



UNIVERSITÀ DI PISA

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

Corso di laurea in Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio  
Curriculum Marino

Tesi di Laurea Specialistica

**STUDIO SPERIMENTALE, SU MODELLO FISICO,  
DELL'EFFICIENZA DI FRANGIFLUTTI GALLEGGIANTI.**

**Relatore:** Prof. Ing. Lorenzo Cappietti

**Candidata:** Costanza Saccomani

.....

.....

Anno Accademico 2008-2009

Grazie al Prof. Ing. Lorenzo Cappietti per la disponibilità con cui mi ha accolto in questa fase finale e cruciale della vita universitaria ma, soprattutto, per avermi proposto questa concreta esperienza lavorativa durante la quale, oltre ad aiutarmi, ha saputo essere un esempio.

All'insostituibile Dott.ssa Ilaria Crema, non solo per la pazienza con cui mi ha seguito nella fase sperimentale ma anche per le chiacchierate e le risate lungo il canale; ai ragazzi che in questi mesi hanno condiviso con me la quotidianità del laboratorio e ai tecnici, Mauro Gioli e Muzio Mascherini, per averci aiutato a risolvere gli inconvenienti del caso.

Alle persone che hanno reso possibile il raggiungimento di questo traguardo e la "scrittura" di un capitolo molto importante della mia vita, sorbendomi i miei vari sbalzi di umore: mio padre, mia madre (che si merita una seconda laurea dopo aver letto, letto e ancora letto questa tesi!), Benedetta e Vittoria che mi hanno sempre dimostrato stima e affetto!

A tutti coloro che in questi anni hanno vissuto con me, oltre agli esami (anche quelli sostenuti ad Agosto), le aulette di mezzo, le piazze (da Cavalieri, passando per Vettovaglie e Garibaldi), il polo con cene annesse, le rare corse alle Piagge, le Luminarie, i pranzi a mensa secondo piano fila a destra e quelli veloci al mare, gli oroscopi davanti al caffè, le partite dell'Italia al Pacinotti, le ruede (sperando nel sombrero doble e più, per schivare il "nano malefico e il gelataio"), il serale, il freddo-umido pisano...e tanto altro, in particolare: Eleonora, Simone, Jacopo, Maira, Filippo, Federico, Cristina, Mirko, Chiara, Lavinia, Cecilia, Cristiano, Marco, Lucia, Andrea e tutti i miei coinquilini.

Alle persone che non nomino, ma che mi vogliono bene!

# Indice

<b>Sommario.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Introduzione .....</b>	<b>2</b>
1.1 Principi del “muro d’acqua” .....	3
1.1.1 Alcuni esempi di realizzazione .....	7
1.2 Le barriere frangiflutti galleggianti, revisione dello stato dell’arte .....	9
1.2.1 Riflessione e trasmissione .....	24
1.2.1.1 Il metodo Goda e Suzuki.....	25
<b>2. Descrizione della metodologia sperimentale.....</b>	<b>28</b>
2.1 Strumenti d’indagine.....	28
2.2 L’analisi fisica dimensionale nella modellistica .....	29
2.3 Il principio di similitudine.....	31
2.3.1 La similitudine di Froude .....	33
2.3.2 La similitudine di Reynolds .....	34
2.4 I modelli idrodinamici.....	35
2.4.1 Gli effetti scala e gli effetti laboratorio .....	36
2.5 Caratteristiche strutturali del Canale del Laboratorio Costiero di Firenze .....	37
2.5.1 Il generatore di moto ondoso .....	38
<b>3. Descrizione degli esperimenti.....</b>	<b>40</b>
3.1 Il prototipo.....	40
3.2 Il modello .....	41
3.3 L’allestimento della sezione di misura.....	42
3.3.1 Gli strumenti di acquisizione dei dati: le sonde resistive.....	44
3.4 Le caratteristiche del moto ondoso incidente.....	49
3.5 Le configurazioni testate .....	50
3.6 Il prototipo per la terza sessione di prove .....	54
3.7 Il modello per la terza sessione di prove.....	55
<b>4. Analisi e interpretazione dei dati.....</b>	<b>58</b>
4.1 Risultati ottenuti nella prima sessione sperimentale .....	59
4.2 Risultati ottenuti nella seconda sessione sperimentale .....	63
4.3 Risultati ottenuti nella terza sessione sperimentale.....	68

4.4 Stima dei massimi spostamenti .....	69
<b>Conclusioni .....</b>	<b>73</b>
<b>Allegati .....</b>	<b>75</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>88</b>

## Indice delle figure

Figura 1 - Caratteristiche di un'onda .....	4
Figura 2 - Riflessione totale di un'onda che investe un ostacolo verticale. ....	4
Figura 3 - Il “muro d’acqua fisso” compreso tra una barriera frangiflutti e il fondale. ....	4
Figura 5 - Schema del progetto realizzato a Barcellona. ....	7
Figura 6 - In alto, vista d’insieme del progetto architettonico della diga semi galleggiante situata nel porto della Condamine di Monaco. In basso, particolare della diga in sezione. ....	8
Figura 7 - Catena di pneumatici affiancati. ....	10
Figura 8 - Frangiflutti galleggianti per la riduzione dell’agitazione ondosa. ....	11
Figura 9 - Definizione dei parametri caratteristici di un generico frangiflutti. ....	13
Figura 10 - Configurazione dei dispositivi di ancoraggio. ....	14
Figura 11 - Valori del coefficiente di trasmissione per le differenti configurazioni. ....	15
Figura 12 - Variazioni delle forze sui dispositivi di ancoraggio lato mare. ....	15
Figura 13 - Frangiflutti galleggianti: a. single box, b. double box, c. board-net. ....	16
Figura 14 - Valori d coefficiente di trasmissione ottenuti per le diverse tipologie di frangiflutti (a single box; b double box; c board-net). ....	18
Figura 15 - Visuale del corpo galleggiante ancorato al canale attraverso tre tipologie di ancoraggio in ciascuna delle inclinazioni sperimentate. ....	19
Figura 17 - Rappresentazione in pianta delle configurazioni sperimentate. I risultati ottenuti dalla configurazione a forma di L, sperimentata nel 2008, sono stati paragonati con quelli ottenuti precedentemente al 2008 dalle configurazioni a forma di I e di J. ....	22
Figura 19 - Il canale del Laboratorio Costiero. ....	38
Figura 20 - Prospetto frontale della parte meccanica del generatore del moto ondoso. ....	39

Figura 21 - Vista, in sezione, del prototipo da riprodurre. ....	41
Figura 22 - Rappresentazione schematica in pianta del modello. ....	41
Figura 23 - Modello del frangiflutti e dei corpi galleggianti da testare.....	42
Figura 24 - Parzializzazione del canale in tre sotto canali. ....	43
Figura 25 - a. Sonda resistiva; b. Schema elettrico di una sonda resistiva. ....	44
Figura 26 - Grafici delle rette di calibrazione ottenuti, per ogni sonda, in data 27-01-10. ....	47
Figura 27 - Parametri caratteristici relativi al moto ondoso registrati dalla sonda 1, nel dominio del tempo a sinistra e nel dominio della frequenza a destra, in data 27-01-10.....	48
Figura 28 - Schema, in sezione, del posizionamento delle sonde resistive. ....	48
Figura 29 - Le diverse dimensioni dei galleggianti testati.....	51
Figura 30 - Le diverse permeabilità dello scafo lato lago testato. ....	51
Figura 31 - Le diverse altezze della deriva testata.....	51
Figura 32 - Vista, in sezione, delle modifiche apportate al prototipo. ....	53
Figura 33 - Vista, in sezione, del prototipo da riprodurre per la III sessione sperimentale.....	55
Figura 34 - Modello del frangiflutti da testare nella III fase sperimentale.....	56
Figura 35 - Schema, in sezione, del posizionamento delle sonde resistive per la III sessione di prove. ....	56
Figura 36 - Sopra, livello e spettro in frequenza acquisito sul fondale antistante al generatore del moto ondoso; sotto, livello e spettro in frequenza acquisito sul fondale davanti al frangiflutti.....	59
Figura 37 - Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la I sessione di prove, in funzione delle diverse tipologie di galleggianti.....	61
Figura 38 - Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la I sessione di prove, in funzione della porosità dello scafo lato lago. A. Confronto tra le configurazioni C5-C7, B. Confronto tra le configurazioni C2-C4. ....	62
Figura 40 - Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la II sessione sperimentale, in funzione dell'altezza della deriva. ....	65
Figura 41 - Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la II sessione di prove, in funzione della permeabilità dello scafo lato lago. ....	65
Figura 42 - Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la II sessione di prove, in funzione della permeabilità del piano dell'estradosso.....	66

Figura 43 - Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la II sessione di prove, in funzione della quota dell'estradosso.....	67
Figura 44 - Confronto tra i diversi coefficienti di trasmissione ottenuti nelle prime due sessioni sperimentali.....	68
Figura 45 - Confronto tra i valori dei coefficienti di trasmissione più bassi ottenuti nelle prime due sessioni sperimentali e quello ottenuto nella terza sessione. ....	69
Figura 46 - Massimi spostamenti effettuati dal primo prototipo testato.....	71
Figura 47 - Massimi spostamenti effettuati dal secondo prototipo testato.....	72

## **Indice delle tabelle**

Tabella 1 - Coefficienti di trasmissione ottenuti da “muri d’acqua” di diverse dimensioni. ....	6
Tabella 2 – Caratteristiche del modello.....	14
Tabella 3 – Parametri caratteristici dei tre diversi modelli studiati.....	17
Tabella 4 – Parametri caratteristici dei tre modelli studiati.....	19
Tabella 5 – Parametri caratteristici dei modelli oggetto di studio.....	21
Tabella 6 – Rapporti di scala per la modellistica fisica in cui si rispetta il criterio di Froude. ....	34
Tabella 7 – Distanza tra le sonde utilizzate nell’analisi di riflessione e trasmissione.....	48
Tabella 8 - Le configurazioni testate durante la I sessione di prove (scala modello).....	52
Tabella 9 – Elementi caratterizzanti le configurazioni testate durante la II sessione di prove (scala modello). ....	54
Tabella 10 - Distanza tra le sonde utilizzate nelle analisi, per la terza sessione sperimentale. ....	57
Tabella 11 – Elementi caratterizzanti la configurazione testata durante la III sessione di prove (scala modello). ....	57
Tabella 12 – Risultati ottenuti nella prima sessione di prove sperimentali (scala prototipo)...	60
Tabella 13 – Risultati ottenuti nella seconda sessione di prove sperimentali (scala prototipo). ....	64
Tabella 14 - Risultati ottenuti nella terza sessione di prove sperimentali (scala prototipo). ....	68
Tabella 15 – Stima degli spostamenti, effettuati dai due prototipi lungo l’asse x e y.....	70

# Sommario

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è l'analisi, tramite prove sperimentali bidimensionali su modello in scala, dell'effetto delle variazioni di alcuni parametri progettuali sulla trasmissione di moto ondoso, a tergo di frangiflutti galleggianti proposti per la protezione di un'area destinata a divenire un approdo turistico.

Gli esperimenti, condotti presso il canale del Laboratorio Costiero del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli studi di Firenze, consistono in prove condotte con un unico attacco ondoso irregolare su fondo fisso.

Nel primo capitolo d'introduzione sono presentati i principi di funzionamento e le generalità delle strutture oggetto di studio, basati sullo stato dell'arte, e i fenomeni che verranno osservati durante lo svolgimento degli esperimenti.

Nel secondo capitolo viene descritta la metodologia sperimentale.

Il terzo capitolo è dedicato alla descrizione dei prototipi da riprodurre, dei modelli riprodotti e delle configurazioni testate, dell'allestimento della sezione di misura, degli strumenti e dei *software* utilizzati per l'acquisizione dei dati.

Infine il quarto capitolo, in cui si riporta il confronto tra le misure sperimentali ottenute dall'analisi dei dati acquisiti per le diverse configurazioni testate, è seguito dall'esposizione delle conclusioni tratte dal presente lavoro.

Nella sezione allegati si riporta la tabella riassuntiva del database dei segnali acquisiti ed elaborati in tutte le fasi sperimentali, la check list di laboratorio seguita giornalmente durante le sessioni di prova, e il programma di analisi dati utilizzato.

# 1. Introduzione

Con il termine barriere frangiflutti viene generalmente indicato nell'ambito dell'Ingegneria Costiera un insieme convenzionale di opere di difesa, distaccate dalla costa, opportunamente create per la salvaguardia dei litorali o per la protezione di aree portuali.

L'utilizzo di queste opere, se da un lato fornisce una protezione quasi totale dei siti, comporta una serie di impatti negativi diretti e indiretti sui fondali, la formazione di zone di scarso ricambio idrico con il mare aperto e un'alterazione del paesaggio cui è associato un forte impatto visivo.

Per cercare di ridurre questi impatti, mantenendo il livello di protezione adeguato allo scopo cui la struttura è preposta, negli ultimi decenni si sono sviluppate tecniche e tecnologie più all'avanguardia. Ai sistemi non convenzionali di attenuazione del moto ondoso appartengono le barriere frangiflutti galleggianti. Le loro prospettive di impiego spaziano tra: la protezione delle coste dall'erosione, la protezione di aree portuali, la protezione di impianti offshore, la realizzazione di aree destinate ad impieghi ricreativi, la protezione temporanea di siti oggetto di ripascimento.

L'attenzione di questo lavoro è dedicata allo studio dell'efficienza di frangiflutti galleggianti nell'attenuazione del moto ondoso, tramite prove sperimentali bidimensionali su modello in scala, al fine di conoscere le condizioni di moto ondoso trasmesso a tergo di esso, e le forze agenti sui dispositivi di ancoraggio in modo da consentirne una corretta progettazione. Le prove sono state condotte presso il Laboratorio Costiero (LC) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA) dell'Università degli studi di Firenze.

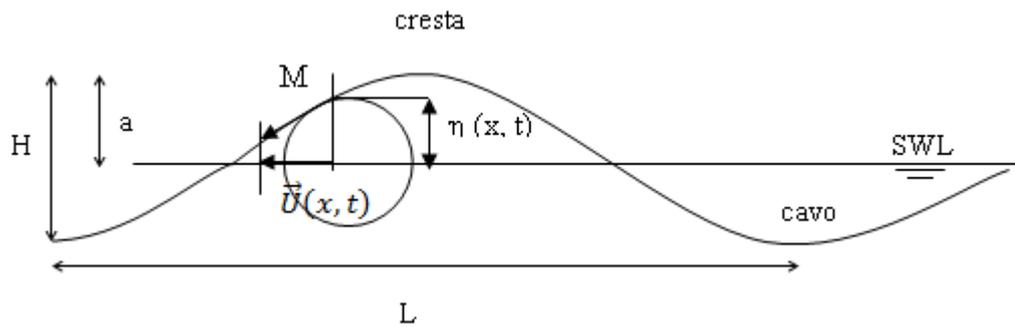
## 1.1 Principi del “muro d’acqua”

Per capire intuitivamente il principio di funzionamento del “muro d’acqua” (Manzone 1992) bisogna considerare un moto ondoso che si propaga in un canale di profondità uniforme. In tali circostanze un’onda incidente che si propaga può essere caratterizzata da una sopraelevazione rispetto al livello dell’acqua in quiete  $\eta(x, t)$  e da una velocità orizzontale  $U(x, t)$  il cui vettore orientato  $\vec{U}(x, t) = U_m \sin(\omega t + a) \hat{i}$  può essere considerato una grandezza caratteristica della propagazione del moto ondoso (Manzone 1992) (Figura 1).

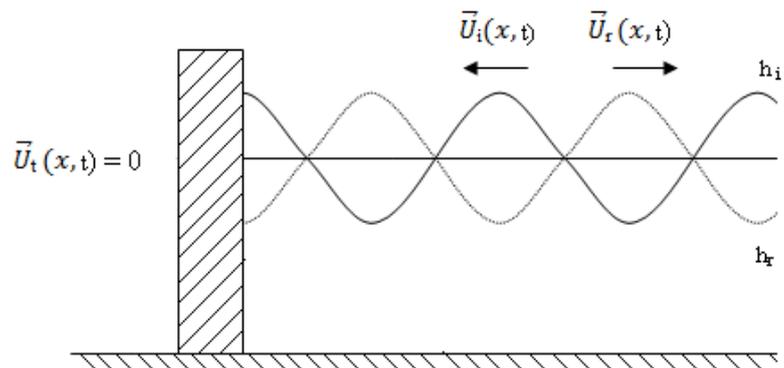
Se si frappone una struttura verticale sul percorso dell’onda incidente si genererà una riflessione totale dell’onda sul muro (Figura 2), a cui è associata la formazione di un’onda che si propaga in senso contrario  $\vec{U}_r(x, t) = -\vec{U}_i(x, t)$  e l’assenza di moto ondoso trasmesso  $\vec{U}_t(x, t)$  dal lato opposto del muro (se la quota della struttura al di sopra del livello dell’acqua in quiete è tale da impedire ogni passaggio del mare al di sopra di essa). Di conseguenza quello che ci si aspetta se si frappone una struttura galleggiante (per es. un cassone) è una riflessione parziale dell’onda incidente, e una certa trasmissione.

Bisogna tener presente che un moto ondoso incidente su una struttura (di larghezza non trascurabile rispetto alla lunghezza d’onda del moto ondoso) parzialmente immersa potrà generare, al di sotto di essa, solo un moto orizzontale rappresentato da un vettore di velocità uniforme che sarà uguale per tutti i punti della massa d’acqua situati lungo la stessa orizzontale, e quindi dipenderà solo dal tempo e dalla profondità  $U(t)$ . La conseguenza dell’interazione e quindi del trasferimento di energia tra il moto ondoso e la massa d’acqua “imprigionata” tra la struttura e il fondo, assimilabile all’acqua contenuta in un tubo al cui lato d’ingresso viene applicata una pressione, sarà la generazione di un’accelerazione e una velocità orizzontale che dipenderanno solamente dall’inerzia, quindi dalla larghezza della struttura, e dall’energia sviluppata dall’onda incidente. Ne consegue che, per un determinato moto ondoso si potrà trovare una larghezza tale da imprigionare una massa d’acqua sufficiente affinché, tenuto conto dell’inerzia, la velocità orizzontale comunicata alla massa sia sufficientemente debole. In queste condizioni l’onda trasmessa, la cui velocità orizzontale caratteristica  $\vec{U}_t(x, t)$  può solo essere pari alla velocità caratteristica della massa d’acqua imprigionata  $U_t(x, t) = U(t)$ , sarà quindi ridotta. Ciò significa che per una data larghezza della struttura immersa, e quindi per una data inerzia del “tubo d’acqua” che si viene a creare al di sotto di essa, la pressione esercitata dall’onda durante il trasferimento di energia

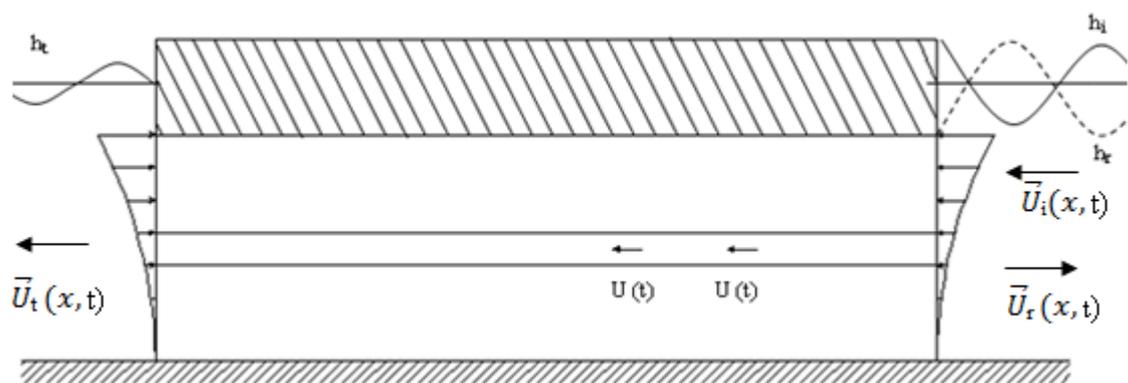
dipenderà solo dal periodo dell'onda incidente. Giocando sulla larghezza e sull'immersione della barriera frangiflutti, le caratteristiche dell'opera possono essere adeguate all'importanza dell'onda da attenuare (Figura 3).



**Figura 1** - Caratteristiche di un'onda.



**Figura 2** - Riflessione totale di un'onda che investe un ostacolo verticale.



**Figura 3** - Il "muro d'acqua fisso" compreso tra una barriera frangiflutti e il fondale.

Questo sistema di smorzamento del moto ondoso incidente è tanto più efficiente tanto più deboli saranno i periodi caratteristici del moto ondoso. La dipendenza dell'efficienza dal

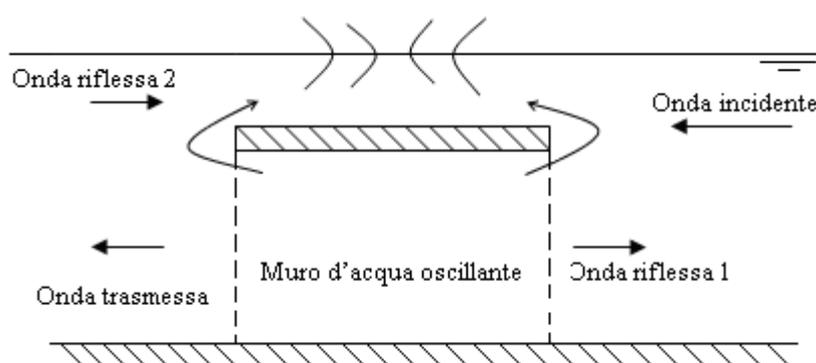
periodo d'onda limita l'applicabilità del sistema a mari caratterizzati da piccole escursioni di marea e a siti dove le condizioni meteo marine sono poco variabili.

Esistono due varianti del muro d'acqua:

- il muro d'acqua fisso, che funziona secondo il principio fin'ora descritto;
- il muro d'acqua oscillante, che funziona secondo un principio leggermente diverso.

Nel muro d'acqua fisso la configurazione geometrica del dispositivo consente di ridurre la velocità orizzontale caratteristica in seno alla massa d'acqua in oscillazione tra il fondo del cassone e quello del mare. Il suo rendimento sarà tanto maggiore quanto più lentamente oscillerà il muro d'acqua imprigionato, per questo motivo il dispositivo prende il nome di muro d'acqua fisso.

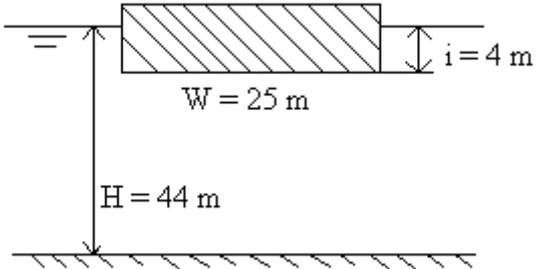
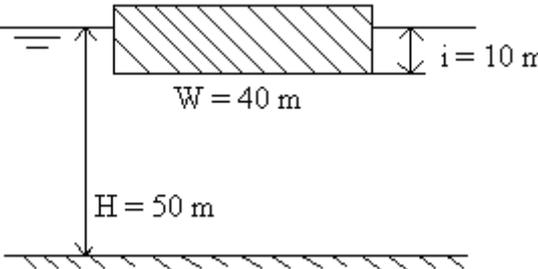
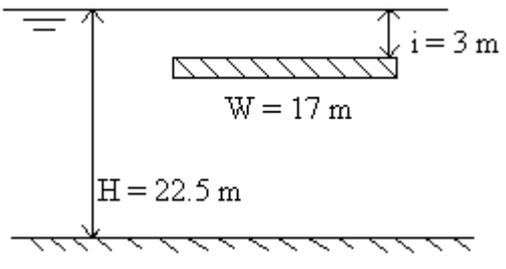
Il muro d'acqua oscillante (Figura 4) si genera quando onde con periodi intermedi mettono in movimento la massa imprigionata tra una struttura di piccolo spessore, immersa qualche metro sotto la superficie dell'acqua in quiete e il fondo. Poiché la massa d'acqua imprigionata viene messa in movimento da onde con periodi maggiori rispetto a quelle che azionano il muro d'acqua fisso, la riduzione della velocità dell'onda trasmessa è meno evidente e il muro d'acqua in questo secondo caso oscilla con una velocità maggiore, caratteristica che ha conferito al dispositivo il nome di muro d'acqua oscillante. Tuttavia questo sistema, simultaneamente alla riduzione dell'onda trasmessa, genera un'onda riflessa, in corrispondenza del lato in uscita del muro d'acqua oscillante, sfalsata rispetto all'onda incidente. L'incontro, tra l'onda riflessa e quella incidente, comporta la reciproca neutralizzazione sull'estradosso della struttura e di conseguenza la perdita dell'energia dell'onda incidente. La somma delle due azioni conferisce al dispositivo delle prestazioni interessanti.



**Figura 4** – Il “muro d'acqua oscillante”.

Le prove su modello fisico fin'ora condotte hanno mostrato valori di coefficiente di trasmissione compresi tra 0.03 e 0.60. Il grado di attenuazione dipende dalla profondità del fondale, dal periodo dell'onda, dall'immersione e dalla larghezza delle barriere frangiflutti utilizzate, come mostrato in tabella 1.

**Tabella 1** - Coefficienti di trasmissione ottenuti da "muri d'acqua" di diverse dimensioni.

Sezione tipo	$T^1$ (s)	$L^2$ (m)	$K_t^3$
 <p>W = 25 m i = 4 m H = 44 m</p>	5	40	0.03
	6	56	0.10
	7	76	0.20
	8	100	0.30
 <p>W = 40 m i = 10 m H = 50 m</p>	6	56	0.03
	7	76	0.10
	8	100	0.20
	10	156	0.50
 <p>W = 17 m i = 3 m H = 22.5 m</p>	4.5	32	0.40
	5.4	45	0.35
	6.3	62	0.50
	7.2	80	0.40
	8	100	0.60

L'interesse tecnologico di questo procedimento di attenuazione del moto ondoso dipende dal fatto che i risultati sono indipendenti dalla profondità dell'acqua, contrariamente ai metodi tradizionali come le dighe a scogliera o a parete verticale. Tenendo conto che una

<sup>1</sup>  $T$ : periodo d'onda, pari all'intervallo di tempo che intercorre tra il susseguirsi del passaggio di due creste o due cavi, rispettivamente massima distanza in positivo e massima distanza in negativo tra l'onda e il livello dell'acqua in stato di quiete (=SWL), in un determinato punto (vedi Figura 1).

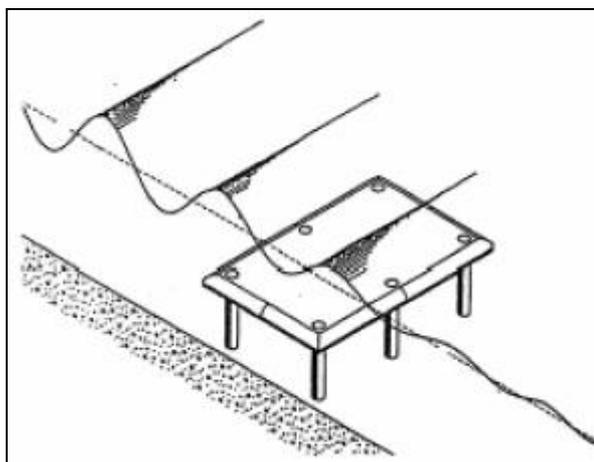
<sup>2</sup>  $L$ : lunghezza d'onda, pari alla distanza tra due successive creste o due successivi cavi.

<sup>3</sup>  $K_t$ : coefficiente di trasmissione, dato dal rapporto tra l'altezza d'onda (=  $H$ , pari al dislivello tra cresta e cavo) trasmessa e l'altezza d'onda incidente.

profondità minima dell'acqua è necessaria affinché venga messo in moto un volume di muro d'acqua sufficiente, solitamente il campo di applicazione di questo sistema di difesa è quello di profondità superiori o uguali a 15 m.

### 1.1.1 Alcuni esempi di realizzazione

Una realizzazione pratica attualmente esistente del muro d'acqua oscillante, è quella eseguita nel Marzo del 1990 per la protezione, dall'insabbiamento e dalla risalita dell'acqua indotta dal frangimento, delle condotte di scarico a mare del Villaggio Olimpico di Barcellona (Landel e Prudhomme 1992). A tale scopo sono state realizzate due lastre, per ottenere un rendimento del 44% per onde di periodo da 6 a 10 s, aventi le seguenti caratteristiche: larghezza (nel senso dell'onda) di 16 m, lunghezza 24 m, spaziatura 50 m, spessore 2 m, e immersione dell'estradosso di 1.5 m. Le lastre sono realizzate con cassoni d'acciaio zavorrati con calcestruzzo, trasportati in galleggiamento e affondati sull'appoggio costituito da 6 piloni di diametro 1.2 m, infissi per 30 m nel fondale sabbioso (Leopoldo 1992).

