

REGIONE SICILIANA

ASSESSORATO DELLE INFRASTRUTTURE E DELLA MOBILITA'
DIPARTIMENTO DELLE INFRASTRUTTURE DELLA MOBILITA' E DEI TRASPORTI

ISOLA DI SALINA (MESSINA) COMUNE DI MALFA

LAVORI DI RIQUALIFICA E DI ADEGUAMENTO DELLE OPERE FORANEE, DELLE BANCHINE, DELLO SCALO DI ALAGGIO E DEI FONDALI DELL' APPRODO DI SCALO GALERA

Progetto Definitivo: Approvato in linea tecnica in Conferenza Speciale di Servizi Ufficio del Genio Civile di Messina in data 21.07.2004

Progetto Esecutivo 1° stralcio funzionale: Approvato in linea tecnica in Conferenza Speciale di Servizi del Genio Civile di Messina in data 20.12.2006 dell'importo complessivo di € 4.800.000,00

Progetto Esecutivo 1° stralcio di completamento: A seguito di rescissione contrattuale ed approvazione Perizia di riparazione danni di forza maggiore di variante in diminuzione in Conferenza Speciale di Servizi del Genio Civile di Messina in data 07 marzo-26 marzo 2013 dell'importo complessivo di € 1.612.247,45

Progetto Esecutivo stralcio di completamento: Approvato in linea tecnica in Conferenza Speciale di Servizi del Genio Civile di Messina in data 19.07.2017 dell'importo complessivo di € 13.700.000,00



PROGETTO ESECUTIVO DI RIUNIONE ED AGGIORNAMENTO DEI LAVORI DEL 1° STRALCIO E DI QUELLO DI COMPLETAMENTO

REV.	DATA	EMISSIONE	RED.	VER.	APPR.
0	27/06/19	PRIMA EMISSIONE	UNIVERSITA' DI CATANIA	F.GIORDANO	F.GIORDANO
1					
2					
CODICE PROGETTO 1 9 0 1		ELABORATO: All. 7.1	REV. A	SCALA:	-

Modellazione fisica della stabilità della mantellata
della diga foranea - Università di Catania

IL R.U.P.:
Geom. Arturo Ciampi
4° Settore Tecnico Lavori Pubblici



DINAMICA S.r.l.
PROGETTO VERIFICATO



IL SUPPORTO ESTERNO AL R.U.P.:
Ing. Salvatore Perillo

IL PROGETTISTA:
Ing. Francesco Giordano
ingfrancescogiordano@gmail.com

COLLABORAZIONE:
Sigma Ingegneria S.r.l.
sigmaingsrl@gmail.com

IL SINDACO:
Dott.ssa Clara Rametta

REGIONE SICILIANA
UFFICIO DEL GENIO CIVILE - MESSINA

Visto il sopralluogo favorevole in linea tecnica
ai sensi dell'art. 17 del R. C. N. e con riferimento alla
nota di pari data e numero di protocollo.

ASL



UFFICIO DEL GENIO CIVILE
- MESSINA -

Si attesta che le previsioni del presente progetto
sono conformi alle norme di edilizia sismica,
l'autorizzazione allo inizio dei lavori è subordinata
alla formale domanda ai sensi dell'Art 17
della Legge 64/1974

ASL

15 NOV. 2019
Messina, il



Regione Siciliana
Assessorato delle Infrastrutture e della Mobilità
Dipartimento Regionale Tecnico
COMMISSIONE REGIONALE DEI LAVORI PUBBLICI
Legge regionale 12 luglio 2011, n. 12 art.5, comma 12
Copia conforme all'elaborato esaminato nelle sedute
del 04 Dicembre 2019 e 17 Dicembre 2019

Parere n° 128

Referente: Ing. Antonino Platania
(Capo Ufficio del Genio Civile di Messina)



ASL



Regione Siciliana



**ASSESSORATO DELLE INFRASTRUTTURE E DELLA MOBILITA'
DIPARTIMENTO DELLE INFRASTRUTTURE DELLA MOBILITA'
E DEI TRASPORTI**

Modellazione fisica della stabilità della mantellata della diga foranea dello Scalo Galera sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina

Relazione finale

Il Responsabile Scientifico

(Ing. Rosaria Ester MUSUMECI)

Il Direttore del DICA

(Prof. Ing. Enrico FOTI)

Settembre 2012

Indice

Premessa	1
1 Introduzione	3
1.1 Posizione del problema	3
1.2 Obiettivi.....	4
1.3 Limiti.....	6
1.4 Fasi del lavoro svolto.....	8
2 Verifica di stabilità di strutture a gettata su modello fisico	10
2.1 Generalità	10
2.2 Criteri di similitudine per modelli fisici di strutture a scogliera	11
2.2.1 Modello geometricamente non distorto	13
2.2.2 Flussi idrodinamici conformi al criterio di Froude	14
2.2.3 Modello con condizioni di moto turbolento attraverso lo strato primario	14
2.2.4 Controllo degli effetti della scabrezza superficiale.....	15
2.2.5 Controllo della densità del materiale del modello	15
2.3 Effetti di scala.....	19
2.3.1 Effetti viscosi.....	19
2.3.2 Effetti sulla riflessione e sulla trasmissione.....	20
2.3.3 Effetti dovuti alla diversa densità dell'acqua	21
2.3.4 Effetti dovuti all'attrito.....	21
2.3.5 Effetti dovuti all'aerazione.....	22
2.4 Criteri di progettazione del modello fisico e di conduzione degli esperimenti	23
2.4.1 Set-up del modello fisico.....	23
2.4.2 Operazioni sul modello fisico	28
2.4.3 Procedure di analisi.....	32
3 Prove sul modello fisico condotte dalla Sogreah.....	39
3.1 Generalità	39
3.2 Configurazioni esaminate	40

3.3	Caratteristiche del modello fisico	41
3.3.1	Canale di prova	41
3.3.2	Programma delle prove eseguite dalla Sogreah.....	41
3.4	Risultati ottenuti dalla Sogreah	42
4	Caratteristiche del modello fisico realizzato.....	43
4.1	Generalità	43
4.2	Apparato sperimentale.....	43
4.2.1	La vasca di sperimentazione.....	44
4.2.2	Sistema per la generazione del moto ondoso.....	47
4.3	Strumentazione di misura utilizzata.....	51
4.3.1	Misura del moto ondoso.....	51
4.3.2	Misura del danno subito dalla mantellata esterna	52
4.3.3	Misura della portata tracimata media	54
4.4	Descrizione del modello fisico della mantellata	55
4.4.1	Caratteristiche del materiale utilizzato	57
4.4.2	Costruzione del modello fisico	69
4.5	Procedura sperimentale	80
4.5.1	Procedura sperimentale nel caso di onde irregolari.....	80
5	Esperimenti condotti	84
5.1	Generalità	84
5.2	Prove effettuate	84
5.3	Condizioni idrodinamiche	86
5.4	Sintesi degli esperimenti condotti.....	90
5.5	Stima del danno	95
5.6	Stima della tracimazione.....	102
5.7	Stima della riflessione.....	104
6	Analisi dei risultati e conclusioni	106
	Elenco delle Figure.....	115
	Elenco delle Tabelle	118
	Elenco degli Allegati	120
	Elenco delle Tavole	121

Bibliografia	122
Allegato 1- Documentazione fotografica	126
Allegato 2- Schede di osservazione esperimenti.....	135
Allegato 3- Analisi spettrale dei segnali registrati alle sonde di livello per la stima del coefficiente di riflessione.....	136

Indice dei simboli

h	profondità dell'acqua rispetto al piede della struttura;
D	percentuale di danno della mantellata dato dal rapporto tra il numero di massi rimossi rispetto al numero totale di massi disposti;
g	accelerazione di gravità;
H	altezza d'onda;
l_a	dimensione lineare caratteristica delle unità della mantellata;
V_w	velocità dell'acqua in prossimità dello strato di copertura;
α	angolo d'inclinazione della mantellata misurato rispetto all'orizzontale;
β	angolo d'inclinazione dell'onda incidente;
Δ	forma del profilo della mantellata;
Θ	inclinazione del fondo della struttura diretta verso il mare;
L	lunghezza d'onda;
μ	coefficiente di viscosità dinamica dell'acqua in prossimità della diga;
ξ_a	dimensione lineare caratteristica della superficie ruvida dell'unità della mantellata;
ρ_a	densità di massa delle unità della mantellata;
ρ_w	densità di massa dell'acqua in prossimità della diga;
N_v	rapporti tra le velocità del prototipo e del modello;
N_L	rapporti tra le lunghezze del prototipo e del modello;
N_g	rapporti tra l'accelerazione gravitazionale del prototipo e del modello;
N_{Fr}	rapporti tra i numeri di Froude del prototipo e del modello;
N_t	rapporti tra i tempi del prototipo e del modello;
N_{wa}	rapporti tra i volumi del prototipo e del modello;
$N_{\gamma a}$	rapporto tra il peso specifico della mantellata del prototipo e del modello;
N_d	numero di massi spostati;
N_{od}	numero di massi spostati all'interno di un'ampia striscia;
S_d	parametro per descrivere il danno subito dalla pendenza della mantellata;
W_a	peso dell'unità della mantellata;
γ_a	peso specifico dell'unità della mantellata;
V	volume dell'unità della mantellata;

Premessa

Il Dipartimento Regionale della Mobilità delle Infrastrutture e dei Trasporti dell'Assessorato Infrastrutture e Mobilità della Regione Siciliana ha in corso di realizzazione il 1° stralcio esecutivo dei lavori di riqualifica e di adeguamento delle opere foranee, delle banchine, dello scalo di alaggio e dei fondali dell'approdo Scalo Galera del Comune di Malfa (Isola di Salina). Detti lavori prevedono l'esecuzione di un tratto di diga foranea realizzato in cassoni cellulari protetti lato mare da un'opera a gettata costituita da una mantellata in massi artificiali di tipo Accropodi da 16 m³.

In base ad alcune prove su modello fisico eseguite nel 2000 dalla società Sogreah, il progetto esecutivo della mantellata prevedeva che la stabilità della mantellata fosse assicurata tramite ammorsamento della stessa al fondale mediante una trincea al piede. Tuttavia, durante la fase di realizzazione dei lavori si è manifestata l'impossibilità di eseguire i lavori di escavo della citata trincea, a causa delle caratteristiche di tenacità dei fondali rocciosi in situ.

Il Direttore Lavori, ing. Francesco Giordano, ha ipotizzato in prima istanza tre soluzioni alternative per la modifica della sezione corrente della diga foranea. Al fine di individuare la soluzione più appropriata da adottare per il proseguimento dei lavori tra quelle alternative, si è reso necessario ricorrere ad ulteriori prove su modello fisico.

In tale contesto, il Dipartimento Regionale della Mobilità, delle Infrastrutture e dei Trasporti ha affidato tramite convenzione al Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA) dell'Università degli Studi di Catania la verifica su modello fisico della stabilità di tre configurazioni della sezione corrente della diga foranea dello Scalo Galera. Più in particolare, per ciascuna configurazione e per diverse condizioni di moto ondoso, è stato richiesto al DICA di verificare la

stabilità della mantellata della diga foranea all'attacco del moto onduoso, la stabilità al piede e la valutazione della portata di tracimazione.

La presente relazione descrive i risultati della campagna sperimentale condotta presso il Laboratorio di Idraulica del DICA nell'ambito della presente convenzione. Appare opportuno precisare che, su indicazione e richiesta dell'ing. Francesco Giordano, responsabile scientifico della convenzione per il Committente, le tre sezioni-tipo inizialmente previste sono state in alcuni casi modificate ed è inoltre stata sottoposta a verifica su modello una ulteriore sezione. In definitiva, il DICA ha testato su modello fisico in scala 1:80 le caratteristiche idrauliche e strutturali di quattro configurazioni della sezione corrente del molo foranero dello Scalo di Galera del Comune di Malfa.

1 Introduzione

1.1 Posizione del problema

La mantellata esterna della diga foranea di un bacino portuale rappresenta la principale componente strutturale preposta alla difesa del bacino dall'attacco del moto ondoso. La progettazione della configurazione geometrica della sezione della diga foranea, e in particolare della protezione al piede della mantellata esterna, deve rispondere sia a esigenze di tipo strutturale sia a esigenze di tipo idraulico. In particolare, con riferimento alla verifica strutturale, si deve scegliere adeguatamente non solo la tipologia e la dimensione dei massi della mantellata, ma anche la geometria e la dimensione della struttura di sostegno al piede, in modo tale che sia garantita la stabilità della struttura sotto l'azione del moto ondoso. Nel caso si scelgano per la mantellata massi artificiali la cui resistenza è affidata al livello di concatenazione tra gli elementi, la situazione è particolarmente delicata in quanto contrariamente alle dighe a gettata tradizionali, in presenza di tali massi artificiali è estremamente difficile prevedere interventi di manutenzione a posteriori.

Per quanto riguarda le verifiche idrauliche, esse attengono generalmente alla: (i) determinazione del massimo livello di risalita del moto ondoso sulla struttura; (ii) stima della portata di tracimazione; (iii) stima della riflessione del moto ondoso incidente indotta dalla presenza della struttura; (iii) stima della trasmissione del moto ondoso a tergo della struttura.

In letteratura esistono alcuni modelli empirici che consentono di effettuare sia le verifiche strutturali che le verifiche idrauliche di dighe a scogliera. Tuttavia tali modelli sono affetti da margini di incertezza elevati, essendo la risposta della struttura fortemente dipendente dalla geometria e dalle condizioni specifiche locali, che quasi mai

coincidono o possono essere assimilate con le condizioni di letteratura.

Si evince come sia quindi sempre opportuno, e spesso necessario, affidarsi ai risultati della modellazione fisica, che consente di tenere meglio in conto le condizioni effettive della struttura che si intende realizzare. In questo quadro, si sottolinea come sia particolarmente importante, inoltre, la verifica della stabilità del piede della struttura, la quale condiziona fortemente la stabilità complessiva della struttura stessa. Le caratteristiche delle opere di protezione al piede, peraltro, sono estremamente variabili, in funzione del sito e delle scelte progettuali, per cui la modellazione fisica risulta l'unico strumento conoscitivo attualmente efficace.

In tale ambito si inserisce la presente relazione che riporta i risultati sperimentali ottenuti sul modello fisico della mantellata e delle opere di protezione al piede dello Scalo Galera, sito nel Comune di Malfa nell'ambito della convenzione tra il DICA e il Dipartimento Regionale della Mobilità, delle Infrastrutture e dei Trasporti.

1.2 Obiettivi

In accordo con quanto previsto dalla sopra citata convenzione, nell'ambito della presente sperimentazione sono state condotte alcune prove su modello fisico, particolarmente volte ad individuare la configurazione ottimale della struttura di protezione al piede della mantellata esterna della sezione corrente della diga foranea dello Scalo Galera, sito nel comune di Malfa.

Si precisa che tal fine, secondo quanto concordato con l'Ing. Francesco Giordano, responsabile scientifico per il Committente, sono state prese in considerazione quattro configurazioni geometriche del piede della struttura. Le configurazioni si differenziano per le diverse modalità di realizzazione del piede della diga foranea. In particolare, nel primo caso la mantellata è sorretta da due file di Accropodi, nel

secondo da una fila di massi trapezoidali in calcestruzzo da 50t con la scarpa rivolta lato mare e da una fila di Accropodi, mentre nel terzo da una fila di massi trapezoidali in calcestruzzo da 50t con la scarpa a sostegno del piede orientata lato terra, infine nel quarto caso il piede è costituito da una berma in massi naturali di IV categoria. La Figura 1.1 illustra schematicamente le quattro configurazioni sopra descritte. Schemi maggiormente dettagliati di dette configurazioni sono anche riportati nelle Tavole 2a e 2b allegate.

Al fine di stimare il danno subito dalla struttura e in particolare dalla mantellata esterna, per ogni sezione sono state considerate diverse condizioni di moto ondoso irregolare. Inoltre, in accordo con le linee guida fornite da Frostick et al. (2011), con l'obiettivo di simulare anche l'azione stabilizzante di modeste mareggiate che si manifestano generalmente durante la fase di costruzione della diga a scogliera, tutti i test effettuati sono stati preceduti da un apposito test di assestamento (o di shake down).

Infine, nell'ambito del presente studio sono state anche effettuate misure sia del coefficiente di riflessione in prossimità della struttura che della portata di tracimazione.

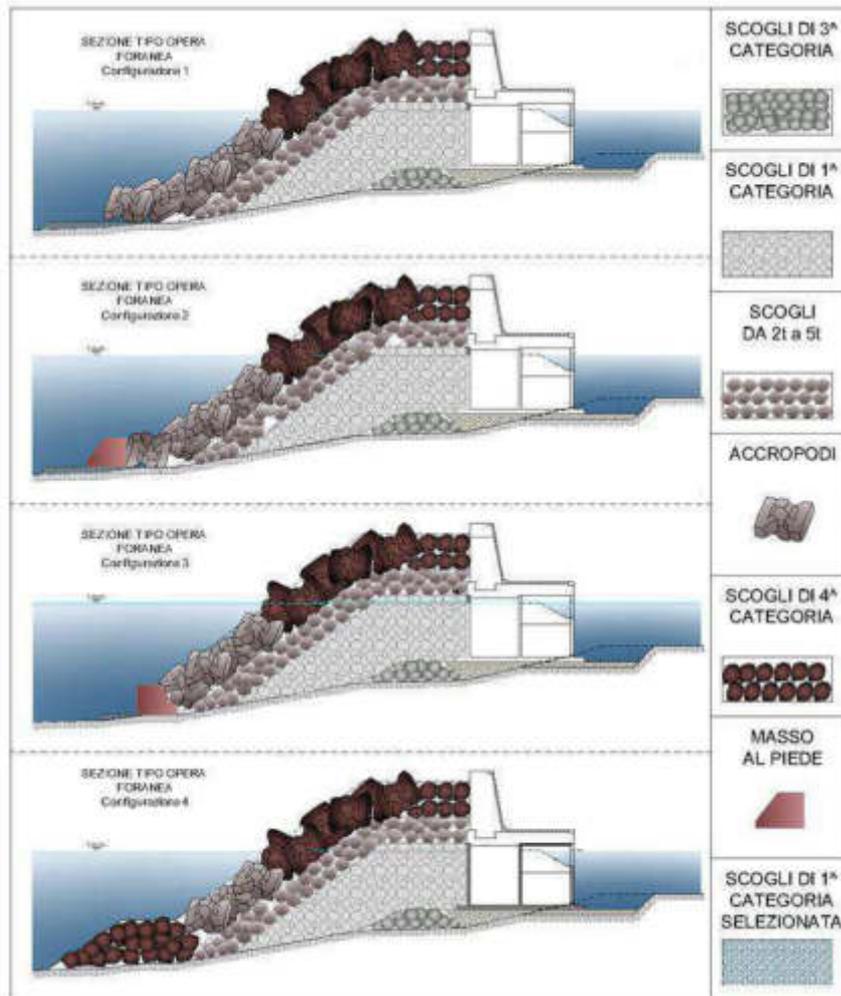


Figura 1.1 Schema strutturale delle quattro sezioni verificate

1.3 Limiti

Un'indagine sperimentale di laboratorio è per sua natura soggetta a diversi limiti. È noto infatti, che le condizioni di similitudine dinamica tra modello in scala e fenomeno reale (di seguito indicato come prototipo) non possono essere tutte soddisfatte. Ciò conduce a una similitudine incompleta che può causare differenze di comportamento tra prototipo e modello note come effetti di scala. Nonostante tali effetti siano ineliminabili, come emergerà anche dal seguito della trattazione, le prove sono state condotte cercando di minimizzare gli effetti scala indesiderati.

È opportuno inoltre precisare che, nel caso in esame, lo studio è stato effettuato schematizzando il problema come bidimensionale, per cui non si è tenuto conto di un possibile attacco obliquo del moto ondoso incidente sulla struttura. Tale attacco, a causa del tipo di esposizione del paraggio, non risulta essere nella realtà particolarmente gravoso. Inoltre, a causa di limiti dell'apparato di generazione del moto ondoso, il range di periodi d'onda testati è stato limitato a valori inferiori a 10.4 secondi, a scala di prototipo. Inoltre, come avviene quando si ha a che fare con un modello bidimensionale, la batimetria reale è stata schematizzata con un profilo di spiaggia avente una pendenza pari a 8%, rappresentativa della pendenza media dei fondali antistanti la diga dello Scalo Galera. Risulta evidente, quindi, che non sono stati presi in considerazione gli andamenti effettivi delle batimetriche, che potrebbero contribuire localmente, sebbene in misura modesta, a variare le condizioni di sollecitazione cui è sottoposta la struttura. Tuttavia, si noti come la presenza di una spiaggia piana consente di avere delle condizioni di attacco del moto ondoso maggiormente gravose, a causa dei processi di shoaling e fragimento, rispetto al classico profilo parabolico. Infine il fondo è stato considerato fisso e inerosibile, pertanto non è stato possibile evidenziare eventuali problemi di erosione al piede della struttura, se non limitati al sottostante strato di riempimento realizzato al fine di regolarizzare il piano di posa. Anche tale semplificazione modellistica appare plausibile, alla luce del fatto che la diga verrà realizzata su fondali prevalentemente rocciosi.

Nonostante i limiti sopra citati, si ritiene comunque che i risultati dello studio effettuato possano essere ritenuti affidabili, soprattutto perché l'analisi condotta è stata impostata come analisi comparativa tra quattro diversi tipi di sezione soggette non solo alle stesse azioni idrodinamiche, ma anche agli stessi limiti e ai medesimi effetti di scala.

1.4 Fasi del lavoro svolto

L'attività sperimentale è stata condotta presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Catania. Tale attività si è articolata in diverse fasi.

In particolare, in una prima fase sono stati presi in considerazione i principali problemi relativi alla modellazione fisica di strutture a scogliera, così come presentati dalla più aggiornata letteratura scientifica sull'argomento. Al riguardo si veda il Capitolo 2 dove sono sintetizzati i principali criteri di similitudine ed effetti scala relativi alla verifica di stabilità di dighe a scogliera e dove sono anche presentati i criteri di progettazione del modello fisico adottati per la realizzazione delle prove oggetto del presente studio.

In una seconda fase, sono state inquadrare, e sintetizzate al Capitolo 3, le opere previste in progetto per la realizzazione della diga foranea nello Scalo Galera del Comune di Malfa.

Nella terza fase, si sono analizzati i risultati sperimentali degli studi condotti nel 2000 dalla Sogreah a supporto della progettazione. Detti risultati sperimentali sono sintetizzati al Capitolo 4.

Si è quindi passati alla progettazione e alla realizzazione del modello fisico all'interno della vasca di sperimentazione presente presso il Laboratorio di Idraulica del DICA. Il Capitolo 5 descrive sia le apparecchiature utilizzate, sia il modello fisico della mantellata, nonché la procedura sperimentale adottata.

Infine il Capitolo 6 presenta gli esperimenti condotti sulle tre diverse sezioni in presenza di moto ondoso irregolare e sintetizza infine i principali risultati relativi alla stima del danno subito ai massi al piede e dalla mantellata, all'analisi del coefficiente di riflessione del moto ondoso e alla misura della portata di tracimazione.

Infine il Capitolo 7 riporta alcune considerazioni conclusive.

Alla presente relazione sono inoltre allegate:

1. una documentazione fotografica delle fasi di realizzazione del modello e delle prove condotte;
2. le schede delle osservazioni registrate durante gli esperimenti condotti;
3. l'analisi spettrale dei segnali registrati alle sonde di livello per la stima del coefficiente di riflessione.
4. le tavole descrittive del progetto definitivo, del modello fisico realizzato all'interno della vasca di sperimentazione e dei risultati delle prove eseguite.

2 Verifica di stabilità di strutture a gettata su modello fisico

2.1 Generalità

Al fine di garantire che i risultati ottenuti sul modello fisico di una diga a scogliera siano effettivamente rappresentativi di ciò che accade a scala di prototipo, ossia nella realtà, è necessario che nella realizzazione delle prove sperimentali vengano soddisfatti specifici criteri di similitudine idrodinamica. Inoltre è necessario minimizzare quanto più possibile gli inevitabili effetti scala che si generano nella modellazione in laboratorio.

Nel seguito vengono presentati i criteri di similitudine generalmente adottati in letteratura e presi in considerazione nell'ambito del presente lavoro per la modellazione fisica di strutture a gettata. Inoltre vengono illustrati i possibili effetti scala che potrebbero inficiare i risultati delle prove e i principali accorgimenti adottati anche nel presente lavoro per ridurre il più possibile gli effetti.

Si precisa che il presente capitolo sintetizza non solo quanto riportato da un testo ritenuto fondamentale per la modellazione fisica in ambito idraulico-marittimo, ovvero quello di Hughes (1993), ma anche i risultati delle esperienze dei principali laboratori europei in tale ambito, che sono stati raccolti recentemente nelle linee guida per la modellazione fisica di frangiflutti a scogliera nell'ambito del progetto europeo HYDRALAB III (Frostick et al.2011).

2.2 Criteri di similitudine per modelli fisici di strutture a scogliera

L'individuazione dei criteri di similitudine che devono essere soddisfatti per la modellazione fisica di strutture a scogliera richiede anzitutto la determinazione dei parametri che permettono di descrivere adeguatamente il problema della stabilità di una diga a scogliera. Detti parametri sono stati individuati da Hudson et al. (1979) come:

- h profondità dell'acqua rispetto al piede della struttura;
- D percentuale di danno della mantellata dato dal rapporto tra il numero di massi rimossi rispetto al numero totale di massi disposti;
- g accelerazione di gravità;
- H altezza d'onda;
- l_a dimensione lineare caratteristica delle unità della mantellata;
- V_w velocità dell'acqua in prossimità dello strato di copertura;
- α angolo d'inclinazione della mantellata misurato rispetto all'orizzontale;
- β angolo d'inclinazione dell'onda incidente;
- Δ forma del profilo della mantellata;
- θ inclinazione del fondo della struttura diretta verso il mare;
- L lunghezza d'onda;
- μ coefficiente di viscosità dinamica dell'acqua in prossimità della diga;
- ξ_a dimensione lineare caratteristica della superficie ruvida dell'unità della mantellata;
- ρ_a densità di massa delle unità della mantellata;
- ρ_w densità di massa dell'acqua in prossimità della diga.

Da notare che, sebbene il periodo dell'onda non compaia tra le variabili elencate, esso è incluso implicitamente, attraverso la lunghezza d'onda "L", tramite la *relazione di dispersione* che, come è noto, lega periodo, lunghezza d'onda e profondità.

Considerando i parametri sopraelencati che consentono di caratterizzare la stabilità della diga scogliera, si può applicare l'*analisi dimensionale* per evidenziare il fatto che esiste la seguente relazione funzionale:

$$f(V_w, H, L, h, \beta, \theta, g, \rho_w, \rho_a, l_a, \mu, \xi_a, \alpha, \Delta, D) = 0 \quad (2.1)$$

in cui:

- le variabili $V_w, H, L, h, \beta, \theta$ sono relative alla spinta idrodinamica, ovvero alle forze destabilizzanti;
- le variabili g, ρ_w, ρ_a, l_a vengono utilizzate per descrivere la spinta idrostatica sulle unità della mantellata (o la resistenza per gravità), ossia per descrivere le azioni stabilizzanti;
- le variabili μ, ξ_a sono relative alla viscosità ed alle forze d'attrito;
- i parametri α, Δ sono legati alla geometria della struttura.

Una delle possibili combinazioni delle variabili sopra descritte in termini di gruppi adimensionali è secondo Hudson et al. (1979):

$$F\left(\frac{l_a}{h}, \frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \alpha, \beta, \Delta, \theta, \frac{V_w}{\sqrt{gl_a}}, \frac{V_w l_a \rho_w}{\mu}, \frac{\xi_a}{l_a}, \frac{\rho_w}{(\rho_a - \rho_w)}, D\right) = 0 \quad (2.2)$$

L'eq. (2.2) è un'espressione adimensionale che descrive il problema della stabilità di dighe a scogliera. Pertanto, se si considera che il danno subito dalla mantellata esterna di una diga a scogliera è una variabile dipendente, si ottiene la similitudine completa nel modello fisico se ognuno dei gruppi adimensionali rappresentati nell'eq. (2.2) assume lo stesso valore sia nel modello sia nel prototipo, per un particolare insieme di condizioni d'onda (i pedici "p" ed "m" indicano il prototipo e il modello rispettivamente).

Ciò implica l'uguaglianza delle seguenti grandezze:

$$\left(\frac{l_a}{h}\right)_p = \left(\frac{l_a}{h}\right)_m \quad (2.3)$$

$$\left(\frac{H}{L}\right)_p = \left(\frac{H}{L}\right)_m \quad (2.4)$$

$$\left(\frac{h}{L}\right)_p = \left(\frac{h}{L}\right)_m \quad (2.5)$$

$$(\alpha)_p = (\alpha)_m \quad (2.6)$$

$$(\beta)_p = (\beta)_m \quad (2.7)$$

$$(\Delta)_p = (\Delta)_m \quad (2.8)$$

$$(\theta)_p = (\theta)_m \quad (2.9)$$

$$\left(\frac{V_w}{\sqrt{gl_a}}\right)_p = \left(\frac{V_w}{\sqrt{gl_a}}\right)_m \quad (2.10)$$

$$\left(\frac{V_w l_a \rho_w}{\mu}\right)_p = \left(\frac{V_w l_a \rho_w}{\mu}\right)_m \quad (2.11)$$

$$(\xi_a)_p = (\xi_a)_m \quad (2.12)$$

$$\left(\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w}\right)_p = \left(\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w}\right)_m \quad (2.13)$$

2.2.1 Modello geometricamente non distorto

Da quanto sopra esposto, ed in particolare sulla base delle relazioni (2.3)-(2.9), si evince come il primo requisito di similitudine da soddisfare nella realizzazione di modelli fisici di strutture a scogliera sia quello che impone l'assenza di distorsioni geometriche nella scala delle lunghezze. E' altresì importante osservare sin d'ora che ridurre le dimensioni del modello può indurre anche una approssimazione della forma e delle distribuzioni delle dimensioni dei massi della mantellata posizionati nei diversi strati.

2.2.2 Flussi idrodinamici conformi al criterio di Froude

Dalla relazione (2.10) si evince che il secondo requisito di similitudine per modelli fisici di strutture a scogliera è quello per il quale deve essere garantito il rispetto del criterio di Froude. In altre parole, il rapporto tra le forze inerziali e la forza di gravità deve mantenersi inalterato tra prototipo e modello.

Indicando con N_v , N_L ed N_g i rapporti tra le velocità, le lunghezze e l'accelerazione di gravità del prototipo e del modello, si può scrivere:

$$\frac{N_v}{\sqrt{N_g N_L}} = N_{Fr} = 1 \quad (2.14)$$

in cui N_{Fr} è il rapporto tra i numeri di Froude. Da quanto detto, si ricava anche che, detto N_t il rapporto tra i tempi nel modello e nel prototipo, deve essere

$$N_t = \sqrt{N_L} \quad (2.15)$$

Si precisa che tale relazione è stata utilizzata per scalare le variabili temporali del modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera di Malfa.

2.2.3 Modello con condizioni di moto turbolento attraverso lo strato primario

Il terzo requisito di similitudine per modelli fisici di strutture a scogliera impone l'uguaglianza dei numeri di Reynolds, vedi relazione (2.11).

E' infatti importante che il rapporto sopra riportato sia pari all'unità quando si devono riprodurre sul modello fenomeni nei quali le dissipazioni viscosi sono predominanti. Si deve osservare come sia praticamente impossibile soddisfare questo criterio quando si esegue la riduzione in scala del prototipo. Tuttavia, se il modello è condotto su una scala abbastanza grande, ossia tale da garantire che il moto attraverso lo strato primario della mantellata rimanga turbolento,

allora detto criterio può ritenersi ragionevolmente soddisfatto. Tale approccio è stato anche adottato nell'ambito della presente modellazione fisica.

2.2.4 Controllo degli effetti della scabrezza superficiale

Il quarto requisito di similitudine per strutture a scogliera è fornito dalla relazione (2.12), che stabilisce che gli effetti della scabrezza superficiale delle unità della mantellata debbano essere uguali sia nel prototipo sia nel modello.

Al riguardo, in generale, si ipotizza di poter trascurare la resistenza al moto offerta dalla scabrezza superficiale caratteristica degli elementi lapidei alla scala del prototipo. Pertanto, sul modello fisico, si tenta di ridurre gli effetti della scabrezza relativa delle unità strutturali rendendo le loro superfici il più lisce possibili. Una tecnica usualmente adottata, anche in questa sede, per ridurre l'attrito tra le unità della mantellata nel modello è quella di dipingere i massi utilizzati per la mantellata. E', infatti, molto importante ridurre l'attrito tra le unità nel modello, in quanto se vi fosse un consistente attrito tra le unità, ciò implicherebbe una maggiore stabilità del modello rispetto al prototipo e ciò a svantaggio di sicurezza.

2.2.5 Controllo della densità del materiale del modello

L'ultimo criterio di similitudine da rispettare nella realizzazione di un modello di strutture a gettata è dato dalla espressione (2.13), che stabilisce che la densità relativa del materiale delle unità della mantellata deve essere uguale nel prototipo e nel modello. Il numero adimensionale sopra definito, è pari al rapporto tra la densità del fluido e la densità immersa delle unità della mantellata. L'eq.(2.13) può anche essere riscritta come

$$\left(\frac{\rho_a}{\rho_w} \right)_p = \left(\frac{\rho_a}{\rho_w} \right)_m \quad (2.16)$$

In particolare, quest'ultima relazione è utile per determinare la densità delle unità della mantellata nel modello, poiché gli esperimenti di laboratorio, per ragioni pratiche, vengono condotti in acqua dolce, piuttosto che in acqua salata. Nel caso si abbia a che fare con massi naturali, il rispetto della condizione (2.16) è fortemente vincolato alla disponibilità di materiale di cava di adeguate caratteristiche. Nel caso di massi artificiali (come nel caso oggetto di studio) il rispetto della relazione (2.16) avviene mediante la realizzazione di una speciale miscela, costituita da resine opportunamente caricate (Hughes, 1993).

Un metodo alternativo per compensare l'incremento di spinta idrostatica dell'acqua salata rispetto all'acqua dolce è quello di regolare il peso delle unità della mantellata nel modello.

A tal fine si definisce la scala del peso delle unità della mantellata, che può essere ottenuta semplicemente eseguendo il rapporto tra prototipo e modello della seguente espressione:

$$W_a = \gamma_a V \quad (2.17)$$

dove

- W_a rappresenta il peso dell'unità della mantellata;
- $\gamma_a = \rho_a g$ rappresenta il peso specifico dell'unità della mantellata;
- V è il volume dell'unità della mantellata.

Definendo i seguenti rapporti:

$$N_{wa} = \frac{(W_a)_p}{(W_a)_m} \quad (2.18)$$

$$N_{\gamma a} = \frac{(\gamma_a)_p}{(\gamma_a)_m} \quad (2.19)$$

$$N_{wa} = \frac{(v)_p}{(v)_m} \quad (2.20)$$

si ottiene la seguente scala del peso:

$$N_{wa} = N_{\gamma a} N_L^3 \quad (2.21)$$

Nell'ambito del presente lavoro è stato utilizzato il criterio descritto nel seguito e introdotto da Hudson (1958), che si basa sulla conservazione del valore del "numero di stabilità" tra prototipo e modello. In particolare, Hudson (1958) adattò l'eq. (2.2), elevando al quadrato il numero di Froude delle unità della mantellata e moltiplicando il risultato per il parametro della densità relativa

$$\frac{V_w^2}{gl_a} \frac{\rho_w}{(\rho_a - \rho_w)} = G \left(\frac{l_a}{h}, \frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \alpha, \beta, \Delta, \theta, \frac{V_w l_a \rho_w}{\mu}, \frac{\xi_a}{l_a}, D \right) \quad (2.22)$$

Assumendo che:

- V_w è direttamente proporzionale a \sqrt{gH}
- W_a è direttamente proporzionale a $\gamma_a l_a^3$
- $\gamma = \rho g$

il parametro adimensionale a primo membro della (2.22) diventa

$$\frac{(\gamma_a)^{\frac{1}{3}} H}{\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_w} - 1 \right) (W_a)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.23)$$

Hudson definì questo rapporto col termine numero di stabilità e condusse prove sistematiche su modello, per legare tale numero a parametri tipici delle strutture a gettata e a parametri idrodinamici arrivando a definire la ben nota formula di Hudson

$$\frac{(\gamma_a)^{\frac{1}{3}} H}{\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_w} - 1 \right) (W_a)} = (k_{\Delta} \cot g \alpha) \quad (2.24)$$

dove k_{Δ} è una costante che dipende dalla tipologia dei massi della mantellata. Tale formula è ancor oggi largamente utilizzata per il dimensionamento dei massi della mantellata di frangiflutti a gettata.

Per quanto concerne il problema dello "scaleggiamento" dei massi per prove di stabilità su strutture a scogliera, Hudson et al. (1979) raccomandano che il peso delle unità della mantellata nel modello, sia scalato attraverso l'uguaglianza del numero di stabilità tra prototipo e modello. In termini di rapporti di scala si ottiene

$$N_{wa} = \frac{N_{\gamma_a} N_L^3}{N_{(\gamma_a/\gamma_{w-1})}} \quad (2.25)$$

in cui si osserva che $N_H = N_L$.

Altri studiosi, come Sharp e Khader (1984) e Sharp (1985), sottolineano che il raggruppamento dei prodotti adimensionali nel numero di stabilità di Hudson (1958) è solo una delle possibili combinazioni che possono essere ottenute dall'analisi dimensionale. Essi indicano che sarebbe più appropriato ottenere una relazione di scaleggiamento per il peso dell'unità della mantellata, riferendosi ad approcci più fisici, nei quali siano mantenuti costanti tra prototipo e modello i rapporti tra le forze principali. In particolare, considerano come forze che controllano la stabilità di un frangiflutti la forza d'inerzia ed il peso immerso, ottenendo la seguente relazione

$$N_{wa} = \frac{N_{\gamma_a} N_L^3}{N_{(\gamma_a/\gamma_{w-1})}} \quad (2.26)$$

In conclusione, si può osservare che l'unica differenza tra il rapporto di scala proposto da Sharp e Khader (3.26) e quello di Hudson (2.25), in termini analitici, è data dalla presenza di un cubo al denominatore nella relazione di Hudson. Inoltre, poiché, come si è verificato anche nell'ambito della presente sperimentazione, il rispetto del criterio di Hudson fornisce unità della mantellata nel modello di

circa l'8% più leggere di quelle indicate dall'applicazione del criterio di Sharp e Khader, è possibile asserire che il criterio di Hudson produce risultati più conservativi per la verifica della stabilità di strutture a scogliera, in quanto fornisce unità della mantellata più facilmente mobilitabili. Pertanto, sulla base delle considerazioni precedentemente esposte, in questa sede è stato adottato il criterio di Hudson al fine di dimensionare i massi della mantellata del modello fisico realizzato.

2.3 Effetti di scala

Gli effetti scala che inevitabilmente permangono nel modello devono essere riconosciuti e minimizzati, spesso con procedure empiriche. Inoltre la definizione chiara degli obiettivi della sperimentazione e il riconoscimento degli effetti scala più importanti sono necessari al fine di effettuare una corretta analisi dei risultati ottenuti.

In questo paragrafo si riportano, in sintesi, i possibili effetti di scala che possono verificarsi nella realizzazione del modello fisico di strutture per la difesa costiera a gettata insieme ad alcune tecniche di mitigazione degli stessi effetti.

2.3.1 Effetti viscosi

Le forze viscosi che si realizzano all'interno dei sottostrati e del nucleo delle dighe a scogliera rappresentano i più importanti effetti di scala associati al modello fisico di una struttura a scogliera.

Nel caso delle scale tipicamente usate per la riproduzione su modello fisico di questo tipo di opere, gli effetti di scala viscosi non costituiscono un problema nello strato primario, né in quello secondario della mantellata (nel caso di massi naturali), in quanto il numero di Reynolds, basato sulla dimensione caratteristica delle unità della mantellata, è sufficientemente grande da assicurare che il moto

sia turbolento. Tuttavia, in alcuni sottostrati e nel nucleo, c'è la possibilità che il numero di Reynolds possa scendere al di sotto di un valore considerato critico, ovvero tale da garantire che gli effetti scala viscosi siano effettivamente trascurabili.

In letteratura sono stati proposti diversi valori per il numero di Reynolds critico, ottenuti sulla base di diverse indagini sperimentali, che variano da 3×10^4 (Dai e Kamel, 1969) o superiori a tale valore (Oumeraci, 1984 e Mol et al., 1983), a 6×10^3 (Jensen e Kliting, 1983), o anche 4×10^4 (Van der Meer, 1988).

In definitiva, vista anche la variabilità dei valori sopra riportati, si suggerisce che i modelli fisici per studi di stabilità dovrebbero essere realizzati a grande scala. Tuttavia, quando ciò non sia possibile, vi è sufficiente certezza nell'affermare che: è possibile l'uso di modelli che presentano numeri di Reynolds, nello strato della mantellata, superiori a 4×10^4 .

2.3.2 Effetti sulla riflessione e sulla trasmissione

Le dighe a scogliera dissipano l'energia dell'onda all'interno dei vuoti ed una corretta simulazione nel modello del run-up richiede che la trasmissione dell'onda e la sua riflessione siano in stretta similitudine con il prototipo. Spesso, si verifica che modelli di strutture, sebbene riprodotti in scala in modo geometricamente corretto, presentino un numero di Reynolds nell'unità della mantellata troppo basso. In questi casi, tali modelli presenteranno una maggiore riflessione e una minore trasmissione del moto ondoso rispetto al prototipo (Wilson e Cross, 1972). Ciò è essenzialmente dovuto alla presenza di moto laminare nella parte interna del modello, il quale dovrebbe essere, in realtà, turbolento per similitudine con il prototipo. A tal proposito esistono dei metodi che permettono di aumentare opportunamente il diametro del materiale che compone il sottostrato ed il nucleo (Le Méhauté, 1965; Keulegan, 1973). In questo modo, la trasmissione dell'onda nel modello presenterà una

corretta similitudine con quella del prototipo. Tali considerazioni sono state anche applicate nella modellazione fisica condotta durante la presente campagna sperimentale, per cui si è provveduto a migliorare opportunamente la dimensione del materiale usato per il nucleo.

2.3.3 Effetti dovuti alla diversa densità dell'acqua

Molte prove su modelli di strutture sono condotte utilizzando acqua dolce al posto di quella salata. E ciò anche per evitare la corrosione dei generatori d'onda o di altre parti metalliche dell'apparato sperimentale nel quale è disposto il modello. Per tale ragione, quando il prototipo si trova in acqua salata, è necessario fare una correzione delle unità della mantellata nel modello, usando per esempio la relazione (2.25) o (2.26). Se non si dovesse ricorrere a questa compensazione, si potrebbero ottenere errori non trascurabili sulla stabilità dei massi, addirittura fino al 10-15% (Le Mèhautè, 1976). Nel presente modello è stato adottato il criterio di Hudson (vedere formula 2.25), pertanto nell'ambito della sua applicazione sono state tenute in conto le differenze di densità tra modello e prototipo.

