



COMUNE DI CASTIGLIONE DELLA PESCAIA



MARINA DI PUNTA ALA S.P.A.
 LOCALITA' IL PORTO SNC
 PUNTA ALA - CASTIGLIONE DELLA PESCAIA (GR)
 42°48',48 N - 10°44',22 E

AMPLIAMENTO DEL PORTO TURISTICO DI PUNTA ALA STRALCIO FUNZIONALE OPERE CIVILI MARITTIME

B.07

PROGETTO DEFINITIVO

RILIEVI, INDAGINI E STUDI SPECIALISTICI

STUDIO SU MODELLO FISICO

20 012 DR B 007 0

Committente

Marina di Punta Ala S.p.a.
 sede legale:
 Castiglione della Pescaia (GR)
 Loc. Il Porto - Punta Ala

Progettazione opere marittime:


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


 Modimar Project S.r.l.
 Via Asmara 72 - 00199 Roma

Progettazione:

Ing. Marco TARTAGLINI
 Ing. Marco DEL BIANCO
 Ing. Andrea SANZONE

ELABORATO REDATTO DA:
 Am3 Spin-Off Srl

Gruppo di lavoro:

Ing. Alessio CAMUSI
 Ing. Valerio TRULLI
 Dott.ssa Sara SCRIMIERI


 AM3 SPIN-OFF
 ADVANCED MODELS AND METHODS
 IN MARITIME ENGINEERING

Consulenza geotecnica:

AGiS Ingegneria s.r.l.
 Ing. Giuseppe IORIO



UNIVERSITÀ
 DEGLI STUDI
 FIRENZE
DICEA
 DIPARTIMENTO
 DI INGEGNERIA CIVILE
 E AMBIENTALE

A-MARE
 ACQUE MARE AMBIENTE ENERGIA
 Laboratorio Congiunto

05.04.2024	0	EMISSIONE	AM3 Spin-Off		M.T.
Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE
E AMBIENTALE

A-MARE

ACQUE MARE AMBIENTE ENERGIA
Laboratorio Congiunto



STUDIO SPECIALISTICO SU MODELLO FISICO
BIDIMENSIONALE PER LA VERIFICA DEL LAYOUT DI
PROGETTO DEL NUOVO TRATTO DELLA DIGA FORANEA
PREVISTO PER LA RIQUALIFICAZIONE E L'AMPLIAMENTO
DEL PORTO DI PUNTA ALA

INDICE

Presentazione di A-MARE	6
Premessa	6
1. Obiettivi e fasi di lavoro	9
2. L'apparecchiatura sperimentale e la metodologia	11
2.1. IL CANALE MARITTIMO	11
2.2. CRITERI DI SIMILITUDINE UTILIZZATI PER LA COSTRUZIONE DEL MODELLO	12
2.3. SIMILITUDINE CON IL PROTOTIPO NEL DECADIMENTO DELLE SOVRAPPRESSIONI ATTRAVERSO IL NUCLEO DELLA DIGA	13
2.4. MODELLAZIONE DEI FONDALI DI POSA	13
2.5. SELEZIONE DEI MASSI COSTITUENTI IL MODELLO DELLA DIGA FORANEA ESISTENTE	14
2.5.1. <i>Peso specifico dei massi</i>	14
2.5.2. <i>Massi naturali costituenti il nucleo</i>	15
2.5.3. <i>Massi naturali costituenti lo strato filtro</i>	16
2.5.4. <i>Massi naturali costituenti la berma al piede (2.0÷5.0t)</i>	16
2.5.5. <i>Massi naturali costituenti la vasca di laminazione (1.0÷3.0t)</i>	17
2.5.6. <i>Massi naturali costituenti la mantellata (5.0÷8.0t)</i>	17
2.6. COSTRUZIONE DELLE SEZIONI DELLA DIGA	18
2.7. SENSORI UTILIZZATI	20
2.7.1. <i>Sensori di livello di tipo ultrasonico</i>	20
2.7.2. <i>Celle di carico per la misura dell'overtopping e delle forze</i>	21
2.7.3. <i>Fotocamera</i>	22
2.8. DEFINIZIONE DELLE ONDE E DEI LIVELLI DI PROVA	22
3. Test per la verifica dell'Avandiga Foranea Maestrale (sezione D1)	28
3.1. RISULTATI FASE I	31
3.2. RISULTATI FASE II	34
4. Test per la verifica dell'Avandiga Foranea Maestrale Provvisoria (sezione D2 e D3)	39
4.1. SEZIONE PROVVISORIA D2	39
4.2. SEZIONE PROVVISORIA D3	42
5. Test per la verifica della Diga Foranea Maestrale (sezione M1 e M2)	44
5.1. SEZIONE M1	44
5.2. SEZIONE M2	51
5.2.1. <i>Risultati fase 1</i>	52
5.2.2. <i>Risultati fase 2</i>	54
Conclusioni	57

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Planimetria di progetto del nuovo tratto di diga del Porto di Punta Ala. In rosso localizzazione delle sezioni di studio - Fonte: MODIMAR.....	8
Figura 2 - Il canale utilizzato per la conduzione dello studio in esame, presso il LABIMA - Laboratorio di Ingegneria Marittima del DICEA-UNIFI.....	11
Figura 3 - Realizzazione del doppio fondo in canale per la riproduzione delle batimetriche dal piede della struttura alla -20.0m s.l.m.	14
Figura 4 - Massi campioni per la determinazione del peso specifico e cilindro graduato	15
Figura 5 - Nucleo: sx) Frequenza % - dx) Frequenza cumulata.....	16
Figura 6 - Filtro: sx) Frequenza % - dx) Frequenza cumulata	16
Figura 7 - Piede 1: sx) Frequenza % - dx) Frequenza cumulata	17
Figura 8 - Vasca: sx) Frequenza % - dx) Frequenza cumulata	17
Figura 9 - Mantellata: sx) Frequenza % - dx) Frequenza cumulata	18
Figura 10 - Costruzione del modello in canale	20
Figura 11 - Sensori di livello: sonda ad ultrasuoni.....	20
Figura 12 - Cella di Carico - CELMI TIPO 54.....	21
Figura 13 - Caratteristiche metrologiche, elettriche, meccaniche e ambientali - Celle di Carico a flessione CELMI TIPO 54.	21
Figura 14 - Fotocamera CANON Power Shot G9.....	22
Figura 15 - Serie temporale degli spostamenti della pala del wavemaker relativa all'attacco ondoso H01 (durata 1800s in scala modello).....	24
Figura 16 - Setup del canale marittimo per le prove sul prolungamento della diga foranea del Porto di Punta Ala.....	24
Figura 17 - Esempio di elaborazioni grafiche ottenute dall'analisi dei dati acquisiti alla sonda WG3, sia nel dominio del tempo sia nel dominio della frequenza per l'onda H01.	26
Figura 18 - Analisi di riflessione condotta alle sonde WG3 e WG4 per il moto ondoso H01 .	27
Figura 19 - Avandiga Foranea Maestrale - sezione D1	28
Figura 20 - Sezione D1 - in alto a sinistra vista frontale; in alto a destra vista della vasca di laminazione; in basso a destra vista della berma al piede; in basso vista laterale.	29
Tabella 11 - Valori del parametro di danno S per differenti livelli di danno per data pendenza di una mantellata in doppio strato di massi naturali	30
Figura 21 - Parametro di danno S parziale - sezione D1 - fase 1	32
Figura 22 - Parametro di danno S cumulato - sezione D1 - fase 1	33
Figura 23 - Avandiga Foranea Maestrale - Fase 1: a sinistra vista frontale; al centro individuazione dei massi dislocati sulla mantellata; a destra in alto particolare della vasca di laminazione; a destra in basso individuazione dei massi dislocati sulla berma al piede	34
Figura 24 - Parametro di danno S parziale - sezione D1 - fase 2	36
Figura 25 - Parametro di danno S cumulato - sezione D1 - fase 2	37
Figura 26 - Avandiga Foranea Maestrale - Fase 2: a sinistra vista iniziale; al centro vista al termine del moto ondoso H04; a destra vista al termine del moto ondoso H05	38
Figura 27 - Avandiga Foranea Maestrale - Fase 2: a sinistra vista al termine del moto H06; al centro vista al termine del moto ondoso H07; a destra vista al termine del moto ondoso H08. In basso da sinistra verso destra viste della berma al piede al termine dei moti ondosi H06, H07 e H08	38

Figura 28 - Avandiga Foranea Maestrale Provvisoria - sezione D2	39
Figura 29 - Sezione D2 - In alto a sinistra vista frontale; in alto a destra vista lato darsena; in basso vista laterale	40
Figura 30 - Configurazione D2: iniziale (a sinistra), post H09 (al centro) e post H10 (a destra) – vista dal porto verso il mare.....	41
Figura 31 - Configurazione D3: iniziale (a sinistra) e post H10 (a destra) – vista dal porto verso il mare.....	42
Figura 32 - Diga Foranea Maestrale – sezione M1	45
Figura 33 - Diga Foranea Maestrale – sezione M1 – i. Posa dello strato filtro; ii Posa del primo strato di mantellata; iii. Vista frontale; iv. Vista dalla pensilina box; v. Vista laterale; vi. Particolare vasca di laminazione; vii. Particolare piede dell’opera	46
Figura 34 - Parametro di danno S parziale – CONFIGURAZIONE M1	48
Figura 35 - Parametro di danno S cumulato – CONFIGURAZIONE M1	49
Figura 36 - Configurazione M1: i. configurazione M1 iniziale; ii. M1 post H01; iii. M1 post H02; iv. M1 post H03; v. M1 post H03 piede opera; vi. M1 post H03 vasca di laminazione	50
Figura 37 - Diga Foranea Maestrale – sezione M2 – a sinistra vista frontale; a destra vista piede dell’opera.....	51
Figura 38 - Parametro di danno S parziale – CONFIGURAZIONE M2 – FASE I	53
Figura 39 - Parametro di danno S cumulato – CONFIGURAZIONE M2 – FASE I	53
Figura 40 - Configurazione M2 – fase 1: a sinistra M2 iniziale; al centro M2 post H02; a destra M2 post H03	54
Figura 41 - Parametro di danno S parziale – CONFIGURAZIONE M2 – FASE II	55
Figura 42 - Parametro di danno S cumulato – CONFIGURAZIONE M2 – FASE II	56
Figura 43 - Configurazione M2 – fase 2: a sinistra M2 iniziale; al centro M2 post H07; a destra M2 post H08	56

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Fasi dei test di laboratorio.	9
Tabella 2 - Scale di riduzione utilizzate nel modello.....	13
Tabella 3 – Parametri peso <i>as is</i> , peso essiccato, peso saturo, volume e peso specifico	15
Tabella 4 - Lettura alla punta idrometrica delle quote principali del modello realizzato in canale per la sezione D1.....	18
Tabella 5 - Moti ondosi di prova target – sezione Avandiga Foranea Maestrale (D1)	23
Tabella 6 - Moti ondosi di prova target – sezione Avandiga Foranea Maestrale provvisoria (D2/D3)	23
Tabella 7 - Moti ondosi di prova target – sezione Diga Foranea Maestrale (M1)	23
Tabella 8 - Moti ondosi di prova target – sezione Diga Foranea Maestrale (M2)	23
Tabella 9 - Disposizione in canale delle sonde di livello	25
Tabella 10 – Moti ondosi di prova per la sezione D1	30
Tabella 12 – Avandiga Foranea Maestrale – sezione D1 – fase 1: Parametri caratteristici delle onde generate, portate e volumi di overtopping - valori riferiti al prototipo.....	31
Tabella 13 - Avandiga Foranea Maestrale – sezione D1 – fase 1: Numero di massi dislocati durante i test e parametri di danno N_{od} e S parziali e cumulati	32
Tabella 14 - Avandiga Foranea Maestrale – sezione D1 – fase 2: Parametri caratteristici delle onde generate, portate e volumi di overtopping	35
Tabella 15 - Avandiga Foranea Maestrale – sezione D1 – fase 2: Numero di massi dislocati durante i test e parametri di danno N_{od} e S parziali e cumulati	36
Tabella 16 - Moti ondosi di prova per la sezione D2 (D1 provvisoria).....	41
Tabella 17 - Avandiga Foranea Maestrale Provvisoria – sezione D2: Parametri caratteristici delle onde generate e trasmesse	41
Tabella 18 - Avandiga Foranea Maestrale Provvisoria – sezione D3: Parametri caratteristici delle onde generate e trasmesse	43
Tabella 19 - Moti ondosi di prova per la sezione M1	47
Tabella 20 - Diga Foranea Maestrale – sezione M1: Parametri caratteristici delle onde generate, portate e volumi di overtopping	47
Tabella 21 - Diga Foranea Maestrale – sezione M1: Numero di massi dislocati durante i test e parametri di danno N_{od} e S parziali e cumulati	48
Tabella 22 - Moti ondosi di prova per la sezione M2	51
Tabella 23 - Diga Foranea Maestrale – sezione M2 – fase 1: Parametri caratteristici delle onde generate, portate e volumi di overtopping	52
Tabella 24 - Diga Foranea Maestrale – sezione M2 – fase 1: Numero di massi dislocati durante i test e parametri di danno N_{od} e S parziali e cumulati	52
Tabella 25 - Diga Foranea Maestrale – sezione M2 – fase 2: Parametri caratteristici delle onde generate, portate e volumi di overtopping	54
Tabella 26 - Numero di massi dislocati durante i test e relativi parametri di danno N_{od} e S parziali e cumulati – CONFIGURAZIONE M2	55
Tabella 27 – Limiti del parametro di danno S	57
Tabella 28 - Limits for wave overtopping for structural design of breakwaters, seawalls, dikes and dams.....	58
Tabella 29 - General limits for overtopping for property behind the defence.....	58

Tabella 30 - Limits for overtopping for people and vehicles 58

PRESENTAZIONE DI A-MARE

Fondato nel 2018, il laboratorio congiunto A-MARE – Acqua Mare Ambiente Energia (nel prosieguo A-MARE) porta avanti attività di ricerca inerenti alle tecnologie innovative a supporto della *Blue Growth*, nei campi specifici della dinamica, protezione e gestione dei litorali, dei dispositivi marittimi per il monitoraggio e lo sfruttamento delle energie rinnovabili dal mare, delle opere marittime innovative per la portualità e delle infrastrutture marittime.

Le attività di ricerca del Laboratorio A-MARE sono basate sia su modellistica sperimentale, svolta nei canali marittimi per onde e correnti del LABIMA – Laboratorio di Ingegneria Marittima dell'Università degli Studi di Firenze (nel prosieguo LABIMA), sia su modellistica numerica del moto ondoso e della sua interazione con strutture e dispositivi marittimi.

PREMESSA

Il laboratorio congiunto A-MARE tra l'Università Degli Studi di Firenze e la società AM3 Spin-off s.r.l. è stato incaricato dal Marina di Punta Ala Spa (di seguito *Committente*) con lettera del 13/04/2023 di eseguire uno studio specialistico su modello fisico bidimensionale per la verifica del layout di progetto del nuovo tratto della diga foranea previsto per la Riqualficazione e l'Ampliamento del porto di Punta Ala.

