

PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



PROGETTO DEFINITIVO ALTERNATIVE AI SITI DI DEPOSITO

(Richieste CTVA del 22/12/2011 Prot. CTVA/2011/4534 e del 16/03/2012 Prot. CTVA/2012/1012)

EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A.
SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A.
COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L.
SACYR S.A.U.
ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD
A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE

IL PROGETTISTA

 SIGMA INGEGNERIA s.r.l.
Via della Libertà 201/A
97143 PALERMO
Tel. 091.8254162 Fax 091.307899
e-mail: sgmanipr@gmail.com
Ing. Fazio Giordano Direttore Tecnico

(Dott. Ing. F. Giordano)



Ing. E. Pagani
Ordine Ing. Milano n°15408

IL CONTRAENTE GENERALE
PROJECT MANAGER
(Ing. P.P. Marcheselli)

STRETTO DI MESSINA
Direttore Generale
Ing. G. Fiammenghi

STRETTO DI MESSINA
Amministratore Delegato
Dott. P. Ciucci

Firmato digitalmente ai sensi dell' "Art.21 del D.Lgs. 82/2005"

CZV0930_F0

Unità Funzionale COLLEGAMENTI VERSANTE SICILIA
Tipo di sistema CANTIERI
Raggruppamento di opere/attività RIPASCIMENTO
Opera - tratto d'opera - parte d'opera ELEMENTI DI CARATTERE GENERALE
Titolo del documento PROVE SU MODELLO FISICO OPERA SOFFOLTA DI PRESIDIO IN GEOCONTENITORI

CODICE

C G 0 0 0 0 P R G V S C Z C 3 G O 0 0 0 0 0 2 F 0

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	31/05/2012	EMISSIONE FINALE	DIC MESSINA	C. FARACI	F. GIORDANO



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MESSINA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

CONVENZIONE TRA LA SOCIETÀ' EUROLINK S.C.p.A. E IL DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA CIVILE DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MESSINA



*Modellazione fisica di una barriera soffolta realizzata mediante sacchi in
geotessuto riempiti di sabbia: effetti della presenza della barriera
sull'idrodinamica e stabilità dell'opera*

RELAZIONE

Il Responsabile Scientifico
(Dott. Ing. Carla Faraci)

Il Direttore del DIC
(Prof. Ing. Antonino D'Andrea)

Messina, 31 05 2012

Indice

Indice	2
Elenco delle Figure	5
Elenco delle Tabelle	9
Premessa	11
1. Introduzione.....	13
2. Fonti di informazione.....	16
3. Impiego di geosintetici per la realizzazione di opere di difesa costiera.....	17
3.1. Generalità.....	17
3.2. Proprietà dei geotessuti per la difesa costiera	17
3.3. Applicazione di GSC in opere di difesa costiera	18
3.4. Stabilità idraulica dei sacchi in geotessuto.....	20
4. I fenomeni di riflessione e trasmissione del moto ondoso	22
4.1. Generalità.....	22
4.2. Il fenomeno della riflessione.....	22
4.2.1. Il fenomeno della riflessione su un ostacolo verticale.....	23
4.2.2. Il fenomeno della riflessione su una parete inclinata.....	25
4.2.3. Effetti del processo di frangimento sul fenomeno della riflessione	28
4.3. La trasmissione del moto ondoso	32
4.3.1. Strutture a cresta bassa e strutture soffolte	32

4.3.2.	Trasmissione attraverso strutture permeabili	33
4.3.3.	Formule per la stima del coefficiente di trasmissione	35
5.	Studio della riflessione e della trasmissione del moto ondoso attraverso la modellazione fisica di laboratorio	38
5.1.	Generalità	38
5.2.	Metodo per la stima del coefficiente di riflessione in laboratorio	39
6.	Descrizione delle condizioni meteomarine in situ	45
6.1.	Generalità	45
6.2.	Caratteristiche del moto ondoso al largo	46
6.3.	Previsione di eventi estremi al largo	47
6.4.	Trasformazione del moto ondoso dal largo alla riva	48
7.	Modellazione fisica dell'opera di presidio dell'intervento di ripascimento	50
7.1.	Generalità	50
7.2.	Criteri di similitudine	51
7.2.1.	Criteri di similitudine nell'Ingegneria Marittimo-Costiera	54
7.2.2.	Criteri di similitudine adottati nel presente studio.....	59
7.3.	Scelta del rapporto geometrico di scala del modello	62
7.4.	Descrizione delle caratteristiche del modello fisico realizzato	63
8.	Prove sperimentali condotte	67
8.1.	Generalità	67
8.2.	Descrizione dell'apparato sperimentale	67
8.3.	Preparazione del modello	69

8.4.	Procedura sperimentale	82
8.4.1.	Operazioni preliminari	83
8.4.2.	Acquisizione dei dati.....	83
8.4.3.	Elaborazione ed analisi dei risultati	85
8.5.	Prove effettuate.....	86
9.	Analisi dei risultati.....	94
9.1.	Generalità.....	94
9.2.	Analisi della riflessione indotta dalla struttura	94
9.3.	Analisi della trasmissione attraverso la struttura	97
9.4.	Analisi della stabilità della struttura.....	101
10.	Conclusioni	107
	Bibliografia	110

Elenco delle Figure

Figura 3.1 Vita utile dei sacchi in geotessuto (<i>Oumeraci e Recio 2009</i>). ...	18
Figura 3.2 Esempio di realizzazione di difesa aderente mediante sacchi in geotessuto: isola di Sylt, Germania (Sylt Press [©]).	19
Figura 4.1 Schematizzazione del problema della riflessione di un'onda che incide su di un ostacolo verticale.	23
Figura 4.2 Schema adottato per lo studio della riflessione provocata da una parete impermeabile inclinata.	26
Figura 4.3 Andamento dell'angolo limite per cui si realizza una riflessione totale dovuta ad una parete inclinata.	27
Figura 4.4 Definizione dei coefficienti di permeabilità utilizzati nella formula di <i>Postma (1989)</i> sulla base dei risultati sperimentali di <i>Van der Meer (1988)</i> (<i>Coastal Engineering Manual, 2003</i>).	31
Figura 4.5 Esempi di riflessione da massi piazzati davanti a una parete verticale. (<i>Coastal Engineering Manual, 2003</i>)	31
Figura 4.6 Influenza dell'altezza d'onda sul coefficiente di trasmissione (<i>Daemen, 1991</i>)	33
Figura 4.7 Coefficiente di trasmissione in funzione dell'altezza relativa della cresta della struttura (<i>van der Meer, 1990</i>)	35
Figura 4.8 Coefficiente di trasmissione misurato e calcolato secondo <i>Daemen (1991)</i>	36
Figura 4.9 Coefficiente di trasmissione misurato e calcolato per strutture permeabili secondo <i>d'Angremond et al. (1996)</i>	37
Figura 4.10 Coefficiente di trasmissione misurato e calcolato per strutture permeabili secondo <i>d'Angremond et al. (1996)</i>	37

Figura 5.1 Schema della soluzione spettrale delle onde incidenti e riflesse. .	42
Figura 6.1 Percentuale degli eventi per classe di altezza d'onda significativa e per classe di direzione di provenienza determinate al largo del paraggio in esame	46
Figura 7.1 Posizionamento e sezione trasversale dei sacchi di geotessuto per la realizzazione della barriera soffolta: (a) primo strato; (b) secondo strato; (c) terzo strato.	65
Figura 7.2 Confronto tra la sezione dell'opera originale e quella modificata.	66
Figura 8.1 Sezione dell'apparecchiatura sperimentale utilizzata.	69
Figura 8.2 Vista del canale prima dell'innalzamento del fondo.	70
Figura 8.3 Innalzamento del fondo del canale mediante uno strato di polistirolo e un doppio strato di mattoni di asfalto pieni.	71
Figura 8.4 Diverse fasi realizzative dell'innalzamento del fondo: disposizione del geotessuto e della sabbia.	72
Figura 8.5 Sabbia di quarzo impiegata per la sperimentazione condotta.	73
Figura 8.6 Curva granulometrica della sabbia di quarzo impiegata per la sperimentazione condotta.	73
Figura 8.7 Preparazione del profilo di spiaggia: posizionamento di guide laterali per la sagomatura del profilo.	74
Figura 8.8 Modello di sacco in geotessuto.	75
Figura 8.9 Dimensioni del modello di sacco in geotessuto: (a) b_{ci} ; (b) l_{ci} ; (c) h_c .	75
Figura 8.10 Posa del primo strato della struttura.	76
Figura 8.11 Posa del secondo strato della struttura.	76

Figura 8.12	Posa del terzo strato della struttura.	77
Figura 8.13	Visione d'insieme del modello fisico.....	78
Figura 8.14	Sezione trasversale della struttura.	79
Figura 8.15	Dimensioni del modello di sacco in geotessuto modificato: (a) b_{c_i} ; (b) l_{c_i} ; (c) h_c	80
Figura 8.16	Posa del primo strato della struttura modificata.....	80
Figura 8.17	Posa del secondo strato della struttura modificata.....	81
Figura 8.18	Posa del terzo strato della struttura modificata.....	81
Figura 8.19	Visione d'insieme del modello fisico con la struttura modificata.	82
Figura 8.20	Segnali acquisiti durante la prova el_021: (a) sonda s1; (b) sonda s2; (c) sonda s3.	92
Figura 8.21	Spettri d'onda per la prova el_021 (a) spettro d'onda incidente; (b) spettro d'onda riflesso; (c) spettro d'onda trasmesso.....	92
Figura 8.22	Segnale Segnali acquisiti durante la prova el_043: (a) sonda s1; (b) sonda s2; (c) sonda s3.....	93
Figura 8.23	Spettri d'onda per la prova el_043 (a) spettro d'onda incidente; (b) spettro d'onda riflesso; (c) spettro d'onda trasmesso.....	93
Figura 9.1	Coefficienti di riflessione al variare del periodo in presenza di onde regolari.	95
Figura 9.2	Coefficienti di riflessione al variare del periodo in presenza di onde irregolari.	95
Figura 9.3	Coefficienti di riflessione al variare dell'altezza d'onda incidente in presenza di onde regolari.	96

Figura 9.4	Coefficienti di riflessione al variare dell'altezza d'onda incidente in presenza di onde irregolari.....	97
Figura 9.5	Coefficienti di trasmissione al variare dell'altezza d'onda in presenza di onde regolari.	98
Figura 9.6	Coefficienti di trasmissione al variare dell'altezza d'onda in presenza di onde irregolari.	99
Figura 9.7	Confronto tra i coefficienti di trasmissione in presenza di onde regolari e la formula proposta da <i>Van der Meer (1990)</i>	100
Figura 9.8	Confronto tra i coefficienti di trasmissione in presenza di onde irregolari e la formula proposta da <i>Van der Meer (1990)</i>	100
Figura 9.9	Opera di presidio dopo l'esecuzione della prova el_018 (vista dall'alto).	101
Figura 9.10	Opera di presidio dopo l'esecuzione della prova el_018 (sezione).	102
Figura 9.11	Opera di presidio dopo l'esecuzione della prova el_073 (sezione).	103
Figura 9.12	Opera di presidio dopo l'esecuzione della prova elm_018....	104
Figura 9.13	Opera di presidio dopo l'esecuzione della prova elm_073....	104
Figura 9.14	Sezione dell'opera di presidio dopo l'esecuzione della prova elm_062 in cui si è osservato un notevole scavo al piede.	105
Figura 9.15	Profilo trasversale dopo l'esecuzione della prova elm_018...	105
Figura 9.16	Profilo trasversale dopo l'esecuzione della prova elm_073...	106
Figura 9.17	Profilo trasversale dopo l'esecuzione della prova elm_062...	106

Elenco delle Tabelle

Tabella 4.I Valori del coefficiente d'attrito consigliati per "correggere" il coefficiente di riflessione.	28
Tabella 4.II Tipo di frangimento in funzione del parametro di Iribarren (<i>Okazaki e Sunamura, 1991</i>).	29
Tabella 4.III Valori del coefficiente di permeabilità P.	34
Tabella 6.1 Valutazione dell'altezza d'onda per fissati tempi di ritorno: Direzione di provenienza 292.5°N.	47
Tabella 6.2 Valutazione dell'altezza d'onda per fissati tempi di ritorno: Direzione di provenienza al largo 292.5°N – Punto 3.	48
Tabella 6.3 Valutazione dell'altezza d'onda per fissati tempi di ritorno: Direzione di provenienza al largo 292.5°N – Punto 6.	49
Tabella 7.I Caratteristiche geometriche, in scala di prototipo e di modello, dell'opera di presidio dell'intervento di ripascimento nella configurazione originale e modificata.	64
Tabella 8.I Intervallo di variabilità dei parametri idrodinamici di controllo a scala del modello fisico e di prototipo.....	87
Tabella 8.II Caratteristiche idrodinamiche delle prove condotte con onde regolari (in rosso le prove che hanno dato esito negativo in termini di stabilità).	89
Tabella 8.III Caratteristiche idrodinamiche delle prove condotte con onde random (in rosso le prove che hanno dato esito negativo in termini di stabilità).	90
Tabella 8.IV Variazioni morfodinamiche in prossimità della struttura per le prove di stabilità condotte.	91

Premessa

La società EUROLINK SCpA, incaricata della progettazione del Collegamento Stabile dello Stretto di Messina, nell'ambito del progetto definitivo ha individuato la possibilità di utilizzare parte dei sedimenti provenienti dagli scavi previsti per la realizzazione delle opere di collegamento al Ponte sul versante siciliano ai fini del ripascimento di alcuni litorali tirrenici ricadenti nella Provincia di Messina e, più specificamente, quelli compresi tra la foce del Torrente Niceto e la foce del torrente Calvaruso.

Gli interventi di ripascimento in progetto, inizialmente ipotizzati come interventi liberi, sono stati in seguito modificati e pensati come ripascimenti protetti da barriere soffolte al piede, realizzate queste ultime mediante sacchi in geotessuto riempiti di sabbia. Questa soluzione, rispetto alle più tradizionali protezioni al piede mediante scogliere in massi, ha il vantaggio di limitare notevolmente i costi oltre che di consentire l'impiego dei sedimenti provenienti dagli scavi delle opere di collegamento al Ponte anche per il riempimento dei sacchi.

In tale contesto, Eurolink SCpA ha chiesto la collaborazione del Dipartimento di Ingegneria Civile (DIC) dell'Università degli Studi di Messina allo scopo di valutare gli effetti della struttura in sacchi di geotessuto riempiti di sabbia sull'idrodinamica a tergo dell'opera. Più in particolare, è stato richiesto al DIC di condurre una campagna sperimentale mediante l'esecuzione di prove su modello fisico per valutare l'entità della trasmissione del moto ondoso attraverso l'opera di presidio del ripascimento in progetto. Nell'ambito di detta campagna oltre a valutare i coefficienti di trasmissione del moto ondoso si è focalizzata l'attenzione anche sulla stabilità della struttura stessa nei confronti delle onde energeticamente più importanti, allo scopo di valutare se le dimensioni dei sacchi in geotessuto fossero sufficienti a garantire la capacità dell'opera di resistere ai marosi con tempi di ritorno elevati.

La presente relazione descrive i risultati di detta campagna sperimentale volta da un lato a determinare l'efficacia della barriera ai fini dell'attenuazione del moto ondoso sottocosta, e quindi di una maggiore vita utile del ripascimento, dall'altro a valutarne la stabilità degli elementi costituenti la barriera stessa nei confronti dell'azione delle onde energeticamente più gravose.

1. Introduzione

Al fine di ridurre la richiesta di materiale per il ripascimento ed incrementarne al tempo stesso la stabilità, specialmente laddove le pendenze dei fondali risultano elevate, è possibile realizzare interventi di ripascimento protetto tramite la costruzione di barriere di protezione al piede del ripascimento, che interrompano il profilo di spiaggia. L'idea che sta alla base di questo tipo di soluzione risiede nella riproduzione di un profilo di spiaggia fino a una opportuna profondità, alla quale il profilo di spiaggia interseca una struttura di contenimento al piede.

Le barriere di protezione assolvono a diverse funzioni: smorzano l'energia del moto ondoso incidente, e di conseguenza delle correnti responsabili del trasporto solido; intrappolano il sedimento, non consentendogli di disperdersi al largo per effetto delle correnti di ritorno; permettono di ridurre i volumi di sabbia da sversare, poiché possono essere pensate come elementi di interruzione del profilo che la spiaggia raggiungerebbe in condizioni di equilibrio; consentono, come già detto, di ridurre significativamente la necessità di interventi periodici di ripascimento.

Nonostante la popolarità di una tale soluzione ingegneristica, poca attenzione è stata rivolta in letteratura all'analisi idro-morfodinamica dei ripascimenti protetti, mentre d'altro canto esistono numerosi studi sia sull'evoluzione dei profili di spiaggia (*Dean, 1977; Dean, 1991; Houston, 1996*), sia sull'efficacia di barriere soffolte (*Van der Meer, 1988; Vidal et al., 1992; Burcharth et al., 2006*).

E' opportuno fra l'altro sottolineare come la quota della cresta della barriera sommersa (dell'ordine di $1 \div 1.5$ m) può determinare un'efficacia ridotta in termini di protezione del litorale retrostante dal moto ondoso rispetto a barriere frangiflutti soffolte propriamente dette (ovvero con livelli di sommergenza dell'ordine di $0.5 \div 1$ m). E' pertanto utile verificare attraverso la

modellazione fisica se l'opera garantisce un'adeguata protezione della spiaggia nei confronti del moto ondoso incidente.

Tra gli studi di laboratorio che si sono occupati del problema è opportuno citare l'analisi sperimentale di *Sorensen e Beil (1988)*, che hanno indagato la risposta all'attacco di mareggiate di un profilo di spiaggia, con pendenza iniziale pari a 1:20, sia in assenza che in presenza di una barriera sommersa di protezione, localizzata a diverse profondità. Questi autori hanno mostrato come l'efficacia della struttura di protezione aumenti considerevolmente al diminuire del valore del livello di sommergenza. *Dette et al. (2002)* indagando gli effetti di una struttura di protezione sommersa del profilo di spiaggia, avente livello di sommergenza variabile tra 0.85 m e 1.6 m, hanno osservato come la presenza della barriera consenta di ridurre sostanzialmente il trasporto off-shore di sabbia al di là della barriera.

Gli studi presenti in letteratura sono particolarmente indirizzati alla ottimizzazione dei parametri di progetto dell'intervento di ripascimento protetto, quale per esempio l'ubicazione della barriera rispetto alla linea di riva.

Rimangono quindi aperte alcune questioni, come ad esempio quale sia la risposta in termini di stabilità della struttura sommersa; quali siano i principali meccanismi di scavo alla base e a tergo della struttura; quale sia l'efficienza di una barriera nei confronti dell'attenuazione del moto ondoso. E ciò ancor più quando la barriera soffolta è "non convenzionale" ovvero non è realizzata in massi ma ad esempio, come nel caso in esame, attraverso sacchi in geotessuto riempiti di sabbia.

Per poter rispondere ad alcune delle sopra menzionate questioni, è stata condotta la presente campagna sperimentale presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Messina.

La presente relazione sintetizza i risultati ottenuti nell'ambito dell'indagine sperimentale, volta a valutare la trasmissione del moto ondoso attraverso una struttura di contenimento di un ripascimento.

Il modello, in scala 1:50, riproduce in particolare il progetto di ripascimento che si prevede di realizzare lungo il tratto di litorale tirrenico della Provincia di Messina compreso tra la foce del Torrente Niceto e la foce del torrente Calvaruso.

La relazione è così organizzata: nel Capitolo 2 sono riportate le fonti di informazione utilizzate a supporto del presente studio; il Capitolo 3 introduce all'impiego dei materiali geosintetici nell'ambito delle opere di protezione costiera; il Capitolo 4 inquadra teoricamente i problemi di riflessione e trasmissione del moto ondoso, il Capitolo 5 definisce i criteri per la valutazione della riflessione e della trasmissione del moto ondoso attraverso la modellazione di laboratorio; il Capitolo 6 inquadra il tratto di litorale e le condizioni meteromarine in situ. Il Capitolo 7 definisce i criteri da rispettare per riprodurre in scala un'opera di difesa costiera con particolare riferimento al caso in esame. Il Capitolo 8 riporta la descrizione dell'apparato sperimentale e della procedura seguita nell'esecuzione delle prove, nonché gli esperimenti condotti. Il Capitolo 9 è dedicato all'analisi dei risultati ottenuti, e infine il Capitolo 10 riporta alcune considerazioni conclusive.

2. Fonti di informazione

Il presente studio è stato redatto sulla base delle informazioni fornite dal Committente e più in particolare dal progetto definitivo del Collegamento Stabile dello Stretto di Messina e dagli studi redatti a supporto dello stesso.

Più in particolare, per il dimensionamento dei sacchi in geotessuto si è fatto riferimento alla relazione di dimensionamento e verifica dei sacchi fornita dalla società Sigma Ingegneria srl che sta curando il progetto dei ripascimenti protetti lungo il litorale tirrenico.

Nell'ambito di detto studio sono state indicate le dimensioni da attribuire a ciascun sacco, pari a 6 m nella direzione di propagazione del moto ondoso, 3 m nella direzione trasversale alla precedente, e 1.2 m in altezza. Come verrà meglio dettagliato nel corso della presente relazione, si è reso necessario portare da 6 a 9 m la lunghezza di alcuni dei sacchi che costituiscono la barriera per garantire la stabilità della struttura. Sono state fornite altresì le indicazioni relative alla posa dei singoli strati costituenti la barriera. Per maggiori dettagli si rimanda al Capitolo 7.

Per quanto riguarda le condizioni meteomarine al largo e sottocosta, sono stati utilizzati gli studi prodotti dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Catania, ed in particolare lo studio idraulico marittimo per il paraggio definito precedentemente.

I risultati di detto studio, opportunamente riportati in scala di modello, hanno rappresentato le condizioni meteomarine in ingresso alle simulazioni condotte sul modello fisico. Maggiori dettagli sono riportati nel Capitolo 6.

3. Impiego di geosintetici per la realizzazione di opere di difesa costiera

3.1. Generalità

I cambiamenti climatici e le loro conseguenze in termini di erosione costiera e rischio idraulico rendono sempre più impellente il problema della difesa dei litorali dall'attacco del moto ondoso. E ancor più attuale è la ricerca di materiali e soluzioni che affianchino una maggiore versatilità con una economia di scala che renda competitivo l'impiego di dette soluzioni. In tale ottica può essere inquadrato l'utilizzo dei geosintetici, geotessuti e geomembrane per la realizzazione di opere di difesa costiere morbide, ovvero deformabili dall'azione del moto ondoso, con costi contenuti, soprattutto se confrontati con le equivalenti opere di difesa rigide in massi. Tale soluzione prevede la realizzazione di sacchi di geotessuto, riempiti di sabbia (Geotextile Sand Containers o GSC nella letteratura anglosassone), oggi impiegati utilmente per la costruzione di pennelli, barriere emerse o soffolte, frangiflutti, rafforzamento di dune, protezione al piede, etc.

Il presente capitolo descrive alcune delle peculiarità dei GCS con particolare riferimento al loro impiego per la realizzazione di barriere soffolte poste a protezione di un ripascimento.

3.2. Proprietà dei geotessuti per la difesa costiera

I più utilizzati geotessuti per la difesa costiera sono realizzati in polipropilene, poliestere e polietilene. Tali materiali presentano una elevata deformabilità, che consente ai sacchi una volta riempiti di potersi adattare e risagomarsi in funzione delle caratteristiche del sottofondo su cui vengono posizionati. Inoltre sono caratterizzati da una buona permeabilità idraulica, che

è funzione del loro spessore, richiesta per consentire un rapido drenaggio nel caso in cui essi siano sottoposti ad esempio a cicli mareali. Una caratteristica assai importante che è richiesta ai sacchi in geotessuto è la resistenza all'abrasione, specialmente qualora l'opera debba essere collocata in corrispondenza della zona di frangimento, oltre che la resistenza all'attacco di agenti microbiologici e chimici, all'ossidazione, alle radiazioni ultraviolette.

Riguardo alla durabilità dei geotessuti, trattandosi di materiali relativamente nuovi specie per le applicazioni di difesa costiera, non sono disponibili dati sperimentali certi relativamente alla vita utile del materiale. Nonostante le estrapolazioni suggeriscano che si possa assumere una durata dell'ordine dei 100 anni, ragionevolmente è possibile assumere una vita utile di circa 20-25 anni (Oumeraci e Recio, 2009). A titolo d'esempio si veda la Figura 3.1.

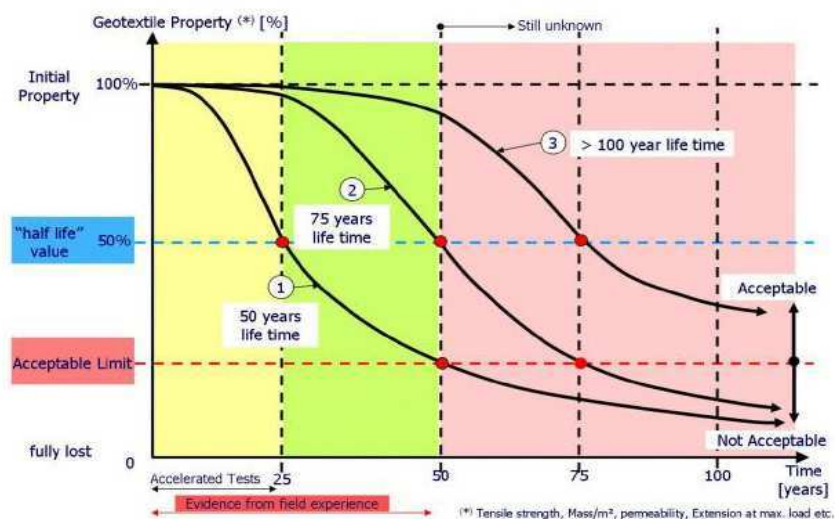


Figura 3.1 Vita utile dei sacchi in geotessuto (Oumeraci e Recio 2009).