2.3.4 Effetti dovuti all'attrito

Nella realizzazione di modelli fisici di strutture costiere esistono principalmente due tipi di attrito per i quali si verificano effetti di scala: (i) l'attrito al fondo che si manifesta se la distanza di propagazione dell'onda è molto grande ; (ii) l'attrito di contatto che si esplica tra unità adiacenti della mantellata. Tuttavia, nelle strutture a gettata, le forze d'attrito di contatto possono essere considerate trascurabili se paragonate alle forze dominanti che influenzano la risposta della struttura all'azione dell'onda. Ciò è valido solo nel caso di massi naturali; infatti se la struttura fosse costruita con unità artificiali della mantellata, progettate in modo specifico per fornire l'incastro per attrito tra le unità, allora le forze d'attrito di contatto

non potrebbero essere trascurate. Inoltre, si può verificare che in un modello fisico a piccola scala, le forze di attrito tra le unità possano non rispettare la similitudine con quelle del prototipo. Questo si manifesta principalmente perché la superficie delle unità della mantellata, nel modello, è in genere più ruvida rispetto a quella su larga scala del prototipo. Pertanto, sono stati effettuati alcuni studi tendenti alla riduzione dell'effetto di scala dovuto alla frizione tra le unità della mantellata. Tali studi, hanno permesso di accertare che una tecnica per ridurre l'attrito è quella di rendere quanto più lisce le unità della mantellata, dipingendole, ad esempio, con pittura a smalto. Hudson e Davidson (1975) ottennero risultati leggermente più conservativi sulla stabilità utilizzando unità del modello più lisce. Per di più, la pittura, oltre a rendere più lisce le superfici, consente di stimare con più facilità il livello di danno nelle unità della mantellata.

La modellazione fisica della sezione corrente della diga foranea di Scalo Galera è stata condotta utilizzando tale tecnica.

2.3.5 Effetti dovuti all'aerazione

L'intrappolamento di aria durante il frangimento è diverso tra prototipo e modello, in quanto è la tensione superficiale a controllare la dimensione delle bolle d'aria. Inoltre la profondità di penetrazione di tali bolle è maggiore nel modello rispetto al prototipo. Tuttavia, Le Méhauté (1976) ha ipotizzato che, nonostante i meccanismi di dissipazione siano differenti nei due casi, il processo globale di dissipazione energetica è in similitudine. Tale affermazione, basata su un'applicazione del principio di conservazione della quantità di moto all'intero volume di controllo, è stata confermata sperimentalmente da Stive (1985). Inoltre le bolle d'aria che si formano per frangimento o per separazione del flusso tra gli elementi della struttura risultano più grandi a scala di modello che non a scala di prototipo. Ciò significa che la dissipazione di energia del moto ondoso nel modello è normalmente più elevata che nel prototipo. Non c'è modo di

correggere questo effetto, né teoricamente né empiricamente. Hall (1990) ha fornito comunque l'indicazione di alcuni elementi che possono risultare utili nell'analisi dei risultati ottenuti.

2.4 Criteri di progettazione del modello fisico e di conduzione degli esperimenti

Nell'ambito del progetto di ricerca HYDRALAB III (2011) finanziato dalla Commissione Europea, sono state fornite alcune linee guida per la modellazione fisica di frangiflutti a scogliera, riportando le esperienze di alcuni tra i maggiori laboratori europei, tra cui DHI, Delft Hydraulics, HR Wallingford (L.E. e Frostick et al.,2011). Detti autori, suggeriscono che le fasi della modellazione fisica vengano suddivise in: (i) set-up del modello fisico; (ii) operazioni su modello fisico e (iii) procedure di analisi dei dati e dei risultati ottenuti. Tali fasi sono state seguite nella realizzazione del modello fisico della sezione corrente della diga foranea di Scalo Galera e vengono analizzate in dettaglio nel seguito.

2.4.1 Set-up del modello fisico

Inizialmente si procede alla scelta del modello, influenzata da numerosi fattori che dipendono dai parametri di progetto, dal sito della struttura reale, dagli obiettivi delle prove che si intendono condurre sul modello; dalle condizioni ambientali di progetto come l'altezza d'onda, il periodo dell'onda, i livelli idrici, gli spettri dell'onda e le direzioni d'onda; dalle prestazioni della struttura, come il livello di danno ammissibile, la massima onda di run-up, la trasmissione d'onda tollerabile in corrispondenza dell'onda di progetto, etc..

Si procede quindi alla disposizione del modello in vasca, condizionata dalla riproduzione di una parte delle caratteristiche del fenomeno reale nel modello. Spesso infatti, viene modellata solo una sezione della struttura reale. Da notare che, in generale, la

disposizione del modello deve essere tale da minimizzare gli effetti dovuti alle condizioni al contorno.

Per quanto riguarda la fondazione, sebbene sarebbe meglio ricostruire a scala di modello le caratteristiche dei fondali (cosa difficilmente realizzabile), negli studi di stabilità della mantellata esterna può anche essere utilizzato un fondo fisso, poiché la maggior parte dei danni avvengono comunque in prossimità del livello di quiete.

Il primo passo nella realizzazione del modello è la preparazione del materiale. Il materiale del nucleo si ottiene generalmente dalla frantumazione di basalti o calcari granulometricamente selezionati. I massi naturali sono generalmente fabbricati in basalto, calcare o anche granito, a seconda del criterio di similitudine utilizzato. E' importante che nel modello si abbia la stessa distribuzione granulometrica che nel prototipo, e questo viene spesso ottenuto manualmente selezionando e pesando i singoli massi. Nel caso si debbano modellare massi artificiali devono essere realizzati da personale specializzato usando miscele specifiche, al fine di raggiungere il corretto peso. Indicazioni dettagliate sulla realizzazione di massi artificiali a scala di modello sono fornite in Funke e Haines (1976).

Operativamente, viene innanzitutto ricostruito il nucleo all'asciutto, esso poi viene saturato con leggeri getti d'acqua e compattato, al fine di simulare l'azione compattante delle onde. I successivi strati filtro vengono posati all'asciutto, in modo da raggiungere le dimensioni e la pendenza desiderate, senza compattamento o risistemazione dei singoli massi, al fine di ottenere una loro collocazione random, analoga a quella che si ottiene in sito, evitando peraltro la "tentazione" di incastonare i massi.

La riproduzione del corretto andamento delle batimetriche su fondo fisso garantisce che le condizioni d'onda, come ad esempio la

dispersione dell'onda, la rifrazione/diffrazione, lo shoaling ed il frangimento, siano correttamente simulati. Un metodo comune per la costruzione della batimetria su fondo fisso nei modelli tridimensionali consiste nel costruire l'inclinazione del fondo con sagome o con profili livellati. Lo spazio tra le sagome è riempito con sabbia (o ghiaia) e coperto con uno strato di calcestruzzo. Nel caso di modellazione 2D, come nel caso in specie, viene ricostruita semplicemente una pendenza media rappresentativa del paraggio in esame.

I parametri d'onda di progetto vengono accoppiati con i livelli idrici di progetto. In particolare, le condizioni d'alta marea sono impiegate per verificare la stabilità delle parti più alte della struttura; mentre la stabilità del piede viene stimata con i valori della bassa marea. In genere, le condizioni d'onda di progetto, vengono utilizzate per differenti valori del tempo di ritorno (compresi tra 1 e 100 anni), includendo: l'altezza d'onda significativa, il periodo dell'onda di picco o media, la direzione d'onda di picco o media e la durata della mareggiata. Inoltre, per poter giungere ad un risultato statisticamente attendibile, le durate delle prove devono superare un numero minimo di onde, in genere compreso tra 500-3000 onde. Ciò corrisponde (nel prototipo) a mareggiate che si protraggono per una durata compresa dalle 3 alle 6 ore. Le mareggiate sono spesso simulate come una serie di prove con condizioni d'onda fisse, incrementandole con rigore, in funzione della mareggiata più probabile. Per quanto riguarda l'energia dello spettro d'onda, nei modelli fisici, essi sono caratterizzati dai loro parametri spettrali. I più comunemente usati sono: l'altezza d'onda significativa H_{mo} (o H_s) ed il periodo di picco T_p . Mentre, gli spettri d'onda più utilizzati sono lo spettro JONSWAP e lo spettro Pierson-Moskowitz.

Le paratoie che vengono disposte in un canale 2D sono talvolta fornite di un sistema di compensazione attivo della riflessione. Ciò significa che il movimento della paratoia compensa le onde riflesse,

impedendo loro di essere nuovamente riflesse verso il modello del frangiflutto. Nei canali 3D questo sistema può essere adottato solo per modulatori multi-pala. In particolare, se non è disponibile alcuna compensazione e presumendo che il set-up permetta una disposizione tra il frangiflutto e la paratoia obliqua, la posizione della struttura dovrebbe consentire la dissipazione della riflessione nei cosiddetti "dampers" (o "assorbitori d'onda"). Pertanto, la compensazione della riflessione è molto importante nel caso di elevati valori del coefficiente di riflessione (per esempio per muri verticali, spiagge o scogliere scoscese, etc) e nel caso in cui si manifestino onde lunghe.

La dissipazione delle onde avviene sia attivamente, mediante lo smorzamento che si compie in prossimità della paratoia, che passivamente con dissipatori d'onda disposti alla fine del canale 2D o intorno al modello 3D. In genere, vengono usati ciottoli schiacciati disposti su basse pendenze insieme a lastre di forma parabolica e schermi perforati o tappetini permeabili. Uno smorzatore d'onda efficace, dovrebbe presentare la stessa capacità di smorzamento indipendentemente dalla ripidità dell'onda.

Le onde irregolari, note anche come onde "random", dovrebbero sempre essere utilizzate nella modellazione di strutture costiere, per raggiungere gli obiettivi di progetto. Onde cilindriche lunghe e corte vengono impiegate nella modellazione fisica. Le onde lunghe ("long crested") si pensa che diano risultati più conservativi per quanto concerne le stime di danno e la portata di tracimazione. Mentre, le onde corte ("short crested"), sono importanti se si conoscono le condizioni locali delle onde.

Per quanto riguarda la scelta della tipologia di modello, i modelli 2D generalmente vengono usati per ottimizzare le sezioni trasversali dei frangiflutti. Per le analisi dell'interazione tra le onde ed il tronco delle strutture spesso è sufficiente un modello 2D. Inoltre, il modello 2D è realizzato in corrispondenza di una sezione trasversale tipica di

una struttura, indagata al punto di massima esposizione d'onda rispettivamente per la più importante direzione d'onda.

Da quanto sopra enunciato si evince come i limiti della modellazione fisica sono definiti da un lato dalla dimensione (massima) delle apparecchiature di modellazione disponibili, dall'altro dai criteri di similitudine (per le dimensioni minime). Il limite inferiore per le dimensioni del modello è dato ad esempio dal numero di Reynolds, il quale deve essere abbastanza grande da garantire condizioni di moto puramente turbolento nel modello (se queste sono condizioni che si manifestano nel prototipo). Anche il numero di Weber deve essere abbastanza grande, ovvero tale da non influenzare le tensioni superficiali che smorzano le onde.

In sintesi, dalle considerazioni sopra esposte si possono derivare i seguenti valori limite per il modello fisico di una diga a scogliera:

- profondità dell'acqua maggiore di 5 cm;
- altezza d'onda maggiore di 2-3 cm e altezza d'onda di progetto maggiore di 5 cm;
- periodo dell'onda in modo che la rapidità dell'onda sia realistica;
- diametro dei massi maggiore di 3-5 mm;
- diametro dei massi della mantellata maggiori di 25 mm.

Infine, si ricorda come le scale più comunemente usate per la modellazione dei frangiflutti sono:

- per il calcolo della stabilità dei massi della mantellata 1:5-1:80 (per modelli 2D si usano in genere 1:30-1:60; mentre per modelli 3D le scale più usate sono 1:30-1:80);
- nel caso dello studio delle forze su corpi solidi 1:10-1:50.

Come emergerà più chiaramente dai successivi capitoli, tali condizioni sono state tutte rispettate nell'ambito della modellazione della sezione corrente della diga foranea di Scalo Galera.

Per quanto concerne gli strumenti di misura, quelli maggiormente impiegati sono:

- sonde (resistive o capacitive);
- sonde direzionali (per determinare la direzione d'onda);
- misuratore di velocità (ad esempio: sonde elettromagnetiche, LDV, tecniche acustiche come il Doppler, etc.);
- sensori di pressione;
- profili per la stima del danno (di tipo acustico e laser scanner 3D);
- attrezzature fotografiche e riprese video.

Tra le strumentazioni specificate, l'attrezzatura fotografica è quella maggiormente utilizzata e la più versatile. Essa viene impiegata nei processi di modellazione per documentare il set-up del modello, le operazioni su modello, la registrazione del danno e le condizioni d'onda.

2.4.2 Operazioni sul modello fisico

Una volta realizzato il modello è opportuno, prima di cominciare le prove, condurre una ispezione preliminare. In questa fase il modello della struttura dovrebbe essere controllato in modo da verificare la rispondenza alle scale fissate, la batimetria e la corretta realizzazione delle parti più importanti della struttura come il piede della struttura, il coronamento o le parti più elevate.

Per quanto riguarda il moto ondoso di progetto, si deve tener conto del fatto che la propagazione del moto ondoso dal largo alla riva deve essere modellata in maniera congrua. Una buona pratica è quella di calibrare le onde, generandole all'interno della vasca di sperimentazione in assenza della riflessione indotta dalla struttura, ovvero misurando le caratteristiche del moto ondoso incidente in prossimità del piede della struttura. Tale fase di calibrazione non è essenziale, ma consente di aggiustare i parametri di controllo del

moto ondoso al fine di ottenere una distribuzione omogenea delle caratteristiche del moto ondoso da testare o di assicurarsi che determinate condizioni da testare siano incluse nel programma di prova.

Una volta che il modello è stato costruito è opportuno sottoporlo a onde a basso contenuto energetico, al fine di permettere alla struttura di assestarsi. Questo test di consolidamento o "shake-down test", deve essere tale da permettere alle unità della mantellata di "incastrarsi" tra di loro, creando un cumulo più compatto (Hughes, 1993). Hudson e Davidson (1975) e Tørum et al. (1979), suggeriscono di usare altezze d'onda pari a circa il 50-60% di quelle delle condizioni di prova (e lo stesso periodo d'onda del test target). Inoltre, il modello dovrebbe essere soggetto ad approssimativamente 1000 onde. Questa esposizione a piccole onde, potrebbe essere vista come la simulazione di onde a bassa energia all'inizio di una mareggiata. Gli effetti dello shake-down test dovrebbero essere sempre monitorati e documentati (per esempio usando fotografie).

Le procedure per le prove su modello dipendono dagli obiettivi dello studio su modello. Jensen (1984) ha elencato sette tipi di procedura che possono essere seguiti:

1. Test con crescenti impatti del moto ondoso: le prove di stabilità iniziano con condizioni iniziali energeticamente medio-basse, in ogni test successivo l'altezza d'onda viene gradualmente incrementata. Si raccomanda che il test prosegua fino al danneggiamento della struttura o fino a che l'altezza d'onda non supera il 120% di quella di progetto (Owen e Allsop, 1983). Questo tipo di prova è quello comunemente utilizzato (Hughes, 1993) ed è stato quello considerato anche durante la presente sperimentazione. Per strutture su acque basse, si dovrebbe individuare la condizione al largo che produce l'altezza d'onda di

frangimento, controllata dalla profondità, che è anche quella che provoca gli impatti più importanti sulla struttura. Ogni prova dovrebbe avere una durata pari a quella di una mareggiata, ovvero durare da 3 a 10 ore a scala di prototipo (Jensen, 1984) oppure da 1000 a 5000 onde (Owen e Allsop, 1983). Al fine di minimizzare la riflessione, nel caso di onde monocromatiche, anziché considerare una serie temporale continua, le onde possono essere generate in brevi sequenze successive.

2. Test in condizioni di progetto: questa tipologia di test è condotta per una sola condizione del moto ondoso. Jensen (1984) afferma che questo tipo di test serve a esaminare aspetti singolari della struttura.
3. Test che riproducono singole mareggiate: questo tipo di prova viene condotta qualora sia disponibile una serie storica dell'altezza d'onda o previsioni del moto ondoso affidabili, al fine di riprodurre i danni subiti dal prototipo durante una mareggiata reale oppure testare il comportamento della struttura in condizioni estreme.
4. Test di lunga durata: lo scopo di queste prove è generalmente quello di verificare se un danneggiamento iniziale della struttura evolve verso la distruzione totale o se il comportamento della struttura si stabilizza.
5. Test di impatti di mareggiate accumulati: in questo tipo di prova si cerca di riprodurre l'effetto cumulato di una serie di mareggiate, aventi caratteristiche differenti, ma tutte in grado di danneggiare la struttura.
6. Test di stabilità residua: questo tipo di prove di solito completano il programma di indagine, al fine di stabilire quale sia la stabilità residua di una struttura danneggiata.

7. Test di strutture in costruzione: questi test, condotti simulando le fasi di costruzione di una struttura a gettata, dal nucleo agli strati di filtro sovrastanti, servono essenzialmente a fornire informazioni su danneggiamenti potenziali o a cercare di ottimizzare la sequenza di costruzione al fine di minimizzare i danni.

Naturalmente sarebbe opportuno che le prove siano "ripetibili", in quanto la ripetibilità dei test dimostra che l'apparecchiatura del modello produce risultati simili sotto simili condizioni forzanti. Tuttavia spesso ciò non è possibile per ragioni di tempo o limiti di budget.

La modellazione del profilo di una mareggiata viene effettuata attraverso l'uso di forzanti idrodinamiche che si incrementano nel tempo. Tuttavia, il periodo dell'onda può variare significativamente tra la fase crescente della mareggiata e la sua fase calante. Il "crollo strutturale" non si verifica solo durante la nascita della tempesta, ma soprattutto quando essa si abbatte (Owen e Allsop, 1983). Per tale ragione, può risultare talora vantaggiosa la modellazione delle onde di progetto non solo durante la formazione della tempesta, ma addirittura la modellazione dell'intero profilo di mareggiata.

Le osservazioni effettuate durante le prove sono indispensabili in quanto permettono di capire gli effetti delle prove sul modello, i quali possono diventare critici ai fini del progetto. Per tale ragione, durante la conduzione degli esperimenti, è opportuno redigere una scheda di osservazione nella quale riportare la portata di overtopping, la trasmissione dell'onda, lo shoaling; la diffrazione, la rifrazione, gli spostamenti del materiale posto sulla mantellata. Nell'ambito della presente campagna, per ogni esperimento è stata redatta una scheda che riporta alcune delle precedenti informazioni (vedere l'Allegato "Schede degli esperimenti").

2.4.3 Procedure di analisi

Per quanto riguarda le modalità di analisi dei dati, generalmente i risultati delle prove si presentano in forma dimensionale. Tuttavia l'analisi adimensionale dei parametri più rilevanti può anche fornire utili indicazioni sul comportamento del modello. E' opportuno segnalare che in funzione dei requisiti delle analisi, il filtraggio dei dati può agevolare una corretta interpretazione dei risultati ottenuti.

Le analisi statistico-probabilistiche vengono usate raramente nella pratica della modellazione fisica, in parte ciò è dovuto al limitato numero di test eseguiti. Tuttavia, esse possono risultare anche utili nella descrizione di alcuni processi idraulici.

La rimozione di dati spuri è un importante pre-requisito per un'accurata analisi ed interpretazione dei dati. In particolare, è necessario eliminare: i "transitori" dovuti a problemi di strumentazione oppure a metodi di acquisizione dei dati; gli offset causati da strumenti o dalle conversioni tra procedure analogiche e digitali; i cambi di direzione generati dal trasporto degli strumenti e dalle variazioni del livello idrico. Le tecniche di rimozione di questi "errori" sono fornite per esempio da Bendat e Piersol (1971). Un altro metodo di rimozione dei dati falsi, consiste nell'eliminare frequenze di oscillazione più alte o più basse non desiderate. L'uso di un filtro passa alto o passa basso, può essere utile per separare le onde corte da quelle lunghe.

Il danno si verifica in strutture a scogliera quando le unità individuali della mantellata disposte sulla struttura vengono movimentate. Ciò può favorirne il crollo o la perdita dei materiali appartenenti ai sottostrati. Inoltre, sia la distribuzione delle dimensioni delle unità della mantellata che il contatto con le unità contigue influenzano notevolmente la stabilità della mantellata. Pertanto, non si dovrebbe attendere un danno uniformemente

distribuito sulla sezione trasversale del modello, ma localizzato in alcuni punti.

In genere, sono due i metodi utilizzati nell'accertamento del danno per modelli di dighe a gettata:

- conteggio del numero delle unità della mantellata che si spostano durante le prove sperimentali;
- determinazione del cambiamento volumetrico nelle aree dove le unità della mantellata sono state disposte.

Per quanto riguarda il metodo del conteggio del numero delle unità della mantellata che si spostano, esso necessita di una tecnica di individuazione delle unità della mantellata che si muovono. Una metodologia comunemente usata, consiste nel costruire il modello con le unità della mantellata aventi differenti colori, in modo che quando le singole unità si spostano durante le prove, è possibile individuare con facilità le zone che si instabilizzano. Tutto ciò, deve essere documentato con foto e filmati che registrino i risultati delle prove. Mentre, la quantificazione del danno in seguito a variazioni volumetriche impone che i profili dell'inclinazione della mantellata prima e dopo le prove siano misurati in maniera consistente per poter essere tra loro confrontati. La sezione di prova dovrebbe essere esaminata su una griglia che abbia sufficiente risoluzione per determinare i cambiamenti del profilo con ragionevole precisione.

Analiticamente, la percentuale di danno può essere stimata in diversi modi.

Secondo Hudson (1959) la percentuale di danno è pari alla percentuale di unità dislocate nella mantellata rispetto al numero totale di unità disposte:

$$N_d = \frac{N_{spostati}}{N_{totali}} \times 100\% \quad (2.27)$$

in cui $N_{spostati}$ è il numero di massi spostati, N_{totali} è il numero di massi totali disposti in quella sezione. Inoltre, si osserva che la

percentuale di danno è tipicamente calcolata per sezioni individuali, considerando che i massi si siano spostati di una distanza maggiore del diametro caratteristico. Nel caso degli Accropodi, gli elementi artificiali considerati nella presente situazione, si assume con diametro nominale il 70% dell'altezza del masso.

Un altro metodo per descrivere la percentuale di danno è dato dal numero N_{OD} definito come il numero di massi spostati all'interno di un'ampia striscia. Esso è dato dalla seguente relazione:

$$N_{od} = \frac{N_{spostati}}{B / D_{n50}} \quad (2.28)$$

in cui B è la larghezza della sezione di prova, determinata in corrispondenza della linea centrale di ogni sezione e D_{n50} è il diametro nominale, ossia quello superato dal 50% dei massi.

Broderick e Ahrens (1982) introdussero un nuovo parametro del livello di danno, indicato con S_d , basato sul diametro nominale medio delle unità della mantellata. Esso è spesso usato per descrivere il danno subito dalla pendenza della mantellata:

$$S_d = \frac{A_e}{D_{n50}^2} \quad (2.29)$$

in cui A_e è l'area erosa della sezione trasversale.

Nella presente sperimentazione sono state effettuate le stime di danno sia in termini di percentuale di danno N_D , sia in termini del parametro del danno N_{od} .

Indifferentemente dal metodo che si usa per stimare il danno su strutture a scogliera, è importante descrivere il metodo quando si riportano i risultati. Inoltre dovrebbero essere utilizzate osservazioni fotografiche di buona qualità, per descrivere il danno nel dettaglio. La stima del danno negli strati della mantellata viene semplificata dall'uso di tecniche fotografiche, nelle quali sia semplice distinguere piccoli movimenti regolari nella mantellata. Infine, le fotografie del

danno dovrebbero essere scattate sul modello asciutto, utilizzando una posizione fissa della macchina fotografica.

Il modello della struttura non viene generalmente riparato durante prove individuali, in modo tale che possa essere effettuata una stima del danno cumulato dopo mareggiate severe. Generalmente, lo strato della mantellata e la berma vengono ricostruiti dopo una serie completa di prove. Tale procedura è stata quella adottata anche nella presente campagna sperimentale.

Infine, una volta stimato sperimentalmente il danno con i metodi sopra descritti, bisogna valutare qualitativamente il tipo di danno sul modello. In particolare, il crollo della struttura si ha se lo strato filtro si rende visibile o se si supera un valore critico del danno. I valori critici della percentuale di danno (N_D , N_{OD}) e del parametro di danno (S_d) per diversi materiali (rocce naturali o unità di calcestruzzo) e vari spessori, sono riportati nel Rock Manual (CIRIA, CUR, CETMEF; 2007) o in U.S. Army Corps of Engineers (2002).

In Tabella 2.I e in Tabella 2.II sono riportate rispettivamente le definizioni adottate dal U.S. Army Corps of Engineers (2002) per quanto riguarda i livelli di danno e i valori limite dei diversi parametri comunemente utilizzati per la stima del danno.

Tabella 2.I Definizione dei livelli di danno secondo il U.S. Army Corps of Engineers (2002).

Assenza di danno	Nessuna unità spostata. Bisogna notare che S potrebbe non essere nullo in questa condizione
Danno iniziale	Poche unità spostate. Questo livello di danno corrisponde al livello "assenza di danno" usato nello Shore Protection Manual 1997 e 1984. Nella relazione del coefficiente di stabilità della formula di Hudson, dove il livello "assenza di danno" è definito come lo 0-5% di unità dislocate dentro la zona che si estende dalla metà dell'altezza inferiore della cresta, rivolta verso il mare, alla profondità al di sotto dello SWL pari ad H_s che genera un danno nel range 0-5%
Danno intermedio	Dislocazione delle unità ma senza l'esposizione del sottostrato o dello strato-filtro diretto dall'attacco delle onde
Crollo	Il sottostrato o lo strato filtro è esposto all'attacco diretto delle onde

Tabella 2.II Limiti dei livelli di danno sulla base delle definizioni fornite dal U.S. Army Corps of Engineers (2002).

Livello di danno N_d per mantellate					
Unità	Pendenza	Danno iniziale	Danno intermedio	Crollo	Riferimento bibliografico
Roccia	1:2-1:3	0-5%	5-10%	$\geq 20\%$	Jackson (1968)
Cubi	1:1.5-1:2		4%		Brorsen et al. (1974)
Dolos	1:1.5	0-2%		$\geq 15\%$	Burcharth and Liu (1992)
Accropodi	1:1.33	0%	1-5%	$\geq 10\%$	Burcharth et al. (1998)

Livello di danno N_{0d} per mantellate (van der Meer, 1988)				
Unità	Pendenza	Danno iniziale	Danno intermedio	Crollo
Cubi	1:1.5	0		2
Tetrapodi	1:1.5	0		1.5
Accropodi	1:1.33	0		0.5

Livello di danno S per mantellate (van der Meer, 1988)				
Unità	Pendenza	Danno iniziale	Danno intermedio	Crollo
Roccia	1:1.5	2	3-5	8
Roccia	1:2	2	4-6	8
Roccia	1:3	2	6-9	12
Roccia	1:4-1:6	3	8-12	17

Un ulteriore metodo per valutare il danno della struttura è quello definito dalla Normativa BS 6349 (Maritime structures, Part 7: Guide to the design and construction of breakwaters, 1991). Tale normativa definisce le categorie di danno riportate nella Tabella 2.III.

Tabella 2.III Definizione dei livelli di danno secondo la Normativa BS 6349 (Maritime structures, Part 7: Guide to the design and construction of breakwaters, 1991)

Categoria di danno	Descrizione
<i>Distruzione</i>	<i>Esposizione del nucleo della diga</i>
<i>Serio</i>	<i>Nucleo della diga visibile</i>
<i>Elevato</i>	<i>Grandi varchi nella mantellata principale, 5% delle unità spostate</i>
<i>Moderato</i>	<i>Varchi nella mantellata principale, 3% delle unità spostate</i>
<i>Piccolo</i>	<i>2% delle unità spostate</i>
<i>Leggero</i>	<i>1% delle unità spostate</i>
<i>Nulla</i>	<i>Nessuno danno</i>

Per quanto concerne i valori massimi della portata di overtopping e del coefficiente di trasmissione del moto ondoso, essi dipendono dal tipo di struttura e dai requisiti di progetto. Alcuni valori di riferimento vengono riportati tra gli altri dal Rock Manual e dal U.S. Army Corps of Engineers (2002) e sono qui sintetizzati in Tabella 2.IV.

Tabella 2.IV Valori accettabili per la portata di overtopping, adattato da U.S. Army Corps of Engineers (2002).

$m^3/s\ m$							$l/s\ m$
		SICUREZZA PER IL TRAFFICO		SICUREZZA STRUTTURALE			
	<i>Veicoli</i>	<i>Pedoni</i>	<i>Edifici</i>	<i>Dighe marittime</i>	<i>Dighe ricoperte d'erba</i>	<i>Rivestimenti</i>	
10^0	<i>Pericoloso per ogni velocità</i>	<i>Molto pericoloso</i>	<i>Danno strutturale</i>	<i>Danno anche se completamente protette</i>	<i>Danno</i>	<i>Danno anche in presenza di pavimentazione</i>	1000
10^{-1}				<i>Danno se la scarpata interna è non protetta</i>		<i>Danno in assenza di pavimentazione</i>	200
10^{-2}				<i>Danno se la cresta è non protetta</i>		<i>Inizio del danno</i>	100 50
10^{-3}		<i>Pericoloso su dighe in erba e frangiflutti a sezione composta</i>					20 10
10^{-4}	<i>Pericoloso parcheggiare su frangiflutti a sezione composta</i>	<i>Pericoloso su dighe in erba e frangiflutti a sezione composta</i>					2
	<i>Pericoloso parcheggiare su frangiflutti a parete verticale</i>	<i>Pericoloso su frangiflutti a parete verticale</i>				<i>Assenza di danno</i>	1
10^{-5}	<i>Pericoloso alle alte velocità</i>	<i>Fastidioso ma non pericoloso</i>	<i>Danni minori</i>	<i>Assenza di danno</i>	<i>Assenza di danno</i>		0.1 0.03 0.02 0.01
10^{-6}		<i>Bagnato ma non fastidioso</i>					0.004 0.001
10^{-7}	<i>Sicuro a tutte le velocità</i>		<i>Assenza di danno</i>				0.0001

3 Prove sul modello fisico condotte dalla Sogreah

3.1 Generalità

In data 31 maggio del 2000 l'ing. Francesco Giordano progettista fiduciario del Comune di Malfa, Amministratore unico della società di ingegneria SIGMA s.r.l., ha incaricato la Sogreah, società di ingegneria detentrica fino a qualche anno fa del brevetto degli Accropodi, dell'esecuzione delle prove su modello fisico della diga foranea prevista sullo Scalo Galera. Le prove si sono svolte presso il laboratorio della Sogreah tra la fine di giugno e l'inizio di luglio del 2000.

Obiettivo delle prove su modello fisico era quello di individuare una sezione tipo dell'opera che consentisse una riduzione dei costi di costruzione e che rispettasse i criteri di stabilità e i criteri relativi alla tracimazione. In particolare, i criteri considerati per la stabilità sono stati:

- ✓ 0% di danni per moti ondosi fino a quello di progetto (moto ondoso corrispondente a un tempo di ritorno di 30 anni);
- ✓ danni riparabili per un moto ondoso pari al 120% di quello di progetto.

I criteri considerati per la tracimazione del moto ondoso erano tali da garantire la possibilità di disporre dei posti barca da diporto nella parte interna della banchina, e quindi sono stati:

- ✓ tracimazioni trascurabili per moti ondosi relativamente frequenti con tempo di ritorno inferiore a 5 anni;
- ✓ tracimazioni limitate (meno del 5-10% di onde tracimate) per moti ondosi più rari con tempo di ritorno pari a 10 anni;
- ✓ tracimazioni tali da interdire l'accesso alla diga per moti ondosi corrispondenti a un tempo di ritorno di 30 anni.

3.2 Configurazioni esaminate

Nel corso dello studio condotto dalla Sogreah sono state esaminate tre differenti configurazioni della diga foranea:

- la configurazione 1 è quella risultante dallo studio preliminare di variante eseguito da Sogreah. In essa si prevede la realizzazione di una mantellata costituita da Accropodi da 20 m³ posti secondo una pendenza di 4:3. Il sottostrato è composto da massi naturali con peso variabile tra 3 t e 6 t. Al fine di assicurare un adeguato sostegno al piede, date le condizioni geologiche (fondale roccioso) è stato previsto di dragare una trincea profonda 3.4m a partire dal fondo naturale. La quota del muro paraonde (+6.50m s.l.m.) e la larghezza della berma orizzontale che costituisce la cresta della mantella (10m) sono state mantenute come nel progetto originario in Antifer.
- la configurazione 2 è stata identificata partendo dalle seguenti considerazioni:
 - o la stabilità della mantellata in seguito alle prove condotte sulla configurazione 1 sono risultate eccellenti, anche con un moto ondoso pari al 120 % di quello di progetto;
 - o si hanno delle notevoli difficoltà a realizzare degli Accropodi da 20 m³ in spazi ristretti quali quelli disponibili a Malfa;
 - o la tracimazione è risultata notevole, anche per moti ondosi relativamente frequenti;
 - o la riduzione dei volumi degli Accropodi determina una riduzione dei volumi dei vuoti, e quindi un incremento della portata tracimata.

Da tali considerazioni è emerso che per la seconda configurazione era necessario: (i) ridurre il volume degli

Accropodi da 20m^3 a 16m^3 , e ciò ha permesso anche di ridurre la dimensione della trincea dragata; (ii) aumentare il livello sia del muro paraonde che della berma in Accropodi, in modo da ridurre la tracimazione.

- la configurazione 3 è stata ipotizzata partendo dalla considerazione che la realizzazione del dragaggio in un fondo roccioso, previsto nelle configurazioni precedenti, è di difficile e onerosa realizzazione.

Per tal motivo, si è previsto la realizzazione di una berma in massi naturali al piede della diga. In realtà, nel modello della Sogreah al posto di massi naturali sono stati utilizzati cubi da 8-10t, simili a quelli salpati dalla diga esistente.

3.3 Caratteristiche del modello fisico

3.3.1 Canale di prova

Le prove condotte dalla Sogreah sono state condotte in un canale le cui dimensioni sono: larghezza pari a 1 m, profondità pari a 1.2 m e lunghezza pari a 40 m. All'interno del canale è presente un generatore di moto ondoso costituito da una pala piana incernierato su un asse orizzontale posto sotto il fondo del canale stesso.

La scala adottata dalla Sogreah per la realizzazione del modello fisico è stata fissata a 1/59.4.

I fondali sono stati modellati all'interno della vasca con cemento liscio. I massi tipo Accropodi e il muro paraonde sono stati realizzati in materiale con densità di circa $2.33\text{t}/\text{m}^3$ rappresentativo di un calcestruzzo (nella realtà) di $2.40\text{t}/\text{m}^3$.

3.3.2 Programma delle prove eseguite dalla Sogreah

Le prove della Sogreah sono state suddivise in tre serie ognuna atta a verificare diverse componenti della diga.

Una prima serie di prove è stata finalizzata all'esame della stabilità della mantellata. Il moto ondoso generato era caratterizzato da un periodo di $T_p=11.65s$, cioè un periodo corrispondente all'altezza d'onda di progetto con tempo di ritorno di 30 anni, e da altezze d'onda pari al 40%, 60%, 80%, 100% e 120% dell'altezza d'onda di progetto, pari a 8.10m.

Una seconda serie di prove è stata dedicata alla valutazione della stabilità del piede. Il moto ondoso generato era caratterizzato sempre da un periodo di $T_p=11.65s$ e da due altezze d'onda pari all' 80% e 100% dell'altezza d'onda di progetto (ovvero $H_{s80\%} = 6.48 \text{ m}$ e $H_{s100\%} = 8.10\text{m}$).

Infine, una terza e ultima serie di prove è stata effettuata per stimare la tracimazione, per altezze d'onda e periodi corrispondenti a un tempo di ritorno di 5 e 10 anni.

La distribuzione delle frequenze è stata riprodotta secondo uno spettro Jonswap.

3.4 Risultati ottenuti dalla Sogreah

Dagli studi condotti dalla Sogreah è emerso che la configurazione 2, con Accropodi da 16m^3 , quota del muro a +7.5m s.l.m e trincea al piede della mantellata, rispetta sia i criteri di stabilità che quelli fissati per la portata tracimata. Sebbene per tale configurazione sia stato suggerito di vietare l'utilizzo dei posti barca in caso di mareggiate eccezionali.

Dalle prove effettuate dalla Sogreah, la configurazione 3, per la quale si prevede la realizzazione di una berma in massi naturali al piede della diga, non è in grado di assicurare una adeguata stabilità della struttura.

4 Caratteristiche del modello fisico realizzato

4.1 Generalità

Le prove su modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera, sito nel Comune di Malfa, sono state condotte presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Catania.

Gli esperimenti sono stati effettuati all'interno della vasca di sperimentazione in dotazione al citato Laboratorio di Idraulica. Il modello fisico realizzato è un modello geometricamente non distorto, bidimensionale, in scala 1:80, per il quale sono stati adottati i criteri di similitudine descritti nei capitoli precedenti. In particolare, con riferimento alla modellazione fisica della stabilità della scogliera, si è assicurata l'uguaglianza del numero di stabilità di Hudson tra modello e prototipo.

Nel presente capitolo vengono analizzati sia gli elementi costitutivi dell'apparato di sperimentazione sia la strumentazione utilizzata durante gli esperimenti. Inoltre, si descrive il processo di costruzione del modello fisico e le modalità di selezione dei materiali utilizzati. Infine, si discute in dettaglio la procedura sperimentale adottata durante la conduzione delle prove su modello.

4.2 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale è costituito da una vasca per la generazione del moto ondoso ubicata presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università degli Studi di Catania. Detta installazione è costituita da una vasca, da una paratoia del tipo a ventola per la generazione delle onde e da una serie di dispositivi per la misura del moto ondoso e delle caratteristiche idrodinamiche delle onde, nonché da dispositivi ottici

atti alla valutazione delle trasformazioni subite dalla struttura durante le prove sperimentali. Le collocazioni degli strumenti sperimentali sono riportati nella Tavola 4.

4.2.1 La vasca di sperimentazione

La vasca, realizzata in cemento, ha una sezione rettangolare di lunghezza 18.00m, larghezza 3.60m e profondità 1.20m. Essa presenta delle pareti in c.a. nella parte iniziale e finale, mentre le pareti laterali sono interamente costituite da pannelli di vetro dello spessore di circa 1cm, fissati su un'intelaiatura metallica, che consentono di osservare ciò che avviene all'interno della vasca. L'apparecchiatura per la generazione del moto ondoso si trova nella parte iniziale della vasca, mentre in quella finale vi è un profilo di spiaggia, ottenuto con pietrame di pezzatura grossolana trattenuto da una rete in materiale plastico. La presenza del profilo di spiaggia è necessaria durante le prove in assenza di strutture per ridurre il più possibile gli effetti indesiderati della riflessione del moto ondoso. Nella presente sperimentazione detta spiaggia è stata utilizzata come area di lavoro, anche al fine di effettuare le misure di portata tracimata.

Il fondo della vasca, originariamente orizzontale, è stato modificato nell'ambito del presente studio al fine di ottenere un profilo di spiaggia impermeabile e fisso caratterizzato da una pendenza pari a 8%, tale da ricreare, seppur in maniera semplificata, la batimetria reale in prossimità della diga foranea del porto dello Scalo Galera. Il valore della pendenza è stato ottenuto dall'analisi delle batimetriche rilevate e fornite dal Committente considerando la pendenza media dei fondali antistanti la scogliera. Inoltre alla fine della pendenza è stato predisposto un volume libero che consentisse di modellare la zona di imbasamento della diga.

La Figura 4.1 e la Figura 4.2 mostrano la vista planimetrica e la sezione trasversale della vasca, rispettivamente prima e dopo la

costruzione della pendenza. Mentre nella Figura 4.3 si riporta un particolare della pendenza realizzata all'interno della vasca.

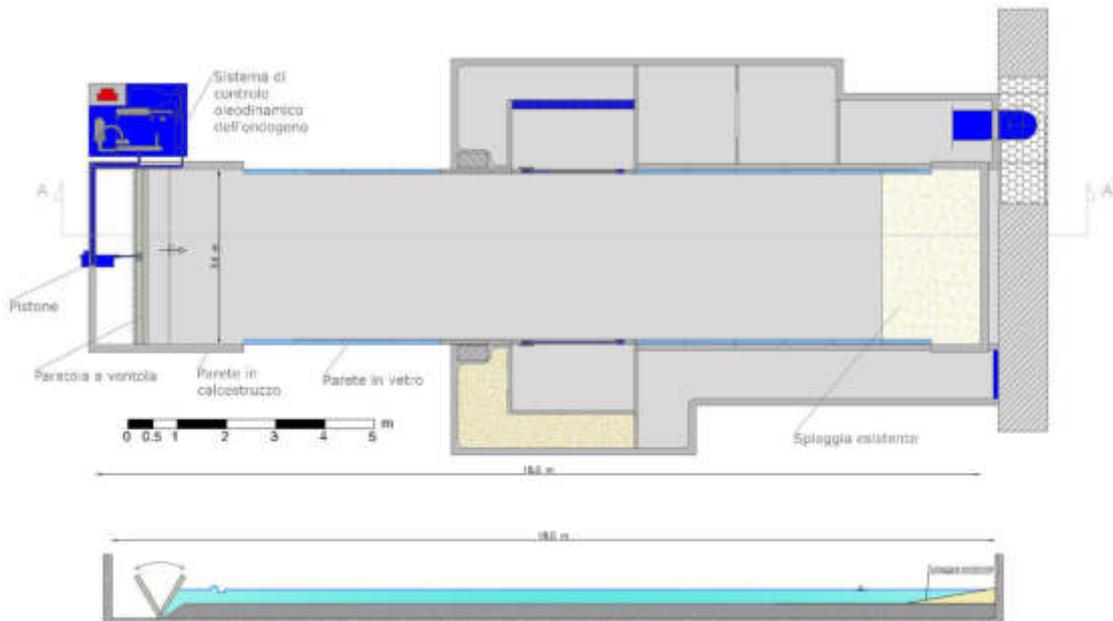


Figura 4.1 Vasca di sperimentazione utilizzata per la modellazione fisica della diga foranea dello Scalo Galera: planimetria e sezione trasversale della configurazione originale della vasca.

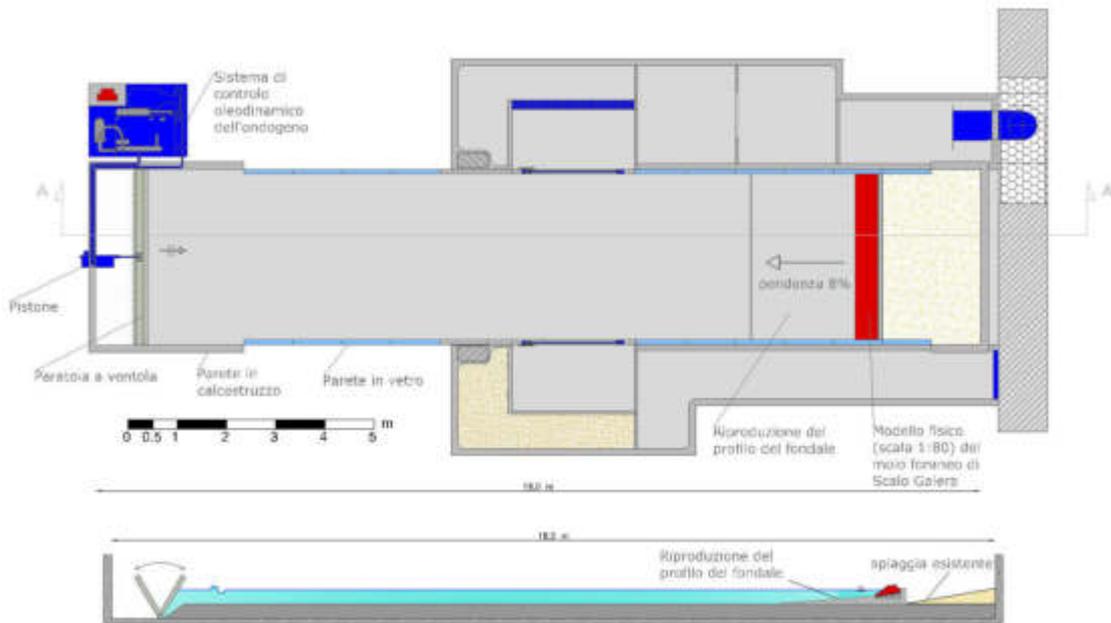


Figura 4.2 Vasca di sperimentazione utilizzata per la modellazione fisica della diga foranea dello Scalo Galera: planimetria e sezione trasversale della vasca dopo la realizzazione della pendenza.