In particolare, è stato richiesto di verificare:

- Stabilità dei massi costituenti la mantellata e la berma al piede e definizione del parametro di danno S;
- Misura della portata media di tracimazione a tergo del muro paraonde e definizione dei massimi volumi di tracimazione;
- Stabilità dei massi costituenti la pista di lavoro della sezione provvisoria;
- Misura delle altezze d'onda trasmesse all'interno della darsena per la sezione provvisoria.

Le sezioni oggetto di indagine e le condizioni degli stati di mare da riprodurre in laboratorio sono state fornite dal committente e dalla società di ingegneria Modimar s.r.l. (di seguito *Progettista*) dallo stesso incaricata della progettazione delle opere marittime.

Sono state effettuate due riunioni in presenza presso il Laboratorio di Ingegneria Marittima (LABIMA) dell'Università di Firenze durante le quali sono state concordate le modalità e le tempistiche di esecuzione delle prove di laboratorio:

- In data 31/03/2023 tra il Committente, nelle persone degli ingg. D. Salvini, M. Lacava e M. Innocenti, e il laboratorio congiunto A-MARE, nelle persone del Responsabile Scientifico prof. ing. L. Cappietti e dei rappresentanti del partner AM3 prof. ing. P.L. Aminti e ing. A. Esposito.
- In data 26/05/2023 tra il Committente, nelle persone degli ingg. M. Lacava e M. Innocenti, il Progettista nella persona dell'ing. M. Del Bianco e il laboratorio congiunto A-MARE nella persona del Responsabile Scientifico prof. ing. L. Cappietti.

Il Committente ed il Progettista hanno fornito i seguenti dati:

- Sezione D - Avandiga Foranea Maestrale con mail del 2023.05.22;
- Tabella delle condizioni di prova, intesa come combinazione di moti ondosi e sovralti del livello del medio mare, da riprodurre per le prove inerenti alla sezione D con mail del 2023.05.26;
- Aggiornamento della tabella delle condizioni di prova per la sezione D con mail del 2023.05.29;
- Sezione D provvisoria – Avandiga Foranea Maestrale provvisoria con mail del 2023.06.09;
- Tabella delle condizioni di prova, intesa come combinazione di moti ondosi e sovralti del livello del medio mare, da riprodurre per le prove inerenti alla sezione D provvisoria con mail del 2023.06.14;
- Sezione M – Diga Foranea Maestrale con mail del 2023.06.19;
- Tabella delle condizioni di prova, intesa come combinazione di moti ondosi e sovralti del livello del medio mare, da riprodurre per le prove inerenti alla sezione M con mail del 2023.06.21.

Sono stati consegnati da A-MARE al committente tre rapporti intermedi per la restituzione dei risultati preliminari ottenuti dalle prove di laboratorio, come di seguito specificato:

- Documento di sintesi dei risultati preliminari relativi alla sezione D e ai primi tre stati di mare testati con mail del 2023.06.07;
- Documento di sintesi dei risultati preliminari relativi alla sezione D aggiornato con gli ulteriori cinque stati di mare testati con mail del 2023.06.15;
- Documento di sintesi dei risultati preliminari relativi alla sezione D, D provvisoria e M per tutti gli stati di mare simulati con mail del 2023.06.27.

In Figura 1 viene riportata la planimetria di progetto del nuovo tratto di diga del Porto di Punta Ala e la posizione delle sezioni dell'avandiga (sezione D) e della diga foranea maestrale (sezione M) oggetto di indagine.

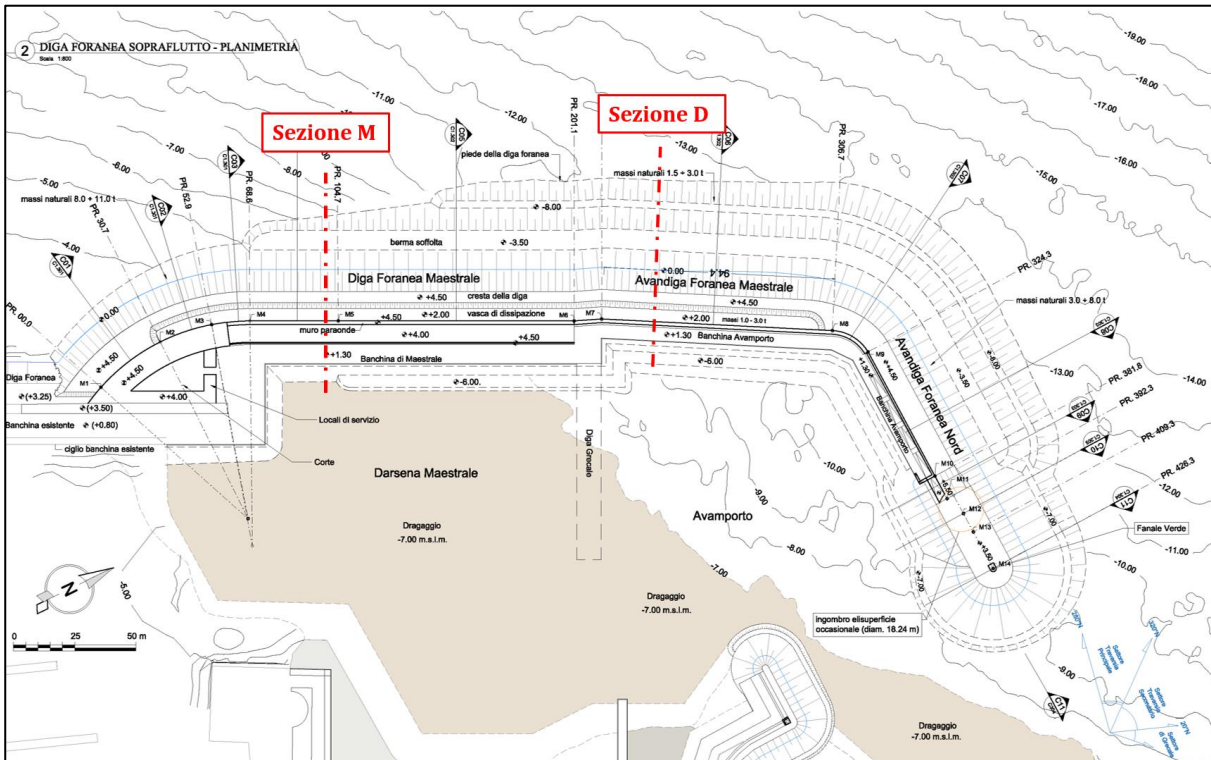


Figura 1 - Planimetria di progetto del nuovo tratto di diga del Porto di Punta Ala. In rosso localizzazione delle sezioni di studio - Fonte: MODIMAR

1. OBIETTIVI E FASI DI LAVORO

Lo studio su modello fisico bidimensionale è stato eseguito nel canale marittimo per onde e correnti WCF1 (Wave-Current Flume 1) del LABIMA (www.labima.unifi.it) ed è stato finalizzato al conseguimento dei seguenti obiettivi:

- Misura delle portate di overtopping e dei volumi massimi di tracimazione a tergo della diga foranea per le configurazioni testate;
- Misura della stabilità dei massi della mantellata e della berma al piede;
- Misura della stabilità dei massi a protezione della pista di lavoro durante la fase di realizzazione dell'opera;
- Misura delle altezze d'onda trasmesse all'interno dell'avamposto per la sezione provvisoria.

La metodologia di lavoro è stata suddivisa nelle fasi riportate in Tabella 1.

Tabella 1 - Fasi dei test di laboratorio.

ALLESTIMENTO DEL SETUP SPERIMENTALE
• Definizione della scala geometrica di riproduzione dell'opera
• Realizzazione dei fondali dalla batimetria dei -20.0m s.l.m. al piede della struttura
• Selezione dei massi e caratterizzazione dei fusi granulometrici per la costruzione del modello
• Definizione, installazione e verifiche della sensoristica impiegata
• Ricerca onde di prova
TEST PER LA VERIFICA DELLA SEZIONE AVANDIGA FORANEA MAESTRALE (SEZIONE D1)
• Costruzione della configurazione di progetto fornita dal Progettista (D1)
• Esecuzione dei test per la misura della stabilità degli elementi costituenti la mantellata ed il piede di berma e per la misura dell'overtopping
• Analisi dei dati e delle immagini per la definizione del parametro di danno S e delle portate e volumi di tracimazione
• Redazione dei report intermedi 1 e 2 dei risultati preliminari
TEST PER LA VERIFICA DELLA SEZIONE AVADIGA FORANEA MAESTRALE PROVVISORIA (SEZIONE D2 e D3)
• Costruzione della configurazione di progetto fornita dal Progettista (D2)
• Esecuzione dei test per la misura della stabilità degli elementi costituenti la pista di lavoro e delle onde trasmesse all'interno dell'avamposto
• Analisi dei dati e delle immagini per la definizione della stabilità dei massi costituenti la pista di lavoro e delle altezze d'onda trasmesse all'interno dell'avamposto

- **Costruzione della configurazione variante fornita dal Progettista (D3)**
- **Esecuzione dei test per la misura della stabilità degli elementi costituenti la pista di lavoro e delle onde trasmesse all'interno della darsena**
- **Analisi dei dati e delle immagini per la definizione della stabilità dei massi costituenti la pista di lavoro e delle altezze d'onda trasmesse nella darsena**

TEST PER LA VERIFICA DELLA SEZIONE *DIGA FORANEA MAESTRALE* (SEZIONE M)

- **Costruzione della configurazione di progetto fornita dal Progettista (M1)**
- **Esecuzione dei test per la misura della stabilità degli elementi costituenti la mantellata e la berma al piede e per la misura dell'overlapping**
- **Analisi dei dati e delle immagini per la definizione del parametro di danno S e delle portate e volumi di tracimazione**
- **Costruzione della variante di progetto fornita dal Progettista (M2)**
- **Esecuzione dei test per la misura della stabilità degli elementi costituenti la mantellata e la berma al piede e per la misura dell'overlapping**
- **Analisi dei dati e delle immagini per la definizione del parametro di danno S e delle portate e volumi di tracimazione**
- **Redazione del report intermedio 3 dei risultati preliminari**

2. L'APPARECCHIATURA SPERIMENTALE E LA METODOLOGIA

2.1. IL CANALE MARITTIMO

I test son stati condotti nel canale marittimo WCF1 del LABIMA lungo circa 37.0m, largo 0.8m e profondo 0.8m (Figura 2).



Figura 2 - Il canale utilizzato per la conduzione dello studio in esame, presso il LABIMA - Laboratorio di Ingegneria Marittima del DICEA-UNIFI.

Il sistema di generazione del moto ondoso è composto da un generatore *piston type* con *stroke* fino a 1600mm azionato da un sistema elettromeccanico ad elevatissima precisione (0,1mm in posizione). Il moto del battionda è comandato da una elettronica di ultima generazione (con standard di comunicazione Fast EtherCAT) che esegue i segnali di comando inviati da un computer sul quale girano i software di generazione, di acquisizione e di analisi dei dati. Tutta la strumentazione hardware, firmware e software è stata completamente sviluppata presso il LABIMA e si basa su componentistica meccanica, elettrica ed elettronica di ultima generazione, totalmente rinnovata nel 2013. La generazione del segnale di guida del battionda, in grado di riprodurre in canale i moti ondosi aventi caratteristiche spettrali volute, avviene mediante un software basato sulla tecnica spettrale detta *deterministic spectral amplitudes and random phases* (Huges 2006). Il segnale viene inviato al sistema di controllo della pala e, attraverso il posizionamento di sonde lungo il canale, viene eseguita l'acquisizione in tempo reale del moto ondoso.

Il sistema permette la generazione sia di onde sinusoidali, con periodo e altezza assegnata, sia di onde focalizzanti per breaking in acque alte e stati di mare *random* con spettro di energia uguale alle onde reali (per esempio: Jonswap, Pierson-Moskowitz, Scott, Neuman, Bretschneider, Ochi-Hubble). Il segnale

random generato può essere memorizzato e riutilizzato per riprodurre più volte lo stesso stato di mare; dopo l'acquisizione, la misura del moto ondoso viene analizzata in tempo reale sia nel dominio della frequenza (analisi spettrale) che nel dominio del tempo (analisi *zero-crossing*) per ottenere tutti i parametri caratteristici d'onda tra i quali e.g.: H_{m0} , $H_{1/3}$, $H_{1/10}$, H_{max} , H_{rms} , T_m , $T_{1/3}$, T_p , $T_{m0,-1}$, $T_{m-1,0}$.

2.2. CRITERI DI SIMILITUDINE UTILIZZATI PER LA COSTRUZIONE DEL MODELLO

Il modello fisico ricostruito in canale è stato realizzato in similitudine di Froude. La scelta del fattore di scala è stata effettuata tenendo conto dei vincoli di laboratorio ed in particolare tenendo conto che:

- il livello idrico massimo nel settore antistante il generatore è di circa 60cm;
- l'altezza d'onda massima che si può generare alla pala battionde è di circa 30cm, con periodo pari a 0.8s-2.6s.

Considerando i dati sopra definiti, la necessità di ricostruire i fondali almeno fino alle batimetriche dei -20.0m s.l.m., il fattore di scala ottimale per la costruzione del modello, concertato con il Committente, è stato individuato in 1:36.

$$n_L = \lambda_m / \lambda_p = 1/36$$

dove λ_m e λ_p sono rispettivamente le dimensioni lineari del modello e del prototipo, di conseguenza la scala dei tempi $n_t = T_m / T_p$ e delle velocità $n_v = V_m / V_p$ risultano:

$$n_T = n_V = \sqrt{n_L} = \sqrt{1/36} = 1/6$$

In base all'analisi dimensionale, assumendo valida la similitudine di Froude, si deducono le relazioni di scala, valide per le altre grandezze che intervengono nel fenomeno studiato. In Tabella 2 sono riportate le varie scale di riduzione adottate nel modello fisico.

Tabella 2 - Scale di riduzione utilizzate nel modello.

GRANDEZZA	DIMENSIONE	SCALA DI RIDUZIONE
Lunghezza	L	n_L
Tempo	T	$n_T = n_L^{1/2}$
Velocità	L/T	$n_V = n_L^{1/2}$
Portata	L^3/T	$n_Q = n_L^{5/2}$
Forza (peso)	ML/T^2	$n_F = n_L^3$
Pressione	M/T^2L	$n_P = n_L$

2.3. SIMILITUDINE CON IL PROTOTIPO NEL DECADIMENTO DELLE SOVRAPPRESSIONI ATTRAVERSO IL NUCLEO DELLA DIGA

Al fine di limitare gli effetti di scala inerenti al cambiamento del regime del moto nell'ammasso poroso, che si avrebbero con l'utilizzo della similitudine di Froude (turbolento nel prototipo ma laminare nel modello), il nucleo dell'opera è stato riprodotto determinando un differente rapporto di scala. È stato utilizzato l'approccio proposto da Burcharth et al. (1999)¹ "*Scaling of core material in rubble mound breakwater model tests*".

Il fattore di scala geometrico scelto per la riproduzione nel modello del nucleo costituente la diga foranea di Punta Ala è stato scelto pari a 1:26. Si rimanda all'ALLEGATO B per i dettagli della procedura di calcolo del fattore di scala geometrico del nucleo.