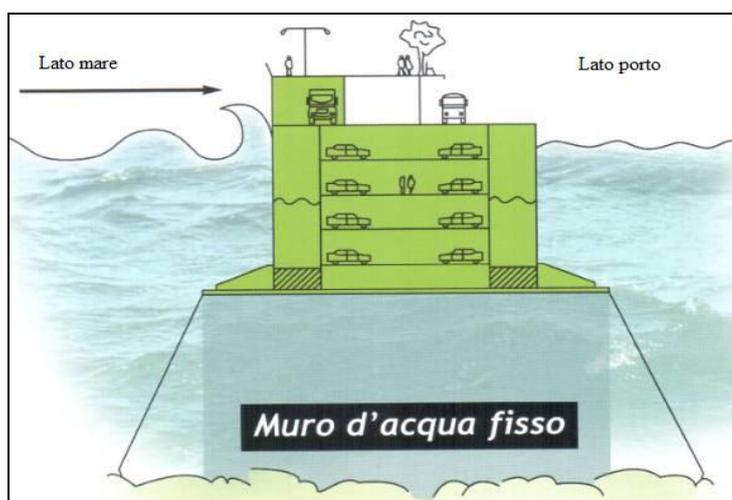


**Figura 5** – Schema del progetto realizzato a Barcellona.

La nuova diga semi-galleggiante del Porto della Condamine, nel Principato di Monaco, è un'opera di protezione del tipo a muro d'acqua fisso (Figura 6). La grande opera realizzata in cemento armato precompresso, lunga 352 m, larga 28 m e alta 19 m è stata realizzata nel Sud della Spagna, per poi essere rimorchiata via mare fino a Monaco dove è stata ancorata tramite una rotula al terrapieno precedentemente realizzato. La diga comprende nel basamento due alettoni stabilizzatori di 8 m ciascuno, con una larghezza totale immersa di 44 m la cui funzione è quella di opporsi ai movimenti di rollio e beccheggio. L'opera emerge di 3 m lato

porto e di 6.60 m lato mare e il volume immerso consente di alloggiarvi 360 posti auto, ripartiti su 4 piani (Figura 6). La diga ospita una stazione marittima per accogliere i passeggeri delle crociere e per soddisfare le esigenze delle compagnie, e i locali amministrativi e commerciali.

I motivi che hanno fatto scegliere l'applicazione del principio del muro d'acqua fisso sono state le profondità elevate e la natura mediocre dei fondali oltre alla necessità di rispettare l'ambiente marino e urbano, motivazioni che potrebbero portare all'utilizzo di questo principio per nuovi ampliamenti del territorio del Principato.



**Figura 6** - In alto, vista d'insieme del progetto architettonico della diga semi galleggiante situata nel porto della Condamine di Monaco. In basso, particolare della diga in sezione.

## 1.2 Le barriere frangiflutti galleggianti, revisione dello stato dell'arte

Le barriere frangiflutti galleggianti si annoverano tra i sistemi non convenzionali per la protezione di aree destinate a divenire approdi turistici e per la protezione delle coste dall'erosione. Il principio di funzionamento è basato sulla dissipazione per riflessione, per assorbimento dell'energia del moto ondoso e per parziale frangimento dell'onda incidente.

Le principali caratteristiche, individuate da McCartney (1985), che portano a preferire l'impiego di queste strutture al posto delle barriere tradizionali sono:

1. il miglior rendimento soprattutto in presenza di terreni di fondo poco consistenti;
2. il minor costo se applicate in acque profonde > 6 m ;
3. il minor impatto sulla circolazione delle acque e sulle migrazioni dei pesci;
4. la possibilità di rimuovere se necessario le barriere galleggianti, per esempio se applicate in zone dove si potrebbe formare del ghiaccio;
5. la scarsa elevazione al di sopra della superficie marina, che garantisce un minor impatto visivo soprattutto in quei luoghi dove si raggiungono elevati range di marea,
6. la possibilità di modificare la configurazione delle barriere frangiflutti con pochi sforzi.

In base alla forma si possono distinguere 4 tipologie diverse di barriere frangiflutti galleggianti (McCartney 1985):

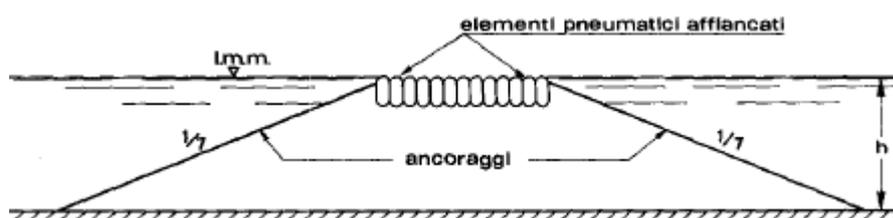
- i *mat* (tappeti ad intreccio)
- i *box* (cassoni);
- i *pontoon* (pontoni);
- i *tethered float*.

Sebbene tali strutture siano spesso meno costose di quelle tradizionali, è difficile fare un confronto diretto dei costi, infatti i frangiflutti galleggianti non offrono lo stesso grado di protezione dal moto ondoso rispetto a quelli fissi e necessitano di maggiori manutenzioni. Ma ancor prima che per ragioni economiche, il loro utilizzo è da escludere quando le condizioni meteomarine sono caratterizzate da periodi d'onda incidenti medi maggiori di 4 secondi. Queste condizioni, a eccezione di forti tempeste che si possono verificare, sono tipiche di baie e zone lacustri dove la lunghezza dell'area di generazione del moto ondoso (fetch) non supera i 3-5 km. L'applicabilità dei frangiflutti galleggianti dipende anche dal grado di esposizione, dal profilo batimetrico, dalla presenza di isole oltre la zona di fetch, dall'ampiezza delle maree, dall'intensità delle correnti, dalla possibilità di formazione di ghiaccio, dalle

condizioni meteo marine annuali e stagionali, dalla frequenza e dall'intensità delle tempeste e dal grado di protezione richiesto (Gaithwaite 1988).

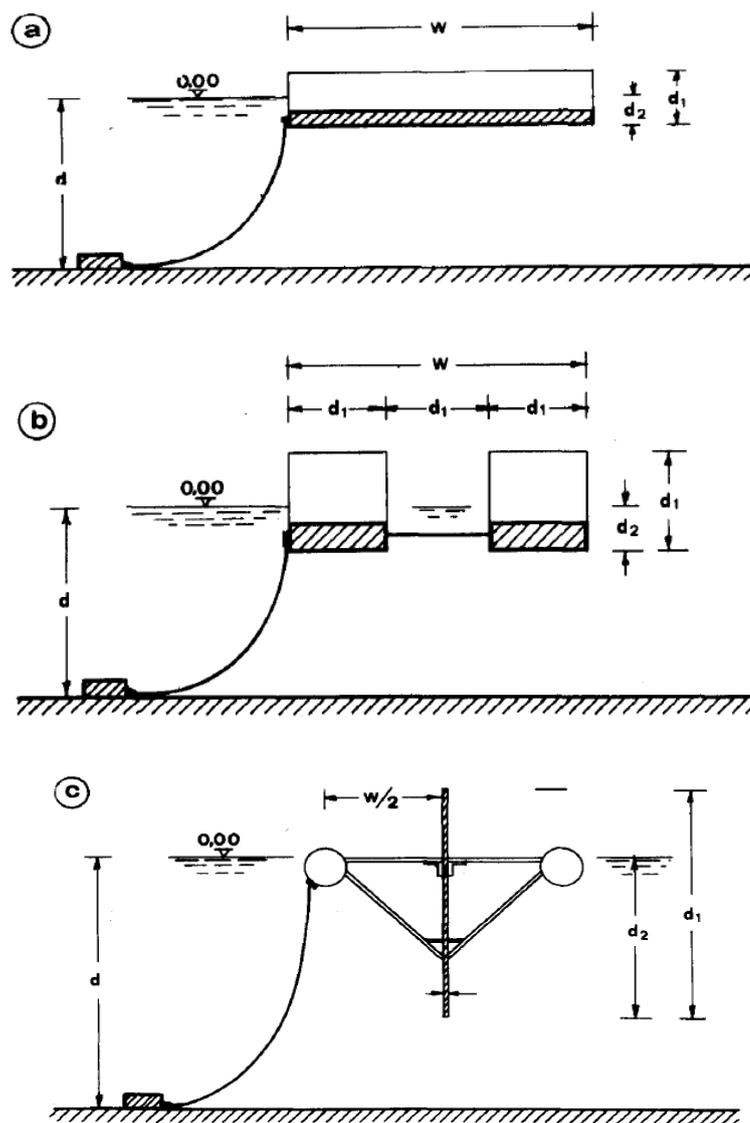
I frangiflutti a forma di mat, visti i bassi costi, la facilità con cui possono essere trascinati a riva per la manutenzione o per prevenire danni dovuti alla presenza di ghiaccio e la possibilità di costruirli senza mano d'opera specializzata, sono stati ampiamente utilizzati nei paesi anglosassoni e sono spesso costituiti da intrecci di copertoni usati, riempiti di poliuretano (Figura 7). Gli svantaggi di questa tipologia di frangiflutti galleggianti sono:

- la progressiva perdita di galleggiabilità a causa della perdita dell'aria intrappolata nella corona dei pneumatici, la crescita di organismi marini e l'accumulo di limo sul fondo dei pneumatici;
- la scarsa durabilità nel tempo che per quanto non sia ancora nota si ritiene non superiore ai 15-20 anni, per un frangiflutti adeguatamente progettato e mantenuto;
- la scarsa applicabilità, infatti per quanto finora messo in evidenza, i frangiflutti costituiti da pneumatici sono efficaci solamente in luoghi caratterizzati da climi meteo marini miti, caratterizzati da onde di  $H < 1$  m e  $T < 3$  sec;
- l'accumulo di rifiuti.



**Figura 7** – Catena di pneumatici affiancati.

La tecnologia più affidabile e collaudata di frangiflutti galleggianti è costituita dai cassoni o pontoni prefabbricati in calcestruzzo ad unico o doppio modulo, nonché quelli di forma particolare realizzati con due galleggianti tubolari opportunamente distanziati tra loro e collegati da una struttura reticolare discontinua, che costituiscono il supporto di una parete continua parzialmente immersa (Figura 8a, 8b, 8c rispettivamente). I vantaggi di queste strutture, rispetto ai frangiflutti galleggianti a forma di mat, sono la maggior durabilità nel tempo (50 anni di vita della struttura), la possibilità di poterle sfruttare come passerelle pedonabili e banchine per l'attracco delle barche, la possibilità di costruire diverse configurazioni interconnettendo più moduli, l'efficienza dimostrata nell'attenuazione del moto ondoso incidente (McCartney 1985).



**Figura 8** – Frangiflutti galleggianti per la riduzione dell’agitazione ondosa.

Per tutte le tipologie di frangiflutti testate, di cui si parla in letteratura, si è riscontrato che il coefficiente di trasmissione, che è dato dal rapporto tra l’altezza d’onda trasmessa e l’altezza d’onda incidente ( $K_t = H_t/H_i$ ) è strettamente dipendente dal valore del rapporto tra la larghezza della struttura e la lunghezza d’onda,  $B/L$ . Questo deve essere quindi il parametro fondamentale di cui tener conto durante la fase di progettazione. Secondo quanto riportato in letteratura da Blumberg (1988) per ottenere una riduzione nella trasmissione del 50%, in acque profonde  $> 6$  m, la larghezza minima della struttura deve essere pari al 50-60% della lunghezza d’onda incidente.

L’installazione delle diverse tipologie di frangiflutti galleggianti viene realizzata tramite l’ancoraggio diretto sul fondo per mezzo di cavi o di pali infissi nel fondale. I dispositivi di ancoraggio per mezzo di cavi possono essere suddivisi anche in base (Werner 1988):

- alla configurazione (cavi incrociati o non incrociati, con ancoraggio a livello del pelo libero dell'acqua o sul fondo della struttura, al centro o agli estremi della struttura);
- alla tipologia del cavo (catene, cavi metallici o corde);
- alla tipologia di ancoraggio (ancora denforth, blocchi in calcestruzzo adagiati sul fondo).

I dispositivi di ancoraggio costituiscono uno dei punti deboli di questa tipologia di opere, in quanto subiscono molte sollecitazioni in seguito all'interazione con il moto ondoso, a cui si possono sommare i rischi dovuti alla risonanza della struttura oscillante.

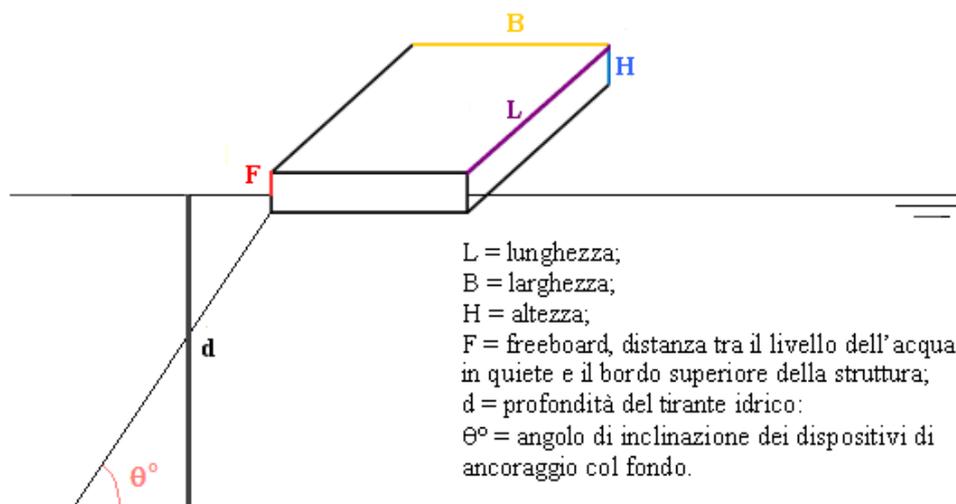
Per una corretta progettazione, affinché non venga messa a repentaglio la resistenza del sistema di ancoraggio e di conseguenza la stabilità e il funzionamento della struttura, è quindi necessario essere a conoscenza delle forze agenti sui frangiflutti e sui dispositivi di ancoraggio e di connessione tra moduli adiacenti.

A causa della natura variabile dei carichi ambientali come ad es. il vento, le onde e le correnti, per poter valutare tali forze è necessaria un'analisi dinamica che tenga conto dei movimenti di risposta in seguito all'azione del moto ondoso incidente, effettuati dal corpo galleggiante lungo le tre direzioni (traslazione lungo l'asse x e l'asse y, rotazione intorno all'asse z) (Rahman, Mizutani e Kawasaki 2006).

I due metodi più comuni di analisi della trasmissione del moto ondoso e delle forze agenti sui dispositivi di ancoraggio sono gli esperimenti su modelli fisici e le simulazioni numeriche. L'approccio sperimentale solitamente, essendo considerato più affidabile dai progettisti, è quello che si preferisce ma la strumentazione per le simulazioni numeriche è molto più economica di quella per le prove sperimentali, per cui questo metodo di analisi potrebbe essere utilizzato per i progetti preliminari (Martinelli e Ruol 2006).

Sono stati effettuati molti studi sull'efficienza dei frangiflutti in relazione ai problemi idrodinamici in acque profonde e intermedie, sugli effetti delle diverse configurazioni e sulle diverse tipologie di ancoraggio.

In mancanza di linee guida per la progettazione dei frangiflutti galleggianti è possibile applicare i risultati ottenuti in questi studi, a patto che le configurazioni, per quanto riguarda: le sezioni trasversali, i livelli d'acqua e la lunghezza della struttura, siano simili a quelle testate e che siano note le condizioni meteo marine medie ed il grado di trasmissione ritenuto accettabile. Per quanto sia evidente che tale applicabilità sia limitata, di seguito si riportano alcuni esempi. I parametri caratteristici di un frangiflutti sono mostrati in figura 9.

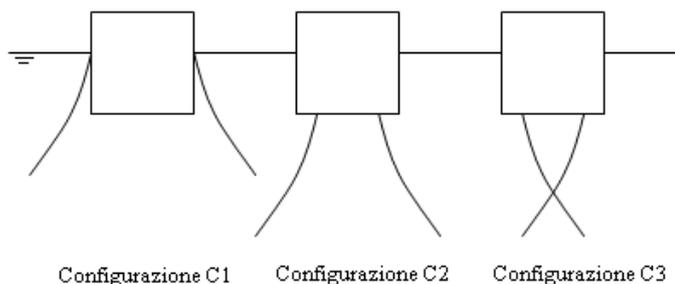


**Figura 9** – Definizione dei parametri caratteristici di un generico frangiflutti.

Nel 1996 Sannasiraj, Sundar e Sundaravadivelu hanno testato il comportamento di un frangiflutti galleggiante, a forma di pontone con tre diverse tipologie di ancoraggio, presso il canale del laboratorio del Centro di Ingegneria Oceanica dell'Indian Institute of Technology, a Madras, in India (i parametri caratteristici del pontone sono riportati nella Tabella 2). Questo esperimento ha messo in evidenza che per quanto riguarda la trasmissione, le tre configurazioni di ancoraggio (Figura 10):

1. dispositivi ancorati sulla struttura galleggiante a livello della superficie dell'acqua,
2. dispositivi ancorati alla base della struttura,
3. dispositivi ancorati alla base della struttura e incrociati,

non hanno un'influenza significativa, anche se le prove hanno rivelato valori di coefficiente di trasmissione maggiori per la terza configurazione (Figura 11). Le tre configurazioni hanno, invece, una notevole influenza sulle sollecitazioni agenti sui dispositivi di ancoraggio. Le sollecitazioni sui dispositivi ancorati a livello della superficie dell'acqua e su quelli ancorati alla base della struttura sono significativamente minori rispetto a quelle subite dai dispositivi incrociati (Figura 12, le interazioni tra le onde e la struttura sono descritte mediante il RAO, l'operatore di risposta all'ampiezza dell'onda, ovvero una funzione di trasferimento che lega le caratteristiche dell'onda, alle forze generalizzate che agiscono sulle strutture galleggianti).



**Figura 10** - Configurazione dei dispositivi di ancoraggio.

**Tabella 2** – Caratteristiche del modello.

Scala	-	Valore	Unità di misura
<b>L</b>		3.78	m
<b>B</b>		0.40	m
<b>H</b>		-	
<b>Immersione</b>		0.10	m
<b>Massa</b>		150.5	kg
<b>Tipologia di ancoraggi</b>		-	
<b>Numero di ancoraggi</b>		4	
<b>Stato tensionale</b>		Scarico	
$\theta$		20	°
<b>d</b>		2.35	m
$H_s^1$		<u>Prove con onde regolari:</u> {0.03-0.08}	m
$f_p^2$		<u>Prove con onde regolari:</u> {0.3-1.5}	Hz
		<u>Prove con onde random:</u> effettuate generando una serie temporale di onde ben rappresentate dallo spettro di Bretschneider con due frequenze di picco: 0.72 e 0.96	Hz
<b>Frequenza naturale di oscillazione</b>		$f_z = 1.012$ $f_y = 0.592$	Hz Hz
<b><math>K_t</math></b>		Vedi figura 11	
<b>Forze sugli ancoraggi</b>		Vedi figura 12	
<b>Forze sui dispositivi di connessione</b>		-	

<sup>1</sup>  $H_s$ : altezza d'onda significativa definita come la media aritmetica delle N/3 onde più alte, individuate da due successivi attraversamenti del livello medio della superficie libera dell'acqua. E' uno dei parametri d'interesse utilizzato nell'analisi statistica a breve termine, nel dominio del tempo.

<sup>2</sup>  $f_p$ : frequenza di picco ( $1/T_p$ ) è la frequenza alla quale è associata la massima energia dello spettro, che rappresenta la distribuzione dell'energia associata a ciascuna onda registrata.

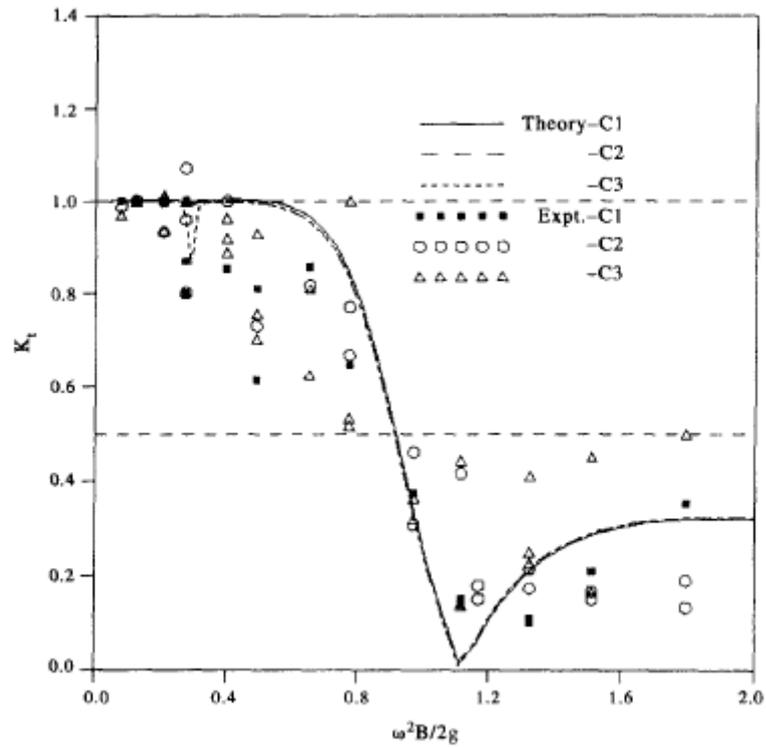


Figura 11 – Valori del coefficiente di trasmissione per le differenti configurazioni.

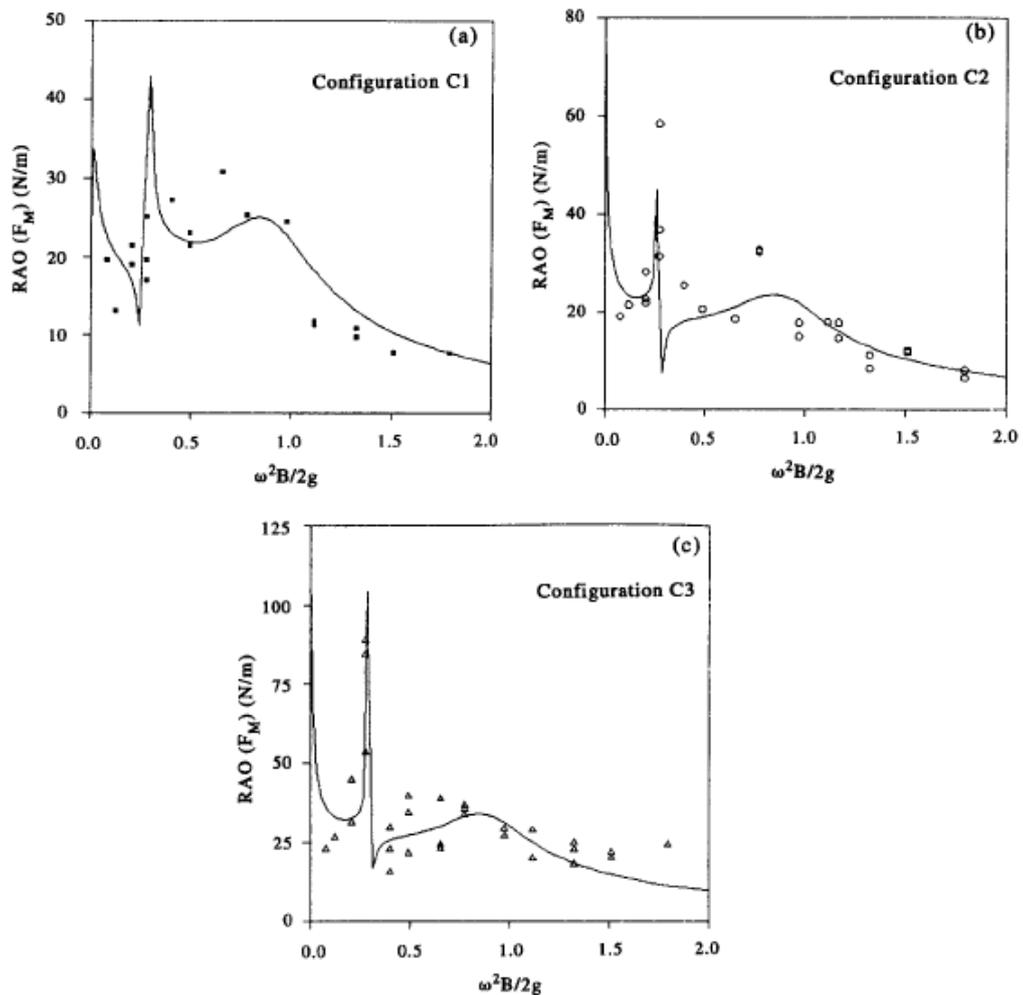
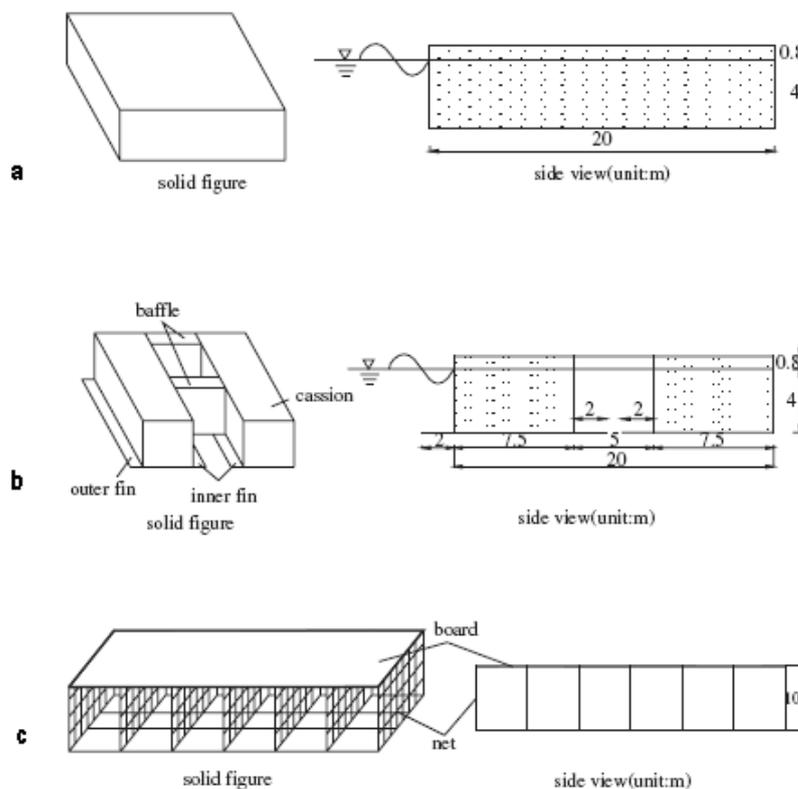


Figura 12 – Variazioni delle forze sui dispositivi di ancoraggio lato mare.

In una pubblicazione del 2004 Dong, Zheng, Li, Teng, Guan e Lin hanno paragonato i valori assunti dal coefficiente di trasmissione per tre tipologie di frangiflutti (single box, double box e board net Figura 13 a, b, c) allo scopo di proteggere delle gabbie utilizzate per l'acquacoltura, in acque profonde dove sono esposte a maggiori carichi ambientali a causa della maggiore intensità del vento, del moto ondoso e della velocità delle correnti. La terza innovativa tipologia di frangiflutti, consiste in due sottili e rigide assi, distanziate tra loro da una serie di maglie reticolari lunghe quanto la larghezza delle assi.

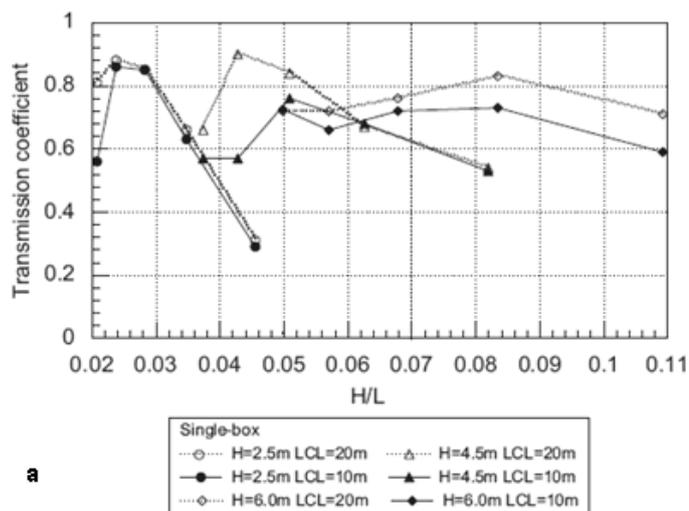
Le prove sperimentali hanno messo in evidenza che nel campo dell'acquacoltura questo frangiflutti può essere ampiamente utilizzato, che la larghezza della struttura gioca un ruolo fondamentale sul rendimento e perciò è da scegliere attentamente in relazione alle condizioni meteo marine dominanti, nei futuri luoghi di impiego. Il valore indicativo delle distanze tra le maglie reticolari, affinché si verifichi una riduzione accettabile dell'altezza d'onda, è di circa 20 m e la lunghezza delle catene di ormeggio di 10 m. Da questo studio risulta inoltre che il frangiflutti board-net è in grado di ridurre del 20 % la velocità delle correnti, caratteristica che comporta un beneficio per i pesci. La fase sperimentale è stata svolta presso il canale del laboratorio di Ingegneria Costiera e Offshore della Dalian University of Technology, in Cina e in tabella 3 si riportano i parametri caratteristici dei prototipi.