3.3. Applicazione di GSC in opere di difesa costiera

Come già accennato, i sacchi in geotessuto hanno trovato un largo impiego nella protezione dei litorali, principalmente per la loro versatilità e i costi più contenuti.

Uno dei primi esempi di uso di GSC per la difesa costiera è associabile alla realizzazione di rivestimenti e opere di protezione delle dune costiere. In tal caso i sacchi di geotessuto vengono disposti lungo la spiaggia per prevenire l'erosione e stabilizzare la duna durante lo storm surge. In Figura 3.2 è mostrata l'applicazione dei GSC ai fini della realizzazione di una difesa aderente a protezione della duna costiera nell'isola di Sylt, in Germania.



Figura 3.2 Esempio di realizzazione di difesa aderente mediante sacchi in geotessuto: isola di Sylt, Germania (Sylt Press[©]).

Anche i pennelli, emersi e sommersi vengono sovente realizzati con sacchi di geotessuto. Spesso in tal caso i sacchi non vengono coperti e sono dunque esposti all'azione diretta del moto ondoso, delle radiazioni solari, dell'abrasione; si rende necessario dunque un doppio strato di geotessuto, di modo che lo strato più interno garantisca la robustezza, quello più esterno la durabilità e la capacità antiabrasiva. In taluni casi è possibile prevedere una tintura che adegui il sacco all'ambiente costiero in cui va ad inserirsi.

Inoltre i sacchi di geotessuto possono essere utilmente adottati nella realizzazione dei nuclei delle strutture, emerse o soffolte, in massi; ciò solitamente avviene perché non c'è disponibilità di materiale roccioso o i costi di questo sono troppo elevati, per evitare l'infiltrazione di sedimenti attraverso la struttura, per ridurre la trasmissione del moto ondoso a tergo della struttura

stessa, nonché per migliorare la stabilità nei confronti dell'erosione del nucleo e dei carichi sismici. D'altro canto effetti collaterali dell'impiego di GSC prevedono un incremento del set up e della risalita del moto ondoso sulla struttura, un aumento della tracimazione e della riflessione.

Non sono invece largamente diffuse strutture emerse o soffolte realizzate interamente con sacchi di geotessuto.

3.4. Stabilità idraulica dei sacchi in geotessuto

A seconda delle forze agenti e dei meccanismi di degradazione, i sacchi in geotessuto possono entrare in crisi per diverse cause:

- i) Instabilità idraulica;
- ii) cedimenti geotecnici;
- iii) degrado del geotessuto.

Con riferimento alla prima ragione di crisi, esistono alcune relazioni per valutare la stabilità dei sacchi in geotessuto, ottenute interpolando i risultati ottenuti a seguito di dettagliate campagne sperimentali.

Per i sacchi disposti lungo il paramento inclinato, l'azione dell'onda può portare allo scalzamento degli stessi; per la verifica della stabilità idraulica viene adattata la formula di Hudson valida per elementi lapidei:

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho} - 1\right) D} = \frac{C_w}{\sqrt{\xi}} \quad (3.1)$$

Essendo ρ_E la densità dei sacchi ($\rho_E = (1-n)\rho_s + n\rho$), e D la dimensione caratteristica del sacco, che, esplicitando il parametro di Irribarren e dunque la pendenza della struttura α , assume la forma:

$$D = \frac{H_s^{3/4} T_p^{1/2} (\tan \alpha)^{1/2}}{C_w \left(\frac{2\pi}{d} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_E}{\rho} - 1 \right)} \quad (3.2)$$

con C_w un parametro empirico pari a 2.75. Sulla base di tale relazione è possibile ricavare la lunghezza del sacco l_c :

$$l_c = \frac{D}{\sin \alpha} = \frac{H_s^{3/4} T_p^{1/2}}{C_w \left(\frac{2\pi}{d} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_E}{\rho} - 1 \right) \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{2}}} \quad (3.3)$$

Per quanto riguarda l'elemento posto sulla cresta della struttura, il cedimento può avvenire o per sollevamento durante il passaggio della cresta dell'onda, con un conseguente spostamento verso riva, o per scalzamento come nel caso precedente. Pertanto è lecito aspettarsi che la stabilità degli elementi disposti lungo la cresta sia più critica di quella degli elementi disposti lungo il paramento inclinato. In tal caso assume notevole importanza l'altezza (o la sommergenza) della cresta rispetto al livello medio del mare. Si utilizza pertanto la seguente relazione di stabilità:

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho} - 1 \right) D} = 0.79 + 0.09 \frac{R_c}{H_s} \quad (3.4)$$

E quindi:

$$l_c = \frac{D}{\sin \alpha} = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho} - 1 \right) \left(0.079 + 0.09 \frac{R_c}{H_s} \right) \sin \alpha} \quad (3.5)$$

Assume inoltre una importanza significativa ai fini della valutazione della stabilità la deformazione del sacco sotto l'azione di onde più gravose, nonché dello spostamento del materiale solido all'interno dei sacchi: ciò infatti comporta una riduzione dell'area di contatto tra i sacchi ed un aumento delle superfici esposte alle azioni di sollevamento e trascinamento esercitate dall'onda.

4. I fenomeni di riflessione e trasmissione del moto ondoso

4.1. Generalità

Quando un'onda, propagandosi dal largo verso la riva, incontra un ostacolo, come ad esempio una barriera emersa o soffolta, parte dell'energia ad essa associata verrà riflessa, con la conseguente generazione di un'onda con altezza H_r che si propaga in verso opposto a quella incidente H_i . Parte dell'energia restante verrà trasmessa per tracimazione o per trasmissione attraverso la struttura. In tal caso si forma uno stato di agitazione ondosa di altezza pari ad H_t a tergo della struttura. L'aliquota di energia che non viene né riflessa né trasmessa è dissipata attraverso vari processi che hanno luogo in prossimità dell'opera. In questo capitolo si vuole fornire un inquadramento generale dei fenomeni di riflessione e di trasmissione del moto ondoso, con particolare riferimento a quanto accade in presenza di una barriera soffolta.

4.2. Il fenomeno della riflessione

La riflessione di un'onda è totale solo nel caso teorico di una parete perfettamente riflettente. In questo caso si ha che l'altezza dell'onda riflessa H_r risulta esattamente uguale a quella dell'onda incidente H_i . In presenza di pareti inclinate o permeabili si può ottenere una riflessione parziale descritta tramite il coefficiente di riflessione K_r , definito come:

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (4.1)$$

in cui H_i è l'altezza dell'onda incidente e H_r è l'altezza dell'onda riflessa. Appare evidente come K_r sia sempre minore di 1.

Ai fini di un inquadramento generale del problema e di un'agevole interpretazione dei risultati sperimentali acquisiti, nel seguito del Capitolo verrà

brevemente illustrato il processo di riflessione con riferimento non soltanto alla fisica del problema, ma anche alla sua trattazione teorica, basata sull'applicazione della teoria lineare del moto ondoso. In particolare, verranno presentati separatamente i casi di riflessione totale su parete verticale e di riflessione parziale su parete inclinata o su ammasso poroso.

4.2.1. Il fenomeno della riflessione su un ostacolo verticale

Lo studio del campo di moto generato da un'onda incidente su di un ostacolo verticale totalmente riflettente è interessante in quanto corrisponde a quanto accade in presenza di una parete verticale impermeabile.

Per semplicità si analizzerà il caso di onda regolare che si propaga su di un fondale non erodibile di profondità h costante. Lo schema concettuale che si può adottare per tale studio è quello riportato in Figura 4.1 in cui è rappresentato lo schema di una vasca per lo studio del campo di moto in presenza di onde. Le onde vengono generate dalla paratoia a ventola che oscilla periodicamente. Le onde così generate iniziano a propagarsi verso l'ostacolo e qui si riflettono.



Figura 4.1 Schematizzazione del problema della riflessione di un'onda che incide su di un ostacolo verticale.

Si adotti un sistema di riferimento con l'asse x giacente sul livello di quiete con origine coincidente con l'ostacolo riflettente (vedere Figura 4.1) e con l'asse z generare onde di piccola ampiezza (per cui risulta ragionevole adottare

la teoria lineare); appare chiaro che dal battitore parte un'onda progressiva caratterizzata da un sopralzo del pelo libero descritto dalla seguente espressione:

$$\eta_i(x,t) = \frac{H_i}{2} \cos(k_i x - \omega_i t) \quad (4.2)$$

con H_i altezza d'onda incidente, k_i numero d'onda dell'onda incidente e ω_i frequenza angolare dell'onda incidente.

A causa della presenza del muro verticale in $x=0$, all'onda incidente si sommerà l'onda riflessa (anch'essa di piccola ampiezza), caratterizzata dal profilo:

$$\eta_r(x,t) = \frac{H_r}{2} \cos(k_r x + \omega_r t + \varepsilon) \quad (4.3)$$

in cui il pedice r fa riferimento alle grandezze relative all'onda riflessa ed ε lo sfasamento tra l'onda incidente e quella riflessa.

Dal momento che il problema viene affrontato adottando un'analisi lineare (equazioni di Stokes al I ordine di approssimazione), risulta chiaro che se η_i e η_r e i rispettivi potenziali di velocità ϕ_i e ϕ_r soddisfano le equazioni che governano il problema, allora anche le loro somme $(\eta_i + \eta_r)$, $(\phi_i + \phi_r)$ saranno soluzioni del problema.

Attraverso opportuni passaggi matematici si ricava che il profilo del pelo libero e la funzione potenziale della velocità risultano rispettivamente essere pari a:

$$\eta(x,t) = H \cos(kx) \cos(\omega t) \quad (4.4)$$

$$\phi(x,z,t) = -gH(\omega)^{-1} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx) \sin(\omega t) \quad (4.5)$$

Ne segue quindi che nel caso di parete verticale impermeabile, il fenomeno della riflessione dà luogo a un'onda risultante ($H=H_i+H_r$) di altezza pari al doppio dell'altezza d'onda incidente, con lo stesso periodo e lo stesso numero

d'onda (ovvero la stessa lunghezza d'onda). Si parla in questo caso di riflessione totale, essendo il coefficiente di riflessione K_r pari a uno.

Noto l'andamento della funzione potenziale della velocità e della pressione, è possibile ricavare la distribuzione di pressione alla parete

$$p = -\rho g z + \rho g H \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(\omega t) \quad (4.6)$$

che permette di calcolare la massima distribuzione istantanea pari a:

$$p = -\rho g z + \rho g H \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \quad (4.7)$$

Quest'ultima può essere riscritta nella forma equivalente (a meno di infinitesimi di ordine H^2):

$$p(z) = \begin{cases} -\rho g z + \rho g H \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} & \text{se } z \leq 0 \\ \rho g (H - z) & \text{se } 0 \leq z \leq H, \end{cases} \quad (4.8)$$

espressione che viene usualmente impiegata per le pratiche applicazioni.

4.2.2. Il fenomeno della riflessione su una parete inclinata

Per il caso in esame risulta interessante richiamare alcuni concetti relativi alla riflessione in parete inclinata.

Con riferimento alla Figura 4.2, si consideri la parete piana inclinata, liscia e impermeabile. Il moto progressivo incidente è tanto più importante quanto maggiore è l'angolo θ di inclinazione della parete rispetto all'orizzontale e quanto minore è la ripidità dell'onda $S_w = H/L$.



Figura 4.2 Schema adottato per lo studio della riflessione provocata da una parete impermeabile inclinata.

In particolare, si può avere la riflessione completa anche con parete inclinata purché θ superi un valore limite θ_L che, secondo Miche (1951), dipende dal parametro adimensionale H_o/gT^2 dove H_o è l'altezza d'onda al largo che è legata all'altezza d'onda locale H (immediatamente *off-shore* la parete) attraverso il processo di *shoaling*. Ovvero:

$$H_o = \frac{H}{K_s} \quad (4.9)$$

con K_s coefficiente di shoaling, espresso come:

$$K_s = \frac{H}{H_o} = \sqrt{\frac{2 \cosh^2(kh)}{2kh + \sinh(2kh)}} \quad (4.10)$$

L'angolo θ_L si ricava invece dalla espressione:

$$\frac{H_o}{gT^2} = \sqrt{\frac{2\theta_L}{\pi} \frac{\sin^2 \theta_L}{2\pi^2}} \quad (4.11)$$

e il suo andamento in funzione del citato parametro adimensionale è riportato nella Figura 4.3.

In definitiva, per $\theta > \theta_L$, $K_r=1$, pertanto la riflessione è totale ed è equivalente a quella provocata da una parete verticale fittizia, la cui posizione (che condiziona la localizzazione dei nodi e degli antinodi) dipende da θ . Per θ

$\theta < \theta_L$, $K_r < 1$, pertanto la riflessione è parziale e il coefficiente di riflessione è espresso dalla seguente relazione:

$$K_r = \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \left(\frac{\sin^2 \theta_L}{2\pi^2} \right) \left(\frac{gT^2}{H_o} \right) \quad (4.12)$$

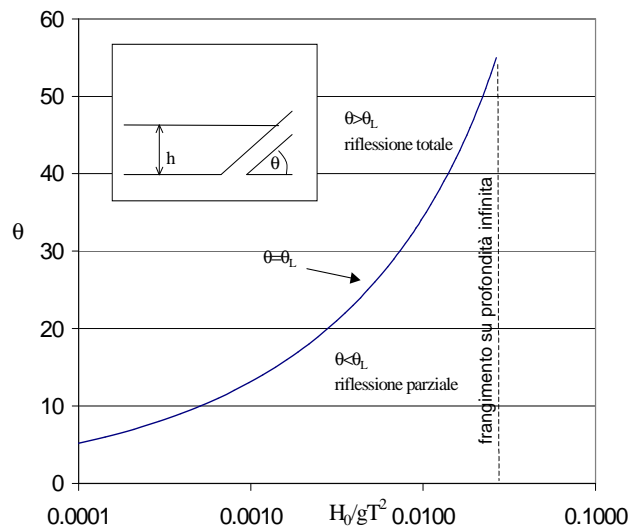


Figura 4.3 Andamento dell'angolo limite per cui si realizza una riflessione totale dovuta ad una parete inclinata.

Dal momento che, usualmente, l'ipotesi di parete liscia ed impermeabile difficilmente può essere adottata, soprattutto se, come nel caso in esame, si ha la presenza di mezzi porosi, si usa moltiplicare il coefficiente di riflessione per un coefficiente d'attrito $\alpha < 1$ che tiene conto del tipo di rivestimento della parete. I valori che usualmente adottati nella pratica progettuale sono quelli riportati nella Tabella 4.I.

Tabella 4.I Valori del coefficiente d'attrito consigliati per "correggere" il coefficiente di riflessione.

Valori consigliati	Caratteristiche della parete
$\alpha = 0.9 \div 1.0$	Pareti rivestite in calcestruzzo
$\alpha = 0.8$	Spiagge in condizioni normali
$\alpha = 0.7 \div 0.8$	Pareti rivestite in pietra
$\alpha = 0.6 \div 0.7$	Scarpate in pietra
$\alpha = 0.5$	Paramenti in blocchi alla rinfusa

4.2.3. Effetti del processo di frangimento sul fenomeno della riflessione

La parete inclinata del paramento delle strutture costiere viene usualmente realizzata per agevolare il frangimento del moto ondoso, ciò consente di dissipare gran parte dell'energia del moto ondoso incidente e di ridurre sia la riflessione che la trasmissione del moto ondoso stesso.

In particolare, al fine di stimare la riduzione del coefficiente di riflessione, mettendo in conto gli effetti del processo di frangimento, sono state proposte sperimentalmente svariate espressioni che mettono in relazione il coefficiente di riflessione K_r con il parametro di Iribarren (surf similarity parameter) introdotto da *Battjes (1974)*, espresso come:

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \quad (4.13)$$

in cui θ è la pendenza dell'ammasso, mentre H e L sono valutate su profondità infinita. Tale parametro consente di identificare il tipo di frangimento che si realizza (vedi Tabella 4.II), ovvero di tipo spilling, plunging, collapsing o surging.

Tabella 4.II Tipo di frangimento in funzione del parametro di Iribarren (*Okazaki e Sunamura, 1991*).

Parametro di Iribarren	Tipo di frangimento
$\xi < 0.5$	Spilling
$0.5 < \xi < 2.5$	Plunging
$2.5 < \xi < 3.7$	Collapsing
$3.7 < \xi$	Surging

In particolare *Battjes (1974)*, nel caso più semplice di una scarpata impermeabile e idraulicamente liscia ha proposto la seguente relazione

$$K_r = \begin{cases} 0.1\xi^2 & 0 < \xi < 3.2 \\ 1 & \xi > 3.2 \end{cases} \quad (4.14)$$

che fu corretta da *Seeling e Ahrens (1981)* come,

$$K_r = \tanh(0.1\xi^2), \quad (4.15)$$

e successivamente da *Seeling (1983)* in

$$K_r = \frac{\xi}{\xi + 5.5} \quad (4.16)$$

Postma (1989), per una scarpata permeabile, sia liscia che scabra, suggerì la seguente relazione

$$K_r = 0.125\xi^{0.73} \quad (4.17)$$

Inoltre *Postma (1989)* propose la seguente formula sulla base di dati sperimentali di *Van der Meer (1988)*, al fine di considerare anche l'effetto della permeabilità P della struttura.

$$K_r = 0.071P^{-0.082} (\cot \theta)^{-0.062} S_w^{-0.46} \quad (4.18)$$

I valori utilizzabili per il coefficiente di permeabilità sono riportati in Figura 4.4 al variare delle caratteristiche della scogliera.

Infine *Sunamura e Okazaki (1996)*, sulla base di numerosi dati sperimentali di letteratura, hanno proposto la seguente relazione

$$K_r = 0.84[1 - \exp(-12.8 \tan \theta)] \tanh(0.11 \xi^{2.4}), \quad (4.19)$$

evidenziando come per frangimento di tipo spilling il coefficiente di riflessione può essere ridotto al valore $K_r=0.1$, mentre aumenta per frangimento di tipo plunging, collapsing e surging, in funzione della pendenza del paramento.

In tutte le formule precedenti, nel caso di onde irregolari, l'altezza dell'onda incidente può essere sostituita con l'altezza d'onda significativa H_s ed il periodo medio T_m o il periodo di picco T_p al posto del periodo.

Tutte le esperienze riguardano il caso in cui non c'è sormonto; qualora si voglia applicarle ad una struttura limitata in altezza ed in lunghezza bisogna verificare che il massimo run-up non ne superi l'altezza.

Inoltre, i dati sperimentali fanno sempre riferimento a strutture in pendenza che si raccordano al fondo; esse sono però probabilmente trasferibili al caso in cui la struttura in pendenza sia interrotta ad una profondità superiore a quella relativa ad acque profonde (cioè quella profondità a cui diventano trascurabili i valori delle velocità indotte dalle onde).

Esistono pochi e confusi risultati per quanto concerne configurazioni più complesse (berma prima della risalita, parete piana verticale dopo la risalita a quota più bassa del massimo run-up, etc). Qualora si decida di ricorrere a queste configurazioni bisogna svolgere prove specifiche su modello fisico.

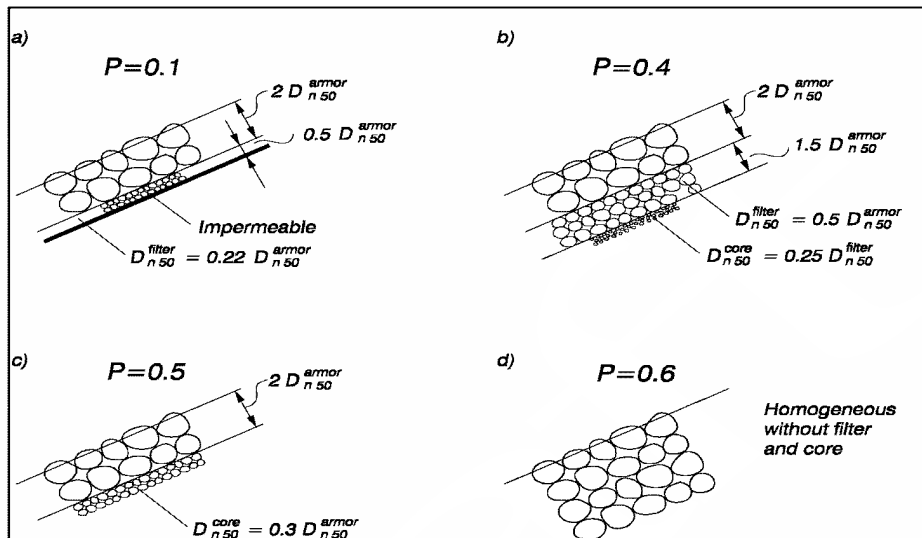


Figura 4.4 Definizione dei coefficienti di permeabilità utilizzati nella formula di Postma (1989) sulla base dei risultati sperimentali di Van der Meer (1988) (Coastal Engineering Manual, 2003).

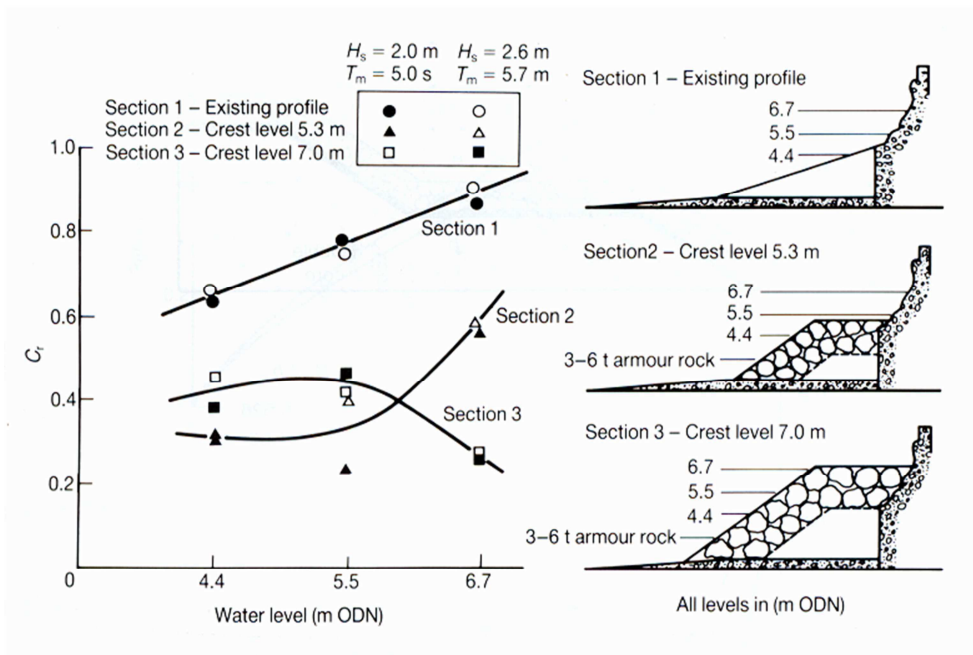


Figura 4.5 Esempi di riflessione da massi piazzati davanti a una parete verticale. (Coastal Engineering Manual, 2003)

4.3. La trasmissione del moto ondoso

La trasmissione del moto ondoso attraverso una struttura genera un'onda trasmessa H_t , il cui rapporto con l'onda incidente H_i prende il nome di coefficiente di trasmissione K_t :

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (4.20)$$

L'altezza d'onda incidente è misurata in corrispondenza della struttura eliminando l'effetto della riflessione. L'altezza d'onda trasmessa viene misurata a tergo della struttura.

Il coefficiente di trasmissione può essere suddiviso in una aliquota che dipende dalla tracimazione ed una causata dalla trasmissione attraverso la struttura. La parte più consistente è tuttavia quella associata alla tracimazione. A tal proposito uno dei parametri più significativi nello studio della trasmissione del moto ondoso è l'altezza relativa della cresta della struttura R_{rc} , ottenuta dividendo l'altezza della cresta della struttura R_c e l'altezza d'onda al largo H_s :

$$R_{rc} = \frac{R_c}{H_s} \quad (4.21)$$

Tale parametro difatti denota quanto la struttura è emergente o soffolta rispetto al livello medio del mare.

4.3.1. Strutture a cresta bassa e strutture soffolte

Ai fini dello studio della trasmissione del moto ondoso una distinzione che sovente viene utilizzata per distinguere le varie tipologie di strutture prende in considerazione come elemento discriminante l'altezza della cresta.

In particolare una struttura si dice soffolta o sommersa se l'altezza della cresta è inferiore al livello medio del mare (e dunque negativa), e pertanto viene tracimata dalla totalità delle onde incidenti. Una struttura a cresta bassa

è viceversa caratterizzata da una altezza della cresta positiva, che tuttavia è piccola, ovvero tale da causare la tracimazione frequente delle onde incidenti.

In entrambi i casi ci si può aspettare una consistente trasmissione del moto ondosso e un'altezza d'onda a tergo della struttura non trascurabile. Pertanto l'impiego di strutture a cresta bassa e soffolte è indicato in quelle situazioni in cui, tenendo conto della destinazione funzionale dell'opera, è accettabile che vi sia una agitazione ondosa residua a tergo dell'opera.

