

# UNIVERSITA' DI PISA

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



CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE  
PER L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO

Tesi di Laurea Specialistica

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

**Candidato:** Alice Righi .....

**Relatore:** Prof. Lorenzo Cappiotti .....

Anno Accademico 2007/2008

*Ai miei genitori*

# Indice

<b>Sommario</b>	<b>1</b>
<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>1. Il Modello Fisico</b>	<b>5</b>
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
1.5 Linee guida per la conduzione di esperimenti su strutture a scogliera.....	20
<b>2. Concetti di idrodinamica costiera: interazione delle onde con le strutture costiere</b>	<b>22</b>
2.1 Trasmissione, riflessione e frangimento .....	22
2.2 Water set-up indotto dalle scogliere.....	26
2.3 Overtopping.....	35
<b>3. Descrizione e messa a punto dell'apparato sperimentale</b>	<b>41</b>
3.1 Caratteristiche strutturali del Canale del Laboratorio Costiero di Firenze .....	41
3.1.1 Generatore di moto ondoso.....	42
3.1.2 Pompa di retropala .....	43
3.1.3 Pompa per il riempimento del canale.....	43
3.1.4 Sistema di ricircolo .....	43
3.2 Strumenti di acquisizione dei dati.....	44
3.2.1 Sonde resistive .....	45
3.2.2 Punta idrometrica .....	50

3.2.3	Misuratore di portata magnetico.....	51
<b>4.</b>	<b>Caratteristiche generali del litorale pisano</b>	<b>53</b>
4.1	Clima meteomarinico dell'area in esame.....	53
4.1.1	Regime anemologico .....	53
4.1.2	Clima del moto ondoso.....	54
4.1.3	Regime idrodinamico.....	57
4.2	Il litorale di Marina di Pisa.....	59
4.2.1	Evoluzione del litorale e successione delle opere di difesa.....	61
4.3	Descrizione tecnica delle strutture in esame .....	63
4.3.1	Caratterizzazione geometrica .....	64
4.3.2	Caratterizzazione granulometrica .....	66
<b>5.</b>	<b>Applicazione al caso di Marina di Pisa: studio su modello fisico del tratto di costa protetto dalla scogliera n°5</b>	<b>70</b>
5.1	Criteri adottati per la realizzazione del modello .....	70
5.1.1	Scelta della sezione di studio .....	70
5.1.2	Scelta del fattore di scala .....	71
5.1.3	Ricostruzione del profilo batimetrico in canale.....	72
5.2	Ricostruzione delle strutture.....	74
5.2.1	Scogliera emersa n°5.....	75
5.2.2	Scogliera radente .....	78
5.3	Ricerca e settaggio degli attacchi ondosi.....	81
5.4	Verifica dei parametri utilizzati per la costruzione del modello fisico in canale . .....	85
5.5	Prove preliminari.....	88
5.5.1	Posizionamento delle sonde resistive.....	89
5.5.2	Misure di overtopping.....	90
5.5.3	Analisi dei dati delle prove preliminari.....	92
5.6	Prove definitive .....	97
5.6.1	Posizionamento delle sonde resistive.....	98
5.6.2	Configurazioni studiate .....	100
<b>6.</b>	<b>Analisi e interpretazione dei risultati</b>	<b>109</b>
6.1	Analisi di I livello.....	109
6.1.1	Coefficienti di calibrazione .....	109
6.1.2	Deviazione standard e Livello di “zero” .....	111
6.2	Analisi preliminare della sessione sperimentale .....	130

6.2.1	Prove relative alla configurazione C0.....	130
6.2.2	Prove relative alla configurazione C1.....	133
6.2.3	Prove relative alla configurazione C2.....	136
6.2.4	Prove relative alla configurazione C3.....	138
6.2.5	Prove relative alla configurazione C4.....	141
6.2.6	Prove relative alla configurazione C5.....	145
6.2.7	Prove relative alla configurazione C6.....	148
6.2.8	Prove relative alla configurazione C7.....	153
6.2.9	Prove relative alla configurazione C8.....	157
6.2.10	Prove relative alla configurazione C9.....	160
6.3	Analisi di II livello.....	163
6.3.1	Water set-up .....	164
6.3.2	Trasmissione .....	180
6.3.3	Overtopping .....	195
<b>7.</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>211</b>
	<b>Allegati</b>	<b>217</b>
	Allegato I: Indagine Granulometrica delle strutture in esame.....	218
	Allegato II: Peso dei geotubi utilizzati nelle sessioni sperimentali e rilievi delle strutture in geotubi ottenuti tramite il profilometro a barre.....	224
	Allegato IV: Check List.....	236
	Allegato V: Listato Matlab – Prove con geotubi.....	238
	<b>Bibliografia</b>	<b>241</b>

# 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.

L'obiettivo del lavoro è quello di studiare su modello fisico varie alternative progettuali per un nuovo sistema di protezione di Marina di Pisa. In questa tesi vengono presentati i risultati relativi a 6 nuove tipologie rispetto a quelle discusse nelle tesi di laurea di Guido Vanni e Ilaria Crema.

È stato realizzato un modello bidimensionale, nel Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile di Firenze, che riproduce lo stato attuale del tratto di costa protetto in esame.

Il lavoro è consistito nella costruzione dei modelli sperimentali, nella conduzione delle prove e nell'analisi dei risultati. Ciascuna delle dieci alternative progettuali è stata sottoposta a sei attacchi ondosi riprodotti per tre diversi livelli medi del mare; in totale sono state condotte 180 prove sperimentali.

Le misure sperimentali hanno preso in esame i tre seguenti fenomeni: trasmissione di moto ondoso, sovralti idrici all'interno delle celle, tracimazioni sulla strada litoranea. La valutazione dell'efficienza delle varie alternative di difesa è stata condotta confrontando le misure sperimentali dei fenomeni citati condotte sul modello dello stato attuale e della generica alternativa.

In questo elaborato di tesi viene presentata la descrizione dell'attività sperimentale, l'analisi e l'interpretazione dei dati acquisiti per tutte le configurazioni.

## 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 dieci configurazioni, due delle quali rappresentano il modello dello stato attuale della scogliera emersa n°5 e sono state denominate C0 e C1.

La configurazione C0 è stata eseguita non simulando la corrente presente nei varchi, mentre per la configurazione C1 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 ipotesi progettuali concordate e sono state denominate C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C9. La struttura alternativa a quella attuale riprodotta nella configurazione C2 presenta una larghezza di cresta pari a 20 m (50 cm nel modello) e freeboard pari a -1 m s.l.m (-2.5 cm nel modello), a differenza di quella realizzata per la configurazione C3 che, sebbene mantenga lo stesso valore di freeboard, ha una larghezza di cresta di 32 m (80 cm nel modello). Nelle configurazioni C4, C5, C6, C7 e C8 è stata mantenuta la struttura sommersa della C3 con l'aggiunta di un'ulteriore barriera in geocontenitori. In particolare, per le configurazioni C4, C5, C6 è stata utilizzata una barriera formata da tre geocontenitori affiancati, con asse longitudinale parallelo alla costa e con freeboard pari a -3 m s.l.m (- 7.5 cm nel modello), disposti rispettivamente a 60 m, 75 m e 35 m dal piede della barriera in massi sommersa (1.5 m, 1.8 m e 0.8 m nel modello). Nella configurazione C7, invece, la barriera in geotubi, posta ad una distanza di 60 m (1.5 m nel modello) dal piede esterno della barriera, è stata costruita su due livelli posizionando un primo geocontenitore con asse longitudinale parallelo alla costa e altri cinque geocontenitori sovrapposti a questo ma con asse longitudinale ortogonale alla costa. La barriera risultante ha un freeboard di -1 m s.l.m (-2.5 cm nel modello). Nella configurazione C8 la barriera in geocontenitori, con

freeboard di -1m s.l.m (-2.5 cm nel modello) e posta alla stessa distanza della C7, è stata costruita sovrapponendo a tre geocontenitori affiancati con asse longitudinale parallelo alla costa, altri due geocontenitori affiancati nella stessa posizione dei sottostanti. Tutte le barriere in geocontenitori ricostruite hanno una larghezza di circa 20 m (0.5 m nel modello). Nella configurazione C9, invece, al posto dei geocontenitori, visti nelle precedenti configurazioni, è stata ricostruita una seconda barriera sommersa (con geometria simile alla configurazione C4) parallela alla prima, distante da essa 60m (1.5 m nel modello), con una larghezza di cresta di 4.8 m (12 cm nel modello) e con freeboard pari a -7 cm (-2.8 m). Ciascuna configurazione è stata sottoposta a sei attacchi ondososi, 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 dieci 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).

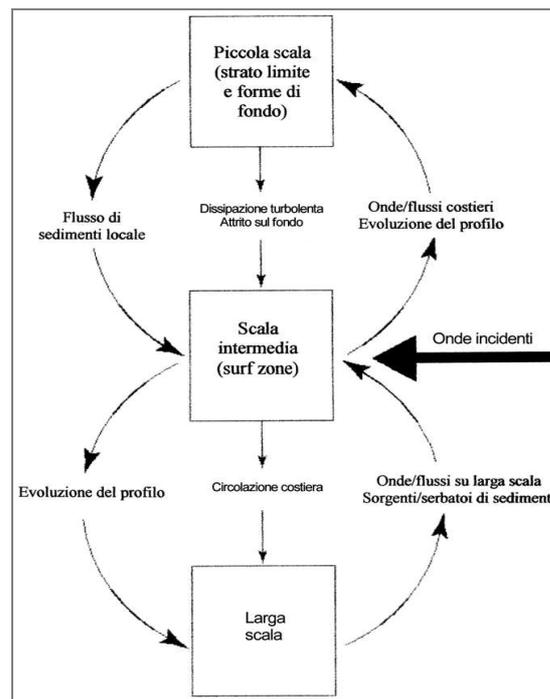


Figura 1.1- Rappresentazione schematica dei processi a scala piccola, larga e intermedia.

### 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:

- ⇒ *Geometricamente simile*, se si verifica la validità di  $\lambda_L$ ; 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  $\lambda_L$  e  $\lambda_T$ ; 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  $\lambda_M$ ; 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) Innanzitutto 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:  $\lambda_{\rho} = \lambda_{\mu} = \lambda_v = 1$
- 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;
- $F_\mu$ : sono le forze viscosive;
- $F_\sigma$ : 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:

- $\rho$ : è la densità del liquido;
- $L$ : è una lunghezza caratteristica;

- $V$ : è la velocità;
- $g$ : è l'accelerazione gravitazionale;
- $\mu$ : è la viscosità dinamica.

A seconda di quali forze risultano prevalenti tra le forze gravitazionali e quelle viscosi, 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 di 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.

## 1.5 Linee guida per la conduzione di esperimenti su strutture a scogliera

In base alle linee guida riportate nel manuale *HydralabIII ( Guidelines for physical model testing of breakwaters: rubble mound breakwaters)* è opportuno verificare che alcuni dei parametri utilizzati per la costruzione di un modello fisico soddisfino alcune relazioni ben precise, affinché, visti i limiti e le approssimazioni che occorre fare nella costruzione del modello stesso, possano essere correttamente riprodotti fenomeni fisici come la dispersione, la riflessione, la diffrazione, lo shoaling ed il frangimento del moto ondoso. Una corretta riproduzione della batimetria e dei fondali, ad esempio, permette che l'onda possa essere riprodotta nel modo più realistico possibile. Proprio per questo, particolare attenzione deve essere data alla riproduzione del fondale tra il battionda, dove vengono generate le onde, e la struttura sulla quale andrà a interagire il moto ondoso riprodotto. In figura 1.2 è rappresentata la struttura della batimetria proposta dal manuale *HydralabIII* mentre in tabella 1.1 sono schematizzati i parametri da verificare affinché il modello fisico costruito in canale possa funzionare correttamente.

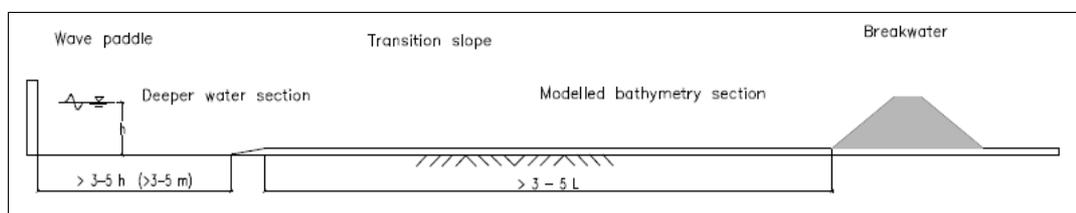


Figura 1.2 – Struttura della batimetria in un modello fisico proposta dal manuale *HydralabIII*.

Tabella 1.1: Insieme dei parametri da verificare proposti dal manuale *HydralabIII*

1	Sezione dove l'acqua è profonda (battionda)	$> 3-5 h$
2	Sezione con batimetria modellata	$> 3-5 L$
3	Inclinazione della rampa (batimetria modellata) ( $\tan\alpha$ )	$< 1:250-1:1000$
4	Profondità relativa dell'acqua nella zona di foreshore ( $h/L_0$ )	$> 0.045$
5	Altezza relativa dell'onda nella zona di foreshore	$< 0.3$

In base alle linee guida fornite dal manuale *HydralabIII* la lunghezza della sezione ( $L_s$ ) tra il battionda e la prima rampa di transizione, inserita per segnare il passaggio tra le acque profonde e intermedie, deve essere  $> 3-5$  volte  $h$ , dove  $h$  è la profondità del fondale [m]. Questo accorgimento garantisce il frangimento delle onde evanescenti prossime al battionda e inoltre, tale distanza, assicura lo spazio necessario al posizionamento degli strumenti di misura.

Per quanto riguarda la sezione di batimetria modellata, tra la seconda rampa di transizione e la scogliera, il manuale *HydralabIII* raccomanda una distanza maggiore di 3-5 volte la lunghezza d'onda locale così da permettere un'accurata riproduzione dei fenomeni di shoaling e breaking.

Infine, in base al manuale *HydralabIII*, in alcuni casi la batimetria del fondale può cautelativamente non essere modellata, tra questi si ha il caso di onde piccole in profondità d'acqua elevate (acque profonde di fronte al battionde). Il modellamento della batimetria può essere trascurabile se tutte le seguenti condizioni, che corrispondono al parametro di Ursell, sono soddisfatte.

- $\tan\alpha < 1:250-1:1000$
- $h/L_0 > 0.045$
- $H_s/h < 0.3$

Dove:

$\tan\alpha$  = inclinazione della rampa nella zona foreshore;

$h/L_0$  = profondità relativa dell'acqua nella zona foreshore,  $L_0$  è la lunghezza dell'onda in acque profonde;

$H_s/h$  = l'altezza dell'onda relativa nella zona di foreshore;

## 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).

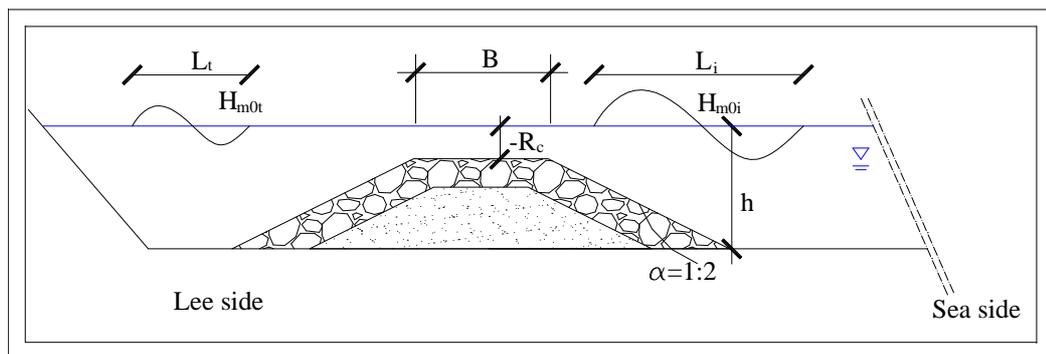


Figura 2.1- Parametri progettuali e terminologia adottata.

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:

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

dove  $\zeta_{0p} = \tan\alpha / (S_{0p})^{0.5}$  è il parametro di Iribarren, e  $c$  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, propongo 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 scegliere 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:

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

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

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  $K_t$  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:

- $\eta_1$  variazione del livello d'acqua a tergo della struttura;
- $\eta_2$  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.

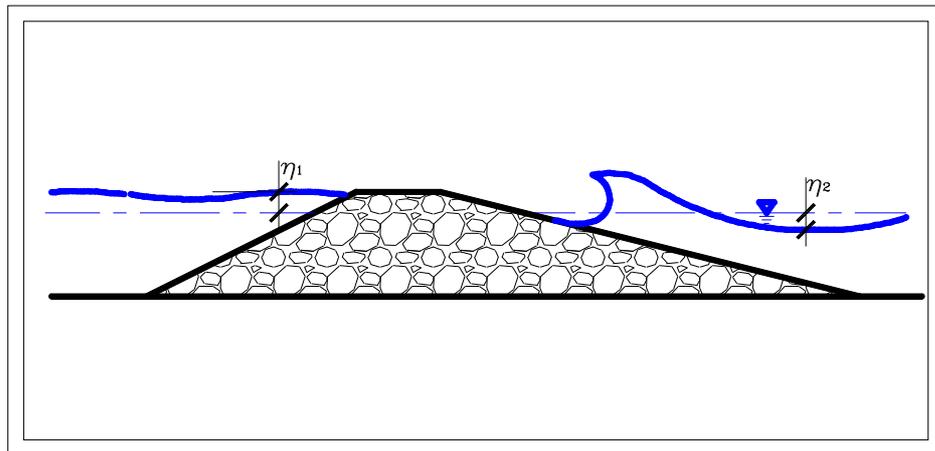


Figura 2.2 -Schematizzazione della variazione del livello idrico nella zona compresa tra una scogliera e la linea di riva.

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:

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

con:

- $H_T$ , altezza d'onda trasmessa;
- $H_r^2$ , 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:  $-2 < \frac{R}{H_i} < 1.5$

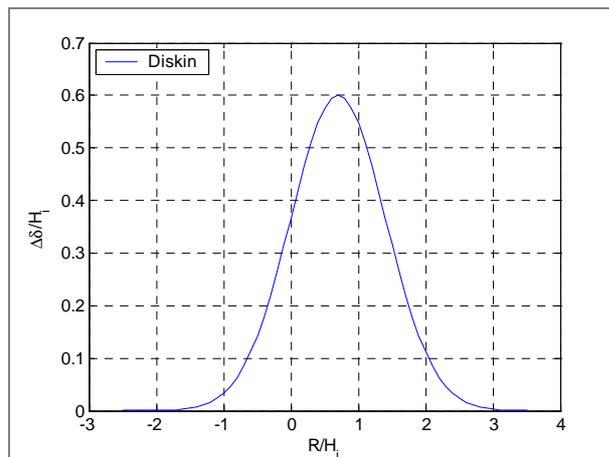


Figura 2.3 - Andamento del Piling-up in funzione della sommergenza relativa secondo la soluzione analitica di Diskin.

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  $0.7H_i$ .

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.

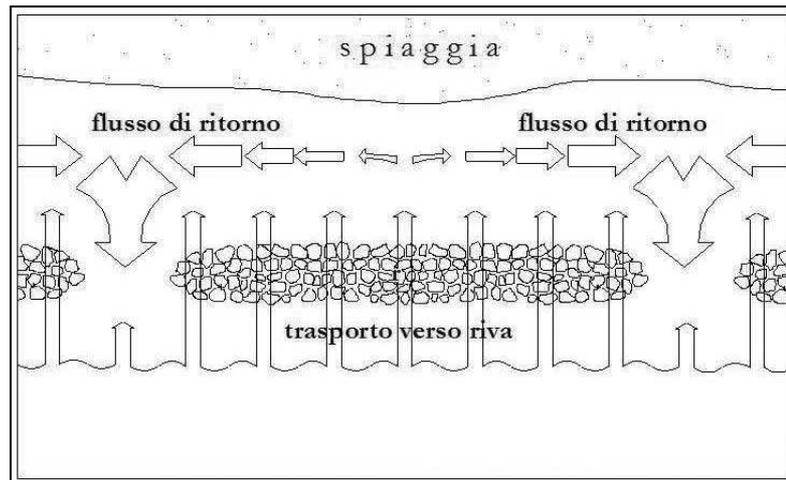


Figura 2.4 - Schema dell'interazione onde-struttura in corrispondenza di una scogliera trascinabile.

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,  $R_c$ , 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;
- $R$ , sommersenza 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 sommersenza 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 sommersenza 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.

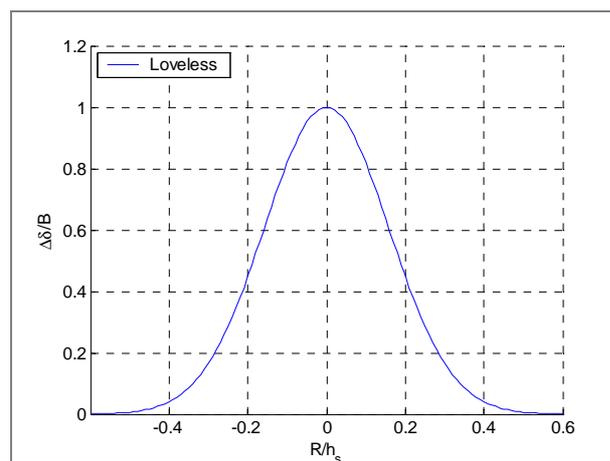


Figura 2.5 - Andamento del Piling-up in funzione della sommersenza relativa secondo la soluzione analitica di Loveless.

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.

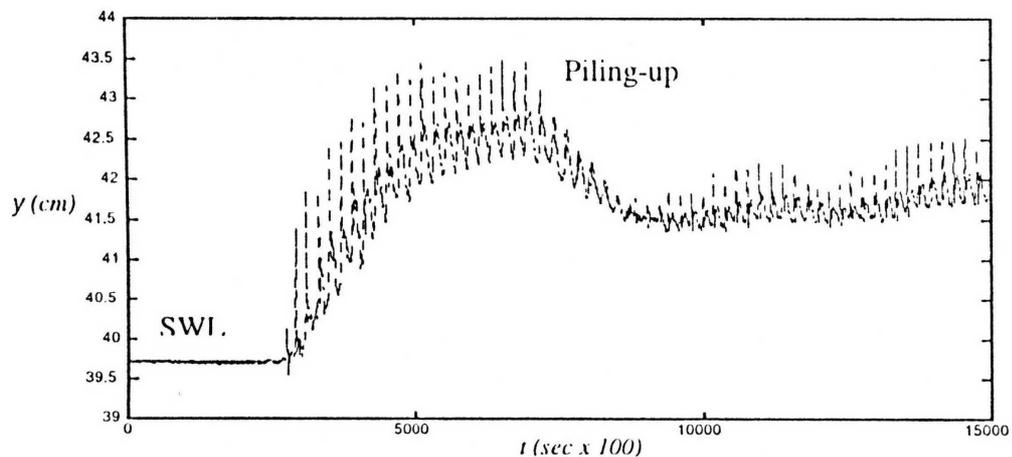


Figura 2.6 - Evoluzione del Piling-up nel tempo (Tirindelli et al. 2001).

### 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.

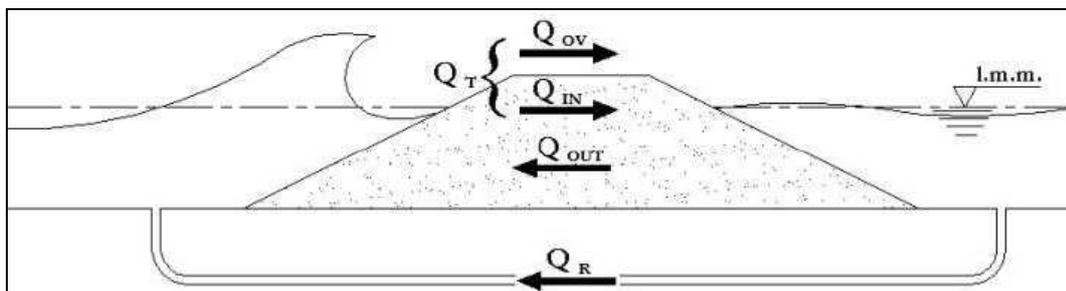


Figura 2.7 - Sezione di una scogliera frangiflutti e flussi presenti attorno ad essa ( $Q_R$  rappresenta il flusso che viene a crearsi attraverso i varchi (Ruol 2003).

$Q_R$  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  $N_{ovt}$  e il numero di onde riconoscibili  $N_w$ .

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

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 traccimate 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  $\sigma$ ;
- Direzione dell'attacco ondoso rispetto all'asse della struttura  $\beta$ ;
- Profondità dell'acqua di fronte alla struttura;
- Geometria della struttura.

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

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

dove  $A$  e  $B$  sono coefficienti sperimentali che rendono conto della rugosità e pendenza della struttura e  $\gamma_r$  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:

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

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

dove  $H_i$  è l'altezza d'onda significativa al piede della diga,  $\tan \alpha$  indica la pendenza della struttura,  $\xi_0$  è l'indice di frangimento al piede della diga e  $\gamma$  sono i fattori di riduzione della risalita dell'onda:  $\gamma_f$  per la larghezza della berma,  $\gamma_b$  per la rugosità della struttura,  $\gamma_v$  per l'obliquità dell'attacco ondosio,  $\gamma_b$  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:

$$F^* = \frac{R_{u2\%} - R}{H_i}$$

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'evoluzione 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 a punto 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 ed una pompa assiale consentono le operazioni di riempimento e svuotamento senza alcun spreco di acqua.

### **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 3.4): una

pompa centrifuga collegata alla tubazione posta sotto al canale e quattro valvole di apertura/chiusura consentono di governare il sistema.

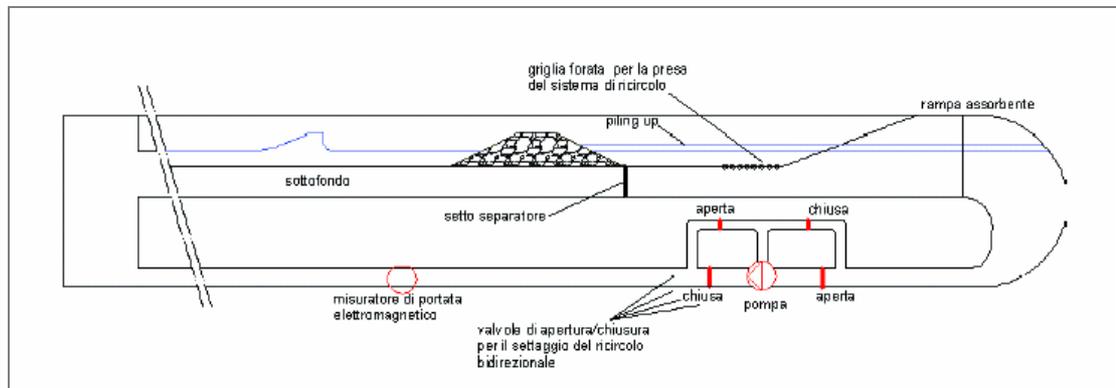


Figura 3.1 - Rappresentazione schematica del sistema di ricircolo.



Foto 3.4 - 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.

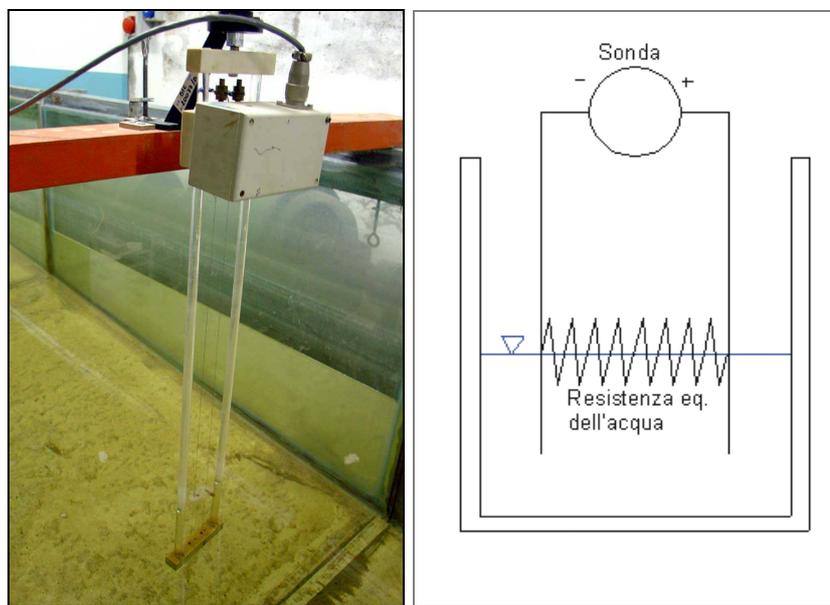


Foto 3.5 - Sonda resistiva e schema elettrico equivalente.

Quando la sonda resistiva è immersa in acqua, il circuito è chiuso (foto 3.5), 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  $\rho$  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  $\eta$  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.

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).

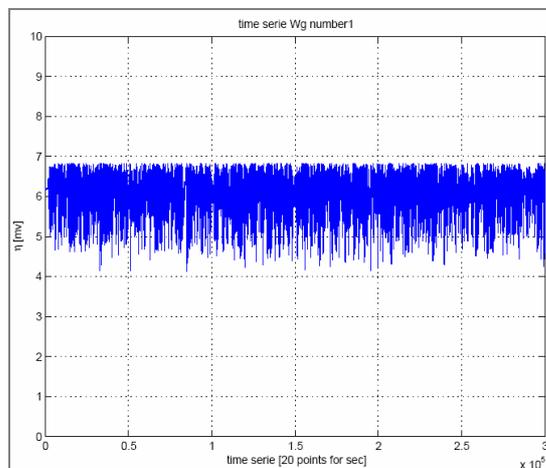


Figura 3.2 - Esempio di segnale “tagliato”.

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).

<b>cm = A * Volt + B</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

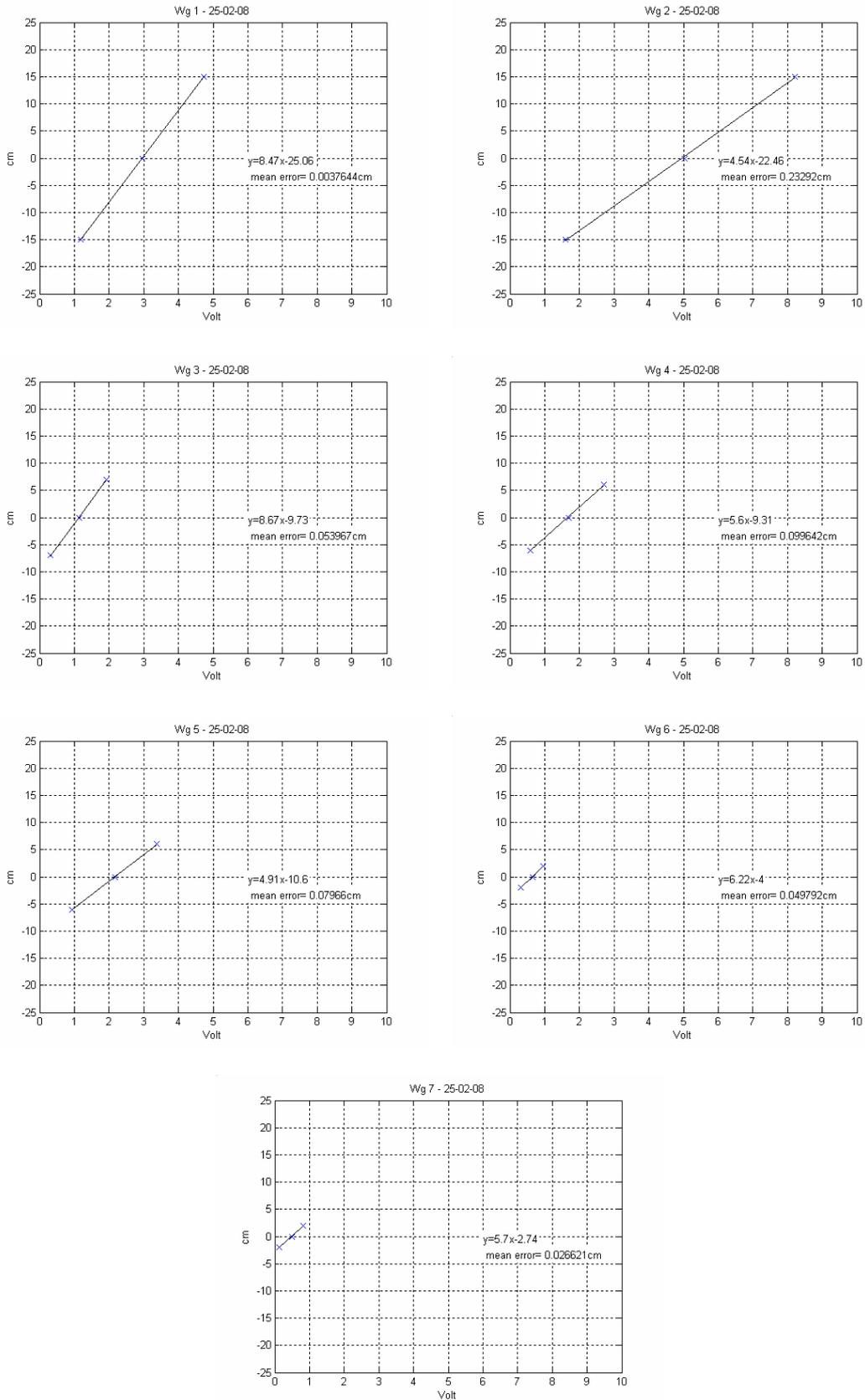


Figura 3.3 - Grafici di calibrazione giornaliera di una giornata tipo (25-02-08).

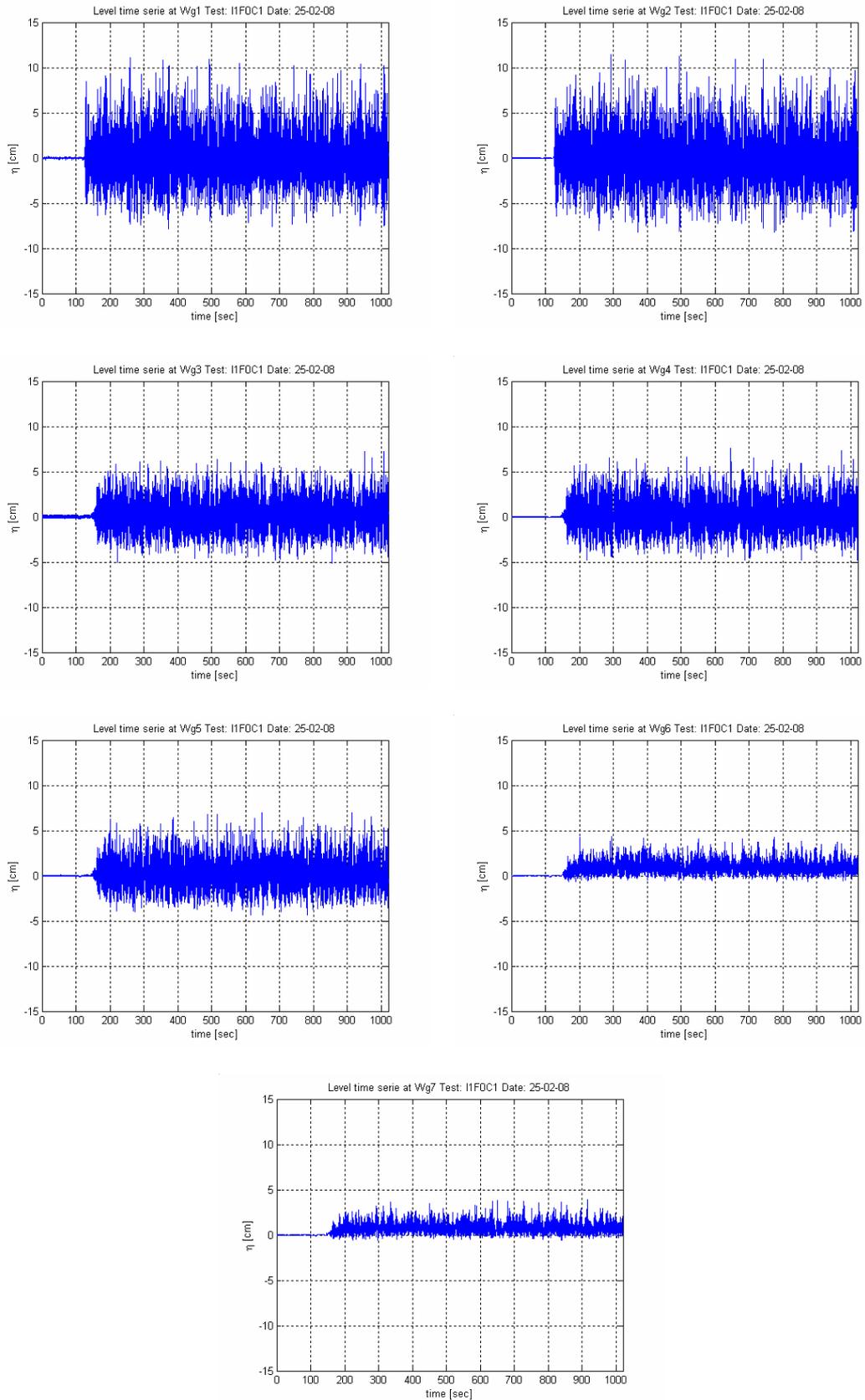


Figura 3.4 - Grafici di calibrazione giornaliera di una giornata tipo (25-02-08).

### **3.2.2 Punta idrometrica**

I livelli d'acqua in fase di riempimento-svuotamento del canale sono determinati utilizzando la punta idrometrica (foto 3.6), 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.

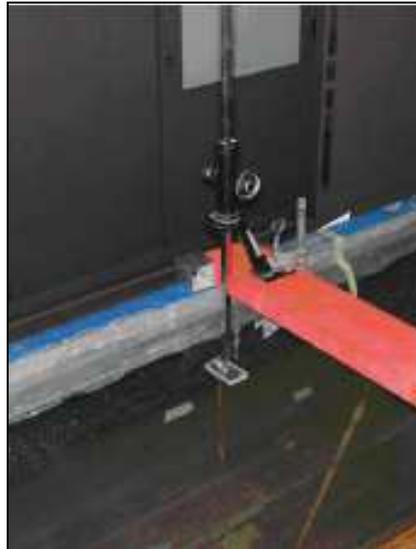


Foto 3.6 - Punta idrometrica.

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).

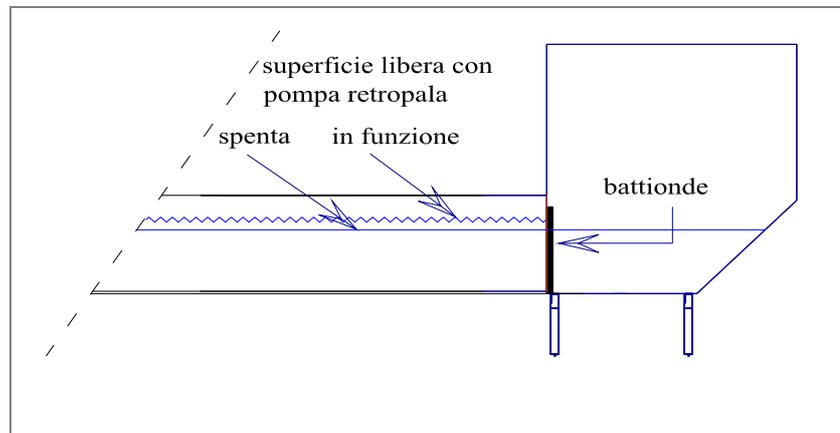


Figura 3.5 - Effetti della pompa retro-pala.

Per stimare l'entità di questa onda parassita e del sovrizzo 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);
- $v$  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 3.7) con la precisione di 0.01 litri/s.



Foto 3.7 - 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 più ampia, è necessario prima di tutto 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).

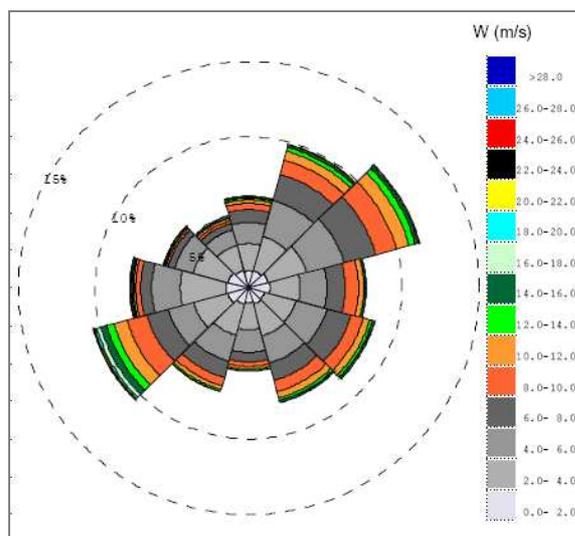


Figura 4.1 - Rosa dei venti ottenuta dalla validazione dei dati registrati della stazione meteorologica di Gorgona (D.E.A.M. srl. Marzo 2006).

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 Beaufort<sup>1</sup>), 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.

---

<sup>1</sup> *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.

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

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.

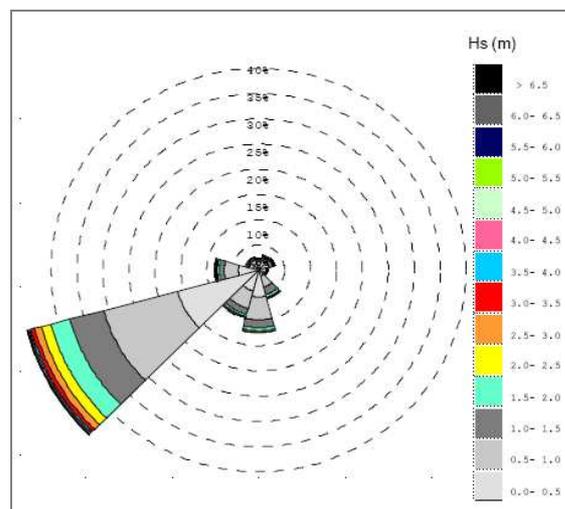


Figura 4.2 - Rosa delle onde ottenuta dalla validazione dei dati registrati dell'ondametro di La Spezia (D.E.A.M. srl. Marzo 2006).

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 Douglas<sup>2</sup> 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 rifrazione<sup>3</sup>, shoaling<sup>4</sup> e di attrito<sup>5</sup>.

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.

---

<sup>2</sup> *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) .

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

<sup>4</sup> *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.

<sup>5</sup> *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 barotropiche<sup>6</sup>, 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.

---

<sup>6</sup> 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.

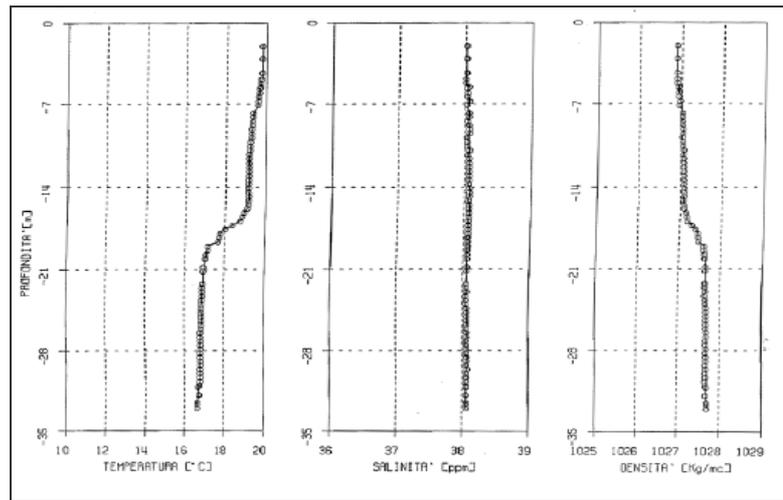


Figura 4.3 - Profilo verticale di temperatura, salinità e densità dell'acqua.

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 Fisiografica<sup>7</sup> 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.

<sup>7</sup> *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.

<b>Periodo di ritorno Tr [anni]</b>	<b>Altezza significativa massima annuale Hs [m]</b>
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).

Il tratto di costa in esame è stato rilevato nel 1997 con sezioni ortogonali alla riva distanziate di 50 m fino a raggiungere la batimetrica 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).

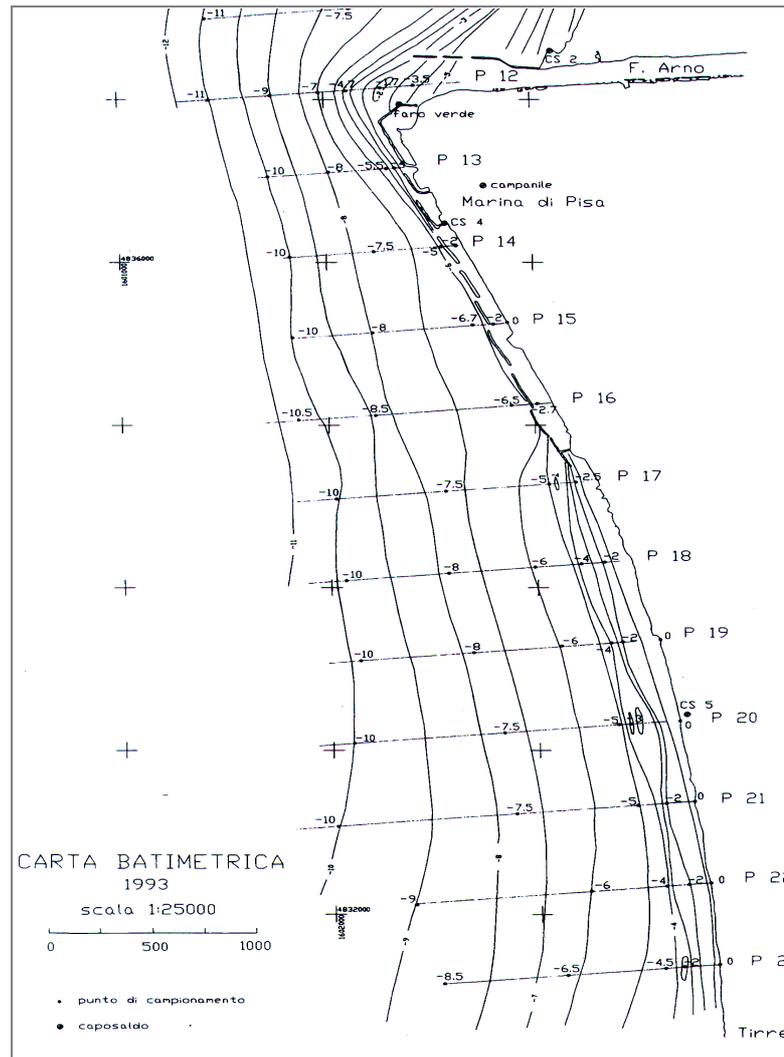


Figura 4.6 - Carta batimetrica dell'area antistante Marina di Pisa, rappresentante anche le dighe foranee.

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.<sup>8</sup>, per opere recentemente sistemate, a circa 1.5 m per le scogliere dove da molti anni non si eseguono lavori di manutenzione.

<sup>8</sup> 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 sul 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).

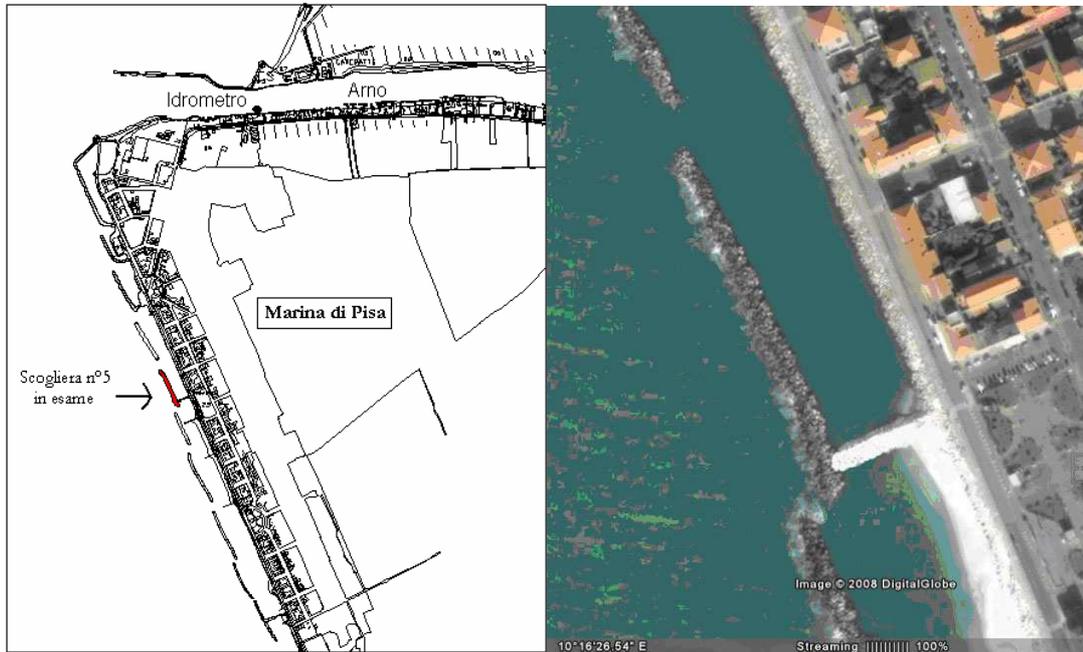


Figura 4.7 - A sinistra è rappresentato il sistema di scogliere radenti e parallele che difende il litorale di Marina di Pisa, a destra foto aerea della scogliera n°5.

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.