2.4. MODELLAZIONE DEI FONDALI DI POSA

Per ottenere nel modello una trasformazione d'onda, durante l'avvicinamento alla diga, che sia in similitudine con il prototipo, è stato riprodotto il fondale antistante l'opera fino alla batimetrica di circa -20.0m posta a circa 150m dal piede della struttura. Dal piede della diga marittima posto ad una profondità di circa -12.5m s.l.m.m. per le sezioni D1, D2 e D3 e da una profondità di circa -6.7m s.l.m.m. per la sezione M1/M2 fino alla batimetrica dei -20.0m s.l.m.m. è stata

¹ Burcharth, H. F., Z. Liu, and P. Troch. 1999. Scaling of core material in rubble mound breakwater model tests. Proceedings of the 5th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC V), Cape Town, South Africa, pp. 1518-1528.

realizzata una rampa con pendenza costante pari a 1:20, fedele ai rilievi dei fondali antistanti, mentre per la restante parte del canale è stato riprodotto un fondo orizzontale fino al generatore di moto ondoso.



Figura 3 - Realizzazione del doppio fondo in canale per la riproduzione delle batimetriche dal piede della struttura alla -20.0m s.l.m.

2.5. SELEZIONE DEI MASSI COSTITUENTI IL MODELLO DELLA DIGA FORANEA ESISTENTE

I massi utilizzati per la riproduzione dei diversi strati costituenti l'esistente diga foranea del porto turistico di Punta Ala sono stati selezionati mediante pesatura di un numero di campioni statisticamente rappresentativo di tutti gli elementi costituenti l'opera.

In fase preliminare il Committente ha fornito al laboratorio circa 1mc di massi provenienti dalla cava individuata per l'approvvigionamento degli inerti. Il materiale è stato selezionato e suddiviso nei diversi fusi granulometrici necessari alla composizione di tutti gli strati della diga foranea.

2.5.1. Peso specifico dei massi

Su alcuni campioni dei massi selezionati sono state effettuate caratterizzazioni presso il laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze per la determinazione del peso specifico.

I massi sono stati dapprima pesati singolarmente "as is" senza nessun trattamento. Successivamente sono stati essiccati in forno per 24 ore. Al termine del processo di essiccazione sono stati rilevati nuovamente i singoli pesi. Infine,

sono stati portati a saturazione tramite immersione per 72 ore e sottoposti a nuova pesatura.

Per la determinazione del volume dei singoli massi è stato utilizzato un cilindro graduato con precisione di $\pm 2.5\text{ml}$; al suo interno è stato immesso un volume noto di acqua, successivamente sono stati inseriti i campioni dei massi uno per volta ed è stato misurato il volume di acqua spostato da ognuno di essi.



Figura 4 – Massi campioni per la determinazione del peso specifico e cilindro graduato

Il peso specifico dei singoli campioni è stato determinato come il rapporto tra il peso essiccato del masso ed il volume occupato una volta saturato. In Tabella 3 vengono riportate le misurazioni e le elaborazioni condotte.

Tabella 3 – Parametri peso *as is*, peso essiccato, peso saturo, volume e peso specifico

Parametro	U.M.	1	2	3	4	5	6
Peso "as is"	[gr]	140.070	163.080	141.275	123.838	173.128	170.872
Peso essiccato	[gr]	139.825	162.970	141.116	123.017	172.622	170.016
Peso saturo	[gr]	140.242	163.263	141.483	124.236	173.231	170.344
Volume	[cm ³]	50	60	50	50	60	65
Peso specifico	[kg/m ³]	2796.5	2716.2	2822.3	2460.3	2877.7	2615.6

Il peso specifico medio determinato su sei massi campione è risultato pari a 2714.2kg/m^3 .

2.5.2. Massi naturali costituenti il nucleo

Come descritto nel paragrafo 2.3 i massi costituenti il nucleo sono stati scalati con un differente scala geometrica e più precisamente con un rapporto pari a 1:26. Il tout-venant di cava simulato è stato dunque realizzato con massi compresi in un range $1\text{g} \div 15\text{g}$, corrispondenti a $15\text{kg} \div 275\text{kg}$ nel prototipo.

Sono stati pesati circa 500 massi presi a caso tra quelli utilizzati, di cui si riporta l'analisi granulometrica in Figura 5.

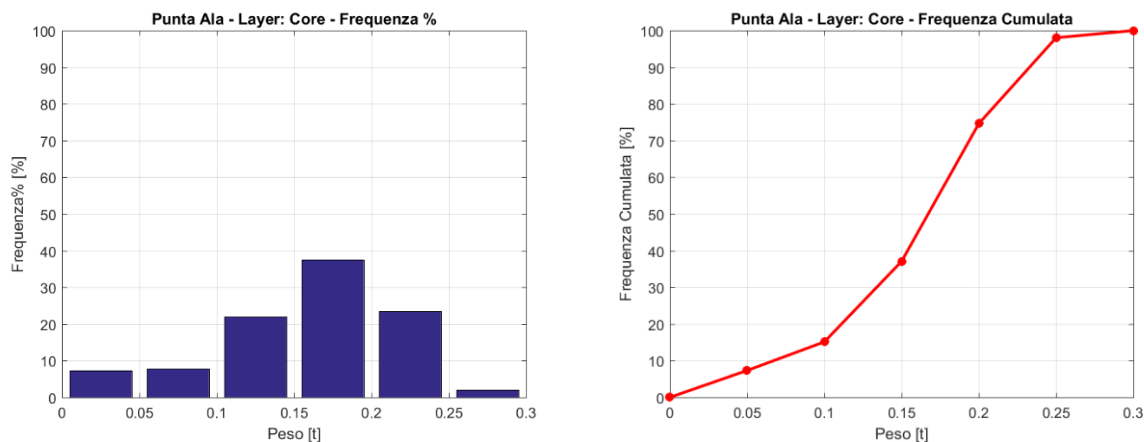


Figura 5 - Nucleo: sx) Frequenza % - dx) Frequenza cumulata

2.5.3. Massi naturali costituenti lo strato filtro

Lo strato filtro della sezione in progetto è realizzato con massi naturali con peso compreso tra 0.75t e 1.5t. I massi utilizzati per la realizzazione del modello dello strato filtro sono stati scelti in un range compreso tra 11g÷33g.

In Figura 6 si riportano i grafici relativi all'analisi granulometrica effettuata su un campione di circa 300 massi presi a caso tra quelli utilizzati.

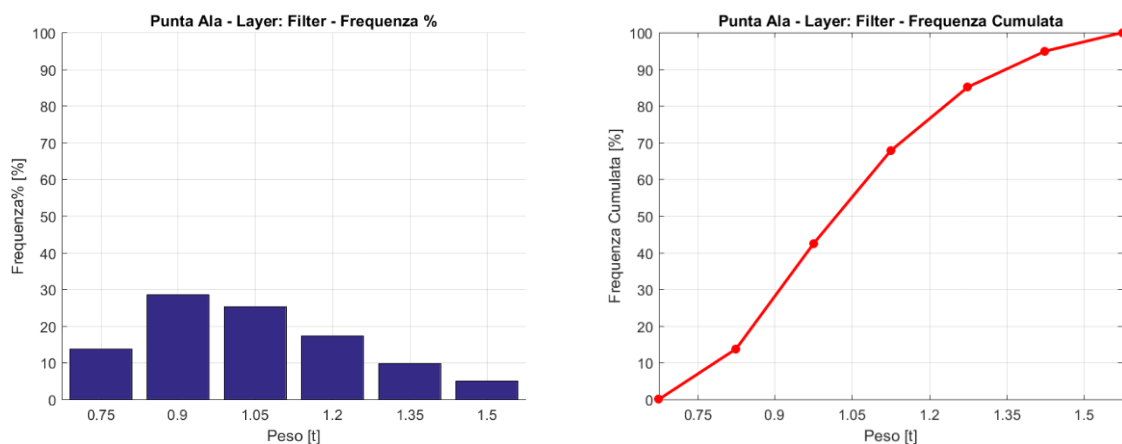


Figura 6 - Filtro: sx) Frequenza % - dx) Frequenza cumulata

2.5.4. Massi naturali costituenti la berma al piede (2.0÷5.0t)

La berma al piede della diga a gettata in progetto è realizzata con massi naturali con peso compreso tra 2.0t e 5.0t. I massi utilizzati per la realizzazione del modello del piede di berma sono stati scelti in un range compreso tra 44g÷110g.

In Figura 7 si riportano i grafici relativi all'analisi granulometrica effettuata su un campione di oltre 300 massi presi a caso tra quelli utilizzati.

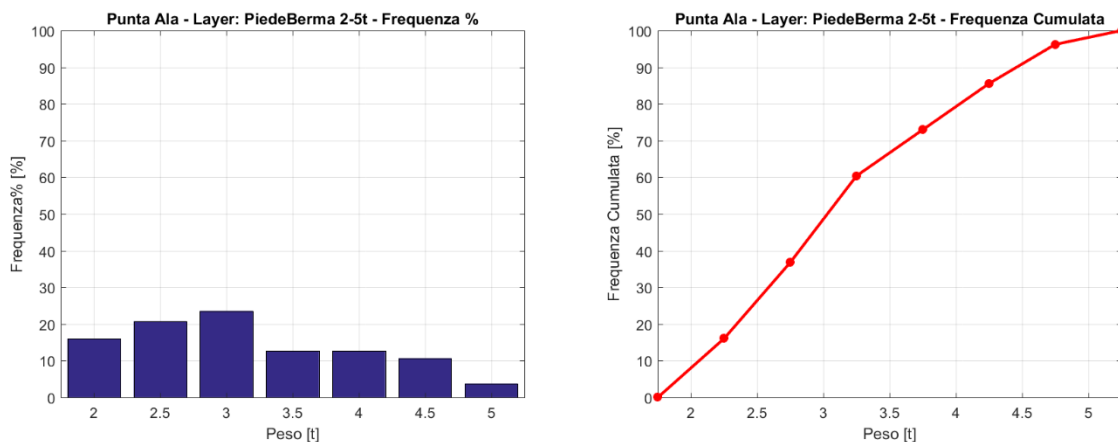


Figura 7 – Piede 1: sx) Frequenza % - dx) Frequenza cumulata

2.5.5. Massi naturali costituenti la vasca di laminazione (1.0÷3.0t)

Le sezioni D e M testate sono caratterizzate dalla presenza di una vasca di laminazione antistante il muro paraonde. Lo strato superficiale della vasca di laminazione è realizzato con massi naturali con peso compreso tra 1t e 3 t, corrispondenti nel modello a massi in un range compreso tra i 22g e i 66g.

In Figura 8 si riportano i grafici relativi all'analisi granulometrica effettuata su un campione di circa 250 massi presi a caso tra quelli utilizzati.

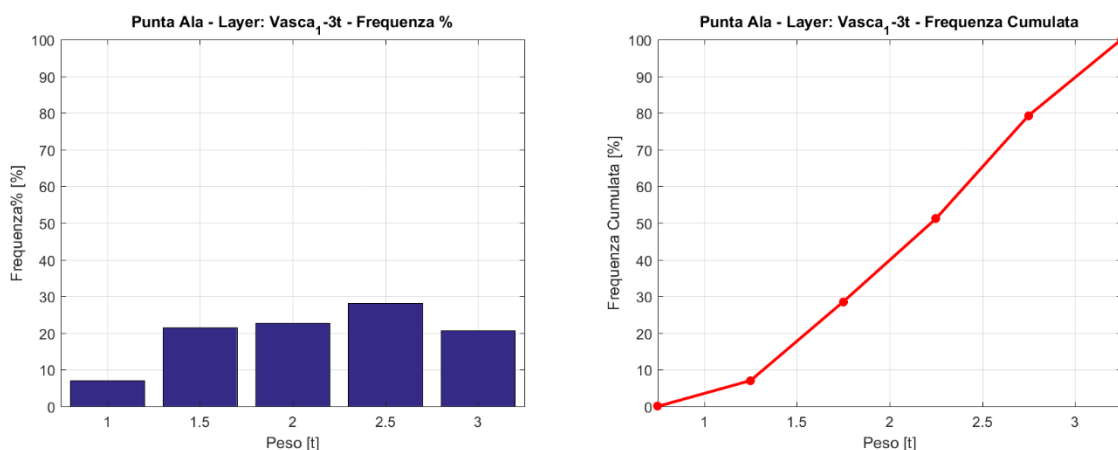


Figura 8 – Vasca: sx) Frequenza % - dx) Frequenza cumulata

2.5.6. Massi naturali costituenti la mantellata (5.0÷8.0t)

La mantellata in doppio strato di massi naturali della diga foranea è stata realizzata con massi compresi tra 5t e 8t. I massi selezionati per la realizzazione della mantellata sono stati scelti in un range compreso tra 110gr÷176gr.

In Figura 9 si riportano i grafici che si riferiscono all'analisi granulometrica effettuata su un campione di circa 500 massi presi a caso tra quelli utilizzati.

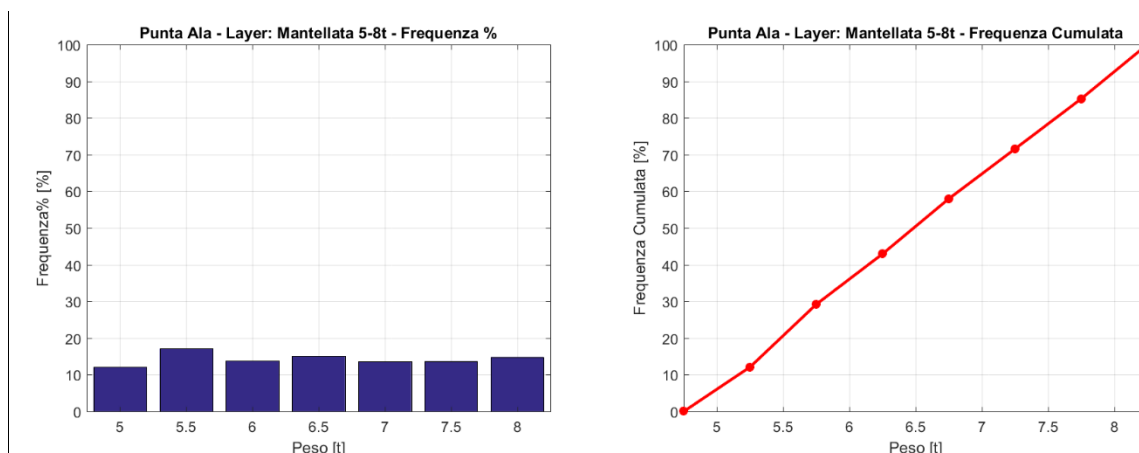


Figura 9 – Mantellata: sx) Frequenza % - dx) Frequenza cumulata

2.6. COSTRUZIONE DELLE SEZIONI DELLA DIGA

Nella realizzazione del modello in canale, particolare attenzione è stata posta nella costruzione del modello al fine di garantire la massima precisione possibile soprattutto per il posizionamento del coronamento del muro paraonde dal quale dipendono in modo determinante le portate tracimanti.

