

**ALLEGATO 11 – REPORT PROVE SU MODELLO FISICO ESEGUITE  
PRESSO I LABORATORI DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA  
SULLA SEZIONE TIPO DEL PROLUNGAMENTO DELLA DIGA FORANEA  
DI SOPRAFLUTTO**



Convenzione tra il  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura  
dell'Università degli Studi di Catania



e il  
Comune di Isola delle Femmine (Palermo)

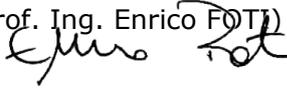
---

*Studio su modello fisico della sezione  
corrente della diga foranea del porto di Isola  
delle Femmine*

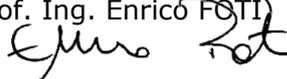
---

Relazione finale

Il Responsabile Scientifico

(Prof. Ing. Enrico Foti)  


Il Direttore del DICAR

(Prof. Ing. Enrico Foti)  


Gennaio 2020

---

## Indice

Lista delle Figure.....	4
Lista delle Tabelle .....	11
1 Premessa .....	14
2 Introduzione .....	16
2.1 Obiettivi dell'indagine sperimentale.....	24
2.2 Fonti di informazione.....	25
2.3 Limiti della modellazione fisica .....	26
3 Verifica di stabilità di strutture a gettata su modello fisico.....	28
3.1 Generalità .....	28
3.2 Criteri di similitudine per modelli fisici di strutture a scogliera ....	28
3.2.1 Modello geometricamente non distorto .....	31
3.2.2 Flussi idrodinamici conformi al criterio di Froude .....	31
3.2.3 Modello con condizioni di moto turbolento attraverso lo strato primario .....	32
3.2.4 Controllo degli effetti della scabrezza superficiale .....	33
3.2.5 Controllo della densità del materiale del modello .....	33
3.3 Effetti di scala .....	37
3.3.1 Effetti viscosi.....	37
3.3.2 Effetti sulla riflessione e sulla trasmissione .....	38
3.3.3 Effetti dovuti alla diversa densità dell'acqua.....	38
3.3.4 Effetti dovuti all'attrito .....	39
3.3.5 Effetti dovuti all'aerazione .....	40
3.4 Criteri di progettazione del modello fisico e di conduzione degli esperimenti .....	40
3.4.1 Set-up del modello fisico .....	41
3.4.2 Operazioni sul modello fisico.....	45
3.4.3 Procedure di analisi .....	48

---

4	Caratteristiche del modello fisico realizzato .....	58
4.1	Generalità .....	58
4.2	Apparato sperimentale .....	58
4.2.1	La vasca di sperimentazione .....	59
4.2.2	Sistema per la generazione del moto ondoso .....	64
4.3	Strumentazione di misura utilizzata .....	67
4.3.1	Misura del moto ondoso .....	67
4.3.2	Misura del danno subito dalla mantellata esterna .....	69
4.3.3	Acquisizioni per la misura della portata tracimata .....	71
4.4	Descrizione del modello fisico della mantellata .....	72
4.4.1	Caratteristiche del materiale utilizzato .....	76
4.4.2	Caratteristiche degli Accropodi .....	78
4.4.3	Costruzione del modello fisico .....	81
5	Procedura sperimentale .....	92
5.1	Generalità .....	92
5.2	Procedura per l'esecuzione degli esperimenti .....	92
5.3	Procedura per l'elaborazione dei dati sperimentali .....	96
5.3.1	Analisi del moto ondoso .....	96
5.3.2	Analisi del danno subito dalla mantellata .....	98
5.3.3	Analisi delle portate tracimate .....	100
6	Esperimenti condotti .....	102
6.1	Generalità .....	102
6.2	Prove effettuate per la valutazione della tracimazione e della riflessione .....	102
6.3	Prove effettuate per la valutazione del danno .....	105
6.4	Analisi della riflessione .....	108
6.6	Analisi della tracimazione .....	111
6.7	Analisi del danno .....	114

---

6.7.1	Analisi delle variazioni di quota altimetrica della mantellata	114
6.7.2	Parametri $N_d$ e $N_{od}$	122
7	Analisi dei risultati e conclusioni	128
	Bibliografia	134
	Allegato 1 – Schede degli esperimenti	138
1.	Scheda degli esperimenti di giorno 9 dicembre 2019	139
2.	Scheda degli esperimenti di giorno 10 dicembre 2019	143
3.	Scheda degli esperimenti di giorno 11 dicembre 2019	147
4.	Scheda degli esperimenti di giorno 12 dicembre 2019	151
5.	Scheda degli esperimenti di giorno 13 dicembre 2019	155
6.	Scheda degli esperimenti di giorno 16 dicembre 2019	159
7.	Scheda degli esperimenti di giorno 16 dicembre 2019	163
	Allegato 2 – Analisi spettrale del moto ondoso misurato nelle prove condotte per la verifica di stabilità della mantellata	167
	Allegato 3 – Report fotografico delle prove di stabilità della mantellata	176
1.	Stato di mare I (80% dell'onda di progetto)	177
2.	Stato di mare II (onda con tempo di ritorno 50 anni)	181
3.	Stato di mare III (onda con tempo di ritorno 100 anni, onda di progetto)	184
4.	Stato di mare IV (120% dell'onda di progetto)	187

---

## Lista delle Figure

Figura 2.1	Localizzazione del porto di Isola delle Femmine. (Mappa: Carta nautica dell'Istituto Idrografico della Marina Militare Italiano "Da Capo Rama a Capo Zafferano e Isola di Ustica", scala 1:100 000) .....16
Figura 2.2	Localizzazione del porto di Isola delle Femmine. (Ortofoto della Regione Siciliana - Assessorato Territorio e Ambiente - Area 2 Interdipartimentale "Ortofoto Regione Siciliana ATA 2007-2008 - WGS84 Web Mercatore"). .....17
Figura 2.3	Il porto di Isola delle Femmine. (fonte: <a href="https://www.pagineazzurre.com/porti-della-sicilia/porto-isola-delle-femmine">https://www.pagineazzurre.com/porti-della-sicilia/porto-isola-delle-femmine</a> ) .....17
Figura 2.4	Progetto esecutivo delle nuove opere previste nel porto di Isola delle Femmine: Planimetria delle nuove opere. ....19
Figura 2.5	Progetto esecutivo delle nuove opere previste nel porto di Isola delle Femmine: sezione tipo del prolungamento della diga di sopraflutto esistente dalla prog. 92 m alla prog. 108.10 m. ....20
Figura 2.6	Progetto esecutivo delle nuove opere previste nel porto di Isola delle Femmine: sezione tipo del prolungamento della diga di sopraflutto esistente dalla prog. 108.10 m alla prog. 123.10 m. ....20
Figura 2.7	Progetto esecutivo delle nuove opere previste nel porto di Isola delle Femmine: sezione tipo del prolungamento della diga di sopraflutto esistente dalla prog. 123.10 m alla prog. 135.20 m. ....21
Figura 2.8	Progetto esecutivo delle nuove opere previste nel porto di Isola delle Femmine: sezione tipo del prolungamento della diga di sopraflutto esistente dalla prog. 135.20 m alla prog. 362.10 m. ....21
Figura 4.1	Vasca di sperimentazione utilizzata per la modellazione fisica della diga foranea del porto di Isola delle Femmine:

---

	planimetria della vasca prima dell'avvia dell'indagine sperimentale sulla diga foranea del porto di Isola delle Femmine. ....	61
Figura 4.2	Vasca di sperimentazione utilizzata per la modellazione fisica della diga foranea del porto di Isola delle Femmine: planimetria della vasca dopo la realizzazione della pendenza.	62
Figura 4.3	Vasca di sperimentazione utilizzata per la modellazione fisica della diga foranea del porto di Isola delle Femmine: sezione trasversale della vasca dopo la realizzazione della pendenza.	63
Figura 4.4	Particolare della vasca di sperimentazione, con la pendenza e il modello fisico realizzati al suo interno. ....	63
Figura 4.5	Interfaccia del software <i>jwg.exe</i> per la generazione delle onde irregolari.....	66
Figura 4.6	Componenti del sistema di generazione delle onde irregolari: a) Laptop Acer dotato di software di controllo <i>jwg.exe</i> ; 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. ....	67
Figura 4.7	Sistema per l'acquisizione delle caratteristiche del moto ondoso: a) sonde resistive 1, 2, 3, 4; b) sonda resistiva 5. ...	68
Figura 4.8	Scheda d'acquisizione National Instrument (NIUSB 6008)...	69
Figura 4.9	Strumenti di misura ottici usati negli studi condotti in laboratorio: a) videocamera Sony modello HDR-CX410VE; b) videocamera Sony modello FDR-AX53; c) macchina fotografica compatta Sony Cyber-shot, modello DSC-HX9V 16.2 MP G Lens.....	70
Figura 4.10	Sistema di misura della tracimazione: a) Componenti del sistema di misura; b) sonda acustica <i>Pepperl Fuchs</i> , modello UC500-30GM70-IE2R2-V15; c) pompa <i>Newa</i> , modello NEW-JET NJ 6000 LITRI ORA NJ6000. ....	72
Figura 4.11	Sezione tipo del prolungamento della diga di sopraflutto esiste del porto di Isola delle Femmine.....	74
Figura 4.12	Configurazioni analizzate nell'ambito della campagna sperimentale effettuata presso il Laboratorio di Idraulica del	

---

---

	Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura: a) Configurazione 1, rappresentativa delle sezione tipo prevista dal progetto definitivo; b) Configurazione 2, in cui le file di Accropodi sono state estese fino al muro paraonde e disposte in modo da non superare la quota di coronamento del muro paraonde.....	75
Figura 4.13	Vista tridimensionale e viste laterali dell'Accropode. ....	79
Figura 4.14	Accropodi realizzati mediante colatura di una miscela di resina, polvere di basalto e polvere di ferro. ....	81
Figura 4.15	Realizzazione della batimetrica idealizzata del fondo con una spiaggia piana avente pendenza pari a 6.5%.....	82
Figura 4.16	Riproduzione della sezione della diga sulle pareti del canale.	83
Figura 4.17	Casseforme di legno appositamente realizzate per la realizzazione dei moduli del muro paraonde. ....	84
Figura 4.18	Sistemazione del muro paraonde al di sopra di massetti in calcestruzzo.....	84
Figura 4.19	Sistemazione del muro paraonde: impiego di geotessuto per la sistemazione allineata delle diversi moduli del muro paraonde. ....	85
Figura 4.20	Posa in opera di granulato di marmo per la riproduzione dall'andamento plano-altimetrico del terreno al disotto della diga.....	85
Figura 4.21	Posa in opera di granulato di marmo per la riproduzione dall'andamento plano-altimetrico del terreno al disotto della diga: configurazione finale. ....	86
Figura 4.22	Posa in opera della parte interna del nucleo e del secondo strato filtro. ....	86
Figura 4.23	Posa in opera della parte interna del nucleo e del secondo strato filtro: configurazione finale.....	87
Figura 4.24	Posa in opera del materiale basaltico (diametro teorico compreso tra 16.1-18.1 mm) per la realizzazione della berma.....	87

---

Figura 4.25	Posa in opera del materiale basaltico (diametro teorico compreso tra 16.1-18.1 mm) per la realizzazione della berma: configurazione finale. ....	88
Figura 4.26	Posa in opera del materiale basaltico (diametro teorico compreso tra 12.1-14.9 mm) per la realizzazione del primo strato filtro. ....	88
Figura 4.27	Configurazione 1: posa in opera degli Accropodi da 16 m <sup>3</sup> a scala di prototipo. ....	90
Figura 4.28	Configurazione 2: posa in opera degli Accropodi da 16 m <sup>3</sup> a scala di prototipo. ....	90
Figura 5.1	Scheda di laboratorio compilata durante la campagna sperimentale (1 di 2). ....	95
Figura 5.2	Scheda di laboratorio compilata durante la campagna sperimentale (2 di 2). ....	96
Figura 5.3	Esempio dei risultati dell'analisi spettrale condotta sulle sonde 1, 2, 3 e 4. ....	97
Figura 5.4	Esempio dei risultati dell'analisi spettrale condotta mediante il metodo delle quattro sonde (Faraci et al., 2015). ....	98
Figura 5.5	Nuvola di punti tridimensionali del modello fisico ricostruita attraverso la tecnica del tecnica fotogrammetrica dello <i>Structure from Motion</i> . ....	100
Figura 5.6	Esempio del livello idrico rilevato dalla sonda acustica posizionata sopra la vaschetta di raccolta dei volumi tracinati a tergo del modello. $\Delta h$ indica il volume tracinato misurato in funzione della differenza tra il livello idrico alla fine del test e quello iniziale.....	101
Figura 6.1	Confronto tra i valori del coefficiente di riflessione stimato per diverse tipologie di strutture e quello stimato mediante il metodo proposto da Zanuttigh e van der Meer (2008). (Fonte: Zanuttigh e van der Meer (2008)).....	109
Figura 6.2	Confronto tra il coefficiente di riflessione stimato nella configurazione 1, nella configurazione 2 e i valori stimati mediante il metodo proposto da Zanuttigh e van der Meer (2008). ....	110

---

---

Figura 6.3	Confronto tra le portate misurate nella campagna sperimentale, la formula empirica fornita dall’Eurotop Manual (2018) e i valori di portata ricavati da una campagna sperimentale condotta sugli Accropodi descritta in Bruce <i>et al.</i> (2009). .....112
Figura 6.4	Portata media tracimata a tergo della struttura per unità di larghezza della diga. Confronto tra la Configurazione 1 e la Configurazione 2. Le linee in ciano indicano i tempi di ritorno delle altezze d’onda significative. La linea rossa relativa alla porta 0.3 l/s/m indica una portata oltre la quale si potrebbero avere condizioni di pericolo per i pedoni e per i veicoli. La linea rossa relativa alla porta 5 l/s/m indica una portata oltre la quale si potrebbero avere condizioni di pericolo per i natanti ormeggiati a tergo della diga. ....113
Figura 6.5	Analisi del danno: a) configurazione iniziale; b) configurazione dopo la simulazione degli stati di mare I e II; c) differenza delle quote altimetriche della mantellata. ....116
Figura 6.6	Analisi del danno: a) configurazione dopo la simulazione degli stati di mare I e II; b) configurazione dopo la simulazione dello stato di mare III; c) differenza delle quote altimetriche della mantellata. ....117
Figura 6.7	Analisi del danno: a) configurazione dopo la simulazione dello stato di mare III; b) configurazione dopo la simulazione dello stato di mare IV; c) differenza delle quote altimetriche della mantellata. ....118
Figura 6.8	Vista dell’alto della configurazione iniziale della mantellata del modello fisico. ....120
Figura 6.9	Vista dell’alto della configurazione dopo la simulazione dello stato di mare IV, ossia lo stato di mare caratterizzato da un’altezza significativa pari al 120% dell’altezza d’onda significativa di progetto.....120
Figura 6.10	Analisi del danno: a) configurazione iniziale; b) configurazione dopo la simulazione dello stato di mare IV; c) differenza delle quote altimetriche della mantellata.....121

---

---

Figura 6.11	Analisi del danno cumulato: evoluzione dello stato della diga a seguito delle diverse mareggiate simulate.....	124
Figura 6.12	Indicazione sugli spostamenti degli Accropodi dovuti all'azione del moto ondoso. Massi spostati al piede del modello. ....	125
Figura 6.13	Indicazione sugli spostamenti degli Accropodi dovuti all'azione del moto ondoso: configurazione iniziale della mantellata; b) configurazione della mantellata dopo la simulazione dello stato di mare IV. ....	126
Figura A. 1	Analisi spettrale per lo stato di mare I (80% dell'onda di progetto): onda 1. ....	168
Figura A. 2	Analisi spettrale per lo stato di mare I (80% dell'onda di progetto): onda 2. ....	168
Figura A. 3	Analisi spettrale per lo stato di mare III (80% dell'onda di progetto): onda 3. ....	169
Figura A. 4	Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 50 anni): onda 1. ....	170
Figura A. 5	Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 50 anni): onda 2. ....	170
Figura A. 6	Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 50 anni): onda 3. ....	171
Figura A. 7	Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 100 anni, onda di progetto): onda 1. ....	172
Figura A. 8	Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 100 anni, onda di progetto): onda 2. ....	172
Figura A. 9	Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 100 anni, onda di progetto): onda 3. ....	173
Figura A. 10	Analisi spettrale per lo stato di mare I (120% dell'onda di progetto): onda 1. ....	174
Figura A. 11	Analisi spettrale per lo stato di mare I (120% dell'onda di progetto): onda 2. ....	174

---

Figura A. 12	Analisi spettrale per lo stato di mare III (120% dell'onda di progetto): onda 3. ....	175
Figura A. 13	Configurazione del modello iniziale.....	177
Figura A. 14	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 1 dello stato di mare I. ....	178
Figura A. 15	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 2 dello stato di mare I. ....	179
Figura A. 16	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 3 dello stato di mare I. ....	180
Figura A. 17	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 1 dello stato di mare II. ....	181
Figura A. 18	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 2 dello stato di mare II. ....	182
Figura A. 19	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 3 dello stato di mare II. ....	183
Figura A. 20	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 1 dello stato di mare III. ....	184
Figura A. 21	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 2 dello stato di mare III. ....	185
Figura A. 22	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 3 dello stato di mare III. ....	186
Figura A. 23	Configurazione del modello prima della simulazione dello stato di mare IV.....	187
Figura A. 24	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 1 dello stato di mare III. ....	188
Figura A. 25	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 2 dello stato di mare III. ....	189
Figura A. 26	Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 3 dello stato di mare III. ....	190

---

## Lista delle Tabelle

Tabella 2.I	Caratteristiche dei massi tipo Accropode al variare del volume del singolo masso (fonte: <a href="http://www.concretelayer.com">www.concretelayer.com</a> ).23
Tabella 2.II	Caratteristiche del moto ondoso in prossimità della diga foranea di sopraflutto del porto di Isola delle Femmine.....25
Tabella 3.I	Parametri individuati sulla base degli studi sperimentali condotti da Hudson <i>et al.</i> (1979) per la descrizione del problema della stabilità di una diga a scogliera. ....29
Tabella 3.II	Definizione dei livelli di danno secondo il U.S. Army Corps of Engineers (2002). ....52
Tabella 3.III	Limiti dei livelli di danno sulla base delle definizioni fornite dal U.S. Army Corps of Engineers (2002).....53
Tabella 3.IV	Definizione dei livelli di danno secondo la Normativa BS 6349 (Maritime structures, Part 7: Guide to the design and construction of breakwaters, 1991).....54
Tabella 3.V	Valori accettabili per la portata di tracimazione o di overtopping (adattato da U.S. Army Corps of Engineers, 2002). ....55
Tabella 3.VI	Valori accettabili per la portata di tracimazione per persone e veicoli proposti dall' <i>Eurotop Manual</i> (2018).....56
Tabella 3.VII	Valori accettabili per la portata di tracimazione per proprietà alle spalle dell'opera di difesa proposti dall' <i>Eurotop Manual</i> (2018). ....57
Tabella 4.I	Valutazione del numero di stabilità secondo il metodo di Hudson <i>et al.</i> (1979) e di Sharp e Khader (1984) per i sedimenti di basalto e di marmo.....77
Tabella 4.II	Caratteristiche degli scogli in scala di prototipo e in scala di modello. ....77
Tabella 4.III	Valutazione del numero di stabilità secondo il metodo di Hudson <i>et al.</i> (1979) e di Sharp e Khader (1984).....79
Tabella 4.IV	Caratteristiche fisiche degli Accropodi a scala di prototipo e a scala di modello.....80

---

Tabella 6.I	La successione di stati di mare simulati per la valutazione della portata tracimata a tergo della diga foranea del porto di Isola delle Femmine: configurazione 1.....	103
Tabella 6.II	La successione di stati di mare simulati per la valutazione della portata tracimata a tergo della diga foranea del porto di Isola delle Femmine: configurazione 2.....	104
Tabella 6.III	Successione di stati di mare simulati per la valutazione del danno nella diga foranea del porto di Isola delle Femmine.	107
Tabella 6.IV	Definizione dei livelli di danno fornite dal U.S. Army Corps of Engineers e quelle secondo la Normativa BS 6349. ....	122
Tabella 6.V	Valori dei parametri $N_d$ e $N_{od}$ ricavati a seguito della sequenza degli stati mare simulati.....	123
Tabella 6.VI	Entità degli spostamenti subiti dagli Accropodi dopo la simulazione dello stato di mare IV. In neretto gli spostamenti superiori al 70% dell'altezza degli Accropodi (van der Meer, 1999). ....	126
Tabella 6.VII	Valori dei parametri $N_d$ e $N_{od}$ ricavati a seguito della sequenza degli stati mare simulati trascurando l'effetto parete.....	127
Tabella 7.I	Valori dei parametri $N_d$ e $N_{od}$ ricavati a seguito della sequenza degli stati mare simulati.....	132
Tabella 7.II	Valori dei parametri $N_d$ e $N_{od}$ ricavati a seguito della sequenza degli stati mare simulati escludendo l'effetto parete.....	132



---

## 1 Premessa

Il Comune di Isola delle Femmine (PA) ha predisposto il progetto esecutivo dei lavori di “Completamento delle opere marittime esistenti per la messa in sicurezza del porto riguardante i lavori di potenziamento del tratto esistente della diga foranea – Prolungamento della stessa dalla progr. 92 m alla progr. 380.00 m – Riqualfica della mantellata della nuova diga di sottoflutto”. Tale progetto è stato inserito dalla Regione Siciliana - Assessorato delle Infrastrutture e della Mobilità - tra quelli ammessi ai benefici del fondo di rotazione per la progettazione di cui al Decreto Assessoriale n 72/Gab D.A. del 20 dicembre 2017.

In tale contesto, il Comune di Isola delle Femmine ha affidato al Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR) dell’Università degli Studi di Catania la verifica idraulica e strutturale su modello fisico di una sezione corrente della diga foranea prevista dal succitato progetto esecutivo.

La diga foranea, del tipo a gettata, prevede una mantellata in massi artificiali tipo Accropodi.

In esito a un aggiornamento dello studio idraulico marittimo condotto dal progettista dott. ing. Giordano, sono state recentemente ricalcolate in prossimità della diga foranea le caratteristiche del moto ondoso di progetto, che sono risultate leggermente meno severe di quelle inizialmente previste. Il progettista ha pertanto valutato la possibilità di modificare i massi della mantellata e, in particolare, di utilizzare massi tipo Accropodi caratterizzati da un volume pari a  $16 \text{ m}^3$  anziché pari a  $18 \text{ m}^3$  come inizialmente previsto dal progetto esecutivo.

La riduzione del volume dei massi, oltre a comportare una evidente riduzione dei costi di realizzazione degli stessi massi, permette di facilitare le attività di posa nonché di ridurre i tempi di realizzazione della diga foranea. Alla luce delle suddette considerazioni, è stato richiesto al DICAR di articolare la campagna sperimentale in due fasi. Infatti è stato richiesto di verificare la sezione corrente della diga foranea considerando massi da

---

16 m<sup>3</sup> e, nel caso di esito negativo di tale verifica, di verificare la sezione corrente della diga foranea considerando massi da 18 m<sup>3</sup>.

La presente relazione descrive i risultati e le procedure della campagna sperimentale condotta presso il Laboratorio di Idraulica del DICAR allo scopo di verificare la sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine sia dal punto di vista strutturale (stabilità della mantellata) che idraulico (tracimazione e riflessione).

---

## 2 Introduzione

Il porto di Isola delle Femmine (PA) è situato fra il Golfo di Castellammare e il Golfo di Palermo (vedere la Figura 2.1), alla radice di ponente del promontorio denominato Punta del Passaggio.

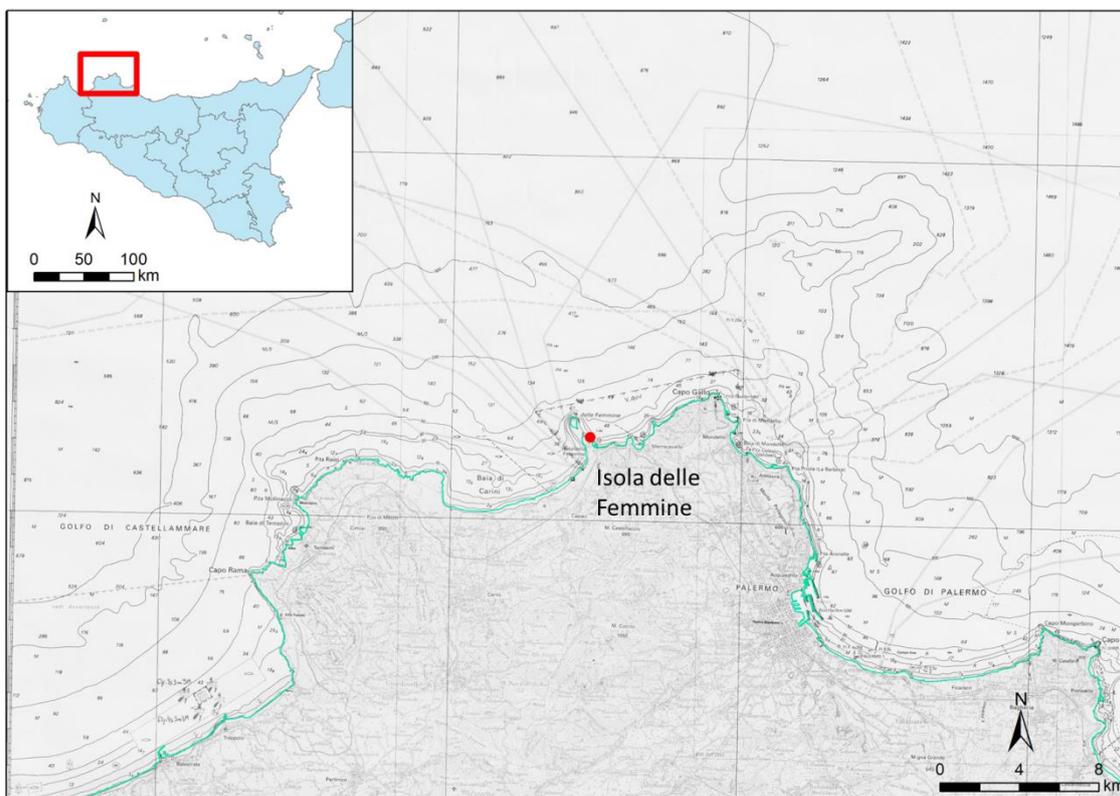


Figura 2.1 Localizzazione del porto di Isola delle Femmine. (Mappa: Carta nautica dell'Istituto Idrografico della Marina Militare Italiano "Da Capo Rama a Capo Zafferano e Isola di Ustica", scala 1:100 000)

Attualmente il porto è protetto da due opere foranee: il molo di sopraflutto, radicato a Nord dallo specchio acqueo portuale e che si sviluppa da Ovest verso Est e dal vecchio molo a gomito posto di fronte al centro abitato (vedere la Figura 2.2 e la Figura 2.3).



Figura 2.2 Localizzazione del porto di Isola delle Femmine. (Ortofoto della Regione Siciliana - Assessorato Territorio e Ambiente - Area 2 Interdipartimentale "Ortofoto Regione Siciliana ATA 2007-2008 - WGS84 Web Mercatore").

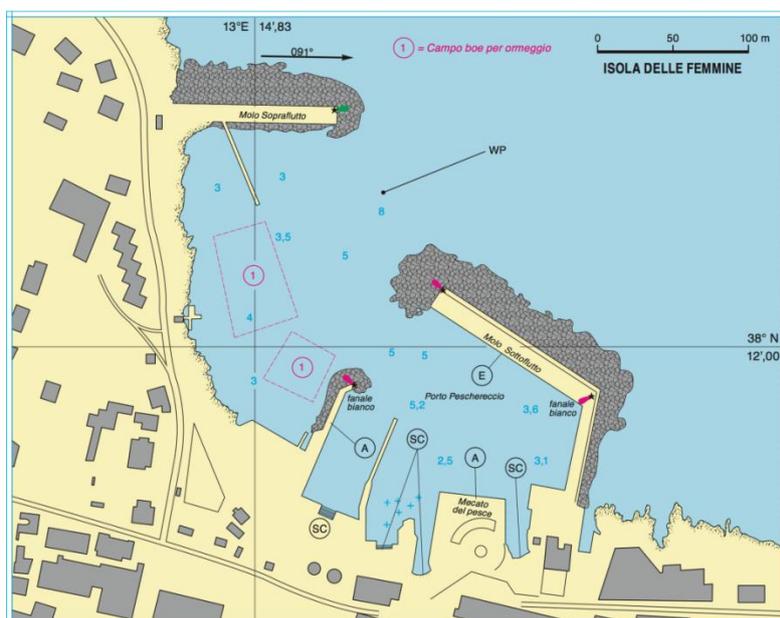


Figura 2.3 Il porto di Isola delle Femmine. (fonte: <https://www.pagineazzurre.com/porti-della-sicilia/porto-isola-delle-femmine>)

---

Lo specchio acqueo attuale del porto risulta particolarmente esposto alle mareggiate provenienti da N-NO, con la conseguente possibilità di utilizzare gli ormeggi in banchina solo nei mesi estivi e in condizioni di scarsa sicurezza. Al fine di superare detti limiti, l'Amministrazione ha incaricato l'ing. Francesco Giordano di redigere il progetto di *“Completamento delle opere marittime esistenti per la messa in sicurezza del porto (ai sensi dell'art.5 della L.R. 21/98) riguardante i lavori di potenziamento del tratto esistente della diga foranea, il prolungamento della stessa dalla progr.92,00m alla progr.380,00m- Riqualfica della mantellata della nuova diga di sottoflutto”*.

Le principali opere a mare previste da tale progetto sono (vedere la Figura 2.4):

- il prolungamento della diga foranea esistente dalla progr. 92,00 m fino alla progr. 380,00 m;
- la riqualfica dell'attuale molo di sottoflutto mediante il prolungamento del primo tronco del vecchio molo per uno sviluppo di circa 60,00 m in direzione N-NE, il prolungamento lato mare del secondo tronco del vecchio molo e la realizzazione di un piazzale a tergo del molo di sottoflutto da destinare ad area water-front.

Per quanto concerne il prolungamento della diga foranea esistente fino alla prog. 380.00 m, il progetto esecutivo originario ha inizialmente previsto la realizzazione di un'opera a gettata, con mantellata in massi artificiali tipo Accropodi da 18 m<sup>3</sup>, ed il banchinamento interno della stessa con cassoncini antiriflettenti.

Dalla Figura 2.5 alla Figura 2.8 si riportano le sezioni tipo del prolungamento previsto per il molo di sopraflutto.

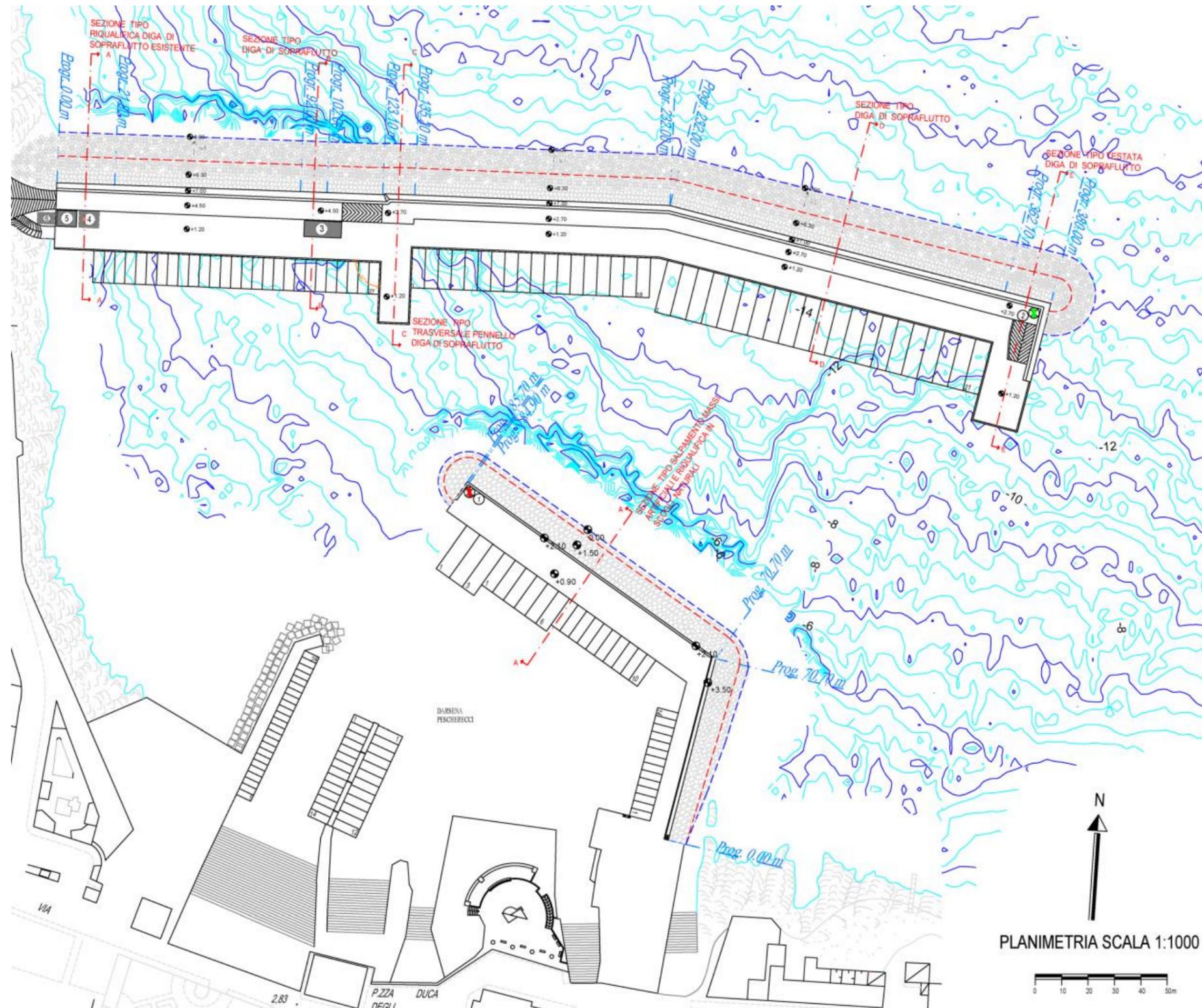


Figura 2.4 Progetto esecutivo delle nuove opere previste nel porto di Isola delle Femmine: Planimetria delle nuove opere.

**SEZIONE TIPO PROLUNGAMENTO DIGA DI SOPRAFLUTTO ESISTENTE  
DALLA PROGR. 92m ALLA PROGR. 108.10m**

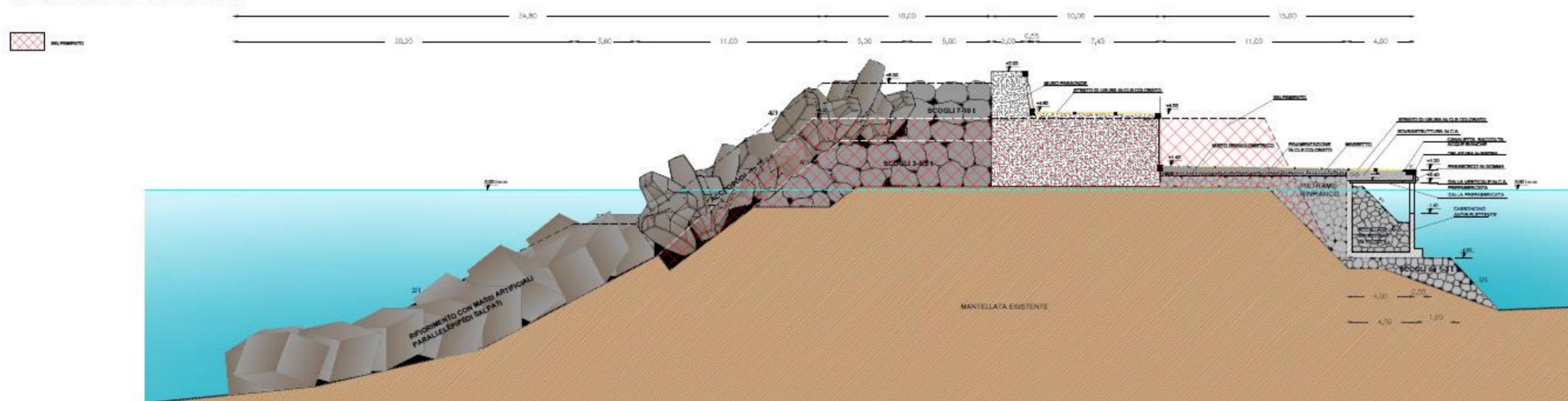


Figura 2.5 Progetto esecutivo delle nuove opere previste nel porto di Isola delle Femmine: sezione tipo del prolungamento della diga di sopraflutto esistente dalla prog. 92 m alla prog. 108.10 m.