La planimetria della vasca di sperimentazione e le relative sezioni sono riportate nella Tavola 3.

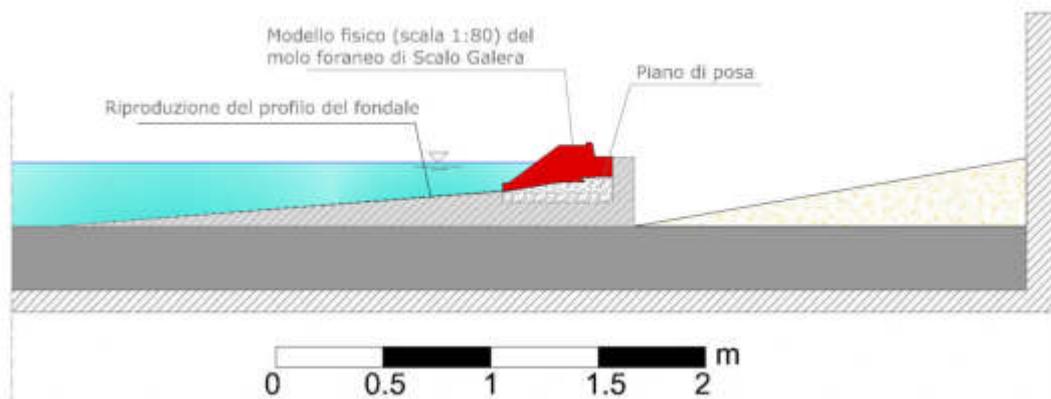


Figura 4.3 Particolare della vasca di sperimentazione, con la pendenza e il modello fisico realizzati al suo interno.

4.2.2 Sistema per la generazione del moto ondoso

Il moto ondoso è generato dal movimento oscillatorio di un battitore di tipo a ventola. Il battitore è azionato da un servosistema oleodinamico a controllo elettronico, i cui componenti sono alloggiati in un pannello di controllo esternamente alla vasca.

L'apparato comprende un serbatoio di capacità pari a 400l, diviso internamente da un setto che separa l'olio da filtrare dall'olio filtrato, che, attraverso il circuito di ricircolo, alimenta il circuito di mandata. Ognuna delle due parti è dotata di un indicatore per il controllo del livello e della temperatura; la temperatura di regime è di circa 50°C.

Il circuito di ricircolo funziona grazie ad una motopompa centrifuga trifase di potenza pari a 3kW e portata 200l/min; nella condotta di aspirazione del circuito è alloggiata una valvola a sfera collegata ad un microinterruttore con controllo a leva.

Dopo il filtraggio, l'olio viene raffreddato passando attraverso uno scambiatore di calore ad acqua. Nella parte di serbatoio contenente l'olio filtrato sono presenti un indicatore elettrico del livello dell'olio e un termostato tarato a 65°C, che, al superamento di tale temperatura, interrompe automaticamente il funzionamento della centrale.

Il circuito di mandata è messo in pressione da un motore asincrono trifase e da una pompa.

Sulla condotta di mandata sono alloggiati in linea i seguenti dispositivi:

- valvola di non ritorno;
- elettrovalvola di massima pressione, tarata alla pressione di 100bar, superata la quale si ha l'interruzione del fluido al circuito di mandata;
- manometro, per il controllo della pressione di regime (80bar);
- regolatore di flusso;

- accumulatore da 10l ad azoto, che permette la compensazione della pressione al valore di regime.

A valle del circuito di mandata si trovano un filtro in pressione e un manometro. L'olio in pressione giunge, quindi, al pistone del battitore. Il pistone di diametro pari a 40mm, è costituito da un cilindro a doppio stelo il quale, per avere un'escursione di ± 210 mm con frequenza di 2Hz, richiede una portata d'olio di 100l/min; il doppio stelo garantisce l'uguaglianza delle sezioni di lavoro in entrambe le direzioni, mantenendo, quindi, costante la portata di funzionamento, il movimento del cilindro è guidato da un servosistema oleodinamico.

Tutto il sistema elettronico del battitore è posto su un pannello di controllo nel quale un generatore di funzioni è in grado di produrre segnali ad andamento sinusoidale, quadro e triangolare; il segnale può essere modulato in frequenza ed in ampiezza. Inoltre il controllo dell'offset consente di fissare la posizione di partenza del pistone. Il segnale d'input è amplificato e convertito in corrente, dei trasduttori dotati di potenziometri permettono la selezione manuale dei valori dei parametri di tensione e di frequenza desiderati.

Il sistema prevede anche la possibilità di un input esterni del segnale.

In particolare le onde irregolari vengono prodotte collegando una scheda di I/O della National Instrument per mezzo di un cavo coassiale (tipo RG-59), al quadro di controllo del battitore e a un Toughbook Panasonic.

Il software di controllo è il programma "jwg.exe" (Figura 4.4), appositamente sviluppato dal DICA, per la generazione di onde random, mediante spettri di tipo JONSWAP. Il segnale così prodotto viene inviato alla scheda di I/O che permette di convertire il segnale da digitale a analogico per l'invio al quadro di controllo del battitore.

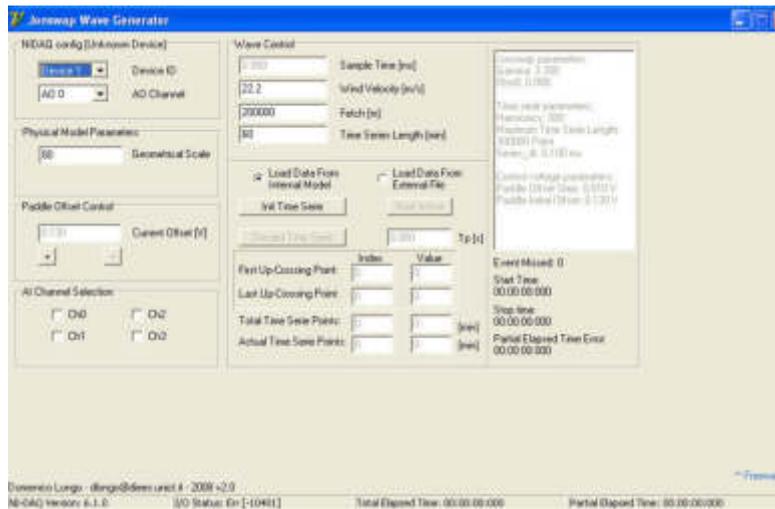


Figura 4.4 Interfaccia del software "jwg.exe" per la generazione delle onde irregolari.

Nella Figura 4.5 sono mostrate le componenti del sistema di controllo per la generazione di onde random appena descritto.

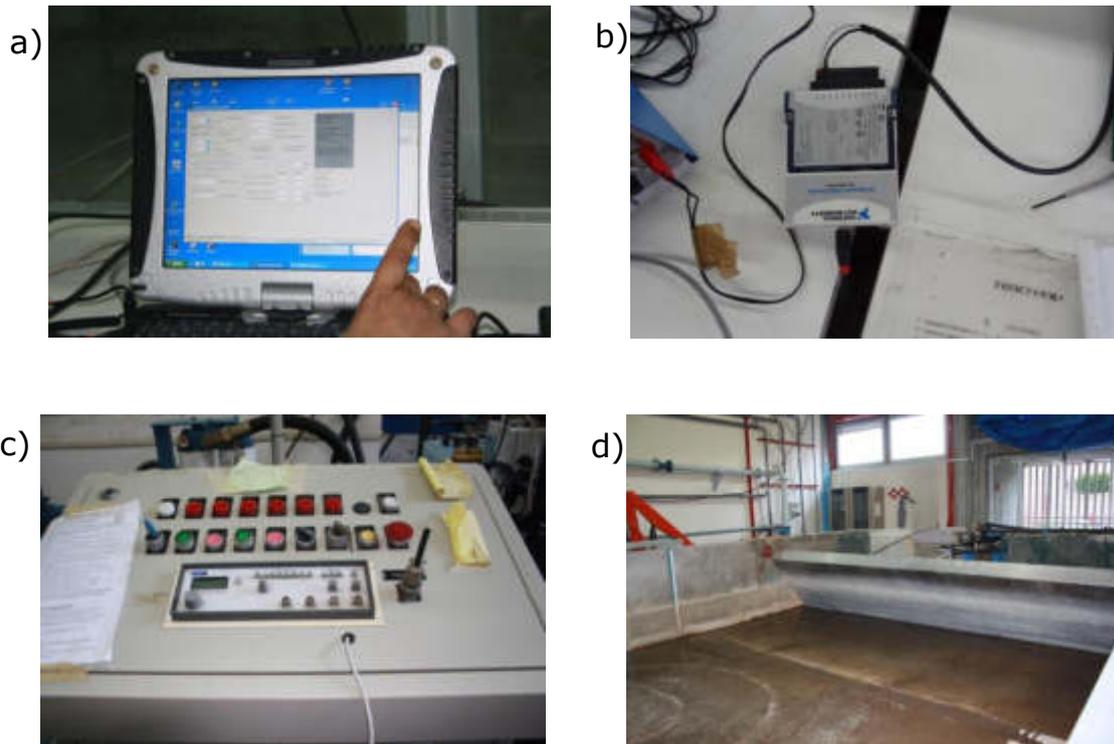


Figura 4.5 Componenti del sistema di generazione delle onde irregolari: a) Toughbook Panasonic dotato di software di controllo "jwg.exe"; b) trasformazione del segnale digitale in segnale analogico mediante la scheda NI-9162; c) quadro di controllo; d) paratoia a ventola per la generazione del moto ondoso.

La taratura dei parametri di controllo per la generazione di onde irregolari, ovvero quelli relativi alla lunghezza del fetch e alla velocità del vento, è stata ottenuta attraverso una serie di prove preliminari. Attraverso i risultati di queste prove è stato possibile costruire una curva di calibrazione, con la quale si sono messi in relazione i parametri utilizzati dal software di generazione e controllo con l'altezza d'onda significativa H_s ottenuta in vasca. Ciò ha permesso di ricavare i valori del fetch (F), della velocità del vento (u) e dell'offset (DC) che consentissero di ottenere le altezze d'onda significative richieste. Si precisa inoltre, che al solo scopo di scalare opportunamente i tempi, il programma richiede anche la scala geometrica del modello.

4.3 Strumentazione di misura utilizzata

4.3.1 Misura del moto ondoso

La misura delle caratteristiche delle onde è stata effettuata mediante 3 sonde resistive di cui 2 posizionate a 1.50m al largo rispetto al piede della struttura - sonda 2 e sonda 3 - ed una posizionata più al largo a circa 5.00m dalla struttura stessa - sonda 1.

Ognuna delle 3 sonde è costituita da due fili metallici in acciaio inossidabile, di lunghezza pari a 300mm e diametro 1.5mm, disposti parallelamente ad una distanza di 12.5mm (vedere Figura 4.6a). In particolare, le 2 sonde accoppiate (vedere Figura 4.6b), sono posizionate a circa 1.5m dalla struttura, distanziate di 17cm l'una dall'altra, al fine di misurare la riflessione dell'onda da parte della struttura stessa con il metodo delle due sonde di Goda e Suzuki (1976).

Il funzionamento delle sonde è di tipo resistivo, ovvero esse vengono alimentate da una differenza di potenziale nota e una volta immerse in acqua, risultano cortocircuitate, generando in uscita un segnale in tensione proporzionale alla profondità d'immersione della sonda. Il segnale viene quindi trasmesso alla *scheda d'acquisizione National Instrument (NIUSB 6008)* e convertito in digitale ed acquisito dal calcolatore. La misura della sopraelevazione d'onda è ottenuta attraverso un'opportuna funzione di trasferimento tensione-sopraelevazione del pelo libero. Tale funzione, nell'ipotesi di comportamento lineare dello strumento, si ottiene mediante un'operazione di taratura di tutte le sonde in condizioni di quiete.

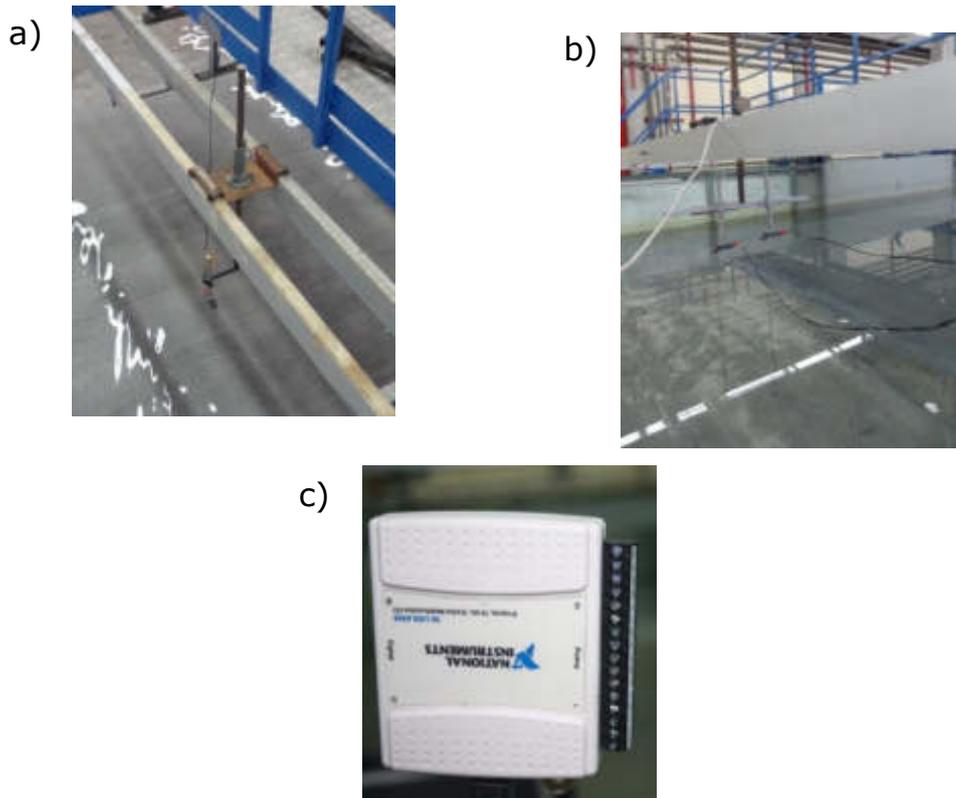


Figura 4.6 Sonde di livello resistive: a) sonda 1; b) sonde 2 e 3, per il rilievo del coefficiente di riflessione; c) scheda d'acquisizione scheda d'acquisizione National Instrument (NIUSB 6008).

4.3.2 Misura del danno subito dalla mantellata esterna

Nell'ambito delle prove sperimentali condotte in laboratorio, al fine di verificare su modello fisico la stabilità della mantellata esterna, sono stati utilizzati diversi strumenti ottici che hanno consentito di stimare il danno subito dalla struttura a causa dell'azione del moto ondoso. In particolare sono state utilizzate:

- una videocamera Sony modello HDR-PJ10E, avente le seguenti caratteristiche: registrazione Full HD su memoria da 16GB, zoom ottico 30x, foto 3,3MP, LCD da 3"/7,5 cm e stabilizzatore di immagine di tipo digitale;

- una macchina fotografica reflex Canon, modello Canon EOS 1000-D avente un sensore CMOS da 10.1 Megapixel, unità di autopulizia del sensore EOS, schermo LCD da 2,5", 9 punti di messa a fuoco automatica ad area allargata, messa a fuoco AF ad area allargata, predefiniti Picture Style, DIGIC II, raffica fino a 27 scatti consecutivi a 3fps, software DPP per elaborazione immagini RAW, compatta e leggera e compatibile con obiettivi EF/EF-S e con flash Speedlite EX;
- un laser appartenente alla classe 3B con una potenza pari a 10mW. La radiazione emessa da esso fa parte del visibile ed appare di colore rosso, la lunghezza d'onda di tale radiazione è compresa nell'intervallo 625-740nm, il diametro della sezione del raggio laser è di 0.8mm. Al laser è stata accoppiata una lente cilindrica che consente di trasformare il raggio in una lama di luce;
- una macchina fotografica compatta Sony Cyber-shot, modello DSC-HX9V 16.2 MP G Lens, avente uno zoom digitale fino 16.2 Mega pixels e 16x di zoom ottico.

In Figura 4.7 sono mostrati gli strumenti ottici sopra descritti. I filmati di tutte le prove sono stati realizzati utilizzando la sopraccitata videocamera Sony, posizionata su ponteggio frontale alla struttura. Inoltre, la macchina reflex della Canon, ubicata sul ponteggio laterale alla struttura, è stata utilizzata per fotografare lo stato della mantellata all'inizio e alla fine di ogni prova, al fine di valutare le alterazioni del profilo della struttura attraverso una tecnica ottica 2D basata sull'uso di luce strutturata. Si deve tuttavia osservare da detta tecnica, utilizzata da chi scrive con successo nel caso di scogliere in massi naturali, non ha fornito una stima affidabile delle modifiche del profilo trasversale a causa della modesta entità delle stesse e della presenza di numerose zone d'ombra nelle immagini, generate dagli stessi Accropodi.

La fotocamera Sony è stata utilizzata come camera mobile per registrare condizioni specifiche verificatesi durante gli esperimenti.



Figura 4.7 Strumenti di misura ottici usati negli studi condotti in laboratorio: a) videocamera Sony modello HDR-PJ10E; b) Fotocamera Canon EOS 1000-D; c) laser a diodo (potenza 10mW); d) Fotocamera Sony DSC-HX9V 16.2 MP G Lens.

4.3.3 Misura della portata trascinata media

Nell'ambito della presente sperimentazione è stata misurata anche la portata di trascinamento media. Allo scopo è stato appositamente realizzato il sistema di misurazione, costituito da una vasca e da uno scivolo per il convogliamento della portata trascinata a tergo della struttura (vedere Figura 4.8).

L'indirizzatore di flusso, costruito in lamiera d'acciaio sagomata con forma trapezia, avente la base maggiore larga 100cm e quella minore

larga 40cm, consente l'incanalamento della portata tracimata all'interno di un contenitore rettangolare in plastica (dimensioni 32cmx48cm). Inoltre, una volta raccolta l'acqua all'interno della vaschetta ne è stato misurato il suo volume mediante un boccale graduato di plastica da 1000 ml con un errore di ± 10 ml.



Figura 4.8 a) Contenitore di raccolta della portata tracimata (32x48 cm) e scivolo in acciaio per l'incanalamento dell'acqua all'interno della stessa vaschetta; b) boccale graduato (1000 ml) usato per la misura del volume d'acqua tracimato in un intervallo di tempo predefinito.

4.4 Descrizione del modello fisico della mantellata

Nell'ambito della presente campagna sperimentale volta ad indagare la stabilità della mantellata esterna della sezione della diga foranea dello Scalo Galera è stato realizzato all'interno della vasca di sperimentazione, descritta sopra, un modello fisico bidimensionale della mantellata.

Il modello realizzato, in accordo con i criteri di similitudine introdotti al capitolo 2, è un modello non distorto geometricamente in scala geometrica 1:80. Al fine di garantire la similitudine in termini di stabilità, il modello è stato realizzato in modo che il numero di stabilità degli elementi lapidei, in particolare di quelli della mantellata

e del piede della struttura, sia lo stesso tra modello e prototipo. Per ridurre il più possibile gli effetti viscosi, gli strati di filtro e il nucleo sono stati realizzati utilizzando una granulometria maggiorata. Inoltre per meglio identificare lo spostamento degli Accropodi indotto dal moto ondoso, ed anche per ridurre gli effetti d'attrito a scala di modello, gli Accropodi sono stati dipinti utilizzando quattro colorazioni differenti. Nel seguito si riportano in dettaglio le caratteristiche dei materiali utilizzati e le fasi di costruzione del modello.

Si precisa che al tal fine sono state investigate quattro configurazioni geometriche del piede della sezione, tutte concordate con il direttore dei lavori l'ing. Francesco Giordano, indicato dal Committente Responsabile Scientifico della convezione. Tali configurazioni sono in numero maggiore rispetto a quelle previste dalla Convenzione (4 anziché 3) e presentano in alcuni casi anche caratteristiche diverse rispetto a quelle inizialmente previste. In particolare sono state considerate le seguenti:

- Configurazione 1: la mantellata è sorretta da due file di Accropodi;
- Configurazione 2: la mantellata è sorretta da una fila di massi trapezoidali in calcestruzzo da 50 t con la scarpa rivolta lato mare e da una fila di Accropodi;
- Configurazione 3: la mantellata è sorretta da una fila di massi trapezoidali in calcestruzzo da 50 t con la scarpa a sostegno del piede;
- Configurazione 4: la mantellata è sorretta da una berma costituita da massi naturali di IV categoria con sommergezza della cresta pari a 8m e larghezza in cresta pari a 5m.

In Figura 4.9 si riportano gli schemi strutturali considerati quindi nelle verifiche di stabilità. Gli schemi strutturali considerati sono riportati con maggior dettaglio nella Tavola 2 allegata alla presente relazione.

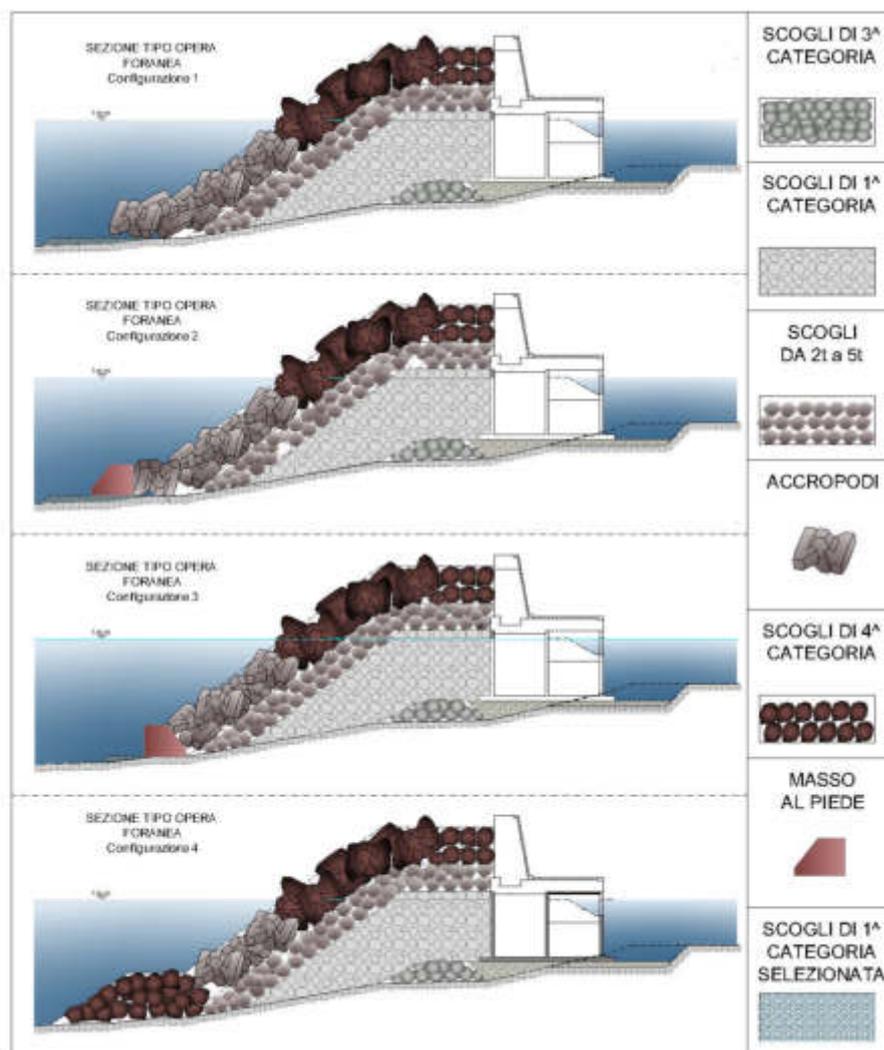


Figura 4.9 Schema strutturale delle quattro sezioni verificate.

4.4.1 Caratteristiche del materiale utilizzato

A scala di prototipo, i diversi elementi che compongono la sezione tipo della diga foranea dello Scalo Galera sono realizzati con i seguenti tipi di materiali lapidei:

- la mantellata è in massi artificiali tipo Accropodi di prima generazione da 16m^3 in conglomerato cementizio ($\rho=2400\text{kg/m}^3$);

- la parte sommitale della mantellata è in scogli naturali di IV categoria (massa 7-10t);
- il filtro è in scogli selezionati da 2 a 5 t;
- il nucleo è in massi e scogli provenienti dai salpamenti e scogli di I categoria;
- la base d'appoggio del nucleo è in massi di III categoria.

Inoltre, si prevede di realizzare la regolarizzazione del fondale al piede della mantellata in scogli di I categoria selezionata.

Nella Tabella 4.I si riassumono le caratteristiche delle categorie di scogli naturali utilizzate per la realizzazione della diga foranea.

Tabella 4.I Categorie degli scogli naturali previste per la realizzazione della diga foranea dello Scalo Galera (prototipo).

Tipo di massa	Kg	
	min	max
I categoria -selezionata	300	1000
II categoria	1000	3000
scogli filtro (da 2 t a 5 t)	2000	5000
III categoria	3000	7000
IV categoria	7000	10000

Per individuare il materiale da utilizzare per la realizzazione del modello fisico della diga è necessario fare riferimento ai criteri di similitudine descritti nel capitolo 3. In particolare, si è fatto riferimento alla metodologia di Hudson et al. (1979) e Sharp e Khader (1984) per la definizione del "numero di stabilità".

Si è fatto riferimento ad una densità dell'acqua pari a 1000 kg/m^3 nel modello (acqua dolce) e pari a 1025 kg/m^3 nel prototipo (acqua salata).

Nel caso della riduzione in scala degli scogli naturali, le due metodologie sono state applicate a due tipologie di materiale lapideo: granulato di marmo e basalto. Per entrambi i materiali, nel prototipo, è stato utilizzato lo stesso valore di densità pari a 2650 kg/m^3 mentre per il modello sono stati utilizzati valori di densità pari a 2500 kg/m^3 per il marmo e 2700 kg/m^3 per il basalto.

In Tabella 4.II si riportano i parametri necessari per l'applicazione del criterio di Hudson et al. (1979) e di Sharp e Khader (1984), in cui N_L è la scala delle lunghezze, N_{γ_a} è la scala del peso degli elementi lapidei, $N_{(\gamma_a/\gamma_{w-1})}$ è la scala della densità relativa, N_{wa} è la scala del peso secondo i criteri di Hudson o di Sharp e Khader.

Tabella 4.II Valutazione del numero di stabilità secondo il metodo di Hudson et al. (1979) e di Sharp e Khader (1984) per i sedimenti di basalto e di marmo.

Parametro	Valore	
	Marmo	Basalto
N_L	80	80
N_{γ_a}	1.06	0.98
$N_{(\gamma_a/\gamma_{w-1})}$	1.06	0.93
N_{wa} (Hudson et al,1979)	459686	619598
N_{wa} (Sharp e Khader,1984)	513497	538854

In generale l'applicazione del metodo di Hudson comporta dei risultati più cautelativi, quindi si è utilizzato tale metodo per la valutazione del numero di stabilità N_{wa} .

Mediante l'applicazione della relazione 2.18 e assumendo i massi di forma approssimativamente cubica è stato possibile rispettivamente

ricavare il peso (vedi Tabella 4.III) e il diametro (vedi Tabella 4.IV) dei massi costituenti del modello fisico.

Tabella 4.III Peso dei modelli fisici dei massi naturali ottenuti mediante il numero di stabilità.

Tipologia di massi	Massa [kg]			
	granulato di marmo		basalto	
	min	max	min	max
I categoria -selezionata	0.001	0.0005	0.0005	0.002
II categoria	0.002	0.0016	0.0016	0.005
scogli filtro (da 2 t a 5 t)	0.004	0.003	0.003	0.008
III categoria	0.007	0.005	0.005	0.011
IV categoria	0.015	0.011	0.011	0.016

Tabella 4.IV Dimensioni dei modelli fisici dei massi naturali ottenuti dal criterio geometrico.

Tipologia di massi	Diametro [mm]			
	granulato di marmo		basalto	
	min	max	min	max
I categoria -selezionata	6.4	9.5	5.6	8.4
II categoria	9.5	13.8	8.4	12.1
scogli filtro (da 2 t a 5 t)	12.0	16.3	10.6	14.4
III categoria	13.8	18.3	12.1	16.1
IV categoria	18.3	20.6	16.1	18.1

Dall'analisi incrociata delle caratteristiche dei massi necessari per la realizzazione della diga foranea a scala di prototipo e dei materiali più facilmente reperibili o già disponibili si è deciso di impiegare le tipologie di materiale riportati in Tabella 4.V per la realizzazione del modello fisico.

Tabella 4.V Tipologia di materiale e relativa classe granulometrica utilizzata per la realizzazione del modello fisico.

Prototipo	Modello fisico	Diametro [mm]	
		min	max
I categoria –selezionata	Granulato di marmo	6.4	9.5
Nucleo (massi e scogli provenienti da salpamenti più scogli di I categoria)	Granulato di marmo	9.0	20.0
II categoria	Basalto (Cava Nunziata-Bosco)	12.7	15
scogli filtro (da 2 t a 5 t)	Basalto(Cava Nunziata-Bosco)	12.7	15
III categoria	Basalto (Cava Moschetto)	15	20
IV categoria	Basalto(Cava Moschetto)	15	20

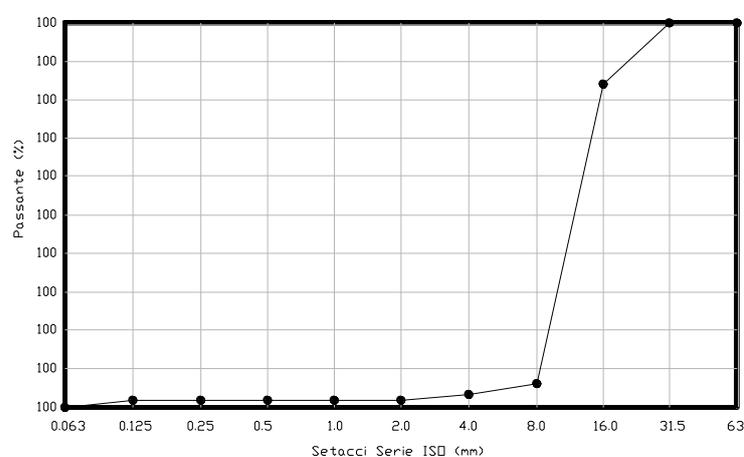
In particolare, per la realizzazione del modello fisico si sono utilizzate le seguenti tipologie di materiali lapidei:

- granulato di marmo;
- basalto.

Il granulato di marmo è stato reperito presso la cava di "Valli Granulati". Tale tipologia di materiale è ottenuto dalla frantumazione di rocce calcaree, successivamente selezionate in varie granulometrie. In particolare, il materiale acquistato presso la cava "Valli Granulati", appartiene alle seguenti classi granulometriche 9-14 mm, 14-18mm e 18-20mm, e viene fornito all'interno di sacchi da 50Kg ciascuno. Dai dati forniti dal fornitore, si è assunto che esso avesse una densità pari a circa 2500kg/m³.

Dal granulato di marmo disponibile è stata selezionata la classe granulometrica compresa tra 6.4mm e 9.5mm per scalare gli elementi appartenenti alla I categoria selezionata (materiale di riempimento dello scanno di imbasamento). La selezione meccanica è avvenuta mediante il setaccio da ¼" (serie ASTM, setaccio a maglie quadrate) e il setaccio da 3/8" (serie ASTM, setaccio a maglie quadrate).

Una parte del materiale basaltico è stato reperito presso la cava di "Nunziata-Bosco" di Mascali (CT), ed è stato fornito corredato di certificato emesso dal Laboratorio Prove Stradali del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Catania (Certificato n. 347 del 06/07/2007) che ne specifica le caratteristiche granulometriche, di resistenza, di densità, etc in ottemperanza alle Norme UNI EN 933-1, 1097-1, 1097-6, 1367-1, 933-3. Le caratteristiche del campione preso in esame sono riportate nella Figura 4.10, in Tabella 4.VI e in Tabella 4.VII.



Setacci ISO [mm]												
Apert. [mm]	125	63	31.5	16	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
% Passante	-	-	100	84	6	3	2	2	2	2	2	1

Figura 4.10 Curva granulometrica e dimensione dei setacci usati per il materiale basaltico proveniente dalla cava "Nunziata-Bosco" (estratte dal Certificato n. 347 del 06/07/2007 emesso dal Laboratorio Prove Stradali del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Catania).

Tabella 4.VI Massa del campione di materiale basaltico proveniente dalla cava "Nunziata-Bosco" (estratte dal Certificato n. 347 del 06/07/2007 emesso dal Laboratorio Prove Stradali del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Catania).

CAMPIONE	MASSA DEL CAMPIONE DOPO ESSICCAZIONE A 105°
Aggregato (14-30 mm)	M ₁ =10.650 g; M ₂ =10.563,9 g dopo lavaggio;

Tabella 4.VII Determinazione della massa volumica dei grani e dell'assorbimento dell'acqua (informazioni estratte dal Certificato n. 347 del 06/07/2007 emesso dal Laboratorio Prove Stradali del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Catania).

Metodo del picnometro per aggregati da 4.0 a 31.5 mm	
Data di esecuzione prova	14/06/2007 – 15/06/2007
Identificazione del campione	Aggregato 14 -30
Frazione granulometrica di prova	da 4.00 mm a 16.00 mm
Massa secca netta	3985.0 g
Massa vol. apparente	2.83 Mg/m ³
Massa vol. granulati pre-essiccati in stufa	2.68 Mg/m ³
Massa vol. granuli saturi a superficie asciutta	2.73 Mg/m ³
Assorbimento acqua	1.9%

Dalla curva granulometrica si può osservare una buona uniformità delle dimensioni dei sedimenti aventi diametri compresi tra 8 e 16 mm. Vista la distribuzione granulometrica, da tale materiale basaltico è stata selezionata la classe granulometrica compresa tra 12.7 mm e 15 mm per la realizzazione, a scala del modello, del filtro

della diga foranea. La selezione è avvenuta mediante setacciatura meccanica, utilizzando il setaccio da ½" (serie ASTM, setaccio a maglia quadrata) e il setaccio da 20 mm (serie UNI, setaccio a maglie circolari).

Per la realizzazione a scala di modello delle parti costituite dalla IV categoria e dalla III categoria, è stato utilizzato del materiale basaltico proveniente dalla cava Moschetto di Belpasso (CT) dalle caratteristiche simili a quelli precedenti con dimensioni comprese tra 15mm e 30mm. Su tale materiale basaltico è stata eseguita una setacciatura meccanica ed è stata selezionata la classe granulometrica compresa tra 15 mm e 20 mm. La selezione è stata eseguita mediante il setaccio da 20 mm (serie UNI, setaccio a maglie circolari) e il setaccio da 25 mm (serie UNI, setaccio a maglie circolari).

4.4.1.1 Caratteristiche degli Accropodi

Il progetto dell'adeguamento dello Scalo Galera di Malfa prevede la realizzazione della mantellata in massi artificiali ed in particolare in Accropodi da 16 m³. Nella Figura 4.11 si riporta il modello 3D di un Accropodo. Come si evince dalla figura la protuberanza prende il nome di "naso" mentre la parte piana è detta incudine (rispettivamente "nose" e "anvil" nella letteratura anglosassone) per via della forma.

La massa dell'Accropodo a scala di modello è stata determinata garantendo l'uguaglianza del numero di stabilità determinato sia con il criterio di Hudson et al. (1979) sia il criterio di Sharp e Khader (1984). Nella Tabella 4.VIII si riportano le caratteristiche fisiche del prototipo e del modello e i parametri necessari per l'applicazione dei citati criteri per la valutazione del numero di stabilità.

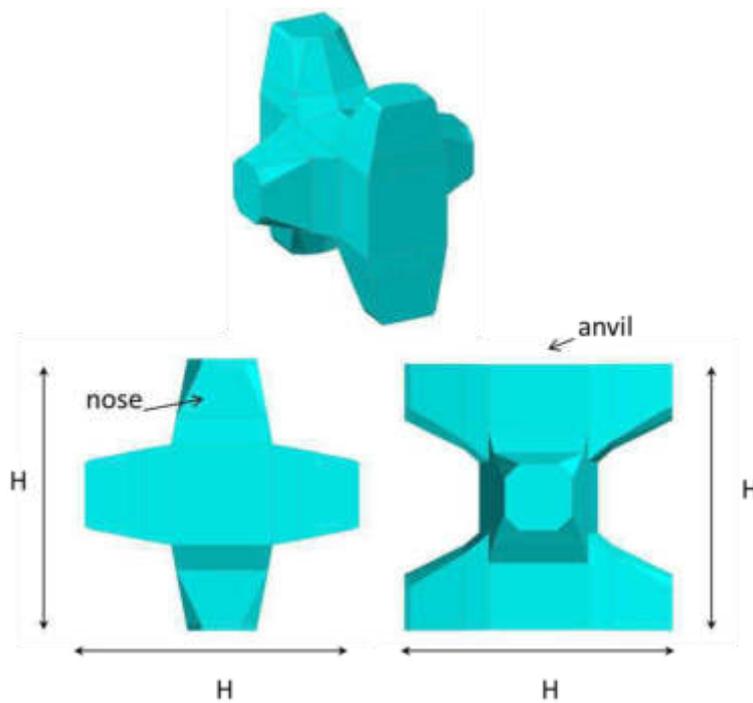


Figura 4.11 Vista 3D e delle prospettive laterali dell'Accropodi.

Tabella 4.VIII Valutazione del numero di stabilità secondo il metodo di Hudson et al. (1979) e di Sharp e Khader (1984).

Parametro	Valore	Parametro	Valore
$\rho_{wp} [kg/m^3]$	1025	N_L	80
$\rho_{ap} [kg/m^3]$	2400	N_{γ_a}	1.04
$\rho_{wm} [kg/m^3]$	1000	$N_{(\gamma_a/\gamma_{w-1})}$	1.03
$\rho_{am} [kg/m^3]$	2300	N_{wa} (Hudson et al, 1979)	486236
$\rho_{ap} / \rho_{wp} - 1$	1.34	N_{wa} (Sharp e Khader, 1984)	517747
$\rho_{am} / \rho_{wm} - 1$	1.30		

Come si evince dalla Tabella 4.VIII l'applicazione del metodo di Hudson comporta dei risultati più cautelativi, quindi si è utilizzato tale metodo per la valutazione del numero di stabilità N_{wa} .

Noto il peso degli Accropodi a scala di prototipo pari a 38400kg, mediante la relazione 2.18, si ricava il peso degli Accropodi a scala di modello pari a 0.079kg, con un volume pari a $3.43 \times 10^{-05} \text{ m}^3$ e una altezza pari a 0.0464m. Nella Tabella 4.IX si riportano le caratteristiche fisiche dell' Accropodi a scala di prototipo e di modello.

Tabella 4.IX Caratteristiche fisiche dell' Accropodi a scala di prototipo e del modello.

	Massa [kg]	V [m ³]	H [m]
Prototipo	38400	16	3.61
Modello	0.079	3.43×10^{-05}	0.0464

Una fase preliminare delle prove ha riguardato la definizione della corretta miscela da utilizzare per la realizzazione dei modelli fisici degli Accropodi. Infatti, detta miscela deve: (i) avere buone proprietà di stampaggio, ovvero deve essere sufficientemente fluida prima della maturazione in modo da poter essere colata facilmente all'interno dello stampo; (ii) aver tempi di maturazione relativamente rapidi in modo da consentire la produzione di un gran numero di pezzi.

Nel presente lavoro, in particolare, 450 modelli fisici di Accropodi sono stati realizzati dalla società GGG Elettromeccanica mediante colatura di una miscela di resina, polvere di basalto e polvere di ferro, all'interno di stampi in MDF realizzati con macchina a controllo elettronico (CNC) a 3 assi.

4.4.1.2 Caratteristiche dei massi al piede

Nelle configurazioni 2 e 3 è previsto l'uso di un masso al piede. Nella configurazione 2 detto elemento permette di proteggere la fila di Accropodi posti alla base della mantellata, mentre nella configurazione 3 il carico della mantellata si scarica direttamente su di esso.

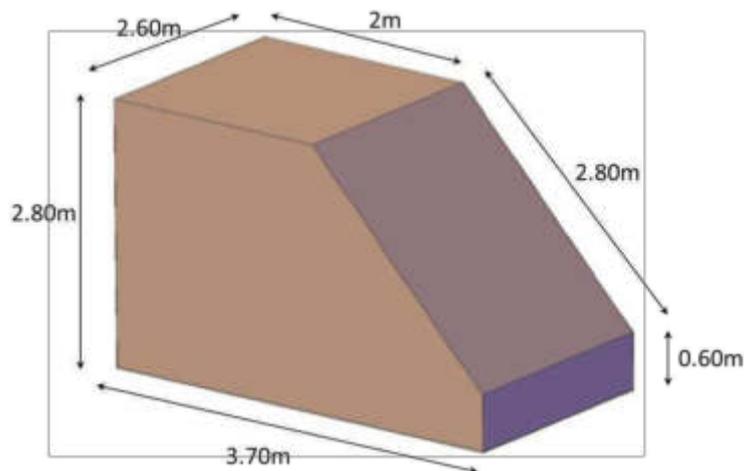


Figura 4.12 Vista 3D del masso al piede (dimensioni a scala di prototipo).

Anche in questo caso, lo "scaleggiamento" è stato effettuato mediante il numero di stabilità determinato sia con il criterio di Hudson et al. (1979) sia con il criterio di Sharp e Khader (1984). Nella

Tabella 4.X si riportano le caratteristiche fisiche del prototipo e del modello e i parametri necessari per l'applicazione dei citati criteri per la valutazione del numero di stabilità.

Tabella 4.X Valutazione del numero di stabilità secondo il metodo di Hudson et al. (1979) e di Sharp e Khader (1984).

Parametro	Valore	Parametro	Valore
$\rho_{wp} [kg/m^3]$	1025	N_L	80
$\rho_{ap} [kg/m^3]$	2300	N_{γ_a}	1.00
$\rho_{wm} [kg/m^3]$	1000	$N_{(\gamma_a/\gamma_{w-1})}$	0.96
$\rho_{am} [kg/m^3]$	2300	N_{wa} (Hudson et al, 1979)	584442
$\rho_{ap}/\rho_{wp} - 1$	1.24	N_{wa} (Sharp e Khader, 1984)	535090
$\rho_{am}/\rho_{wm} - 1$	1.30		

Come si evince dalla Tabella 4.X l'applicazione del metodo di Hudson comporta dei risultati più cautelativi, quindi si è utilizzato tale metodo per la valutazione del numero di stabilità N_{wa} .