In Figura 10 è riportata la documentazione fotografica, relativa a tutte le fasi di costruzione delle sezioni di progetto dell'ampliamento della diga foranea del Porto di Punta Ala.

Le quote dell'estradosso del muro paraonde, della berma emersa in corrispondenza del muro paraonde e della berma emersa in corrispondenza dello spigolo, della berma al piede e del piede della struttura, sono state misurate tramite lettura con punta idrometrica dotata di nonio con accuratezza 0.05 mm (≈ 2 mm nel prototipo) e portando la superficie d'acqua in canale tangente ai suddetti piani).

Tabella 4 - Lettura alla punta idrometrica delle quote principali del modello realizzato in canale per la sezione D1

QUOTA	Letture alla punta idrometrica [cm]	Quote scala prototipo [m s.l.m.m.]	Quota target di progetto [m s.l.m.m.]
Fondo Canale	66.00	-19.80	
Piede Opera	45.90	-12.56	-12.50
Scapolame 50÷200kg	42.20	-11.23	-11.20
Scapolame 200÷500kg	39.00	-10.08	-10.00
Berma al piede	33.10	-7.96	-8.00
Vasca di laminazione	5.40	+2.02	+2.00
Berma emersa	-1.40	+4.46	+4.50
Muro Paraonde	-1.60	+4.54	+4.50





Figura 10 - Costruzione del modello in canale

2.7. SENSORI UTILIZZATI

2.7.1. Sensori di livello di tipo ultrasonico

I sensori distanziometrici utilizzati per le misure del moto ondoso sono del tipo ad ultrasuoni (Figura 11) e permettono di misurare variazioni della posizione della superficie libera con ripetibilità della misura di $\pm 1\text{mm}$ ($\pm 3.6\text{cm}$ a scala del prototipo) entro il *range* di distanza dal sensore compreso tra 60mm e 500mm.

La calibrazione delle sonde è verificata sistematicamente prima dell'inizio di ogni attività sperimentale, tramite taratura delle stesse.

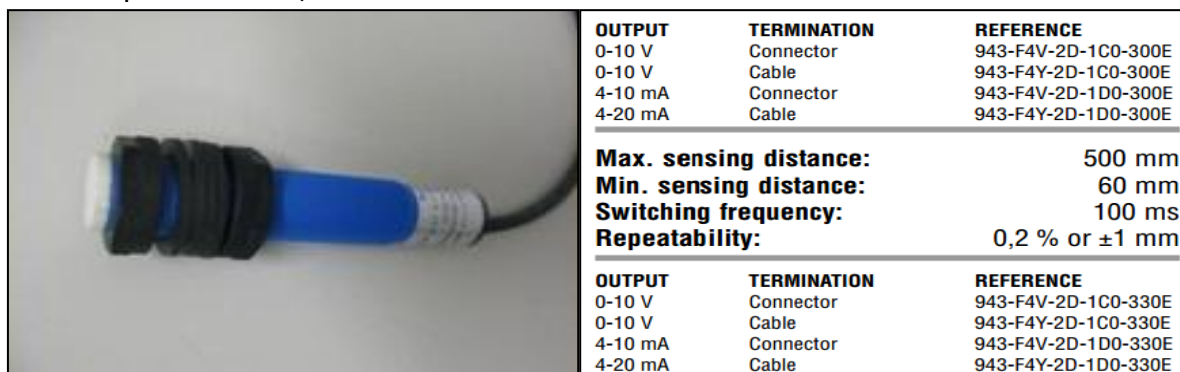


Figura 11 - Sensori di livello: sonda ad ultrasuoni.

L'analisi delle serie temporali delle oscillazioni dei livelli della superficie libera permette anche di calcolare le variazioni del livello medio del mare durante le mareggiate rispetto alla superficie di quiete, in tutti i punti di misura dove sono state posizionate le sonde.

2.7.2. Celle di carico per la misura dell'overlapping e delle forze

La misura dell'overlapping a tergo del muro paraonde è stata effettuata realizzando un sistema di raccolta della portata tracimante.

L'acqua incanalata sullo scivolo viene convogliata in un cassone di raccolta connesso a 4 celle di carico del tipo bending moment (Figura 12), che acquisiscono in continuo il peso delle tracimazioni oltre il muro paraonde.

Le celle di carico utilizzate hanno fondo scala di 100kg, carico di rottura pari a 300kg ed errore combinato $\pm 35gr$.



Figura 12 – Cella di Carico - CELMI TIPO 54.

Caratteristiche Metrologiche			
	Par.	Un.	
Errore combinato	Feomb	$\pm\%Ln$	0,035
Carico Nominale	Ln	Kg	2÷500
Carico Minimo	Lp	$\%Ln$	25
Carico Massimo	Ll	$\%Ln$	150
Linearità	Flin	$\pm\%Ln$	0,02
Isteresi	Fu	$\pm\%Ln$	0,015
Ripetibilità	Fv	$\pm\%Ln$	0,01
Deriva sotto carico in 30'	Fcr	$\pm\%Ln$	0,02
Campo di temperatura nominale	Btn	$^{\circ}C$	-10+40
Variazione termica di Zero (10÷60 $^{\circ}C$, per 10 $^{\circ}C$)	TKo	$\pm\%Cn$	0,065
Variazione termica in uscita (10÷60 $^{\circ}C$, per 10 $^{\circ}C$)	TKC	$\pm\%Cn$	0,035
Gradiente Termico		K/h	<5

Caratteristiche Elettriche			
Uscita Nominale	Cn	mV/V	2
Tolleranza dell'uscita nominale	Dc	$\pm\%Cn$	0,1
Tensione di alimentazione nominale	Bsu	V	1÷12
Tensione di alimentazione massima	Usmax	V	15
Resistenza di ingresso	Re	Ω	390 \pm 10%
Resistenza di uscita	Ra	Ω	350 \pm 1%
Resistenza di isolamento @ 20V	Ris	MW	>2000
Tolleranza uscita a carico zero	Do	$\pm\%Cn$	1

Caratteristiche meccaniche			
Carico di rottura	Ld	$\%Ln$	>300
Carico trasversale	Llq	$\%Ln$	100
Deflessione	hn	mm	<0,5
Lunghezza cavo		m	5
Peso		Kg	0,6

Condizioni ambientali			
Campo temperatura di esercizio	Btn	$^{\circ}C$	-40+80
Campo temperatura di stoccaggio	Bts	$^{\circ}C$	-40+80
Grado di protezione			IP 66/68

Figura 13 - Caratteristiche metrologiche, elettriche, meccaniche e ambientali - Celle di Carico a flessione CELMI TIPO 54.

2.7.3. Fotocamera

La stabilità degli elementi costituenti la mantellata, il piede e la pista di lavoro della diga foranea è stata valutata mediante analisi delle immagini acquisite prima e dopo l'esecuzione di ogni test. Per le foto dall'alto è stata utilizzata una fotocamera CANON Power Shot G9.



Figura 14 – Fotocamera CANON Power Shot G9.

2.8. DEFINIZIONE DELLE ONDE E DEI LIVELLI DI PROVA

Il Committente ed il Progettista hanno fornito una serie di stati di mare da riprodurre in canale individuati sulla base delle risultanze dello *Studio meteomarinario al largo e propagazione a costa per la determinazione delle azioni di progetto del prolungamento della diga marittima di Punta Ala* (2020).

In totale sono stati riprodotti 11 diversi stati di mare, intesi come combinazioni di altezza significativa dell'onda (H_s), periodo di picco dell'onda (T_p) e sovrizzo del livello del medio mare (s).

Il sovrizzo del livello del medio mare fornito (s) intende tener conto dei fenomeni di sovrizzo barico, sovrizzo di marea e wind surge; il wave set-up, invece, avviene nel modello analogamente a quanto accade nella realtà.

Gli attacchi ondososi sono stati riprodotti con una durata di 3000 onde per ogni condizione di moto ondoso (circa 9 ore nel prototipo) necessarie per avere una certezza statistica sia sul fenomeno dell'overtopping che per la stabilità dei massi costituenti la diga foranea. Le analisi di dati di overtopping e stabilità della mantellata che sono presentate nel prosieguo sono state condotte anche dividendo ciascun test di 3000 onde in tre test da 1000 onde (rispettivamente: SID1, SID2 e SID3) al fine di meglio rappresentare l'evoluzione temporale dei fenomeni.

Nelle Tabella 5, Tabella 6, Tabella 7 e Tabella 8 si riportano i codici ed i parametri caratteristici delle onde riprodotte per le differenti sezioni sia in scala prototipo che in scala del modello. Nello specifico sono riportati:

- i parametri di altezza significativa incidente ($H_{s,i}$), periodo di picco (T_p) e sovrizzo (s) in scala prototipo;
- la profondità di acqua in canale (d);

- i parametri di altezza significativa incidente ($H_{s,i}$), periodo di picco (T_p) e sovrizzo (s) in scala modello;
- il *peak enhancement factor* (γ) utilizzato per la definizione dello spettro Jonswap utilizzato per la riproduzione dei moti ondosi.

Tabella 5 - Moti ondosi di prova target – sezione Avandiga Foranea Maestrale (D1)

CODICE	$H_{s,i}$ Prot. [m]	T_p Prot. [s]	s Prot. [m]	d Mod. [cm]	$H_{s,i}$ Mod. [cm]	T_p Mod. [s]	γ Jonswap
H01	2.6	8.3	0.50	56.4	7.22	1.39	2.4
H02	4.0	9.5	0.50	56.4	11.11	1.58	2.4
H03	4.7	10.5	0.65	56.8	13.1	1.75	2.4
H04	1.5	7.0	0.20	55.6	4.2	1.17	2.4
H05	3.0	8.8	0.65	56.8	8.3	1.47	2.4
H06	4.7	10.5	-0.20	54.4	13.1	1.75	2.4
H07	4.7	10.5	1.15	58.2	13.1	1.75	2.4
H08	5.5	11.1	0.65	56.8	15.3	1.85	2.4

Tabella 6 - Moti ondosi di prova target – sezione Avandiga Foranea Maestrale provvisoria (D2/D3)

CODICE	$H_{s,i}$ Prot. [m]	T_p Prot. [s]	s Prot. [m]	d Mod. [cm]	$H_{s,i}$ Mod. [cm]	T_p Mod. [s]	γ Jonswap
H09	2.5	8.2	0.20	55.6	6.9	1.37	2.4
H10	3.6	9.4	0.50	56.4	10.0	1.57	2.4

Tabella 7 - Moti ondosi di prova target – sezione Diga Foranea Maestrale (M1)

CODICE	$H_{s,i}$ Prot. [m]	T_p Prot. [s]	s Prot. [m]	d Mod. [cm]	$H_{s,i}$ Mod. [cm]	T_p Mod. [s]	γ Jonswap
H01	2.6	8.3	0.50	56.4	7.22	1.39	2.4
H02	4.0	9.5	0.50	56.4	11.11	1.58	2.4
H03	4.7	10.5	0.65	56.8	13.1	1.75	2.4

Tabella 8 - Moti ondosi di prova target – sezione Diga Foranea Maestrale (M2)

CODICE	$H_{s,i}$ Prot. [m]	T_p Prot. [s]	s Prot. [m]	d Mod. [cm]	$H_{s,i}$ Mod. [cm]	T_p Mod. [s]	γ Jonswap
H02	4.0	9.5	0.50	56.4	11.11	1.58	2.4
H03	4.7	10.5	0.65	56.8	13.1	1.75	2.4
H07	4.7	10.5	1.15	58.2	13.1	1.75	2.4
H08	5.5	11.1	0.65	56.8	15.3	1.85	2.4

In Figura 15 si riporta a titolo di esempio una serie temporale degli spostamenti della pala del wavemaker utilizzata per la realizzazione dei moti ondosi in canale.

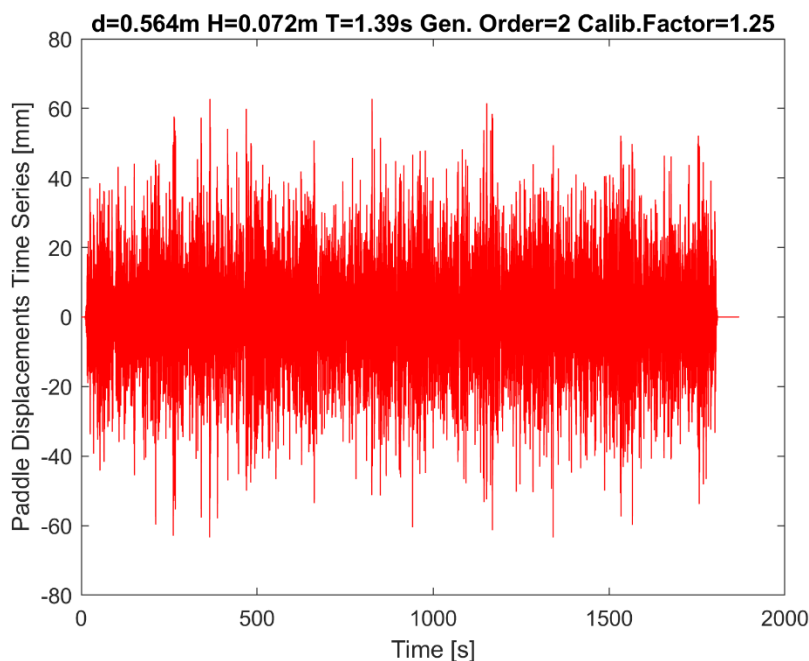


Figura 15 - Serie temporale degli spostamenti della pala del wavemaker relativa all'attacco onduoso H01 (durata 1800s in scala modello).

La misura delle onde è stata effettuata strumentando il canale marittimo con 6 sonde di livello di tipo ultrasonico (WG) configurate con una frequenza di campionamento pari a 1000Hz e posizionate come mostrato in Figura 16 (vedi ALLEGATO A).

