



SEZIONE DEL GENIO MILITARE PER LA MARINA DI CAGLIARI

Stazione VLF - Isola di Tavolara (OT)

RESTAURATION OF HEALTH AND SAFETY CONDITIONS TO
OPERATE THE STATION - STAZIONE VLF - ISOLA DI
TAVOLARA (OT)

005

PROGETTO DEFINITIVO

STUDIO SU MODELLO FISICO 2D TRACIMAZIONE E STABILITA' SCOGLIERA

21

018

DR

005

0

MAR

Committente

SEZIONE DEL GENIO MILITARE
PER LA MARINA DI CAGLIARI

P.zza Marinai d'Italia snc

Progettazione opere marittime:



MODIMAR s.r.l. Via Monte Zebio 40 - 00195 ROMA
06.3269461 - www.modimar.it

Progettazione:

Ing. Mauro MARINI

Ing. Davide SALTARI

Ing. Leonardo FARINA

Dott. Arch. Alessandro BARTOLESCHI

Studi ambientali

Dott.ssa Scrimieri Sara

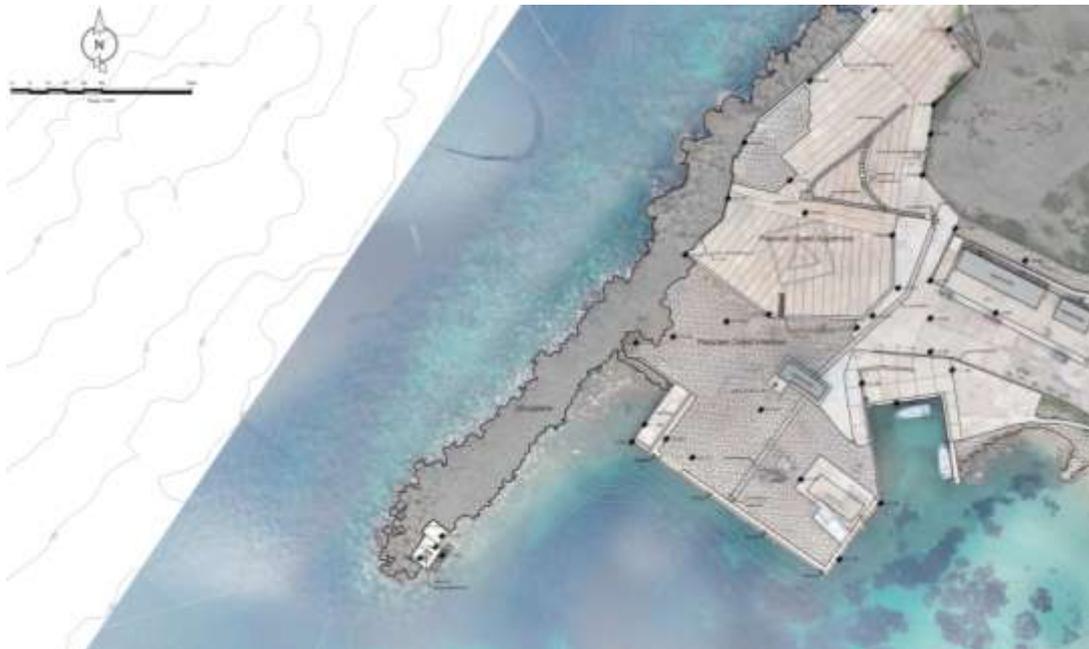
Dott. De Pirro Maurizio

Febbraio 2022	0	0	L.F.	D.S.	M.M.
Data	Rev.	DESCRIZIONE	Disegnato:	Verificato:	Approvato:
Dimensioni foglio: A1		La MODIMAR s.r.l. si riserva la proprietà di questo documento con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta. This document is property of MODIMAR s.r.l. Reproduction and divulgation forbidden without written permission			

Modimar Srl

Studio su modello fisico 2D della tracimazione ondosa e della stabilità della scogliera frangiflutti di Tavolara

RELAZIONE TECNICA



Università degli Studi Roma Tre
Dipartimento di Ingegneria

Febbraio 2022

Responsabile Scientifico:
Prof. Ing. Giorgio Bellotti

Collaboratori Scientifici:
Prof. Ing. Leopoldo Franco
Prof. Claudia Cecioni
Ing. Yuri Pepi

Indice

1. Introduzione	5
2. Prove su modello fisico in scala ridotta	6
2.1 Apparato sperimentale e strumenti di misura	6
2.2 Costruzione del modello fisico	8
2.3 Descrizione delle prove sperimentali	11
3. Analisi dei Risultati	13
3.1 Misure di trascinamento	13
3.2 Stabilità dei massi	16
3.3 Prova senza vasca di dissipazione	17
4. Conclusioni.....	19

Indice delle figure

Figura 1 Planimetria di progetto della diga a scogliera di Tavolara. Ubicazione della sezione di riferimento per il modello fisico (SEZ 1-1).	5
Figura 2 Sezione 1-1 della diga a scogliera della base portuale di Tavolara, configurazione di progetto. Misure in metri in scala prototipo (riferite al livello medio mare).	6
Figura 3 Foto del canale sperimentale	6
Figura 4: Vista prospettica del generatore di moto ondoso con le due sonde per l'assorbimento attivo	7
Figura 5 Sezione longitudinale del canale sperimentale con modello della diga in scala e posizione delle sonde di livello(A-F) e del generatore di moto ondoso (misure in m)	7
Figura 6 Quattro sonde di livello davanti alla scogliera	8
Figura 7 Condizionatore di segnale per l'acquisizione dalle sonde di livello	8
Figura 8 Scheda di conversione analogico-digitale	8
Figura 9 Foto della vasca di tracimazione posta dietro la scogliera	8
Figura 10 Bilancia di precisione per la selezione degli elementi della mantellata	9
Figura 11 Setacci utilizzati per la selezione del materiale del filtro	9
Figura 12 Fuso granulometrico dei massi della scogliera (48÷83 g in modello, 7÷12 t in prototipo) riprodotta in laboratorio (peso in scala modello).	10
Figura 13 Sezione della diga a scogliera della base portuale di Tavolara. Misure in metri in scala modello (fattore di scala 50).	10
Figura 14 Foto del modello fisico della diga a scogliera in canale	11
Figura 15 Portata di tracimazione media misurata in laboratorio e riportata in prototipo (marker tondi neri) e calcolata con la formula dell'Eurotop (marker quadrati rossi) e Grossi et al., 2017 (marker triangolari verdi).	14
Figura 16 Definizione dei parametri presenti nelle formule proposte da Grossi et al., 2017	15
Figura 17: Foto della diga con vasca di dissipazione riempita in massi rocciosi 48-83 g (7 – 12 t in prototipo)	17
Figura 18: Sezione della diga a scogliera della base portuale di Tavolara senza vasca di dissipazione. Misure in metri in scala modello (fattore di scala 50).	18