**SEZIONE TIPO PROLUNGAMENTO DIGA DI SOPRAFLUTTO ESISTENTE  
DALLA PROGR. 108.10m ALLA PROGR. 123.10m**

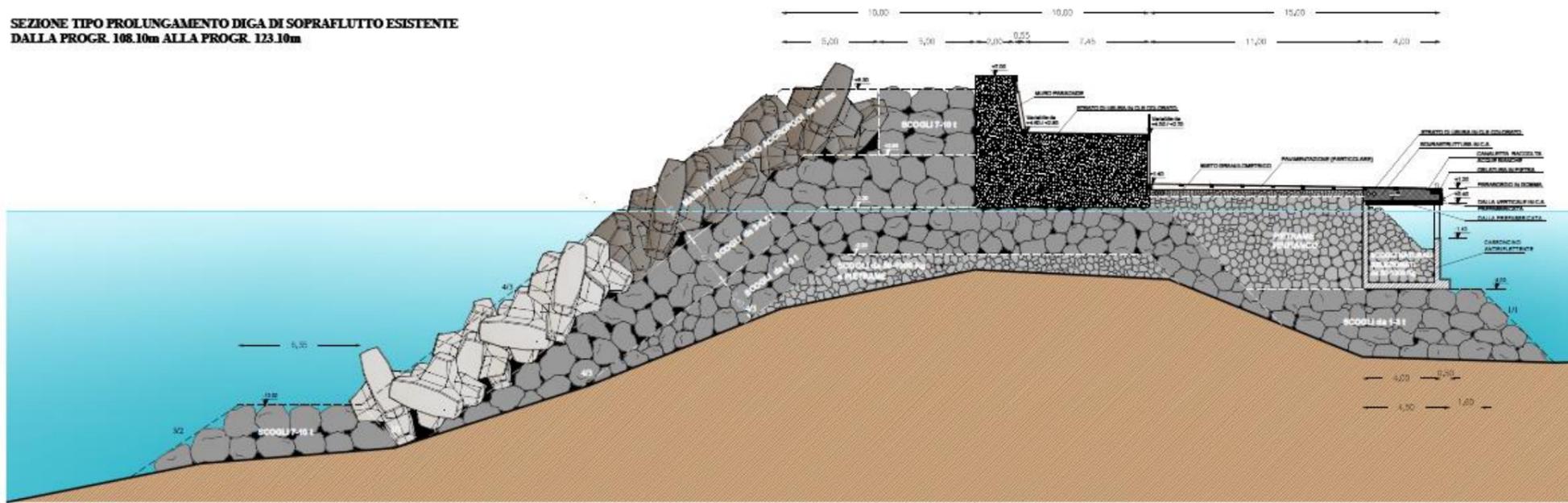


Figura 2.6 Progetto esecutivo delle nuove opere previste nel porto di Isola delle Femmine: sezione tipo del prolungamento della diga di sopraflutto esistente dalla prog. 108.10 m alla prog. 123.10 m.

**SEZIONE TIPO PROLUNGAMENTO DIGA DI SOPRAFLUTTO ESISTENTE  
DALLA PROGR. 123.10m ALLA PROGR. 135.20m**

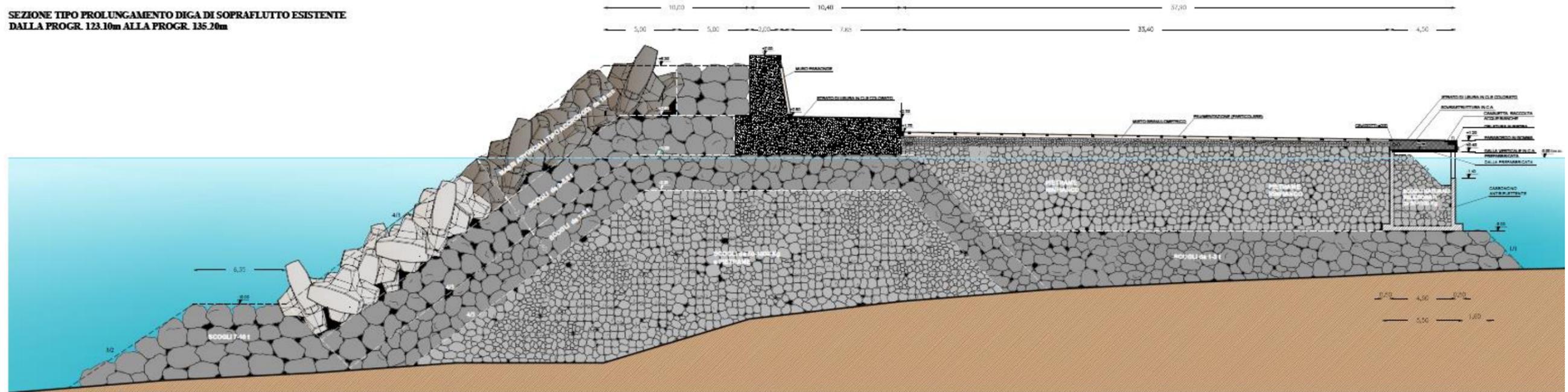


Figura 2.7 Progetto esecutivo delle nuove opere previste nel porto di Isola delle Femmine: sezione tipo del prolungamento della diga di sopraflutto esistente dalla prog. 123.10 m alla prog. 135.20 m.

**SEZIONE TIPO PROLUNGAMENTO DIGA DI SOPRAFLUTTO ESISTENTE  
DALLA PROGR. 135.20m ALLA PROGR. 362.10m**

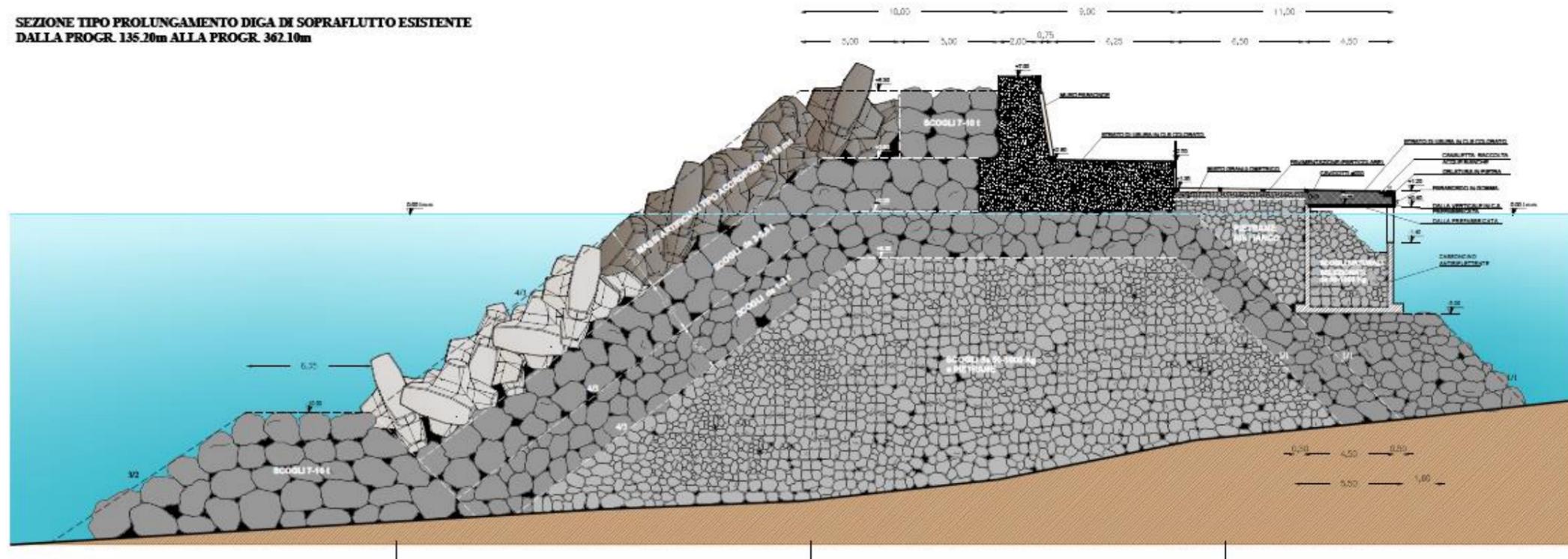


Figura 2.8 Progetto esecutivo delle nuove opere previste nel porto di Isola delle Femmine: sezione tipo del prolungamento della diga di sopraflutto esistente dalla prog. 135.20 m alla prog. 362.10 m.

---

In fase di progettazione delle nuove opere del porto i massi delle opere a gettata previsti nel prolungamento del molo di sopraflutto sono stati dimensionati considerando un'onda di progetto con tempo di ritorno pari a 100 anni. Inizialmente le caratteristiche dell'onda di progetto non sono state determinate sulla base dei dati rilevati dalla boa ondometrica di Capo Gallo, prossima al paraggio in esame, in quanto tale boa risultava caratterizzata da un numero limitato di dati rilevati nel momento di elaborazione del progetto. Per superare tale limite connesso alla disponibilità di dati, il progettista ha valutato le condizioni di progetto sulla base dei venti rilevati dalla stazione meteorologica di Ustica. La propagazione del moto ondoso da largo a sottocosta ha quindi permesso di stimare in corrispondenza dell'opera la seguente onda di progetto: altezza significativa ( $H_s$ ) pari a 7.42 m e periodo di picco ( $T_p$ ) pari a 13.47 s.

Sulla base di tali caratteristiche del moto ondoso incidente ( $H_s=7.42$  m e  $T_p=13.47$  s), il progettista aveva dunque scelto di realizzare la mantellata della diga di sopraflutto mediante massi artificiali del tipo Accropodi caratterizzati da un volume pari a  $18\text{ m}^3$ .

In esito ad un recente aggiornamento dello studio idraulico marittimo condotto dallo stesso progettista, effettuato sulla base dei nuovi dati rilevati dalla boa ondometrica di Capo Gallo (dal 2002 al 2014), è emersa la possibilità di ridurre il volume degli Accropodi. In particolare, dal momento che il nuovo studio ha stabilito un moto ondoso di progetto in corrispondenza dell'opera caratterizzato dalle seguenti caratteristiche:  $H_s=6.48$  m e  $T_p=11.72$  s, il progettista ha proposto di limitare il volume dei massi di mantellata tipo Accropodi a  $16\text{ m}^3$ . E ciò al fine di garantire adeguate condizioni di stabilità strutturale e costi maggiormente contenuti per l'Amministrazione oltreché una maggiore facilità, velocità ed economicità nella posa dei massi.

La Tabella 2.1 riporta le caratteristiche dei massi artificiali tipo Accropode al variare del volume del singolo masso.

Tabella 2.1 Caratteristiche dei massi tipo Accropode al variare del volume del singolo masso (fonte: [www.concretelayer.com](http://www.concretelayer.com)).



### ACCROPODE™ Design Guide Table

Unit Volume (m³)	$V = 0,34H^3$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	28.0	
Unit Height (m)	$H = (V/0,34)^{1/3}$	1.43	1.81	2.07	2.27	2.45	2.60	2.87	3.09	3.28	3.45	3.61	3.75	3.89	4.01	4.13	4.35	
Equivalent Cube Size (m)	$D_n = V^{1/3}$	1.00	1.26	1.44	1.59	1.71	1.82	2.00	2.15	2.29	2.41	2.52	2.62	2.71	2.80	2.88	3.04	
Armour Thickness (m)	$T = 1,29 D_n$	1.29	1.63	1.86	2.05	2.21	2.34	2.58	2.78	2.95	3.11	3.25	3.38	3.50	3.61	3.72	3.92	
Armour concrete consumption and coverage	Packing density $\phi$ (-)	0.645	0.645	0.645	0.643	0.642	0.640	0.637	0.634	0.631	0.628	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	
	Consumption (m³/m²)	0.645	0.813	0.930	1.021	1.098	1.164	1.275	1.366	1.445	1.514	1.575	1.638	1.697	1.751	1.803	1.898	
	Number of units (u/m²)	0.645	0.406	0.310	0.255	0.220	0.194	0.159	0.137	0.120	0.108	0.098	0.091	0.085	0.080	0.075	0.068	
	Porosity (%)	50.00	50.00	50.00	50.12	50.24	50.36	50.60	50.83	51.07	51.31	51.55	51.55	51.55	51.55	51.55	51.55	
Filter stone underlayer - to meet the following requirement NUL/NLL < 3.0	NLL (tons)	Standard	0.17	0.34	0.50	0.67	0.84	1.01	1.34	1.68	2.02	2.35	2.69	3.02	3.36	3.70	4.03	4.70
		Min/Max*	0.1 0.2	0.2 0.4	0.4 0.7	0.5 0.9	0.6 1.1	0.7 1.3	0.9 1.7	1.2 2.2	1.4 2.6	1.6 3.1	1.9 3.5	2.1 3.9	2.4 4.4	2.6 4.8	2.8 5.2	3.3 6.1
	NUL (tons)	Standard	0.34	0.67	1.01	1.34	1.68	2.02	2.69	3.36	4.03	4.70	5.38	6.05	6.72	7.39	8.06	9.41
		Min/Max*	0.2 0.4	0.5 0.9	0.7 1.3	0.9 1.7	1.2 2.2	1.4 2.6	1.9 3.5	2.4 4.4	2.8 5.2	3.3 6.1	3.8 7.0	4.2 7.9	4.7 8.7	5.2 9.6	5.6 10.5	6.6 12.2
	Thickness (m) for standard NLL&NUL Specific density 2,6 t/m³	Kt=1,15	1.06	1.33	1.52	1.68	1.81	1.92	2.11	2.28	2.42	2.55	2.66	2.77	2.87	2.96	3.05	3.21
		Kt=0,9*	0.83	1.04	1.19	1.31	1.41	1.50	1.65	1.78	1.89	1.99	2.08	2.17	2.24	2.32	2.38	2.51

This table is to be used together with the note "Additional essential information regarding the tables" here appended.

- : Geometrical characteristics of unit
- : Recommended values for use at preliminary design stage
- : (\*)The information in this section is to be used with a compulsory analysis by a experienced coastal engineer even at preliminary stage - Ratio NUL/NLL should be kept between 2 and 3

This proprietary information of CLI is provided for preliminary guidance only. Hence, it is not a substitute for analysis by an experienced coastal Engineer. CLI provides assistance to the owners, developers, designers and contractors at all stages of projects. CLI reserves the right to make changes to the guidelines for improvement of its products. The validity of this document is therefore limited, but CLI will maintain accurate the version available online.

Please Contact us : [cli@concretelayer.com](mailto:cli@concretelayer.com)

Website : [www.concretelayer.com](http://www.concretelayer.com)

ACCROPODE™ is a trademark of Artelia, France.



---

Al fine di verificare l'efficacia delle soluzioni definite in fase di progettazione, soprattutto quelle relative al prolungamento del molo di sopraflutto, il Comune di Isola delle Femmine ha affidato tramite convenzione al Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR) dell'Università degli Studi di Catania la verifica su modello fisico della stabilità di una sezione corrente della diga foranea di sopraflutto.

Più precisamente, durante una riunione del 30 ottobre 2019 svoltasi presso il DICAR, cui ha partecipato - tra gli altri - anche il signor Sindaco dott. Stefano Bologna, sulla base delle indicazioni fornite dal responsabile scientifico del Comune di Isola delle Femmine, ing. Francesco Giordano, in presenza del R.U.P., Arch. Monica Giambruno, si è deciso di focalizzare la campagna sperimentale sulla sezione del molo di sopraflutto maggiormente sollecitata dal moto ondoso e, precisamente, sulla sezione tipo del prolungamento dalla prog. 135.20 m alla prog. 362.10 m (vedere la già citata Figura 2.8). Tale sezione è stata dunque quella sottoposta alle verifiche idrauliche e strutturali concordate.

### 2.1 Obiettivi dell'indagine sperimentale

La convenzione tra il Comune di Isola delle Femmine e Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR) dell'Università degli Studi di Catania ha la finalità di verificare su modello fisico la stabilità di una sezione corrente del prolungamento del molo di sopraflutto previsto dal progetto esecutivo *“Completamento delle opere marittime esistenti per la messa in sicurezza del porto (ai sensi dell'art.5 della L.R. 21/98) riguardante i lavori di potenziamento del tratto esistente della diga foranea, il prolungamento della stessa dalla progr.92,00m alla progr.380,00m- Riqualfica della mantellata della nuova diga di sottoflutto”*.

Il responsabile scientifico del Comune di Isola delle Femmine, ing. Giordano, ha richiesto al DICAR di articolare la campagna sperimentale secondo la seguente successione di test. In una prima fase in cui condurre le verifiche idrauliche e strutturali sulla sezione corrente della diga foranea considerando massi da  $16 \text{ m}^3$  e, solo nel caso di esito negativo, di tale verifica, di condurre le stesse verifiche della prima fase considerando però massi da  $18 \text{ m}^3$ .

---

È opportuno precisare che i massi tipo “Accropodi”, a differenza di scogli naturali o di altri tipi di massi artificiali, resistono all’azione del moto ondoso per effetto del loro peso ma anche e soprattutto per la loro particolare forma che garantisce una concatenazione tra gli stessi massi. Pertanto ci si è concentrati su un’analisi di dettaglio del danno della mantellata attraverso l’adozione di innovative tecniche ottiche.

## 2.2 Fonti di informazione

Per quanto concerne le caratteristiche della diga di sopraflutto si è fatto riferimento agli elaborati progettuali forniti dal progettista. In particolare, da tali elaborati è stato possibile desumere:

- la batimetrica in prossimità del porto;
- le caratteristiche della mantellata e dei materiali utilizzati per la realizzazione dei diversi strati della diga;
- le dimensioni e le quote altimetriche delle diverse componenti della diga a gettata;
- le dimensioni e le quote altimetriche del muro paraonde.

Per quanto concerne le condizioni di moto ondoso, il progettista ha fornito i dati ottenuti da un aggiornamento dello studio idraulico marittimo a supporto del progetto esecutivo delle nuove opere previste per il porto di Isola delle Femmine. In particolare, le caratteristiche del moto ondoso in prossimità della diga di sopraflutto forniti dal progettista sono riportate in Tabella 2.II.

Tabella 2.II Caratteristiche del moto ondoso in prossimità della diga foranea di sopraflutto del porto di Isola delle Femmine.

Tempo di ritorno [anni]	Altezza d’onda significativa [m]	Periodo di picco [s]
25	5.20	11.00
50	5.81	11.00
100	6.48	11.72
350	7.74	12.48

---

### 2.3 Limiti della modellazione fisica

Un'indagine sperimentale di laboratorio è per sua natura soggetta a diversi limiti. È noto, infatti, che le condizioni di similitudine dinamica tra il modello in scala e il 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 in letteratura come effetti di scala. Nonostante tali effetti siano ineliminabili, come emergerà anche dal seguito della trattazione, le prove sono state condotte cercando di minimizzarli ricorrendo sia alle indicazioni di letteratura che all'esperienza di chi ha effettuato le prove.

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 obliquo, a causa del tipo di esposizione del paraggio, non risulta tuttavia essere nel caso in specie particolarmente gravoso.

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 costante pari a 6.5%, rappresentativa della pendenza media dei fondali antistanti il porto di Isola delle Femmine. Risulta evidente, quindi, che non sono stati presi in considerazione gli andamenti effettivi delle batimetriche, che potrebbero contribuire, sebbene in misura modesta, a modificare localmente le condizioni di sollecitazione cui è sottoposta la struttura. Tuttavia, la scelta effettuata di schematizzare l'effettiva batimetria antistante l'opera con una spiaggia piana consente di simulare delle condizioni di attacco del moto ondoso maggiormente gravose.

Infine, il fondale è stato considerato fisso e inerosibile, pertanto non è stata considerata la possibilità di evidenziare eventuali problemi di erosione al piede della struttura.

Nonostante i limiti sopra citati, si ritiene comunque che i risultati dello studio effettuato possano essere ritenuti affidabili per quelli che sono gli

---

obiettivi dello studio, soprattutto perché l'analisi condotta è stata validata attraverso il confronto con i risultati di altre indagini sperimentali condotte su strutture simili a quella sottoposta a verifica.

---

## 3 Verifica di stabilità di strutture a gettata su modello fisico

### 3.1 Generalità

La validità dei risultati ottenuti sul modello fisico, ossia tali da essere rappresentativi di ciò che accade a scala di prototipo, richiede che nelle 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 presente capitolo sono descritti i criteri di similitudine usualmente impiegati nella realizzazione di modelli fisici e presi in considerazione nell'ambito del presente lavoro di modellazione di una struttura 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 e rendere quindi i risultati stessi affidabili per e finalità dello studio.

### 3.2 Criteri di similitudine per modelli fisici di strutture a scogliera

Al fine di definire i criteri di similitudine che devono essere soddisfatti per la modellazione fisica di strutture a scogliera, come quella in esame, è preliminarmente necessario individuare i parametri che descrivono il problema della stabilità di una diga. In particolare, sulla base degli studi sperimentali condotti da Hudson *et al.* (1979), sono stati individuati i parametri riportati in Tabella 3.1.

Da notare che, sebbene il periodo dell'onda non compaia esplicitamente tra le variabili elencate, esso risulta comunque considerato attraverso la lunghezza d'onda  $L$  e la profondità  $h$  tramite la relazione di dispersione che, come è noto, lega tra loro proprio il periodo dell'onda, la lunghezza d'onda e la profondità locale.

Tabella 3.1 Parametri individuati sulla base degli studi sperimentali condotti da Hudson *et al.* (1979) per la descrizione del problema della stabilità di una diga a scogliera.

Parametro	Descrizione
$h$	profondità dell'acqua 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
$\alpha$	angolo d'inclinazione della mantellata misurato rispetto all'orizzontale
$\beta$	angolo d'inclinazione dell'onda incidente
$\Delta$	forma del profilo della mantellata
$\theta$	inclinazione del fondo della struttura diretta verso il mare
$L$	lunghezza d'onda
$\mu$	coefficiente di viscosità dinamica dell'acqua in prossimità della diga
$\xi_a$	dimensione lineare caratteristica della superficie ruvida dell'unità della mantellata
$\rho_a$	densità di massa delle unità della mantellata
$\rho_w$	densità di massa dell'acqua in prossimità della diga

---

Considerando i parametri riportati nella citata Tabella 3.1 si può applicare l'analisi dimensionale per evidenziare il fatto che esiste la seguente relazione funzionale:

$$f(V_w, H, L, h, \beta, \theta, g, \rho_w, \rho_a, l_a, \mu, \xi_a, \alpha, \Delta, D) = 0 \quad (3.1)$$

in cui:

- ✓ le variabili  $V_w, H, L, h, \beta, \theta$  sono relative alla spinta idrodinamica, ovvero alle forze destabilizzanti;
- ✓ le variabili  $g, \rho_w, \rho_a, l_a$  vengono utilizzate per descrivere la spinta idrostatica sulle unità della mantellata (o la resistenza per gravità), ossia per descrivere le azioni stabilizzanti;
- ✓ le variabili  $\mu, \xi_a$  sono relative alla viscosità ed alle forze d'attrito;
- ✓ i parametri  $\alpha, \Delta$  e  $D$  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), le seguenti:

$$F\left(\frac{l_a}{h}, \frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \alpha, \beta, \Delta, \theta, \frac{V_w}{\sqrt{gl_a}}, \frac{V_w l_a \rho_w}{\mu}, \frac{\xi_a}{l_a}, \frac{\rho_w}{(\rho_a - \rho_w)}, D\right) = 0 \quad (3.2)$$

L'eq. (3.2) 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. (3.2) 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:

$$\left(\frac{l_a}{h}\right)_p = \left(\frac{l_a}{h}\right)_m \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{H}{L}\right)_p = \left(\frac{H}{L}\right)_m \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{h}{L}\right)_p = \left(\frac{h}{L}\right)_m \quad (3.5)$$

$$(\alpha)_p = (\alpha)_m \quad (3.6)$$

$$(\beta)_p = (\beta)_m \quad (3.7)$$

$$(\Delta)_p = (\Delta)_m \quad (3.8)$$

$$(\theta)_p = (\theta)_m \quad (3.9)$$

$$\left(\frac{V_w}{\sqrt{gl_a}}\right)_p = \left(\frac{V_w}{\sqrt{gl_a}}\right)_m \quad (3.10)$$

$$\left(\frac{V_w l_a \rho_w}{\mu}\right)_p = \left(\frac{V_w l_a \rho_w}{\mu}\right)_m \quad (3.11)$$

$$(\xi_a)_p = (\xi_a)_m \quad (3.12)$$

$$\left(\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w}\right)_p = \left(\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w}\right)_m \quad (3.13)$$

### 3.2.1 Modello geometricamente non distorto

Da quanto sopra esposto, e in particolare sulla base delle relazioni (3.3)-(3.9), 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 un'approssimazione della forma e delle distribuzioni delle dimensioni dei massi della mantellata posizionati nei diversi strati.

### 3.2.2 Flussi idrodinamici conformi al criterio di Froude

Dalla relazione (3.10) 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* significativo del supporto tra le forze di inerzia e quella di gravità. In altre parole, il rapporto tra le forze inerziali e la forza di gravità deve mantenersi inalterato tra prototipo e modello.

Indicando rispettivamente 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:

$$\frac{N_V}{\sqrt{N_g N_L}} = N_{Fr} = 1 \quad (3.14)$$

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

$$N_t = \sqrt{N_L} \quad (3.15)$$

**Tale relazione è stata utilizzata proprio per “scalare” le variabili temporali del modello fisico della diga foranea del porto di Isola delle Femmine rispetto a quanto avviene a scala di prototipo.**

### 3.2.3 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, vedere la relazione (3.11).

E' infatti importante che il rapporto sopra riportato sia pari all'unità quando si devono riprodurre sul modello fenomeni nei quali le dissipazioni viscosse sono predominanti. Si deve osservare come sia impossibile soddisfare questo criterio quando si esegue la riduzione in scala del prototipo. **Tuttavia, se il modello è condotto su una scala geometrica sufficientemente grande, ossia tale da garantire che il moto attraverso lo strato primario della mantellata rimanga turbolento, allora detto criterio può ritenersi ragionevolmente soddisfatto. Tale approssimazione è stata adottata anche nell'ambito della presente modellazione fisica.**

---

### 3.2.4 Controllo degli effetti della scabrezza superficiale

Il quarto requisito di similitudine per strutture a scogliera è fornito dalla relazione (3.12), 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 possibile.** Una tecnica usualmente adottata 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. **Tale tecnica di riduzione dell'attrito tramite tinteggiatura degli elementi della mantellata è stata adottata anche in questa sede.**

### 3.2.5 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 (3.13), 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.(3.13) può anche essere riscritta come

$$\left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right)_p = \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right)_m \quad (3.16)$$

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 (3.16) è fortemente vincolato alla disponibilità di materiale di cava di adeguate caratteristiche. Nel caso di massi artificiali il rispetto della relazione (3.16) avviene mediante il controllo della densità del materiale utilizzato e delle dimensioni dei massi (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:

$$W_a = \gamma_a V \quad (3.17)$$

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:

$$N_{wa} = \frac{(W_a)_p}{(W_a)_m} \quad (3.18)$$

$$N_{\gamma a} = \frac{(\gamma_a)_p}{(\gamma_a)_m} \quad (3.19)$$

$$N_v = N_L^3 = \frac{(V)_p}{(V)_m} \quad (3.20)$$

si ottiene la seguente scala del peso:

$$N_{wa} = N_{\gamma a} N_L^3 \quad (3.21)$$

Nell'ambito del presente lavoro è stato utilizzato il criterio introdotto da Hudson (1958) e descritto nel seguito, che si basa sulla conservazione del

valore del “numero di stabilità” tra prototipo e modello. In particolare, Hudson (1958) adattò l’eq. (3.20), elevando al quadrato il numero di Froude delle unità della mantellata e moltiplicando il risultato per il parametro della densità relativa

$$\frac{V_w^2}{gl_a} \frac{\rho_w}{(\rho_a - \rho_w)} = G \left( \frac{l_a}{h}, \frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \alpha, \beta, \Delta, \theta, \frac{V_w l_a \rho_w}{\mu}, \frac{\xi_a}{l_a}, D \right) \quad (3.22)$$

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 (4.22) diventa

$$\frac{(\gamma_a)^{\frac{1}{3}} H}{\left( \frac{\gamma_a}{\gamma_w} - 1 \right) (W_a)^{\frac{1}{3}}} \quad (3.23)$$

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

$$\frac{(\gamma_a)^{\frac{1}{3}} H}{\left( \frac{\gamma_a}{\gamma_w} - 1 \right)^3 (W_a)} = (k_\Delta \cot g\alpha) \quad (3.24)$$

dove  $k_\Delta$  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

---

riprodotto attraverso l'uguaglianza del numero di stabilità tra prototipo e modello. In termini di rapporti di scala si ottiene

$$N_{wa} = \frac{N_{\gamma_a} N_L^3}{N_{(\gamma_a/\gamma_{w-1})}} \quad (3.25)$$

in cui si osserva che  $N_H = \frac{(H)_p}{(H)_m} = N_L$ .

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. Tali Autori considerano che sarebbe più appropriato ottenere una relazione di riduzione in scala 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

$$N_{wa} = \frac{N_{\gamma_a} N_L^3}{N_{(\gamma_a/\gamma_{w-1})}} \quad (3.26)$$

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 (3.25), in termini analitici, è data dalla presenza di un cubo al denominatore nella relazione di Hudson. Inoltre, poiché, il rispetto del criterio di Hudson fornisce unità della mantellata nel modello di circa l'8% più leggera 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.**

---

### 3.3 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 a gettata per la difesa costiera insieme ad alcune tecniche di mitigazione degli stessi effetti.

#### 3.3.1 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  $3 \times 10^4$  (Dai e Kamel, 1969) o superiori a tale valore (Oumeraci, 1984 e Mol *et al.*, 1983), a  $6 \times 10^3$  (Jensen e Kliting, 1983), o anche  $4 \times 10^4$  (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  $4 \times 10^4$ .

### 3.3.2 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 applicate anche nella presente modellazione fisica, per cui si provveduto a aumentare opportunamente la dimensione del materiale usato per il nucleo. Si ricordi comunque il fatto che la trasmissione non rientra tra le grandezze di diretto interesse della presente indagine sperimentale.

### 3.3.3 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 (3.25) o (3.26). 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 sarà adottato il criterio di Hudson (vedere la formula 3.25), pertanto nell'ambito della sua applicazione saranno tenute in conto le differenze di densità tra modello e prototipo.

#### 3.3.4 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 del porto di Isola delle Femmine è stata condotta utilizzando tale tecnica.**

### 3.3.5 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.

### 3.4 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;
  - (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 del porto di Isola delle Femmine e vengono analizzate in dettaglio nel seguito.**

#### 3.4.1 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 sistemazione 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 1500-5000 onde. Ciò corrisponde (nel prototipo) a mareggiate che si protraggono per

---

una durata compresa dalle 3 alle 10 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 presente indagine sperimentale.**

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.

#### 3.4.2 Operazioni sul modello fisico

Una volta realizzato il modello è opportuno, prima di cominciare le prove, condurre un'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 superi 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 "*crollò 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").**

#### 3.4.3 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.

È 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:

$$N_d = \frac{N_{spostati}}{N_{totali}} \times 100\% \quad (3.27)$$

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 (van der Meer, 1999).

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:

$$N_{od} = \frac{N_{spostati}}{B/D_{n50}} \quad (3.28)$$

---

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:

$$S_d = \frac{A_e}{D_{n50}^2} \quad (3.29)$$

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 3.II e in Tabella 3.III 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 3.II Definizione dei livelli di danno secondo il U.S. Army Corps of Engineers (2002).**

<b><i>Assenza di danno</i></b>	Nessuna unità spostata. Bisogna notare che S potrebbe non essere nullo in questa condizione
<b><i>Danno iniziale</i></b>	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%
<b><i>Danno intermedio</i></b>	Dislocazione delle unità ma senza l'esposizione del sottostrato o dello strato-filtro diretto dall'attacco delle onde
<b><i>Crollo</i></b>	Il sottostrato o lo strato filtro è esposto all'attacco diretto delle onde

Tabella 3.III Limiti dei livelli di danno sulla base delle definizioni fornite dal U.S. Army Corps of Engineers (2002).

<b>Livello di danno <math>N_d</math> per mantellate</b>					
<i>Unità</i>	<i>Pendenza</i>	<i>Danno iniziale</i>	<i>Danno intermedio</i>	<i>Crollo</i>	<i>Riferimento bibliografico</i>
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)
<b>Accropodi</b>	<b>1:1.33</b>	<b>0%</b>	<b>1-5%</b>	<b><math>\geq 10\%</math></b>	<b>Burcharth et al. (1998)</b>

<b>Livello di danno <math>N_{od}</math> per mantellate (van der Meer, 1988)</b>				
<i>Unità</i>	<i>Pendenza</i>	<i>Danno iniziale</i>	<i>Danno intermedio</i>	<i>Crollo</i>
Cubi	1:1.5	0		2
Tetrapodi	1:1.5	0		1.5
<b>Accropodi</b>	<b>1:1.33</b>	<b>0</b>		<b>0.5</b>

<b>Livello di danno S per mantellate (van der Meer, 1988)</b>				
<i>Unità</i>	<i>Pendenza</i>	<i>Danno iniziale</i>	<i>Danno intermedio</i>	<i>Crollo</i>
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 3.IV.

Tabella 3.IV Definizione dei livelli di danno secondo la Normativa BS 6349 (*Maritime structures, Part 7: Guide to the design and construction of breakwaters*, 1991)

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

Per quanto concerne i valori massimi della portata di overtopping, essi dipendono dal tipo di struttura e dai requisiti di progetto. Alcuni valori di riferimento vengono riportati tra gli altri dal U.S. Army Corps of Engineers (2002) e sono qui sintetizzati in Tabella 3.V.

Un riferimento più aggiornato è, invece, rappresentato dall'*EurOtop Manual* (2018). La Tabella 3.VI e la Tabella 3.VII riportano i limiti di accettabilità delle portate di tracimazione relativi rispettivamente alla salvaguardia di veicoli e pedoni transitanti e delle proprietà che si trovano alle spalle del frangiflutti.

Tabella 3.V Valori accettabili per la portata di tracimazione o di overtopping (adattato da U.S. Army Corps of Engineers, 2002).