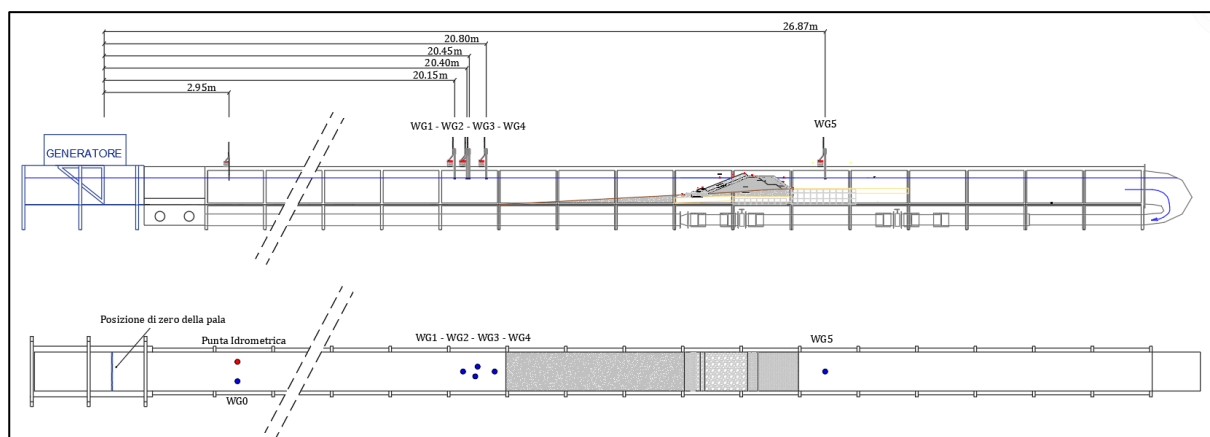


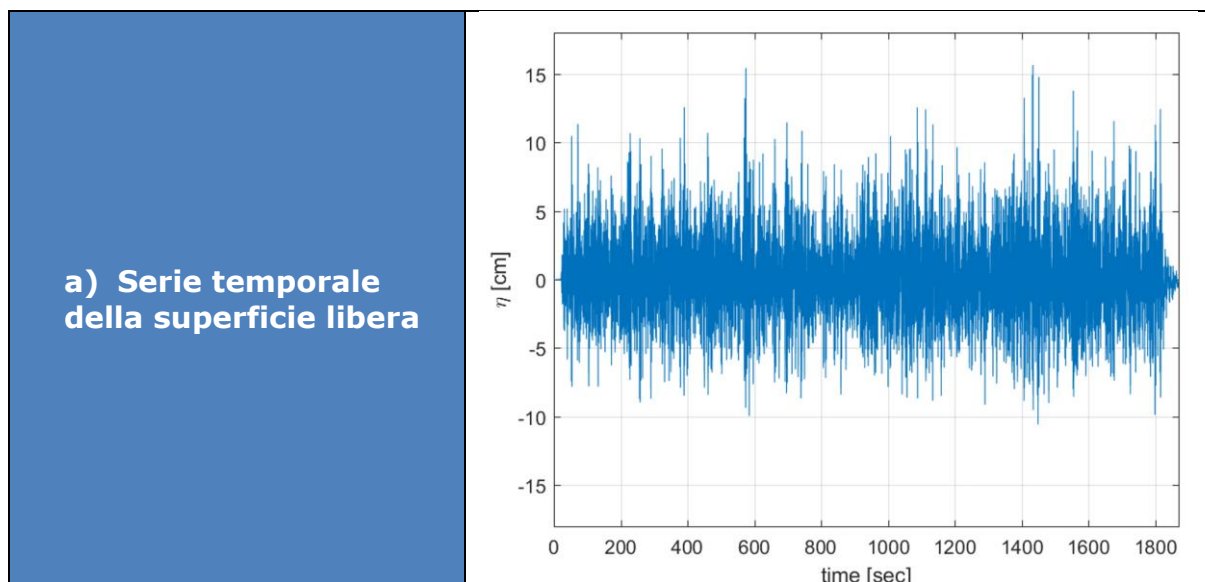
Figura 16 - Setup del canale marittimo per le prove sul prolungamento della diga foranea del Porto di Punta Ala.

In Tabella 9 sono riportate le distanze di ciascun sensore (in scala modello e in scala prototipo) rispetto al generatore di moto onduoso e al piede della struttura.

Tabella 9 - Disposizione in canale delle sonde di livello

NOME	Scala del modello		Scala del prototipo		
	Distanza dal Wavemaker [m]	Distanza dal piede della diga [m]	Distanza dal Wavemaker [m]	Distanza dal piede della diga [m]	Fondale [m]
WG0	2.96	21.91	106.56	788.76	19.8
WG1	20.15	4.72	725.40	169.92	19.8
WG2	20.40	4.47	734.40	160.92	19.8
WG3	20.45	4.42	736.20	159.12	19.8
WG4	20.80	4.07	748.80	146.52	19.8
WG5	26.87	-2.00	967.32	-72.00	8.0

L'utilizzo di sonde di livello distribuite lungo il canale ha permesso di misurare i moti ondosì e i livelli medi della superficie del mare durante le condizioni di prova. I dati registrati dalle singole sonde sono poi stati processati per eseguire l'analisi delle mareggiate riprodotte sia nel dominio del tempo tramite analisi zero-crossing, sia nel dominio della frequenza con analisi di tipo spettrale. Di seguito in Figura 17 si riporta un esempio di analisi eseguita per i dati registrati alla sonda WG3.



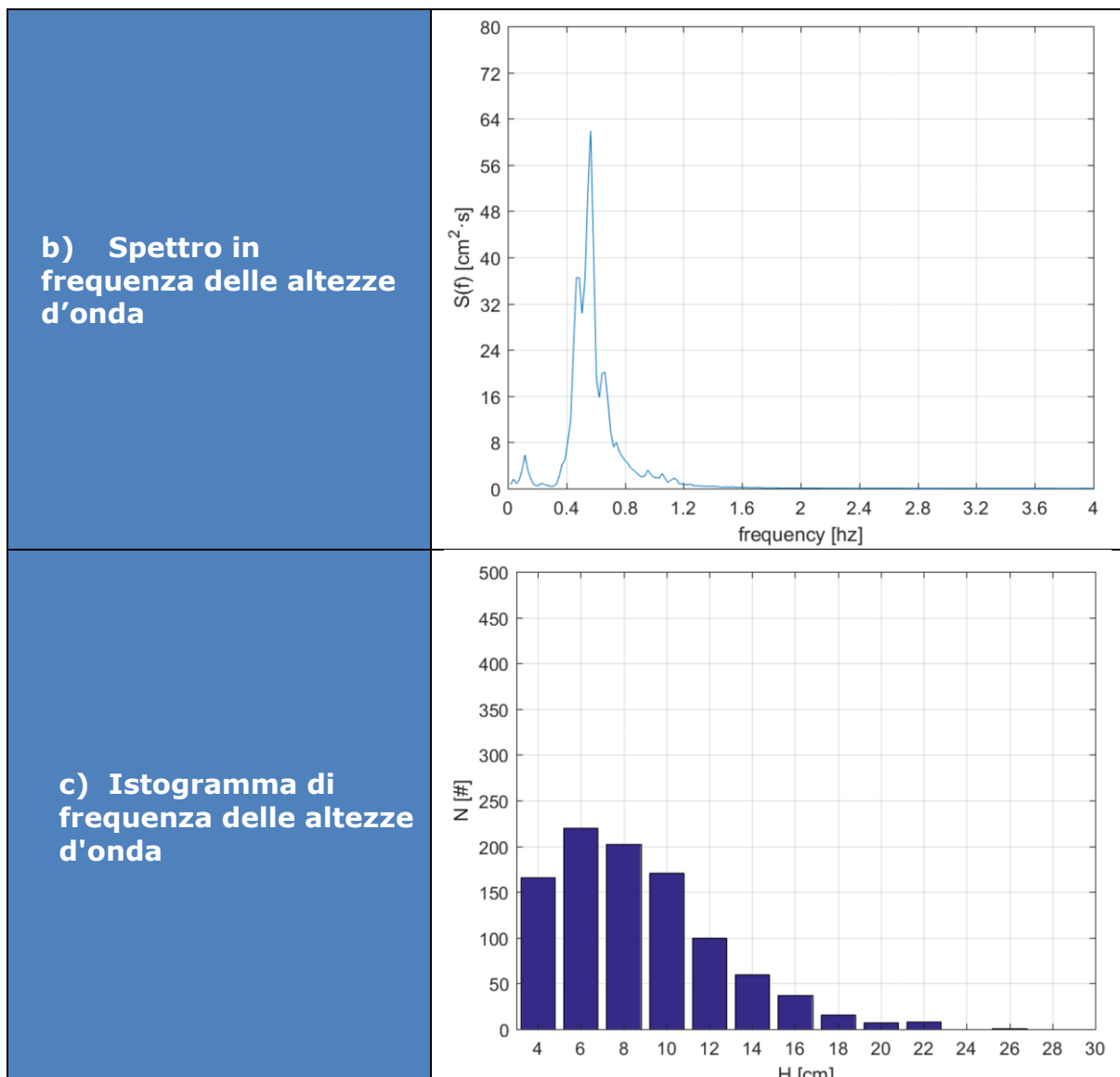


Figura 17 – Esempio di elaborazioni grafiche ottenute dall’analisi dei dati acquisiti alla sonda WG3, sia nel dominio del tempo sia nel dominio della frequenza per l’onda H01.

La misura delle onde incidenti su fondali di 20m è stata condotta mediante 4 sonde ultrasoniche (WG1, WG2, WG3 e WG4) installate a distanza opportuna l’una dall’altra (20.0cm, 5.0cm e 29.0cm). Tale scelta è basata sulla metodologia sviluppata da Goda & Suzuki che consente di calcolare le altezze d’onda e le fasi delle componenti incidenti, riflesse e trasmesse attraverso la registrazione simultanea del profilo d’onda tramite due sonde adiacenti, posizionate all’interno del canale marittimo.

A titolo di esempio si riporta in Figura 18 un’immagine dell’analisi di riflessione effettuata alle sonde WG3 e WG4 per l’onda H01.

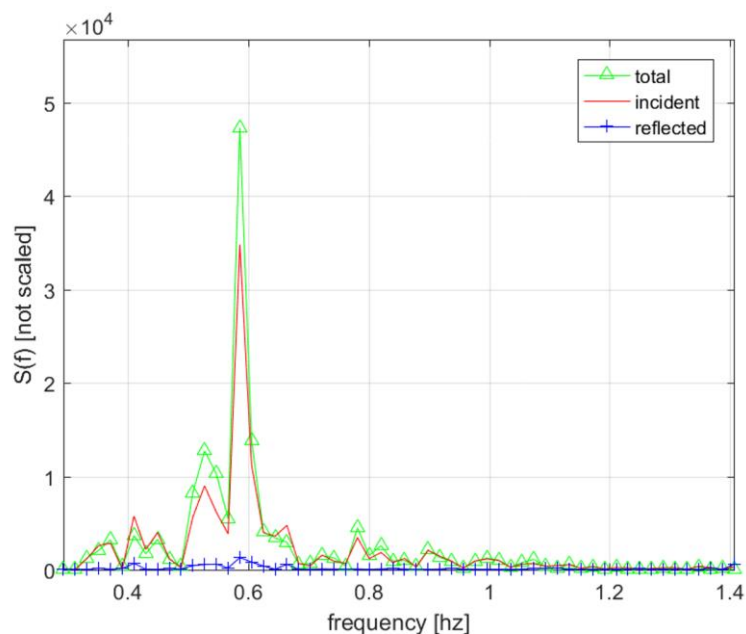


Figura 18 - Analisi di riflessione condotta alle sonde WG3 e WG4 per il moto ondoso H01

La sonda di livello WG5 è stata utilizzata solo per la sezione dell'Avandiga Foranea Maestrale provvisoria (D2/D3) per la misura delle altezze d'onda trasmesse all'interno dell'avamposto.

3. TEST PER LA VERIFICA DELL'AVANDIGA FORANEA MAESTRALE (SEZIONE D1)

Il layout della sezione tipo dell'Avandiga Foranea Maestrale, le condizioni di moto ondoso e la sequenza temporale delle prove sono state fornite dal Committente e dal Progettista.

La sezione in oggetto, indicata con il codice D1 e riportata in Figura 19 e Figura 20, è caratterizzata dai seguenti parametri principali:

- Profondità al piede → -12.5m s.l.m.m.
- Profondità berma al piede → -8.0m s.l.m.m.
- Larghezza berma al piede → 3.5m
- Quota berma emersa → +4.50m s.l.m.m.
- Larghezza berma emersa → 4.5m
- Vasca di laminazione → +2.0m s.l.m.m
- Larghezza vasca di laminazione → 7.5m
- Coronamento muro paraonde → +4.50m s.l.m.m.
- Massi mantellata → 5 – 8t
- Massi della berma piede della mantellata → 2 – 5t

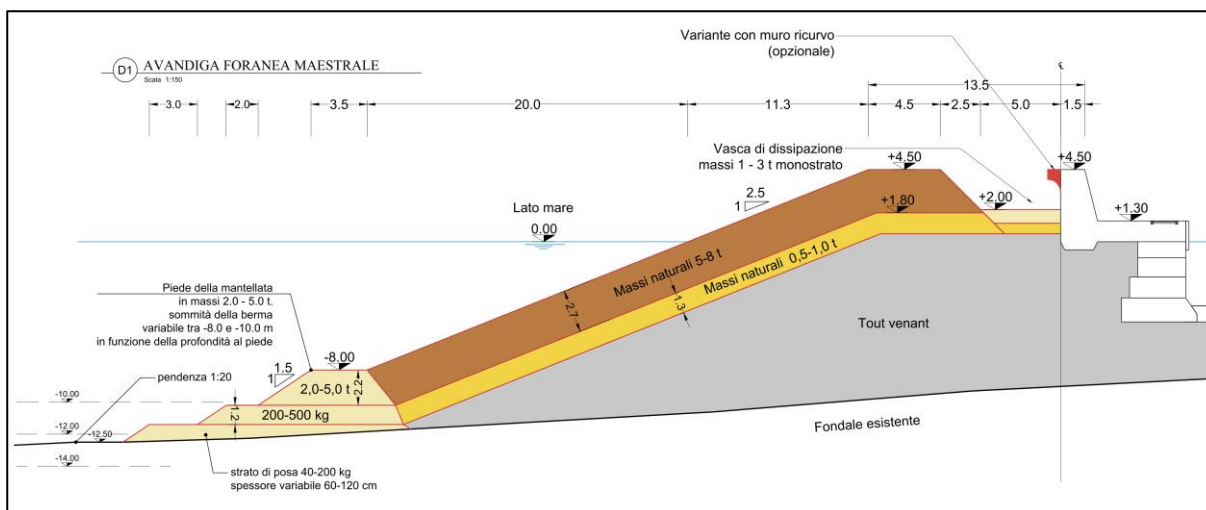


Figura 19 - Avandiga Foranea Maestrale - sezione D1



Figura 20 – Sezione D1 - in alto a sinistra vista frontale; in alto a destra vista della vasca di laminazione; in basso a destra vista della berma al piede; in basso vista laterale.

Per comodità di lettura si riporta a seguire la Tabella 10 di riepilogo delle condizioni di moto ondoso testate. L'ordine temporale delle prove è congruente con la numerazione dei codici onda utilizzati.

Tabella 10 – Moti ondosi di prova per la sezione D1

CODICE	H _{s,i} Prot. [m]	T _p Prot. [s]	s Prot. [m]
H01	2.6	8.3	0.50
H02	4.0	9.5	0.50
H03	4.7	10.5	0.65
H04	1.5	7.0	0.20
H05	3.0	8.8	0.65
H06	4.7	10.5	-0.20
H07	4.7	10.5	1.15
H08	5.5	11.1	0.65

Per ogni prova, dall'analisi dei risultati sono stati ottenuti i seguenti parametri:

- Parametro di danno N_{od} e S della mantellata parziale e cumulato;
- Stabilità del piede di berma;
- Portata media di overtopping in l/s/m;
- Volumi massimi di tracimazione in m³/m.

Per quanto riguarda la stabilità degli elementi costituenti la mantellata della diga foranea, l'analisi comparativa delle foto realizzate prima e dopo ogni prova ha permesso di determinare il numero di massi estratti dalla loro posizione originaria e il parametro di danno N_{od}, così definito.

$$N_{od} = \frac{N * d_{n,50}}{B}$$

Dove N è il numero di massi movimentati, $d_{n,50}$ è il diametro medio dei massi movimentati e B è la larghezza della sezione di mantellata considerata.