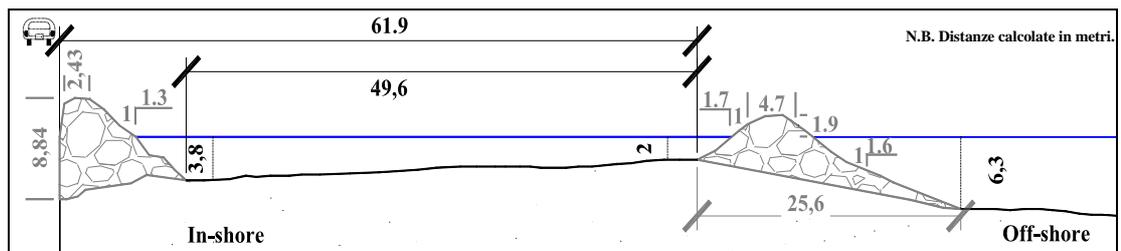


Figura 4.8 - Ricostruzione in sezione del sistema di studio (scogliera distaccata e radente).

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<sub>c</sub>: Freeboard;
- M: Pendenza del parametro lato mare;
- M': Pendenza del parametro lato terra.

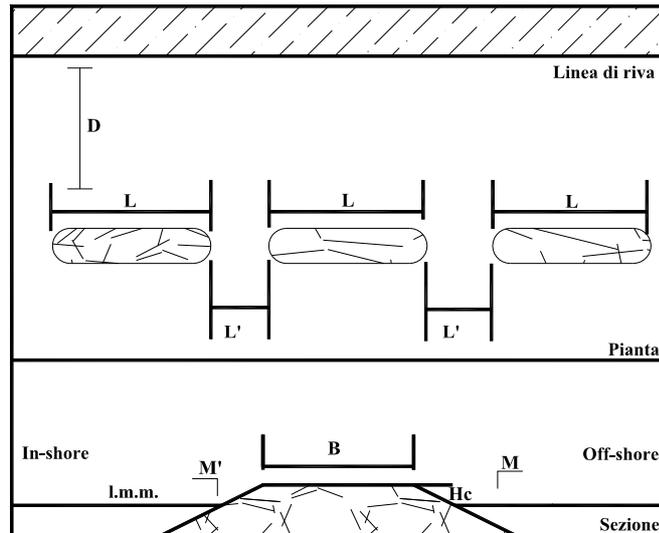


Figura 4.9 - Principali parametri per il dimensionamento delle scogliere frangiflutti.

#### 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 (Allegato I).

E' 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

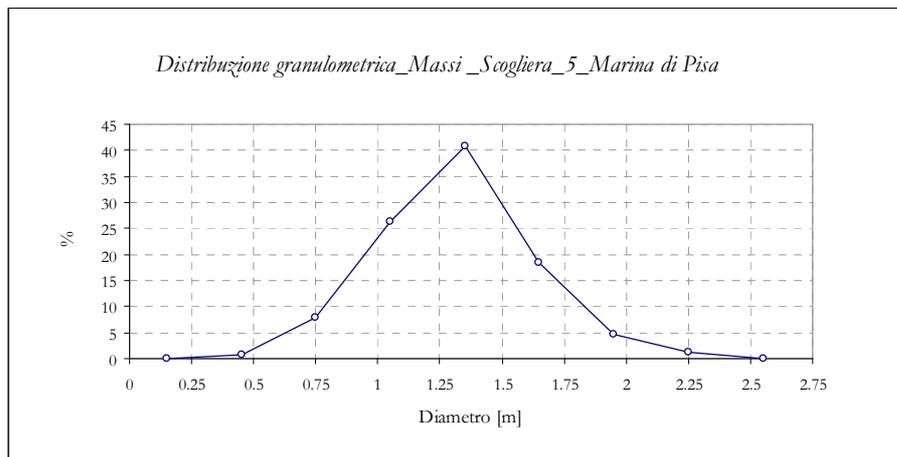


Figura 4.10 - Frequenza relativa dei massi della scogliera emersa n°5.

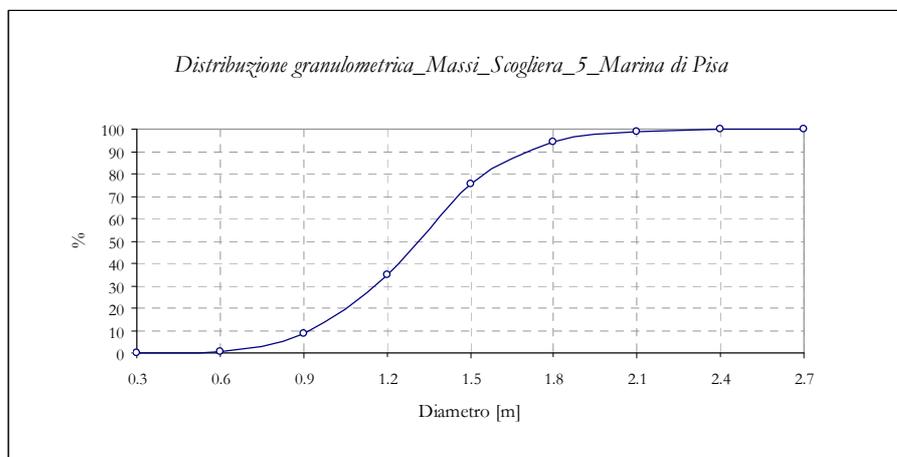


Figura 4.11 - Frequenza cumulata dei massi della scogliera emersa n°5.

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 (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

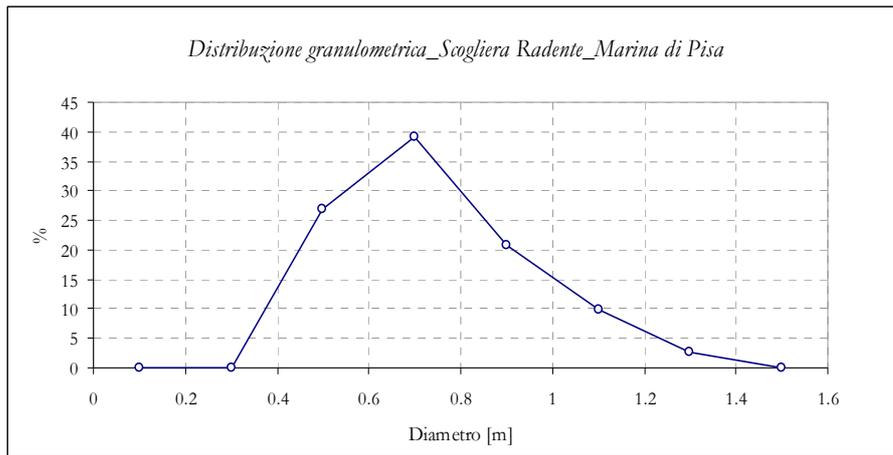


Figura 4.12 - Frequenza relativa dei massi della scogliera radente.

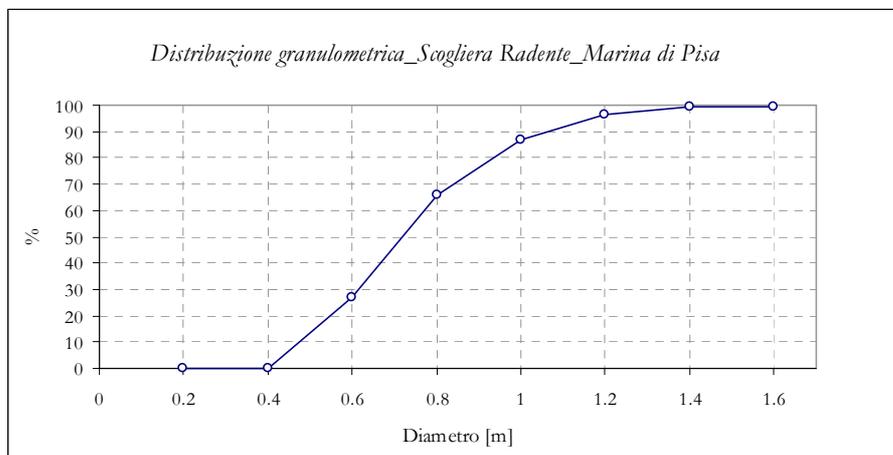


Figura 4.13 - Frequenza cumulata dei massi della scogliera radente.

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).

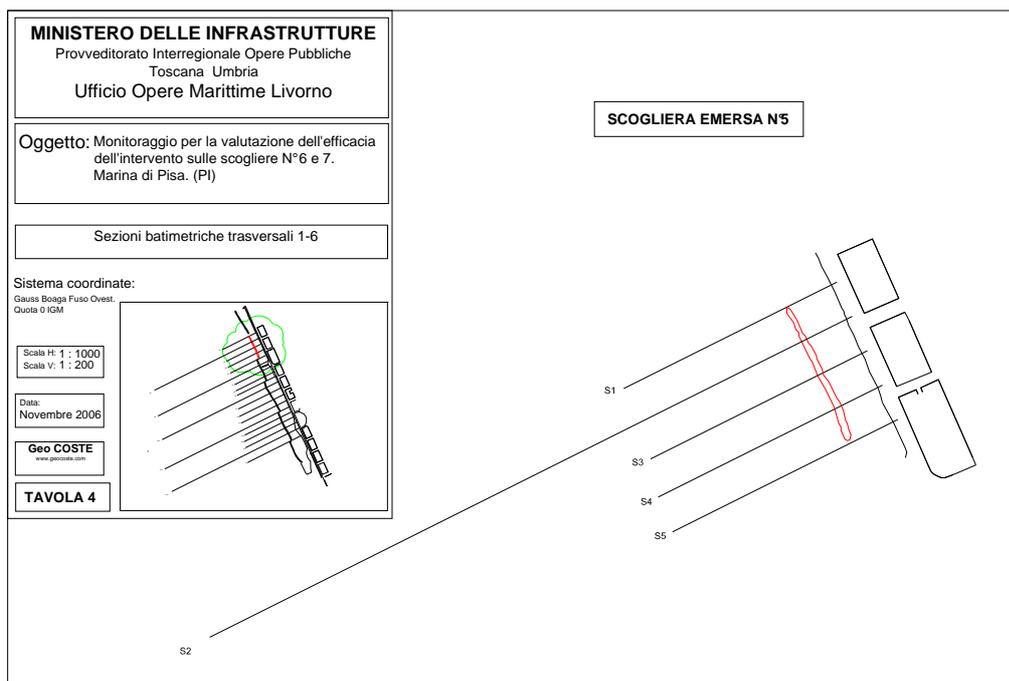


Figura 5.1 - Particolare della scogliera emersa n°5 e relative sezioni trasversali batimetriche.

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).

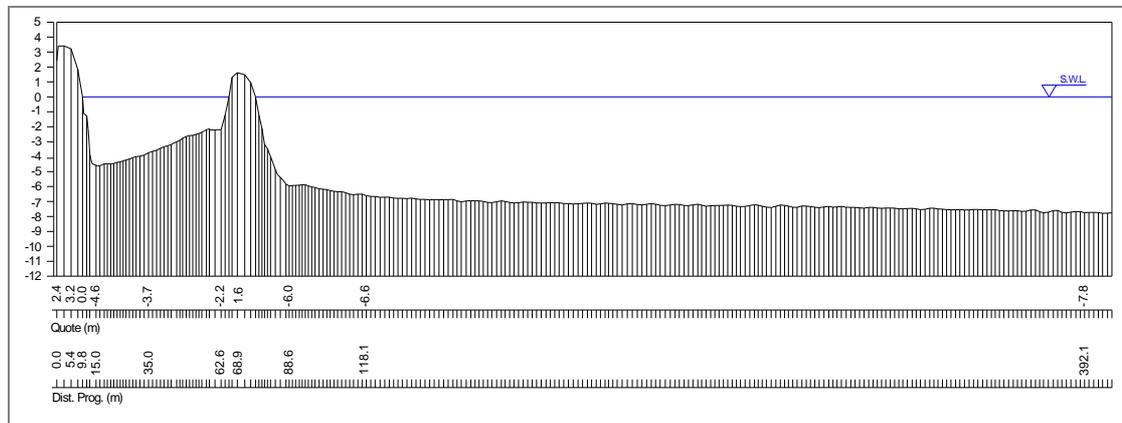


Figura 5.2- Sezione batimetrica n°2.

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 battionde 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,  $\gamma$  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 batimetria 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 ondosì, 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 ondosì, 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 ondosì, 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 ondosì.

### 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.

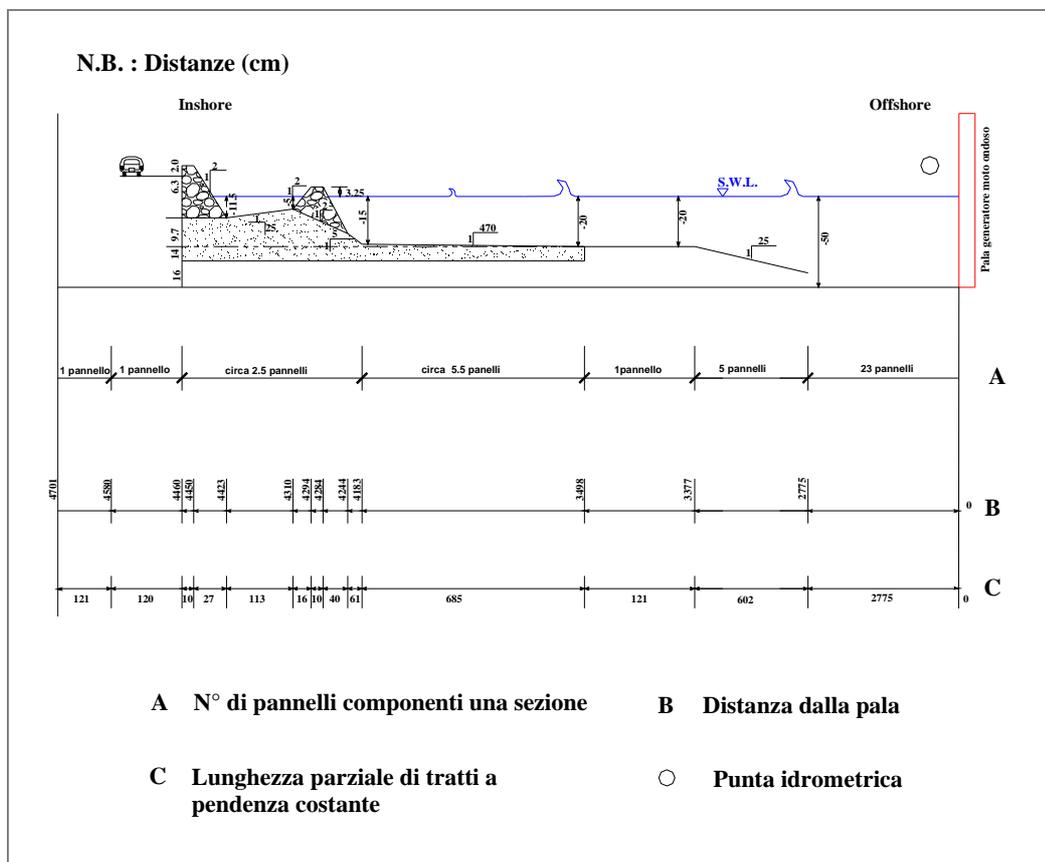


Figura 5.3 - Schematizzazione non in scala del profilo batimetrico ricostruito in canale.

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);

$\nu$  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  $70 \text{ dm}^3$  (il volume della scogliera è approssimativamente  $34 \text{ dm}^3$ ) 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:

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

<sup>9</sup> 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  $v = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/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 dm<sup>3</sup>. 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/cm<sup>3</sup>), 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.

<sup>10</sup> 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 <sup>3</sup> ] (su un totale di 70 dm <sup>3</sup> )	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.

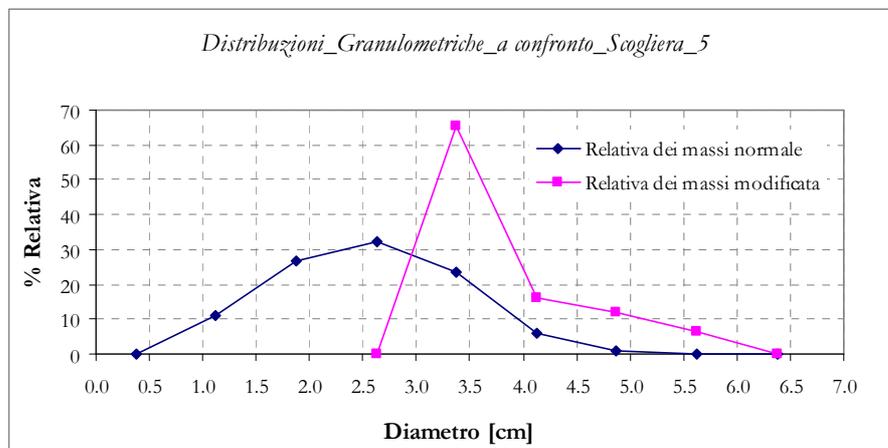


Figura 5.4 - Frequenze relative del numero dei massi costituenti la scogliera emersa, prima e dopo la modifica.

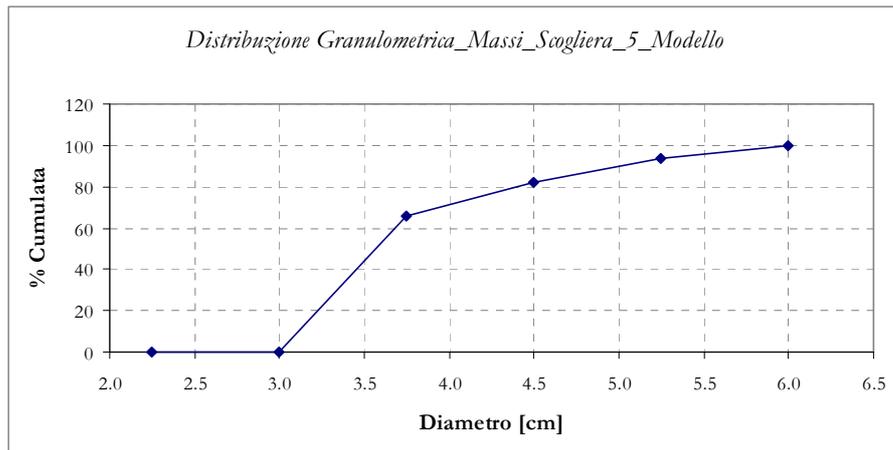


Figura 5.5 - Frequenza cumulata dei massi costituenti il modello della scogliera emersa, dopo la modifica.

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  $50 \text{ dm}^3$  (il volume della scogliera è approssimativamente  $46 \text{ dm}^3$ ) 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:

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

Il valore di Re ottenuto, pari a  $3.31 \cdot 10^6$ , è caratteristico di un moto turbolento. E' importante precisare che nel calcolo del numero di Reynolds è stata utilizzata una  $H_s$  minima ( $\sim 2.28$  m) compatibile con la profondità del fondale ( $\sim 3.7$  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  $v = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s,  $Re = 30000$ , e  $H_{s(m)} = 0.06$  m (altezza d'onda minima, ottenuta riportando in scala 1:40 l'altezza d'onda corrispondente nel prototipo):

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

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 <sup>3</sup> ] (su un totale di 50 dm <sup>3</sup> )	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.

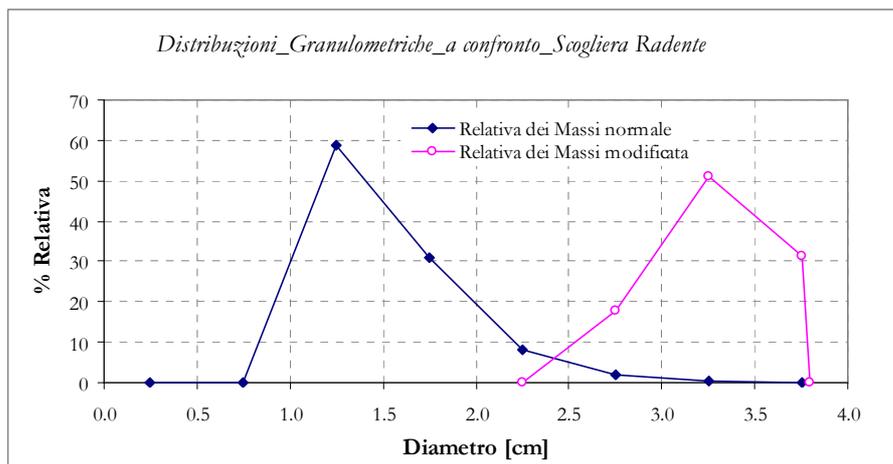


Figura 5.6 - Frequenze relative del numero dei massi costituenti la scogliera radente, prima e dopo la modifica.

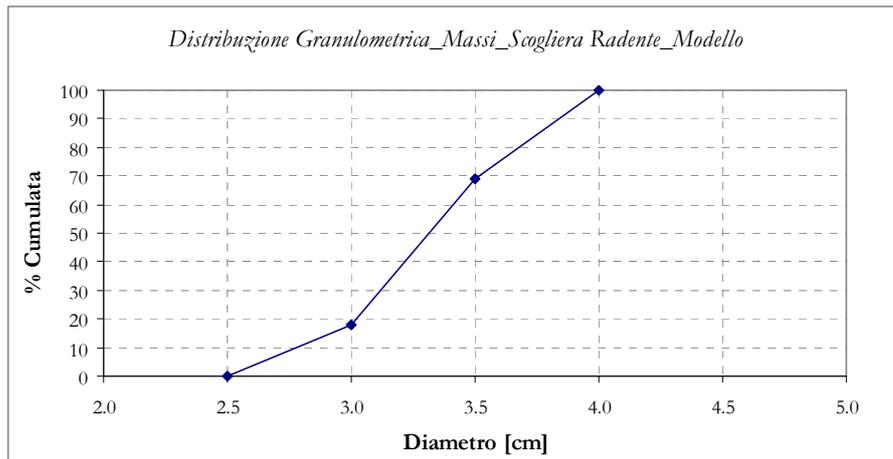


Figura 5.7 - Frequenza cumulata dei massi costituenti il modello della scogliera radente.

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 anche 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 (4.5 cm nel modello).

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

- $H_{S1i} = 1.8 \text{ m}$  (4.5 cm)  $\rightarrow H/d = 0.30$ ;
- $H_{S2i} = 3.0 \text{ m}$  (7.5 cm)  $\rightarrow H/d = 0.50$ ;
- $H_{S2i} = 4.2 \text{ m}$  (10.5 cm)  $\rightarrow H/d = 0.70$ .

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°N-330°N, localizzato a 43°40.8'N e 10°16.8'E, fornisce il grafico delle coppie H, T in fig. 5.8.

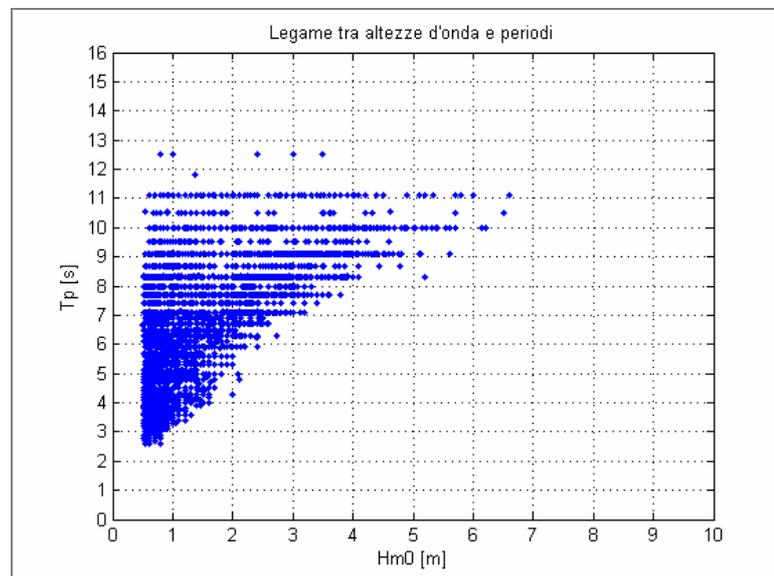


Figura 5.8 - Grafico H-T relativo al settore 170°N-330°N fornito dall'ondametro di La Spezia.

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	<b>I1</b>
		9 (1.4)	5	<b>I2</b>
		11 (1.7)	5	<b>I3</b>
3.0 (7.5)	6.6 (15,0)	9 (1.4)	5	<b>I4</b>
		11 (1.7)	5	<b>I5</b>
4.2 (10.5)	7.2 (18,0)	11 (1.7)	5	<b>I6</b>

Le prove sperimentali sono state eseguite lanciando i sei attacchi ondosi 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 Verifica dei parametri utilizzati per la costruzione del modello fisico in canale

In base alle indicazioni fornite dal manuale *HydralabIII (Guidelines for physical model testing of breakwaters: rubble mound breakwaters)* e riportate nel paragrafo 1.5 (Linee guida per la conduzione di esperimenti su strutture a scogliera) è stato necessario, una volta costruito il modello, verificare che i parametri e le dimensioni scelte verificassero le condizioni riportate dal manuale.

La prima verifica richiesta dal manuale riguarda la lunghezza della sezione ( $L_s$ ) tra il battionda e la prima rampa di transizione. Tale sezione deve, infatti, essere  $> 3-5$  volte  $h$ , dove  $h$  rappresenta la profondità del fondale. Nel modello riprodotto in laboratorio la lunghezza di tale sezione misura 27.75m e la profondità  $h$  è di circa 0.50m. Essendo, quindi, il rapporto  $L_s/h$  pari a  $27.75/0.50 = 55.5$ , il parametro richiesto risulta decisamente verificato.

La seconda verifica richiesta riguarda la sezione della batimetria modellata, tra la seconda rampa di transizione e la scogliera, in particolare tale sezione deve risultare  $>$  di 3-5 volte la lunghezza d'onda locale. Per verificare tale parametro occorre calcolare le lunghezze delle onde scelte nel tratto della sezione d'interesse. Tramite i valori delle altezze d'onda significative scelte per il modello e la "relazione di dispersione" (3) è stato possibile calcolare la lunghezza dell'onda in prossimità della struttura. In realtà tra tutte le onde scelte, è stato sufficiente verificare il caso dell'onda incidente più alta e con periodo maggiore, ovvero la I6 con  $H_{s1} = 10.50\text{cm}$  e  $T=1.7\text{sec}$ .

$$L = (gT^2/2\pi) \tanh(2\pi h/L) \quad (3)$$

Dove:

$L$  = lunghezza dell'onda [m];

$g$  = accelerazione di gravità [ $\text{m/s}^2$ ];

$T$  = periodo dell'onda [s];

$h$  = profondità dell'acqua [m].

Tuttavia tramite la (4) è stato possibile calcolare la lunghezza d'onda al battionda, ovvero come se ci si trovasse al largo nel prototipo.

$$L_o = 1.56 T^2 \quad (4)$$

$$L_o = 4.51\text{m}$$

Da qui si ricava che:

$$L = L_o \tanh(2\pi h/L) \quad (5)$$

A partire da  $L_o = 4.51\text{m}$ , attraverso la (5) e proseguendo per tentativi è stato possibile calcolare la lunghezza dell'onda in prossimità della struttura ( $h = 0.15\text{m}$ ), evidenziata in tabella 5.9.

**Tabella 5.9:** Lunghezza dell'onda per  $h=0.15\text{m}$   
ricavata dalla formula di dispersione

<b>h = 0.15 m</b>	
<b>L [m]</b>	<b><math>L_o \tanh(2\pi h/L)</math> [m]</b>
2.15	1.86
2.15	1.86
2.10	1.90
2.05	1.94
<b>2.00</b>	<b>1.98</b>
1.95	2.02
1.90	2.07
1.85	2.11
1.80	2.16
1.75	2.21

Il valore relativo alla lunghezza dell'onda I6 in prossimità della struttura è di circa 1.98m. Si può fare la stessa cosa per calcolare la lunghezza dell'onda dove  $h=0.20\text{m}$ , ovvero nella sezione compresa tra le due rampe nel modello (acque intermedie), evidenziata in tabella 5.10.

**Tabella 5.10:** Lunghezza dell'onda per  $h=0.20\text{m}$   
ricavata dalla formula di dispersione

<b>h = 0.20 m</b>	
<b>L [m]</b>	<b><math>L_o \tanh(2\pi h/L)</math> [m]</b>
2.66	1.98
2.61	2.02
2.56	2.05
2.51	2.09
2.46	2.12
2.41	2.16
2.36	2.20
2.31	2.24
<b>2.26</b>	<b>2.28</b>
2.21	2.32

Il valore relativo alla lunghezza dell'onda I6 nella sezione compresa tra le due rampe è di circa 2.28m.

La lunghezza della sezione ( $L_s$ ) tra la prima rampa (quella che determina il passaggio dalle acque profonde a quelle di transizione) e la barriera emersa è di circa 8.06m, la lunghezza dell'onda I6 in questo tratto è compresa tra 2.28m e 1.98m, di conseguenza il rapporto  $L_s/L = 3.78$  rispetta l'indicazione proposta dal manuale *HydralabIII*. E' importante precisare che per il valore di  $L$  è stato utilizzato il valore medio tra 2.28m e 1.98m.

Infine in base alle indicazioni del manuale *HydralabIII*, occorre verificare anche la validità del parametro di Ursell, definito dai seguenti parametri:

- $\tan\alpha < 1:250-1:1000$
- $h/L_0 > 0.045$
- $H_s/h < 0.3$

Dove:

$\tan\alpha$  = inclinazione della rampa nella zona foreshore;

$h/L_0$  = profondità relativa dell'acqua nella zona foreshore,  $L_0$  è la lunghezza dell'onda in acque profonde;

$H_s/h$  = l'altezza dell'onda relativa nella zona di foreshore;

Per quanto riguarda la verifica del parametro  $\tan\alpha < 1:250-1:1000$ , essendo la pendenza della rampa nel modello 1:470 (batimetria modellata), si può dire che tale parametro risulta rispettato.

La verifica dell'altro parametro del numero di Ursell richiede che  $h/L_0 > 0.045$ . Essendo la lunghezza dell'onda al battionda pari a 4.51m e la profondità  $h = 0.20$ m, si ottiene  $h/L_0 = 0.044$ . Il parametro risulta leggermente inferiore al valore richiesto ma essendo tale differenza minima, la verifica risulta corretta.

La correttezza dell'ultimo parametro del numero di Ursell,  $H_s/h$ , invece, non può essere valutato a priori, ma solo in seguito all'esecuzione delle prove sperimentali che rilasceranno, per ogni livello di prova in canale, l'esatto valore dell'altezza d'onda nella zona foreshore di fronte alla struttura.

## **5.5 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 miglierie 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 ondosi 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 preliminare 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.

**5.5.1 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. 5.10).

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 5.12 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 5.12:** Posizione delle sonde in canale, durante le prove preliminari.

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

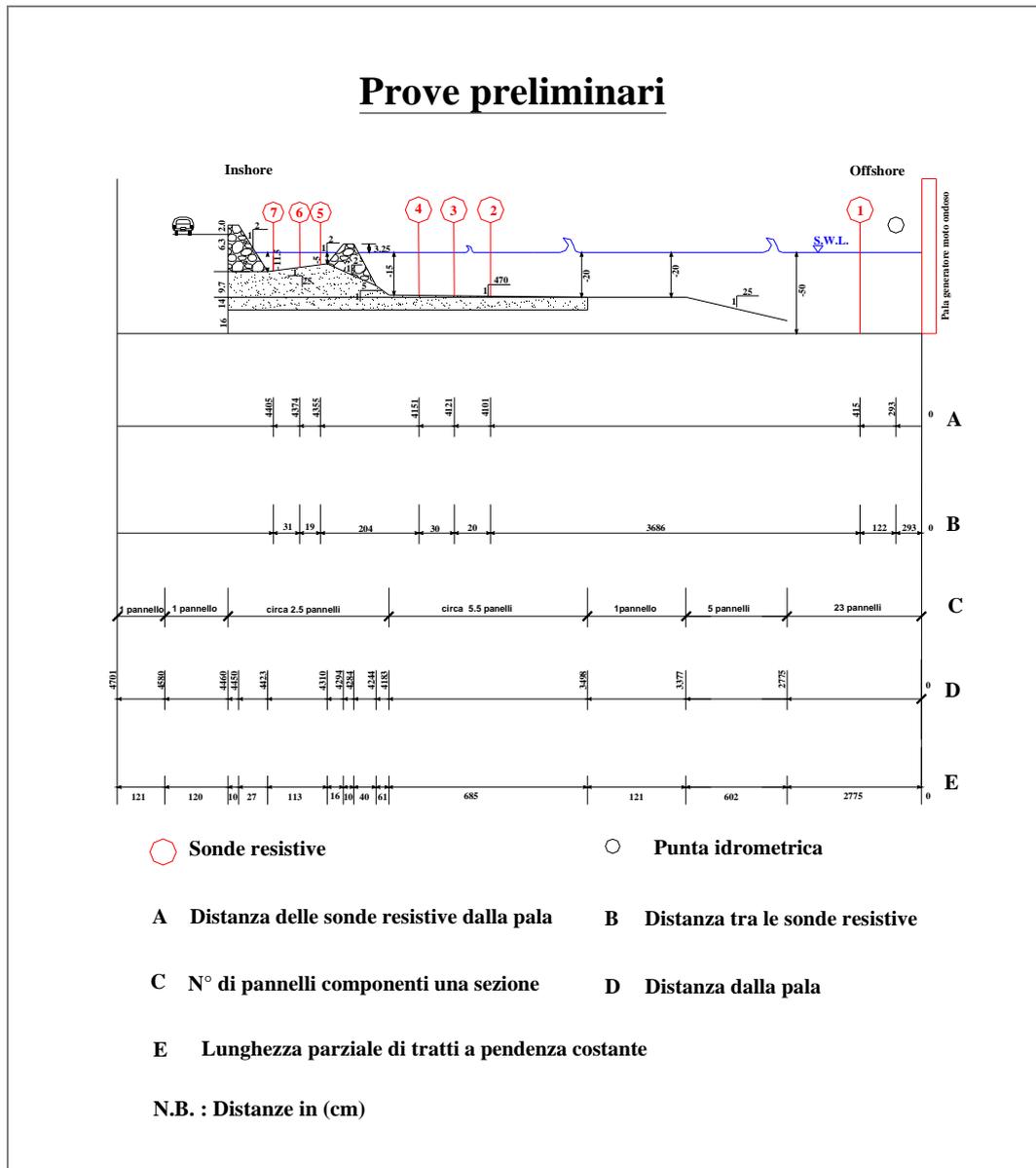


Figura 5.10 - Profilo non in scala del canale del Laboratorio Costiero di Firenze, rappresentante la posizione delle sonde durante la prove preliminari.

### 5.5.2 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 5.11 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.

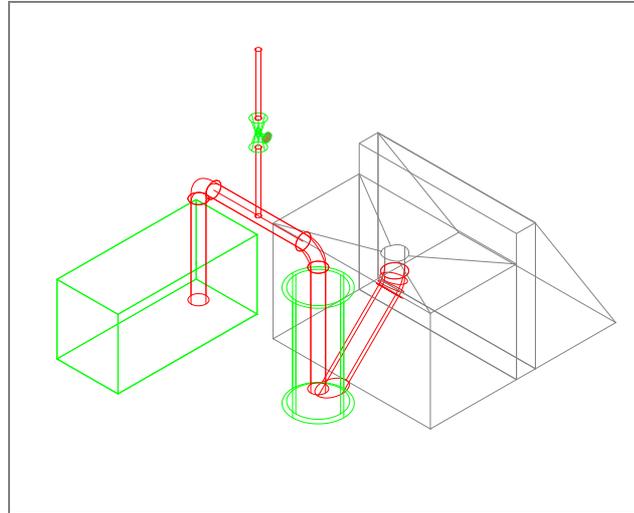


Figura 5.11 - Rappresentazione grafica dell'apparato per la misura dei volumi di overtopping



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

### 5.5.3 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 5.13 si riportano i valori dei livelli idrici in canale, impostanti durante le prove preliminari, con la pompa di retropala spenta.

**Tabella 5.13:** Valori dei livelli idrici in canale per le prove preliminari.

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

#### → *Misura delle onde generate*

In Tabella 5.14 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 5.14:** 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 5.15 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);
- $T_{m0-li}$ : 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 5.15: 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]	$T_{m0-it}$ [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 5.16 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 5.16:** 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 5.17:** Misurazioni relative al giorno 04/02/08 per il livello idrico F1.

<b>Livello F1</b>			
<b>Codice onda</b>	<b>N° di overtopping</b>	<b>Volume stimato di overtopping [dm<sup>3</sup>]</b>	<b>Commenti</b>
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 5.189:** Misurazioni relative al giorno 04/02/08 per il livello F2.

<b>Livello F2</b>			
<b>Codice onda</b>	<b>N° di overtopping</b>	<b>Volume stimato di overtopping [dm<sup>3</sup>]</b>	<b>Commenti</b>
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 5.19:** Misurazioni relative al giorno 11/02/08 per il livello F1.

<b>Livello F1</b>			
<b>Codice onda</b>	<b>N° di overtopping</b>	<b>Volume stimato di overtopping [dm<sup>3</sup>]</b>	<b>Commenti</b>
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 5.20:** Misurazioni relative al giorno 11/02/08 per il livello F2.

<b>Livello F2</b>			
<b>Codice onda</b>	<b>N° di overtopping</b>	<b>Volume stimato di overtopping [dm<sup>3</sup>]</b>	<b>Commenti</b>
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.

## 5.6 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 dieci configurazioni, denominate C0, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C9.
- il sistema di ricircolo è stato azionato solo per la configurazione C1;
- 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 V). Tale elaborazione restituisce la variazione del livello idrico in canale e l'analisi spettrale delle onde.

### 5.6.1 Posizionamento delle sonde resistive

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

Per le configurazioni C0, C1, C2 e C3 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 battente 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 (fig. 5.11).

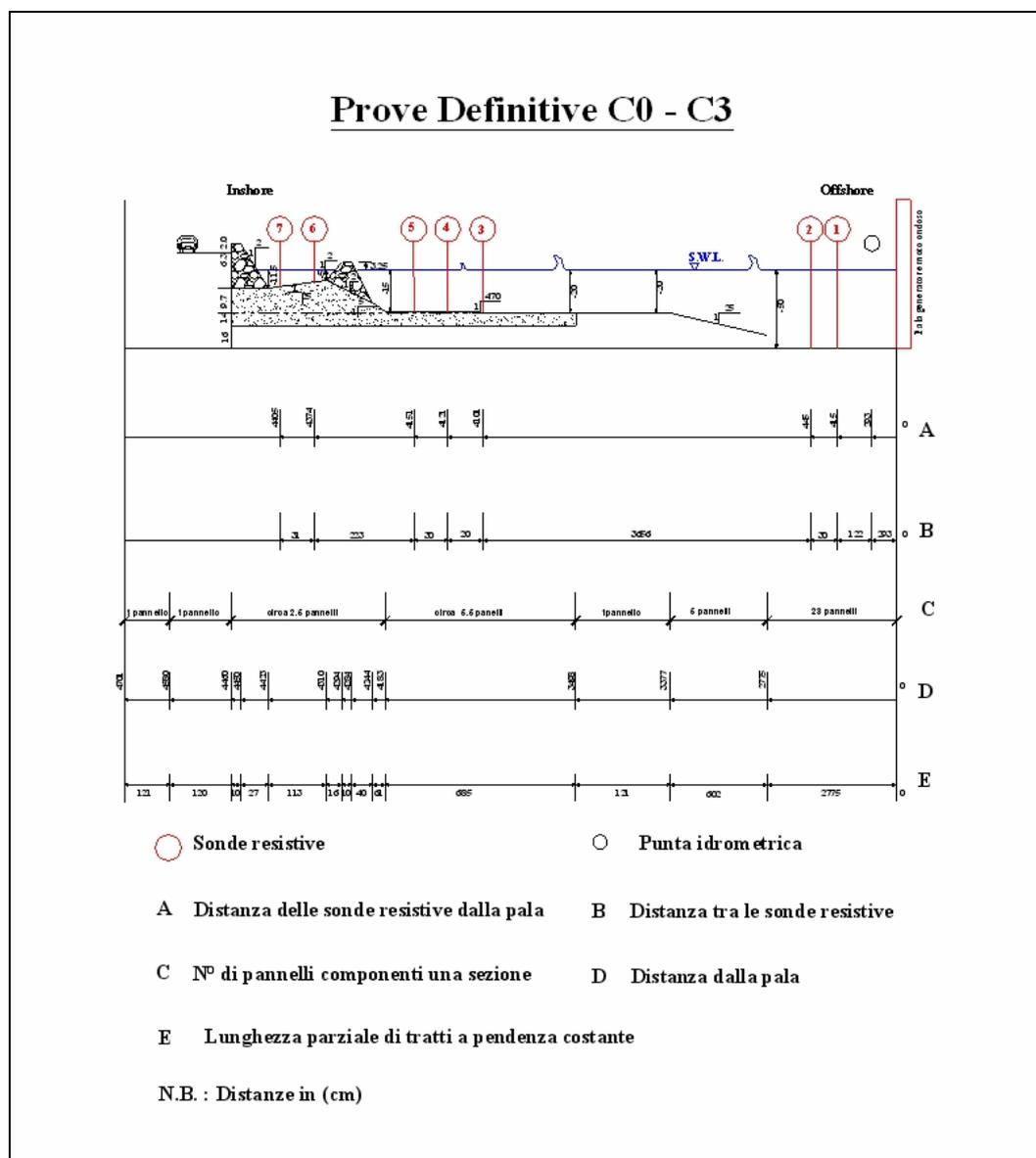


Figura 5.9- Profilo non in scala del canale del Laboratorio Costiero di Firenze, rappresentante la posizione delle sonde durante le prove definitive C0, C1, C2 e C3.

Per le configurazioni C4, C5, C6, C7, C8 e C9 la sonda in posizione 2 è stata spostata e messa in coppia con la sonda in posizione 3 davanti alla barriera esterna. Inoltre la sonda in posizione 4 è stata messa in coppia con la sonda in posizione 5 davanti alla barriera in massi interna (fig. 5.12).

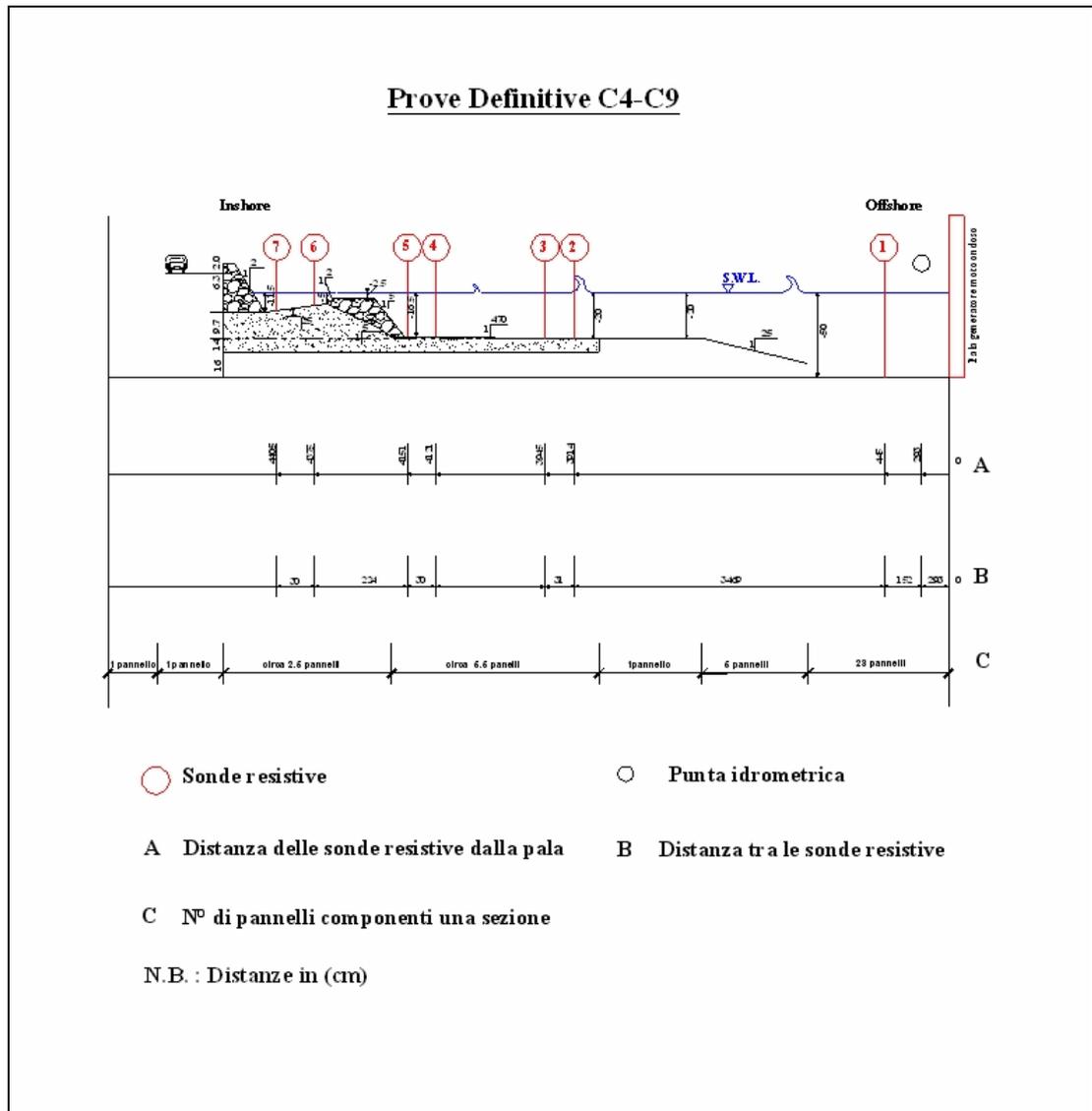


Figura 5.12- Profilo non in scala del canale del Laboratorio Costiero di Firenze, rappresentante la posizione delle sonde durante la prove definitive C4, C5, C6, C7, C8 e C9.

## 5.6.2 Configurazioni studiate

### → Configurazioni C0 e C1

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. 5.13).

La configurazione, denominata C0, è caratterizzata da una scogliera radente costituita da massi con  $d_{50}$  pari a 3.3 cm (1.32 m nel prototipo), larghezza di cresta di 10 cm (4 m nel prototipo), e lato inclinato verso mare (1:2) di lunghezza pari a 27 cm (10.80 m nel prototipo), per un volume complessivo di 46 dm<sup>3</sup>(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 (1.44 m nel prototipo), per un volume complessivo di 34 dm<sup>3</sup>. Il lato obliquo rivolto verso la zona protetta ha un'inclinazione 1:2, e la larghezza della cresta è di 10 cm (4 m nel prototipo). Tale scogliera presenta, inoltre, un freeboard di 3.25 cm (1.30 m nel prototipo) 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, 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.

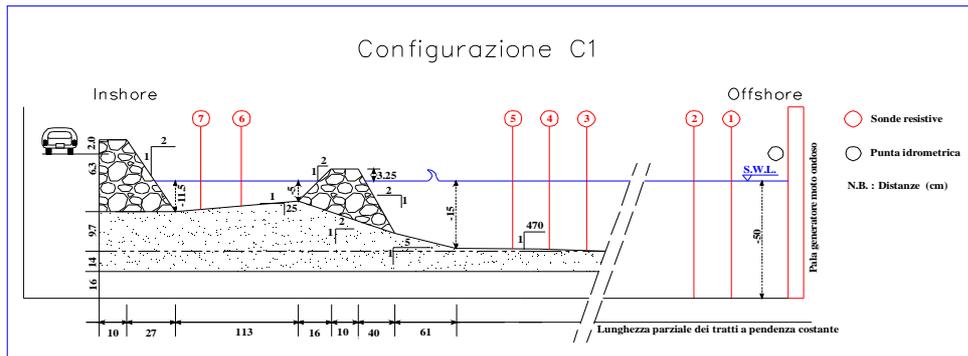


Figura 5.13 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C0 e C1 e il posizionamento delle sonde.



Foto 5.3 - Scogliera emersa ricostruita in canale per la configurazioni C0 e C1.

### → Configurazione C2

I giorni 17-19 e 20 Marzo sono state eseguite le prove per la configurazione C2 (fig. 5.14 e foto 5.4), che rappresenta, insieme alla configurazione C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C9 una delle ipotesi progettuali studiate per conto della Provincia di Pisa.

La scogliera radente rimane immutata nelle dieci 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 dm<sup>3</sup>), 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.

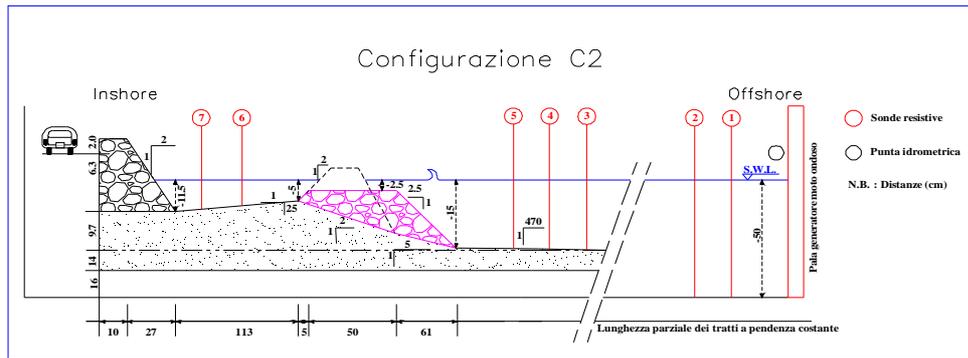


Figura 5.14 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C2 e il posizionamento delle sonde.



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

### → *Configurazione C3*

I giorni 9-10-15 e 16 Aprile è stata ricostruita la configurazione C3 (fig. 5.15 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 dm<sup>3</sup>.

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.