Indice delle tabelle

Tabella 1 Caratteristiche dei massi naturali costituenti la scogliera (filtro e mantellata) in oggetto in entrambe le configurazioni.	9
Tabella 2 Condizioni di moto ondoso a largo (-15 m sul l.m.m.), fornite dal progettista.	11
Tabella 3 Risultati di moto ondoso incidente alla -15 m e di portata media specifica di sormonto in scala prototipo per le prove condotte in laboratorio.	13
Tabella 4 Misure in prototipo della portata media di tracimazione in l/s/m misurate in laboratorio e predette dalla formula dell'Eurotop Manual e Grossi et al., 2017.	15
Tabella 5: Numerosità di massi dislocati durante la durata di 1000 onde per le 5 prove.	16
Tabella 6: Valori di tracimazione misurati in laboratorio per tutte le 7 prove eseguite senza vasca di dissipazione della tracimazione, riempita di massi 7-12 t, in scala prototipo, berma di sommità G_c larga 10 m (tre file di massi naturali) e 6,5 m (2 file di massi naturali), vedi sezione utilizzate in Figura 18.	17

1. Introduzione

La presente relazione riporta la descrizione e i risultati delle attività sperimentali svolte nell'ambito del contratto di consulenza tra la società di ingegneria MODIMAR s.r.l. e il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi Roma Tre.

Le attività di studio hanno incluso la riproduzione in scala ridotta in canale ad onde della diga scogliera della base portuale di Tavolara, con lo scopo di verificarne l'efficienza idraulica in termini di contenimento della tracimazione ondosa e di stabilità del rivestimento.

Il modello bidimensionale a fondo fisso ha riprodotto una sezione rappresentativa delle condizioni batimetriche secondo la configurazione di progetto fornita dal progettista MODIMAR, con il quale si è mantenuto uno stretto contatto.

In laboratorio è stata riprodotta la sezione nella configurazione di progetto, indicata nella planimetria in Figura 1, come SEZ 1-1 e riportata in Figura 2, le misure sono in *m* a scala di prototipo. La linea color magenta di Figura 2 indica il profilo del terreno roccioso fornitoci dal cliente, mentre l'area tratteggiata rappresenta il fondale roccioso come è stato riprodotto in laboratorio. La sezione è stata realizzata con un fattore di scala 50, in similitudine di Froude. Il profilo del fondo fisso è riprodotto dal piede della scogliera con una pendenza 1:4 fino alla batimetrica -15, arrivando al generatore del moto ondoso con una profondità costante di 15 m (0.3 m in scala modello).

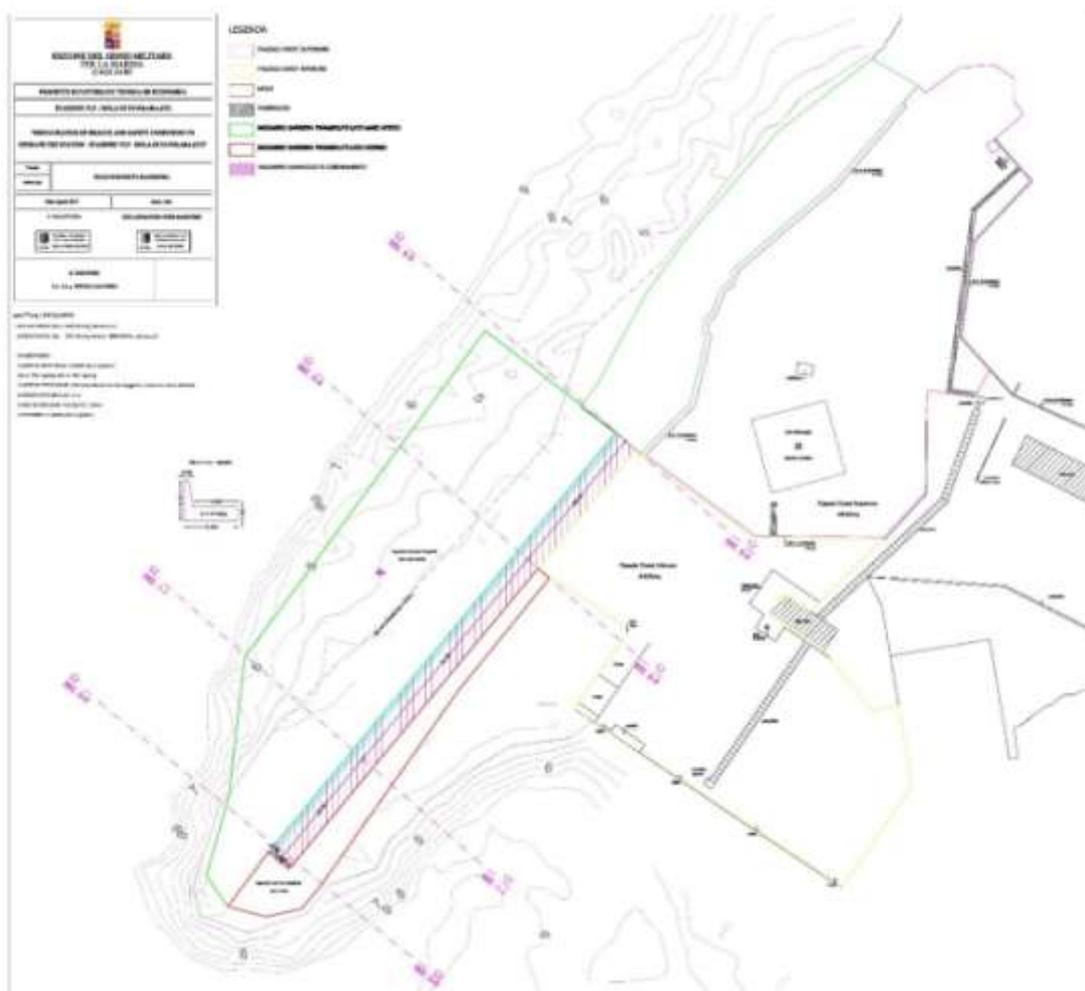


Figura 1 Planimetria di progetto della diga a scogliera di Tavolara. Ubicazione della sezione di riferimento per il modello fisico (SEZ 1-1).