In Tabella 11, relativa ad una mantellata costituita da un doppio strato di massi naturali, il livello di danno è tabulato in funzione del parametro di danno S che è legato al parametro di danno N_{od} dalla seguente relazione:

$$N_{od} = G \cdot (1 - p) \cdot S$$

dove:

p = porosità della mantellata;

G = parametro dipendente dalla gradazione dello strato di mantellata.

Il valore di p è generalmente compreso tra 0.4 e 0.6; il valore di G per massi naturali è compreso tra 1.2 e 1.6. Dunque, dalla combinazione dei parametri descritti la relazione con maggior margine di sicurezza risulta pari a N_{od}=0.48*S.

Tabella 11 – Valori del parametro di danno S per differenti livelli di danno per data pendenza di una mantellata in doppio strato di massi naturali

Armor Slope	Initial Damage	Intermediate Damage	Failure
1:1.5	2	3-5	8
1:2	2	4-6	8
1:3	2	6-9	12
1:4-1:6	3	8-12	17

Le prove di stabilità e overtopping effettuate sono state suddivise in due fasi così come richiesto dal Progettista. Nella fase I sono state eseguite in sequenza le condizioni di moto ondoso H01, H02 e H03.

Al termine della fase 1 si è provveduto a ripristinare il layout della sezione riprofilando nuovamente la mantellata e la berma al piede della mantellata. Per la fase 2 sono state effettuate in sequenza le prove relative ai moti ondosi da H04 a H08.

3.1. RISULTATI FASE I

In questa sezione vengono riportati i risultati ottenuti dall'analisi delle prove effettuate in fase 1 sulla sezione dell'Avandiga Foranea Maestrale.

In Tabella 12 vengono riportati i parametri caratteristici misurati delle onde generate in canale, altezza significativa $H_{s,i}$ [m], periodo di picco T_p [s] e sovrizzo iniziale s [m], la portata media di overtopping q_{wo} [l/s/m], il valore della portata media di overtopping mediato sulle tre serie temporali riprodotte per ogni moto ondoso $q_{wo,mean}$ [l/s/m] ed il volume massimo di tracimazione registrato $V_{wo,max}$ [m³/m].

Tabella 12 – Avandiga Foranea Maestrale – sezione D1 – fase 1: Parametri caratteristici delle onde generate, portate e volumi di overtopping - valori riferiti al prototipo

ONDA	SEED	$H_{s,i}$	T_p	s	q_{wo}	$q_{wo, mean}$	$V_{wo, max}$
		[m]	[s]	[m]	[l/s/m]	[l/s/m]	[m ³ /m]
H01	S1	2.7	8.3	0.50	0.0*	0.0	0.0
	S2	2.7	8.3	0.50	0.0*		0.0
	S3	2.6	8.3	0.50	0.0*		0.0
H02	S1	3.9	9.7	0.50	2.0	2.3	1.5
	S2	3.9	9.8	0.50	2.5		1.6
	S3	3.9	9.6	0.50	2.4		1.4
H03	S1	4.6	10.5	0.65	8.8	8.3	9.6
	S2	4.7	10.5	0.65	7.0		6.5
	S3	4.5	10.3	0.65	9.1		10.0

* *spray a tergo del muro paraonde*

Durante il test H01, rappresentativo di una mareggiata ordinaria con tempo di ritorno di 1 anno, non sono state registrate tracimazioni a tergo del muro paraonde, intese come lame d'acqua; tuttavia, si sono verificati alcuni fenomeni di spray.

Sotto le condizioni di moto ondoso H02 è stata registrata una portata media di overtopping pari a 2.3l/s/m. Il volume massimo misurato, relativo ad una singola onda tracimante, è pari a 1.6m³/m.

La portata media di tracimazione per il moto ondoso H03 è risultata pari a 8.3l/s/m; il volume massimo di tracimazione è pari a 10.0m³/m.

In Tabella 13 sono riportati il numero di massi dislocati per singolo test, il numero di massi totali dislocati, il parametro di danno N_{od} parziale e cumulato ed il parametro di danno S parziale e cumulato. In Figura 21 e Figura 22 sono rappresentati il parametro di danno S parziale e cumulato.

Tabella 13 - Avandiga Foranea Maestrale – sezione D1 – fase 1: Numero di massi dislocati durante i test e parametri di danno N_{od} e S parziali e cumulati

ONDA	SEED	Displaced boulders	Total displaced boulders	Partial N_{od}	Cumulative N_{od}	Partial S	Cumulative S
H01	S1	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	S2	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	S3	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
H02	S1	2	2	0.09	0.09	0.13	0.13
	S2	1	3	0.05	0.14	0.06	0.19
	S3	1	4	0.05	0.18	0.06	0.25
H03	S1	13	17	0.60	0.79	0.83	1.09
	S2	1	18	0.05	0.83	0.06	1.16
	S3	0	18	0.00	0.83	0.00	1.16

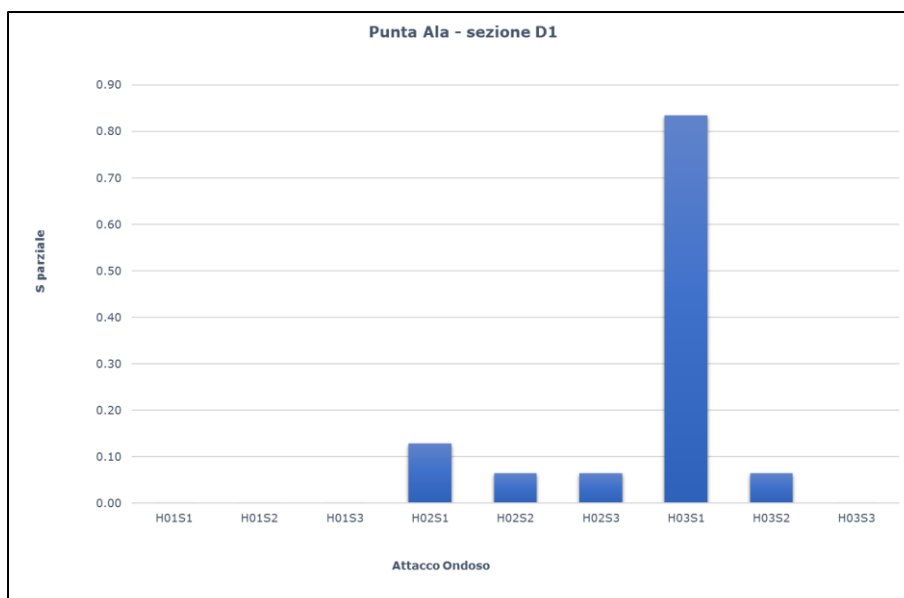


Figura 21 - Parametro di danno S parziale - sezione D1 – fase 1

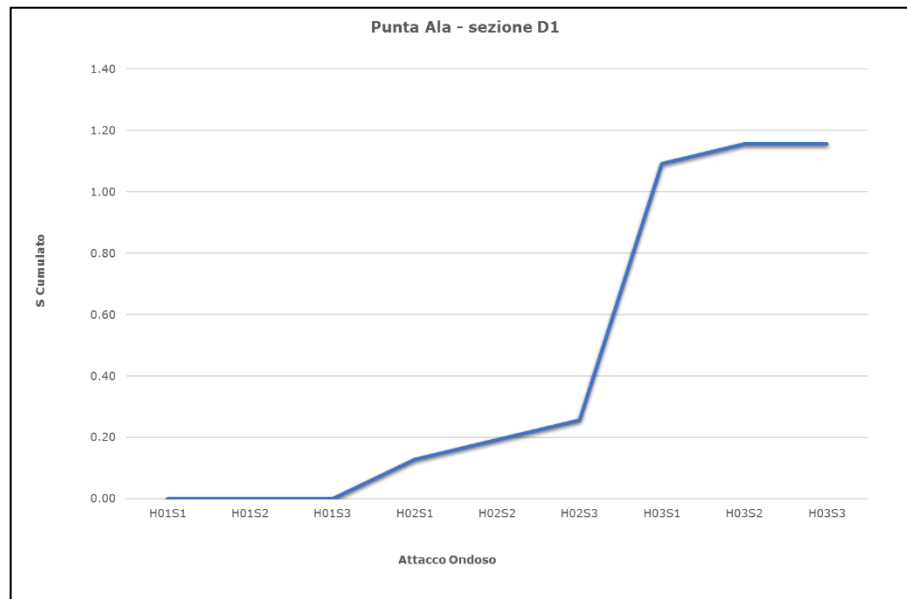


Figura 22 - Parametro di danno S cumulato - sezione D1 – fase 1

Il parametro di danno S alla fine dei test di fase 1 è risultato pari a 1.16, di cui oltre l'80% è avvenuto sotto l'azione del moto ondoso più gravoso H03. Il parametro di danno parziale per i moti ondosi H01, H02 e H03 è risultato pari a 0, 0.25 e 0.89 rispettivamente.

Al termine dei tre moti ondosi di fase 1, i massi dislocati dalla loro posizione originale sul secondo strato di mantellata sono stati 18, con pesi variabili su tutto il fuso 5÷8 t e così distribuiti:

- 9 massi con peso compreso tra 5 e 6 t
- 3 massi con peso compreso tra 6 e 7 t
- 6 massi con peso compreso tra 7 e 8 t.

Il dislocamento dei massi si è verificato principalmente su due zone:

1. sulla prima fila a ridosso della vasca di laminazione, dove su un totale di 15 massi 4 sono stati riversati nella vasca;
2. la fascia subito al di sotto del livello del medio mare; dei 14 massi dislocati 2 sono stati spostati verso l'alto mentre la quasi totalità (10 massi) sono rotolati verso il basso a ridosso della berma al piede.

La maggior parte della dislocazione dei massi di mantellata (13) è avvenuta in corrispondenza della prima serie temporale relativa al moto ondoso H03, il più gravoso. Durante le due serie temporali successive si è registrato il dislocamento di un solo masso ulteriore.

Per quanto riguarda la berma al piede i massi sono stati dislocati durante la mareggiata H03, precisamente 1 masso durante la prima serie temporale, 2 massi

durante la seconda ed 1 masso durante la terza. Il peso dei 4 massi dislocati è compreso tra un minimo di 3.3t ed un massimo di 4.5t.

Durante il passaggio dei cavi delle onde più importanti si sono evidenziati fenomeni di rocking di alcuni massi.

Nella Figura 23 si riporta la vista completa e le viste di dettaglio sulla mantellata, sulla vasca di laminazione e sulla berma al piede al termine delle prove di fase 1.



Figura 23 – Avandiga Foranea Maestrale – Fase 1: a sinistra vista frontale; al centro individuazione dei massi dislocati sulla mantellata; a destra in alto particolare della vasca di laminazione; a destra in basso individuazione dei massi dislocati sulla berma al piede

3.2. RISULTATI FASE II

Le elaborazioni effettuate per le prove di fase 1 sono state ripetute per i test condotti durante la fase 2. Nella Tabella 14 a seguire si riportano i parametri caratteristici delle onde generate in canale, altezza significativa $H_{s,i}$ [m], periodo di picco T_p [s] e sovrizzo iniziale s [m], la portata media di overtopping q_{wo} [l/s/m], il valore della portata media di overtopping $q_{wo,mean}$ [l/s/m] il valore della portata media di overtopping mediato sulle tre serie temporali ed il volume massimo di tracimazione registrato $V_{wo,max}$ [m³/m].

Tabella 14 - Avandiga Foranea Maestrale – sezione D1 – fase 2: Parametri caratteristici delle onde generate, portate e volumi di overtopping

ONDA	SEED	$H_{s,i}$	T_p	s	q_{wo}	$q_{wo, mean}$	$V_{wo, max}$
		[m]	[s]	[m]	[l/s/m]	[l/s/m]	[m ³ /m]
H04	S1	1.4	7.0	0.2	0.0	0.0	0.0
	S2	1.4	7.1	0.2	0.0		0.0
	S3	1.4	7.0	0.2	0.0		0.0
H05	S1	3.0	8.8	0.65	0.1	0.1	0.2
	S2	3.1	8.8	0.65	0.2		0.3
	S3	3.0	8.9	0.65	0.1		0.4
H06	S1	4.5	10.3	-0.2	3.3	3.2	3.6
	S2	4.6	10.3	-0.2	3.5		3.2
	S3	4.7	10.3	-0.2	2.7		5.5
H07	S1	4.8	10.4	1.15	18.7	19.0	*
	S2	4.8	10.5	1.15	18.2		*
	S3	4.7	10.4	1.15	20.0		*
H08	S1	5.5	10.7	0.65	28.2	28.9	9.7
	S2	5.5	10.8	0.65	29.8		13.0
	S3	5.4	10.9	0.65	28.8		10.0

* Misura non effettuata

Durante il moto ondoso H04 non si sono registrate tracimazioni a tergo del muro paraonde, nemmeno sottoforma di spray. Le prime tracimazioni si sono verificate durante il test H05, con valori sia in termini di portata media che di volumi massimi limitati, rispettivamente 0.1l/s/m e 0.4m³/m. I valori di overtopping sono aumentati con il moto ondoso H06 e sono risultati pari a 3.2l/s/m per quanto riguarda la portata media mediata sulle tre serie temporali e 5.5m³/m come volume massimo registrato.

I test relativi al moto ondoso H07 sono rappresentativi di una condizione di sovrizzo del livello del medio mare estrema (*sea level rise*) pari a +1.15m s.l.m.m.; in queste condizioni non è stato possibile effettuare le misure dei singoli volumi tracimanti per l'impossibilità nell'installare un sistema di raccolta connesso alle celle di carico non a contatto con il livello di acqua presente in canale. La portata media di overtopping mediata sulle tre serie temporali è risultata pari a 19.0l/s/m.

L'ultima condizione di moto ondoso è rappresentativa di una condizione estrema per quanto concerne l'altezza significativa ed il periodo di picco della mareggiata simulata (*overload*). La portata media di tracimazione è risultata pari a 28.9l/s/m con un volume massimo tracimante di 13.0m³/m.

In Tabella 15 sono riportati il numero di massi dislocati per singolo test, il numero di massi totali dislocati, il parametro di danno N_{od} parziale e cumulato ed

il parametro di danno S parziale e cumulato per i test di fase 2. In Figura 24 e Figura 25 sono rappresentati il parametro di danno S parziale e cumulato.