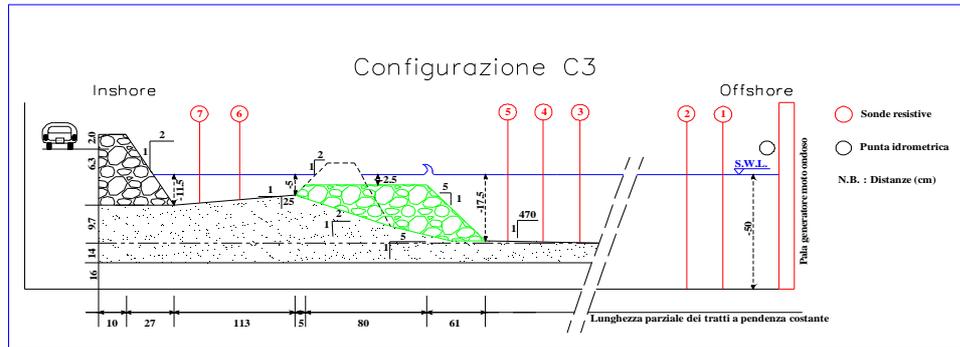


Figura 5.15 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C3 e il posizionamento delle sonde.



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

→ **Configurazione C4**

I giorni 28-29 e 30 Aprile è stata ricostruita la configurazione C4 (fig. 5.16 e foto 5.6).

Per tale configurazione è stata mantenuta la scogliera sommersa rappresentante la configurazione C3 con l'aggiunta, ad una distanza di 1.5 m (60 m nel prototipo) dal piede esterno di essa, di una barriera in geocontenitori. Tale barriera, che presenta una larghezza di cresta di circa 0.5 m (20 m nel prototipo), è formata da tre geocontenitori affiancati con asse longitudinale parallelo alla costa, lunghi 80 cm (32 m nel prototipo), larghi 17 cm (6.8 m nel prototipo) e alti 9 cm (3.8 m nel prototipo). Il freeboard della barriera in geocontenitori è pari a - 7.5 cm s.l.m (-3 m nel prototipo).



Foto 5.6 - Barriera in geocontenitori ricostruita in canale per la configurazione C4.

→ **Configurazioni C5 e C6**

I giorni 05-06 e 07 Maggio è stata ricostruita la configurazione C5 mentre nei giorni 08-12 e 13 Maggio è stata ricostruita la configurazione C6 (fig. 5.16).

Entrambe le configurazioni mantengono le stesse caratteristiche della C4 ma cambia la distanza della barriera in geocontenitori dal piede esterno della scogliera in massi. Nella configurazione C5, infatti, la barriera in geocontenitori è posta ad una distanza di 1.8 m (75 m nel prototipo), mentre nella configurazione C6 ad una distanza di 0.8 m (35 m nel prototipo).

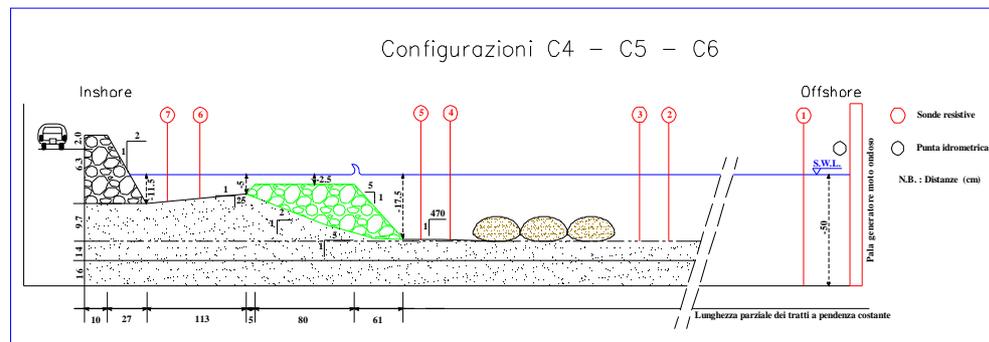


Figura 5.16 - Profilo non in scala rappresentante le strutture delle configurazioni C4-C5-C6 e il posizionamento delle sonde

→ **Configurazione C7**

I giorni 13-14 e 15 Maggio è stata ricostruita la configurazione C7 (fig 5.17 e foto 5.7).

Per tale configurazione è stato deciso di ricostruire una nuova barriera in geocontenitori ad una distanza di 1.5 m (60 m nel prototipo) dal piede esterno della scogliera in massi, in quanto, da una prima analisi è risultata la distanza migliore in termini di tracimazioni conteggiate nelle configurazioni C4, C5 e C6. La barriera in geocontenitori è stata costruita su due livelli, posizionando un primo geocontenitore con asse longitudinale parallelo alla costa e altri cinque geocontenitori sovrapposti a questo, ma con asse longitudinale ortogonale alla costa. La barriera risultante è larga circa 0.5 m (20 m nel prototipo) ed ha un freeboard di -2.5 cm s.l.m (-1 m nel prototipo).

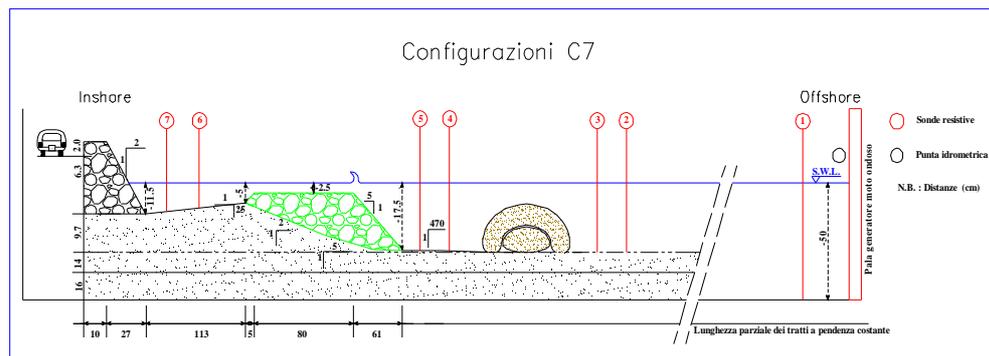


Figura 5.17 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C7 e il posizionamento delle sonde.

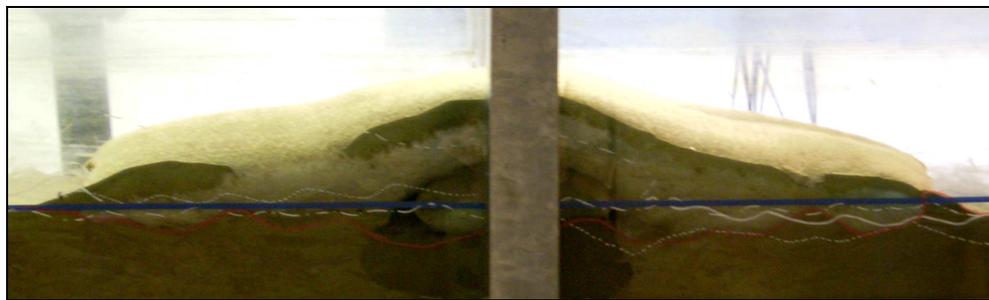


Foto 5.7 - Barriera in geocontenitori ricostruita in canale per la configurazione C7.

### → **Configurazione C8**

I giorni 26 – 28 e 30 Maggio è stata ricostruita la configurazione C8 (fig 5.18 e foto 5.8).

Per tale configurazione è stata costruita una barriera in geocontenitori ad una distanza di 1.5 m (60 m nel prototipo) dal piede esterno della scogliera in massi, sovrapponendo a tre geocontenitori affiancati e con asse longitudinale parallelo alla costa altri due geocontenitori affiancati nella medesima posizione dei sottostanti. La barriera risultante è larga circa 0.5 m (20 m nel prototipo) ed ha un freeboard di -2.5 cm s.l.m (-1 m nel prototipo).

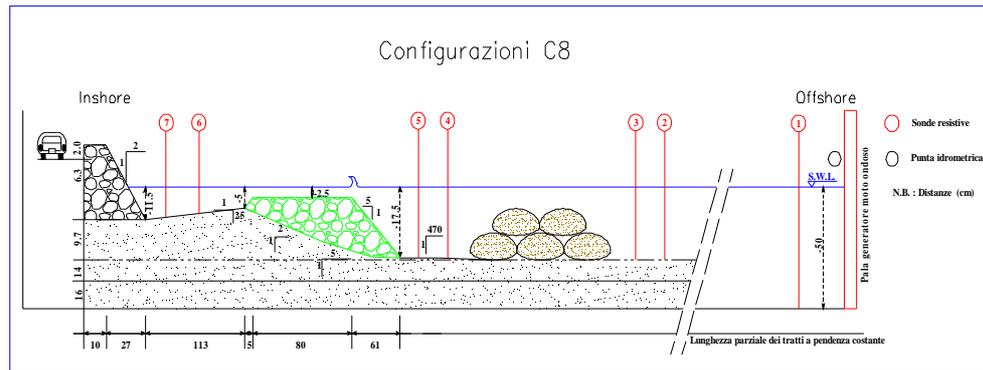


Figura 5.18 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C8 e il posizionamento delle sonde

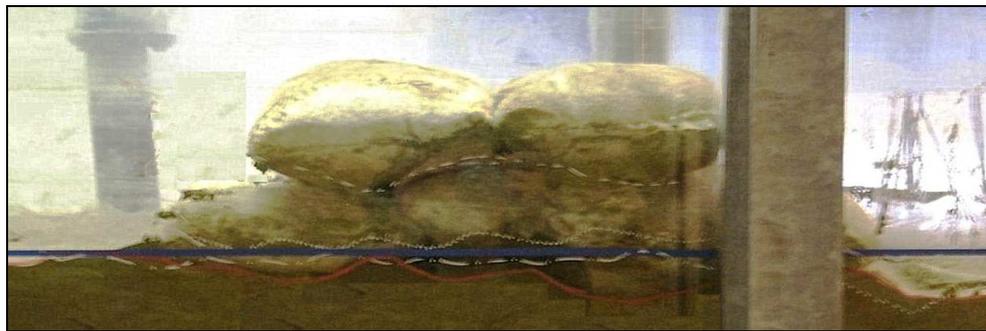


Foto 5.8 - Barriera in geocontenitori ricostruita in canale per la configurazione C8.

### → **Configurazione C9**

I giorni 03 – 04 e 09 Luglio è stata ricostruita la configurazione C9 (fig 5.19 e foto 5.9).

Per tale configurazione, al posto della barriera in geotubi, è stata costruita una seconda scogliera in massi ad una distanza di 1.5 m (60 m nel prototipo) dal piede esterno della prima, con massi dotati delle stesse caratteristiche granulometriche viste per le scogliere in massi delle precedenti configurazioni e con caratteristiche geometriche simili a quelle dell'alternativa C4 costruita in geotubi. La nuova scogliera esterna, infatti, è alta 10cm (4m nel prototipo), ha una larghezza della base inferiore pari a circa 0.5 m (20m nel prototipo), una larghezza di cresta pari a 12 cm (4.8 m nel prototipo), una pendenza del lato obliquo verso mare pari a 1/2 ed un freeboard di -7 cm s.l.m (-2.8 m nel prototipo).

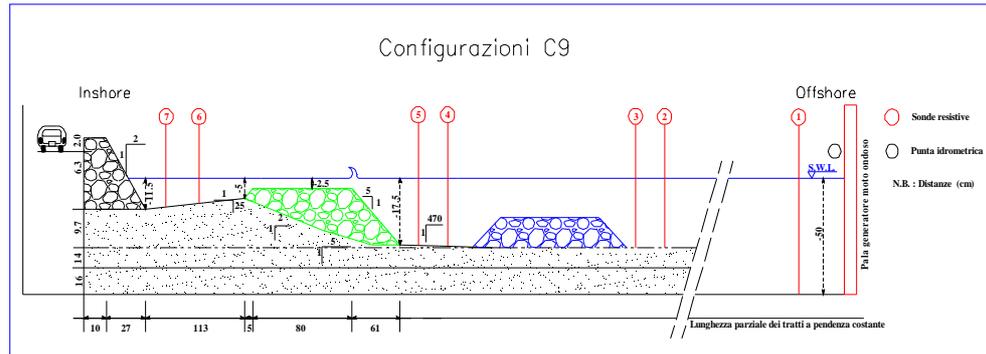


Figura 5.19 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C9 e il posizionamento delle sonde



Foto 5.9 - Scogliera in massi ricostruita in canale per la configurazione C9.

E' importante sottolineare che per le configurazioni C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C9 è stato deciso di non azionare il sistema di ricircolo, dato che il sovrizzo idrico dovuto all'attacco ondoso per queste configurazioni non è risultato rilevante.

In tabella 5.21 sono riassunte tutte le caratteristiche strutturali delle dieci configurazioni progettuali studiate.

**Tabella 5.21:** Caratteristiche strutturali delle dieci configurazioni riprodotte nel modello fisico

Configurazione	Caratteristiche dei modelli realizzati in laboratorio (misure sono in scala prototipo)
C0	Configurazione attuale del sistema di difesa. Muro radente in massi con D50=1.3m, quota della cresta 3.2m s.l.m e pendenza del paramento lato mare 1:2 . Scogliera parallela emersa con D50=1.44m quota massima della cresta a +2.0m s.l.m. , larghezza di cresta di 4m e pendenza del paramento lato a mare 1:2.
C1	Come C0 ma sono state simulate le correnti nei varchi.
C2	Come C1 ma è stata abbassata la cresta fino ad arrivare a quota -1m s.l.m. Gli scogli rimossi sono stati posati al piede esterno della scogliera, incrementando la larghezza della cresta fino 20m e realizzando una pendenza del lato a mare di 1:2.5.
C3	Come C3 ma è stata aumentata la larghezza di cresta fino a 32m aggiungendo scogli e la pendenza del paramento lato a mare pari a 1:5

<b>C4</b>	Come C3 ma è stata aggiunta una barriera in geocontenitori posta a 60m dalla scogliera (misurati dal piede esterno della scogliera al piede interno della barriera in geocontenitori) su un fondale di circa 7m. Sono stati utilizzati 3 geocontenitori affiancati con asse longitudinale parallelo alla costa, lunghi 32m, larghi 6.8m e con altezza massima 3.8m. La barriera è larga circa 20m con cresta a quota di circa -3.0m s.l.m
<b>C5</b>	Come C4 ma la distanza fra la scogliera e la barriera in geocontenitori è 75m.
<b>C6</b>	Come C4 ma la distanza fra la scogliera e la barriera in geocontenitori è 35m
<b>C7</b>	Come C4 ma la barriera in geocontenitori è stata costruita su due livelli. Un geocontenitore è stato posto con asse longitudinale parallelo alla costa e gli altri affiancati sono sovrapposti a questo ma con asse longitudinale ortogonale alla costa. La barriera risultante è larga circa 20m e ha la cresta ha quota di circa -1m s.l.m
<b>C8</b>	Come C4 ma la barriera in geocontenitori è stata costruita su due livelli. Tre geocontenitori sono stati posti con asse longitudinale parallelo alla costa altri due affiancati, sempre con asse longitudinale parallelo alla costa, sopra i primi. La barriera risultante è larga circa 20m e ha la cresta ha quota di circa -1m s.l.m.
<b>C9</b>	Come C4 ma la seconda barriera è stata costruita in massi e con la stessa geometria della barriera in geotubi vista nella C4. La scogliera risultante è alta 4m, ha una larghezza di cresta di 4.8m, una pendenza del lato obliquo verso mare pari a $\frac{1}{2}$ ed un freeboard -2.8m.

## 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, calcolato come la media degli errori, in valore assoluto, tra il valore predetto dalla curva di calibrazione e il valore misurato.

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

Errore medio di calibrazione per ogni sonda [cm]							
Data	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
20/02/2008 C0F2	0.0120	0.2001	0.1390	0.1390	0.0600	0.0486	0.0346
21/02/2008 C0F2	0.0077	0.3168	0.1407	0.1407	0.0413	0.0539	0.0401
22/02/2008 C0F1	0.0019	0.2737	0.1407	0.1407	0.0601	0.1317	0.0489
25/02/2008 C0F0	0.0038	0.2329	0.0996	0.0996	0.0797	0.0498	0.0266
28/02/2008 C1F1	0.0616	0.3262	0.1090	0.1090	0.0702	0.1686	0.0287
03/03/2008 C1F2	0.0144	0.3219	0.0705	0.0705	0.0578	0.1127	0.0163
06/03/2008	0.0035	0.2721	0.0830	0.0830	0.0803	0.0193	0.0265

C1F0							
17/03/2008 C2F0	0.0368	0.3428	0.1111	0.0610	0.0724	0.1813	0.0921
19/03/2008 C2F1	0.0428	0.3799	0.0878	0.0462	0.1335	0.1616	0.0180
20/03/2008 C2F2	0.0564	0.3611	0.0176	0.0055	0.1044	0.1421	0.0063
09/03/2008 C3F0	0.0239	0.4210	0.0754	0.0451	0.0816	0.0138	0.0109
10/04/2008 C3F1	0.0513	0.4127	0.0287	0.0365	0.0154	0.0164	0.0085
15/04/2008 C3F2	0.0776	0.4233	0.0298	0.0056	0.0102	0.0038	0.0062
16/04/2008 C3F2	0.0661	0.3907	0.0272	0.0034	0.0083	0.0234	0.0050
28/04/2008 C4F0	0.3275	0.0262	0.0217	0.0415	0.0699	0.0245	0.0178
29/04/2008 C4F1	0.2930	0.0000	0.0058	0.0301	0.0550	0.0128	0.0112
30/04/2008 C4F2	0.2825	0.0053	0.0544	0.0045	0.0167	0.0405	0.0830
05/05/2008 C5F0	0.4434	0.0248	0.0080	0.0479	0.0560	0.0216	0.0137
06/05/2008 C5F1	0.3004	0.0819	0.0837	0.0494	0.0717	0.0304	0.0241
07/05/2008 C5F2	0.0914	0.0861	0.1110	0.0288	0.0994	0.0996	0.0682
08/05/2008 C6F0	0.0663	0.1915	0.1146	0.0555	0.1118	0.0144	0.0102
12/05/2008 C6F1	0.2443	0.2975	0.3367	0.0624	0.1098	0.0500	0.1350
13/05/2008 C6F2	0.0891	0.1817	0.1437	0.0080	0.0499	0.0501	0.1163
14/05/2008 C7F0	0.0956	0.1438	0.0563	0.0647	0.1183	0.1105	0.0340
15/05/2008 C7F1	0.0132	0.8533	0.3502	0.0153	0.0160	0.0138	0.0012
16/05/2008 C7F2	0.1333	0.7798	0.2799	0.0087	0.0020	0.0147	0.0132
26/05/08 C8F0	0.0179	0.7532	0.3143	0.0854	0.0501	0.0943	0.0000
28/05/08 C8F1	0.1923	0.7098	0.2920	0.0244	0.0086	0.0952	0.0285
30/05/2008 C8F2	0.1811	0.5556	0.1880	0.0209	0.0113	0.0422	0.0352
03/07/08 C9F0	0.0787	0.5096	0.3068	0.0137	0.0206	0.1049	0.0119
04/07/08 C9F1	0.2233	0.4812	0.2407	0.0096	0.0274	0.0022	0.0086
09/07/08 C9F2	0.1615	0.3271	0.2360	0.0473	0.0381	0.0179	0.0098
<b>Media</b>	<b>0.1155</b>	<b>0.3339</b>	<b>0.1345</b>	<b>0.0501</b>	<b>0.0565</b>	<b>0.0615</b>	<b>0.0310</b>

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

Per le prove inerenti le configurazioni C0, C1, C2 e C3, la sonda in posizione 2, presenta 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. Nelle configurazioni successive, ovvero nella C4, C5, C6, C7, C8 e C9, la sonda in posizione 2 è stata spostata davanti alla scogliera esterna in coppia con la sonda 3, trovandosi, questa volta, in una posizione chiave per le misure che si vogliono effettuare, è stato necessario scambiarla con la sonda in posizione 1. Nonostante questo, dalla configurazione C7, per la sonda in posizione 2, si rileva di nuovo un errore medio maggiore di 2 mm.

### 6.1.2 Deviazione standard e Livello di “zero”

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.

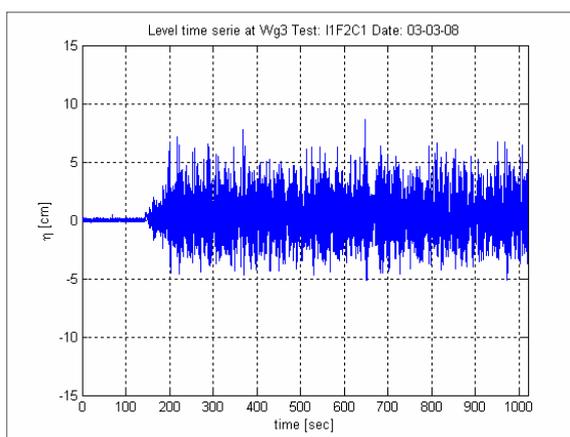


Figura 6.1 - Segnale acquisito dalla sonda in posizione 3 durante la prova “I1F2C1” del 03-03-08 con la pompa di ricircolo accesa.

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”, ottenuti dalla media dei livelli nei due minuti di acquisizione, rispetto al livello acquisito durante la calibrazione, e una stringa con la deviazione standard del segnale registrata ancora durante i primi 2 minuti di acquisizione per ogni sonda.

Nelle Tabelle seguenti, sono riportate i livelli di “zero” e 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 C0.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F0C0 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C0</b>	0.0288	0.0855	0.0950	0.0210	0.0264	0.0128	0.0096
<b>I2F0C0</b>	0.0282	0.0202	0.0927	0.0218	0.0265	0.0157	0.0165
<b>I3F0C0</b>	0.0337	0.0204	0.1031	0.0305	0.0339	0.0338	0.0348
<b>I4F0C0</b>	0.0325	0.0208	0.1025	0.0304	0.0342	0.0381	0.0372
<b>I5F0C0</b>	0.0403	0.0327	0.1113	0.0478	0.0512	0.0564	0.0541
<b>I6F0C0</b>	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 C0.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F1C0 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C0</b>	0.0354	0.0258	0.0944	0.0324	0.0368	0.0293	0.0257
<b>I2F1C0</b>	0.0314	0.0238	0.0966	0.0360	0.0399	0.0513	0.0460
<b>I3F1C0</b>	0.0412	0.0370	0.0995	0.0438	0.0472	0.0500	0.0460
<b>I4F1C0</b>	0.0346	0.0295	0.0968	0.0302	0.0342	0.0445	0.0402
<b>I5F1C0</b>	0.0321	0.0270	0.0996	0.0357	0.0394	0.0506	0.0462
<b>I6F1C0</b>	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 C0.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F2 senza ricircolo [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C0</b>	0.0290	0.0199	0.0936	0.0254	0.0317	0.0257	0.0241
<b>I2F2C0</b>	0.0344	0.0251	0.0920	0.0361	0.0402	0.0469	0.0462
<b>I3F2C0</b>	0.0349	0.0237	0.0918	0.0346	0.0387	0.0429	0.0421
<b>I4F2C0</b>	0.0371	0.0355	0.0930	0.0366	0.0410	0.0506	0.0493
<b>I5F2C0</b>	0.0404	0.0371	0.0966	0.0428	0.0461	0.0533	0.0510
<b>I6F2C0</b>	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.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F0C1 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C1</b>	0.0368	0.0238	0.0816	0.0277	0.0335	0.0296	0.0269
<b>I2F0C1</b>	0.0389	0.0240	0.0849	0.0349	0.0398	0.0369	0.0339
<b>I3F0C1</b>	0.0362	0.0244	0.0842	0.0300	0.0359	0.0301	0.0278
<b>I4F0C1</b>	0.0320	0.0245	0.0823	0.0313	0.0381	0.0314	0.0294
<b>I5F0C1</b>	0.0310	0.0245	0.0832	0.0307	0.0364	0.0337	0.0309
<b>I6F0C1</b>	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.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F1C1[cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C1</b>	0.0300	0.0283	0.0887	0.0320	0.0381	0.0331	0.0281
<b>I2F1C1</b>	0.0320	0.0238	0.0905	0.0343	0.0393	0.0392	0.0324
<b>I3F1C1</b>	0.0421	0.0336	0.0995	0.0537	0.0570	0.0548	0.0471
<b>I4F1C1</b>	0.0344	0.0294	0.0921	0.0436	0.0480	0.0511	0.0433
<b>I5F1C1</b>	0.0323	0.0224	0.0874	0.0370	0.0418	0.0392	0.0320
<b>I6F1C1</b>	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.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F2C1 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
I1F2C1	0.0389	0.0338	0.0866	0.0497	0.0544	0.0426	0.0457
I2F2C1	0.0369	0.0303	0.0876	0.0430	0.0488	0.0349	0.0362
I3F2C1	0.0451	0.0367	0.0876	0.0410	0.0478	0.0352	0.0362
I4F2C1	0.0352	0.0291	0.0866	0.0430	0.0487	0.0340	0.0355
I5F2C1	0.0370	0.0293	0.0884	0.0448	0.0503	0.0412	0.0428
I6F2C1	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.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F0 senza ricircolo [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
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.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F1 senza ricircolo [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
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.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F2 senza ricircolo [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C2</b>	0.0270	0.0175	0.0680	0.0215	0.0282	0.0260	0.0238
<b>I2F2C2</b>	0.0403	0.0327	0.0812	0.0489	0.0549	0.0734	0.0673
<b>I3F2C2</b>	0.0467	0.0416	0.0834	0.0569	0.0626	0.0937	0.0856
<b>I4F2C2</b>	0.0376	0.0266	0.0728	0.0462	0.0503	0.0791	0.0737
<b>I5F2C2</b>	0.0487	0.0421	0.0810	0.0606	0.0654	0.0922	0.0831
<b>I6F2C2</b>	-	-	-	-	-	-	-
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.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F0C3[cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C3</b>	0.0867	0.0871	0.1121	0.0977	0.1060	0.1877	0.1958
<b>I2F0C3</b>	0.0850	0.0856	0.1143	0.1024	0.1097	0.1539	0.1600
<b>I3F0C3</b>	0.0687	0.0671	0.0817	0.0649	0.0732	0.1569	0.1621
<b>I4F0C3</b>	0.0622	0.0597	0.0863	0.0696	0.0770	0.1642	0.1695
<b>I5F0C3</b>	0.0486	0.0440	0.0796	0.0610	0.0674	0.1028	0.1077
<b>I6F0C3</b>	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.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F1C3[cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C3</b>	0.0494	0.0462	0.0741	0.0608	0.0651	0.1180	0.1251
<b>I2F1C3</b>	0.0516	0.0457	0.0653	0.0445	0.0492	0.1037	0.1100
<b>I3F1C3</b>	0.0630	0.0569	0.0784	0.0645	0.0707	0.1325	0.1399
<b>I4F1C3</b>	0.0573	0.0517	0.0715	0.0537	0.0596	0.1049	0.1100
<b>I5F1C3</b>	0.0592	0.0536	0.0749	0.0591	0.0637	0.1631	0.1695
<b>I6F1C3</b>	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.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F2C3 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C3</b>	0.0584	0.0513	0.0708	0.0606	0.0641	0.1167	0.1235
<b>I2F2C3</b>	0.0485	0.0451	0.0727	0.0594	0.0654	0.1019	0.1088
<b>I3F2C3</b>	0.0814	0.0766	0.0924	0.0841	0.0909	0.1732	0.1789
<b>I4F2C3</b>	0.0711	0.0666	0.0872	0.0758	0.0796	0.1596	0.1688
<b>I5F2C3</b>	0.0665	0.0598	0.0941	0.0854	0.0910	0.1627	0.1687
<b>I6F2C3</b>	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

**Tabella 6.14:** Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C4.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F0C4 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C4</b>	0.0628	0.0861	0.079	0.0644	0.0723	0.1445	0.1519
<b>I2F0C4</b>	0.0455	0.0605	0.0585	0.0586	0.0612	0.1124	0.117
<b>I3F0C4</b>	0.0515	0.0647	0.0651	0.0652	0.0687	0.1009	0.1057
<b>I4F0C4</b>	0.0439	0.0646	0.0629	0.0627	0.0669	0.1103	0.1163
<b>I5F0C4</b>	0.0471	0.0579	0.0581	0.0612	0.0662	0.1219	0.1267
<b>I6F0C4</b>	0.0452	0.0570	0.0610	0.0500	0.0538	0.0951	0.0999
Media per ogni sonda	0.0493	0.0651	0.0641	0.0604	0.0649	0.1142	0.1196
4*Deviazione standard	0.1973	0.2605	0.2564	0.2414	0.2594	0.4567	0.4783

**Tabella 6.15:** Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C4.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F1C4 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C4</b>	0.0491	0.0612	0.0597	0.064	0.0653	0.1019	0.1062
<b>I2F1C4</b>	0.0346	0.0458	0.0505	0.0394	0.0387	0.0669	0.0688
<b>I3F1C4</b>	0.0372	0.0539	0.0566	0.0458	0.0463	0.0916	0.0927
<b>I4F1C4</b>	0.0325	0.0439	0.0486	0.0464	0.0464	0.0700	0.0719
<b>I5F1C4</b>	0.0477	0.0596	0.0576	0.0562	0.0590	0.1015	0.1041
<b>I6F1C4</b>	0.0414	0.0486	0.0488	0.0489	0.0501	0.0827	0.0846
Media per ogni sonda	0.0404	0.0522	0.0536	0.0501	0.0510	0.0858	0.0881
4*Deviazione standard	0.1617	0.2087	0.2145	0.2005	0.2039	0.3431	0.3522

**Tabella 6.16:** Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C4.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F2C4 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C4</b>	0.0505	0.0806	0.0778	0.0441	0.0483	0.1319	0.1409
<b>I2F2C4</b>	0.061	0.096	0.0868	0.0511	0.0567	0.1675	0.1792
<b>I3F2C4</b>	0.0513	0.0686	0.0662	0.0637	0.0647	0.112	0.1212
<b>I4F2C4</b>	0.0692	0.1128	0.1058	0.065	0.0692	0.1919	0.2074
<b>I5F2C4</b>	0.0555	0.0681	0.0676	0.0686	0.0723	0.144	0.1551
<b>I6F2C4</b>	0.0447	0.0622	0.0635	0.0495	0.0514	0.0986	0.1055
Media per ogni sonda	0.0554	0.0814	0.0780	0.0570	0.0604	0.1410	0.1516
4*Deviazione standard	0.2215	0.3255	0.3118	0.2280	0.2417	0.5639	0.6062

**Tabella 6.17:** Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C5.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F0C5 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C5</b>	0.0734	0.1227	0.1037	0.0535	0.0547	0.1753	0.1844
<b>I2F0C5</b>	0.0436	0.0484	0.0464	0.0436	0.0468	0.0696	0.0698
<b>I3F0C5</b>	0.0459	0.0511	0.0488	0.0494	0.0520	0.0857	0.0881
<b>I4F0C5</b>	0.0345	0.0445	0.0453	0.0422	0.0433	0.0622	0.0639
<b>I5F0C5</b>	0.0380	0.0484	0.0472	0.0455	0.0456	0.0786	0.0813
<b>I6F0C5</b>	0.0321	0.0471	0.0459	0.0359	0.0369	0.0649	0.0675
Media per ogni sonda	0.0446	0.0604	0.0562	0.0450	0.0466	0.0894	0.0925
4*Deviazione standard	0.1783	0.2415	0.2249	0.1801	0.1862	0.3575	0.3700

**Tabella 6.18:** Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C5.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F1C5 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C5</b>	0.0489	0.0627	0.0491	0.0469	0.0501	0.0933	0.0944
<b>I2F1C5</b>	0.0426	0.0618	0.0478	0.0461	0.0491	0.0815	0.0835
<b>I3F1C5</b>	0.0563	0.0748	0.0546	0.0547	0.0591	0.1191	0.1204
<b>I4F1C5</b>	0.0451	0.0712	0.0494	0.0348	0.0379	0.1014	0.1034
<b>I5F1C5</b>	0.0532	0.0722	0.0516	0.0475	0.0497	0.1023	0.1048
<b>I6F1C5</b>	0.0456	0.0706	0.0496	0.0300	0.0325	0.0991	0.1010
Media per ogni sonda	0.0486	0.0689	0.0504	0.0433	0.0464	0.0995	0.1013
4*Deviazione standard	0.1945	0.2755	0.2014	0.1733	0.1856	0.3978	0.4050

**Tabella 6.19:** Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C5.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F2C5 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C5</b>	0.0469	0.0584	0.0594	0.0502	0.0538	0.1265	0.1196
<b>I2F2C5</b>	0.0358	0.0426	0.0498	0.0272	0.0302	0.0644	0.0597
<b>I3F2C5</b>	0.0452	0.0488	0.0532	0.0422	0.0468	0.1011	0.0945
<b>I4F2C5</b>	0.0490	0.0485	0.0506	0.0481	0.0504	0.0941	0.0883
<b>I5F2C5</b>	0.0485	0.0707	0.0726	0.0329	0.0375	0.1326	0.1247
<b>I6F2C5</b>	0.0414	0.0518	0.0519	0.0443	0.0467	0.0870	0.0811
Media per ogni sonda	0.0445	0.0535	0.0563	0.0408	0.0442	0.1010	0.0947
4*Deviazione standard	0.1779	0.2139	0.2250	0.1633	0.1769	0.4038	0.3786

**Tabella 6.20:** Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C6.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F0C6 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C6</b>	0.0351	0.0599	0.0672	0.0572	0.0626	0.1127	0.1165
<b>I2F0C6</b>	0.0366	0.0547	0.0704	0.0265	0.0303	0.0859	0.0882
<b>I3F0C6</b>	0.0301	0.0390	0.0521	0.0242	0.0289	0.0598	0.0605
<b>I4F0C6</b>	0.0399	0.0605	0.0797	0.0327	0.0370	0.1039	0.1071
<b>I5F0C6</b>	0.0399	0.0605	0.0797	0.0327	0.0370	0.1039	0.1071
<b>I6F0C6</b>	0.0133	0.0268	0.0347	0.0099	0.0153	0.0173	0.0063
Media per ogni sonda	0.0325	0.0502	0.0640	0.0305	0.0352	0.0806	0.0810
4*Deviazione standard	0.1299	0.2009	0.2559	0.1221	0.1407	0.3223	0.3238

**Tabella 6.21:** Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C6.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F1C6 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C6</b>	0.0133	0.0251	0.0671	0.0129	0.0179	0.0131	0.0073
<b>I2F1C6</b>	0.0246	0.0307	0.0736	0.0312	0.0337	0.0536	0.0521
<b>I3F1C6</b>	0.0311	0.0305	0.0728	0.0354	0.0388	0.0536	0.0559
<b>I4F1C6</b>	0.0376	0.0327	0.0705	0.0434	0.0465	0.0590	0.0612
<b>I5F1C6</b>	0.0192	0.0295	0.0723	0.0294	0.0329	0.0320	0.0350
<b>I6F1C6</b>	0.0271	0.0305	0.0732	0.0301	0.0337	0.0404	0.0421
Media per ogni sonda	0.0255	0.0298	0.0716	0.0304	0.0339	0.0420	0.0423
4*Deviazione standard	0.1019	0.1193	0.2863	0.1216	0.1357	0.1678	0.1691

**Tabella 6.22:** Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C6.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F2C6 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C6</b>	0.0144	0.0190	0.0797	0.0127	0.0169	0.0118	0.0108
<b>I2F2C6</b>	0.0226	0.0285	0.0826	0.0222	0.0250	0.0434	0.0353
<b>I3F2C6</b>	0.0265	0.0280	0.0835	0.0309	0.0344	0.0445	0.0361
<b>I4F2C6</b>	0.0489	0.0347	0.0868	0.0545	0.0590	0.0817	0.0709
<b>I5F2C6</b>	0.0262	0.0343	0.0852	0.0324	0.0355	0.0527	0.0460
<b>I6F2C6</b>	0.0262	0.0343	0.0852	0.0324	0.0355	0.0527	0.0460
Media per ogni sonda	0.0275	0.0298	0.0838	0.0309	0.0344	0.0478	0.0409
4*Deviazione standard	0.1099	0.1192	0.3353	0.1234	0.1375	0.1912	0.1634

**Tabella 6.23:** Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C7.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F0C7 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C7</b>	0.0220	0.0266	0.0776	0.0283	0.0357	0.0421	0.0382
<b>I2F0C7</b>	0.0138	0.0287	0.0776	0.0190	0.0260	0.0220	0.0191
<b>I3F0C7</b>	0.0144	0.0250	0.0788	0.0164	0.0231	0.0198	0.0177
<b>I4F0C7</b>	0.0176	0.0266	0.0810	0.0164	0.0234	0.0245	0.0222
<b>I5F0C7</b>	0.0148	0.0254	0.0811	0.0150	0.0217	0.0162	0.0150
<b>I6F0C7</b>	0.0145	0.0246	0.0804	0.0141	0.0206	0.0143	0.0125
Media per ogni sonda	0.0162	0.0262	0.0794	0.0182	0.0251	0.0232	0.0208
4*Deviazione standard	0.0647	0.1046	0.3177	0.0728	0.1003	0.0926	0.0831

**Tabella 6.24:** Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C7.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F1C7 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C7</b>	0.0139	0.0165	0.0675	0.0109	0.0172	0.0107	0.0095
<b>I2F1C7</b>	0.0245	0.0242	0.0702	0.0293	0.0307	0.0393	0.0403
<b>I3F1C7</b>	0.0137	0.0173	0.0694	0.0114	0.0158	0.0080	0.0069
<b>I4F1C7</b>	0.0141	0.0162	0.0681	0.0115	0.0159	0.0102	0.0088
<b>I5F1C7</b>	0.0153	0.0165	0.0697	0.0129	0.0170	0.0126	0.0098
<b>I6F1C7</b>	0.0135	0.0172	0.0692	0.0125	0.0168	0.0102	0.0109
Media per ogni sonda	0.0158	0.0180	0.0690	0.0148	0.0189	0.0152	0.0144
4*Deviazione standard	0.0633	0.0719	0.2761	0.0590	0.0756	0.0607	0.0575

**Tabella 6.25:** Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C7.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F2C7 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C7</b>	0.0132	0.0144	0.0608	0.0106	0.0154	0.0086	0.0061
<b>I2F2C7</b>	0.0138	0.0158	0.0619	0.0098	0.0142	0.0084	0.0085
<b>I3F2C7</b>	0.0147	0.0166	0.0623	0.0123	0.0159	0.0095	0.0073
<b>I4F2C7</b>	0.0148	0.0159	0.0619	0.0108	0.0145	0.0077	0.0069
<b>I5F2C7</b>	0.0140	0.0163	0.0632	0.0116	0.0154	0.0094	0.0085
<b>I6F2C7</b>	0.0150	0.0160	0.0628	0.0129	0.0171	0.0092	0.0074
Media per ogni sonda	0.0143	0.0158	0.0622	0.0113	0.0154	0.0088	0.0075
4*Deviazione standard	0.0570	0.0633	0.2486	0.0453	0.0617	0.0352	0.0298

**Tabella 6.26:** Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C8.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F0C8 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C8</b>	0.0132	0.0180	0.0635	0.0161	0.0248	0.0090	0.0051
<b>I2F0C8</b>	0.0138	0.0166	0.0576	0.0155	0.0213	0.0109	0.0100
<b>I3F0C8</b>	0.0141	0.0185	0.0617	0.0162	0.0233	0.0092	0.0057
<b>I4F0C8</b>	0.0146	0.0186	0.0643	0.0169	0.0247	0.0104	0.0056
<b>I5F0C8</b>	0.0138	0.0203	0.0639	0.0164	0.0241	0.0105	0.0082
<b>I6F0C8</b>	0.0149	0.0199	0.0634	0.0158	0.0237	0.0104	0.0056
Media per ogni sonda	0.0141	0.0187	0.0624	0.0162	0.0237	0.0101	0.0067
4*Deviazione standard	0.0563	0.0746	0.2496	0.0646	0.0946	0.0403	0.0268

**Tabella 6.27:** Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C8.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F1C8 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C8</b>	0.0120	0.0179	0.0558	0.0141	0.0199	0.0118	0.0071
<b>I2F1C8</b>	0.0150	0.0166	0.0568	0.0153	0.0198	0.0097	0.0065
<b>I3F1C8</b>	0.0147	0.0169	0.0579	0.0153	0.0201	0.0092	0.0077
<b>I4F1C8</b>	0.0144	0.0175	0.0593	0.0158	0.0219	0.0078	0.0065
<b>I5F1C8</b>	0.0145	0.0174	0.0584	0.0147	0.0202	0.0099	0.0079
<b>I6F1C8</b>	0.0153	0.0175	0.0583	0.0151	0.0198	0.0086	0.0075
Media per ogni sonda	0.0143	0.0173	0.0578	0.0151	0.0203	0.0095	0.0072
4*Deviazione standard	0.0573	0.0692	0.2310	0.0602	0.0811	0.0380	0.0288

Tabella 6.28: Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C8.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F2C8 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
I1F2C8	0.0127	0.0178	0.0529	0.0147	0.0193	0.0086	0.0096
I2F2C8	0.0151	0.0183	0.0545	0.0148	0.0201	0.0109	0.0109
I3F2C8	0.0145	0.0154	0.0544	0.0138	0.0180	0.0075	0.0072
I4F2C8	0.0140	0.0164	0.0540	0.0138	0.0172	0.0091	0.0073
I5F2C8	0.0142	0.0165	0.0541	0.0130	0.0175	0.0082	0.0086
I6F2C8	0.0155	0.0155	0.0552	0.0137	0.0171	0.0085	0.0071
Media per ogni sonda	0.0143	0.0167	0.0542	0.0140	0.0182	0.0088	0.0085
4*Deviazione standard	0.0573	0.0666	0.2167	0.0559	0.0728	0.0352	0.0338

Tabella 6.29: Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C9.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F0C9 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
I1F0C9	0.0198	0.0262	0.0530	0.0227	0.0293	0.0260	0.0281
I2F0C9	0.0306	0.0177	0.0520	0.0189	0.0257	0.0192	0.0204
I3F0C9	0.0172	0.0172	0.0520	0.0189	0.0252	0.0153	0.0165
I4F0C9	0.0198	0.0194	0.0534	0.0216	0.0281	0.0206	0.0216
I5F0C9	0.0174	0.0168	0.0532	0.0178	0.0252	0.0123	0.0128
I6F0C9	0.0166	0.0160	0.0514	0.0169	0.0248	0.0125	0.0134
Media per ogni sonda	0.0202	0.0189	0.0525	0.0195	0.0264	0.0177	0.0188
4*Deviazione standard	0.0809	0.0755	0.2100	0.0779	0.1055	0.0706	0.0752

Tabella 6.30: Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C9.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F1C9 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
I1F1C9	0.0135	0.0150	0.0489	0.0150	0.0224	0.0079	0.0083
I2F1C9	0.0208	0.0183	0.0524	0.0202	0.0260	0.0211	0.0223
I3F1C9	0.0174	0.0166	0.0505	0.0157	0.0234	0.0122	0.0117
I4F1C9	0.0156	0.0147	0.0513	0.0151	0.0240	0.0100	0.0091
I5F1C9	0.0158	0.0150	0.0512	0.0151	0.0221	0.0091	0.0088
I6F1C9	0.0175	0.0150	0.0515	0.0165	0.0232	0.0127	0.0125
Media per ogni sonda	0.0168	0.0158	0.0510	0.0163	0.0235	0.0122	0.0121
4*Deviazione standard	0.0671	0.0631	0.2039	0.0651	0.0941	0.0487	0.0485

**Tabella 6.31:** Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C9.

<b>Deviazione standard per ogni sonda livello F2C9 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C9</b>	0.0198	0.0262	0.0530	0.0227	0.0293	0.0260	0.0281
<b>I2F2C9</b>	0.0306	0.0177	0.0520	0.0189	0.0257	0.0192	0.0204
<b>I3F2C9</b>	0.0172	0.0172	0.0520	0.0189	0.0252	0.0153	0.0165
<b>I4F2C9</b>	0.0198	0.0194	0.0534	0.0216	0.0281	0.0206	0.0216
<b>I5F2C9</b>	0.0174	0.0168	0.0532	0.0178	0.0252	0.0123	0.0128
<b>I6F2C9</b>	0.0166	0.0160	0.0514	0.0169	0.0248	0.0125	0.0134
Media per ogni sonda	0.0202	0.0189	0.0525	0.0195	0.0264	0.0177	0.0188
4*Deviazione standard	0.0809	0.0755	0.2100	0.0779	0.1055	0.0706	0.0752

Dall'esame delle tabelle relative alle deviazioni standard per ogni livello e configurazione, si può rilevare un malfunzionamento della sonda in posizione 7, in particolare modo nelle configurazioni C0, C1, 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 solo le acquisizioni della sonda in posizione 6.