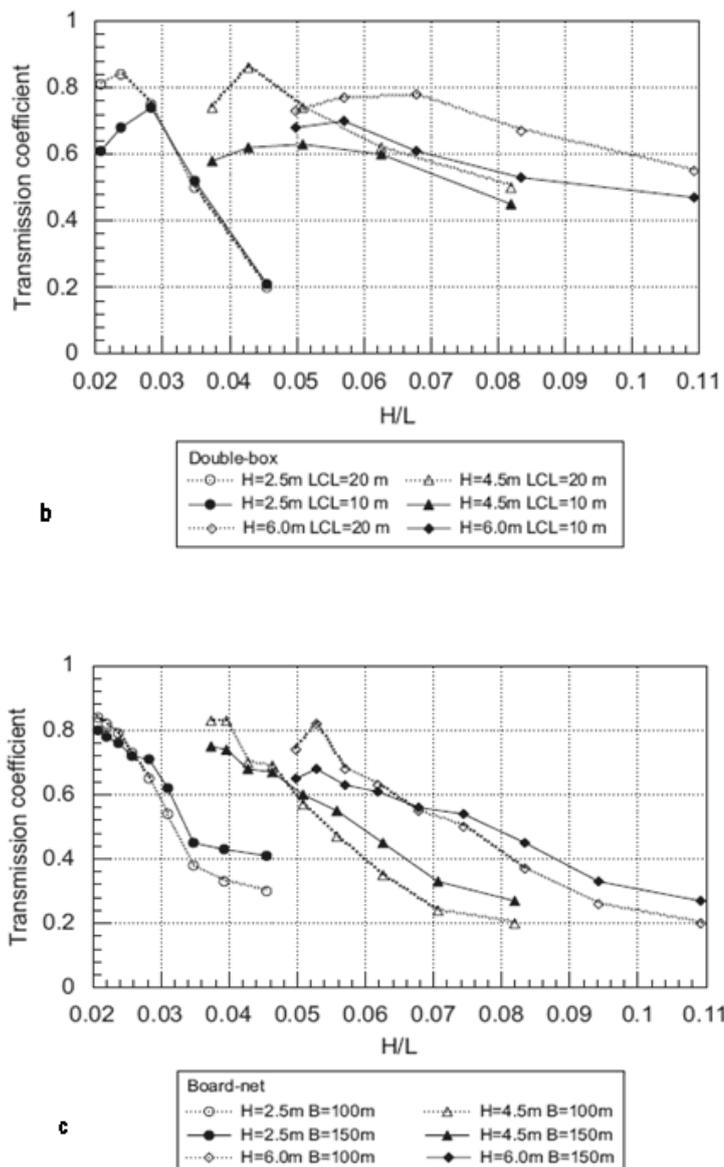
**Figura 13** – Frangiflutti galleggianti: a. single box, b. double box, c. board-net.

Tabella 3 – Parametri caratteristici dei tre diversi modelli studiati.

Scala	1:40 Per il T 1:6.325	Valore	Unità di misura
<b>L</b>		-	m
<b>B</b>		Single e double box: 0.5 Board-net: 2.5; 3.75	m m
<b>H</b>		Single e double box: 0.12 Board-net: 0.25	m m
<b>F</b>		0.02	m
<b>Massa</b>		-	kg
<b>Tipologia di ancoraggi</b>		Catene	
<b>Numero di ancoraggi</b>		12 (6 su ogni lato)	
<b>Stato tensionale</b>		Scarico	
$\theta$		-	
<b>d</b>		0.5	m
<b>H<sub>s</sub></b>		Prove con onde regolari: 0.0625; 0.1125; 0.15	m
<b>T<sub>s</sub><sup>1</sup></b>		{0.949-1.581}	s
<b>Periodo naturale di oscillazione</b>		-	
<b>K<sub>t</sub></b>		Vedi figura 14	
<b>Forze sugli ancoraggi</b>		-	
<b>Forze sui dispositivi di connessione</b>		-	



<sup>1</sup> T<sub>s</sub>: periodo significativo, definito come il periodo medio delle onde utilizzate per il calcolo dell'altezza significativa, non si tratta del periodo medio delle onde con maggior periodo.

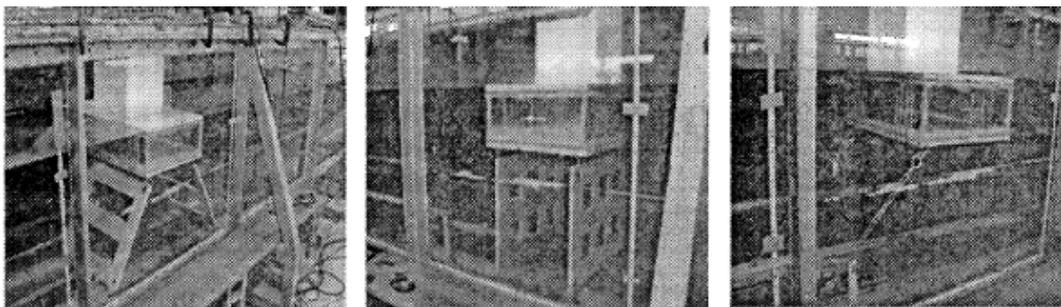


**Figura 14** – Valori di coefficiente di trasmissione ottenuti per le diverse tipologie di frangiflutti (a single box; b double box; c board-net).

Nel 2006 Mizutani e Rahman, hanno testato il comportamento di un frangiflutti galleggiante, a forma di box, con tre diverse tipologie di ancoraggio, presso il canale del Laboratorio di Ingegneria Costiera dell'Università di Nagoya, in Giappone. Per ancorare il corpo galleggiante al fondo del canale sono state utilizzate tre diverse tipologie di connessioni (Figura 15):

1. assi di legno perforate, per garantire una porosità del 32-39%;
2. assi di legno perforate, per garantire una porosità del 24-29%;
3. catene;

ciascuna delle tipologie di ancoraggio è stata ancorata al fondo con 3 diverse angolazioni ( $\theta = 90^\circ$ ,  $\theta = 60^\circ$  e  $\theta = 45^\circ$ ). (In tabella 4 sono riportati i valori delle caratteristiche principali).



**Figura 15** – Visuale del corpo galleggiante ancorato al canale attraverso tre tipologie di ancoraggio in ciascuna delle inclinazioni sperimentate.

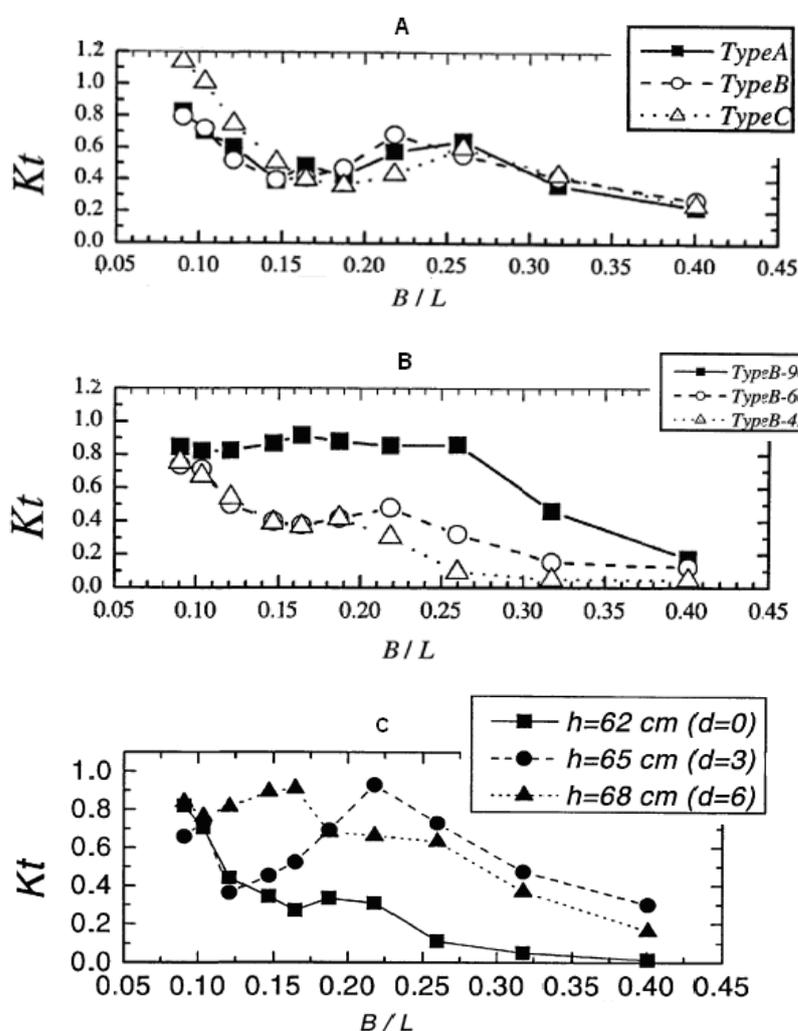
**Tabella 4** – Parametri caratteristici dei tre modelli studiati.

Scala	-	Valore	Unità di misura
<b>L</b>		0.4	m
<b>B</b>		0.68	m
<b>H</b>		0.18	m
<b>F</b>		0; -0.03; -0.06	m
<b>Massa</b>		15700	gm
<b>Tipologia di ancoraggi</b>		<u>Tipo a e b</u> : assi di legno perforate con diversa porosità <u>Tipo c</u> : catene	
<b>Numero di ancoraggi</b>		<u>Tipo a e b</u> : 2 assi (1 per ogni lato) <u>Tipo c</u> : 4 catene (2 per ogni lato)	
<b>Stato tensionale</b>		In tensione	
$\theta$		90; 60; 45	°
<b>d</b>		0.62; 0.65; 0.68	m
$\delta^1$		0.01; 0.02; 0.03	
<b>T<sub>s</sub></b>		{0.8; 0.9; 1.0; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.6; 1.8; 2.0}	s
<b>Periodo naturale di oscillazione</b>		-	
<b>K<sub>t</sub></b>		Vedi figura 16	
<b>Forze sugli ancoraggi</b>		-	
<b>Forze sui dispositivi di connessione</b>		-	

Tale studio ha messo in evidenza che i frangiflutti galleggianti sommersi sostenuti da assi perforate possono giocare un ruolo importante nella riduzione dell'altezza d'onda trasmessa a costa, e che sono in grado di dissipare una notevole quantità dell'energia del moto ondosso incidente.

<sup>1</sup> *Ripidità dell'onda*: definita come il rapporto tra l'altezza e la lunghezza d'onda.

I rendimenti per queste configurazioni sono risultati migliori rispetto al rendimento del frangiflutti ancorato con le catene, ed inoltre la rigidità delle assi non induce il “fenomeno di rilassamento” durante il passaggio del cavo dell’onda impedendo lo sviluppo di sollecitazioni impulsive sul sistema di ancoraggio. Questo costituisce un notevole vantaggio rispetto ai tradizionali sistemi che utilizzano le catene, per le quali il tensionamento deve essere garantito affinché non sia messa a repentaglio la resistenza del sistema stesso. Per quanto riguarda gli angoli d’inclinazione, il miglior rendimento è stato ottenuto per le assi inclinate a  $60^\circ$ , e i miglior risultati nella riduzione della trasmissione (Figura 16) e nella dissipazione dell’energia, sono stati ottenuti per i corpi con freeboard pari a 0 cm, rispetto ai corpi con freeboard pari a -3 e -6 cm.

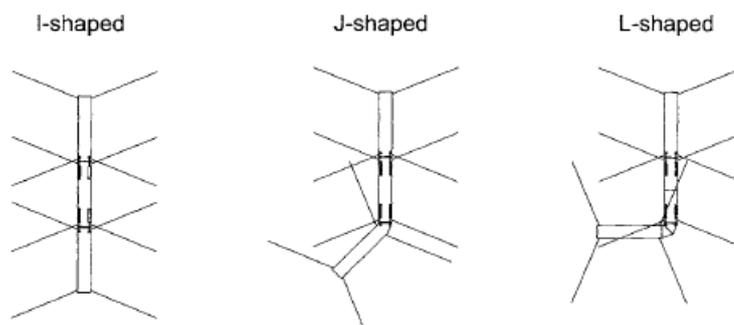


**Figura 16 – A.** Valori del coefficiente di trasmissione per le 3 diverse tipologie di ancoraggio ( $\theta^\circ = 60$ ;  $h = 65$  cm;  $H/L = 0.02$ ) **B.** Valori di  $K_t$  per frangiflutti ancorati con assi a minore porosità ( $\theta^\circ = 90$ ;  $60$ ;  $45$   $h = 62$  cm;  $H/L = 0.02$ ) **C.** Effetti della maggior immersione sull’efficienza della struttura (galleggiante ancorato con assi a minore porosità;  $\theta^\circ = 60$ ;  $H/L = 0.01$ ).

Dal 2006 al 2008 Martinelli, Ruol e Zanuttigh hanno effettuato delle prove sperimentali sugli effetti che diverse configurazioni, di un frangiflutti galleggiante, hanno sulle sollecitazioni esercitate sui dispositivi di ancoraggio e sulla capacità di ridurre la trasmissione. Il frangiflutti era formato da 3 elementi connessi, costituiti da uno scheletro in alluminio e di teflon riempito da polistirene. L'esperimento è stato condotto in una vasca per modelli tridimensionali (in condizioni di moto ondoso obliquo) presso l'Università di Padova, in Italia. Inizialmente furono analizzate solo 2 configurazioni, quella in cui i moduli erano connessi tra loro a forma di I e quella in cui erano connessi a forma di J, solo in seguito sono state fatte le prove sulla configurazione in cui i moduli erano connessi a forma di L (Figura 17); come linee d'ormeggio, per le diverse configurazioni del frangiflutti, sono state utilizzate delle catene (i parametri caratteristici del frangiflutti sono riportati nella tabella 5).

**Tabella 5** – Parametri caratteristici dei modelli oggetto di studio.

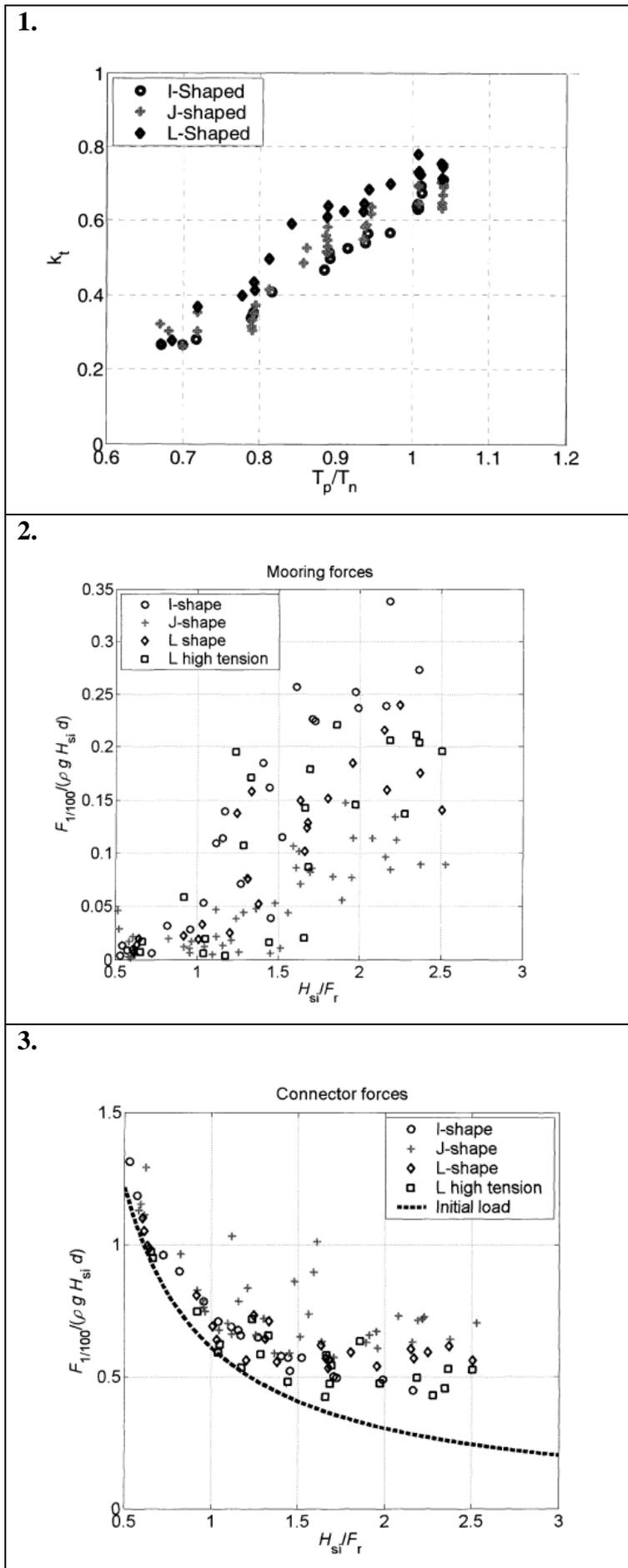
<b>Scala</b>	<b>1:20</b>	<b>Valore</b>	<b>Unità di misura</b>
<b>L</b>		2.94	m
<b>B</b>		0.2	m
<b>H</b>		0.07	m
<b>F</b>		0.034	m
<b>Massa</b>		7.25	kg
<b>Tipologia di ancoraggi</b>		Catene	
<b>Numero di ancoraggi</b>		12 (4 per ogni modulo)	
<b>Stato tensionale</b>		Scarico	
<b><math>\theta</math></b>		-	
<b>D</b>		0.5	m
<b><math>H_s</math></b>		{0.015-0.8}	m
<b><math>T_s</math></b>		0.56; 0.67; 0.78; 0.89	s
<b>Periodo naturale di oscillazione</b>		$T_z = 0.85$	s
<b><math>K_t</math></b>		Vedi figura 18 1.	
<b>Forze sugli ancoraggi</b>		Vedi figura 18 2.	
<b>Forze sui dispositivi di connessione</b>		Vedi figura 18 3.	



**Figura 17** – Rappresentazione in pianta delle configurazioni sperimentate. I risultati ottenuti dalla configurazione a forma di L, sperimentata nel 2008, sono stati paragonati con quelli ottenuti precedentemente al 2008 dalle configurazioni a forma di I e di J.

Le conclusioni che si sono potute trarre sono:

- che il coefficiente di trasmissione diminuisce all'aumentare dell'angolo di incidenza dell'onda;
- che il massimo valore di carico sui dispositivi di ancoraggio in presenza di moto ondoso perpendicolare alla struttura è maggiore rispetto a quello che si ottiene per moto ondoso incidente obliquamente. Le forze decrescono linearmente con l'aumentare dell'angolo d'incidenza, questa è una conseguenza del fatto che le onde perpendicolari applicano un carico costante su tutta la sezione del frangiflutti e di conseguenza le massime pressioni vengono applicate simultaneamente su tutta la struttura, mentre nel caso di onde incidenti obliquamente il carico varia lungo la struttura e di conseguenza le massime pressioni sono applicate solo su una porzione della sezione;
- che la configurazione a forma di I comporta una minor riflessione e una maggior dissipazione, per cui risulta essere la migliore tra le strutture testate;
- che la trasmissione e le sollecitazioni sui dispositivi di connessione tra i moduli sono strettamente dipendenti dal periodo d'onda incidente, mentre le sollecitazioni sugli ancoraggi non mostrano una chiara correlazione col periodo dell'onda;
- che l'aumento della complessità della configurazione comporta: un aumento della trasmissione in seguito a una minor dissipazione e a una maggior riflessione, una diminuzione dei massimi valori assunti dalle sollecitazioni sugli ancoraggi, un aumento nelle sollecitazioni sui dispositivi di connessione tra moduli (Figura 18).



**Figura 18** – 1. Valori del coefficiente di trasmissione per tutte le configurazioni testate; 2. Valori delle massime sollecitazioni sui dispositivi di ancoraggio, in rapporto al grado di tracimazione, per ogni configurazione; 3. Valori delle massime sollecitazioni sui dispositivi di connessione, in rapporto al grado di tracimazione per le 3 configurazioni studiate.

### 1.2.1 Riflessione e trasmissione

Dall'interazione di una barriera frangiflutti galleggiante e un'onda incidente possono nascere due fenomeni:

- la riflessione;
- la trasmissione.

La riflessione comporta che parte dell'energia di un'onda incidente venga riflessa all'indietro generando un'onda che si propaga nella regione prospiciente all'ostacolo che l'ha generata. L'altezza dell'onda riflessa dipende dalle caratteristiche dell'ostacolo (rugosità, permeabilità, inclinazione della barriera investita) e dalla ripidità dell'onda a largo. Ai fini di una corretta progettazione, il coefficiente di riflessione  $K_r$  rappresenta un parametro d'interesse. Esso rappresenta il rapporto fra l'altezza d'onda riflessa verso il largo  $H_r$ , e quella incidente,  $H_i$ :

$$K_r = \frac{H_r}{H_i}$$

o, alternativamente, come rapporto fra radici delle energie riflesse e incidenti,  $E_r$  ed  $E_i$ :

$$K_r = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}}$$

visto che  $E_r = \rho g H_r^2 / 8$  e  $E_i = \rho g H_i^2 / 8$ , dove  $\rho$  è la densità dell'acqua e  $g$  l'accelerazione di gravità. Quando questo coefficiente assume valore unitario si parla di riflessione totale altrimenti, come nel caso dei frangiflutti galleggianti, di riflessione parziale. La combinazione dell'onda riflessa e dell'onda incidente può determinare anche il raddoppiamento dell'altezza d'onda risultante, tale fenomeno deve quindi essere valutato correttamente in modo da abbattere l'altezza d'onda.

La trasmissione comporta la diffusione delle onde al di là di una barriera che genera delle onde all'interno dell'area da proteggere. Essa può avvenire come risultato della filtrazione dell'onda attraverso la barriera, come risultato dell'impatto dell'acqua che tracima la barriera, o nel caso di barriere galleggianti anche come risultato dell'effetto dell'ondeggiamento della struttura messa in movimento dall'onda incidente. La tracimazione avviene quando l'altezza di una struttura è inferiore al livello di run-up definito come la massima elevazione della superficie dell'acqua, misurata verticalmente rispetto al livello dell'acqua in quiete, che si verifica quando l'onda risale lungo la struttura.

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 barriera alta ed impermeabile e al valore uno, la condizione di barriera assente. Sostanzialmente  $K_t$  rappresenta la quantità d'energia ondosa incidente trasferita al di là delle barriere frangiflutti. I fattori che influenzano maggiormente il coefficiente di trasmissione, in presenza di barriere galleggianti sono: la larghezza, il freeboard, la permeabilità e il grado di rollio e beccheggio della struttura. Visto come sono definiti i coefficienti, un ruolo decisivo nello studio della riflessione e della trasmissione del moto ondoso è assunto dall'algoritmo utilizzato per la separazione fra componente ondosa incidente e componente ondosa riflessa e trasmessa. Esistono diverse procedure di separazione, in questo studio si riporta la descrizione del metodo Goda e Suzuki (1976), in quanto è quello utilizzato presso il Laboratorio Costiero dell'Università degli studi di Firenze.

### 1.2.1.1 Il metodo Goda e Suzuki

Questo metodo di separazione delle componenti incidenti, riflesse e trasmesse appartiene ai metodi che operano nel campo dell'analisi nel dominio della frequenza, che ha lo scopo di conoscere la distribuzione dell'energia associata a ciascuna onda rispetto alla frequenza ( $f = 1/T$ ). Tutti i metodi utilizzati per l'analisi di riflessione e trasmissione di un attacco ondoso irregolare, si basano su due considerazioni fondamentali:

- che la superficie del mare possa essere considerata come il risultato della sovrapposizione di infinite onde sinusoidali, di ampiezze ( $a = H/2$ , vedi figura 1), lunghezze e periodi differenti. La sommatoria che si adatta a questo procedimento è la rappresentazione in serie di Fourier, espressa dalla seguente espressione:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(k_n x - \omega_n t + \phi_n)$$

dove, il numero d'onda  $k = 2\pi/L$  descrive la periodicità nello spazio, la frequenza angolare  $\omega = 2\pi/T$  descrive la periodicità nel tempo e  $\phi$  è la fase all'istante iniziale;

- che ogni onda componente la serie si muova con una propria velocità di fase,  $C$ . Per definizione la velocità di fase è data dal rapporto tra  $L$  e  $T$  oppure dal rapporto di  $\omega$  e  $k$ . Se ad essa si sostituisce la relazione di dispersione  $\omega^2 = gk \tanh(kd)$  ottenuta dalla teoria lineare di Airy, si ottiene che tale velocità sia uguale a:

$$C^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd)$$

dove  $d$  rappresenta la profondità del fondale.

A partire da queste considerazioni, il metodo sviluppato da Goda e Suzuki consente di calcolare le altezze d'onda e le fasi delle componenti incidenti riflesse e trasmesse attraverso la registrazione simultanea del profilo dell'onda tramite due sonde adiacenti, posizionate all'interno dei canali, come spiegato di seguito.

Quando il moto ondoso generato da un battente incontra un ostacolo, si genera un treno di onde riflesse che si propagherà in direzione opposta, e quindi tornerà verso il generatore stesso, di conseguenza il profilo dell'onda registrato nello stesso istante di tempo, da due sonde adiacenti in posizione  $x_1$  e  $x_2$  poste ad una distanza  $\Delta x$ , sarà dato dalla somma delle due componenti:

$$\eta_i = a_i \cos(kx_1 - \omega t + \phi_i) + a_r \cos(kx_1 - \omega t + \phi_r)$$

$$\eta_r = a_i \cos(kx_2 - \omega t + \phi_i) + a_r \cos(kx_2 - \omega t + \phi_r)$$

Ricordando che  $x_2 = x_1 + \Delta x$  e applicando la formula di sottrazione del coseno, tali profili d'onda risultano uguali a:

$$\eta_1 = A_1 \cos(\omega t) + B_1 \sin(\omega t)$$

$$\eta_2 = A_2 \cos(\omega t) + B_2 \sin(\omega t)$$

dove:

$$A_1 = a_i \cos(kx_1 + \phi_i) + a_r \cos(kx_1 + \phi_r)$$

$$B_1 = a_i \sin(kx_1 + \phi_i) + a_r \sin(kx_1 + \phi_r)$$

$$A_2 = a_i \cos(k\Delta x + kx_1 + \phi_i) + a_r \cos(k\Delta x + kx_1 + \phi_r)$$

$$B_2 = a_i \sin(k\Delta x + kx_1 + \phi_i) + a_r \sin(k\Delta x + kx_1 + \phi_r).$$

Dalla risoluzione di questo sistema di equazioni e utilizzando la relazione di dispersione è possibile ottenere l'ampiezza della componente incidente e di quella riflessa come riportato di seguito:

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

$$a_r = \frac{1}{2|\sin(k\Delta x)|} [A_2 - A_1 \cos(k\Delta x) + B_1 \sin(k\Delta x)] + [B_2 - A_1 \sin(k\Delta x) - B_1 \cos(k\Delta x)]$$

L'analisi di Fourier permette di stimare i valori di  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  in tutte le frequenze in cui si può scomporre lo stato di mare. Una volta che si conoscono tali valori è possibile risalire all'ampiezza dell'onda riflessa e incidente, su tutto il campo di frequenze e infine calcolare il coefficiente di riflessione.

Il metodo fallisce, fornendo valori prossimi all'unità di  $K_r$ , quando la distanza fra le due sonde ( $\Delta x$ ) presenta valori prossimi a multipli interi di una semilunghezza d'onda:

$$\Delta x/L = n/2 \text{ con } n = 0, 1, 2, \dots$$

Goda e Suzuki, inoltre, raccomandano di restringere l'analisi delle componenti spettrali al seguente intervallo di lunghezze d'onda:

$$0.05 < \Delta x/L < 0.45.$$

Ciò vuol dire che la frequenza spettrale minima e quella massima adottabili affinché potranno ritenersi affidabili i valori di altezza d'onda incidente e riflessa desunti col metodo, deriveranno dalle seguenti uguaglianze:

$$L(f_{\min}) = \Delta x/0.05$$

$$L(f_{\max}) = \Delta x/0.45.$$

Lo stesso procedimento viene utilizzato per calcolare l'onda trasmessa, solo che in tal caso si ha una costa riflettente dietro la barriera.

## 2. Descrizione della metodologia sperimentale

### 2.1 Strumenti d'indagine

Per lo studio e la previsione dei fenomeni coinvolti nell'evoluzione della fascia costiera si può far ricorso a tre tipologie di strumenti:

- le osservazioni in situ;
- i modelli fisici;
- i modelli numerici.

La diretta osservazione sul campo, che si basa sulla descrizione dei processi che si verificano in un determinato sito senza dover ricorrere a schematizzazioni semplificative, costituisce un aspetto indispensabile per ottenere informazioni sia di tipo qualitativo che quantitativo, come i valori di portata, le caratteristiche dei sedimenti che costituiscono la fascia costiera o il clima meteo marino. Questo strumento d'indagine attualmente viene utilizzato soprattutto come supporto per l'acquisizione di dati che verranno impiegati nella modellistica fisica e numerica, perché le osservazioni in situ, oltre ad essere più costose rispetto ai modelli, risultano tanto più complicate da interpretare tanto più complessi sono i fenomeni coinvolti. Un ulteriore svantaggio di questo approccio di studio è rappresentato dalle difficoltà operative legate alle condizioni del mare, che possono influire sull'acquisizione dei dati e sulla loro qualità e sul funzionamento degli strumenti.