Tabella 15 - Avandiga Foranea Maestrale – sezione D1 – fase 2: Numero di massi dislocati durante i test e parametri di danno N_{od} e S parziali e cumulati

ONDA	SEED	Displaced boulders	Total displaced boulders	Partial N _{od}	Cumulative N _{od}	Partial S	Cumulative S
H04	S1	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	S2	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	S3	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
H05	S1	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	S2	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	S3	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
H06	S1	10	10	0.47	0.47	0.65	0.65
	S2	0	10	0.00	0.47	0.00	0.65
	S3	5	15	0.23	0.70	0.32	0.97
H07	S1	5	20	0.23	0.93	0.32	1.29
	S2	4	24	0.18	1.11	0.26	1.55
	S3	7	31	0.32	1.44	0.45	2.00
H08	S1	2	33	0.10	1.57	0.13	2.18
	S2	2	35	0.10	1.66	0.13	2.31
	S3	2	37	0.10	1.76	0.13	2.44

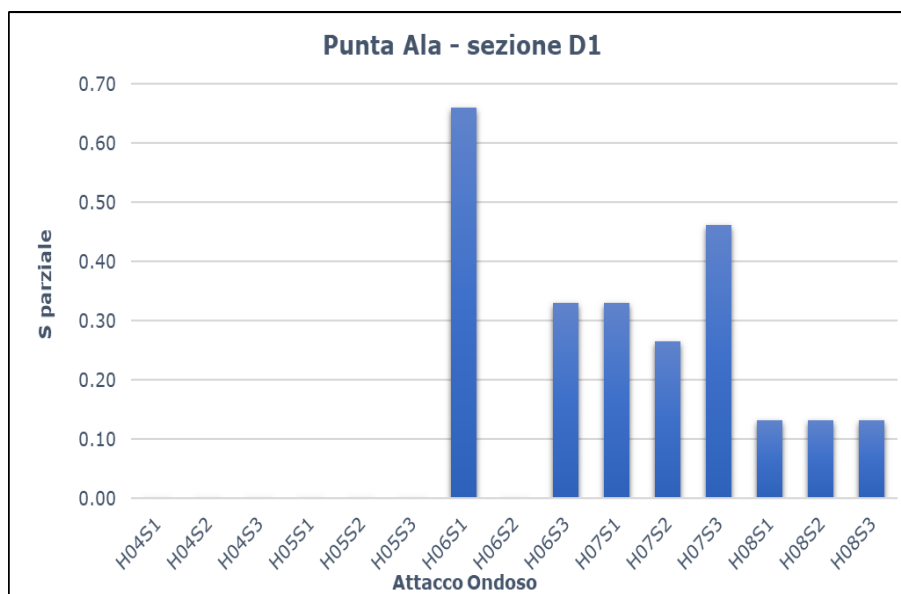


Figura 24 - Parametro di danno S parziale - sezione D1 – fase 2

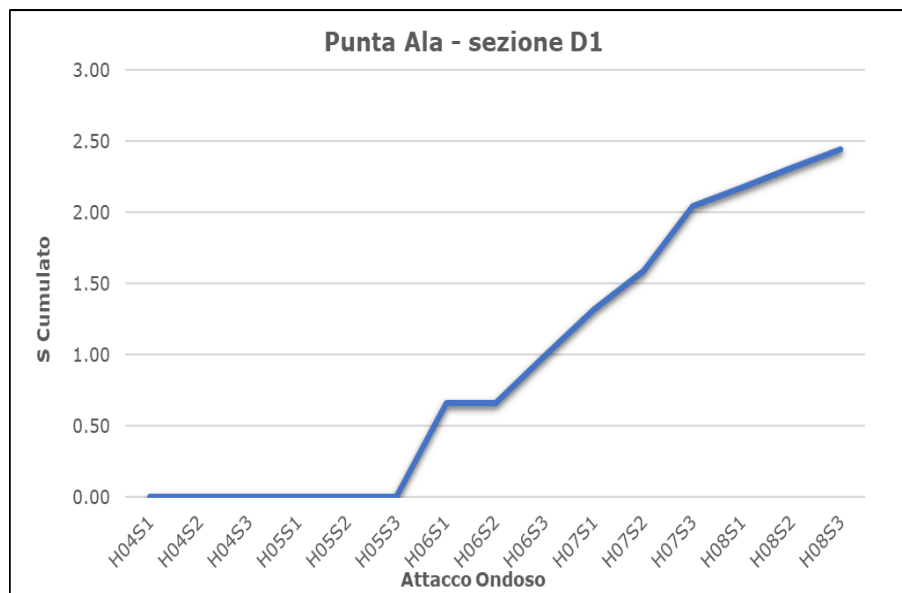


Figura 25 - Parametro di danno S cumulato - sezione D1 – fase 2

Il parametro di danno S al termine dei test di fase 2 è risultato pari a 2.44, con parametri di danno parziale così definiti: 0 per i moti ondosi H04 e H05; 0.97 per il moto ondoso H06, 1.03 per il moto ondoso H07 e 0.39 per il moto ondoso H08.

Al termine delle mareggiate H04 e H05 non si sono registrati dislocamenti di massi dal secondo strato di mantellata. Durante la mareggiata H05 si è verificato lo spostamento di un masso sulla berma al piede.

Durante la mareggiata H06 si registra il dislocamento di 15 massi costituenti lo strato superiore della mantellata. I massi costituenti la berma al piede sono risultati più instabili rispetto alle stesse condizioni di moto ondoso con livello del medio mare pari a +0.65m invece di -0.20m s.l.m..

Al termine della mareggiata H07 è stato registrato un dislocamento di ulteriori 16 massi, distribuito uniformemente durante le 3 serie temporali riprodotte.

Infine, durante la mareggiata H08, oltre allo spostamento di ulteriori 5 massi, è stato evidenziato un allargamento delle aree in cui è visibile il primo strato di mantellata.

In definitiva, al termine delle cinque mareggiate simulate è stato registrato uno spostamento di 37 massi, su un totale di oltre 300 massi costituenti il secondo strato di mantellata. I pesi dei massi dislocati sono così distribuiti:

- 8 massi con peso compreso tra 5 e 6 t
- 11 massi con peso compreso tra 6 e 7 t
- 17 massi con peso compreso tra 7 e 8 t.

Nelle Figura 26 e Figura 27 sono riportate le viste frontali dell'avandiga prima dei test di fase 2 e al termine di ogni moto ondoso.



Figura 26 – Avandiga Foranea Maestrale – Fase 2: a sinistra vista iniziale; al centro vista al termine del moto ondoso H04; a destra vista al termine del moto ondoso H05

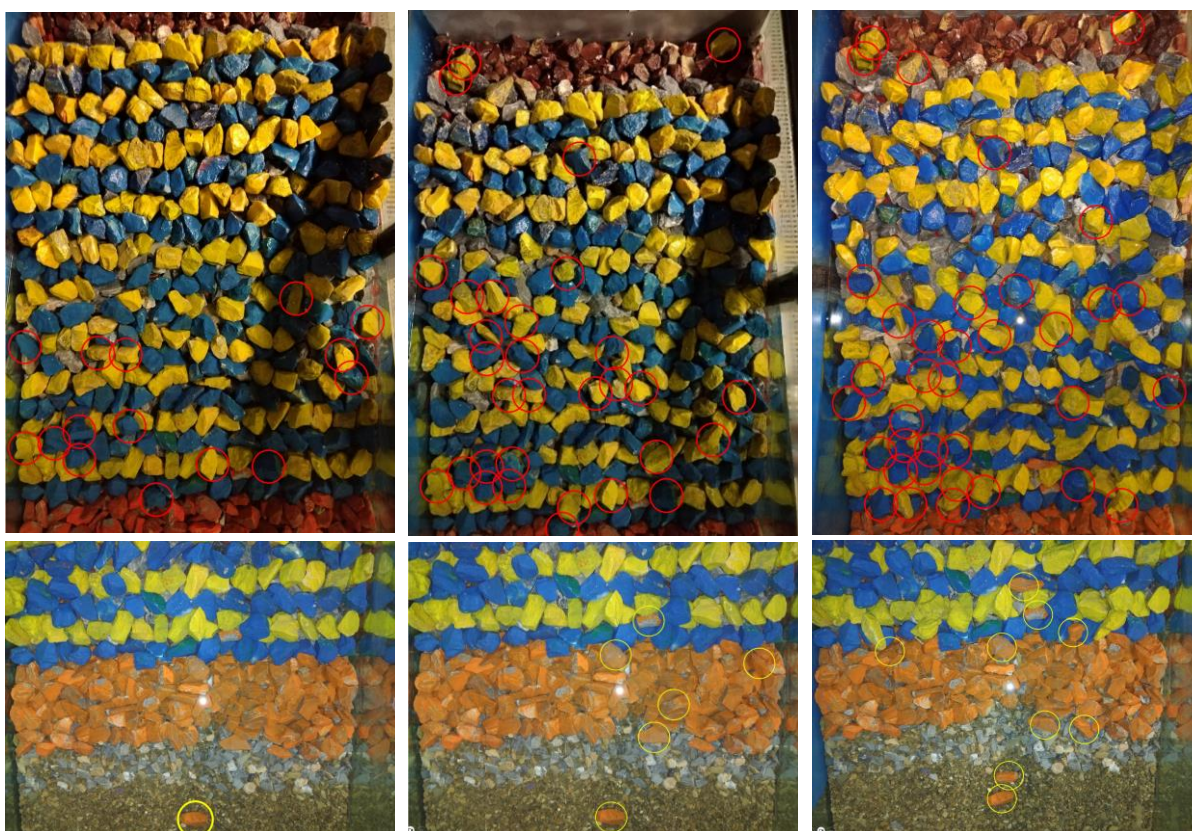


Figura 27 – Avandiga Foranea Maestrale – Fase 2: a sinistra vista al termine del moto H06; al centro vista al termine del moto ondoso H07; a destra vista al termine del moto ondoso H08. In basso da sinistra verso destra viste della berma al piede al termine dei moti ondosi H06, H07 e H08

4. TEST PER LA VERIFICA DELL'AVANDIGA FORANEA MAESTRALE PROVVISORIA (SEZIONE D2 E D3)

Una volta verificata la funzionalità idraulica e la stabilità della sezione dell'Avandiga Foranea Maestrale, il Committente ed il Progettista hanno richiesto la verifica della medesima sezione nelle condizioni provvisorie di cantiere durante la realizzazione dell'opera e hanno fornito le condizioni di onda e livello da provare.

4.1. SEZIONE PROVVISORIA D2

La sezione provvisoria in oggetto, indicata con il codice D2 e riportata in Figura 28 e Figura 29, è caratterizzata dai seguenti parametri principali:

- Profondità al piede → -12.5m s.l.m.m.
- Profondità berma al piede → -8.0m s.l.m.m.
- Larghezza berma al piede → 3.5m
- Quota berma emersa → +3.00m s.l.m.m.
- Larghezza berma emersa → 2.7m
- Pista di cantiere → +1.2m s.l.m.m
- Larghezza pista di cantiere → 17.3m
- Massi pista di cantiere → massi filtro 0.5 – 1.0t per i primi 7.3m a partire dalla mantellata, 50 – 500kg per i 10m successivi e paramento interno da rimuovere in fase di ultimazione della sezione di progetto
- Massi mantellata → 5 – 8t
- Massi piede → 2 – 5t

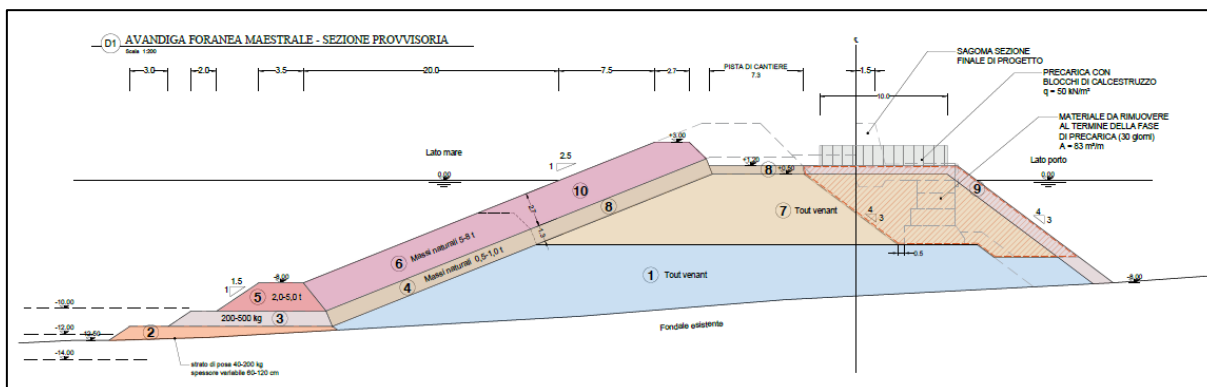


Figura 28 - Avandiga Foranea Maestrale Provvisoria - sezione D2



Figura 29 – Sezione D2 - In alto a sinistra vista frontale; in alto a destra vista lato darsena; in basso vista laterale

In Tabella 16 vengono riportate le condizioni di moto ondoso utilizzate per la verifica della sezione provvisoria.

Tabella 16 - Moti ondosi di prova per la sezione D2 (D1 provvisoria)

CODICE	$H_{s,i}$ Prot. [m]	T_p Prot. [s]	s Prot. [m]
H09	2.5	8.2	0.20
H10	3.6	9.4	0.50

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dall'analisi delle prove effettuate sulla sezione dell'Avandiga Foranea Maestrale Provvisoria D2.

In Tabella 17 vengono riportati i parametri caratteristici misurati delle onde generate in canale, altezza significativa $H_{s,i}$ [m], periodo di picco T_p [s] e sovrizzo iniziale s [m], e l'altezza significativa trasmessa nell'avamposto H_t [m].

Tabella 17 - Avandiga Foranea Maestrale Provvisoria – sezione D2: Parametri caratteristici delle onde generate e trasmesse

ONDA	SEED	$H_{s,i}$	T_p	s	H_t
		[m]	[s]	[m]	[m]
H09	S1	2.5	8.2	0.20	0.12
	S2	2.6	8.3	0.20	0.10
	S3	2.5	8.3	0.20	0.10
H10	S1	3.5	9.5	0.50	0.24
	S2	3.6	9.5	0.50	0.26
	S3	3.6	9.4	0.50	0.24
	S2	3.6	9.5	0.50	0.24
	S3	3.6	9.4	0.50	0.24

In Figura 30 viene riportata l'analisi fotografica della stabilità degli elementi costituenti la pista di cantiere.



Figura 30 - Configurazione D2: iniziale (a sinistra), post H09 (al centro) e post H10 (a destra) – vista dal porto verso il mare.

Durante la mareggiata indicata con il codice H09 non si sono registrati danni né sulla pista di cantiere né sul paramento interno.

Invece, durante la prova H10 si sono verificati spostamenti dei massi costituenti la pista di cantiere, sia quelli dello strato filtro più a ridosso della mantellata che quelli più interni con pezzatura minore. In alcuni punti, evidenziati in Figura 30, viene scoperto il nucleo della diga.

4.2. SEZIONE PROVVISORIA D3

In accordo con il Progettista è stata testata una variante della sezione provvisoria dell'Avandiga Foranea Maestrale, indicata con il codice D3. Questa differisce dalla sezione D2 per la composizione dei massi costituenti la pista di cantiere; in particolare, la pezzatura dello strato filtro da 0.5 – 1.0t nella parte a ridosso della mantellata è stata sostituita con una pezzatura da 1 a 3 t.

In Figura 31 vengono riportate le viste della sezione D3 iniziale e al termine dell'unico moto ondoso testato (H10); in Tabella 18 vengono invece riportati i parametri caratteristici delle onde e l'altezza d'onda trasmessa in avamposto.