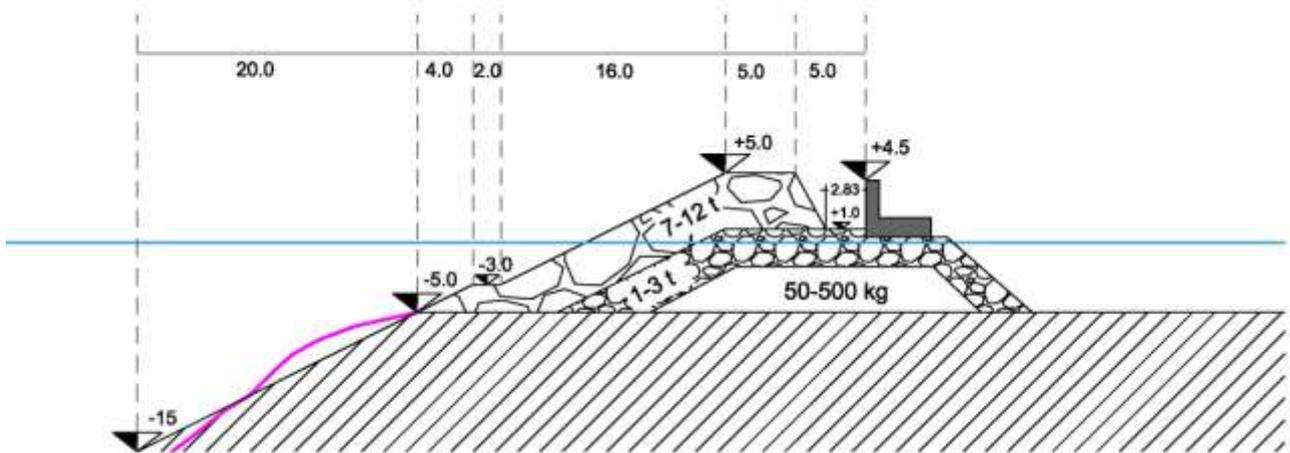


Figura 2 Sezione 1-1 della diga a scogliera della base portuale di Tavolara, configurazione di **progetto**. Misure in metri in scala prototipo (riferite al livello medio mare).

2. Prove su modello fisico in scala ridotta

2.1 Apparato sperimentale e strumenti di misura

Le prove sperimentali 2D sono state realizzate presso il Laboratorio di Idraulica Marittima dell'Università degli Studi Roma Tre nel mese di dicembre 2021. Il canale utilizzato ha una lunghezza di 9.00 m, una larghezza di 0.27 m ed una profondità di 0.48 m (Figura 3). È equipaggiato con un generatore di moto ondoso a pistone (vedi Figura 4) capace di una escursione massima orizzontale di circa 0.6 m. La generazione delle onde, è controllata dal software Awaysys 7.0, sviluppato all'Università di Aalborg (Danimarca), in grado di generare stati di mare regolari e irregolari. Il software controlla il movimento della pala che genera le onde, in modo da assorbire le onde che inevitabilmente si riflettono dall'altra estremità del canale e dal modello sulla pala stessa (sistema di assorbimento attivo).



Figura 3 Foto del canale sperimentale



Figura 4: Vista prospettica del generatore di moto ondoso con le due sonde per l'assorbimento attivo

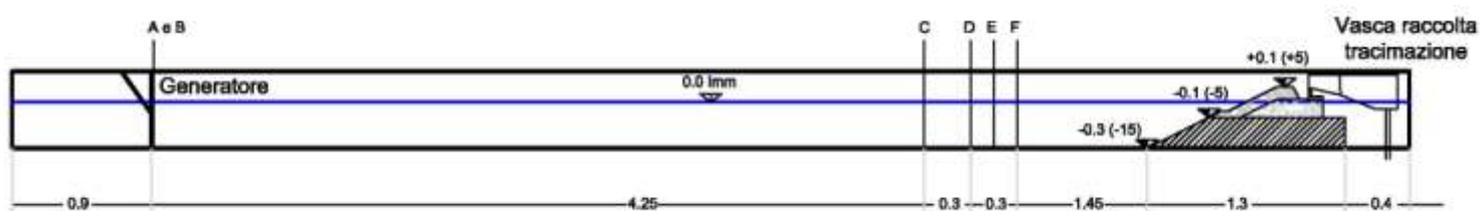


Figura 5 Sezione longitudinale del canale sperimentale con modello della diga in scala e posizione delle sonde di livello(A-F) e del generatore di moto ondoso (misure in m)

Il laboratorio è dotato di sei sonde di livello di tipo resistivo per la misura del moto ondoso, quattro delle quali sono posizionate ad intervalli di 10 cm lungo il canale, come mostrato in Figura 5 (sonde C-F). Le due rimanenti (A e B) sono posizionate entrambe sul generatore del moto ondoso, a 1 cm dalla pala stessa, in modo da fornire la misura dell'elevazione della superficie libera per il sistema di assorbimento attivo. Le sonde resistive sono impiegate per effettuare l'analisi dei livelli nel dominio del tempo. Le sonde C, D, E e F ci hanno permesso di misurare ed analizzare le caratteristiche della sola onda incidente in prossimità del piede dell'opera su un tirante di 15 m in prototipo, e verificare la loro coerenza con i dati ondometrici forniti dal progettista per quel tirante.

La frequenza di acquisizione delle sonde è pari a 50 Hz, pertanto ben superiore rispetto alle frequenze tipiche dei fenomeni misurati.

Un calcolatore raccoglie e assembla, grazie ad appositi software, i dati provenienti da ciascuno strumento di misura mediante una scheda di acquisizione National Instruments (NI – PCI 6229, M Series) in formato digitale (Figura 8). La scheda di acquisizione costituisce anche il tramite per inviare all'attuatore elettrico il segnale di generazione del moto ondoso.

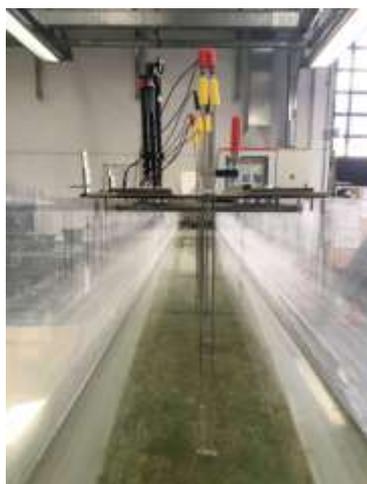


Figura 6 Quattro sonde di livello davanti alla scogliera



Figura 7 Condizionatore di segnale per l'acquisizione dalle sonde di livello



Figura 8 Scheda di conversione analogico-digitale

Il canale è inoltre equipaggiato con una vasca di raccolta delle onde tracimanti. Essa intercetta la tracimazione lungo tutta la larghezza di 27 cm del muro paraonde (vedi Figura 9). Il volume di acqua raccolto nell'intera durata della prova veniva ragguagliato ai valori di portata media sull'intera durata e per metro lineare di diga in prototipo.



Figura 9 Foto della vasca di tracimazione posta dietro la scogliera

Per misurare la stabilità dei massi sotto l'azione delle onde riprodotte, ci si è serviti di una videocamera, posizionata in modo da riprendere dall'alto l'intera mantellata (vedi capitolo 4).

2.2 Costruzione del modello fisico

In laboratorio si è riprodotta la sezione di progetto della diga a scogliera della base portuale di Tavolara (profilo fornito da Modimar), vedi Figura 2.