4.3.2. Trasmissione attraverso strutture permeabili

In corrispondenza di strutture a cresta bassa non tracimabili, il coefficiente di trasmissione diminuisce all'aumentare dell'altezza d'onda H_s , a causa della maggiore dissipazione all'interno della struttura frangiflutti. Per strutture a cresta bassa tracimabili avviene il viceversa, a causa della maggiore quantità d'acqua che è in grado di oltrepassare il frangiflutti. Nel caso di strutture sommerse un'onda più alta verrà maggiormente smorzata dal frangiflutti di una più piccola e dunque la trasmissione diminuirà all'aumentare dell'altezza d'onda. Vi sarà tuttavia un punto tale che l'onda che transita sulla struttura non si accorgerà più della presenza di quest'ultimo e dunque la trasmissione sarà di nuovo crescente al crescere di H_s .

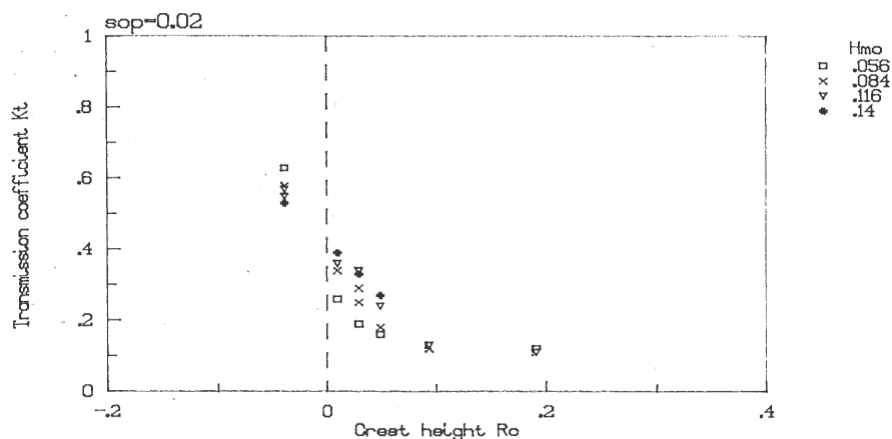


Figura 4.6 Influenza dell'altezza d'onda sul coefficiente di trasmissione (Daemen, 1991)

Per strutture a cresta bassa inoltre la trasmissione del moto ondoso aumenta all'aumentare del periodo, a causa della presenza di onde più lunghe che provocano una maggiore risalita del moto ondoso (run up) sul paramento della struttura. Onde più lunghe inoltre si propagano maggiormente attraverso la struttura. Nel caso di barriere sofolte, *van der Meer (1990)* ha trovato che onde più lunghe provocano un coefficiente di trasmissione maggiore; tuttavia *Powell e Allsop (1985)* hanno osservato un fenomeno opposto. Tale discrepanza può dipendere tuttavia dalle dimensioni dei blocchi che costituiscono la struttura.

Per quanto concerne la permeabilità, è immediato osservare che tanto per strutture a cresta bassa che per strutture sofolte, la trasmissione aumenta all'aumentare della permeabilità. Tuttavia per strutture a cresta bassa il run up sarà inferiore a causa dell'infiltrazione. Per poter confrontare diverse strutture *van der Meer (1988)* ha introdotto un fattore di permeabilità P che è definito nella Tabella 4.III:

Tabella 4.III Valori del coefficiente di permeabilità P .

Valori consigliati	Caratteristiche della parete
$P=0.1$	Frangiflutti impermeabile
$P=0.4$	Frangiflutti con nucleo, filtro e corazzamento
$P=0.5$	Frangiflutti con nucleo e corazzamento
$P=0.6$	Frangiflutti omogeneo

Un altro parametro che si è visto avere influenza sulla trasmissione del moto ondoso è la larghezza della cresta B_c . In una struttura a cresta bassa una maggiore larghezza provoca perdite per attrito maggiori nonché un percorso più lungo affinché si verifichi la tracimazione dell'onda incidente. Per barriere sofolte l'influenza di tale parametro è minore.

4.3.3. Formule per la stima del coefficiente di trasmissione

Esistono in letteratura alcune relazioni che consentono di esprimere il coefficiente di trasmissione del moto ondoso in funzione di alcuni dei parametri più significativi tra quelli prima definiti che regolano la trasmissione del moto ondoso attraverso una struttura.

Una delle prime formule che furono ottenute interpolando un vasto insieme di dati sperimentali di laboratorio è dovuta a *van der Meer (1990)*:

$$K_t = 0.46 - 0.3 \frac{R_c}{H_i} \quad (4.22)$$

Con limite massimo e minimo rispettivamente pari a 0.8 e 0.1. In Figura 4.7 si riporta l'andamento del coefficiente di trasmissione secondo *van der Meer (1990)*.

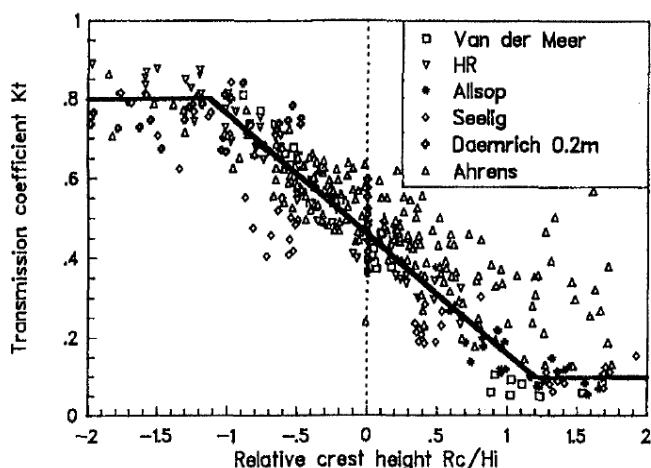


Figura 4.7 Coefficiente di trasmissione in funzione dell'altezza relativa della cresta della struttura (*van der Meer, 1990*)

Un'altra espressione è dovuta a *Daemen (1991)* che attribuisce parte della dispersione dei punti attorno alla legge di van der Meer alla permeabilità dello strato di corazzamento, e conclude affermando che un miglioramento nella descrizione del coefficiente di trasmissione può ottenersi introducendo un nuovo parametro adimensionale, ovvero il rapporto tra l'altezza della cresta e il diametro nominale del masso costituente lo strato di corazzamento, R_c/D_{n50} :

$$K_t = a \frac{R_c}{D_{n50}} + b \quad (4.23)$$

Essendo:

$$a = 0.031 \frac{H_s}{D_{n50}} - 0.24 \quad (4.24)$$

$$b = -5.42s_{op} + 0.0323 \frac{H_s}{D_{n50}} - 0.017 \left(\frac{B_c}{D_{n50}} \right)^{1.84} + 0.51 \quad (4.25)$$

Con s_{op} pendenza dell'onda.

Tale relazione vale per s_{op} compreso tra 0.01 e 0.05 e H_s/D_{n50} tra 1 e 6 e fornisce valori di K_t compresi tra 0.075 e 0.75 (Figura 4.8). Tale relazione cessa di essere valida tuttavia per strutture che non sono caratterizzate da una dimensione nominale D_{n50} .

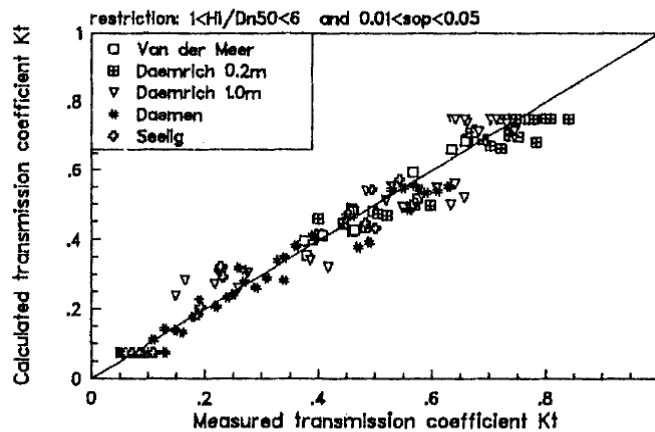


Figura 4.8 Coefficiente di trasmissione misurato e calcolato secondo Daemen (1991).

Infine *d'Angremond et al (1996)*, dopo aver reso omogenei i dati esistenti sulla trasmissione del moto ondoso hanno proposto due relazioni, valide rispettivamente per frangiflutti permeabili ed impermeabili:

$$K_t = -0.4 \frac{R_c}{H_s} + \left(\frac{B_c}{H_s} \right)^{-0.31} \cdot (1 - e^{0.5\xi}) \cdot 0.64 \quad (4.26)$$

$$K_t = -0.4 \frac{R_c}{H_s} + \left(\frac{B_c}{H_s} \right)^{-0.31} \cdot (1 - e^{0.5\xi}) \cdot 0.80 \quad (4.27)$$

In cui ξ è il già citato parametro di Irribarren.

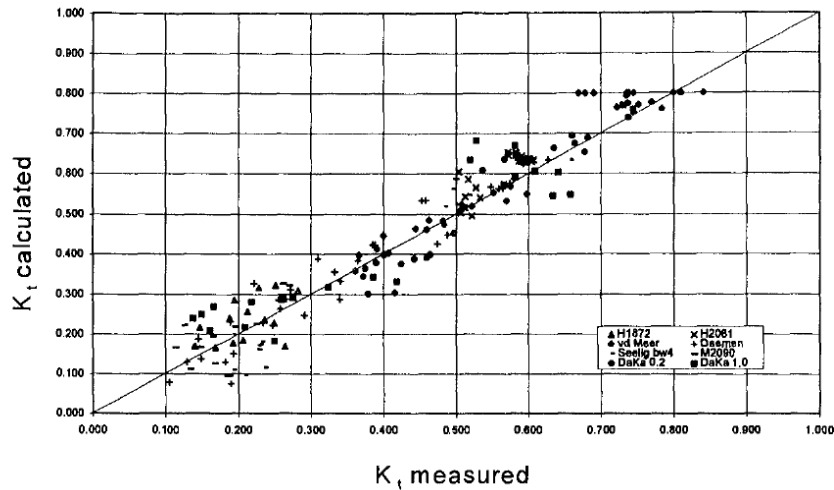


Figura 4.9 Coefficiente di trasmissione misurato e calcolato per strutture permeabili secondo *d'Angremond et al. (1996)*.

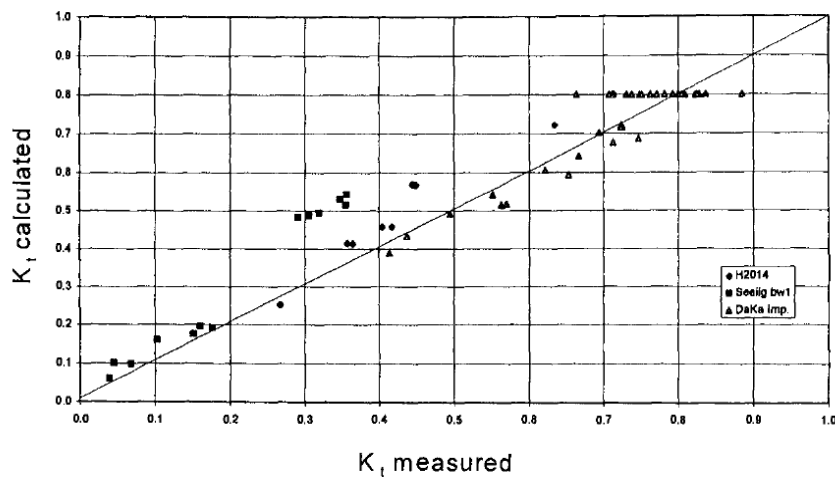


Figura 4.10 Coefficiente di trasmissione misurato e calcolato per strutture permeabili secondo *d'Angremond et al. (1996)*.

5. Studio della riflessione e della trasmissione del moto ondoso attraverso la modellazione fisica di laboratorio

5.1. Generalità

In letteratura sono stati proposti vari metodi per la stima del coefficiente di riflessione sulla base di misure sperimentali sia in presenza di onde regolari (*Isaacson, 1991*) sia in presenza di onde irregolari, caso quest'ultimo di maggiore rilevanza ai fini ingegneristici, (*Thornton e Calhoun, 1972* e *Goda e Suzuki, 1976, Mansard e Funke, 1980*).

Limitatamente al caso di onde regolari, il metodo concettualmente più semplice (ma operativamente più oneroso) per la stima della riflessione è il cosiddetto "metodo dell'involuppo". Esso consiste nel misurare, tramite l'uso di una sonda di livello, l'altezza minima e massima dell'involuppo ottenuto dalla sovrapposizione del moto ondoso incidente e di quello riflesso. L'onerosità operativa di questo metodo consiste nella necessità di dovere effettuare un elevato numero di misure, spostando in maniera pressochè continua la sonda all'interno di una lunghezza d'onda. Inoltre tale metodo non fornisce nessuna informazione sulla fase dell'onda riflessa.

Nel caso di onde random, sono stati proposti diversi metodi basati sull'adozione di due o più sonde di livello posizionate a una distanza fissata, che possono essere applicati anche al caso di onde regolari, a patto che la distanza tra le sonde sia scelta in modo tale da ricadere, per una fissata condizione idrodinamica, all'interno dei limiti di validità del metodo.

In particolare nel seguito verrà descritto il metodo proposto da *Goda e Suzuki (1976)*, che fa uso di due sonde poste a una distanza fissata. Analiticamente il metodo fa uso della tecnica della trasformata di Fourier ed è diventato il metodo standard per la misura della riflessione in laboratorio. Infatti, la stima del coefficiente di riflessione ottenuta applicando tale metodo

si è rivelata più accurata rispetto a quella ricavata utilizzando altri metodi di letteratura, soprattutto nel caso di strutture ad alta capacità riflettente.

5.2. Metodo per la stima del coefficiente di riflessione in laboratorio

La situazione sperimentale è quella di una canaletta per la generazione del moto ondoso, all'interno della quale è installata una barriera soffolta (costituita da sacchi in geotessuto riempiti di sabbia) che deve essere testata per quanto attiene alla riflessione e trasmissione del moto ondoso a tergo della struttura.

Le onde incidenti, prodotte da un battitore a pistone per la generazione del moto ondoso, vengono riflesse dal modello e si propagano in direzione opposta verso la pala del battitore stesso, dove sono soggette a una nuova riflessione. Quindi si propagano di nuovo verso la struttura e vengono ancora riflesse, e il processo si ripete molte volte. All'interno del canale si genera dunque un processo di riflessione multipla di treni d'onda.

Le onde che si propagano all'interno della canaletta sono dunque il risultato della sovrapposizione dell'onda incidente generata e della somma delle onde successivamente generate per riflessione dalla struttura e dalla pala stessa del battitore.

Benché il processo possa apparire complicato, nel caso di onde monocromatiche le componenti di queste onde generate dal processo di riflessione multipla hanno tutte la stessa frequenza e possono pertanto essere rappresentate come un singolo treno di onde. Inoltre, non solo tutte le componenti hanno la stessa frequenza ma anche le differenze di fase tra le varie componenti sono fissate. Volendone fare una trattazione analitica, per una data frequenza il profilo di onde rispettivamente incidenti e riflesse può essere sintetizzato come:

$$\begin{aligned}\eta_i &= a_i \cos(kx - \omega t + \varepsilon_i), \\ \eta_r &= a_r \cos(kx + \omega t + \varepsilon_r),\end{aligned}\tag{5.1}$$

in cui i pedici i e r indicano rispettivamente le grandezze relative all'onda incidente e all'onda riflessa e la coordinata spaziale x si assume positiva nel verso che va dal battitore al modello della struttura.

Si supponga di registrare il profilo della superficie libera in due punti (ossia in corrispondenza delle due sonde), aventi ascissa $x=x_1$ e $x=x_2=x_1+\Delta$, in cui Δ è la distanza di separazione tra le sonde. I profili d'onda possono essere espressi come

$$\begin{aligned}\eta_1 &= (\eta_i + \eta_r)_{x=x_1} = A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \\ \eta_2 &= (\eta_i + \eta_r)_{x=x_2} = A_2 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t\end{aligned}\quad (5.2)$$

in cui

$$\begin{aligned}A_1 &= a_i \cos \phi_i + a_r \cos \phi_r \\ B_1 &= a_i \sin \phi_i - a_r \sin \phi_r \\ A_2 &= a_i \cos(k\Delta + \phi_i) + a_r \cos(k\Delta + \phi_r) \\ B_2 &= a_i \sin(k\Delta + \phi_i) - a_r \sin(k\Delta + \phi_r)\end{aligned}\quad (5.3)$$

$$\begin{aligned}\phi_i &= kx_1 + \varepsilon_i \\ \phi_r &= kx_1 + \varepsilon_r\end{aligned}\quad (5.4)$$

In quanto sopra le equazioni (4.3) rappresentano un sistema di quattro equazioni contenenti le quattro incognite a_i , a_r , ϕ_i e ϕ_r . Eliminando a_r e ϕ_r dall'espressione per A_2 e B_2 si ottiene

$$\begin{aligned}A_2 &= (A_1 \cos k\Delta + B_1 \sin k\Delta) - 2a_i \sin k\Delta \sin \phi_i \\ B_2 &= (-A_1 \sin k\Delta + B_1 \cos k\Delta) + 2a_i \sin k\Delta \cos \phi_i\end{aligned}\quad (5.5)$$

La quantità a_i può essere ottenuta eliminando i termini contenenti ϕ_i nelle equazioni precedenti, e analogamente si può ottenere a_r . Il risultato è

$$\begin{aligned}a_i &= \frac{1}{2|\sin k\Delta|} \left[(A_2 - A_1 \cos k\Delta - B_1 \sin k\Delta) + (B_2 + A_1 \sin k\Delta - B_1 \cos k\Delta)^2 \right]^{1/2} \\ a_r &= \frac{1}{2|\sin k\Delta|} \left[(A_2 - A_1 \cos k\Delta - B_1 \sin k\Delta) + (B_2 - A_1 \sin k\Delta - B_1 \cos k\Delta)^2 \right]^{1/2}\end{aligned}\quad (5.6)$$

Così, le ampiezze a_i e a_r delle onde incidenti e riflesse possono essere calcolate dalle quattro ampiezze A_1, B_1, A_2 e B_2 e dalla differenza di fase $k\Delta$. Inoltre, la fase angolare φ_i può essere ottenuta eliminando i termini contenenti a_i nell'equazione (4.5), e così per φ_r , come già dimostrato da *Fan (1988)*. Si ottiene quindi:

$$\begin{aligned}\varphi_i &= \tan^{-1} \left[\frac{-A_2 + A_1 \cos k\Delta l + B_1 \sin k\Delta l}{B_2 + A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l} \right], \\ \varphi_r &= \tan^{-1} \left[\frac{-A_2 + A_1 \cos k\Delta l - B_1 \sin k\Delta l}{-B_2 + A_1 \sin k\Delta l + B_1 \cos k\Delta l} \right].\end{aligned}\tag{5.7}$$

Il metodo di risoluzione sopra descritto può essere applicato a ogni componente dello spettro di Fourier dei profili di onde irregolari registrati alle due sonde, poste ad un'appropriata distanza.

Un'ipotesi alla base dell'analisi di *Goda e Suzuki (1976)* presentata è che la relazione di dispersione (relazione tra il numero d'onda k e la frequenza f) sia soddisfatta all'interno dell'intervallo di analisi.

Le ampiezze a_i e a_r , così stimate per ogni componente di Fourier, rappresentano l'ampiezza quadratica media $|A_k^2 + B_k^2|^{1/2}$ per il profilo d'onda. Una volta nota l'ampiezza delle singole componenti, gli spettri delle onde incidenti e riflesse possono essere stimati separatamente.

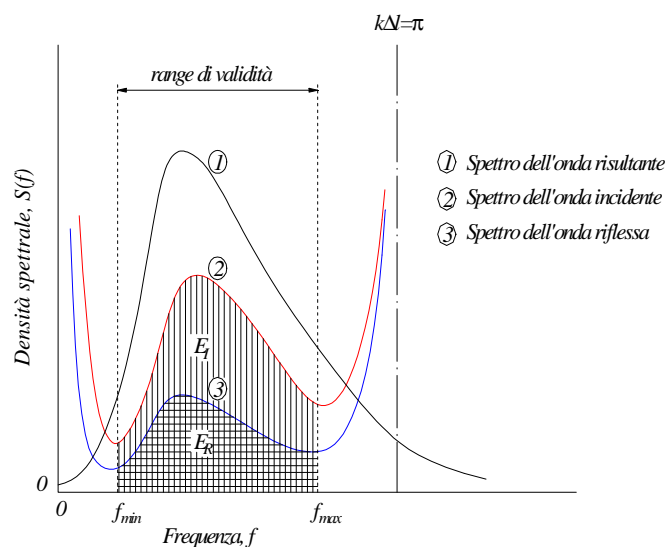


Figura 5.1 Schema della soluzione spettrale delle onde incidenti e riflesse.

Il risultato della risoluzione spettrale ottenuta con questo metodo è mostrata schematicamente in Figura 5.1. Si osservi come la stima spettrale diverga in prossimità delle frequenze che soddisfano la condizione $k \Delta = n\pi$, per $n=0,1,2,\dots$, perché il fattore $|\sin k\Delta|$ a denominatore del secondo membro delle (4.6) diventa molto piccolo, e quindi errori dovuti a rumore del segnale vengono fortemente amplificati. Le stime spettrali sono quindi valide solo all'interno di un range di valori di frequenza il quale non contiene i punti caratterizzati da $k \Delta = n \pi$. L'effettivo campo di validità del metodo può quindi essere stimato sulla base delle seguenti indicazioni di massima,

$$\begin{aligned} \text{Limite superiore } (f_{\max}) : \Delta / L_{\min} &\cong 0.45, \\ \text{Limite inferiore } (f_{\min}) : \Delta / L_{\max} &\cong 0.05. \end{aligned} \quad (5.8)$$

I simboli L_{\min} e L_{\max} denotano le lunghezze d'onda rispettivamente associate ai limiti superiore (f_{\max}) e inferiore (f_{\min}) dell'effettivo campo di validità per le frequenze.

Una volta che la distanza tra due sonde è stata fissata, l'effettivo range di frequenza per la determinazione delle onde incidenti e riflesse può essere determinato a partire dalle espressioni (4.8). Ovvero, ragionando in modo duale, nella progettazione di un modello idraulico, la distanza Δ / l dovrebbe essere scelta in modo tale che la maggior parte dell'energia dello spettro dell'onda da testare sia contenuta all'interno del range di frequenze delimitato da f_{\min} e f_{\max} .

Per quanto concerne la stima del coefficiente di riflessione, si devono calcolare l'energia del moto ondoso incidente e quella del moto ondoso riflesso, rispettivamente E_i e E_r , all'interno del range (f_{\min})-(f_{\max}). Questo può essere fatto considerando le seguenti espressioni

$$\begin{aligned}
E_i &= \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_i(f) df = \frac{\Delta t}{2t_0} \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} I_i \\
E_r &= \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_r(f) df = \frac{\Delta t}{2t_0} \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} I_r
\end{aligned}
\tag{5.9}$$

in cui S_i e S_r sono le densità spettrali dell'onda incidente e dell'onda riflessa mentre I_i e I_r sono i periodogrammi delle onde incidenti e riflesse, uguali rispettivamente a Na_i^2 e Na_r^2 . Il calcolo viene condotto meglio considerando i periodogrammi in quanto si evitano gli effetti di perdita dell'energia (*leakage*) in prossimità delle bande di frequenza, introdotti attraverso l'uso di un filtro per il trattamento del periodogramma (al fine di ridurre le irregolarità). Poiché l'energia delle onde incidenti e riflesse deve essere proporzionale al quadrato delle rispettive altezze d'onda, il coefficiente di riflessione, definito come rapporto tra altezze d'onda, può essere espresso in termini energetici come

$$K_R = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}}
\tag{5.10}$$

Questo coefficiente di riflessione rappresenta quello del gruppo d'onde come "unicum". L'altezza significativa dell'onda incidente H_{Si} e quella dell'onda riflessa H_{Sr} sono state valutate dalle ampiezze delle singole componenti spettrali utilizzando la relazione:

$$H_s = 4 \sqrt{\sum \frac{1}{2} a^2}
\tag{5.11}$$

Nell'applicazione del metodo gli autori raccomandano che le sonde siano localizzate a una distanza maggiore di una lunghezza d'onda dell'onda significativa dal modello della struttura e dalla pala del battitore.

La tecnica sopra descritta per la risoluzione del problema della scomposizione dell'onda incidente e dell'onda riflessa può essere direttamente applicata a treni d'onde regolari. In questo caso il coefficiente di riflessione può essere ottenuto come rapporto a_R/a_I . Inoltre, l'uso delle fasi angolari φ_i e φ_r , risolte utilizzando le espressioni (4.7), insieme con la conoscenza dei valori

delle ampiezze a_i e a_r rende possibile ricostruire i profili dei treni d'onde incidenti e riflessi. Applicando questa tecnica per tutte le componenti di Fourier del treno d'onde irregolari (all'interno del range di frequenza valido per la risoluzione), possono essere ricostruiti anche i profili delle onde irregolari incidenti e delle onde irregolari riflesse.

In diversi laboratori idraulici, la tecnica è stata estesa a una matrice lineare di sonde al fine di superare il problema della divergenza del metodo nell'intorno di $k \Delta = n \pi$. Per esempio, utilizzando tre sonde, nel caso in cui un paio di esse dovesse fallire nel trovare la corretta soluzione, l'altro paio può consentire di ottenere stime non divergenti. Utilizzando, quindi, tre sonde i problemi di divergenza del metodo sono notevolmente ridotti ed è pertanto possibile estendere il campo di validità del metodo.

Per il calcolo del coefficiente di trasmissione è necessario calcolare l'altezza d'onda incidente con il metodo anzi descritto, in modo da depurarla dalla componente di riflessione indotta dalla struttura e quindi calcolare il rapporto:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (5.12)$$

In cui l'altezza d'onda trasmessa a tergo della struttura andrebbe depurata anch'essa dalla componente riflessa.