Noto il peso del masso al piede a scala di prototipo pari a 50770kg, mediante la relazione 2.18, si ricava il peso degli Accropodi a scala di modello pari a 0.087 kg, con un volume pari a $3.776 \times 10^{-05} \text{m}^3$ e una lunghezza (L_m) pari a 0.0311 m. Nella Tabella 4.XI si riportano le caratteristiche fisiche del masso al piede a scala di prototipo e del modello.

Tabella 4.XI Caratteristiche fisiche del masso al piede a scala di prototipo e del modello.

	Massa [kg]	V [m ³]	L _m [m]
Prototipo	50770.2	22.07	2.60
Modello	0.087	3.776×10^{-05}	0.0311

I modelli fisici dei massi al piede sono stati realizzati in calcestruzzo attraverso getti in casseforme di legno appositamente realizzate.

4.4.2 Costruzione del modello fisico

Il modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera del Comune di Malfa è stato realizzato in scala 1:80, utilizzando quattro configurazioni di progetto del prototipo (n°1, n°2, n°3 e n°4) dalle quali sono scaturite quattro sezioni del modello fisico: sezione 1, sezione 2, sezione 3 e sezione 4. Le sezioni sono riportate nella Tavola 5.

Di seguito si riporta la descrizione dettagliata dei fasi costruttive del modello fisico.

4.4.2.1 Fasi costruttive della diga: dal piano di posa al filtro

La struttura della diga foranea nelle quattro configurazioni varia solo per la differente disposizione della mantellata e del piede. Pertanto di seguito si riportano le fasi di messa in opera delle parti della struttura in comune nelle tre configurazioni.

Le fasi costruttive sono le seguenti:

- Realizzazione della batimetrica idealizzata del fondo con una spiaggia piana avente pendenza pari all' 8% (Figura 4.13 a);
- realizzazione del piano di posa dalla diga foranea mediante una struttura in calcestruzzo (Figura 4.13 b);

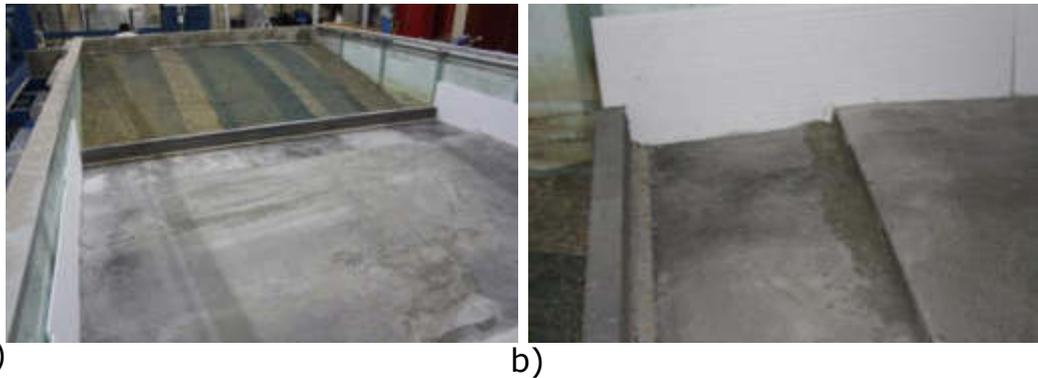


Figura 4.13 Realizzazione della spiaggia piana in calcestruzzo liscio (a) e del piano di posa del modello all'interno della vasca mediante una struttura in calcestruzzo(b).

- Riempimento della zona di imbasamento della struttura mediante materiale basaltico ($D=20-30$ mm) (Figura 4.14);



Figura 4.14 Riempimento della struttura in calcestruzzo mediante materiale basaltico ($D=20-30$ mm).

- riproduzione della sezione della diga su una lastra di compensato, per la realizzazione di quattro sagome-guida necessarie alla costruzione del modello fisico (Figura 4.15 a);
- posizionamento nella vasca delle quattro sagome, in corrispondenza del piano di posa realizzato in precedenza. Tali sagome sono state collocate nel seguente modo: due all'estremità della vasca e le rimanenti ad una distanza pari a 0.80 m dal bordo vasca (Figura 4.15 b);



a)

b)

Figura 4.15 a) riproduzione della sezione della diga su quattro lastre di compensato; b) posizionamento delle sagome guida all'interno del piano di posa.

- ricoprimento del piano di posa con geotessuto (Figura 4.16). La sistemazione del geotessuto permette di evitare il trasporto di

materiale determinato dal deflusso della acqua e quindi di evitare la conseguente modifica del piano di posa.



Figura 4.16 Ricoprimento del piano di posa con del geotessuto, per evitare il trasporto di materiale e la conseguente modifica del piano stesso.

- sistemazione del muro paraonde al di sopra di uno strato di sabbia, quest'ultimo necessario per la sistemazione allineata delle diversi moduli del muro paraonde. Il muro paraonde è stato suddiviso su 7 moduli in calcestruzzo da 30 cm ciascuno, attraverso getti in casseforme di legno appositamente realizzate;



Figura 4.17 Posa del muro paraonde su uno strato di sabbia in modo da facilitare la sistemazione allineata dei singoli moduli.

- messa in opera della parte interna del nucleo con materiale basaltico (D=15-20 mm) (III categoria) e della parte esterna con granulato di marmo (D=9-20 mm) (I categoria);



Figura 4.18 Messa in opera del nucleo sia della parte interna con materiale basaltico (a) sia della parte esterna con granulato di marmo (b) rappresentativi rispettivamente della III categoria e degli scogli e massi provenienti da salpamenti e rocce di I categoria.

- posa in opera del materiale basaltico ($D=12.7-15$ mm) per la realizzazione del filtro (Figura 4.19);



Figura 4.19 Messa in opera del filtro realizzato mediante materiale basaltico rappresentativo degli scogli di 2-5 t a scala di prototipo.

- sistemazione della rete metallica per protezione delle strutture laterali del modello fisico, non appartenenti all'area di studio (Figura 4.20);



Figura 4.20 Sistemazione delle parti laterali e protette mediante rete metallica a maglie quadrate

- colorazione degli Accropodi. Gli Accropodi sono stati suddivisi in 4 gruppi di colore, ogni uno costituito da circa 100 massi, e colorati in blu, bianco, arancione e grigio. Si può osservare che la tecnica di colorazione del materiale che compone gli strati della mantellata è molto diffusa nei modelli fisici, in quanto permette di individuare con facilità la mobilità del materiale e quindi di studiare meglio la stessa stabilità della mantellata.



Figura 4.21 Verniciatura dei modelli fisici degli Accropodi.

4.4.2.2 Costruzione della Configurazione 1

Nella configurazione 1 la sistemazione del piede della mantellata della diga avviene mediante due file di Accropodi.

Sulla base delle caratteristiche di tale configurazione, è stata definita la geometria della sezione da sottoporre a prova (nel seguito denominata sezione n°1), rappresentata in Figura 4.22.

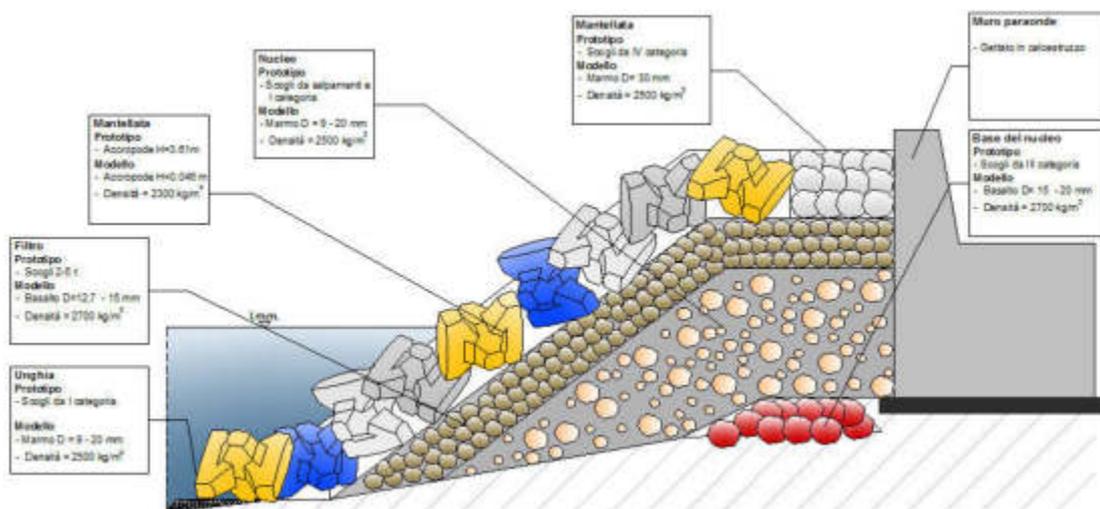


Figura 4.22 Geometria della sezione n°1 del modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.

La messa in opera degli Accropodi deve rispettare dei criteri di posa da applicare sia a scala di prototipo sia a scala del modello fisico. Tali criteri sono di seguito elencati (Verma et al., 2004):

- 1) i massi devono essere sistemati in un unico strato;

- 2) l'intervallo tra i centri di massa di due blocchi nella stessa riga e colonna sono uguali;
- 3) la modalità di imbragatura deve essere variata e agevolare l'inclinazione dei blocchi;
- 4) i blocchi devono essere posizionati con una configurazione differente rispetto ai blocchi adiacenti;
- 5) due blocchi nella stessa riga orizzontale non devono essere in contatto;
- 6) ogni blocco deve essere in contatto con i blocchi della riga inferiore;
- 7) ogni blocco deve poggiare su due blocchi della riga inferiore;
- 8) meno di un terzo dei blocchi deve avere l'anvil parallelo alla pendenza; i blocchi così posizionati devono essere distribuiti lungo la mantellata in maniera omogenea e non concentrata in gruppi;
- 9) due blocchi adiacenti non devono toccarsi tramite i loro anvil;
- 10) la densità di posa deve essere fissata secondo il progetto.

Seguendo tali criteri nella messa in opera degli Accropodi si è realizzata la mantellata della configurazione 1 riportata in Figura 4.23.



Figura 4.23 Modello nella Configurazione 1 della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.

4.4.2.3 Costruzione della Configurazione 2

Nella configurazione 2 la sistemazione del piede della mantellata della diga avviene mediante una fila di massi al piede, con scarpa rivolta lato mare, e una di Accropodi.

Sulla base delle caratteristiche di tale configurazione, è stata definita la geometria della sezione da sottoporre a prova (nel seguito denominata sezione n°2), rappresentata in Figura 4.24.

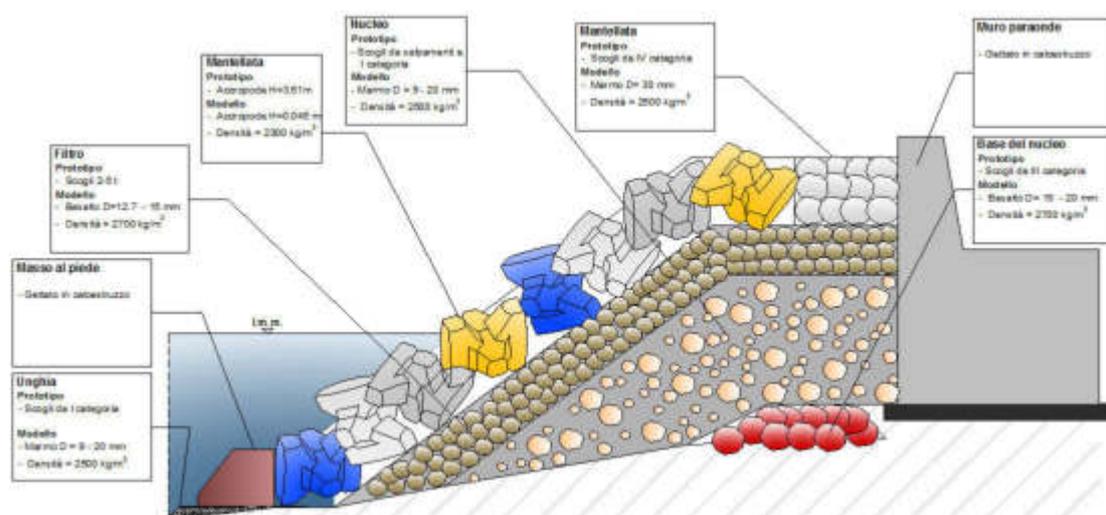


Figura 4.24 Geometria della sezione n°2 del modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.

Seguendo i criteri descritti in precedenza per messa in opera degli Accropodi si è realizzata la mantellata della configurazione 2 riportata in Figura 4.25.



Figura 4.25 Modello nella Configurazione 2 della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.

4.4.2.4 Costruzione della Configurazione 3

Nella configurazione 3 la sistemazione del piede della mantellata della diga avviene mediante una fila di massi al piede con scarpa rivolta verso la scogliera.

Sulla base delle caratteristiche di tale configurazione, è stata definita la geometria della sezione da sottoporre a prova (nel seguito denominata sezione n°3), rappresentata in Figura 4.26.

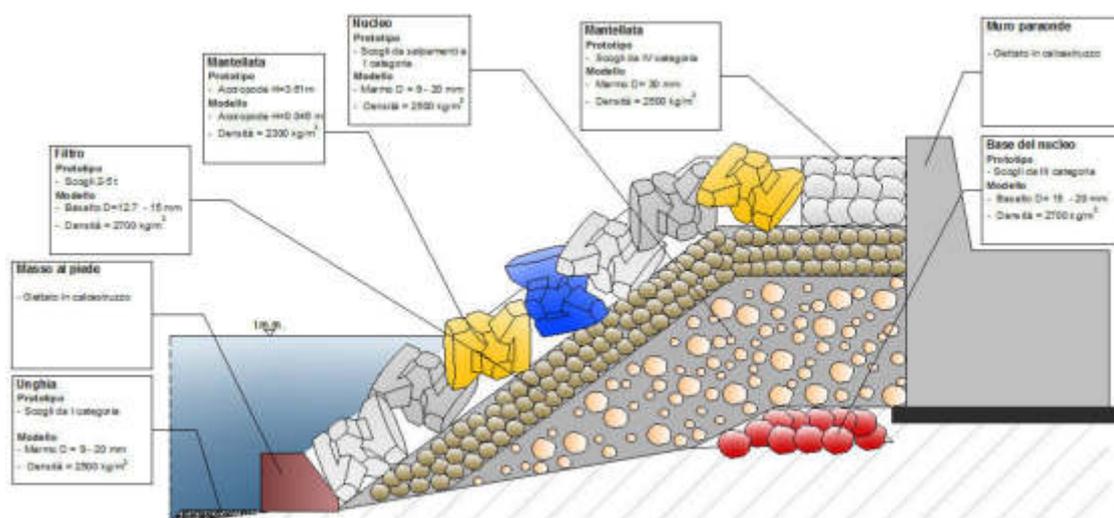


Figura 4.26 Geometria della sezione n°3 del modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.

Seguendo i criteri descritti in precedenza per messa in opera degli Accropodi si è realizzata la mantellata della configurazione 3 riportata in Figura 4.27.



Figura 4.27 Modello nella Configurazione 3 della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.

4.4.2.5 Costruzione della Configurazione 4

Nella configurazione 4 la mantellata è protetta al piede mediante una berma realizzata con massi naturali di IV categoria, con sommergenza della cresta della berma pari a 8m e larghezza pari a 5m.

Sulla base delle caratteristiche di tale configurazione, è stata definita la geometria della sezione da sottoporre a prova (nel seguito denominata sezione n°4), rappresentata in Figura 4.28.

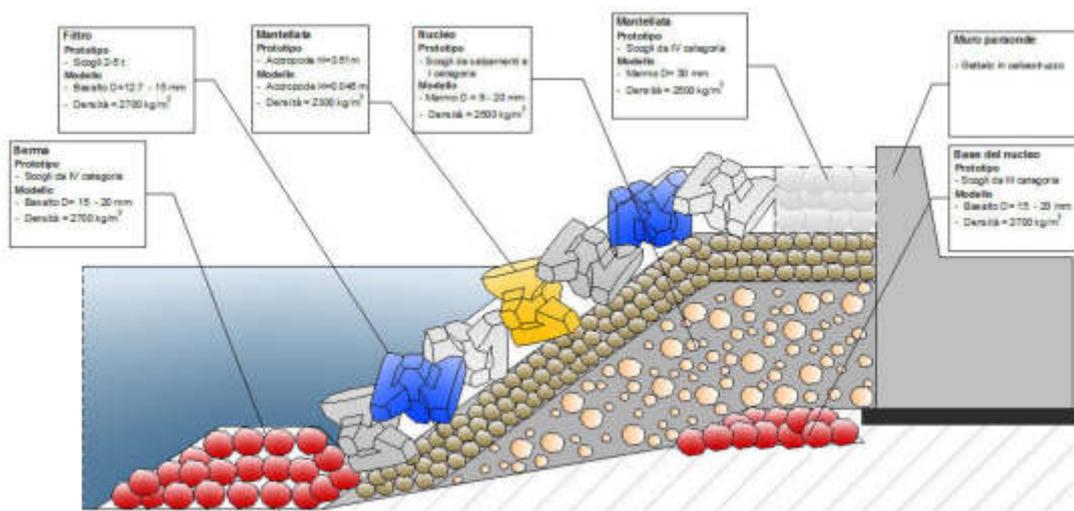


Figura 4.28 Geometria della sezione n°4 del modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.

Nella Figura 4.29 si riportano le foto del modello fisico realizzato in laboratorio.



Figura 4.29 Modello nella Configurazione 4 della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.

4.5 Procedura sperimentale

Allo scopo di verificare la stabilità del piede della diga foranea dello Scalo Galera sito nel Comune di Malfa (Isola di Salina), sono stati condotti alcuni esperimenti eseguendo una serie di prove preliminari per la calibrazione dei parametri idrodinamici al fine di ottenere in vasca un moto ondoso avente le caratteristiche desiderate.

Nello specifico si è fatto riferimento a condizioni di moto ondoso irregolare organizzando la procedura sperimentale in tre fasi: una fase di generazione del moto ondoso, una fase di acquisizione dei dati ed una fase di elaborazione dei dati acquisiti.

Prima di procedere con le prove effettive, è stato effettuato lo "shake-down test" ossia una prova che, simulando le mareggiate probabili durante la fase di costruzione della diga, permette l'assestamento dell'intera mantellata.

Successivamente sono state considerate due condizioni di moto ondoso, fino al raggiungimento dell'altezza d'onda di progetto relativa ad un tempo di ritorno pari a 30 anni. In alcuni casi ci si è spinti fino al 120% dell'onda di progetto.

Di seguito, si descrivono dettagliatamente le operazioni compiute durante gli esperimenti.

4.5.1 Procedura sperimentale nel caso di onde irregolari

La realizzazione del modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera è avvenuta all'interno della vasca di sperimentazione in assenza di acqua; solo successivamente la vasca è stata riempita fino ad un prestabilito livello idrico pari a 30 cm misurato tramite una scala graduata posizionata sulla parete laterale della vasca in prossimità del battitore.

Completato il riempimento della vasca, è stata effettuata la taratura delle tre sonde resistive seguita dal posizionamento degli strumenti ottici per le acquisizioni delle immagini.

Le sonde sono state collegate al sistema di acquisizione e per la loro calibrazione è stato utilizzato il software LabView (lanciando *acquisizione due canali.vi* e *acquisisci terza sonda.vi*) impostando lo zero della sonda a 40 cm e variandolo di ± 6 cm.

In riferimento alla strumentazione ottica, sul ponte interno alla vasca, in posizione centrale, sono stati posizionati sia il laser per la misura del profilo della mantellata, che la telecamera per la valutazione dell'entità degli spostamenti degli Accropodi nella zona centrale della barriera.

Sul ponte laterale alla vasca, è stata posizionata la macchina fotografica allo scopo di acquisire immagini rappresentative delle condizioni della mantellata all'inizio e alla fine di ogni prova; le immagini ottenute sono state opportunamente calibrate utilizzando un calibro dalla geometria nota posizionato sulla mantellata.

Per ogni condizione del moto ondoso realizzata, è stata compilata una scheda di osservazione in cui vengono inserite le considerazioni relative ai fenomeni osservati durante gli esperimenti (Figura 4.30).

Dette schede sono allegate alla presente relazione.



**CONDUZIONE DI PROVE SU MODELLO FISICO
PER VALUTARE LA STABILITÀ DELLA MANTELLATA DELLA DIGA FORANEA
DELLO SCALO GALERA SITO NEL COMUNE DI MALFA, ISOLA DI SALINA**

Scheda dell'esperimento

• Data: ___/___/___ Test: _____
• Prova condotta da: _____

• **FASE PRELIMINARE:**

- Taratura sonde;
- Posizionamento sonde;
- Chiusura valvola di scarico;
- Riempimento vasca h=_____cm;
- Valutazione distanza sonde $\Delta=17$ cm;
- Posizionamento telecamera;
- Posizionamento della fotocamera;
- Posizionamento laser;

SONDE	+6 cm	0 cm	-6 cm
sonda 1 (CH2)	_____V	_____V	_____V
sonda 2 (CH0)	_____V	_____V	_____V
sonda 3 (CH1)	_____V	_____V	_____V

• **FASE DI ACQUISIZIONE: (da ripetere per ogni tipo di onda generata)**

Onda da raggiungere $H=_____m$;
Offset (DC) = _____;
 $u=_____m/s$;
Fetch= _____m;
Tempo di Acquisizione (n° 3 sonde fisse): _____;

• **FENOMENI OSSERVATI:**

- > RIFLESSIONE
 - $K_r = _____$;
 - $H_i = _____m$;
 - $H_r = _____m$;
- > PORTATA DI OVERTOPPING
 - VERIFICATA SI NO
 - MISURATA SI NO
 - VALORE: _____l;
 - LARGHEZZA SCIVOLO: _____m;

Acquisizione filmato; Acquisizione foto; Laser;

OSSERVAZIONI:

Figura 4.30 Scheda di osservazione tipo degli esperimenti condotti con onde irregolari.

Per la generazione del moto ondoso, è stata collegata la scheda di acquisizione National Instruments al battitore spento mediante cavo coassiale RG-59 e successivamente è stato lanciato il programma *jwg.exe* appositamente realizzato per la generazione di onde

irregolari. Quindi è stata avviata la procedura di accensione del battitore e, una volta completata, sono state chiuse le valvole di scarico della vasca.

Al fine di generare il moto ondoso, il programma *jwg.exe* richiede l'inserimento di parametri quali l'offset di lavoro ($DC=0.13$), la scala geometrica, il fetch e la velocità del vento; inoltre ciascuna condizione di moto ondoso è stata generata per una durata pari ad almeno 1000 cicli, corrispondente ad una durata della prova minima pari a 22 minuti.

Una volta raggiunta la durata complessiva della prova, è stata bloccata la generazione della serie di onde e contemporaneamente la registrazione del filmato. Sono state effettuate le foto al buio in modo da poter visualizzare la lama di luce laser ed è stata effettuata la misura della portata trascinata durante la prova.

L'acquisizione dei dati è avvenuta direttamente tramite il programma *jwg.exe*, con il salvataggio su file dei risultati registrati dalla scheda input/output digitale.

Alla fine di ogni esperimento è stata avviata la procedura di spegnimento del battitore, riposizionando la paratoia in condizione di riposo e svuotando completamente la vasca.

5 Esperimenti condotti

5.1 Generalità

Per il presente studio è stato realizzato un modello fisico rappresentativo della diga foranea dello Scalo Galera, nel porto di Malfa, allo scopo di valutare la stabilità del piede nelle quattro diverse configurazioni descritte al capitolo precedente.

Nello specifico, sono state effettuate delle prove sperimentali in presenza di onde irregolari allo scopo di esaminare il comportamento dell'intera struttura soggetta ad onde aventi altezza d'onda significativa pari all'80% e al 100% dell'altezza d'onda di progetto.

Nei paragrafi seguenti vengono descritti gli esperimenti effettuati relativi alle quattro differenti configurazioni analizzate; ognuna di queste è stata sottoposta a tre o quattro condizioni di moto ondoso di cui la prima rappresentata dallo "shake-down test". Per ogni condizione, è stata quindi effettuata un'analisi di stabilità mediante la stima dei danni subiti dalla mantellata e dal piede della struttura.

Inoltre, sono stati determinati anche i valori del coefficiente di riflessione in prossimità della struttura e l'entità della portata tracimata.

5.2 Prove effettuate

Nell'ambito del presente studio le prove sono state effettuate sulla base delle condizioni di moto ondoso precedentemente utilizzate in fase di prova su modello fisico della diga foranea di Scalo Galera dalla Sogreah.

La Tabella 5.I riassume le caratteristiche principali del moto ondoso target simulato durante le prove di laboratorio. Si noti come i valori di altezza significativa a scala di prototipo e a scala di modello facciano riferimento in termini percentuali a quelli di progetto

($H_s=8.15\text{m}$ a scala di prototipo) caratterizzati da un tempo di ritorno pari a 30 anni.

Si precisa che per quanto concerne il periodo di picco, esso è stato assunto pressoché costante in tutte le prove e pari a quello di progetto ($T_p=11.65\text{s}$, a scala di prototipo).

Tabella 5.I Caratteristiche del moto ondoso simulato durante le prove di laboratorio fornite dalla Sogreah.

	Prototipo		Modello	
	H_s [m]	T_p [s]	H_s [m]	T_p [s]
40%	3.26	11.65	0.04	1.30
80%	6.52	11.65	0.08	1.30
100%	8.15	11.65	0.10	1.30
120%	9.78	11.65	0.12	1.30

In particolare, le condizioni di moto ondoso caratterizzate da un'altezza d'onda pari al 40% di quella di progetto sono state utilizzate per effettuare lo "shake down test", mentre le altre tre condizioni, caratterizzate da un'altezza d'onda pari all'80% e al 100% dell'onda di progetto, sono rappresentative delle prove di valutazione di stabilità dell'opera.

La Tabella 5.II riporta l'elenco delle prove effettuate in laboratorio nell'ambito della presente indagine sperimentale, con una denominazione sintetica della prova e una breve descrizione delle stesse in modo da rendere agevole l'interpretazione delle tabelle successive. Alla terza configurazione appartengono due gruppi di esperimenti in quanto durante gli stessi si sono osservati dei cedimenti dell'intera mantellata probabilmente dovuti ad alcuni elementi di incertezza nel posizionamento dei massi tipo Accropodi, pertanto si è deciso di ricostruire l'intera barriera e ripetere le prove.

Inoltre, solo nel caso della quarta configurazione, è stato possibile effettuare la prova sollecitando la struttura con un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 120% dell'onda di

progetto, in quanto la struttura era riuscita a resistere all'attacco del moto ondoso di progetto.

Tabella 5.II Descrizione delle prove condotte presso il laboratorio di Idraulica del DICA.

	Prova	Descrizione
Configurazione 1 Masso al piede tipo Accropodi	A_1	Shake down test; altezza onda pari al 40% dell'onda di progetto
	A_2	altezza onda pari all'80% dell'onda di progetto
	A_3	altezza onda pari al 100% dell'onda di progetto
Configurazione 2 Masso al piede con lato inclinato in direzione dell'onda	M_1	Shake down test; altezza onda pari al 40% dell'onda di progetto
	M_2	altezza onda pari all'80% dell'onda di progetto
	M_3	altezza onda pari al 100% dell'onda di progetto
Configurazione 3 Masso al piede con lato inclinato in direzione della mantellata	MS_1	Shake down test; altezza onda pari al 40% dell'onda di progetto
	MS_2	Masso al piede tipo Accropodi; altezza onda pari all'80% dell'onda di progetto
	MS_3	Masso al piede tipo Accropodi; altezza onda pari al 100% dell'onda di progetto
	MS1_1	Shake down test; altezza onda pari al 40% dell'onda di progetto
	MS2_2	Masso al piede tipo Accropodi; altezza onda pari all'80% dell'onda di progetto
	MS3_3	Masso al piede tipo Accropodi; altezza onda pari al 100% dell'onda di progetto
Configurazione 4 Berma al piede	B_1	Shake down test; altezza onda pari al 40% dell'onda di progetto
	B_2	altezza onda pari all'80% dell'onda di progetto
	B_3	altezza onda pari al 100% dell'onda di progetto
	B_4	altezza onda pari al 120% dell'onda di progetto

5.3 Condizioni idrodinamiche

Come descritto nel capitolo precedente, le prove sono state condotte in riferimento a quattro differenti configurazioni della protezione al piede della barriera; la Tabella 5.III riporta l'elenco delle

prove eseguite ed i parametri di controllo ad esse associati quali l'offset del battitore (DC), il fattore di scala (NL), la velocità del vento (u) e il fetch.

Tabella 5.III Parametri di controllo idrodinamici delle prove condotte in laboratorio.

	Prova	Offset (DC)	N_L	u [m/s]	Fetch [m]
Configurazione 1	A_1	0.13	80	2.53	200000
	A_2	0.13	80	7.56	300000
	A_3	0.13	80	11.45	300000
Configurazione 2	M_1	0.13	80	2.53	200000
	M_2	0.13	80	7.56	300000
	M_3	0.13	80	11.45	300000
Configurazione 3	MS_1	0.13	80	2.53	200000
	MS_2	0.13	80	7.56	300000
	MS_3	0.13	80	11.45	300000
	MS1_1	0.13	80	2.53	200000
	MS2_2	0.13	80	7.56	300000
	MS3_3	0.13	80	11.45	300000
Configurazione 4	B_1	0.13	80	2.53	200000
	B_2	0.13	80	7.56	300000
	B_3	0.13	80	11.45	300000
	B_4	0.13	80	15.34	300000

La Tabella 5.IV riporta invece i valori caratteristici del moto ondoso misurato in vasca durante gli esperimenti registrati dalle tre sonde di acquisizione. Si precisa che tali dati sono stati successivamente analizzati mediante il metodo delle sonde di Goda e Suzuki (1976) al

fine di determinare i coefficienti di riflessione e le altezze d'onda incidenti e riflesse, riportati in Tabella 5.IX.

Come si noterà detti valori sono simili a quelli considerati con target (vedere Tabella 5.I) della presente sperimentazione. Occorre tuttavia osservare che, a causa di limiti dell'apparato sperimentale i valori del periodo del moto ondoso sono generalmente minori rispetto a quelli target.

Tabella 5.IV Valori caratteristici del moto ondoso registrati durante gli esperimenti tramite le sonde di acquisizione.

		Modello				Prototipo			
	Prova	H _{1,SONDA1} [m]	H _{2,SONDA2} [m]	H _{3,SONDA3} [m]	T _m [s]	H _{1,SONDA1} [m]	H _{2,SONDA2} [m]	H _{3,SONDA3} [m]	T _m [s]
Configurazione 1	A_1	0.015	0.026	0.019	1.076	1.198	2.075	1.522	9.624
	A_2	0.067	0.055	0.056	0.897	5.385	4.412	4.458	8.027
	A_3	0.072	0.087	0.073	1.001	5.762	6.930	5.831	8.956
Configurazione 2	M_1	0.017	0.017	0.018	0.597	1.349	1.373	1.408	5.336
	M_2	0.056	0.053	0.054	0.890	4.503	4.269	4.301	7.959
	M_3	0.074	0.069	0.072	0.982	5.898	5.520	5.751	8.784
Configurazione 3	MS_1	0.016	0.017	0.016	0.684	1.297	1.358	1.306	6.116
	MS_2	0.056	0.055	0.056	0.889	4.501	4.388	4.475	7.950
	MS_3	0.068	0.069	0.066	1.005	5.452	5.499	5.296	8.987
	MS1_1	0.016	0.017	0.018	0.603	1.284	1.369	1.402	5.397
	MS2_2	0.056	0.056	0.056	0.905	4.496	4.456	4.460	8.092
	MS3_3	0.072	0.068	0.070	0.992	5.798	5.462	5.620	8.877
Configurazione 4	B_1	0.017	0.017	0.018	0.600	1.354	1.387	1.421	5.369
	B_2	0.056	0.054	0.055	0.882	4.488	4.297	4.376	7.893
	B_3	0.072	0.071	0.072	1.001	5.767	5.640	5.735	8.952
	B_4	0.071	0.077	0.076	1.169	5.652	6.126	6.087	10.455

5.4 Sintesi degli esperimenti condotti

Di seguito si riportano le descrizioni sintetiche degli esperimenti condotti in laboratorio per le quattro configurazioni analizzate, redatte sulla base delle osservazioni registrate sulle schede di prova durante gli esperimenti stessi e dal post-processing dei filmati delle prove.

CONFIGURAZIONE 1

Prova A_1. $H_s=0.04$ m; $T_m=1.07$ s; $T_R=30$ anni.

Shake down test. La prova è durata 22 minuti. Il moto ondoso è caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 40% dell'onda di progetto al fine di stabilizzare l'intera struttura prima delle prove successive. Non sono stati osservati spostamenti né degli elementi della mantellata, né dei massi al piede tipo Accropodi. Non sono stati osservati fenomeni di *overtopping*.

Prova A_2. $H_s=0.08$ m; $T_m=0.88$ s; $T_R=30$ anni.

La barriera è stata sottoposta ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari all'80% dell'onda di progetto per la durata di 22 minuti. Lievi danni alle parti laterali (non all'interno dell'area di misura) della barriera dovuti al fatto che la mantellata non ricopriva interamente il filtro. È stato osservato un piccolo spostamento di un solo masso al piede tipo Accropodi posizionato centralmente. La portata di tracimazione rilevata è stata pari a 0.0022 l/sm a scala di modello (pari a 1.54 l/sm a scala di prototipo).

Prova A_3. $H_s=0.10$ m; $T_m=1.00$ s; $T_R=30$ anni.

La barriera è stata sottoposta ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 100% dell'onda di progetto per la durata di 22 minuti. Poiché il moto ondoso riprodotto risulta più gravoso, i massi in marmo, utilizzati per ricoprire le zone laterali del filtro,

hanno subito notevoli spostamenti. Inoltre, si è osservato che il masso al piede tipo Accropodi che nella prova A_2 aveva subito un piccolo spostamento, si è allontanato notevolmente dalla sua posizione iniziale. La portata di tracimazione rilevata è stata pari a 0.027 l/sm a scala di modello (pari a 18.97 l/sm a scala di prototipo).

CONFIGURAZIONE 2

Prova M_1. $H_s=0.04$ m; $T_m=0.59$ s; $T_R=30$ anni.

Shake down test. La prova è durata 22 minuti. Il moto ondoso è caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 40% dell'onda di progetto al fine di stabilizzare l'intera struttura prima delle prove successive. Non sono stati osservati spostamenti né degli elementi della mantellata, né dei massi posti al piede; non sono stati osservati fenomeni di tracimazione.

Prova M_2. $H_s=0.08$ m; $T_m=0.89$ s; $T_R=30$ anni.

La barriera è stata sottoposta ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari all'80% dell'onda di progetto per la durata di 22 minuti. Non sono stati rilevati né spostamenti della mantellata né dei massi posizionati al piede della barriera. La portata di tracimazione rilevata è stata pari a 0.0023 l/sm a scala di modello (pari a 1.64 l/sm a scala di prototipo).

Prova M_3. $H_s=0.10$ m; $T_m=0.98$ s; $T_R=30$ anni.

La barriera è stata sottoposta ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 100% dell'onda di progetto per la durata di 22 minuti. Alla fine della prova tutti i massi al piede hanno subito notevoli spostamenti, alcuni sono risultati soggetti anche a ribaltamento. Un solo Accropodo appartenente alla fila immediatamente sopra i massi al piede si è spostato. La portata di

tracimazione rilevata risulta elevata e pari a 0.020 l/sm a scala di modello (pari a 19.04 l/sm a scala di prototipo).

CONFIGURAZIONE 3

Prova MS_1. $H_s=0.04$ m; $T_m=0.68$ s; $T_R=30$ anni.

Shake down test. La prova è durata 22 minuti. Il moto ondoso è caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 40% dell'onda di progetto al fine di stabilizzare l'intera struttura prima delle prove successive. Non sono stati osservati spostamenti né degli elementi della mantellata, né dei massi posti al piede; non sono stati osservati fenomeni di tracimazione.

Prova MS_2. $H_s=0.08$ m; $T_m=0.89$ s; $T_R=30$ anni.

La barriera è stata sottoposta ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari all'80% dell'onda di progetto per la durata di 22 minuti. Sono stati rilevati spostamenti della mantellata e conseguentemente dei massi posizionati al piede della barriera; probabilmente la causa è da imputare ad un errato posizionamento di alcuni elementi della mantellata durante la fase di costruzione. La portata di tracimazione rilevata è stata pari a 0.003 l/sm a scala di modello (pari a 2.38 l/sm a scala di prototipo).

Prova MS_3. $H_s=0.10$ m; $T_m=1.00$ s; $T_R=30$ anni.

La barriera è stata sottoposta ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 100% dell'onda di progetto per la durata di 22 minuti. La barriera, già soggetta a cedimenti nella prova precedente, ha riportato ulteriori danni dovuti sia a spostamenti di Accropodi appartenenti alla mantellata che dei massi al piede. La portata di tracimazione rilevata è stata pari a 0.007 l/sm a scala di modello (pari a 4.71 l/sm a scala di prototipo).

Prova MS1_1. $H_s=0.04$ m; $T_m=0.60$ s; $T_R=30$ anni.

Shake down test. La prova è durata 22 minuti. Il moto ondoso è caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 40% dell'onda di progetto al fine di stabilizzare l'intera struttura prima delle prove successive. Non sono stati osservati spostamenti né degli elementi della mantellata, né dei massi posti al piede; non sono stati osservati fenomeni di tracimazione.

Prova MS2_2. $H_s=0.08$ m; $T_m=0.90$ s; $T_R=30$ anni.

La barriera è stata sottoposta ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari all'80% dell'onda di progetto per la durata di 22 minuti. Non sono stati rilevati né spostamenti della mantellata né dei massi posizionati al piede della barriera. Nel complesso la barriera risultata stabile. La portata di tracimazione rilevata è stata pari a 0.0024 l/sm a scala di modello (pari a 1.75 l/sm a scala di prototipo).

Prova MS3_3. $H_s=0.10$ m; $T_m=0.99$ s; $T_R=30$ anni.

La barriera è stata sottoposta ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 100% dell'onda di progetto per la durata di 22 minuti. Dopo pochi minuti dall'inizio della prova nella parte laterale della barriera si è osservato uno spostamento contemporaneo di alcuni massi tipo Accropodi appartenenti alla mantellata che ha generato l'esposizione dello strato di filtro. Si è osservato successivamente un cedimento simultaneo di tutta la mantellata con conseguente scivolamento dei massi posti al piede. La portata di tracimazione rilevata è stata pari a 0.023 l/sm a scala di modello (pari a 16.37 l/sm a scala di prototipo).

CONFIGURAZIONE 4

Prova B_1. $H_s=0.04$ m; $T_m=0.60$ s; $T_R=30$ anni.

Shake down test. La prova è durata 22 minuti. Il moto ondoso è caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 40% dell'onda di progetto al fine di stabilizzare l'intera struttura prima delle prove successive. Non sono stati osservati spostamenti né degli elementi della mantellata, né della berma al piede; non sono stati osservati fenomeni di tracimazione.

Prova B_2. $H_s=0.08$ m; $T_m=0.88$ s; $T_R=30$ anni.

La barriera è stata sottoposta ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari all'80% dell'onda di progetto per la durata di 22 minuti. Non è stato rilevato alcun spostamento degli Accropodi costituenti la mantellata; si sono osservati minimi spostamenti di alcuni massi appartenenti alla berma al piede. La portata di tracimazione rilevata è stata pari a 0.002 l/sm a scala di modello (pari a 1.23 l/sm a scala di prototipo).

Prova B_3. $H_s=0.10$ m; $T_m=1.00$ s; $T_R=30$ anni.

La barriera è stata sottoposta ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 100% dell'onda di progetto per la durata di 22 minuti. Non è stato rilevato alcun spostamento degli Accropodi costituenti la mantellata; si sono osservati ulteriori piccoli spostamenti di alcuni massi appartenenti alla berma al piede. La portata di tracimazione rilevata è stata pari a 0.017 l/sm a scala di modello (pari a 12.23 l/sm a scala di prototipo).

Prova B_4. $H_s=0.12$ m; $T_m=1.17$ s; $T_R=30$ anni.

La barriera è stata sottoposta ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda pari al 120% dell'onda di progetto per la durata di 22 minuti. È stato rilevato lo spostamento di un Accropodo

appartenente alla prima fila della mantellata nella zona centrale e di due Accropodi nella parte laterale sinistra; il primo probabilmente dovuto ad un abbassamento della cresta della berma a seguito dell'azione del moto ondoso. Si sono osservati ulteriori piccoli spostamenti di massi appartenenti alla berma. La portata di trascinamento rilevata è stata pari a 0.033 l/sm a scala di modello (pari a 23.77 l/sm a scala di prototipo).

5.5 Stima del danno

Dall'analisi delle immagini della mantellata è stato possibile valutare il danno subito dopo ogni prova nelle diverse condizioni di moto ondoso riprodotte in laboratorio relative alle quattro configurazioni prese in esame.

Di seguito si riporta il procedimento utilizzato per la valutazione del danno.

Inizialmente sono state analizzate le immagini della condizione della mantellata prima e dopo ciascuna prova; è stato così possibile individuare le coordinate dei centri di massa dei massi tipo Accropodi e dei massi al piede della mantellata (in funzione delle diverse configurazioni analizzate). Note le coordinate dei centri di massa è stato possibile valutare lo spostamento s dei singoli elementi.

Successivamente sono state definite due classi relative all'entità dello spostamento s rispetto il diametro nominali D_N dei massi:

- I CLASSE: $0.5D_N < s < D_N$;
- II CLASSE: $s > D_N$.

Nel caso di Accropodi il D_N è stato assunto pari a $0.7H_{ACCR}$ (van der Meer, 1988b); nel caso del masso trapezoidale di protezione al piede si assume il D_N pari ad un valore medio tra l'altezza e la larghezza della base del masso stesso.

Infine è stato determinato il valore della percentuale di danno in funzione sia dei massi soggetti a spostamento su tutta la mantellata (N_d) che dei massi spostati all'interno di una striscia della mantellata (N_{od}).

La stima del danno è stata effettuata per tutte le prove ad eccezione delle prove di shake down in cui, come si evidenziato nel paragrafo precedente, non viene rilevato alcun danno alla struttura.

A titolo esemplificativo si riportano le immagini e i risultati ottenuti relativi ad una delle prove effettuate. I risultati relativi a tutte le prove sono riportati nelle Tavole 6 -10.

In particolare, in Figura 5.1 si riportano le immagini del modello prima e dopo l'esperimento condotto in laboratorio.