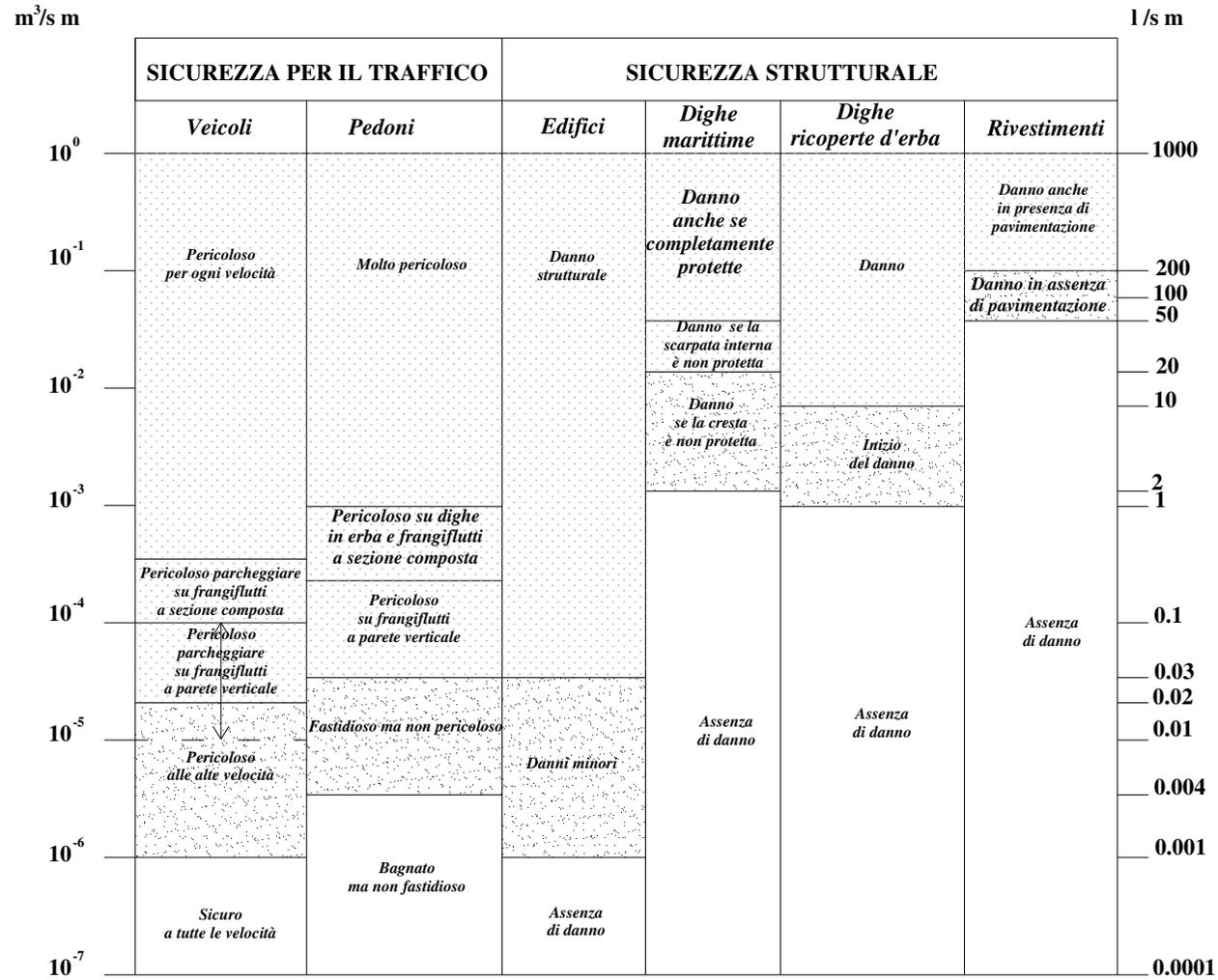


Tabella 3.VI Valori accettabili per la portata di tracimazione per persone e veicoli proposti dall'*Eurotop Manual* (2018).

<b>Limiti per la portata di tracimazione – pedoni e veicoli</b>		
<b>Tipo di pericolo e ragione</b>	<b>Portata media di tracimazione [l/s*m]</b>	<b>Massimo volume di tracimazione [l/m]</b>
Pedoni in prossimità di strutture con possibili violenti fenomeni di tracimazione, principalmente strutture verticali	Accesso vietato	Accesso vietato
Pedoni sulla cresta della struttura. Chiara visione del mare		
$H_s=3$ m	0.3	600
$H_s=2$ m	1	600
$H_s=1$ m	10÷20	600
$H_s<0.5$ m	Nessun limite	Nessun limite
Automobili sulla cresta della struttura, oppure linee ferroviarie molto vicine alla cresta		
$H_s=3$ m	<5	2000
$H_s=2$ m	10÷20	2000
$H_s=1$ m	<75	2000
Autostrade e strade, traffico veloce	Chiuse prima che i detriti in sospensione diventino pericolosi	Chiuse prima che i detriti in sospensione diventino pericolosi

Tabella 3.VII Valori accettabili per la portata di tracimazione per proprietà alle spalle dell'opera di difesa proposti dall'Eurotop Manual (2018).

<b>Limiti per la portata di tracimazione - proprietà</b>		
<b>Tipo di pericolo e ragione</b>	<b>Portata media di tracimazione [l/s*m]</b>	<b>Massimo volume di tracimazione [l/m]</b>
Danno significativo o affondamento di grandi yachts; $H_s > 5$ m	>10	>5000 ÷ 30000
Danno significativo o affondamento di grandi yachts; $H_s = 3$ ÷ 5 m	>20	>5000 ÷ 30000
Affondamento di barche piccole poste a 5 ÷ 10 m dalla difesa; $H_s = 3$ ÷ 5 m Danni a grandi yachts	>5	>3000 ÷ 5000
Sicuro per grandi yachts; $H_s > 5$ m	<5	<5000
Sicuro per barche piccole poste a 5 ÷ 10 m dalla difesa; $H_s = 3$ ÷ 5 m	<1	<2000
Elementi strutturali di edifici; $H_s = 1$ ÷ 3 m	≤1	<1000
Danni ad attrezzature arretrate di 5 ÷ 10 m	≤1	<1000

---

## 4 Caratteristiche del modello fisico realizzato

### 4.1 Generalità

Le prove su modello fisico della diga foranea del porto di Isola delle Femmine sono state condotte presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR) 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 DICAR.

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.

---

#### 4.2.1 La vasca di sperimentazione

La vasca, realizzata in cemento, ha una sezione rettangolare di lunghezza 18.00 m, larghezza 3.60 m e profondità 1.20 m. 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 1 cm, 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.

Al fine di limitare gli effetti tridimensionali, il modello fisico della diga foranea del porto di Isola delle Femmine è stato realizzato all'interno di un canale con larghezza pari a 1.20 m. Tale canale è stato realizzato suddividendo la vasca di sperimentazione attraverso un setto in legno. Il fondo del canale, 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 6.5%, tale da ricreare, seppur in maniera semplificata, la batimetria reale in prossimità della diga foranea del porto di Isola delle Femmine. 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.

La Figura 4.1 e Figura 4.2 mostrano la configurazione della vasca, rispettivamente prima e dopo la ricostruzione della batimetria antistante l'opera a gettata soggetta ad indagini.

La Figura 4.3 riporta la sezione trasversale dalla vasca dopo la ricostruzione della batimetria antistante l'opera a gettata soggetta ad indagini.

---

In Figura 4.4 si riporta un particolare della pendenza della batimetrica realizzata all'interno della vasca.

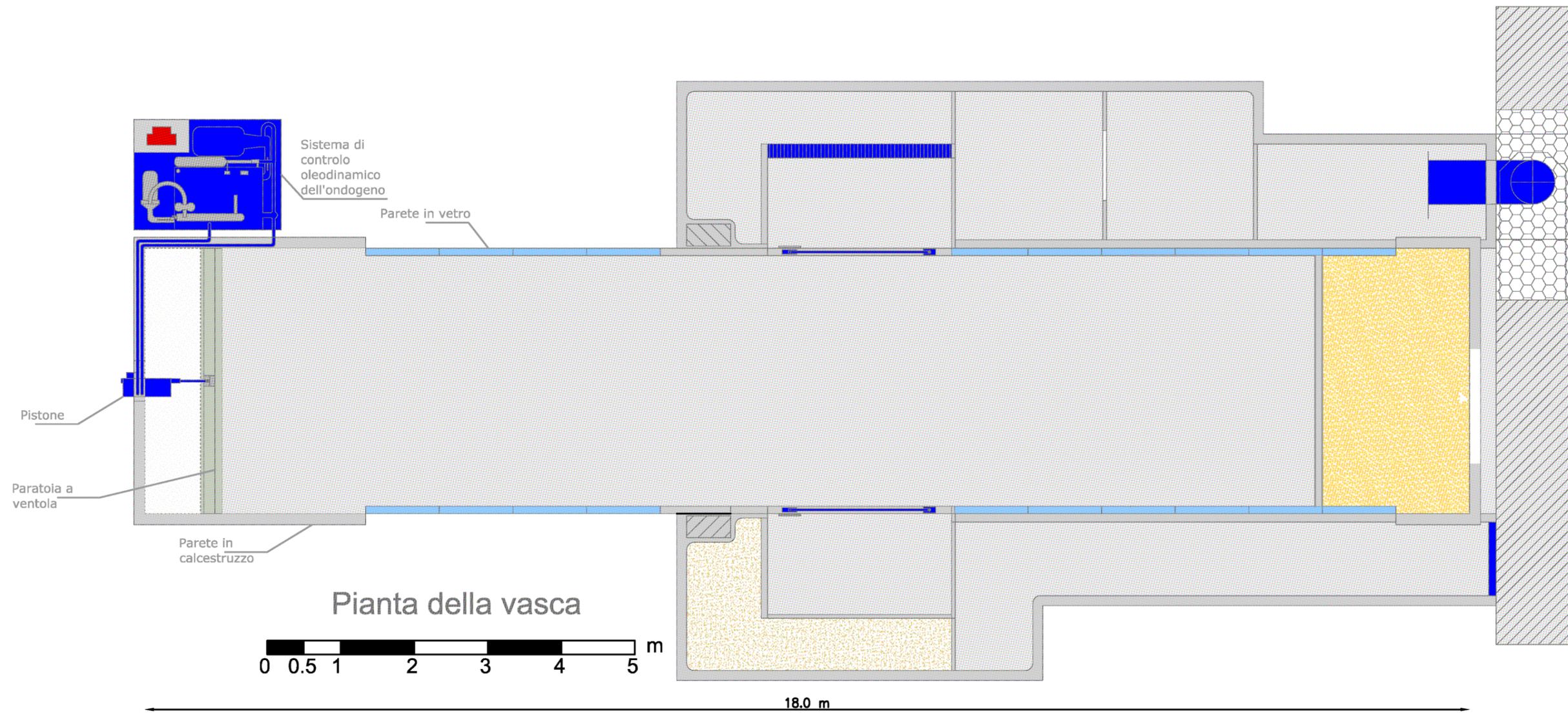


Figura 4.1 Vasca di sperimentazione utilizzata per la modellazione fisica della diga foranea del porto di Isola delle Femmine: planimetria della vasca prima dell'avvia dell'indagine sperimentale sulla diga foranea del porto di Isola delle Femmine.

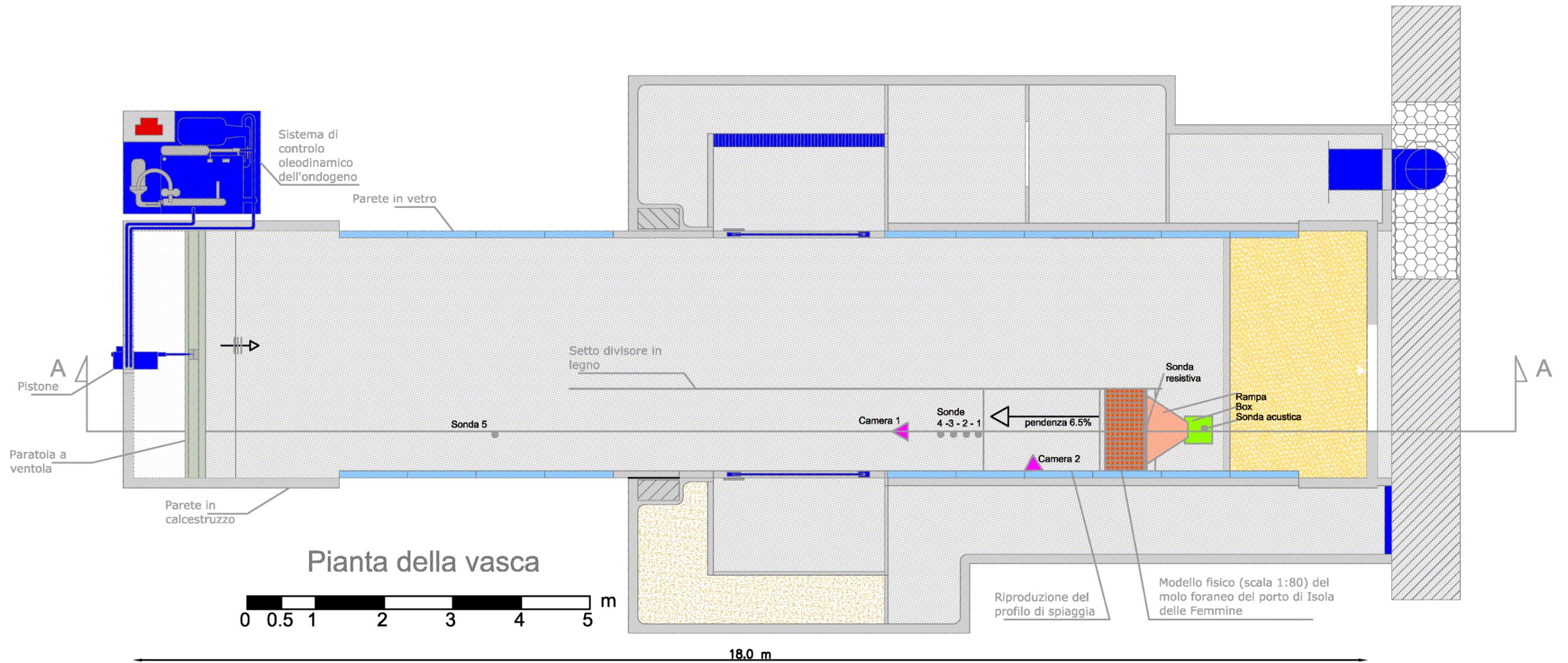


Figura 4.2 Vasca di sperimentazione utilizzata per la modellazione fisica della diga foranea del porto di Isola delle Femmine: planimetria della vasca dopo la realizzazione della pendenza.

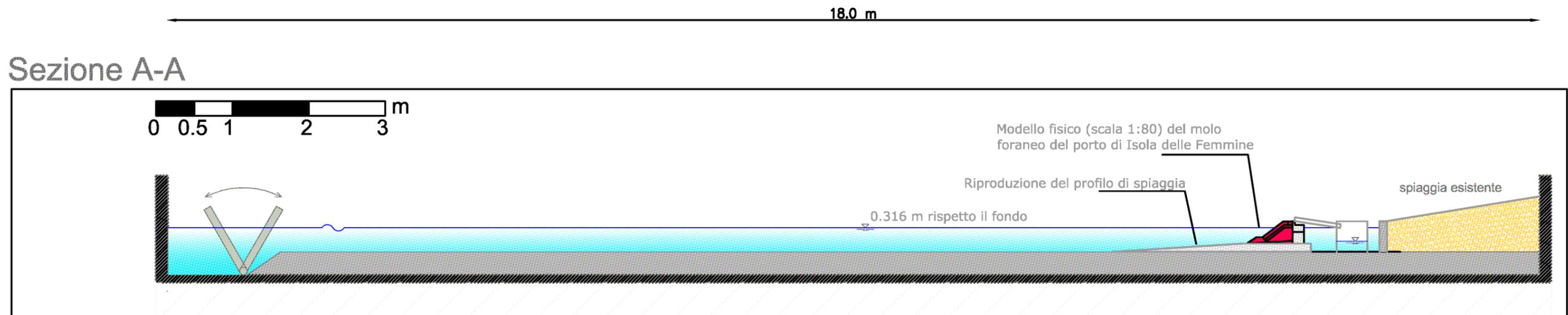


Figura 4.3 Vasca di sperimentazione utilizzata per la modellazione fisica della diga foranea del porto di Isola delle Femmine: sezione trasversale della vasca dopo la realizzazione della pendenza.

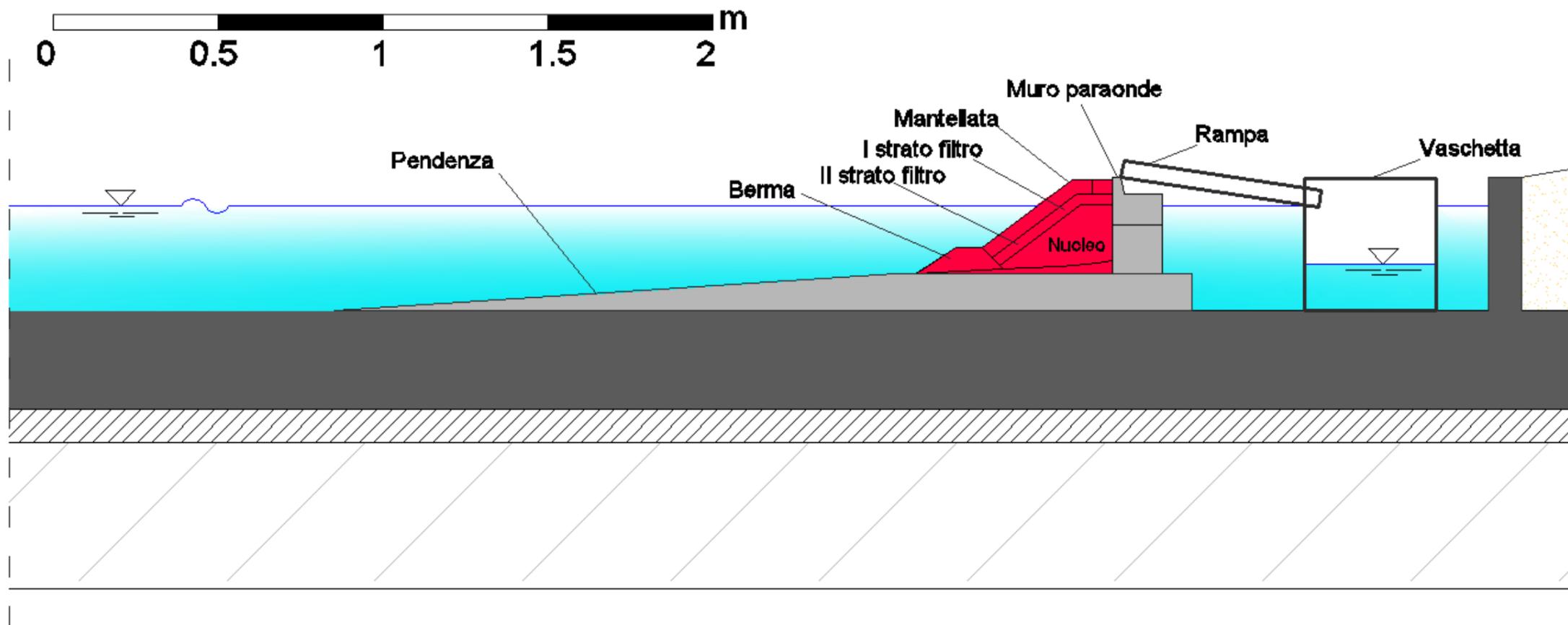


Figura 4.4 Particolare della vasca di sperimentazione, con la pendenza e il modello fisico realizzati al suo interno.

#### 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 3 kW e portata 200 l/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 10 l 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 40 mm, è costituito da un cilindro a doppio stelo il quale, per avere un'escursione di  $\pm 210$  mm con frequenza di 2 Hz, richiede una portata d'olio di 100 l/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 esterno 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 ad un laptop Acer.

Il software di controllo è il programma *jwg.exe* (Figura 4.5), appositamente sviluppato dal DICAR, 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.

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

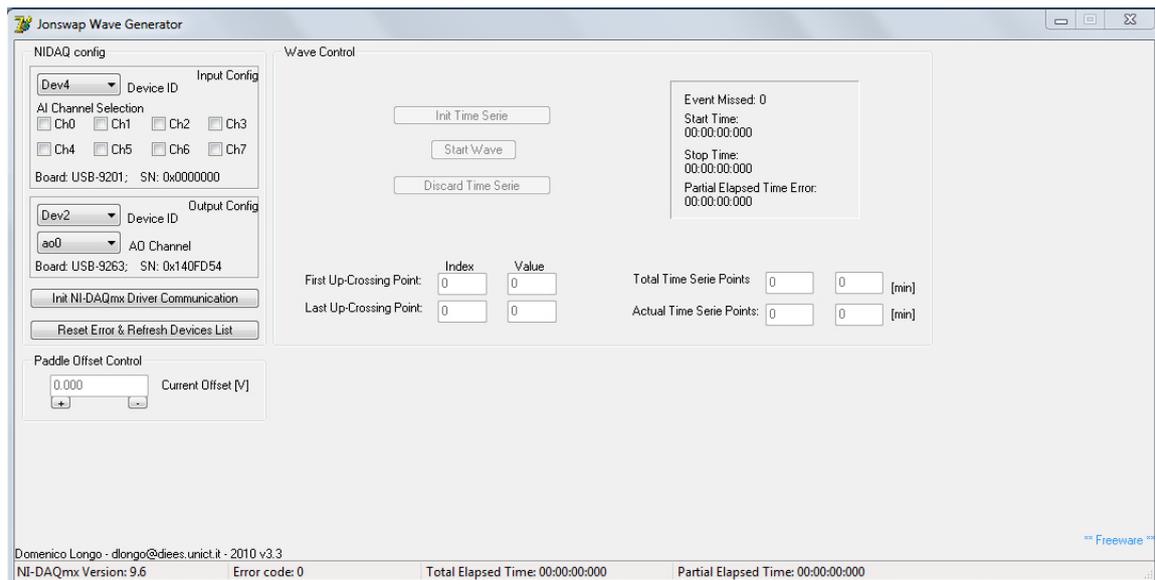


Figura 4.5 Interfaccia del software *jwg.exe* per la generazione delle onde irregolari.

La taratura dei parametri di controllo per la generazione di onde irregolari 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  $H_s$  effettivamente ottenuta in vasca.

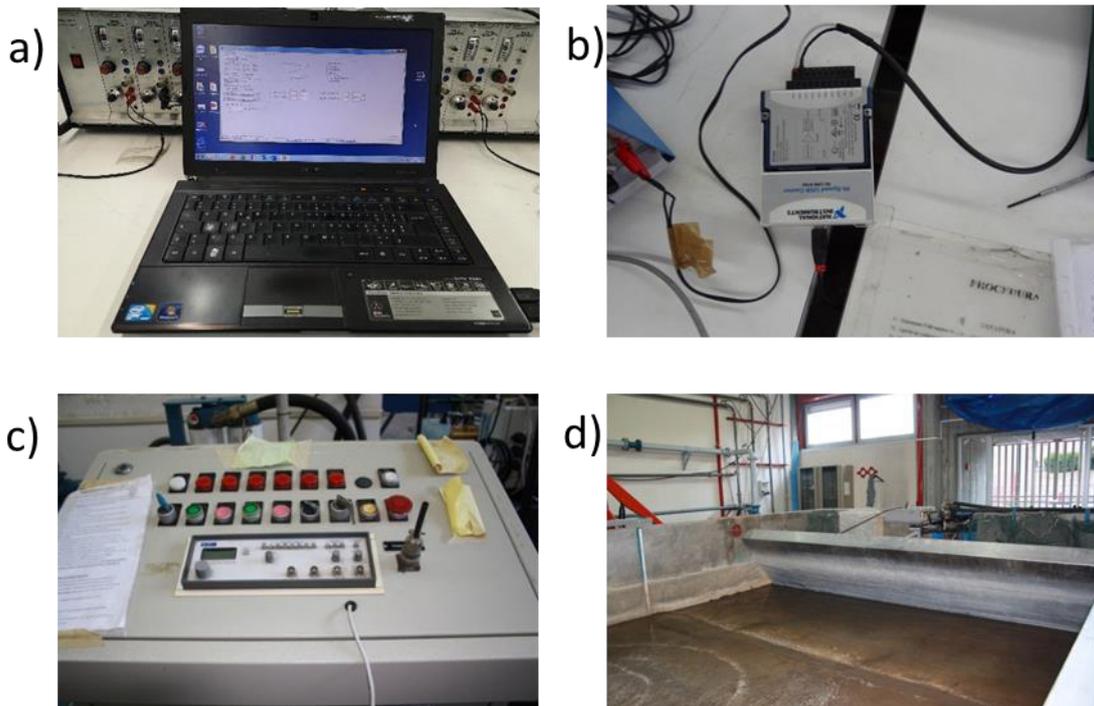


Figura 4.6 Componenti del sistema di generazione delle onde irregolari: a) Laptop Acer dotato di software di controllo jwg.exe; b) trasformazione del segnale digitale in segnale analogico mediante la scheda NI-9162; c) quadro di controllo; d) paratoia a ventola per la generazione del moto ondoso.

### 4.3 Strumentazione di misura utilizzata

#### 4.3.1 Misura del moto ondoso

La misura delle caratteristiche delle onde è stata effettuata mediante 5 sonde resistive, il cui posizionamento all'interno della vasca di sperimentazione è rappresentato in Figura 4.2. In particolare, quattro sonde resistive (Figura 4.7a) sono posizionate rispettando le seguenti distanze dal piede della struttura: sonda 1 a 1.70 m; sonda 2 a 1.80 m; sonda 3 a 2.25 m; sonda 4 a 2.36 m. La sonda 5 (Figura 4.7b), invece, è posizionata a 5 m dal battitore.

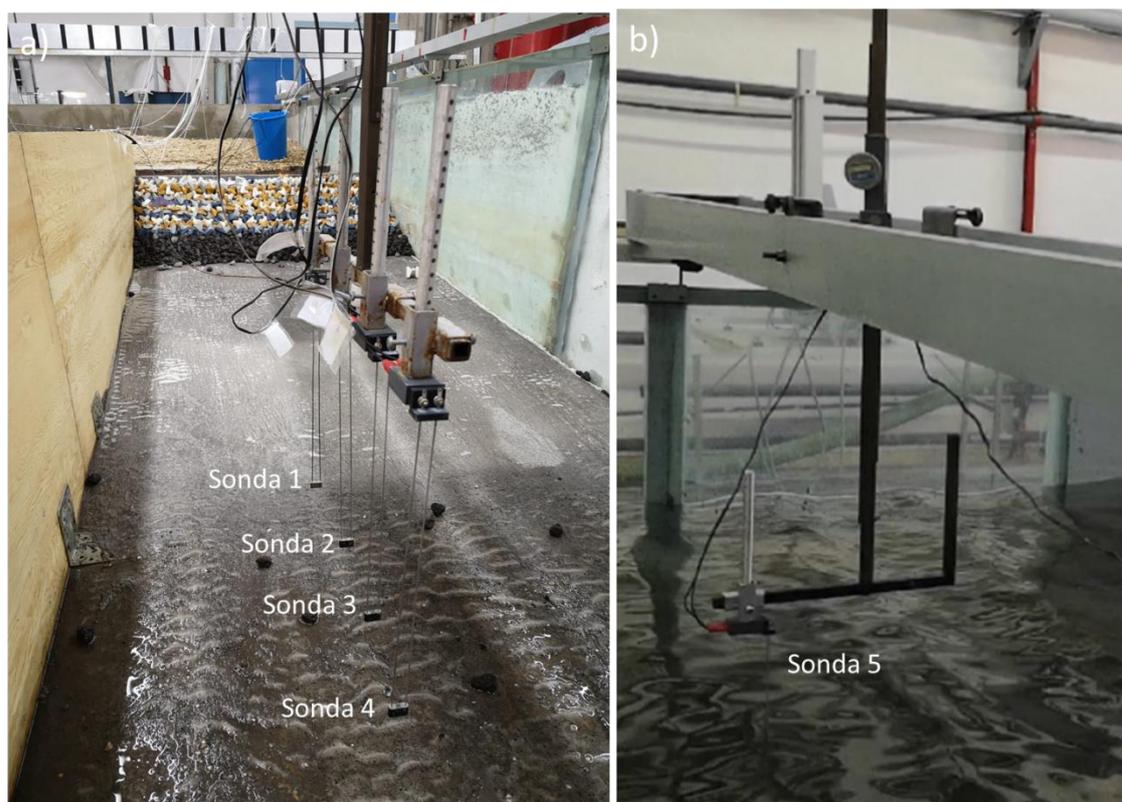


Figura 4.7 Sistema per l'acquisizione delle caratteristiche del moto ondoso: a) sonde resistive 1, 2, 3, 4; b) sonda resistiva 5.

Ognuna delle cinque sonde è costituita da due fili metallici in acciaio inossidabile, di lunghezza pari a 300 mm e diametro 1.5 mm, disposti parallelamente ad una distanza di 12.5 mm. In particolare, le sonde 1, 2, 3 e 4, opportunamente distanziate tra loro, sono posizionate a 1.70 m dalla struttura al fine di misurare la riflessione dell'onda da parte della struttura stessa con il metodo delle quattro sonde di Faraci *et al.* (2015). 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* (Figura 4.8), convertito in digitale ed acquisito dal laptop Acer mediante un codice *Labview* appositamente realizzato, che tra l'altro consente la sincronizzazione tra le cinque sonde resistive, le due videocamere utilizzate per la stima del danno e del numero di onde che

---

tracimano e la sonda acustica usata per l'analisi della tracimazione, tramite l'accensione di una luce led visibile in tutte e tre le inquadrature.



Figura 4.8 Scheda d'acquisizione National Instrument (NIUSB 6008).

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.

#### 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-CX410VE, avente le seguenti caratteristiche: registrazione Full HD, zoom ottico 30x, foto 8.9 MP, frequenza di acquisizione video pari a 25 frame/s, LCD da 3"/7,5 cm e stabilizzatore di immagine di tipo digitale;
- una videocamera Sony modello FDR-AX53, avente le seguenti caratteristiche: registrazione in 4k, zoom ottico 20x, foto 8.3 MP,

---

frequenza di acquisizione video pari a 25 frame/s, LCD da 3"/7,5 cm e stabilizzatore di immagine di tipo digitale;

- 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 4.9 sono mostrati gli strumenti ottici sopra descritti.



Figura 4.9 Strumenti di misura ottici usati negli studi condotti in laboratorio: a) videocamera Sony modello HDR-CX410VE; b) videocamera Sony modello FDR-AX53; c) macchina fotografica compatta Sony Cyber-shot, modello DSC-HX9V 16.2 MP G Lens.

I filmati di tutte le prove sono stati realizzati utilizzando le due videocamere Sony sopra descritte. In particolare, la videocamera Sony modello FDR-AX53, è posizionata sul ponteggio frontale alla struttura al fine di inquadrare frontalmente l'intero modello e consentire l'acquisizione di video e foto utili per l'analisi del danno della struttura (definita "Camera 1" in Figura 4.2). Per quanto concerne la videocamera Sony modello HDR-CX410VE è posizionata su un ponteggio laterale per il monitoraggio del fenomeno di trascinamento della struttura (definita "Camera 2" in Figura 4.2).

Infine, la macchina fotografica compatta Sony Cyber-shot DSC-HX9V 16.2 MP G Lens è utilizzata per l'acquisizione di sequenze di fotografie della struttura da elaborare mediante la tecnica fotogrammetrica dello *Structure from Motion (SfM)*, la quale consente la ricostruzione del modello 3D di un oggetto a partire da una serie di fotografie bidimensionali dello stesso.

---

### 4.3.3 Acquisizioni per la misura della portata tracimata

Nell'ambito della presente sperimentazione è stata misurata anche la portata di tracimazione, per mezzo di un sistema di misurazione appositamente realizzato. Tale sistema è costituito da una rampa per il convogliamento dell'acqua tracimata, una vaschetta di raccolta, una sonda acustica per la misura del livello all'interno della vasca e tre pompe per lo svuotamento della vaschetta. La Figura 4.2 mostra la posizione di tale sistema alla spalle del modello fisico della diga foranea del Isola delle Femmine, mentre la Figura 4.10 mostra gli elementi che lo costituiscono.

La vaschetta di raccolta dell'acqua di tracimazione, realizzata in metallo, ha dimensioni 40x40x30 cm ed è opportunamente ancorata al fondo tramite dei pesi. Lo scivolo metallico per il convogliamento, di forma trapezia (base maggiore 98 cm, base minore 22 cm, altezza 60cm), è incastrato all'interno di una fessura realizzata sulla sommità della faccia della vaschetta rivolta al modello. L'acqua di tracimazione viene convogliata all'interno della vaschetta tramite opportuna pendenza dello scivolo. Tre fori di scarico posizionati al fondo della vaschetta ne permettono lo svuotamento tramite tre pompe *Newa* (modello NEW-JET NJ 6000 LITRI ORA NJ6000) disposte in parallelo che reimmettono l'acqua nella vasca in cui è realizzato il modello fisico. L'azionamento delle tre pompe è automatizzato mediante l'utilizzo dello stesso codice *Labview* usato per l'acquisizione del moto ondoso. Quando il livello nella vaschetta, misurato da una sonda acustica *Pepperl Fuchs* (modello UC500-30GM70-IE2R2-V15) collegata al laptop Acer, raggiunge un valore pari a 30 cm ha inizio lo svuotamento. Le pompe interrompono il funzionamento quando il livello nella vaschetta raggiunge un valore pari a 12 cm.

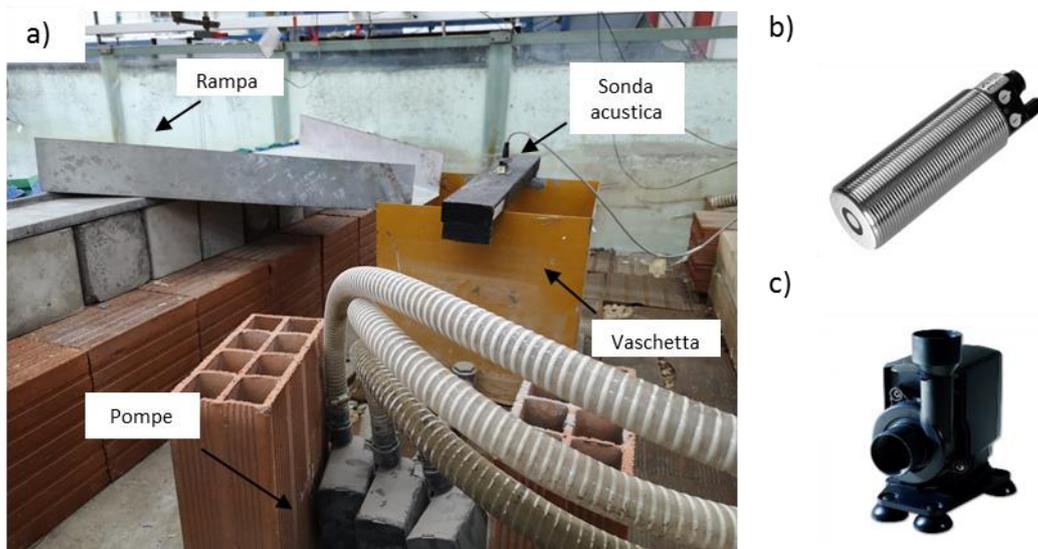


Figura 4.10 Sistema di misura della tracimazione: a) Componenti del sistema di misura; b) sonda acustica *Pepperl Fuchs*, modello UC500-30GM70-IE2R2-V15; c) pompa *Newa*, modello NEW-JET NJ 6000 LITRI ORA NJ6000.

#### 4.4 Descrizione del modello fisico della mantellata

Nell'ambito della presente campagna sperimentale volta a indagare la stabilità della mantellata esterna della sezione della diga foranea del porto di Isola delle Femmine è stato realizzato all'interno della vasca di sperimentazione, descritta sopra, un modello fisico bidimensionale della mantellata.

Il modello realizzato 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.

---

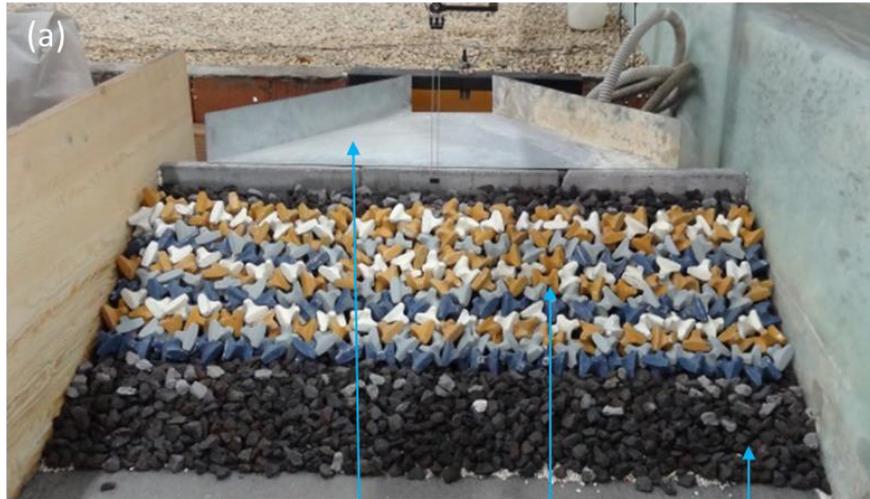
Si precisa che in esito a un aggiornamento dello studio idraulico marittimo condotto dal progettista ing. Giordano, la campagna sperimentale effettuata presso il Laboratorio di Idraulica del DICAR, sotto indicazione dello stesso progettista, è stata eseguita in una prima fase considerando un volume degli Accropodi pari a  $16 \text{ m}^3$  anziché pari a  $18 \text{ m}^3$  come previsto dal progetto.