6. Descrizione delle condizioni meteomarine in situ

6.1. Generalità

Il tratto di litorale che verrà interessato dagli interventi di ripascimento protetto è compreso tra la foce del Torrente Niceto e la foce del Torrente Calvaruso, all'interno dell'area fisiografica compresa tra Capo Milazzo e Capo Peloro, lungo la costa nord della Sicilia. Il tratto di costa risulta interessato dalle foci dei torrenti Niceto, Caracciolo, Senia, Cocuzzaro, Pietra, Saponara e Calvaruso.

Il tratto di litorale in oggetto è caratterizzato da una elevata presenza antropica con insediamenti abitativi e strutture viarie a ridosso della porzione attiva della spiaggia.

In esso sono presenti importanti fenomeni di dissesto determinati verosimilmente da interventi antropici che hanno determinato un significativo arretramento della linea di costa.

Inoltre, lungo tutto il tratto di costa sono stati realizzati negli ultimi decenni interventi localizzati di protezione (pennelli, barriere emerse anche in tetrapodi,...) che, tuttavia, non sono stati realizzati in un'ottica di unitarietà, determinando quindi forti scompensi alla dinamica del litorale, alterando la naturale deriva dei sedimenti e determinando importanti arretramenti della linea di riva sottoflutto alle stesse opere. In questo Capitolo si riporta una sintesi delle condizioni meteomarine in situ, che verranno poi utilizzate, dopo essere state opportunamente riportate in scala di modello, come forzanti delle simulazioni idrodinamiche e di stabilità condotte nell'ambito del presente studio.

6.2. Caratteristiche del moto ondoso al largo

Per lo studio meteomarinario al largo del litorale tirrenico della costa di Messina sono stati adottati i dati ondametrici relativi a un punto del modello onda metrico europeo dell' European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) posto a largo del paraggio in esame ($38.5^{\circ}\text{N}, 15.5^{\circ}\text{E}$), i quali coprono il periodo 01/01/1993-30/06/2011.

Dall'analisi di detto database è emerso che il regime medio annuo del moto ondoso al largo del paraggio in esame è caratterizzato da una predominanza di eventi provenienti dal settore $270\text{-}300^{\circ}\text{N}$ sia in termini di frequenza che in termini di massima altezza d'onda, come indicato in Figura 6.1.

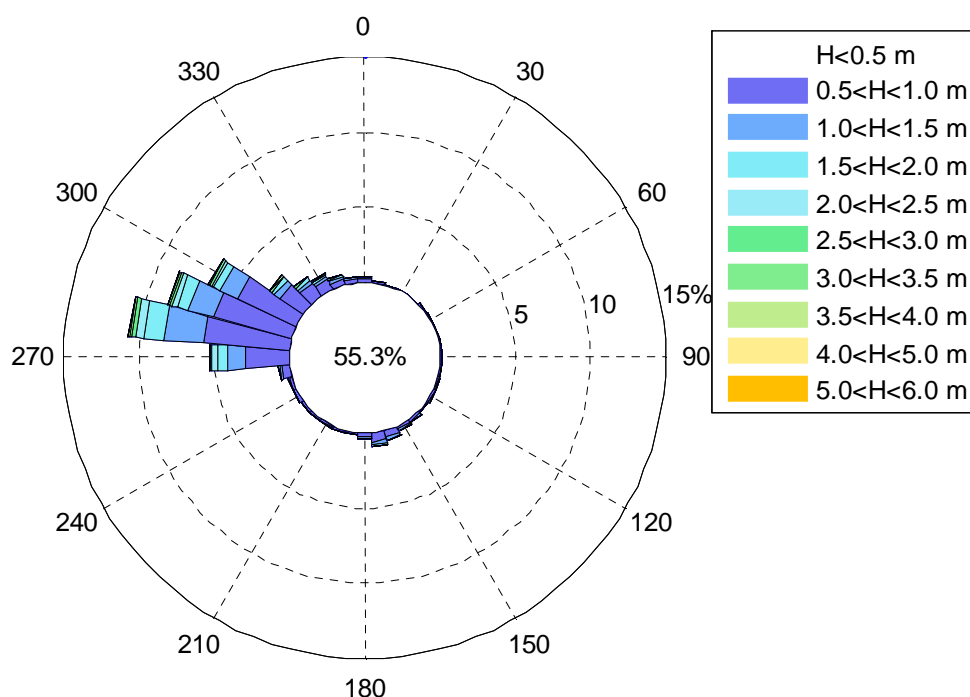


Figura 6.1 Percentuale degli eventi per classe di altezza d'onda significativa e per classe di direzione di provenienza determinate al largo del paraggio in esame

6.3. Previsione di eventi estremi al largo

I dati sopra menzionati sono stati utilizzati per la determinazione delle altezze d'onda corrispondenti a tempi di ritorno pluriennali. Per quanto attiene alla determinazione dell'altezza d'onda di progetto H_s , essa è stata valutata in corrispondenza di un prefissato periodo di ritorno T_r . Inoltre, è necessario associare a ogni altezza d'onda così ricavata un periodo medio e un periodo di picco. In particolare è possibile esprimere il periodo medio e il periodo di picco in funzione dell'altezza d'onda mediante le relazioni di seguito riportate (Boccotti, 2000):

$$T_m = 6.6\pi \sqrt{\frac{H_s}{4g}} \quad (6.1)$$

$$T_p = \frac{T_m}{0.78} \quad (6.2)$$

In Tabella 6.1 si riportano, per diversi tempi di ritorno, le altezze d'onda significative e i corrispondenti periodi medio e di picco nella direzione di 292.5° dalla quale provengono i marosi energeticamente più significativi.

Tabella 6.1 Valutazione dell'altezza d'onda per fissati tempi di ritorno:
Direzione di provenienza 292.5° N.

T_r [anni]	H_s [m]	T_m [s]	T_p [s]
2	4,23	6,8	8,7
5	4,86	7,3	9,4
10	5,32	7,6	9,8
20	5,77	8,0	10,2
40	6,20	8,2	10,6
50	6,34	8,3	10,7
100	6,76	8,6	11,0

6.4. Trasformazione del moto ondoso dal largo alla riva

La stima del moto ondoso sottocosta è stata eseguita mediante l'utilizzo del modello CMS-Wave, modello bidimensionale per la propagazione dello spettro d'onda, che simula una trasformazione stazionaria spettrale di onde direzionali casuali.

In particolare si sono determinate le caratteristiche del moto ondoso in alcuni punti sottocosta per diversi tempi di ritorno e direzione di provenienza del moto ondoso al largo. Dalla Tabella 6.2 alla Tabella 6.3 sono riportate, per la direzione di provenienza del moto ondoso al largo di 292.5° individuata come la più gravosa, le altezze d'onda, i periodi di picco e le direzioni di provenienza sottocosta nei due punti in cui l'agitazione ondosa sottocosta è risultata maggiore.

Tabella 6.2 Valutazione dell'altezza d'onda per fissati tempi di ritorno:
Direzione di provenienza al largo 292.5°N – Punto 3.

T_r [anni]	H_s [m]	T_p [s]	Dir [°N]
2	2.93	8.0	313.1
5	3.41	9.5	314.8
10	3.80	9.5	315.3
20	4.18	9.5	315.6
40	4.58	11.8	316.5
50	4.70	11.8	316.9
100	5.07	11.8	317.9

Tabella 6.3 Valutazione dell'altezza d'onda per fissati tempi di ritorno:
Direzione di provenienza al largo 292.5°N – Punto 6.

T_r [anni]	H_s [m]	T_p [s]	Dir [°N]
2	2.85	8.0	318.8
5	3.36	9.5	320.3
10	3.63	9.5	320.6
20	3.86	9.5	320.9
40	4.16	11.8	321.6
50	4.21	11.8	321.9
100	4.21	11.8	322.5

7. Modellazione fisica dell'opera di presidio dell'intervento di ripascimento

7.1. Generalità

Com'è noto nell'ingegneria marittima e costiera, quando non è possibile applicare metodologie consolidate, si può ricorrere ad approcci basati: 1) su osservazioni e misure in campo; 2) sulla soluzione numerica di modelli matematici; 3) su osservazioni e misure in laboratorio.

La tecnica basata su osservazioni e misure in campo è quella che fornisce i risultati più affidabili. Tuttavia, a causa dell'impossibilità di poter intervenire sulle variabili idrodinamiche di input, per esempio facendole variare in maniera sistematica, la raccolta e l'interpretazione dei risultati è piuttosto difficile. In particolare, negli studi sulla interazione del moto ondoso con le opere marittime, questa tecnica richiede la realizzazione di manufatti a scala reale e quindi risulta economicamente onerosa. Inoltre, se è richiesta l'esecuzione di studi comparativi, come nel presente caso, occorre realizzare diverse tipologie di manufatti a scala reale con costi molto rilevanti. Per le ragioni sopra riportate, la tecnica basata su osservazioni e misure in campo non è stata presa in considerazione nel presente studio.

La tecnica basata sulla soluzione numerica di modelli matematici sta diventando uno strumento di indagine sempre più importante, impiegata con successo nel predire i flussi di marea negli estuari, fenomeni di rifrazione, diffrazione e shoaling, circolazione costiera, ecc. Tuttavia, esistono situazioni le quali, per via della complessa idrodinamica che li caratterizza, non possono essere studiate mediante modelli matematici. Molte di queste, ad esempio, sono quelle nelle quali i fenomeni dissipativi dovuti alle resistenze al fondo e alla generazione di turbolenza costituiscono un fattore fondamentale del processo idrodinamico. Oltre ad esse, i casi caratterizzati da geometrie

complesse, come per esempio l'interazione del moto ondoso con una scogliera, sono anch'essi difficilmente analizzabili mediante l'adozione di modelli matematici.

Il fenomeno della riflessione e trasmissione del moto ondoso attraverso una barriera soffolta realizzata in sacchi di geotessuto, è anch'esso caratterizzato da intense dissipazioni di energia ed inoltre la geometria del sistema è piuttosto complessa. Per questa ragione anche questo approccio metodologico è stato scartato.

Nel presente studio è stato pertanto impiegato l'approccio basato su indagini in laboratorio condotte su modello fisico. Un modello fisico è la riproduzione, usualmente a scala ridotta, di un sistema fisico, eseguita in modo tale che tutti i fenomeni quantificabili abbiano luogo in esso nella stessa proporzione nella quale si verificano nel sistema fisico (prototipo) che si vuole analizzare. Nel caso in studio, l'approccio basato su modello fisico permette di superare i limiti dei modelli numerici e di ottenere risultati affidabili a costi significativamente inferiori di quelli richiesti da esperimenti condotti in campo.

Alla base della modellazione fisica sta la condizione che il modello si comporti in maniera simile al prototipo che si intende emulare. Se questa condizione viene soddisfatta, dagli studi sul modello è possibile estrarre informazioni di supporto alla progettazione del prototipo o alle decisioni riguardanti la gestione del sistema. In generale, occorre comunque tenere conto che esiste sempre la possibilità che i risultati del modello fisico non siano indicativi del comportamento del prototipo. Tale possibilità deve essere tenuta sotto controllo mediante una attenta progettazione e accurata validazione del modello.

7.2. Criteri di similitudine

In generale, la similarità di comportamento fra prototipo e modello riguarda tutte le grandezze fisiche come velocità, accelerazioni, trasporto di massa e le

forze che il fluido applica sui contorni solidi. La similitudine si ottiene quando le grandezze rilevanti per il fenomeno da studiare sono in proporzione fra il prototipo e il modello.

I requisiti di similarità possono essere imposti sulla base di considerazioni riguardanti l'analisi dimensionale o le equazioni differenziali che descrivono la dinamica del sistema. Tali requisiti possono essere dati mediante *criteri di similitudine* o *condizioni di similarità*.

I criteri di similitudine sono imposti mediante relazioni fra parametri. Si tratta di condizioni matematiche che devono essere soddisfatte dal rapporto fra certi parametri del prototipo e quelli del modello. I criteri di similitudine sono anche detti *leggi di scala*.

Le condizioni di similarità sono relazioni fra i parametri del prototipo e quelli del modello che lo sperimentatore sceglie in modo tale che il modello fisico riproduca risultati soddisfacenti. Queste relazioni possono includere uno o più criteri di similitudine ed altre condizioni determinate anche sulla base dell'esperienza.

I requisiti di similitudine dipendono dal fenomeno che si desidera studiare e dal grado di accuratezza che si vuole raggiungere nello studio.

I *modelli a similarità completa* sono quei modelli nei quali tutti i valori dei parametri adimensionali del prototipo sono mantenuti nel modello.

La corrispondenza fra i parametri del prototipo e quelli del modello si denota mediante il termine rapporto scala o semplicemente scala. Convenzionalmente il rapporto scala viene definito come il rapporto fra un parametro del prototipo ed il valore dello stesso parametro nel modello. In simboli, data una generica grandezza G , si ha $N_G = \frac{G_p}{G_m}$, dove G_p è il valore di G nel modello e G_m è il valore di G nel prototipo, mentre N_G è il rapporto scala prototipo-modello per la generica grandezza G .

Per quanto riguarda la similarità, nello studio dei fenomeni idraulici si possono avere: *similarità geometrica*, *similarità cinematica* e *similarità dinamica*.

La *similarità geometrica* fra prototipo e modello si ha quando tutte le dimensioni del modello sono date dalle corrispondenti dimensioni del prototipo ridotte mediante un fattore comune. I modelli che soddisfano la similarità geometrica sono anche detti *modelli non distorti*.

La *similarità cinematica* si ha quando il rapporto delle componenti del vettore velocità fra punti corrispondenti del prototipo e del modello è lo stesso a tutti gli istanti e in tutti i punti. In un modello non distorto la similarità cinematica dà luogo a percorsi delle particelle fluide che sono geometricamente simili a quelli del prototipo.

La *similarità dinamica* fra due sistemi geometricamente e cinematicamente simili richiede che il rapporto di tutte le componenti dei vettori forza nel prototipo e nel modello sia lo stesso. I requisiti per la similarità dinamica derivano dalla seconda legge di Newton la quale impone l'uguaglianza fra la forza d'inerzia di una massa m e le forze che agiscono sulla massa stessa,

$$F_i = F_g + F_\mu + F_\sigma + F_e + F_{pr} \quad (7.1)$$

Dove:

F_i = forza d'inerzia,

F_g = forza di gravità,

F_μ = forza viscosa,

F_σ = forza dovuta alla tensione superficiale,

F_e = forza elastica,

F_{pr} = forza di pressione.

La perfetta similitudine dinamica richiede che il rapporto fra la forza d'inerzia e una qualsiasi delle forze che figurano a secondo membro della (7.1) sia lo stesso nel prototipo e nel modello. Questa condizione conduce alle seguenti relazioni,

$$\frac{(F_i)_p}{(F_i)_m} = \frac{(F_g)_p}{(F_g)_m} = \frac{(F_\mu)_p}{(F_\mu)_m} = \frac{(F_\sigma)_p}{(F_\sigma)_m} = \frac{(F_e)_p}{(F_e)_m} = \frac{(F_{pr})_p}{(F_{pr})_m} \quad (7.2)$$

che possono essere riscritte in termini di rapporti scala come segue,

$$N_{F_i} = N_{F_g} = N_{F_\mu} = N_{F_\sigma} = N_{F_e} = N_{F_{pr}} \quad (7.3)$$

Siccome se il modello è più piccolo del prototipo non è noto nessun fluido che soddisfi tutti i rapporti della (7.3), un importante aspetto della progettazione di un modello è quello di evidenziare quali rapporti tra le forze stesse sono di maggior rilievo nel fenomeno che deve essere studiato e quindi devono essere mantenuti nel modello e, naturalmente, fornire la giustificazione del motivo per il quale gli altri rapporti possano essere trascurati.

7.2.1. Criteri di similitudine nell'Ingegneria Marittimo-Costiera

Nel seguito vengono illustrati i più importanti criteri di similitudine di cui occorre tenere conto quando si studia un fenomeno idraulico (*Hughes, 1993*).

Il primo passo consiste nell'individuare le forze che giocano un ruolo significativo nel fenomeno che si deve studiare e quali, fra quelle che a stretto rigore dovrebbero essere considerate, possono invece essere trascurate.

Nei fenomeni idraulici le forze d'inerzia sono sempre presenti, quindi il problema viene qui ricondotto al trovare quali delle forze a secondo membro della (7.1) bilanciano la forza d'inerzia. L'esperienza indica che nella grande maggioranza dei problemi idraulici solo una delle forze che figurano a secondo membro della (7.1) fornisce un contributo significativo nel bilanciare la forza d'inerzia. Restringendo l'attenzione ai problemi pratici di idraulica marittima, la forza dovuta alla tensione superficiale e la forza elastica possono essere

sicuramente trascurate, la prima perché la curvatura della superficie libera è grande e quindi la tensione superficiale non ha possibilità di giocare un ruolo importante, la seconda perché la deformabilità del fluido è molto bassa.

Il primo passo consiste nell'esprimere gli ordini di grandezza dei rapporti tra la forza d'inerzia e le altre forze.

A questo fine, l'ordine di grandezza di ciascuna forza deve essere espresso in termini della lunghezza L_s , velocità V_s e tempo T_s caratteristici del fenomeno in studio oltre che in termini della densità ρ e viscosità μ del fluido e dell'accelerazione di gravità g . Quindi si ha,

$$F_i = (\rho L_s^3)(V_s^2 / L_s) = \rho L_s^2 V_s^2, \quad (7.4)$$

$$F_g = \rho L_s^3 g, \quad (7.5)$$

$$F_\mu = \mu(V_s / L_s)L_s^2 = \mu V_s L_s, \quad (7.6)$$

$$F_{pr} = p_s L_s^2. \quad (7.7)$$

Il rapporto fra la forza d'inerzia e una delle altre forze fornisce l'influenza relativa delle due forze. Imponendo che il rapporto fra le forze sia lo stesso nel modello e nel prototipo si ottiene un criterio di similitudine per ciascun rapporto.

Criterio di Froude

L'influenza della forza di gravità rispetto alla forza d'inerzia è espressa dalla radice quadrata del rapporto fra la forza d'inerzia e la forza di gravità, il quale viene chiamato numero di Froude,

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho L_s^2 V_s^2}{\rho L_s^3 g}} = \frac{V_s}{\sqrt{g L_s}}. \quad (7.8)$$

Imponendo che il numero di Froude sia lo stesso nel modello e nel prototipo si ha:

$$\left(\frac{V_s}{\sqrt{gL_s}} \right)_p = \left(\frac{V_s}{\sqrt{gL_s}} \right)_m, \quad (7.9)$$

la quale conduce alla

$$\frac{V_{sp}}{V_{sm}} = \sqrt{\frac{L_{sp}}{L_{sm}}}. \quad (7.10)$$

Esprimendo la (7.10) in termini di rapporti di scala si ha

$$N_v = \sqrt{N_L}. \quad (7.11)$$

L'equazione (7.11) rappresenta il criterio di Froude, che, da solo, risulta sufficiente per modellare quei casi nei quali la forza d'inerzia risulta bilanciata quasi esclusivamente dalla forza di gravità, come accade in molti flussi a superficie libera. In ingegneria marittima la maggior parte dei modelli idraulici vengono realizzati secondo il criterio di Froude.

Criterio di Reynolds

L'importanza relativa della forza viscosa rispetto alla forza d'inerzia è data dal rapporto fra la forza d'inerzia e la forza viscosa il quale è noto come numero di Reynolds,

$$\text{Re} = \frac{\rho L_s^2 V_s^2}{\mu V_s L_s} = \frac{\rho L_s V_s}{\mu}. \quad (7.12)$$

Il criterio di Reynolds si ha quando il numero di Reynolds del modello è uguale a quello del prototipo,

$$\left(\frac{\rho V_s L_s}{\mu} \right)_p = \left(\frac{\rho V_s L_s}{\mu} \right)_m. \quad (7.13)$$

Sviluppando la (5.13) si ottiene

$$\frac{V_{sp}}{V_{sm}} \frac{L_{sp}}{L_{sm}} \frac{\rho_p}{\rho_m} = \frac{\mu_p}{\mu_m}. \quad (7.14)$$

In termini di rapporti di scala si ha

$$\frac{N_V N_L N_\rho}{N_\mu} = 1. \quad (7.15)$$

Il criterio di Reynolds è importante in quei fenomeni nei quali le forze viscosse sono predominanti come per esempio nello strato limite laminare.

Criterio di Eulero

L'importanza delle forze di pressione rispetto a quelle di inerzia è espressa dal numero di Eulero,

$$Eul = \frac{p_s L_s^2}{\rho L_s^2 V_s^2} = \frac{p_s}{\rho V_s^2}. \quad (7.16)$$

Il criterio di Eulero si trova uguagliando il numero di Eulero del prototipo con il numero di Eulero del modello,

$$\left(\frac{p_s}{\rho V_s^2} \right)_p = \left(\frac{p_s}{\rho V_s^2} \right)_m, \quad (7.17)$$

che si può ancora scrivere come

$$\left(\frac{p_{sp}}{p_{sm}} \right) = \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left(\frac{V_{sp}}{V_{sm}} \right)^2. \quad (7.18)$$

In termini di rapporti scala si ha

$$\frac{N_p}{N_\rho N_V^2} = 1. \quad (7.19)$$

Criterio di Strouhal

La forza d'inerzia in un fluido è dovuta alla somma di due contributi: l'accelerazione convettiva e l'accelerazione locale. L'accelerazione convettiva è dovuta alle differenti velocità del fluido in punti diversi del campo di moto, mentre l'accelerazione locale deriva da variazioni della velocità che si verificano nel tempo in ogni punto del campo di moto. In termini di grandezze caratteristiche le forze che derivano da queste due accelerazioni possono essere espresse come segue

$$\text{forza d'inerzia locale} = (\rho L_s^3)(V_s / T_s) \quad (7.20)$$

$$\text{forza d'inerzia convettiva} = (\rho L_s^3)(V_s^2 / L_s) \quad (7.21)$$

Il rapporto fra la forza d'inerzia locale e la forza d'inerzia convettiva è denominato numero di Strouhal St ,

$$St = \frac{(\rho L_s^3)(V_s / T_s)}{(\rho L_s^3)(V_s^2 / L_s)} = \frac{L_s}{V_s T_s}. \quad (7.22)$$

Il criterio di Strouhal si ha imponendo che il valore del numero di Strouhal nel modello sia lo stesso di quello del prototipo e quindi si ha

$$\left(\frac{L_s}{V_s T_s} \right)_p = \left(\frac{L_s}{V_s T_s} \right)_m, \quad (7.23)$$

la quale può essere riscritta come segue

$$\left(\frac{L_{sp}}{L_{sm}} \right) = \left(\frac{V_{sp}}{V_{sm}} \right) \left(\frac{T_{sp}}{T_{sm}} \right). \quad (7.24)$$

In termini di rapporti di scala si ha

$$\frac{N_L}{N_V N_T} = 1 \quad (7.25)$$

Il criterio di Strouhal è rilevante nei moti oscillanti nei quali l'accelerazione locale risulta essere significativa. Il tempo T deve essere basato sul periodo di

oscillazione del moto, per esempio nel caso delle onde T è il periodo delle onde.

7.2.2. Criteri di similitudine adottati nel presente studio

L'obiettivo del presente studio è quello di analizzare la trasmissione del moto ondoso attraverso un'opera di difesa rappresentata da una barriera soffolta realizzata mediante sacchi in geotessuto riempiti di sabbia. Inoltre, si vuole anche verificare se la struttura è stabile, ovvero se i sacchi non vengono movimentati dall'azione delle onde più gravose.

I requisiti per la scelta della scala delle onde possono essere determinati facendo riferimento alle equazioni di Navier-Stokes e all'equazione di continuità, che governano il moto di un fluido a superficie libera, scritte in forma adimensionale sulla base di appropriate grandezze scala. Tali grandezze scala sono di seguito riportate,

V_s = velocità caratteristica in direzione orizzontale,

W_s = velocità caratteristica in direzione verticale,

X_s = lunghezza caratteristica in direzione orizzontale,

Z_s = lunghezza caratteristica in direzione verticale,

T_s = tempo caratteristico,

p_s = pressione caratteristica.

Per brevità le equazioni di Navier-Stokes o equazioni del moto non vengono riportate, basti qui sapere che quando queste equazioni vengono poste in forma adimensionale in esse compaiono alcuni parametri adimensionali. Per due sistemi fisici (prototipo e modello) governati dalle stesse equazioni differenziali, la similitudine completa si ottiene quando ciascun parametro adimensionale assume lo stesso valore per i due sistemi. I parametri adimensionali che figurano nelle equazioni di Navier-Stokes sono quelli descritti

al paragrafo precedente e cioè: numero di *Froude*, numero di *Reynolds*, numero di *Eulero*, numero di *Strouhal* oltre al parametro $(X_s W_s)/(Z_s V_s)$.

Per prima cosa si vuole verificare se è possibile usare un modello fisico geometricamente distorto. Imponendo l'uguaglianza dei numeri di *Eulero* del prototipo e del modello si ottengono le seguenti due uguaglianze

$$\frac{N_p}{N_\rho N_V^2} = 1, \quad \frac{N_p}{N_\rho N_W^2} = 1, \quad (7.26)$$

dove la prima delle (7.26) deriva dall'equazione del moto in direzione orizzontale e la seconda deriva dall'equazione del moto in direzione verticale. Siccome i primi membri delle equazioni (7.26) sono entrambi uguali a 1, essi sono anche uguali fra di loro, ne segue che

$$N_V = N_W. \quad (7.27)$$

Secondo la (7.27), la scala della componente orizzontale della velocità deve essere uguale a quella della componente verticale. Imponendo l'uguaglianza del parametro $(X_s W_s)/(Z_{ss} V)$ fra modello e prototipo si ha

$$\frac{N_x N_W}{N_z N_V} = 1. \quad (7.28)$$

In virtù della (7.27), dalla (7.28) segue

$$N_x = N_z. \quad (7.29)$$

Quindi si può affermare che una corretta modellazione dell'idrodinamica delle onde corte richiede che il modello fisico sia *geometricamente non distorto*.