Nella costruzione della scogliera tutte le grandezze sono scalate opportunamente in similitudine di Froude. Questo criterio di similitudine consiste nel mantenere costante, nel passaggio dal prototipo al modello, il numero di Froude, e quindi si presta a descrivere tutti i processi in cui le

forze gravitazionali risultano prevalenti, quali la maggior parte dei moti a pelo libero. In base a tale criterio di similitudine le variabili geometriche sono scalate con il fattore di scala λ , le variabili del tempo sono scalate con la radice quadrata del fattore di scala, la massa con il fattore di scala al cubo, a parità di densità del materiale di prototipo e di modello.

In base alle dimensioni del canale, delle onde generabili e del tirante idrico di prototipo in prossimità del piede dell'opera (-15 m sul l.m.m.) è stata scelta una scala di riduzione di 1:50, che risulta adeguata per questo tipo di studio.

Nella costruzione del modello fisico sono state utilizzate pietre con densità media di 2.65 t/m³, uguale alla densità dei massi in prototipo. Differenze di densità sussistono anche per quanto riguarda l'acqua: 1.03 t/m³ per l'acqua di mare in prototipo, 1.00 t/m³ per l'acqua dolce usata nel modello. Per scalare il peso medio dei massi che costituiscono la mantellata della scogliera si è tenuto conto di tali differenze di densità, e facendo in modo che resti costante, tra valori di modello e di prototipo, il numero di stabilità fornito dalla legge di Hudson.

$$\frac{P_m}{\rho_{s,m} H_m^3} \left(\frac{\rho_{s,m}}{\rho_{w,m}} - 1 \right)^3 k_d \cot \alpha = \frac{P_p}{\rho_{s,p} H_p^3} \left(\frac{\rho_{s,p}}{\rho_{w,p}} - 1 \right)^3 k_d \cot \alpha \quad (1)$$

Dove P indica il peso del masso, H l'altezza d'onda significativa, ρ_s e ρ_w le densità dei massi e dell'acqua rispettivamente, k_d il coefficiente di non danneggiamento e α la pendenza della scogliera. I pedici m e p sono riferiti ai valori da modello e da prototipo rispettivamente. I massi naturali presenti sono riportati in Tabella 1, in cui si mostrano anche i valori in scala modello.

PROTOTIPO		MODELLO	
P	Dn50	P	Dn50
t	m	g	mm
1÷3	0.72÷1.04	6.9÷20.8	13.8÷19.9
7÷12	1.38÷1.65	48.5÷83.1	26.3÷31.5

Tabella 1 Caratteristiche dei massi naturali costituenti la scogliera (filtro e mantellata) in oggetto in entrambe le configurazioni.



Figura 10 Bilancia di precisione per la selezione degli elementi della mantellata

Figura 11 Setacci del



materiale del filtro

I massi della mantellata sono stati scelti a valle di pesatura di idoneo materiale appositamente acquisito in cava, utilizzando una bilancia di precisione (Figura 10). La selezione di tali massi è effettuata rispettando il più possibile la norma EN 13383 (come riportato anche in CIRIA CUR - Rock Manual 2007) che riguarda la gradazione in massa degli elementi della mantellata.

In Figura 12 si mostrano le percentuali di passante in massa (scala modello) degli elementi della mantellata utilizzati in modello; le linee in nero indicano i pesi di 48 e 83 g (corrispondenti a 7-12 t, in prototipo).

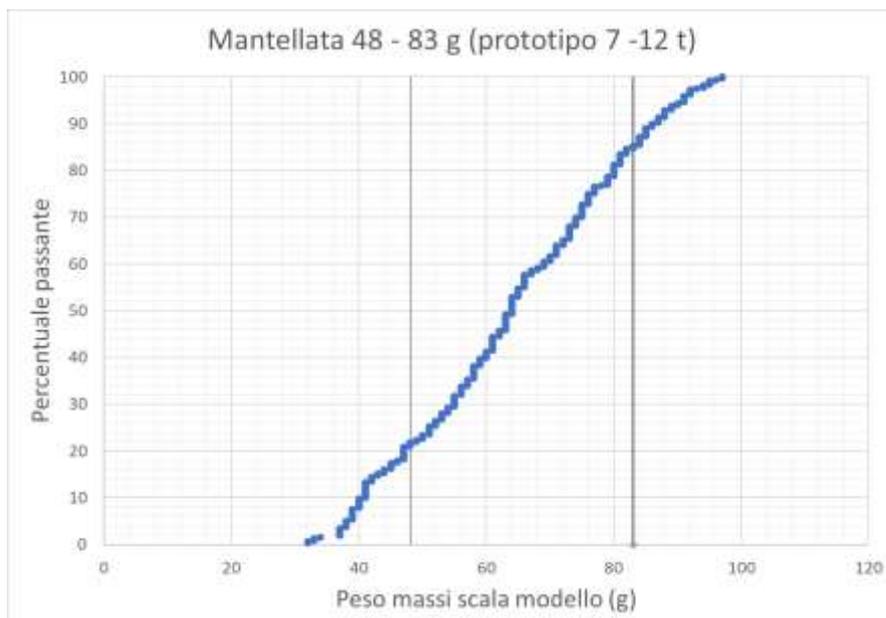


Figura 12 Fuso granulometrico dei massi della scogliera (48÷83 g in modello, 7÷12 t in prototipo) riprodotta in laboratorio (peso in scala modello).

La selezione dei massi che costituiscono il filtro è invece stata effettuata mediante setacciatura (Figura 11).

Tutti i risultati descritti nel seguito sono da intendersi rappresentativi di quanto accade in prototipo nell'ipotesi che le sezioni ricostruite siano effettivamente simili a quelle reali.

In laboratorio si è riprodotto anche il muro di protezione del lungomare, costruito in materiale plastico (Forex) facilmente lavorabile, (ancorato per evitarne il movimento) e largo quanto la larghezza interna del canale, 27 cm.

Nel canale davanti alla diga è stata riprodotta la batimetria costiera a fondo fisso a largo della scogliera, utilizzando del materiale rigido impermeabile disposto con una pendenza 1:4 per 20 cm dal piede della diga (vedi Figura 2 e Figura 5). Il materiale utilizzato è liscio ed impermeabile ha pertanto il solo scopo di riprodurre la batimetria al piede dell'opera in modo schematico ma cautelativo.

In Figura 13 si riporta la sezione di progetto della diga a scogliera riprodotta in laboratorio, mentre in Figura 14 si riporta una foto del modello in canale.