I modelli fisici costituiscono la riproduzione in laboratorio di un fenomeno naturale, che viene riprodotto in scala ridotta. Questa tipologia di approccio di studio: aiuta nella comprensione del fenomeno, consente di agire per prove ed errori contrariamente a quanto avviene col prototipo, può essere utilizzata anche se i processi fisici alla base non sono completamente chiari, permette di costruire artificialmente condizioni che in natura non esistono. Questa riproduzione è importante quando i fenomeni oggetto di studio sono così complicati da non prestarsi ad una agevole schematizzazione matematica e spesso costituisce uno strumento di conferma e di taratura dei risultati forniti dai modelli matematici. Di contro i modelli fisici: non raggiungono la completa similitudine tra prototipo e modello perché certe quantità non possono essere scalate, non possono riprodurre tutti i fenomeni presenti in natura e quindi sarà necessario scegliere di studiare gli aspetti prevalenti verificando che i fenomeni

non riprodotti siano effettivamente poco influenti sul modello, per essere affidabili solitamente richiedono una riduzione in scala non troppo forte e quindi richiedono canali o vasche molto grandi, sono più costosi dei modelli numerici. Infine bisogna considerare che i risultati ottenuti utilizzando questo strumento d'indagine non possono essere utilizzati direttamente nella progettazione ma devono essere interpretati.

I modelli numerici descrivono un fenomeno attraverso equazioni che legano tra loro le varie grandezze fisiche coinvolte. Tali equazioni vengono scelte sulla base di considerazioni teoriche e sperimentali, e si basano su principi fisici fondamentali come ad esempio, la conservazione della massa, della quantità di moto, dell'energia. I principi fisici fondamentali vengono tradotti in equazioni o sistemi di equazioni grazie alla formulazione di determinate ipotesi alle quali si associano opportune condizioni al contorno. I modelli numerici hanno preso campo recentemente in seguito all'aumento della capacità di calcolo e di memoria dei calcolatori, rappresentano la tipologia di approccio allo studio dei fenomeni costieri meno costosa e forniscono una descrizione più dettagliata nel tempo e nello spazio rispetto ai modelli fisici.

Vista la validità di tutti gli strumenti d'indagine appena descritti sarebbe auspicabile un loro utilizzo congiunto, che consentendo uno sfruttamento migliore delle caratteristiche di ciascuno, comporta una visione completa del fenomeno studiato.

## **2.2 L'analisi fisica dimensionale nella modellistica**

Considerato che i concetti di dimensione e unità di misura sono alla base della descrizione di ogni fenomeno fisico, il primo problema da affrontare nel campo della modellistica fisica è l'opportuna determinazione dei fattori di scala, in modo da rispettare la similitudine tra prototipo e modello, in maniera sufficientemente corretta. A seconda del sistema di misura utilizzato alcune grandezze vengono considerate fondamentali e altre derivate da esse. In base al Sistema Internazionale le grandezze fondamentali nel campo della meccanica sono: la lunghezza (L) misurata in metri (m), la massa (M) misurata in chilogrammi (Kg), e il tempo (T) misurato in secondi (s). In questo sistema tutte le unità di misura di una qualsiasi grandezza meccanica  $a$ , possono essere espresse come prodotto delle tre grandezze fondamentali elevate a un opportuno esponente, secondo la formula (Yalin 1971):

$$a = L^{\alpha} \cdot T^{\beta} \cdot M^{\gamma}.$$

Nel caso in cui  $\alpha = \beta = \gamma = 0$  la grandezza è adimensionale e il suo valore è indipendente dal sistema di unità di misura scelto, altrimenti in base al valore assunto dagli esponenti le grandezze si distingueranno in:

- grandezza geometrica se  $\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma = 0$ ;
- grandezza cinematica se  $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma = 0$ ;
- grandezza dinamica se  $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$ .

Per descrivere un fenomeno fisico è necessario stabilire quali grandezze devono essere considerate significative e in seguito stabilire tra di esse delle relazioni funzionali. Al fine di ridurre il numero delle variabili in gioco e di ottenere equazioni dimensionalmente omogenee<sup>1</sup> (nella quali le variabili dipendenti e quelle indipendenti sono adimensionali) si ricorre all'analisi dimensionale. L'analisi dimensionale è una procedura che combina le variabili di un fenomeno fisico in modo da creare dei prodotti adimensionali. Un insieme di prodotti adimensionali è 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 pratica, una volta individuato un insieme completo di prodotti adimensionali, il fenomeno fisico è completamente descritto da relazioni funzionali che usano come variabili indipendenti i prodotti adimensionali trovati.

Il numero di prodotti adimensionali che può essere formato a partire da un insieme di variabili è espresso dal teorema di Buckingham o teorema pi-greco, secondo il quale in un esperimento che dipende da  $n$  variabili, il numero di prodotti adimensionali che si possono formare è  $(n-m)$  dove  $m$  è il numero delle dimensioni fondamentali delle variabili. Il numero delle dimensioni fondamentali  $m$  varierà tra 0, 1, 2 e 3, a seconda che le grandezze siano adimensionali, geometriche, cinematiche o dinamiche. Questo teorema consente di sostituire a una equazione omogenea nella forma:

$$p_1 = f(p_2, p_3 \dots p_n)$$

la seguente equazione:

$$\pi_1 = g(\pi_i; i = 2, n-m)$$

---

<sup>1</sup> *Equazioni dimensionalmente omogenee* : si definiscono tali le equazioni la cui forma è indipendente dal sistema di misura adottato (Langhaar 1951).

dove i  $\pi_i$  sono i gruppi adimensionali tramite i quali sono esprimibili i risultati dell'esperimento. Il passaggio da una equazione omogenea a una equazione adimensionale consente di ridurre il numero delle variabili da prendere in considerazione per valutare i risultati di un esperimento da  $n$  a  $(n-m)$ , con risultati tanto più utili quanto minore è la differenza tra  $(n-m)$ . L'analisi dimensionale gioca un ruolo importante nella definizione dei criteri di similitudine.

## 2.3 Il principio di similitudine

Un modello fisico in teoria dovrebbe essere una perfetta riproduzione del prototipo e di conseguenza tutte le grandezze coinvolte del modello dovrebbero essere proporzionate all'originale. La proporzione è espressa dal fattore di scala:

$$N_x = X_p / X_m$$

dove  $X_p$  è il valore della grandezza  $X$  nell'originale e  $X_m$  è il valore della stessa grandezza nel modello. In base alla tipologia di grandezza fisica riprodotta nel modello possono essere definite tre diverse tipologie di similitudine: geometrica, cinematica e dinamica.

La similitudine geometrica di un modello sussiste quando tutte le dimensioni lineari del prototipo sono in rapporto costante con quelle corrispondenti del modello (ovvero quando  $N_L = L_p/L_m$ ). Ciò implica che venga adottato lo stesso fattore di scala per le dimensioni orizzontali e quelle verticali. I modelli che non soddisfano questa similitudine vengono definiti distorti.

La similitudine cinematica implica la sussistenza della similitudine geometrica e la similitudine tra il moto delle particelle nel prototipo e nel modello. E' quindi necessario che il rapporto tra le componenti dei campi di moto nel prototipo e nel modello sia costante e che le traiettorie delle particelle siano in similitudine geometrica.

La similitudine dinamica si verifica quando oltre all'esistenza della similitudine geometrica e cinematica esiste un rapporto costante tra le forze agenti sul prototipo e quelle agenti sul modello. Le condizioni per il rispetto di questa similitudine in un fluido sono date dalla II legge di Newton:

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

che per un fluido può essere riscritta come:

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

dove:

$F_i$  sono le forze inerziali date dal prodotto tra la massa e l'accelerazione;

$F_g$  sono le forze gravitazionali;

$F_\mu$  sono le forze viscosse;

$F_\sigma$  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 come riportato di seguito:

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

tuttavia tale condizione non si verifica mai nei modelli in scala ridotta. Del resto gli esperimenti vengono condotti sotto l'effetto del campo gravitazionale terrestre che è lo stesso nel prototipo e nel modello. Per poter conseguire la similitudine meccanica bisognerebbe poter variare, in funzione del fattore di scala geometrico, la forza di gravità, la viscosità e la densità del fluido utilizzato nel modello. Essendo questa soluzione impraticabile risulta che nessun modello idraulico soddisfa la similitudine dinamica e conseguentemente bisognerà rispettare la similitudine per le forze ritenute più importanti, valutando gli effetti del mancato rispetto delle condizioni trascurate.

Nel campo dell'idraulica esistono diversi criteri, basati su opportune ipotesi semplificative per la modellazione. Il concetto principale è semplificare il fenomeno da analizzare ipotizzando che due forze siano prevalenti rispetto alle altre e, pertanto realizzare il modello limitando la similitudine solamente a queste grandezze.

In qualsiasi fenomeno fisico sono presenti le forze inerziali che vengono controbilanciate da altre forze di diversa natura. Nel campo dell'ingegneria costiera quelle che si incontrano nella quasi totalità dei casi a controbilanciare le forze inerziali sono: le forze viscosse e quelle gravitazionali. Tali forze possono essere espresse in termini dimensionali come segue:

$$F_i = \text{massa} \cdot \text{accelerazione} = (\rho L^3) (V^2/L);$$

$$F_\mu = \text{viscosità} \cdot (\text{velocità/distanza}) \cdot \text{area} = \mu (V/L) L^2 = \mu VL;$$

$$F_g = \text{massa} \cdot \text{accelerazione gravitazionale} = \rho L^3 g$$

dove:

$\rho$  è la densità del liquido;

$L$  è la lunghezza caratteristica;

$V$  è la velocità;

$g$  è l'accelerazione gravitazionale;

$\mu$  è la viscosità dinamica.

La similitudine di Froude e quella di Reynolds, che rappresentano i criteri fondamentali di similitudine usati in idraulica, si distinguono in base alla prevalenza tra le forze gravitazionali e quelle viscosi.

### 2.3.1 La similitudine di Froude

Il criterio di similitudine di Froude si presta a descrivere tutti quei fenomeni guidati dalle forze gravitazionali. Questo criterio consiste nel conservare costante, nel passaggio dal prototipo al modello, il numero di Froude. Questo numero adimensionale, che costituisce un parametro fondamentale in idraulica, è dato dalla radice quadrata del rapporto tra le forze inerziali e gravitazionali:

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

Questo criterio viene utilizzato ogniqualvolta si studino i moti a pelo libero e quindi è il più utilizzato nella modellistica costiera.

Imponendo la condizione che:

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

ipotizzando che si utilizzi acqua nelle prove sperimentali e visto che l'accelerazione di gravità rimane costante, una volta assegnato il fattore di scala  $N_L$ , è possibile determinare tutti gli altri fattori di scala. I rapporti di scala, per le principali grandezze fisiche che solitamente sono oggetto di studio, sono riportate in tabella 6.

**Tabella 6** – Rapporti di scala per la modellistica fisica in cui si rispetta il criterio di Froude.

<u>Grandezza</u>	<u>Dimensione</u>	<u>Scala di riduzione</u>	<u>Esempio</u>
Lunghezza ed altezza d'onda (m)	L	$N_L$	1:30
Tempo (s)	T	$N_T = N_L^{1/2}$	1: $\sqrt{30}$
Velocità (m/s)	L/T	$N_V = N_L^{1/2}$	1: $\sqrt{30}$
Massa (kg)	M	$N_M = N_L^3$	1:27000
Portata (m <sup>3</sup> /s)	L <sup>3</sup> /T	$N_Q = N_L^{5/2}$	1:4930

### 2.3.2 La similitudine di Reynolds

Il criterio di similitudine di Reynolds si presta a descrivere tutti quei fenomeni guidati dalla viscosità. Questo criterio consiste nel conservare costante, nel passaggio dal prototipo al modello, il numero di Reynolds. Questo numero adimensionale è espresso dal rapporto tra le forze inerziali e quelle viscosi:

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

Questa similitudine non è molto utilizzata nella modellistica costiera perché sono le forze gravitazionali a prevalere nei moti a superficie libera e inoltre, nei rari casi in cui il moto non è a pelo libero i numeri di Reynolds in gioco sono così elevati da far sì che l'effetto della turbolenza prevalga sulla viscosità.

Ad ogni modo, analogamente a quanto fatto precedentemente, imporre la condizione che:

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

comporta la determinazione degli ulteriori fattori di scala. Ipotizzando che venga usato nelle prove sperimentali lo stesso liquido oggetto delle osservazioni sul campo e che  $g$  sia costante, per i tempi vale la relazione:

$$N_T = N_L^2$$

## 2.4 I modelli idrodinamici

I modelli fisici utilizzati nell'ingegneria costiera si suddividono in:

- modelli a fondo fisso;
- modelli a fondo mobile.

I modelli a fondo fisso vengono utilizzati esclusivamente per i processi idrodinamici, mentre i modelli in cui il fondale è costituito da materiale sciolto servono per comprendere l'interazione tra il campo di moto e i sedimenti, in modo da poter valutare l'evoluzione morfologica della costa. I modelli a fondo fisso, che visto il loro impiego vengono spesso denominati modelli idrodinamici, possono concentrarsi su quei fenomeni caratterizzati da periodi dell'ordine di 1-20 s (short waves) oppure su quelli caratterizzati da periodi dell'ordine di minuti-giorni (long waves). I modelli di short waves studiano i fenomeni legati alla propagazione del moto ondoso, mentre quelli di long waves i fenomeni legati alle maree e agli tsunami. Un'ulteriore distinzione dei modelli fisici è tra quelli bidimensionali, che vengono realizzati in canale e si basano sull'assunzione che il moto ondoso sia prevalentemente ortogonale alla costa e la simmetria sia piana, e quelli tridimensionali che vengono realizzati in vasca, dove vengono simulate condizioni di moto proveniente da più direzioni, e che consentono di descrivere la morfodinamica di tratti estesi di litorale.

Questi modelli possono essere applicati per lo studio di un copioso numero di fenomeni come ad esempio: lo shoaling, la riflessione e trasmissione del moto ondoso, il frangimento, l'innalzamento del pelo libero in zona frangente, la cinematica del moto ondoso etc. A meno di non poter variare a piacimento la viscosità e la densità di un liquido in funzione del fattore geometrico, e considerato che per ragioni sia tecniche che economiche il fluido maggiormente impiegato nei modelli idraulici è l'acqua, il contemporaneo soddisfacimento della similitudine di Froude e Reynolds è impossibile. I modelli idrodinamici pertanto rispettano solo due condizioni delle tre necessarie per conseguire la completa similitudine:

1. che il modello non sia geometricamente distorto;
2. che sia conservato il numero di Froude, con l'aggiunta che il fattore di scala per i periodi delle onde sia lo stesso utilizzato per tutte le altre grandezze temporali.

Pertanto, si può concludere che i modelli short waves si prestano a descrivere i fenomeni in cui gli sforzi resistenti sono prevalentemente di natura turbolenta, assunzione ritenuta accettabile nella maggior parte dei casi di interesse per l'ingegneria costiera. Qualora

si rendesse necessario tenere in conto gli effetti delle forze viscosse, si dovrà ricorrere alla sperimentazione in scala reale.

### **2.4.1 Gli effetti scala e gli effetti laboratorio**

I modelli fisici presentano alcuni difetti che sono riconducibili all'incapacità di riprodurre esattamente in laboratorio le condizioni presenti in natura, basti pensare alla presenza del vento che in natura genera una significativa circolazione idrica, assente nelle prove sperimentali su modelli fisici dove viene simulata solo l'azione del moto ondoso. Questi inconvenienti prendono il nome di effetti scala ed effetti laboratorio.

Gli effetti scala nascono nei modelli in scala ridotta quando non è possibile scalare tutte le grandezze significative in modo corretto tra il prototipo e il modello. Nei modelli idrodinamici gli effetti scala nascono dall'assunto che la gravità è la forza predominante e che si ritengano secondarie le altre forze. Questa condizione che si può verificare in natura difficilmente si verifica anche nel modello in scala dove le forze secondarie, come ad es. la viscosità, sono più grandi che nella realtà perché non scalate correttamente. Queste forze possono quindi diventare importanti nelle prove sperimentali e originare un errore. Per ridurre gli effetti di scala bisogna provvedere all'individuazione e quantificazione dell'errore che potrà, grazie a metodi empirici o teorici, essere corretto consentendo di fornire un risultato corrispondente alla realtà. Questi effetti sono tanto più pronunciati quanto più è piccola la scala di riduzione utilizzata.

Gli effetti laboratorio sono causati dal fatto che un'installazione sperimentale non è in grado di riprodurre le stesse condizioni fisiche presenti in natura. Uno dei principali effetti di laboratorio è provocato dalle dimensioni finite dell'installazione che è delimitata da pareti impermeabili che possono originare fenomeni di riflessione indesiderati che comportano, in canale, la formazione di una componente trasversale di moto ondoso e nelle vasche l'alterazione della circolazione idrica e l'amplificazione del moto ondoso incidente. Altri effetti di laboratorio sono legati alla difficoltà di riprodurre le forze presenti in natura dovendo ricorrere a delle semplificazioni schematiche, e alle difficoltà nella simulazione del moto ondoso. Questi effetti possono essere attenuati attraverso vari accorgimenti.

## **2.5 Caratteristiche strutturali del Canale del Laboratorio Costiero di Firenze**

Le prove sperimentali su modello fisico, per valutare l'efficienza dell'innovativo frangiflutti galleggiante oggetto di studio di questa tesi, sono state effettuate presso il Laboratorio Costiero (LC) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA) dell'Università degli studi di Firenze.

Il canale utilizzato è lungo 47 m, largo e alto 0.8 m e sollevato da terra di 0.5 m, è suddiviso in 37 settori (1.2x0.8x0.8 m) di vetro e acciaio, più due settori iniziali di cemento (figura 19) con un fondo costituito da pannelli di cemento fibro-rinforzato precompresso (120x80x2cm).

Ad un'estremità del canale è collocato il generatore di onde costituito da una struttura metallica che sorregge ed assiste al movimento di un battionde 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/s.

Per permettere lo svuotamento della porzione di canale posizionato dietro il battionde, è utilizzata una pompa (detta "di retropala") centrifuga 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.

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.



Figura 19 - Il canale del Laboratorio Costiero.

### 2.5.1 Il generatore di moto ondoso

Il generatore è costituito da una pala meccanica (Figura 20) 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.

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 di generare sia onde sinusoidali, con periodo e altezza assegnata, che 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:  $H_{m0}$ ,  $H_s$ ,  $H_{std}$ ,  $T_p$ ,  $T_s$ .



**Figura 20** - Prospetto frontale della parte meccanica del generatore del moto ondoso.

### 3. Descrizione degli esperimenti

Le prove su modello fisico sono state eseguite, al fine di verificare l'efficienza di diverse configurazioni di un frangiflutti proposto per la protezione di un'area destinata a divenire un approdo turistico, all'interno di un lago.

#### 3.1 Il prototipo

La barriera frangiflutti da testare può essere descritta come riportato di seguito. La struttura portante è composta da 5 telai in elementi reticolari, uniti da correnti in modo da formare 4 campi della dimensione di 2.6 m x 3.5 m ciascuno. La barriera frangiflutti è ancorata tramite 8 linee di ancoraggio (4 su ogni lato, collegate lungo i rispettivi correnti inferiori sommersi dei paramenti verticali del frangiflutti) pretensionate a blocchi di fondazione (Figura 21). Internamente ad ogni campo è collocato un corpo galleggiante a forma cilindrica necessario a garantire il pretensionamento degli ancoraggi. Lo scafo esterno è dotato di una deriva ed è impermeabile nel lato rivolto verso l'approdo turistico e semi-permeabile sia nel lato rivolto verso il lago (Figura 21) che sul piano dell'estradosso (Figura 22). La larghezza totale del frangiflutti è pari a 12 m, lo spessore a 4 m e l'altezza varia da 10.2 a 11.4 m, in funzione della dimensione della deriva. Il peso di massima della struttura priva dei galleggianti è stato stimato pari a 2.0 t/m. La quota tra la sommità della struttura e il livello dell'acqua in quiete è pari a + 1.0 m e l'inclinazione tra le linee di ancoraggio e il fondo è pari a 32° nel lato lago e 98° nel lato porto. Gli ancoraggi lato lago sono posti su un fondale di 21 m e quelli lato porto su un fondale di 11 m; il fondale ha una pendenza di 2/3 e collega la profondità massima pari a 30 m alla profondità minima pari a 5 m.

Al fine di studiarne gli effetti sulla trasmissione del moto ondoso e sulle sollecitazioni sugli ancoraggi, i parametri progettuali da variare sono:

- le dimensioni e la zavorra dei corpi galleggianti;
- il grado di permeabilità dello scafo lato lago;
- l'altezza della deriva.

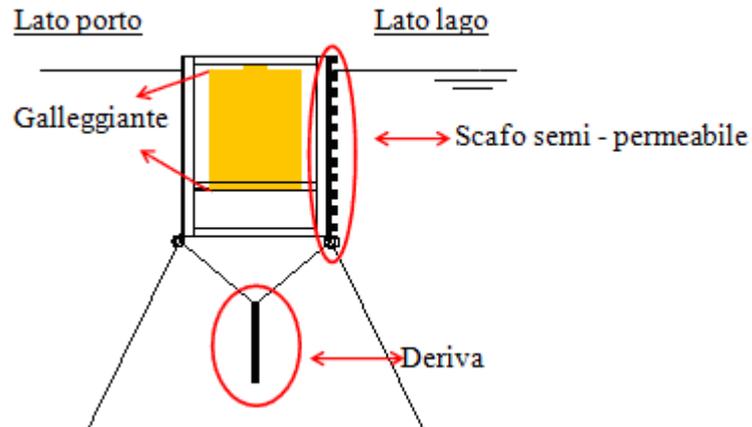


Figura 21 - Vista, in sezione, del prototipo da riprodurre.

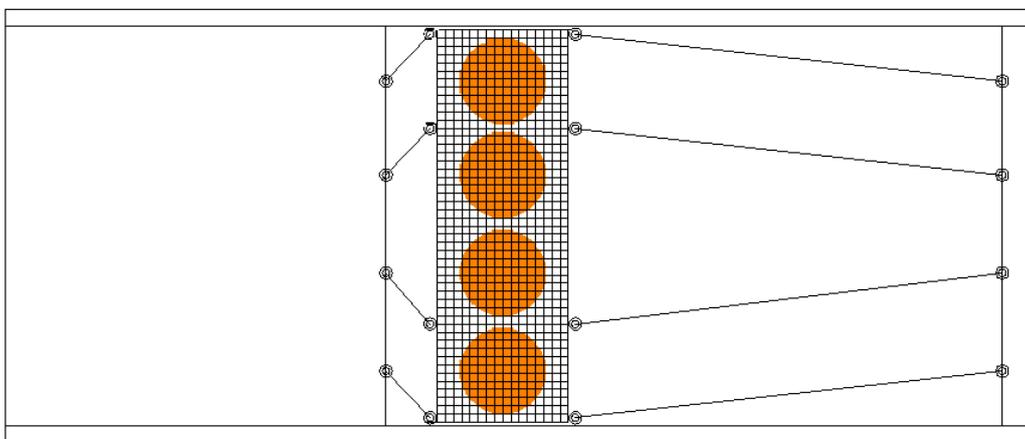


Figura 22 – Rappresentazione schematica in pianta del modello.

### 3.2 Il modello

Per soddisfare una corretta similitudine geometrica e dinamica tra modello e prototipo sono state utilizzate le caratteristiche geometriche ed il peso, di massima, della struttura. Visto che la profondità massima del fondale è pari a 30 m, tenendo conto delle condizioni del canale marittimo, si è assunto un fattore di scala pari a 1:50.

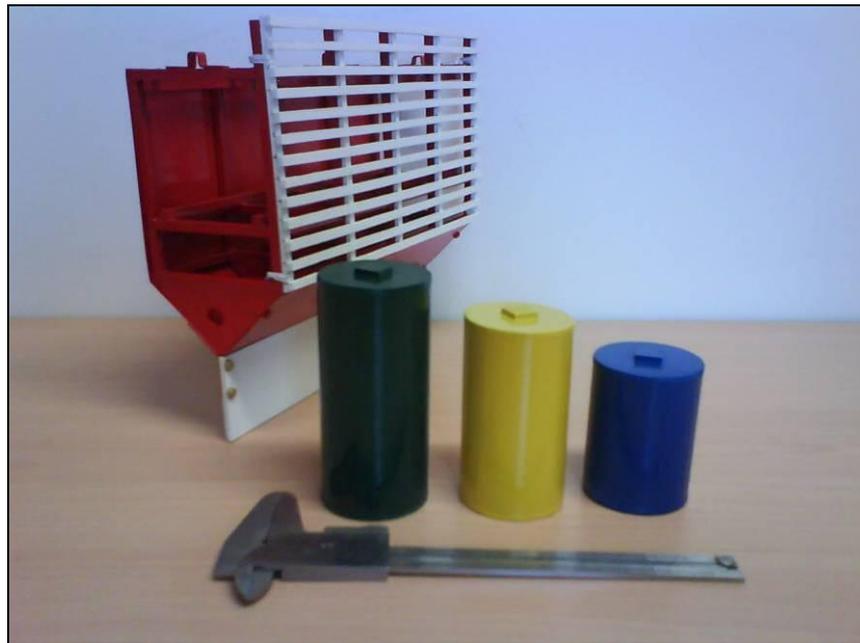
Per la realizzazione del modello (Figura 23) sono stati utilizzati:

- per le travature profilati in legno a sezione quadrata di 4 mm x 4 mm;
- per lo scafo lato porto un lamierino di alluminio di spessore 0.3 mm;
- per lo scafo lato lago elementi in schiuma di PVC (polivinilcloruro) di sezione 4 mm x 4 mm;
- per la deriva una lastra in schiuma di PVC di spessore 3 mm;

- per i galleggianti elementi in PVC
- per le linee di ancoraggio un filo trecciato relativamente indeformabile.

Il modello così costruito, al netto dei galleggianti, è risultato avere un peso di 9.5 g/cm pari ad un peso del prototipo di 2.4 t/m.

In fase di progettazione definitiva, quando anche le grandezze relative al dimensionamento strutturale di tutti gli elementi del frangiflutti saranno definite, sarà opportuno verificarne il peso. Tale fattore infatti è determinante ai fini dell'effettiva spinta di galleggiamento e quindi del pretensionamento degli ancoraggi e delle relative sollecitazioni sui blocchi di fondazione. Se il prototipo definitivo risultasse più leggero del modello, a parità di tutte le altre grandezze e di tutti i fenomeni che possono generarsi, è ragionevole aspettarsi coefficienti di trasmissione relativamente più alti di quelli che si otterranno nelle prove sperimentali. Questo perché, a parità di forza di sollecitazione dovuta all'azione del moto ondoso, la struttura risulterebbe soggetta a oscillazioni più rapide e più in fase con la forzante quindi, il grado di rollio e beccheggio risulterebbe maggiore.



**Figura 23** – Modello del frangiflutti e dei corpi galleggianti da testare.

### **3.3 L'allestimento della sezione di misura**

Successivamente alla costruzione del modello del frangiflutti da testare, è stata allestita e opportunamente strumentata la sezione di misura, all'interno del canale. Un tratto di canale a distanza di circa 20 m dal battente è stato suddiviso in tre sotto-canali mediante l'uso di

due pannelli in plexiglass lunghi 300 cm, larghi 80 cm e spessi 3 cm, disposti simmetricamente e parallelamente all'asse principale, come mostrato in figura 24.

Nel sotto-canale centrale di larghezza 24 cm è stato costruito il fondale di prova, caratterizzato da un piano inclinato con pendenza  $2/3$  che collega due livelli del fondale da 60 cm a 10 cm. Il modello del frangiflutti è stato installato nel punto del fondale piano inclinato a profondità di 30 cm e ancorato con 4 linee lato lago, su un fondale di 42.2 cm e 4 linee lato porto, su un fondale di 22.8 cm. Le linee di ancoraggio non sono state disposte parallelamente all'asse del canale, ma con un angolo di convergenza verso l'asse di  $10^\circ$  (Figura 22).



**Figura 24** – Parzializzazione del canale in tre sotto canali.

La presenza dei due sotto canali laterali consente il passaggio di parte dell'energia del moto ondoso verso il fondo del canale centrale, dove è stato realizzato un sistema di assorbimento passivo di tale energia mediante strutture porose. Grazie a questo allestimento della sezione di misura, la riflessione del moto ondoso può nascere solo dall'interazione con il modello disposto nel sotto-canale centrale e la componente riflessa non raggiunge il generatore di moto ondoso, evitando la nascita di contro riflessioni dal battionde, che comporterebbero l'insorgenza di effetti di laboratorio.