Dall'uguaglianza dei numeri di *Froude* deriva la condizione (7.11) e dall'uguaglianza dei numeri di *Strouhal* si ha la condizione (7.25). Nel caso di modelli di onde, la condizione (7.25) viene rispettata scegliendo N_T come rapporto fra i periodi delle onde.

Ricavando N_V dalla (7.25) e sostituendo in (7.11) si ha

$$N_T = \sqrt{N_L}. \quad (7.30)$$

Dall'uguaglianza dei numeri di Reynolds si ha poi la (7.15) e dall'uguaglianza dei numeri di Eulero si ha la (7.19). La (7.11) e la (7.25) costituiscono le principali relazioni per lo scaleggiamento dei modelli idrodinamici di onde corte. Se viene rispettata anche la relazione (7.15), dalle relazioni (7.2), trascurando F_e e F_σ , si può vedere che la (7.19) è automaticamente soddisfatta.

Tuttavia, a causa di difficoltà nel mantenere la similitudine di Froude e di Reynolds nello stesso modello, la condizione (7.15) sul numero di Reynolds non viene solitamente soddisfatta. Questa approssimazione è del tutto accettabile anche nel presente caso in quanto il moto indotto dalle onde è affetto dalla viscosità solo in una misura molto debole.

Per quanto concerne la scala utilizzata per i sedimenti, non è ovviamente possibile scalare seguendo un criterio geometrico, poiché si ricadrebbe nel campo dei sedimenti coesivi. È stata quindi inizialmente valutata la possibilità di utilizzare sedimenti alleggeriti, al fine di mantenere sia la similitudine del numero di Reynolds dei sedimenti, sia quella della numero di Froude densimetrico. Tuttavia tale soluzione è stata scartata (i) sia per la possibilità di avere una sovrastima del sedimento in sospensione, (ii) sia perché è noto che non è possibile utilizzare questo tipo di sedimenti in prove di accrescimento della spiaggia (Hughes, 1993), quali quelle considerate in questa sede; (iii) sia per la difficoltà di reperire un materiale dalle caratteristiche adeguate. Si è quindi deciso di adottare un SAND model, ovvero un modello in cui la densità dei sedimenti del modello è la stessa di quella dei sedimenti del prototipo, che lasci libera la scelta sulla dimensione dei grani.

In definitiva, il modello fisico per lo studio della trasmissione è stato progettato imponendo che sia non distorto, quindi esso deve essere una riproduzione in scala del prototipo. Una volta fissata la scala delle lunghezze N_L , la scala dei periodi delle onde è stata determinata tramite la (7.30).

7.3. Scelta del rapporto geometrico di scala del modello

La scelta della scala del modello è influenzata da alcuni fattori, i più importanti fra i quali sono:

- dimensioni dell'apparecchiatura sperimentale a disposizione;
- numero di Reynolds a scala di modello;
- necessità di contenere i costi dell'esperimento.

Le dimensioni del modello devono essere compatibili con le dimensioni dell'apparecchiatura sperimentale disponibile nel laboratorio presso il quale deve essere eseguito lo studio. Questo aspetto rappresenta un limite superiore alle dimensioni del modello che è possibile adottare.

Come descritto al paragrafo 7.2, i modelli idrodinamici di flussi a superficie libera in genere non tengono conto della similitudine di Reynolds. A causa di ciò il comportamento del modello può essere diverso da quello del prototipo. Per esempio, nello studio del fenomeno della riflessione delle onde da un ammasso poroso, le onde riflesse tendono ad essere più ampie nel modello che nel prototipo. Ciò deriva dal fatto che mentre il moto attraverso i pori dell'ammasso nel prototipo non è influenzato dalla viscosità, in quanto il numero di Reynolds è molto elevato, il moto attraverso i pori nel modello può essere influenzato dalla viscosità perché la similitudine di Reynolds non viene rispettata e quindi la struttura si comporta come se fosse meno porosa. Questo effetto indesiderato è noto come effetto scala e può essere corretto nel modello aumentando le dimensioni dei massi al di sopra del valore determinato dalla scala geometrica.

Allo scopo di ridurre gli effetti scala, sarebbe opportuno realizzare i modelli a scale molto grandi. Tuttavia, considerazioni sui costi di realizzazione dei modelli suggeriscono che i modelli a scala molto grande risultano nel complesso non economici.

Come soluzione di compromesso tra le problematiche sopra descritte, si è pertanto deciso di adottare nel presente studio una scala geometrica di 1:50 tra prototipo e modello.

7.4. Descrizione delle caratteristiche del modello fisico realizzato

Come già più volte accennato, obiettivo della modellazione fisica è la misura della trasmissione del moto ondoso attraverso la barriera soffolta in sacchi di geotessuto posta protezione del ripascimento che si intende realizzare in svariati siti della provincia di Messina.

Il modello fisico, come già indicato, è stato realizzato in scala geometrica non distorta pari a 1:50. E' bene qui precisare che tra i fattori che hanno condizionato la scelta del rapporto di scala figurano due esigenze opposte: da un lato difatti la necessità di riprodurre in scala i periodi di picco massimi tra 11 e 12 s che si ottengono in situ per tempi di ritorno di 100 anni; dall'altro l'esigenza di ottenere dei tiranti idrici in prossimità della barriera sufficientemente grandi da consentire una misura efficace delle caratteristiche del moto ondoso a tergo della struttura. Il rapporto scelto è perfettamente compatibile con l'apparecchiatura sperimentale, che consente la simulazione di onde con periodi fino a 2 s; inoltre i valori sia del tirante a tergo della struttura, pari a 6 cm in scala di modello, sia della sommergenza sulla sezione di mezzeria della barriera, pari a 2.5 cm in scala di modello, sono sufficientemente grandi da consentire la misura del moto ondoso attraverso la barriera in sacchi.

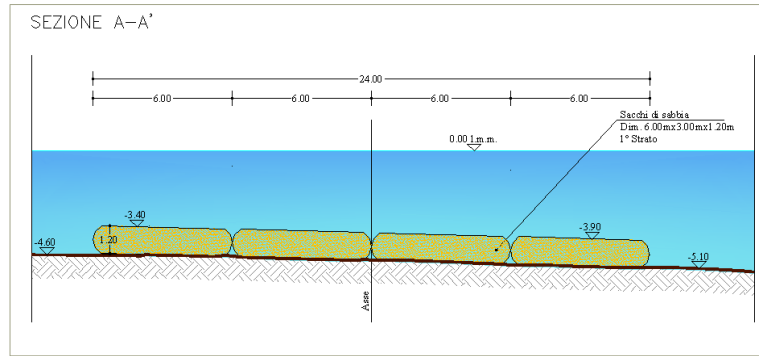
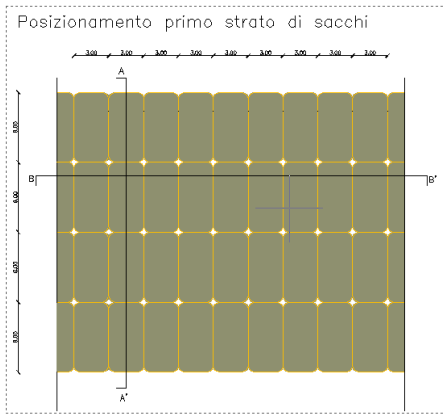
In Tabella 7.I sono riportate le caratteristiche geometriche, rispettivamente in scala di prototipo e in scala di modello, dell'opera di presidio dell'intervento di ripascimento proposto. Più precisamente sono indicate con l_c la lunghezza dei sacchi nella direzione di propagazione dell'onda, con b_c la larghezza dei sacchi nella direzione trasversale, con h_c l'altezza dei sacchi; inoltre B_c rappresenta la larghezza della cresta della struttura, h_t il tirante idrico a tergo dell'opera, h_0 la profondità d'acqua al piede lato offshore della struttura, R_c la

sommergenza in corrispondenza all'asse di mezzeria, α la pendenza del paramento della struttura (uguale dal lato onshore e offshore). Come sarà meglio dettagliato nel seguito, la struttura è stata testata ai fini della stabilità in una configurazione modificata, di cui si riportano nella stessa tabella le caratteristiche geometriche in scala di prototipo e di modello.

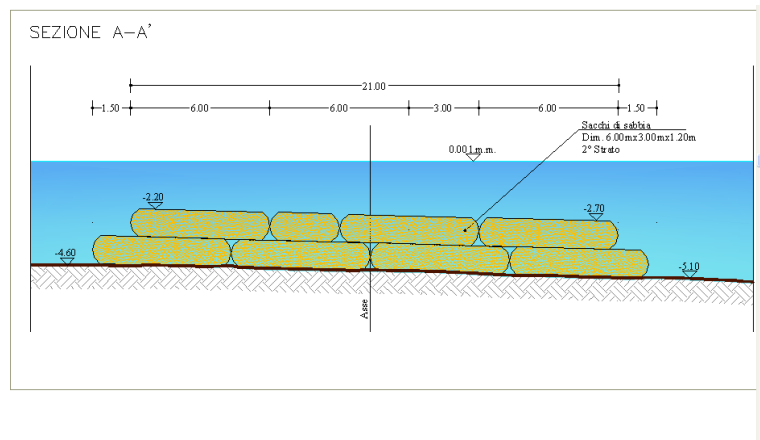
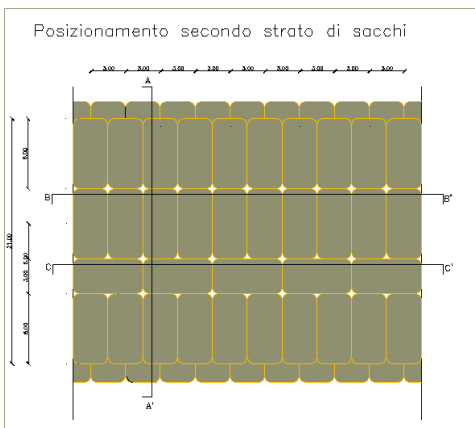
In Figura 7.1 sono riportati lo schema di posa e la sezione trasversale dei singoli strati dell'opera di presidio, conformemente a quanto indicato dal progettista. Inoltre in Figura 7.2 è riportato il confronto tra la configurazione proposta in origine e quella modificata con i sacchi frontali di dimensioni maggiori.

Tabella 7.I Caratteristiche geometriche, in scala di prototipo e di modello, dell'opera di presidio dell'intervento di ripascimento nella configurazione originale e modificata.

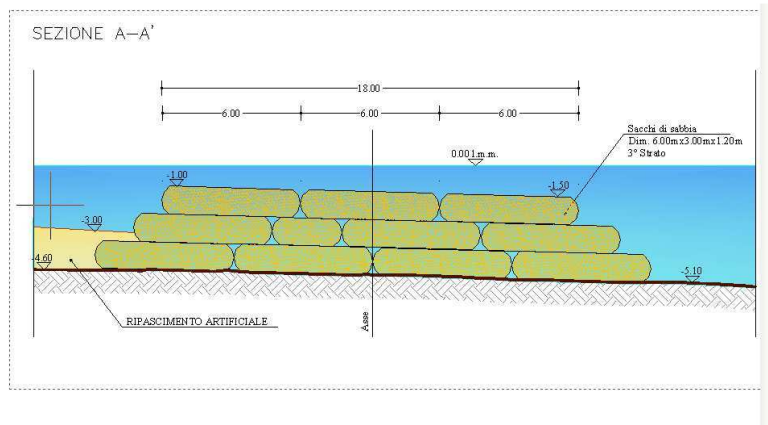
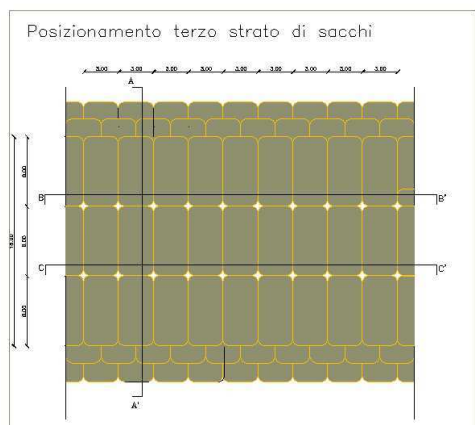
		configurazione originale		configurazione modificata	
		prototipo	modello	prototipo	modello
l_c	(m)	6	0.12	6/9	0.12/0.18
b_c	(m)	3	0.06	3	0.06
h_c	(m)	1.2	0.024	1.2	0.024
B_c	(m)	18	0.36	24	0.48
h_t	(m)	3	0.06	3	0.06
h_o	(m)	5	0.1	5	0.1
R_c	(m)	1.25	0.025	1.25	0.025
α	(-)	50	50	50	50



(a)



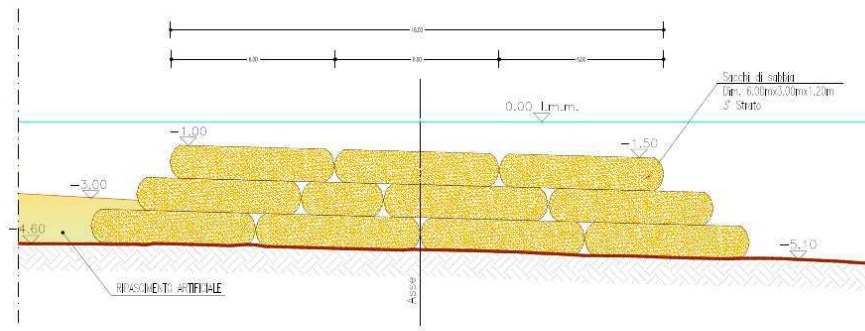
(b)



(c)

Figura 7.1 Posizionamento e sezione trasversale dei sacchi di geotessuto per la realizzazione della barriera soffolta: (a) primo strato; (b) secondo strato; (c) terzo strato.

SEZIONE A-A'



nuova proposta

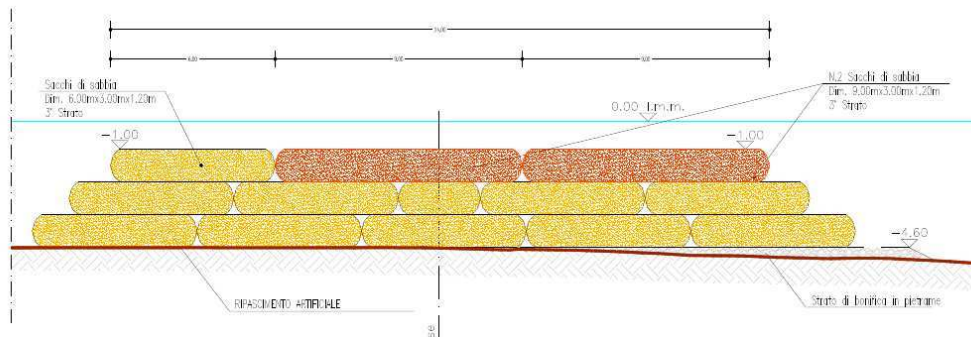


Figura 7.2 Confronto tra la sezione dell'opera originale e quella modificata.

8. Prove sperimentali condotte

8.1. Generalità

La valutazione della trasmissione a tergo dell'opera di presidio dell'intervento di ripascimento proposto è stata condotta, come già accennato in precedenza, attraverso la conduzione di prove su modello fisico.

La sperimentazione è stata condotta presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università degli studi di Messina, all'interno di un canale per la simulazione dei processi idro-morfodinamici costieri.

Obiettivo della campagna sperimentale è stata la valutazione dell'idrodinamica indotta dalla presenza della barriera, con particolare riferimento alla valutazione sia della riflessione che della trasmissione dell'onda che impatta sulla barriera soffolta. Inoltre si sono individuate le condizioni idrodinamiche che portano all'instabilizzazione dei singoli sacchi che costituiscono l'opera.

Nel presente capitolo vengono descritti l'apparato sperimentale utilizzato e la procedura sperimentale seguita. Successivamente vengono presentati gli esperimenti condotti.

8.2. Descrizione dell'apparato sperimentale

Le prove sperimentali sul modello sono state effettuate in un canale lungo 18 m, di sezione rettangolare larga 40 cm e alta 80 cm, rappresentato in Figura 8.1. Le pareti verticali del canale sono realizzate con lastre di vetro opportunamente fissate su una intelaiatura metallica per tutta la lunghezza utile del canale, pari a 15 m.

La generazione del moto ondoso avviene tramite un battitore del tipo a ventola costituito da una pala metallica di forma rettangolare collegata ad un pistone oleodinamico controllato mediante un regolatore industriale (Gefran 2500) che grazie alla presenza di un potenziometro posto in parallelo allo stelo del pistone idraulico, comanda una valvola idraulica proporzionale. Il regolatore è inserito all'interno di un quadro che gestisce l'accensione e lo spegnimento del compressore idraulico, collegato ad un PC tramite una scheda di acquisizione e controllo National Instruments (NI)[©]. Il moto ondoso all'interno del canale è quindi generato mediante un software appositamente messo a punto, il quale invia al battitore i riferimenti di posizione mediante la scheda NI e che sarà descritto più nel dettaglio di seguito.

Alle spalle del battitore è presente un serbatoio collegato al canale tramite un convogliatore di sezione rettangolare a 3 lati, avente lo scopo di accumulo momentaneo dei volumi d'acqua mobilitati dal battitore. Esso è riempito con materassi realizzati mediante una rete in materiale plastico riempita con spezzoni di tubo corrugato in PET, allo scopo di smorzare il moto ondoso generato alle spalle del battitore.

All'estremità opposta del canale è stato realizzato il modello fisico oggetto della presente sperimentazione che sarà descritto meglio nel seguito. E' inoltre presente, anche se non utilizzata nella presente sperimentazione, una vasca di accumulo dei volumi d'acqua nel canale, la quale, mediante una pompa idraulica, alimenta un sistema di ricircolo delle portate che possono dunque essere reimmesse all'interno del canale alle spalle del battitore.

Per la misura delle altezze delle onde nel canale sono state impiegate quattro sonde di livello di tipo resistivo, di lunghezza pari a 300 mm, costituite da due fili metallici di acciaio inossidabile di diametro di 1.5 mm, disposti parallelamente ad una distanza di 12.5 mm. La presenza di acqua fra i due fili cortocircuita la sonda la quale è alimentata da una differenza di potenziale con un segnale ad onda quadra ad alta frequenza. In uscita viene inviato un segnale di corrente proporzionale alla profondità di immersione della sonda il quale viene trasformato in un segnale di differenza di potenziale. Il segnale

analogico viene inviato ad una scheda di acquisizione per essere convertito in digitale. I valori di differenze di potenziale così misurati vengono convertiti in altezza d'acqua mediante un software appositamente realizzato.

Le quattro sonde, denominate rispettivamente s1, s2, s3 e s4 a partire dal battitore nella direzione di propagazione del moto ondoso, sono accoppiate a due a due e, per ogni coppia le sonde sono distanziate l'una dall'altra di $\Delta=18$ cm in modo da rispettare la relazione di *Goda e Suzuki (1976)*, (4.8) riportata al precedente paragrafo 5.2.

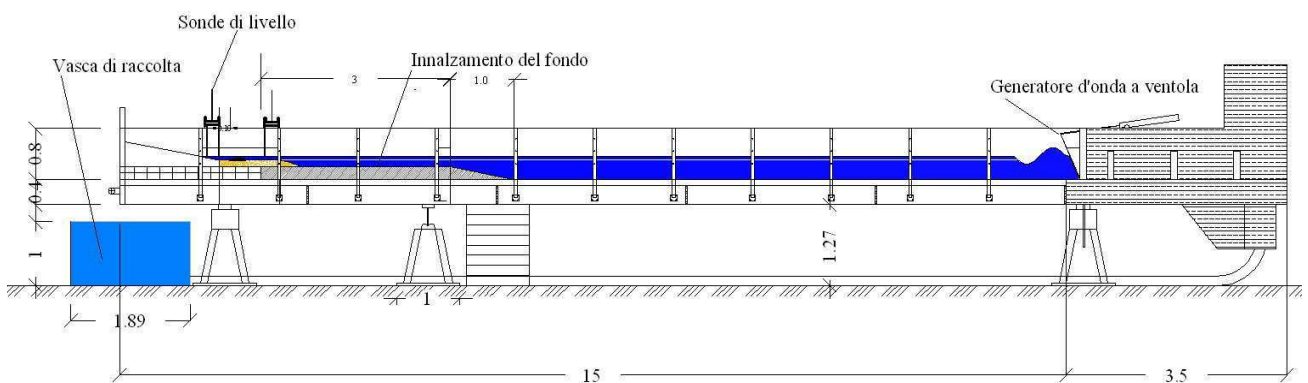


Figura 8.1 Sezione dell'apparecchiatura sperimentale utilizzata.

8.3. Preparazione del modello

Poiché i tiranti idrici da riprodurre nel corso della campagna sperimentale sono piuttosto piccoli, per ottimizzare il funzionamento del battitore a ventola e riuscire a riprodurre onde più "pulite", si è reso necessario sollevare il fondo del canale nella zona che ospita il modello (Figura 8.2).



Figura 8.2 Vista del canale prima dell'innalzamento del fondo.

Pertanto si è deciso di innalzare il fondo mediante doppio strato di mattoni pieni di asfalto, delle dimensioni di 20x10x3 cm poggiati su un bassofondo di polistirolo dello spessore di 2.5 cm (Figura 8.3).

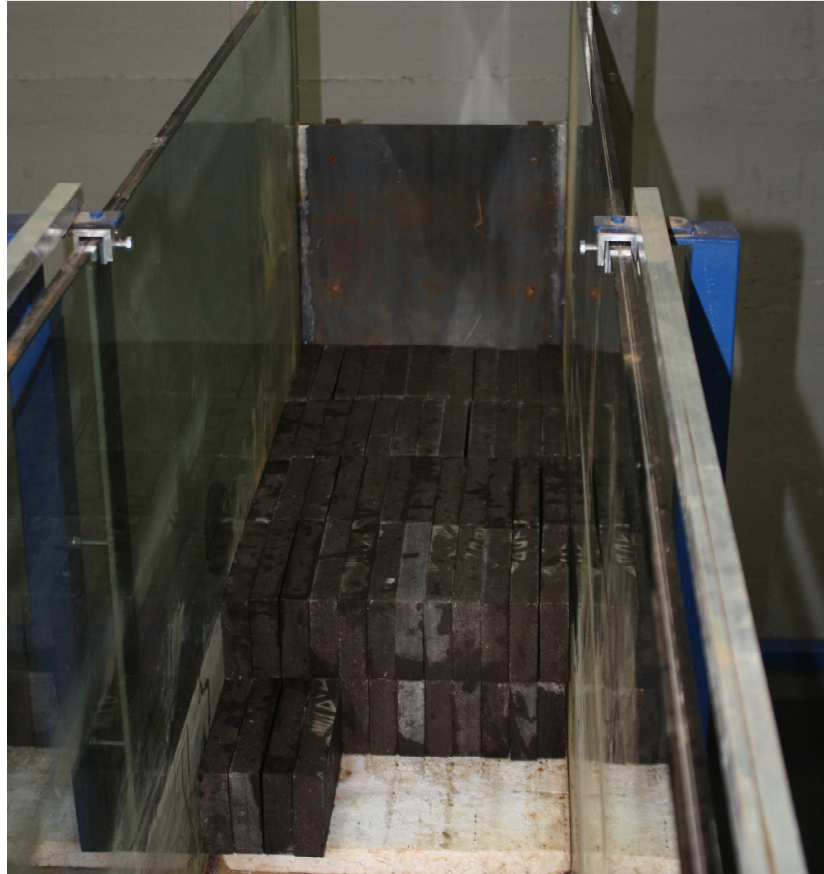


Figura 8.3 Innalzamento del fondo del canale mediante uno strato di polistirolo e un doppio strato di mattoni di asfalto pieni.

Quindi si è disposto uno strato di geotessuto ed è stato poi versato uno strato uniforme alto 10 cm di sabbia, utilizzando sabbia di quarzo uniforme avente un diametro mediano d_{50} pari a 0.25 mm (si vedano la Figura 8.4 e la Figura 8.5). In Figura 8.6 è invece riportata la curva granulometrica della sabbia di quarzo impiegata per la sperimentazione.



Figura 8.4 Diverse fasi realizzative dell'innalzamento del fondo: disposizione del geotessuto e della sabbia.



Figura 8.5 Sabbia di quarzo impiegata per la sperimentazione condotta.

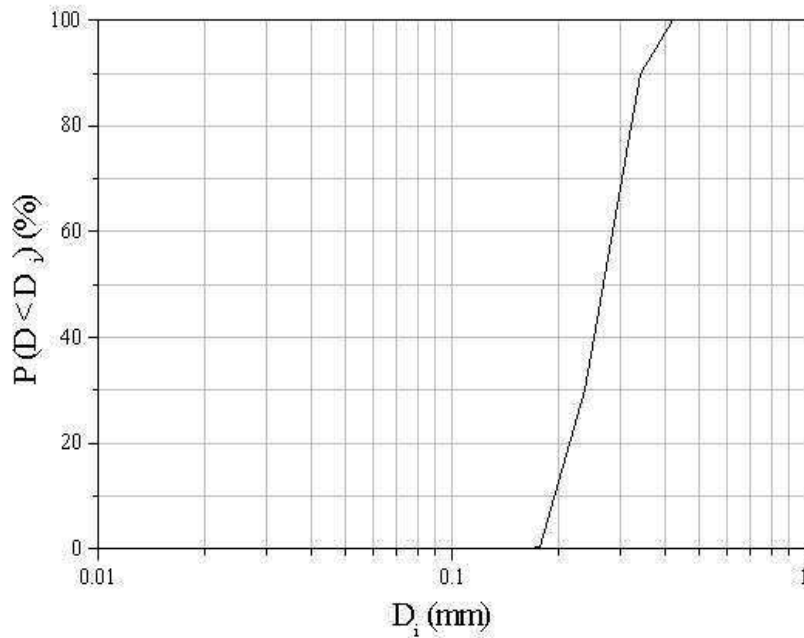


Figura 8.6 Curva granulometrica della sabbia di quarzo impiegata per la sperimentazione condotta.