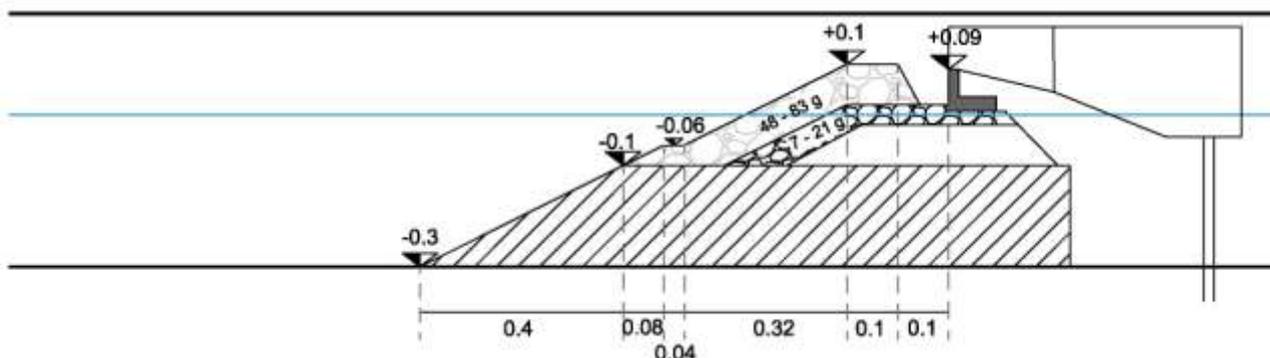


Figura 13 Sezione della diga a scogliera della base portuale di Tavolara. Misure in metri in scala modello (fattore di scala 50).

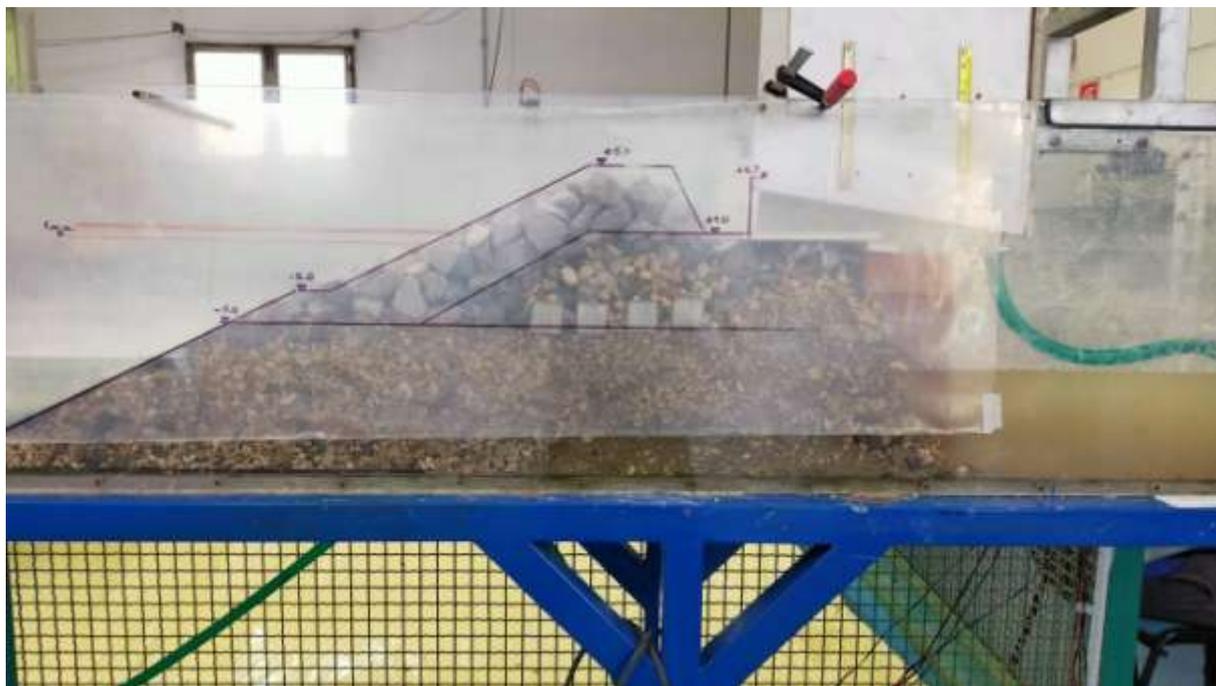


Figura 14 Foto del modello fisico della diga a scogliera in canale

2.3 Descrizione delle prove sperimentali

Le condizioni di moto ondoso e i livelli marini da riprodurre negli esperimenti sono state specificate da Modimar. Le attività oggetto della presente relazione non prevedono una verifica delle analisi statistiche relative al moto ondoso e al livello. L'attacco ondoso nel canale è perpendicolare alla struttura.

ID	prototipo						modello					
	T_R	h	H_{m0}	T_p	$T_{m-1,0}$	livello	h	H_{m0}	T_p	$T_{m-1,0}$	livello	durata
#	anni	m	m	s	s	m	m	m	s	s	m	n° onde
1	2	15.65	2.50	7.70	7.00	0.65	0.313	0.050	1.09	0.99	0.013	1000
2	10	15.65	3.10	8.30	7.55	0.65	0.313	0.062	1.17	1.07	0.013	1000
3	50	15.71	3.50	8.80	8.00	0.71	0.314	0.070	1.24	1.13	0.014	1000
4	100	15.77	4.00	8.90	8.09	0.77	0.315	0.080	1.26	1.14	0.015	1000
5	overload 20%	15.77	4.80	9.50	8.64	0.77	0.315	0.096	1.34	1.22	0.015	1000

Tabella 2 Condizioni di moto ondoso a largo (-15 m sul l.m.m.), fornite dal progettista.

Le condizioni di livello e moto ondoso riprodotte, alla batimetrica -15 m sul l.m.m, sono riportate in Tabella 2 sia in prototipo che in scala modello, secondo il programma contrattuale (T_R è il tempo di ritorno, h il tirante idrico, H_{m0} l'altezza d'onda significativa, T_p il periodo di picco, $T_{m-1,0}$ il periodo medio spettrale, calcolato come $T_p/1.1$, e definito come il rapporto tra il momento spettrale di ordine -1 e di ordine 0, il sovralzato in metri è rispetto al livello medio mare). Ognuna di queste 5 prove è stata effettuata riproducendo una serie d'onda generata a partire dai valori di H_{m0} e T_p applicando il metodo delle fasi random (Tuah & Hudspeth, 1982) da spettri di energia del tipo JONSWAP, opportunamente calibrati, con coefficiente di appuntimento del picco $\gamma=3.33$.

La generazione delle onde in laboratorio avviene su un tirante di 15 m in scala prototipo (0.30 m scala modello) rispetto al livello medio marino (si veda Figura 5).

Ognuna delle 5 prove è stata ripetuta più volte in modo da verificare che al tirante di 15 m sul l.m.m (scala prototipo) si misurasse un'onda pari ai valori riportati in Tabella 2. L'analisi delle serie temporali di elevazione della superficie libera, misurate dalle 4 sonde davanti alla diga (sonde C,D, E e F di Figura 5), ha permesso di caratterizzare lo stato di mare davanti all'opera e separare la componente di moto ondoso incidente da quella riflessa dalla struttura. Quest'ultima analisi è effettuata seguendo il metodo proposto da Eldrup & Lykke Andersen (2019) e Lykke Andersen et al. (2017). Tale metodo ha permesso di ricostruire l'effettivo stato di mare incidente al piede dell'opera, e di calibrare la generazione delle onde in modo da riprodurre proprio gli stati di mare incidenti forniti.