Tale scelta da parte del progettista è stata motivata dal fatto di voler garantire adeguate condizioni di stabilità della struttura con costi ridotti per l'Amministrazione.

Durante la campagna sperimentale sono state verificate due differenti configurazioni della diga foranea. La prima configurazione riproduce in scala l'effettiva sezione corrente prevista dal progetto definitivo (vedere Figura 4.11), adottando però Accropodi da  $16 \text{ m}^3$ . Nella seconda configurazione analizzata, gli scogli da 7-10 t previsti tra l'ultima fila di Accropodi e il muro paraonde sono stati sostituiti con due file di Accropodi disposti in maniera tale da non superare la quota di coronamento del muro paraonde. Quest'ultima configurazione è stata analizzata al fine di poter verificare se la disposizione degli Accropodi usualmente impiegata potesse ridurre la tracimazione a tergo della struttura.

Le due configurazioni analizzate nell'indagine condotte presso il Laboratorio di Idraulica del DICAR sono riportate in Figura 4.12.





Rampa per la misura della  
tracimazione a tergo della struttura

Accropodi da 16 m<sup>3</sup>  
a scala di prototipo

Berma in massi da 7-10 t



Nella configurazione 2 i massi da 7-10 t sono stati sostituiti da  
due file di Accropodi.

Lo spessore strato filtro è stato aumentato in modo che gli  
accropodi avessero la stessa quota del muro paraonde

Figura 4.12 Configurazioni analizzate nell'ambito della campagna sperimentale effettuata presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura: a) Configurazione 1, rappresentativa delle sezione tipo prevista dal progetto definitivo; b) Configurazione 2, in cui le file di Accropodi sono state estese fino al muro paraonde e disposte in modo da non superare la quota di coronamento del muro paraonde.

#### 4.4.1 Caratteristiche del materiale utilizzato

A scala di prototipo, i diversi elementi che compongono la sezione tipo della diga foranea del porto di Isola delle Femmine oggetto della presente campagna sperimentale sono realizzati con i seguenti tipi di materiali lapidei:

- la berma è in scogli naturali di IV categoria (massa 7-10 t).
- la mantellata è in massi artificiali tipo Accropodi di prima generazione da  $16 \text{ m}^3$  in conglomerato cementizio ( $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$ );
- la parte sommitale della mantellata è in scogli naturali di IV categoria (massa 7000-10000 kg);
- il primo strato filtro è in scogli naturali caratterizzati da una massa tra 3000 e 5500 kg;
- il secondo strato filtro è in scogli naturali caratterizzati da una massa tra 1000 e 3000 kg);
- il nucleo è in scogli naturali di I categoria (massa 50-1000 kg);

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 4. 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  $1000 \text{ kg/m}^3$  nel modello (acqua dolce) e pari a  $1025 \text{ kg/m}^3$  nel prototipo (acqua salata).

Nel caso della riduzione in scala degli scogli naturali, le due metodologie sono state applicate sia a sedimenti di basalto che sedimenti in marmo. In fase di dimensionamento, nel prototipo è stato utilizzato un valore di densità degli scogli pari a  $2650 \text{ kg/m}^3$ , mentre per il modello fisico è stata utilizzato il valore di densità pari a  $2700 \text{ kg/m}^3$  per il sedimenti di basalto e  $2500 \text{ kg/m}^3$  per il marmo.

In Tabella 4.1 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,  $N_{\gamma_a}$  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.I 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
$N_{\gamma_a}$	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  $N_{wa}$ .

La Tabella 4.II riporta le caratteristiche degli scogli in scala di prototipo e in scala di modello.

Tabella 4.II Caratteristiche degli scogli in scala di prototipo e in scala di modello.

Tipologia di massi	Prototipo				Modello				
	Massa [kg]		Dimensioni [m]		Tipologia sedimenti	Massa [kg*10 <sup>-2</sup> ]		Dimensioni [m*10 <sup>-3</sup> ]	
	min	max	min	max		min	max	min	max
Berma	7000	10000	1.4	1.6	basalto	1.13	1.61	16.1	18.1
Filtro 1	3000	5500	1.0	1.3	basalto	0.48	0.89	12.1	14.9
Filtro 2	1000	3000	0.7	1.0	marmo	0.20	0.606	9.10	13.4

Dai sedimenti in basalto disponibili sono state selezionate due classi granulometriche. La prima, compresa tra 15.0 mm e 19.05 mm, utilizzata

---

per riprodurre gli elementi appartenenti alla berma. La selezione meccanica è avvenuta mediante il setaccio da 20 mm (serie UNI, setaccio a maglie circolari) e il setaccio da 3/4" (serie ASTM, setaccio a maglie quadrate). La seconda, compresa tra 12.7 e 15.0 mm, utilizzata per riprodurre gli elementi appartenenti al primo strato filtro. La selezione meccanica è avvenuta mediante il setaccio da 1/2" (serie ASTM, setaccio a maglie quadrate) e il setaccio da 20 mm (serie UNI, setaccio a maglie circolari).

Dal granulato di marmo disponibile è stata selezionata la classe granulometrica compresa tra 6.4 mm e 12.7 mm per riprodurre gli elementi appartenenti alla I categoria selezionata (materiale di riempimento dello scanno di imbasamento). La selezione meccanica è avvenuta mediante il setaccio da 1/4" (serie ASTM, setaccio a maglie quadrate) e il setaccio da 1/2" (serie ASTM, setaccio a maglie quadrate).

#### 4.4.2 Caratteristiche degli Accropodi

Nella Figura 4.13 si riporta il modello 3D di un Accropode. 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.

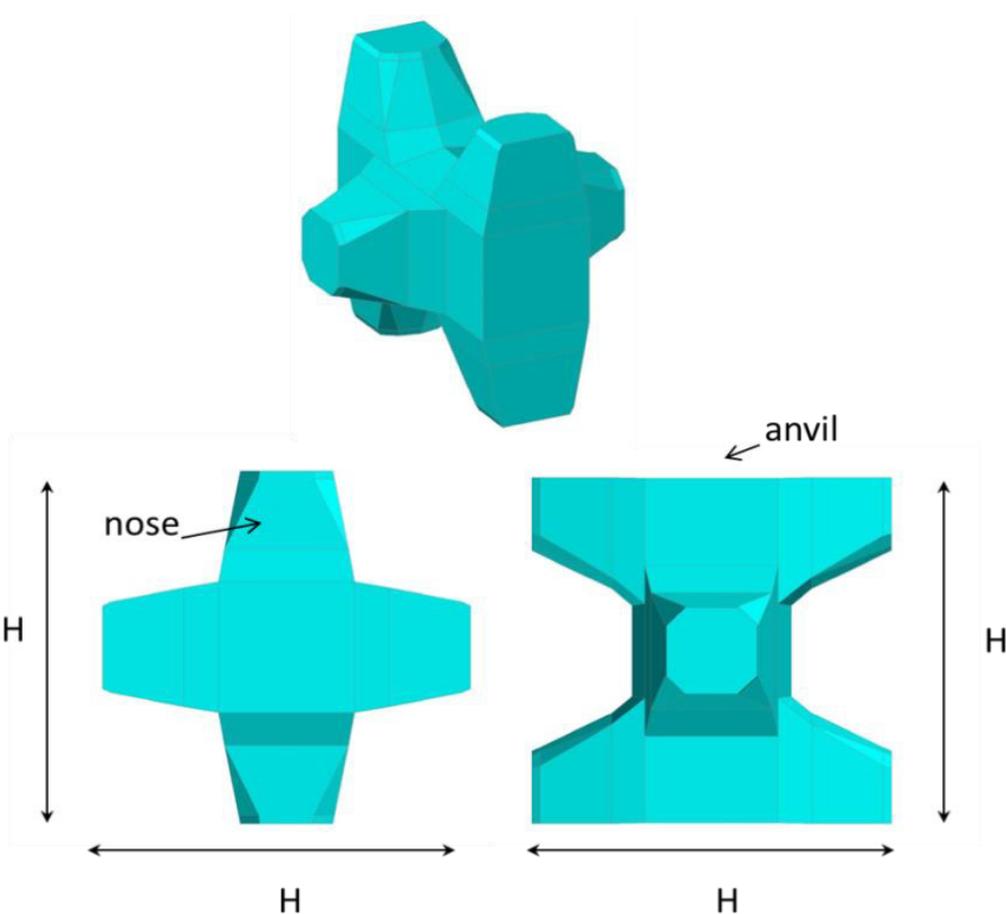


Figura 4.13 Vista tridimensionale e viste laterali dell'Accropode.

La massa dell'Accropode 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 con il criterio di Sharp e Khader (1984). Nella Tabella 4.III 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.III 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	$N_{\gamma_a}$	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,	486236

$\rho_{ap}/\rho_{wp}-1$	1.34	1979) $N_{wa}$ ( Sharp e Khader, 1984)	517747
$\rho_{am}/\rho_{wm}-1$	1.30		

Noto il peso degli Accropodi a scala di prototipo pari a 38400 kg, mediante la relazione 4.18, si ricava il peso degli Accropodi a scala di modello pari a 0.079 kg, con un volume pari a  $3.43 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  e un'altezza pari a 0.0464m. Nella Tabella 4.IV si riportano le caratteristiche fisiche dei massi a scala di prototipo e di modello.

Tabella 4.IV Caratteristiche fisiche degli Accropodi a scala di prototipo e a scala di modello.

	Massa [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	H [m]
Prototipo	38400	16	3.61
Modello	0.079	$3.43 \times 10^{-5}$	0.046

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, gli Accropodi (vedere la Figura 4.14) sono stati realizzati 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.

---

Si precisa che le polveri di basalto e di ferro sono state aggiunte alla miscela di resina in apposite quantità al solo scopo di ottenere il peso specifico desiderato.



Figura 4.14 Accropodi realizzati mediante colatura di una miscela di resina, polvere di basalto e polvere di ferro.

#### 4.4.3 Costruzione del modello fisico

Successivamente alla posa del setto in legno per la ripartizione della vasca di sperimentazione, sono state eseguite le seguenti attività per la costruzione del modello fisico.

1. Realizzazione della batimetria idealizzata del fondo con una spiaggia piana avente pendenza pari a 6.5% (vedere la Figura 4.15);



Figura 4.15 Realizzazione della batimetria idealizzata del fondo con una spiaggia piana avente pendenza pari a 6.5%.

2. riproduzione della sezione della diga sulle pareti del canale (vedere la Figura 4.16);



Figura 4.16 Riproduzione della sezione della diga sulle pareti del canale.

3. sistemazione del muro paraonde al di sopra di massetti in calcestruzzo e impiego di geotessuto per il livellamento dei moduli del muro paraonde. Il muro paraonde è stato suddiviso su tre moduli in calcestruzzo di larghezza pari a circa 40 cm ciascuno, realizzati attraverso getti in casseforme di legno appositamente realizzate (vedere la Figura 4.17, la Figura 4.18, la Figura 4.19);



Figura 4.17 Casseforme di legno appositamente realizzate per la realizzazione dei moduli del muro paraonde.

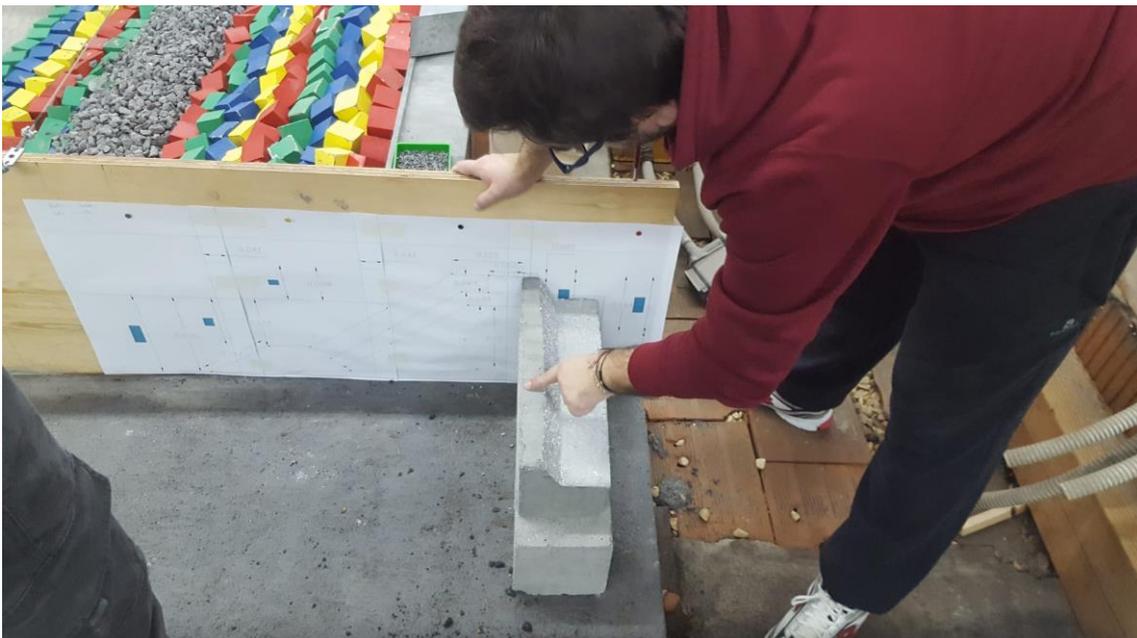


Figura 4.18 Sistemazione del muro paraonde al di sopra di massetti in calcestruzzo.



Figura 4.19 Sistemazione del muro paraonde: impiego di geotessuto per la sistemazione allineata delle diversi moduli del muro paraonde.

4. realizzazione del piano di posa dalla diga foranea mediante granulato di marmo (vedere la Figura 4.20 e la Figura 4.21);



Figura 4.20 Posa in opera di granulato di marmo per la riproduzione dall'andamento plano-altimetrico del terreno al disotto della diga.



Figura 4.21 Posa in opera di granulato di marmo per la riproduzione dall'andamento plano-altimetrico del terreno al disotto della diga: configurazione finale.

5. posa in opera della parte interna del nucleo e del secondo strato filtro (diametro nominale teorico compreso tra 9.10-13.4 mm) (vedere la Figura 4.22 e la Figura 4.23);



Figura 4.22 Posa in opera della parte interna del nucleo e del secondo strato filtro.



Figura 4.23 Posa in opera della parte interna del nucleo e del secondo strato filtro: configurazione finale.

6. posa in opera del materiale basaltico (diametro teorico compreso tra 16.1-18.1 mm) per la realizzazione della berma (vedere Figura 4.24 e la Figura 4.25);



Figura 4.24 Posa in opera del materiale basaltico (diametro teorico compreso tra 16.1-18.1 mm) per la realizzazione della berma.



Figura 4.25 Posa in opera del materiale basaltico (diametro teorico compreso tra 16.1-18.1 mm) per la realizzazione della berma: configurazione finale.

7. posa in opera del materiale basaltico (diametro teorico compreso tra 12.1-14.9 mm) per la realizzazione del primo strato filtro (vedere la Figura 4.26);

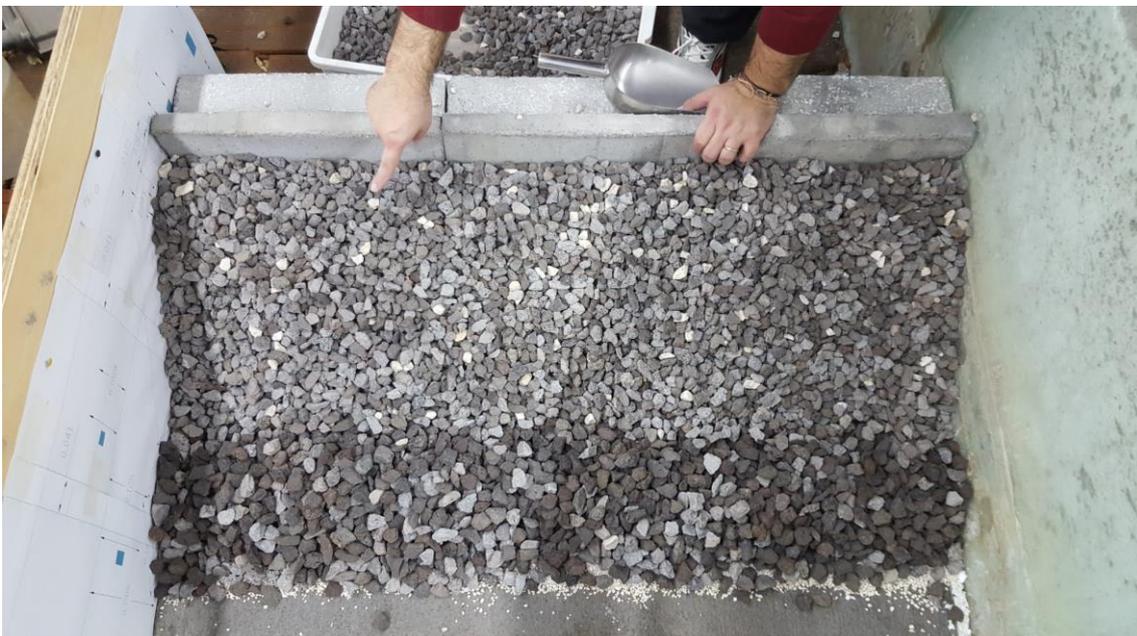


Figura 4.26 Posa in opera del materiale basaltico (diametro teorico compreso tra 12.1-14.9 mm) per la realizzazione del primo strato filtro.

- 
8. posa in opera degli Accropodi;
  9. posa in opera del materiale basaltico (diametro teorico compreso tra 12.1-14.9 mm) per la realizzazione degli scogli tra gli Accropodi e il muro paraonde.

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 il piano di posa del filtro;
- 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.

In particolare, in fase di realizzazione del modello, si è garantito che la densità di posa, ovvero il rapporto tra il numero di elementi ogni 100 m<sup>2</sup>, fosse corrispondente a quella di 9.02 a scala di prototipo. Tale valore è prossimo a quello indicato per gli Accropodi da 16 m<sup>3</sup> dalle linee guida fornite dalla ditta che ha ideato questo tipo di massi.



Figura 4.27 Configurazione 1: posa in opera degli Accropodi da 16 m<sup>3</sup> a scala di prototipo.

Per quanto concerne la realizzazione della configurazione 2, sulla diga già realizzata sono state apportate alcune modifiche allo strato filtro. In particolare, lo strato filtro in corrispondenza del coronamento è stato innalzato attraverso il posizionando di un'ulteriore strato di scogli. Successivamente, è avvenuta la posa di 3 file di Accropodi.



Figura 4.28 Configurazione 2: posa in opera degli Accropodi da 16 m<sup>3</sup> a scala di prototipo.



---

## 5 Procedura sperimentale

### 5.1 Generalità

Al fine di ottenere in vasca un moto ondoso irregolare avente le caratteristiche desiderate, ovvero simili a quelle della scala di prototipo, sono state condotte numerose serie di prove preliminari per la calibrazione dei parametri idrodinamici.

Una volta ultimata la fase di calibrazione, è stata definita una procedura sperimentale da seguire per le verifiche delle performance strutturali e idrauliche delle configurazioni considerate. L'utilizzo di una procedura per l'esecuzione degli esperimenti consente l'ottenimento di risultati affidabili e confrontabili tra loro. Infine, sono stati scelti dei parametri utili per la valutazione delle prestazioni strutturali e idrauliche del modello oggetto della campagna sperimentale.

Di seguito si riporta la descrizione sia della procedura per l'esecuzione degli esperimenti che la procedura per l'elaborazione dei dati rilevati durante la campagna sperimentale.

### 5.2 Procedura per l'esecuzione degli esperimenti

Al fine di effettuare l'analisi del danno, per il modello della diga foranea del porto di Isola delle Femmine considerata è stata condotta una serie di test con crescenti impatti del moto ondoso, mediante la simulazione di uno stato di mare da 5000 onde, suddiviso in tre intervalli di uguale durata. In particolare, sono stati considerati i seguenti stati di mare:

1. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa prossima al 80% dell'onda di progetto. Tale stato di mare è caratterizzato da un tempo di ritorno pari a circa 25 anni.
2. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa con tempo di ritorno pari a circa 50 anni.
3. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa con tempo di ritorno pari a circa 100 anni, ossia l'onda di progetto.

- 
4. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa pari al 120% dell'onda di progetto. Tale onda è caratterizzata da un tempo di ritorno pari a circa 350 anni.

Si osservi che il modello della struttura non viene "riparato" durante le prove individuali; ciò in modo tale che possa essere effettuata una stima del danno cumulato dopo le mareggiate riprodotte all'interno della vasca di sperimentazione.

Oltre ai suddetti test per l'analisi del danno, durante la campagna sperimentale sono stati condotti ulteriori test per approfondire l'analisi dei fenomeni di tracimazione e di riflessione del modello.

Ognuno dei test descritti deve essere condotto compiendo una serie di operazioni ben definite, di seguito riportate.

- Fase preliminare:
  - verifica del corretto posizionamento delle cinque sonde resistive, della sonda acustica e delle tre videocamere;
  - acquisizione mediante macchina fotografica di una serie di foto (30 ÷ 40 scatti) dell'intero modello necessarie per la ricostruzione 3D applicando la tecnica dello *SfM*, avendo cura che tali fotografie abbiano un buon margine di sovrapposizione;
  - acquisizione di un'immagine del modello dalla videocamera posta sul ponteggio di fronte alla struttura;
  - dopo aver chiuso le quattro valvole di scarico, riempimento della vasca fino al raggiungimento del tirante di progetto, misurato tramite una scala graduata posizionata sulla parete laterale della vasca in prossimità del battitore;
  - accensione delle cinque sonde resistive, della sonda acustica e delle tre pompe;

- 
- taratura delle sonde resistive, mediante la misura tramite il software di acquisizione in *LabView*, del voltaggio corrispondente a tre livelli noti, cioè la posizione di lavoro (considerata come zero di riferimento) e altre due posizioni a +6 cm e -6 cm dalla condizione iniziale.
  - Fase di acquisizione:
    - acquisizione di un'immagine del modello dalla videocamera posta sul ponteggio di fronte alla struttura;
    - accensione del battitore per la generazione del moto ondoso e inserimento dei parametri di input tramite il software *jwg.exe* per l'ottenimento delle condizioni idrodinamiche desiderate;
    - avvio delle acquisizioni video dalle tre videocamere;
    - generazione del moto ondoso;
    - avvio delle acquisizioni mediante le cinque sonde resistive e la sonda acustica tramite il software di acquisizione in *LabView*, appositamente realizzato.
    - interruzione delle acquisizioni e del moto ondoso alla fine del test.
  - Fase finale:
    - spegnimento del battitore e di tutte le strumentazioni (videocamere, sonde resistive, sonda acustica e pompe);
    - svuotamento della vasca mediante l'apertura della quattro valvole di scarico;
    - acquisizione mediante macchina fotografica di una serie di foto (30 ÷ 40 scatti) dell'intero modello necessarie per la ricostruzione 3D applicando la tecnica dello *SfM*, avendo cura che tali fotografie abbiano un buon margine di sovrapposizione;

- acquisizione di un'immagine del modello dalla videocamera posta sul ponteggio di fronte alla struttura;
- copia di tutti i file di acquisizione.

Si osserva che la fase preliminare e quella finale vanno eseguite rispettivamente all'inizio e alla fine di ogni set di prove, mentre la fase di acquisizione viene ripetuta per ogni test costituente tale set.

Al fine di essere certi di eseguire tutte le operazioni sopra descritte, durante l'esecuzione delle prove viene compilata una scheda di laboratorio appositamente realizzata (vedere la Figura 5.1 e la Figura 5.2).

**Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine**  
**Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine**

- Data \_\_\_\_\_ • Foglio \_\_\_\_\_ • Nomi test \_\_\_\_\_
- Tipologia test \_\_\_\_\_
- Test condotta da: \_\_\_\_\_
- Fase preliminare:
  - ☐ Controllo posizione sonde resistive e sonda acustica
  - ☐ Controllo posizione videocamere
  - ☐ Controllo chiusura 4 valvole di scarico
  - ☐ Foto alla struttura dalle 3 videocamere
  - ☐ Foto alla struttura per modello 3D n. \_\_\_\_\_
  - ☐ Riempimento vasca h=\_\_\_\_\_ m
  - ☐ Accensione sonde resistive e sonda acustica
  - ☐ Accensione pompe
  - ☐ Verificare che il livello nella vaschetta di trascinazione superi i pesi

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m						
-0.08 m						
+0.08 m						
Note						

- ☐ Taratura sonde (zero su a 0.14 m al micrometro)
- ☐ Accensione battitore

- Hs = _____	- Tp = _____	- h = _____
- hp = 0.4	- gmm = 3.3	- finf = 0.01
- fsup = 10	- df = 0.02	- ST = 0.01
- TS = 3600	- guadagno = 40	- offset = 0.13

- Fase d acquisizione:

Test	h [m]	Tp [s]	Hs in [m]	Start	Stop	R1	R2	R3	Note

Preparare lavagnetta con nome prova per acquisizione video

Figura 5.1 Scheda di laboratorio compilata durante la campagna sperimentale (1 di 2).

---

**Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine**  
**Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di**  
**Isola delle Femmine**

- Data \_\_\_\_\_
- Foglio \_\_\_\_\_
- Nomi test \_\_\_\_\_
- Tipologia test \_\_\_\_\_
- Test condotta da: \_\_\_\_\_
- Fase finale:
  - Spegnimento battitore
  - Spegnimento videocamere
  - Spegnimento sonde resistive, sonda acustica e pompe
  - Svuotamento vasca
  - Foto alla struttura dalla videocamera centrale
  - Foto alla struttura per modello 3D
  - Copia acquisizioni LabView
  - Copia video
  - Copia foto per modello 3D

Figura 5.2 Scheda di laboratorio compilata durante la campagna sperimentale (2 di 2).

### 5.3 Procedura per l'elaborazione dei dati sperimentali

#### 5.3.1 Analisi del moto ondoso

Le caratteristiche del moto ondoso irregolare generato all'interno della vasca di sperimentazione sono calcolate utilizzando il metodo delle quattro sonde (Faraci *et al.*, 2015). Tale metodo, basato su un'analisi di tipo spettrale dei primi tre minuti di acquisizione delle sonde resistive 1, 2, 3 e 4 appositamente calibrati, consente il calcolo dello spettro in frequenza dell'onda incidente e di quello dell'onda riflessa e, quindi del coefficiente riflessione ( $K_r$ ).

In particolare, il metodo delle quattro sonde proposto da Faraci *et al.* (2015) è un'estensione del metodo di Mansard e Funke (1980). In Faraci *et al.* (2015) si assume che il campo delle onde può essere considerato come una sovrapposizione lineare di diverse onde incidenti e riflesse che si propagano a una profondità costante. Per considerare gli effetti di non linearità per una determinata componente, è possibile stimare il rapporto

---

tra il termine di secondo ordine e di primo ordine nell'espansione di Stokes. Nel caso in cui questo rapporto è molto inferiore a 1, la relazione di dispersione fornisce una buona approssimazione delle caratteristiche dell'onda. Per l'applicazione di tale metodo il rapporto tra la distanza tra la prima e la seconda sonda e la lunghezza d'onda deve essere compresa tra 0.05 e 0.45. Nella presente campagna sperimentale il valore di tale rapporto è generalmente prossimo al limite inferiore.

La Figura 5.4 riporta un esempio dell'analisi spettrale condotta sulle sonde resistive 1, 2, 3 e 4. La Figura 5.4 mostra un esempio dei risultati dell'analisi spettrale condotta mediante il metodo delle quattro sonde (Faraci et al., 2015).

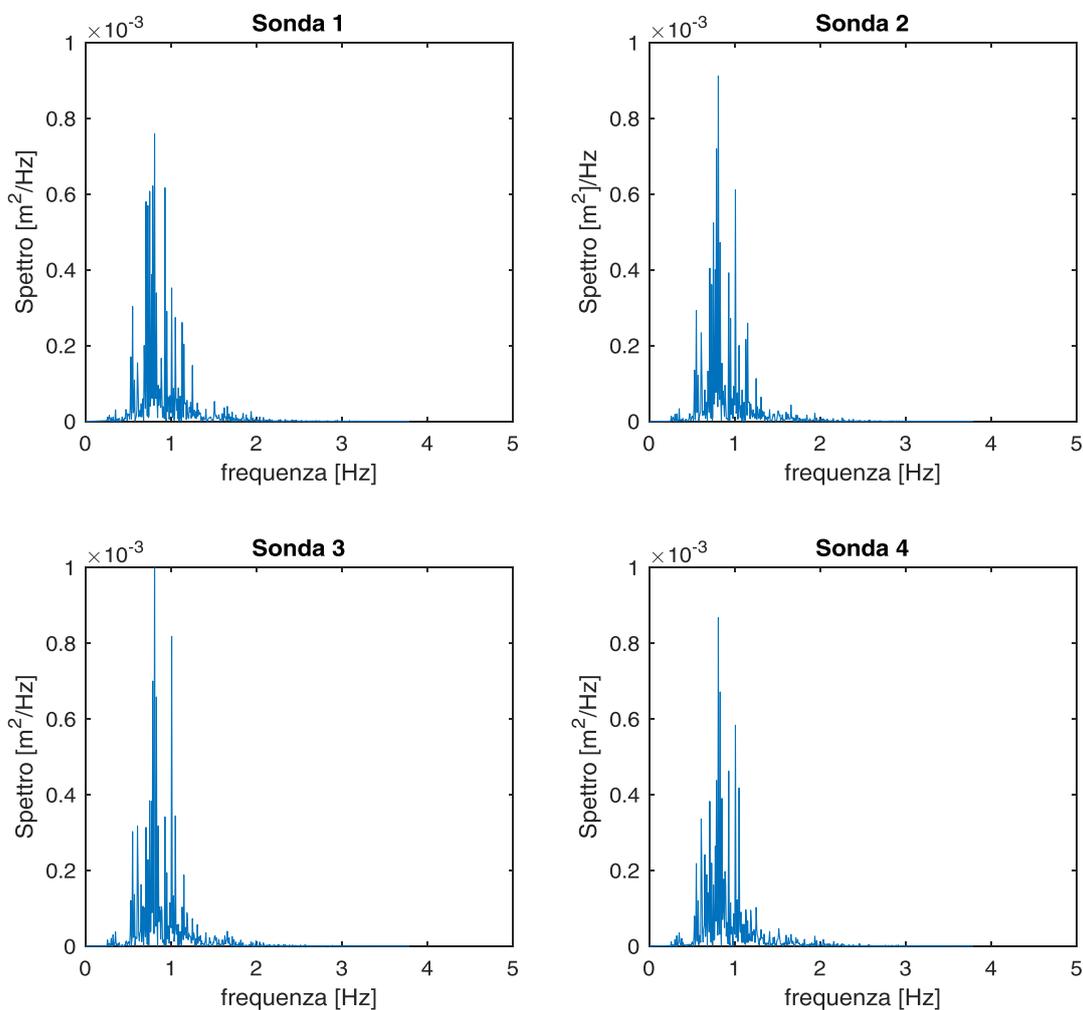


Figura 5.3 Esempio dei risultati dell'analisi spettrale condotta sulle sonde 1, 2, 3 e 4.

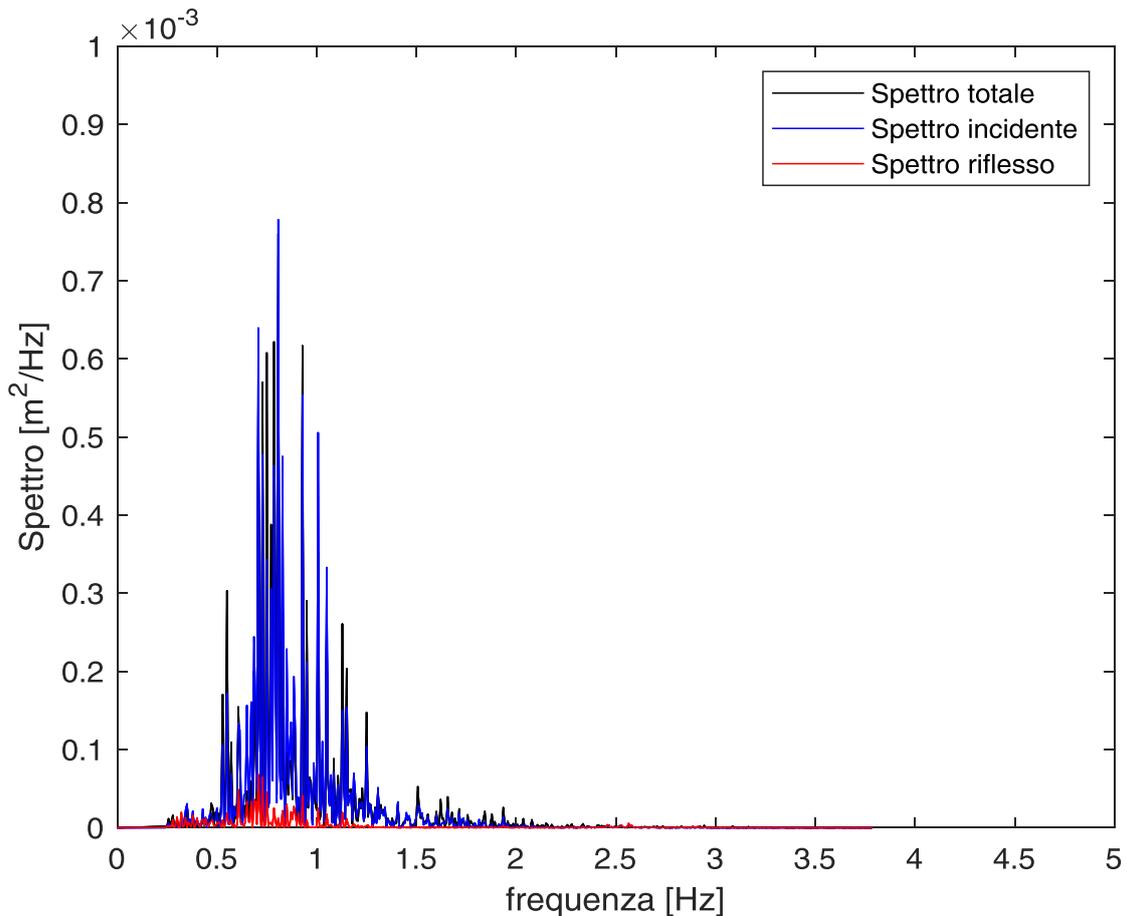


Figura 5.4 Esempio dei risultati dell'analisi spettrale condotta mediante il metodo delle quattro sonde (Faraci et al., 2015).

Si osserva che l'analisi dei risultati delle prove preliminari di calibrazione ha consentito la definizione dei valori dei parametri di input per il software *jwg.exe* una volta fissato l'output desiderato in termini di  $H_s$  e  $T_p$ .

Per quanto concerne la sonda resistiva 5, il segnale acquisito, opportunamente calibrato, consente il confronto tra il moto ondoso incidente in prossimità del battitore e quello in prossimità del piede della struttura, rendendo possibile l'individuazione di eventuali fenomeni di frangimento e, quindi, dissipazione di energia del moto ondoso lungo il percorso che va dalla zona di generazione al modello fisico della struttura.

### 5.3.2 Analisi del danno subito dalla mantellata

Nella presente indagine sperimentale, il danno è stato espresso attraverso due parametri  $N_d$  e  $N_{od}$ .

---

Il parametro  $N_d$  definito dalla seguente relazione:

$$N_d = \frac{N_{spostati}}{N_{totali}} \times 100\% \quad (5.1)$$

in cui  $N_{spostati}$  è il numero di massi spostati,  $N_{totali}$  è il numero di massi totali disposti in quella sezione.

Il parametro  $N_{od}$  definito dalla seguente relazione:

$$N_{od} = \frac{N_{spostati}}{B / D_{n50}} \quad (5.2)$$

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.

Il calcolo di  $N_d$  e  $N_{od}$  è stato effettuato a partire dall'analisi delle immagini acquisite dopo la simulazione dei diversi stati di mare. In particolare, le immagini sono state acquisite nei seguenti momenti:

- Subito dopo la realizzazione del modello (Configurazione iniziale);
- Dopo la simulazione degli stati di mare I e II;
- Dopo la simulazione dello stato di mare III;
- Dopo la simulazione dello stato di mare I.