Una volta realizzato uno strato uniforme di spessore pari a 10 cm sono state posizionate due guide alle pareti del canale, poggiandole sul substrato sabbioso, allo scopo di agevolare la sagomatura del profilo di spiaggia e controllare la pendenza di quest'ultimo. Si precisa che le modifiche indotte dall'idrodinamica sul profilo di spiaggia esulano dall'oggetto della presente relazione e dunque la scelta della pendenza del profilo di spiaggia è stata scelta pari a 1:5 in modo da minimizzare l'effetto della riflessione indotta dalla presenza della spiaggia medesima.



Figura 8.7 Preparazione del profilo di spiaggia: posizionamento di guide laterali per la sagomatura del profilo.

Si è quindi passati a realizzare in scala il modello di sandbag in geotessuto (Figura 8.8): si è prima realizzato l'involucro in geotessuto, lasciando un lato aperto per le operazioni di riempimento, quindi questo è stato riempito in

sabbia e infine chiuso l'ultimo lato, avendo cura di verificare che le dimensioni del modello riproducessero correttamente quelle ottenute a seguito dello scaleggiamento delle dimensioni del prototipo (Figura 8.9).



Figura 8.8 Modello di sacco in geotessuto.



(a)



(b)



(c)

Figura 8.9 Dimensioni del modello di sacco in geotessuto: (a) b_c ; (b) l_c ; (c) h_c .

Per la realizzazione della struttura si è seguito lo schema di posa fornito dal progettista, e riportato nel paragrafo 7.4. Dalla Figura 8.10 alla Figura 8.12 si riportano le immagini che illustrano le modalità di posa dei singoli strati.



Figura 8.10 Posa del primo strato della struttura.



Figura 8.11 Posa del secondo strato della struttura.



Figura 8.12 Posa del terzo strato della struttura.

In Figura 8.13 si riporta una visione di insieme del modello fisico, mentre in Figura 8.14 è rappresentata la sezione trasversale della struttura.



Figura 8.13 Visione d'insieme del modello fisico.



Figura 8.14 Sezione trasversale della struttura.

Come già accennato e meglio dettagliato nel seguito, si è ritenuto opportuno, a seguito di alcune risultanze sperimentali, modificare la sezione trasversale della struttura aumentando la larghezza trasversale complessiva e modificando le dimensioni delle prime due file di sacchi in direzione offshore appartenenti allo strato superiore, portando la dimensione longitudinale l_c a 9 m in scala di prototipo, al fine di aumentare la stabilità della struttura. La Figura 8.15 riporta le dimensioni del nuovo modello, mentre dalla Figura 8.16 alla Figura 8.18 sono riportati i tre strati di posa della struttura modificata.



(a)



(b)



(c)

Figura 8.15 Dimensioni del modello di sacco in geotessuto modificato: (a) b_c ; (b) l_{ci} ; (c) h_c .



Figura 8.16 Posa del primo strato della struttura modificata.



Figura 8.17 Posa del secondo strato della struttura modificata.



Figura 8.18 Posa del terzo strato della struttura modificata.

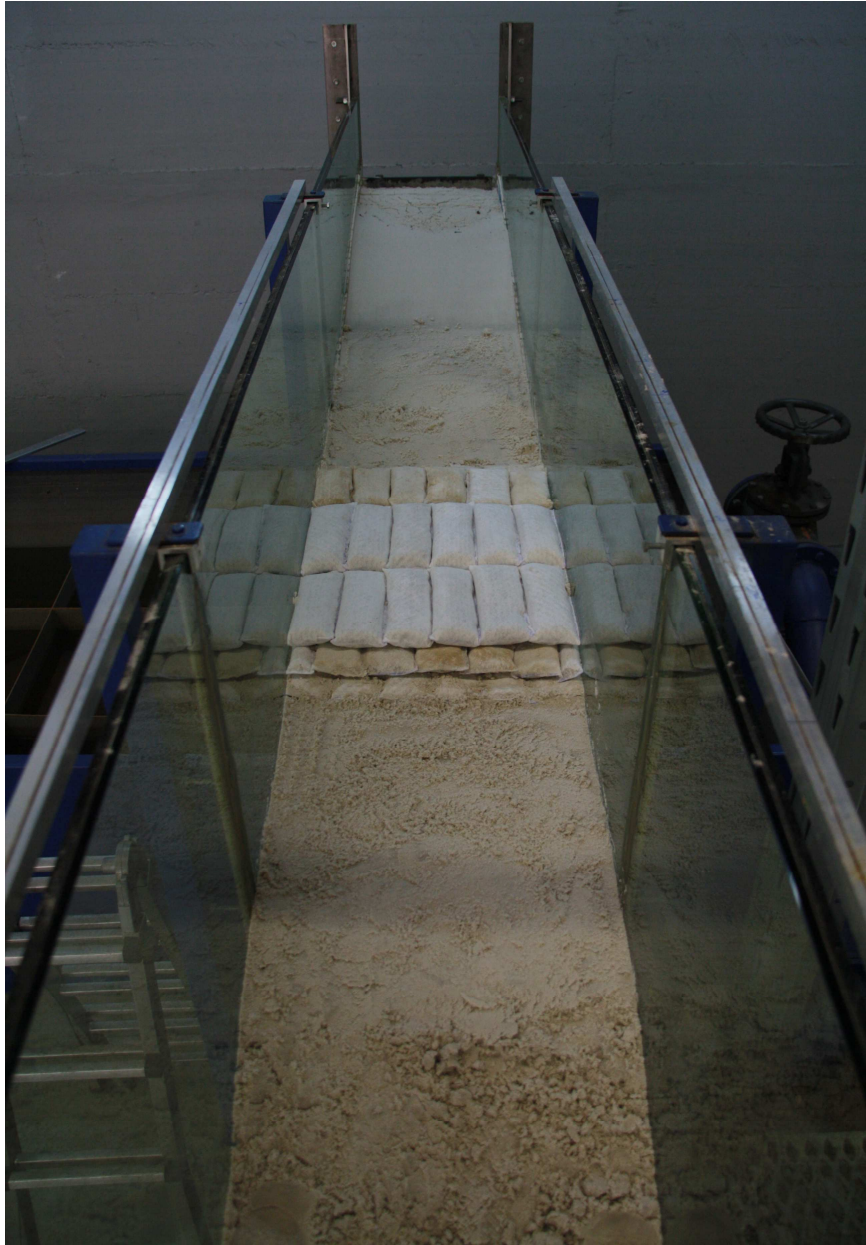


Figura 8.19 Visione d'insieme del modello fisico con la struttura modificata.

8.4. Procedura sperimentale

La procedura sperimentale è stata organizzata in tre fasi: una fase preliminare, una fase di acquisizione dei dati e una di elaborazione degli stessi.

La fase preliminare è unica per tutte le prove e viene generalmente ripetuta ogni volta che il canale viene riempito. La seconda e la terza fase invece devono essere ripetute per ogni prova.

8.4.1. Operazioni preliminari

Durante la fase preliminare vengono posizionate le sonde resistive per la misura del livello della superficie libera a una distanza di circa una lunghezza d'onda dalla struttura.

Il canale viene quindi riempito fino alla profondità h_0 prescelta ($h_0=10.2$ cm corrispondente ad una profondità di 5.1 m in scala di prototipo). Il raggiungimento del livello viene controllato tramite l'uso di una punta idrometrica con una precisione pari a 1/20 di millimetro.

La misura della distanza tra le sonde Δ , essenziale per l'applicazione del metodo di *Goda e Suzuki (1976)*, è effettuata in prossimità del livello medio nel canale.

Affinché il segnale delle sonde resistive possa essere trasformato in misura di livello, le sonde vengono opportunamente tarate, in modo da poter convertire il segnale, acquisito in Volt in una misura di livello in cm attraverso l'individuazione di una retta di calibrazione. A tal fine, dal momento che i tiranti in gioco sono piuttosto bassi, la taratura è stata eseguita facendo variare il livello idrico in vasca: inizialmente questo è stato portato al livello zero, corrispondente al livello medio del mare, quindi si è riempito il canale a +/-3 cm e successivamente si è riportato il livello allo zero iniziale, registrando ad ogni step il valore in Volt registrato dalle sonde.

8.4.2. Acquisizione dei dati

Prima di ogni esperimento viene spianato il profilo di spiaggia retrostante la struttura con pendenza 1:5 e il fondale antistante, realizzando un primo tratto suborizzontale seguito da un secondo tratto con pendenza 1:5. Viene inoltre ripristinata la struttura dell'opera di presidio nel caso in cui l'esperimento precedente abbia comportato lo spostamento di alcuni dei sacchi in geotessuto.

Il primo passo della fase di acquisizione dati consiste nella scelta dei parametri per la generazione del moto ondoso all'interno del canale, ovvero nella scelta della condizione idrodinamica a cui sottoporre la struttura.

Come accennato in precedenza, questa fase viene perseguita attraverso l'utilizzo di un apposito software, messo a punto in ambiente Delphi®, il quale, previa inizializzazione del sistema, consente innanzitutto di selezionare se riprodurre onde regolari, random o di acquisire un segnale generato dall'esterno.

Nel caso di generazione di onde regolari, il codice richiede di fissare l'ampiezza (in Volt) e la frequenza (in s^{-1}) di oscillazione del battitore, nonché l'offset e la frequenza di campionamento dei dati.

Nel caso di generazione di onde random, il codice è in grado di riprodurre uno spettro TMA, ovvero caratterizzato dalla seguente relazione :

$$S(f) = \beta_j H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]} \quad (5.1)$$

in cui:

$$\beta_j = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] \quad (5.2)$$

$$T_p = T_s / [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}] \quad (5.3)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 : f \leq f_p \\ 0.09 : f \geq f_p \end{cases} \quad (5.4)$$

$$\gamma = 3.3 \quad (5.5)$$

essendo H_s e T_s l'altezza ed il periodo significativi, f ed f_p rispettivamente la frequenza e la frequenza di picco dello spettro.

Oltre alle grandezze sopra menzionate vengono impostate anche le frequenze di taglio del segnale, assunte pari a 0.05 per quanto riguarda il limite inferiore e a 2.5 per quello superiore, la frequenza di campionamento dei

dati, nonché il fattore di scala, l'offset del battitore e la durata della serie temporale, assunta pari a 180 s.

La fase di registrazione del segnale delle quattro sonde di livello avviene simultaneamente all'innescio del moto ondoso nel canale, pertanto in fase di elaborazione dei dati è poi necessario depurare il segnale delle prime decine di secondi, in modo tale da filtrare il transitorio iniziale e che all'interno del canale si sia già instaurato il processo di riflessione.

La frequenza di acquisizione adottata è pari a 100 Hz sia per le prove con onde regolari che per gli spettri; la durata di ogni prova è pari a 2 minuti per le onde regolari (150-250 periodi d'onda circa) e 4 minuti per le onde irregolari (300-500 periodi d'onda circa).

Inoltre, per ogni prova sperimentale è stata scattata una fotografia e sono state segnalate eventuali note, al fine di individuare anche visivamente qualora intervenissero anomalie della prova stessa (eccessiva tridimensionalità dell'onda, spostamento dei sacchi, scavo al piede, etc.).

8.4.3. Elaborazione ed analisi dei risultati

Una volta acquisiti, i dati vengono subito elaborati. Il primo passo consiste nella generazione degli spettri di energia a partire dai segnali rilevati dalle sonde, tramite un'analisi DFT (Direct Fourier Transform). Successivamente vengono calcolati gli spettri dell'onda incidente e di quella riflessa, applicando il metodo delle due sonde di *Goda e Suzuki (1976)* e utilizzando dei codici di calcolo in linguaggio FORTRAN appositamente implementati. La conoscenza di questi ultimi spettri di energia consente quindi di stimare sia le altezze significative delle onde incidente e riflessa, sia di stimare il valore del coefficiente di riflessione. Infine, i dati vengono registrati su supporto digitale e ne viene fatta una copia di riserva, per ragioni di sicurezza.

8.5. Prove effettuate

Sono state effettuate due serie di prove, testando due differenti configurazioni di struttura, la prima, denominata nel seguito struttura originale, caratterizzata da una larghezza B_c della cresta pari a 36 cm, ottenuta sovrapponendo tre strati di sacchi in geotessuto riempiti in sabbia con dimensioni pari a 12 cm x 6 cm x 2.4 cm, la seconda, denominata struttura modificata, con B_c pari a 48 cm, ottenuta sempre sovrapponendo tre strati di sacchi, dei quali le ultime due file dello strato superficiale sono state modificate realizzando dei sacchi più lunghi, caratterizzati da una lunghezza l_c pari a 18 cm.

La prima serie di prove è stata mirata a valutare l'attenuazione del moto ondoso a tergo della barriera in sacchi. Più in particolare la struttura originale è stata sottoposta a diverse condizioni di moto ondoso; i parametri idrodinamici considerati per le prove sono stati ottenuti assumendo le forzanti a cui è soggetto il prototipo (determinate a partire dallo studio idraulico marittimo redatto dal DICA dell'Università di Catania e richiamato nel capitolo 6) e utilizzando il rapporto 1:40 adottato per ridurre in scala il modello. Partendo da queste informazioni, le dimensioni spaziali sono state ridotte in scala 1:50, mentre i tempi sono stati ridotti in scala $(1:50)^{1/2}$ in accordo con le considerazioni svolte al capitolo 7.

Più specificamente, i periodi utilizzati nella modellazione sono risultati compresi tra 0.5 s e 2 s e le altezze d'onda tra 0.003 m e 0.08 m. In Tabella 8.I si riportano i range di variabilità dei parametri idrodinamici considerati nell'esecuzione delle prove, ovvero rispettivamente altezza d'onda H , periodo T , lunghezza d'onda L ; si ricorda infine che la profondità d'acqua h è stata mantenuta costante nell'esecuzione delle prove e pari a 0.102 m in scala di modello, corrispondenti a 5.1 m in scala di prototipo.

Tabella 8.I Intervallo di variabilità dei parametri idrodinamici di controllo a scala del modello fisico e di prototipo.

	Scala di modello 1:50		Scala di prototipo	
	Valore minimo	Valore massimo	Valore minimo	Valore massimo
H [m]	0.003	0.08	0.06	4.0
T [s]	0.5	2.0	3.5	14.1
L [m]	0.36	1.96	18.3	98.2

Poiché nella prima serie di prove, ovvero quelle effettuate con la configurazione originale, si è osservato che alcuni sacchi della prima fila si spostavano sotto l'azione del moto ondoso, è stata effettuata la seconda serie di prove, con la configurazione modificata, con l'obiettivo invece di valutare la stabilità della struttura nelle sole condizioni che avevano provocato modifiche strutturali all'opera di presidio, ripetendo dunque le prove che avevano dato risultati negativi per quanto riguarda la stabilità.

Sono state effettuate complessivamente 84 prove, 75 relative alla configurazione originale e 9 alla configurazione modificata; per la configurazione originale 45 sono relative ad onde regolari e 30 ad onde random, per la configurazione modificata 6 ad onde regolari e 3 ad onde random.

Nella Tabella 8.II e nella Tabella 8.III vengono riportate rispettivamente le informazioni relative alle prove con onde regolari e a quelle con onde random, evidenziando in rosso in ciascuna tabella le prove che hanno dato esito negativo in termini di stabilità dei sacchi. Queste ultime prove sono state ripetute con la configurazione modificata, mantenendo invariati i parametri idrodinamici dell'esperimento. Si ritiene opportuno precisare che al fine di rispettare i tempi di esecuzione delle prove imposti dal Committente, tenendo conto che le prove sulla configurazione modificata (sostituzione di alcuni sacchi in geotessuto con altri di lunghezza pari a 9 m) non erano state inizialmente previste, essendosi rese necessarie in esito alle prove condotte sulla

configurazione originale (sacchi in geotessuto di lunghezza pari a 6 m), non è stata analizzata l'idrodinamica per la configurazione modificata ma solo la stabilità della struttura. Tuttavia, tenendo conto che la configurazione modificata differisce da quella originale solo per una maggiore larghezza della berma, è certamente possibile affermare che in termini di trasmissione la nuova sezione individuata può solo contribuire a smorzare l'energia trasmessa dal moto ondoso a tergo della struttura e che pertanto i risultati ottenuti sono da intendersi come cautelativi rispetto alla soluzione modificata.

Per ogni tabella figurano: nella prima colonna il numero progressivo della prova, nella seconda colonna il periodo T (o il periodo di picco per onde random) in s, nella terza l'altezza d'onda incidente H_i in m, nella quarta colonna l'altezza d'onda riflessa H_r in m, nella quinta l'altezza d'onda trasmessa H_t e infine nella sesta e settima colonna rispettivamente il coefficiente di riflessione K_r e il coefficiente di trasmissione K_t .

L'insieme completo delle prove è riportato in Appendice. Insieme alle informazioni relative a ciascuna delle prove effettuate, sono riportate un'immagine della prova stessa, i segnali registrati dalle due sonde lato offshore considerate per l'applicazione del metodo di *Goda e Suzuki (1976)* e quello registrato dalla sonda s4 utilizzata ai fini della valutazione della trasmissione, gli spettri di energia dell'onda incidente, dell'onda riflessa e dell'onda trasmessa a tergo della struttura.

Tabella 8.II Caratteristiche idrodinamiche delle prove condotte con onde regolari (in rosso le prove che hanno dato esito negativo in termini di stabilità).

prova [-]	T [s]	H _i [m]	H _r [m]	H _t [m]	K _r [-]	K _t [-]
el_001	2.01	0.009	0.005	0.005	0.556	0.522
el_002	2.01	0.019	0.007	0.013	0.382	0.700
el_003	1.94	0.031	0.010	0.019	0.305	0.600
el_004	1.32	0.028	0.009	0.016	0.306	0.568
el_005	2.01	0.041	0.014	0.017	0.345	0.415
el_006	2.01	0.057	0.019	0.024	0.328	0.418
el_007	1.34	0.013	0.004	0.015	0.283	0.998
el_008	1.34	0.030	0.004	0.027	0.146	0.890
el_009	1.34	0.045	0.011	0.017	0.239	0.376
el_010	1.34	0.058	0.015	0.027	0.262	0.460
el_011	1.34	0.063	0.020	0.035	0.323	0.556
el_012	1.34	0.068	0.198	0.032	0.293	0.470
el_013	1.01	0.017	0.014	0.013	0.083	0.735
el_014	1.01	0.040	0.007	0.020	0.185	0.500
el_015	1.01	0.053	0.012	0.020	0.232	0.370
el_016	1.01	0.066	0.016	0.021	0.248	0.323
el_017	1.01	0.071	0.016	0.020	0.228	0.280
el_018	1.01	0.074	0.016	0.019	0.216	0.261
el_019	0.81	0.015	0.003	0.015	0.229	0.996
el_020	0.81	0.034	0.005	0.021	0.148	0.626
el_021	0.81	0.054	0.010	0.023	0.192	0.433
el_022	0.81	0.068	0.015	0.027	0.223	0.393
el_023	0.81	0.071	0.015	0.029	0.208	0.406
el_024	0.81	0.069	0.015	0.027	0.215	0.394
el_025	0.68	0.015	0.002	0.015	0.158	1.000
el_026	0.68	0.031	0.006	0.015	0.192	0.497
el_027	0.68	0.046	0.008	0.015	0.173	0.330
el_028	0.68	0.058	0.010	0.017	0.171	0.295
el_029	0.68	0.061	0.011	0.017	0.177	0.280
el_030	0.68	0.059	0.010	0.017	0.170	0.280
el_031	0.58	0.011	0.004	0.011	0.339	1.000
el_032	0.58	0.022	0.007	0.018	0.296	0.823
el_033	0.58	0.032	0.009	0.017	0.291	0.531
el_034	0.58	0.036	0.012	0.013	0.338	0.364
el_035	0.58	0.032	0.010	0.012	0.321	0.375
el_036	0.59	0.035	0.010	0.013	0.277	0.366
el_037	0.51	0.011	0.004	0.008	0.399	0.755
el_038	0.51	0.009	0.002	0.009	0.284	0.980
el_039	0.59	0.024	0.005	0.012	0.202	0.508
el_040	0.51	0.025	0.007	0.013	0.270	0.524
el_041	1.95	0.057	0.021	0.014	0.376	0.240
el_042	1.76	0.058	0.022	0.017	0.372	0.300
el_062	1.48	0.064	0.022	0.035	0.338	0.550
el_063	1.55	0.072	0.015	0.033	0.202	0.464
el_064	1.45	0.066	0.018	0.033	0.264	0.495

Tabella 8.III Caratteristiche idrodinamiche delle prove condotte con onde random (in rosso le prove che hanno dato esito negativo in termini di stabilità).

prova [-]	T _p [s]	H _i [m]	H _r [m]	H _t [m]	K _r [-]	K _t [-]
el_043	1.39	0.027	0.008	0.005	0.296	0.178
el_044	1.43	0.006	0.003	0.006	0.500	0.983
el_045	1.01	0.003	0.002	0.007	0.667	0.980
el_046	0.88	0.005	0.001	0.004	0.200	0.840
el_047	1.19	0.014	0.005	0.014	0.357	0.986
el_048	1.10	0.016	0.005	0.014	0.313	0.850
el_049	1.18	0.021	0.008	0.016	0.381	0.776
el_050	1.00	0.024	0.007	0.018	0.292	0.729
el_051	0.77	0.020	0.005	0.015	0.250	0.735
el_052	1.21	0.027	0.007	0.027	0.259	0.993
el_053	1.03	0.029	0.007	0.024	0.241	0.810
el_054	1.18	0.037	0.010	0.024	0.270	0.643
el_055	1.00	0.042	0.010	0.022	0.238	0.531
el_056	0.96	0.037	0.008	0.020	0.216	0.530
el_057	1.25	0.036	0.090	0.030	2.500	0.842
el_058	1.15	0.039	0.010	0.028	0.256	0.710
el_059	1.00	0.053	0.012	0.029	0.226	0.545
el_060	1.00	0.063	0.013	0.025	0.206	0.392
el_061	1.00	0.044	0.009	0.021	0.205	0.484
el_065	1.03	0.068	0.016	0.027	0.235	0.391
el_066	1.17	0.051	0.013	0.033	0.255	0.639
el_067	1.25	0.049	0.011	0.033	0.224	0.680
el_068	1.22	0.037	0.011	0.030	0.297	0.808
el_069	1.18	0.061	0.018	0.035	0.295	0.566
el_070	1.27	0.065	0.018	0.038	0.277	0.580
el_071	1.03	0.048	0.013	0.031	0.271	0.654
el_072	0.89	0.034	0.010	0.027	0.294	0.779
el_073	1.63	0.075	0.020	0.030	0.267	0.397
el_074	1.39	0.074	0.024	0.034	0.324	0.461
el_075	1.56	0.075	0.025	0.039	0.333	0.520

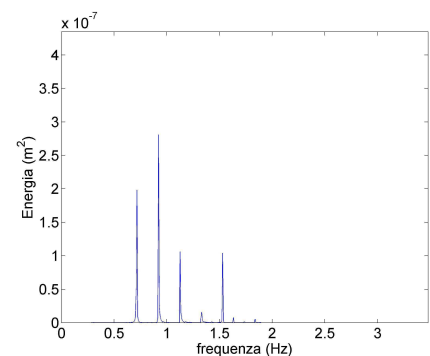
Infine in Tabella 8.IV è riportata una sintesi delle condizioni morfodinamiche in prossimità della struttura al termine di ogni prova, della durata pari approssimativamente a 15 minuti, ovvero un tempo sufficiente a determinare il raggiungimento di condizioni di equilibrio morfodinamico. In particolare per ognuna delle prove viene indicato il numero di sacchi che si sono spostati durante la prova, lo scavo al piede dell'opera e quello a tergo della stessa. In

Appendice per ciascuna di esse è riportata una sintesi dell'esperimento, un'immagine della prova e i profili trasversali all'inizio e alla fine di ogni prova.

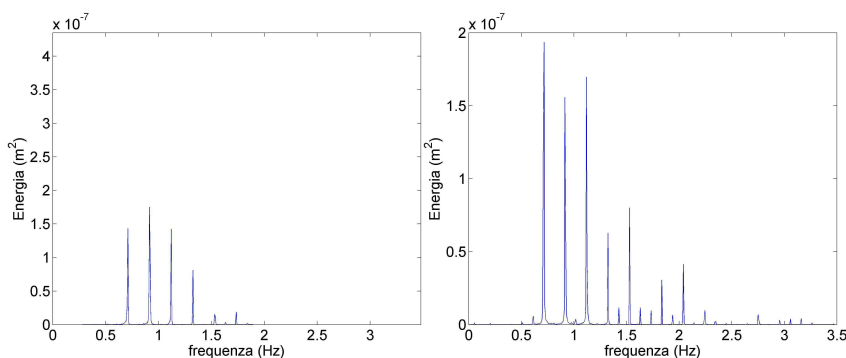
Tabella 8.IV Variazioni morfodinamiche in prossimità della struttura per le prove di stabilità condotte.

prova [-]	sacchi spostati [-]	scavo al piede [cm]	scavo a tergo [cm]
elm_006	0	-	-
elm_017	0	-	-
elm_018	0	0.95	0.10
elm_062	0	3.10	-
elm_063	0	0.25	-
elm_064	0	1.30	-
elm_073	0	0.90	0.20
elm_074	0	-	0.50
elm_075	0	-	0.50

Nella Figura 8.20 e nella Figura 8.21 si riportano, a titolo d'esempio i segnali acquisiti dalle sonde s1, s2 e s4 utilizzate per le analisi della riflessione e della trasmissione e gli spettri corrispondenti all'onda incidente, all'onda riflessa e all'onda trasmessa in corrispondenza della sonda s4 durante la prova el_021 condotta con onde regolari.