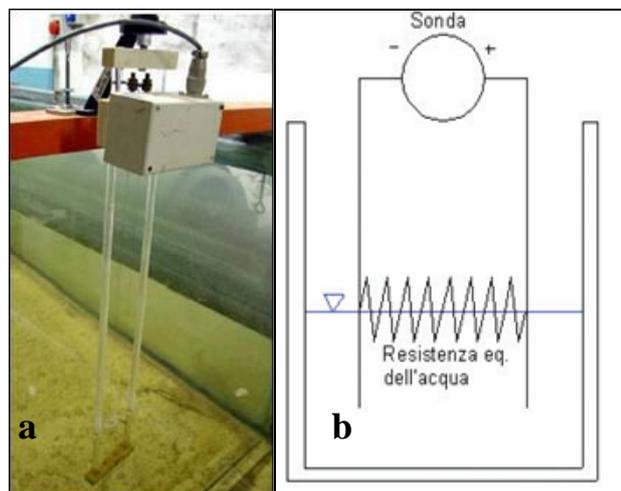
### 3.3.1 Gli strumenti di acquisizione dei dati: le sonde resistive

La misura delle caratteristiche del moto ondoso incidente e trasmesso è condotta tramite l'analisi dei segnali acquisiti da sonde resistive di livello, disposte di fronte e a tergo del modello. Il laboratorio dispone di tutti i software necessari, utilizzati in questa tesi, per la generazione del moto ondoso e per la gestione della strumentazione di misura. Di seguito si riporta una sommaria descrizione dei software, che sono stati sviluppati dall'Ing. Cappietti in modo da poter essere utilizzati facilmente dagli operatori, e della strumentazione.

Le sonde resistive sono costituite da un generatore di corrente alle cui estremità sono collegati due fili conduttori, non in contatto tra loro (Figura 25 a). Inizialmente il circuito è aperto, la sua chiusura si verifica quando la sonda viene immersa in acqua e si instaura una differenza di potenziale pari a (Figura 25 b):

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

in cui:  $i$  è l'intensità della corrente e  $R$  è la resistenza che, per un filo, è data dal rapporto tra la lunghezza e la sezione del filo moltiplicato per la resistività elettrica ( $R = \rho \cdot l/s$ ). Di conseguenza, la differenza di potenziale misurata da un voltmetro posto nella scatola superiore della sonda, risulta essere proporzionale alla lunghezza di filo immersa e quindi al livello idrico in canale.



**Figura 25** – a. Sonda resistiva; b. Schema elettrico di una sonda resistiva.

Le sonde rilevano la variazione del livello dell'acqua dovuto al moto ondoso con una frequenza di acquisizione pari a 20 Hz (ogni cinque centesimi di secondo), e forniscono una misura in Volt che viene convertita in unità metrica grazie alla seguente relazione lineare:

$$\eta = V_0 + kV$$

dove:

$\eta$  è la misura in cm dell'oscillazione della superficie libera;

$V$  è la misura in Volt dell'oscillazione della superficie libera;

$V_0$  è l'intercetta della relazione lineare di conversione in Volt;

$k$  è il coefficiente angolare della relazione lineare di conversione.

Utilizzando queste sonde è possibile ottenere un'accuratezza della misura, del livello dell'acqua, dell'ordine del decimo di millimetro. La linearità delle sonde deve essere verificata giornalmente, per tutta la durata delle prove in canale, tramite la procedura di taratura che è composta dalle seguenti fasi:

- predisporre il Pc per la calibrazione con inserimento, per ogni sonda e canale d'acquisizione associato, dei parametri di: range di taratura, distanza dalla pala generatrice di onde e profondità;
- portare il livello dell'acqua al livello più basso di taratura (operazione che viene effettuata utilizzando una punta idrometrica posizionata in prossimità della pala generatrice del moto ondoso, che consente di determinare il livello con una precisione del ventesimo di millimetro), attendere che il livello d'acqua si stabilizzi e acquisire i dati;
- portare il livello dell'acqua al livello più alto di taratura, attendere che il livello si stabilizzi e acquisire i dati;
- portare il livello dell'acqua al livello centrale, coincidente con quello di prova alla pala a pompa spenta<sup>1</sup>, attendere che il livello si stabilizzi e acquisire i dati.

La calibrazione delle sonde deve essere ripetuta se l'errore medio risulta maggiore di 0.3 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 di immersione delle sonde è determinata in base alla profondità del canale in corrispondenza della posizione di ognuna di esse e in modo che l'onda più alta rientri

---

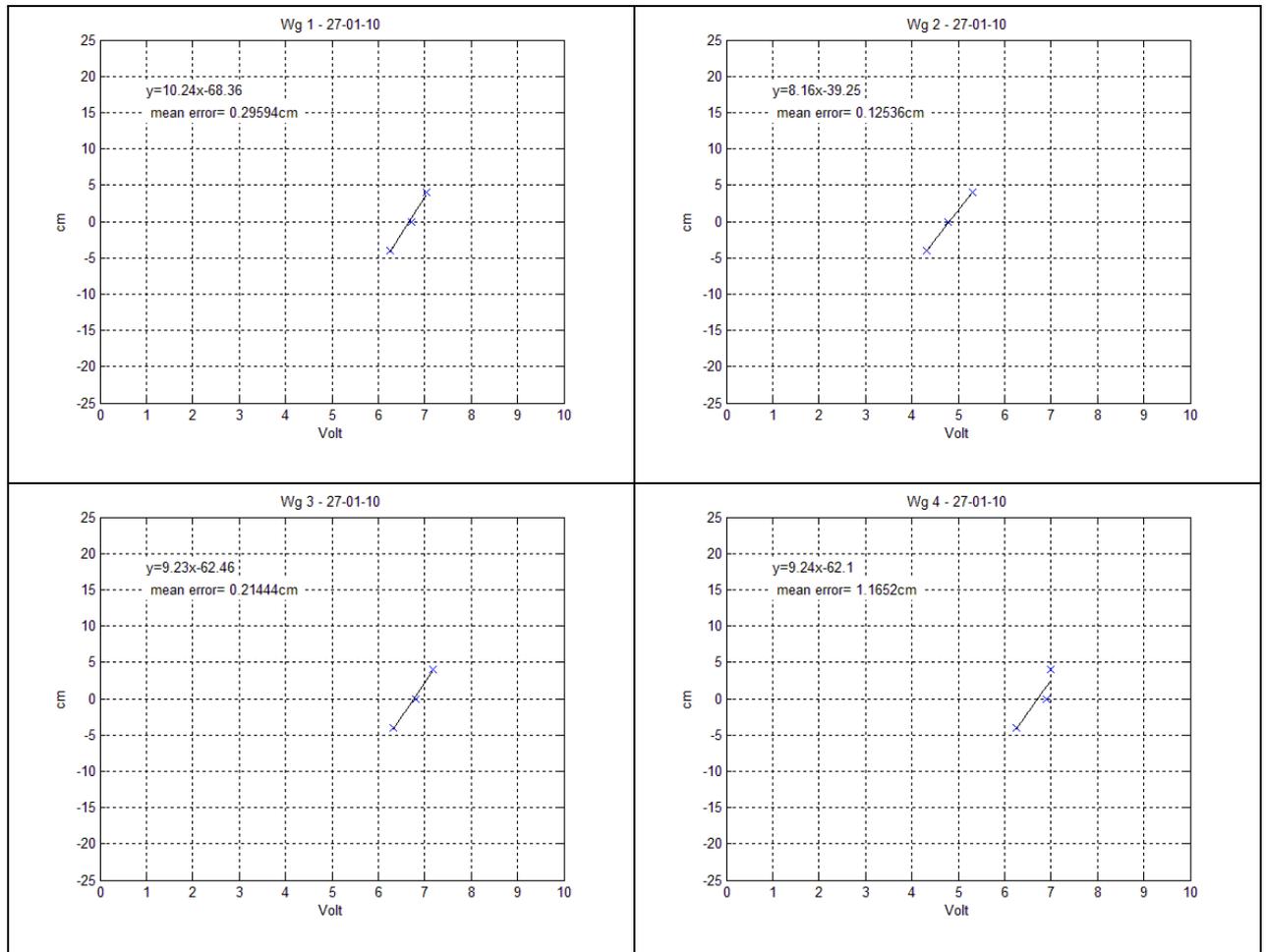
<sup>1</sup> In fase di calibrazione la superficie dell'acqua deve essere immobile, ciò è possibile solo con la pompa di retro-pala spenta. L'accensione della pompa genera "un'onda parassita" che comporta un sovrizzo del livello idrico in canale di 0.83 cm.

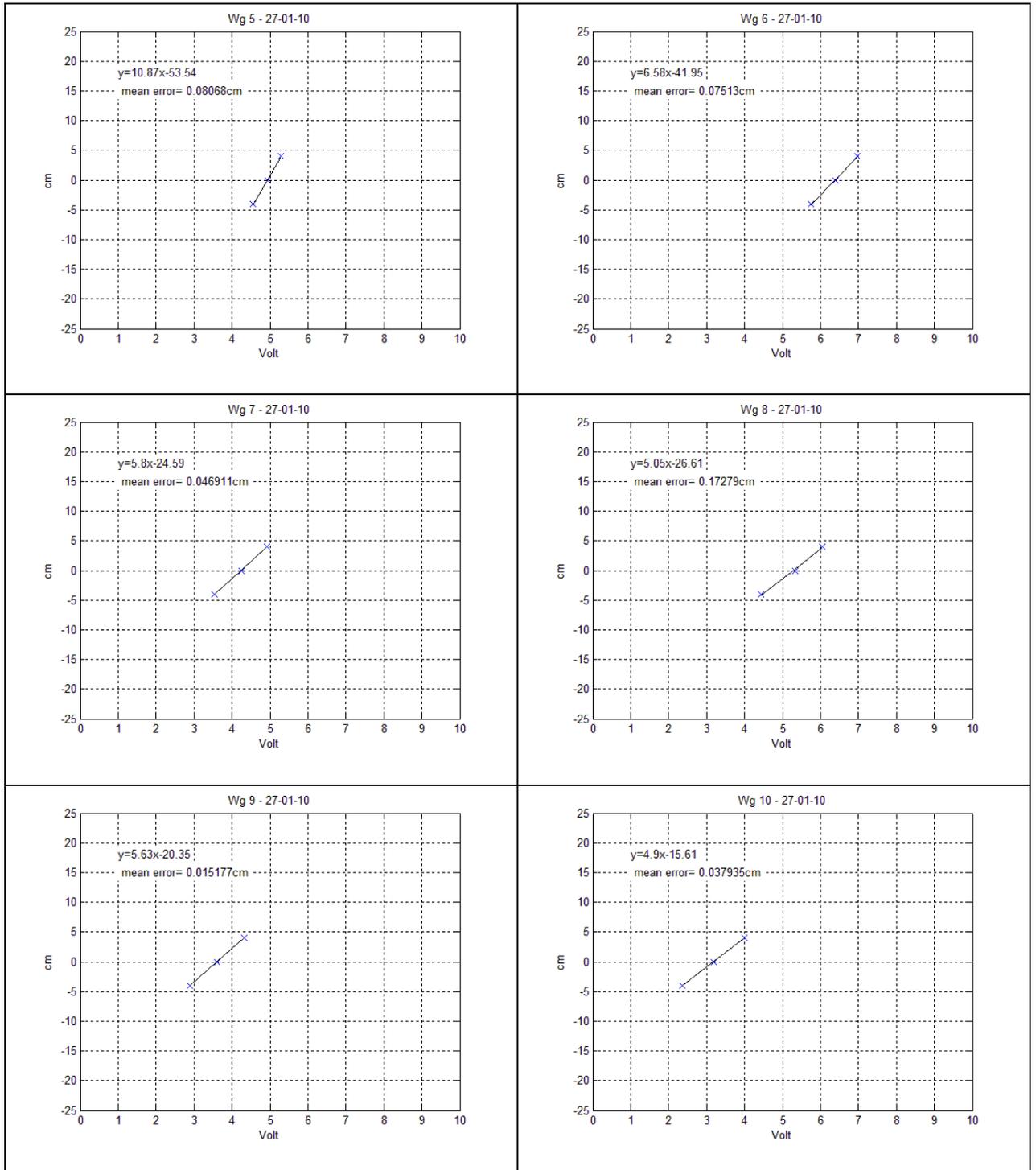
all'interno del loro range di acquisizione, per evitare che non venga acquisito il livello idrico. Infatti, se l'onda massima fosse troppo ampia, verrebbe acquisito un segnale tagliato.

Dopo aver ottenuto i parametri di calibrazione, ovvero i coefficienti di conversione Volt-cm per il segnale acquisito dalle sonde (Figura 26), tramite elaborazione "Matlab" è possibile ottenere i segnali (in cm) acquisiti nel tempo e gli spettri (in  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ) per tutte le sonde resistive (Figura 27).

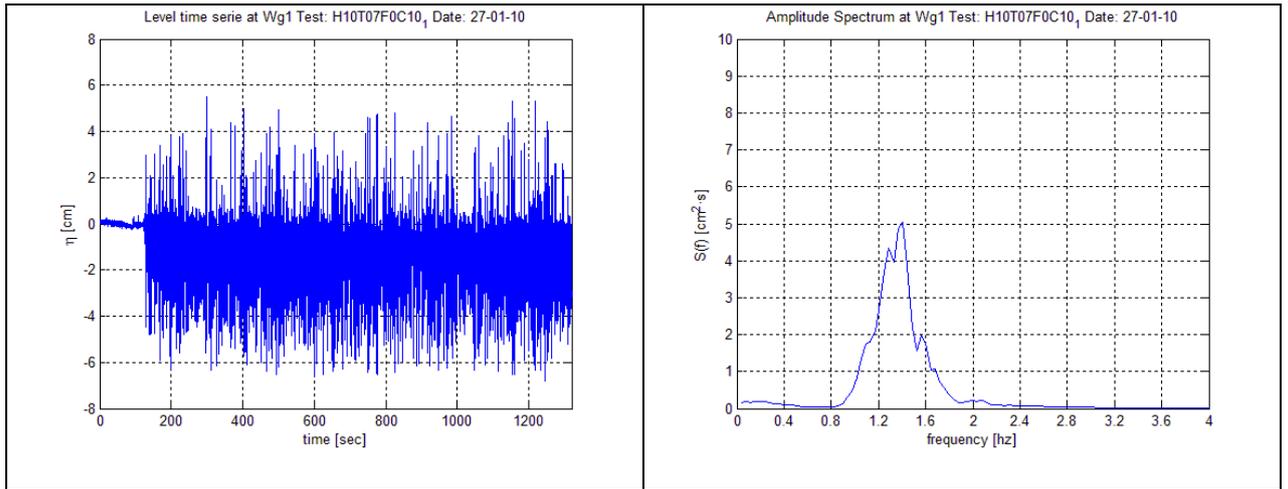
In questo studio sono state installate nella sezione di misura 10 sonde, due di fronte al battionde, quattro disposte davanti al frangiflutti (lato lago) e quattro disposte dietro al frangiflutti (lato porto), come mostrato in figura 28.

Secondo il metodo di Goda e Suzuki (spiegato nel paragrafo 1.2.1.1) è stato scelto di analizzare i segnali acquisiti dalla coppia di sonde 1 e 2, 3 e 5, 7 e 10. La prima coppia è stata utilizzata per verificare che non si generassero contro riflessioni dal battionde al modello, la seconda coppia per calcolare la riflessione del moto ondoso dovuta all'interazione con il frangiflutti e la terza coppia per calcolare la trasmissione del moto ondoso a tergo di esso. Le distanze tra queste sonde sono riportate in tabella 7.

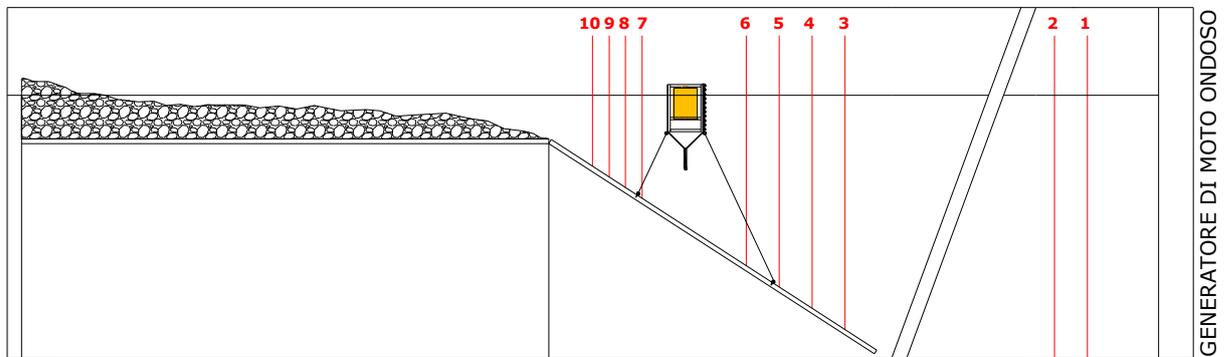




**Figura 26** - Grafici delle rette di calibrazione ottenuti, per ogni sonda, in data 27-01-10.



**Figura 27** – Parametri caratteristici relativi al moto ondoso registrati dalla sonda 1, nel dominio del tempo a sinistra e nel dominio della frequenza a destra, in data 27-01-10.



**Figura 28** – Schema, in sezione, del posizionamento delle sonde resistive.

**Tabella 7** – Distanza tra le sonde utilizzate nell'analisi di riflessione e trasmissione.

Sonda	Distanza dalla pala (cm)	$\Delta x$ (cm)
1	419	15
2	434	
3	1897	17
5	1914	
7	1944.4	11.3
10	1955.7	

### 3.4 Le caratteristiche del moto ondoso incidente

In questo studio è stato utilizzato il programma per la generazione di moto ondoso disponibile presso il laboratorio. Il programma sviluppato dall'Ing. Cappietti mediante software LabView è basato su spettro in frequenza JONSWAP, caratterizzato dalla seguente forma:

$$S(\omega) = Ag^2 \omega^{-5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \gamma \exp \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p} \right)^2 \right]$$

dove  $A$  è la costante di Phillips che dipende dal grado di sviluppo dell'onda,  $\omega$  è la frequenza dell'onda,  $\omega_p$  è la frequenza di picco a cui corrisponde la massima energia,  $\gamma$  è un parametro di forma che determina di quante volte il picco è più alto rispetto allo spettro di Pierson-Moskowitz e  $\sigma$  è un ulteriore parametro di forma che determina la pendenza dello spettro ai lati del picco (esso assume valori diversi a seconda che ci si posizioni a sinistra o a destra del picco di frequenza,  $\sigma_a = 0.07$  se  $\omega \leq \omega_p$   $\sigma_b = 0.09$  se  $\omega > \omega_p$ ).

L'analisi nel dominio della frequenza ricava il valore dell'energia di una mareggiata, definendolo come momento di ordine zero ( $m_0$ ), per integrazione della forma spettrale:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega$$

Una volta calcolato questo integrale è possibile ottenere i valori statistici di altezza significativa spettrale e di periodo significativo spettrale, che sono molto simili alla coppia  $H_s$  -  $T_s$  ottenuti dall'analisi nel dominio del tempo, come segue:

$$m_0 = \frac{H_{m0}^2}{16} \rightarrow H_{m0} = 4 \sqrt{m_0}$$

Il periodo di picco è determinato come l'inverso della frequenza associata alla massima energia nella forma spettrale misurata alle sonde resistive.

I valori statistici, del moto ondoso in acque alte riprodotto in laboratorio, pari a  $H_{m0} = 2.5$  m e  $T_p = 5$  s fanno riferimento a valori estremi aventi periodi di ritorno<sup>1</sup> di 50 anni. In questo caso quindi il valore  $H_{m0} = 2.5$  m corrisponde al valore di altezza d'onda che viene superato in media una volta ogni 50 anni.

---

<sup>1</sup> Il periodo di ritorno è l'intervallo di tempo in cui il valore  $H_{m0}$  viene superato in media una volta.

In base alla scala prescelta, il moto ondoso nel modello è quindi caratterizzato da  $H_{m0} = 5.0$  cm e  $T_p = 0.7$  s, onde di queste dimensioni (con  $H > 2$  cm) garantiscono l'assenza degli effetti di scala dovuti alla distorta rappresentazione delle forze viscosi.

Le prove sperimentali hanno una durata pari a 1700 onde, corrispondenti a circa 20 minuti nel modello e quasi 2 ore nel prototipo. In base a questo record di onde, utilizzando la distribuzione di Rayleigh, che approssima in modo accettabile le onde di un record, è stato stimato il valore più probabile di massima altezza dell'onda, che è risultato circa 1.9 volte superiore rispetto all'altezza significativa, tramite la seguente formula:

$$(H_{\max})_{\text{moda}} = 0.706\sqrt{\ln N_0 H_s}$$

in cui  $N_0$  è uguale al record di onde.

Di conseguenza, visto che la massima altezza d'onda attesa in canale è pari a 9.6 cm e che il freeboard del frangiflutti è pari a 2 cm, è ragionevole aspettarsi numerose tracimazioni.

### 3.5 Le configurazioni testate

La prima sessione sperimentale è stata condotta su otto diverse configurazioni del frangiflutti galleggiante fin'ora descritto. Al fine di studiarne gli effetti sulla trasmissione del moto ondoso, sono state testate:

- 4 diverse tipologie di galleggianti (Figura 29):
  - galleggianti alti 3.5 m;
  - galleggianti alti 4.5 m;
  - galleggianti alti 5.5 m;
  - galleggianti alti 5.5 m zavorrati per 2 m (scala prototipo);
- 2 diverse tipologie di scafo lato lago (Figura 30):
  - uno scafo con maggiore permeabilità, in cui le doghe che lo costituiscono sono distanziate di 0.3 m l'una dall'altra;
  - uno scafo con minore permeabilità, in cui le doghe che lo costituiscono sono distanziate di 0.2 m l'una dall'altra (scala prototipo);
- 2 diverse tipologie di deriva (Figura 31):
  - una deriva alta 2.4 m;
  - una deriva alta 3.6 m (scala prototipo);
- 2 diverse quote tra la sommità della struttura e il livello dell'acqua in quiete:

- una pari a 1 m;
- una pari a 1.75 m (scala prototipo).

Non sono state studiate tutte le configurazioni possibili dall'incrocio di tutti i fattori variabili, le otto configurazioni studiate sono riportate in tabella 8.

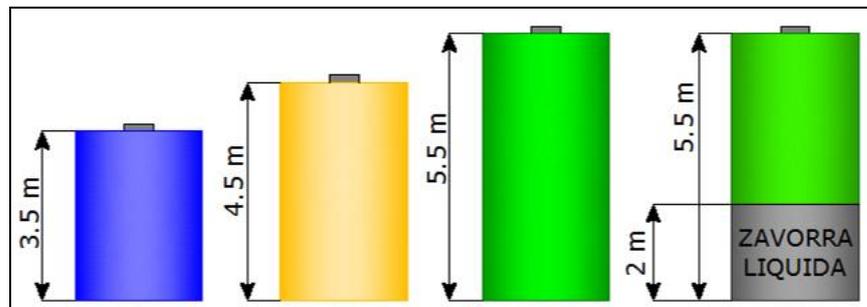


Figura 29 - Le diverse dimensioni dei galleggianti testati.

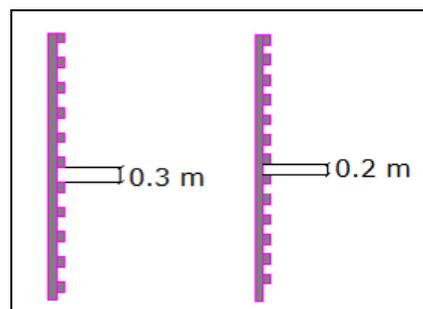


Figura 30 - Le diverse permeabilità dello scafo lato lago testato.

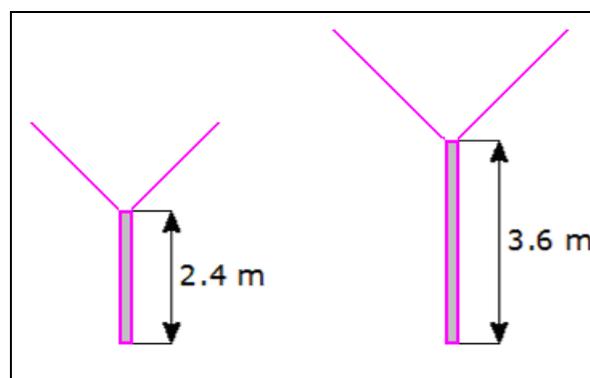


Figura 31 - Le diverse altezze della deriva testata.

**Tabella 8** - Le configurazioni testate durante la I sessione di prove (scala modello).

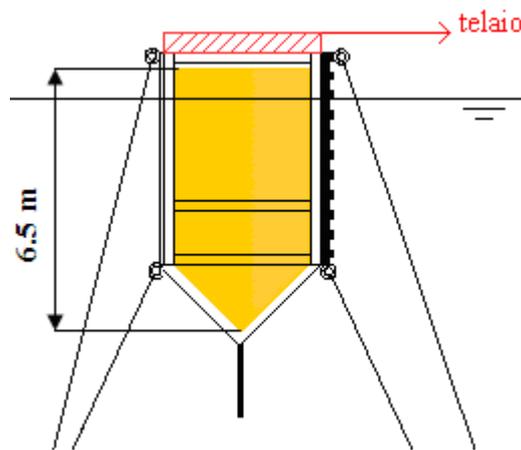
<b>Configurazione</b>	<b>Galleggianti (cm)</b>	<b>Scafo lato lago (permeabilità)</b>	<b>Deriva (cm)</b>	<b>Quota (cm)</b>	<b>Peso (g/cm)</b>
<b>C1</b>	7	>	4.8	2	13.8
<b>C2</b>	9	>	4.8	2	15.3
<b>C3</b>	11	>	4.8	2	16.3
<b>C4</b>	9	<	4.8	2	14.3
<b>C5</b>	11	<	4.8	2	30.7
<b>C6</b>	11 con zavorra	<	4.8	3.5	30.7
<b>C7</b>	11 con zavorra	>	4.8	2	30.5
<b>C8</b>	7	>	7.2	2	14.3

In seguito ai risultati ottenuti, per la cui discussione si rimanda al prossimo capitolo, è stata effettuata una seconda sessione di prove sperimentali in cui, in seguito ad alcune varianti progettuali del frangiflutti, sono state testate:

- una nuova tipologia di galleggianti alti 6.5 m (scala prototipo), in modo tale da occupare tutto il volume interno del frangiflutti (Figura 32);
- 16 linee di ancoraggio (8 su ciascun lato, 4 inferiori e 4 superiori, come mostrato in Figura 32);
- 2 diverse tipologie di scafo lato lago:
  - scafo semi-permeabile, in cui le doghe che lo costituiscono sono distanziate di 0.3 m l'una dall'altra (scala prototipo);
  - scafo impermeabile;
- 2 diverse altezze della deriva (le stesse sperimentate nella prima sessione sperimentale);
- 3 diverse quote tra la sommità della struttura e il livello dell'acqua in quiete:
  - una pari a 1 m;
  - una pari a 1.50 m, per alzare la quota è stato sovrapposto orizzontalmente alla struttura portante un telaio in legno spesso 0.25 m, alto 0.5 m, lungo 12 m e largo 4 m (Figura 32);
  - una pari a 2 m, per alzare la quota sono stati sovrapposti 2 telai in legno delle dimensioni sopracitate (scala prototipo);
- 2 tipologie di piano dell'estradosso del frangiflutti:

- un piano semi-permeabile (come per tutte le configurazioni della prima sessione);
- un piano impermeabile.

Le nuove sette configurazioni studiate hanno tutte lo stesso tipo di galleggiante e lo stesso numero di linee di ancoraggio, gli elementi che variano da una configurazione all'altra sono riportati in tabella 9. La configurazione C12 e la configurazione C13, sono uguali dal punto di vista di struttura testata, la differenza è dovuta al fatto che nella configurazione C13, al fine di valutare eventuali effetti di laboratorio, sono state occluse le fessure, di dimensioni di 3 cm (scala prototipo), tra il modello e le pareti dei pannelli in plexiglass utilizzati per l'allestimento della sezione di misura.



**Figura 32** - Vista, in sezione, delle modifiche apportate al prototipo.

Per ogni configurazione studiata, l'attacco ondoso di prova, è stato ripetuto 2 volte. Durante il primo attacco ondoso la prova è stata documentata con una ripresa video a tergo del frangiflutti e in asse al canale per monitorare le tracimazioni sopra la struttura, durante il secondo la videocamera è stata posizionata lateralmente in modo da monitorare gli spostamenti del frangiflutti e delle linee di ancoraggio attraverso la parete vetrata del canale.

L'attività sperimentale è proseguita, con una terza sessione di prove sperimentali, prendendo in esame il progetto di un nuovo frangiflutti.

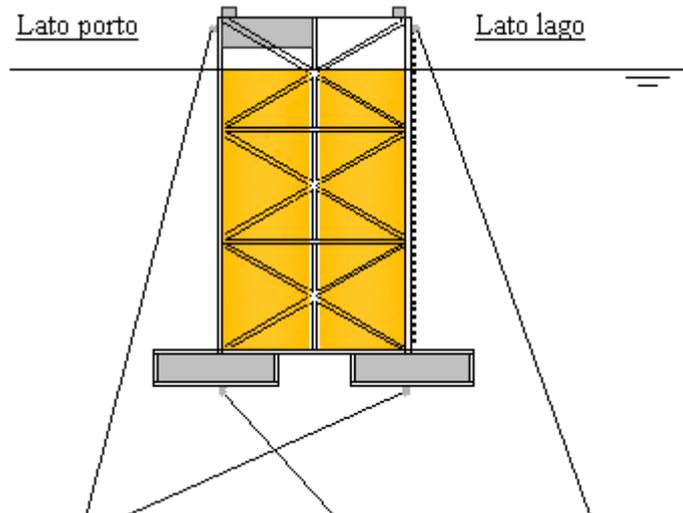
**Tabella 9** – Elementi caratterizzanti le configurazioni testate durante la II sessione di prove (scala modello).