**Tabella 6.32:** Livelli di “zero” per il livello F0, relativi alla configurazione C0

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F0C0 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C0</b>	0.9407	1.3264	1.0595	1.1053	1.0949	1.0834	0.9140
<b>I2F0C0</b>	0.8951	1.1598	1.1150	1.1071	1.1235	1.1323	0.9370
<b>I3F0C0</b>	0.9561	1.0909	1.1192	1.1087	1.1326	1.1388	0.9371
<b>I4F0C0</b>	1.0365	1.1123	1.1418	1.1251	1.1387	1.1428	0.9494
<b>I5F0C0</b>	1.0890	1.1538	1.1393	1.1386	1.1586	1.1220	0.9344
<b>I6F0C0</b>	1.1522	1.1754	1.1409	1.1541	1.1786	1.1092	0.9381
Media per ogni sonda	1.0116	1.1698	1.1193	1.1232	1.1378	1.1214	0.9350

**Tabella 6.33:** Livelli di “zero” per il livello F1, relativi alla configurazione C0

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F1C0 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C0</b>	0.9029	1.3576	1.0425	1.1202	1.0513	1.2708	0.9454
<b>I2F1C0</b>	0.8979	1.1971	1.1294	1.1574	1.0961	1.3155	0.9877
<b>I3F1C0</b>	0.9532	1.1885	1.1442	1.1568	1.1024	1.2930	0.9591
<b>I4F1C0</b>	1.0444	1.2316	1.1504	1.1692	1.1092	1.2895	0.9693
<b>I5F1C0</b>	1.0250	1.1623	1.1498	1.1862	1.1288	1.3032	0.9798
<b>I6F1C0</b>	1.1026	1.2040	1.1526	1.1793	1.1246	1.2909	0.9905
Media per ogni sonda	0.9877	1.2235	1.1282	1.1615	1.1021	1.2938	0.9720

**Tabella 6.34:** Livelli di “zero” per il livello F2, relativi alla configurazione C0

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F2C0 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
I1F2C0	1.1955	0.6638	1.1154	1.2560	1.1097	1.1222	0.9944
I2F2C0	1.1470	0.6187	1.1518	1.2145	1.0972	1.1665	1.0294
I3F2C0	0.8652	1.4115	1.1112	1.1646	1.0650	1.1366	1.0324
I4F2C0	1.0143	1.3450	1.0811	1.1161	1.0080	1.0815	0.9910
I5F2C0	0.9192	1.2206	1.1265	1.1389	1.0316	1.0721	0.9798
I6F2C0	1.1297	1.3741	1.1962	1.1263	1.0888	1.0841	1.0104
Media per ogni sonda	1.0452	1.1056	1.1304	1.1694	1.0667	1.1105	1.0062

**Tabella 6.35:** Livelli di “zero” per il livello F0, relativi alla configurazione C1

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F0C1 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
I1F0C1	1.749	2.2857	2.0151	2.0318	2.0579	1.7591	1.7266
I2F0C1	2.0077	2.4776	2.4955	2.3411	2.3625	2.1613	2.0212
I3F0C1	2.0943	2.4255	2.3872	2.2311	2.2628	2.0721	1.9310
I4F0C1	2.2022	2.4673	2.364	2.2223	2.2503	2.0560	1.9088
I5F0C1	2.3606	2.5826	2.4729	2.333	2.3457	2.1571	2.0183
I6F0C1	2.3396	2.5183	2.4246	2.2725	2.2982	2.0687	1.9038
Media per ogni sonda	2.1256	2.4595	2.3599	2.2386	2.2629	2.0457	1.9183

**Tabella 6.36:** Livelli di “zero” per il livello F1, relativi alla configurazione C1

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F1C1 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
I1F1C1	1.9384	2.3131	2.034	2.0274	1.9902	2.2645	1.6859
I2F1C1	2.0801	2.3667	1.9040	1.8923	1.8967	2.1943	1.6420
I3F1C1	2.1821	2.3803	1.9644	1.9736	1.9459	2.2325	1.6857
I4F1C1	2.2533	2.3613	2.0079	1.9907	1.9865	2.2011	1.6648
I5F1C1	2.3595	2.4193	1.9826	1.9896	1.9660	2.2099	1.6671
I6F1C1	2.5253	2.6128	2.2484	2.2102	2.2504	2.3865	1.7726
Media per ogni sonda	2.2231	2.4089	2.0236	2.0140	2.0060	2.2481	1.6864

**Tabella 6.37:** Livelli di “zero” per il livello F2, relativi alla configurazione C1

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F2C1 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
I1F2C1	1.272	1.8015	1.5216	1.5612	1.5576	1.6545	1.3077
I2F2C1	1.4967	1.8495	1.7079	1.7264	1.7181	1.8929	1.5033
I3F2C1	1.7572	1.9797	1.6714	1.6583	1.6505	1.8229	1.4992
I4F2C1	1.796	1.9437	1.7333	1.7365	1.7486	1.8606	1.5145
I5F2C1	1.8874	1.9843	1.7308	1.7166	1.7188	1.8657	1.5169
I6F2C1	1.9947	2.0817	1.7725	1.7794	1.7869	1.9249	1.5422
Media per ogni sonda	1.7007	1.9401	1.6896	1.6964	1.6968	1.8369	1.4806

**Tabella 6.38:** Livelli di “zero” per il livello F0, relativi alla configurazione C2

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F0C2 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C2</b>	0.8977	1.2068	1.2503	1.0532	1.0732	1.4200	1.1734
<b>I2F0C2</b>	0.9387	1.1868	1.2350	1.0534	1.0817	1.4071	1.1661
<b>I3F0C2</b>	1.0226	1.2156	1.2616	1.0730	1.1012	1.4087	1.1705
<b>I4F0C2</b>	1.0713	1.2337	1.2363	1.0563	1.1013	1.4086	1.1516
<b>I5F0C2</b>	1.1095	1.2595	1.2400	1.0800	1.1132	1.4406	1.1646
<b>I6F0C2</b>	1.1441	1.2870	1.2402	1.0704	1.0999	1.4298	1.1635
Media per ogni sonda	1.0307	1.2316	1.2439	1.0644	1.0951	1.4191	1.1650

**Tabella 6.39:** Livelli di “zero” per il livello F1, relativi alla configurazione C2

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F1C2 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C2</b>	0.8206	1.4212	0.9569	0.9978	1.1498	1.3777	1.336
<b>I2F1C2</b>	0.7699	1.2681	1.0827	1.0161	1.1810	1.4353	1.3940
<b>I3F1C2</b>	0.7974	1.1877	1.0486	1.0027	1.1595	1.3982	1.3603
<b>I4F1C2</b>	0.9022	1.2388	1.0834	1.0615	1.2244	1.4087	1.3882
<b>I5F1C2</b>	0.9007	1.1732	1.1094	1.0596	1.2208	1.4349	1.3885
<b>I6F1C2</b>	0.9189	1.1729	1.0661	1.0172	1.1896	1.4153	1.3275
Media per ogni sonda	0.8516	1.2437	1.0579	1.0258	1.1875	1.4117	1.3658

**Tabella 6.40:** Livelli di “zero” per il livello F2, relativi alla configurazione C2

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F2C2 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C2</b>	0.6955	1.3303	0.9113	0.9309	1.1426	1.3759	0.9614
<b>I2F2C2</b>	0.7960	1.2867	1.0254	0.9611	1.1692	1.4013	0.9645
<b>I3F2C2</b>	0.7701	1.1627	1.0007	0.939	1.1399	1.3534	0.9443
<b>I4F2C2</b>	0.6865	1.0769	0.9442	0.8803	1.0902	1.2881	0.8784
<b>I5F2C2</b>	0.6424	0.9803	0.8880	0.8330	1.0423	1.2626	0.8324
<b>I6F2C2</b>	...	...	...	...	...	...	...
Media per ogni sonda	0.7181	1.1674	0.9539	0.9089	1.1168	1.3363	0.9162

**Tabella 6.41:** Livelli di “zero” per il livello F0, relativi alla configurazione C3

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F0C3 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C3</b>	0.7937	1.4677	1.0167	0.9282	1.0340	0.9097	0.7962
<b>I2F0C3</b>	0.7503	1.2642	1.0498	0.9593	1.0701	0.9528	0.8596
<b>I3F0C3</b>	0.7495	1.1501	1.0399	0.9563	1.0703	0.9511	0.8633
<b>I4F0C3</b>	0.7773	1.0933	1.0479	0.9631	1.0767	0.9446	0.8483
<b>I5F0C3</b>	0.7961	1.0486	1.0295	0.9570	1.0737	0.9465	0.8591
<b>I6F0C3</b>	0.8174	1.0361	0.9843	0.9414	1.0564	0.9316	0.8420
Media per ogni sonda	0.7807	1.1767	1.0280	0.9509	1.0635	0.9394	0.8448

Tabella 6.42: Livelli di “zero” per il livello F1, relativi alla configurazione C3

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F1C3 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F1C3	0.8253	1.4817	0.8859	0.9651	0.9470	0.9632	0.8835
I2F1C3	0.7565	1.2680	0.9323	0.9850	0.9665	0.9946	0.9184
I3F1C3	0.7327	1.1527	0.8931	0.9490	0.9327	0.9671	0.8956
I4F1C3	0.7506	1.1042	0.8942	0.9519	0.9368	0.9577	0.8894
I5F1C3	0.6689	1.0080	0.8888	0.9442	0.9351	0.9521	0.8831
I6F1C3	0.6679	0.9875	0.8567	0.9118	0.9012	0.9105	0.8508
Media per ogni sonda	0.7337	1.1670	0.8918	0.9512	0.9366	0.9575	0.8868

Tabella 6.43: Livelli di “zero” per il livello F2, relativi alla configurazione C3

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F2C3 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F2C3	0.8596	1.5719	1.0169	0.9910	0.9711	1.0116	0.9221
I2F2C3	0.5930	1.1529	1.0057	0.9787	0.9608	1.0127	0.9238
I3F2C3	0.5659	1.0110	0.9697	0.9395	0.9276	0.9899	0.9206
I4F2C3	0.6773	1.0392	0.9549	0.9140	0.8985	0.9760	0.8693
I5F2C3	0.5633	0.8729	0.9492	0.9106	0.8937	0.9612	0.8776
I6F2C3	0.7841	1.4319	0.8953	0.9347	0.9268	0.9846	0.9044
Media per ogni sonda	0.6739	1.1800	0.9653	0.9448	0.9298	0.9893	0.9030

Tabella 6.44: Livelli di “zero” per il livello F0, relativi alla configurazione C4

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F0C4 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F0C4	1.3667	0.9129	0.9043	0.9644	1.0174	0.9673	0.8858
I2F0C4	1.0197	0.9252	0.8919	0.9678	1.0262	0.9862	0.8974
I3F0C4	1.1099	0.8879	0.8482	0.9415	1.0065	0.9497	0.86
I4F0C4	1.1518	0.9073	0.8592	0.9826	1.0198	0.962	0.8767
I5F0C4	1.0101	0.9053	0.8542	0.9961	1.0395	0.9689	0.8793
I6F0C4	1.0030	0.863	0.8198	0.9634	1.0073	0.9351	0.8482
Media per ogni sonda	1.1102	0.9003	0.8629	0.9693	1.0195	0.9615	0.8746

Tabella 6.45: Livelli di “zero” per il livello F1, relativi alla configurazione C4

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F1C4 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F1C4	1.345	0.9475	0.8095	0.982	1.0223	0.9684	0.9162
I2F1C4	1.103	0.9779	0.8124	1.0324	1.0759	1.0237	0.9652
I3F1C4	1.1677	0.9623	0.8099	1.022	1.0927	1.0249	0.9617
I4F1C4	1.1585	0.9297	0.7941	1.0028	1.0898	1.0086	0.9538
I5F1C4	1.1027	0.7969	0.6678	0.8663	0.9662	0.9073	0.8476
I6F1C4	1.0719	0.8475	0.7366	0.9391	1.0206	0.948	0.8834
Media per ogni sonda	1.1581	0.9103	0.7717	0.9741	1.0446	0.9802	0.9213

**Tabella 6.46:** Livelli di “zero” per il livello F2, relativi alla configurazione C4

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F2C4 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C4</b>	1.3844	0.9937	0.8855	1.0007	1.0102	1.1124	1.1484
<b>I2F2C4</b>	0.9937	0.9498	0.8573	0.9815	1.0122	1.0889	1.1292
<b>I3F2C4</b>	1.0883	0.9227	0.8198	0.9523	0.9897	1.0433	1.0885
<b>I4F2C4</b>	1.1598	0.8751	0.7799	0.9127	0.9657	0.9874	1.0593
<b>I5F2C4</b>	0.9861	0.8376	0.731	0.8856	0.9274	0.9694	1.0051
<b>I6F2C4</b>	1.0758	0.8730	0.7745	0.9341	0.9833	1.0287	1.0760
Media per ogni sonda	1.1147	0.9087	0.8080	0.9445	0.9814	1.0384	1.0844

**Tabella 6.47:** Livelli di “zero” per il livello F0, relativi alla configurazione C5

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F0C5 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C5</b>	1.5006	0.9919	0.9354	0.9774	0.9817	0.9562	0.9029
<b>I2F0C5</b>	1.2883	0.9658	0.8995	0.9382	0.9244	0.9708	0.924
<b>I3F0C5</b>	1.6462	0.8655	0.8076	0.8955	0.8906	0.9487	0.8963
<b>I4F0C5</b>	1.5639	0.8402	0.7729	0.8228	0.8134	0.9043	0.8562
<b>I5F0C5</b>	1.5088	0.8025	0.7344	0.7845	0.7773	0.8624	0.8178
<b>I6F0C5</b>	1.5277	0.776	0.7024	0.7554	0.7431	0.8297	0.8062
Media per ogni sonda	1.5059	0.8737	0.8087	0.8623	0.8551	0.9120	0.8672

**Tabella 6.48:** Livelli di “zero” per il livello F1, relativi alla configurazione C5

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F1C5 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C5</b>	1.1993	1.0899	0.8468	1.0092	1.0428	1.0263	0.9444
<b>I2F1C5</b>	1.1827	1.073	0.8695	0.9636	0.9981	0.9659	0.8945
<b>I3F1C5</b>	1.1982	1.0626	0.8805	0.9403	0.9772	0.9225	0.8538
<b>I4F1C5</b>	1.2416	1.0416	0.8823	0.9255	0.9659	0.9081	0.8475
<b>I5F1C5</b>	1.152	1.0176	0.8821	0.8969	0.942	0.8903	0.8308
<b>I6F1C5</b>	1.1699	0.9894	0.8353	0.8795	0.9124	0.8625	0.8034
Media per ogni sonda	1.1906	1.0457	0.8661	0.9358	0.9731	0.9293	0.8624

**Tabella 6.49:** Livelli di “zero” per il livello F2, relativi alla configurazione C5

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F2C5 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C5</b>	1.1089	1.1154	0.9201	1.0156	1.1256	1.2145	1.0448
<b>I2F2C5</b>	1.1711	0.7595	0.9207	1.0252	1.1305	1.1901	1.0264
<b>I3F2C5</b>	1.2463	0.6761	0.899	0.9819	1.091	1.1336	0.9808
<b>I4F2C5</b>	1.3945	0.7331	0.9045	1.0009	1.1116	1.1553	1.003
<b>I5F2C5</b>	1.3485	0.7204	0.9172	1.0008	1.1139	1.1624	1.0043
<b>I6F2C5</b>	1.3563	0.7103	0.8946	0.9882	1.1069	1.1529	1.0123
Media per ogni sonda	1.2811	0.7648	0.8952	0.9794	1.0777	1.1095	0.9717

**Tabella 6.50:** Livelli di “zero” per il livello F0, relativi alla configurazione C6

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F0C6 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C6</b>	1.2019	1.2861	1.1528	0.9737	1.1334	0.9715	0.8969
<b>I2F0C6</b>	1.5042	1.0481	1.163	0.9958	1.1334	0.9535	0.8945
<b>I3F0C6</b>	1.6271	0.7453	1.127	0.9822	1.1188	0.9159	0.8663
<b>I4F0C6</b>	1.6557	0.7443	1.1417	0.9762	1.1200	0.9037	0.8576
<b>I5F0C6</b>	1.6210	0.6614	1.0391	0.886	1.0213	0.8019	0.7550
<b>I6F0C6</b>	1.9533	0.7749	1.1304	0.9764	1.1169	0.8873	0.8418
Media per ogni sonda	1.5939	0.8767	1.1257	0.9651	1.1073	0.9056	0.8520

**Tabella 6.51:** Livelli di “zero” per il livello F1, relativi alla configurazione C6

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F1C6 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F1C6</b>	1.5247	1.3165	0.5326	1.0245	1.1411	1.0370	1.1560
<b>I2F1C6</b>	1.4912	1.3773	0.5192	1.0495	1.1634	1.0287	1.1634
<b>I3F1C6</b>	1.5111	1.3406	0.4172	1.0368	1.1583	1.0109	1.1557
<b>I4F1C6</b>	1.5326	1.3393	0.2603	1.0076	1.1113	0.9712	1.132
<b>I5F1C6</b>	1.5387	1.3852	0.2470	1.0078	1.1345	0.9787	1.1389
<b>I6F1C6</b>	1.6125	1.4127	0.2401	0.9859	1.1058	0.9633	1.1245
Media per ogni sonda	1.5351	1.3619	0.3694	1.0187	1.1357	0.9983	1.1451

**Tabella 6.52:** Livelli di “zero” per il livello F2, relativi alla configurazione C6

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F2C6 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F2C6</b>	1.2404	0.6449	1.1993	0.9723	1.0471	1.0997	-1.0522
<b>I2F2C6</b>	1.1628	0.7290	1.2027	1.0224	1.0900	1.1241	-1.0782
<b>I3F2C6</b>	1.1920	0.7677	1.1964	1.0375	1.0803	1.0946	-1.0688
<b>I4F2C6</b>	1.2591	0.7994	1.1873	1.0030	1.0513	1.0637	-1.0555
<b>I5F2C6</b>	1.1346	0.8163	1.1927	0.9685	1.0214	1.0376	-1.0372
<b>I6F2C6</b>	1.2584	0.7562	1.1153	0.8878	0.9397	0.9434	-0.9704
Media per ogni sonda	1.2079	0.7523	1.1823	0.9819	1.0383	1.0605	-1.0437

**Tabella 6.53:** Livelli di “zero” per il livello F0, relativi alla configurazione C7

<b>Livelli di “zero” per ogni sonda livello F0C7 [cm]</b>							
<b>Codice Onda</b>	<b>WG1</b>	<b>WG2</b>	<b>WG3</b>	<b>WG4</b>	<b>WG5</b>	<b>WG6</b>	<b>WG7</b>
<b>I1F0C7</b>	1.2800	0.7469	0.9543	1.0317	1.1822	1.1987	0.9628
<b>I2F0C7</b>	1.3534	0.9548	1.0795	1.1262	1.2699	1.2208	0.9962
<b>I3F0C7</b>	1.4297	1.0570	0.9724	1.2154	1.3732	1.2254	0.9914
<b>I4F0C7</b>	1.4812	1.0948	0.9552	1.2620	1.4346	1.2416	1.0034
<b>I5F0C7</b>	1.4667	1.1072	0.9470	1.2715	1.4526	1.2587	1.0165
<b>I6F0C7</b>	1.5481	1.0914	0.9660	1.2584	1.4189	1.2669	1.0199
Media per ogni sonda	1.4265	1.0087	0.9791	1.1942	1.3552	1.2354	0.9984

**Tabella 6.54:** Livelli di “zero” per il livello F1, relativi alla configurazione C7

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F1C7 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F1C7	1.1249	-0.1039	0.4554	0.9434	0.9352	0.9970	0.9312
I2F1C7	1.1947	-0.2830	0.4009	1.0502	1.0501	1.1100	1.0321
I3F1C7	1.2583	-0.2670	0.3524	1.0353	1.0375	1.1284	1.0410
I4F1C7	1.3418	-0.1932	0.3312	1.0084	1.0169	1.1121	1.0271
I5F1C7	1.3760	-0.1881	0.2959	0.9693	0.948	1.0828	1.0087
I6F1C7	1.4218	-0.1999	0.2846	0.9031	0.9076	1.0122	0.9558
Media per ogni sonda	1.2863	-0.2059	0.3534	0.9850	0.9826	1.0738	0.9993

**Tabella 6.55:** Livelli di “zero” per il livello F2, relativi alla configurazione C7

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F2C7 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F2C7	1.0351	0.1556	0.7600	1.0293	1.0065	1.0294	0.9490
I2F2C7	1.1902	0.1600	0.7881	1.0485	1.0321	1.0177	0.9640
I3F2C7	1.282	0.1722	0.7808	1.0011	1.0135	0.9847	0.9288
I4F2C7	1.3372	0.1951	0.7520	0.9823	0.9897	0.9415	0.8761
I5F2C7	1.3594	0.2127	0.7768	1.0019	0.9917	0.9608	0.9151
I6F2C7	1.4862	0.2140	0.7671	0.9848	0.9875	0.9355	0.8996
Media per ogni sonda	1.2817	0.1849	0.7708	1.0080	1.0035	0.9783	0.9221

**Tabella 6.56:** Livelli di “zero” per il livello F0, relativi alla configurazione C8

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F0C8 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F0C8	1.2256	-0.0331	0.5155	1.1325	1.0346	1.1988	0.8995
I2F0C8	1.2704	-0.0873	0.4461	1.0046	0.9027	1.0721	0.8289
I3F0C8	1.3639	-0.0953	0.462	1.0057	0.9074	1.0542	0.8055
I4F0C8	1.4316	-0.0923	0.4691	1.0103	0.9318	1.0485	0.7969
I5F0C8	1.4782	-0.1213	0.4298	1.0017	0.9235	1.0453	0.7913
I6F0C8	1.5559	-0.1228	0.434	0.9821	0.9141	1.0214	0.7713
Media per ogni sonda	1.3876	-0.0920	0.4594	1.0228	0.9357	1.0734	0.8156

**Tabella 6.57:** Livelli di “zero” per il livello F1, relativi alla configurazione C8

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F1C8 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F1C8	1.0488	0.073	0.6187	1.0171	1.0008	1.2058	0.9316
I2F1C8	0.9709	0.0622	0.5954	0.9896	0.971	1.1938	0.9299
I3F1C8	0.9973	0.0827	0.5747	0.9708	0.9634	1.1747	0.9122
I4F1C8	1.0501	0.094	0.5612	0.9494	0.9385	1.1578	0.9053
I5F1C8	1.0879	0.0859	0.5398	0.9425	0.9347	1.1402	0.8941
I6F1C8	1.0994	0.02	0.4741	0.8879	0.8817	1.0833	0.8356
Media per ogni sonda	1.0424	0.0696	0.5607	0.9596	0.9484	1.1593	0.9015

Tabella 6.58: Livelli di “zero” per il livello F2, relativi alla configurazione C8

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F2C8 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F2C8	0.8846	0.3062	0.7889	1.0426	0.9957	1.0941	0.9924
I2F2C8	0.7452	0.1619	0.7558	1.0213	0.9759	1.0939	0.9855
I3F2C8	0.7937	0.1159	0.7347	0.9925	0.9534	1.0708	0.9708
I4F2C8	0.8384	0.0623	0.6947	0.9424	0.9161	1.0218	0.9321
I5F2C8	0.7859	0.0398	0.6664	0.9228	0.8919	1.0067	0.9012
I6F2C8	0.8242	-0.0093	0.6142	0.8733	0.844	0.9537	0.8629
Media per ogni sonda	0.8120	0.1128	0.7091	0.9658	0.9295	1.0402	0.9408

Tabella 6.59: Livelli di “zero” per il livello F0, relativi alla configurazione C9

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F0C9 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F0C9	0.9152	0.2998	0.5235	0.9828	0.9815	1.0843	0.8992
I2F0C9	0.8073	0.2018	0.4874	0.9570	0.9344	1.3913	0.9107
I3F0C9	0.8395	0.1960	0.4876	0.9436	0.9277	1.4138	0.9060
I4F0C9	0.9028	0.1844	0.4428	0.9080	0.9015	1.3942	0.8906
I5F0C9	0.7470	0.1325	0.4255	0.8861	0.8552	1.3706	0.8705
I6F0C9	0.8167	0.1009	0.4124	0.8641	0.8489	1.3569	0.8535
Media per ogni sonda	0.8381	0.1859	0.4632	0.9236	0.9082	1.3352	0.8884

Tabella 6.60: Livelli di “zero” per il livello F1, relativi alla configurazione C9

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F1C9 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F1C9	0.7449	0.3612	0.5344	0.9612	0.9316	0.9929	0.9354
I2F1C9	0.7084	0.2605	0.4356	0.9341	0.9098	0.9878	0.9370
I3F1C9	0.8294	0.2697	0.3723	0.901	0.905	0.973	0.9212
I4F1C9	0.8714	0.2515	0.3334	0.8978	0.8932	0.9453	0.9127
I5F1C9	0.8026	0.2205	0.3011	0.875	0.8647	0.9423	0.8984
I6F1C9	0.8460	0.1685	0.2748	0.8351	0.8261	0.9144	0.8695
Media per ogni sonda	0.8005	0.2553	0.3753	0.9007	0.8884	0.9593	0.9124

Tabella 6.61: Livelli di “zero” per il livello F2, relativi alla configurazione C9

Livelli di “zero” per ogni sonda livello F2C9 [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F2C9	0.9152	0.2998	0.5235	0.9828	0.9815	1.0843	0.8992
I2F2C9	0.8073	0.2018	0.4874	0.9570	0.9344	1.3913	0.9107
I3F2C9	0.8395	0.1960	0.4876	0.9436	0.9277	1.4138	0.9060
I4F2C9	0.9028	0.1844	0.4428	0.908	0.9015	1.3942	0.8906
I5F2C9	0.7470	0.1325	0.4255	0.8861	0.8552	1.3706	0.8705
I6F2C9	0.8167	0.1009	0.4124	0.8641	0.8489	1.3569	0.8535
Media per ogni sonda	0.8381	0.1859	0.4632	0.9236	0.9082	1.3352	0.8884

Dall'analisi dei livelli di "zero" di ogni sonda, per ciascun livello di prova, emerge come la sonda 2, a partire dalla configurazione C4 abbia iniziato a funzionare male registrando valori più bassi rispetto alle altre; nella configurazione C9, inoltre, si rileva un malfunzionamento anche della sonda 3. Da notare inoltre come nella configurazione C1 si rilevino valori superiori, per ogni sonda, rispetto alla configurazione C0, tale effetto è dovuto all'azionamento del ricircolo che provoca un innalzamento del livello dell'acqua in canale.

## 6.2 Analisi preliminare della sessione sperimentale

### 6.2.1 Prove relative alla configurazione C0

Nei giorni 20-21-22 e 25 Febbraio sono state effettuate le prove definitive per la configurazione C0, 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 6.62 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retro-pala spenta.

**Tabella 6.62:** Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C0.

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 6.63 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 C0, 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 6.63:** Rilievi della quota della cresta della scogliera per le prove relative alla configurazione C0.

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 6.64 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per le configurazioni C0, C1, C2 e C3, 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 6.64: Parametri caratteristici registrati per la configurazione C0.

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]
I1F0C0	6.67	0.35	1.1	1.9	-0.06	2.50	1.2	2.8	0.83	5.15
I2F0C0	7.38	0.41	1.4	2.1	-0.10	3.26	1.5	2.2	1.09	5.15
I3F0C0	7.56	0.44	1.8	2.6	-0.09	3.46	1.7	3.5	1.11	5.15
I4F0C0	8.16	0.43	1.4	2.6	0.08	3.66	1.6	3.7	1.53	5.15
I5F0C0	8.60	0.43	1.9	3.2	0.07	4.09	25.6	5.1	1.68	5.15
I6F0C0	8.85	0.46	1.8	3.3	0.25	3.97	25.6	5.2	1.80	5.15
I1F1C0	6.81	0.36	1.2	1.9	-0.04	3.2	1.2	3.0	0.94	4.30
I2F1C0	7.56	0.42	1.4	2.1	-0.11	4.06	1.5	2.3	1.27	4.13
I3F1C0	7.89	0.45	1.8	2.7	-0.11	4.23	1.7	3.7	1.35	4.13
I4F1C0	8.48	0.42	1.5	2.6	0.04	4.59	1.6	3.6	1.85	4.14
I5F1C0	8.90	0.43	1.6	3.0	-0.01	4.86	25.6	4.4	1.98	4.14
I6F1C0	9.16	0.45	1.9	3.5	0.16	5.05	25.6	4.7	2.08	4.16
I1F2C0	7.03	0.33	1.2	2.0	-0.14	3.38	1.2	2.9	1.02	3.38
I2F2C0	7.85	0.38	1.4	2.3	-0.15	4.45	1.5	2.0	1.38	3.33
I3F2C0	8.05	0.43	1.9	2.9	-0.15	4.41	1.7	3.6	1.44	3.22
I4F2C0	8.70	0.39	1.5	2.3	0.03	4.93	1.5	2.7	1.96	3.18
I5F2C0	9.36	0.41	1.8	2.8	-0.06	5.27	1.6	3.8	2.03	3.21
I6F2C0	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 della durata di 15min, 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 6.65 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).

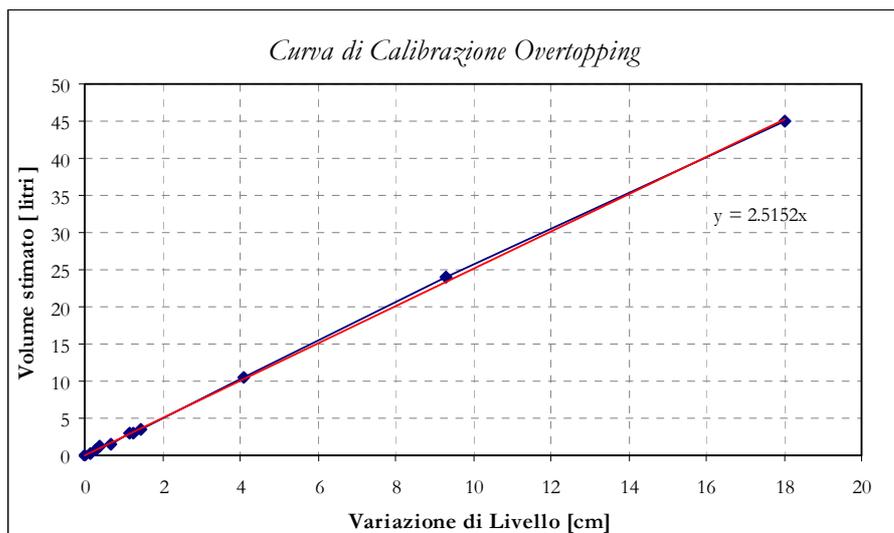


Figura 6.2 - Curva di calibrazione per la stima dei volumi di overtopping.

Tabella 6.65: Misure di overtopping, relative alla configurazione C0 senza.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Letture iniziale [cm]	Letture finale [cm]	$\Delta$ livello [cm]	Volume di Overtopping [litri]
I1F0C0	0	0	7.15	7.15	0	0
I2F0C0	0	4	7.15	7.15	0	0
I3F0C0	0	6	7.15	7.15	0	0
I4F0C0	0	7	7.15	7.15	0	0
I5F0C0	1	24	7.15	7.82	0.67	1.61
I6F0C0	6	39	7.82	8.20	0.38	1.17
I1F1C0	0	1	6.78	6.78	0	0
I2F1C0	0	14	6.78	6.78	0	0
I3F1C0	2	19	7.01	7.01	0	0
I4F1C0	5	19	7.01	7.15	0.14	0.25
I5F1C0	23	46	7.15	8.30	1.15	2.99
I6F1C0	46	59	8.3	12.4	4.10	10.52
I1F2C0	0	0	10.13	10.13	0	0
I2F2C0	1	14	10.13	10.44	0.31	0.74
I3F2C0	20	28	6.34	7.60	1.26	3.10
I4F2C0	28	40	7.60	9.03	1.43	3.57
I5F2C0	80	48	9.03	18.32	9.29	24.06
I6F2C0	118	31	5.76	23.80	18.04	44.97

### 6.2.2 Prove relative alla configurazione C1

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 ondosso, nella zona protetta, che altrimenti sarebbe sovradimensionato.

→ ***Livelli idrici in canale***

In Tabella 6.66 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retro-pala spenta.

**Tabella 6.66:** Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C1.

<b>Livelli idrici in canale [cm]</b>					
<b>F0</b>		<b>F1</b>		<b>F2</b>	
<b>Profondità alla pala [cm]</b>	<b>Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]</b>	<b>Profondità alla pala [cm]</b>	<b>Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]</b>	<b>Profondità alla pala [cm]</b>	<b>Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]</b>
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 6.67 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

**Tabella 6.67:** Rilievi della quota della cresta della scogliera per la configurazione C1.

<b>Rilievi della quota della cresta [cm]</b>		
<b>DATA</b>	<b>LIVELLO DI PROVA</b>	<b>Lettura del livello della cresta della scogliera</b>
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 6.68 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondosso, nella sessione sperimentale per la configurazione C1, con sistema di ricircolo acceso.

**Tabella 6.68:** Parametri caratteristici registrati per la configurazione C1.

Codice Onda	H <sub>m0i</sub> [cm]	K <sub>r</sub>	T <sub>p</sub> [sec]	T <sub>m0-lt</sub> [sec]	Level WG 3-4-5 [cm]	H <sub>m0t</sub> [cm]	T <sub>pt</sub> [sec]	T <sub>m0-lt</sub> [sec]	Level WG 6 [cm]	Freeboard [cm]
I1F0C1	6.68	0.32	1.2	1.9	0.20	2.61	1.2	2.3	0.70	5.01
I2F0C1	7.34	0.41	1.5	2.0	-0.16	3.45	1.5	2	0.54	4.80
I3F0C1	7.66	0.43	1.8	2.7	-0.05	3.55	1.8	3.3	0.66	4.80
I4F0C1	8.18	0.42	1.4	2.6	0.04	3.69	1.6	3.4	0.95	4.80
I5F0C1	8.53	0.43	1.9	3.1	-0.07	4.07	25.6	4.9	0.96	4.80
I6F0C1	8.93	0.44	2.3	3.4	0.16	3.87	25.6	5.4	1.18	4.82
I1F1C1	6.79	0.33	1.2	1.9	-0.30	3.41	1.2	2.5	0.27	3.85
I2F1C1	7.30	0.41	1.4	2.0	-0.26	4.24	1.5	2.2	0.58	3.88
I3F1C1	7.68	0.43	1.8	2.7	-0.26	4.39	1.8	3.5	0.60	3.88
I4F1C1	8.38	0.41	1.5	2.5	-0.12	4.67	1.6	3.4	1.13	3.88
I5F1C1	8.74	0.43	1.9	3.0	-0.16	5.00	25.6	4.6	1.25	3.90
I6F1C1	9.16	0.45	1.8	3.4	-0.08	5.16	1.7	4.7	1.34	3.88
I1F2C1	6.99	0.31	1.2	2.0	0.12	3.87	1.2	2.6	0.97	3.23
I2F2C1	8.01	0.37	1.4	2.2	-0.11	5.12	1.5	2	1.16	3.10
I3F2C1	8.02	0.41	1.9	2.8	-0.11	4.83	1.7	3.6	1.11	3.10
I4F2C1	8.78	0.38	1.5	2.3	0.03	5.45	1.5	2.7	1.69	3.10
I5F2C1	9.38	0.40	1.8	2.7	0	5.75	1.6	3.6	1.73	3.10
I6F2C1	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 6.69 sono riportate le letture delle portate di ricircolo, effettuate sul display digitale del misuratore di portata magnetico, durante ciascun attacco ondos.

**Tabella 6.69:** Portate di ricircolo registrate durante la serie di prove relative alla configurazione C1

Codice Onda	Portata di ricircolo [l/sec]	Codice Onda	Portata di ricircolo [l/sec]	Codice Onda	Portata di ricircolo [l/sec]
I1F0C1	1.39-1.45	I1F1C1	1.60-1.71	I1F2C1	1.51-1.68
I2F0C1	1.40-1.45	I2F1C1	1.52-1.73	I2F2C1	1.57-1.72
I3F0C1	1.32-1.47	I3F1C1	1.61-1.69	I3F2C1	1.50-1.65
I4F0C1	1.31-1.45	I4F1C1	1.60-1.73	I4F2C1	1.47-1.67
I5F0C1	1.36-1.55	I5F1C1	1.58-1.71	I5F2C1	1.41-1.63
I6F0C1	1.33-1.54	I6F1C1	1.56-1.73	I6F2C1	1.48-1.78

→ **Overtopping**

In Tabella 6.70 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 6.70: Misure di overtopping relative alla configurazione C1.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Lettura iniziale [cm]	Lettura finale [cm]	$\Delta$ livello [cm]	Volume di Overtopping [litri]
I1F0C1	0	0	6.20	6.20	0	0
I2F0C1	0	20	6.30	6.30	0	0
I3F0C1	0	39	6.30	6.30	0	0
I4F0C1	0	25	6.40	6.40	0	0
I5F0C1	0	59	6.40	6.51	0.11	0.28
I6F0C1	6	71	6.40	6.64	0.24	0.62
I1F1C1	0	1	6.55	6.55	0	0
I2F1C1	0	9	6.55	6.55	0	0
I3F1C1	0	28	6.55	6.55	0	0
I4F1C1	0	25	6.55	6.55	0	0
I5F1C1	7	98	6.55	7.51	0.96	2.47
I6F1C1	16	96	7.52	9.22	1.70	4.37
I1F2C1	0	9	6.22	6.22	0	0
I2F2C1	1	37	6.22	6.32	0.10	0.26
I3F2C1	15	40	6.32	7.42	1.10	2.83
I4F2C1	18	31	7.42	8.48	1.06	2.72
I5F2C1	69	67	8.48	14.18	5.70	14.65
I6F2C1	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 6.71 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retro-pala spenta.

Tabella 6.71: 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 6.72 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

**Tabella 6.72:** Rilievi della quota della cresta della scogliera per la configurazione C2.

<b>Rilievi della quota della cresta [cm]</b>		
<b>DATA</b>	<b>LIVELLO DI PROVA</b>	<b>Letture del livello della cresta della scogliera</b>
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 6.73 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 6.73:** Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C2.

<b>Codice Onda</b>	<b>H<sub>m0i</sub> [cm]</b>	<b>K<sub>r</sub></b>	<b>T<sub>p</sub> [sec]</b>	<b>T<sub>m0-li</sub> [sec]</b>	<b>Level WG 3-4-5 [cm]</b>	<b>H<sub>m0t</sub> [cm]</b>	<b>T<sub>pt</sub> [sec]</b>	<b>T<sub>m0-lt</sub> [sec]</b>	<b>Level WG 6 [cm]</b>	<b>Freeboard [cm]</b>
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

<b>I4F2C2</b>	9.55	0.29	1.4	2.1	0.11	7.14	12.8	4.3	0.95	-4.10
<b>I5F2C2</b>	10.02	0.29	1.9	2.8	0.02	8.11	12.8	6.9	0.87	-4.10
<b>I6F2C2</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

→ **Overtopping**

In Tabella 6.74 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 6.74:** Misure di overtopping relative alla configurazione C2.

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

#### 6.2.4 Prove relative alla configurazione C3

Nei giorni 9-10-15 e 16 Aprile 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 6.75 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retro-pala spenta.

**Tabella 6.75:** Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C3.

<b>Livelli idrici in canale [cm]</b>					
<b>F0</b>		<b>F1</b>		<b>F2</b>	
<b>Profondità alla pala [cm]</b>	<b>Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]</b>	<b>Profondità alla pala [cm]</b>	<b>Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]</b>	<b>Profondità alla pala [cm]</b>	<b>Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]</b>
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 6.76 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

**Tabella 6.76:** Rilievi della quota della cresta della scogliera per le prove relative alla configurazione C3.

<b>Rilievi della quota della cresta [cm]</b>		
<b>DATA</b>	<b>LIVELLO DI PROVA</b>	<b>Lettura del livello della cresta della scogliera</b>
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 6.77 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per la configurazione C3.

Tabella 6.77: Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C3.

Codice Onda	$H_{m0i}$ [cm]	$K_r$	$T_p$ [sec]	$T_{m0-Ii}$ [sec]	Level WG 3-4-5 [cm]	$H_{m0t}$ [cm]	$T_{pt}$ [sec]	$T_{m0-I t}$ [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 6.78 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 6.78: Misure di overtopping relative alla configurazione C3.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Letture iniziale [cm]	Letture finale [cm]	$\Delta$ livello [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

<b>I4F1C3</b>	7	67	7.60	8.34	0.74	1.86
<b>I5F1C3</b>	38	82	8.34	11.23	2.89	7.27
<b>I6F1C3</b>	43	103	11.23	20.61	9.38	23.59
<b>I1F2C3</b>	2	28	6.43	6.61	0.18	0.45
<b>I2F2C3</b>	14	80	6.61	8.26	1.65	4.15
<b>I3F2C3</b>	32	88	8.26	14.20	5.94	14.94
<b>I4F2C3</b>	49	96	7.10	13.13	6.03	15.17
<b>I5F2C3</b>	101	98	6.60	25.81	19.21	48.32
<b>I6F2C3</b>	(8min) 56	(8min) 44	5.14	(8min)	-	-

### 6.2.5 Prove relative alla configurazione C4

Nei giorni 28-29 e 30 Aprile sono state svolte le prove definitive per la configurazione C4. In tale configurazione la barriera in massi ha una larghezza di berma pari a 80 cm (32 m nel prototipo) e cresta sommersa di -2.5 cm (-1 m nel prototipo), mentre la barriera in geocontenitori, formata da tre geocontenitori affiancati è posta ad una distanza di 1.5 m (60 m nel prototipo) dal piede esterno della barriera, ha una larghezza di berma pari a 50 cm (20 m nel prototipo) e cresta sommersa di -7.5 cm (-3 m nel prototipo). Per tali prove, così come per tutte le seguenti, è stato deciso di non azionare il sistema di ricircolo.

#### → *Livelli idrici in canale*

In Tabella 6.79 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retropala spenta.

**Tabella 6.79:** Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C4.

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

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

Gli esperimenti relativi alla configurazione C4 sono stati eseguiti in tre sessioni giornaliere, all'inizio di ogni prova è stato eseguito il rilievo della quota di entrambe le

strutture, portando il livello dell'acqua in canale, tangente alla cresta delle due scogliere, ed effettuando la lettura alla punta idrometrica.

In Tabella 6.80 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

**Tabella 6.80:** Rilievi delle quote della creste delle scogliere per le prove relative alla configurazione C4.

Rilievi della quota della cresta [cm]			
DATA	LIVELLO DI PROVA	Lettura del livello di cresta della scogliera in massi interna	Lettura del livello di cresta della barriera in geocontenitori
28/04/2008	F0	23.33	28.30
29/04/2008	F1	23.32	28.24
30/04/2008	F2	23.32	28.24

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

Di seguito sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per le configurazioni C4, C5, C6, C7 e C8, in particolare:

- $H_{m0i}$  (scogliera esterna): altezza d'onda incidente al piede della scogliera esterna filtrata dall'onda riflessa (misurata dalle sonde in posizione 2, 3);
- $K_r$  (scogliera esterna) : coefficiente di riflessione dell'onda incidente al piede della scogliera esterna (misurata dalle sonde in posizione 2, 3);
- $T_p$  (scogliera esterna): periodo di picco registrato davanti alla scogliera esterna (media dei  $T_p$  misurati dalle sonde in posizione 2, 3);
- $T_{m0-li}$  (scogliera esterna): periodo medio registrato davanti alla scogliera esterna (media dei  $T_m$  misurati dalle sonde in posizione 2, 3);
- **Level WG 2-3:** media del livello misurato dalle sonde in posizione 2, 3.
- $H_{m0i}$  (scogliera interna): altezza d'onda incidente al piede della scogliera interna filtrata dall'onda riflessa (misurata dalle sonde in posizione 4, 5);
- $K_r$  (scogliera interna) : coefficiente di riflessione dell'onda incidente al piede della scogliera interna (misurata dalle sonde in posizione 4, 5);
- $T_p$  (scogliera interna): periodo di picco registrato davanti alla scogliera interna (media dei  $T_p$  misurati dalle sonde in posizione 4, 5);
- $T_{m0-li}$  (scogliera interna): periodo medio registrato davanti alla scogliera interna (media dei  $T_m$  misurati dalle sonde in posizione 4, 5);

- **Level WG 4-5:** media del livello misurato dalle sonde in posizione 4, 5.
- **$H_{m0t}$ :** altezza d'onda trasmessa dietro la scogliera interna (misurata dalla sonda in posizione 6);
- **$T_{pt}$ :** periodo di picco registrato dietro la scogliera interna ( $T_p$  misurato dalla sonda in posizione 6);
- **$T_{m0-t}$ :** periodo medio registrato dietro la scogliera interna ( $T_m$  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 dei diversi tipi di scogliere realizzate nella configurazione in esame, 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 ondoso.

In Tabella 6.81 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per la configurazione C4.

**Tabella 6.81:** Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C4.

Codice Onda	H <sub>m0i</sub> (scogliera est.)	K <sub>r</sub> (scogliera est.)	T <sub>p</sub> (scogliera est.) [sec]	T <sub>m0-li</sub> scogliera est.) [sec]	Level WG 2-3 [cm]	Freeboard (scogliera est.)	H <sub>m0i</sub> (scogliera int.) [cm]	K <sub>r</sub> (scogliera int.)	T <sub>p</sub> (scogliera int.) [sec]	T <sub>m0-li</sub> (scogliera int.) [sec]	Level WG 4-5 [cm]	Freeboard (scogliera int.)	H <sub>m0t</sub>	T <sub>pt</sub>	T <sub>m0-1t</sub>	Level WG 6 [cm]
I1F0C4	6.67	0.18	1.2	1.7	-0.07	-7.64	5.29	0.84	1.2	1.65	0.155	-2.67	3.10	12.80	3.40	0.49
I2F0C4	8.00	1.85	1.6	1.7	-0.105	-7.64	6.00	0.21	1.5	1.75	0.17	-2.67	3.77	1.5	3.5	0.62
I3F0C4	7.81	0.30	1.7	2.0	-0.05	-7.64	5.86	0.22	1.7	2	0.045	-2.67	3.61	25.6	4.4	0.63
I4F0C4	8.93	0.28	1.6	1.9	0.11	-7.64	6.54	0.26	1.3	2.25	0.42	-2.67	4.05	25.6	5.1	0.92
I5F0C4	9.23	0.30	1.8	2.1	0.1	-7.64	6.77	0.28	1.6	2.5	0.375	-2.67	4.63	12.8	7.2	0.92
I6F0C4	9.52	0.32	1.9	2.4	0.275	-5.64	7.09	0.29	4.95	3.15	0.53	-0.67	4.84	25.6	8.5	1.08
I1F1C4	6.50	0.18	1.2	1.5	0.005	-8.73	5.67	0.17	1.1	1.5	0.105	-3.72	3.69	12.8	3.4	0.39
I2F1C4	8.37	0.24	1.6	1.7	0.115	-8.73	6.53	0.22	1.5	1.75	0.15	-3.72	4.35	1.5	3.6	0.49
I3F1C4	8.21	0.30	1.7	2.1	0.1	-8.73	6.49	0.23	1.7	2.15	0.13	-3.72	4.28	12.8	4.3	0.47
I4F1C4	0.56	0.27	1.6	1.8	0.2	-8.73	7.25	0.25	1.6	2.1	0.35	-3.72	4.8	25.6	5.1	0.75
I5F1C4	9.76	0.30	1.8	2.1	0.16	-8.73	7.59	0.26	1.6	2.6	0.315	-3.72	5.38	12.8	7.2	0.75
I6F1C4	9.79	0.30	1.7	2.3	0.295	-8.74	7.65	0.29	1.6	2.95	0.455	-3.73	5.45	25.6	8	0.87
I1F2C4	7.04	0.17	1.2	1.4	0	-9.67	6.01	0.17	1.15	1.45	0.055	-4.75	4.42	1.2	3.1	0.26
I2F2C4	8.67	0.24	1.6	1.7	0.04	-9.67	6.88	0.23	1.5	1.75	0.095	-4.75	5.25	1.5	3.1	0.36
I3F2C4	8.46	0.31	1.7	2.0	0.035	-9.67	6.95	0.26	1.7	2.1	0.08	-4.75	5.2	25.6	4.5	0.35
I4F2C4	10.03	0.27	1.6	1.7	0.18	-9.67	7.76	0.27	1.6	1.8	0.265	-4.75	5.59	1.5	4.1	0.66
I5F2C4	10.27	0.31	1.8	2.2	0.125	-9.67	8.20	0.27	1.3	2.75	0.225	-4.75	6.35	12.8	7.6	0.61
I6F2C4	10.31	0.30	1.7	2.2	0.19	-9.67	8.24	0.29	1.6	2.85	0.285	-4.75	6.21	25.6	6.6	0.66

→ **Overtopping**

In Tabella 6.82 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 precisa del volume di overtopping, poiché dopo 10 minuti dal lancio dell'attacco ondoso, la vasca nella quale viene convogliata l'acqua tracimata, ha raggiunto il livello di saturazione.

**Tabella 6.82:** Misure di overtopping relative alla configurazione C4.

<b>Codice Onda</b>	<b>N° Green Water</b>	<b>N° White Water</b>	<b>Letture iniziale [cm]</b>	<b>Letture finale [cm]</b>	<b>Δlivello [cm]</b>	<b>Volume di Overtopping [litri]</b>
<b>I1F0C4</b>	0	0	6.52	6.52	0	0
<b>I2F0C4</b>	0	10	6.52	6.52	0	0
<b>I3F0C4</b>	0	17	6.52	6.52	0	0
<b>I4F0C4</b>	0	35	6.80	6.80	0	0
<b>I5F0C4</b>	8	45	6.80	7.08	0.28	0,7
<b>I6F0C4</b>	10	58	7.08	7.84	0.76	1,91
<b>I1F1C4</b>	0	10	6.52	6.52	0	0
<b>I2F1C4</b>	3	36	5.32	5.61	0.29	0,73
<b>I3F1C4</b>	5	30	5.61	5.87	0.26	0,65
<b>I4F1C4</b>	17	65	6.11	6.50	0.39	0,98
<b>I5F1C4</b>	26	38	6.50	8.50	2	5,03
<b>I6F1C4</b>	35	69	8.50	14.03	5.53	13,91
<b>I1F2C4</b>	0	58	6.02	6.02	0	0
<b>I2F2C4</b>	7	70	6.20	7.18	0.98	2,46
<b>I3F2C4</b>	65	75	7.18	10.52	3.34	8,4
<b>I4F2C4</b>	30	86	10.52	14.61	4.09	10,29
<b>I5F2C4</b>	98	75	22.29	43.49	21.2	43,49
<b>I6F2C4</b>	118	68	25.8	50.93	25.13	50,93 (10 min)

### 6.2.6 Prove relative alla configurazione C5

Nei giorni 05-06 e 07 Maggio sono state svolte le prove definitive per la configurazione C5. In tale configurazione la barriera in massi ha una larghezza di berma pari a 80 cm (32 m nel prototipo) e cresta sommersa di -2.5 cm (-1 m nel prototipo), mentre la barriera in geocontenitori, formata da tre geocontenitori affiancati è posta ad una distanza di 1.8 m (75 m nel prototipo) dal piede esterno della barriera, ha una larghezza di berma pari a 50 cm (20 m nel prototipo) e cresta sommersa di -7.5 cm (-3 m nel prototipo).

→ **Livelli idrici in canale**

In Tabella 6.83 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retro-pala spenta.

**Tabella 6.83:** Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C5.

Livelli idrici in canale [cm]					
F0		F1		F2	
Profondità alla pala [cm]	Letture al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Letture al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Letture 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 C5 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 6.84 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

**Tabella 6.84:** Rilievi della quota della cresta della scogliera per le prove relative alla configurazione C5.

Rilievi della quota della cresta [cm]			
DATA	LIVELLO DI PROVA	Letture del livello di cresta della scogliera in massi interna	Letture del livello di cresta della barriera in geocontenitori
05/05/2008	F0	23.30	29.63
06/05/2008	F1	23.34	30.14
07/05/2008	F2	23.33	30.20

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

In Tabella 6.85 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per la configurazione C5.

**Tabella 6.85:** Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C5.

Codice Onda	H <sub>m0i</sub> (scogliera est.)	K <sub>r</sub> (scogliera est.)	T <sub>p</sub> (scogliera est.) [sec]	T <sub>m0-li</sub> (scogliera est.) [sec]	Level WG 2-3 [cm]	Freeboard (scogliera est.)	H <sub>m0i</sub> (scogliera int.) [cm]	K <sub>r</sub> (scogliera int.)	T <sub>p</sub> (scogliera int.) [sec]	T <sub>m0-li</sub> (scogliera int.) [sec]	Level WG 4-5 [cm]	Freeboard (scogliera int.)	H <sub>m0t</sub>	T <sub>pt</sub>	T <sub>m0-lt</sub>	Level WG 6 [cm]
I1F0C5	6.85	0.18	1.3	1.5	-0.13	-9.09	5.87	0.17	1.2	1.5	-0.005	-2.76	3.28	12.8	3.4	0.47
I2F0C5	8.06	0.24	1.4	1.7	-0.12	-9.09	6.77	0.23	1.45	1.7	0	-2.76	3.68	1.5	3.2	0.56
I3F0C5	7.31	0.24	1.7	2.1	-0.135	-9.09	6.48	0.23	1.7	2.1	-0.025	-2.76	3.7	25.6	4.5	0.56
I4F0C5	8.70	0.26	1.5	1.9	0.04	-9.09	7.08	0.25	1.45	1.9	0.185	-2.76	4.03	25.6	5.6	0.8
I5F0C5	8.80	0.27	1.6	2.2	0.015	-9.09	7.26	0.28	1.6	2.2	0.165	-2.76	4.53	12.8	7.7	0.82
I6F0C5	8.94	0.28	1.4	2.4	0.175	-9.09	7.39	0.30	1.7	2.4	0.335	-2.76	4.8	25.6	8.1	0.95
I1F1C5	6.70	0.19	1.2	1.4	-0.01	-10.58	6.10	0.18	1.2	1.4	-0.015	-3.78	3.65	1.2	2.8	0.31
I2F1C5	7.73	0.24	1.4	1.7	-0.05	-10.58	6.96	0.25	1.4	1.7	0.01	-3.78	4.23	1.5	3.3	0.46
I3F1C5	7.14	0.26	1.7	2.2	-0.05	-10.58	6.77	0.24	1.7	2.2	0.025	-3.78	4.35	25.6	4.6	0.47
I4F1C5	8.70	0.25	1.6	1.9	0.095	-10.58	7.61	0.25	1.6	1.9	0.195	-3.78	4.64	25.6	4.9	0.74
I5F1C5	8.82	0.28	1.6	2.3	0.04	-10.58	7.92	0.28	1.8	2.3	0.17	-3.78	5.43	12.8	8.1	0.72
I6F1C5	9.06	0.28	1.6	2.3	0.155	-10.52	8.02	0.29	1.5	2.3	0.3	-3.72	5.5	12.8	7.8	0.83
I1F2C5	6.28	0.19	1.3	1.4	-0.16	-11.59	6.35	0.19	1.15	1.4	-0.005	-4.72	4.65	1.2	2.8	0.27
I2F2C5	6.99	0.26	1.4	1.7	-0.08	-11.7	7.37	0.25	1.45	1.7	-0.01	-4.83	5.32	1.5	3.1	0.39
I3F2C5	6.47	0.30	1.7	2.2	-0.06	-11.7	7.22	0.25	1.7	2.2	-0.015	-4.83	5.32	25.6	4.4	0.37
I4F2C5	7.49	0.32	1.6	1.9	0.245	-11.68	8.12	0.25	1.6	1.9	0.14	-4.81	5.68	12.8	4.3	0.67
I5F2C5	7.45	0.34	1.6	2.4	-0.12	-11.69	8.45	0.27	1.6	2.4	0.065	-4.82	6.44	12.8	8.3	0.59
I6F2C5	7.38	0.37	1.6	2.5	-0.06	-11.67	8.66	0.29	1.6	2.5	0.225	-4.80	6.63	25.6	7.9	0.69

→ **Overtopping**

In Tabella 6.86 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 6.86: Misure di overtopping relative alla configurazione C5.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Letture iniziale [cm]	Letture finale [cm]	$\Delta$ livello [cm]	Volume di Overtopping [litri]
I1F0C5	0	9	12.16	12.16	0	0
I2F0C5	0	20	12.16	12.16	0	0
I3F0C5	1	13	12.68	12.68	0	0
I4F0C5	1	44	12.68	12.68	0	0
I5F0C5	7	28	12.68	13.05	0.37	0,93
I6F0C5	32	58	13.05	14.43	1.38	3,47
I1F1C5	0	26	9.10	9.10	0	0
I2F1C5	2	21	9.27	9.45	0.18	0,45
I3F1C5	15	39	9.45	10.11	0.66	1,66
I4F1C5	9	39	10.11	10.50	0.39	0,98
I5F1C5	49	43	10.50	13.50	3.0	13,12
I6F1C5	47	58	13.50	20.65	7.15	17,98
I1F2C5	1	41	6.14	6.21	0.07	0,5
I2F2C5	9	54	6.21	7.31	0.1	2,79
I3F2C5	26	65	7.31	11.64	4.33	10,89
I4F2C5	36	89	5.6	10.43	4.83	12,15
I5F2C5	91	92	6.16	21.06	14.9	15,87
I6F2C5	94	79	5.31	25.05	19.74	72,29

**6.2.7 Prove relative alla configurazione C6**

Nei giorni 08-12 e 13 Maggio sono state svolte le prove definitive per la configurazione C6. In tale configurazione la barriera in massi ha una larghezza di berma pari a 80 cm (32 m nel prototipo) e cresta sommersa di -2.5 cm (-1 m nel prototipo), mentre la barriera in geocontenitori, formata da tre geocontenitori affiancati è posta ad una distanza di 0.87 m (35 m nel prototipo) dal piede esterno della barriera, ha una larghezza di berma pari a 50 cm (20 m nel prototipo) e cresta sommersa di -7.5 cm (-3 m nel prototipo).