Oltre all'analisi delle immagini acquisite durante la campagna sperimentale, per l'individuazione dei massi spostati sono stati utilizzati i risultati della tecnica fotogrammetrica dello *Structure from Motion (SfM)*, la quale consente la ricostruzione del modello tridimensionale (3D) di un oggetto a partire da una serie di fotografie bidimensionali dello stesso. In particolare, attraverso la tecnica dello *Structure from Motion* è stato possibile ricostruire la struttura 3D del modello fisico alla fine dei diversi stati di mare simulati. Successivamente, da tale struttura è stato possibile ricostruire una superficie su una maglia regolare che riproduce le variazioni plano altimetriche della mantellata.

---

La Figura 5.5 mostra un esempio della nuvola di punti 3D ricavati mediante la del tecnica fotogrammetrica dello *Structure from Motion*.

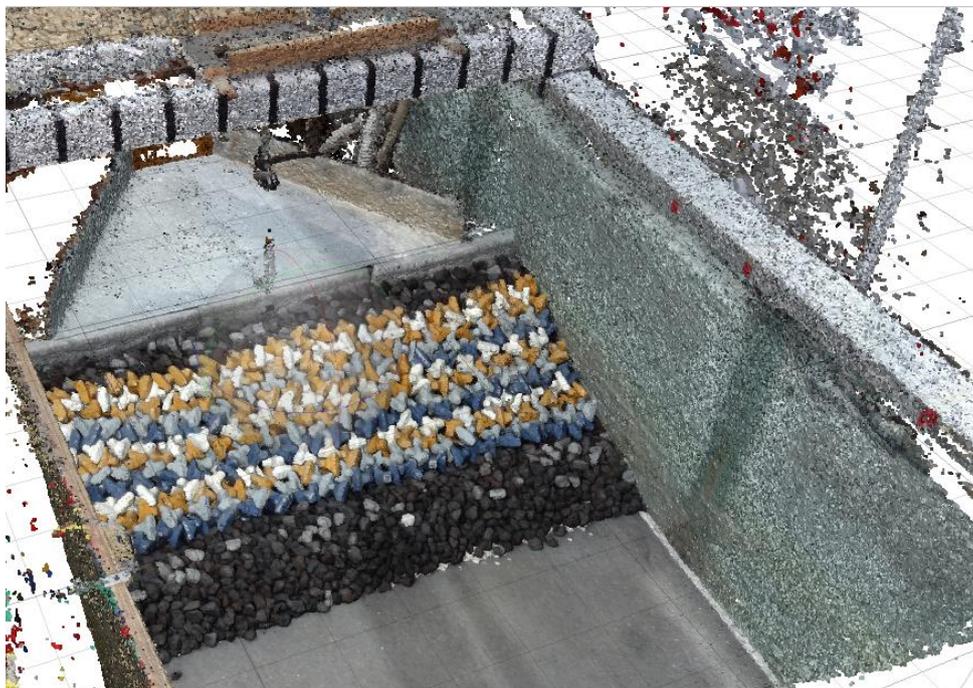


Figura 5.5 Nuvola di punti tridimensionali del modello fisico ricostruita attraverso la tecnica fotogrammetrica dello *Structure from Motion*.

### 5.3.3 Analisi delle portate tracimate

Il fenomeno della tracimazione della portata a tergo della struttura è stato rilevato attraverso la misura della portata media tracimata pari al rapporto tra il volume totale e il tempo di simulazione dello stato di mare in vasca. Per la valutazione del volume totale di tracimazione si è fatto riferimento ai dati di livello idrico acquisiti dalla sonda acustica posizionata sulla vaschetta posta alle spalle del modello fisico. In particolare, noti la geometria della vaschetta e il tirante idrico nel tempo è stato possibile stimare il volume di acqua che tracima e che viene raccolta dalla rampa posizionata sul coronamento del muro paraonde.

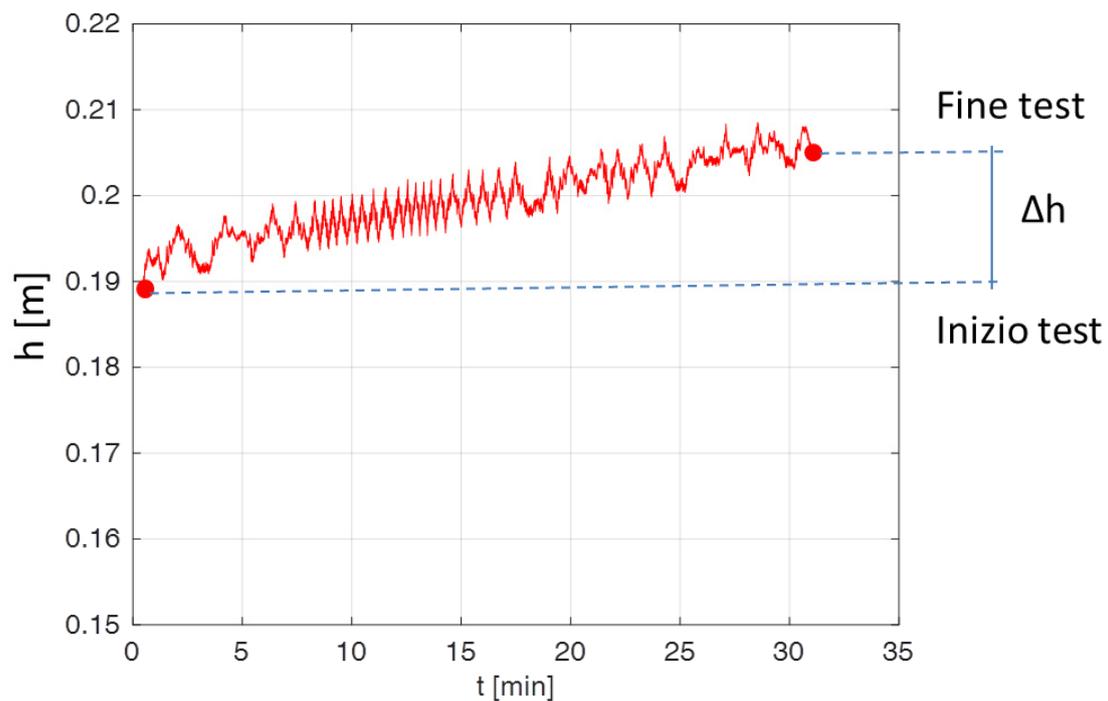


Figura 5.6 Esempio del livello idrico rilevato dalla sonda acustica posizionata sopra la vaschetta di raccolta dei volumi traccimati a tergo del modello.  $\Delta h$  indica il volume traccimato misurato in funzione della differenza tra il livello idrico alla fine del test e quello iniziale.

---

## 6 Esperimenti condotti

### 6.1 Generalità

Per il presente studio è stato realizzato un modello fisico rappresentativo della diga foranea del porto di Isola delle Femmine allo scopo di valutarne la stabilità della mantellata e le principali performance idrodinamiche. Nello specifico, sono state effettuate diverse prove sperimentali in presenza di onde irregolari allo scopo di esaminare il comportamento della struttura soggetta all'azione di diversi stati di mare, ciascuno caratterizzato da un diverso tempo di ritorno.

Nei paragrafi seguenti vengono descritti preliminarmente i diversi esperimenti condotti e successivamente i risultati delle analisi principali sulla stabilità della mantellata, sulla riflessione e sulla tracimazione del moto ondoso.

### 6.2 Prove effettuate per la valutazione della tracimazione e della riflessione

Al fine di quantificare i volumi tracimati a tergo della struttura e la riflessione dovuta all'impatto delle onde con la struttura sono condotti specifici test su due configurazioni. In particolare, come già indicato precedentemente, la configurazione 1 riproduce in scala l'effettiva sezione corrente prevista dal progetto definitivo, adottando però Accropodi da 16 m<sup>3</sup>. Nella seconda configurazione analizzata, gli scogli da 7-10 t previsti tra l'ultima fila di Accropodi e il muro paraonde sono stati sostituiti con due file di Accropodi disposti in maniera tale da non superare la quota di coronamento del muro paraonde. Quest'ultima configurazione è stata analizzata al fine di poter verificare se la disposizione degli Accropodi usualmente impiegata potesse ridurre la tracimazione a tergo della struttura.

I test condotti per la valutazione della tracimazione e della riflessione sono riportati nella Tabella 6.I e nella Tabella 6.II, rispettivamente per la configurazione 1 e la configurazione 2. Per la configurazione 1 sono stati

---

inclusi anche i test effettuati per la valutazione del danno descritti nel paragrafo successivo.

Tabella 6.1 La successione di stati di mare simulati per la valutazione della portata tracimata a tergo della diga foranea del porto di Isola delle Femmine: configurazione 1.

Numero	Modello		Protipo	
	Hm0 [m]	Tp [s]	Hm0 [m]	Tp [s]
1	0.055	1.18	4.40	10.55
2	0.055	1.15	4.38	10.29
3	0.056	1.15	4.46	10.29
4	0.061	1.15	4.91	10.28
5	0.061	1.34	4.88	11.94
6	0.062	1.21	4.92	10.82
7	0.069	1.33	5.50	11.94
8	0.059	1.21	4.74	10.81
9	0.063	1.15	5.04	10.28
10	0.063	1.15	5.05	10.28
11	0.074	1.15	5.95	10.28
12	0.075	1.21	6.02	10.81
13	0.071	1.21	5.66	10.81
14	0.075	1.33	5.98	11.94
15	0.067	1.26	5.32	11.29
16	0.068	1.30	5.44	11.61
17	0.084	1.33	6.70	11.94
18	0.092	1.36	7.34	12.16
19	0.102	1.52	8.13	13.61
20	0.104	1.37	8.34	12.28

---

Tabella 6.II La successione di stati di mare simulati per la valutazione della portata tracimata a tergo della diga foranea del porto di Isola delle Femmine: configurazione 2.

Numero	Modello		Protipo	
	Hm0 [m]	Tp [s]	Hm0 [m]	Tp [s]
21	0.061	1.15	4.86	10.29
22	0.079	1.03	6.31	9.22
23	0.093	1.10	7.43	9.85
24	0.092	1.15	7.36	10.29
25	0.062	1.10	5.00	9.80
26	0.052	1.12	4.16	10.04
27	0.071	1.26	5.67	11.31
28	0.082	1.15	6.59	10.29
29	0.076	1.10	6.09	9.80
30	0.067	1.15	5.39	10.29
31	0.113	1.24	9.07	11.08

---

### 6.3 Prove effettuate per la valutazione del danno

Per la valutazione del danno si è fatto riferimento alla configurazione di progetto, indicata nel presente elaborato come configurazione 1.

In particolare, per la valutazione del danno sono stati condotti nella vasca test con crescenti impatti del moto ondoso, mediante la simulazione di uno stato di mare composto da 5000 onde, suddiviso in tre intervalli di uguale durata ogni tempo di ritorno considerato. In particolare, sono stati simulati i seguenti stati di mare ciascuno caratterizzato da un diverso tempo di ritorno:

- I. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa prossima al 80% dell'onda di progetto. Tale stato di mare è caratterizzato da un tempo di ritorno pari a circa 25 anni.
- II. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa con tempo di ritorno pari a circa 50 anni.
- III. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa con tempo di ritorno pari a circa 100 anni, ossia l'onda di progetto.
- IV. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa pari al 120% dell'onda di progetto. Tale onda è caratterizzata da un tempo di ritorno pari a circa 350 anni.

Si osserva che dopo le prove individuali il modello fisico della diga foranea del porto di Isola delle Femmine non viene riparato, in modo tale che possa essere effettuata una stima del danno cumulato.

Le caratteristiche idrodinamiche del moto ondoso impiegate per la valutazione del danno nella diga foranea del porto di Isola delle Femmine sono riportate nella Tabella 6.III. In particolare, la citata Tabella 6.III riporta: il numero identificativo dello stato di mare; il numero identificativo del test; le caratteristiche idrodinamiche del moto ondoso a scala di modello; le caratteristiche idrodinamiche del moto ondoso a scala di prototipo; il valore medio dell'altezza d'onda significativa e del periodo di picco osservati nei tre intervalli dello stato di mare; le caratteristiche idrodinamiche del moto ondoso a scala di prototipo *target*, ossia le

---

caratteristiche del moto ondoso in prossimità della struttura valutate nello studio idraulico marittimo a supporto del progetto della diga foranea del porto di Isola delle Femmine.

Tabella 6.III Successione di stati di mare simulati per la valutazione del danno nella diga foranea del porto di Isola delle Femmine.

Stato di mare	Numero	Modello		Protipo		Media		Onda target		Tr [anni]
		Hm0 [m]	Tp [s]	Hm0 [m]	Tp [s]	Hm0 [m]	Tp [s]	Hm0 [m]	Tp [s]	
I	1	0.059	1.21	4.74	10.81	4.95	10.46	5.20	11.00	25 (80% onda di progetto)
	2	0.063	1.15	5.04	10.28					
	3	0.063	1.15	5.05	10.28					
II	4	0.074	1.15	5.95	10.28	5.88	10.63	5.81	11.00	50
	5	0.075	1.21	6.02	10.81					
	6	0.071	1.21	5.66	10.81					
III	7	0.075	1.33	5.98	11.94	6.38	11.94	6.47	11.72	100 (onda di progetto)
	10	0.084	1.33	6.70	11.94					
	11	0.081	1.33	6.44	11.94					
IV	12	0.101	1.41	8.07	12.65	7.79	12.52	7.74	12.48	350 (120 % onda di progetto)
	14	0.087	1.41	6.96	12.65					
	15	0.104	1.37	8.34	12.28					

## 6.4 Analisi della riflessione

I risultati relativi al coefficiente di riflessione delle configurazioni studiate nell'indagine sperimentale, ossia il parametro che misura la quota di energia che la struttura riflette in seguito all'impatto tra un'onda e la struttura stessa, sono stati confrontati con il modello empirico proposto da Zanuttigh e van der Meer (2008). Tale confronto è mostrato in Figura 6.2. Tale metodo si basa sulla seguente relazione:

$$K_r = \tanh(a_z \xi_0^{b_z}) \quad (6.1)$$

dove  $\xi_0$  è il parametro di *Iribarren* calcolato mediante la seguente relazione:

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H m_0}{g T_{m-1,0}^2}}} \quad (6.2)$$

dove  $T_{m-1,0}$  è il periodo medio energetico e  $\tan \alpha$  è la pendenza della scarpata lato mare. I coefficienti  $a_z$  e  $b_z$  sono definiti dalla seguente relazione:

$$a_z = 0.167 [1 - \exp(-3.2\gamma_f)] \quad (6.3)$$

$$b_z = 1.49(\gamma_f - 0.38)^2 + 0.86 \quad (6.4)$$

La rappresentazione grafica del metodo proposto da Zanuttigh e van der Meer (2008) è riportata in Figura 6.1. In particolare, la figura riporta il confronto tra i valori del coefficiente di riflessione stimato per diverse tipologie di strutture (massi artificiali, paramento liscio, massi naturali con struttura impermeabile e massi naturali con struttura permeabile) e il coefficiente di riflessione stimato mediante il metodo proposto da Zanuttigh e van der Meer (2008). (Fonte: Zanuttigh e van der Meer (2008))

---

La Figura 6.2 riporta il confronto tra il coefficiente di riflessione stimato per la configurazione 1, per la configurazione 2 e quello stimato mediante il modello di Zanuttigh e van der Meer (2008). In particolare, in quest'ultimo caso i coefficienti,  $a_z$  e  $b_z$ , della relazione 7.2 sono pari, rispettivamente, a 0.1287 e 0.8695.

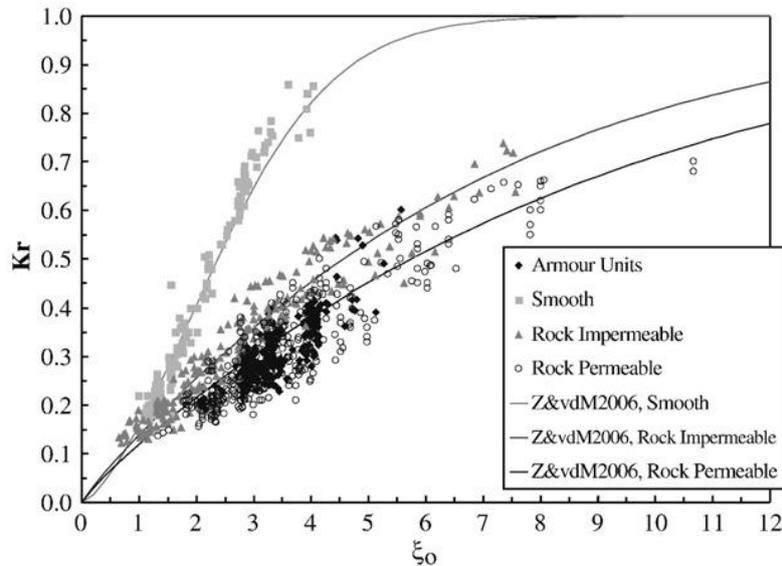


Figura 6.1 Confronto tra i valori del coefficiente di riflessione stimato per diverse tipologie di strutture e quello stimato mediante il metodo proposto da Zanuttigh e van der Meer (2008). (Fonte: Zanuttigh e van der Meer (2008))

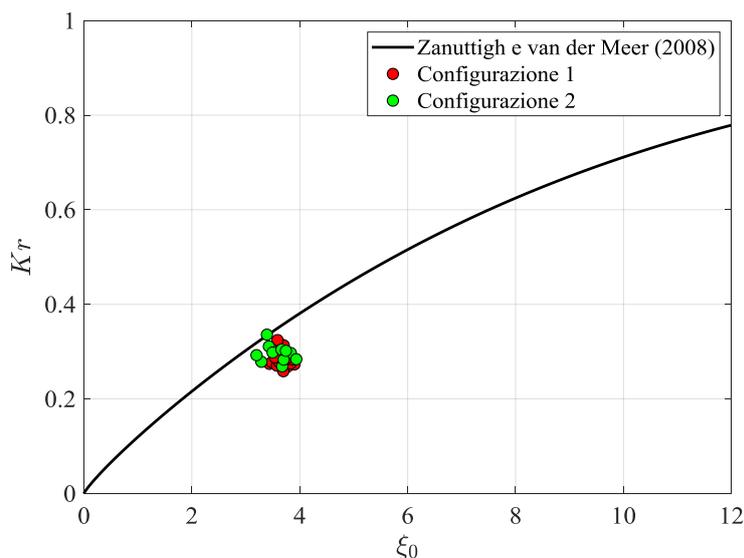


Figura 6.2 Confronto tra il coefficiente di riflessione stimato nella configurazione 1, nella configurazione 2 e i valori stimati mediante il metodo proposto da Zanuttigh e van der Meer (2008).

Come si evince dall'analisi della citata Figura 6.2, le due configurazioni comportano valori simili del coefficiente di riflessione. Inoltre, si rileva che i risultati relativi al coefficiente di riflessione sono compatibili con i valori osservati per altre tipologie di strutture la cui mantellata è realizzata in massi artificiali (vedere la Figura 6.1). Rispetto al modello proposto da Zanuttigh e van der Meer (2008) non si rilevano significative differenze. In particolare, i coefficienti di riflessione stimati nella presente campagna sperimentale presentano lo stesso grado di dispersione rispetto al curva descritta dalle relazioni proposte da Zanuttigh e van der Meer (2008) di altre tipologie di strutture la cui mantellata è realizzata in massi artificiali (vedere la Figura 6.1).

---

## 6.6 Analisi della tracimazione

I risultati dei test condotti per la valutazione della tracimazione sono stati sintetizzati in Figura 6.3 e in Figura 6.4.

In particolare, la citata Figura 6.3 riporta il confronto tra le portate di tracimazione adimensionali misurate nella campagna sperimentale e la formula empirica fornita dall’Eurotop Manual (2018). Tale formula si basa sulla seguente relazione:

$$q_{in}^* = \frac{q_{in}}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = a \cdot \exp\left(-\left(b \cdot \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f}\right)^c\right) \quad (6.5)$$

dove:  $q_{in}$  [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ] è la portata media;  $g$  è l’accelerazione di gravità;  $H_{m0}$  indica l’altezza d’onda significativa del moto ondoso incidente;  $R_c$  [m] indica la quota di coronamento del muro paraonde rispetto al livello medio del mare;  $\gamma_f$  è un parametro che misura la scabrezza della struttura, nel caso di Accropodi tale coefficiente è pari a 0.46 (Eurotop Manual, 2018). I coefficienti  $a$ ,  $b$  e  $c$  sono pari a 0.09, 1.5 e 1.3. Nel grafico sono riportati anche gli intervalli di confidenza del 95%. Inoltre, in Figura 6.3 si riportano i valori di portata ricavati da una campagna sperimentale condotta sugli Accropodi desunti da Bruce *et al.* (2009).

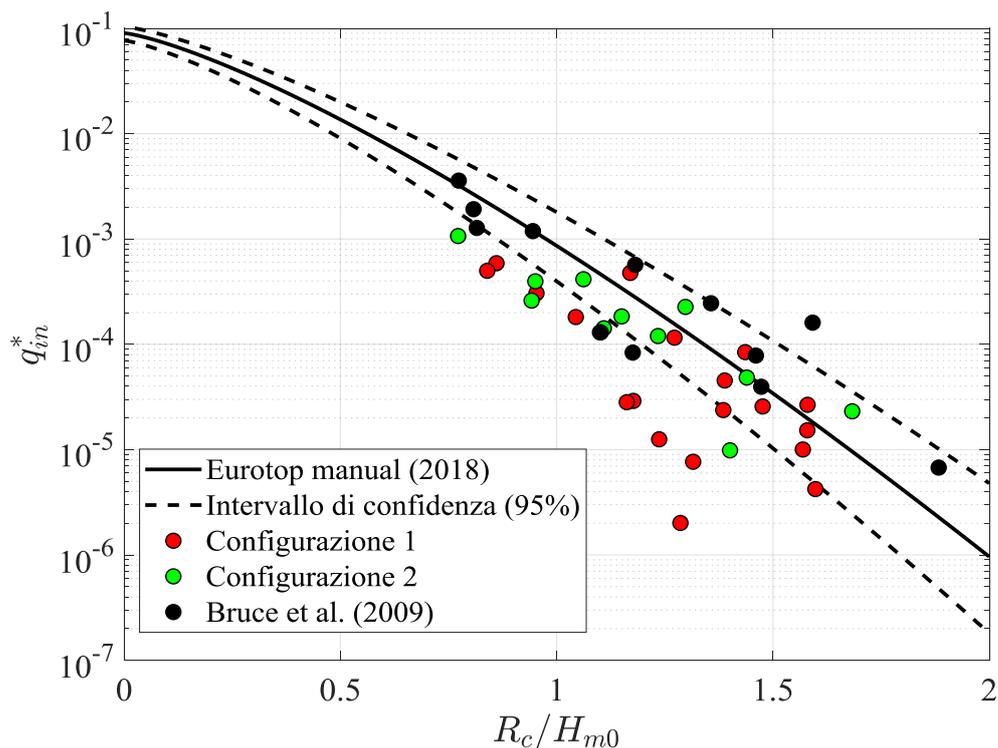


Figura 6.3 Confronto tra le portate misurate nella campagna sperimentale, la formula empirica fornita dall’Eurotop Manual (2018) e i valori di portata ricavati da una campagna sperimentale condotta sugli Accropodi descritta in Bruce *et al.* (2009).

Dall’analisi delle due figure, si evince che i risultati della campagna sperimentale sono in accordo sia con la formula empirica proposta dall’Eurotop Manual (2018) sia con i risultati di un’altra campagna sperimentale condotta su un modello di una diga realizzata in Accropodi (Bruce *et al.*, 2009).

Dalla citata Figura 6.3, si rileva inoltre che al variare delle condizioni di moto ondoso le due configurazioni della diga foranea del porto di Isola delle Femmine comportano valori di portata pressoché simile.

La Figura 6.4 riporta gli stessi valori di portata della Figura 6.3 espressi però in forma dimensionale. Inoltre, nella stessa figura sono riportate delle linee in ciano le quali indicano i tempi di ritorno delle altezze d’onda significative in ascissa e le linee in rosso indicano dei limiti sulla portata tracimata. In particolare, secondo l’U.S. Army Corps of Engineers e

l'Eurotop Manul (2008), per evitare condizioni di pericolo per i pedoni e per i veicoli la portata dovrebbe essere inferiore a 0.3 l/s/m; mentre per la sicurezza dei natanti ormeggiati a tergo della diga foranea la portata dovrebbe essere inferiore a 5 l/s/m.

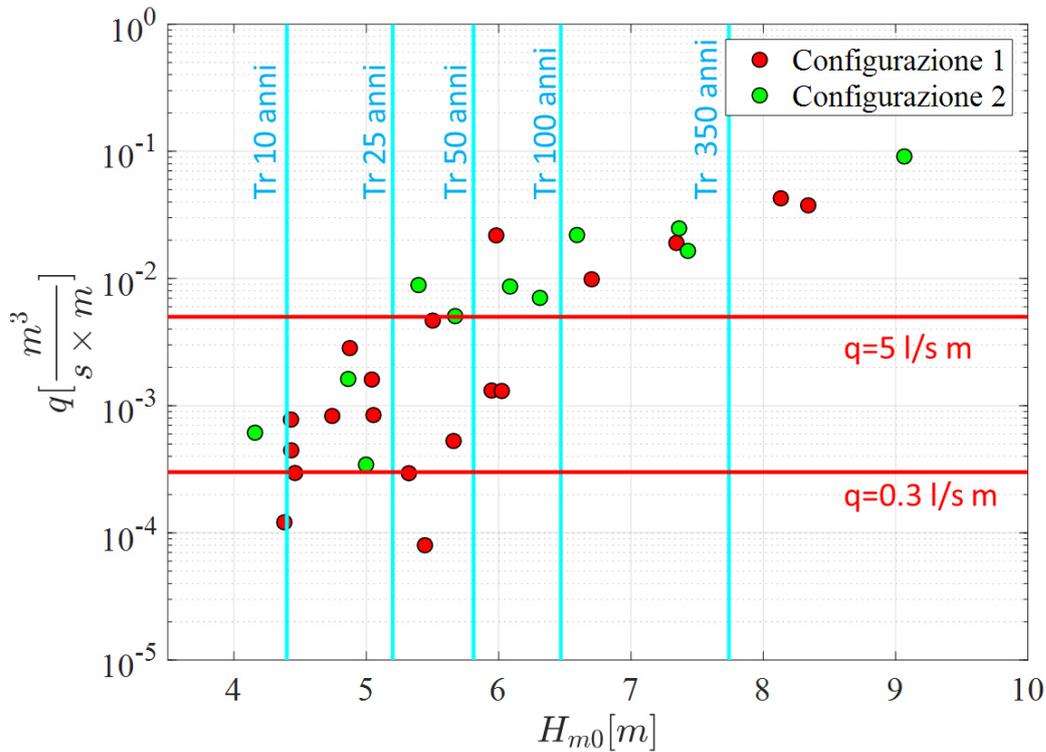


Figura 6.4 Portata media trascinata a tergo della struttura per unità di larghezza della diga. Confronto tra la Configurazione 1 e la Configurazione 2. Le linee in ciano indicano i tempi di ritorno delle altezze d'onda significative. La linea rossa relativa alla porta 0.3 l/s/m indica una portata oltre la quale si potrebbero avere condizioni di pericolo per i pedoni e per i veicoli. La linea rossa relativa alla porta 5 l/s/m indica una portata oltre la quale si potrebbero avere condizioni di pericolo per i natanti ormeggiati a tergo della diga.

---

## 6.7 Analisi del danno

Prima di passare all'analisi del danno della mantellata, è opportuno ricordare che nel caso in specie, la mantellata risulta costituita da massi tipo Accropodi. Tali massi artificiali, che vengono disposti in singolo strato, resistono all'azione del moto ondoso non solo in base a quello che è il loro peso, ma soprattutto anche in base allo loro particolare forma geometrica che consente un effetto di concatenazione reciproca dei massi. Ciò implica il fatto che l'analisi del danno deve essere effettuata con tecniche sofisticate come quelle adottate. Infatti, spostamenti anche apparentemente modesti dei massi potrebbero inficiare la resistenza per concatenazione.

Nel presente paragrafo si riportano preliminarmente i risultati dell'analisi condotta sulla struttura tridimensionale del modello ricavata attraverso la tecnica *Structure from Motion*. Tale analisi ha permesso di effettuare delle valutazioni delle variazioni di quota altimetrica della mantellata e di individuare le zone maggiormente vulnerabili, ossia quelle zone maggiormente soggette all'azione del moto ondoso.

In una seconda fase sono stati stimati i parametri  $N_d$  e  $N_{od}$  i quali attraverso i limiti indicati della Normativa BS 6349 e i limiti forniti dal U.S. *Army Corps of Engineers* hanno permesso la definizione del livello di danno subito dal modello fisico.

### 6.7.1 Analisi delle variazioni di quota altimetrica della mantellata

Attraverso la tecnica dello *Structure from Motion* è stato possibile ricostruire la struttura tridimensionale del modello fisico alla fine dei diversi stati di mare simulati. Successivamente, da tale struttura è stato possibile ricostruire una superficie su una maglia regolare che riproduce le variazioni della quota altimetrica della mantellata.

Dalla Figura 6.5 alla Figura 6.7 si riporta la differenza tra le superfici ricavate dalla struttura 3D del modello alla fine dei diversi stati di mare simulati. In particolare, la Figura 6.5 riporta confronto tra la configurazione dopo la simulazione degli stati di mare I e II e la

---

configurazione iniziale del modello; la Figura 6.6 riporta confronto tra la configurazione dopo la simulazione dello stato di mare III e la configurazione dopo la simulazione degli stati di mare I e II; la Figura 6.7 riporta il confronto tra la configurazione dopo la simulazione dello stato di mare IV e la configurazione dopo la simulazione dello stato di mare III.

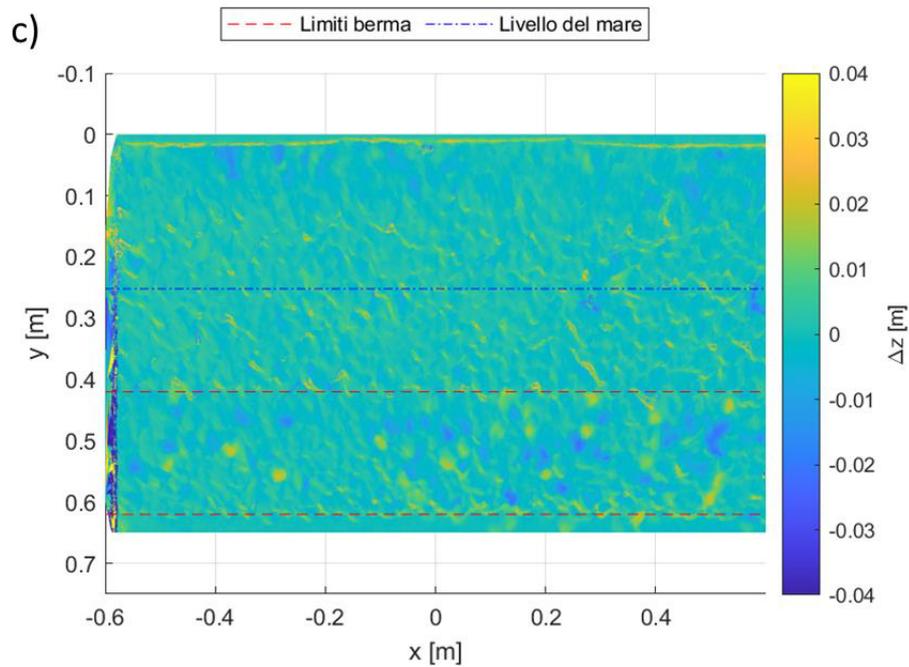
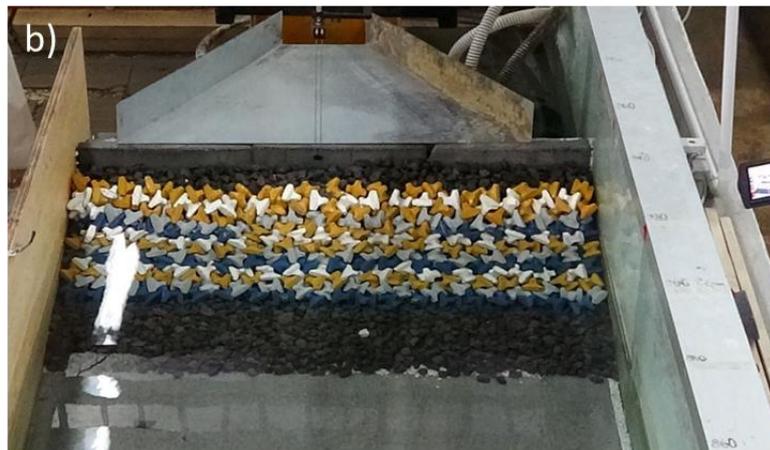


Figura 6.5 Analisi del danno: a) configurazione iniziale; b) configurazione dopo la simulazione degli stati di mare I e II; c) differenza delle quote altimetriche della mantellata.

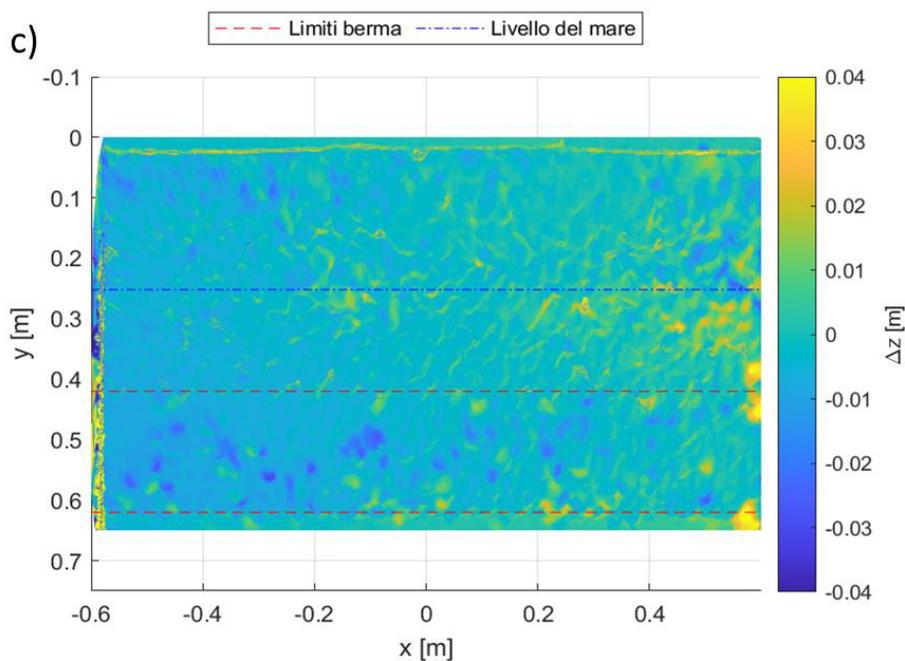
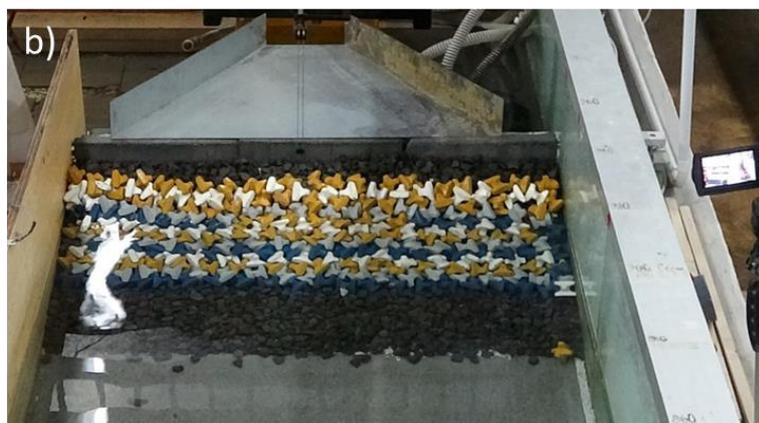


Figura 6.6 Analisi del danno: a) configurazione dopo la simulazione degli stati di mare I e II; b) configurazione dopo la simulazione dello stato di mare III; c) differenza delle quote altimetriche della mantellata.