Le quattro prove sono state condotte riproducendo 1000 onde irregolari, generate applicando il metodo delle fasi random a partire da spettri di energia del tipo JONSWAP (con $\gamma = 3.3$), opportunamente calibrati. Quindi la durata di ogni prova è funzione del periodo di picco dell'onda, tipicamente 18-23 minuti. La prova ID 5 rappresenta la condizione ondosa con tempo di ritorno 100 anni (ID 4) ma con una sovrastima conservativa dell'altezza dell'onda del 20%.

3. Analisi dei Risultati

3.1 Misure di tracimazione

Si riportano in seguito i valori in scala prototipo della portata media di tracimazione per metro lineare di diga, per i 5 stati di mare riprodotti (vedi Tabella 2). Si ricorda che lo stato di mare incidente sul tirante di 15 m sul l.m.m., è quello fornito dallo studio di propagazione del moto ondoso su tale tirante idrico (inclusivo di sovralzò). In laboratorio la misura di tale moto ondoso incidente è calcolata al termine di ogni prova, tramite l'analisi della serie temporale registrata alle 4 sonde davanti alla diga. In tal modo, il moto ondoso incidente non è perfettamente identico a quello target e sempre leggermente diverso ad ogni ripetizione della prova.

In Tabella 3 sono riportati i valori di moto ondoso incidente (H_{m0} e T_p) al piede dell'opera (valori target e misurati nella ripetizione che ha riportato valori più simili ai valori target) e il valore della portata media di tracimazione opportunamente riportata in prototipo. Il bordo libero R_c è dato dalla differenza tra la quota di cresta della scogliera (+5.0 m sul l.m.m.) ed il livello del mare, variabile in ogni prova.

ID	T_r	livello	R_c	Target		Misura in lab					
				H_{m0}	T_p	H_{m0}	T_p	R_c/H_{m0}	n°onde	durata	q
#	anni	m		m	s	m	s	-	-	s	l/s/m
1	2	0,65	4,35	2,50	7,70	2,50	7,60	1,74	1000	1005	0,00E+00
2	10	0,65	4,35	3,10	8,30	3,27	8,05	1,33	1000	1022	6,62E-03
3	50	0,71	4,29	3,50	8,80	3,56	8,91	1,21	1000	1074	2,70E-02
4	100	0,77	4,23	4,00	8,90	3,90	9,12	1,08	1000	1088	1,43E-01
5	overload 20%	0,77	4,23	4,80	9,50	4,84	9,34	0,87	1000	1148	2,03E+00

Tabella 3 Risultati di moto ondoso incidente alla -15 m e di portata media specifica di sormonto in scala prototipo per le prove condotte in laboratorio.

La portata di tracimazione media è stata calcolata a partire dal peso dell'acqua di sormonto, raccolta dalla vasca posta a tergo del muro di coronamento (si veda Figura 9) e convogliata in un secchio. Il peso totale della sola acqua tracimata è stato convertito in volume (l), diviso per la durata della prova (l/s) e diviso per la larghezza in metri della vasca di tracimazione, in modo da ottenere il valore della portata di tracimazione media su metro lineare di diga per ogni prova (l/s/m). Per riferirsi ai valori in prototipo, la portata così ottenuta dalle misure in laboratorio è stata moltiplicata per il fattore di scala, 50, elevato alla 3/2.

In Figura 15 si riporta il grafico dei risultati di laboratorio (marker tondi neri), dove le portate medie di tracimazione sono opportunamente dedotte in scala prototipo. Alla portata di tracimazione per la prova ID1 – SLE in configurazione di progetto è stato assegnato un valore di portata pari a 10^{-6} , invece che zero, per visualizzare tale valore nel grafico semilogaritmico. Le linee verticali tratteggiate, mostrano i valori delle quote del muro paraonde, adimensionalizzate con l'altezza d'onda significativa fornita dal Committente (vedi Tabella 2). Si può notare che i risultati del modello fisico non ricadono esattamente in questi valori, ma molto vicino, in quanto si basano sull'altezza d'onda significativa effettivamente misurata in laboratorio.

I risultati delle prove di laboratorio sono stati confrontati con i valori di portata media di sormonto ottenuti applicando la formula dell'Eurotop manual (2018) e di Grossi et al. (2017).

Nel Eurotop la formula empirica è riportata in Eq. (2), dove γ_f rappresenta il coefficiente di rugosità della mantellata, posto pari a 0.4 per massi naturali su due strati con nucleo permeabile, e γ_β è il coefficiente che tiene conto dell'obliquità delle onde rispetto alla diga, posto pari ad 1 per la presente applicazione. I valori di portata calcolati tramite la (2) sono stati moltiplicati per il coefficiente C_r , riportato in eq. (3), che tiene conto della berma di cresta (di lunghezza $G_c = 10$ m) posta davanti al muro.

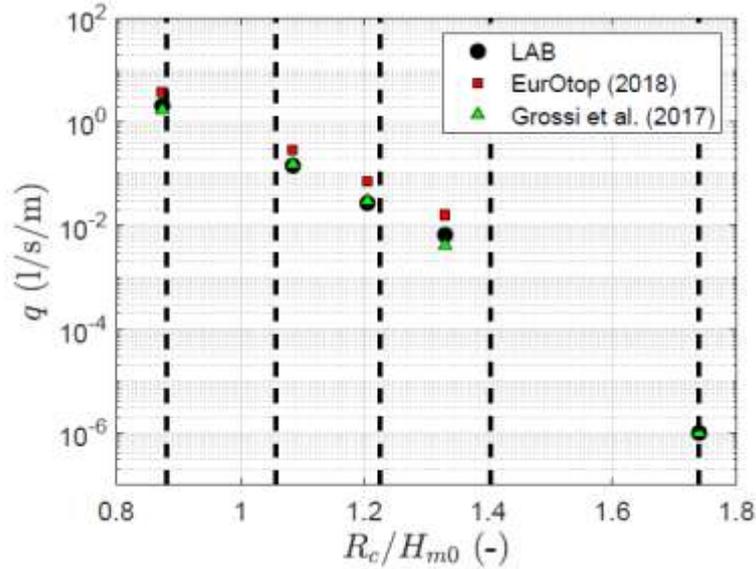


Figura 15 Portata di tracimazione media misurata in laboratorio e riportata in prototipo (marker tondi neri) e calcolata con la formula dell'Eurotop (marker quadrati rossi) e Grossi et al., 2017 (marker triangolari verdi).

Nel lavoro di Grossi et al. (2017) un coefficiente correttivo γ_{osb} è stato proposto per valutare la riduzione della portata media di tracimazione dovuta alla presenza di una vasca di dissipazione (*OverSpill Basin*). Questo coefficiente è stato determinato sulla base delle formule proposte nella versione precedente del Eurotop pubblicata nel 2007 e ricalibrate da Grossi et al. (2017) (Eq. 4). Il coefficiente γ_{osb} dipende dalle dimensioni della vasca, la pendenza della mantellata e le condizioni d'onda incidenti (Eq. 5). I parametri sono definiti in Figura 16.