→ **Livelli idrici in canale**

In Tabella 6.87 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retro-pala spenta.

Tabella 6.87: Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C6.

Livelli idrici in canale [cm]					
F0		F1		F2	
Profondità alla pala [cm]	Letture al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Letture al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Letture 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 C6 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 6.88 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

Tabella 6.88: Rilievi della quota della cresta della scogliera per le prove relative alla configurazione C6.

Rilievi della quota della cresta [cm]			
DATA	LIVELLO DI PROVA	Letture del livello di cresta della scogliera in massi interna	Letture del livello di cresta della barriera in geocontenitori
08/05/2008	F0	23.40	27.58
12/05/2008	F1	23.10	28.00
13/05/2008	F2	23.15	28.36

A partire dalla configurazione C6, fino al termine della C7, la quota della cresta della struttura in geotubi è stata rilevata anche con l'ausilio di un profilatore a barre (foto 6.1), in modo da valutare in modo più preciso l'eventuale scavo che si verifica sul fondale, davanti e dietro la struttura, durante i sei diversi attacchi ondosi (I1-I6) che caratterizzano ciascun livello studiato (F0, F1 e F2). I rilievi sono stati effettuati lungo tre sezioni della struttura in geotubi, due in prossimità dei bordi del canale e una al centro. In Allegato II sono riportati i pesi espressi in Kg di ciascun geotubo utilizzato nelle prove sperimentali e i rilievi ottenuti attraverso il profilatore a barre.

In figura 6.3 sono riportati i rilievi della barriera in geotubi, relativa alla configurazione C6, all'inizio e alla fine di ciascun livello (F0, F1 e F2).

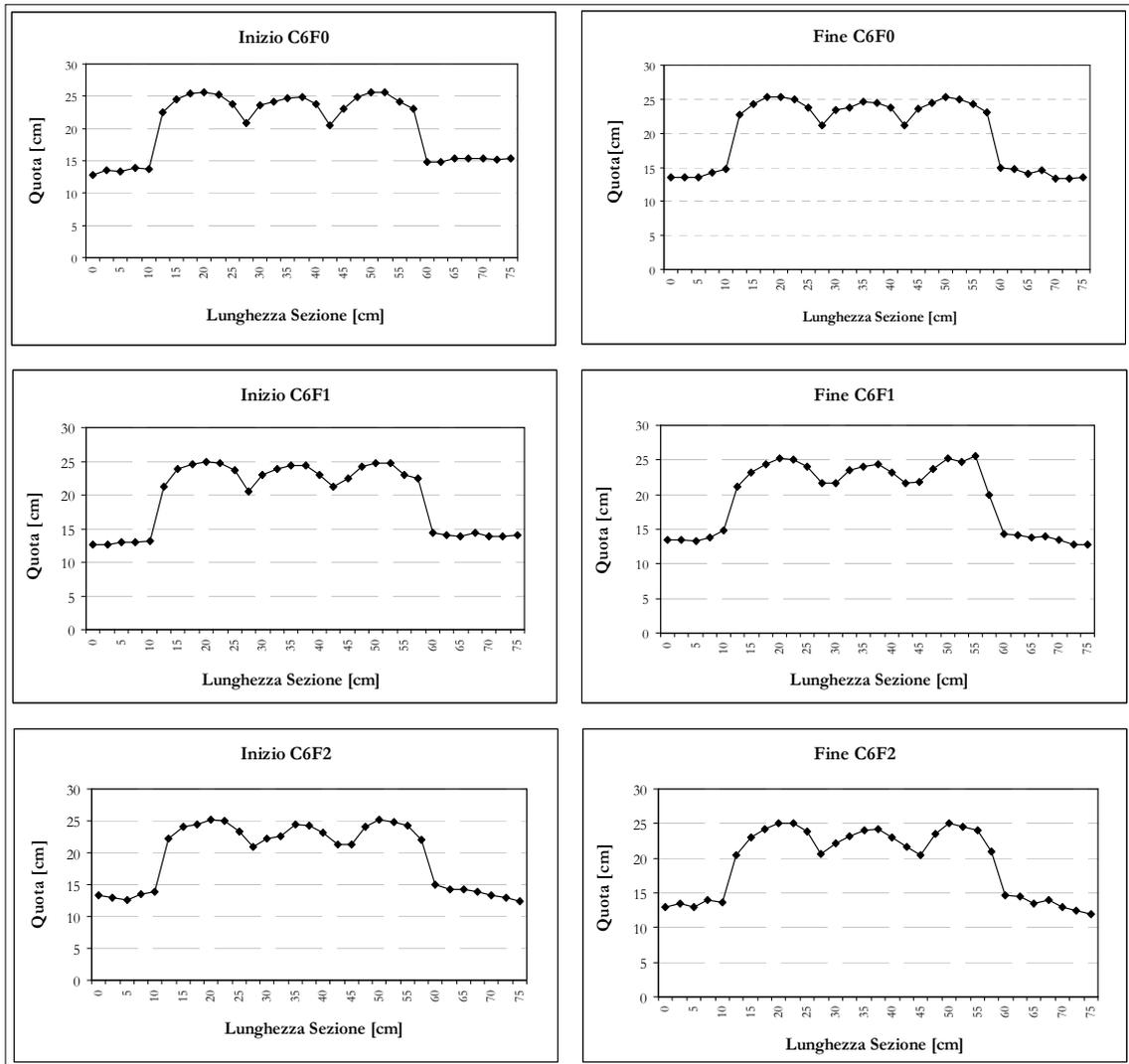


Figura 6.3: Rilievi della configurazione C6 prima e dopo ciascun livello di mare impostato in canale (F0, F1 e F2)



Foto 6.1 – Rilievi effettuati tramite il rilevatore a barre sulla struttura in geotubi

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

In Tabella 6.89 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per la configurazione C6.

**Tabella 6.89:** Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C6.

Codice Onda	H <sub>m0i</sub> (scogliera est.)	K <sub>r</sub> (scogliera est.)	T <sub>p</sub> (scogliera est.) [sec]	T <sub>m0-li</sub> (scogliera est.) [sec]	Level WG 2-3 [cm]	Freeboard (scogliera est.)	H <sub>m0i</sub> (scogliera int.) [cm]	K <sub>r</sub> (scogliera int.)	T <sub>p</sub> (scogliera int.) [sec]	T <sub>m0-li</sub> (scogliera int.) [sec]	Level WG 4-5 [cm]	Freeboard (scogliera int.)	H <sub>m0t</sub>	T <sub>pt</sub>	T <sub>m0-It</sub>	Level WG 6 [cm]
I1F0C6	6.37	0.20	1.3	1.6	-0.195	-7	4.68	0.22	1.2	1.65	0.195	-2.82	3.09	12.8	3.9	0.42
I2F0C6	5.71	0.41	1.5	2.0	-0.525	-6.96	5.40	0.26	1.5	1.85	0.245	-2.78	3.62	12.8	3.7	0.52
I3F0C6	5.03	0.45	1.7	2.3	-0.36	-7.02	5.44	0.27	1.7	2.4	0.25	-2.84	3.51	25.6	4.9	0.58
I4F0C6	5.81	0.45	1.5	2.0	-0.265	-7.01	5.92	0.28	1.6	2.2	0.49	-2.83	3.8	25.6	5.1	0.8
I5F0C6	5.84	0.46	1.6	2.3	-0.175	-6.87	6.18	0.29	5.05	2.7	0.52	-2.69	4.58	12.8	8.1	0.91
I6F0C6	5.94	0.47	1.6	2.5	-0.255	-6.98	6.40	0.32	6.4	3	0.43	-2.80	4.26	25.6	7.9	0.83
I1F1C6	6.31	0.28	1.3	1.5	-0.075	-8.58	5.10	0.22	1.2	1.5	0.165	-3.68	3.72	12.8	3.2	0.33
I2F1C6	7.17	0.39	1.5	1.8	-0.14	-8.58	6.05	0.27	1.5	1.75	0.195	-3.68	4.48	1.5	3.3	0.41
I3F1C6	5.82	0.33	1.7	2.2	-0.27	-8.58	6.04	0.27	1.7	2.2	0.19	-3.68	4.27	12.8	4.2	0.42
I4F1C6	7.17	0.43	1.6	1.9	-0.01	-8.58	6.77	0.29	1.6	2.1	0.445	-3.68	4.75	25.6	4.9	0.71
I5F1C6	7.61	0.46	1.8	2.4	0.035	-8.58	7.08	0.30	1.8	2.7	0.41	-3.68	5.36	12.8	7.3	0.74
I6F1C6	7.80	0.49	1.8	2.6	0.22	-8.58	7.34	0.31	8.5	3.1	0.505	-3.68	5.43	25.6	7.9	0.84
I1F2C6	6.56	0.31	1.3	1.5	0.025	-9.79	5.53	0.22	1.15	1.45	0.16	-4.58	4.47	1.2	3.1	0.32
I2F2C6	7.55	0.38	1.4	1.8	0.03	-9.79	6.44	0.28	1.5	1.75	0.17	-4.58	5.24	1.5	3.3	0.34
I3F2C6	7.36	0.36	1.7	2.2	-0.03	-9.79	6.56	0.27	1.7	2.2	0.125	-4.58	5.07	12.8	4.3	0.35
I4F2C6	8.87	0.40	1.5	1.8	0.23	-9.79	7.27	0.30	1.6	2	0.34	-4.58	5.55	12.8	4.3	0.62
I5F2C6	9.28	0.41	1.8	2.4	0.15	-9.72	7.61	0.29	2	2.7	0.3	-4.51	6.01	12.8	7.4	0.62
I6F2C6	9.32	0.42	1.6	2.4	0.275	-7.76	7.52	0.31	1.6	2.9	0.375	-2.55	5.91	25.6	6.4	0.7

→ **Overtopping**

In Tabella 6.90 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 6.90: Misure di overtopping relative alla configurazione C6.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Lettura iniziale [cm]	Lettura finale [cm]	$\Delta$ livello [cm]	Volume di Overtopping [litri]
I1F0C6	0	6	9.15	9.15	0	0
I2F0C6	0	16	9.15	9.15	0	0
I3F0C6	0	23	9.35	9.35	0	0
I4F0C6	0	26	9.42	9.50	0.08	0,2
I5F0C6	3	37	9.53	9.62	0.09	0,23
I6F0C6	6	43	9.65	10.62	0.97	2,44
I1F1C6	0	24	13.82	13.82	0	0
I2F1C6	6	34	13.82	14.25	0.43	1,08
I3F1C6	20	28	14.20	15.20	1.0	2,39
I4F1C6	14	36	15.20	16.0	0.8	2,01
I5F1C6	49	48	16.0	18.45	2.45	6,16
I6F1C6	53	43	18.45	26.50	8.05	20,25
I1F2C6	0	23	9.81	9.91	0.1	0,25
I2F2C6	21	53	9.91	10.88	0.97	2,44
I3F2C6	32	35	10.88	14.22	3.34	8,4
I4F2C6	57	54	14.22	18.70	4.48	11,27
I5F2C6	81	58	8.70	20.30	11.6	29,18
I6F2C6	50	81	10.30	32.05	21.75	54,71

**6.2.8 Prove relative alla configurazione C7**

Nei giorni 14-15 e 16 Maggio sono state svolte le prove definitive per la configurazione C7. In tale configurazione la barriera in massi ha una larghezza di berma pari a 80 cm (32 m nel prototipo) e cresta sommersa di -2.5 cm (-1 m nel prototipo). La barriera in geocontenitori formata da un geocontenitore disposto parallelamente alla linea di costa e quattro geocontenitori sovrapposti perpendicolarmente all'altro, è larga circa 0.5 m (20 m nel prototipo), ha un freeboard di -2.5 cm s.l.m (-1 m nel prototipo) ed è posta a 1.5 m (60 m nel prototipo) dal piede esterno della barriera in massi.

→ **Livelli idrici in canale**

In Tabella 6.91 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retro-pala spenta.

**Tabella 6.91:** Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C7.

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 C7 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 6.92 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

**Tabella 6.92:** Rilievi della quota della cresta della scogliera per le prove relative alla configurazione C7.

Rilievi della quota della cresta [cm]			
DATA	LIVELLO DI PROVA	Lettura del livello di cresta della scogliera in massi interna	Lettura del livello di cresta della barriera in geocontenitori
14/05/2008	F0	23.10	23.47
15/05/2008	F1	23.15	23.86
16/05/2008	F2	23.20	23.86

In figura 6.4 sono riportati i rilievi della barriera in geotubi, relativa alla configurazione C7, all'inizio e alla fine di ciascun livello (F0, F1 e F2).

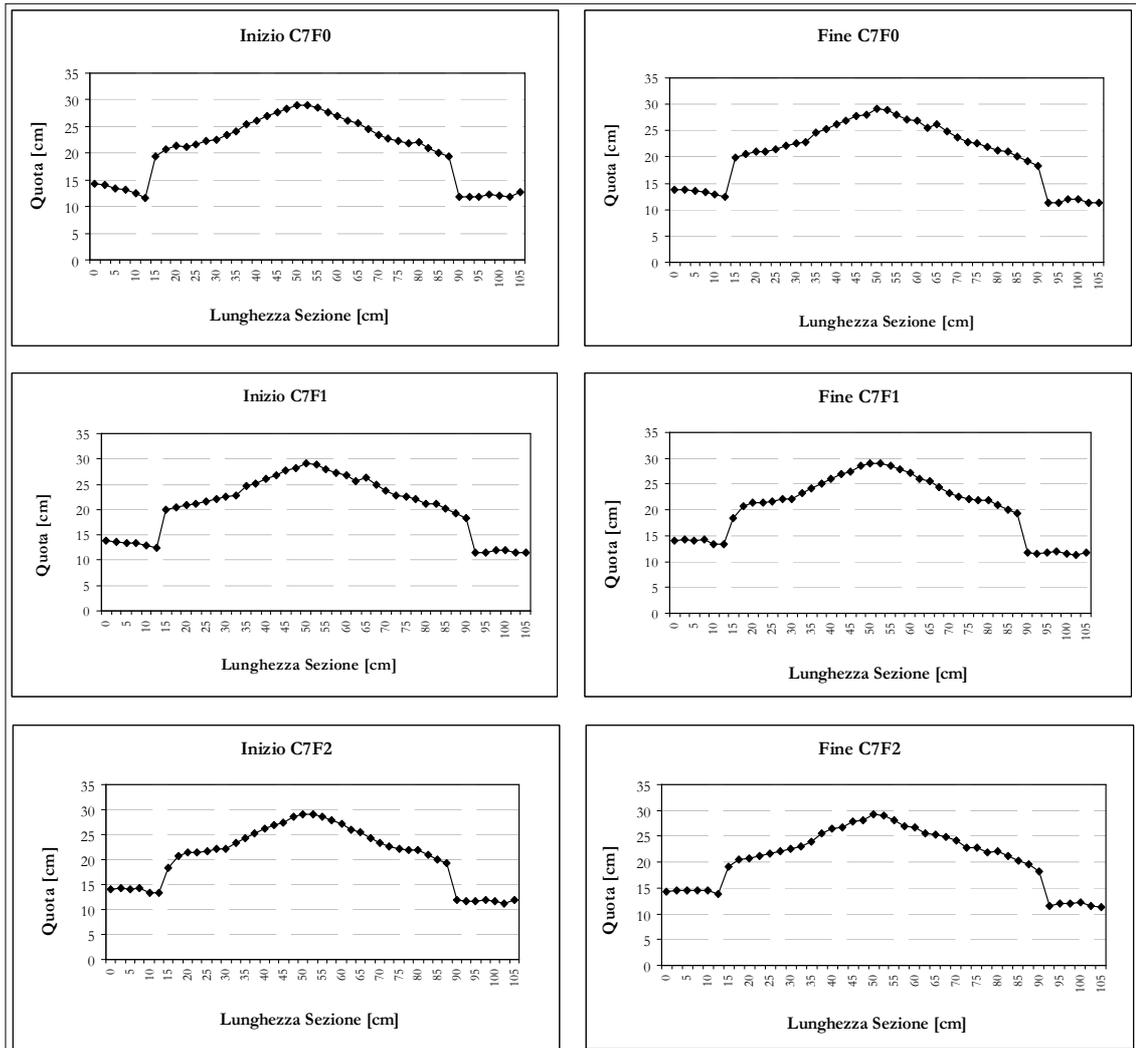


Figura 6.4: Rilievi della configurazione C7 prima e dopo ciascun livello di mare impostato in canale (F0, F1 e F2)

→ *Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove*

In Tabella 6.93 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondosu, nella sessione sperimentale per la configurazione C7.

**Tabella 6.93:** Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C7.

<b>Codice Onda</b>	<b>H<sub>m0i</sub></b> (scogliera est.)	<b>K<sub>r</sub></b> (scogliera est.)	<b>T<sub>p</sub></b> (scogliera est.) [sec]	<b>T<sub>m0-li</sub></b> (scogliera est.) [sec]	<b>Level WG 2-3</b> [cm]	<b>Freeboard</b> (scogliera est.)	<b>H<sub>m0i</sub></b> (scogliera int.) [cm]	<b>K<sub>r</sub></b> (scogliera int.)	<b>T<sub>p</sub></b> (scogliera int.) [sec]	<b>T<sub>m0-li</sub></b> (scogliera int.) [sec]	<b>Level WG 4-5</b> [cm]	<b>Freeboard</b> (scogliera int.)	<b>H<sub>m0t</sub></b>	<b>T<sub>pt</sub></b>	<b>T<sub>m0-lt</sub></b>	<b>Level WG 6</b> [cm]
<b>I1F0C7</b>	6.47	0.33	1.3	2.4	0.08	-2.89	3.81	0.23	1.25	1.6	0.78	-2.52	3.13	12.8	4.2	0.84
<b>I2F0C7</b>	6.57	0.40	1.6	2.5	-0.23	-2.9	4.67	0.28	1.5	1.75	1.02	-2.53	3.73	1.5	3.3	1.08
<b>I3F0C7</b>	6.12	0.42	1.8	2.7	-0.25	-2.9	4.72	0.30	1.7	1.9	0.98	-2.53	3.7	12.8	3.8	1.1
<b>I4F0C7</b>	6.95	0.41	1.6	2.3	-0.07	-2.9	5.05	0.32	1.6	1.9	1.265	-2.53	4.03	1.5	3.8	1.46
<b>I5F0C7</b>	7.24	0.45	2.0	2.5	-0.045	-2.89	5.45	0.32	1.8	2.3	1.2	-2.52	4.6	12.8	5.9	1.45
<b>I6F0C7</b>	7.79	0.48	1.8	3.0	0.13	-2.9	5.76	0.33	5.05	2.8	1.275	-2.53	4.77	12.8	7.4	1.53
<b>I1F1C7</b>	6.46	0.38	1.3	1.9	0.045	-4.28	4.49	0.25	1.2	1.4	0.58	-3.57	3.58	1.2	2.8	0.65
<b>I2F1C7</b>	7.89	0.47	1.4	2.2	0.215	-4.28	5.35	0.32	1.5	1.65	0.68	-3.57	4.35	1.5	3.1	0.79
<b>I3F1C7</b>	7.64	0.53	1.7	2.3	0.23	-4.29	5.35	0.32	1.75	1.95	0.64	-3.58	4.28	12.8	3.6	0.73
<b>I4F1C7</b>	8.96	0.49	1.6	2.2	0.415	-4.29	5.79	0.36	1.6	1.85	0.865	-3.58	4.57	1.5	3.9	0.97
<b>I5F1C7</b>	9.48	0.53	1.8	2.5	0.46	-4.28	6.11	0.33	1.8	2.45	0.91	-3.57	5.15	12.8	5.8	1.01
<b>I6F1C7</b>	9.46	0.55	1.7	2.7	0.42	-4.27	6.26	0.36	1.6	2.65	0.84	-3.56	5.12	12.8	6.7	0.98
<b>I1F2C7</b>	7.50	0.35	1.3	1.7	0.17	-5.35	4.93	0.23	1.2	1.35	0.305	-4.69	4.06	1.2	2.4	0.33
<b>I2F2C7</b>	9.01	0.45	1.6	2.0	0.21	-5.35	5.85	0.32	1.5	1.6	0.47	-4.69	4.84	1.5	2.9	0.53
<b>I3F2C7</b>	8.58	0.48	1.7	2.2	0.12	-5.35	5.84	0.31	1.7	1.9	0.415	-4.69	4.72	1.7	3.5	0.47
<b>I4F2C7</b>	10.40	0.43	1.6	2.1	0.21	-5.35	6.51	0.33	1.5	1.8	0.61	-4.69	5.03	1.5	3.5	0.71
<b>I5F2C7</b>	10.23	0.51	1.8	2.6	0.115	-5.35	6.68	0.34	1.8	2.35	0.535	-4.69	5.44	12.8	5.6	0.63
<b>I6F2C7</b>	10.27	0.50	1.8	2.5	0.205	-5.33	6.73	0.37	1.6	2.7	0.62	-4.67	5.62	12.8	6.3	0.74

→ **Overtopping**

In Tabella 6.94 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 6.94: Misure di overtopping relative alla configurazione C7.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Letture iniziale [cm]	Letture finale [cm]	$\Delta$ livello [cm]	Volume di Overtopping [litri]
I1F0C7	0	6	14.22	14.22	0	0
I2F0C7	0	15	14.26	14.26	0	0
I3F0C7	1	16	14.30	14.38	0.08	0,08
I4F0C7	1	20	14.38	14.43	0.05	0,05
I5F0C7	0	33	14.45	14.61	0.16	0,16
I6F0C7	10	38	14.61	15.80	1.19	1,19
I1F1C7	0	18	6.30	6.30	0	0
I2F1C7	1	36	6.40	6.45	0.05	0,13
I3F1C7	8	38	6.50	6.64	0.14	0,35
I4F1C7	2	48	6.66	6.95	0.29	0,73
I5F1C7	29	77	6.95	9.87	2.92	7,34
I6F1C7	30	68	9.87	19.07	9.2	23,14
I1F2C7	4	33	6.81	6.88	0.07	0,18
I2F2C7	8	78	6.93	8.32	1.39	3,5
I3F2C7	49	48	8.32	11.71	3.39	8,53
I4F2C7	22	85	8.63	13.0	4.37	10,99
I5F2C7	101	58	6.50	20.11	13.61	34,23
I6F2C7	76	103	6.50	29.32	22.82	57,4

**6.2.9 Prove relative alla configurazione C8**

Nei giorni 26, 28 e 30 Maggio sono state svolte le prove definitive per la configurazione C8. In tale configurazione la barriera in massi ha una larghezza di berma pari a 80 cm (32 m nel prototipo) e cresta sommersa di -2.5 cm (-1 m nel prototipo). La barriera esterna, formata da tre geocontenitori affiancati con asse longitudinale parallelo alla costa con sovrapposti altri due geocontenitori affiancati nella medesima posizione, è posta ad una distanza di 1.5 m (60 m nel prototipo) dal piede esterno della scogliera in massi, è larga circa 0.5 m (20 m nel prototipo) ed ha un freeboard di -2.5 cm s.l.m (-1 m nel prototipo).

→ **Livelli idrici in canale**

In Tabella 6.95 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retro-pala spenta.

Tabella 6.95: Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C8.

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 C8 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 6.96 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

Tabella 6.96: Rilievi della quota della cresta della scogliera per le prove relative alla configurazione C8.

Rilievi della quota della cresta [cm]			
DATA	LIVELLO DI PROVA	Lettura del livello di cresta della scogliera in massi interna	Lettura del livello di cresta della barriera in geocontenitori
26/05/2008	F0	23.24	22.97
28/05/2008	F1	23.37	22.40
30/05/2008	F2	23.41	22.46

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

In Tabella 6.97 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per la configurazione C8.

**Tabella 6.97:** Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C8.

Codice Onda	H <sub>m0i</sub> (scogliera est.) [cm]	K <sub>r</sub> (scogliera est.)	T <sub>p</sub> (scogliera est.) [sec]	T <sub>m0-li</sub> (scogliera est.) [sec]	Level WG 2-3 [cm]	Freeboard (scogliera est.)	H <sub>m0i</sub> (scogliera int.) [cm]	K <sub>r</sub> (scogliera int.)	T <sub>p</sub> (scogliera int.) [sec]	T <sub>m0-li</sub> (scogliera int.) [sec]	Level WG 4-5 [cm]	Freeboard (scogliera int.)	H <sub>m0t</sub>	T <sub>pt</sub>	T <sub>m0-lt</sub>	Level WG 6 [cm]
I1F0C8	6.61	0.55	1.3	2.5	0.2	-2.44	6.61	0.30	1.2	1.4	1.14	-2.71	2.91	13.8	3.1	1.25
I2F0C8	8.09	0.58	1.6	2.5	0.25	-2.37	8.09	0.30	1.55	1.75	1.275	-2.64	3.91	1.5	2.7	1.38
I3F0C8	7.76	0.69	1.8	2.4	0.29	-2.37	7.76	0.35	1.75	1.8	1.155	-2.64	3.5	1.7	3.7	1.26
I4F0C8	8.63	0.64	1.6	2.3	0.52	-2.37	8.63	0.34	1.6	1.8	1.51	-2.64	3.88	1.6	3.2	1.67
I5F0C8	9.04	0.71	1.8	2.3	0.52	-2.37	9.04	0.36	1.8	2.15	1.425	-2.64	4.25	12.8	5	1.57
I6F0C8	8.82	0.72	1.8	3.0	0.415	-2.31	8.82	0.39	8.5	2.6	1.335	-2.58	4.31	12.8	6.4	1.49
I1F1C8	6.84	0.43	1.3	2.2	0.115	-2.94	6.84	0.31	1.15	1.4	0.67	-3.91	3.52	1.1	2.9	0.78
I2F1C8	8.70	0.55	1.7	2.3	0.145	-2.94	8.70	0.34	1.45	1.7	0.89	-3.91	4.28	1.5	3.2	1.02
I3F1C8	8.34	0.65	1.8	2.2	0.185	-2.94	8.34	0.37	1.75	1.8	0.875	-3.91	4.27	1.7	3.2	1
I4F1C8	9.43	0.58	1.7	2.2	0.355	-2.84	9.43	0.40	1.5	1.75	1.2	-3.81	4.69	1.5	3.2	1.36
I5F1C8	9.73	0.66	2.0	2.5	0.265	-2.84	9.73	0.38	2	2.25	1.095	-3.81	4.92	8.5	4.7	1.27
I6F1C8	9.43	0.66	1.7	2.7	0.25	-2.84	9.43	0.39	1.8	2.6	1.085	-3.81	5.12	12.8	6.2	1.26
I1F2C8	7.23	0.37	1.3	2.0	0.055	-3.89	7.23	0.30	1.15	1.4	0.505	-4.84	3.85	1.2	2.4	0.57
I2F2C8	8.79	0.51	1.7	2.1	0.105	-3.89	8.79	0.38	1.4	1.55	0.725	-4.84	4.68	1.5	2.8	0.78
I3F2C8	8.65	0.61	1.7	2.2	0.16	-3.89	8.65	0.38	1.65	1.85	0.685	-4.84	4.56	1.7	3.1	0.73
I4F2C8	9.84	0.54	1.7	2.1	0.315	-3.78	9.84	0.39	1.5	1.8	1.035	-4.73	5.02	1.5	3.2	1.11
I5F2C8	9.87	0.66	1.8	2.4	0.24	-3.78	9.87	0.39	2	2.2	0.92	-4.73	5.18	12.8	4.6	0.99
I6F2C8	9.81	0.66	1.7	2.5	0.145	-3.78	9.81	0.42	1.6	2.5	0.86	-4.73	5.37	12.8	5.5	0.94

→ **Overtopping**

In Tabella 6.98 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 6.98: Misure di overtopping relative alla configurazione C8.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Letture iniziale [cm]	Letture finale [cm]	$\Delta$ livello [cm]	Volume di Overtopping [litri]
I1F0C8	0	0	9.53	9.53	0	0
I2F0C8	0	13	9.53	9.53	0	0
I3F0C8	0	5	9.53	9.53	0	0
I4F0C8	0	12	9.63	9.63	0	0
I5F0C8	10	17	9.63	9.80	0.17	0.43
I6F0C8	16	17	9.8	10.53	0.73	1.84
I1F1C8	0	13	8.12	8.12	0	0
I2F1C8	3	34	8.12	8.12	0	0
I3F1C8	7	20	8.12	8.41	0.29	0.73
I4F1C8	17	27	8.41	9.10	0.69	1.74
I5F1C8	31	25	9.10	12.44	3.34	8.40
I6F1C8	35	25	12.44	16.80	4.36	10.97
I1F2C8	0	24	9.91	9.91	0	0
I2F2C8	20	42	9.91	10.90	0.99	2.49
I3F2C8	35	38	10.90	14.61	3.71	9.33
I4F2C8	48	38	14.61	18.60	3.99	10.04
I5F2C8	59	13	16.70	30.75	14.05	35.34
I6F2C8	87	17	9.05	28.31	19.26	48.44

**6.2.10 Prove relative alla configurazione C9**

Nei giorni 03, 04 e 09 Luglio sono state svolte le prove definitive per la configurazione C9. In tale configurazione la scogliera interna in massi ha una larghezza di berma pari a 80 cm (32 m nel prototipo) e cresta sommersa di -2.5 cm (-1 m nel prototipo). La barriera esterna, costruita con massi aventi le stesse caratteristiche granulometriche di quella interna, è posta ad una distanza di 1.5 m (60 m nel prototipo) dal piede esterno dell'altra. Ha una larghezza di cresta pari a 12 cm (4.8 m nel prototipo), una pendenza del lato obliquo verso mare pari a 1/2 ed un freeboard di -7 cm s.l.m (-2.8 m nel prototipo).

→ **Livelli idrici in canale**

In Tabella 6.99 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retro-pala spenta.

Tabella 6.99: Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C9.

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 C9 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 6.100 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

Tabella 6.100: Rilievi della quota della cresta della scogliera per le prove relative alla configurazione C9.

Rilievi della quota della cresta [cm]			
DATA	LIVELLO DI PROVA	Lettura del livello di cresta della scogliera in massi interna	Lettura del livello di cresta della scogliera in massi esterna
03/07/2008	F0	23.24	28.30
04/07/2008	F1	23.26	28.35
09/07/2008	F2	23.30	28.60

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

In Tabella 6.101 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per la configurazione C9.

Tabella 6.101: Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C9.

Codice Onda	H <sub>m0i</sub> (scogliera est.) [cm]	K <sub>r</sub> (scogliera est.)	T <sub>p</sub> (scogliera est.) [sec]	T <sub>m0-li</sub> (scogliera est.) [sec]	Level WG 2-3 [cm]	Freeboard (scogliera est.)	H <sub>m0i</sub> (scogliera int.) [cm]	K <sub>r</sub> (scogliera int.)	T <sub>p</sub> (scogliera int.) [sec]	T <sub>m0-li</sub> (scogliera int.) [sec]	Level WG 4-5 [cm]	Freeboard (scogliera int.)	H <sub>m0t</sub>	T <sub>pt</sub>	T <sub>m0-1t</sub>	Level WG 6 [cm]
I1F0C9	6.91	0.20	1.3	1.6	-0.07	-7.65	6.91	0.15	1.2	1.8	-0.005	-2.59	3.01	12.8	3.8	0.75
I2F0C9	7.68	0.24	1.5	1.7	0	-7.65	7.68	0.19	1.5	1.9	0.025	-2.59	3.35	1.5	3.6	0.59
I3F0C9	7.48	0.25	1.7	2.1	0	-7.65	7.48	0.22	1.7	2.4	0.02	-2.59	3.3	25.6	4.8	0.55
I4F0C9	8.44	0.26	1.5	2.0	0.185	-7.65	8.44	0.22	1.45	2.55	0.215	-2.59	3.71	25.6	5.8	0.79
I5F0C9	8.63	0.29	1.7	2.2	0.175	-7.65	8.63	0.24	1.3	2.85	0.2	-2.59	4.34	12.8	7.8	0.8
I6F0C9	8.61	0.30	1.6	2.3	0.1	-7.65	8.61	0.26	1.4	3.25	0.125	-2.59	4.19	25.6	8.6	0.71
I1F1C9	6.82	0.21	1.3	1.5	-0.075	-8.75	6.82	0.17	1.15	1.65	-0.005	-3.66	3.76	12.8	3.3	0.34
I2F1C9	7.80	0.24	1.6	1.8	-0.02	-8.75	7.80	0.21	1.5	1.85	0.025	-3.66	4.14	12.8	3.4	0.45
I3F1C9	7.64	0.26	1.7	2.1	0.02	-8.75	7.64	0.23	1.7	2.3	0.03	-3.66	4.18	25.6	4.4	0.44
I4F1C9	8.56	0.27	1.6	1.9	0.17	-8.75	8.56	0.25	1.6	2.25	0.205	-3.66	4.52	25.6	5.2	0.71
I5F1C9	8.80	0.28	2.0	2.2	0.15	-8.75	8.80	0.26	1.65	2.85	0.18	-3.66	5.28	12.8	8	0.7
I6F1C9	8.76	0.30	1.6	2.4	0.245	-8.75	8.76	0.27	1.4	3.15	0.245	-3.66	5.21	25.6	8.2	0.72
I1F2C9	7.00	0.21	1.2	1.5	-0.01	-10.14	7.00	0.17	1.2	1.55	0.03	-4.84	4.46	1.2	2.9	0.27
I2F2C9	7.91	0.23	1.5	1.8	0	-10.14	7.91	0.21	1.5	1.8	0.045	-4.84	4.77	1.5	3.1	0.34
I3F2C9	7.94	0.27	1.7	2.1	-0.005	-10.14	7.94	0.24	1.7	2.3	0.025	-4.84	4.86	25.6	4.6	0.32
I4F2C9	8.96	0.27	1.5	1.9	0.155	-10.14	8.96	0.25	1.6	2.2	0.19	-4.84	5.25	25.6	4.9	0.61
I5F2C9	9.08	0.27	2.0	2.2	0.1	-10.14	9.08	0.25	<b>1.6</b>	2.85	0.135	-4.84	6.04	12.8	7.6	0.56
I6F2C9	9.11	0.31	1.6	2.3	0.075	-10.14	9.11	0.27	<b>1.65</b>	2.95	0.115	-4.84	5.72	25.6	7.5	0.49

→ **Overtopping**

In Tabella 6.102 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 6.102:** Misure di overtopping relative alla configurazione C9.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Letture iniziale [cm]	Letture finale [cm]	$\Delta$ livello [cm]	Volume di Overtopping [litri]
I1F0C9	0	2	7.90	7.90	0	0
I2F0C9	0	7	7.90	7.90	0	0
I3F0C9	0	9	7.90	7.90	0	0
I4F0C9	0	10	7.90	7.90	0	0
I5F0C9	2	17	7.90	8.02	0.12	0.3
I6F0C9	8	27	8.02	8.20	0.18	0.45
I1F1C9	0	6	7.50	7.50	0	0
I2F1C9	4	23	7.50	7.60	0.10	0.25
I3F1C9	5	18	7.60	8.16	0.56	1.41
I4F1C9	2	27	8.16	8.16	0	0.00
I5F1C9	25	58	8.16	9.03	0.87	2.19
I6F1C9	40	61	9.03	13.99	4.96	12.48
I1F2C9	1	21	7.60	7.65	0.05	0.13
I2F2C9	7	41	7.65	8.06	0.41	1.03
I3F2C9	28	49	8.06	10.90	2.84	7.14
I4F2C9	41	55	10.90	13.45	2.55	6.41
I5F2C9	73	56	13.45	25.00	11.55	29.05
I6F2C9	78	76	7.12	31.06	23.94	60.22

### 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 water set-up, trasmissione, e overtopping. Nella prima parte di questa sezione sono riportate le misure sperimentali condotte su ogni configurazione ricostruita (C0, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C9) e per ogni alternativa progettuale è discusso il confronto con la situazione attuale e con tutte le altre alternative progettuali per la riqualificazione del tratto di costa in esame. In questa analisi dei dati, inoltre, come altezza d'onda incidente è stata utilizzata quella ottenuta nelle prove C0 tramite il metodo proposto da Goda e Suzuki (1976) applicato alle registrazioni acquisite alle sonde 4 e 5, mentre come altezza d'onda trasmessa è stato utilizzato il valore  $H_{m0t}$  ottenuto dall'analisi dei dati della sonda 6 registrati in ogni

prova. Per comodità di lettura, tutte le misure riportate nell'analisi di II livello sono riportate alla scala del prototipo e di conseguenza espresse in metri.

### 6.3.1 Water set-up

Per ogni prova è stato misurato il water set-up o sovrizzo  $\eta$ , misurato dalla sonda in posizione 6, nella zona protetta compresa tra la scogliera parallela e quella radente, indotto dagli attacchi ondosi che si propagano sul mare con livello medio pari a F0, F1 e F2.

Nelle tabelle 6.103 e 6.104 e nelle figure 6.3, 6.4 e 6.5 sono riportati i valori di sovrizzo idrico, per ciascun livello di prova, relativi alle configurazioni C0 e C1 che rappresentano le opere di difesa attualmente presenti a Marina di Pisa.

**Tabella 6.103:** Misure in scala prototipo relative al sovrizzo del livello idrico tra la scogliera parallela e quella radente nella configurazione C0, con corrente di rip nel varco a Nord sostanzialmente nulla

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
Attacco Ondoso	I1 ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0.33	0.38	0.41
	I2 ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0.44	0.51	0.55
	I3 ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	0.44	0.54	0.58
	I4 ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0.61	0.74	0.78
	I5 ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.67	0.79	0.81
	I6 ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.72	0.83	0.84

**Tabella 6.104:** Misure in scala prototipo relative al sovrizzo del livello idrico tra la scogliera parallela e quella radente nella configurazione C1, con corrente di rip nel varco a Nord forzata pari a 1.14 mc/s

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
Attacco Ondoso	I1 ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0.28	0.11	0.39
	I2 ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0.22	0.23	0.46
	I3 ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	0.26	0.24	0.44
	I4 ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0.38	0.45	0.68
	I5 ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.38	0.50	0.69
	I6 ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.47	0.53	0.72

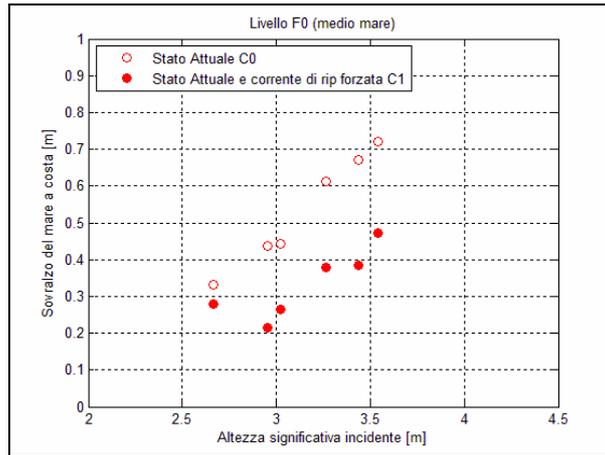


Figura 6.3 – Misure di sovrizzo nell'area protetta relative alle configurazioni attuali C0 (senza ricircolo forzato) e C1 (con ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

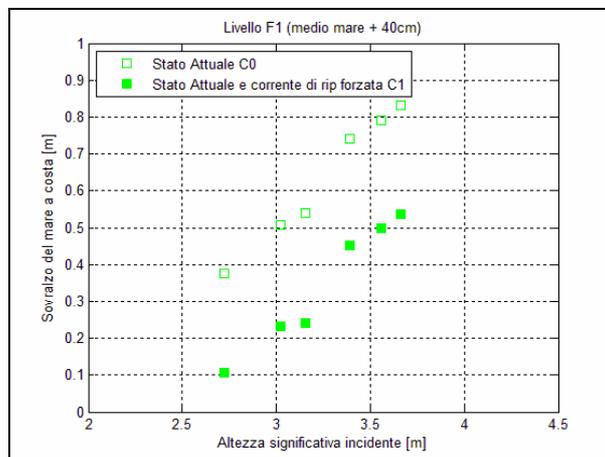


Figura 6.4 – Misure di sovrizzo nell'area protetta relative alle configurazioni attuali C0 (senza ricircolo forzato) e C1 (con ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

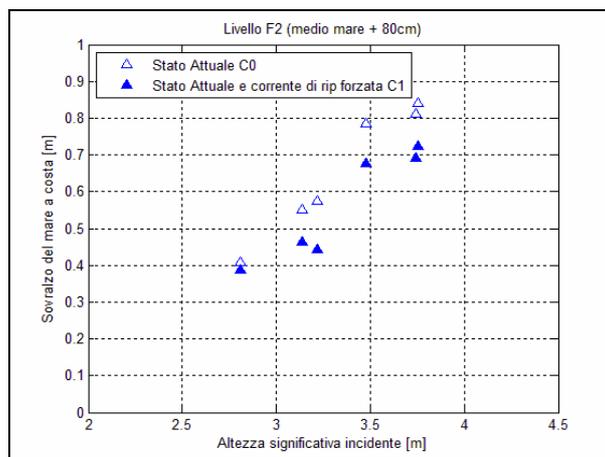


Figura 6.5 – Misure di sovrizzo nell'area protetta relative alle configurazioni attuali C0 (senza ricircolo forzato) e C1 (con ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Le misure condotte nella configurazione C0, in assenza di corrente di rip, e nella configurazione C1, con corrente di rip pari a 1.14 mc/s, dimostrano che l'assenza della corrente da luogo a sovralti idrici nella zona protetta che sono maggiori di circa 20-30 cm. In mancanza di misure dirette condotte nel prototipo a Marina di Pisa, non è possibile prevedere con precisione l'entità della corrente di rip che si instaura nel varco sotto determinate condizioni di moto ondoso. Tuttavia la scogliera in esame è confinata a Sud da un pennello sostanzialmente impermeabile e all'altra estremità, circa 200 m a Nord, presenta un piccolo varco di circa 10m, di conseguenza, la presenza di un unico varco con dimensioni molto minori dell'estensione della scogliera fanno ritenere che il sistema sia sostanzialmente confinato, cioè, idraulicamente simile al caso di scogliera di lunghezza indefinita senza varchi. Questo aspetto è stato approfondito sperimentalmente in questo lavoro e le misure condotte sui modelli con o senza corrente di rip (rispettivamente C0 e C1), confrontate con le misure, condotte dal Dipartimento, su un prototipo di scogliera a Marina di Pisa simile a quella in esame, dimostrano che i valori dei livelli che si formano durante le mareggiate sono più vicini a quelli ottenuti nel modello senza corrente di rip. Nel seguito di questo studio, quindi, è stato considerato che il modello più rappresentativo della situazione attuale del prototipo sia il modello C0 dove non si è forzata la presenza della corrente di rip.

Per quanto riguarda la configurazione C0, dalla tabella 6.103 si osserva che i sovralti idrici aumentano notevolmente all'aumentare dell'altezza d'onda incidente, del periodo e all'aumentare del livello di prova. I sovralti che possono verificarsi frequentemente (qualche volta l'anno) sono quelli relativi alle condizioni del livello del mare pari a zero (livello di prova F0) o incrementato di 40cm a causa della marea (livello di prova F1) e sono compresi tra 40-80cm, quindi, i relativi livelli idrici possono arrivare rispettivamente fino +40cm e +1.20m sul livello medio del mare. In casi estremi, ossia quando il livello del mare a causa di vento, del sovrizzo barico e della marea è 80 cm più alto rispetto al medio mare (livello di prova F2) i sovralti sono compresi tra 40 cm (onde di prova I1) e 84cm (onde di prova I6) e quindi i relativi livelli idrici nella zona protetta possono arrivare fino a +1.20 m e +1.64 m. A causa di questo notevole aumento del livello del mare nella zona protetta durante le mareggiate, il moto ondoso riesce più facilmente a oltrepassare la scogliera radente e di conseguenza a spingere notevoli flussi idrici sulla strada litoranea. Qualsiasi ipotesi di intervento, finalizzata alla riduzione della frequenza e intensità delle tracimazioni sulla strada litoranea, deve porsi tra gli obiettivi principali l'abbattimento di questi sovralti.

In tabella 6.105 sono riportati i valori di sovrizzo idrico, per ciascun livello di prova, nell'area compresa tra la scogliera parallela e quella radente, relativo all'alternativa progettuale C2. Nelle figure 6.6, 6.7 e 6.8, tali misure di sovrizzo, per ogni livello idrico, sono confrontate graficamente con la configurazione C0, rappresentante lo stato di difesa attuale di Marina di Pisa.

**Tabella 6.105:** Misure in scala prototipo relative al sovrizzo del livello idrico tra la scogliera parallela e quella radente nella configurazione C2

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1</b> ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0.30	0.24	0.18
	<b>I2</b> ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0.40	0.30	0.23
	<b>I3</b> ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	0.40	0.29	0.19
	<b>I4</b> ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0.54	0.46	0.38
	<b>I5</b> ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.54	0.44	0.35
	<b>I6</b> ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.58	0.48	-

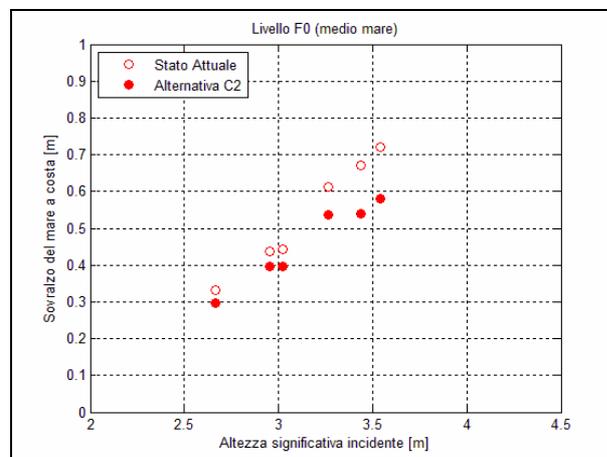


Figura 6.6 – Misure di sovrizzo nell'area protetta relative alla configurazione C2 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

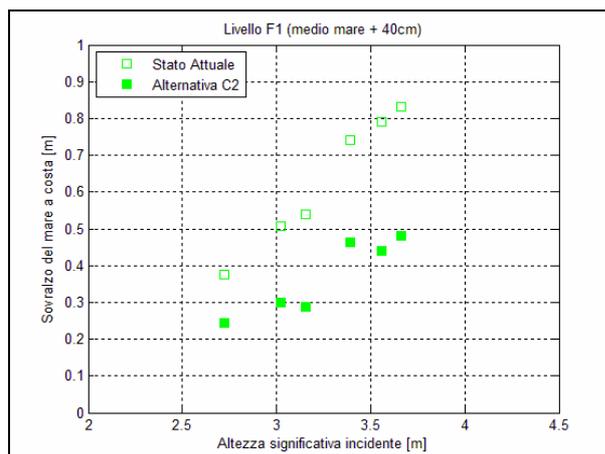


Figura 6.7 – Misure di sovrizzo nell'area protetta relativa alla configurazione C2 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scal prototipo.