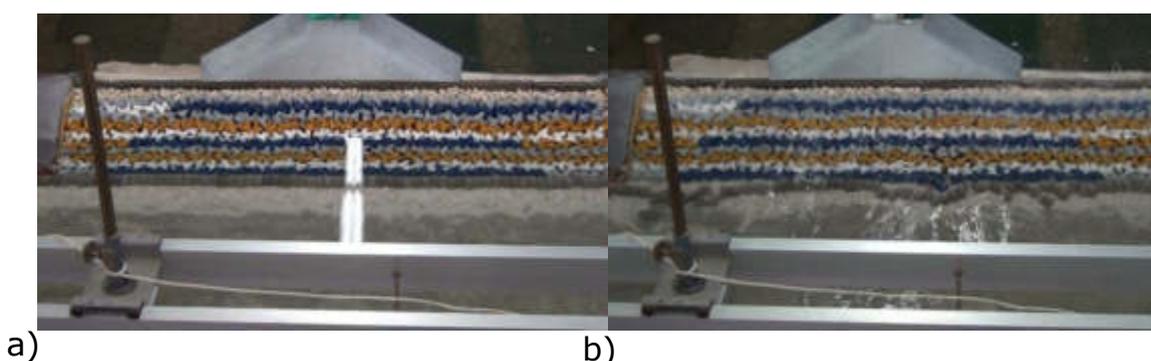
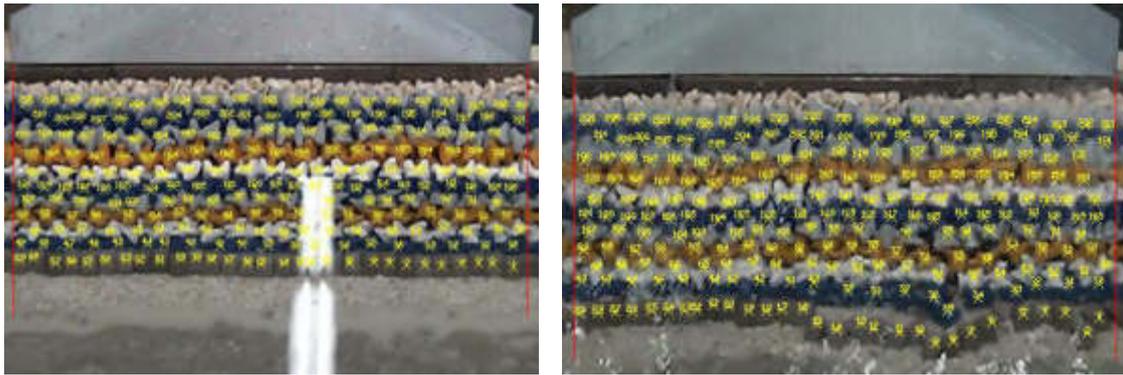


Figura 5.1 Prova M_3 ($T_p = 11.65$ s, $H_s = 100\%$ $H_{sp} = 8.15$ m): a) condizione della struttura prima della simulazione del moto ondoso; b) condizione finale della struttura alla fine della prova.

La Figura 5.2 mostra come attraverso l'analisi delle suddette immagini è stato possibile localizzare all'interno dell'area di misura (ubicata al centro della vasca e larga 1m) i centri di massa di ogni elemento appartenente alla barriera, massi al piede e Accropodi, ottenendo le relative coordinate.



a) **Figura 5.2** Individuazione dei centri di massa sia dei massi al piede che degli Accropodi e valutazione. Si noti che le linee rosse delimitano l'area di misura. a) condizione della struttura prima della simulazione del moto ondoso per la prova (prova M_3:Masso al piede con lato inclinato in direzione dell'onda); b) condizione finale della struttura alla fine della prova (prova M_3:Masso al piede con lato inclinato in direzione dell'onda);.

La Figura 5.3 mostra gli spostamenti complessivamente subiti dai massi alla fine dell'esperimento rispetto alla condizione iniziale. Nella Tabella 5.V si riportano le stime del danno parziale e cumulato misurato al piede della mantellata. Si precisa che, a causa della ridotta dimensione degli scogli naturali costituenti la berma del piede nella configurazione 4, non è stato possibile quantificare gli spostamenti dei massi. Mentre nella Tabella 5.VI e nella Tabella 5.VII si riportano le stime del danno parziale e cumulato subito dai massi della mantellata mediante i parametri N_d e N_{od} , rispettivamente per spostamenti compresi tra $0.5DN$ e DN e spostamenti maggiori del DN .

Dette tabelle riportano inoltre la classificazione del danno subito dalla mantellata sulla base della normativa inglese B56349 "Maritime structures – Part 7. Guide to the design and construction of breakwaters".

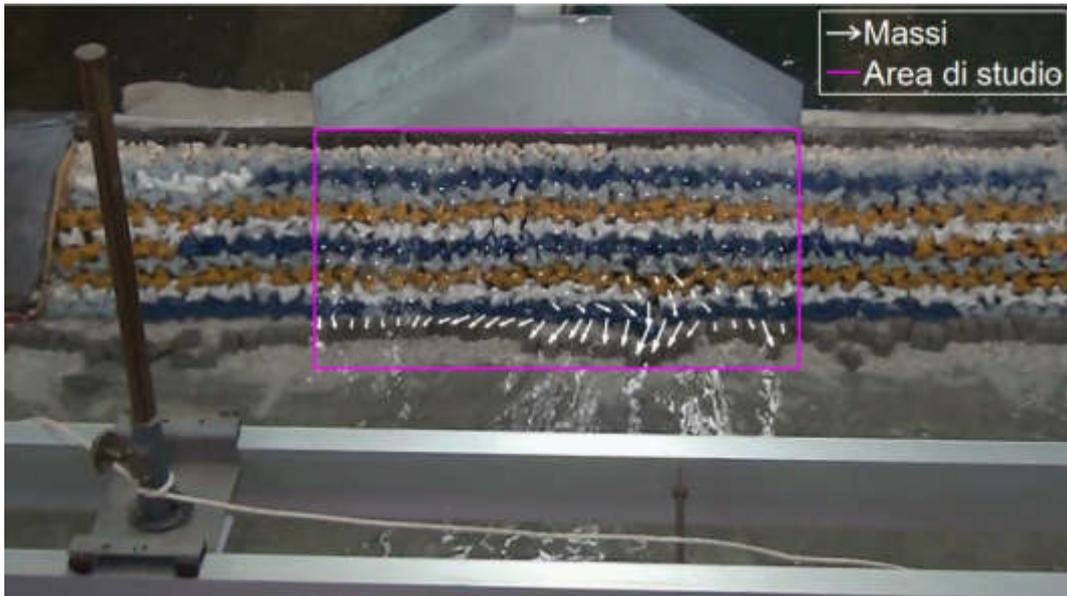


Figura 5.3 Traiettoria dei centri massa alla fine della prova (prova M_3:Masso al piede con lato inclinato in direzione dell'onda).

Tabella 5.V Valutazione del danno parziale e cumulato misurato al piede della mantellata.

Configurazione	Prova	Percentuale di massi al piede movimentati			
		0.5 $D_N < s < D_N$		$s > D_N$	
		Parziale	Cumulato	Parziale	Cumulato
1	A_1	0.00	0.00	0.00	0.00
1	A_2	0.00	0.00	0.00	0.00
1	A_3	0.00	0.00	5.00	5.00
2	M_1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	M_2	0.00	0.00	0.00	0.00
2	M_3	37.93	37.93	48.28	48.28
3	MS_1	0.00	0.00	0.00	0.00
3	MS_2	41.38	41.38	24.14	24.14
3	MS_3	17.24	58.62	72.41	96.55
3	MS1_1	0.00	0.00	0.00	0.00
3	MS2_2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	MS3_3	12.50	12.50	6.3	6.3

Tabella 5.VI Valutazione del danno parziale e cumulato subito dai massi della mantellata mediante i parametri N_d e N_{od} , per spostamenti compresi tra $0.5D_N$ e D_N .

Configurazione	Prova	Danno mantellata				Classificazione Normativa BS 6349
		N_d		N_{od}		
		Parziale	Cumulato	Parziale	Cumulato	
1	A_1	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
1	A_2	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
1	A_3	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
2	M_1	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
2	M_2	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
2	M_3	3.47	3.47	0.23	0.23	<i>Piccola</i>
3	MS_1	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
3	MS_2	9.19	9.19	0.55	0.55	<i>Piccola</i>
3	MS_3	10.81	20.00	0.64	1.19	<i>Piccola</i>
3	MS1_1	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
3	MS2_2	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
3	MS3_3	19.30	19.30	1.1	1.1	<i>Piccola</i>
4	B_1	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
4	B_2	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
4	B_3	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
4	B_4	0.50	0.50	0.03	0.03	<i>Piccola</i>

Tabella 5.VII Valutazione del danno subito dai massi della mantellata mediante i parametri N_d e N_{od} , per spostamenti maggiori di D_N .

		Danno mantellata				Classificazione Normativa BS 6349
Configurazione	Prova	N_d		N_{od}		
		Parziale	Cumulato	Parziale	Cumulato	
1	A_1	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
1	A_2	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
1	A_3	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
2	M_1	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
2	M_2	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
2	M_3	1.00	1.00	0.1	0.1	<i>Nulla</i>
3	MS_1	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
3	MS_2	27.57	27.57	1.64	1.64	<i>Elevata</i>
3	MS_3	10.81	38.38	0.64	2.28	<i>Elevata</i>
3	MS1_1	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
3	MS2_2	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
3	MS3_3	11.40	11.40	0.60	0.60	<i>Elevata</i>
4	B_1	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
4	B_2	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
4	B_3	0.00	0.00	0.00	0.00	<i>Nulla</i>
4	B_4	0.50	0.50	0.03	0.03	<i>Piccola</i>

5.6 Stima della tracimazione

Durante le prove in laboratorio è stato possibile stimare la portata media tracimata a tergo della barriera tramite uno scivolo in grado di convogliarla verso un recipiente e di un boccale graduato per la quantificazione. La Tabella 5.VIII riassume i risultati ottenuti dalle prove effettuate in laboratorio in relazione alle quattro configurazioni analizzate. In particolare, la tabella riporta i valori delle portate tracimate sia a scala di modello che a scala di prototipo. Si rilevano valori di portata tracimata compresi tra 14l/sm e 24l/sm; confrontando i risultati ottenuti con i limiti suggeriti dal U.S. Army Corps of Engineers (2002), riportati nella Tabella 2.IV, si può concludere che i valori di portata tracimata sono generalmente non preoccupanti per la sicurezza della struttura, ma comunque non trascurabili per quanto riguarda la sicurezza per la circolazione dei mezzi.

Tabella 5.VIII Valori di portata media di tracimata misurate in laboratorio.

Configurazione	Prova	Modello	Prototipo
		Q_{trac} [l/sm]	Q_{trac} [l/sm]
1	A_1	0.00	0.00
1	A_2	0.002	1.539
1	A_3	0.027	18.97
2	M_1	0.00	0.00
2	M_2	0.002	1.64
2	M_3	0.020	14.09
3	MS_1	0.00	0.00
3	MS_2	0.0033	2.38
3	MS_3	0.007	4.72
3	MS1_1	0.00	0.00
3	MS2_2	0.002	1.54
3	MS3_3	0.023	16.37
4	B_1	0.00	0.00
4	B_2	0.002	1.23
4	B_3	0.017	12.23
4	B_4	0.033	23.77

5.7 Stima della riflessione

Durante le prove, attraverso le sonde posizionate in prossimità della barriera (sonda 2 e sonda 3), sono state valutate anche le altezze d'onda incidente e riflessa e i relativi coefficienti di riflessione valutati come rapporto tra le due altezze d'onda anzi dette.

La Tabella 6.IX riporta i valori delle altezze d'onda incidente e riflessa relativi alle quattro configurazioni riprodotte in laboratorio e i corrispondenti coefficienti di riflessione.

Tabella 5.IX Valori di altezza d'onda incidente e riflessa e dei coefficienti di riflessione misurati in laboratorio con il metodo delle due sonde di Goda e Suzuki (1976).

Configurazione	Prova	Modello			Prototipo		
		H _i [m]	H _r [m]	K _r	H _i [m]	H _r [m]	K _r
1	A_1	0.028	0.011	0.403	2.239	0.901	0.403
1	A_2	0.089	0.023	0.258	7.088	1.828	0.258
1	A_3	0.114	0.031	0.273	9.087	2.485	0.273
2	M_1	0.023	0.007	0.285	1.857	0.529	0.285
2	M_2	0.076	0.020	0.265	6.095	1.614	0.265
2	M_3	0.100	0.028	0.281	7.998	2.250	0.281
3	MS_1	0.021	0.005	0.258	1.684	0.434	0.258
3	MS_2	0.078	0.017	0.229	6.247	1.429	0.229
3	MS_3	0.094	0.023	0.249	7.556	1.884	0.249
3	MS1_1	0.023	0.007	0.309	1.869	0.578	0.309
3	MS2_2	0.077	0.019	0.246	6.158	1.514	0.246
3	MS3_3	0.096	0.027	0.278	7.707	2.144	0.278
4	B_1	0.024	0.007	0.309	1.895	0.586	0.309
4	B_2	0.076	0.018	0.241	6.097	1.472	0.241
4	B_3	0.098	0.026	0.262	7.828	2.049	0.262
4	B_4	0.100	0.031	0.310	8.038	2.491	0.310

Dai risultati riportati in tabella si può osservare come il fenomeno della riflessione si intensifichi all'aumentare dell'altezza d'onda simulata durante le prove, anche se i valori del coefficiente di riflessione si mantengono comunque al di sotto di 0.5.

6 Analisi dei risultati e conclusioni

Nell'ambito della convenzione tra il Dipartimento Regionale delle Infrastrutture, della Mobilità e dei Trasporti e il DICA è stata condotta la presente indagine sperimentale che ha avuto come obiettivo quello di fornire indicazioni utili per l'ottimizzazione della geometria della diga foranea dello Scalo Galera del Comune di Malfa, dell'isola di Salina. In particolare, il presente lavoro è stato rivolto allo studio di quattro diverse configurazioni della sezione corrente del molo foraneo (una in più rispetto alle tre previste in convenzione) al fine di individuare tra di esse la configurazione che determina una maggiore stabilità della mantellata. Tutte le configurazioni testate sono state concordate con il Responsabile Scientifico per il Committente, Ing. Francesco Giordano, in alcuni casi anche modificando le configurazioni inizialmente richieste.

A distinguere dette configurazioni è la differente geometria della struttura di sostegno al piede della mantellata. In particolare la mantellata è sorretta: (i) nel primo caso da due file di Accropodi (configurazione 1); (ii) nel secondo da una fila di massi trapezoidali in calcestruzzo da 50t con la scarpa rivolta lato mare e da una fila di Accropodi (configurazione 2), (iii) nel terzo da una fila di massi trapezoidali in calcestruzzo da 50t con la scarpa a sostegno del piede (configurazione 3); (iv) infine nel quarto da una berma in massi naturali di IV categoria.

La campagna sperimentale è stata condotta presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Catania, dove è presente una vasca di lunghezza pari a 18 m, una larghezza pari a 3.60m e un'altezza di 1.20m dotata di ondogeno. In virtù delle caratteristiche di esposizione del paraggio

è stato possibile effettuare una modellazione bidimensionale della struttura.

All'interno della vasca, ai fini della corretta modellazione della propagazione del moto ondoso da largo alla riva, è stato riprodotto un profilo di spiaggia piana e inerodibile in calcestruzzo liscio avente pendenza pari all'8%, rappresentativo dei fondali antistanti lo Scalo Galera.

Il modello fisico è stato realizzato all'interno della vasca adottando una scala geometrica di riduzione pari a 1:80. La fase di realizzazione del modello in laboratorio è stata preceduta da uno studio atto a individuare le caratteristiche del materiale che meglio rappresentasse il materiale impiegato a scala di prototipo. In particolare, la riduzione in scala degli scogli naturali e dei massi artificiali è avvenuta utilizzando il metodo di Hudson, risultato generalmente più cautelativo rispetto ad altri metodi.

Per quanto concerne le condizioni idrodinamiche del moto ondoso cui sottoporre il modello fisico, si è fatto riferimento a quelle già impiegate dalla Sogreah nel 2000, riportate in Tabella 6.I.

Tabella 6.I Caratteristiche del moto ondoso, a scala di prototipo, adottate per le verifiche condotte sul modello fisico nell'ambito del presente progetto esecutivo (fonte: report Sogreah,2000).

	Tempo di ritorno [anni]			
	3	5	10	30 (progetto)
Hs [m]	3.23	4.15	5.55	8.15
Tp [s]	7.56	6.51	9.74	11.65

Le caratteristiche del moto ondoso incidente sulla struttura sono state definite in accordo con le linee guida internazionali più recenti in

materia di modellazione fisica di strutture a gettata (Frostick et al., 2011), ossia in modo tale che in una prima fase la scogliera fosse sottoposta a un test di assestamento (o test di shake-down), che simulasse il comportamento di mareggiate di lieve intensità durante la fase di costruzione della struttura stessa. Successivamente a tale fase di assestamento la struttura, nelle quattro configurazioni, è stata sottoposta all'azione di un moto ondoso avente crescente intensità, ovvero tale da simulare un profilo di mareggiata in fase crescente. In particolare, nella simulazione si sono considerate altezze d'onda pari rispettivamente al 40%, al 80% e al 100% dell'altezza d'onda di progetto, quest'ultima corrispondente a un tempo di ritorno di 30 anni. In un caso è stato possibile effettuare test considerando il 120% dell'altezza d'onda di progetto.

Durante le prove sono state effettuate riprese video ad alta risoluzione dell'area di misura collocata nella parte centrale della mantellata per una larghezza di 1m, al fine di effettuare una stima del danno anche attraverso opportune tecniche di analisi delle immagini.

Più in dettaglio, la stima del danno della mantellata esterna in Accropodi è stata condotta mediante i parametri N_d e N_{od} , che indicano rispettivamente le percentuali di massi movimentati rispetto al numero di massi totali posizionati nell'area di misura in esame e il numero di massi spostati all'interno di un'ampia striscia.

Per tutte quelle configurazioni del piede della struttura che prevedono l'uso di elementi ciclopici in calcestruzzo (e.g. Accropodi o massi trapezoidali) sono state effettuate inoltre delle stime dei movimenti di detti elementi.

Al fine di sintetizzare i risultati sperimentali relativi alle sopra citate stime di danno, nella Figura 6.1 si riporta un quadro sinottico rappresentativo del danno cumulato dal modello fisico rilevato alla fine delle prove condotte, considerando solo spostamenti maggiori del diametro nominale D_N (pari a 0.7 volte l'altezza di un Accropodo e

alla media tra la larghezza e l'altezza dell'elemento trapezoidale). In particolare, per ogni parametro di danno considerato, si riporta una scala del danno divisa in due zone, una di colore verde che indica una condizione "accettabile" e una rossa che indica, invece, una condizione "non accettabile". Più precisamente, per le sistemazioni al piede della mantellata, si è considerata una condizione "accettabile" se la percentuale di massi movimentati rispetto il numero totale di massi è inferiore al 5%; per la mantellata si considera una condizione "accettabile" se i parametri N_d e N_{od} sono inferiori rispettivamente al 5% e 0.5 (secondo i limiti definiti dal U.S. Army Corps of Engineers, 2002).

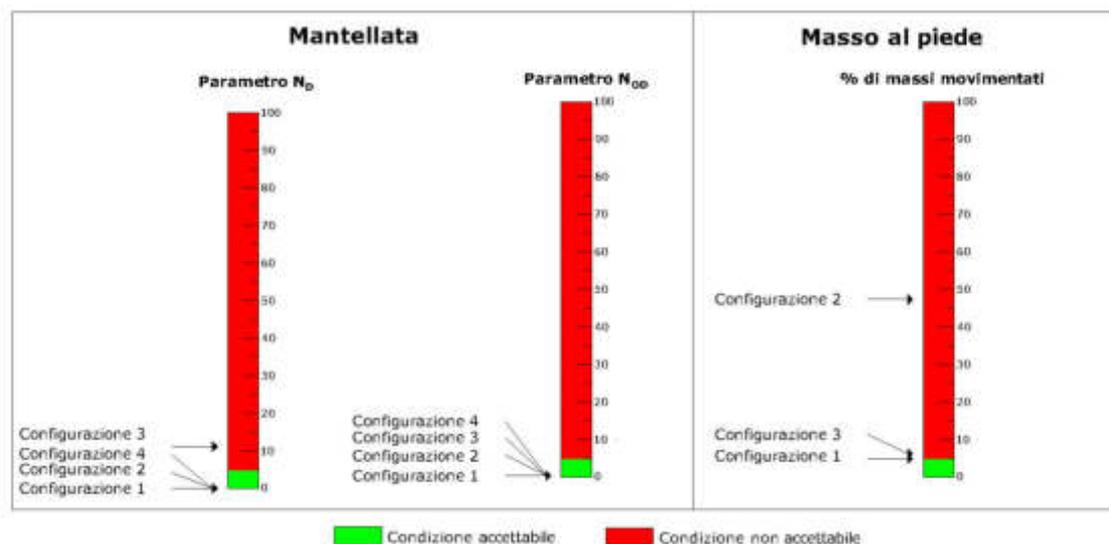


Figura 6.1 Confronto tra i livelli di danno del modello fisico per le quattro prove eseguite.

In definitiva, dalle prove effettuate emerge quanto segue. Per quanto riguarda la stabilità della mantellata, come si può vedere dal quadro sinottico in Figura 6.1, essa è maggiormente garantita nella configurazione 1 e nella configurazione 4. Tali configurazioni rispondono bene alle sollecitazioni indotte dal moto onduoso grazie all'interazione della mantellata con la sistemazione al piede della

mantella stessa. Detta interazione si esplica in maniera diversa nei due casi. Infatti, nella configurazione 1 la stabilità è principalmente garantita dalla interconnessione che si stabilisce tra gli Accropodi della mantellata e quelli costituenti il piede della mantellata stessa. La componente destabilizzante indotta dal peso della mantellata determina una spinta verso l'ultima fila di Accropodi, alla quale questi ultimi si oppongono grazie al contributo del proprio peso ma anche grazie al fatto che gli elementi sporgenti degli Accropodi tendono ad ammorsarsi nelle modeste asperità del substrato realizzato per uniformare il piano di posa.

Nella configurazione 2 e nella configurazione 3, la struttura della diga è simile a quella della configurazione 1, tuttavia le evidenze sperimentali hanno mostrato che il masso al piede non è in grado di resistere alle sollecitazioni indotte dalla mantellata in entrambe le configurazioni.

Nella configurazione 4 il carico della mantellata si scarica in maniera distribuita sugli scogli della berma. Pertanto la mantellata stessa non risente dei problemi evidenziati nelle configurazioni precedenti. La stabilità è dovuta al peso proprio della berma e a una adeguata sommersione che fa sì che la berma stessa non venga sollecitata eccessivamente dall'azione del moto ondoso.

Per quanto concerne più specificatamente la stabilità del piede della struttura, le prove su modello fisico hanno mostrato come la configurazione 1 e 4 mostrino caratteristiche di resistenza complessivamente migliori di quelle con masso ciclopico in cls trapezoidale (configurazioni 2 e 3).

Durante le prove in laboratorio, è stata condotta una stima del coefficiente di riflessione incidente K_r mediante l'applicazione del metodo di Goda e Suzuki (1976). Dall'esame dei dati si evince che il coefficiente di riflessione è contenuto nel range 23%-40%. Dalla Figura 6.2, che sintetizza le misure di K_r ottenute per tutti i test

condotti, si nota che a parità delle caratteristiche idrodinamiche del moto incidente, si hanno delle piccole variazioni tra le configurazioni di K_r (K_r si mantiene mediamente pari al 28%), dovute essenzialmente al fatto che la pendenza della mantellata risulta pressoché la stessa nei vari casi esaminati. Inoltre in tutte le prove i valori del coefficiente di riflessione si mantengono ben al di sotto del 50%.

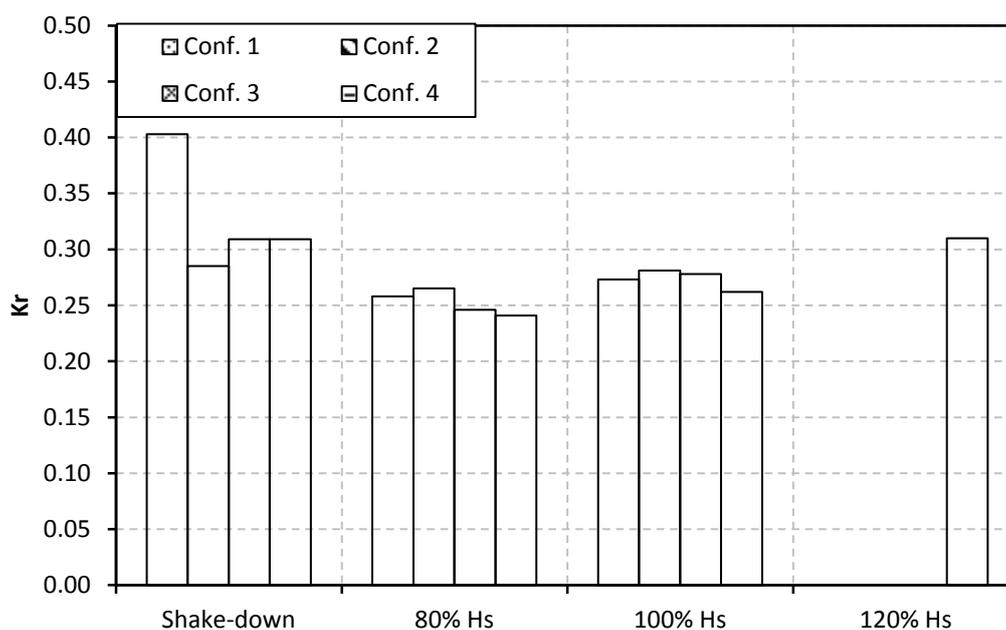


Figura 6.2 Confronto del coefficiente di riflessione ottenuto per le quattro configurazioni del modello fisico nelle varie prove.

Per quanto riguarda le portate tracimate ottenute durante le prove sulle quattro configurazioni si ottengono, con moto ondoso pari a quello di progetto, valori compresi tra 12 l/sm (configurazione 2) e 19 l/sm (configurazione 1) come si evince dai risultati in Figura 6.3. Dal confronto tra i valori ottenuti e i limiti di accettabilità suggeriti dal U.S. Army Corps of Engineers (2002) si nota che i massimi valori di portata tracimata ottenuti in corrispondenza della mareggiata con

tempo di ritorno di 30 anni, risultano non preoccupanti per la sicurezza della struttura, ma comunque non trascurabili per quanto riguarda la sicurezza per il traffico. Si sottolinea tuttavia che generalmente le misure di portata tracimata ottenute da prove fisiche su modello tendono a sottostimare la tracimazione che si realizza in campo (Eurotop Manual, 2008).

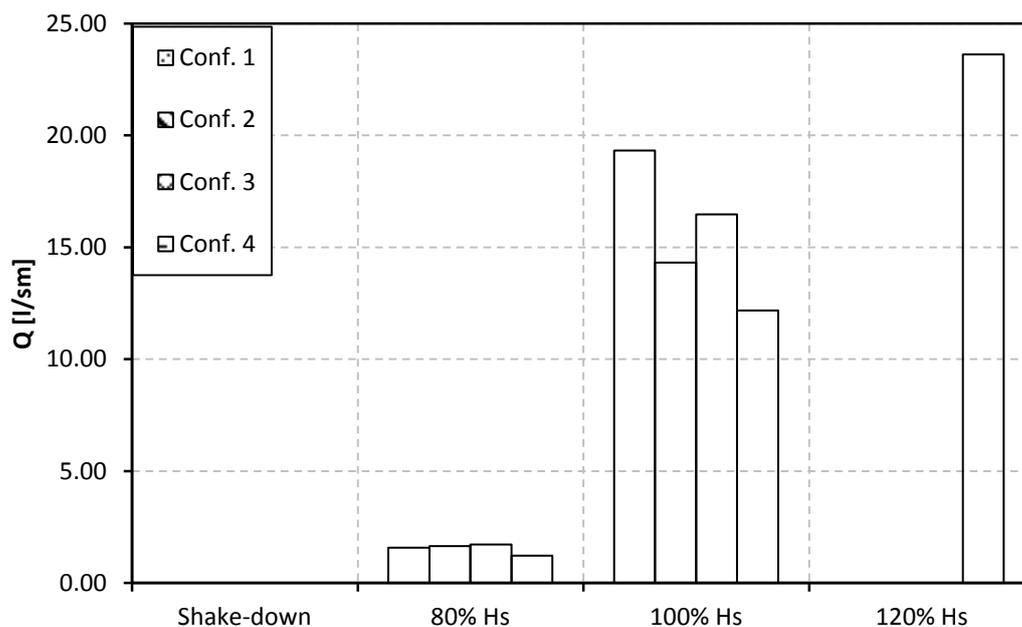


Figura 6.3 Confronto della portata tracimata ottenuta per le quattro configurazioni del modello fisico nelle varie prove.

In definitiva, l'analisi sperimentale condotta sul modello fisico della sezione corrente della diga foranea dello Scalo Galera ha permesso di individuare due configurazioni, la 1 e la 4, che garantiscono la stabilità della struttura. Dal confronto delle due configurazioni emerge che:

- la struttura della diga, a meno della mantellata e della sistemazione al piede, è pressoché uguale;

- il numero di Accropodi richiesti per la realizzazione della mantellata nella configurazione 1 è maggiore di quello richiesto per la configurazione 4;
- i tempi per la realizzazione della sistemazione al piede nella configurazione 1 sono minori rispetto alla configurazione 4;
- la stabilità della mantellata è garantita da entrambe le configurazioni;
- la tracimazione è minore nel caso della configurazione 4.

Tuttavia, appare opportuno sottolineare come nel lungo termine, la vulnerabilità della sistemazione al piede della configurazione 1 dovrebbe essere più elevata rispetto a quella della configurazione 4. Infatti, nel caso della configurazione 1 lo spostamento anche di un solo Accropodo posto al piede della mantellata (come accaduto peraltro per condizioni di moto ondoso di progetto, durante i test effettuati in laboratorio) comporterebbe un peggioramento non riparabile delle condizioni di stabilità dell'intera struttura. Invece, eventuali danneggiamenti anche significativi della berma in massi naturali potrebbero essere compensati da successivi interventi di rifioritura.

In definitiva, dal confronto tra queste due ultime configurazioni, emerge che la configurazione 4, oltre a richiedere un numero di Accropodi inferiore rispetto alla configurazione 1 e a consentire la riduzione della portata tracimata, permette soprattutto di ottenere una maggiore affidabilità della struttura nel lungo termine. Sulla base dei risultati ottenuti in laboratorio, pur considerando i limiti della sperimentazione fisica, si suggerisce pertanto l'adozione della configurazione 4 per la realizzazione della sezione tipo del molo foraneo dello Scalo Galera. Infine, ove possibile, si consiglia una maggiorazione del peso dei massi degli elementi della berma al fine di ridurre la necessità di interventi di manutenzione.

Con tutto quanto sopra riportato si ritiene si avere assolto agli obblighi del mandato ricevuto tramite convenzione.

Elenco delle Figure

Figura 1.1	Schema strutturale delle quattro sezioni verificate	6
Figura 4.1	Vasca di sperimentazione utilizzata per la modellazione fisica della diga foranea dello Scalo Galera: planimetria e sezione trasversale della configurazione originale della vasca.	45
Figura 4.2	Vasca di sperimentazione utilizzata per la modellazione fisica della diga foranea dello Scalo Galera: planimetria e sezione trasversale della vasca dopo la realizzazione della pendenza.	46
Figura 4.3	Particolare della vasca di sperimentazione, con la pendenza e il modello fisico realizzati al suo interno... ..	46
Figura 4.4	Interfaccia del software "jwg.exe" per la generazione delle onde irregolari.	49
Figura 4.5	Componenti del sistema di generazione delle onde irregolari: a) Toughbook Panasonic dotato di software di controllo "jwg.exe"; b) trasformazione del segnale digitale in segnale analogico mediante la scheda NI-9162; c) quadro di controllo; d) paratoia a ventola per la generazione del moto ondoso.	50
Figura 4.6	Sonde di livello resistive: a) sonda 1; b) sonde 2 e 3, per il rilievo del coefficiente di riflessione; c) scheda d'acquisizione scheda d'acquisizione National Instrument (NIUSB 6008).	52
Figura 4.7	Strumenti di misura ottici usati negli studi condotti in laboratorio: a) videocamera Sony modello HDR-PJ10E; b) Fotocamera Canon EOS 1000-D; c) laser a diodo (potenza 10mW); d) Fotocamera Sony DSC-HX9V 16.2 MP G Lens.	54
Figura 4.8	a) Contenitore di raccolta della portata tracimata (32x48 cm) e scivolo in acciaio per l'incanalamento dell'acqua all'interno della stessa vaschetta; b) boccale graduato (1000 ml) usato per la misura del volume d'acqua tracimato in un intervallo di tempo predefinito.	55
Figura 4.9	Schema strutturale delle quattro sezioni verificate.	57
Figura 4.10	Curva granulometrica e dimensione dei setacci usati per il materiale basaltico proveniente dalla cava "Nunziata-Bosco" (estratte dal Certificato n. 347 del 06/07/2007 emesso dal Laboratorio Prove Stradali del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Catania).....	63
Figura 4.11	Vista 3D e delle prospettive laterali dell'Accropodi.....	66

Figura 4.12	Vista 3D del masso al piede (dimensioni a scala di prototipo).	68
Figura 4.13	Realizzazione della spiaggia piana in calcestruzzo liscio (a) e del piano di posa del modello all'interno della vasca mediante una struttura in calcestruzzo(b).	70
Figura 4.14	Riempimento della struttura in calcestruzzo mediante materiale basaltico (D=20–30 mm).....	71
Figura 4.15	a) riproduzione della sezione della diga su quattro lastre di compensato; b) posizionamento delle sagome guida all'interno del piano di posa.	71
Figura 4.16	Ricoprimento del piano di posa con del geotessuto, per evitare il trasporto di materiale e la conseguente modifica del piano stesso.	72
Figura 4.17	Posa del muro paraonde su uno strato di sabbia in modo da facilitare la sistemazione allineata dei singoli moduli.	72
Figura 4.18	Messa in opera del nucleo sia della parte interna con materiale basaltico (a) sia della parte esterna con granulato di marmo (b) rappresentativi rispettivamente della III categoria e degli scogli e massi provenienti da salpamenti e rocce di I categoria.	73
Figura 4.19	Messa in opera del filtro realizzato mediante materiale basaltico rappresentativo degli scogli di 2-5 t a scala di prototipo.	73
Figura 4.20	Sistemazione delle parti laterali e protette mediante rete metallica a maglie quadrate	74
Figura 4.21	Verniciatura dei modelli fisici degli Accropodi.....	75
Figura 4.22	Geometria della sezione n°1 del modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.	75
Figura 4.23	Modello nella Configurazione 1 della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.	76
Figura 4.24	Geometria della sezione n°2 del modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.	77
Figura 4.25	Modello nella Configurazione 2 della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.	77
Figura 4.26	Geometria della sezione n°3 del modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.	78
Figura 4.27	Modello nella Configurazione 3 della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.	78
Figura 4.28	Geometria della sezione n°4 del modello fisico della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.	79
Figura 4.29	Modello nella Configurazione 4 della diga foranea dello Scalo Galera, in scala 1:80.	79
Figura 4.30	Scheda di osservazione tipo degli esperimenti condotti con onde irregolari.....	82
Figura 5.1	Prova M_3 ($T_p = 11.65$ s, $H_s = 100\%$ $H_{sp} = 8.15$ m): a) condizione della struttura prima della simulazione del	

	moto ondoso; b) condizione finale della struttura alla fine della prova.	96
Figura 5.2	Individuazione dei centri di massa sia dei massi al piede che degli Accropodi e valutazione. Si noti che le linee rosse delimitano l'area di misura. a) condizione della struttura prima della simulazione del moto ondoso per la prova (prova M_3:Masso al piede con lato inclinato in direzione dell'onda); b) condizione finale della struttura alla fine della prova (prova M_3:Masso al piede con lato inclinato in direzione dell'onda);.	97
Figura 5.3	Traiettoria dei centri massa alla fine della prova (prova M_3:Masso al piede con lato inclinato in direzione dell'onda).	98
Figura 6.1	Confronto tra i livelli di danno del modello fisico per le quattro prove eseguite.	109
Figura 6.2	Confronto del coefficiente di riflessione ottenuto per le quattro configurazioni del modello fisico nelle varie prove.	111
Figura 6.3	Confronto della portata tracimata ottenuta per le quattro configurazioni del modello fisico nelle varie prove. ...	112

Elenco delle Tabelle

Tabella 2.I	Definizione dei livelli di danno secondo il U.S. Army Corps of Engineers (2002).	36
Tabella 2.II	Limiti dei livelli di danno sulla base delle definizioni fornite dal U.S. Army Corps of Engineers (2002).....	36
Tabella 2.III	Definizione dei livelli di danno secondo la Normativa BS 6349 (Maritime structures, Part 7: Guide to the design and construction of breakwaters, 1991).....	37
Tabella 2.IV	Valori accettabili per la portata di overtopping, adattato da U.S. Army Corps of Engineers (2002).	38
Tabella 4.I	Categorie degli scogli naturali previste per la realizzazione della diga foranea dello Scalo Galera (prototipo).....	58
Tabella 4.II	Valutazione del numero di stabilità secondo il metodo di Hudson et al. (1979) e di Sharp e Khader (1984) per i sedimenti di basalto e di marmo.	59
Tabella 4.III	Peso dei modelli fisici dei massi naturali ottenuti mediante il numero di stabilità.	61
Tabella 4.IV	Dimensioni dei modelli fisici dei massi naturali ottenuti dal criterio geometrico.....	61
Tabella 4.V	Tipologia di materiale e relativa classe granulometrica utilizzata per la realizzazione del modello fisico.....	62
Tabella 4.VI	Massa del campione di materiale basaltico proveniente dalla cava "Nunziata-Bosco" (estratte dal Certificato n. 347 del 06/07/2007 emesso dal Laboratorio Prove Stradali del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Catania).....	64
Tabella 4.VII	Determinazione della massa volumica dei grani e dell'assorbimento dell'acqua (informazioni estratte dal Certificato n. 347 del 06/07/2007 emesso dal Laboratorio Prove Stradali del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Catania).....	64
Tabella 4.VIII	Valutazione del numero di stabilità secondo il metodo di Hudson et al. (1979) e di Sharp e Khader (1984)... ..	66
Tabella 4.IX	Caratteristiche fisiche dell' Accropodi a scala di prototipo e del modello.	67
Tabella 4.X	Valutazione del numero di stabilità secondo il metodo di Hudson et al. (1979) e di Sharp e Khader (1984).	68
Tabella 4.XI	Caratteristiche fisiche del masso al piede a scala di prototipo e del modello.....	69
Tabella 5.I	Caratteristiche del moto ondoso simulato durante le prove di laboratorio fornite dalla Sogreah.	85

Tabella 5.II	Descrizione delle prove condotte presso il laboratorio di Idraulica del DICA.....	86
Tabella 5.III	Parametri di controllo idrodinamici delle prove condotte in laboratorio.	87
Tabella 5.IV	Valori caratteristici del moto ondoso registrati durante gli esperimenti tramite le sonde di acquisizione.	89
Tabella 5.V	Valutazione del danno parziale e cumulato misurato al piede della mantellata.	99
Tabella 5.VI	Valutazione del danno parziale e cumulato subito dai massi della mantellata mediante i parametri N_d e N_{od} , per spostamenti compresi tra $0.5D_N$ e D_N	100
Tabella 5.VII	Valutazione del danno subito dai massi della mantellata mediante i parametri N_d e N_{od} , per spostamenti maggiori di D_N	101
Tabella 5.VIII	Valori di portata media di tracimata misurate in laboratorio.....	103
Tabella 5.IX	Valori di altezza d'onda incidente e riflessa e dei coefficienti di riflessione misurati in laboratorio con il metodo delle due sonde di Goda e Suzuki (1976). ...	105
Tabella 6.I	Caratteristiche del moto ondoso, a scala di prototipo, adottate per le verifiche condotte sul modello fisico nell'ambito del presente progetto esecutivo (fonte: report Sogreah,2000).....	107

Elenco degli Allegati

1. Documentazione fotografica.
2. Schede di osservazione degli esperimenti condotti.
3. Analisi spettrale dei segnali registrati alle sonde di livello per la stima del coefficiente di riflessione.
4. Tavole.

Elenco delle Tavole

Tavola 1	Planimetria di progetto dell'opera foranea (1:1000).
Tavola 2a	Sezioni di progetto dell'opera foranea testate su modello fisico (scala 1:250).
Tavola 2b	Sezioni di progetto dell'opera foranea testate su modello fisico (scala 1:250).
Tavola 3	Planimetria della vasca (1:100).
Tavola 4	Apparato sperimentale e posizionamento del modello 3D e della strumentazione di misura nella vasca di prova.
Tavola 5	Sezioni alternative dell'opera forane sottoposte a verifica (1:2.50).
Tavola 6	Risultati della configurazione 1.
Tavola 7	Risultati della configurazione 2.
Tavola 8a	Risultati della configurazione 3.
Tavola 8b	Risultati della configurazione 3.
Tavola 9a	Risultati della configurazione 4.
Tavola 9b	Risultati della configurazione 4.

Bibliografia

- Bendat, J., Piersol, A., 1971. Random data: analysis and measurement procedures. Wiley, New York.
- Broderick, L., Ahrens, J.P., 1982. Rip-rap stability scale effects. Technical Paper 82-3, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Burcharth, H.F., Liu, Z., 1992. Design of dolos armour units. Proceedings of the 23rd International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Vol. 1, 1053-1066.
- U.S. Army Corps of Engineers, 2002. Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (in 6 volumes).
- CIRIA, CUR, CETMEF; 2007. The rock manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, CIRIA, London.
- Dai, Y.B., Kamel, A.M., 1969. Scale effect tests for rubble-mound breakwaters; hydraulic modeling investigation. Research Report H-69-2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Funke, E.R., Haines, S.A., 1976. Production of model armour units for scale breakwaters. LTR-HY-52, National Research Council, Canada Hydraulics Laboratory, Ottawa, Canada.
- Goda e Suzuki (1976),
- Hall, K.R., 1990. Aeration in rubble-mound breakwater models. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 116, 3, 400-405.
- Hudson, R.Y., 1958. Design of quarry-stone cover layers for rubble-mound breakwaters; hydraulic laboratory investigation. Research Report 2-2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

- Hudson, R.Y., 1959. Laboratory investigation of rubble mound breakwaters. *Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE*, Vol. 85, WW3, 93-121.
- Hudson, R.Y., Davidson, D.D., 1975. Reliability of rubble-mound breakwater stability models. 2nd Symposium on Modeling Techniques, ASCE, Vol. 2, 1603-1622.
- Hudson, R.Y., Hermann, F.A., Sager, R.A., Whalin, R.W., Keulegan, G.H., Chatham, C.E., Hales, L.Z., 1979. Coastal hydraulic models. Special Report 5, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Hughes, S.A., 1993. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering, *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 7, World Scientific Publishing, Singapore.
- Jensen, O.J., 1984. A monograph on rubble mound breakwaters. Danish Hydraulic Institute, Hørsholm, Denmark.
- Jensen, O.J., Kliting, P., 1983. Evaluation of scale effects in hydraulic models by analysis of laminar and turbulent flow. *Coastal Engineering*, Vol. 7, 319-329.
- Keulegan, G.H., 1973. Wave transmission through rock structures. Research Report H-73-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- L.E. Frostick, S.J. McLelland, T.G. Mercer, 2011. Users Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network, CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands.
- Le Méhauté, B., 1965. Wave absorbers in harbors. Contract Report 2-122, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Le Méhauté, B., 1976. Similitude in coastal engineering. *Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE*, WW3, 317-335.