I risultati della stima della portata media di tracimazione tramite la formula dell'Eurotop (Eq. 2) e Grossi (Eq. 4) sono stati riportati in l/m/s e confrontati con quelli misurati in laboratorio (si veda Tabella 4). I risultati sono stati graficati insieme alle formule di predizione del EurOtop (2018) e Grossi et al. (2017) in Figura 15. La formula proposta da Grossi et al. (2017) fornisce una predizione migliore rispetto all'approccio suggerito nel EurOtop (2018).

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.09 \cdot \exp \left[- \left(1.5 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right] \quad (2)$$

$$C_r = 3.06 \exp(-1.5G_c/H_{m0}) \quad (3)$$

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.0635 \cdot \exp \left[-2.091 \frac{R_c}{H_{m0} \gamma_f \gamma_{osb}} \right] \quad (4)$$

$$\gamma_{osb} = 0.387 \left(\frac{h_b G_b G_c \tan \alpha}{H_{m0}^2 L_0} \right)^{-0.14} \quad (5)$$

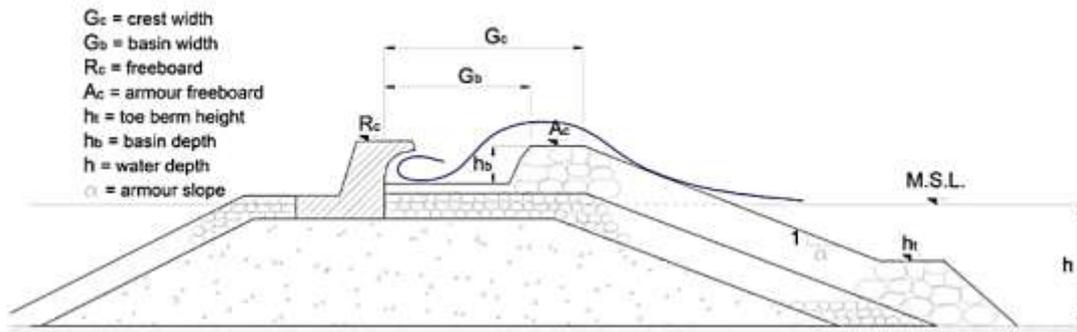


Figura 16 Definizione dei parametri presenti nelle formule proposte da Grossi et al., 2017

ID	T_r	livello	R_c	H_{m0}	T_p	R_c/H_{m0}	q lab	q Eurotop	q Grossi
#	anni	m	m	m	s	-	l/s/m	l/s/m	l/s/m
1	2	0,65	4,35	2,50	7,60	1,74	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	10	0,65	4,35	3,27	8,05	1,33	6,62E-03	1,61E-02	4,15E-03
3	50	0,71	4,29	3,56	8,91	1,21	2,70E-02	7,04E-02	2,97E-02
4	100	0,77	4,23	3,90	9,12	1,08	1,43E-01	2,90E-01	1,51E-01
5	overload 20%	0,77	4,23	4,84	9,34	0,87	2,03E+00	3,85E+00	1,70E+00

Tabella 4 Misure in prototipo della portata media di tracimazione in l/s/m misurate in laboratorio e predette dalla formula dell'Eurotop Manual e Grossi et al., 2017.

3.2 Stabilità dei massi

Per la configurazione di progetto della diga di sopraflutto a scogliera della base militare di Tavolara è stata effettuata la verifica di stabilità idraulica dei massi della mantellata. Come specificato nel paragrafo 2.2, il peso dei massi riprodotti in laboratorio è stato scalato considerando le differenze di densità, tra modello e prototipo, dei massi stessi e dell'acqua, considerando il numero di stabilità del masso fornito dalla formula di Hudson.

Durante tutte le prove sono stati osservati e ripresi i massi della mantellata differenziando gli eventuali spostamenti dei massi tra dislocamento (spostamento $> D_{n50}$) ed oscillazione (movimento sul posto del masso sotto l'azione delle onde).

Nella durata di 1000 onde abbiamo registrato il numero di massi spostati riportato in Tabella 5. e il numero dei massi della mantellata utilizzati nel modello, il cui fuso granulometrico è riportato in Figura 12, sono in totale 318, si riporta quindi anche la percentuale di massi dislocati nella durata delle prove rispetto al totale dei massi.

ID	prototipo				durata	n° tot massi mantellata = 318	
	T_R	h	H_{m0}	T_p		n° massi disloc	%
#	anni	m	m	s	s	-	-
1	2	15,65	2,50	7,60	1005	0	0
2	10	15,65	3,27	8,05	1022	0	0
3	50	15,71	3,56	8,91	1074	2	0,63
4	100	15,77	3,90	9,12	1088	3	0,94
5	overload 20%	15,77	4,84	9,34	1148	5	1,57

Tabella 5: Numerosità di massi dislocati durante la durata di 1000 onde per le 5 prove.

La percentuale dei massi dislocati è stata per tutte le prove inferiore al 5%, valore di limite di danno ammesso dall'utilizzo della formula di Hudson per il dimensionamento del peso medio dei massi della mantellata.

Tutti i massi che si sono spostati durante le prove si trovavano inizialmente nella zona della mantellata al di sotto del livello medio mare. Vista la modellazione del fondale roccioso antistante la diga, con una ripida rampa liscia con pendenza cautelativa costante di 1:4, i massi che hanno subito un dislocamento sono rotolati fino alla batimetrica -15 m.

3.3 Prova senza vasca di dissipazione

Durante la prova ID 5 (TR = 100 anni, 20% overload) dei massi posizionati sulla cresta della mantellata si sono spostati in direzione della diga, cadendo dentro la vasca di dissipazione delle onde tracimanti. Tale vasca ha lo scopo di ridurre la tracimazione dell'onda a tergo del muro paraonde, dissipando l'energia dell'onda. Come si può notare in Figura 13 e Figura 14, all'interno della vasca stessa, il paramento lato mare ha una pendenza molto ripida dei massi della mantellata, che compromettono la stabilità dei massi stessi in fase di attacco del moto ondoso. Per interesse scientifico sono state effettuate ulteriori prove, con condizioni di onde e livelli uguali alla prova ID4 e ID5, ma in assenza della vasca di dissipazione. Questa infatti è stata riempita da massi uguali a quelli della mantellata (7-12 t, in prototipo), come si può notare nella Figura 17



Figura 18: Foto della diga con vasca di dissipazione riempita in massi rocciosi 48-83 g (7 – 12 t in prototipo)

In Tabella 6, sono riportati i valori di 7 prove aggiuntive con larghezza della berma di sommità pari a 10 m e 6,5 m, senza vasca di dissipazione. I risultati di quest'ultime prove sono da confrontarsi con quelli della prova ID 5, per parità di condizioni di livello e onde. Annullando l'effetto della vasca di dissipazione si nota un aumento (atteso) della tracimazione, del 50% circa. Tale valore di portata media (3,019 l/s/m è più vicino a quello stimato con la formula dell'Eurotop, eq(2) (valore 3,85 l/s/m) riportato in tabella 4, che non include l'effetto della vasca di dissipazione.