<b>Configurazione</b>	<b>Scafo lato lago (permeabilità)</b>	<b>Deriva (cm)</b>	<b>Quota (cm)</b>	<b>Piano dell'estradosso (permeabilità)</b>	<b>Peso (g/cm)</b>
<b>C9</b>	assente	7.2	2	presente	21.2
<b>C10</b>	assente	4.8	2	presente	20.7
<b>C11</b>	presente	4.8	2	presente	20.5
<b>C12 C13</b>	presente	4.8	2	assente	20.5
<b>C14</b>	presente	4.8	3	presente	21.4
<b>C15</b>	presente	4.8	4	presente	22.2

### 3.6 Il prototipo per la terza sessione di prove

La nuova barriera frangiflutti da testare può essere descritta come riportato di seguito. La struttura portante è composta da 10 telai in elementi reticolari, uniti da correnti in modo da formare 8 campi della dimensione di 2.6 m x 2.7 m ciascuno. La barriera frangiflutti è ancorata tramite 8 linee di ancoraggio su ogni lato, collegate lungo i rispettivi correnti inferiori sommersi e superiori emersi dei paramenti verticali del frangiflutti, pretensionate a blocchi di fondazione. Le linee di ancoraggio inferiori sono incrociate (Figura 33). Internamente ad ogni campo è collocato un corpo galleggiante a forma rettangolare, necessario a garantire il pretensionamento degli ancoraggi, alto 8.9 m. Lo scafo esterno è impermeabile nel lato rivolto verso l'approdo turistico e sul piano dell'estradosso mentre è semi-permeabile nel lato rivolto verso il lago. La larghezza del frangiflutti è pari a 12 m, lo spessore a 6 m e l'altezza a 10.6 m. La quota tra la sommità della struttura e il livello dell'acqua in quiete è pari a + 1.70 m e l'inclinazione tra le linee di ancoraggio e il fondo è pari a 38° per l'ancoraggio superiore e 7° per quello inferiore nel lato lago, e 109° per l'ancoraggio superiore e 37° per quello inferiore, nel lato porto. Gli ancoraggi lato lago sono posti su un fondale di 22.6 m e quelli lato porto su un fondale di 10.9 m.

La struttura portante poggia su due alettoni zavorrati alti 1.14 m, lunghi 12 m, larghi 3.9 m la cui funzione è quella di stabilizzare la struttura.



**Figura 33** – Vista, in sezione, del prototipo da riprodurre per la III sessione sperimentale.

### 3.7 Il modello per la terza sessione di prove

Visto che la nuova barriera frangiflutti è posizionata sullo stesso fondale della precedente, si è assunto lo stesso fattore di scala per la costruzione del secondo modello da testare (1:50).

La struttura portante del modello è composta da 2 telai quindi è costituita da un unico campo, della dimensione di 5.2 m x 10.8 m, all'interno del quale è collocato un unico corpo galleggiante. Questa scelta è stata effettuata al fine di dare più robustezza al modello. Per la sua realizzazione (Figura 34) sono stati utilizzati:

- per le travature e lo scafo lato lago, profilati in legno a sezione quadrata di 4 mm x 4 mm;
- per lo scafo lato porto e il piano dell'estradosso, un lamierino di alluminio di spessore 0.3 mm;
- per il galleggiante elementi in PVC;
- per gli alettoni elementi in PVC;
- per le zavorre 2 lastre di marmo di 23.3 cm x 0.7cm x 6.8 cm;
- per le linee di ancoraggio un filo trecciato relativamente indeformabile.

Il modello così costruito è risultato avere un peso di 79.4 g/cm pari ad un peso del prototipo di circa 19.8 t/m, o di 16.8 t/m comprensivo degli alettoni zavorrati, al netto del galleggiante.

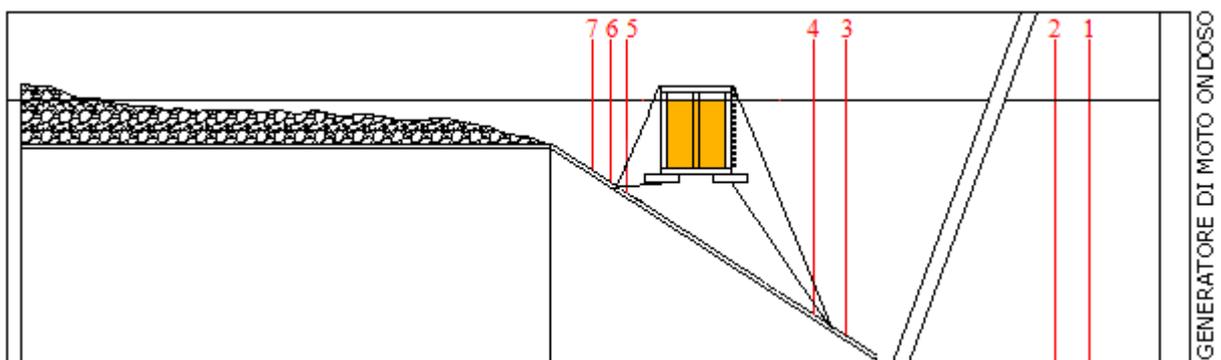


**Figura 34** – Modello del frangiflutti da testare nella III fase sperimentale.

La sezione di misura, l'apparecchiatura sperimentale e la metodologia di conduzione della prova sono rimaste uguali alle prove precedentemente condotte.

A causa della maggiore larghezza del modello da testare e della maggiore profondità del fondale a cui sono previsti gli ancoraggi, sono state eliminate alcune sonde che sono passate da 10 a 7, come mostrato in figura 35. Le coppie di sonde utilizzate per l'analisi di riflessione e trasmissione sono state le seguenti: 1-2, 3-4, 5-7 le cui distanze sono riportate in tabella 10.

La nuova configurazione caratterizzata dai parametri progettuali appena descritti ha preso il nome di configurazione C16 (Tabella 11).



**Figura 35** - Schema, in sezione, del posizionamento delle sonde resistive per la III sessione di prove.

**Tabella 10** - Distanza tra le sonde utilizzate nelle analisi, per la terza sessione sperimentale.

<b>Sonde</b>	<b>Distanza dalla pala (cm)</b>	<b><math>\Delta x</math> (cm)</b>
1	419	15
2	434	
3	1897	7.5
4	1904.5	
5	1948.2	7.5
7	1955.7	

**Tabella 11** – Elementi caratterizzanti la configurazione testata durante la III sessione di prove (scala modello).

<b>Configurazione</b>	<b>Galleggiante (cm)</b>	<b>Scafo lato lago</b>	<b>Scafo lato porto e piano dell'estradosso</b>	<b>Quota (cm)</b>	<b>Alettoni</b>	<b>Peso (g/cm)</b>
<b>C16</b>	17.8	permeabile	impermeabile	3.4	zavorrati	79.4

## 4. Analisi e interpretazione dei dati

In questo capitolo si riportano i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati raccolti durante le tre sessioni di prove sperimentali. Dai valori di altezza d'onda incidente davanti al frangiflutti e trasmessa a tergo di esso, restituiti dal programma di analisi di dati "MatLab", è stato possibile calcolare i coefficienti di trasmissione per ciascuna configurazione studiata.

Una prima osservazione dei livelli e degli spettri in frequenza acquisiti dalle sonde davanti al generatore del moto ondoso e davanti al frangiflutti, ha messo in evidenza che il moto ondoso incidente generato con periodo di picco pari a 0.71 s e altezza pari a 5 cm (scala modello), durante la propagazione subisce una trasformazione dovuta alla variazione della pendenza del fondale. Infatti se il fondale antistante il generatore del moto ondoso realizza la condizione di acque alte<sup>1</sup>, il fondale antistante il frangiflutti, essendo più basso, non la realizza.

I valori della lunghezza d'onda in prossimità del battionde e del frangiflutti sono stati calcolati con metodo iterativo attraverso la relazione di dispersione, come riportato di seguito:

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh\left(\frac{2\pi}{L} d\right)$$

e sono risultati rispettivamente pari a 77.6 cm e 76.8 cm (scala modello). In base alle profondità del fondale il rapporto tra  $d/L$  è pari a 0.77 nella zona antistante il battionde, e a 0.39 nella zona antistante il frangiflutti, tale valore conferma la condizioni di acque intermedie<sup>2</sup> che comporta l'inizio della trasformazione dei parametri caratteristici delle onde.

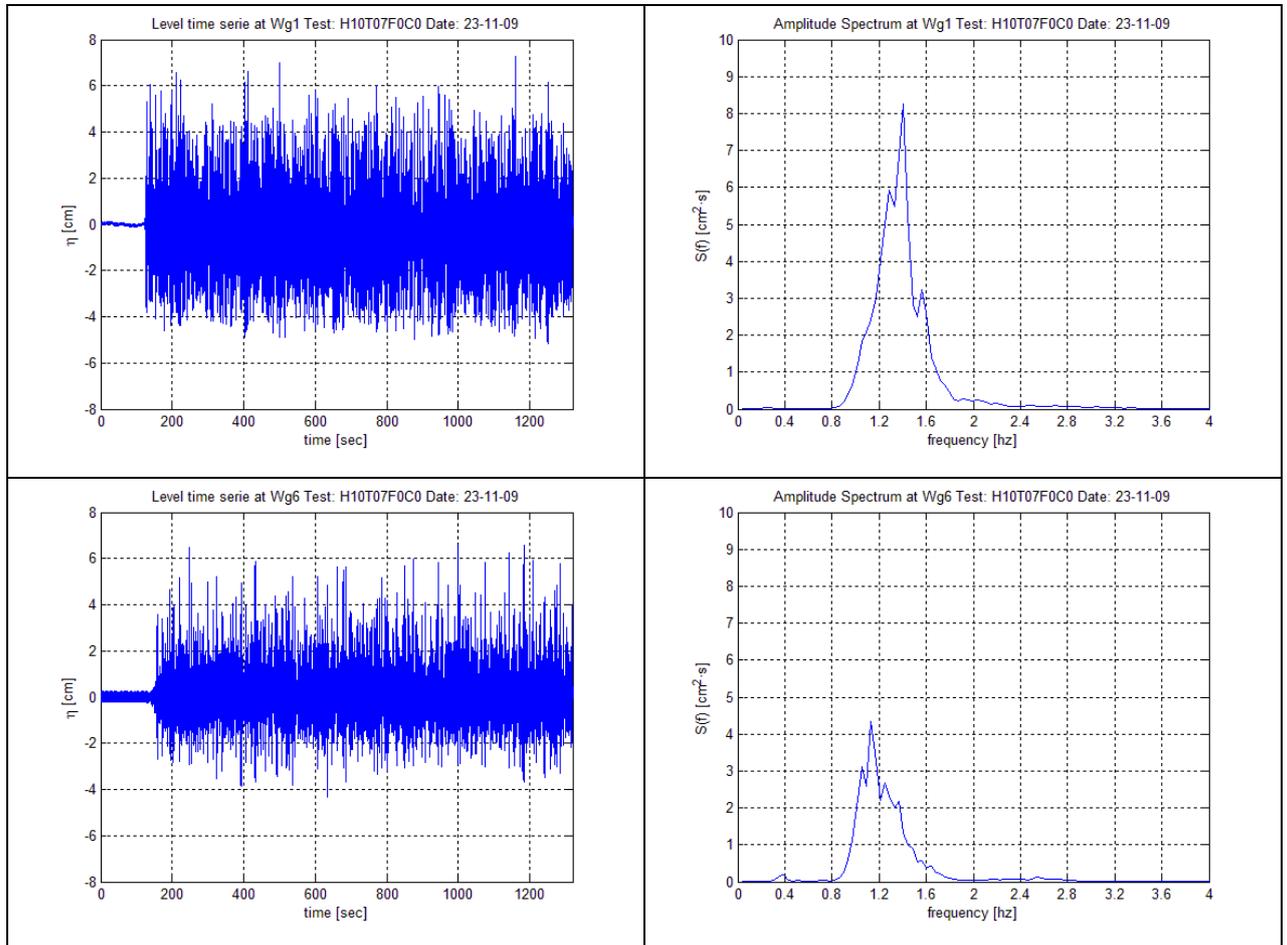
In seguito all'interazione col fondale l'altezza d'onda e il periodo subiscono delle variazioni. Il moto ondoso incidente registrato in prossimità del frangiflutti ha un'altezza

---

<sup>1</sup> Si definiscono *acque alte o profonde* quelle in cui il rapporto tra la profondità del fondale ( $d$ ) e la lunghezza d'onda ( $L$ ) assume valori superiori a 0.5.

<sup>2</sup> Si definiscono *acque intermedie* quelle in cui il rapporto  $d/L$  assume valori compresi tra 0.05 e 0.5.

significativa pari a 5.1 cm e un periodo pari a 0.85 s (scala modello), come mostrato in figura 36.



**Figura 36** – Sopra, livello e spettro in frequenza acquisito sul fondale antistante al generatore del moto ondoso; sotto, livello e spettro in frequenza acquisito sul fondale davanti al frangiflutti.

## 4.1 Risultati ottenuti nella prima sessione sperimentale

Il risultato delle analisi relative al calcolo dei valori significativi dei moti ondosi incidenti e trasmessi per le prime otto configurazioni testate, e del rispettivo coefficiente di trasmissione, è riportato in tabella 12. Visto che per ogni configurazione studiata, l'attacco ondoso di prova è stato ripetuto due volte, i dati delle altezze d'onda sono frutto della media dei valori calcolati durante i due attacchi ondosi.

**Tabella 12** – Risultati ottenuti nella prima sessione di prove sperimentali (scala prototipo).

<b>Configurazione</b>	<b>H<sub>i</sub> (m)</b>	<b>H<sub>t</sub> (m)</b>	<b>K<sub>t</sub></b>
C1	2.33	1.75	75%
C2	2.42	1.58	65%
C3	2.34	1.42	61%
C4	2.25	1.54	68%
C5	2.22	1.68	76%
C6	2.26	1.89	83%
C7	2.17	1.67	77%
C8	2.13	1.54	73%

Confrontando i risultati ottenuti per le configurazioni in cui sono state testate le diverse tipologie di galleggianti, si nota come la loro dimensione sia ben correlata all'abbattimento del coefficiente di trasmissione (Figura 37).

Ciò conferma che l'aumento del volume dei galleggianti, che comporta una maggiore spinta di galleggiamento, garantisce un maggior tensionamento delle linee di ancoraggio. Mentre dal confronto dei risultati ottenuti per le configurazioni in cui sono state testate le diverse tipologie di scafi lato lago e le diverse tipologie di deriva non sono state riscontrate significative diminuzioni del coefficiente, almeno per quanto riguarda le configurazioni studiate. Infatti, confrontando a coppie le configurazioni che differiscono solo per la tipologia di scafo lato lago si osserva, nel caso delle configurazioni C5-C7 (Figura 38 A.), lo stesso coefficiente di trasmissione e, nel caso delle configurazioni C2-C4 una diminuzione del 3% che è da ritenersi poco significativa in base all'errore sperimentale (Figura 38 B.). Anche la diminuzione del 2%, che si osserva confrontando le configurazioni C1-C8, che differiscono per la tipologia di deriva (Figure 39), è da ritenersi poco significativa.

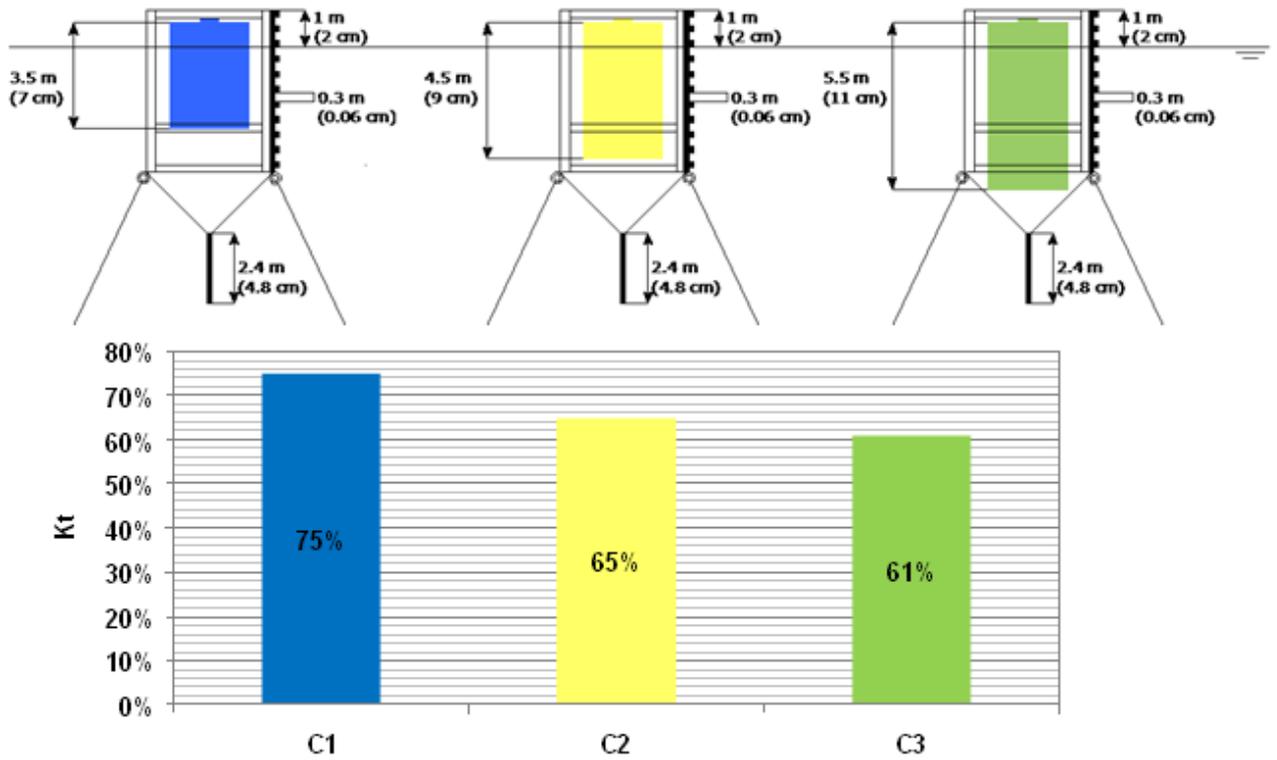
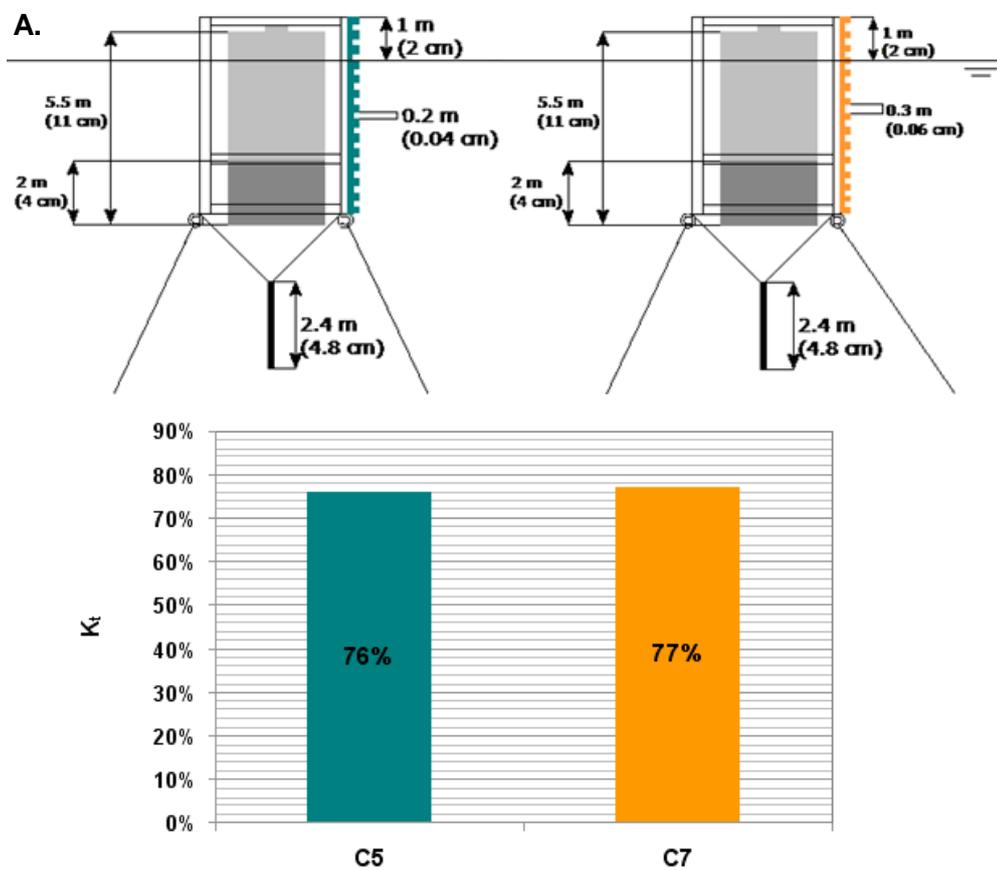
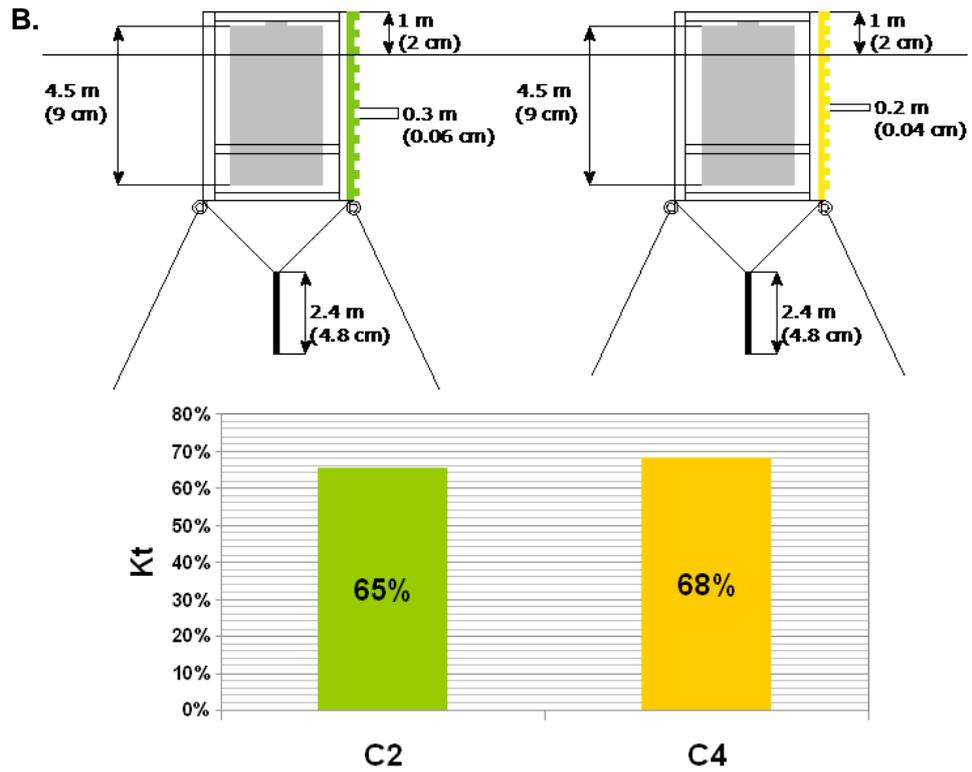
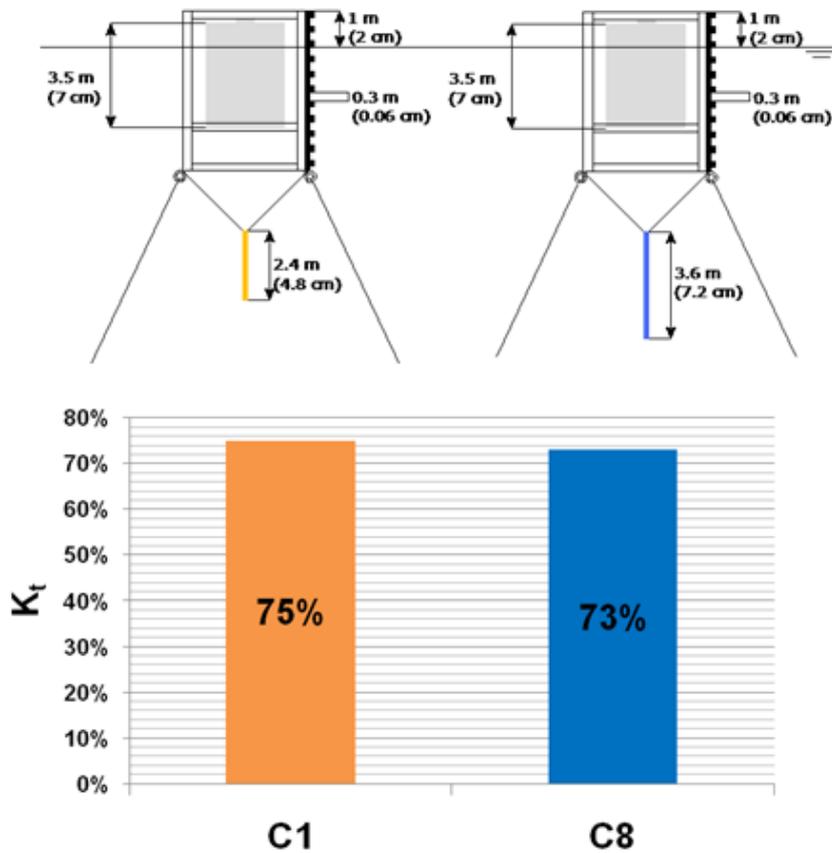


Figura 37 – Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la I sessione di prove, in funzione delle diverse tipologie di galleggianti.





**Figura 38** – Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la I sessione di prove, in funzione della porosità dello scafo lato lago. **A.** Confronto tra le configurazioni C5-C7, **B.** Confronto tra le configurazioni C2-C4.



**Figura 39**– Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la I sessione sperimentale, in funzione dell’altezza della deriva.

Il maggior coefficiente di trasmissione, pari all'83%, è stato ottenuto per la configurazione C6 e quello minore, pari al 61%, è stato ottenuto per la configurazione C3. Tale valore è tuttavia troppo alto per poter essere accettato ai fini della protezione di un'area portuale.

Le misure condotte su tutte le varianti del frangiflutti galleggiante, oggetto di studio della prima sessione sperimentale, hanno evidenziato quindi un comportamento non soddisfacente nei confronti della trasmissione del moto ondoso.

Le principali cause che hanno determinato tali risultati possono essere state:

- la quota dell'estradosso della struttura;
- la dimensione dei galleggianti;
- la larghezza della struttura.

Infatti: la quota dell'estradosso del frangiflutti, pari a 1.0 m o a 1.75 m, è troppo bassa considerato che i 2.5 m di altezza d'onda significativa possono essere frequentemente superati fino a raggiungere valori pari al doppio e che in tale circostanze si verificano tracimazioni della quota per più del 50% delle onde; la dimensione dei galleggianti non è sufficiente a garantire il tensionamento delle linee di ancoraggio in quanto, durante il passaggio del cavo dell'onda, sono stati osservati fenomeni di azzeramento della tensione di trazione che consentono lo sviluppo di sollecitazioni impulsive sul sistema di ancoraggio, in occasione del passaggio della cresta successiva; la struttura sotto l'azione del moto ondoso incidente si muove in fase con le sollecitazioni delle onde denotando un'inerzia, e quindi una larghezza, troppo piccole.

In seguito a questi risultati si è ritenuto opportuno effettuare una seconda sessione di prove sperimentali in cui, tramite modifiche progettuali del frangiflutti, si è tentato di eliminare le problematiche appena esposte.

## **4.2 Risultati ottenuti nella seconda sessione sperimentale**

In tabella 13 si riportano i risultati delle analisi relative al calcolo dei valori significativi dei moti ondosi incidenti e trasmessi e del rispettivo coefficiente di trasmissione, per le sette configurazioni testate durante la seconda sessione sperimentale. Anche in questo caso i dati delle altezze d'onda sono frutto della media dei valori calcolati durante i due attacchi ondosi di prova.

**Tabella 13** – Risultati ottenuti nella seconda sessione di prove sperimentali (scala prototipo).

<b>Configurazione</b>	<b>H<sub>i</sub> (m)</b>	<b>H<sub>t</sub> (m)</b>	<b>K<sub>t</sub></b>
C9	2.07	1.43	69%
C10	2.20	1.40	63%
C11	2.16	1.30	60%
C12	2.08	1.21	58%
C13	2.08	1.21	58%
C14	2.23	1.25	56%
C15	2.08	1.20	58%

Diversamente da quanto ottenuto nelle prove precedenti, in questa sessione l'altezza della deriva risulta avere una certa influenza sull'abbattimento del coefficiente di trasmissione. Confrontando le configurazioni C9 e C10 (Figura 40), in cui a variare è solamente il parametro progettuale riguardante la deriva, si osserva una riduzione del coefficiente di trasmissione pari al 6%. Tale diminuzione è da ritenersi significativa perché l'errore assoluto delle misure sperimentali è dell'1% ed è quindi possibile affermare che la deriva più corta ha degli effetti positivi sull'abbattimento della trasmissione e quindi è da preferirsi a quella più lunga, che fa oscillare maggiormente la struttura.