Analogamente nella Figura 8.22 e nella

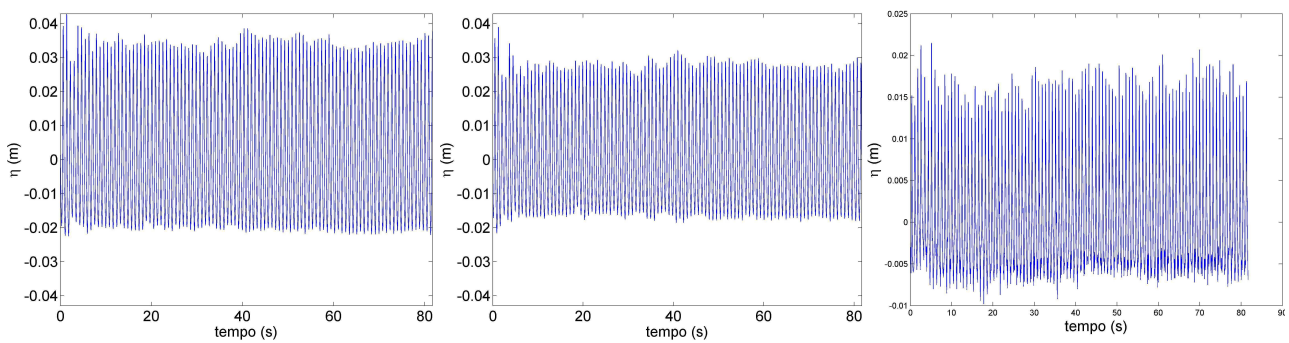


(a)

(b)

(c)

Figura 8.23 si riportano, i segnali acquisiti dalle sonde s1, s2 e s4 utilizzate per le analisi della riflessione e della trasmissione e gli spettri corrispondenti all'onda incidente, all'onda riflessa e all'onda trasmessa in corrispondenza della sonda s4 durante la prova el_043 condotta con onde irregolari.

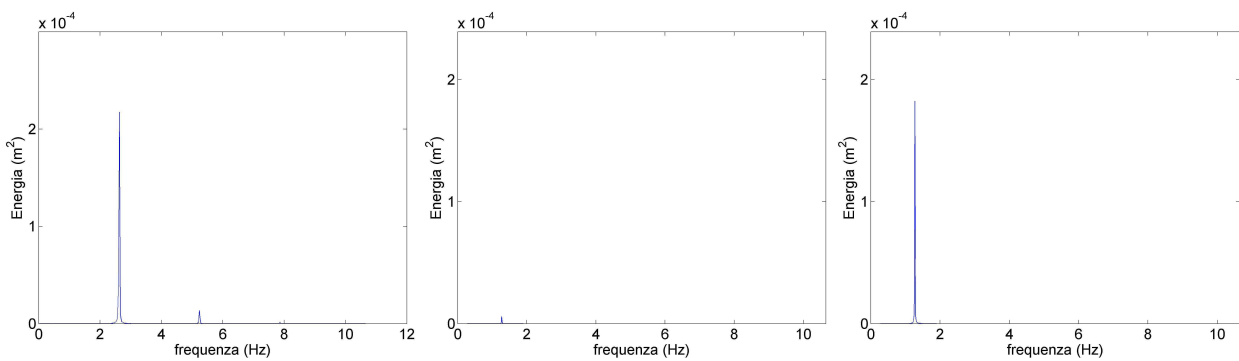


(a)

(b)

(c)

Figura 8.20 Segnali acquisiti durante la prova el_021: (a) sonda s1; (b) sonda s2; (c) sonda s3.



(a)

(b)

(c)

Figura 8.21 Spettri d'onda per la prova el_021 (a) spettro d'onda incidente; (b) spettro d'onda riflesso; (c) spettro d'onda trasmesso.

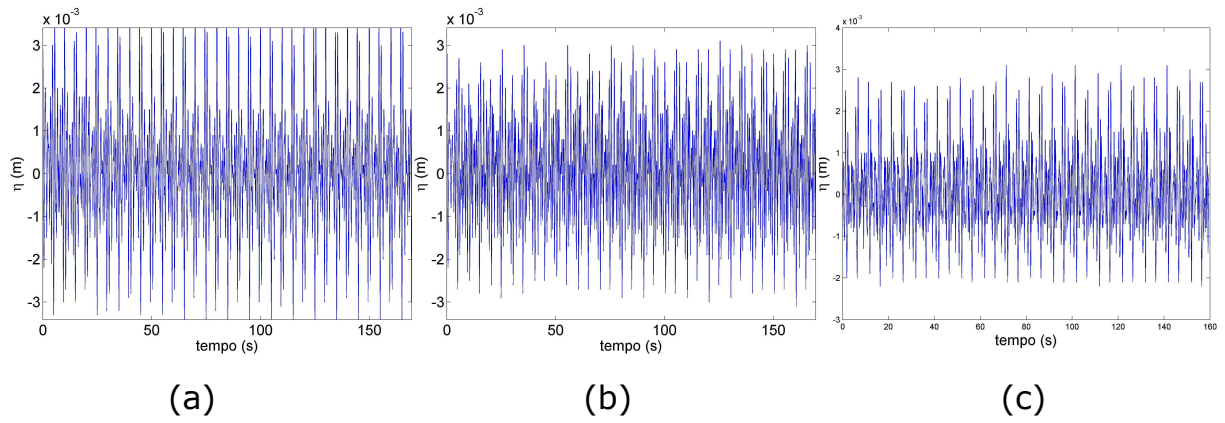


Figura 8.22 Segnale Segnali acquisiti durante la prova el_043: (a) sonda s1; (b) sonda s2; (c) sonda s3.

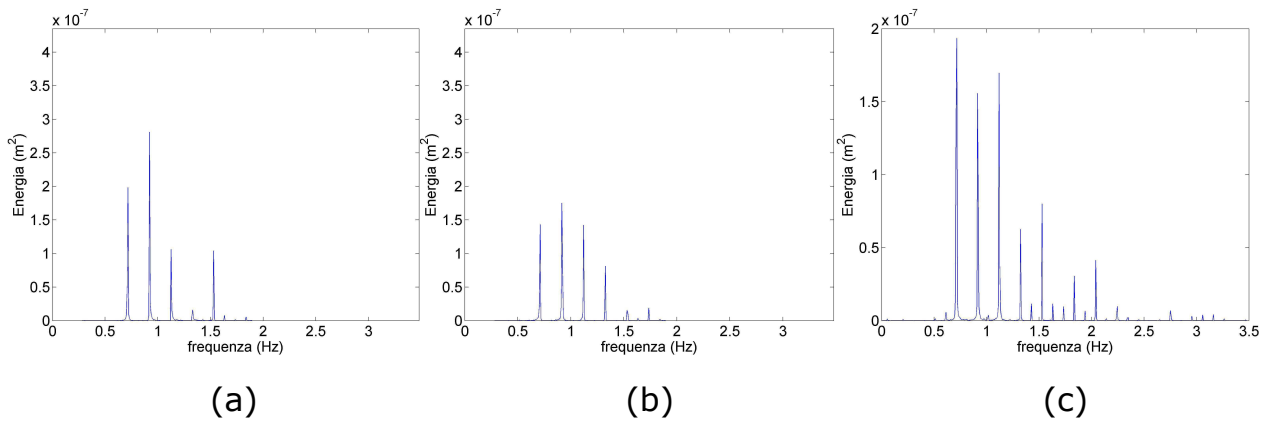


Figura 8.23 Spettri d'onda per la prova el_043 (a) spettro d'onda incidente; (b) spettro d'onda riflesso; (c) spettro d'onda trasmesso.

9. Analisi dei risultati

9.1. Generalità

Sulla base di quanto esposto nel capitolo precedente, in questo capitolo saranno presentati i risultati ottenuti in termini di attenuazione dell'altezza d'onda, valutando i coefficienti di riflessione e di trasmissione che si instaurano in prossimità della struttura nella configurazione originale.

In particolare sarà evidenziato come la struttura, nella sua configurazione originale, consente una notevole riduzione del moto ondoso a tergo dell'opera, in quanto determina un abbattimento delle onde più gravose fino al 60-70%. Tuttavia si è anche osservato che ai fini della stabilità le onde più importanti possono in taluni casi determinare uno spostamento di alcuni dei sacchi che costituiscono la struttura. Per questo motivo si è ritenuto opportuno rinforzare l'opera e testarla nei confronti delle condizioni che avevano messo in crisi la configurazione originale. Si precisa che tali prove sono state mirate a valutare la sola stabilità dell'opera, e dunque non sono stati ricalcolati per esse i coefficienti di riflessione e trasmissione, essendo immutate le condizioni idrodinamiche.

9.2. Analisi della riflessione indotta dalla struttura

Come accennato in precedenza, il primo passo compiuto per valutare gli effetti della struttura sull'idrodinamica è stato relativo alla valutazione della riflessione causata dall'opera nei confronti dell'onda proveniente dal largo.

In Figura 9.1 e in Figura 9.2 sono mostrati i valori dei coefficienti di riflessione al variare del periodo dell'onda.

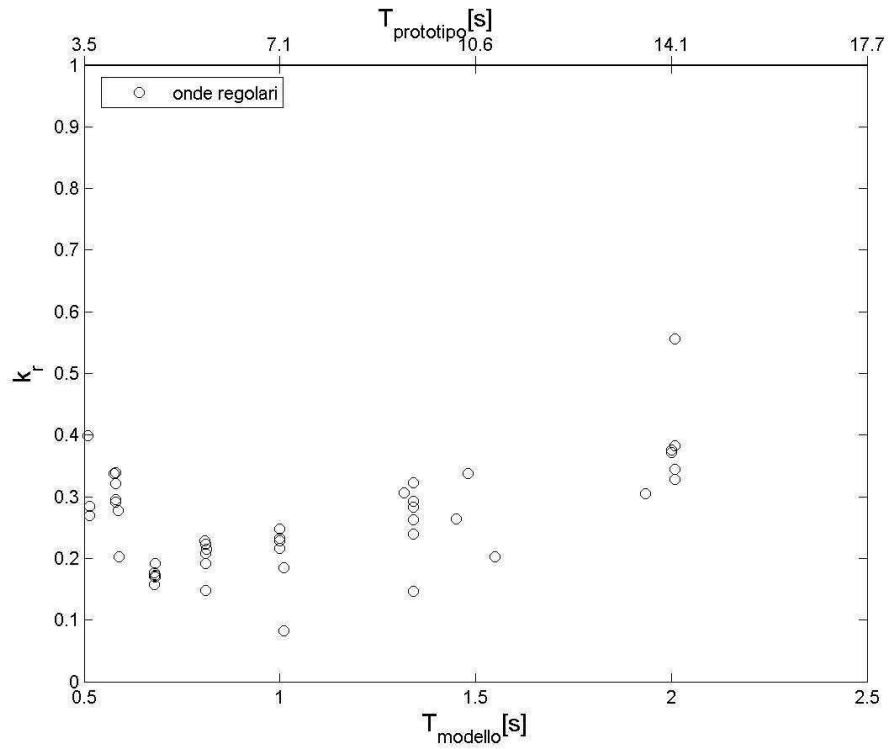


Figura 9.1 Coefficienti di riflessione al variare del periodo in presenza di onde regolari.

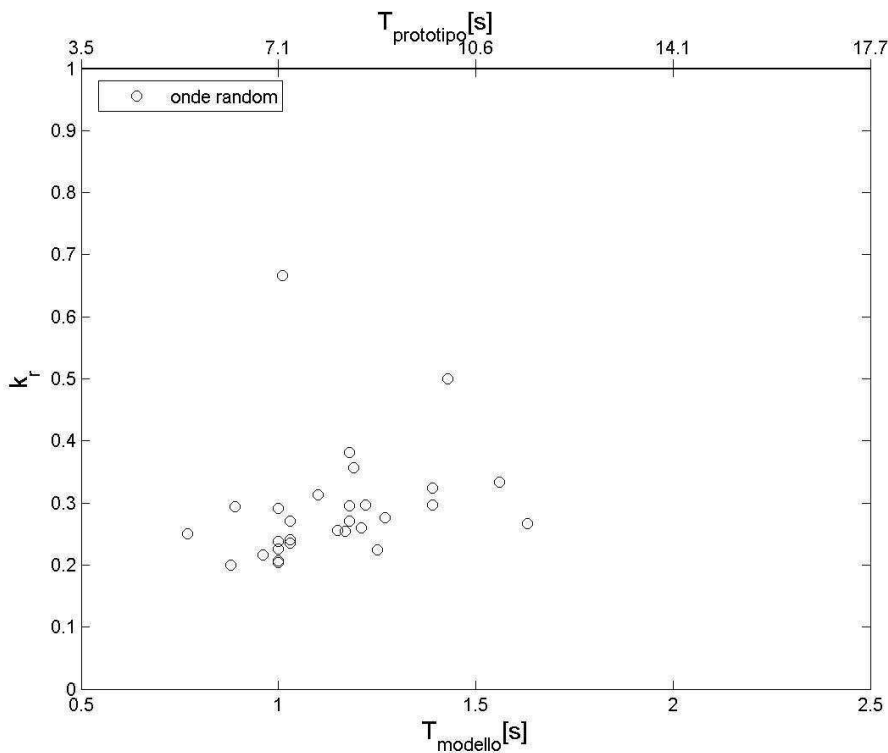


Figura 9.2 Coefficienti di riflessione al variare del periodo in presenza di onde irregolari.

Come è possibile osservare dai due grafici, sia in presenza di onde regolari che con onde irregolari la riflessione indotta dalla struttura lato mare è inferiore al 50%. Inoltre per periodi compresi tra 0.5 e 1 s in scala di modello il coefficiente di riflessione presenta un minimo con valori intorno a 0.2-0.3.

Analogamente in Figura 9.3 e in Figura 9.4 sono mostrati i coefficienti di riflessione al variare dell'altezza d'onda incidente, sempre nel caso di onde regolari e onde random. In questo caso è possibile vedere come non vi sia alcun tipo di trend al variare dell'altezza d'onda, ma piuttosto i valori più alti siano imputabili alle onde più piccole tra quelle generate, inferiori al cm in scala di modello, per le quali l'errore insito nella misura è comparabile alla misura stessa.

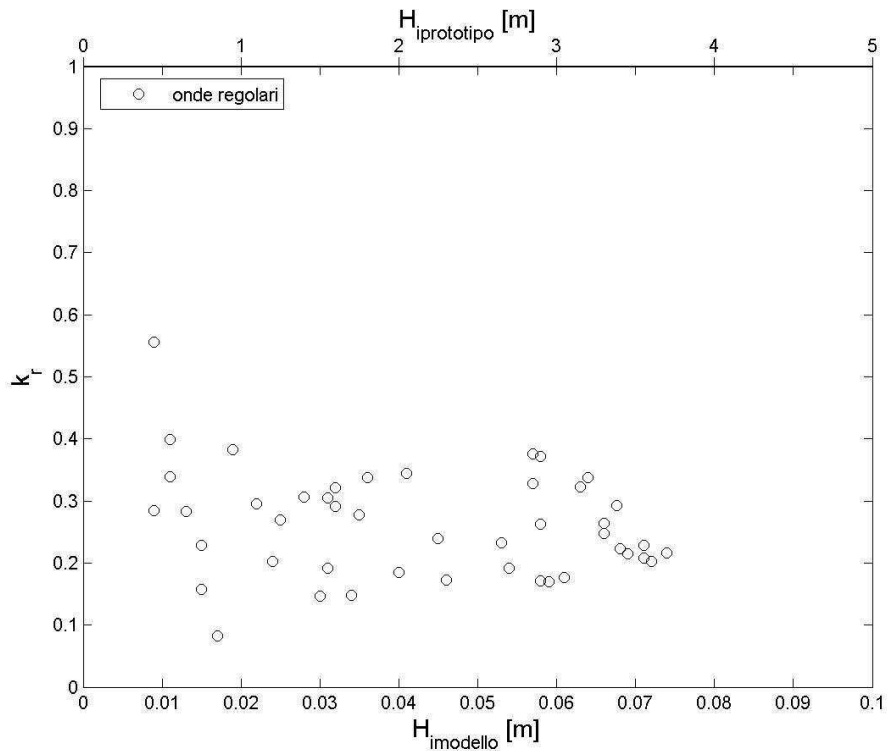


Figura 9.3 Coefficienti di riflessione al variare dell'altezza d'onda incidente in presenza di onde regolari.

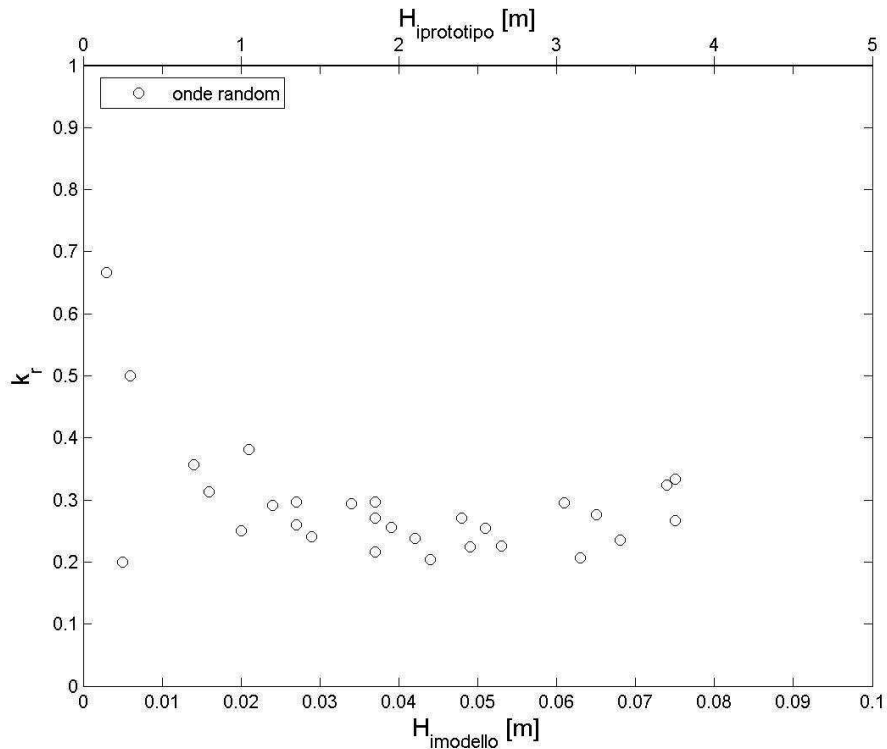


Figura 9.4 Coefficienti di riflessione al variare dell'altezza d'onda incidente in presenza di onde irregolari.

9.3. Analisi della trasmissione attraverso la struttura

E' stata quindi valutata la trasmissione del moto ondoso attraverso la barriera, come indicato nel Capitolo 5. I risultati sono plottati in funzione dell'altezza d'onda incidente in Figura 9.5 e in Figura 9.6 rispettivamente per onde regolari ed irregolari.

In entrambi i casi i coefficienti di trasmissione hanno un andamento decrescente al crescere dell'altezza d'onda incidente. Come atteso difatti, le onde più piccole non risentono quasi per nulla della presenza della barriera e dunque penetrano nello specchio acqueo retrostante più o meno integralmente; l'effetto di attenuazione del moto ondoso comincia a farsi sentire per altezze d'onda dell'ordine di 3 cm in scala di modello, corrispondenti ad onde di 1.5 m in scala di prototipo, per le quali l'onda trasmessa è pari a circa il 60% di quella incidente. All'aumentare ancora dell'altezza d'onda l'efficacia della barriera è ancora più evidente, come può del

resto osservarsi tenendo conto che le onde più gravose, dell'ordine di 4 m in scala di prototipo, penetrano smorzate fino al 30-40%.

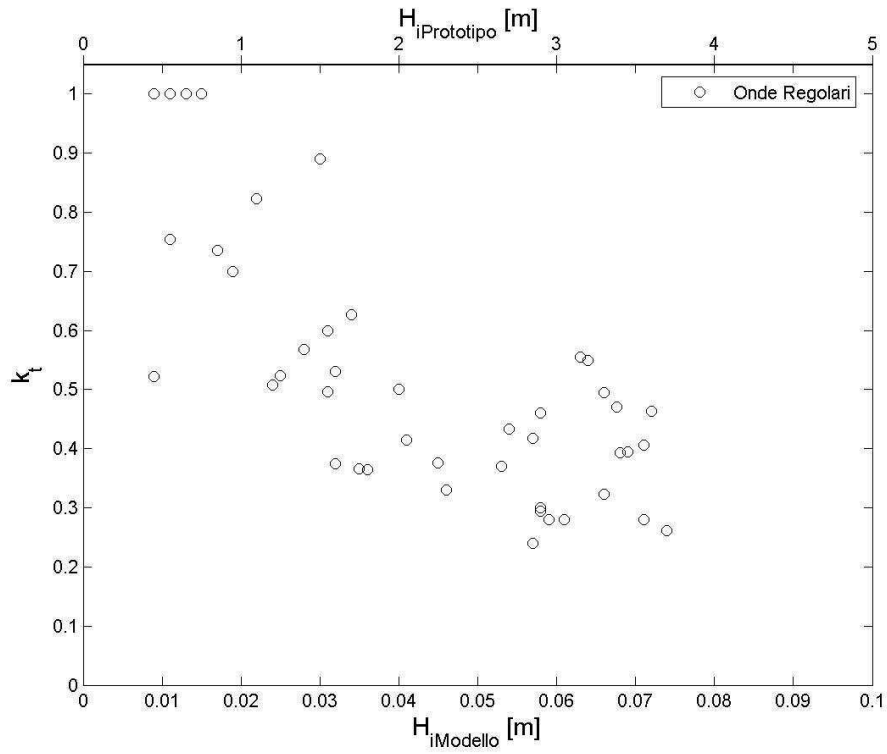


Figura 9.5 Coefficienti di trasmissione al variare dell'altezza d'onda in presenza di onde regolari.

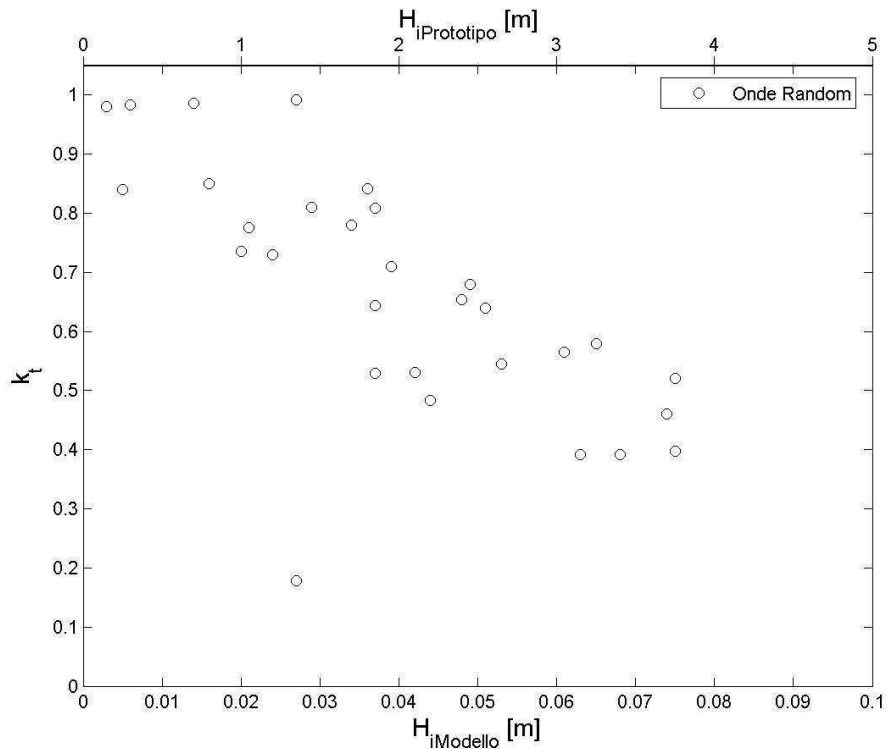


Figura 9.6 Coefficienti di trasmissione al variare dell'altezza d'onda in presenza di onde irregolari.

I risultati ottenuti sono stati inoltre confrontati con la formula proposta da *Van der Meer (1990)* e riportata nel precedente Capitolo 4, nonché in forma grafica in Figura 4.7, rendendo adimensionale l'altezza d'onda incidente con la sommergenza della cresta della barriera R_c (costante e pari a 2.5 cm in scala di modello nella presente sperimentazione). In Figura 9.7 e Figura 9.8 sono riportati detti confronti per onde regolari e irregolari rispettivamente. Nel caso di onde regolari è possibile osservare che la struttura in sacchi di geotessuto risponde meglio di quanto riportato in letteratura nella pressoché totalità dei casi analizzati; nel caso di onde random il comportamento della barriera è mediamente simile quanto riportato in letteratura, anche se va qui sottolineato come, specie per altezze d'onda più importanti, l'efficacia della barriera, come ricordato precedentemente, risulti notevolmente superiore.