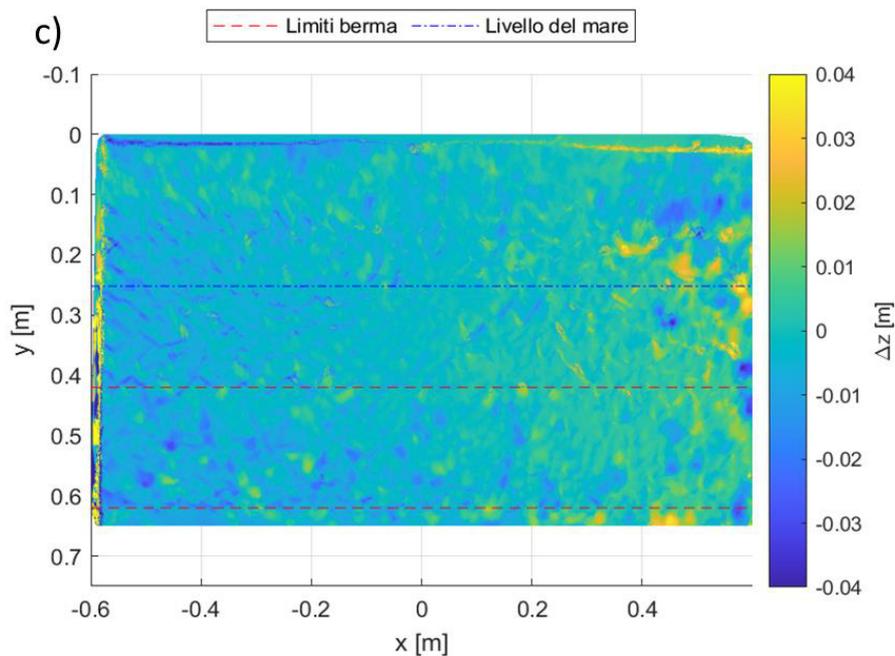
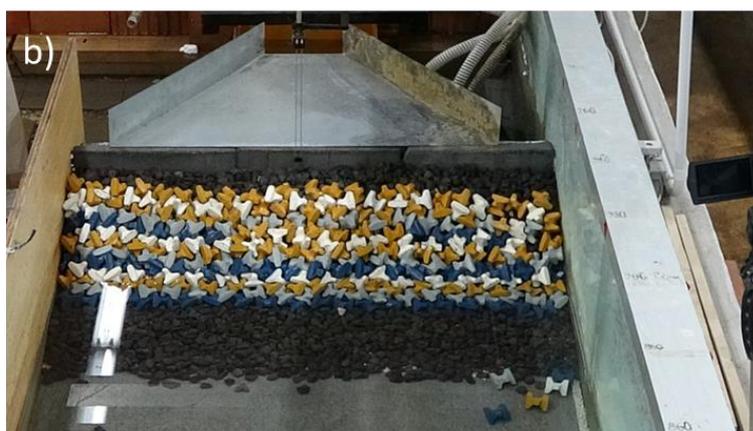
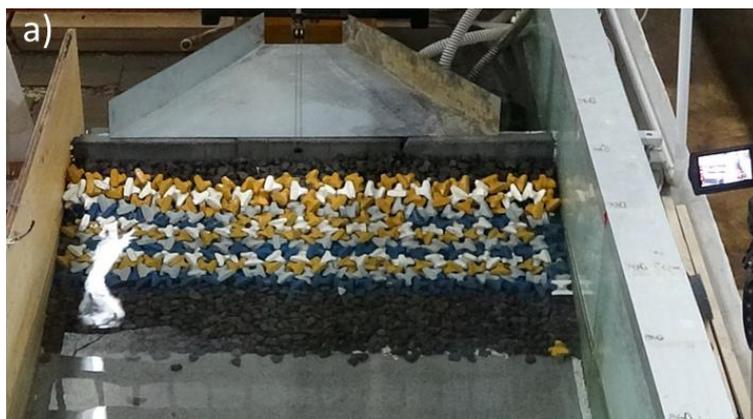


Figura 6.7 Analisi del danno: a) configurazione dopo la simulazione dello stato di mare III; b) configurazione dopo la simulazione dello stato di mare IV; c) differenza delle quote altimetriche della mantellata.

---

La Figura 6.8 e la Figura 6.9 mostrano la nuvola di punti del modello fisico rispettivamente prima dell'avvio dei test e alla fine dei test, ossia dopo la simulazione dello stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa pari al 120% dell'altezza d'onda significativa di progetto.

La Figura 6.10 riporta la differenza tra la superficie 3D delle configurazioni mostrate in Figura 6.8 e in Figura 6.9.

Dall'analisi della Figura 6.10 si evince che la zona che risente maggiormente dell'azione del moto ondoso è la porzione di mantellata posta ad un'ascissa di circa 0.6 m, ossia quella posta in prossimità della parete della vasca sperimentale. Per quanto concerne la altre parti della mantellata, non si rilevano significative variazioni della quota altimetrica.

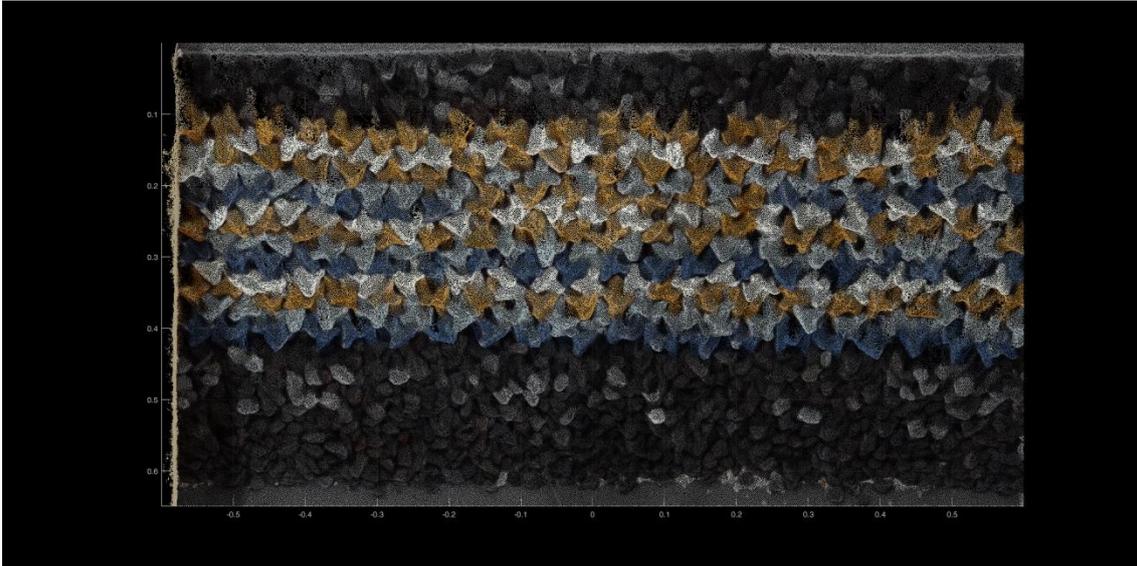


Figura 6.8 Vista dell'alto della configurazione iniziale della mantellata del modello fisico.

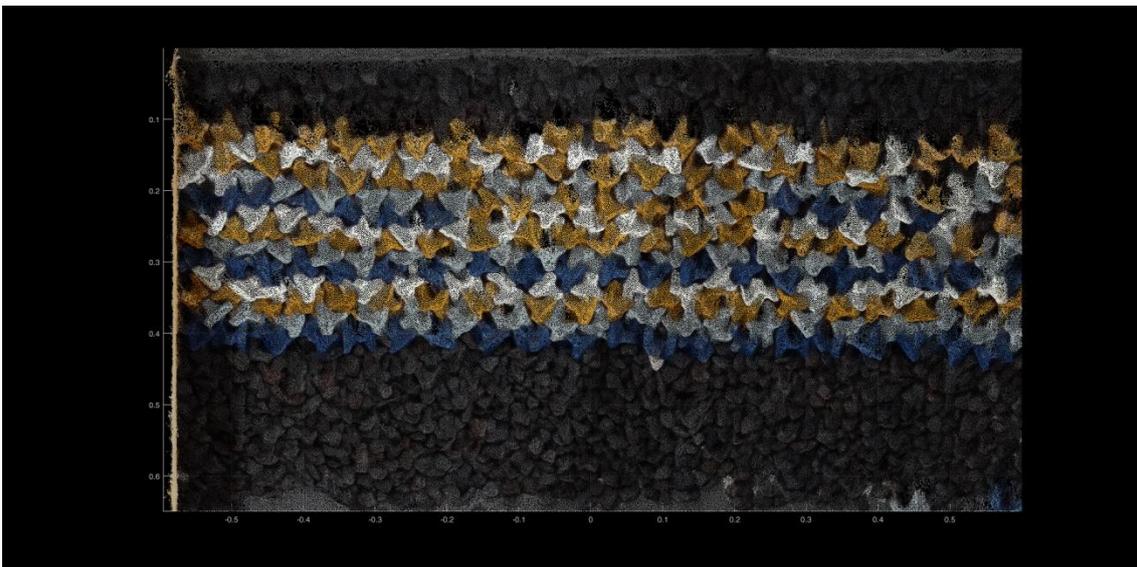


Figura 6.9 Vista dell'alto della configurazione dopo la simulazione dello stato di mare IV, ossia lo stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa pari al 120% dell'altezza d'onda significativa di progetto.

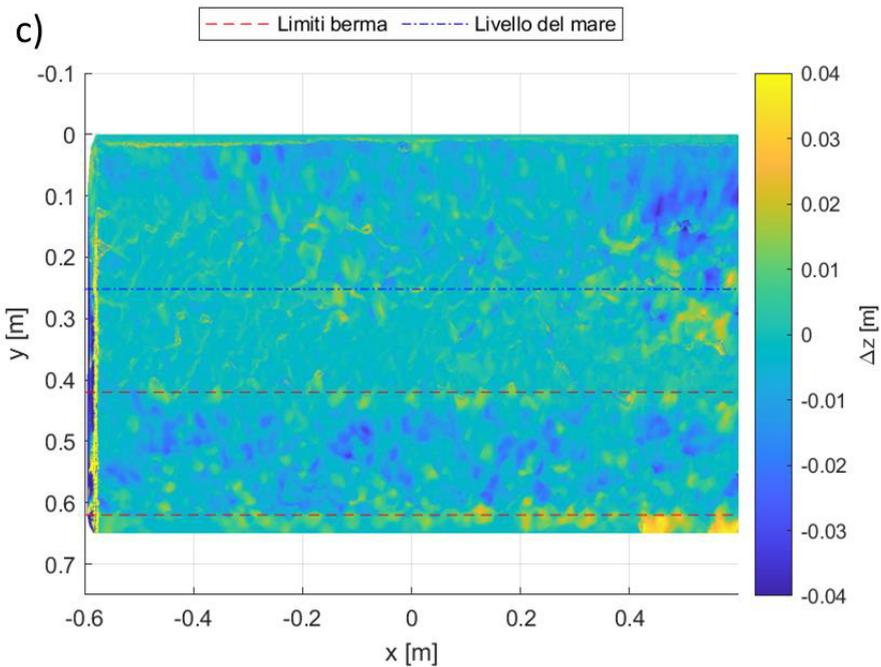
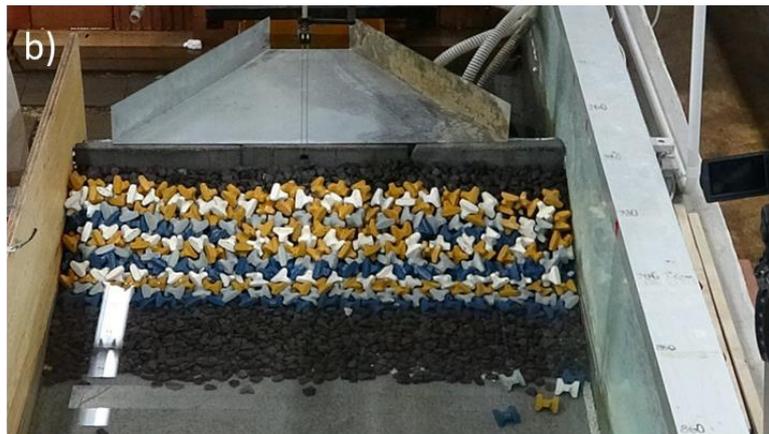


Figura 6.10 Analisi del danno: a) configurazione iniziale; b) configurazione dopo la simulazione dello stato di mare IV; c) differenza delle quote altimetriche della mantellata.

---

### 6.7.2 Parametri $N_d$ e $N_{od}$

Le analisi riportate nel paragrafo precedente hanno consentito di rilevare le zone maggiormente vulnerabili, ossia quelle zone maggiormente soggette all'azione del moto ondoso. Nel presente paragrafo si cerca di fornire una misura degli spostamenti osservati e di valutare il livello di danno che il modello ha subito in esito all'azione del moto ondoso.

In particolare, al fine di definire il livello del danno in funzione dei parametri  $N_d$  e  $N_{od}$  si è fatto riferimento alle definizioni fornite sia dal U.S. Army Corps of Engineers che dalla Normativa BS 6349 (Maritime structures, Part 7: Guide to the design and construction of breakwaters, 1991). Nel caso di Accropodi tali valori sono stati sintetizzati nella Tabella 6.IV. Nella citata tabella si è cercato di adattare la classificazione fornita dalla Normativa BS 6349 con quella fornita dal U.S. Army Corps of Engineers.

Tabella 6.IV Definizione dei livelli di danno fornite dal U.S. Army Corps of Engineers e quelle secondo la Normativa BS 6349.

Riferimento	Parametro	Danno nullo	Danno intermedio	Crollo
U.S. Army Corps of Engineers	$N_d$ [%]	0	1-5	>10
	$N_{od}$	0		0.5
Normativa BS 6349	$N_d$ [%]	0	1-5	>5

Considerato che nel modello della diga foranea del porto di Isola delle Femmine sono stati posizionati 255 Accropodi, per osservare nel modello oggetto di studio un danno intermedio il numero di massi che si dovrebbero spostare è compreso tra 2-12. Mentre il livello di danno può essere classificato come crollo se il numero di massi che si spostano è superiore a 12 se si considera la Normativa BS 6349 e par a 22 se si considera il livello di danno fornito dal U.S. Army Corps of Engineers.

La Figura 6.11 riporta alcune immagini rappresentative dello stato del modello della diga foranea del porto di Isola delle Femmine prima e dopo la simulazione delle diverse condizioni di moto ondoso. Inoltre, nella

Figura 6.11 si riportano le seguenti informazioni: il numero di massi posizionati; il numero di massi movimentati e i valori dei parametri  $N_d$  e  $N_{od}$ . I valori dei due parametri ottenuti nei diversi test sono riportati anche in Tabella 6.V.

Tabella 6.V Valori dei parametri  $N_d$  e  $N_{od}$  ricavati a seguito della sequenza degli stati mare simulati.

Stato di mare	Parametro $N_d$ [%]	Esito in funzione del parametro $N_d$	Parametro $N_{od}$	Esito in funzione del parametro $N_{od}$
I	-	-	-	-
II	0.00	Danno nullo	0.00	Danno nullo
III	0.78	Danno nullo	0.05	Danno nullo
IV	4.31	Danno intermedio	0.31	Danno intermedio

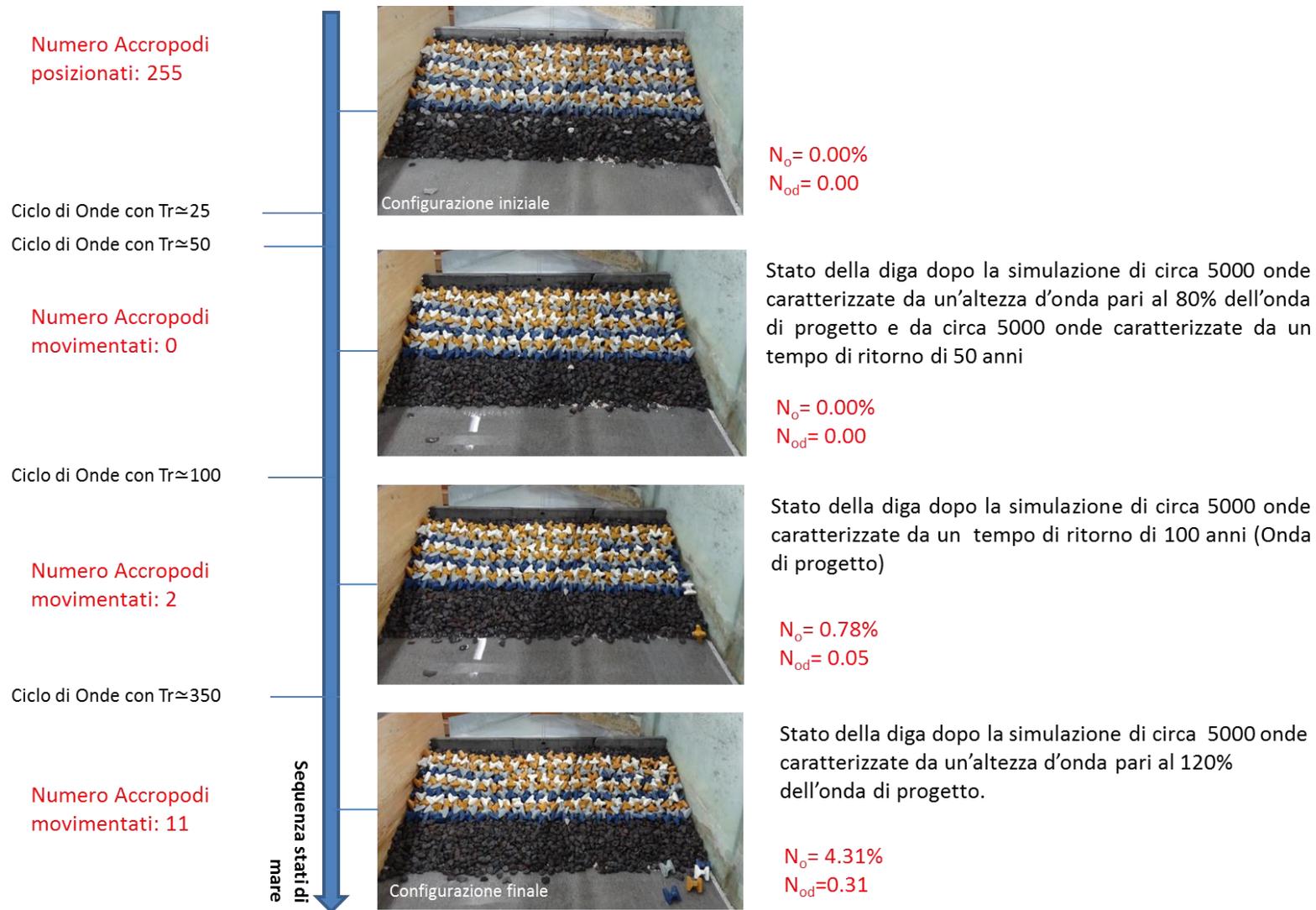


Figura 6.11 Analisi del danno cumulato: evoluzione dello stato della diga a seguito delle diverse mareggiate simulate.

---

Come si evince dalla Figura 6.11, il danno risulta essere nullo dopo gli stati di mare I e II. Dopo la simulazione dello stato di mare III, ossia lo stato di mare di progetto, in prossimità della parete della vasca si rileva lo scivolamento di due Accropodi sopra la berma (masso bianco) che al piede della berma (masso giallo). Dopo la simulazione dello stato di mare IV, in prossimità della parete della vasca si rileva lo scivolamento di alcuni massi. In particolare, come si evince dalla Figura 6.12, 5 massi sono spostati dalla scarpata al piede della struttura. Come invece si evince dalla Figura 6.13, i massi che subiscono degli spostamenti almeno pari al 70% dell'altezza del singolo masso ( $0.7 \times H = 0.7 \times 0.0464\text{m} = 0.032$ ) sono circa 6. L'entità degli spostamenti di tali massi, valutata attraverso la nuvola di punti ricavati con la tecnica *Structure from Motion*, è riportata in Tabella 6.VI.

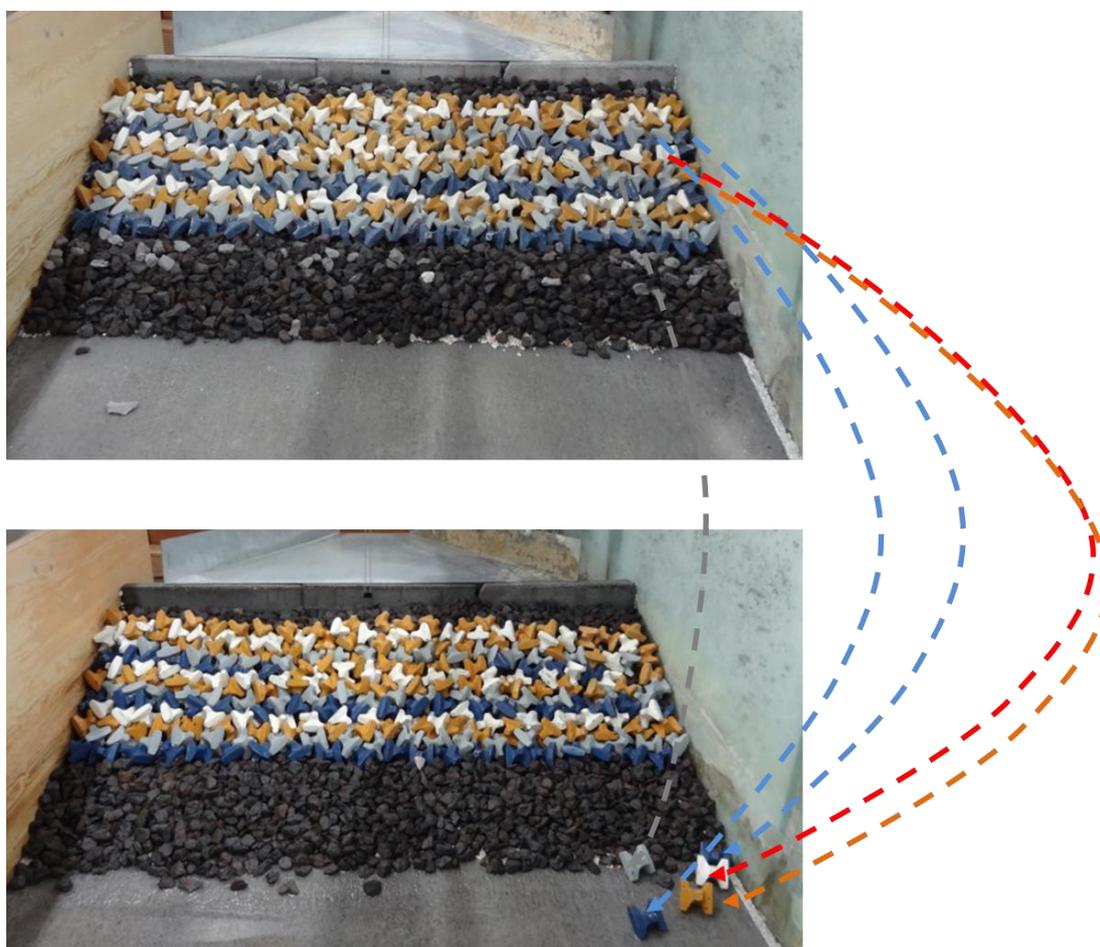
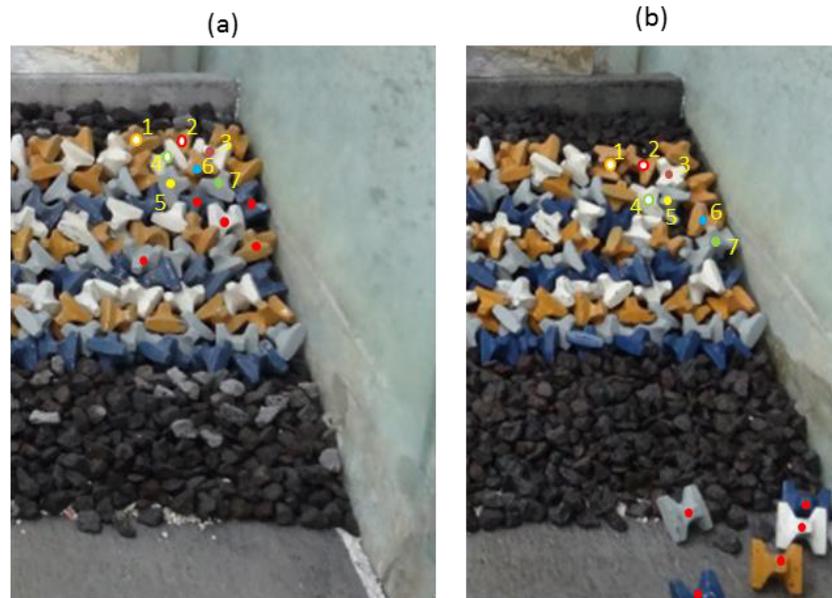
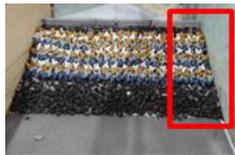


Figura 6.12 Indicazione sugli spostamenti degli Accropodi dovuti all'azione del moto ondoso. Massi spostati al piede del modello.



• Massi spostati al piede del modello

Figura 6.13 Indicazione sugli spostamenti degli Accropodi dovuti all'azione del moto ondoso: configurazione iniziale della mantellata; b) configurazione della mantellata dopo la simulazione dello stato di mare IV.

Tabella 6.VI Entità degli spostamenti subiti dagli Accropodi dopo la simulazione dello stato di mare IV. In neretto gli spostamenti superiori al 70% dell'altezza degli Accropodi (van der Meer, 1999).

Numero identificativo masso	Configurazione iniziale		Configurazione dopo lo stato di mare IV		Spostamento [m]
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	
1	0.456	0.129	0.469	0.153	0.028
2	0.511	0.114	0.514	0.148	<b>0.034</b>
3	0.554	0.139	0.556	0.175	<b>0.036</b>
4	0.499	0.148	0.514	0.200	<b>0.053</b>
5	0.496	0.197	0.546	0.205	<b>0.051</b>
6	0.535	0.165	0.588	0.248	<b>0.098</b>
7	0.554	0.191	0.588	0.277	<b>0.093</b>

Tuttavia, è bene sottolineare che tale comportamento è confinato alle pareti, ossia laddove l'effetto di distribuzioni di pressioni diverse da quelle ipotizzate, e dunque non risulta particolarmente preoccupante. Inoltre, come è noto, la stabilità di tali massi è garantita non solo dal loro peso ma anche dalla loro forma che consente una concatenazione (o fenomeno di *interlocking*) e dal mutuo attrito che si instaura tra gli stessi massi. Pertanto gli Accropodi alle pareti (vedere la Figura 6.12 e la Figura 6.13), essendo solo parzialmente incastrati tra loro, diversamente che nella realtà, sono maggiormente vulnerabili all'azione del moto ondoso rispetto ai massi posizionati nella zona centrale.

In particolare, se si considera un tronco di mantellata che esclude l'effetto parete di estensione pari a 0.75 m, in analogia alla metodologia adottata in Burcharth *et al.* (1998), il livello di danno si riduce a "nullo" (vedere la Tabella 6.VII).

Tabella 6.VII Valori dei parametri  $N_d$  e  $N_{od}$  ricavati a seguito della sequenza degli stati mare simulati trascurando l'effetto parete.

Stato di mare	Parametro $N_d$ [%]	Esito in funzione del parametro $N_d$	Parametro $N_{od}$	Esito in funzione del parametro $N_{od}$
I	-	-	-	-
II	0.00	Danno nullo	0.00	Danno nullo
III	0.00	Danno nullo	0.00	Danno nullo
IV	0.00	Danno nullo	0.00	Danno nullo

---

## 7 Analisi dei risultati e conclusioni

Il porto di Isola delle Femmine (PA) è situato fra il Golfo di Castellamare e il Golfo di Palermo, alla radice di ponente del promontorio detto Punta del Passaggio. Attualmente il porto è protetto da due opere foranee che non garantiscono adeguata protezione. Infatti, lo specchio acqueo del porto risulta particolarmente esposto alle mareggiate provenienti da N-NO, con la conseguente limitazione di uso degli ormeggi in banchina ai soli mesi estivi. Al fine di superare detti limiti, l'Amministrazione ha incaricato l'ing. Francesco Giordano di redigere il progetto di *“Completamento delle opere marittime esistenti per la messa in sicurezza del porto (ai sensi dell'art.5 della L.R. 21/98) riguardante i lavori di potenziamento del tratto esistente della diga foranea, il prolungamento della stessa dalla progr.92,00m alla progr.380,00m- Riqualifica della mantellata della nuova diga di sottoflutto”*.

Per quanto concerne il prolungamento della diga foranea esistente fino alla prog. 380.00 m, il progetto esecutivo originario ha inizialmente previsto la realizzazione di un'opera a gettata, con mantellata in massi artificiali tipo Accropodi da  $18 \text{ m}^3$ , ed il banchinamento interno della stessa con cassoncini antiriflettenti.

In esito ad un aggiornamento dello studio idraulico marittimo condotto dallo stesso progettista, effettuato sulla base dei nuovi dati rilevati dalla boa ondometrica di Capo Gallo, è emersa la possibilità di ridurre il volume degli Accropodi. In particolare, il progettista ha proposto di limitare il volume dei massi di mantellata a  $16 \text{ m}^3$ ; e ciò al fine di garantire al contempo adeguate condizioni di stabilità strutturale insieme a una significativa riduzione dei costi per l'Amministrazione, anche per l'effetto di una maggiore facilità, velocità ed economicità nella posa degli stessi massi.

Allo scopo di verificare l'efficacia delle soluzioni definite in fase di progettazione, il Comune di Isola delle Femmine ha affidato al Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR) dell'Università degli Studi di Catania la verifica idraulica e strutturale su modello fisico di una sezione corrente della citata diga foranea di sopraflutto. In

---

particolare, sulla base delle indicazioni fornite dal responsabile scientifico del Comune di Isola delle Femmine, ing. Giordano, la campagna sperimentale condotta presso il Laboratorio di Idraulica del DICAR si è focalizzata sulla sezione maggiormente sollecitata dal moto ondoso e, precisamente, sulla sezione tipo del prolungamento dalla prog. 135.20 m alla prog. 362.10 m. Inoltre, è stato richiesto al DICAR di articolare la campagna sperimentale in due fasi. E precisamente: di verificare la sezione corrente della diga foranea considerando massi da  $16 \text{ m}^3$  e, solo nel caso di esito negativo di tale verifica, di verificare la sezione corrente della diga foranea considerando massi da  $18 \text{ m}^3$ .

Al fine di ottimizzare la sezione corrente nei riguardi del fenomeno della tracimazione, chi scrive ha suggerito di effettuare alcune prove su due diverse configurazioni della diga foranea. La prima configurazione è quella coincidente con l'effettiva sezione corrente prevista dal progetto definitivo. La seconda configurazione è stata modificata in modo tale che gli scogli da 7-10 t previsti tra l'ultima fila di Accropodi e il muro paraonde fossero sostituiti con due file di Accropodi disposti in maniera tale da non superare la quota di coronamento del muro paraonde.

Come è noto, i massi artificiali tipo Accropode, disposti in singolo strato, resistono all'azione del moto ondoso non solo in base a quello che è il loro peso, ma anche in base alla loro particolare forma geometrica che consente un effetto di concatenazione reciproca degli stessi massi. Ciò implica il fatto che l'analisi del danno deve essere effettuata con tecniche sofisticate come quelle adottate nell'ambito della presente analisi sperimentale. Infatti, spostamenti anche apparentemente modesti dei massi potrebbero inficiarne la resistenza per concatenazione. Pertanto, nell'ambito delle prove sperimentali condotte in laboratorio sono state utilizzate diverse tecniche ottiche innovative che hanno consentito di stimare il danno subito dalla struttura con estrema accuratezza.

Il modello fisico realizzato è un modello geometricamente non distorto, bidimensionale, in scala 1:80, per il quale sono stati adottati appropriati criteri di similitudine. 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.

Al fine di effettuare l'analisi del danno, per il modello della diga foranea del porto è stata condotta una serie di test con crescenti impatti del moto ondoso incidente caratterizzato da diversi tempi di ritorno. Ciascuno stato di mare è stato riprodotto considerando non meno di 5000 onde. In particolare, sono stati simulati i seguenti stati di mare:

- I. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa prossima all'80% dell'onda di progetto. Tale stato di mare è caratterizzato da un tempo di ritorno pari a circa 25 anni.
- II. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa con tempo di ritorno pari a circa 50 anni.
- III. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa con tempo di ritorno pari a circa 100 anni (onda di progetto).
- IV. Stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa pari al 120% dell'onda di progetto. Tale onda è caratterizzata da un tempo di ritorno pari a circa 350 anni.

Si precisa che, cautelativamente, il modello non è stato "riparato" alla fine della simulazione del singolo stato di mare, in quanto è stata effettuata anche una stima del danno cumulato.

Oltre ai suddetti test per l'analisi del danno, durante la campagna sperimentale sono stati condotti ulteriori test per approfondire l'analisi dei fenomeni di tracimazione e di riflessione del moto ondoso incidente.

L'analisi della tracimazione e della riflessione ha permesso di accertare che:

- i risultati della campagna sperimentale sulla portata tracimata sono in accordo sia con la formula empirica proposta dall'Eurotop Manual (2018) sia con i risultati di un'altra campagna sperimentale condotta su un modello di una diga realizzata in Accropodi (Bruce *et al.*, 2009);

- 
- i risultati della campagna sperimentale sulla riflessione sono in accordo con il modello proposto da Zanuttigh e van der Meer (2008);
  - al variare delle condizioni di moto ondoso le due configurazioni 1 e 2 della diga foranea del porto comportano valori di portata tracimata e di riflessione pressoché simili.

Il buon accordo tra i risultati sperimentali della presente indagine e quelli di letteratura può essere considerato una conferma indiretta della bontà degli esperimenti effettuati.

Per quanto concerne le verifiche di stabilità della mantellata, la valutazione del danno è stata articolata in due fasi. Nella prima, al fine di individuare le zone maggiormente vulnerabili, ossia quelle zone maggiormente soggette all'azione del moto ondoso, è stata condotta un'analisi sulle variazioni di quota altimetrica della mantellata. Tale analisi è stata basata sulla struttura tridimensionale del modello ricavata attraverso la tecnica *Structure from Motion*. In una seconda fase, sono stati stimati i parametri  $N_d$  e  $N_{od}$ , i quali, attraverso i limiti indicati dalla Normativa BS 6349 e i limiti forniti dal U.S. *Army Corps of Engineers*, hanno permesso la definizione del livello di danno subito dal modello fisico.

Come si evince dall'analisi della Tabella 7.1, in seguito alla simulazione dell'onda di progetto il livello di danno della mantellata è classificato come "danno nullo". Solo in seguito alla simulazione dello stato di mare caratterizzato da un'altezza significativa pari al 120% dell'onda di progetto, il danno passa ad una classificazione di "danno intermedio". Al riguardo, tuttavia, è bene sottolineare che:

- 1) lo stato di mare con onda pari al 120% dell'onda di progetto è caratterizzato da un tempo di ritorno di 350 anni, ossia da un tempo di ritorno molto più elevato di quello di progetto;
- 2) i danni alla mantellata sono confinati alle pareti della canaletta, ossia laddove l'effetto delle distribuzioni di pressioni differisce di più rispetto a quello reale;

3) come è noto, la stabilità dei massi tipo Accropode è garantita non solo dal loro peso ma anche dalla loro forma che consente una concatenazione (c.d. fenomeno di *interlocking*) e dal mutuo attrito che si instaura tra gli stessi massi. Pertanto gli Accropodi alle pareti, essendo solo parzialmente incastrati tra loro, diversamente che nella realtà, sono maggiormente vulnerabili all'azione del moto ondoso rispetto ai massi posizionati nella zona centrale.

4) se si considera un tronco di mantellata che esclude l'effetto parete di estensione pari a 0.75 m, in analogia alla metodologia adottata in Burcharth et al. (1998), il livello di danno si riduce a "nullo" (vedere la Tabella 7.II).