L'impermeabilizzazione dello scafo lato lago e del piano dell'estradosso porta a modeste variazioni del coefficiente di trasmissione, la diminuzione del 3% tra la configurazione C10 e la C11 (Figura 41) e quella del 2% tra la configurazione C11 e C12, non sono da ritenersi significative (Figura 42).

Le prove effettuate per valutare se le fessure di dimensione di circa 3 cm (scala prototipo), tra il modello e le pareti dei pannelli in plexiglass utilizzati per l'allestimento della sezione di misura, comportino il passaggio indisturbato di parte del moto ondoso incidente a tergo del frangiflutti, hanno mostrato lo stesso coefficiente di trasmissione, per tanto si può escludere l'insorgenza di effetti di laboratorio.

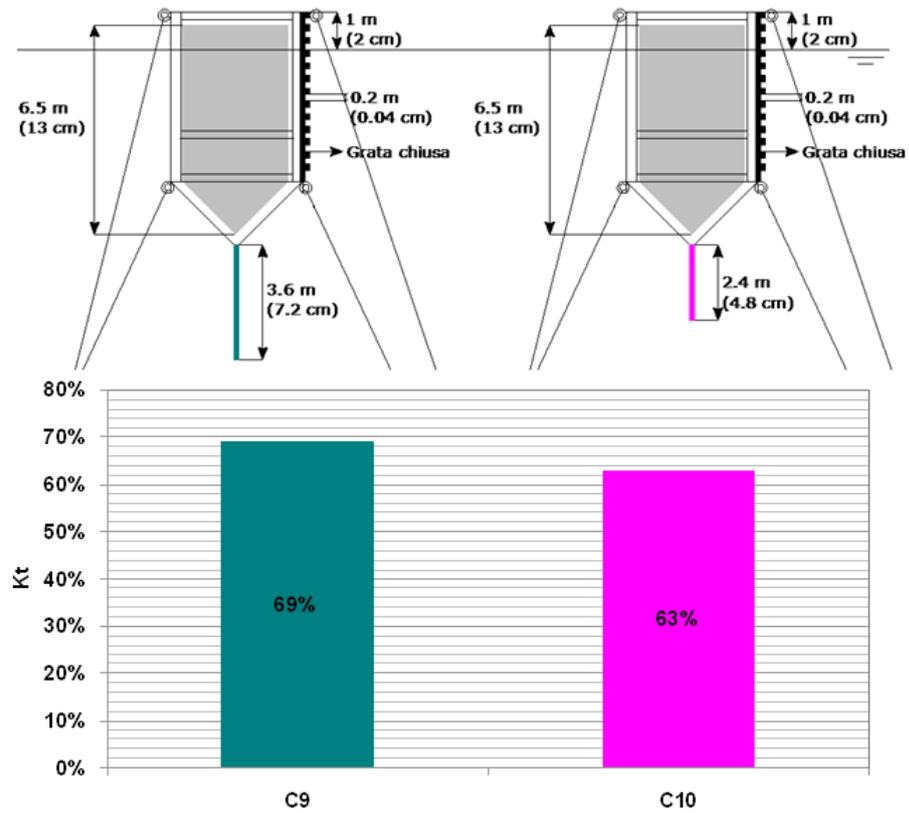


Figura 40 - Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la II sessione sperimentale, in funzione dell'altezza della deriva.

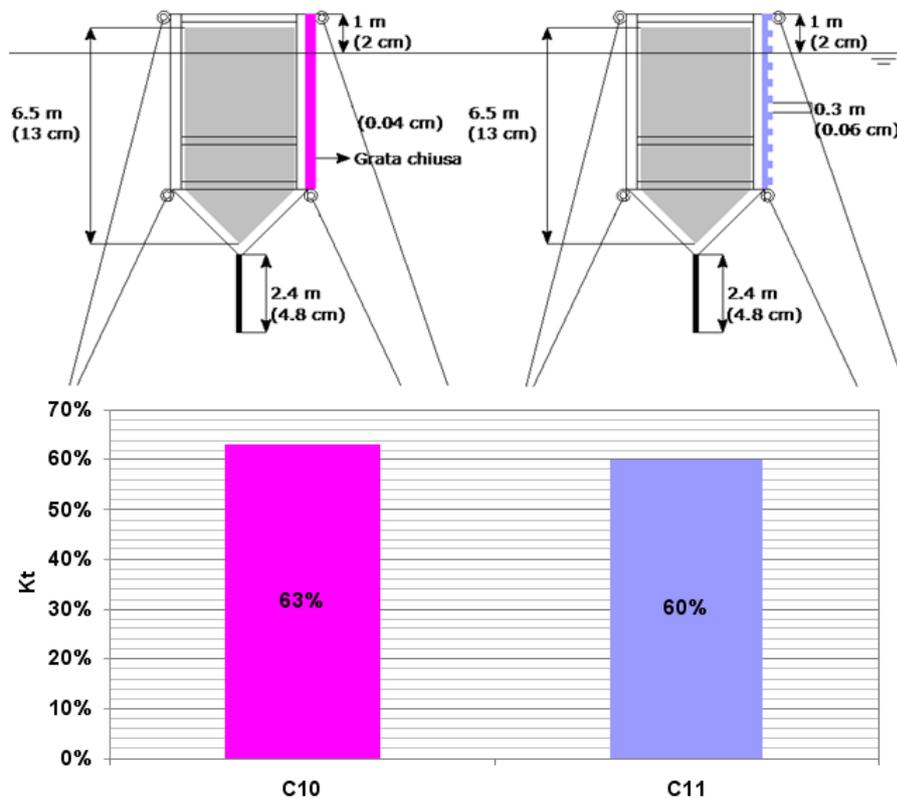
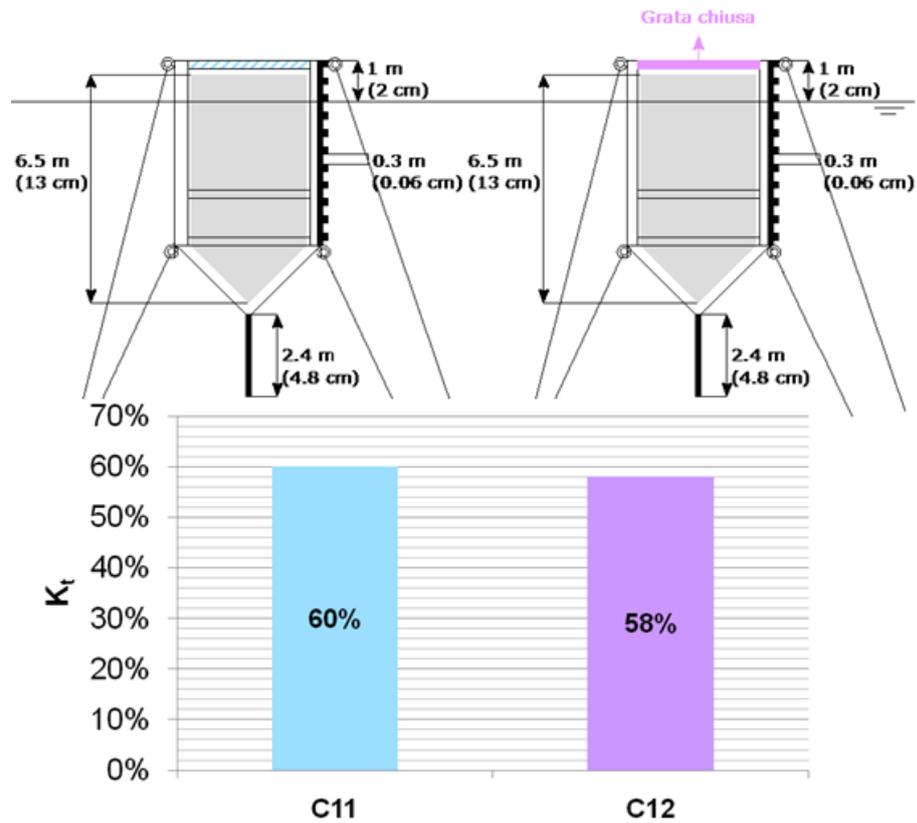
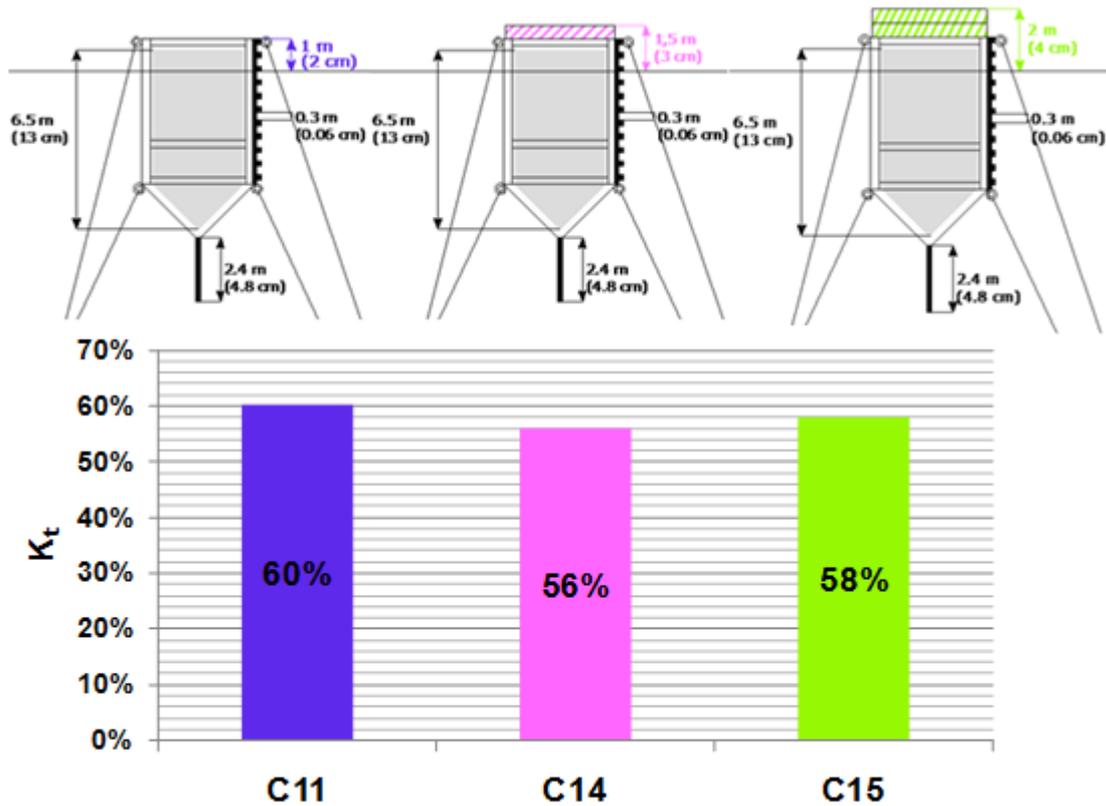


Figura 41 – Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la II sessione di prove, in funzione della permeabilità dello scafo lato lago.



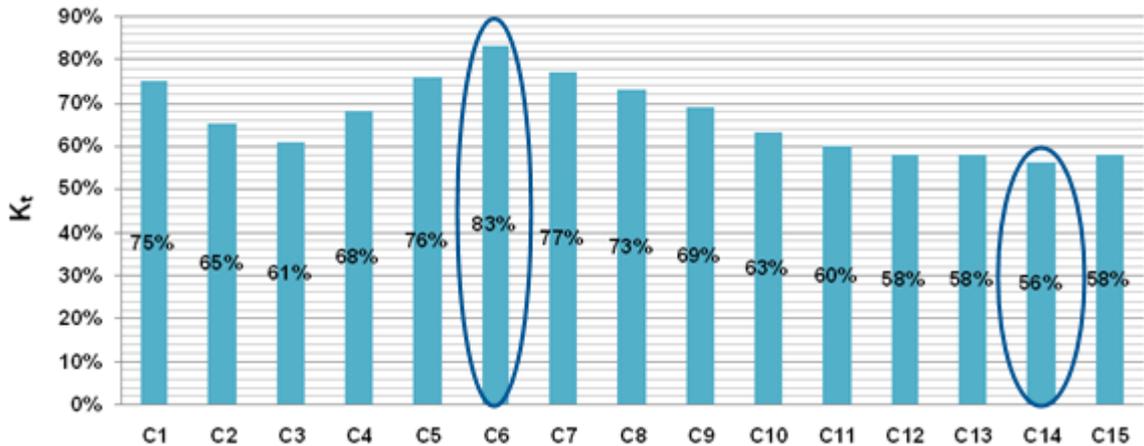
**Figura 42** - Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la II sessione di prove, in funzione della permeabilità del piano dell'estradosso.

I coefficienti di trasmissione ottenuti dalle configurazioni che differiscono solo in funzione della quota hanno mostrato modeste differenze. I valori della configurazione C14 e della C15 devono essere considerati sostanzialmente coincidenti con quelli ottenuti per la configurazione C11 (Figura 43). Questo risultato dimostra che per questa tipologia di struttura l'aumento della quota non influisce fortemente sulla trasmissione, a conferma del fatto che il moto ondoso incidente viene trasmesso soprattutto a causa dell'effetto dell'ondeggiamento della struttura. L'aumento dell'altezza dell'opera, che offre una superficie di impatto maggiore tra la struttura e il moto ondoso incidente, se da un lato comporta un minor numero di tracimazioni dall'altro comporta un aumento delle oscillazioni della struttura, che sono la causa della rigenerazione del moto ondoso a tergo di essa. Un'ulteriore conferma del fenomeno si è ottenuta dall'osservazione dei filmati ottenuti dalle riprese video effettuate lateralmente al canale.



**Figura 43** - Coefficienti di trasmissione, ottenuti durante la II sessione di prove, in funzione della quota dell'estradosso.

Le modifiche apportate alla struttura, tra la prima sessione di prove e la seconda, hanno portato a un abbattimento del coefficiente di trasmissione che è passato dall'83%, ottenuto per la configurazione C6, al 56% ottenuto per la configurazione C14 (Figura 44). Tale valore tuttavia non è comunque sufficiente ai fini della protezione portuale per cui è stata progettata la struttura. Constatando che l'aumento delle linee di ancoraggio e dei galleggianti hanno portato a una maggiore stabilità del frangiflutti, sono state pensate ulteriori modifiche della struttura. Per l'ottimizzazione dell'opera, in accordo con i risultati fin'ora ottenuti, si è ritenuto necessario provvedere al progetto di un nuovo frangiflutti dotato di una maggiore larghezza in modo da disporre di un'inerzia maggiore e di più spazio, per alloggiare galleggianti più grandi.



**Figura 44** – Confronto tra i diversi coefficienti di trasmissione ottenuti nelle prime due sessioni sperimentali.

### 4.3 Risultati ottenuti nella terza sessione sperimentale

I risultati dell'analisi relativa al coefficiente di trasmissione, ottenuto dalle medie dei valori di altezza d'onda incidente e trasmessa calcolati durante i due attacchi ondosi riprodotti, per la terza sessione sperimentale sono riportati in tabella 14.

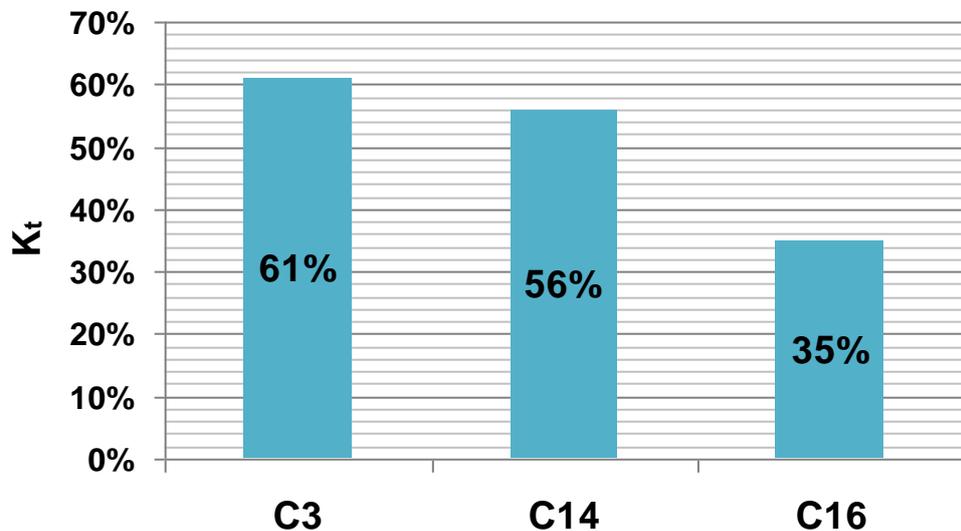
**Tabella 14** - Risultati ottenuti nella terza sessione di prove sperimentali (scala prototipo).

Configurazione	$H_i$ (m)	$H_t$ (m)	$K_t$
C16	1.73	0.62	35%

In questa sessione sperimentale l'altezza d'onda incidente davanti al frangiflutti è leggermente inferiore alle prove precedentemente condotte, ciò è dovuto probabilmente all'effetto dell'aumento del coefficiente di riflessione davanti ad esso. Infatti tale valore è passato dal 20%, ottenuto per le prime 15 configurazioni al 70%, ottenuto per la configurazione C16. Le ragioni di questo aumento possono essere imputabili alle maggiori dimensioni della struttura, che comportano sia una maggiore superficie riflettente che una maggiore inerzia dell'opera.

Le modifiche strutturali del frangiflutti, pensate per l'ottimizzazione dell'opera durante la conduzione dell'attività sperimentale, hanno portato notevoli miglioramenti in termini dell'abbattimento del coefficiente di trasmissione rispetto alle configurazioni

precedentemente studiate. Infatti questa terza sessione ha permesso di raggiungere una riduzione della trasmissione pari al 65% (Figura 45).



**Figura 45** – Confronto tra i valori dei coefficienti di trasmissione più bassi ottenuti nelle prime due sessioni sperimentali e quello ottenuto nella terza sessione.

#### 4.4 Stima dei massimi spostamenti

Alla fine delle sessioni sperimentali sono state condotte delle stime sui massimi spostamenti orizzontali e verticali effettuati dai due frangiflutti. Del primo prototipo è stata scelta la configurazione C14, per la quale è stato ottenuto il minor valore del coefficiente di trasmissione e del secondo prototipo la configurazione C16, l'unica testata.

A tale scopo sono state utilizzate le riprese video laterali al frangiflutti, che sono servite per monitorare gli spostamenti attraverso la parete vetrata del canale, sulla quale era stata disegnata una griglia di 23 x 23 cm con maglia di 0.5 x 0.5 cm.

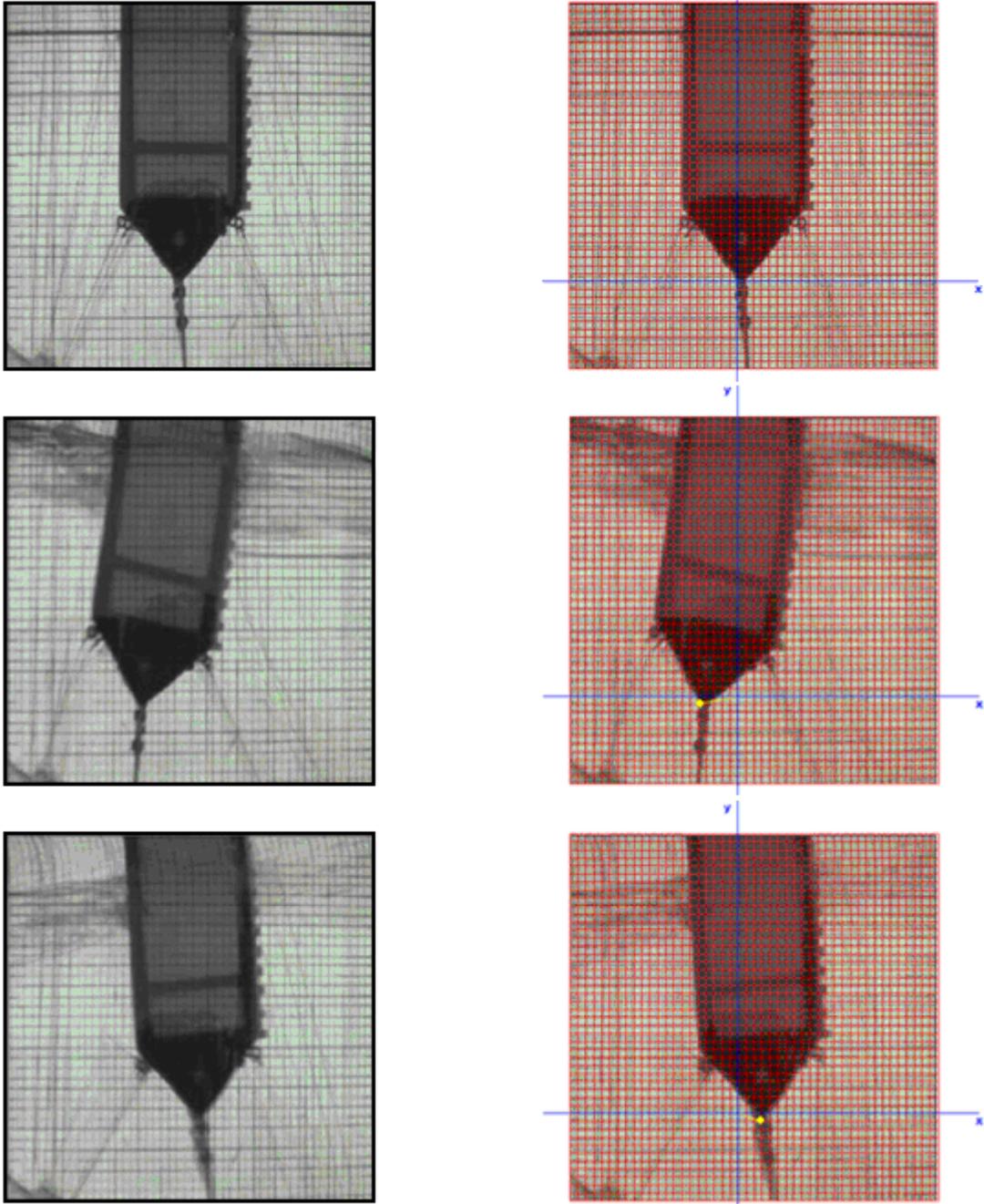
Dall'analisi delle immagini video sono stati estrapolati 3 fotogrammi. Il primo, con acqua in stato di quiete, rappresenta la struttura in condizioni statiche ed è servito per individuare il punto di origine degli assi di riferimento, utilizzati nei fotogrammi successivi per il calcolo dello spostamento. Il secondo rappresenta il massimo spostamento della struttura durante il passaggio del cavo d'onda e il terzo rappresenta il massimo spostamento della struttura in seguito allo sviluppo delle sollecitazioni impulsive, in occasione del passaggio della cresta successiva (Figura 46 e Figura 47).

La massima distanza orizzontale è stata stimata sommando i valori assoluti della proiezione dello spostamento lungo l'asse x, ottenuti dal secondo e dal terzo fotogramma (Tabella 15). Per la configurazione C14 detta distanza è risultata essere pari a 2 m (4 cm scala modello), mentre per la configurazione C16 pari a 0.5 m (1 cm scala modello).

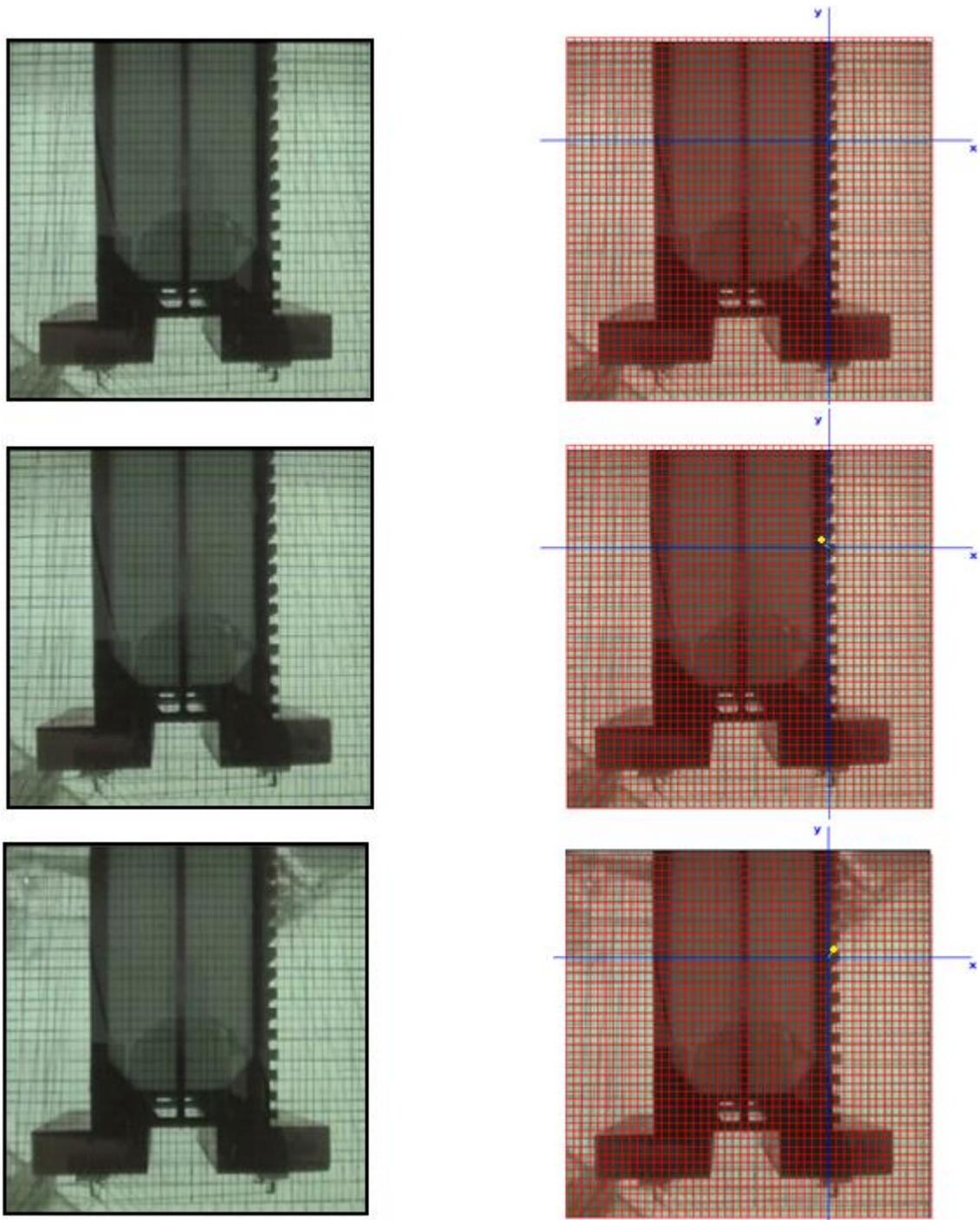
La massima distanza verticale misurata dal punto d'origine degli assi è risultata pari a 0.25 m (0.5 cm scala modello) per entrambe le configurazioni. L'unica differenza riscontrata è che, al passaggio dell'onda, il primo frangiflutti subisce una spinta dall'alto verso il basso mentre il secondo dal basso verso l'alto.

**Tabella 15** – Stima degli spostamenti, effettuati dai due prototipi lungo l'asse x e y.

Configurazione C14	X (cm)	Y (cm)	Configurazione C16	X (cm)	Y (cm)
<b>1° fotogramma</b>	0	0	<b>1° fotogramma</b>	0	0
<b>2° fotogramma</b>	-2.5	-0.5	<b>2° fotogramma</b>	-0.5	+0.5
<b>3° fotogramma</b>	+1.5	-0.5	<b>3° fotogramma</b>	+0.5	+0.5



**Figura 46** - Massimi spostamenti effettuati dal primo prototipo testato.



**Figura 47** - Massimi spostamenti effettuati dal secondo prototipo testato.

## Conclusioni

Questa tesi, basata sulla conduzione di un'attività sperimentale su modello fisico bidimensionale, ha avuto l'obiettivo di studiare l'effetto delle variazioni di alcuni parametri progettuali sulla trasmissione di moto ondoso, a tergo di un frangiflutti galleggiante proposto per la protezione di un'area destinata a divenire un approdo turistico lacustre.

Sono state testate un totale di 16 configurazioni. Per le prime 15 configurazioni sono stati variati alcuni parametri progettuali quali: volume dei galleggianti, altezza della deriva, permeabilità dello scafo lato lago e del piano dell'estradosso, numero delle linee di ancoraggio, quota dell'estradosso. Per l'ultima configurazione è stato preso in esame un nuovo frangiflutti.