- Mol, A., Ligteringen, H., Groenveld, R.L., Pita, C.R., 1983. West breakwaters – Sines: study of armour stability. Proceedings of Coastal Structures '83, ASCE, 57-70.
- Normativa BS 6349 Maritime structures, Part 7: Guide to the design and construction of breakwaters, 1991.
- Oumeraci, H., 1984. Scale effects in coastal hydraulic models. Symposium on Scale effects in modelling hydraulic structures, ed. H. Kobus, IAHR, 7.10-1 – 7.10.7.
- Owen, M.W., Allsop, N.W., 1983. Hydraulic modelling of rubble mound breakwaters. Proceedings of Breakwaters: Design and Construction, Institution of Civil Engineers, London, 71-78.
- Sharp, J.J. 1985. Scaling the weight of breakwater armour units. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, 3, 594-597.
- Sharp, J.J., Khader, M.H.A., 1984. Scale effects in harbour models involving permeable rubble mound structures. Symposium on Scale effects in modelling hydraulic structures, ed. H. Kobus, IAHR, 7.12-1 – 7.12-5.
- Stive, M.J.F., 1985. A scale comparison of waves breaking on a beach. Coastal Engineering, Vol 9., 151-158.
- Tomasicchio, G.R., 1992. Analisi del comportamento di un frangiflutti a berma. Tesi di dottorato. Politecnico di Milano, Politecnico di Torino, Università di Bologna e Università di Pavia.
- Tørum, A., Mathiesen, B., Escutia, R., 1979. Reliability of breakwater model tests. Proceedings of Coastal Structures '79, ASCE, 454-469.
- Van der Meer, J.W., 1988. Rock slopes and gravel beaches under wave attack. PhD Dissertation, Delft Hydraulics Communication 396, Delft Hydraulics Laboratory, Emmerloord, The Netherlands.
- Verma, V., Varghese, K., Sekar, A.L., 2004. Evaluation of Physical Modeling and 3-D Simulation for Planning Accropodi Placement.

ISARC 2004 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Jeju Island.

Wilson, K.W., Cross, R.H., 1972. Scale effect in rubble mound breakwaters. Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference, ASCE, Vol. 3, 1873-1884.

Wolters, G., 2007. Guidelines for physical model testing of breakwaters: rubble mound breakwaters. HYDRALAB III EC contract no. 022441(RII3), Deliverable NA3.1.

Allegato 1- Documentazione fotografica



Fasi di realizzazione del fondo: la parte interna viene realizzata con forati e pannelli di polistirolo che successivamente vengono ricoperti da uno strato di cemento.



Sagome in calcestruzzo utilizzate per riprodurre il muro paraonde.

a)

b)



Strumentazione utilizzata per setacciare il materiale adoperato per la realizzazione della barriera: a) setacciature meccanico; b) setacci utilizzati per la selezione granulometrica; c) separazione del materiale setacciato.



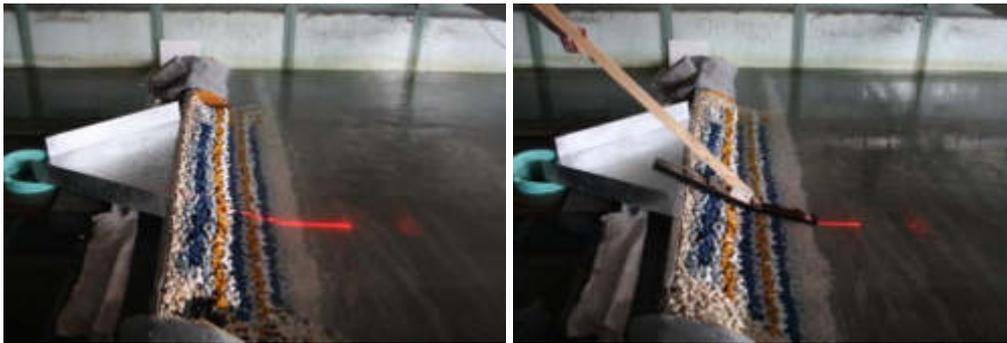
Pannello di controllo del battitore (a sinistra) e battitore (a destra) per la generazione delle onde.



Dispositivi utilizzati per l'acquisizione dei dati inviati dalle sonde durante le prove di laboratorio.



Strumentazione utilizzata per la valutazione della portata tracimata: scivolo per la raccolta della portata di overtopping (a sinistra) e boccale graduato per la misurazione (a destra).



Luce strutturata per l'analisi degli spostamenti della mantellata e del piede (a sinistra) e calibro utilizzato per la calibrazione delle immagini acquisite.



Riempimento della parte interna del nucleo con basalto di III categoria.



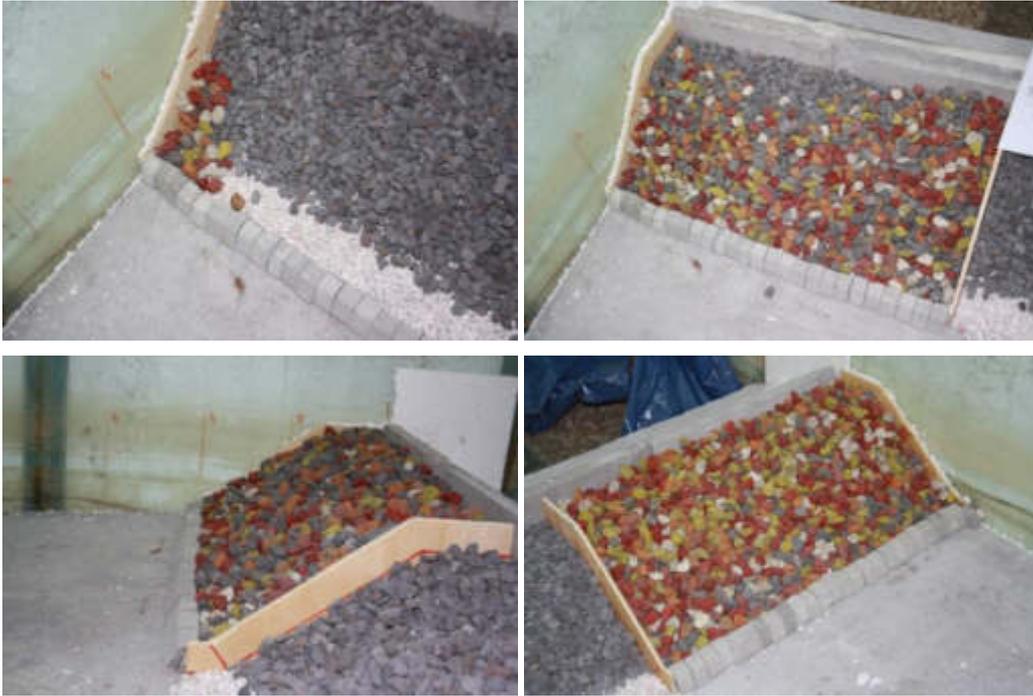
Riempimento dello strato filtro interno con granulato di marmo non selezionato.



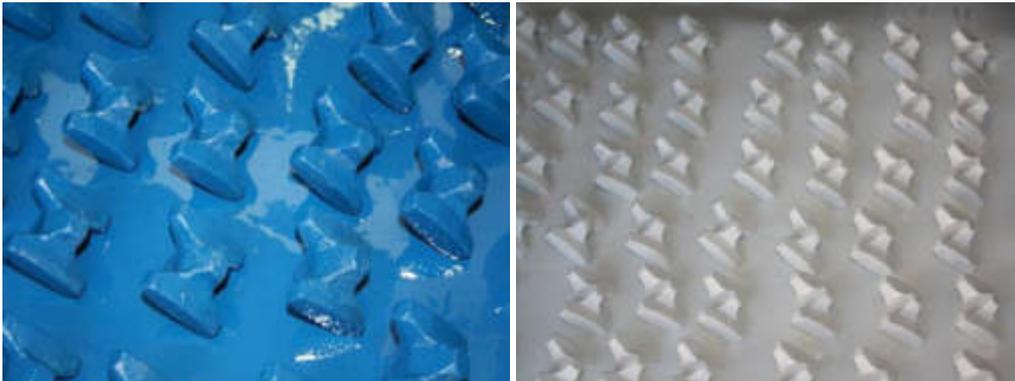
Riempimento dello strato filtro esterno con basalto di VI categoria.



Completamento dello strato filtro esterno.



Fasi di riempimento delle aree (non oggetto di studio) laterali alla barriera.



Alcuni massi tipo Accropodi utilizzati per la realizzazione della mantellata.



Configurazione 1: Fase di costruzione della mantellata con massi tipo Accropodi e con massi di protezione al piede tipo Accropodi.



Configurazione 2: Fase costruttiva della mantellata con massi tipo Accropodi e con massi di protezione al piede (lato obliquo del masso rivolto verso il largo).



Configurazione 3: Fase costruttiva della mantellata con massi tipo Accropodi e con massi di protezione al piede (lato obliquo del masso rivolto verso la barriera).



Configurazione 4: Fase costruttiva della mantellata con massi tipo Accropodi e della berma come protezione al piede.

Allegato 2- Schede di osservazione esperimenti

Allegato 3- Analisi spettrale dei segnali registrati alle sonde di livello per la stima del coefficiente di riflessione

Prova: A1

- $H_{S,SONDA1}=0.015$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.026$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.019$ m
- $T_m=1.07$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.03$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.01$ m
- $K_r=0.40$



Figura A1.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

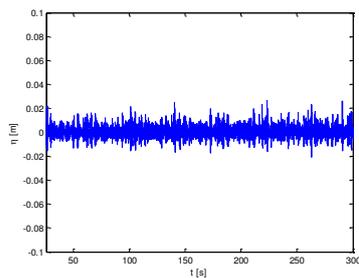


Figura A1.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

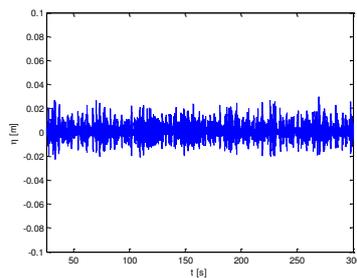


Figura A1.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

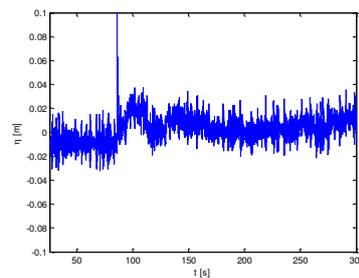


Figura A1.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

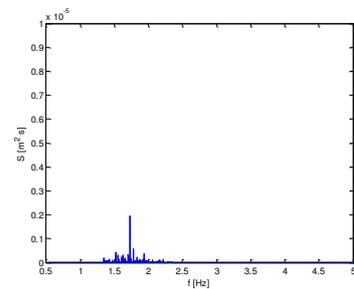


Figura A1.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

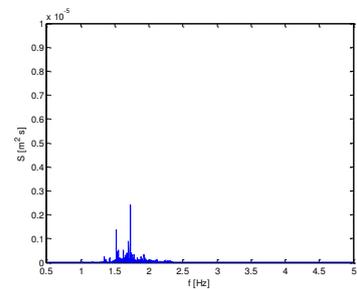


Figura A1.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

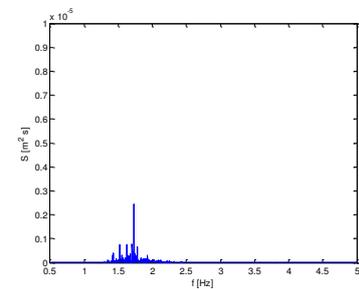


Figura A1.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

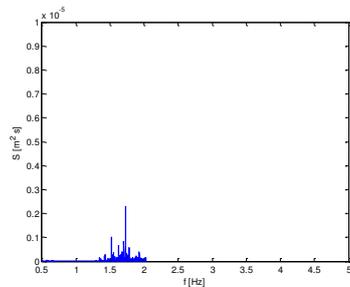


Figura A1.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

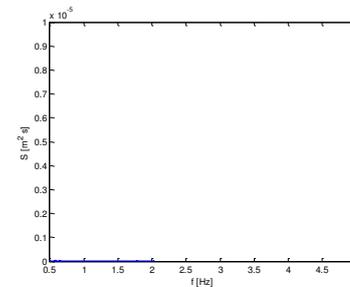


Figura A1.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: A2

- $H_{S,SONDA1}=0.067$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.055$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.056$ m
- $T_m=0.90$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.08$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.02$ m
- $K_r=0.26$



Figura A2.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

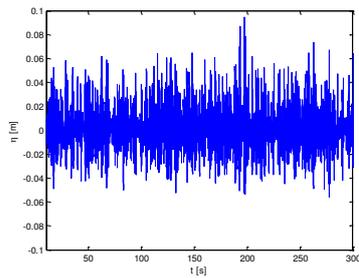


Figura A2.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

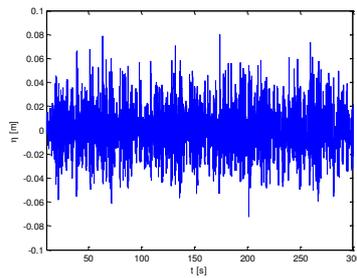


Figura A2.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

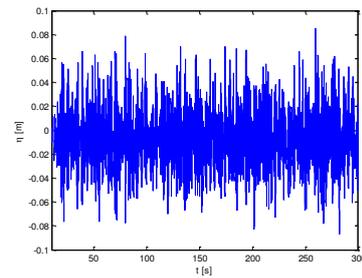


Figura A2.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

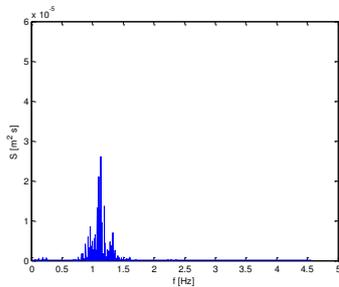


Figura A2.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

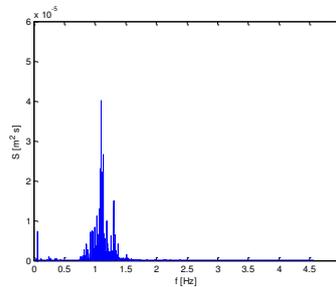


Figura A2.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

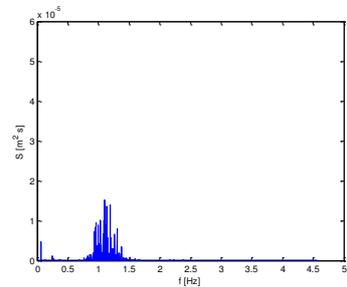


Figura A2.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

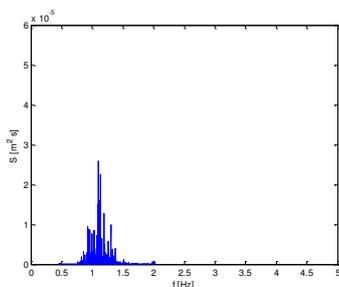


Figura A2.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

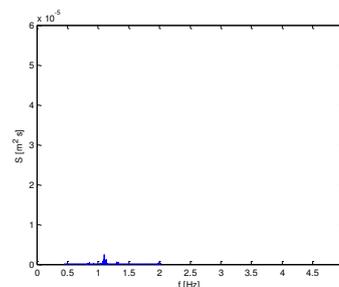


Figura A2.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: A3

- $H_{S,SONDA1}=0.072$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.087$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.073$ m
- $T_m=1.00$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.11$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.03$ m
- $K_r=0.27$



Figura A3.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

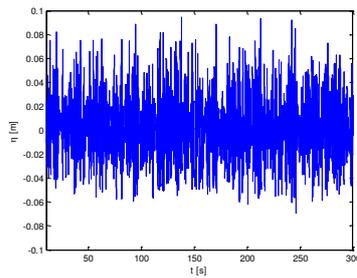


Figura A3.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

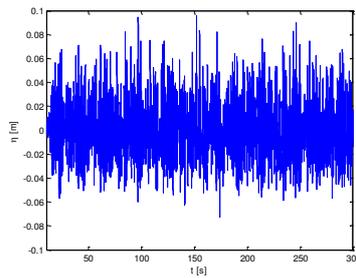


Figura A3.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

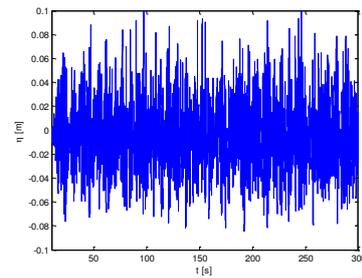


Figura A3.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

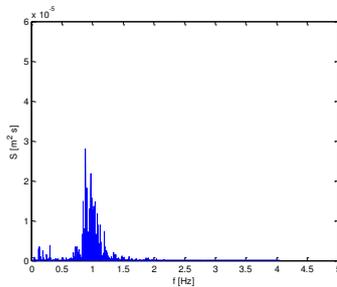


Figura A3.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

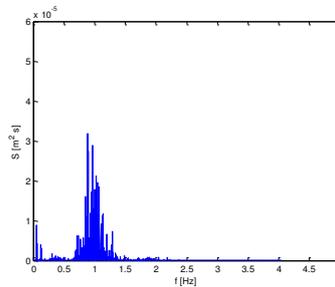


Figura A3.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

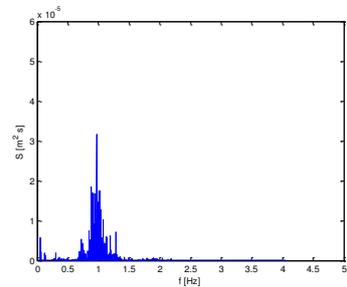


Figura A3.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

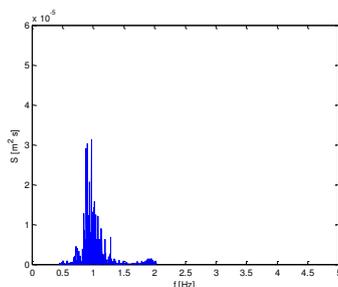


Figura A3.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

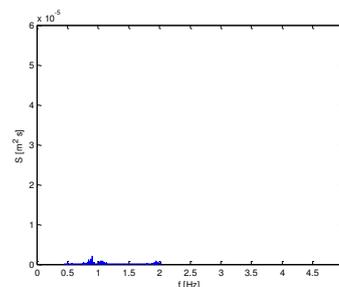


Figura A3.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: M1

- $H_{S,SONDA1}=0.017$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.017$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.018$ m
- $T_m=0.60$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.02$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.006$ m
- $K_r=0.28$



Figura M1.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

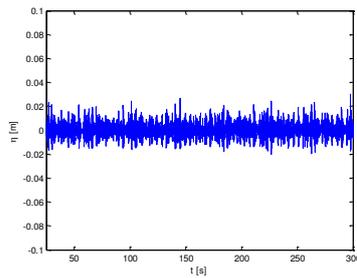


Figura M1.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

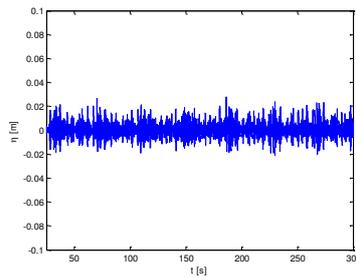


Figura M1.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

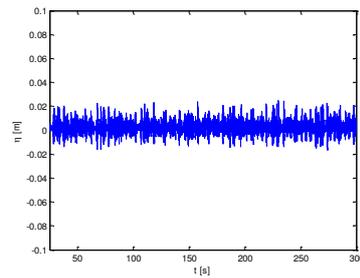


Figura M1.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

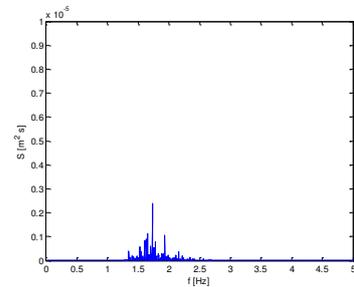


Figura M1.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

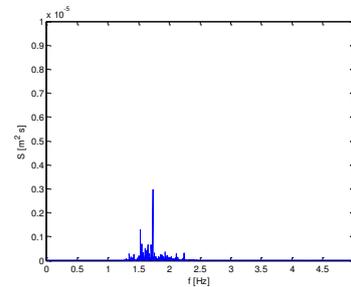


Figura M1.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

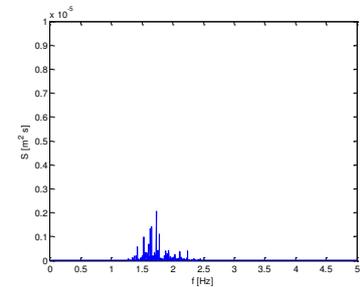


Figura M1.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

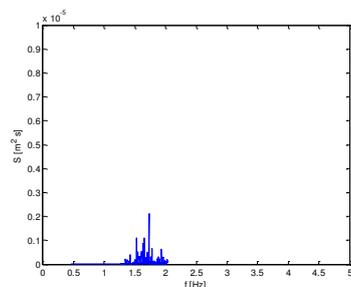


Figura M1.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

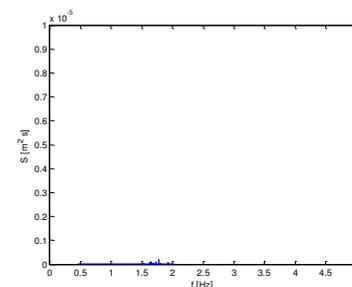


Figura M1.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: M2

- $H_{S,SONDA1}=0.056$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.053$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.054$ m
- $T_m=0.89$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.07$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.02$ m
- $K_r=0.26$



Figura M2.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

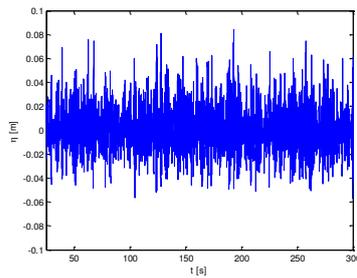


Figura M2.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

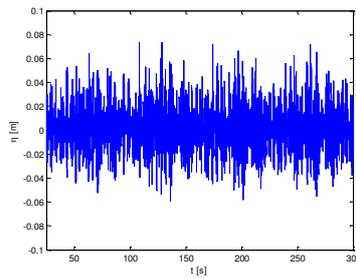


Figura M2.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

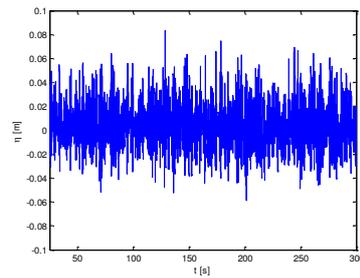


Figura M2.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

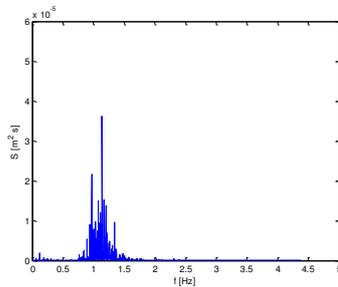


Figura M2.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

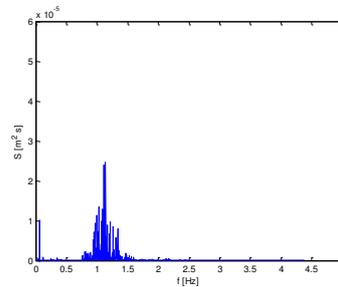


Figura M2.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

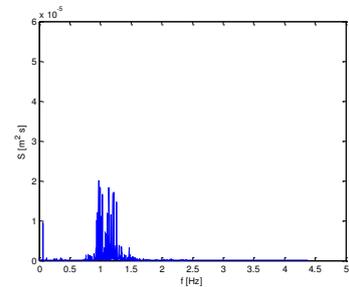


Figura M2.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

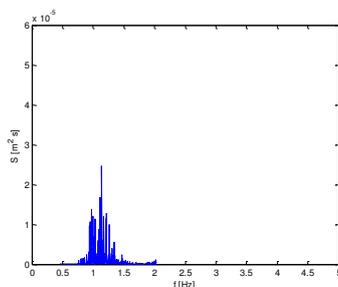


Figura M2.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

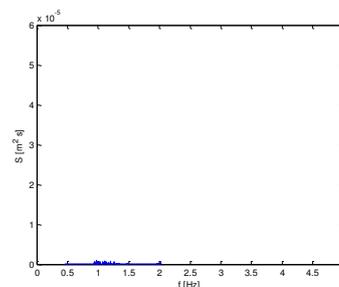


Figura M2.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: M3

- $H_{S,SONDA1}=0.074$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.069$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.072$ m
- $T_m=0.98$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.09$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.03$ m
- $K_r=0.28$



Figura M3.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

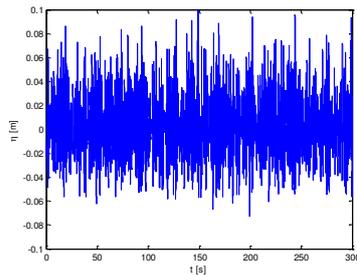


Figura M3.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

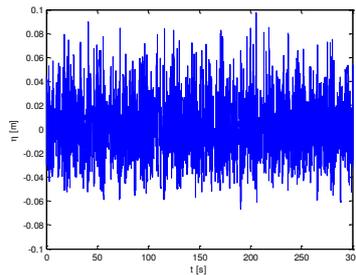


Figura M3.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

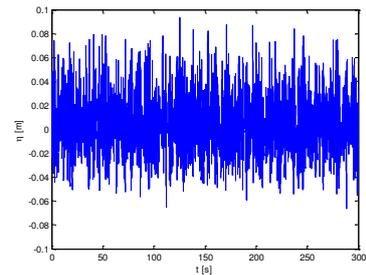


Figura M3.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

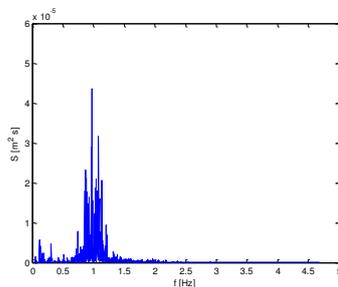


Figura M3.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

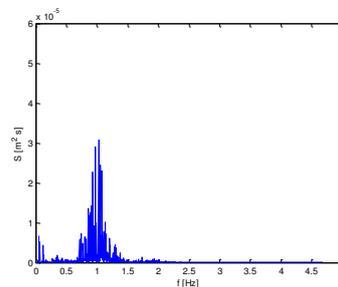


Figura M3.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

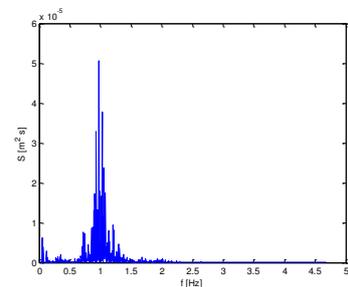


Figura M3.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

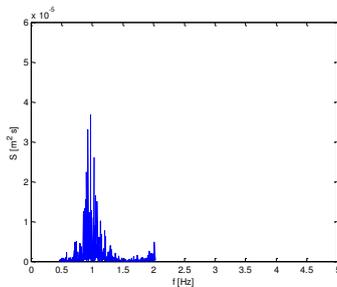


Figura M3.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

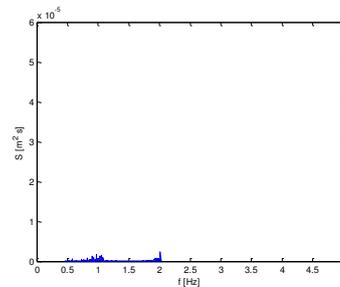


Figura M3.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: MS_1

- $H_{S,SONDA1}=0.016$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.017$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.016$ m
- $T_m=0.68$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.02$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.005$ m
- $K_r=0.26$



Figura MS_1.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

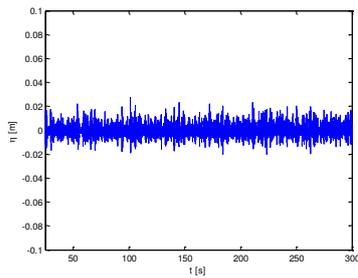


Figura MS_1.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

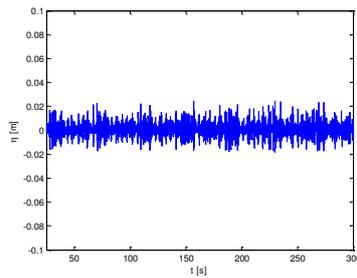


Figura MS_1.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

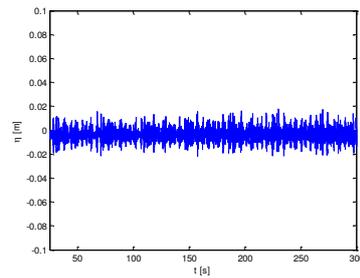


Figura MS_1.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

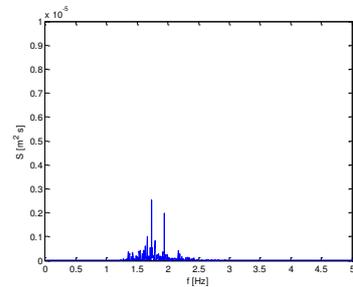


Figura MS_1.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

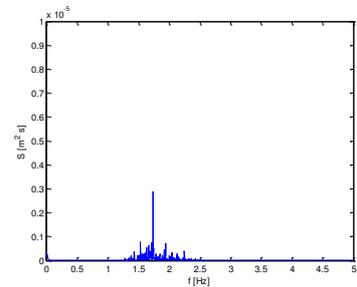


Figura MS_1.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

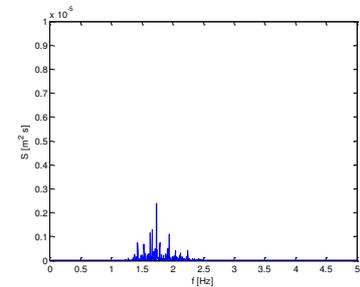


Figura MS_1.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

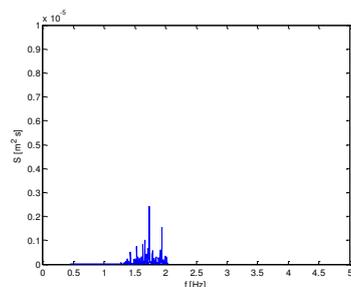


Figura MS_1.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

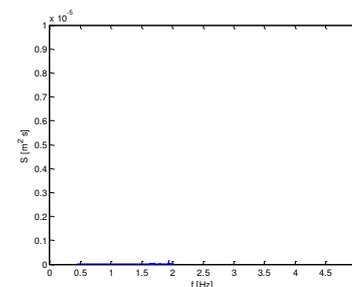


Figura MS_1.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: MS_2

- $H_{S,SONDA1}=0.056$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.055$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.056$ m
- $T_m=0.89$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.08$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.02$ m
- $K_r=0.23$



Figura MS_2.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

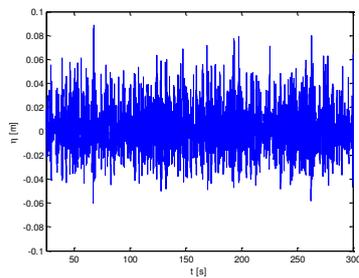


Figura MS_2.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

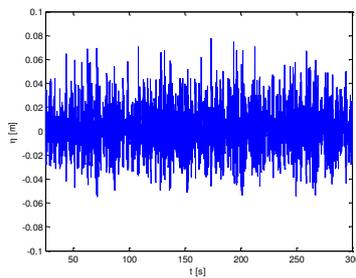


Figura MS_2.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

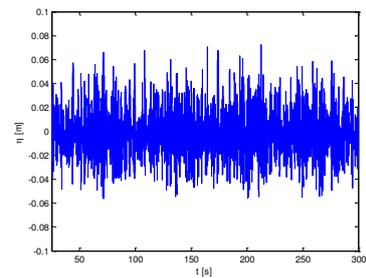


Figura MS_2.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

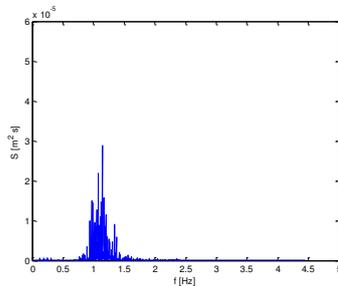


Figura MS_2.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

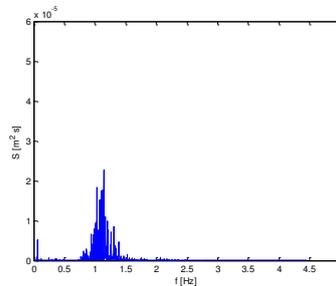


Figura MS_2.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

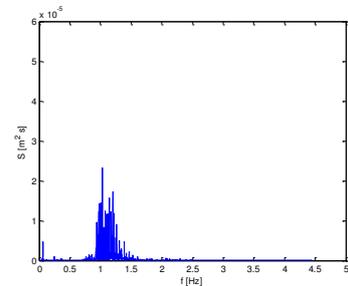


Figura MS_2.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

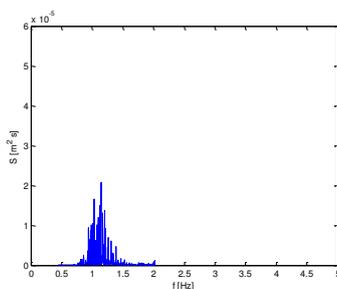


Figura MS_2.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

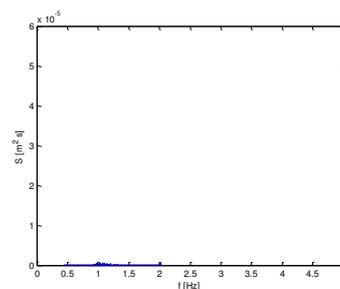


Figura MS_2.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: MS_3

- $H_{S,SONDA1}=0.068$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.069$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.066$ m
- $T_m=1.00$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.09$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.02$ m
- $K_r=0.25$



Figura MS_3.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

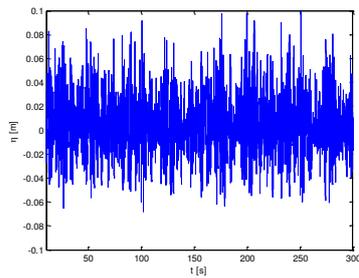


Figura MS_3.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

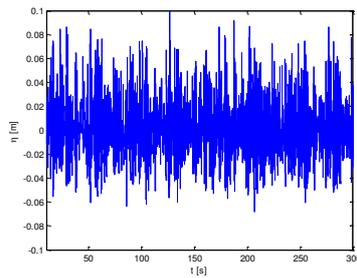


Figura MS_3.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

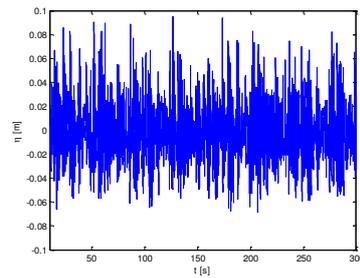


Figura MS_3.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

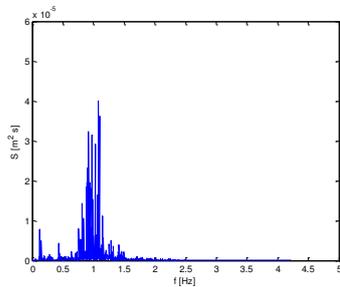


Figura MS_3.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

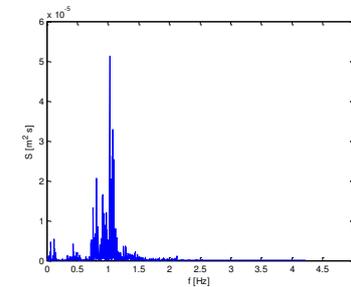


Figura MS_3.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

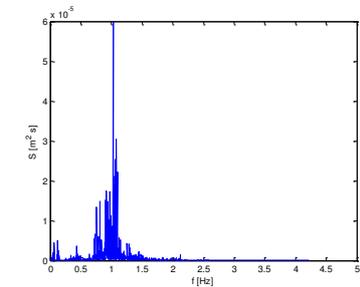


Figura MS_3.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

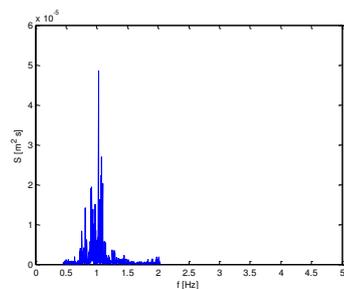


Figura MS_3.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

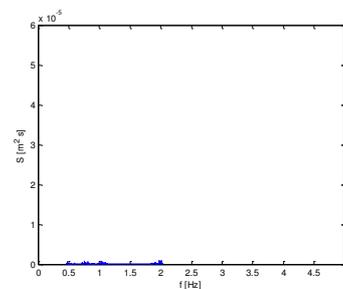


Figura MS_3.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: MS1_1

- $H_{S,SONDA1}=0.016$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.017$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.018$ m
- $T_m=0.60$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.02$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.007$ m
- $K_r=0.31$



Figura MS1_1.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

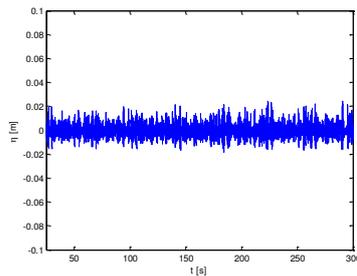


Figura MS1_1.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

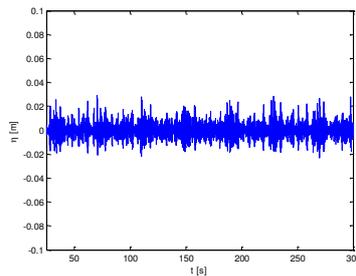


Figura MS1_1.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

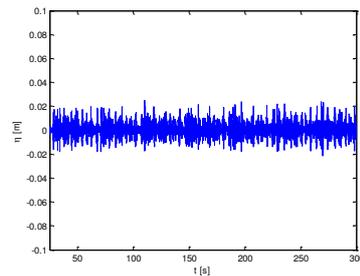


Figura MS1_1.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

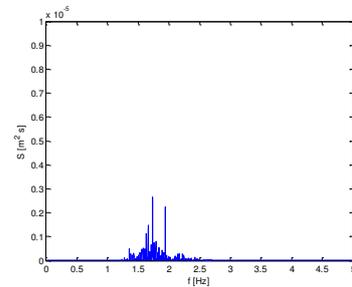


Figura MS1_1.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

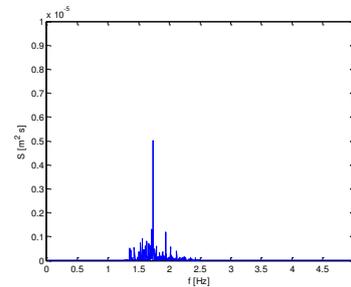


Figura MS1_1.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

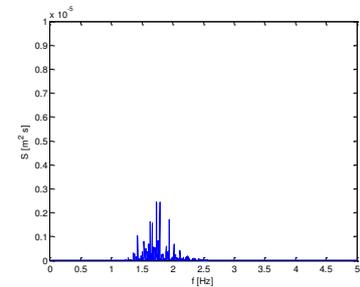


Figura MS1_1.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

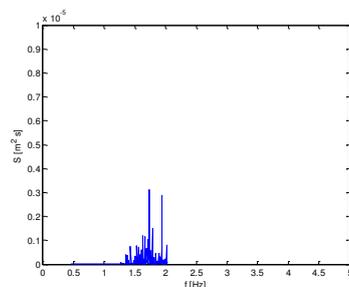


Figura MS1_1.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

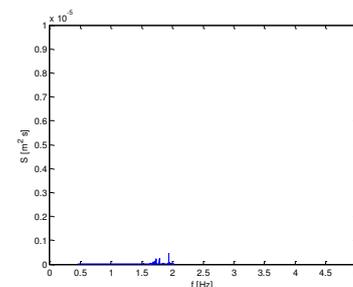


Figura MS1_1.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: MS2_2

- $H_{S,SONDA1}=0.056$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.056$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.056$ m
- $T_m=0.90$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.07$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.02$ m
- $K_r=0.25$



Figura MS2_2.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

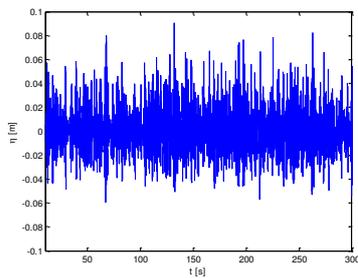


Figura MS2_2.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

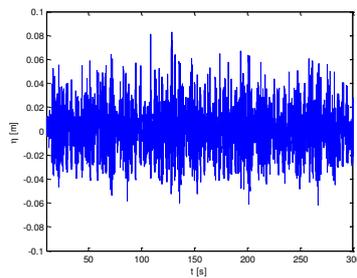


Figura MS2_2.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

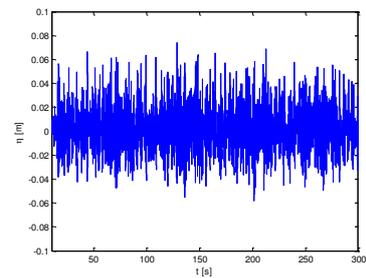


Figura MS2_2.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

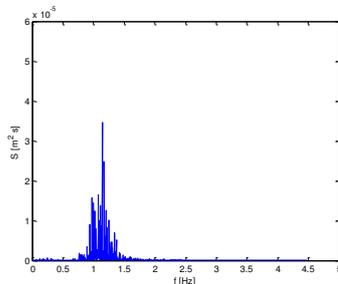


Figura MS2_2.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

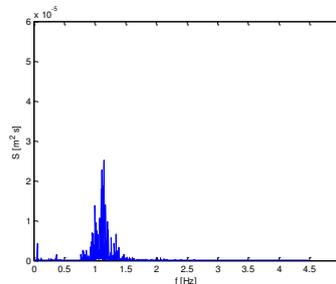


Figura MS2_2.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

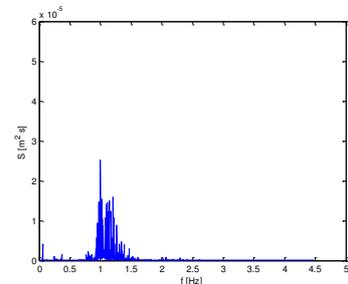


Figura MS2_2.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

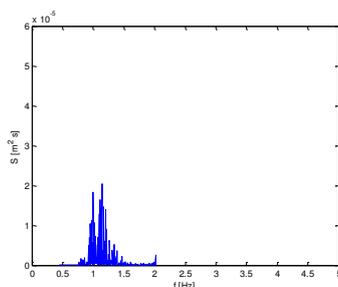


Figura MS2_2.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

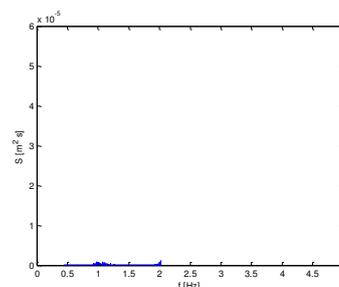


Figura MS2_2.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: MS3_3

- $H_{S,SONDA1}=0.072$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.068$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.070$ m
- $T_m=0.99$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}= 0.09$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}= 0.03$ m
- $K_r= 0.28$