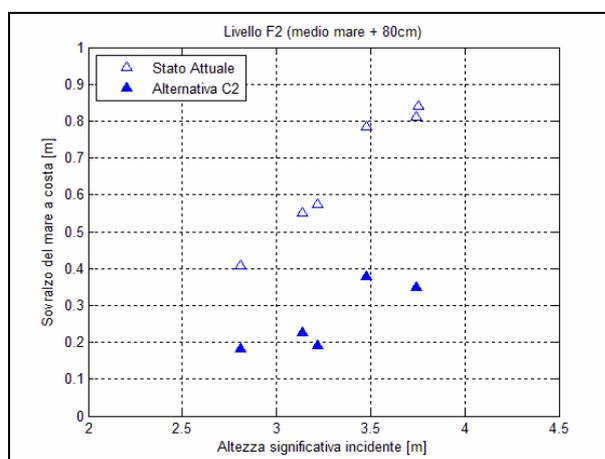


Figura 6.8 – Misure di sovrizzo nell'area protetta relativa alla configurazione C2 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Dalle figure 6.6, 6.7 e 6.8 si osserva che l'abbassamento della scogliera comporta diminuzioni significative dei sovrizzi idrici per ogni livello idrico considerato, rispetto alla configurazione attuale C0. Inoltre, al contrario di quanto accade con le opere di difesa attuali, con questa struttura sommersa, l'incremento dei livelli del mare da F0 a F2, porta ad una rispettiva diminuzione dei sovrizzi (vedi tabella 6.105). Tale fenomeno può essere spiegato osservando che a livelli del mare maggiori corrisponde una barriera relativamente più sommersa quindi con una minore resistenza idraulica ai flussi di ritorno verso il largo.

In tabella 6.106 e nelle figure 6.9, 6.10 e 6.11 sono riportati i valori di sovrizzo idrico, per ciascun livello di prova, relativo all'alternativa progettuale C3.

**Tabella 6.106:** Misure in scala prototipo relative al sovrizzo del livello idrico tra la scogliera parallela e quella radente nella configurazione C3

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1</b> ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0.26	0.18	0.13
	<b>I2</b> ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0.32	0.25	0.18
	<b>I3</b> ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	0.32	0.25	0.17
	<b>I4</b> ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0.44	0.37	0.30
	<b>I5</b> ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.45	0.37	0.28
	<b>I6</b> ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.50	0.42	0.34

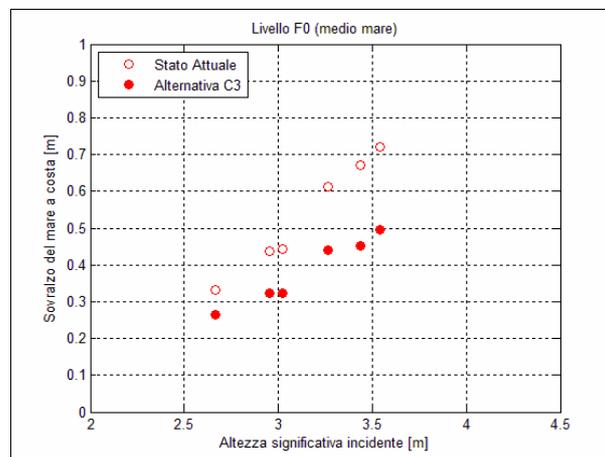


Figura 6.9 – Misure di sovrizzo nell’area protetta relativa alla configurazione C3 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

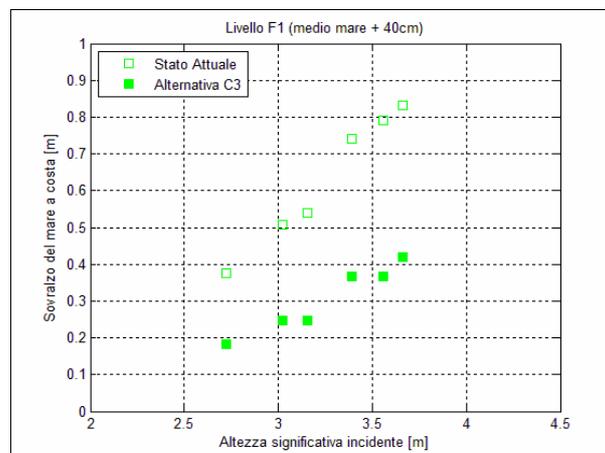


Figura 6.10 – Misure di sovrizzo nell’area protetta relativa alla configurazione C3 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

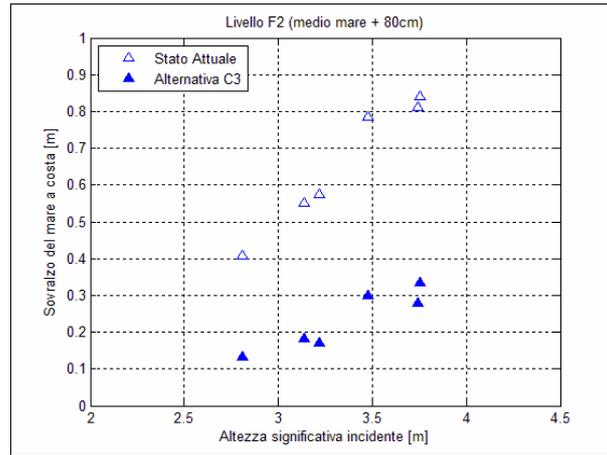


Figura 6.11 – Misure di sovrizzo nell’area protetta relativa alla configurazione C3 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Come nel caso dell’alternativa C2, si osserva di nuovo che con una struttura sommersa i sovrizzi idrici sono molto inferiori rispetto a quelli che si formano con le opere di difesa nella configurazione C0 e che il loro valore diminuisce, a parità di mareggiata incidente, se il livello del mare è maggiore. Tuttavia, in questo caso si verificano sovrizzi ancora minori (vedi tabella 6.106) quindi si dimostra che l’allungamento della scogliera sommersa porta effetti positivi nella limitazione di questo fenomeno.

Nelle tabelle 6.107, 6.108, 6.109 e nelle figure 6.12-6.20 sono riportati i valori di sovrizzo idrico, per ciascun livello di prova, relativo alle alternative progettuali C4, C5 e C6.

**Tabella 6.107:** Misure in scala prototipo relative al sovrizzo del livello idrico tra la scogliera parallela e quella radente nella configurazione C4

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1 (H<sub>si</sub>=2.7m T<sub>p</sub>=7.3s)</b>	0.20	0.16	0.10
	<b>I2 (H<sub>si</sub>=2.9m T<sub>p</sub>=8.8s)</b>	0.25	0.20	0.14
	<b>I3 (H<sub>si</sub>=3.0m T<sub>p</sub>=12s)</b>	0.25	0.19	0.14
	<b>I4 (H<sub>si</sub>=3.3m T<sub>p</sub>=9.1s)</b>	0.37	0.30	0.26
	<b>I5 (H<sub>si</sub>=3.4m T<sub>p</sub>=12.6s)</b>	0.37	0.30	0.24
	<b>I6 (H<sub>si</sub>=3.5m T<sub>p</sub>=12.2s)</b>	0.43	0.35	0.26

**Tabella 6.108:** Misure in scala prototipo relative al sovrizzo del livello idrico tra la scogliera parallela e quella radente nella configurazione C5

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	I1 ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0.19	0.12	0.11
	I2 ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0.22	0.18	0.16
	I3 ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	0.22	0.19	0.15
	I4 ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0.32	0.30	0.27
	I5 ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.33	0.29	0.24
	I6 ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.38	0.33	0.28

**Tabella 6.109:** Misure in scala prototipo relative al sovrizzo del livello idrico tra la scogliera parallela e quella radente nella configurazione C6

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	I1 ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0.17	0.13	0.13
	I2 ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0.21	0.16	0.14
	I3 ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	0.23	0.17	0.14
	I4 ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0.32	0.28	0.25
	I5 ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.36	0.30	0.25
	I6 ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.33	0.34	0.28

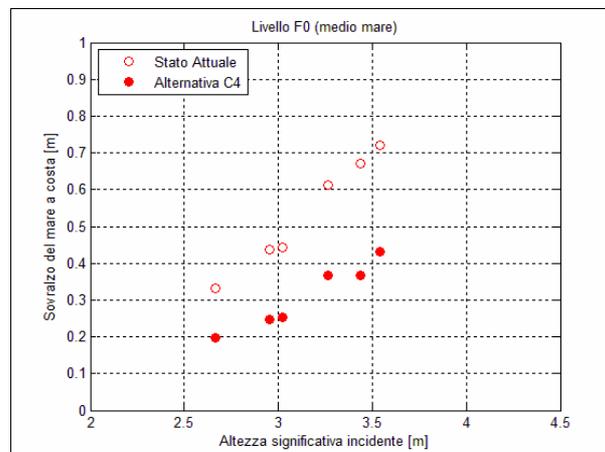


Figura 6.12 – Misure di sovrizzo nell'area protetta relativa alla configurazione C4 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

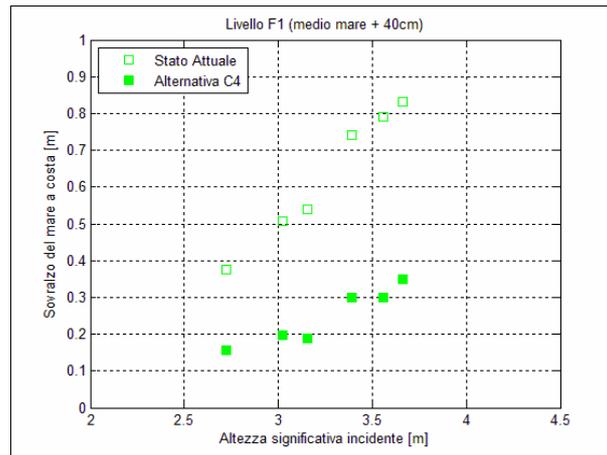


Figura 6.13 – Misure di sovralzo nell'area protetta relativa alla configurazione C4 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

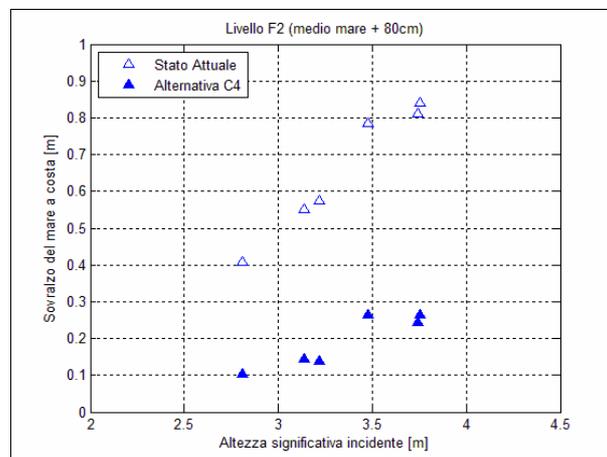


Figura 6.14 – Misure di sovralzo nell'area protetta relativa alla configurazione C4 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

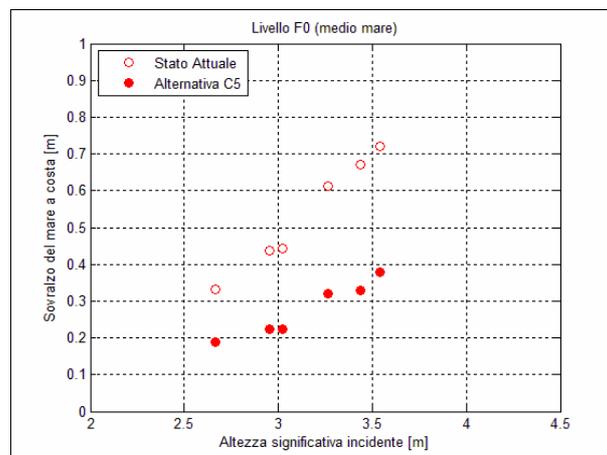


Figura 6.15 – Misure di sovralzo nell'area protetta relativa alla configurazione C5 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

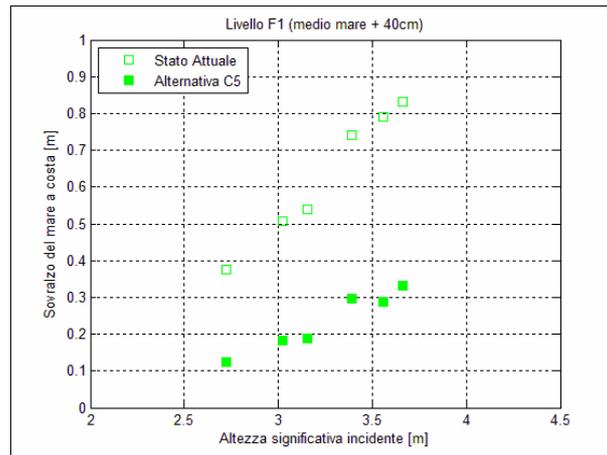


Figura 6.16 – Misure di sovrizzo nell'area protetta relativa alla configurazione C5 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

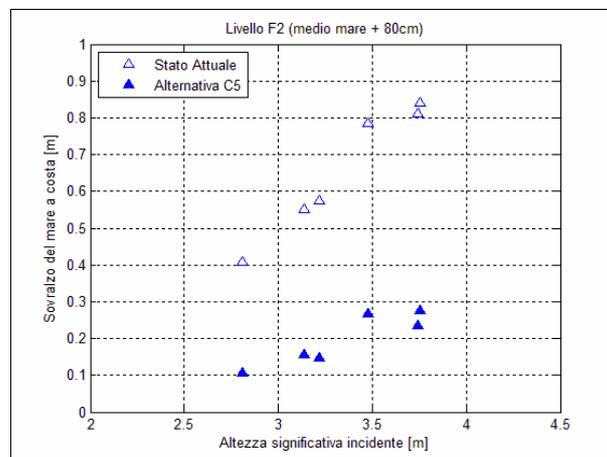


Figura 6.17 – Misure di sovrizzo nell'area protetta relativa alla configurazione C5 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

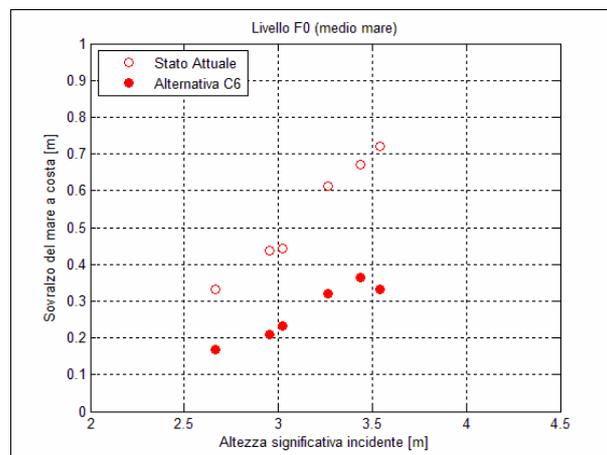


Figura 6.18 – Misure di sovrizzo nell'area protetta relativa alla configurazione C6 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

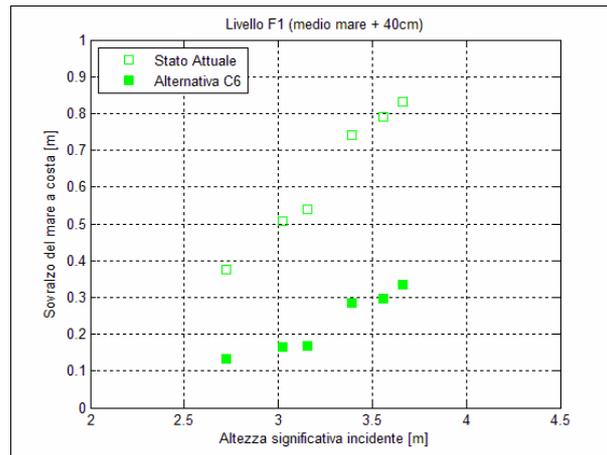


Figura 6.19 – Misure di sovrалzo nell’area protetta relativa alla configurazione C6 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

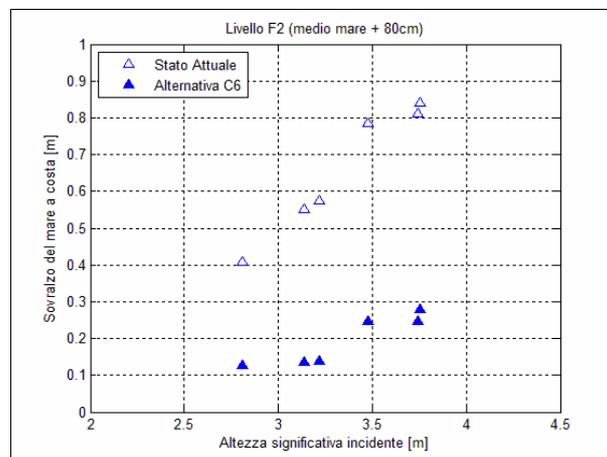


Figura 6.20 – Misure di sovrалzo nell’area protetta relativa alla configurazione C6 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Dalle tabelle 6.107, 6.108 e 6.109 si osserva che i valori dei sovrалzi misurati nelle tre configurazioni, per tutte le condizioni di moto ondoso e livello del mare simulati, sono sostanzialmente uguali. Con questo si dimostra che tale fenomeno non risulta influenzato dalla distanza relativa tra la seconda barriera in geotubi e quella sommersa a scogliera.. Inoltre, con questa seconda barriera, indipendentemente dalla posizione, i sovrалzi misurati sono sensibilmente inferiori a quelli misurati nei modelli delle alternative C2 e C3 i quali erano già molto inferiori alle misure sullo stato attuale viste nella configurazione C0.

In tabella 6.110 e 6.11 sono riportati i valori di sovrалzo idrico, per ogni livello idrico, relativi alle alternative progettuali C7 e C8. Nelle figure 6.21- 6.26 tali misure

sono confrontate graficamente con la configurazione C0, rappresentante lo stato attuale di difesa di Marina di Pisa.

**Tabella 6.110:** Misure in scala prototipo relative al sovrizzo del livello idrico tra la scogliera parallela e quella radente nella configurazione C7

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
Attacco Ondoso	I1 ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0.34	0.26	0.13
	I2 ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0.43	0.32	0.21
	I3 ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	0.44	0.29	0.19
	I4 ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0.58	0.39	0.28
	I5 ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.58	0.40	0.25
	I6 ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.61	0.39	0.30

**Tabella 6.111:** Misure in scala prototipo relative al sovrizzo del livello idrico tra la scogliera parallela e quella radente nella configurazione C8

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
Attacco Ondoso	I1 ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0.50	0.31	0.23
	I2 ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0.55	0.41	0.31
	I3 ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	0.50	0.40	0.29
	I4 ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0.67	0.54	0.44
	I5 ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.63	0.51	0.40
	I6 ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.60	0.50	0.38

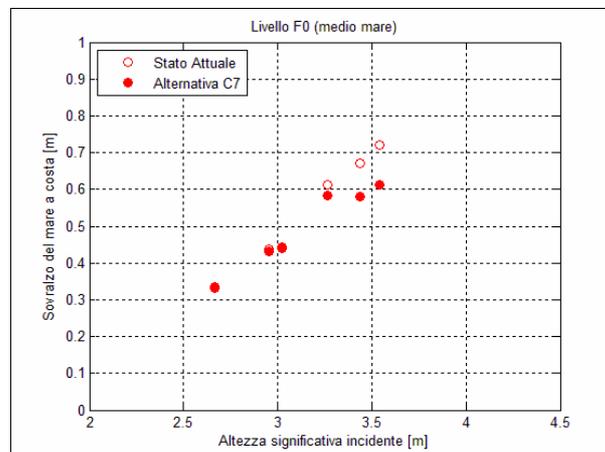


Figura 6.21 – Misure di sovrizzo nell'area protetta relativa alla configurazione C7 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

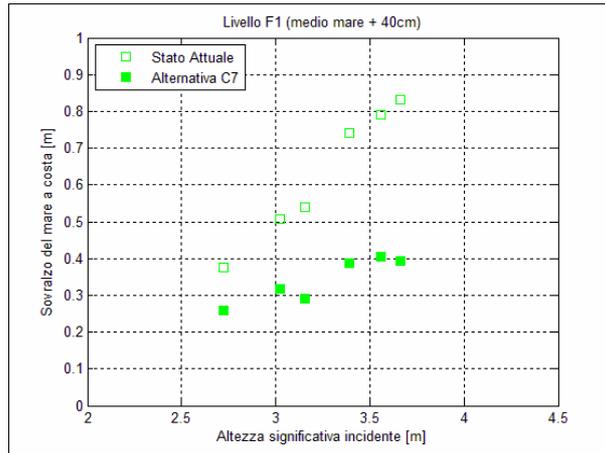


Figura 6.22 – Misure di sovralzo nell'area protetta relativa alla configurazione C7 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

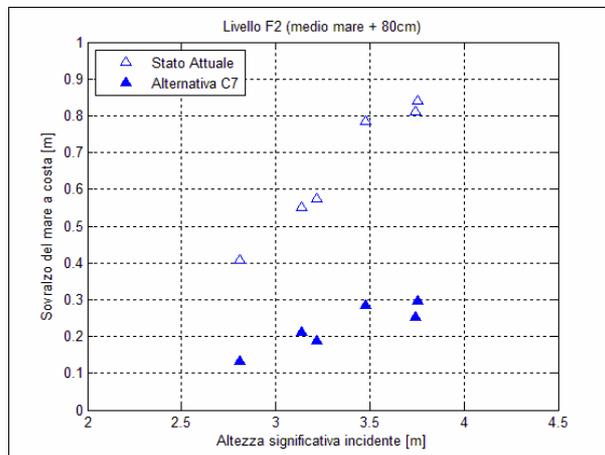


Figura 6.23 – Misure di sovralzo nell'area protetta relativa alla configurazione C7 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

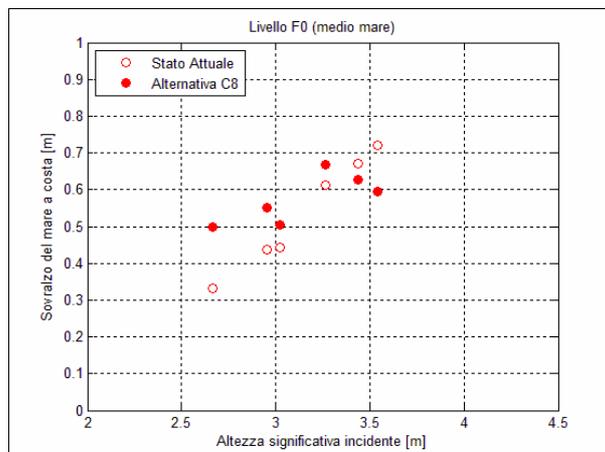


Figura 6.24 – Misure di sovralzo nell'area protetta relativa alla configurazione C8 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

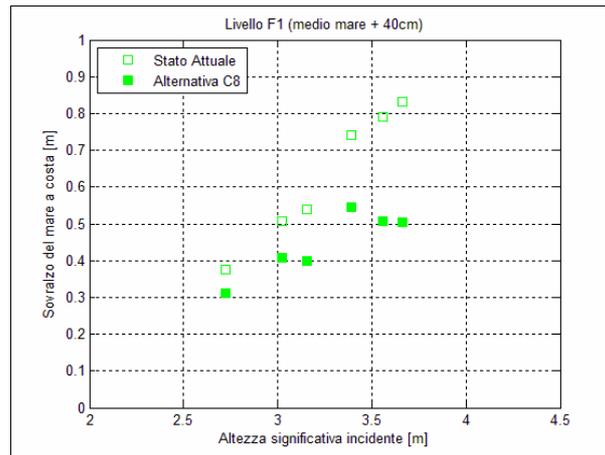


Figura 6.25 – Misure di sovralzo nell'area protetta relativa alla configurazione C8 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

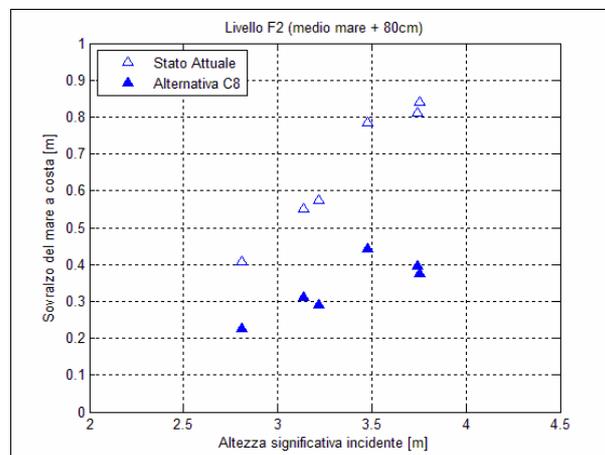


Figura 6.26 – Misure di sovralzo nell'area protetta relativa alla configurazione C8 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Dai valori riportati nelle tabelle 6.110 e 6.111 si osserva che i sovralti relativi alla configurazione C8 risultano sempre leggermente superiori rispetto a quelli misurati nella configurazione C7. Inoltre entrambe le configurazioni mostrano valori di sovralto decisamente inferiori rispetto alla configurazione C0 fatta eccezione per il livello F0 della configurazione C8, nel quale, alcuni attacchi ondosi risultano superiori rispetto allo stato attuale. Tale fenomeno può essere spiegato a causa della ridotta permeabilità della barriera in geotubi che non permette un facile scambio tra le portate in avanzamento verso riva e quelle di ritorno.

In tabella 6.112 sono riportati i valori di sovralto idrico relativo all' alternativa progettuale C9 per ciascun livello di prova. Nelle figure 6.27, 6.28 e 6.29 tali misure

sono confrontate graficamente con la configurazione C0 rappresentante lo stato di difesa attuale di Marina di Pisa.

**Tabella 6.112:** Misure in scala prototipo relative al sovrizzo del livello idrico tra la scogliera parallela e quella radente nella configurazione C9

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1</b> ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0.30	0.14	0.11
	<b>I2</b> ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0.24	0.18	0.14
	<b>I3</b> ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	0.22	0.18	0.13
	<b>I4</b> ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0.32	0.28	0.24
	<b>I5</b> ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.32	0.28	0.22
	<b>I6</b> ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.28	0.29	0.20

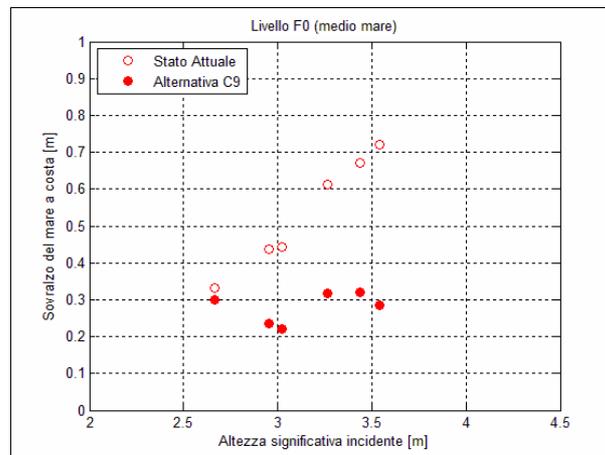


Figura 6.27 – Misure di sovrizzo nell’area protetta relativa alla configurazione C9 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

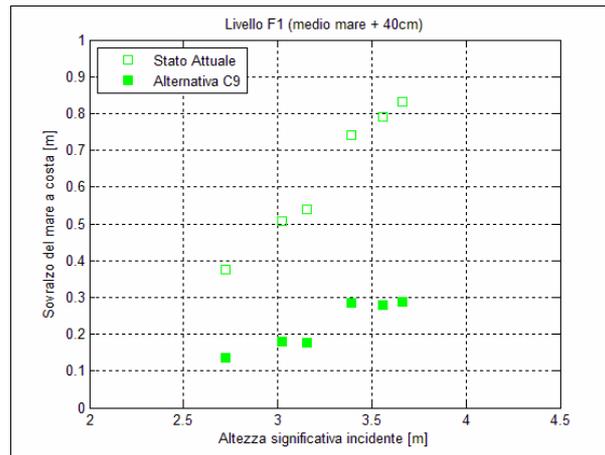


Figura 6.28 – Misure di sovrалzo nell'area protetta relativa alla configurazione C9 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

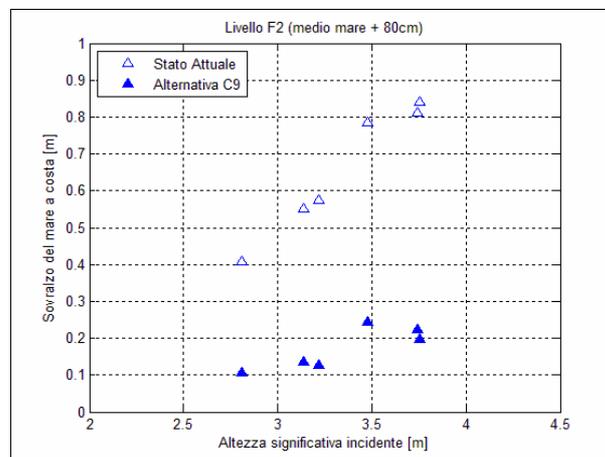


Figura 6.29 – Misure di sovrалzo nell'area protetta relativa alla configurazione C9 confrontata con la configurazione attuale C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Dai valori riportati in tabella 6.112 si osserva che le misure dei sovrалzi idrici nella configurazione C9 risultano decisamente inferiori rispetto a quelli ottenuti nella configurazione attuale C0 e che tale diminuzione è tanto più pronunciata quanto più il livello idrico aumenta. Confrontando, invece, tali valori con quelli della C4 si nota che essi sono sostanzialmente simili; tutto ciò dimostra che la tecnica di costruzione (scogliera o geotubo) della seconda barriera sommersa non influisce in termini di sovrалzo se costruita nella stessa posizione e nella stessa geometria.

### 6.3.2 Trasmissione

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

Per l'analisi della 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 tabelle 6.113 e 6.114 e nelle figure 6.30, 6.31 e 6.32 sono riportati i valori di trasmissione, nell'area tra la scogliera parallela e quella radente, indotti dagli attacchi ondosi che si propagano sul mare con livello medio pari a F0, F1 e F2, nelle configurazioni C0 e C1

**Tabella 6.113:** Misure di trasmissione in scala prototipo relative alla configurazione C0, con corrente di rip nel varco a Nord sostanzialmente nulla

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1 (H<sub>si</sub>=2.7m T<sub>p</sub>=7.3s)</b>	1.0	1.3	1.4
	<b>I2 (H<sub>si</sub>=2.9m T<sub>p</sub>=8.8s)</b>	1.3	1.6	1.8
	<b>I3 (H<sub>si</sub>=3.0m T<sub>p</sub>=12s)</b>	1.4	1.7	1.8
	<b>I4 (H<sub>si</sub>=3.3m T<sub>p</sub>=9.1s)</b>	1.5	1.8	2.0
	<b>I5 (H<sub>si</sub>=3.4m T<sub>p</sub>=12.6s)</b>	1.6	1.9	2.1
	<b>I6 (H<sub>si</sub>=3.5m T<sub>p</sub>=12.2s)</b>	1.6	2.0	2.2

**Tabella 6.114:** Misure di trasmissione in scala prototipo relative alla configurazione C1, con corrente di rip nel varco a Nord forzata pari a 1.14 mc/s

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1 (H<sub>si</sub>=2.7m T<sub>p</sub>=7.3s)</b>	1.0	1.4	1.5
	<b>I2 (H<sub>si</sub>=2.9m T<sub>p</sub>=8.8s)</b>	1.4	1.7	2.0
	<b>I3 (H<sub>si</sub>=3.0m T<sub>p</sub>=12s)</b>	1.4	1.8	1.9
	<b>I4 (H<sub>si</sub>=3.3m T<sub>p</sub>=9.1s)</b>	1.5	1.9	2.2
	<b>I5 (H<sub>si</sub>=3.4m T<sub>p</sub>=12.6s)</b>	1.6	2.0	2.3
	<b>I6 (H<sub>si</sub>=3.5m T<sub>p</sub>=12.2s)</b>	1.5	2.1	2.4

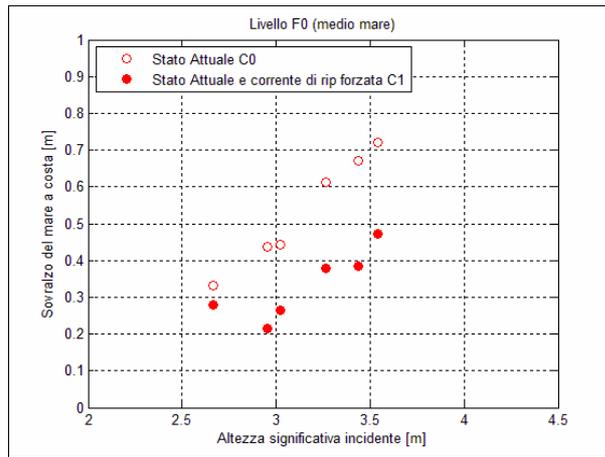


Figura 6.30 – Misure di trasmissione nell’area protetta relative alle configurazioni attuali C0 (senza ricircolo forzato) e C1 (con ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo.

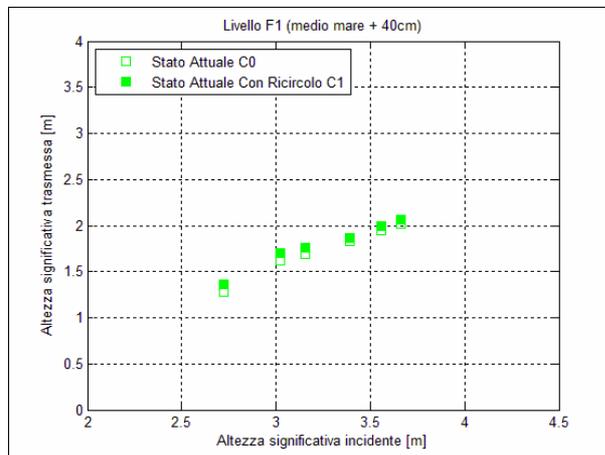


Figura 6.31 – Misure di trasmissione nell’area protetta relative alle configurazioni attuali C0 (senza ricircolo forzato) e C1 (con ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

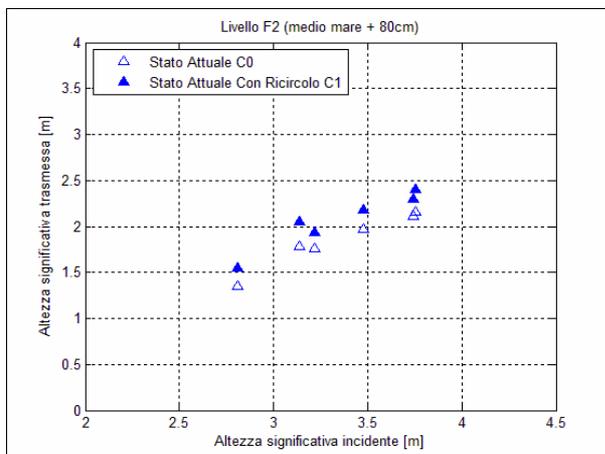


Figura 6.32 – Misure di trasmissione nell’area protetta relative alle configurazioni attuali C0 (senza ricircolo forzato) e C1 (con ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Dai valori riportati nelle tabelle 6.113 e 6.114 e dalle figure 6.30, 6.31 e 6.32, si osserva che la trasmissione del moto ondoso non risulta influenzata dalla presenza della corrente di rip nel varco. A parità di moto ondoso incidente, l'altezza d'onda trasmessa aumenta all' aumentare del livello del mare su cui si propagano le onde. Il fenomeno è facilmente spiegabile osservando che con i livelli del mare alti, la cresta della scogliera parallela appare relativamente più bassa e quindi più facilmente sormontabile a parità di moto ondoso incidente. Per esempio, nel caso dell'onda I1 si ha una trasmissione di moto ondoso pari a 1.0 m se la mareggiata avviene con livello del mare pari a zero (livello di prova F0), mentre, se la stessa mareggiata avvenisse con livello del mare incrementato di 80 cm (livello di prova F2) l'onda trasmessa avrebbe altezza maggiore del 40% , quindi pari a 1.4 m.

In tabella 6.115 sono riportati i valori di trasmissione, nell'area tra la scogliera parallela e quella radente, relativi all' alternativa progettuale C2 per ciascun livello di prova. Attraverso le figure 6.33, 6.34 e 6.35 è possibile effettuare un confronto grafico, in termini di altezza d'onda trasmessa nell'area protetta, tra la configurazione C2 e la C0 rappresentante la situazione attuale di Marina di Pisa.

**Tabella 6.115:** Misure di trasmissione in scala prototipo relative alla configurazione C2

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1 (<math>H_{si}=2.7m</math> <math>T_p=7.3s</math>)</b>	1.7	2.0	2.3
	<b>I2 (<math>H_{si}=2.9m</math> <math>T_p=8.8s</math>)</b>	2.0	2.3	2.7
	<b>I3 (<math>H_{si}=3.0m</math> <math>T_p=12s</math>)</b>	2.0	2.4	2.6
	<b>I4 (<math>H_{si}=3.3m</math> <math>T_p=9.1s</math>)</b>	2.2	2.6	2.9
	<b>I5 (<math>H_{si}=3.4m</math> <math>T_p=12.6s</math>)</b>	2.7	3.0	3.2
	<b>I6 (<math>H_{si}=3.5m</math> <math>T_p=12.2s</math>)</b>	2.7	3.0	-

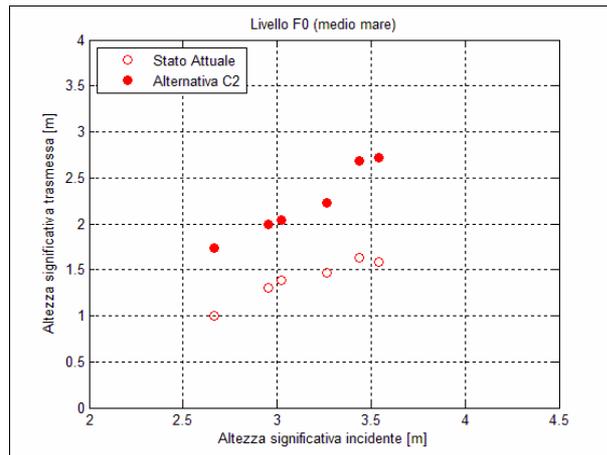


Figura 6.33– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C2 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

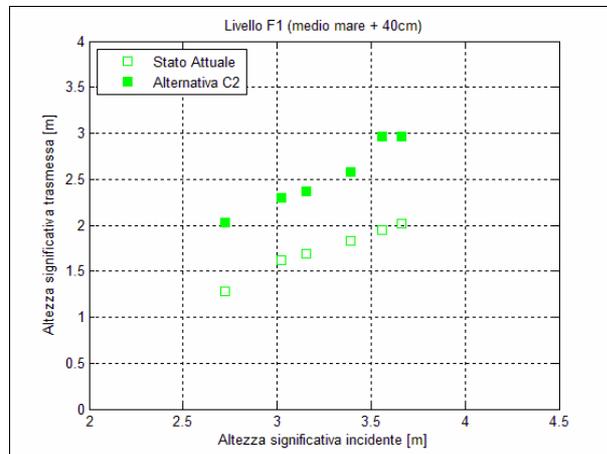


Figura 6.34– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C2 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

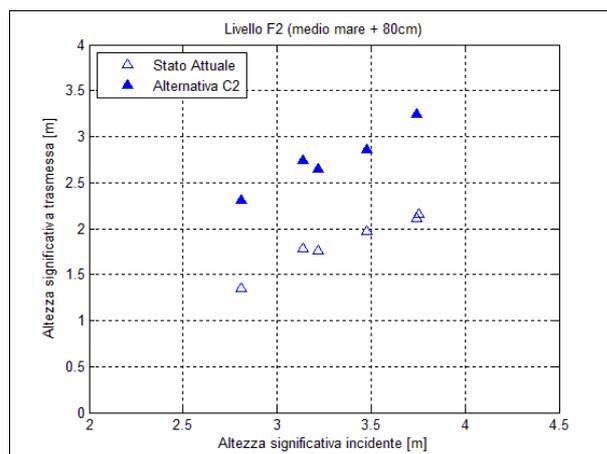


Figura 6.35– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C2 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Osservando i valori riportati per la configurazione C2 si osserva che l'altezza d'onda trasmessa aumenta significativamente a causa della trasformazione della scogliera distaccata da emersa a sommersa. Per tutti i moti ondosi riprodotti si ha un aumento di circa 1 metro dell'altezza d'onda trasmessa rispetto alle attuali opere di protezione (C0 e C1). I massimi incrementi dell'altezza d'onda si hanno nel caso dei livelli del mare elevati (livelli di prova F2). Nel caso dell'onda I6, le misure sperimentali sono state interrotte prima della fine degli esperimenti a causa delle eccessive trasmissioni di moto ondoso che stavano provocando tracimazioni troppo elevate per essere misurate con la strumentazione utilizzata. Da un punto di vista della tollerabilità della trasmissione del moto ondoso in merito alla stabilità strutturale delle opere di difesa e della sicurezza idraulica del litorale di Marina di Pisa, la modifica proposta con la configurazione C2 non è risultata vantaggiosa..

Nella tabella 6.116 sono riportati i valori di trasmissione, nell'area tra la scogliera parallela e quella radente, relativi all' alternativa progettuale C3 per ciascun livello di prova. Nelle figure 6.36, 6.37 e 6.38 le misure di trasmissione relative alla configurazione C3 sono confrontate graficamente con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) rappresentante lo stato attuale di difesa di Marina di Pisa.

**Tabella 6.116:** Misure di trasmissione in scala prototipo relative alla configurazione C3

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1 (<math>H_{si}=2.7m</math> <math>T_p=7.3s</math>)</b>	1.4	1.6	1.8
	<b>I2 (<math>H_{si}=2.9m</math> <math>T_p=8.8s</math>)</b>	1.5	1.8	2.1
	<b>I3 (<math>H_{si}=3.0m</math> <math>T_p=12s</math>)</b>	1.5	1.9	2.1
	<b>I4 (<math>H_{si}=3.3m</math> <math>T_p=9.1s</math>)</b>	1.7	2.0	2.2
	<b>I5 (<math>H_{si}=3.4m</math> <math>T_p=12.6s</math>)</b>	2.0	2.2	2.5
	<b>I6 (<math>H_{si}=3.5m</math> <math>T_p=12.2s</math>)</b>	2.1	2.3	2.5

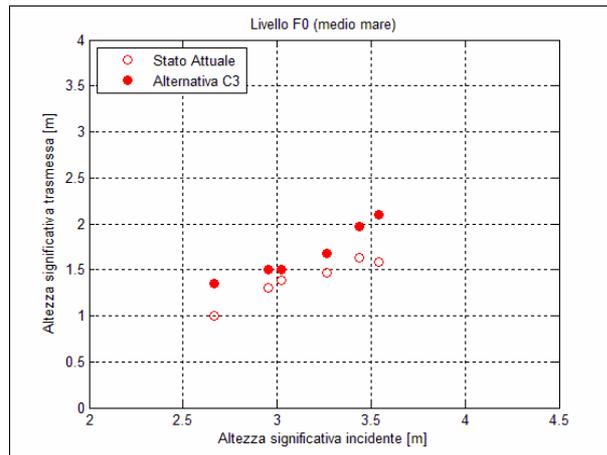


Figura 6.36– Misure di trasmissione nell'area protetta relative alla configurazione C3 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

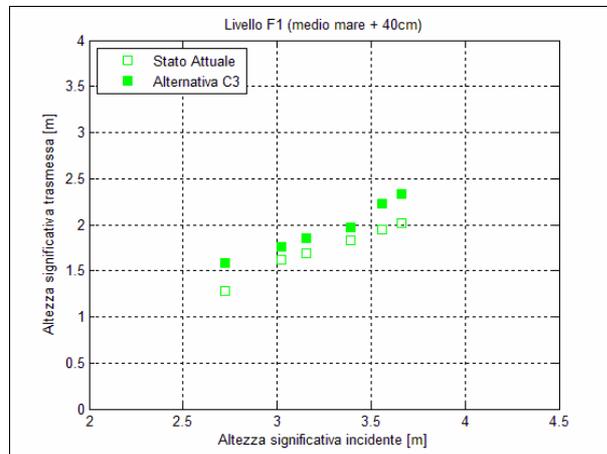


Figura 6.37– Misure di trasmissione nell'area protetta relative alla configurazione C3 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

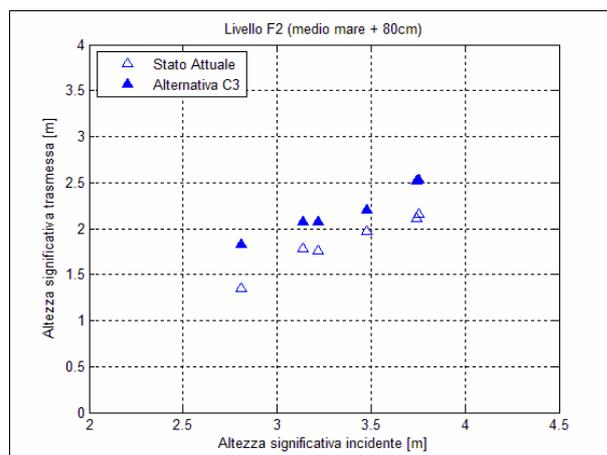


Figura 6.38– Misure di trasmissione nell'area protetta relative alla configurazione C3 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Come si osserva dai valori riportati in tabella 6.116 e dalle figure 6.36, 6.37 e 6.38, l'allungamento delle scogliera sommersa fino a 30 m di cresta, rispetto alla scogliera C2 caratterizzata da una cresta di 20 m, comporta, per tutti i livelli idrici, significativi abbattimenti delle altezze d'onda trasmesse. Inoltre, in questo caso, la trasmissione risulta solo un po' maggiore, ma comunque molto vicina, a quella misurata per la configurazione C0 rappresentante lo stato di difesa attuale di Marina di Pisa..

Nelle tabelle 6.117, 6.118 e 6.119 sono riportati i valori di trasmissione, nell'area tra la scogliera parallela e quella radente, relativi alle alternative progettuali C4, C5 e C6 per ciascun livello di prova. Inoltre nelle tabelle 6.39-6.47 sono riportati i confronti grafici tra ciascuna di queste configurazioni con la configurazione C0.