Tabella 7.I Valori dei parametri  $N_d$  e  $N_{od}$  ricavati a seguito della sequenza degli stati mare simulati.

Stato di mare	Tempo di ritorno [anni]	Parametro $N_d$ [%]	Esito in funzione del parametro $N_d$	Parametro $N_{od}$	Esito in funzione del parametro $N_{od}$
I	~25	N.V.	N.V.	N.V.	N.V.
II	50	0.00	Danno nullo	0.00	Danno nullo
III	100	0.78	Danno nullo	0.05	Danno nullo
IV	~350	4.31	Danno intermedio	0.31	Danno intermedio

Tabella 7.II Valori dei parametri  $N_d$  e  $N_{od}$  ricavati a seguito della sequenza degli stati mare simulati escludendo l'effetto parete.

Stato di mare	Tempo di ritorno [anni]	Parametro $N_d$ [%]	Esito in funzione del parametro $N_d$	Parametro $N_{od}$	Esito in funzione del parametro $N_{od}$
I	~25	N.V.	N.V.	N.V.	N.V.
II	50	0.00	Danno nullo	0.00	Danno nullo
III	100	0.00	Danno nullo	0.00	Danno nullo
IV	~350	0.00	Danno nullo	0.00	Danno nullo

---

In definitiva, alla luce dei risultati ottenuti nella presente indagine sperimentale, si ritiene che sulla base dei nuovi dati di moto ondoso definiti nell'aggiornamento dello studio idraulico marittimo a supporto del progetto esecutivo, la scelta del progettista di utilizzare massi di tipo Accropode da 16 m<sup>3</sup>, anziché quelli da 18 m<sup>3</sup> previsti nel progetto esecutivo originario, garantisca una adeguata stabilità della mantellata del prolungamento del molo di sopraflutto del porto di Isola delle Femmine.

Inoltre, al fine di rispettare i suggerimenti presenti nei manuali tecnici relativi agli Accropodi, sebbene per quanto concerne la tracimazione a tergo della struttura le due configurazioni analizzate nella presente campagna sperimentale presentino risposte simili, si consiglia la configurazione 2, ossia quella in cui gli scogli da 7-10 t previsti tra l'ultima fila di Accropodi e il muro paraonde risultano sostituiti con due file di Accropodi, così come per altro consigliato dalla stessa Ditta CLI (<https://www.concretelayer.com/en/solutions/technologies/accropode>).

Infine, si ritiene utile suggerire che particolare attenzione dovrà essere posta alla gestione della struttura una volta ultimata. In particolare, per garantire un'efficiente risposta strutturale della mantellata, si suggerisce di verificare l'adeguata concatenazione degli Accropodi dopo ogni mareggiata particolarmente severa. Inoltre, al fine di limitare la tracimazione a tergo della struttura, si suggerisce, compatibilmente con i vincoli imposti dagli organi competenti, di apportare alcune modifiche strutturali alla diga foranea come, ad esempio, l'incremento della quota di coronamento del muro paraonde. In subordine si raccomanda: *i)* di limitare un eventuale traffico di pedoni e di veicoli sulla diga a gettata nel caso di previsioni di mareggiate caratterizzate da tempo di ritorno superiori a 5 anni; *ii)* di limitare l'ormeggio di natanti a tergo della diga a gettata nel caso di previsioni di mareggiate caratterizzate da tempo di ritorno superiori a 20 anni.

Con tutto quanto sopra riportato si ritiene si avere assolto agli obblighi del mandato ricevuto tramite convenzione. Si resta comunque a disposizione per eventuali richieste di chiarimenti o di integrazioni.

---

## 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.

Bruce, T., Van der Meer, J. W., Franco, L., & Pearson, J. M. (2009). Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 56(2), 166-179.

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.

Burcharth, H. F., Christensen, M., Jensen, T., & Frigaard, P. (1998). Influence of core permeability on Accropode armour layer stability. In ICCE. Thomas Telford.

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 (2<sup>nd</sup> 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.

Faraci, C., Scandura, P., & Foti, E. (2015). Reflection of sea waves by combined caissons. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 141(2), 04014036.

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.

---

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. 2<sup>nd</sup> 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.

Mansard, E. P., & Funke, E. R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. In *Coastal Engineering 1980* (pp. 154-172).

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.

Tørum, A., Mathiesen, B., Escutiã, 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.

van der Meer, J. W. (1999). Design of concrete armour layers. In Proceedings of the Coastal Structures (Vol. 99, pp. 213-221).

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 13<sup>th</sup> 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.

Zanuttigh, B., & van der Meer, J. W. (2008). Wave reflection from coastal structures in design conditions. Coastal engineering, 55(10), 771-779.

---

## Allegato 1 – Schede degli esperimenti

---

1. Scheda degli esperimenti di giorno 9 dicembre 2019

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### **Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine**

- Data 2019 12 09
- Foglio 1 di 3
- Nomi test
- Tipologia test: Calibrazione
- Fase preliminare:
  - ✓ Controllo posizione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Controllo posizione videocamere
  - ✓ Controllo chiusura 4 valvole di scarico
  - ✓ Foto alla struttura dalle 2 videocamere
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D n. \_\_\_\_\_
  - ✓ Riempimento vasca  $h=0.316$  m
  - ✓ Accensione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Accensione pompe
  - ✓ Verificare che il livello nella vaschetta di trascinazione superi i pesi

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		0.01	0.07	0.01	0.01	0
-0.08 m		1.07	0.76	0.9	0.95	0.8
+0.08 m		-0.74	-1.35	-0.94	-0.9	-0.92
Note		-	-	-	-	-

- ✓ Taratura sonde (zero su a 0.14 m al micrometro)
- ✓ Accensione battitore

- Hs = _____	- Tp = _____	- h = 0.316
- hp = 0.4	- gmm = 3.3	- finf = 0.01
- fsup = 10	- df = 0.02	- ST = 0.01
- TS = 3600	- guadagno = 40	- offset = 0.13

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### **Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine**

- Data 2019 12 09
- Foglio 2 di 3
- Nomi test
- Tipologia test: Calibrazione
- Fase di acquisizione:
  - Preparare lavagnetta con nome prova per acquisizione video

Test	h [m]	Tp [s]	Hs in [m]	Start	Stop	R1	R2	Note
S01_PC001	0.316	0.70	0.040	12:50	12:54	ok	ok	<b>Non è possibile scalare il modello 3D perché il marker non si vede bene.</b>
S01_PC002	0.316	0.70	0.035	13:03	13:07	ok	ok	
S01_PC003	0.316	0.70	0.055	13:14	13:18	ok	ok	
S01_PC004	0.316	1.00	0.035	13:25	13:29	ok	ok	
S01_PC005	0.316	1.00	0.030	13:33	13:37	ok	ok	
S01_PC006	0.316	1.00	0.050	13:44	13:48	ok	ok	
S01_PC007	0.316	1.00	0.050	13:55	13:59	ok	ok	
S01_PC008	0.316	1.00	0.085	14:03	14:07	ok	ok	
S01_PC009	0.316	1.40	0.035	14:11	14:15	ok	ok	
S01_PC010	0.316	1.40	0.045	14:19	14:23	ok	ok	
S01_PC011	0.316	1.40	0.060	14:27	14:31	ok	ok	
S01_PC012	0.316	1.40	0.070	14:35	14:39	ok	ok	
S01_PC013	0.316	1.40	0.100	14:43	14:47	ok	ok	
S01_PC014	0.316	1.40	0.120	14:50	14:54	ok	ok	

---

**Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine**

***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 09
- Foglio 3 di 3
- Nomi test
  
- Fase finale:
  - ✓ Spegnimento battitore
  - ✓ Spegnimento videocamere
  - ✓ Spegnimento sonde resistive, sonda acustica e pompe
  - ✓ Svuotamento vasca
  - ✓ Foto alla struttura dalla videocamera centrale
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D
  - ✓ Copia acquisizioni LabView
  - ✓ Copia video
  - ✓ Copia foto per modello 3D

---

2. Scheda degli esperimenti di giorno 10 dicembre 2019

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### **Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine**

- Data 2019 12 10
- Foglio 1 di 3
- Nomi test
- Tipologia test: traccimazione, danno, calibrazione
- Fase preliminare:
  - ✓ Controllo posizione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Controllo posizione videocamere
  - ✓ Controllo chiusura 4 valvole di scarico
  - ✓ Foto alla struttura dalle 2 videocamere
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D n. 28
  - ✓ Riempimento vasca  $h=0.316$  m
  - ✓ Accensione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Accensione pompe
  - ✓ Verificare che il livello nella vaschetta di traccimazione superi i pesi

#### Prima calibrazione

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		0	0.01	0.02	-0.02	0.01
-0.08 m		0.79	0.69	0.74	0.68	1.06
+0.08 m		-0.74	-0.84	-0.91	-0.92	-0.93
Note		-	-	-	-	-

#### Seconda calibrazione

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		0.02	0.02	-0.02	0.01	0.02
-0.08 m		1.13	0.54	0.9	0.95	1.04
+0.08 m		-0.73	-0.88	-0.92	-0.9	-0.91
Note		-	-	-	-	-

- ✓ Taratura sonde (zero su a 0.14 m al micrometro)
- ✓ Accensione battitore

- Hs = _____	- Tp = _____	- h = 0.316
- hp = 0.4	- gmm = 3.3	- finf = 0.01
- fsup = 10	- df = 0.02	- ST = 0.01
- TS = 3600	- guadagno = 40	- offset = 0.13

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### ***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 10
- Foglio 2 di 3
- Nomi test
- Tipologia test: traccimazione, danno, calibrazione
- Fase di acquisizione:
  - Preparare lavagnetta con nome prova per acquisizione video

Test	h [m]	Tp [s]	Hs in [m]	Start	Stop	R1	R2	Note
MS01	0.316	1.15	0.055	10:16	10:20	ok	ok	
MS02	0.316	1.15	0.045	10:35	10:39	ok	ok	
MS03	0.316	1.15	0.045	10:43	11:13	ok	ok	
MS04	0.316	1.15	0.045	11:16	11:46	ok	ok	
MS05	0.316	1.15	0.045	11:48	12:18	ok	ok	
MS06	0.316	1.23	0.065	12:19	12:23	ok	ok	
MS07	0.316	1.23	0.070	12:28	12:42	ok	ok	
MS08	0.316	1.23	0.070	12:37	13:07	ok	ok	
MS09	0.316	1.23	0.070	13:10	13:40	ok	ok	
MS10	0.316	1.23	0.070	13:42	14:12	ok	ok	
MS11	0.316	1.31	0.085	16:06	16:10	ok	ok	
MS12	0.316	1.31	0.085	16:15	16:45	ok	ok	
MS13	0.316	1.31	0.085	16:50	16:20	ok	ok	
MS14	0.316	1.31	0.085	16:22	16:52	ok	ok	

---

**Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine**

***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 10
- Foglio 3 di 3
- Nomi test
  
- Fase finale:
  - ✓ Spegnimento battitore
  - ✓ Spegnimento videocamere
  - ✓ Spegnimento sonde resistive, sonda acustica e pompe
  - ✓ Svuotamento vasca
  - ✓ Foto alla struttura dalla videocamera centrale
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D
  - ✓ Copia acquisizioni LabView
  - ✓ Copia video
  - ✓ Copia foto per modello 3D

---

3. Scheda degli esperimenti di giorno 11 dicembre 2019

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### **Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine**

- Data 2019 12 11
- Foglio 1 di 3
- Nomi test
- Tipologia test: trascinamento, danno, calibrazione
- Fase preliminare:
  - ✓ Controllo posizione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Controllo posizione videocamere
  - ✓ Controllo chiusura 4 valvole di scarico
  - ✓ Foto alla struttura dalle 2 videocamere
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D n. 28
  - ✓ Riempimento vasca h=0.316 m
  - ✓ Accensione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Accensione pompe
  - ✓ Verificare che il livello nella vaschetta di trascinamento superi i pesi

#### Prima calibrazione

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		-0.01	-0.02	0	0	0.01
-0.08 m		1.07	0.76	0.95	0.94	1.12
+0.08 m		-0.75	-0.99	-0.93	-0.9	-0.92
Note		-	-	-	-	-

#### Seconda calibrazione

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		0.01	-0.02	0.02	0.01	0.01
-0.08 m		1.11	0.7	0.96	0.95	0.79
+0.08 m		-0.75	-0.88	-0.92	-0.9	-0.94
Note		-	-	-	-	-

- ✓ Taratura sonde (zero su a 0.14 m al micrometro)
- ✓ Accensione battitore

- Hs = _____	- Tp = _____	- h = _____
- hp = 0.4	- gmm = 3.3	- finf = 0.01
- fsup = 10	- df = 0.02	- ST = 0.01
- TS = 3600	- guadagno = 40	- offset = 0.13

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### ***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 11
- Foglio 3 di 3
- Nomi test
  
- Tipologia test: traccimazione, danno, calibrazione
- Fase di acquisizione:
  - Preparare lavagnetta con nome prova per acquisizione video

Test	h [m]	Tp [s]	Hs in [m]	Start	Stop	R1	R2	Note
MS15	0.316	1.31	0.081	09:35	09:39	ok	ok	
MS16	0.316	1.31	0.081	09:48	09:52	ok	ok	
MS17	0.316	1.31	0.081	09:55	10:25	ok	ok	
MS18	0.316	1.31	0.081	10:28	10:58	ok	ok	
MS19	0.316	1.31	0.081	11:00	11:30	ok	ok	
MS20	0.316	1.31	0.081	11:46		ok	ok	
MS21	0.316	1.40	0.097	17:35	17:39	ok	ok	
MS22	0.316	1.40	0.097	17:44	17:48	ok	ok	
MS23	0.316	1.40	0.097	17:52	02:16	ok	ok	
MS24	0.316	1.40	0.097	18:00	18:04	ok	ok	
MS25	0.316	1.40	0.097	18:08	18:12	ok	ok	
MS26	0.316	1.40	0.097	18:18	18:22	ok	ok	
MS27	0.316	1.40	0.097	18:28	18:32	ok	ok	
MS28	0.316	1.40	0.097	18:35	19:05	ok	ok	
MS29	0.316	1.40	0.097	19:07	19:37	ok	ok	
MS30	0.316	1.40	0.097	19:39	20:09	ok	ok	

---

**Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine**

***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 11
- Foglio 3 di 3
- Nomi test
  
- Fase finale:
  - ✓ Spegnimento battitore
  - ✓ Spegnimento videocamere
  - ✓ Spegnimento sonde resistive, sonda acustica e pompe
  - ✓ Svuotamento vasca
  - ✓ Foto alla struttura dalla videocamera centrale
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D
  - ✓ Copia acquisizioni LabView
  - ✓ Copia video
  - ✓ Copia foto per modello 3D

---

4. Scheda degli esperimenti di giorno 12 dicembre 2019

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### **Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine**

- Data 2019 12 12
- Foglio 1 di 3
- Nomi test
- Tipologia test: trascinamento, danno, calibrazione
- Fase preliminare:
  - ✓ Controllo posizione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Controllo posizione videocamere
  - ✓ Controllo chiusura 4 valvole di scarico
  - ✓ Foto alla struttura dalle 2 videocamere
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D n. 28
  - ✓ Riempimento vasca  $h=0.316$  m
  - ✓ Accensione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Accensione pompe
  - ✓ Verificare che il livello nella vaschetta di trascinamento superi i pesi

#### Prima calibrazione

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		-0.01	-0.02	0	0	0.01
-0.08 m		1.07	0.76	0.95	0.94	1.12
+0.08 m		-0.75	-0.99	-0.93	-0.9	-0.92
Note		-	-	-	-	-

- ✓ Taratura sonde (zero su a 0.14 m al micrometro)
- ✓ Accensione battitore

- Hs = _____	- Tp = _____	- h = _____
- hp = 0.4	- gmm = 3.3	- finf = 0.01
- fsup = 10	- df = 0.02	- ST = 0.01
- TS = 3600	- guadagno = 40	- offset = 0.13

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### ***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 12
- Foglio 2 di 3
- Nomi test
- Tipologia test: traccimazione, danno, calibrazione
- Fase di acquisizione:
  - Preparare lavagnetta con nome prova per acquisizione video

Test	h [m]	Tp [s]	Hs in [m]	Start	Stop	R1	R2	Note
MS31	0.316	1.40	0.130	11:09	11:13	ok	ok	
MS32	0.316	1.40	0.130	11:19	11:49	ok	ok	
MS33	0.316	1.40	0.130	11:53	11:23	ok	ok	
MS34	0.316	1.40	0.130	12:26	12:56	ok	ok	
MS35	0.316	1.40	0.140	15:00	15:30	ok	ok	
MS36	0.316	1.40	0.140	15:42	16:08	ok	ok	
MS37	0.316	1.40	0.140	16:14	16:44	ok	ok	

---

**Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine**

***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 12
- Foglio 3 di 3
- Nomi test
  
- Fase finale:
  - ✓ Spegnimento battitore
  - ✓ Spegnimento videocamere
  - ✓ Spegnimento sonde resistive, sonda acustica e pompe
  - ✓ Svuotamento vasca
  - ✓ Foto alla struttura dalla videocamera centrale
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D
  - ✓ Copia acquisizioni LabView
  - ✓ Copia video
  - ✓ Copia foto per modello 3D

---

5. Scheda degli esperimenti di giorno 13 dicembre 2019

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### **Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine**

- Data 2019 12 13
- Foglio 1 di 3
- Nomi test
- Tipologia test: traccimazione, danno, calibrazione
- Test condotta da: **Iuppa, Stagnitti**
- Fase preliminare:
  - ✓ Controllo posizione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Controllo posizione videocamere
  - ✓ Controllo chiusura 4 valvole di scarico
  - ✓ Foto alla struttura dalle 2 videocamere
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D n. 28
  - ✓ Riempimento vasca  $h=0.316$  m
  - ✓ Accensione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Accensione pompe
  - ✓ Verificare che il livello nella vaschetta di traccimazione superi i pesi

#### Prima calibrazione

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		-0.01	-0.08	0.03	-0.01	0.01
-0.08 m		1.08	0.58	0.99	0.93	0.86
+0.08 m		-0.75	-0.91	-0.91	-0.89	-0.96
Note		-	-	-	-	-

#### Seconda calibrazione

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		0.01	-0.01	-0.02	0.01	-0.01
-0.08 m		1.16	0.71	0.82	0.97	0.89
+0.08 m		-0.73	-0.88	-0.91	-0.87	-1.01
Note		-	-	-	-	-

- ✓ Taratura sonde (zero su a 0.14 m al micrometro)
- ✓ Accensione battitore

- Hs = _____	- Tp = _____	- h = 0.316
- hp = 0.4	- gmm = 3.3	- finf = 0.01
- fsup = 10	- df = 0.02	- ST = 0.01
- TS = 3600	- guadagno = 40	- offset = 0.13

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### ***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 12
- Foglio 2 di 3
- Nomi test
  
- Tipologia test: traccimazione, danno, calibrazione
- Fase di acquisizione:
  - Preparare lavagnetta con nome prova per acquisizione video

Test	h [m]	Tp [s]	Hs in [m]	Start	Stop	R1	R2	Note
MS38	0.316	1.15	0.045	10:03	10:33	ok	ok	
MS39	0.316	1.23	0.055	10:37	10:41	ok	ok	
MS40	0.316	1.23	0.055	10:46	11:16	ok	ok	
MS41	0.316	1.23	0.055	10:18	10:48	ok	ok	
MS42	0.316	1.23	0.055	11:53	12:23	ok	ok	
MS43	0.316	1.23	0.070	12:27	12:31	ok	ok	
MS44	0.316	1.23	0.065	12:35	12:39	ok	ok	
MS45	0.316	1.23	0.065	12:42	13:12	ok	ok	
MS46	0.316	1.23	0.065	13:17	13:47	ok	ok	
MS47	0.316	1.23	0.065	13:48	14:18	ok	ok	
MS48	0.316	1.31	0.080	16:03	16:07	ok	ok	
MS49	0.316	1.31	0.080	16:14	16:44	ok	ok	
MS50	0.316	1.31	0.080	16:46	17:01	ok	ok	
MS51	0.316	1.31	0.080	17:18	17:58	ok	ok	
MS52	0.316	1.31	0.085	17:54	18:24	ok	ok	
MS53	0.316	1.31	0.083	18:33	19:03	ok	ok	

---

**Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine**

***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 13
- Foglio 3 di 3
- Nomi test
  
- Fase finale:
  - ✓ Spegnimento battitore
  - ✓ Spegnimento videocamere
  - ✓ Spegnimento sonde resistive, sonda acustica e pompe
  - ✓ Svuotamento vasca
  - ✓ Foto alla struttura dalla videocamera centrale
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D
  - ✓ Copia acquisizioni LabView
  - ✓ Copia video
  - ✓ Copia foto per modello 3D

---

6. Scheda degli esperimenti di giorno 16 dicembre 2019

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### **Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine**

- Data 2019 12 17
- Foglio 1 di 3
- Nomi test
- Tipologia test: traccimazione, danno, calibrazione
- Test condotta da: **Iuppa, Stagnitti**
- Fase preliminare:
  - ✓ Controllo posizione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Controllo posizione videocamere
  - ✓ Controllo chiusura 4 valvole di scarico
  - ✓ Foto alla struttura dalle 2 videocamere
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D n. 28
  - ✓ Riempimento vasca h=0.316 m
  - ✓ Accensione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Accensione pompe
  - ✓ Verificare che il livello nella vaschetta di traccimazione superi i pesi

#### Prima calibrazione

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		0.01	0	0	0.01	-0.02
-0.08 m		1.15	0.87	0.96	0.96	0.81
+0.08 m		-0.74	-0.88	-0.92	-0.89	-1.03
Note		-	-	-	-	-

#### Seconda calibrazione

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		0.01	0	0	0	-0.01
-0.08 m		1.08	0.84	0.97	0.94	0.85
+0.08 m		-0.75	-0.87	-0.9	-0.87	-0.94
Note		-	-	-	-	-

- ✓ Taratura sonde (zero su a 0.14 m al micrometro)
- ✓ Accensione battitore

- Hs = _____	- Tp = _____	- h = 0.316
- hp = 0.4	- gmm = 3.3	- finf = 0.01
- fsup = 10	- df = 0.02	- ST = 0.01
- TS = 3600	- guadagno = 40	- offset = 0.13

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### ***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 17
- Foglio 2 di 3
- Nomi test
  
- Tipologia test: traccimazione, danno, calibrazione
- Fase di acquisizione:
  - Preparare lavagnetta con nome prova per acquisizione video

Test	h [m]	Tp [s]	Hs in [m]	Start	Stop	R1	R2	Note
TS01	0.316	1.15	0.055	09:14	09:18	foto	no	
TS02	0.316	1.15	0.050	09:24	09:43	foto	no	
TS03	0.316	1.07	0.065	10:50	11:20	foto	no	
TS04	0.316	1.11	0.075	11:23	11:53	foto	no	
TS05	0.316	1.20	0.075	12:02	12:32	foto	no	
TS06	0.316	1.15	0.045	14:40	15:10	foto	no	
TS07	0.316	1.15	0.040	15:16	15:46	foto	no	
TS08	0.316	1.23	0.058	15:57	16:27	foto	no	
TS09	0.316	1.15	0.055	16:36	17:06	foto	no	
TS10	0.316	1.15	0.055	17:15	17:45	foto	no	
TS11	0.316	1.15	0.030	17:50	18:04	foto	no	
TS12	0.316	1.15	0.040	18:08	18:38	no	no	
TS13	0.316	1.4	0.110	18:46	19:16	foto	ok	

---

**Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine**

***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 17
- Foglio 3 di 3
- Nomi test
  
- Fase finale:
  - ✓ Spegnimento battitore
  - ✓ Spegnimento videocamere
  - ✓ Spegnimento sonde resistive, sonda acustica e pompe
  - ✓ Svuotamento vasca
  - ✓ Foto alla struttura dalla videocamera centrale
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D
  - ✓ Copia acquisizioni LabView
  - ✓ Copia video
  - ✓ Copia foto per modello 3D

---

7. Scheda degli esperimenti di giorno 16 dicembre 2019

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### **Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine**

- Data 2019 12 16
- Foglio 1 di 3
- Nomi test
- Tipologia test: trascinamento, danno, calibrazione
- Test condotta da: **Iuppa, Stagnitti**
- Fase preliminare:
  - ✓ Controllo posizione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Controllo posizione videocamere
  - ✓ Controllo chiusura 4 valvole di scarico
  - ✓ Foto alla struttura dalle 2 videocamere
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D n. 28
  - ✓ Riempimento vasca  $h=0.316$  m
  - ✓ Accensione sonde resistive e sonda acustica
  - ✓ Accensione pompe
  - ✓ Verificare che il livello nella vaschetta di trascinamento superi i pesi

#### Prima calibrazione

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		0.01	0.01	-0.01	0	0
-0.08 m		1.08	0.81	0.92	0.92	0.86
+0.08 m		-0.74	-0.85	-0.92	-0.88	-0.93
Note		-	-	-	-	-

#### Seconda calibrazione

	Micr. [cm]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0 m		0.01	0.01	0	0	0.02
-0.08 m		1.11	0.86	0.96	0.92	0.82
+0.08 m		-0.73	-0.87	-0.93	-0.9	-0.94
Note		-	-	-	-	-

- ✓ Taratura sonde (zero su a 0.14 m al micrometro)
- ✓ Accensione battitore

- Hs = _____	- Tp = _____	- h = 0.316
- hp = 0.4	- gmm = 3.3	- finf = 0.01
- fsup = 10	- df = 0.02	- ST = 0.01
- TS = 3600	- guadagno = 40	- offset = 0.13

---

## Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine

### ***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 12
- Foglio 2 di 3
- Nomi test
- Tipologia test: traccimazione, danno, calibrazione
- Fase di acquisizione:
  - Preparare lavagnetta con nome prova per acquisizione video

Test	h [m]	Tp [s]	Hs in [m]	Start	Stop	R1	R2	Note
MS54	0.316	1.40	0.105	10:18	10:19	ok	ok	
MS55	0.316	1.40	0.105	10:27	10:32	ok	ok	
MS56	0.316	1.40	0.095	10:37	10:42	ok	ok	
MS57	0.316	1.40	0.085	10:45	10:49	ok	ok	
MS58	0.316	1.40	0.085	10:53	11:23	ok	ok	
MS59	0.316	1.40	0.085	11:29	11:59	ok	ok	
MS60	0.316	1.40	0.100	12:08	12:38	ok	ok	
MS61	0.316	1.40	0.105	14:19	14:23	ok	ok	
MS62	0.316	1.40	0.110	14:27	14:32	ok	ok	
MS63	0.316	1.40	0.110	14:37	15:07	ok	ok	

---

**Convenzione con il Comune di Isola delle Femmine**

***Studio su modello fisico della sezione corrente della diga foranea del porto di Isola delle Femmine***

- Data 2019 12 16
- Foglio 3 di 3
- Nomi test
  
- Fase finale:
  - ✓ Spegnimento battitore
  - ✓ Spegnimento videocamere
  - ✓ Spegnimento sonde resistive, sonda acustica e pompe
  - ✓ Svuotamento vasca
  - ✓ Foto alla struttura dalla videocamera centrale
  - ✓ Foto alla struttura per modello 3D
  - ✓ Copia acquisizioni LabView
  - ✓ Copia video
  - ✓ Copia foto per modello 3D

---

Allegato 2 – Analisi spettrale del moto ondoso misurato nelle  
prove condotte per la verifica di stabilità della mantellata

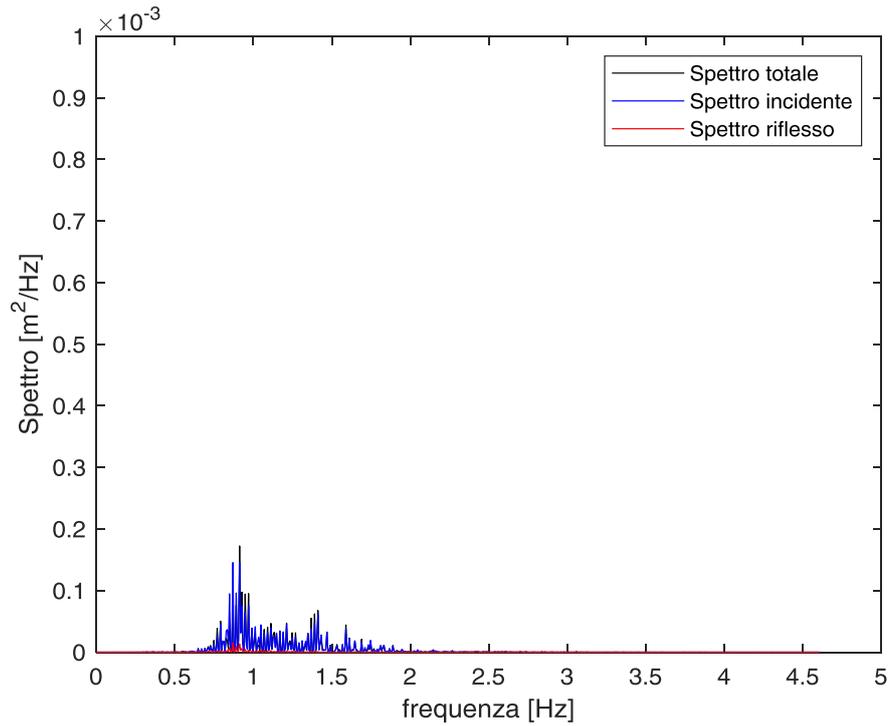


Figura A. 1 Analisi spettrale per lo stato di mare I (80% dell'onda di progetto): onda 1.

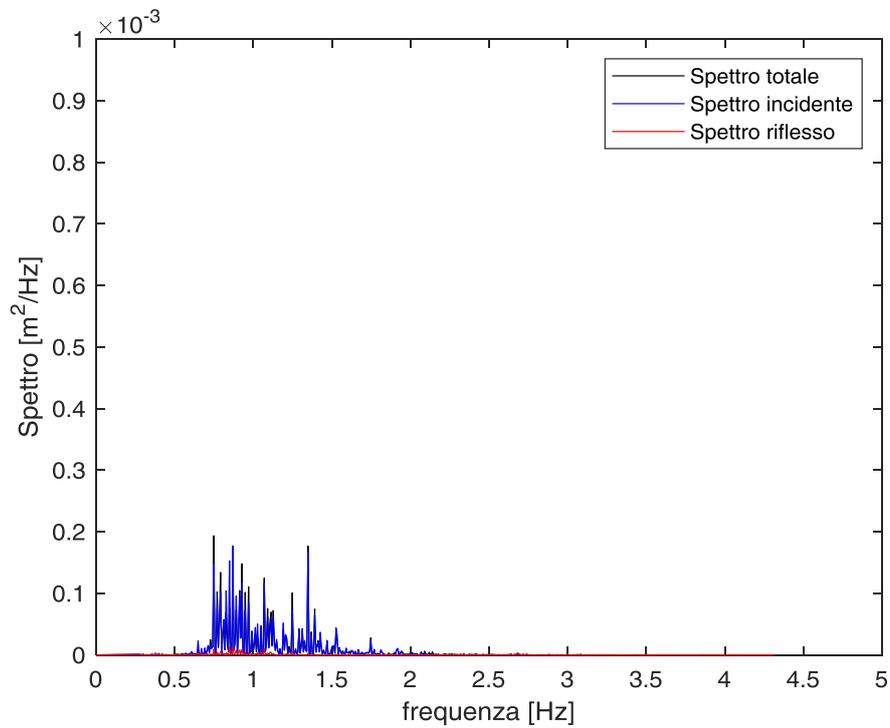


Figura A. 2 Analisi spettrale per lo stato di mare I (80% dell'onda di progetto): onda 2.

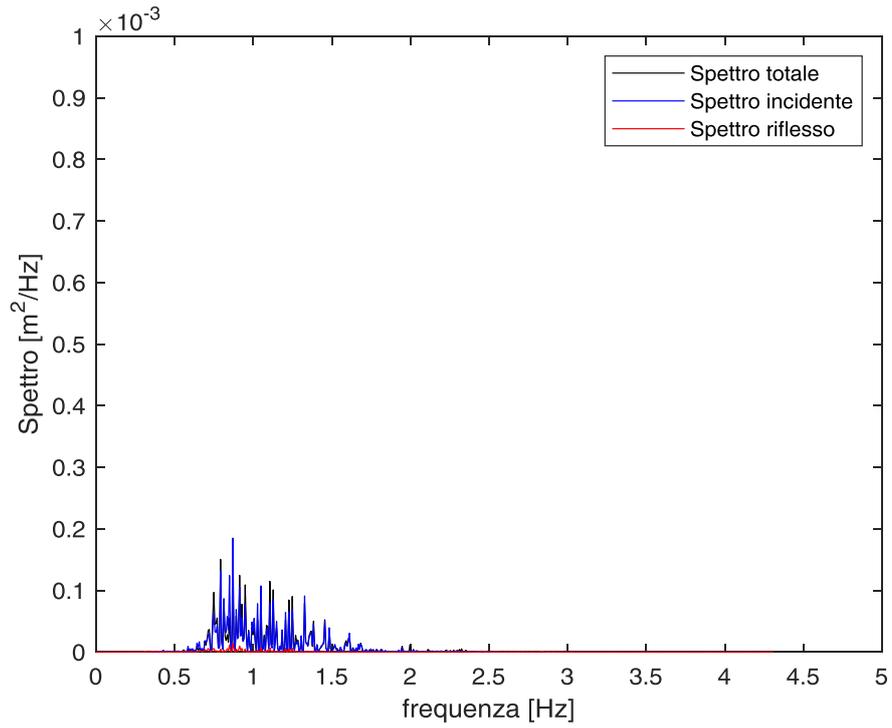


Figura A. 3 Analisi spettrale per lo stato di mare III (80% dell'onda di progetto): onda 3.

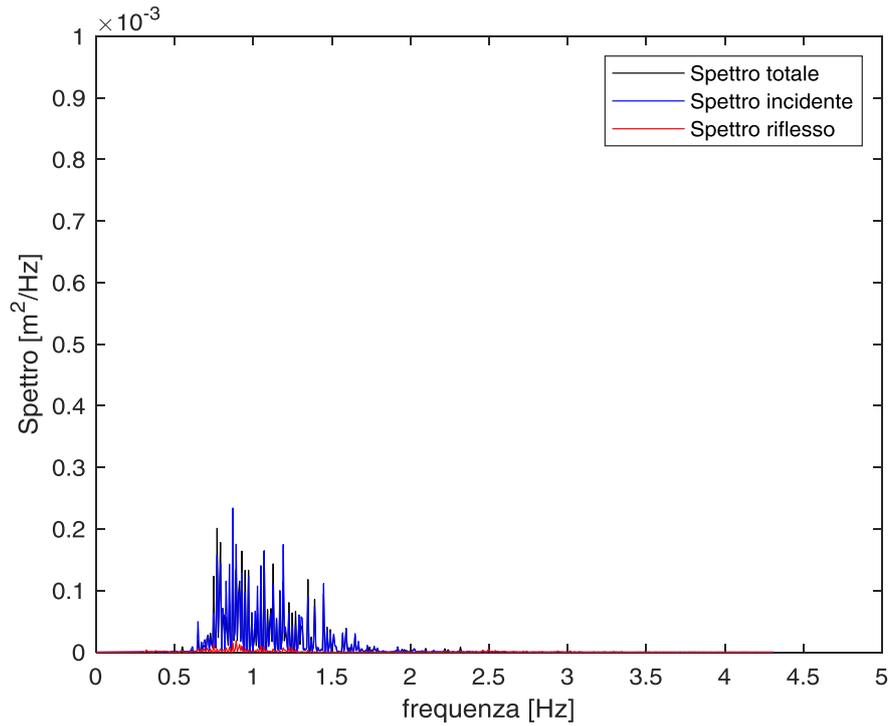


Figura A. 4 Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 50 anni): onda 1.