Figura MS3_3.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

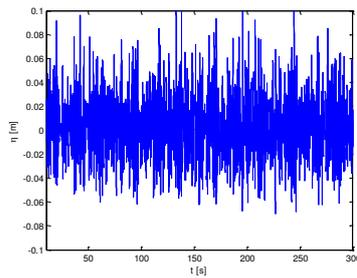


Figura MS3_3.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

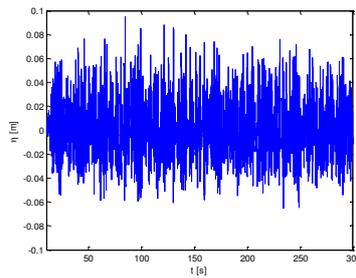


Figura MS3_3.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

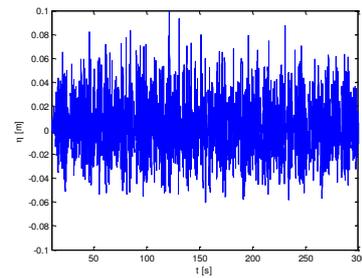


Figura MS3_3.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

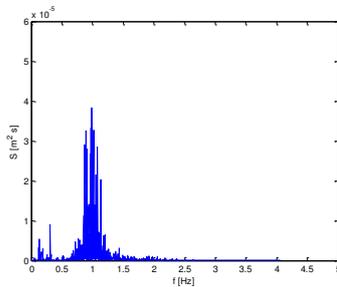


Figura MS3_3.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

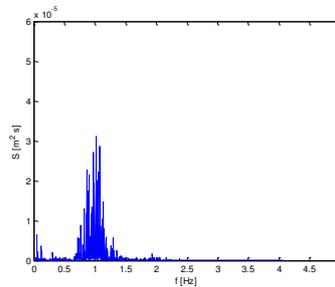


Figura MS3_3.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

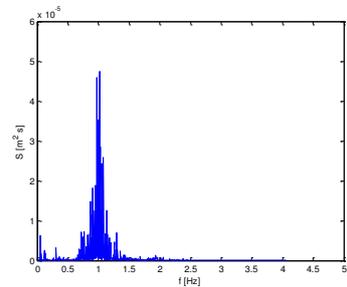


Figura MS3_3.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

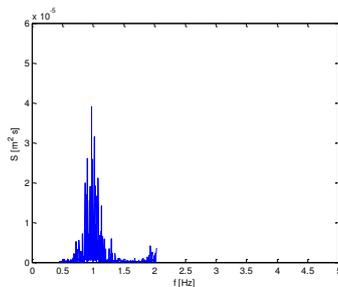


Figura MS3_3.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

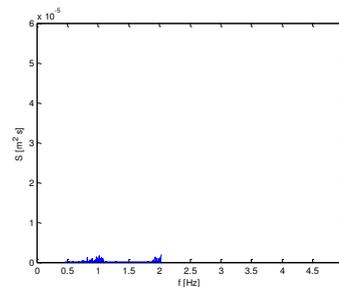


Figura MS3_3.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: B1

- $H_{S,SONDA1}=0.017$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.017$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.018$ m
- $T_m=0.60$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.02$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.007$ m
- $K_r=0.31$



Figura B1.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

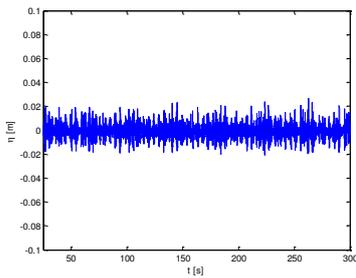


Figura B1.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

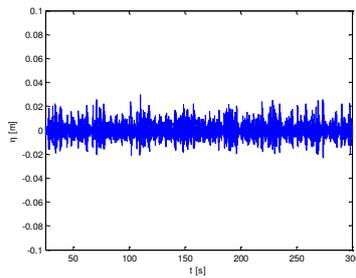


Figura B1.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

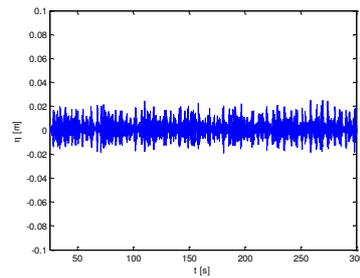


Figura B1.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

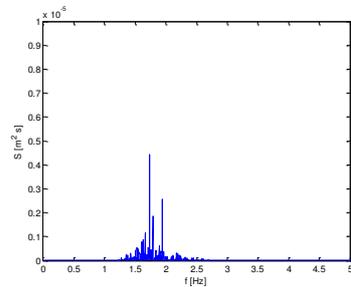


Figura B1.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

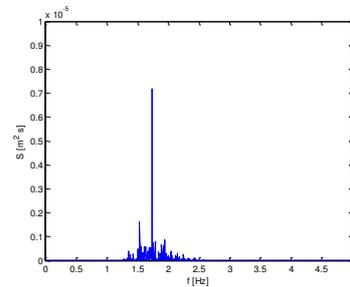


Figura B1.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

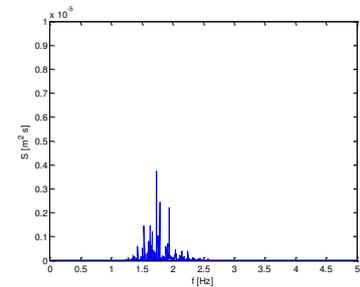


Figura B1.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

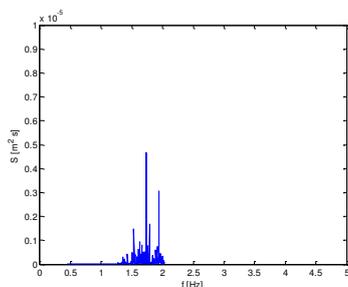


Figura B1.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

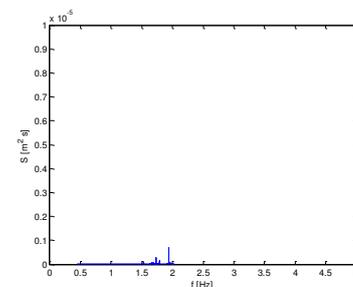


Figura B1.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: B2

- $H_{S,SONDA1}=0.056$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.054$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.055$ m
- $T_m=0.88$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.07$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.02$ m
- $K_r=0.24$



Figura B2.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

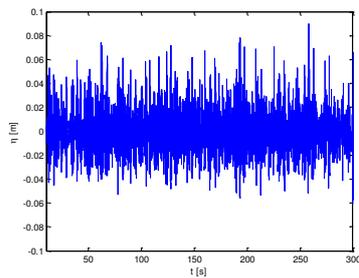


Figura B2.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

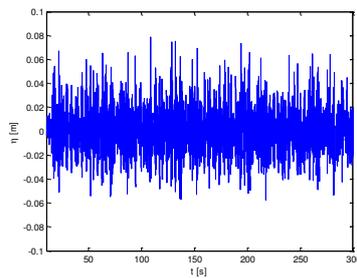


Figura B2.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

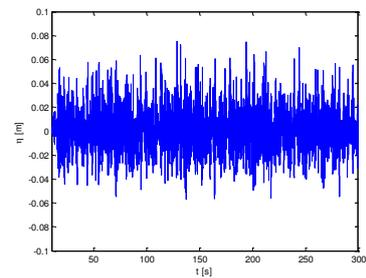


Figura B2.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

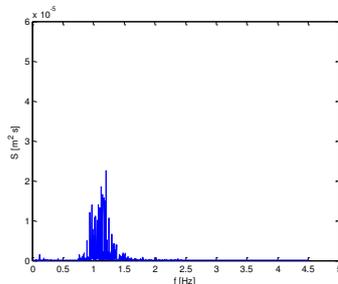


Figura B2.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

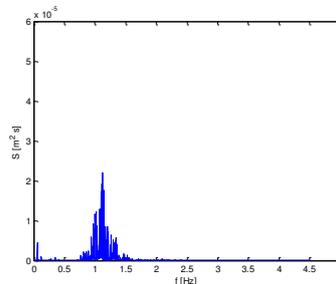


Figura B2.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

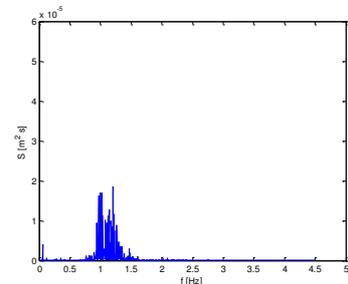


Figura B2.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

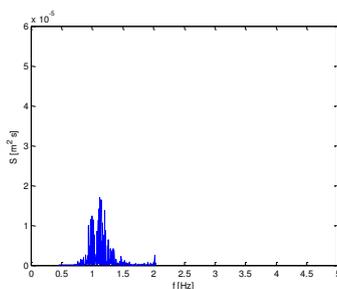


Figura B2.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

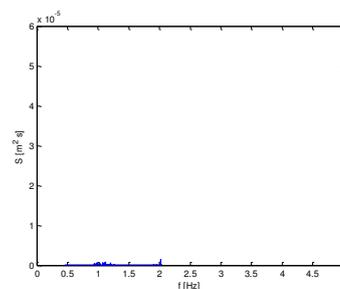


Figura B2.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: B3

- $H_{S,SONDA1}=0.072$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.071$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.072$ m
- $T_m=1.00$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.09$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.03$ m
- $K_r=0.26$



Figura B3.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

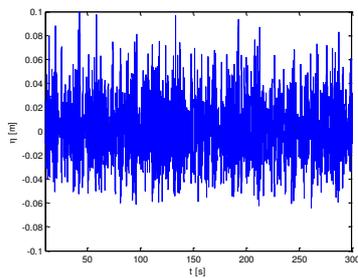


Figura B3.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

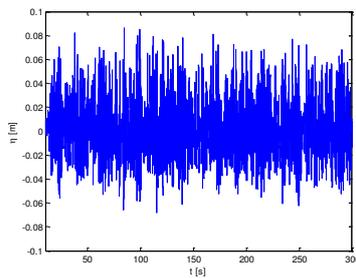


Figura B3.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

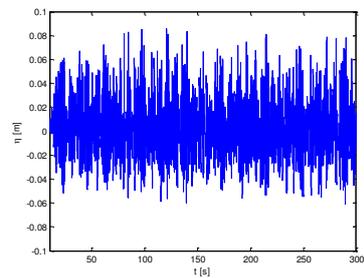


Figura B3.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

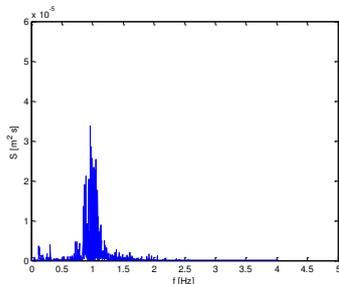


Figura B3.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

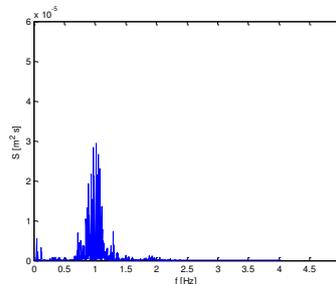


Figura B3.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

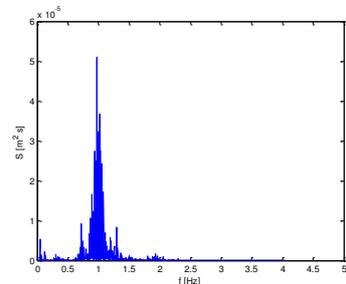


Figura B3.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

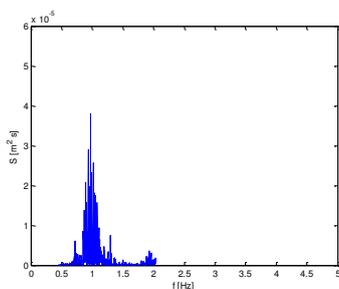


Figura B3.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

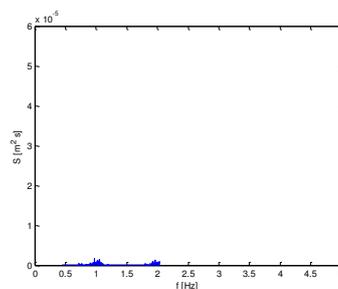


Figura B3.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3

Prova: B4

- $H_{S,SONDA1}=0.071$ m
- $H_{S,SONDA2}=0.077$ m
- $H_{S,SONDA3}=0.076$ m
- $T_m=1.17$ s
- $H_{i,sonde\ 2-3}=0.10$ m
- $H_{r,sonde\ 2-3}=0.03$ m
- $K_r=0.31$



Figura B4.1 Immagine del modello fisico alla fine della prova

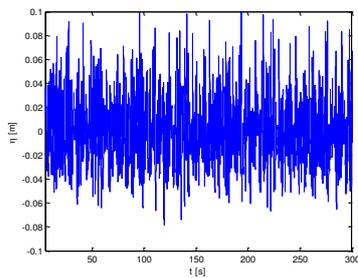


Figura B4.2 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 1

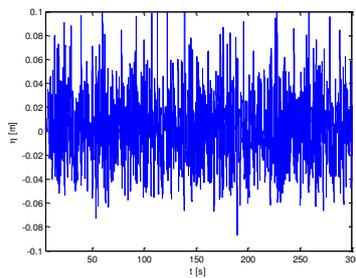


Figura B4.3 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 2

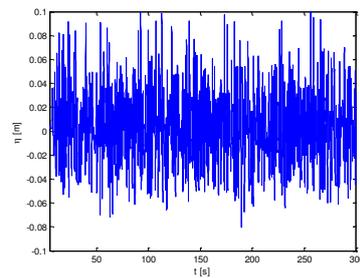


Figura B4.4 Segnale della sopraelevazione η rilevato dalla sonda 3

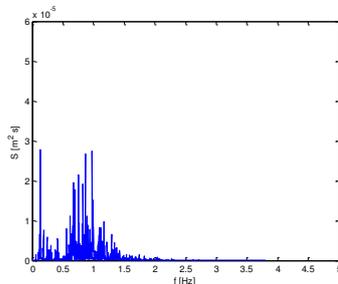


Figura B4.5 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 1

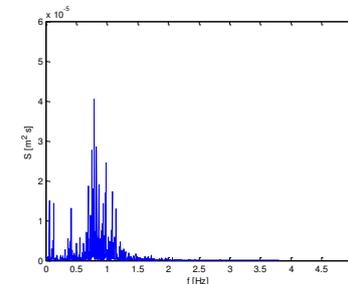


Figura B4.6 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 2

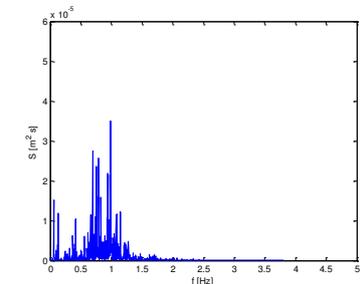


Figura B4.7 Spettro di frequenza rilevato dalla sonda 3

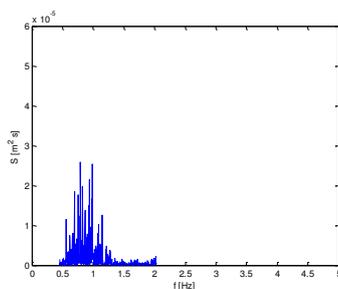


Figura B4.8 Spettro d'onda incidente rilevato dalle sonde 2 e 3

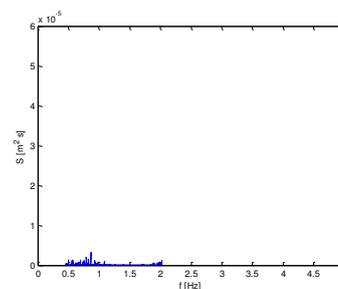
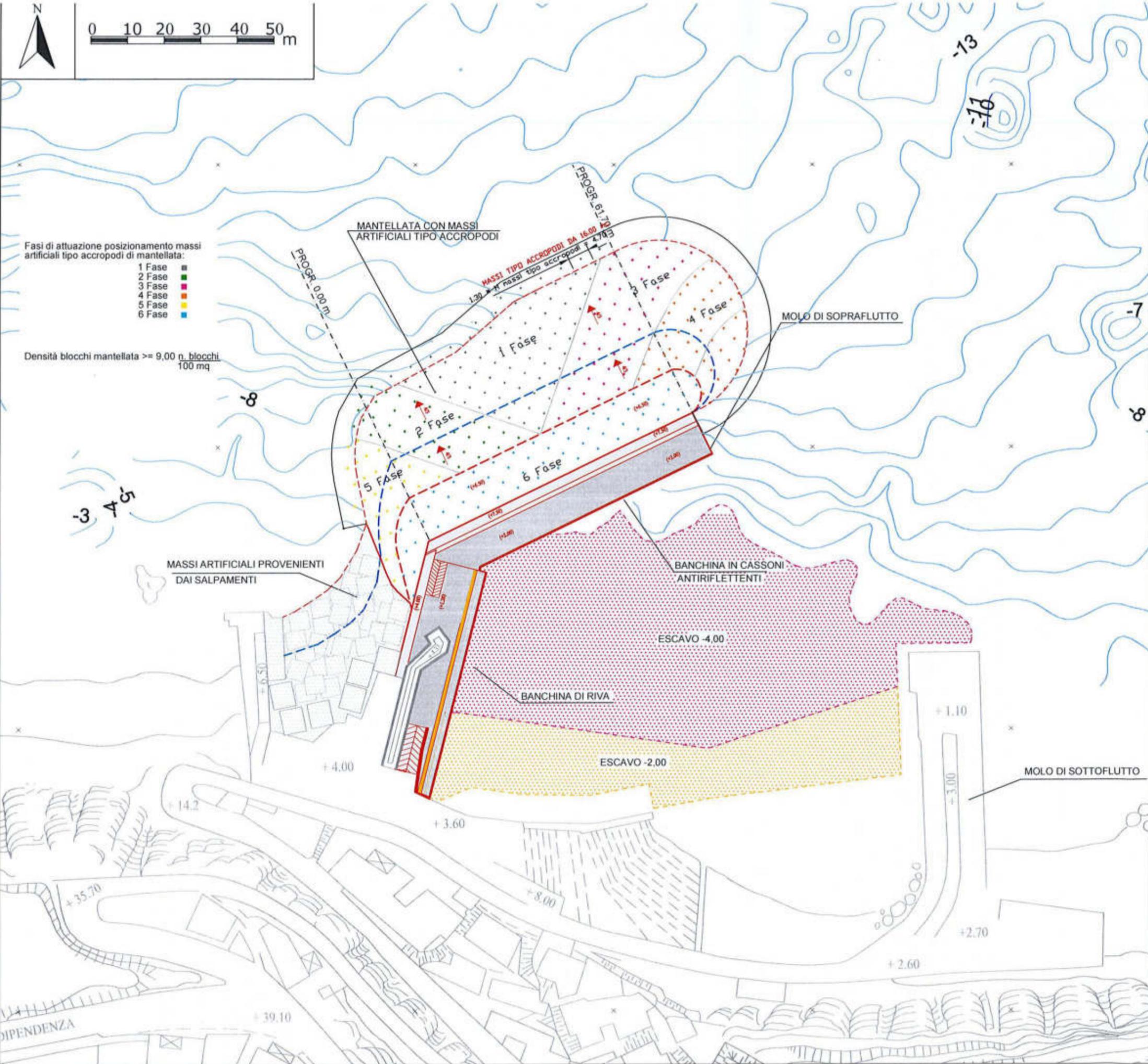


Figura B4.9 Spettro d'onda riflessa rilevato dalle sonde 2 e 3



Note:
 Si precisa che la tavola è stata redatta sulla base delle informazioni di progetto fornite dal committente

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANI
 DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

COMMITTENTE:
 Dipartimento Infrastrutture Mobilità e Trasporti

Modellazione fisica della stabilità della mantellata della diga foranea dello Scalo Galera sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina
 1° stralcio funzionale

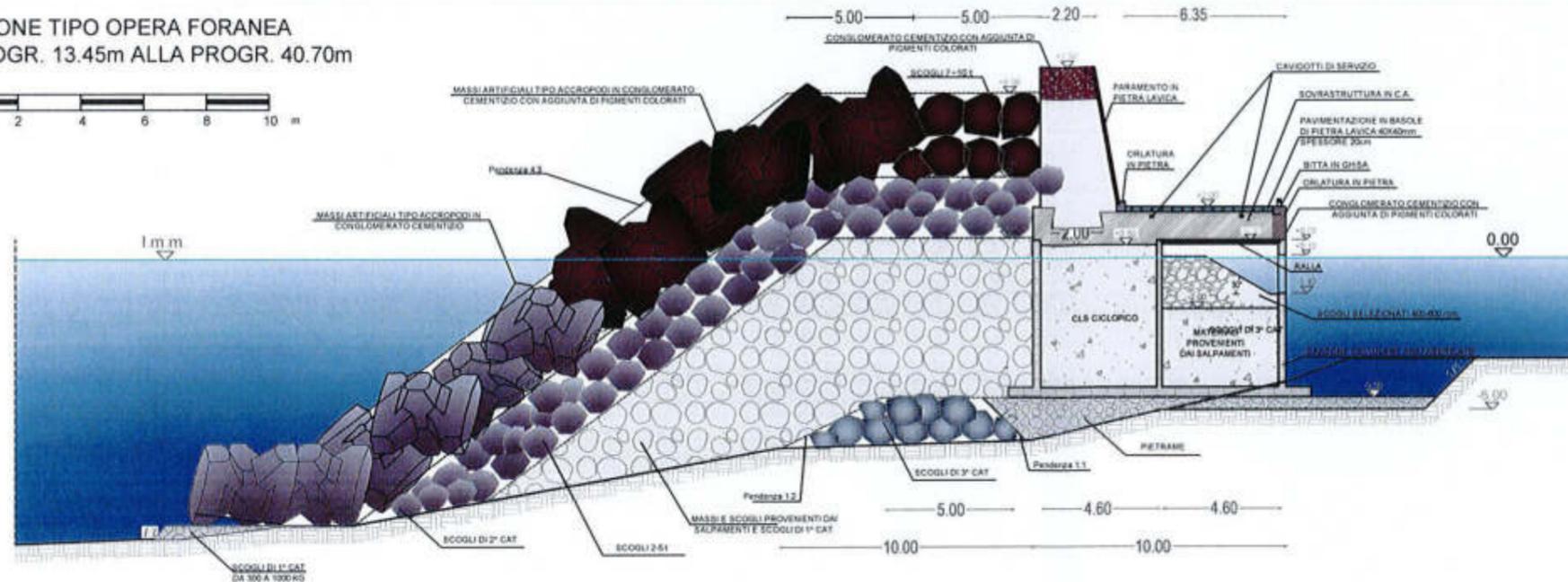
Planimetria di progetto dell'opera foranea	Tavola:	1
	Scala:	1:1000

Redatto da: (Ing. Claudio Iuppa) (Ing. Ilaria Zammuto)	File: Tav1a5_Planimetria e sezioni.dwg	Data: Settembre 2012
--	---	-------------------------

Il Responsabile Scientifico (Ing. Rosaria Musumeci)	Il Direttore del DICA (Prof. Ing. Enrico Foti)
--	---

Configurazione 1
(mantellata sorretta da due file di Accropodi alla base)

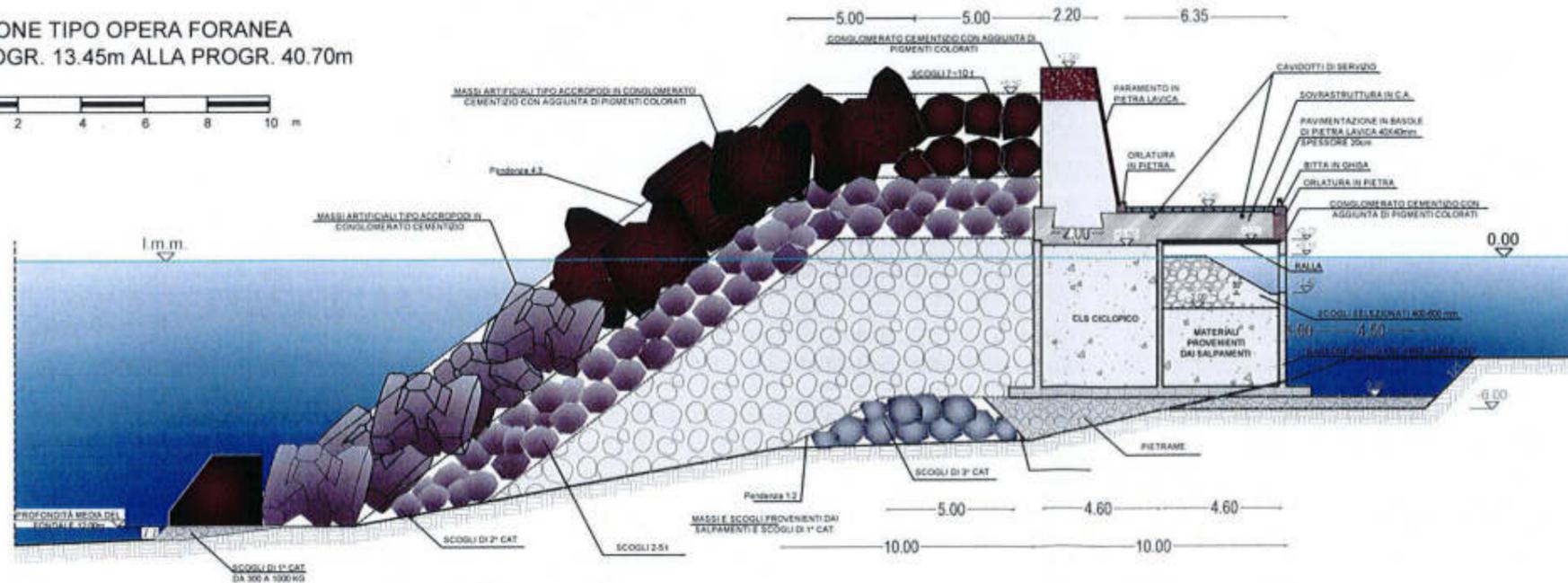
SEZIONE TIPO OPERA FORANEA
DALLA PROGR. 13.45m ALLA PROGR. 40.70m



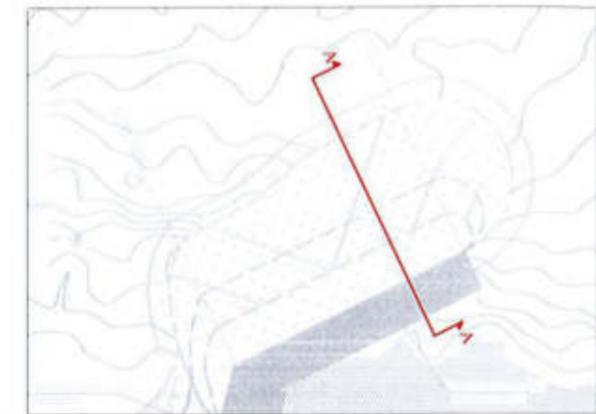
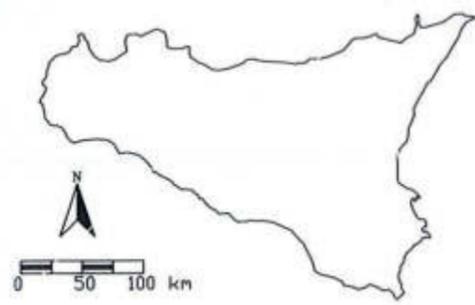
Configurazione 2

(mantellata sorretta da una fila di massi trapezoidali in calcestruzzo da 50 t con la scarpa rivolta lato mare e da una fila di Accropodi)

SEZIONE TIPO OPERA FORANEA
DALLA PROGR. 13.45m ALLA PROGR. 40.70m



Isola di Salina



Note:

Le tavole 2a e 2b si riferiscono alle sezioni prese in esame per la modellazione fisica. Tali sezioni sono relative alla progressiva compresa tra 13.45 m e 40.70 m. La tavola è stata redatta sulla base delle informazioni di progetto fornite dal Committente.



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANI
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE E AMBIENTALE

COMMITTENTE:
Dipartimento Infrastrutture Mobilità e Trasporti

Modellazione fisica della stabilità della
mantellata della diga foranea dello Scalo Galera
sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina
1° stralcio funzionale

**Sezione di progetto
dell'opera foranea
testate su modello
fisico**

Tavola:
2a
Scala:
1:250

Redatto da:
(Ing. Claudio Iuppa)
(Ing. Iliaria Zammuto)

File:
Tav1a5_
Planimetria e
sezioni.dwg

Data:
Settembre 2012

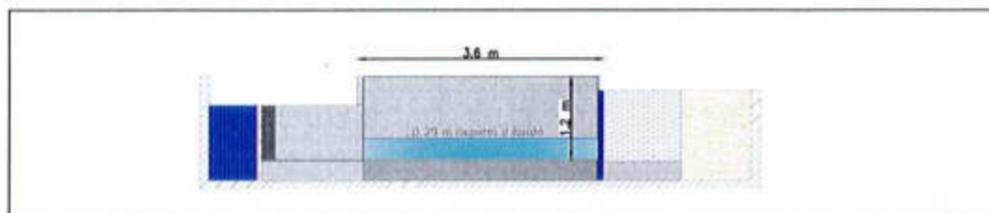
Il Responsabile Scientifico
(Ing. Rosaria Musumeci)

Il Direttore del DICA
(Prof. Ing. Enrico Foti)

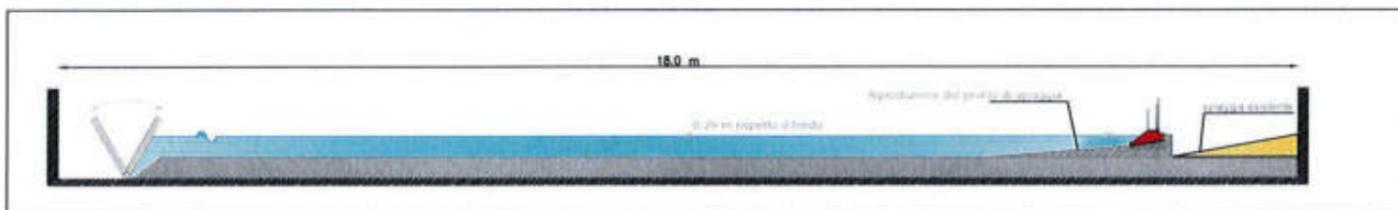
Pianta della vasca



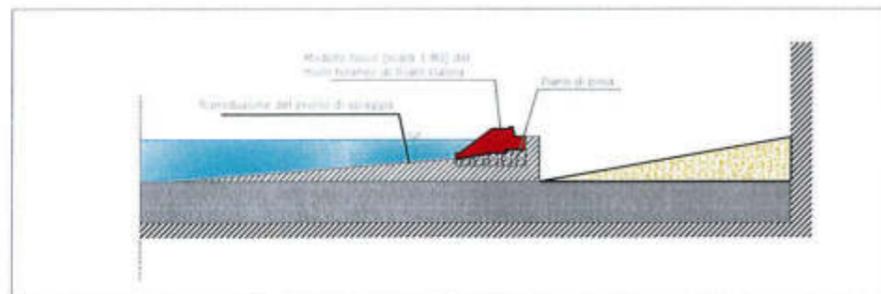
Sezione A-A



Sezione B-B



Particolare della struttura



Le prove sul modello fisico sono state condotte presso il Laboratorio di Idraulico del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale. Nella tabella si riassumono le dimensioni della vasca.

Caratteristiche della vasca	
Larghezza [m]	3.60
Lunghezza [m]	18.00
Altezza [m]	1.20

Caratteristiche dell'ondogeno	
Tipo battitore	A ventola
Tipo di controllo	Elettrico
Sistema di azionamento	Servosistema oleodinamico

Note:



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE E AMBIENTALE

COMMITTENTE:
Dipartimento Infrastrutture Mobilità e Trasporti

Modellazione fisica della stabilità della
mantellata della diga foranea dello Scalo Galera
sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina
1° stralcio funzionale

**Planimetria
della vasca**

Tavola:

3

Scala:

1:100

Redatto da:
(Ing. Claudio Iuppa)
(Ing. Ilaria Zammuto)

File:
Tav1a5_
Planimetria e
sezioni.dwg

Data:
Settembre 2012

Il Responsabile Scientifico
(Ing. Rosaria Musumeci)

Il Direttore del DICA
(Prof. Ing. Enrico Foti)

Telecamera ad alta risoluzione
(Sony HDR-PJ10E)



Macchina fotografica
(Sony EOS 1000D)



Sonda di livello resistiva (Sonda 1)



Sistema di controllo oleodinamico dell'ondogeno



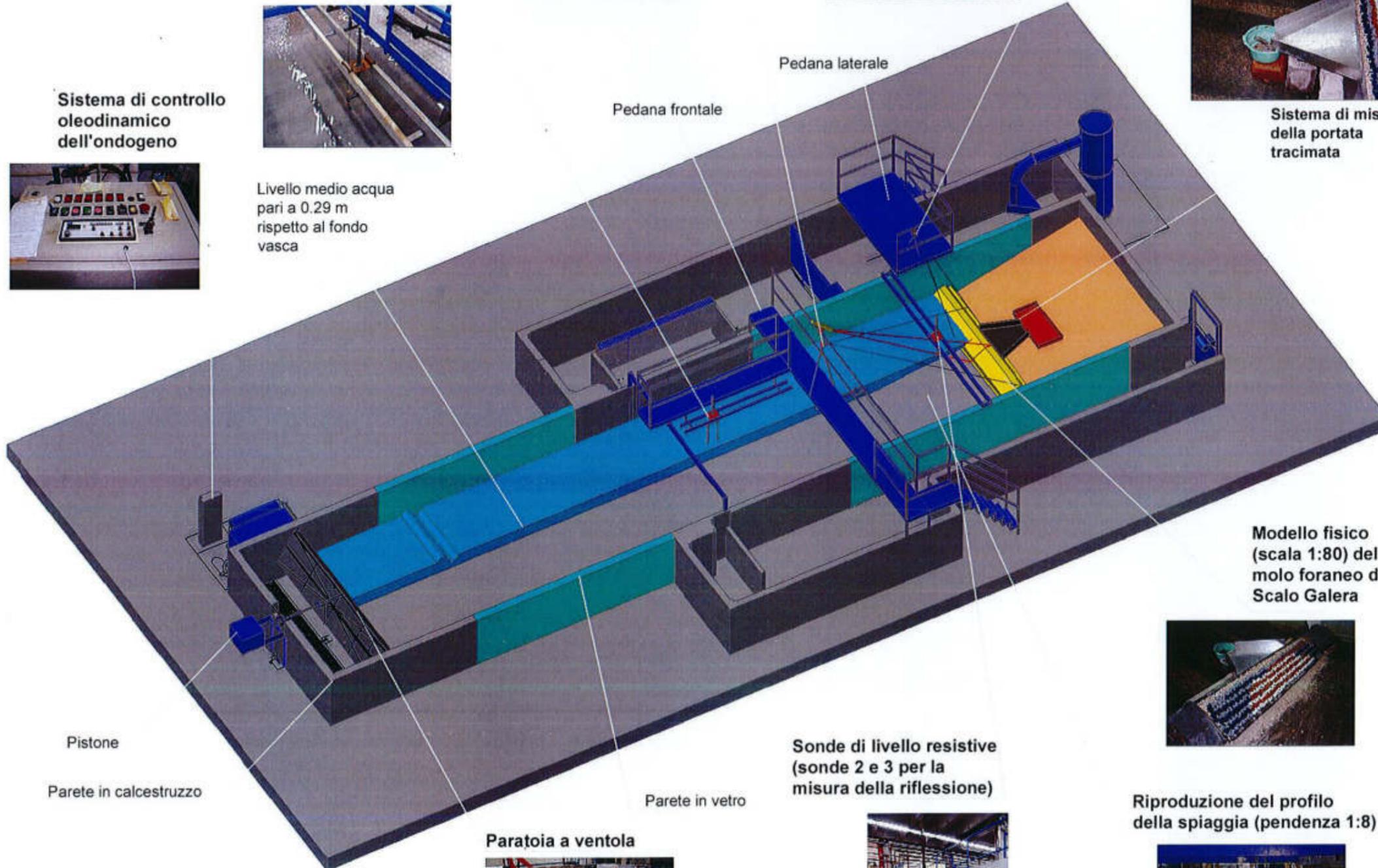
Livello medio acqua pari a 0.29 m rispetto al fondo vasca

Pedana laterale

Pedana frontale



Sistema di misura della portata traccinata



Modello fisico (scala 1:80) del molo foraneo di Scalo Galera



Sonde di livello resistive (sonde 2 e 3 per la misura della riflessione)



Riproduzione del profilo della spiaggia (pendenza 1:8)



Paratoia a ventola



Parete in vetro

Pistone

Parete in calcestruzzo

Note:

Le prove sul modello fisico sono state condotte presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale in scala 1:80.

L'apparato sperimentale è costituito da:

- una vasca di lunghezza pari a 18 m, di larghezza pari a 3.60 m e di altezza pari a 1.20 m;
- un battitore di tipo a ventola, per la generazione del moto ondoso, azionato da un servosistema oleodinamico con controllo elettronico.

Gli strumenti di misura utilizzati sono:

- 3 sonde resistive: una sonda (Sonda 1) è stata posizionata a una distanza pari a 5 m dal modello; due sonde (Sonda 2 e 3) sono state posizionate in prossimità del modello fisico, a una distanza pari a 1.50 m da quest'ultimo.
- Telecamera ad alta risoluzione, posizionata frontalmente rispetto al modello fisico.
- Macchina fotografica, posizionata lateralmente rispetto al modello fisico;

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE E AMBIENTALE

COMMITTENTE:
Dipartimento Infrastrutture Mobilità e Trasporti

Modellazione fisica della stabilità della mantellata della diga foranea dello Scalo Galera sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina
1° stralcio funzionale

Apparato sperimentale e posizionamento del modello 3D e della strumentazione di misura nella vasca di prova

Tavola:

4

Scala:

-

Redatto da:
(Ing. Claudio Iuppa)
(Ing. Ilaria Zammuto)

File:

Data:

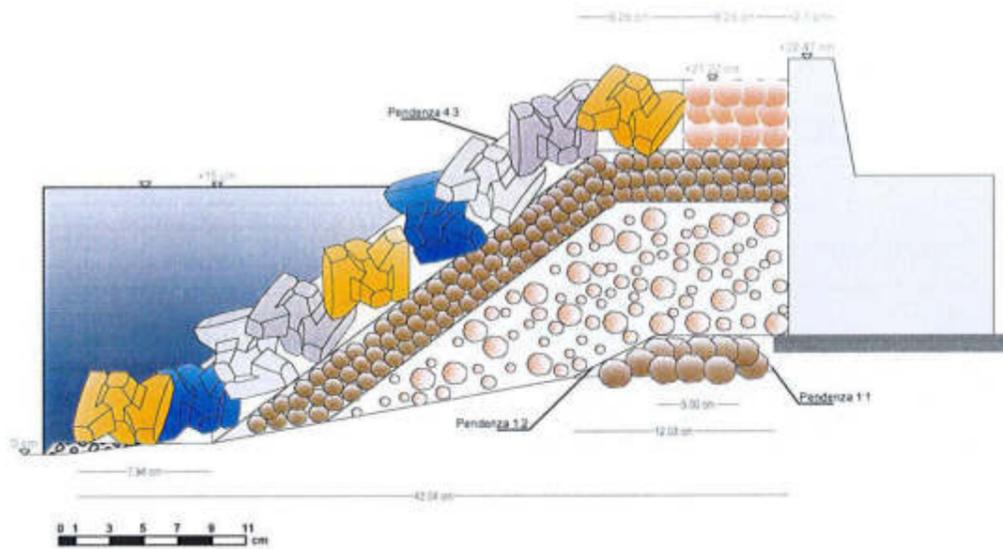
Settembre 2012

Il Responsabile Scientifico
(Ing. Rosaria Musumeci)

Il Direttore del DICA
(Prof. Ing. Enrico Foti)

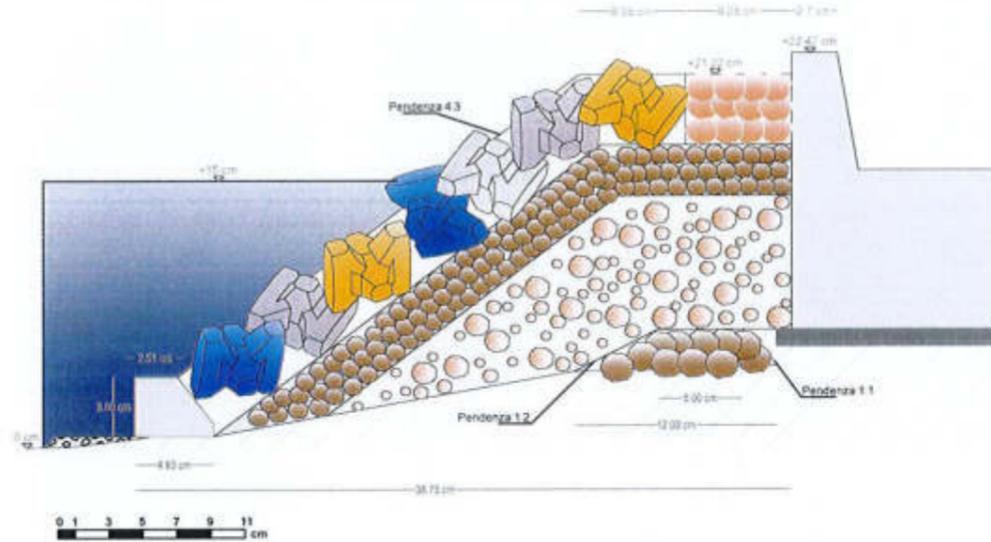
Configurazione 1

(mantellata sorretta da due file di Accropodi alla base)



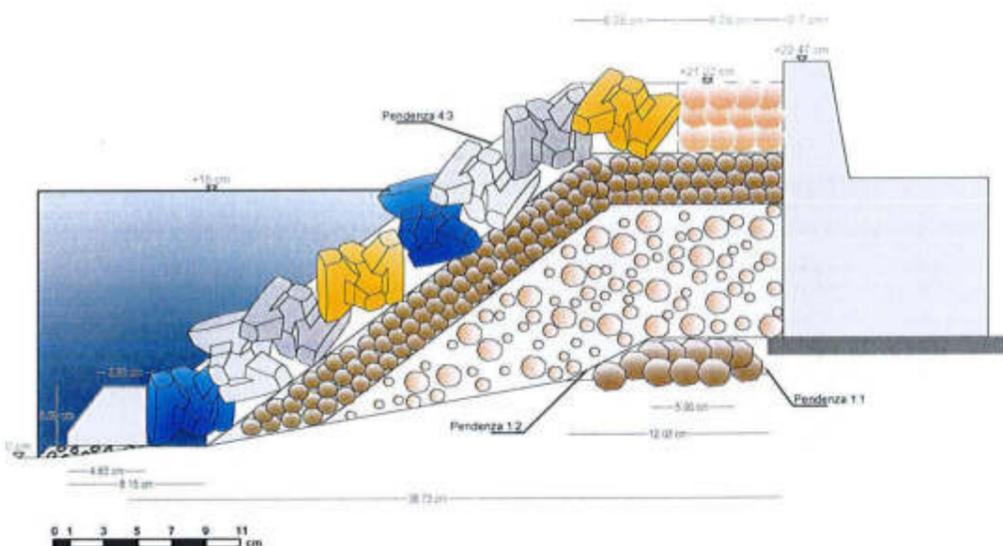
Configurazione 3

(mantellata sorretta da una fila di massi trapezoidali in calcestruzzo da 50 t con la scarpa lato terra a sostegno del piede)