**Tabella 6.117:** Misure di trasmissione in scala prototipo relative alla configurazione C4

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1 (H<sub>si</sub>=2.7m T<sub>p</sub>=7.3s)</b>	1.2	1.5	1.8
	<b>I2 (H<sub>si</sub>=2.9m T<sub>p</sub>=8.8s)</b>	1.5	1.7	2.1
	<b>I3 (H<sub>si</sub>=3.0m T<sub>p</sub>=12s)</b>	1.4	1.7	2.1
	<b>I4 (H<sub>si</sub>=3.3m T<sub>p</sub>=9.1s)</b>	1.6	1.9	2.2
	<b>I5 (H<sub>si</sub>=3.4m T<sub>p</sub>=12.6s)</b>	1.9	2.2	2.5
	<b>I6 (H<sub>si</sub>=3.5m T<sub>p</sub>=12.2s)</b>	1.9	2.2	2.5

**Tabella 6.118:** Misure di trasmissione in scala prototipo relative alla configurazione C5

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1 (H<sub>si</sub>=2.7m T<sub>p</sub>=7.3s)</b>	1.3	1.5	1.9
	<b>I2 (H<sub>si</sub>=2.9m T<sub>p</sub>=8.8s)</b>	1.5	1.7	2.1
	<b>I3 (H<sub>si</sub>=3.0m T<sub>p</sub>=12s)</b>	1.5	1.7	2.1
	<b>I4 (H<sub>si</sub>=3.3m T<sub>p</sub>=9.1s)</b>	1.6	1.9	2.3
	<b>I5 (H<sub>si</sub>=3.4m T<sub>p</sub>=12.6s)</b>	1.8	2.2	2.6
	<b>I6 (H<sub>si</sub>=3.5m T<sub>p</sub>=12.2s)</b>	1.9	2.2	2.7

**Tabella 6.119:** Misure di trasmissione in scala prototipo relative alla configurazione C6

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1</b> ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	1.2	1.5	1.8
	<b>I2</b> ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	1.4	1.8	2.1
	<b>I3</b> ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	1.4	1.7	2.0
	<b>I4</b> ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	1.5	1.9	2.2
	<b>I5</b> ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	1.8	2.1	2.4
	<b>I6</b> ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	1.7	2.2	2.4

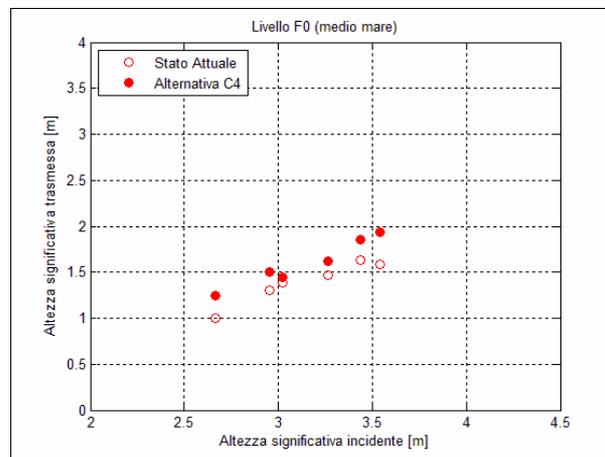


Figura 6.39– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C4 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

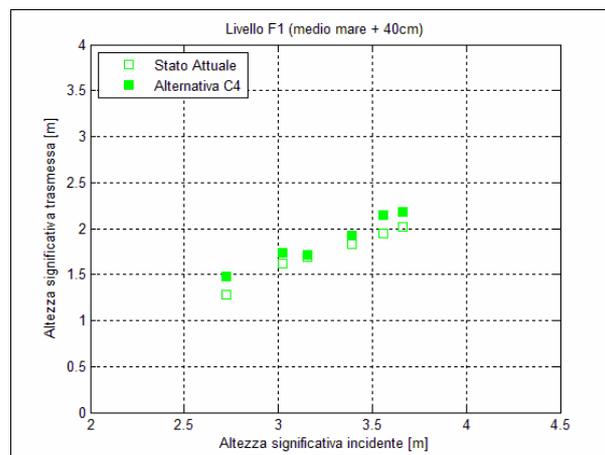


Figura 6.40– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C4 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

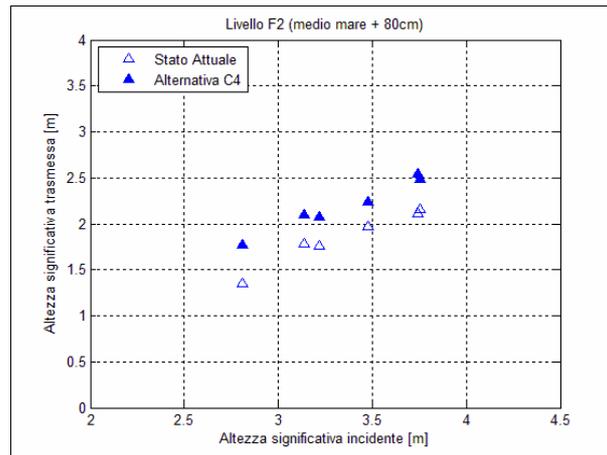


Figura 6.41– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C4 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

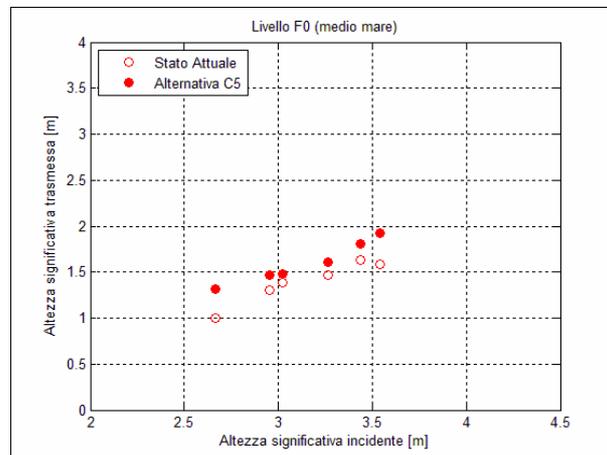


Figura 6.42– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C5 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

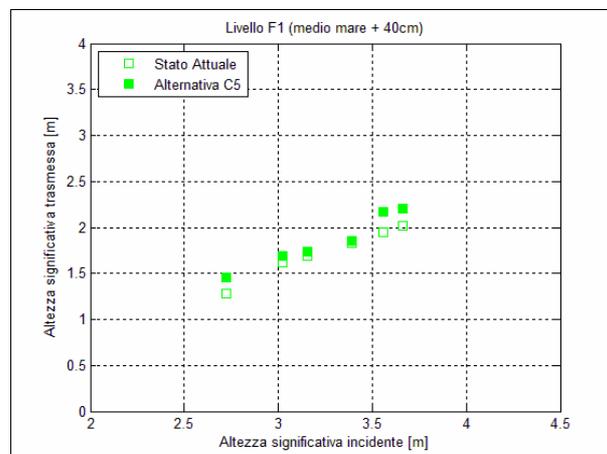


Figura 6.43– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C5 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

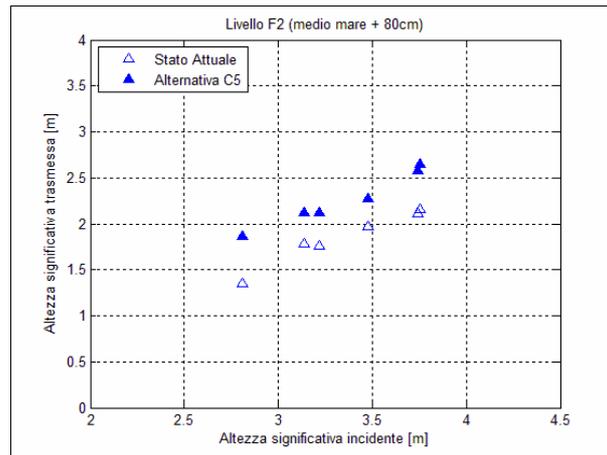


Figura 6.44– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C5 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

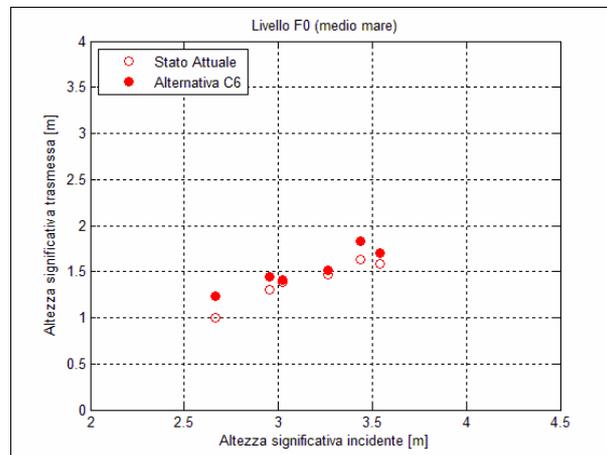


Figura 6.45– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C6 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

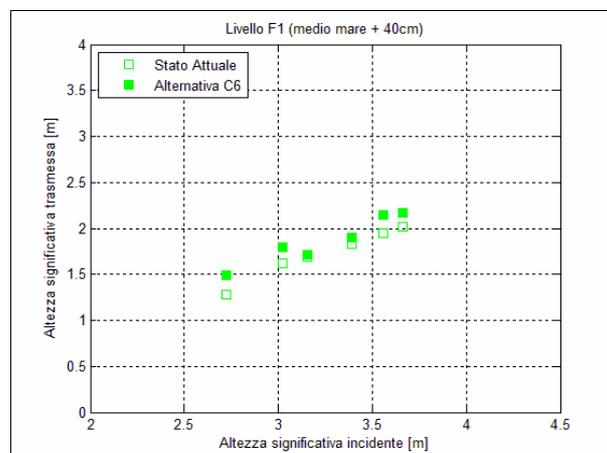


Figura 6.46– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C6 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

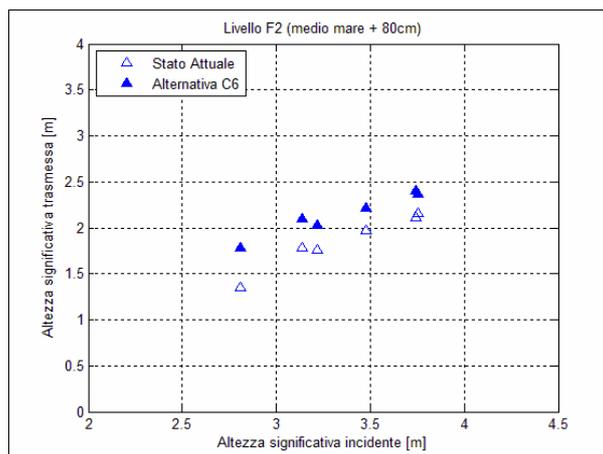


Figura 6.47– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C6 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Osservando i valori riportati nelle tabelle 6.117, 6.118 e 6.119 si osserva che le misure dell'altezza d'onda trasmessa dimostrano solo piccolissime differenze tra i valori ottenuti nelle configurazioni C4, C5 e C6 tanto da poter ritenere questo fenomeno, ai fini pratici, come indipendente dalle posizioni testate per la seconda barriera. Tuttavia come si può osservare dalle figure 6.39-6.47, il confronto con i valori di altezza d'onda trasmessa misurata nella configurazione C0 (stato attuale) e nella migliore delle configurazioni precedenti (C3) dimostra che con l'inserimento di questa seconda barriera si ottengono valori di trasmissione sostanzialmente simili a quelli che è possibile ottenere con l'alternativa C3, già prossimi alle misure sullo stato attuale.

Nelle tabelle 6.120 e 6.121 e nelle figure 6.48-6.53 sono riportati i valori di trasmissione, nell’area tra la scogliera parallela e quella radente, relativa alle alternative progettuali C7 e C8 per ciascun livello di prova.

**Tabella 6.120:** Misure in scala prototipo di trasmissione relative alla configurazione C7

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1</b> ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	1.3	1.4	1.6
	<b>I2</b> ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	1.5	1.7	1.9
	<b>I3</b> ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	1.5	1.7	1.9
	<b>I4</b> ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	1.6	1.8	2.0
	<b>I5</b> ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	1.8	2.1	2.2
	<b>I6</b> ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	1.9	2.0	2.4

**Tabella 6.121:** Misure in scala prototipo di trasmissione relative alla configurazione C8

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1</b> ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	1.2	1.4	1.5
	<b>I2</b> ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	1.4	1.7	1.9
	<b>I3</b> ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12s$ )	1.4	1.7	1.8
	<b>I4</b> ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	1.6	1.9	2.0
	<b>I5</b> ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	1.7	2.0	2.1
	<b>I6</b> ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	1.7	2.0	2.1

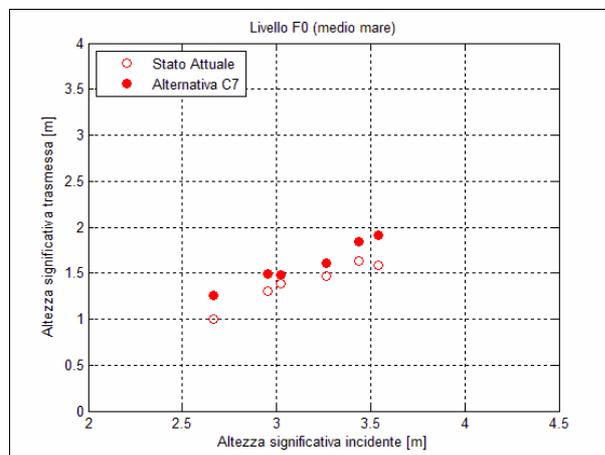


Figura 6.48– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C7 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

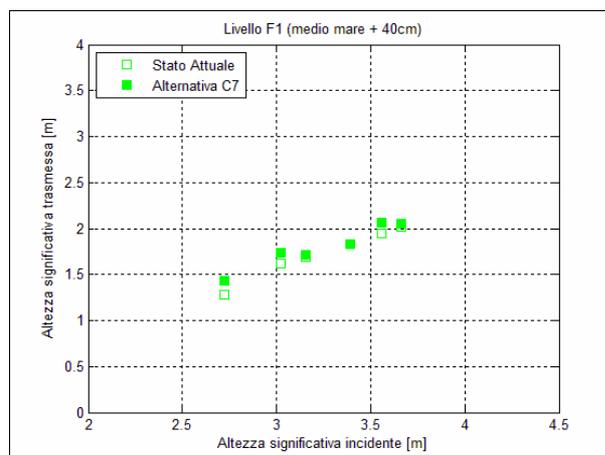


Figura 6.49– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C7 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

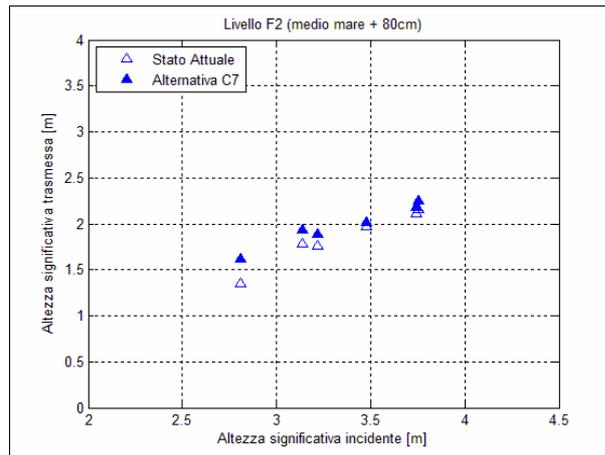


Figura 6.50– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C7 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

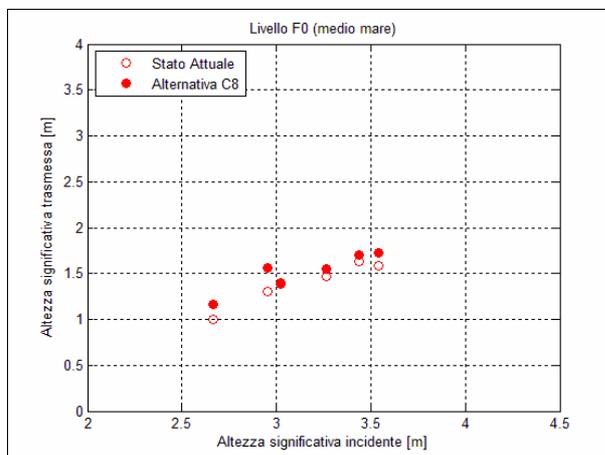


Figura 6.51– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C8 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

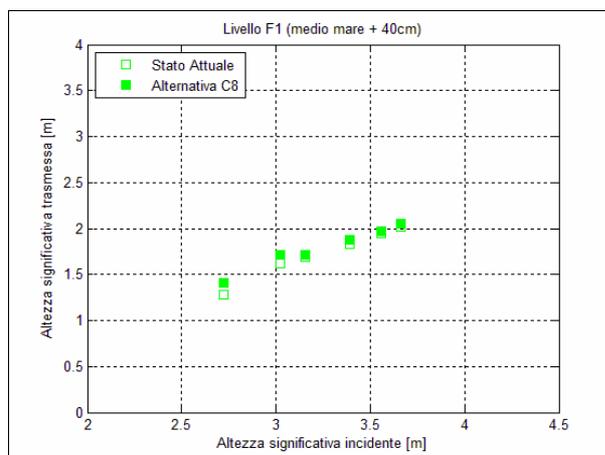


Figura 6.52– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C8 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

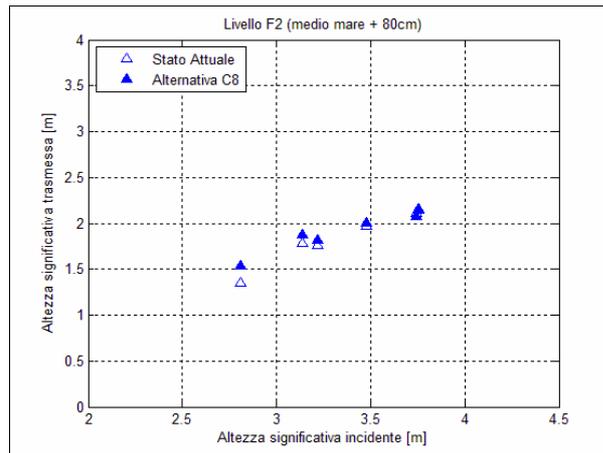


Figura 6.53– Misure di trasmissione nell’area protetta relative alla configurazione C8 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Come si osserva dalle tabelle 6.120 e 6.121 e dalle figure 6.48-6.53, i valori di trasmissione delle configurazioni C7 e C8 risultano molto vicini tra loro e sostanzialmente simili a quelli ottenuti nella configurazione C0, ovvero con le opere di difesa dello stato attuale.

In tabella 6.122 sono riportati i valori di trasmissione, nell’area tra la scogliera parallela e quella radente, relativi alla configurazione C9 per ciascun livello di prova. Nelle figure 6.54, 6.55 e 6.56 tali valori, per ogni livello idrico, sono confrontati graficamente con quelli ottenuti nella configurazione C0 rappresentante lo stato attuale.

**Tabella 6.122:** Misure in scala prototipo di trasmissione relative alla configurazione C9

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1 (H<sub>si</sub>=2.7m T<sub>p</sub>=7.3s)</b>	1.2	1.5	1.8
	<b>I2 (H<sub>si</sub>=2.9m T<sub>p</sub>=8.8s)</b>	1.3	1.7	1.9
	<b>I3 (H<sub>si</sub>=3.0m T<sub>p</sub>=12.0s)</b>	1.3	1.7	1.9
	<b>I4 (H<sub>si</sub>=3.3m T<sub>p</sub>=9.1s)</b>	1.5	1.8	2.1
	<b>I5 (H<sub>si</sub>=3.4m T<sub>p</sub>=12.6s)</b>	1.7	2.1	2.4
	<b>I6 (H<sub>si</sub>=3.5m T<sub>p</sub>=12.2s)</b>	1.7	2.1	2.3

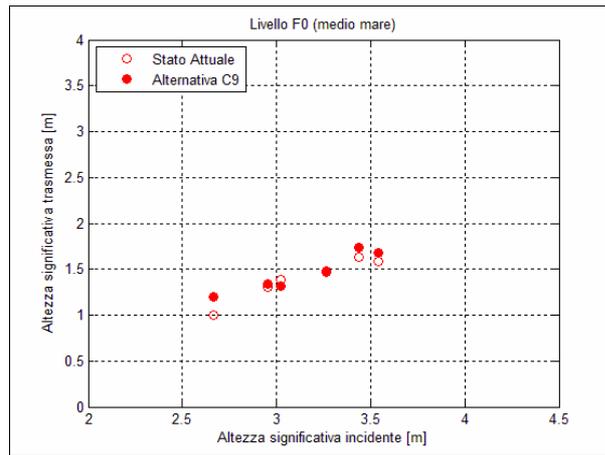


Figura 6.54– Misure di trasmissione nell'area protetta relative alla configurazione C9 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

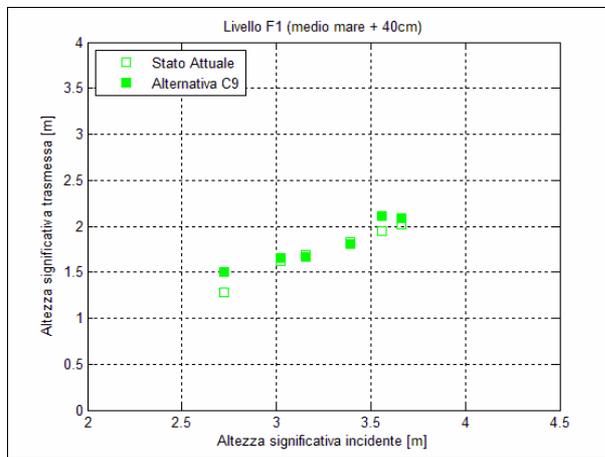


Figura 6.55– Misure di trasmissione nell'area protetta relative alla configurazione C9 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

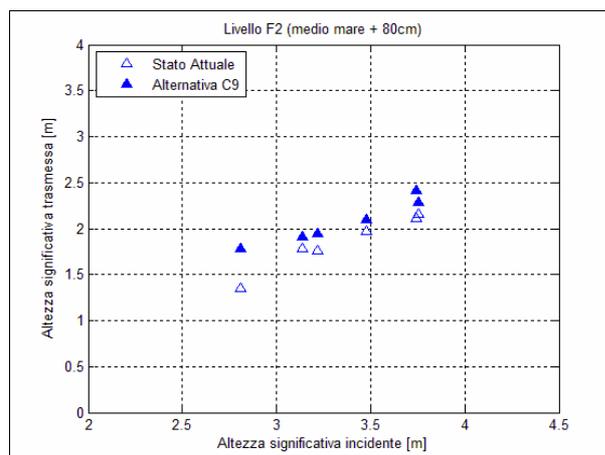


Figura 6.56– Misure di trasmissione nell'area protetta relative alla configurazione C9 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Confrontando la tabella 6.122 con la 6.117 relativa alla configurazione C4, di forma e posizione simile alla configurazione C9 ma realizzata in geotubi, si osserva che i valori di trasmissione risultano pressoché uguali. In questo modo si dimostra, ancora una volta che la tecnica di costruzione (scogliera o geotubo) della seconda barriera sommersa, qualora vengano mantenute la stessa posizione e geometria, non interferisce nel comportamento idraulico in termini di altezza d'onda trasmessa.. Inoltre, con questa alternativa progettuale si ottengono valori di trasmissione sostanzialmente simili a quelli misurati sul modello dello stato attuale (configurazione C0) fatta eccezione per il livello idrico maggiore F2, nel quale, con la C9, si registrano valori leggermente più alti.

### **6.3.3 Overtopping**

I dati relativi all'overtopping sono stati analizzati a partire dalle misure dei volumi di acqua tracimati sul pannello rappresentante la strada litoranea, durante la serie di prove e per le diverse configurazioni. I valori sono espressi in termini di portata, 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).

Le tracimazioni sulla strada litoranea sono determinate dall'altezza d'onda trasmessa a tergo della scogliera distaccata (che quindi si presenta davanti alla scogliera radente) e dal livello idrico che si forma nella zona compresa tra questa e la scogliera radente; in particolare le portate tracimate aumentano all'aumentare sia dell'onda trasmessa che dei livelli del mare. La misura di questo fenomeno fornisce quindi un parametro sintetico molto utile al fine di valutare l'efficienza del sistema di difesa di Marina di Pisa perché riassume le conseguenze derivanti dai valori assunti dagli altri due fenomeni, i sovralti idrici nella zona protetta e l'altezza d'onda trasmessa.

Nelle tabelle 6.123 e 6.124 sono riportate le portate tracimate sulla strada litoranea a causa degli attacchi ondosi che si propagano su livelli del mare F0, F1 e F2 relative alle configurazioni C0 e C1, rappresentanti lo stato attuale di Marina di Pisa. Nelle figure 6.57, 6.58 e 6.59 è mostrato il confronto grafico tra le configurazioni C0 (senza ricircolo forzato) e C1 (con ricircolo forzato)

**Tabella 6.123:** Misure di tracimazione, espresse in l/s/m, relative alla configurazione C0, con correnti di rip nel varco a Nord sostanzialmente nulla, in scala prototipo

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	I1 ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0	0	0
	I2 ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0	0	0.3
	I3 ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12.0s$ )	0	0	1.1
	I4 ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0	0.1	2
	I5 ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.4	1.1	8.5
	I6 ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.9	3.7	15.8

**Tabella 6.124:** Misure di tracimazione, espresse in l/s/m, relative alla configurazione C1, con correnti di rip nel varco a Nord forzata pari a 1.14 mc/s, in scala prototipo

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	I1 ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0	0	0
	I2 ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0	0	0.1
	I3 ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12.0s$ )	0	0	1
	I4 ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0	0	1
	I5 ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.1	0.9	5.1
	I6 ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.2	1.5	13

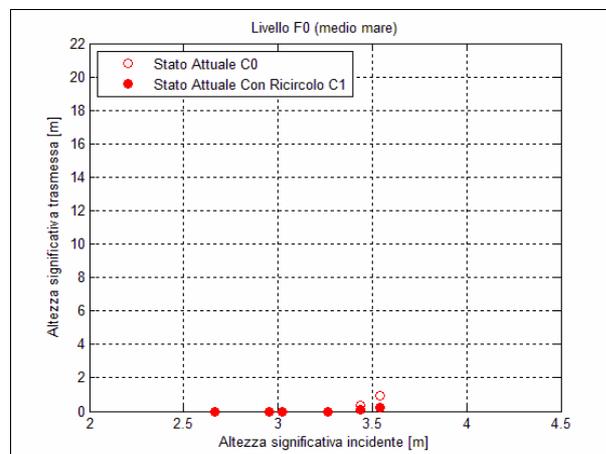


Figura 6.57– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alle configurazioni C0 (senza ricircolo forzato) e C1 (con ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

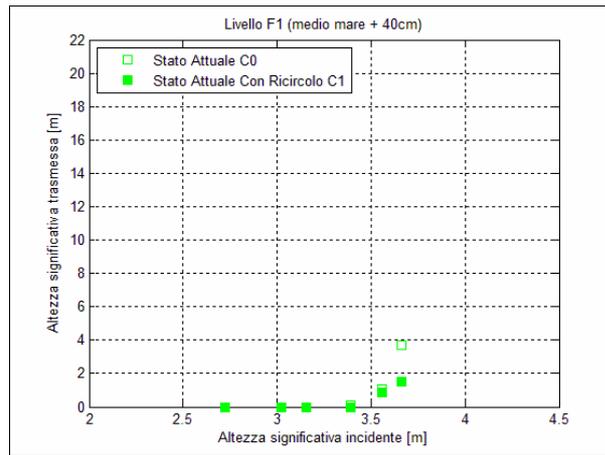


Figura 6.58– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alle configurazioni C0 (senza ricircolo forzato e C1 (con ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

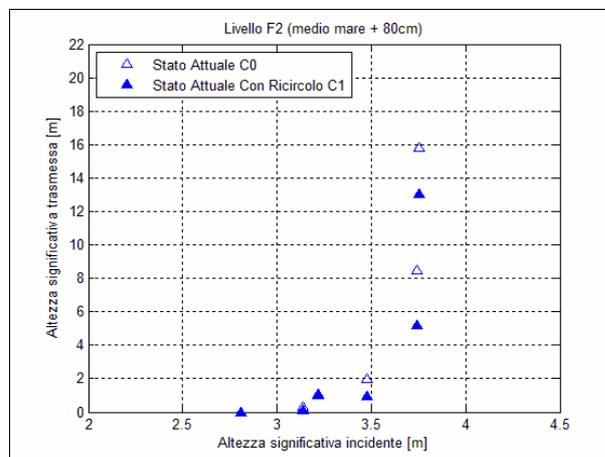


Figura 6.59– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alle configurazioni C0 (senza ricircolo forzato e C1 (con ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Le misure sperimentali relative alla condizione attuale di Marina di Pisa dimostrano che le tracimazioni sono fortemente determinate dal livello del mare durante la mareggiata. Se prendiamo in considerazione il livello F0 nella configurazione C0 si osserva che il moto ondoso estremo rappresentato dall’onda I6 da luogo a portate dell’ordine di 0.9 l/s/m che sono da ritenersi pericolose per la sicurezza dei pedoni (limite 0.1 l/s/m); se il livello del mare durante le mareggiate fosse maggiore di circa 40 cm per esempio come nel caso di alta marea (livello idrico F1) le tracimazioni possono raggiungere i 3.7 l/s/m e quindi raggiungere i limiti di tollerabilità per la sicurezza del traffico stradale e per la resistenza degli arredi urbani (limiti 1-10 l/s/m); infine nel caso in cui le mareggiate avvenissero in presenza di un livello del mare alto 80 cm sopra il valore di zero, come nel caso di alta marea accompagnata da forti venti foranei e basse pressioni (livello idrico F2), le portate tracimanti aumenterebbero notevolmente fino ad

arrivare a valori dell'ordine di 15.8 l/s/m così da superare anche i limiti di tollerabilità per pedoni, veicoli, arredi stradali e essere prossimi ai limiti di tollerabilità per la sicurezza strutturale delle pavimentazioni stradali e degli edifici lungomare (50 l/s/m), (vedi Allegato III).

In tabella 6.125 e nelle figure 6.60, 6.61 e 6.62 sono riportate, per ogni livello di prova, le portate tracimate sulla strada litoranea relative alla configurazione C2.

**Tabella 6.125:** Misure di tracimazione, espresse in l/s/m, relative alla configurazione C2, in scala prototipo

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1</b> ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0	0	0
	<b>I2</b> ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0	0.3	2.3
	<b>I3</b> ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12.0s$ )	0.3	1.4	4.9
	<b>I4</b> ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0.1	0.4	4.6
	<b>I5</b> ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.5	4.3	15.9
	<b>I6</b> ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	2.6	12.3	>50

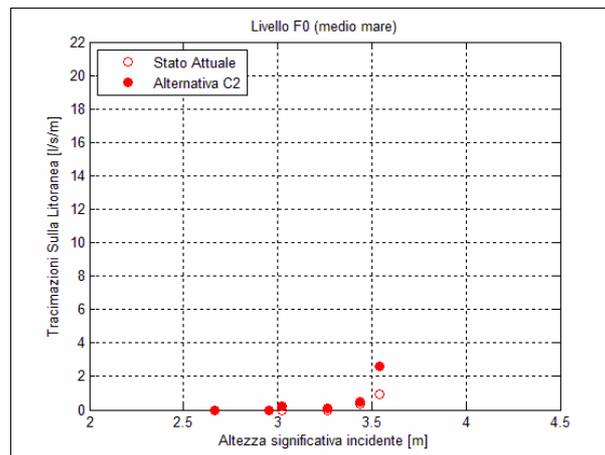


Figura 6.60– Misure di tracimazione nell'area protetta relative alla configurazione C2 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

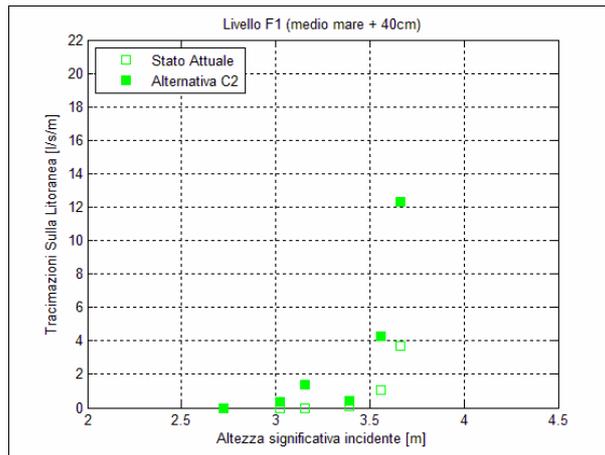


Figura 6.61– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C2 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

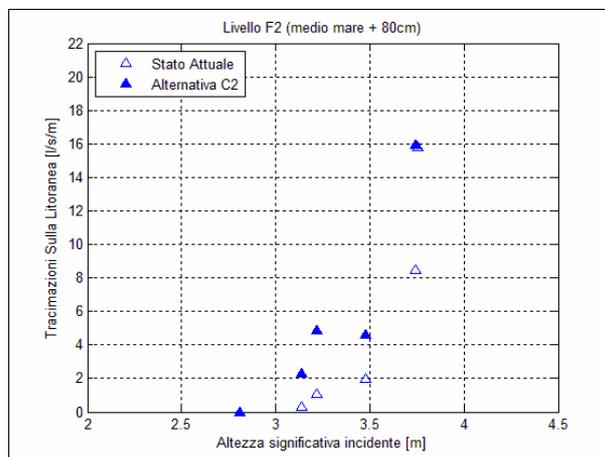


Figura 6.62– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C2 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Dalle figure 6.60, 6.61 e 6.62 si osserva che, rispetto alle tracimazioni misurate per lo stato attuale, con la modifica proposta nella configurazione C2, le tracimazioni iniziano già con moti ondosi meno intensi rispetto a quanto accade con il sistema di difesa attuale C0 e si verificano, inoltre, forti aumenti delle portate tracimanti sulla strada litoranea.

In tabella 6.126 e nelle figure 6.63, 6.64 e 6.65 sono riportate le portate tracimate sulla strada litoranea, per ogni livello di prova, relative alla configurazione C3.

**Tabella 6.126:** Misure di tracimazione, espresse in l/s/m, relative alla configurazione C3, in scala prototipo

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1 (<math>H_{si}=2.7m</math> <math>T_p=7.3s</math>)</b>	0	0	0.2
	<b>I2 (<math>H_{si}=2.9m</math> <math>T_p=8.8s</math>)</b>	0	0.1	1.5
	<b>I3 (<math>H_{si}=3.0m</math> <math>T_p=12.0s</math>)</b>	0.1	1	5.2
	<b>I4 (<math>H_{si}=3.3m</math> <math>T_p=9.1s</math>)</b>	0.1	0.7	5.3
	<b>I5 (<math>H_{si}=3.4m</math> <math>T_p=12.6s</math>)</b>	0.4	2.6	17
	<b>I6 (<math>H_{si}=3.5m</math> <math>T_p=12.2s</math>)</b>	1.4	8.3	>50

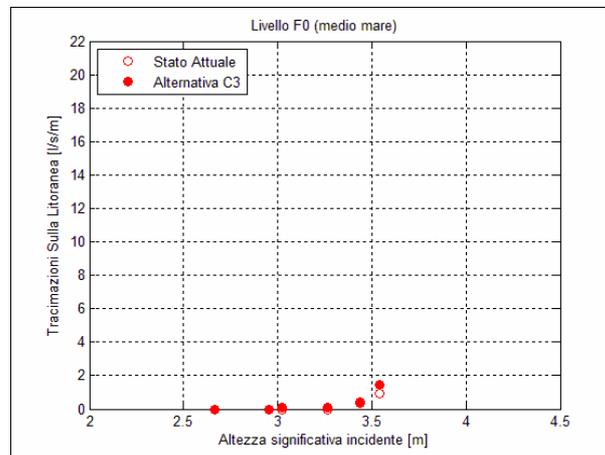


Figura 6.63– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C3 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

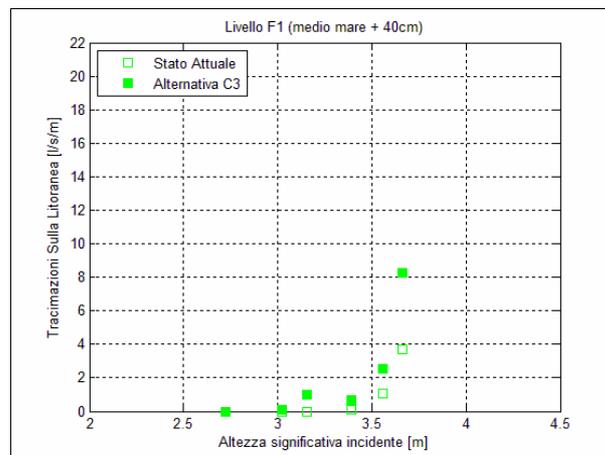


Figura 6.64– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C3 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

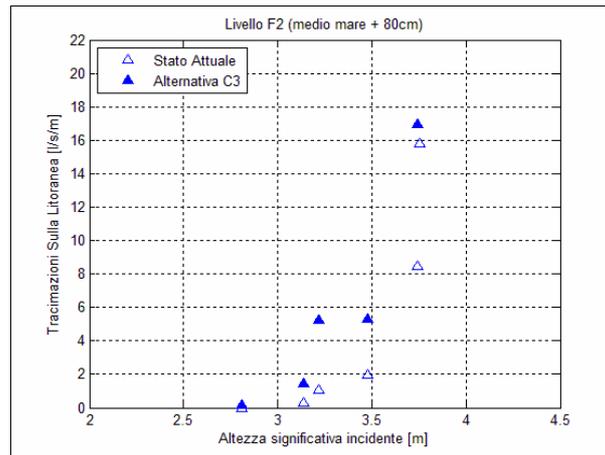


Figura 6.65– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C3 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Come è possibile verificare dalle tabelle 6.125 e 6.126, l'allungamento della scogliera sommersa fino a 30 m, cioè 10 metri in più rispetto alla configurazione C2, porta a modeste ma significative diminuzioni delle portate tracimanti sulla strada litoranea nel caso dei due livelli di prova F0 e F1 e portate sostanzialmente uguali per il livello F2. Il confronto con la situazione attuale, però, mostra che le tracimazioni sono più frequenti e rimangono ancora sensibilmente maggiori rispetto a quelle misurate con le opere di difesa nella situazione attuale (figure 6.63, 6.64 e 6.45).

Nelle tabelle 6.127, 6.128 e 6.129 e nelle figure 6.46-6.54 sono riportate, per ogni livello di prova, le portate tracimate sulla strada litoranea, relative alle configurazioni progettuali alternative C4, C5 e C6.

**Tabella 6.127:** Misure di tracimazione, espresse in l/s/m, relative alla configurazione C4, in scala prototipo

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1</b> ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0	0	0
	<b>I2</b> ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0	0.3	0.9
	<b>I3</b> ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12.0s$ )	0	0.2	3
	<b>I4</b> ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0	0.3	3.6
	<b>I5</b> ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.2	1.8	15.3
	<b>I6</b> ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.7	4.9	26.5

**Tabella 6.128:** Misure di tracimazione, espresse in l/s/m, relative alla configurazione C5, in scala prototipo

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
Attacco Ondoso	I1 ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0	0	0.2
	I2 ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0	0.2	1.0
	I3 ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12.0s$ )	0	0.6	3.8
	I4 ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0	0.3	4.3
	I5 ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.3	4.6	13.2
	I6 ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	1.2	6.3	25.7

**Tabella 6.129:** Misure di tracimazione, espresse in l/s/m, relative alla configurazione C6, in scala prototipo

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
Attacco Ondoso	I1 ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0	0	0.1
	I2 ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0	0.4	0.9
	I3 ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12.0s$ )	0	0.8	3.0
	I4 ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0.1	0.7	4.0
	I5 ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.1	2.2	10.3
	I6 ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.9	7.1	19.2

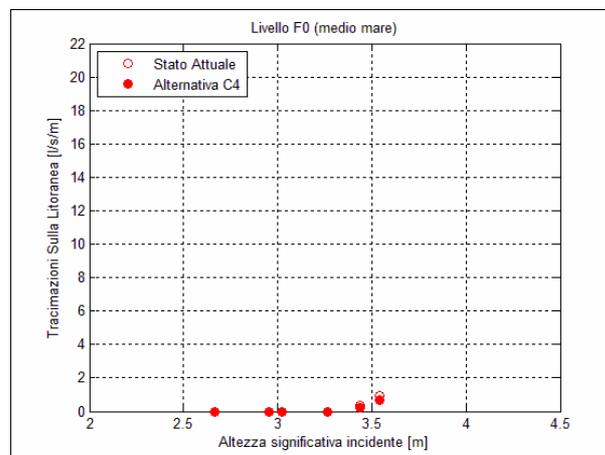


Figura 6.46– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C4 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

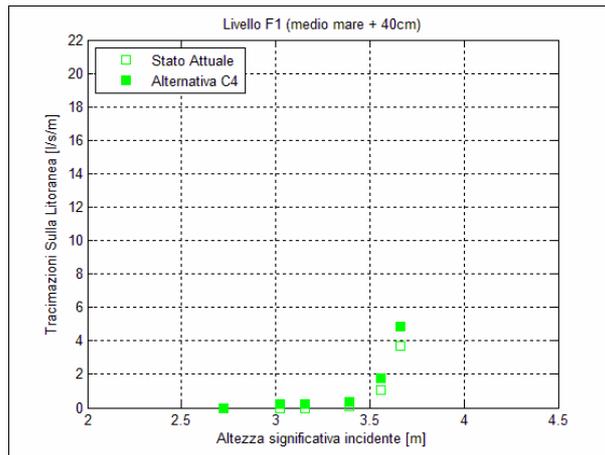


Figura 6.47– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C4 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

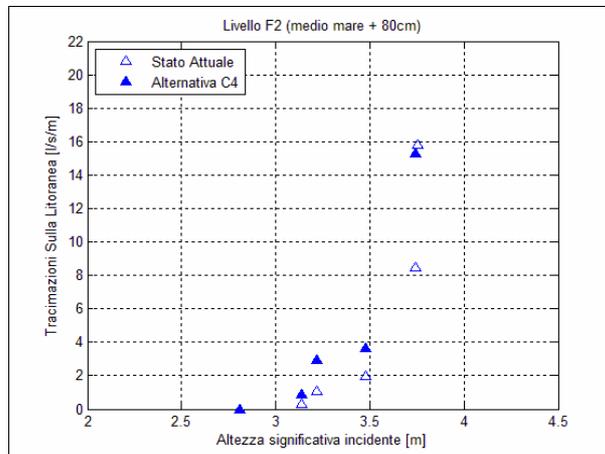


Figura 6.48– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C4 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

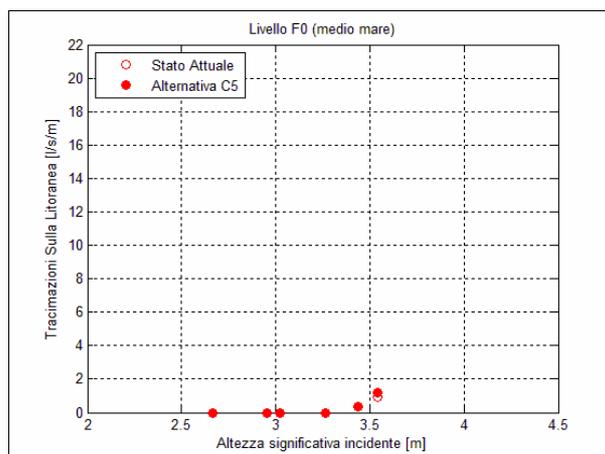


Figura 6.49– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C5 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

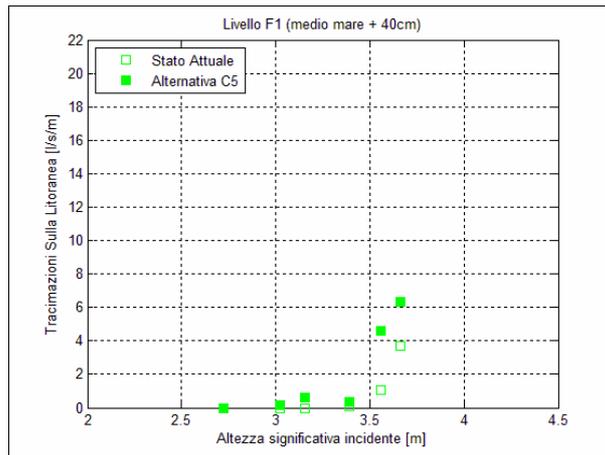


Figura 6.50– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C5 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

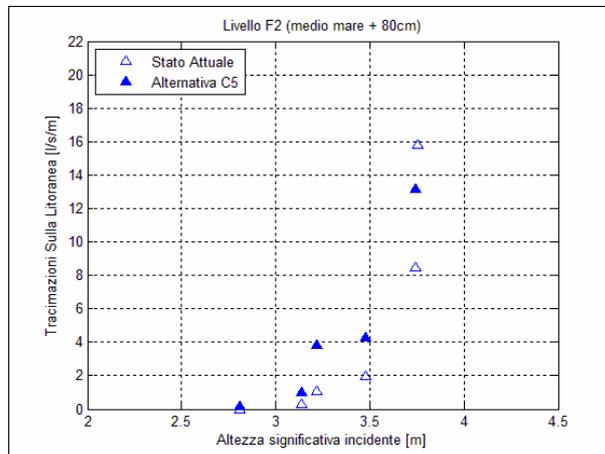


Figura 6.51– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C5 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

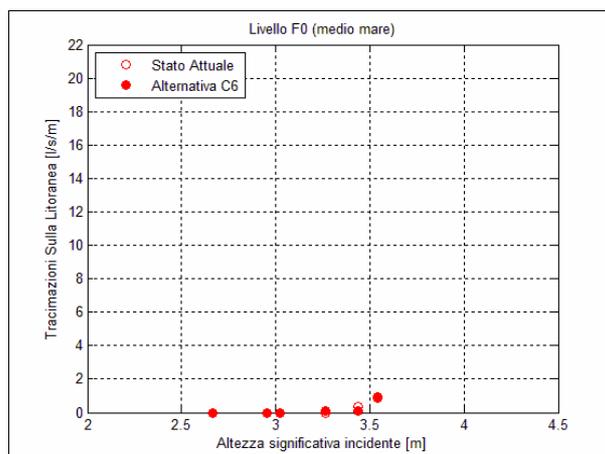


Figura 6.52– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C6 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

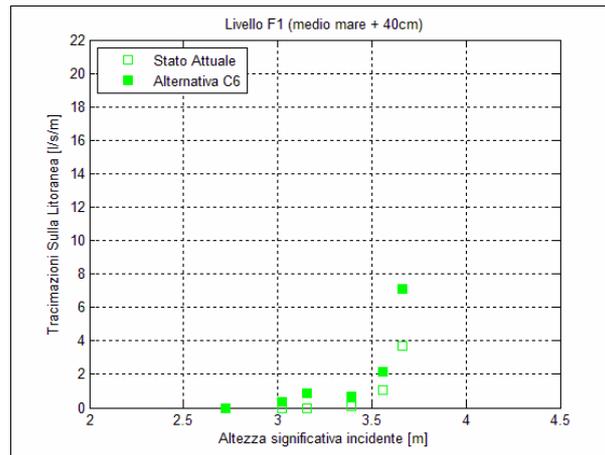


Figura 6.53– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C6 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

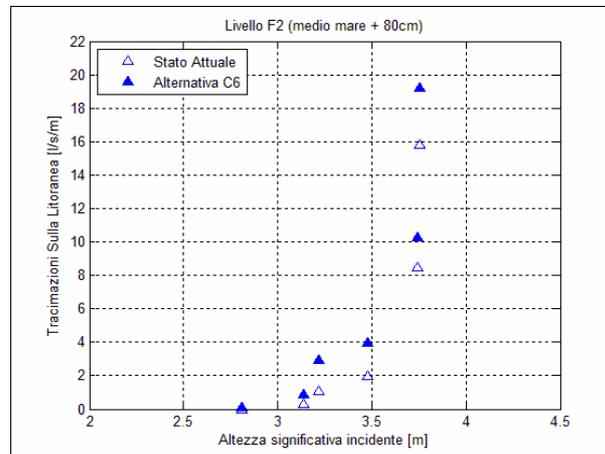


Figura 6.54– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C6 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

A differenza di quanto osservato per le misure di sovrizzo e di trasmissione, le posizioni della seconda barriera sommersa (C4 C5 e C6) influenzano il fenomeno della tracimazione. Con la configurazione C4, caratterizzata da una distanza della seconda barriera pari a 60 m rispetto alla scogliera sommersa, si ottengono valori delle tracimazioni apprezzabilmente minori rispetto a quelli misurati nelle altre due configurazioni C5 e C6. In relazione alle altre alternative progettuali, le misure dimostrano che l’inserimento di questa seconda barriera davanti alla scogliera sommersa è molto importante per la riduzione delle tracimazioni sulla strada litoranea. Ad esempio, se prendiamo in considerazione il caso estremo relativo all’onda I6 con livello F2 (+80cm) si hanno valori molto minori del limite di 50 l/s/m che invece veniva abbondantemente superato nelle altre alternative (C2 e C3). Tuttavia i valori di

tracimazione misurati nella configurazione C4 risultano significativamente superiori alla configurazione C0 rappresentante lo stato di difesa attuale di marina di Pisa.

Nelle tabelle 6.130 e 6.131 e nelle figure 6.55-6.60 sono riportati, per ciascun livello di prova, le portate tracimate sulla strada litoranea relative alle configurazioni C7 e C8.

**Tabella 6.130:** Misure di tracimazione, espresse in l/s/m, relative alla configurazione C7 in scala prototipo

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1 (H<sub>si</sub>=2.7m T<sub>p</sub>=7.3s)</b>	0	0	0.1
	<b>I2 (H<sub>si</sub>=2.9m T<sub>p</sub>=8.8s)</b>	0	0	1.2
	<b>I3 (H<sub>si</sub>=3.0m T<sub>p</sub>=12.0s)</b>	0.1	0.1	3
	<b>I4 (H<sub>si</sub>=3.3m T<sub>p</sub>=9.1s)</b>	0	0.3	3.9
	<b>I5 (H<sub>si</sub>=3.4m T<sub>p</sub>=12.6s)</b>	0.1	2.6	12
	<b>I6 (H<sub>si</sub>=3.5m T<sub>p</sub>=12.2s)</b>	1.1	8.1	20.2

**Tabella 6.131:** Misure di tracimazione, espresse in l/s/m, relative alla configurazione C8 in scala prototipo

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
<b>Attacco Ondoso</b>	<b>I1 (H<sub>si</sub>=2.7m T<sub>p</sub>=7.3s)</b>	0	0	0
	<b>I2 (H<sub>si</sub>=2.9m T<sub>p</sub>=8.8s)</b>	0	0	0.9
	<b>I3 (H<sub>si</sub>=3.0m T<sub>p</sub>=12.0s)</b>	0	0.3	3.3
	<b>I4 (H<sub>si</sub>=3.3m T<sub>p</sub>=9.1s)</b>	0	0.6	3.5
	<b>I5 (H<sub>si</sub>=3.4m T<sub>p</sub>=12.6s)</b>	0.2	3.0	12.4
	<b>I6 (H<sub>si</sub>=3.5m T<sub>p</sub>=12.2s)</b>	0.6	3.9	17.0

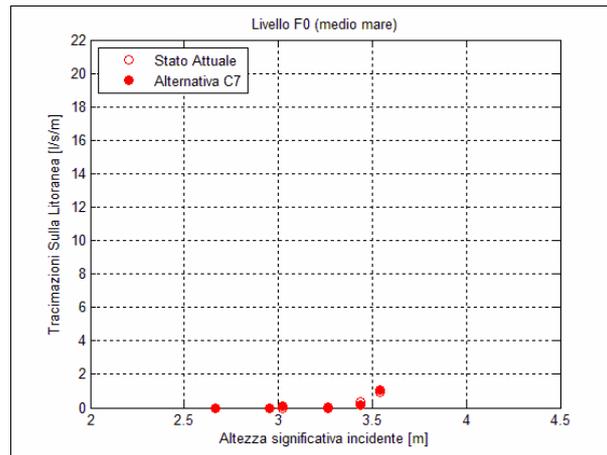


Figura 6.55– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C7 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

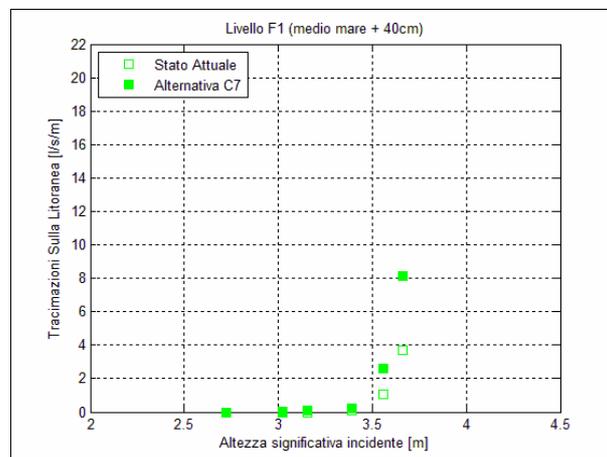


Figura 6.56– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C7 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

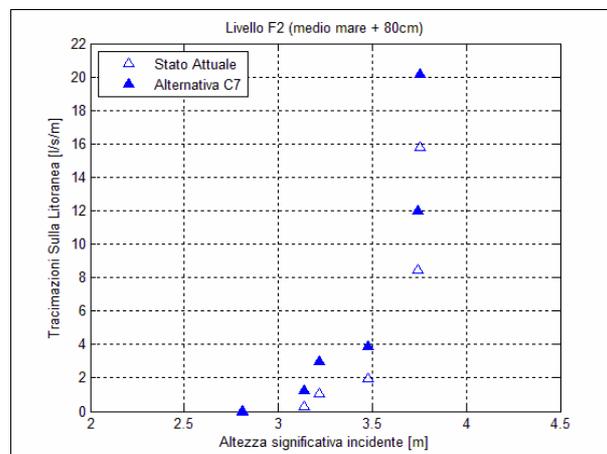


Figura 6.57– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C7 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

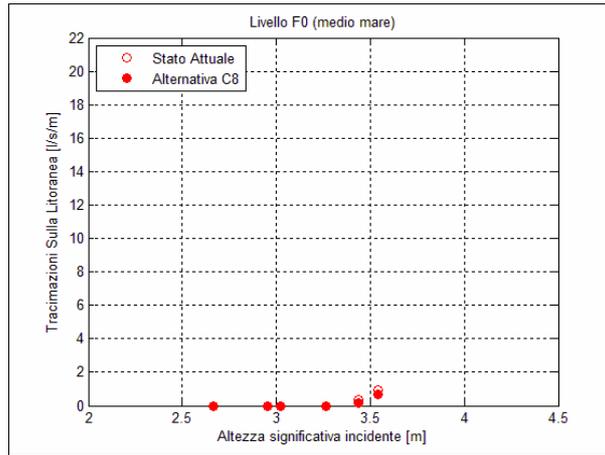


Figura 6.58– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C8 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

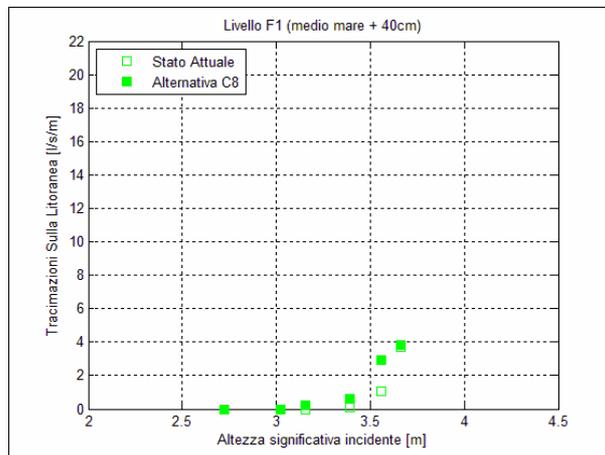


Figura 6.59– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C8 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

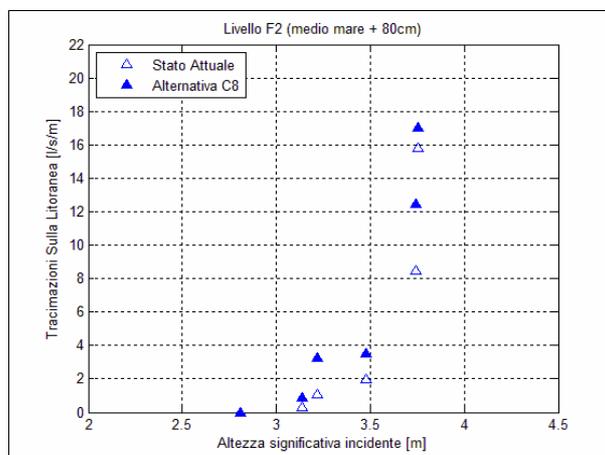


Figura 6.60– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C8 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Come è possibile osservare nelle tabelle 6.130 e 6.131 le tracimazioni per l'alternativa progettuale C8 sono leggermente inferiori rispetto alla configurazione C7, in particolar modo se prendiamo in considerazione l'onda I6 in ciascun livello di prova. Per quanto riguarda il confronto con la situazione attuale C0, entrambe le alternative progettuali mostrano lievi aumenti solo per il livello di prova F0, per quanto riguarda i livelli F1 ed F2, invece, si verificano aumenti significativi, in particolar modo nella C7.