G_c	ID	T_r	livello	R_c	H_{m0}	T_p	R_c/H_{m0}	q lab	Wave Series
m	#	anni	m	m	m	s	-	l/s/m	-
10,00	4	100	0,77	4,23	3,90	9,12	1,08	0,259	WS_ID4
	4	100	0,77	4,23	3,93	9,12	1,08	0,414	WS_new
	5	overload 20%	0,77	4,23	4,84	9,34	0,87	3,019	WS_ID5
6,50	2	10	0,65	4,35	3,27	8,05	1,33	0,164	WS_ID2
	3	50	0,71	4,29	3,56	8,91	1,21	0,415	WS_ID3
	4	100	0,77	4,23	3,90	9,12	1,08	2,331	WS_ID4
	5	overload 20%	0,77	4,23	4,84	9,34	0,87	17,353	WS_ID5

Tabella 6: Valori di tracimazione misurati in laboratorio per tutte le 7 prove eseguite senza vasca di dissipazione della tracimazione, riempita di massi 7-12 t, in scala prototipo, berma di sommità G_c larga 10 m (tre file di massi naturali) e 6,5 m (2 file di massi naturali), vedi grafico delle sezioni utilizzate in Figura 18.

Struttura SENZA vasca di dissipazione (NOosb)

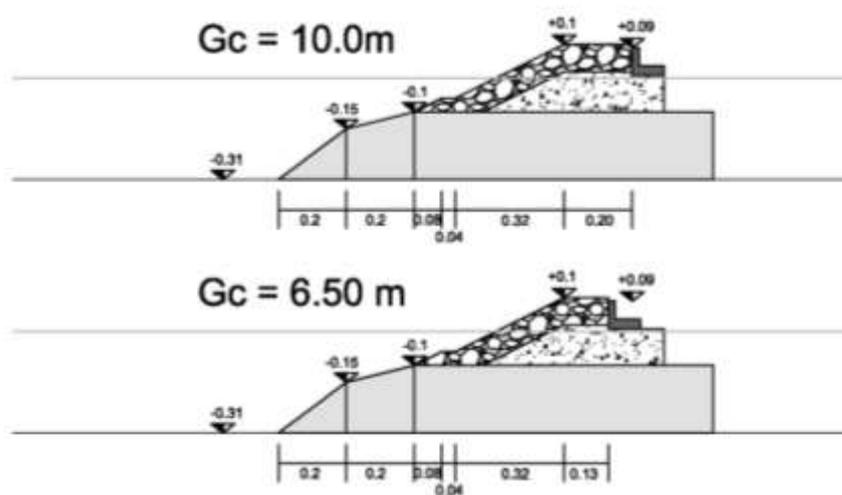


Figura 19: Sezione della diga a scogliera della base portuale di Tavolara senza vasca di dissipazione. Misure in metri in scala modello (fattore di scala 50).

4. Conclusioni

La presente relazione espone i risultati della modellazione fisica in canale 2D della diga a scogliera della base portuale di Tavolara (Sardegna). L'obiettivo della modellazione è stato quello di misurare la portata media di tracimazione e la stabilità idraulica dei massi della mantellata per le 5 condizioni di moto ondoso e livello stabilite dal progettista Modimar per la configurazione di progetto (Figura 2 sezione).

Per quanto riguarda la tracimazione, nel modello fisico si è misurata una portata di tracimazione media di circa 0,03 l/s/m per la prova con condizioni ondose relative al tempo di ritorno di 50 anni (ID 3) e di circa 0,14 l/s/m per la prova con tempo di ritorno di 100 anni (ID 4), con vasca di dissipazione e valore 0,414 l/s/m, in assenza di vasca di dissipazione, (tale conformazione della mantellata, comporta una maggiore resistenza della struttura alle azioni del moto ondoso incidente. La prova in condizioni ondose più gravose del 20% rispetto alle condizioni relative ad un tempo di ritorno di 100 anni (ID 5), ha misurato una portata media di tracimazione di circa 2 l/s/m con vasca e di 3,0 l/s/m in assenza della vasca di dissipazione dei sormonti.

L'effetto della vasca di dissipazione della tracimazione, è stato analizzato per le prove con tempo di ritorno 100 anni e overload del 20%, colmando la vasca stessa con i massi. Si è rilevato un aumento della portata media di tracimazione di oltre il 50% superiore a quello relativo alla configurazione con vasca. In particolare per condizioni di moto ondoso (ID5) il valore della portata è pari a 0,259 l/s/m (con vasca 0,143 l/s/m) e per le condizioni ID 6 è pari a 3 l/s/m (con vasca 2,03 l/s/m). Si tratta comunque di valori molto bassi e non pericolosi per la stabilità strutturale, mentre potrebbero essere pericolosi per il transito di persone o veicoli, ma va ricordato che si tratta di una condizione eccezionale. Il valore rilevato per onde con TR= 50 anni è invece ben inferiore ai limiti di sicurezza circa 0,2 l/s/m.

Per quanto riguarda la stabilità dei massi della mantellata, questa è garantita con livelli di danneggiamento della mantellata inferiori all'1%, e di 1.57% per la prova di overload (ID 5). Lo spostamento dei massi è avvenuto nella fascia della mantellata al di sotto del livello medio marino. Durante la prova ID 5, due massi inizialmente posizionati sulla cresta sommitale della mantellata sono caduti nella vasca di dissipazione, data l'eccessiva ripidità del paramento interno della vasca.

Valori della larghezza della berma di sommità minori di 10 m (grandezza G_c) determinano per le ondate più gravose valori della portata di tracimazione notevolmente superiori a quelle determinate con berma larga 6,5 m, la stabilità dei massi è comunque sempre garantita.

Riferimenti bibliografici essenziali

Edrup, M. R. and Lykke Andersen, T., 2019. Estimation of Incident and Reflected Wave Trains in Highly Nonlinear Two-Dimensional Irregular Waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, (145), Issue 1.

EurOtop, 2018. Manual on wave overtopping of sea defences and related Structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Second Edition. Authors: J.W. van der Meer, N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. DeRouck, A. Kortenhaus, T. Pullen, H. Schüttrumpf, P. Troch and B. Zanuttigh. www.overtopping-manual.com

Grossi, A., Kortenhaus, A., Romano, A., & Franco, L. (2017). Wave Runup and Overtopping. Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters 2015.

Lykke Andersen T., Eldrup M. R., Frigaard P., 2017. Estimation of incident and reflected components in highly nonlinear regular waves, *Coastal Engineering*, (119), 2017, pp. 51-64.

Tuah, Hang, and Robert T. Hudspeth, 1982. Comparisons of numerical random sea simulations. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division* (108.4) pp. 569-584.