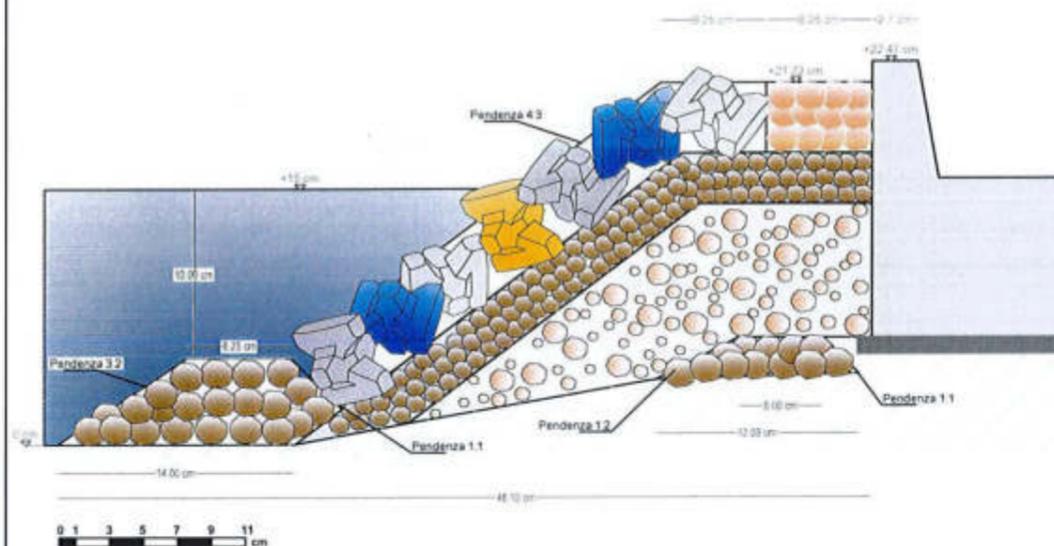
Configurazione 2

(mantellata sorretta da una fila di massi trapezoidali in calcestruzzo da 50 t con la scarpa rivolta lato mare e da una fila di Accropodi)



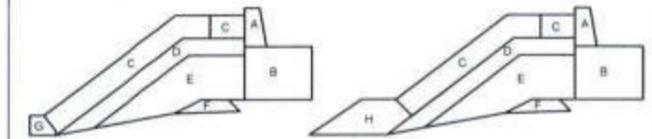
Configurazione 4

(mantellata sorretta da una berma in massi naturali di IV categoria)



Legenda:

	Muro paraonde
	Gettato in calcestruzzo
Mantellata	
	Prototipo
	Modello
- Scogli da IV categoria	- Marmo D= 30 mm
- Densità = 2500 kg/m ³	- Densità = 2500 kg/m ³
Base del nucleo e berma	
	Prototipo
	Modello
- Scogli da III cat per la base del nucleo	- Basato D= 15 - 20 mm
- Scogli da IV cat per la berma	- Densità = 2700 kg/m ³
Nucleo	
	Prototipo
	Modello
- Scogli da scarpamenti e I categoria	- Marmo D = 9 - 20 mm
- Densità = 2500 kg/m ³	- Densità = 2500 kg/m ³
Filtro	
	Prototipo
	Modello
- Scogli 2-5 t	- Basato D= 12.7 - 15 mm
- Densità = 2700 kg/m ³	- Densità = 2700 kg/m ³
Unghia	
	Prototipo
	Modello
- Scogli di I categoria selezionata	- Marmo D= 6.35 - 9.52 mm
- Densità = 2500 kg/m ³	- Densità = 2500 kg/m ³
Accropode	
	Prototipo
	Modello
- Accropode H=3.81m	- Accropode H=0.048 m
- Densità = 2300 kg/m ³	- Densità = 2300 kg/m ³
Masso al piede	
	Gettato in calcestruzzo



A: Muro paraonde
 B: Cassone cellulare
 C: Mantellata
 D: Filtro
 E: Nucleo
 F: Piano di posa nucleo
 G: Masso al piede
 H: Berma



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
 DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
 CIVILE E AMBIENTALE

COMMITTENTE:
 Dipartimento Infrastrutture Mobilità e Trasporti

Modellazione fisica della stabilità della
 mantellata della diga foranea dello Scalo Galera
 sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina
 1° stralcio funzionale

**Modellazione fisica
 delle sezioni
 alternative
 dell'opera foranea**

Tavola:

5

Scala:

-

Redatto da:
 (Ing. Claudio Iuppa)
 (Ing. Iliana Zammuto)

File:
 Tav1a5_...
 Planimetria e
 sezioni.dwg

Data:
 Settembre 2012

Il Responsabile Scientifico
 (Ing. Rosaria Musumeci)

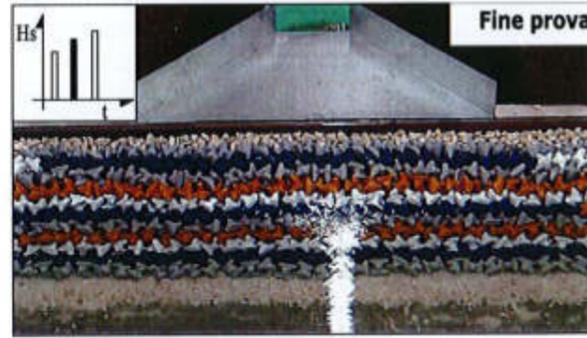
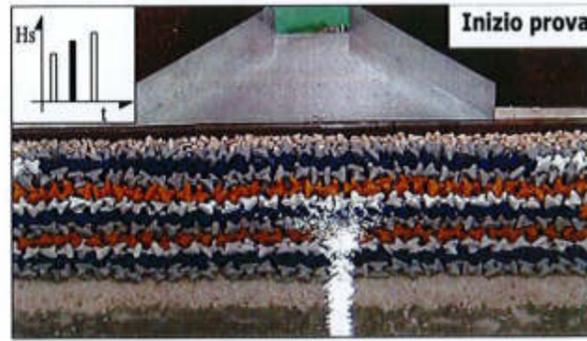
Il Direttore del DICA
 (Prof. Ing. Enrico Foti)

Prova A_1 (Shake down test)



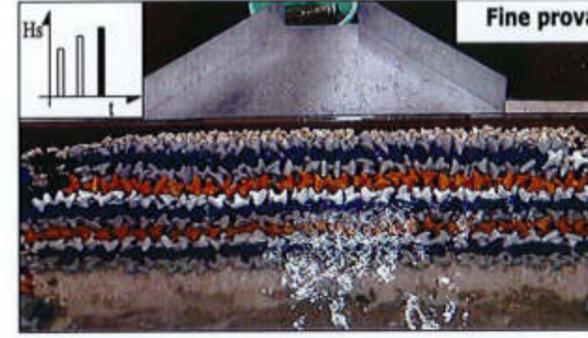
Prova A_1 (Shake down test)	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	3.26	0.04
Tm [s]	9.62	1.076
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	2.239	0.028
Hr [m]	0.901	0.011
Kr	0.403	0.403
Q [l/s m]	0.00	0.00

Prova A_2



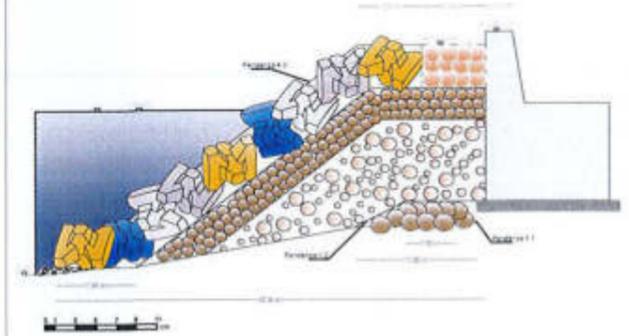
Prova A_2	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	6.52	0.08
Tm [s]	8.03	0.897
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	7.09	0.089
Hr [m]	1.83	0.023
Kr	0.258	0.258
Q [l/s m]	1.54	0.002

Prova A_3



Prova A_3	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	8.15	0.10
Tm [s]	8.96	1.001
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	9.08	0.114
Hr [m]	2.485	0.031
Kr	0.273	0.273
Q [l/s m]	18.97	0.027

Sezione del modello fisico



Caratteristiche del modello fisico

D _N Accropodi [cm]*	3.22
Altezza Accropodi [cm]	4.60
Densità di posa [n/100m ²]	9.17
Numero di Accropodi	204
Numero di massi al piede	20

Note:

Area di misura pari a 1m x 0.34m = 0.34m².
* il D_N degli Accropodi è stato calcolato come prodotto tra il coefficiente 0.7 e l'altezza degli Accropodi stessi.

** "s" è lo spostamento lineare dei massi

Danni masso al piede (percentuale di massi movimentati) **

		0.5 D _n < s < D _n	s > D _n
A_1	[%]	0.00	0.00
A_2	[%]	0.00	0.00
A_3	[%]	0.00	5.00

Danni mantellata (parametri Nd e Nod) **

		0.5 D _n < s < D _n	s > D _n	Normativa BS 6349
A_1	Nd [%]	0.00	0.00	Nulla
	Nod	0.00	0.00	Nulla
A_2	Nd [%]	0.00	0.00	Nulla
	Nod	0.00	0.00	Nulla
A_3	Nd [%]	0.00	0.00	Nulla
	Nod	0.00	0.00	Nulla



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE E AMBIENTALE

COMMITTENTE:

Dipartimento Infrastrutture Mobilità e Trasporti

Modellazione fisica della stabilità della
mantellata della diga foranea dello Scalo Galera
sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina
1° stralcio funzionale

**Risultati nella
configurazione
1**

Tavola:

6

Scala:

Redatto da:
(Ing. Claudio Iuppa)
(Ing. Ilaria Zammuto)

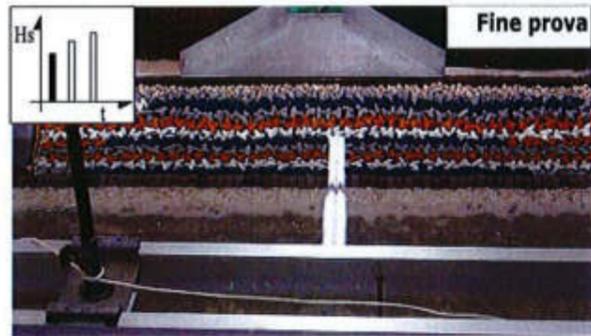
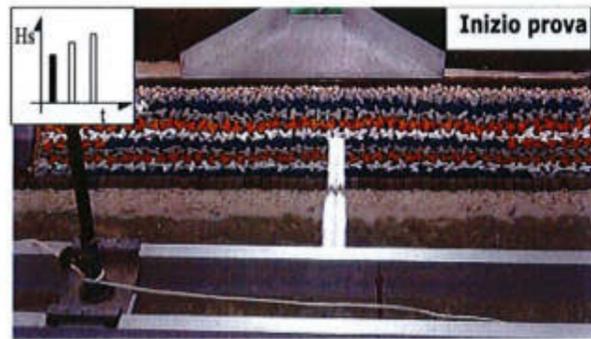
File:
Ta_6a10
Risultati prove
.dwg

Data:
Settembre 2012

Il Responsabile Scientifico
(Ing. Rosaria Musumeci)

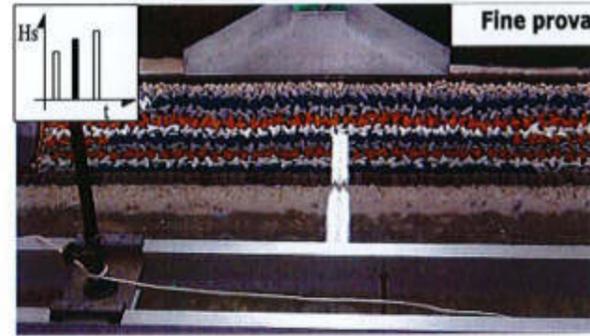
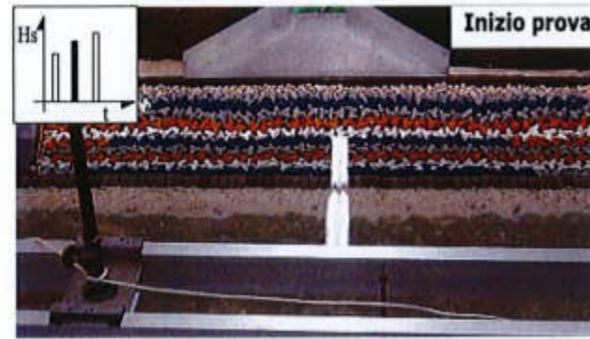
Il Direttore del DICA
(Prof. Ing. Enrico Foti)

Prova M_1 (Shake down test)



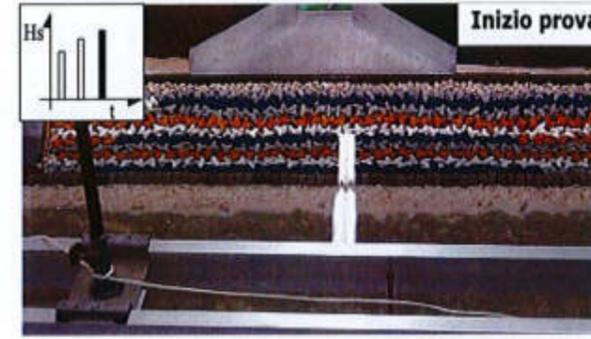
Prova M_1 (Shake down test)	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	3.26	0.04
Tm [s]	5.33	0.59
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	1.85	0.023
Hr [m]	0.52	0.007
Kr	0.285	0.285
Q [l/s m]	0.00	0.00

Prova M_2



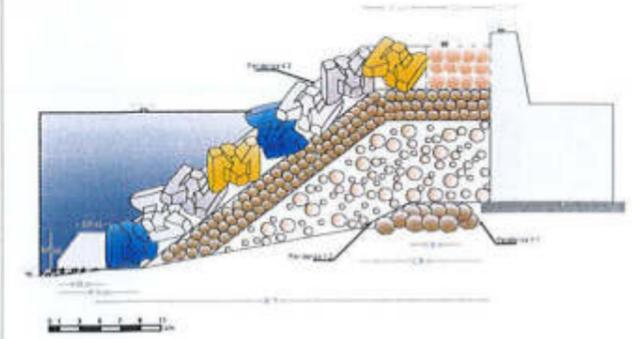
Prova M_2	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	6.52	0.080
Tm [s]	7.95	0.890
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	6.09	0.076
Hr [m]	6.095	0.020
Kr	0.265	0.265
Q [l/s m]	1.64	0.002

Prova M_3



Prova M_3	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	8.15	0.10
Tm [s]	8.78	0.982
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	7.99	0.100
Hr [m]	2.25	0.028
Kr	0.281	0.281
Q [l/s m]	14.09	0.020

Sezione del modello fisico



Caratteristiche del modello fisico

D _N Accropodi [cm]*	3.22
Altezza Accropodi [cm]	4.60
Densità di posa [n/100m ²]	9.22
Numero di Accropodi	202
Numero di massi al piede	29

Note:

Area di misura pari a 1m x 0.34m = 0.34m².
 * il D_N degli Accropodi è stato calcolato come prodotto tra il coefficiente 0.7 e l'altezza degli Accropodi stessi.

** "s" è lo spostamento lineare dei massi

Danni masso al piede (percentuale di massi movimentati) **

		0.5 D _n < s < D _n	s > D _n
M_1	[%]	0.00	0.00
M_2	[%]	0.00	0.00
M_3	[%]	37.93	48.28

Danni mantellata (parametri Nd e Nod) **

		0.5 D _n < s < D _n	s > D _n	Normativa BS 6349
M_1	Nd [%]	0.00	0.00	Nulla
	Nod	0.00	0.00	Nulla
M_2	Nd [%]	0.00	0.00	Nulla
	Nod	0.00	0.00	Nulla
M_3	Nd [%]	3.47	1.00	Nulla
	Nod	0.23	0.10	Piccolo

Danno alla struttura alla fine delle prove



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
 DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
 CIVILE E AMBIENTALE

COMMITTENTE:

Dipartimento Infrastrutture Mobilità e Trasporti

Modellazione fisica della stabilità della
 mantellata della diga foranea dello Scalo Galera
 sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina
 1° stralcio funzionale

**Risultati nella
 configurazione
 2**

Tavola:

7

Scala:

-

Redatto da:
 (Ing. Claudio Iuppa)
 (Ing. Ilaria Zammuto)

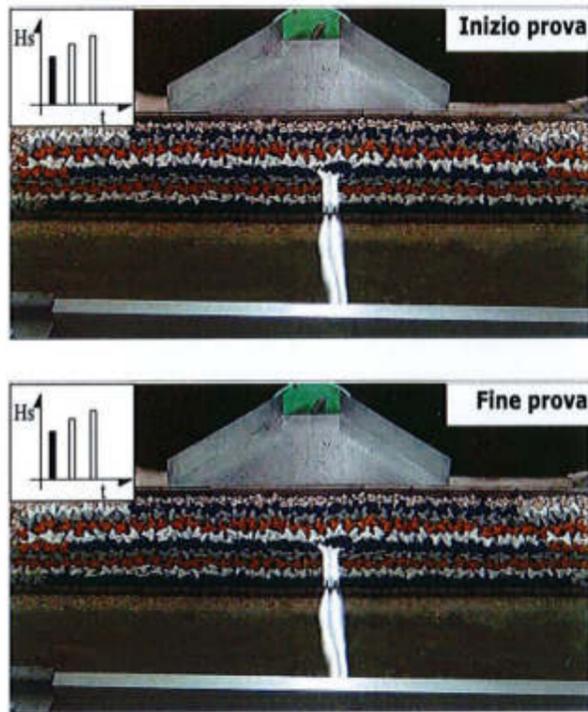
File:
 Ta_6a10
 Risultati prove
 .dwg

Data:
 Settembre 2012

Il Responsabile Scientifico
 (Ing. Rosaria Musumeci)

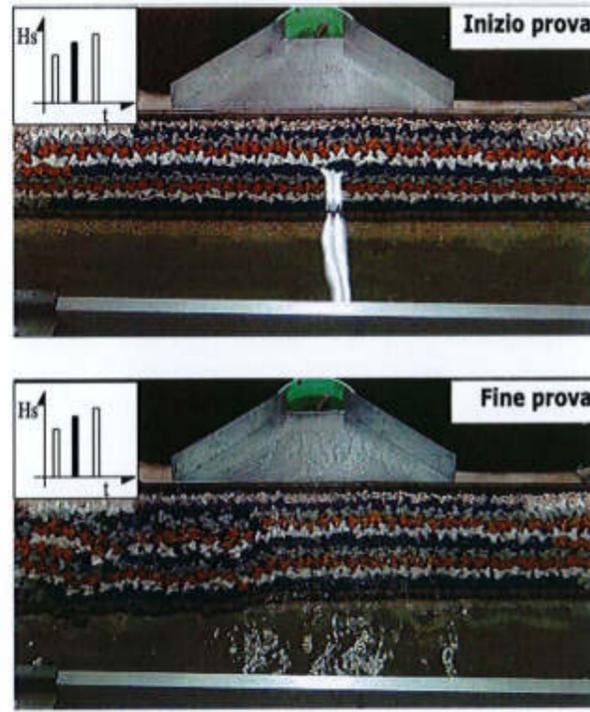
Il Direttore del DICA
 (Prof. Ing. Enrico Foti)

Prova MS_1 (Shake down test)



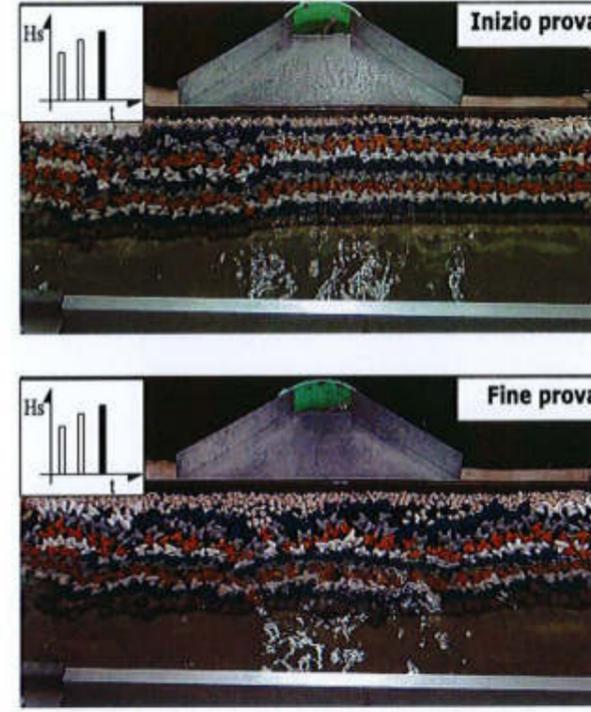
Prova MS_1 (Shake down test)	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	3.26	0.04
Tm [s]	6.11	0.684
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	1.68	0.021
Hr [m]	0.43	0.005
Kr	0.258	0.258
Q [l/s m]	0.00	0.00

Prova MS_2



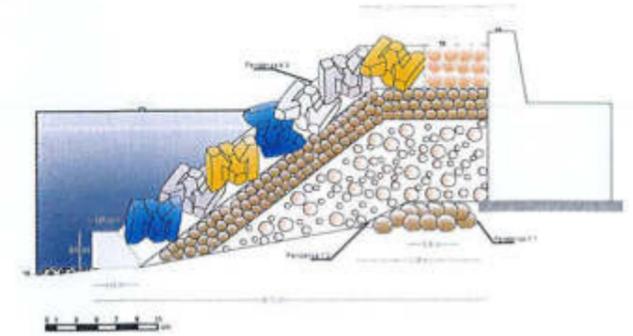
Prova MS_2	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	6.52	0.080
Tm [s]	7.95	0.889
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	6.24	0.078
Hr [m]	1.42	0.017
Kr	0.229	0.229
Q [l/s m]	2.38	0.003

Prova MS_3



Prova MS_3	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	8.15	0.10
Tm [s]	8.98	1.005
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	7.55	0.094
Hr [m]	1.88	0.023
Kr	0.249	0.249
Q [l/s m]	4.72	0.007

Sezione del modello fisico



Caratteristiche del modello fisico

D _N Accropodi [cm]*	3.22
Altezza Accropodi [cm]	4.60
Densità di posa [n/100m ²]	8.25
Numero di Accropodi	185
Numero di massi al piede	29

Note:

Area di misura pari a 1m x 0.34m = 0.34m².
* il D_N degli Accropodi è stato calcolato come prodotto tra il coefficiente 0.7 e l'altezza degli Accropodi stessi.

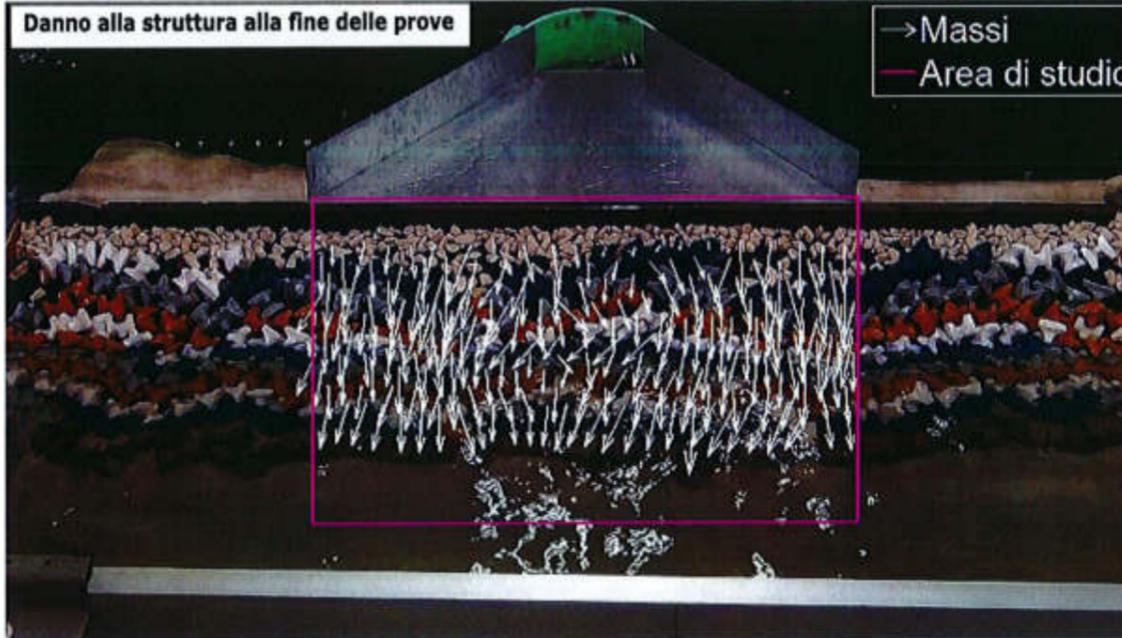
** "s" è lo spostamento lineare dei massi

Danno parziale del masso al piede (percentuale di massi movimentati) **

		0.5 D _n < s < D _n	s > D _n
MS_1	[%]	0.00	0.00
MS_2	[%]	41.38	24.14
MS_3	[%]	17.24	72.41

Danno parziale della mantellata (parametri Nd e Nod) **

		0.5 D _n < s < D _n	s > D _n	Normativa BS 6349
MS_1	Nd [%]	0.00	0.00	Nulla
	Nod	0.00	0.00	
MS_2	Nd [%]	9.19	27.57	Elevato
	Nod	0.55	1.64	
MS_3	Nd [%]	10.81	10.81	Elevato
	Nod	0.64	0.64	



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE E AMBIENTALE

COMMITTENTE:

Dipartimento Infrastrutture Mobilità e Trasporti

Modellazione fisica della stabilità della
mantellata della diga foranea dello Scalo Galera
sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina
1° stralcio funzionale

Risultati nella
configurazione
3

Tavola:

8a

Scala:

Redatto da:
(Ing. Claudio Iuppa)
(Ing. Iliara Zammuto)

File:
Ta_6a10
Risultati prove
.dwg

Data:
Settembre 2012

Il Responsabile Scientifico
(Ing. Rosaria Musumeci)

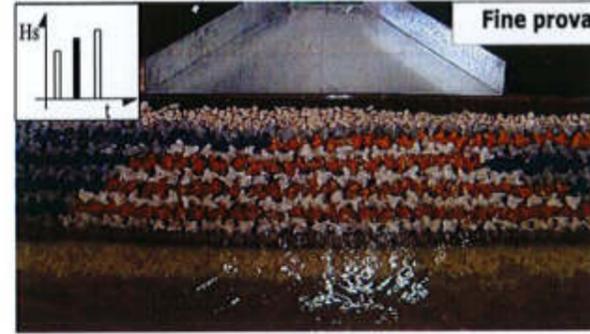
Il Direttore del DICA
(Prof. Ing. Enrico Foti)

Prova MS1_1 (Shake down test)



Prova MS1_1 (Shake down test)	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	3.26	0.04
Tm [s]	5.39	0.603
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	1.86	0.023
Hr [m]	0.57	0.007
Kr	0.309	0.309
Q [l/s m]	0.00	0.00

Prova MS2_2



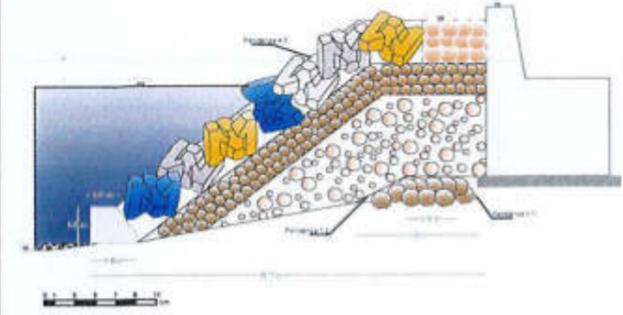
Prova MS2_2	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	6.52	0.080
Tm [s]	8.09	0.905
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	6.15	0.077
Hr [m]	1.51	0.019
Kr	0.246	0.246
Q [l/s m]	1.54	0.002

Prova MS3_3



Prova MS3_3	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	8.15	0.10
Tm [s]	8.87	0.992
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	7.07	0.096
Hr [m]	2.14	0.027
Kr	0.278	0.278
Q [l/s m]	16.37	0.023

Sezione del modello fisico



Caratteristiche del modello fisico

D _N Accropodi [cm]*	3.22
Altezza Accropodi [cm]	4.60
Densità di posa [n/100m ²]	8.25
Numero di Accropodi	185
Numero di massi al piede	29

Note:

Area di misura pari a 1m x 0.34m = 0.34m².
* il D_N degli Accropodi è stato calcolato come prodotto tra il coefficiente 0.7 e l'altezza degli Accropodi stessi.

** "s" è lo spostamento lineare dei massi

Danno parziale del masso al piede (percentuale di massi movimentati) **

		0.5 D _n < s < D _n	s > D _n
MS1_1	[%]	0.00	0.00
MS2_2	[%]	0.00	0.00
MS3_3	[%]	12.50	6.3

Danno parziale della mantellatura (parametri Nd e Nod) **

		0.5 D _n < s < D _n	s > D _n	Normativa BS 6349
MS1_1	Nd [%]	0.00	0.00	Nullo
	Nod	0.00	0.00	
MS2_2	Nd [%]	0.00	0.00	Nullo
	Nod	0.00	0.00	
MS3_3	Nd [%]	19.30	11.40	Elevato
	Nod	1.10	0.60	



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE E AMBIENTALE

COMMITTENTE:

Dipartimento Infrastrutture Mobilità e Trasporti

Modellazione fisica della stabilità della
mantellatura della diga foranea dello Scalo Galera
sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina
1° stralcio funzionale

**Risultati nella
configurazione
3**

Tavola:

8b

Scala:

Redatto da:
(Ing. Claudio Iuppa)
(Ing. Ilenia Zammuto)

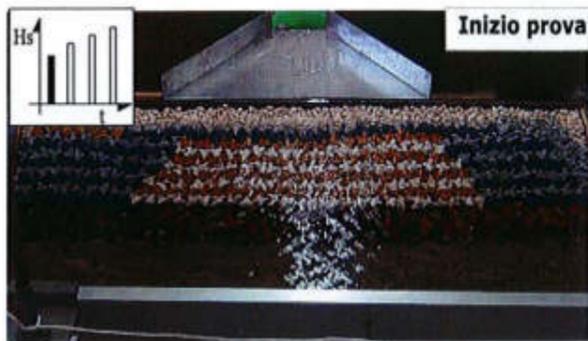
File:
Ta_6a10
Risultati prove
.dwg

Data:
Settembre 2012

Il Responsabile Scientifico
(Ing. Rosaria Musumeci)

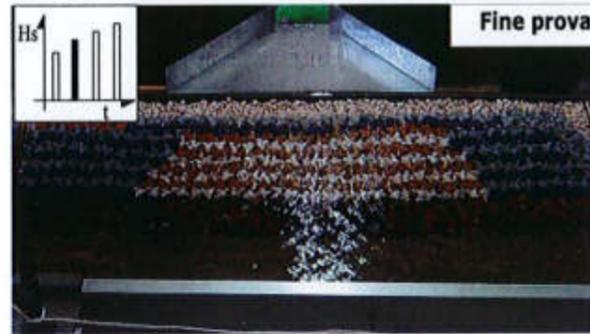
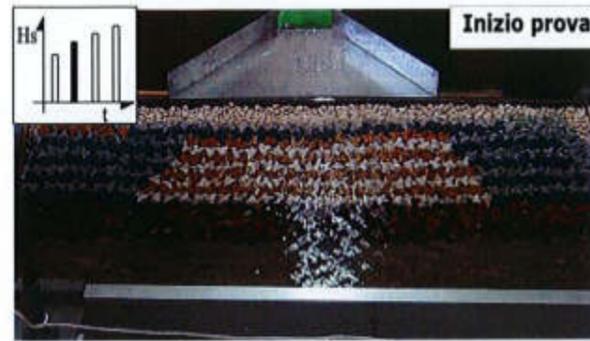
Il Direttore del DICA
(Prof. Ing. Enrico Foti)

Prova B_1 (Shake down test)



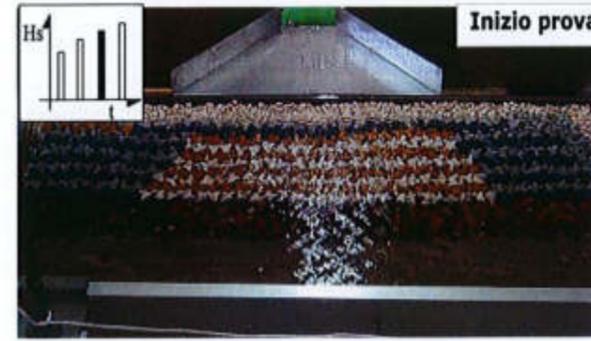
Prova B_1 (Shake down test)	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	3.26	0.04
Tm [s]	5.36	0.600
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	1.89	0.024
Hr [m]	0.58	0.007
Kr	0.309	0.309
Q [l/s m]	0.00	0.00

Prova B_2



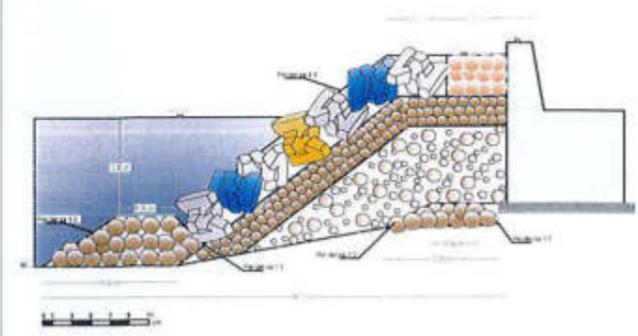
Prova B_2	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	6.52	0.080
Tm [s]	7.89	0.822
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	6.09	0.076
Hr [m]	1.47	0.018
Kr	0.241	0.241
Q [l/s m]	1.23	0.002

Prova B_3



Prova B_3	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	8.15	0.10
Tm [s]	8.95	1.001
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	7.82	0.098
Hr [m]	2.04	0.026
Kr	0.262	0.262
Q [l/s m]	12.23	0.017

Sezione del modello fisico



Caratteristiche del modello fisico

D _N Accropodi [cm]*	3.22
Altezza Accropodi [cm]	4.60
Densità di posa [n/100m ²]	9.93
Numero di Accropodi	200
Numero di massi al piede	0

Note:

Area di misura pari a 1m x 0.34m = 0.34m².
 * il D_N degli Accropodi è stato calcolato come prodotto tra il coefficiente 0.7 e l'altezza degli Accropodi stessi.

** "s" è lo spostamento lineare dei massi



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
 DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
 CIVILE E AMBIENTALE

COMMITTENTE:

Dipartimento Infrastrutture Mobilità e Trasporti

Modellazione fisica della stabilità della
 mantellata della diga foranea dello Scalo Galera
 sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina
 1° stralcio funzionale

**Risultati nella
 configurazione
 4**

Tavola:

9a

Scala:

Redatto da:
 (Ing. Claudio Iuppa)
 (Ing. Iliaria Zammuto)

File:
 Ta_6a10
 Risultati prove
 .dwg

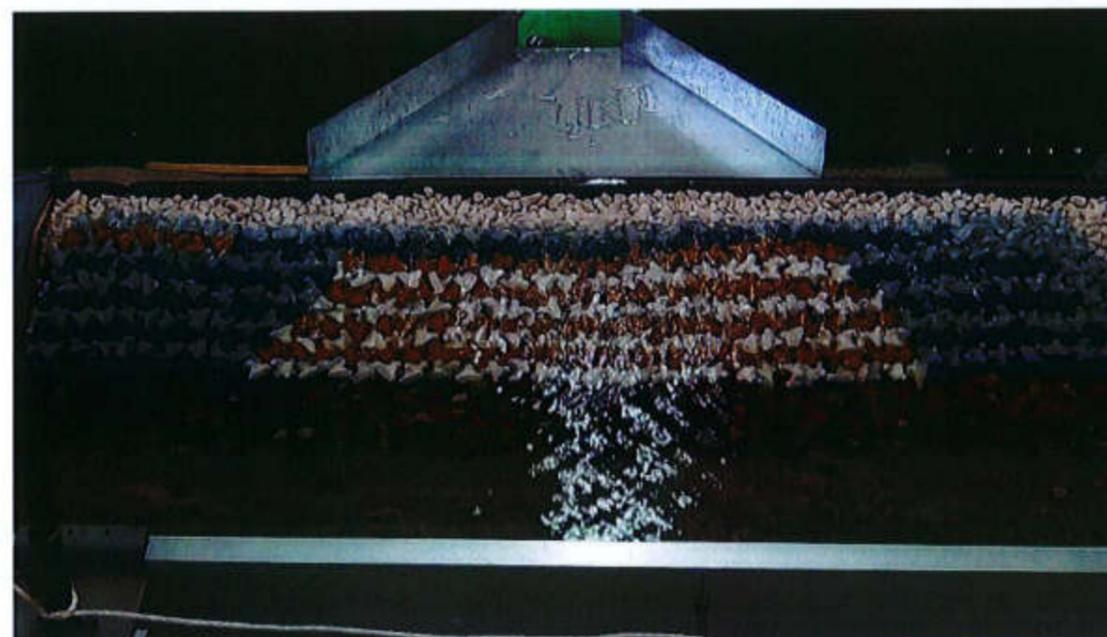
Data:
 Settembre 2012

Il Responsabile Scientifico
 (Ing. Rosaria Musumeci)

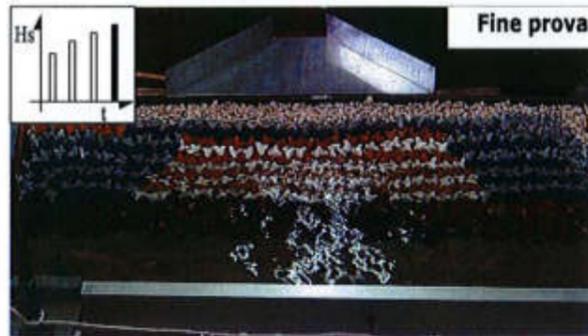
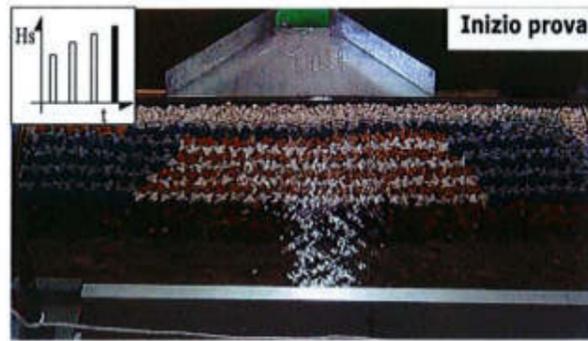
Il Direttore del DICA
 (Prof. Ing. Enrico Foti)

Danno parziale della mantellata (parametri Nd e Nod) **

		0.5 D _n < s < D _n	s > D _n	Normativa BS 6349
B_1	Nd [%]	0.00	0.00	Nulla
	Nod	0.00	0.00	
B_2	Nd [%]	0.00	0.00	Nulla
	Nod	0.00	0.00	
B_3	Nd [%]	0.00	0.00	Nulla
	Nod	0.00	0.00	



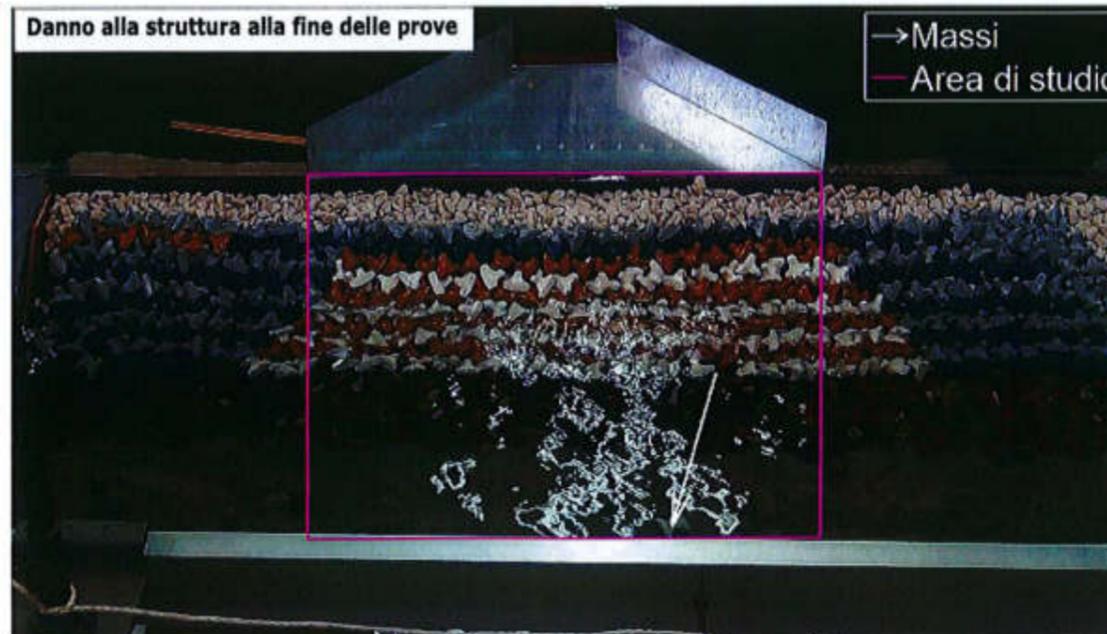
Prova B_4



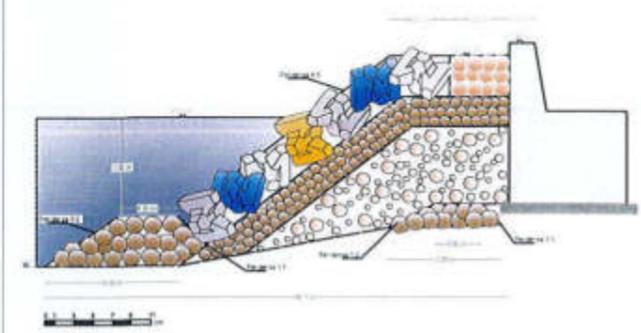
Prova B_4	Prototipo	Modello
<i>Caratteristiche del moto ondoso</i>		
Hs [m]	9.78	0.12
Tm [s]	10.45	1.169
<i>Riflessione e portata tracimata</i>		
Hi [m]	8.03	0.100
Hr [m]	2.49	0.031
Kr	0.310	0.310
Q [l/s m]	23.77	0.033

Danno parziale della mantellata (parametri Nd e Nod) **

		0.5 D _n < s < D _n	s > D _n	Normativa BS 6349
B_4	Nd [%]	0.50	0.50	Piccolo
	Nod	0.03	0.03	



Sezione del modello fisico



Caratteristiche del modello fisico

D _N Accropodi [cm]*	3.22
Altezza Accropodi [cm]	4.60
Densità di posa [n/100m ²]	9.93
Numero di Accropodi	200
Numero di massi al piede	0

Note:

Area di misura pari a 1m x 0.34m = 0.34m².
* il D_N degli Accropodi è stato calcolato come prodotto tra il coefficiente 0.7 e l'altezza degli Accropodi stessi.

** "s" è lo spostamento lineare dei massi



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE E AMBIENTALE

COMMITTENTE:

Dipartimento Infrastrutture Mobilità e Trasporti

Modellazione fisica della stabilità della
mantellata della diga foranea dello Scalo Galera
sito nel Comune di Malfa, Isola di Salina
1° stralcio funzionale

**Risultati nella
configurazione
4**

Tavola:

9b

Scala:

Redatto da:
(Ing. Claudio Iuppa)
(Ing. Iliara Zammuto)

File:
Ta_6a10
Risultati prove
.dwg

Data:
Settembre 2012

Il Responsabile Scientifico
(Ing. Rosaria Musumeci)

Il Direttore del DICA
(Prof. Ing. Enrico Foti)