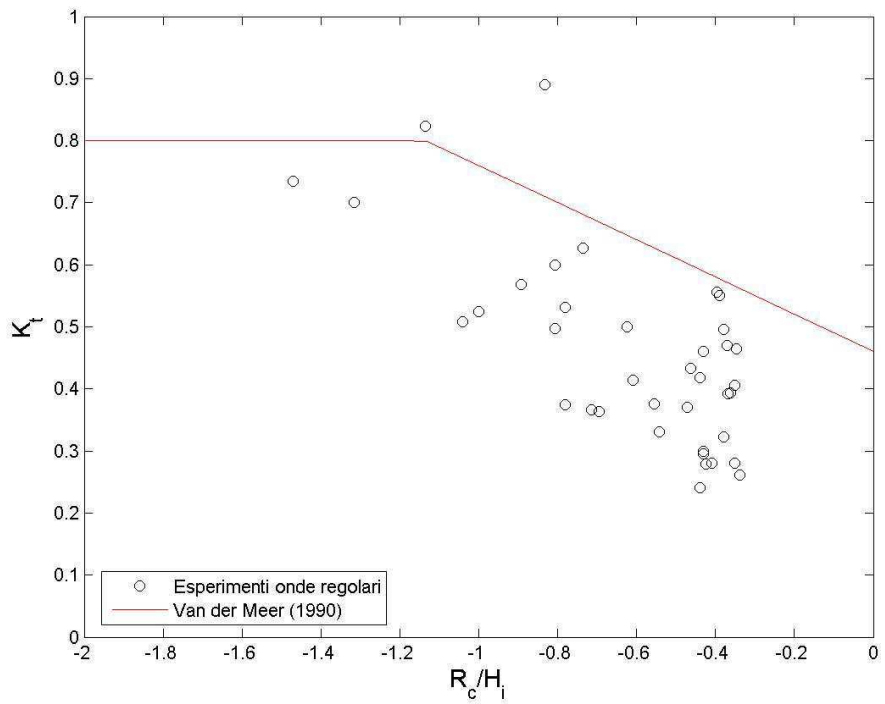


Figura 9.7 Confronto tra i coefficienti di trasmissione in presenza di onde regolari e la formula proposta da *Van der Meer (1990)*.

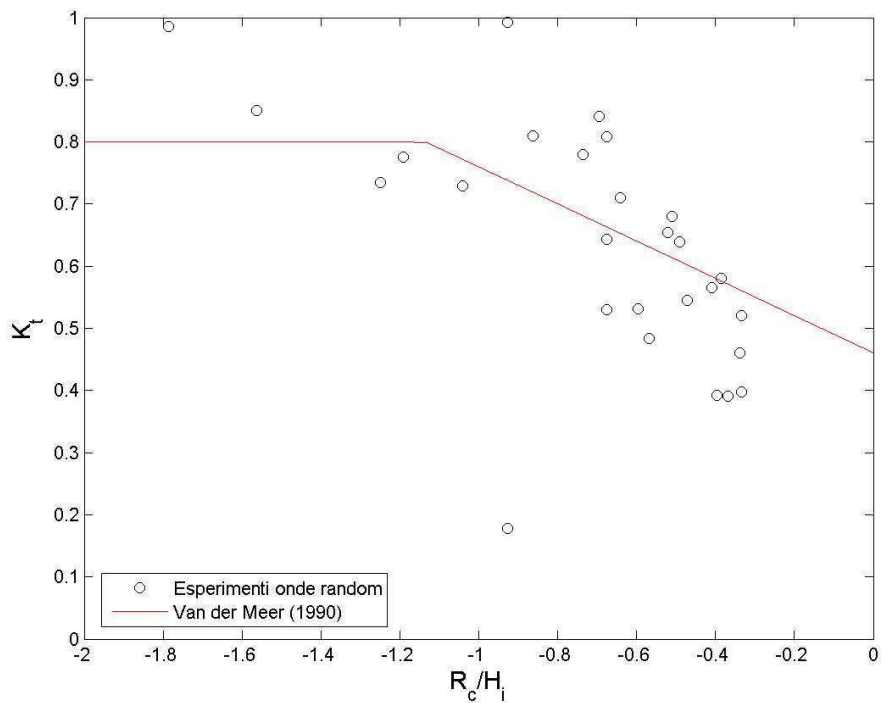


Figura 9.8 Confronto tra i coefficienti di trasmissione in presenza di onde irregolari e la formula proposta da *Van der Meer (1990)*.

9.4. Analisi della stabilità della struttura

Durante l'esecuzione delle prove sperimentali descritte nei precedenti paragrafi, come accennato in precedenza, è stato osservato, in corrispondenza delle onde più alte il sollevamento o lo spostamento di alcuni dei sacchi costituenti la barriera.

In Figura 9.9 e in Figura 9.10 si riportano rispettivamente una vista dall'alto ed una sezione dell'opera di presidio dopo la conduzione di una delle prove condotte con onde regolari in cui si è assistito alla in stabilizzazione della struttura (prova el_018, $H_i=0.074$ m, $H_r=0.016$ m, $T=1$ s).



Figura 9.9 Opera di presidio dopo l'esecuzione della prova el_018 (vista dall'alto).

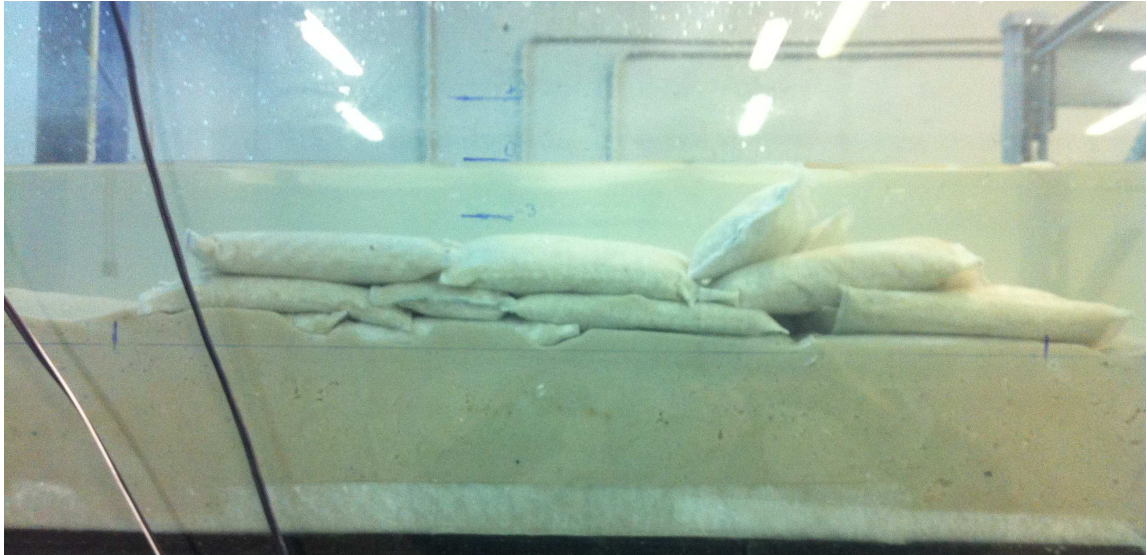


Figura 9.10 Opera di presidio dopo l'esecuzione della prova el_018 (sezione).

Analogamente in Figura 9.11 è riportata un'immagine conseguente all'esecuzione di una delle prove con onde irregolari che hanno dato esito negativo ai fini della stabilità (prova el_073, $H_i=0.075$ m, $H_r=0.020$ m, $T=1.6$ s).



Figura 9.11 Opera di presidio dopo l'esecuzione della prova el_073 (sezione).

Come già accennato, una volta acquisito il risultato di queste prove, che dimostrano come nel caso di onde energeticamente più importanti la struttura possa essere messa in crisi, il progettista ha ritenuto opportuno modificare la sezione dell'opera così come indicato nel paragrafo 7.4. Per tale configurazione modificata sono state nuovamente eseguite le prove che avevano fornito esito negativo in termini di stabilità dell'opera. In Figura 9.12 e in Figura 9.13 sono riportate a titolo d'esempio le viste dall'alto della struttura dopo la ripetizione delle prove el_018 (prova elm_018) e el_073 (prova elm_073) in cui è evidente che la struttura non si è in alcun modo modificata durante la conduzione delle prove. Lo stesso risultato si è osservato nella totalità delle prove eseguite con la configurazione modificata. In un solo caso (prova elm_062), mostrato in Figura 9.14, si è registrato un significativo scavo al piede della struttura al termine della prova.



Figura 9.12 Opera di presidio dopo l'esecuzione della prova elm_018.



Figura 9.13 Opera di presidio dopo l'esecuzione della prova elm_073.

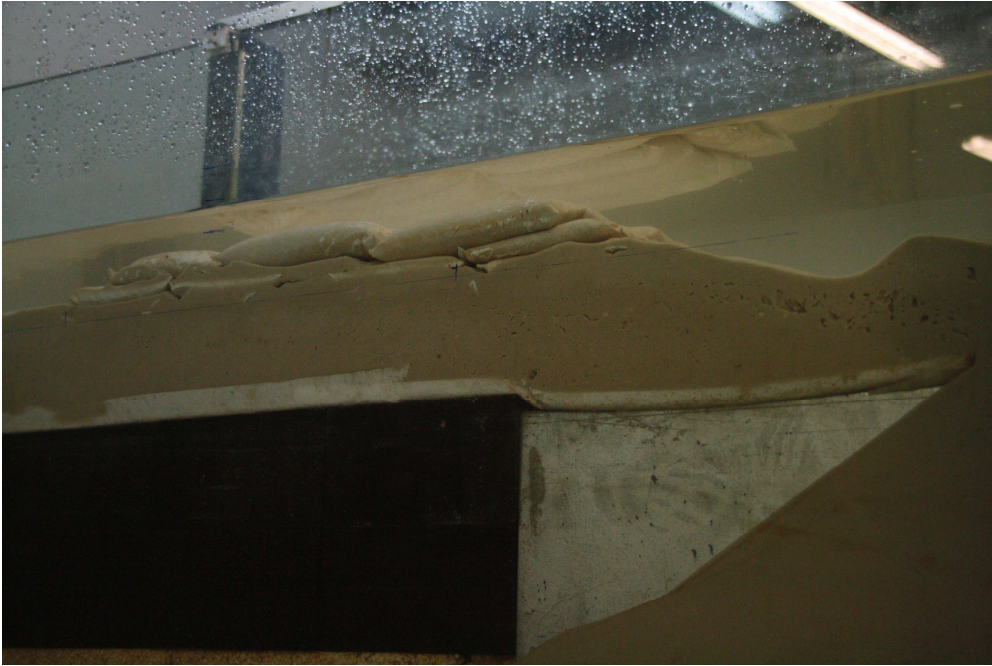


Figura 9.14 Sezione dell'opera di presidio dopo l'esecuzione della prova elm_062 in cui si è osservato un notevole scavo al piede.

Per le medesime prove si riportano dalla Figura 9.15 alla Figura 9.17 i profili trasversali acquisiti con una punta micrometrica nella sezione di mezzzeria.

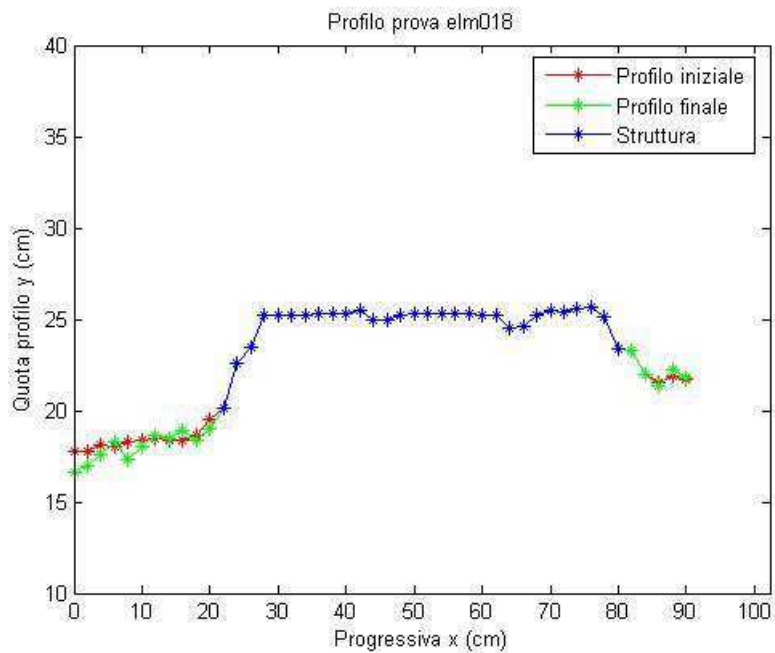


Figura 9.15 Profilo trasversale dopo l'esecuzione della prova elm_018.

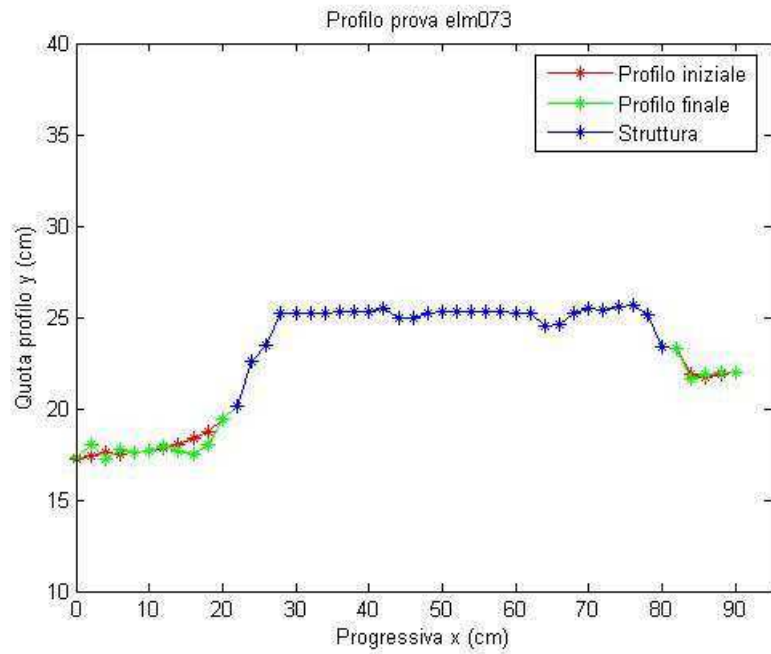


Figura 9.16 Profilum trasversale dopo l'esecuzione della prova elm_073.

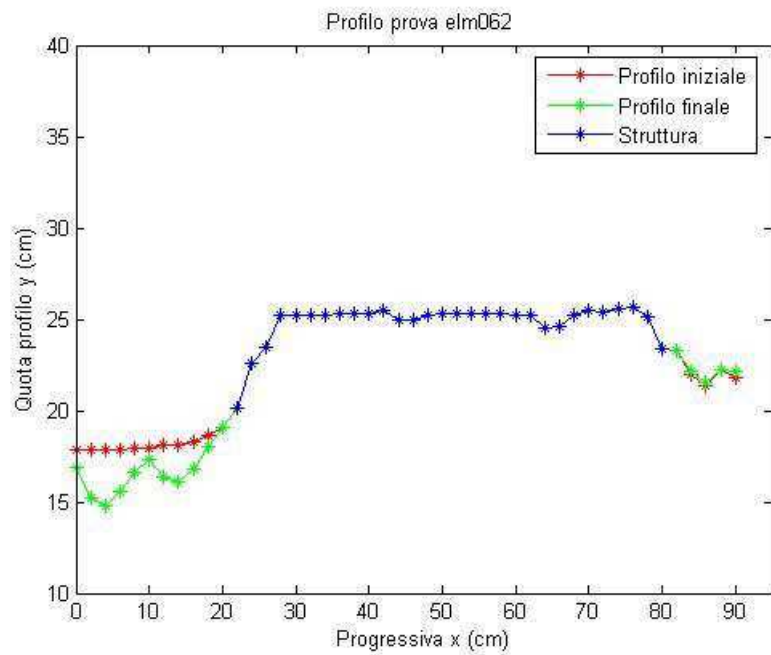


Figura 9.17 Profilum trasversale dopo l'esecuzione della prova elm_062.

10. Conclusioni

La società EUROLINK SCpA, incaricata della progettazione del Collegamento Stabile dello Stretto di Messina, ha individuato la possibilità di utilizzare parte dei sedimenti provenienti dagli scavi previsti per la realizzazione delle opere di collegamento al Ponte sul versante siciliano ai fini del ripascimento di alcuni litorali tirrenici ricadenti nella Provincia di Messina e, più specificamente, quelli compresi tra la foce del Torrente Niceto e la foce del torrente Calvaruso.

Gli interventi di ripascimento in progetto sono protetti da barriere soffolte al piede, realizzate queste ultime mediante sacchi in geotessuto riempiti di sabbia. Per valutare le modifiche indotte dalla presenza delle barriere sull'idrodinamica costiera, Eurolink SCpA ha chiesto la collaborazione del DIC dell'Università di Messina per condurre prove su modello fisico volte a stimare l'entità della trasmissione dell'energia del moto ondoso attraverso l'opera di presidio del ripascimento in progetto. Nell'ambito di detta campagna oltre a determinare i coefficienti di trasmissione del moto ondoso si è focalizzata l'attenzione anche sulla stabilità della struttura stessa nei confronti delle onde energeticamente più importanti, allo scopo di valutare se le dimensioni dei sacchi in geotessuto fossero sufficienti a garantire la capacità dell'opera di resistere ai marosi con tempi di ritorno elevati.

La presente relazione riporta i risultati di detta campagna sperimentale volta da un lato a determinare l'efficacia della barriera ai fini dell'attenuazione del moto ondoso sottocosta, e quindi di una maggiore vita utile del ripascimento, dall'altro a valutarne la stabilità nei confronti dell'azione delle onde più gravose. E' stato pertanto realizzato un modello fisico in scala di Froude con rapporto 1:50 in un canale bidimensionale lungo 15 m, adottando come criterio di similitudine il sand model (Hughes, 1993) per riprodurre i sedimenti nel modello.

La configurazione della barriera soffolta originariamente proposta dal Committente era caratterizzata da sacchi di lunghezza pari a 6 m, larghezza

pari a 3 m e alti 1.2 m. Tale configurazione è stata testata per valutare l'entità dei coefficienti di riflessione di fronte alla struttura e dei coefficienti di trasmissione a tergo dell'opera, riproducendo condizioni di moto ondoso rappresentati attraverso onde sia regolari che random caratterizzate da uno spettro Jonswap. Le onde simulate nel canale erano caratterizzate da periodi compresi tra 3.5 s e 14 s in scala di prototipo e altezze tra 0.5 e 4 m in scala di prototipo. I risultati, ottenuti applicando il metodo di *Goda e Suzuki (1976)* per determinare i coefficienti di riflessione, hanno mostrato che la riflessione di fronte alla barriera è abbastanza contenuta e sempre inferiore al 40%. Per quanto riguarda la trasmissione dell'energia del moto ondoso si è visto che i coefficienti di trasmissione si riducono al crescere dell'altezza d'onda, e dunque l'efficacia della barriera, come auspicabile, è via via crescente per condizioni più gravose del moto ondoso in arrivo dal largo; più in particolare, l'attenuazione dell'energia dell'onda incidente è dell'ordine del 30-40% per le onde più alte ovvero 3-4 m in scala di prototipo. Ciò è altresì evidente confrontando i risultati ottenuti con la formula di van der Meer (1990), da cui si evince come la barriera risponde meglio rispetto ai dati di letteratura nel caso di onde energeticamente più importanti.

Durante le prove condotte per analizzare l'idrodinamica in prossimità della barriera è tuttavia emerso che, in presenza delle onde più alte alcuni sacchi si sollevavano o, in taluni casi, si spostavano.

A seguito di questa osservazione il progettista ha ritenuto opportuno modificare la configurazione originale della barriera soffiata, allargando nel complesso la struttura e, soprattutto, sostituendo le prime due file dei sacchi appartenenti allo strato superiore dell'opera con sacchi più lunghi, caratterizzati da una lunghezza pari a 9 m nella direzione di propagazione del moto ondoso, a cui corrisponde un aumento del peso da oltre 30 tonnellate a oltre 50 tonnellate.

Per questa configurazione modificata sono state quindi condotte diverse prove di stabilità, al fine di verificare che le condizioni idrodinamiche che

mettevano in crisi la struttura originale, non fossero tali da instabilizzare la nuova configurazione.

Si ritiene opportuno precisare che, al fine di rispettare i tempi di esecuzione delle prove imposti dal Committente, tenendo conto che le prove sulla configurazione modificata non erano state inizialmente previste, essendosi rese necessarie in esito alle prove condotte sulla configurazione originale, non è stata analizzata l'idrodinamica per la configurazione modificata ma solo la stabilità della struttura. Tuttavia, tenendo conto che la configurazione modificata differisce da quella originale solo per una maggiore larghezza della berma, è certamente possibile affermare che in termini di trasmissione la nuova sezione individuata può solo contribuire a smorzare l'energia trasmessa dal moto ondoso a tergo della struttura e che pertanto i risultati ottenuti sono da intendersi come cautelativi rispetto alla soluzione modificata.

Per queste ultime prove è stato osservato che nessuna delle condizioni di moto ondoso che mettevano in crisi la configurazione originale provoca alcun sollevamento o spostamento dei sacchi che costituiscono la barriera nella configurazione modificata.

In definitiva si ritiene che l'opera di presidio dell'intervento di ripascimento in progetto assolva egregiamente al compito di attenuare la penetrazione dell'energia del moto ondoso in prossimità della spiaggia retrostante e , nella sua configurazione modificata, sia stabile anche nei confronti delle condizioni di moto ondoso caratterizzate dai tempi di ritorno più elevati (ordine dei 100 anni).

Bibliografia

- Battjes, J. A. (1974). Surf similarity. *Proc. 14th Coastal Engineering Conference (ASCE)*, pp. 466-480.
- Boccotti, P. (2000) Wave mechanics for ocean engineering. Elsevier Oceanographic Series, n. 64.
- Burcharth, H.F., Kramer, M., Lamberti, A., Zanuttigh, B., 2006. Structural stability of detached low crested breakwaters. *Coastal Engineering*, 53, 381-394.
- Coastal Engineering Manual (2003). U.S. Corps of Engineers.
- d'Angremond, K., Van Der Meer, J.W., De Jong, R.J. (1996) Wave transmission at low-crested structures. 25th ICCE Conference, Orlando, Florida.
- Daemen, I.F.R. (1991) Wave transmission at low crested structures. MSc Thesis Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Delft Hydraulics Report H462.
- Dean, R.G., 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report no. 12, University of Delaware.
- Dean, R.G., 1991. Equilibrium beach profiles: characteristics and application. *Journal of Coastal Research*, 7(1) 53-84.
- Dette, H.H., Larson, M., Murphy, J., Newe, J., Peters, K., Reniers, A., Steetzel, H., 2002. Application of prototype flume tests for beach nourishment assessment. *Coastal Engineering*, 47, 137-177.
- Goda, Y., Suzuki, Y., (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Proc. 15th Int. Coastal Engineering Conference (ASCE)*, 828-845.
- Gonzalez, M., Median, R., Losada, M.A., 1999. Equilibrium beach profile model for perched beaches. *Coastal Engineering*, 36, 343-357.

- Houston, J.R., 1996. Beach fill design. In: Liu, P.L. (Ed.), *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. World Scientific, 199-231.
- Hughes, S. A. (1993). Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. World Scientific.
- Isaacson, M., (1991). Measurement of regular wave reflection. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 117, pp. 553-569.
- Mansard, E. P. D., Funke, E. R., (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least square method. *Proc. 17th Int. Coastal Engineering Conference*, 1, pp. 154-172.
- Miche, A., 1951. Pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposés à l'action de houle. *Annales des Ponts et Chaussées*, 121, 285-319.
- Okazaki S. and Sunamura T. (1991) Re-examination of Breaker-Type Classification on Uniformly Inclined Laboratory Beaches *Journal of Coastal Research*, Vol. 7, No. 2 (Spring, 1991), pp. 559-564
- Oumeraci H., Recio, J. (2009) Geotextile sand containers for shore protection. Ch. 21, Handbook of coastal and ocean Engineering. Ed. Y.C. Kim. World scientific.
- Postma, G. M. (1989). Wave reflection from rock slopes under random wave attack. MSc. Thesis, Delft University of Technology.
- Powell, K.A., And Allsop N.W.H. (1985) Low-crest breakwaters, hydraulic performance and stability. Report SR57, HR Wallingford, England.
- Seeling, W.N., 1983. Wave reflection from coastal structures. *Proceedings of Coastal Structures '83*, ASCE, 961-973.
- Seeling, W.N., Ahrens, J.P., 1981. Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments, and breakwaters. Technical Paper no. 81-1, *U.S. Army Corps of Engineers*, Coastal Engineering Center, Fort Belvoir, Virginia.

- Sorensen, R.M., Beil, N., 1988. Perched beach profile response to wave action. Proceedings of the 21st International Conference on Coastal Engineering, 1482-1492.
- Sunamura, T., Okazaki, S. (1996). Breaker types and wave reflection coefficient: laboratory relationships. *J. Coastal Res.*, 12 (1), pp. 240-245.
- Thorton, E. B., Calhoun, R. J., (1972). Spectral resolution of breakwater reflected waves". *Proc. ASCE 98 (WW4)*, pp. 443-460.
- Van der Meer, J. (1988). Rock Slopes and Gravel Beaches Under Wave Attack. Delft Hydraulics Laboratory, Ph.D. Dissertation.
- Van der Meer, J.W. (1990b) Low-crested and reef breakwaters. Delft Hydraulics. Report no. H986II, prepared for CUR C67.