Dall'analisi dei dati ottenuti è emerso, in accordo con quanto riportato in letteratura, che il coefficiente di trasmissione, dato dal rapporto tra l'altezza d'onda trasmessa e l'altezza d'onda incidente, è dipendente dal valore del rapporto tra la larghezza della struttura e la lunghezza d'onda. Infatti, a parità di moto ondoso incidente e tipologia di fondale, le prove condotte sulle prime 15 configurazioni hanno dato valori di trasmissione relativamente elevati, mentre le prove condotte sulla sedicesima configurazione, caratterizzata da una maggiore larghezza della struttura rispetto alla precedente, hanno dato valori di trasmissione inferiori. La larghezza maggiore, associata a un peso maggiore, comporta un'inerzia maggiore, e fa sì che la struttura sotto l'azione del moto ondoso incidente non si muova in fase con le sollecitazioni delle onde. Un'ulteriore conferma della maggiore stabilità della configurazione C16 è data dai risultati, 4 volte inferiori rispetto alla migliore delle precedenti configurazioni, ottenuti sulle stime degli spostamenti orizzontali che si verificano al passaggio di un'onda.

Inoltre si è potuto notare come il coefficiente di trasmissione, contrariamente a quanto avviene per le barriere frangiflutti fisse, sia sostanzialmente indipendente dalla quota dell'estradosso. L'aumento della quota da 1.0 m a 1.5 m e 2.0 m non ha portato a drastiche riduzioni della trasmissione, per cui si può concludere che il moto ondoso trasmesso a tergo della struttura è principalmente dovuto alle sue oscillazioni, più o meno in fase con il moto ondoso incidente.

Considerato che la risonanza della struttura influisce sia sulla diffusione delle onde all'interno dell'area da proteggere, sia sui dispositivi di ancoraggio, che costituiscono un punto debole di questa tipologia di opere, in accordo con quanto osservato dagli esperimenti è necessario valutare il volume da destinare ai galleggianti in modo da garantire tensionamento delle linee di ancoraggio ed evitare lo sviluppo di sollecitazioni impulsive. In linea generale è quindi opportuno conoscere il peso della struttura da realizzare in modo da poter determinare l'effettiva spinta di galleggiamento.

Oltre alla larghezza della struttura e al volume dei galleggianti, un ulteriore parametro che ha dimostrato un'influenza sulla stabilità dell'opera, quindi sul coefficiente di trasmissione, è il numero delle linee di ancoraggio che tra la prima e le altre sessioni è passato da 8 a 16.

In conclusione il risultato finale a cui ha portato questo studio è quello di escludere, in base ai coefficienti di trasmissione forniti dagli esperimenti, la fattibilità del primo frangiflutti studiato e di prendere in considerazione per un eventuale ipotesi progettuale il secondo frangiflutti, che ha fornito un coefficiente di trasmissione pari al 35%. Tuttavia, sarebbe necessario condurre delle ulteriori prove sperimentali sull'ultima configurazione, volte a studiare:

- l'influenza della presenza degli alettoni zavorrati;
- delle alternative per la disposizione delle linee di ancoraggio;
- l'interazione della struttura con diversi attacchi ondosi;

al fine di individuare la struttura più efficiente nell'attenuazione del moto ondoso.

## **Allegati**

**Allegato I:** Tabella riassuntiva dei parametri caratteristici per ogni configurazione testata.

Configurazione	Onda	Livello	Hi Pala [cm]	Hr Pala [cm]	Kr Pala	Hi davanti alla diga [cm]	Hr davanti alla diga [cm]	Kr davanti	Hi dietro alla diga [cm]	Hr dietro alla diga [cm]	Kr dietro	Kt	Kt MEDIA
C0	H10T07	F0	6.47	1.05	0.16	5.00	0.66	0.13	4.91	0.6	0.12		0.98
C1_1	H10T07	F0	6.53	1.07	0.16	4.97	0.6	0.12	3.8	0.8	0.21	0.76	
C1_2	H10T07	F0	5.75	0.77	0.13	4.34	0.58	0.13	3.18	0.8	0.25	0.73	0.75
C2_1	H10T07	F0	5.83	0.96	0.16	4.84	0.68	0.14	3.15	0.86	0.27	0.65	
C2_2	H10T07	F0	5.83	0.96	0.16	4.84	0.68	0.14	3.15	0.86	0.27	0.65	0.65
C3_1	H10T07	F0	5.64	0.87	0.15	4.62	0.74	0.16	2.79	0.91	0.33	0.60	
C3_2	H10T07	F0	5.71	0.86	0.15	4.73	0.7	0.15	2.87	0.9	0.31	0.61	0.61
C4_1	H10T07	F0	5.82	0.98	0.17	4.59	0.54	0.12	3.14	0.82	0.26	0.68	
C4_2	H10T07	F0	5.55	0.8	0.14	4.41	0.6	0.14	3.01	0.68	0.23	0.68	0.68
C5_1	H10T07	F0	5.49	0.86	0.16	4.4	0.46	0.1	3.32	0.77	0.23	0.75	
C5_2	H10T07	F0	5.52	0.82	0.15	4.46	0.5	0.11	3.38	0.77	0.23	0.76	0.76
C6_1	H10T07	F0	5.53	0.73	0.13	4.55	0.75	0.16	3.83	0.68	0.18	0.84	
C6_2	H10T07	F0	5.33	0.76	0.14	4.48	0.68	0.15	3.71	0.6	0.16	0.83	0.83
C7_1	H10T07	F0	5.44	0.76	0.14	4.37	0.49	0.11	3.36	0.82	0.24	0.77	
C7_2	H10T07	F0	5.38	0.93	0.17	4.31	0.55	0.13	3.32	0.8	0.24	0.77	0.77
C8_1	H10T07	F0	5.01	0.87	0.17	4.24	0.6	0.14	3.06	0.8	0.26	0.72	
C8_2	H10T07	F0	5.01	0.82	0.16	4.27	0.54	0.13	3.11	0.71	0.23	0.73	0.73
C9_1	H10T07	F0	6.07	1.03	0.17	4.18	1.16	0.28	2.92	0.81	0.28	0.70	
C9_2	H10T07	F0	6.2	1.12	0.18	4.08	1.26	0.31	2.8	0.61	0.22	0.69	0.69
C10_1	H10T07	F0	5.68	1.06	0.19	4.29	1.36	0.32	2.62	0.73	0.28	0.61	
C10_2	H10T07	F0	5.8	1.1	0.19	4.5	1.19	0.26	2.96	0.57	0.19	0.66	0.63
C11_1	H10T07	F0	5.94	1.22	0.21	4.34	1.25	0.29	2.69	0.9	0.33	0.62	
C11_2	H10T07	F0	5.96	1.32	0.22	4.31	1.26	0.29	2.52	1.1	0.44	0.58	0.60
C12_1	H10T07	F0	5.84	1.29	0.22	4.17	1.29	0.31	2.41	0.73	0.3	0.58	
C12_2	H10T07	F0	5.83	1.25	0.22	4.13	1.2	0.29	2.42	0.7	0.29	0.59	0.58
C13_1	H10T07	F0	6.01	1.27	0.21	4.43	0.98	0.22	2.93	0.74	0.25	0.66	
C13_2	H10T07	F0	5.96	1.21	0.2	4.39	0.93	0.21	2.98	0.71	0.24	0.68	0.67
C14_1	H10T07	F0	5.47	1.02	0.19	4.39	1.39	0.32	2.44	0.8	0.33	0.56	
C14_2	H10T07	F0	5.69	1.18	0.21	4.53	1.36	0.3	2.55	0.95	0.37	0.56	0.67
C15_1	H10T07	F0	5.58	1.23	0.22	4.10	1.21	0.3	2.31	0.93	0.4	0.56	
C15_2	H10T07	F0	5.78	1.29	0.22	4.20	1.2	0.29	2.47	0.78	0.32	0.59	0.58
C16_1	H10T07	F0	6.15	2.5	0.41	3.56	2.44	0.69	1.27	0.46	0.36	0.36	
C16_2	H10T07	F0	6.03	2.36	0.39	3.37	2.39	0.71	1.19	0.49	0.42	0.35	0.35

## Allegato II: Check list.

Check-list		Data:	
<b>Test effettuati:</b>			
Step	Operazioni giornaliere:	Operatore:	Note
1	Accendere le sonde resistive (interruttore n°8 del quadro elettrico).		
2	Accendere i PC Squalo Ganimede e Stokes e far partire la webcam.		
3	Controllare spazio di memorizzazione su Squalo (E:\) e Ganimede (F:\).		
4	Creare la cartella del giorno nel formato gg-mm-aa in Ganimede in F:\COOP7\Espperimenti e creare sempre in Ganimede le cartelle Figure e DatiCalibrati in Squalo invece creare in E:\COOP7 solo la cartella del giorno		
5	Posizionare la punta idrometrica nella posizione del livello più basso di calibrazione <b>F0<sub>D</sub>: 15.3 cm</b>		
6	Controllare che la superficie libera nel canale sia tangente alla punta, attendere <b>20 minuti</b> , ed annotare sulla check-list calibrazione la lettura esatta al nonio.		
7	Avviare la procedura di <u>calibrazione</u> (vedi check-list calibrazione).		
8	Avviare la pompa di retropala, attendere circa 20 minuti e		
9	Prima della prova annotare il livello dietro e davanti alla pala nel retro della check-list.		
10	Lanciare l'attacco ondosio H10T07.pre ed avviare la ripresa video: <u>Video nel canalino</u> : lettura nonio = 15.5 <u>Video fuori canalino</u> : lettura nonio=3.0		
11	Appena parte la ripresa presentare la prova che si sta eseguendo ( livello, configurazione		

	e onda)		
12	Appena finita la prova effettuare la lettura del livello dietro alla pala e annotarla nel retro della check list.		
13	Trasformare il file appena acquisito (H10T07.a01) da binario ad ASCII (da Labview in Squalo).		
14	Tagliare il file ASCII acquisito da Squalo e copiarlo in Ganimede (cartella del giorno!) e rinominarlo nella forma H10T07F0C0.dat		
15	Trasferire il file appena acquisito (IxFyCz15.dat) nelle cartelle giornaliere di Squalo (i binari .a01) e di Ganimede (gli ASCII.dat), e compilare il Report.		
16	Alla fine della prova terminare la ripresa video e attendere 20 minuti perché si stabilizzi l'acqua all'interno del canale.		
17	Nel frattempo analizzare e compilare il rapporto delle prove.		
18	Ripetere le operazioni dallo <b>step 9</b> fino al termine delle prove giornaliere.  <b>IN CASO DI VARIAZIONI NEL LIVELLO DI STUDIO RIPETERE LA CALIBRAZIONE!!!!</b>		
19	Al termine delle prove giornaliere spegnere i computer e chiudere la porta della stanza dove si trova il PC Squalo.		

<b>CHECK-LIST CALIBRAZIONE</b>		<b>Data:</b>	
<b>Step</b>	<b>Fasi della procedura di calibrazione sonde resistive</b>	<b>Operatore:</b>	<b>Note</b>
<b>1</b>	Avviare la procedura di calibrazione aprendo la cartella COOP7 dal desktop del PC Squalo.		
<b>2</b>	Lanciare il file idra11.vi.		
<b>3</b>	Avviare dalla barra dei menù il modulo di “predisposizione”, quindi il modulo di “taratura”.		
<b>4</b>	Selezionare i canali delle sonde da tarare: sonde 1-16.		
<b>5</b>	Immissione del range di taratura per ogni sonda [mm].		
<b>6</b>	Immissione del valore della distanza di ogni sonda dalla pala generatrice [mm].		
<b>7</b>	Immissione del valore della profondità di ogni sonda [mm].		
<b>8</b>	Controllare che il livello sia <b>F0<sub>D</sub>: 15.3 cm</b> (cioè il livello più basso di calibrazione) <b>E selezionare taratura.</b>		Lettura <b>F0<sub>D</sub></b> al nonio:
<b>9</b>	Posizionare la punta idrometrica nella posizione del livello più alto di calibrazione: <b>F0<sub>U</sub>: 7.3 cm</b>		
<b>10</b>	Controllare che la superficie libera nel canale sia tangente alla punta, attendere <b>20 minuti</b> , ed annotare sulla check-list la lettura esatta al nonio.		Lettura <b>F0<sub>U</sub></b> al nonio:
<b>11</b>	Posizionare la punta idrometrica nella posizione del livello centrale di calibrazione: <b>F0<sub>C</sub>: 11.3 cm</b> (cercare di essere più precisi almeno su questo livello!!!)		

12	Controllare che la superficie libera nel canale sia tangente alla punta, attendere <b>20 minuti</b> , ed annotare sulla check-list la lettura esatta al nonio.		Lettura <b>F0<sub>C</sub></b> al nonio:
13	Copiare il file idra11.son nella cartella del giorno di Squalo e collegarsi in rete da Ganimede a Squalo e copiarlo in F:\COOP7\Eperimenti\gg-mm-aa e rinominare in cggmmaazzx.cal (giorno mese anno livello numero di calibrazione (es.c040507F20.cal).		
14	Fare una copia del file di calibrazione appena rinominato nella stessa cartella di Ganimede e rinominarlo cggmmaazzxlivelli.cal, cancellarne il contenuto e scrivere i tre livelli effettivi letti al nonio nel seguente ordine:  <b>F0<sub>D</sub></b>  <b>F0<sub>U</sub></b>  <b>F0<sub>C</sub></b>		
15	Analizzare il file di calibrazione tramite software Matlab con il programma “VerificaCalibrazione” inserendo l’istruzione calibrazione (numero sonde,’data’, ‘livello’, numero di calibrazione).		
16	Annotare sugli appunti eventuali anomalie riscontrate nel corso della calibrazione.		
17	Annotare sul diario le calibrazioni eseguite.		
<b>Appunti:</b>			

Codice onda	Configurazione	Livelli		
H10T07		<b>Prima</b>	Dietro pala:	Davanti pala:
		<b>Dopo</b>	Dietro pala:	-
H10T07		<b>Prima</b>	Dietro pala:	Davanti pala:
		<b>Dopo</b>	Dietro pala:	-
H10T07		<b>Prima</b>	Dietro pala:	Davanti pala:
		<b>Dopo</b>	Dietro pala:	-
H10T07		<b>Prima</b>	Dietro pala:	Davanti pala:
		<b>Dopo</b>	Dietro pala:	-

**Allegato III:** Programma di analisi dati, per le prime due sessioni sperimentali.

```

clear
close all

%cd C:\Users\User\Desktop\COOP7\Esperimenti\FileMatLabPerAnalisiDati
addpath C:\Users\User\Desktop\COOP7\Esperimenti\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. "H10T07"=']);
CodiceBarriera=input(['Dammi il codice della struttura Es. "C0"=']);
CodiceLivello=input(['Dammi il codice del livello Es. "F0"=']);
NumeroCalibrazione=input(['Dammi il numero della calibrazione =']);
% Data='23-05-07';
% CodiceOnda='H060T10j05';
% CodiceBarriera='00';
% CodiceLivello='F2';
% NumeroCalibrazione='2';

%-----
% Vettore di corrispondenza canali/posizione di acquisizione
%-----

%Corrispondenza sonde canali utilizzata nella seconda parte di prove
%wg=[1 2 3 5 4 9 15 7 8 16]; % usata 27-11-09 per la config. C0
%wg=[1 2 3 10 4 13 15 7 8 16]; % usata 27-11-09 per la config. C1_1
wg=[1 2 3 5 4 13 15 7 8 16]; % usata 27-11-09 per la config. C1_2

%-----
%Numero sonde resistive utilizzate in canale
%-----
ns=length(wg);
%-----
%Mi sposto nella cartella del giorno
%-----
eval(['cd C:\Users\User\Desktop\COOP7\Esperimenti\' 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']);
livelli=load([FileWgCal '_livelli.cal']);
%dati acquisiti
FileWg=[CodiceOnda CodiceLivello CodiceBarriera ];
DataWg=load([FileWg '.dat']);
%dati per riferimento dello zero locale, (i primi due minuti)

DataWgZero=DataWg(1:2400,:);

%-----

```

```

% Riordina i files acquisiti in base alla posizione
% definisci la matrice con i dati per la calibrazione:
% riga i-esima -> parametri sonda in posizione i-esima
% definisci la matrice con i dati acquisiti:
% colonna i-esima -> acquisizione sonda in posizione i-esima
%-----
DataWgCal_Temp=DataWgCal*0;
DataWg_Temp=DataWg*0;
DataWgZero_Temp=DataWgZero*0;
for i=1:ns
    DataWgCal_Temp(i,:)=DataWgCal(wg(i),:);
    DataWg_Temp(:,i)=DataWg(:,wg(i));
    DataWgZero_Temp(:,i)=DataWgZero(:,wg(i));
end
DataWgCal=DataWgCal_Temp(1:ns,:);
DataWgZero=DataWgZero_Temp(:,1:ns);
DataWg=DataWg_Temp(:,1:ns);

clear DataWgCal_Temp;
clear DataWgZero_Temp;
clear DataWg_Temp;

%-----
% Genera la matrice con in coefficienti di calibrazione e salva i grafici
%-----
[a]=Calibrazione(DataWgCal, Data, CodiceLivello,livelli);

%-----
% 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 sugli ultimi 19 minuti delle misure
%-----

inizio=size(b,1)-19*60*20;
fine=size(b,1);
fs=20;
nfft=512;
[c]=AnalisiSpettrale(b(inizio:fine,:),FileWg,Data,fs,nfft);

% %-----
% % Filtraggio del rumore e dell'onda lunga
% %-----
% %
% % ATTENZIONE non usare il filtro per eliminare le frequenze quando si fa analisi di piling-up.
% % Il filtraggio delle frequenze basse ELIMINA IL TREND DEI LIVELLI ACQUISITI
% % Il filtraggio delle frequenze alte cambia il segnale nei primi istanti di acquisizione così che
% % non e' piu' possibile 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=0.600;
    h=0.510;
    h1=0.212;
% elseif (CodiceLivello=='F1')
%   h=0.185;
%   h1=0.095;
% elseif (CodiceLivello=='F2')
%   h=0.195;
%   h1=0.105;
end

%analisi riflessione alle sonde in posizione 1 e 2
Delta=0.15;
WgRef1=1;
WgRef2=2;
DatiRiflessione=b(inizio:fine,[WgRef1 WgRef2]);
[Kr_ allaPala, Hi_ allaPala, Hr_ allaPala]=wvrefVer2(h0,Delta,DatiRiflessione,fs,FileWg, [Data 'Wg'
num2str(WgRef1) 'And' num2str(WgRef2)],nfft,'AllaPala');

%analisi riflessione alle sonde in posizione 3 e 5
Delta=0.15;
WgRef1=3;
WgRef2=5;
DatiRiflessione=b(inizio:fine,[WgRef1 WgRef2]);
[Kr_Davanti, Hi_Davanti, Hr_Davanti]=wvrefVer2(h,Delta,DatiRiflessione,fs,FileWg, [Data 'Wg'
num2str(WgRef1) 'And' num2str(WgRef2)],nfft,'Davanti');

%analisi riflessione alle sonde in posizione 8 e 12
Delta=0.1125;
WgRef1=7;
WgRef2=10;
DatiRiflessione=b(inizio:fine,[WgRef1 WgRef2]);
[Kr_Dietro, Hi_Dietro, Hr_Dietro]=wvrefVer2(h1,Delta,DatiRiflessione,fs,FileWg, [Data 'Wg'
num2str(WgRef1) 'And' num2str(WgRef2)],nfft,'Dietro');

pluto=fopen(['DatiCalibrati\ FileWg '-Riflessione.dat'],'w');
fprintf(pluto,'%Hi_ allaPala[cm] Hr_ allapala[cm] kr_ allaPala 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_ allaPala Hr_ allaPala Kr_ allaPala Hi_Davanti Hr_Davanti Kr_Davanti Hi_Dietro Hr_Dietro
Kr_Dietro]);
fclose(pluto)

cd ../FileMatLabPerAnalisiDati\

```

**Allegato IV:** Programma di analisi dati, per la terza sessione sperimentale.

```

clear
close all

fs=20; %frequenza di campionamento

%cd C:\Users\User\Desktop\COOP7\Esperimenti\FileMatLabPerAnalisiDati
addpath
C:\Users\User\Desktop\ModelliFisiciInConduzione\2010COOP7\Esperimenti\FileMatLabPerAnalisiDatiSecondaSessione

%-----
%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. "H10T07"=']);
CodiceBarriera=input(['Dammi il codice della struttura Es. "C0"=']);
CodiceLivello=input(['Dammi il codice del livello Es. "F0"=']);
NumeroCalibrazione=input(['Dammi il numero della calibrazione =']);
% Data='23-05-07';
% CodiceOnda='H060T10j05';
% CodiceBarriera='00';
% CodiceLivello='F2';
% NumeroCalibrazione='2';

%-----
% Vettore di corrispondenza canali/posizione di acquisizione
%-----

%Corrispondenza sonde canali utilizzata nella seconda parte di prove
wg=[1 2 3 13 7 8 16];

%-----
%Numero sonde resistive utilizzate in canale
%-----
ns=length(wg);
%-----
%Mi sposto nella cartella del giorno
%-----
eval(['cd ..\ 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']);
livelli=load([FileWgCal '_livelli.cal']);
%dati acquisiti
FileWg=[CodiceOnda CodiceLivello CodiceBarriera ];
DataWg=load([FileWg '.dat']);

%dati per riferimento dello zero locale, (i primi due minuti)

```

```

DataWgZero=DataWg(1:2400,:);

%-----
% Riordina i files acquisiti in base alla posizione
% definisci la matrice con i dati per la calibrazione:
% riga i-esima -> parametri sonda in posizione i-esima
% definisci la matrice con i dati acquisiti:
% colonna i-esima -> acquisizione sonda in posizione i-esima
%-----
DataWgCal_Temp=DataWgCal*0;
DataWg_Temp=DataWg*0;
DataWgZero_Temp=DataWgZero*0;
for i=1:ns
    DataWgCal_Temp(i,:)=DataWgCal(wg(i),:);
    DataWg_Temp(:,i)=DataWg(:,wg(i));
    DataWgZero_Temp(:,i)=DataWgZero(:,wg(i));
end
DataWgCal=DataWgCal_Temp(1:ns,:);
DataWgZero=DataWgZero_Temp(:,1:ns);
DataWg=DataWg_Temp(:,1:ns);

clear DataWgCal_Temp;
clear DataWgZero_Temp;
clear DataWg_Temp;

%-----
% Genera la matrice con in coefficienti di calibrazione e salva i grafici
%-----
[a]=Calibrazione(DataWgCal, Data, CodiceLivello,livelli);

%-----
% Converto i segnali da volt a cm, li riscalo e salvo i files
%-----
[b]=ConvertiESalvaSegnali(DataWg,DataWgZero,a,FileWg,Data,fs);

%-----
% Calcola i parametri spettrali d'onda, Hmo, Tp, Tm
% e i livelli medi sugli ultimi 19 minuti delle misure
%-----

inizio=size(b,1)-19*60*20;
fine=size(b,1);
nfft=512;
[c]=AnalisiSpettrale(b(inizio:fine,:),FileWg,Data,fs,nfft);

% %-----
% % 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 cosi che
% % non e' piu' 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=0.600;
    h=0.510;
    h1=0.188;
% elseif (CodiceLivello=='F1')
%   h=0.185;
%   h1=0.095;
% elseif (CodiceLivello=='F2')
%   h=0.195;
%   h1=0.105;
end

%analisi riflessione alle sonde in posizione 1 e 2
Delta=0.15;
WgRef1=1;
WgRef2=2;
DatiRiflessione=b(inizio:fine,[WgRef1 WgRef2]);
[Kr_allaPala, Hi_allaPala, Hr_allaPala]=wvrefVer2(h0,Delta,DatiRiflessione,fs,FileWg, [Data 'Wg'
num2str(WgRef1) 'And' num2str(WgRef2)],nfft,'AllaPala');

%analisi riflessione alle sonde in posizione 3 e 4
Delta=0.075;
WgRef1=3;
WgRef2=4;
DatiRiflessione=b(inizio:fine,[WgRef1 WgRef2]);
[Kr_Davanti, Hi_Davanti, Hr_Davanti]=wvrefVer2(h,Delta,DatiRiflessione,fs,FileWg, [Data 'Wg'
num2str(WgRef1) 'And' num2str(WgRef2)],nfft,'Davanti');

%analisi riflessione alle sonde in posizione 5 e 7
Delta=0.075;
WgRef1=5;
WgRef2=7;
DatiRiflessione=b(inizio:fine,[WgRef1 WgRef2]);
[Kr_Dietro, Hi_Dietro, Hr_Dietro]=wvrefVer2(h1,Delta,DatiRiflessione,fs,FileWg, [Data 'Wg'
num2str(WgRef1) 'And' num2str(WgRef2)],nfft,'Dietro');

pluto=fopen(['DatiCalibrati\ ' FileWg '-Riflessione.dat'],'w');
fprintf(pluto,%%Hi_allaPala[cm] Hr_allaPala[cm] kr_allaPala Hi_Davanti[cm] Hr_Davanti[cm]
kr_Davanti Hi_Dietro[cm] Hr_Dietro[cm] kr_Dietro\r\n');
fprintf(pluto,'%4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f\r\n',...
%4.2f %4.2f %4.2f\r\n',...
[Hi_allaPala Hr_allaPala Kr_allaPala Hi_Davanti Hr_Davanti Kr_Davanti Hi_Dietro Hr_Dietro
Kr_Dietro]);
fclose(pluto)

cd ../FileMatLabPerAnalisiDati\

```

## Bibliografia

Benassai E. - *Soluzioni innovative per approdi turistici nell'area costiera del golfo di Taranto* - Relazione per la Conferenza operativa tra le regioni Basilicata - Calabria - Puglia, sul tema: "Lo sviluppo della nautica da diporto nello Ionio", pp. 5-25, 1980.

Blumberg G.P. - *Floating breakwater physical model testing for marina applications* - Bulletin AIPCN n°63, pp. 5-13, 1988.

Crema I. - *Studio sperimentale su modello fisico di ipotesi progettuali per la riqualificazione del sistema di difesa costiera di Marina di Pisa* - Tesi di laurea, Università di Pisa, pp. 38-48, 2008.

De Bonis P., Fattoruso G., Onori F., Pagano A., Pasanisi F., Peloso A., Regina P., Tebano C. & Zarlenga F. (ENEA; CAT) - *Elementi di modellistica fisica* - La dinamica costiera modellistica fisico-matematica, analisi del territorio, il supporto G.I.S. e la strumentazione in uso. Lo stato dell'arte, pp. 52-63, 2001.

Di Pace P. - *Riflessione di onde regolari in presenza di opere a gettata* - Tesi di dottorato, Università degli studi di Napoli Federico II, pp. 24-29, 2006.

Dong G.H., Zheng Y.N., Li Y.C., Teng B., Guan C.T., Lin D.F. - *Experiments on wave transmission coefficients of floating breakwaters* - Ocean Engineering, pp. 931-938, 2008.

Franco L. - *Nuovi sistemi per la difesa dei litorali* - Dispense del corso Protezione dei litorali, Università degli studi Roma tre, pp. 1-23, 1992.

Gaithwaite J. - *Practical aspects of floating breakwater design* - Bulletin AIPCN n°63, pp. 31-49, 1988.

Goda Y., Suzuki Y. - *Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments* - Proceedings of 15th Conference on Coastal Engineering, pp.828-845, 1976.

Landel E., Prudhomme P. - *Présentation des atténuateurs de houle et des résultats obtenus dans le cadre des deux premières années du projet EUREKA EU 394 qui leur est consacré* - Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Nantes, pp 154-168, 1992.

Manzone J.M. - *Ouvrages Maritimes écologiques et perspectives d'aménagements littoraux* - Actes du colloque international sur l'écologie et la protection du littoral méditerranéen, Commission Ramoge, pp. 60-71, 1992.

Martinelli L., Ruol P., Zanuttigh B. - *Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts* - Applied Ocean Research, pp. 199-207, 2008.

McCartney B.L. - *Floating breakwater design* - Journal of water way, port, coastal and ocean engineering, pp. 304-318, 1985.

Md. Ataur Rahman, Norimi Mizutani, Koji Kawasaki - *Numerical modeling of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwater* - Coastal Engineering, pp. 799-815, 2006.

Mizutani N., Md Ataur Rahman - *Performance of submerged floating breakwater supported by perforated plates under wave action and its dynamics* - Marine structures journal, pp. 329-341, 2004.

Murali K., Mani J.S. - *Performance of cage floating breakwater* - Journal of water way, port, coastal and ocean engineering, pp. 1997.

Ruol P., Martinelli L., Zanuttigh B. - *Loads on floating breakwaters: effect of layout under irregular waves* - Coastal Engineering, pp. 3875-3887, 2008.

Sannasiraj S.A., Sundar V., Sundaravadivelu R. - *Mooring forces and motion responses pontoon-type floating breakwaters* - Ocean Engineering, pp. 27-48, 1998.

Sardi L. - *Studio su modello fisico del processo di trasmissione di moto ondoso a tergo di barriere sommerse caratterizzate da differenti larghezze della cresta* - Tesi di laurea, Università di Pisa, pp. 19-31, 2008.

Werner G. - *Experiences with floating breakwaters a literature review* - Bulletin AIPCN n°63, pp. 23-30, 1988.