In tabella 6.132 e nelle figure 6.61, 6.62 e 6.63 sono riportate, per ciascun livello di prova, le portate tracimate sulla strada litoranea relative alla configurazione C9.

**Tabella 6.132:** Misure di tracimazione, espresse in l/s/m, relative alla configurazione C9, in scala prototipo

		Livelli del mare durante le mareggiate		
		F0 (medio mare 0m)	F1 (medio mare + 0.4m)	F2 (medio mare + 0.8m)
Attacco Ondoso	I1 ( $H_{si}=2.7m$ $T_p=7.3s$ )	0	0	0
	I2 ( $H_{si}=2.9m$ $T_p=8.8s$ )	0	0.1	0.4
	I3 ( $H_{si}=3.0m$ $T_p=12.0s$ )	0	0.5	2.5
	I4 ( $H_{si}=3.3m$ $T_p=9.1s$ )	0	0	2.3
	I5 ( $H_{si}=3.4m$ $T_p=12.6s$ )	0.1	0.8	10.2
	I6 ( $H_{si}=3.5m$ $T_p=12.2s$ )	0.2	4.4	21.2

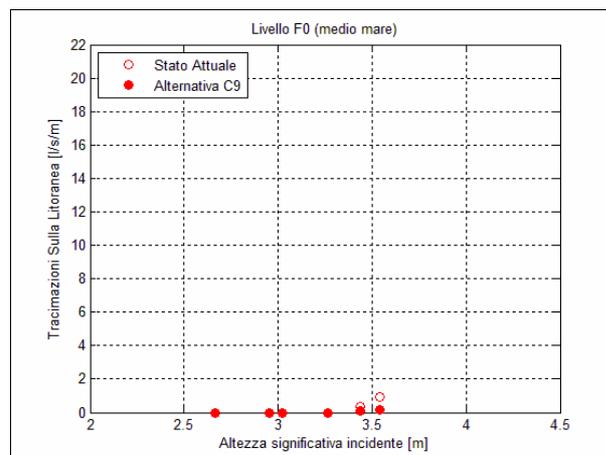


Figura 6.61– Misure di tracimazione nell'area protetta relative alla configurazione C9 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F0, espresse in scala prototipo

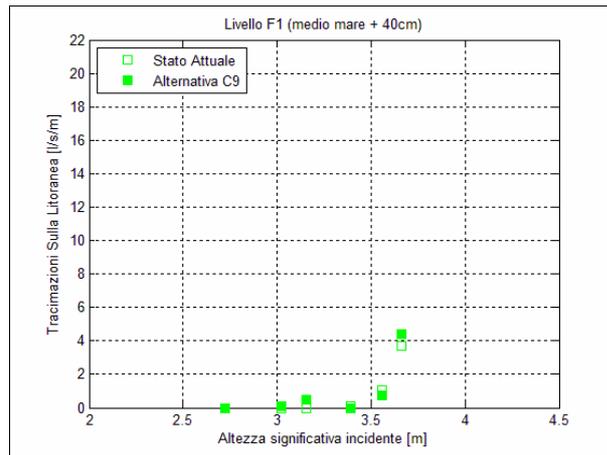


Figura 6.62– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C9 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F1, espresse in scala prototipo

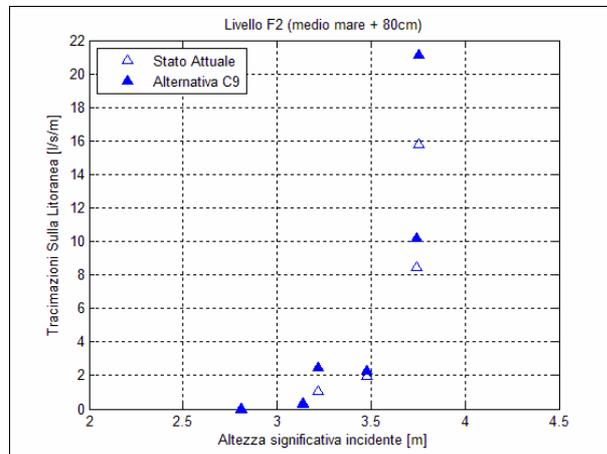


Figura 6.63– Misure di tracimazione nell’area protetta relative alla configurazione C9 confrontate con la configurazione C0 (senza ricircolo forzato) per il livello F2, espresse in scala prototipo

Osservando le figure 6.2, 6.3 e 6.4 emerge come con la configurazione C9 si ottengano misure solo leggermente superiori a quelle ottenute nella configurazione C0 per i livelli di prova F0 ed F1, mentre si ottengono valori significativamente superiori in presenza di mareggiate estreme simulate tramite il livello di prova F2. Confrontando, invece, questa configurazione con la C4, di posizione e geometria simile, ma costruita in geotubi, si osserva come in questo caso si abbia un leggero miglioramento in termini di tracimazione sulla strada litoranea (vedi tabelle 6.132 e 6.127).

## 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 stato quello 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.

Sono state condotte misure sperimentali sul modello dello stato attuale e sui modelli di altre otto alternative progettuali di intervento per un totale di 180 prove. Ciascuna configurazione studiata è stata sottoposta a sei diversi attacchi ondosi (I1, I2, I3, I4, I5, I6) rappresentanti sia condizioni di mareggiate ordinarie che estreme, per tre diversi livelli idrici (F0, F1, F2) simulanti rispettivamente mareggiate che avvengono con una superficie del mare a livello zero, a livello +0.40m (condizione di massima alta marea) e a livello +0.80m (condizione di massimo sovrizzo da vento, marea e bassa pressione).

I fenomeni studiati in dettaglio sono stati la trasmissione del moto ondoso e il sovrizzo del mare indotto dalle mareggiate nella zona compresa tra la scogliera distaccata e quella radente e le tracimazioni sulla strada litoranea. Per permettere una rapida valutazione comparativa tra tutte le alternative studiate, tutte le misure sperimentali sono riassunte, per ognuno dei tre fenomeni indagati, nelle tre serie di grafici riportate nelle figure 7.1, 7.2 e 7.3.

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 (C0) che nell'ipotesi di ricircolo volto a simulare l'effetto della corrente di ritorno verso il largo (C1). Le misure su modello del sovrizzo e del coefficiente di trasmissione ottenute in assenza e in presenza di ricircolo, sono state confrontate con le misure di campo condotte dal Dipartimento e da questa verifica

risulta che le misure più rappresentative della situazione attuale sono quelle condotte in assenza di ricircolo (C0).

I livelli idrici che si formano durante le mareggiate nella condizione attuale (C0) possono raggiungere anche i 1.64m (0.84m dovuti al sovrizzo generato dal moto ondoso più 0.80m dovuti a marea, vento e bassa pressione). La trasmissione del moto ondoso all'interno delle celle nella condizione attuale è poco influenzata dal livello del mare rispetto a quanto osservato per le alternative progettuali studiate. Nella condizione attuale, la presenza della scogliera distaccata emersa fa sì che il moto ondoso venga dissipato anche in presenza di livelli del mare maggiori mentre nelle alternative progettuali, caratterizzate da opere sommerse, in presenza di un livello del mare alto, le onde minori non frangono e si ottengono, di conseguenza, valori di trasmissione maggiori. In base ai risultati ottenuti, per mareggiate e livelli del mare inferiori, la massima altezza d'onda significativa trasmessa nella zona protetta è pari a circa 1.0m mentre per livelli di mare maggiori l'altezza d'onda significativa può raggiungere i 2.2m. Le tracimazioni sulla strada litoranea nella configurazione attuale in presenza di attacchi ondosi di modesta entità (I5) si verificano già con il livello del mare più basso F0, in questi casi, infatti, i flussi di tracimazione possono raggiungere valori dell'ordine di 0.9 l/s/m, pericolosi per la sicurezza dei pedoni (limite 0.1 l/s/m). Con il livello del mare più alto F2 le portate tracimanti aumentano notevolmente fino a raggiungere valori dell'ordine di 15.8 l/s/m così da avvicinarsi ai limiti di tollerabilità per la sicurezza strutturale della scogliera radente e degli edifici lungomare (limite pari a 50 l/s/m).

I risultati ottenuti con le alternative C2 e C3 hanno mostrato come, con l'abbassamento a -1m della scogliera parallela e con l'allungamento, in seguito, della stessa fino a 30m, si ottengano significative diminuzioni del sovrizzo ma anche notevoli aumenti della trasmissione rispetto alla situazione attuale C0. Inoltre, con entrambe queste alternative progettuali si verificano dei forti aumenti della tracimazione sia in termini di frequenza che intensità tanto da sconsigliare una simile trasformazione delle opere di difesa.

Le alternative progettuali C4, C5 e C6 hanno riguardato l'inserimento di una seconda barriera in geotubi posta a distanza dalla scogliera in massi rispettivamente di 60m, 75 m e 35m. La seconda barriera, al contrario della prima, è stata realizzata utilizzando tre geotubi affiancati in modo da formare una struttura larga 20m e sommersa circa 3.2m.

I valori ottenuti nelle misure sperimentali hanno dimostrato come i fenomeni di sovrizzo e trasmissione siano, in realtà, poco influenzati dalla distanza alla quale è stata posizionata la seconda barriera, mentre per quanto riguarda la tracimazione, la configurazione che ha permesso di ottenere una migliore efficienza è stata la C4. In termini di sovrizzo, con quest'ultima configurazione, si sono ottenuti miglioramenti rispetto alla situazione attuale, infatti, per mareggiate con livello del mare più basso (F0) si verifica una diminuzione di sovrizzo di circa 10cm mentre nel caso di mareggiate con livello maggiore(F2) si ha una riduzione di circa 60cm rispetto a quella attuale. Tuttavia con la C4 si ottengono valori di trasmissione leggermente superiori rispetto alla C0 e se le tracimazioni con un livello del mare più basso (F0) risultano inferiori a quella attuale, con livelli del mare più alti (F1 e F2) sono decisamente superiori rispetto alla situazione attuale (con livello di prova F2, +0.8m, si verificano tracimazioni massime pari a 26.5 l/s/m a fronte dei 15.8 l/s/m della C0 rappresentante lo stato di difesa attuale).

Al fine di diminuire le tracimazioni anche nei casi estremi, sono state studiate altre tre alternative progettuali (C7, C8 e C9) realizzate ancora con una seconda barriera sommersa posta a 60m di fronte alla scogliera. Mentre nelle alternative C7 e C8 la seconda barriera è stata realizzata con due strati di geotubi sovrapposti a formare una struttura larga 20m e sommersa di circa 1m, nella C9 è stata realizzata una nuova scogliera, larga 20m e sommersa circa -3m, con geometria simile alla C4 (in geotubi).

Le configurazioni C7 e C8 hanno mostrato la stessa efficienza idraulica sebbene i geotubi fossero sovrapposti in modo diverso. Per quanto riguarda il sovrizzo idrico, sebbene la C7 abbia mostrato una migliore efficienza rispetto alla C8, sono stati ottenuti valori significativamente maggiori rispetto alla C4, in particolar modo nel livello più basso F0, dove si registra un aumento medio di circa +20cm. Per quanto riguarda il confronto con la situazione attuale C0 sono stati ottenuti valori sostanzialmente simili. Le trasmissioni di moto ondoso, invece, sono risultate di poco inferiori alla C4, e anche in questo caso simili a quelle ottenute per la configurazione attuale C0. In termini di tracimazioni con la configurazione C8, migliore della C7, si ottengono valori superiori rispetto alla configurazione C4 ma anche rispetto alla configurazione attuale. Con il livello di mare più basso (F0) sono raggiunti valori massimi di 1.1 l/s/m a fronte degli 0.9 l/s/m raggiunti attualmente, mentre con il livello di mare più alto (F0) sono stati registrati valori massimi pari a 20.2 l/s/m contro i 15.8 l/s/m attuali.

Con l'alternativa C9, geometricamente simile alla C4 ma realizzata in massi invece che con geotubi, si ottengono valori di sovrizzo inferiori alla configurazione attuale C0 ma anche rispetto a tutte le altre configurazioni studiate. Da un confronto con la C0 si

osserva che con il livello F0 e con onde maggiori (I5 e I6) si verifica una diminuzione di sovrizzo di circa 30cm mentre con il livello F2 di circa 60cm. La trasmissione del moto ondoso è sostanzialmente uguale a quella attuale mentre in termini di tracimazione, con la configurazione C9, si verifica una piccola diminuzione con il livello F0 ma con livelli maggiori (F1 ed F2) si ottengono tracimazioni con la stessa frequenza di quelle che avvengono attualmente ma con intensità superiore. Ad esempio, per il livello F0 si hanno valori massimi di 0.2 l/s/m a fronte di quelli che si verificano con la situazione attuale pari a 0.9 l/s/m, mentre con il livello F2 si ottengono valori massimi di 21.2 l/s/m contro i 15.8 l/s/m della configurazione C0.

I risultati di questo studio sperimentale dimostrano che le migliori alternative, tra tutte quelle studiate, per un nuovo sistema di difesa del litorale di Marina di Pisa, sono la C4 o la C9, le quali si differenziano le une dalle altre per il materiale utilizzato nella costruzione della seconda barriera, la prima in geotubi e la seconda in massi. Tuttavia con una seconda barriera in massi, presente nella configurazione C9, potrebbe essere garantita una maggiore dissipazione del moto ondoso. Con un sistema di difesa di questo tipo, durante le mareggiate si otterrebbero valori di sovrizzo d'onda, all'interno delle celle, sempre molto minori rispetto all'attuale, trasmissioni del moto ondoso sostanzialmente uguali all'attuale e tracimazioni sulla strada litoranea sostanzialmente con la stessa frequenza attuale ma di intensità inferiore con il livello del mare F0 (condizioni di mare ordinarie) e moderatamente maggiori con livello F1 (condizioni di mare frequenti) e F2 (condizioni di mare estreme).

Un tale sistema di difesa dovrebbe essere ulteriormente ottimizzato al fine di garantire livelli di protezione, nei confronti delle tracimazioni, migliori di quelli attuali anche nei casi di mareggiate con livelli del mare frequenti e estremi.

Due parametri che sarebbe possibile studiare in modo ancora più preciso sono la sommergezza e la larghezza della seconda scogliera sommersa.

Inoltre, sarebbe opportuno studiare anche la dipendenza del fenomeno dell'overtopping con la distanza tra la scogliera distaccata e quella radente utilizzando ancora la configurazione C9, in questo modo sarebbe possibile valutare eventuali variazioni trasladando tutte le opere di difesa più distanti dalla costa. In caso affermativo si aprirebbe un nuovo scenario per la riqualificazione del litorale di Marina di Pisa e si aprirebbe la possibilità di poter aggiungere, come ulteriore elemento di protezione, un ripascimento per costruire una spiaggia artificiale con la quale spostare la linea di costa più lontano dalla strada litoranea.

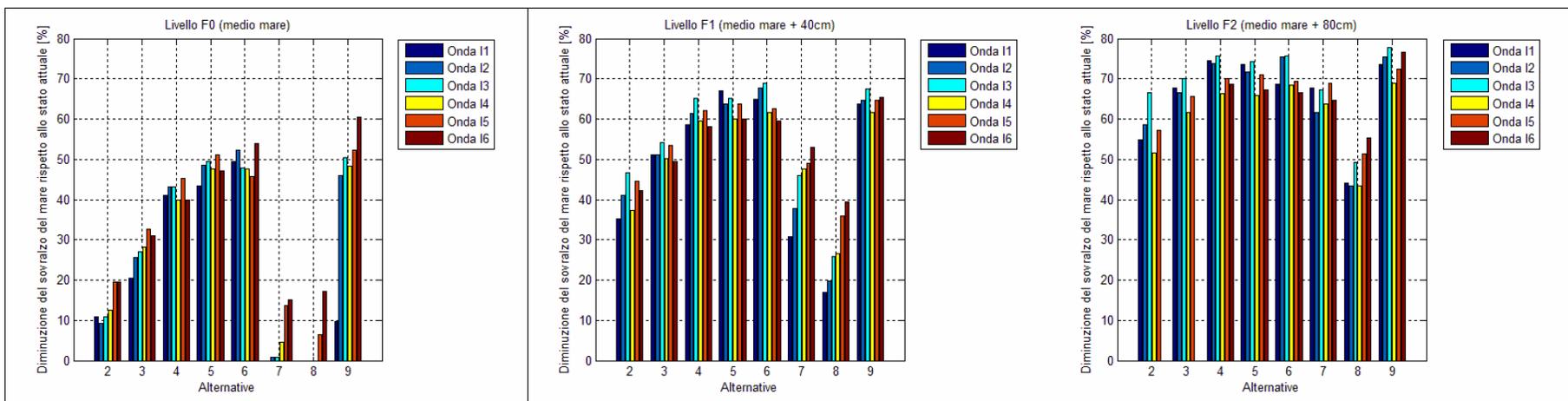


Figura 7.1: Diminuzione del sovrizzo del mare ottenuto con le alternative progettuali studiate, espressa in % su quello misurato nello stato attuale

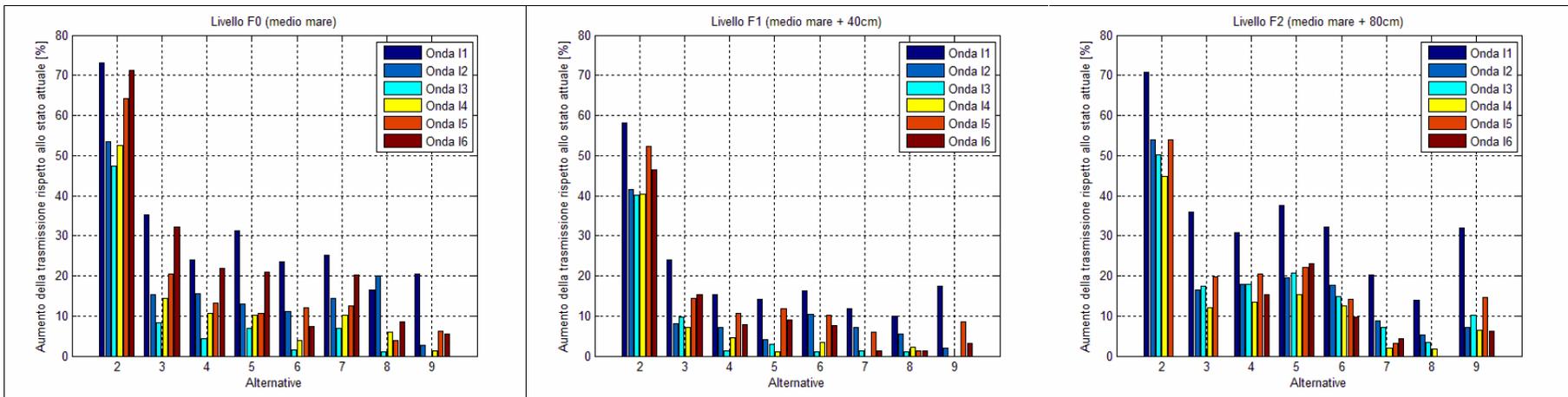


Figura 7.2: Aumento della trasmissione di moto ondoso relativo alle alternative progettuali studiate, espresso in % su quella misurata nello stato attuale

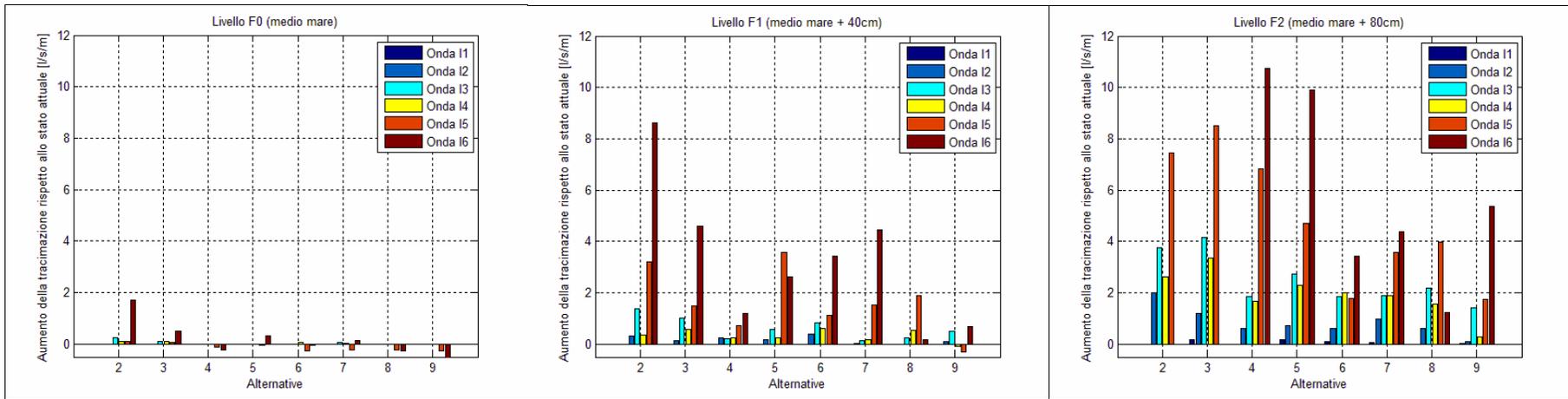


Figura 7.3: Aumento della tracimazione sulla strada litoranea relativo alle alternative progettuali studiate, espresso in l/s/m rispetto allo stato attuale

## **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 <sup>3</sup> ]	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
		10	0.90	1.20	0.90	0.97	0.99	2.55
3	7	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
		14	0.90	2.40	1.20	2.59	1.37	6.80
4	6	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
		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
5	6	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
		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
6	6	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
		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
7	6	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
		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
8	5	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
		34	1.00	1.30	1.90	2.47	1.35	6.48
9	6	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
		38	3.40	1.80	1.20	7.34	1.94	19.28
10	7	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
		43	2.40	1.20	0.90	2.59	1.37	6.80
11	6	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
		47	1.90	1.10	1.20	2.51	1.36	6.58
12	6	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
		51	1.30	1.50	2.30	4.49	1.65	11.77
13	6	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
25	6	99	1.10	1.90	1.00	2.09	1.28	5.49
		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
26	6	105	0.70	1.70	1.75	2.08	1.28	5.47
		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
27	7	110	2.00	1.40	0.70	1.96	1.25	5.15
		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
		126	1.95	1.40	1.10	3.00	1.44	7.88
30	6	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
		130	0.90	0.80	1.50	1.08	1.03	2.84
31	6	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
		134	1.20	1.65	1.40	2.77	1.40	7.28
32	5	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
		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
33	7	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
		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
34	7	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
		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
35	5	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 <sup>3</sup> ]	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: Peso dei geotubi utilizzati nelle sessioni sperimentali e rilievi delle strutture in geotubi ottenuti tramite il profilometro a barre**

**Tabella 1:** Kg di sabbia che sono stati necessari per riempire i geotubi utilizzati nelle prove sperimentali

Nome Geotubo	Peso [Kg]
1	16.98
2	16.45
3	17.72
A	15.27
B	16.03
C	16.35
D	16.19
E	15.42
F	16.26

**Tabella 2:** Rilievi della quota della struttura in geotubi all'inizio della C6F0

Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]	Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]	Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]	Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]
0	13.3	12.8	13.8
2.5	13.8	13.6	13.6
5.0	13.2	13.3	13.2
7.5	13.3	13.9	13.5
10.0	13.6	13.8	13.9
12.5	21.8	22.5	21.8
15.0	23.2	24.6	23.4
17.5	24.6	25.4	24.6
20.0	25.5	25.6	25.0
22.5	24.3	25.3	25.2
25.0	23.2	23.8	24.4
27.5	21.8	20.9	21.1
30.0	23.4	23.6	23.1
32.5	24.2	24.2	23.8
35.0	23.9	24.7	24.5
37.5	23.8	24.8	24.3
40.0	22.2	23.7	22.9
42.5	20.7	20.5	21.2
45.0	23.0	23.1	23.2
47.5	24.1	24.9	23.3
50.0	24.6	25.6	24.4
52.5	24.4	25.6	24.2
55.0	23.4	24.2	23.5

57.5	22.7	23.1	22.5
60.0	14.5	14.9	14.8
62.5	15.0	14.9	14.5
65.0	15.5	15.3	14.6
67.5	15.4	15.4	15.2
70.0	15.3	15.3	15.0
72.5	15.0	15.2	14.8
75	14.8	15.4	14.9

**Tabella 3:** Rilievi della quota della struttura in geotubi al termine della C6F0

Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]	Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]	Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]	Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]
0	13.6	13.6	13.9
2.5	13.8	13.6	14.1
5.0	13.4	13.5	13.7
7.5	14.3	14.2	14.5
10.0	14.9	14.7	14.2
12.5	21.8	22.7	20.9
15.0	23.7	24.2	23.0
17.5	24.7	25.3	24.2
20.0	25.1	25.4	24.5
22.5	24.9	24.9	24.9
25.0	23.9	23.7	24.0
27.5	21.1	21.2	20.9
30.0	22.7	23.4	23.0
32.5	23.1	23.7	23.4
35.0	23.8	24.6	24.2
37.5	23.4	24.4	23.2
40.0	23.0	23.8	21.3
42.5	20.9	21.2	22.8
45.0	23.0	23.6	23.4
47.5	23.7	24.5	24.0
50.0	24.9	25.4	24.9
52.5	24.7	24.9	23.8
55.0	24.4	24.2	23.3
57.5	22.7	23.1	22.3
60.0	16.0	14.9	15.2
62.5	15.4	14.7	14.6
65.0	14.6	14.0	14.3
67.5	14.7	14.6	14.6
70.0	14.1	13.4	13.8
72.5	13.4	13.3	13.4
75	14.2	13.6	14.2

**Tabella 4:** Rilievi della quota della struttura in geotubi all'inizio della C6F1

Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]	Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]	Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]	Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]
0	12.7	12.7	13.5
2.5	13.6	12.6	13.6
5.0	13.7	13	13.7
7.5	14.3	12.9	14.6
10.0	14.4	13.1	15.2
12.5	20.2	21.3	20.7
15.0	22.5	23.8	23.5
17.5	23.7	24.5	23.7
20.0	25	25	24.7
22.5	24.8	24.8	24.4
25.0	23.7	23.7	24.6
27.5	21.2	20.6	21.3
30.0	22.3	23	22.6
32.5	23	23.8	23.6
35.0	23.7	24.4	24.2
37.5	23.7	24.4	24.2
40.0	23.5	23	22.8
42.5	22.2	21.2	21
45.0	21	22.4	23
47.5	22.7	24.2	23.4
50.0	23.4	24.8	24
52.5	24.4	24.7	23.7
55.0	24.3	23	22.4
57.5	23	22.5	22.2
60.0	15.4	14.4	14.9
62.5	14.9	14	14.5
65.0	14.5	13.8	13.8
67.5	14.3	14.4	14
70.0	13.8	13.9	13.8
72.5	13.7	13.9	13.5
75	13.2	14	14

**Tabella 5:** Rilievi della quota della struttura in geotubi al termine della C6F1

Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]	Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]	Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]	Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]
0	13.4	13.4	13.3
2.5	13.2	13.4	13.2
5.0	13.4	13.3	13.5
7.5	13.5	13.8	13.5
10.0	13.5	14.8	13.6
12.5	19.8	21.2	19.5
15.0	22.0	23.2	22.5
17.5	23.8	24.4	23.3
20.0	24.3	25.3	24.5

22.5	24.0	25.0	24.8
25.0	24.2	24.0	23.8
27.5	20.8	21.6	20.7
30.0	22.2	21.6	21.8
32.5	23.0	23.5	23.0
35.0	23.3	24.0	24.2
37.5	23.6	24.3	24.2
40.0	22.8	23.2	22.7
42.5	19.8	21.6	21.0
45.0	23.0	21.8	22.8
47.5	22.8	23.7	23.0
50.0	23.8	25.3	24.0
52.5	24.0	24.8	23.2
55.0	23.4	25.5	22.6
57.5	20.5	20.0	19.7
60.0	14.5	14.3	14.2
62.5	14.5	14.1	13.5
65.0	14.0	13.8	14.3
67.5	14.5	14.0	13.1
70.0	13.3	13.5	13.4
72.5	13.2	12.7	13.4
75	13.2	12.8	13.2

**Tabella 6:** Rilievi della quota della struttura in geotubi all'inizio della C6F2

<b>Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]</b>	<b>Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]</b>	<b>Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]</b>	<b>Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]</b>
0	14	13.3	13.6
2.5	13.8	13	13.6
5.0	13.7	12.6	13.3
7.5	14	13.5	14.2
10.0	14.2	13.8	14.6
12.5	20	22.3	20.2
15.0	21.8	24	22
17.5	23.3	24.5	23.5
20.0	25	25.2	24.7
22.5	25	25	24.3
25.0	24.2	23.3	23.6
27.5	20.9	21	21
30.0	22.4	22.2	22.7
32.5	22.5	22.5	23.5
35.0	23.5	24.5	24
37.5	23.5	24.2	24.5
40.0	22.3	23.2	23.9
42.5	20.3	21.3	21
45.0	22.5	21.3	22.3
47.5	23	24	22.4
50.0	24	25.2	24
52.5	23.8	24.8	23.5

55.0	23.7	24.3	23
57.5	21.2	22.1	21.5
60.0	15.5	15	15.5
62.5	14	14.2	14.5
65.0	14	14.2	14
67.5	14.5	13.8	14
70.0	12.8	13.3	13.5
72.5	13.2	12.9	13.5
75	13.2	12.5	13.5

**Tabella 7:** Rilievi della quota della struttura in geotubi al termine della C6F2

Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]	Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]	Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]	Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]
0	13	13	13.2
2.5	13.3	13.5	13.2
5.0	13.2	13	13
7.5	14	14	14
10.0	13.8	13.7	14.4
12.5	21.2	20.5	18.6
15.0	23	23	20.9
17.5	24	24.2	23.3
20.0	24.7	25	24.2
22.5	24	25	24.2
25.0	23	23.8	24
27.5	20.5	20.6	20.8
30.0	22.4	22.2	21.3
32.5	23	23.2	22.5
35.0	23.5	24	24
37.5	23.5	24.2	24.3
40.0	22.2	23	23.2
42.5	20.5	21.6	22.2
45.0	22.8	20.4	22.2
47.5	23	23.6	22.8
50.0	24	25	23.8
52.5	24	24.6	23.3
55.0	23.3	24	23.3
57.5	21.4	21	20.4
60.0	14.5	14.7	14.5
62.5	13.5	14.5	14
65.0	13.2	13.5	14
67.5	13.2	14	14
70.0	12.2	13	13.2
72.5	12.8	12.5	12.6
75	12.2	12	12.4

**Tabella 8:** Rilievi della quota della struttura in geotubi all'inizio della C7F0

Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]	Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]	Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]	Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]
0	14.5	14.2	14.2
2.5	13.6	14.1	14.1
5.0	13.1	13.4	13.6
7.5	12.7	13.2	13.4
10.0	12.8	12.4	12.8
12.5	13.0	11.7	12.6
15.0	12.2	19.3	14.4
17.5	20.0	20.8	21.4
20.0	21.3	21.3	22.0
22.5	21.9	21.2	22.3
25.0	22.3	21.7	22.9
27.5	22.7	22.2	23.3
30.0	22.9	22.5	23.8
32.5	23.5	23.4	24.5
35.0	24.7	24.0	24.7
37.5	25.6	25.4	25.9
40.0	27.4	26.1	26.6
42.5	28.3	26.9	27.0
45.0	28.5	27.6	27.5
47.5	29.3	28.4	28.3
50.0	29.5	29.0	28.9
52.5	29.4	29.0	29.2
55.0	29.0	28.6	29.0
57.5	28.1	27.7	28.3
60.0	27.5	26.9	27.7
62.5	26.1	26.0	26.4
65.0	25.3	25.6	25.6
67.5	24.6	24.6	24.9
70.0	23.5	23.3	24.2
72.5	22.9	22.8	23.6
75.0	22.7	22.4	23.3
77.5	22.2	21.8	22.1
80.0	22.7	22	22.2
82.5	22.3	21	21.4
85.0	21.7	20.1	20.2
87.5	21.0	19.3	19.3
90.0	12.3	11.8	16.6
92.5	11.7	11.9	11.4
95.0	12.0	11.8	11.6
97.5	11.9	12.2	12.3
100.0	12.2	12.1	11.8
102.5	12.1	11.9	10.5
105.0	12.1	12.6	11.8

**Tabella 9:** Rilievi della quota della struttura in geotubi al termine della C7F0

Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]	Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]	Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]	Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]
0	13.8	13.8	14.0
2.5	13.9	13.7	14.0
5.0	13.5	13.5	13.7
7.5	13.4	13.4	13.6
10.0	13.0	12.9	12.5
12.5	12.9	12.5	12.4
15.0	20.2	19.9	11.6
17.5	21.5	20.5	20.7
20.0	22.2	21.0	21.7
22.5	22.7	21.1	22.1
25.0	23.2	21.5	22.4
27.5	23.5	22.1	22.7
30.0	23.9	22.6	23.1
32.5	24.1	22.8	23.5
35.0	25.0	24.6	25.1
37.5	26.0	25.2	26.5
40.0	26.4	26.1	27.3
42.5	26.7	26.8	27.9
45.0	27.2	27.8	28.1
47.5	27.6	28.1	28.7
50.0	28.5	29.2	29.3
52.5	28.6	28.9	28.9
55.0	28.5	27.9	27.9
57.5	27.8	27.2	26.9
60.0	27.4	26.8	25.6
62.5	25.8	25.5	24.8
65.0	25.2	26.2	24.7
67.5	25.1	24.9	23.7
70.0	24.5	23.8	23.0
72.5	23.7	22.8	22.7
75.0	23.2	22.6	22.3
77.5	22.6	22.0	21.7
80.0	22.7	21.2	22.4
82.5	22.1	21.1	22.0
85.0	21.2	20.1	21.5
87.5	20.4	19.3	20.8
90.0	19.6	18.4	19.2
92.5	12.3	11.4	12.3
95.0	12.0	11.4	12.7
97.5	12.4	12.0	13.1
100.0	11.6	11.9	13.2
102.5	11.5	11.4	12.6
105.0	12.0	11.4	11.9

**Tabella 10:** Rilievi della quota della struttura in geotubi all'inizio della C7F1

Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]	Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]	Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]	Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]
0	13.8	13.8	14.0
2.5	13.9	13.7	14.0
5.0	13.5	13.5	13.7
7.5	13.4	13.4	13.6
10.0	13.0	12.9	12.5
12.5	12.9	12.5	12.4
15.0	20.2	19.9	11.6
17.5	21.5	20.5	20.7
20.0	22.2	21.0	21.7
22.5	22.7	21.1	22.1
25.0	23.2	21.5	22.4
27.5	23.5	22.1	22.7
30.0	23.9	22.6	23.1
32.5	24.1	22.8	23.5
35.0	25.0	24.6	25.1
37.5	26.0	25.2	26.5
40.0	26.4	26.1	27.3
42.5	26.7	26.8	27.9
45.0	27.2	27.8	28.1
47.5	27.6	28.1	28.7
50.0	28.5	29.2	29.3
52.5	28.6	28.9	28.9
55.0	28.5	27.9	27.9
57.5	27.8	27.2	26.9
60.0	27.4	26.8	25.6
62.5	25.8	25.5	24.8
65.0	25.2	26.2	24.7
67.5	25.1	24.9	23.7
70.0	24.5	23.8	23.0
72.5	23.7	22.8	22.7
75.0	23.2	22.6	22.3
77.5	22.6	22.0	21.7
80.0	22.7	21.2	22.4
82.5	22.1	21.1	22.0
85.0	21.2	20.1	21.5
87.5	20.4	19.3	20.8
90.0	19.6	18.4	19.2
92.5	12.3	11.4	12.3
95.0	12.0	11.4	12.7
97.5	12.4	12.0	13.1
100.0	11.6	11.9	13.2
102.5	11.5	11.4	12.6
105.0	12.0	11.4	11.9

**Tabella 11:** Rilievi della quota della struttura in geotubi alla fine della C7F1

Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]	Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]	Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]	Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]
0	14.2	14.0	13.9
2.5	14.2	14.2	14.1
5.0	13.8	14.0	13.6
7.5	13.8	14.3	13.7
10.0	13.6	13.4	13.1
12.5	13.3	13.3	13.0
15.0	12.8	18.4	19.5
17.5	20.4	20.8	21.1
20.0	21.5	21.4	21.8
22.5	22.0	21.4	22.5
25.0	22.2	21.6	23.0
27.5	22.4	22.1	23.2
30.0	22.8	22.2	23.3
32.5	23.7	23.3	23.8
35.0	24.8	24.2	24.2
37.5	26.6	25.2	25.4
40.0	27.4	26.1	26.1
42.5	28.2	26.9	26.4
45.0	28.7	27.3	26.8
47.5	29.3	28.5	27.5
50.0	29.4	29.1	27.9
52.5	29.1	29.0	28.4
55.0	28.9	28.6	28.6
57.5	28.3	27.9	27.6
60.0	27.4	27.1	27.6
62.5	25.8	26.0	26.5
65.0	25.0	25.5	26.3
67.5	24.2	24.4	25.6
70.0	23.3	23.3	24.3
72.5	22.5	22.6	23.7
75.0	22.6	22.2	23.4
77.5	21.9	21.8	22.5
80.0	22.4	21.9	22.5
82.5	22.0	21.0	21.6
85.0	21.4	20.0	21.0
87.5	20.8	19.3	19.9
90.0	20.1	11.8	19.0
92.5	13.0	11.6	12.6
95.0	12.9	11.7	11.6
97.5	13.4	11.9	12.0
100.0	12.9	11.6	11.6
102.5	12.7	11.2	11.1
105.0	12.9	11.8	11.7

**Tabella 12:** Rilievi della quota della struttura in geotubi all'inizio della C7F2

Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]	Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]	Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]	Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]
0	14.2	14.0	13.9
2.5	14.2	14.2	14.1
5.0	13.8	14.0	13.6
7.5	13.8	14.3	13.7
10.0	13.6	13.4	13.1
12.5	13.3	13.3	13.0
15.0	12.8	18.4	19.5
17.5	20.4	20.8	21.1
20.0	21.5	21.4	21.8
22.5	22.0	21.4	22.5
25.0	22.2	21.6	23.0
27.5	22.4	22.1	23.2
30.0	22.8	22.2	23.3
32.5	23.7	23.3	23.8
35.0	24.8	24.2	24.2
37.5	26.6	25.2	25.4
40.0	27.4	26.1	26.1
42.5	28.2	26.9	26.4
45.0	28.7	27.3	26.8
47.5	29.3	28.5	27.5
50.0	29.4	29.1	27.9
52.5	29.1	29.0	28.4
55.0	28.9	28.6	28.6
57.5	28.3	27.9	27.6
60.0	27.4	27.1	27.6
62.5	25.8	26.0	26.5
65.0	25.0	25.5	26.3
67.5	24.2	24.4	25.6
70.0	23.3	23.3	24.3
72.5	22.5	22.6	23.7
75.0	22.6	22.2	23.4
77.5	21.9	21.8	22.5
80.0	22.4	21.9	22.5
82.5	22.0	21.0	21.6
85.0	21.4	20.0	21.0
87.5	20.8	19.3	19.9
90.0	20.1	11.8	19.0
92.5	13.0	11.6	12.6
95.0	12.9	11.7	11.6
97.5	13.4	11.9	12.0
100.0	12.9	11.6	11.6
102.5	12.7	11.2	11.1
105.0	12.9	11.8	11.7

**Tabella 13:** Rilievi della quota della struttura in geotubi alla fine della C7F2

Distanza progressiva del punto di rilievo [cm]	Quota Sezione 1 (Lato Finestra) [cm]	Quota Sezione 2 (Centrale) [cm]	Quota Sezione 3 (Lato Laboratorio) [cm]
0	14.3	14.3	14.6
2.5	14.3	14.6	14.4
5.0	14.4	14.5	14.0
7.5	14.2	14.5	14.5
10.0	14.0	14.4	14.0
12.5	13.7	13.8	13.8
15.0	19.5	19.0	14.0
17.5	21.2	20.6	20.5
20.0	22.0	20.8	21.5
22.5	22.5	21.2	22.0
25.0	23.1	21.6	22.2
27.5	23.3	22.2	22.5
30.0	23.6	22.5	23.0
32.5	23.8	23.0	23.5
35.0	24.5	24.0	24.3
37.5	25.4	25.5	26.6
40.0	26.6	26.5	27.4
42.5	26.7	26.6	28.0
45.0	27.4	27.8	29.0
47.5	27.5	28.2	29.0
50.0	28.2	29.2	29.5
52.5	28.3	28.9	29.1
55.0	28.2	28.2	28.4
57.5	27.7	27.0	27.6
60.0	27.5	26.8	27.0
62.5	26.3	25.5	24.8
65.0	25.7	25.4	24.7
67.5	22.5	24.9	24.4
70.0	24.4	24.2	23.2
72.5	23.5	22.7	22.6
75.0	23.5	22.8	22.3
77.5	22.5	21.8	23.0
80.0	22.4	22.0	22.5
82.5	21.5	21.1	22.2
85.0	20.6	20.2	21.5
87.5	19.8	19.5	21.0
90.0	19.0	18.2	20.1
92.5	10.9	11.5	12.9
95.0	11.2	12.0	12.8
97.5	11.2	12.0	13.0
100.0	11.2	12.1	12.0
102.5	10.6	11.5	11.2
105.0	11.0	11.2	11.9

**Allegato III: Limiti di tollerabilità dell'Overtopping [l/s/m]  
pubblicate dall'*EuroTop2007***

**Tabella 1:** Limiti di tollerabilità del fenomeno dell'Overtopping pubblicati dall'EuroTop2007

<b>Tipologia di Limite</b>	<b>Flusso [l/s/m]</b>
Limite per i pedoni	0.1 – 1 l/s/m
Limite per veicoli che si spostano a velocità moderata	1 – 10 l/s/m
Limite per danni ad arredi stradali	1 – 10 l/s/m
Limite per danno strutturale alla pavimentazione stradale o ad abitazioni	50 – 100 l/s/m

## **Allegato IV: 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 interna, ed effettuare la lettura al Nonio. Ripetere l'operazione per la scogliera esterna;
- posizionare la punta idrometrica nella posizione del livello di prova a pompa spenta (F0=21.55 cm, F1=20.55 cm, F2=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 retro-pala, 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 battione;
- 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

- Spegnere generatore onde seguendo le istruzioni;
- spegnere il pc, la videocamera e le sonde.

## Allegato V: Listato Matlab – Prove con geotubi

```
clear
close all
path=('I:\MarinaDiPisa\Eperimenti\');
cd ([path 'FileMatLabPerAnalisiDati']);
addpath ([path '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"=']);
CodiceBarriera=input(['Dammi il codice della barriere Es. "C1"=']);
CodiceLivello=input(['Dammi il codice del livello Es. "F1"=']);
NumeroCalibrazione=input(['Dammi il numero della calibrazione =']);
% Data='23-05-07';
% CodiceOnda='H060T10j05';
% CodiceBarriera='00';
% CodiceLivello='F2';
% NumeroCalibrazione='2';
%-----
%Numero sonde resistive utilizzate in canale
%-----
ns=7;
%-----
%Vettore di corrispondenza canali/posizione di acquisizione
%-----
wg=[6 2 8 5 7 15 16];
%end
%-----
%Mi sposto nella cartella del giorno
%-----
eval(['cd ' path 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 CodiceBarriera ];
DataWg=load([FileWg '.dat']);
%dati per riferimento dello zero locale, (i primi due minuti)
%FileWgZero=[CodiceOnda(1:8) '02' CodiceBarriera CodiceLivello];

DataWgZero=DataWg(1:2400,:);
```

```

%-----
%Riordina i files acquisiti in base alla posizione
%definisci la matrice con i dati per la calibrazione:
%origa 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 i 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 è più possibile riscalarlo 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')
    h0=0.175;
    h=0.175;
    h1=0.085;
elseif (CodiceLivello=='F1')
    h0=0.185;
    h=0.185;
    h1=0.095;
elseif (CodiceLivello=='F2')
    h0=0.195;
    h=0.195;
    h1=0.105;
end
fs=20;
%analisi riflessione alle sonde in posizione 2 e 3
Delta=0.31;
DatiRiflessione=b(inizio:fine,[2 3]);
[Kr_DavantiTubi, Hi_DavantiTubi, Hr_DavantiTubi]=wvref(h0,Delta,DatiRiflessione,fs,FileWg, [Data ' Up-Up-
Stream']);
%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_DavantiTubi[cm] Hr_DavantiTubi[cm] kr_DavantiTubi 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 %4.2f
%4.2f %4.2f\r\n',[Hi_DavantiTubi Hr_DavantiTubi Kr_DavantiTubi Hi_Davanti Hr_Davanti Kr_Davanti
Hi_Dietro Hr_Dietro Kr_Dietro]);
fclose(pluto)

cd ..\FileMatLabPerAnalisiDati\

```

## 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, primo tra tutti, il Prof. Lorenzo Cappietti per la fiducia fin da subito dimostratami nell'avermi fatto partecipare a questo studio ma anche per avermi seguita durante l'intero lavoro con sempre nuovi preziosi insegnamenti.

Ringrazio inoltre il Prof. Ing. Pier Luigi Aminti e l'Ing. Enrica Mori per i molti consigli e la grande disponibilità e soprattutto per avermi sostenuta durante il mio primo giorno di prove.

Un grazie sincero va anche ai tecnici del Laboratorio di Idraulica, Mauro Gioli e Muzio Mascherini, per la grande pazienza e competenza con le quali, ogni volta, hanno saputo risolvere i problemi tecnici nati in laboratorio.

Grazie a Guido Vanni, Matteo Giannini e Luca Sardi con i quali ho condiviso il lavoro di questa tesi ma soprattutto a Ilaria Crema, preziosa compagna di lavoro e amica con la quale, con forza e tenacia, sono giunta al termine di questo studio.

Desidero ringraziare gli amici e i compagni dell'Università con cui ho iniziato e trascorso i miei anni di studio in particolare Matteo, Carolina, Elisa, Benedetta, Marina e Marzio, senza i quali sarebbe stata molto più dura.

Grazie a Dario e a Cristina, il braccio sinistro e il braccio destro, fondamentali non solo in questi anni universitari ma soprattutto nella vita.

Infine il ringraziamento più sentito va ai miei genitori, ai quali dedico questa tesi, senza il cui appoggio e contributo niente di tutto questo sarebbe stato possibile.

*Alice*