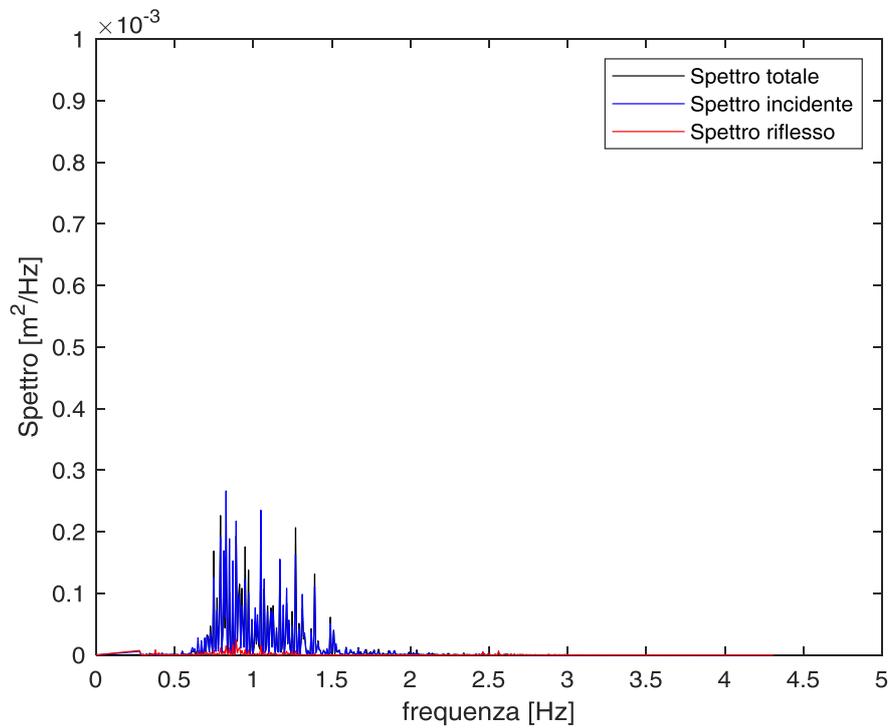


Figura A. 5 Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 50 anni): onda 2.

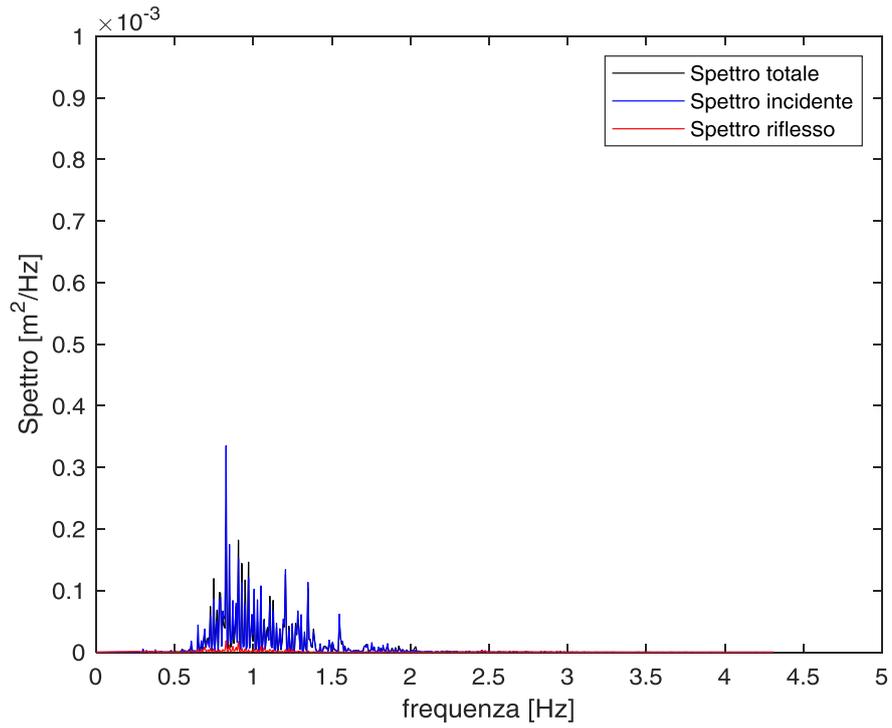


Figura A. 6 Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 50 anni): onda 3.

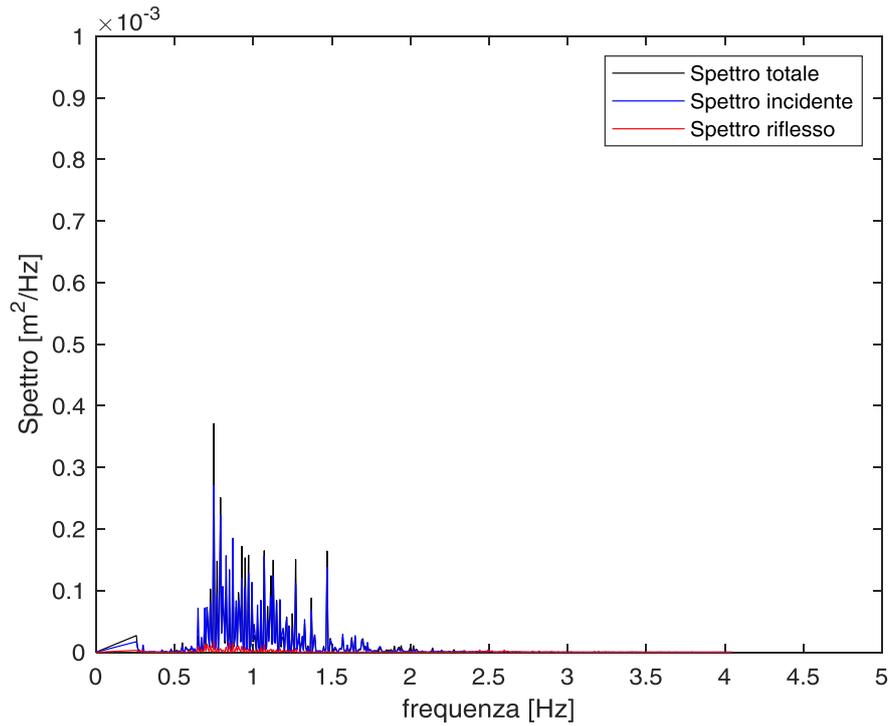


Figura A. 7 Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 100 anni, onda di progetto): onda 1.

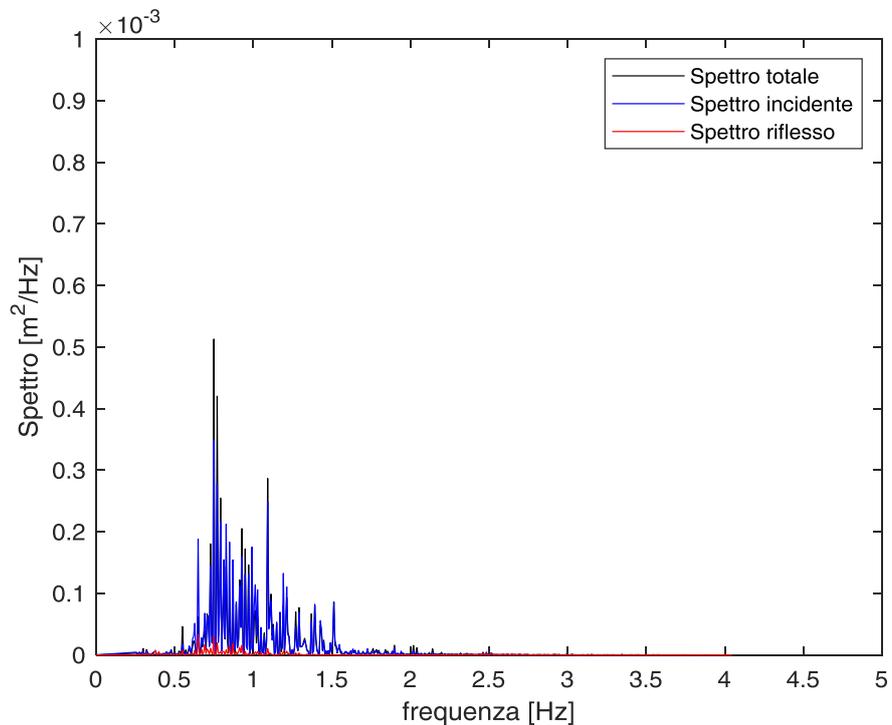


Figura A. 8 Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 100 anni, onda di progetto): onda 2.

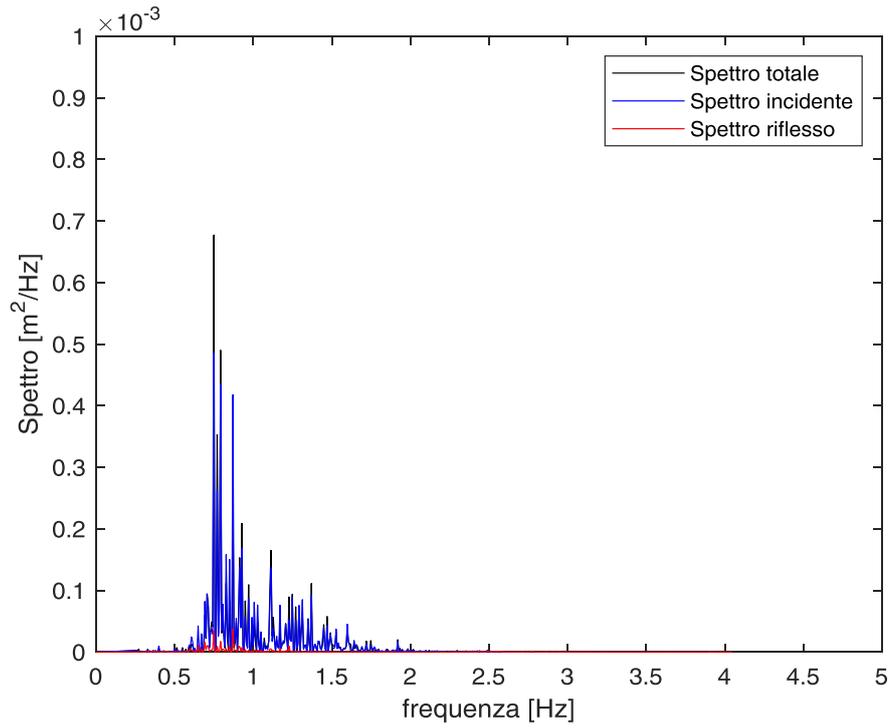


Figura A. 9 Analisi spettrale per lo stato di mare II (onda con tempo di ritorno di 100 anni, onda di progetto): onda 3.

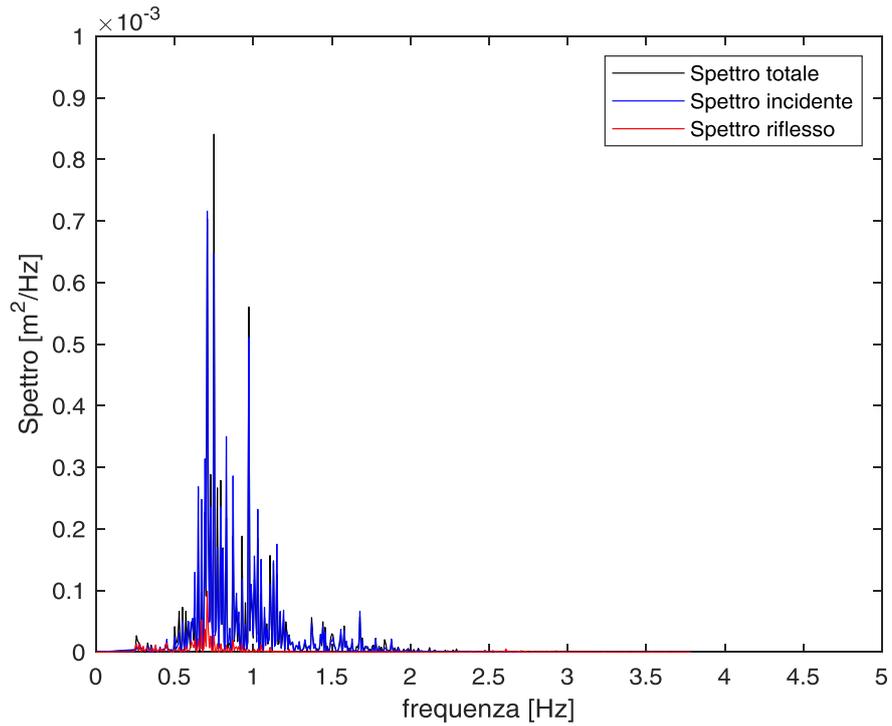


Figura A. 10 Analisi spettrale per lo stato di mare I (120% dell'onda di progetto): onda 1.

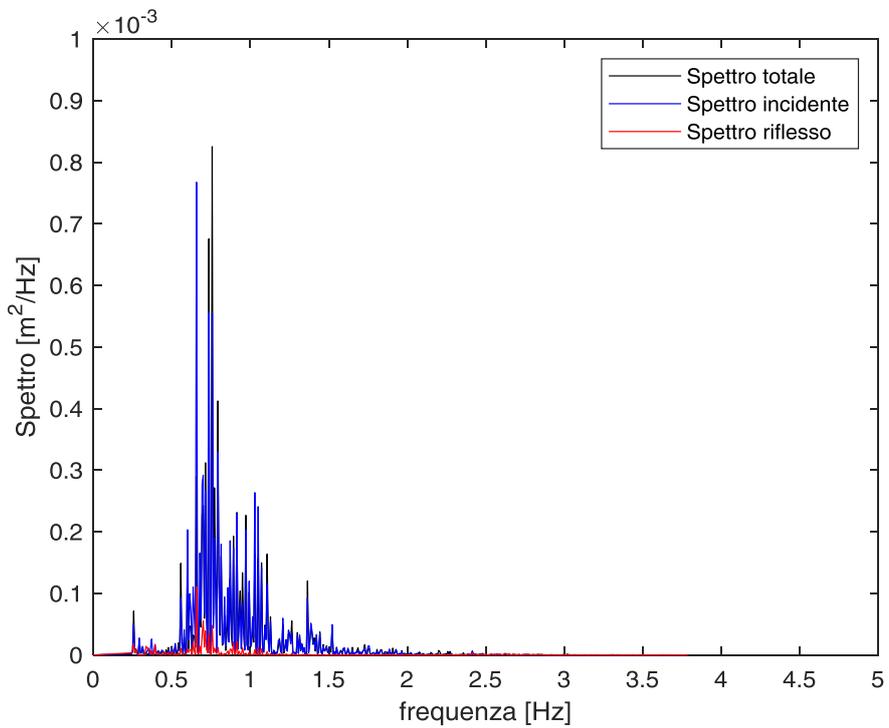


Figura A. 11 Analisi spettrale per lo stato di mare I (120% dell'onda di progetto): onda 2.

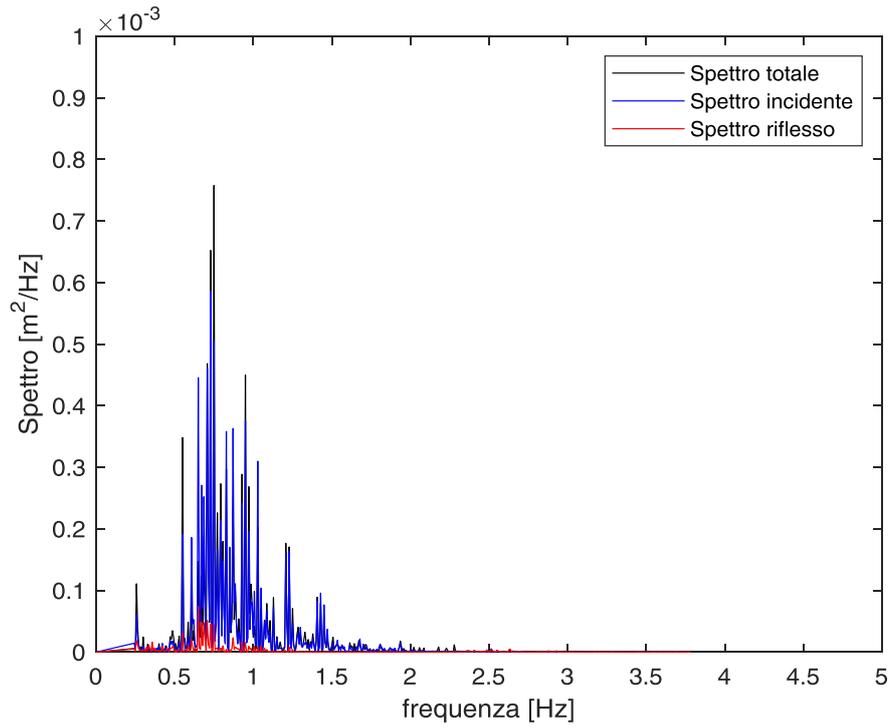


Figura A. 12 Analisi spettrale per lo stato di mare III (120% dell'onda di progetto): onda 3.

---

Allegato 3 – Report fotografico delle prove di stabilità della mantellata

---

1. Stato di mare I (80% dell'onda di progetto)

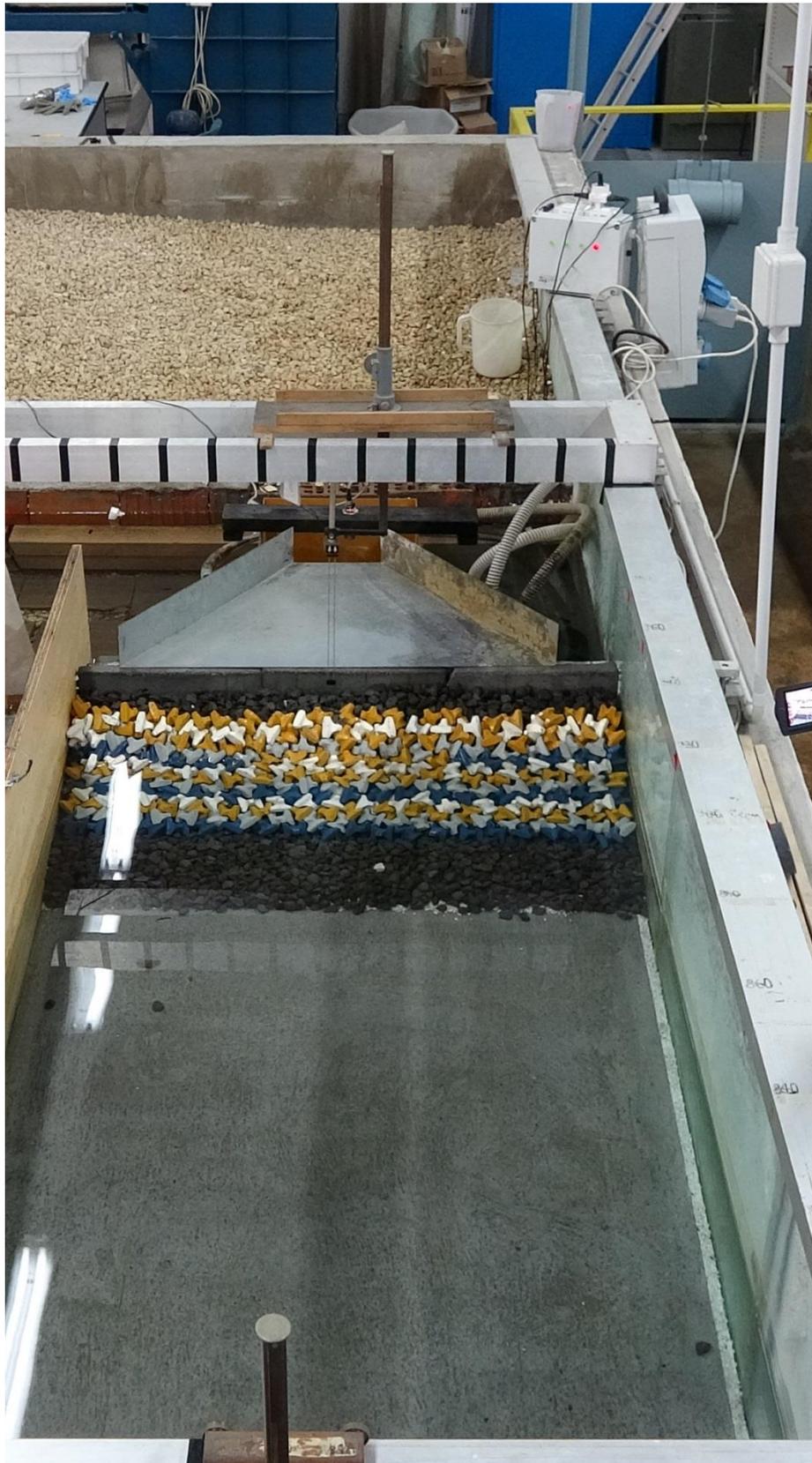


Figura A. 13 Configurazione del modello iniziale

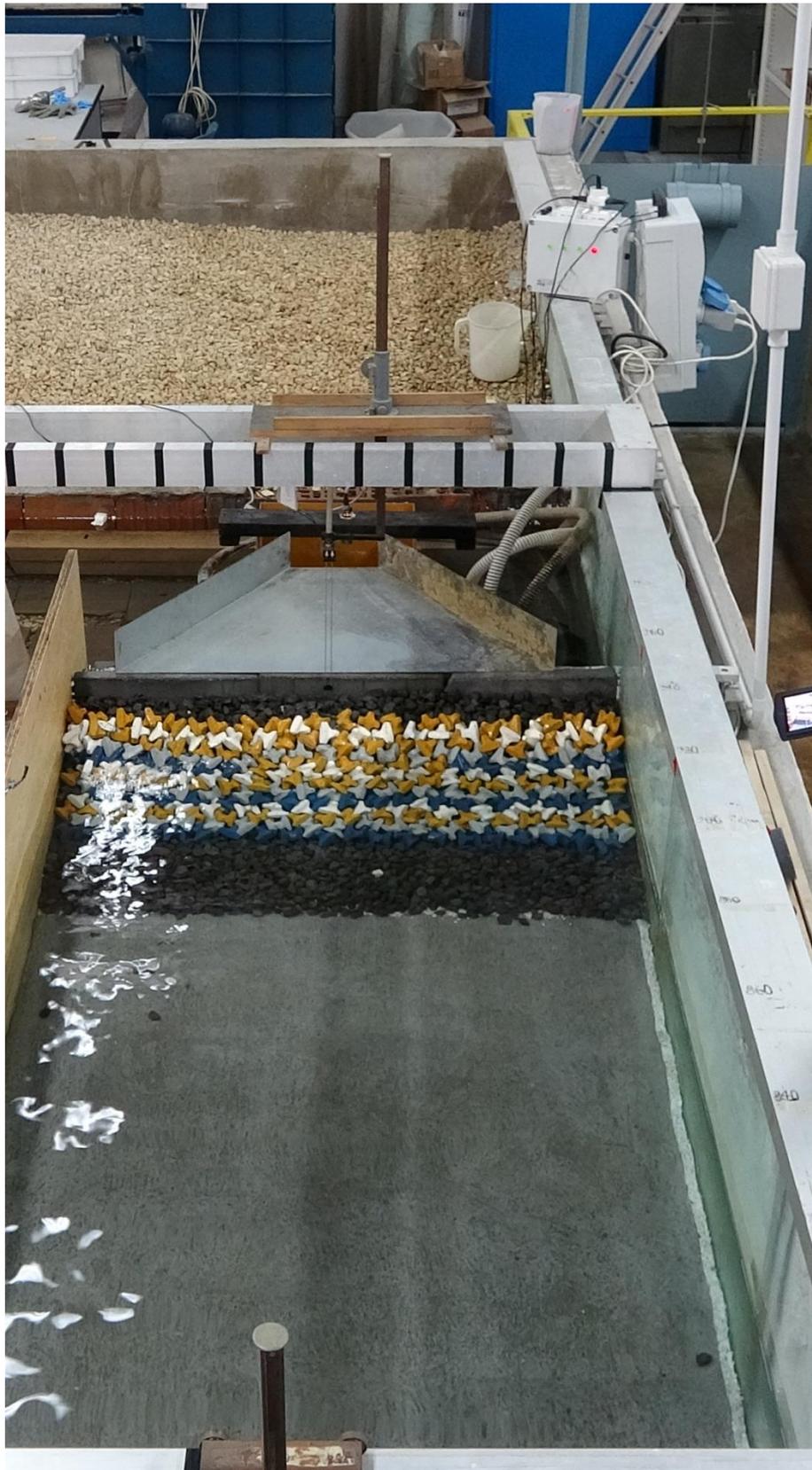


Figura A. 14 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 1 dello stato di mare I.



Figura A. 15 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 2 dello stato di mare I.



Figura A. 16 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 3 dello stato di mare I.

---

2. Stato di mare II (onda con tempo di ritorno 50 anni)



Figura A. 17 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 1 dello stato di mare II.



Figura A. 18 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 2 dello stato di mare II.



Figura A. 19 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 3 dello stato di mare II.

---

3. Stato di mare III (onda con tempo di ritorno 100 anni, onda di progetto)

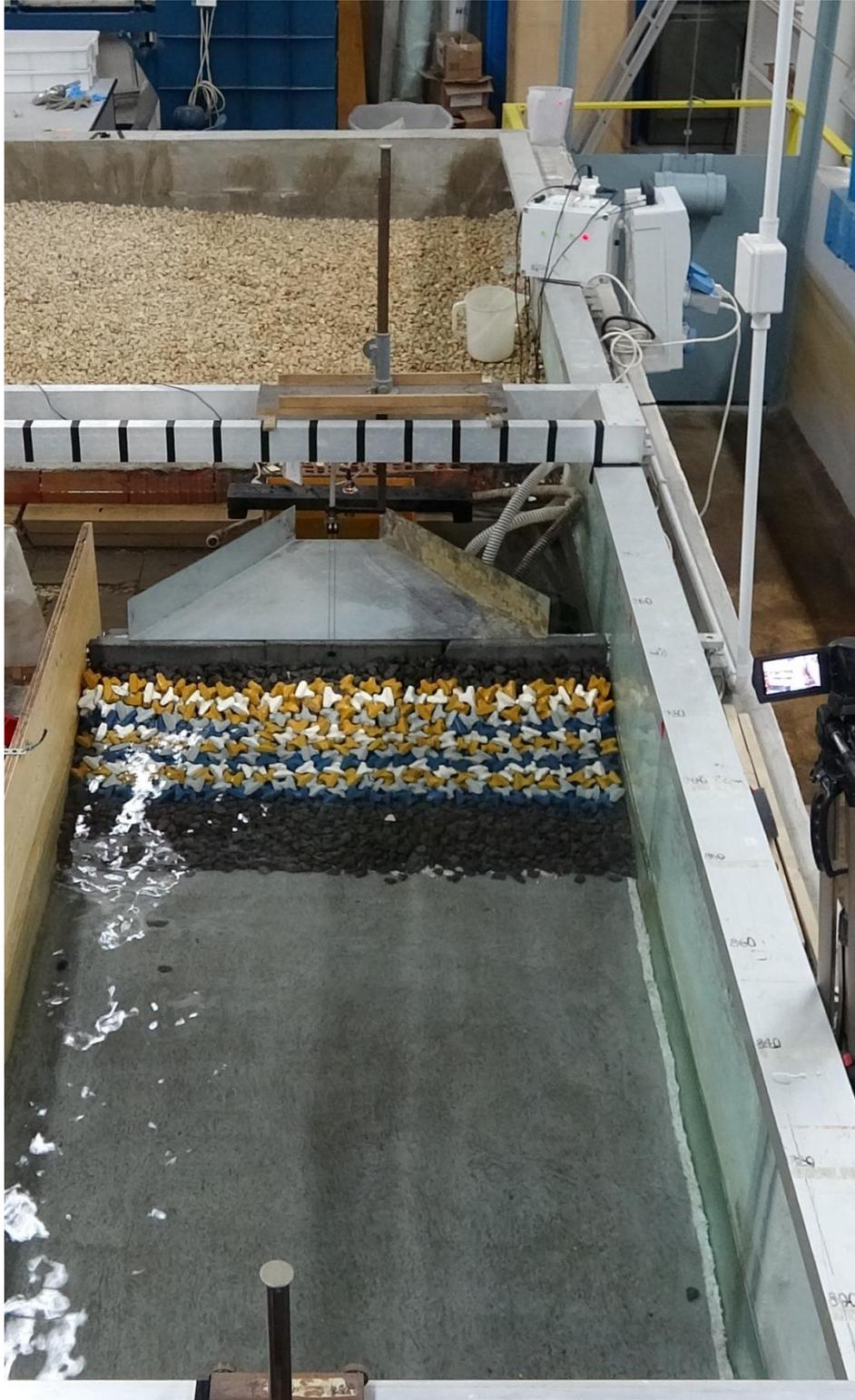


Figura A. 20 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 1 dello stato di mare III.



Figura A. 21 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 2 dello stato di mare III.

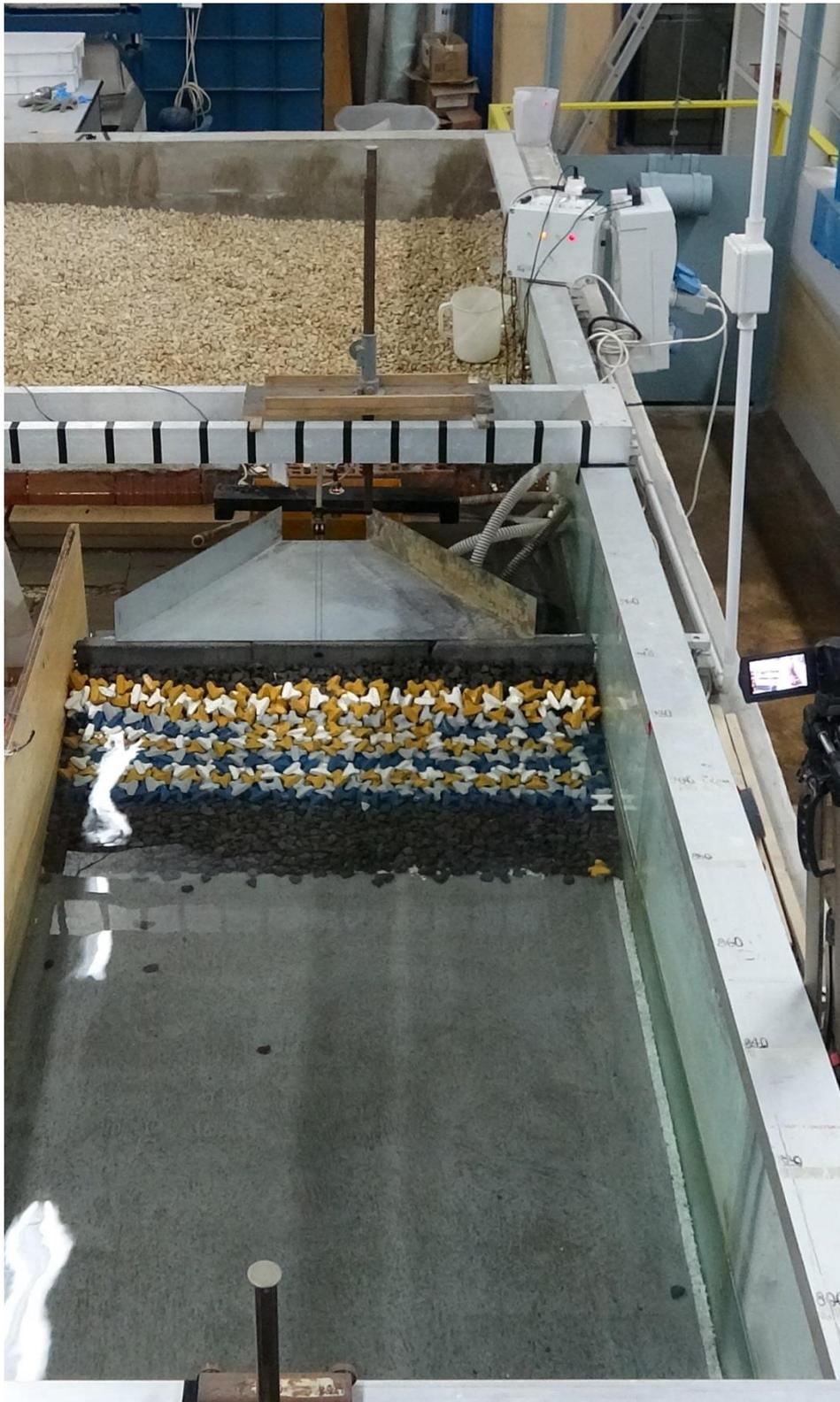


Figura A. 22 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 3 dello stato di mare III.

---

4. Stato di mare IV (120% dell'onda di progetto)



Figura A. 23 Configurazione del modello prima della simulazione dello stato di mare IV



Figura A. 24 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 1 dello stato di mare III.



Figura A. 25 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 2 dello stato di mare III.

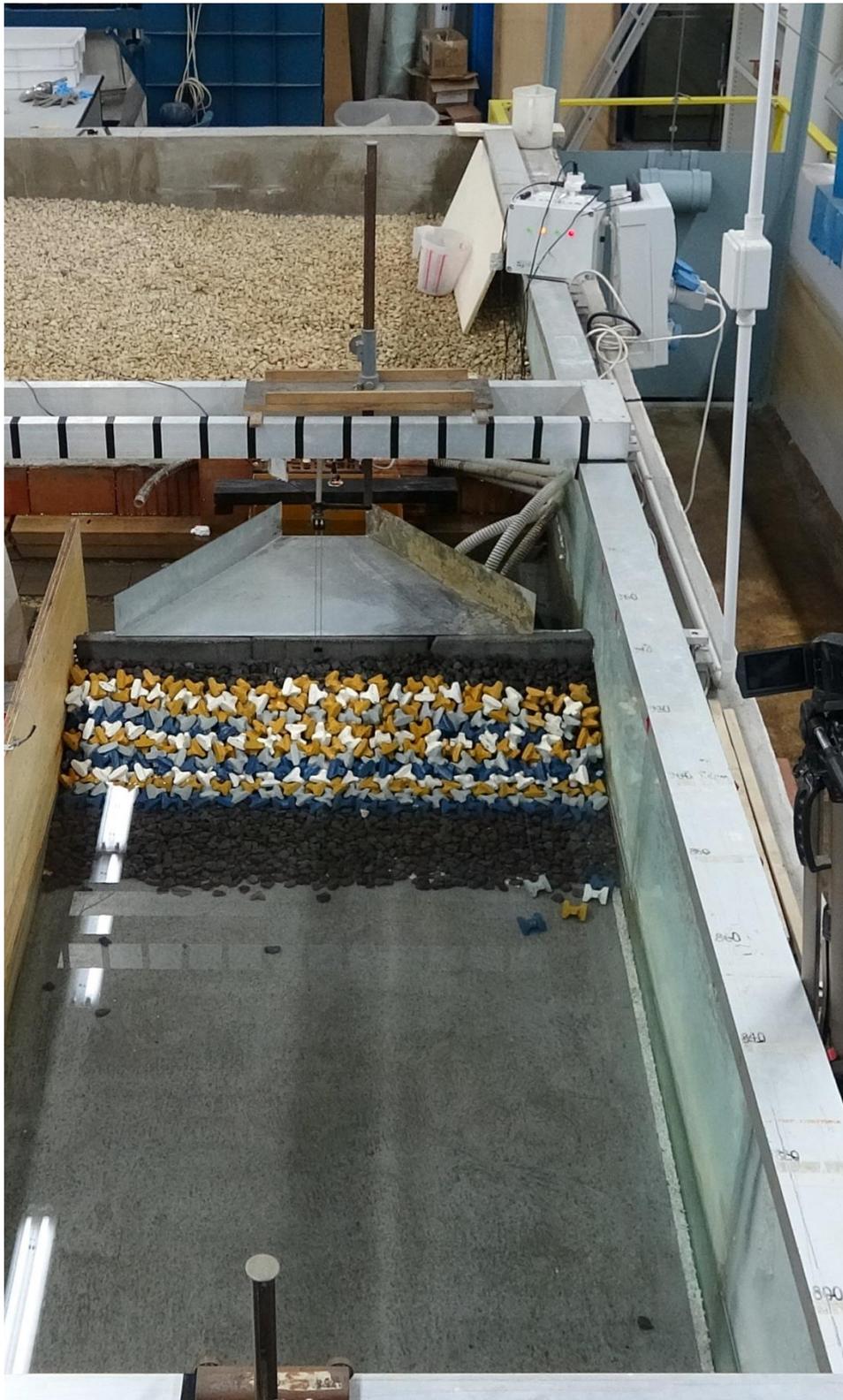


Figura A. 26 Configurazione del modello dopo la simulazione dell'onda 3 dello stato di mare III.