Figura 31 - Configurazione D3: iniziale (a sinistra) e post H10 (a destra) – vista dal porto verso il mare

Tabella 18 - Avandiga Foranea Maestrale Provvisoria – sezione D3: Parametri caratteristici delle onde generate e trasmesse

ONDA	SEED	$H_{s,i}$	T_p	s	H_t
		[m]	[s]	[m]	[m]
H10	S1	3.5	9.6	0.50	0.24
	S2	3.6	9.5	0.50	0.24
	S3	3.6	9.4	0.50	0.24

Gli spostamenti dei massi costituenti la pista di cantiere registrati con il cambio di pezzatura realizzato previsto per la D3, sono risultati inferiori a quelli osservati per la D2.

5. TEST PER LA VERIFICA DELLA DIGA FORANEA MAESTRALE (SEZIONE M1 E M2)

Dopo la verifica dei layout di progetto e di cantiere dell'Avandiga Foranea Maestrale si è passati alla verifica di una sezione della Diga Foranea Maestrale individuata dal Progettista. La sezione in oggetto è localizzata nella parte iniziale della Diga Foranea Maestrale dove i fondali al piede dell'opera sono relativamente bassi, pari a circa -7m s.l.m.m..

Particolare cura, come richiesto dal Committente e dal Progettista, è stata posta nella realizzazione dei fondali antistanti l'opera; la pendenza del fondale varia da 1:20 a 1:10 per il tratto terminale a ridosso del piede dell'opera per un'estensione di circa 25m.

Per le configurazioni M1 e M2 la portata ed i volumi di overtopping sono stati spillati non più a tergo del muro paraonde ma a tergo del muretto presente sulla pensilina dei box lato porto.

5.1. SEZIONE M1

La sezione della Diga Foranea Maestrale, indicata con il codice M1 e riportata in Figura 32 e Figura 33, è caratterizzata dai seguenti parametri principali:

- Profondità al piede → -6.7m s.l.m.m.
- Profondità berma al piede → -2.8m s.l.m.m.
- Larghezza berma al piede → 4.2m
- Quota berma emersa → +4.50m s.l.m.m.
- Larghezza berma emersa → 4.5m
- Vasca di laminazione → +2.0m s.l.m.m
- Larghezza vasca di laminazione → 7.5m
- Coronamento muro paraonde → +4.50m s.l.m.m.
- Massi mantellata e piede → 5 - 8t

iii.



iv.



v.



vi.



vii.



Figura 33 – Diga Foranea Maestrale – sezione M1 – i. Posa dello strato filtro; ii Posa del primo strato di mantellata; iii. Vista frontale; iv. Vista dalla pensilina box; v. Vista laterale; vi. Particolare vasca di laminazione; vii. Particolare piede dell’opera

Di seguito in Tabella 19 si riportano i parametri caratteristici dei moti ondosi utilizzati per la verifica della sezione M1, come forniti dal progettista.

Tabella 19 - Moti ondosi di prova per la sezione M1

CODICE	$H_{s,i}$ Prot. [m]	T_p Prot. [s]	s Prot. [m]
H01	2.6	8.3	0.50
H02	4.0	9.5	0.50
H03	4.7	10.5	0.65

In Tabella 20 vengono riportati i parametri caratteristici delle onde generate in canale, altezza significativa $H_{s,i}$ [m], periodo di picco T_p [s] e sovrizzo iniziale s [m], la portata media di overtopping q_{wo} [l/s/m], il valore della portata media di overtopping mediato sulle tre serie temporali riprodotte per ogni moto ondoso $q_{wo,mean}$ [l/s/m] ed il volume massimo di tracimazione registrato $V_{wo,max}$ [m³/m].

Tabella 20 - Diga Foranea Maestrale – sezione M1: Parametri caratteristici delle onde generate, portate e volumi di overtopping

ONDA	SEED	$H_{s,i}$	T_p	s	q_{wo}	$q_{wo,mean}$	$V_{wo,max}$
		[m]	[s]	[m]	[l/s/m]	[l/s/m]	[m ³ /m]
H01	S1	2.7	8.1	0.50	0.0	0.0	0.0
	S2	2.7	8.3	0.50	0.0		0.0
	S3	2.6	8.3	0.50	0.0		0.0
H02	S1	3.9	9.3	0.50	0.4	0.5	0.3
	S2	3.9	9.8	0.50	0.7		1.0
	S3	3.9	9.8	0.50	0.6		0.4
H03	S1	4.6	10.6	0.65	3.6	3.6	2.1
	S2	4.7	10.6	0.65	4.2		2.4
	S3	4.6	10.6	0.65	2.9		2.4

La presenza della pensilina sopra i box contribuisce a mantenere su bassi valori l'overtopping. Durante il test H01 sulla banchina non si registrano lame tracimanti né tantomeno fenomeni di spray che si limitano all'area della pensilina. Per il test H02 i valori di portata media sono inferiori a 1l/s/m e per il test H03 pari a 3.6l/s/m con volumi massimi tracimanti di poco superiori a 2 m³/m.

In Tabella 21 sono riportati il numero di massi dislocati per singolo test, il numero di massi totali dislocati, il parametro di danno Nod parziale e cumulato ed il parametro di danno S parziale e cumulato per i test sulla sezione M1. In Figura 34 e Figura 35 sono rappresentati il parametro di danno S parziale e cumulato.

Tabella 21 - Diga Foranea Maestrale – sezione M1: Numero di massi dislocati durante i test e parametri di danno N_{od} e S parziali e cumulati

ONDA	SEED	Displaced boulders	Total displaced boulders	Partial N_{od}	Cumulative N_{od}	Partial S	Cumulative S
H01	S1	1	1	0.05	0.05	0.07	0.07
	S2	0	1	0.00	0.05	0.00	0.07
	S3	0	1	0.00	0.05	0.00	0.07
H02	S1	1	2	0.05	0.09	0.07	0.13
	S2	1	3	0.05	0.14	0.07	0.20
	S3	2	5	0.09	0.24	0.13	0.33
H03	S1	10	15	0.47	0.71	0.66	0.99
	S2	9	24	0.43	1.14	0.59	1.58
	S3	8	32	0.38	1.52	0.53	2.11

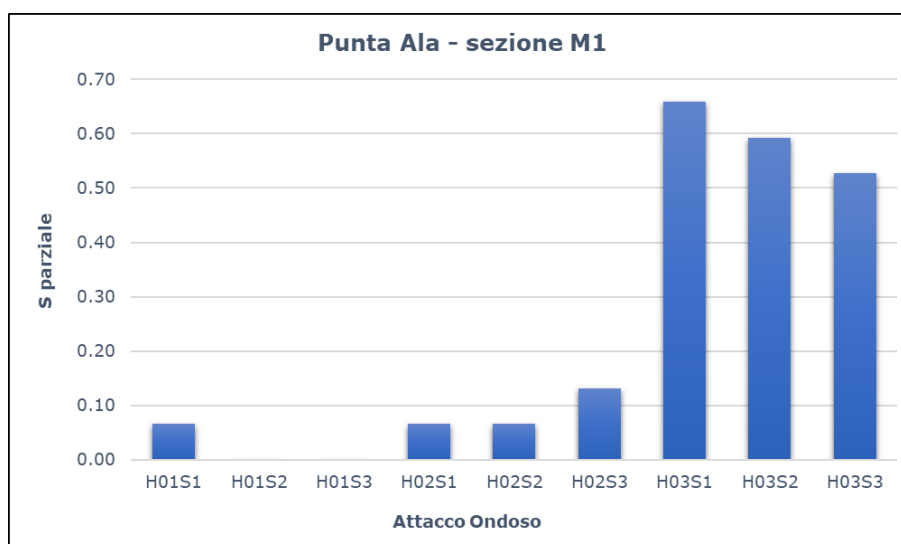


Figura 34 - Parametro di danno S parziale – CONFIGURAZIONE M1

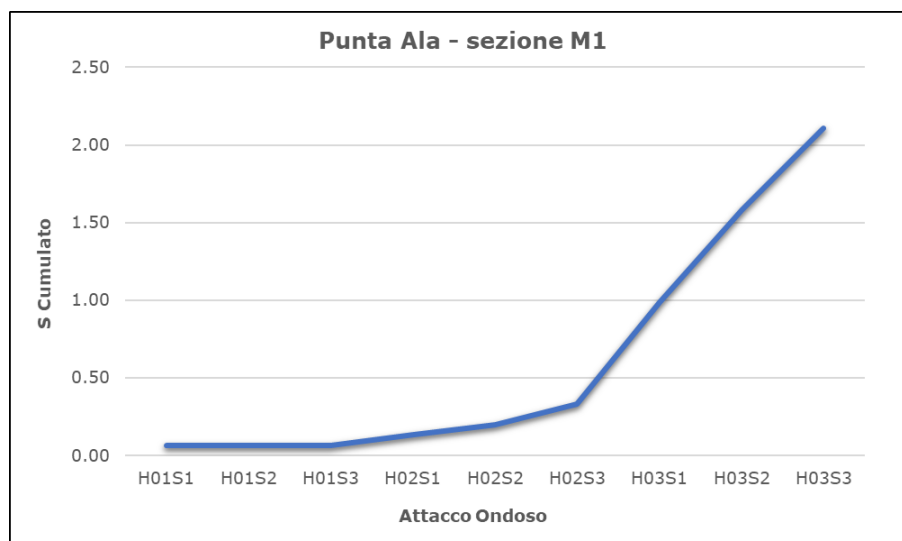


Figura 35 - Parametro di danno S cumulato – CONFIGURAZIONE M1

Il parametro di danno S al termine dei test sulla sezione della Diga Foranea Maestrale (M1) è risultato pari a 2.11, con parametri di danno parziale così definiti: 0.07 per il moto ondoso H01, 0.26 per il moto ondoso H02, 1.85 per il moto ondoso H03.

Le prove condotte sulla configurazione M1 hanno mostrato l'instabilità della piccola berma al piede della mantellata (a quota -2.8m s.l.m.m.). I massi iniziano ad essere dislocati dalla loro posizione già con la condizione di moto ondoso H02; durante i test H03 vengono spostati 27 massi, distribuiti più o meno uniformemente durante le tre serie temporali riprodotte. Ciò dimostra che la mantellata non raggiunge una condizione di stabilità come registrato ad esempio per la configurazione D1, ma il danno è continuo.

Al termine del moto ondoso H03 la prima fila al piede del secondo strato di mantellata (Figura 36) è quasi completamente scomparsa; inoltre, vengono movimentati anche due massi del primo strato di mantellata sottostante non più protetto.

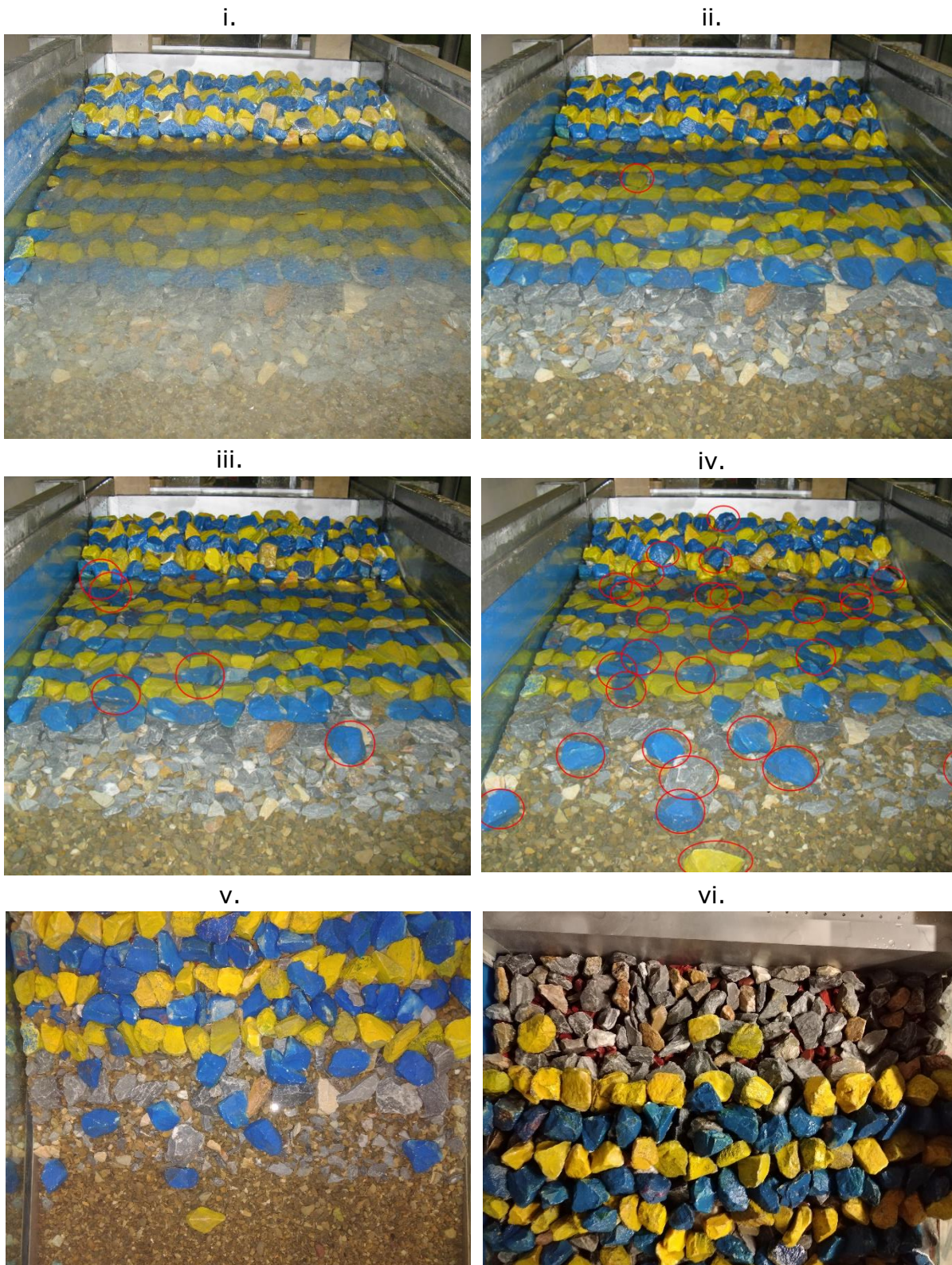


Figura 36 - Configurazione M1: i. configurazione M1 iniziale; ii. M1 post H01; iii. M1 post H02; iv. M1 post H03; v. M1 post H03 piede opera; vi. M1 post H03 vasca di laminazione

5.2. SEZIONE M2

Vista l'instabilità della mantellata e del piede dell'opera per la configurazione M1 il Progettista ha richiesto la verifica di una variante della sezione della Diga Foranea Maestrale, indicata con il codice M2, e caratterizzata dalla presenza di massi di tonnellaggio maggiore sul piede dell'opera. In particolare, sono stati utilizzati massi naturali nel range 8 - 11t, visibili in Figura 37 nei colori verde e rosso.



Figura 37 – Diga Foranea Maestrale – sezione M2 – a sinistra vista frontale; a destra vista piede dell'opera

I test sono stati condotti in due fasi distinte; al termine dei test di fase 1 si è provveduto alla riprofilatura della mantellata e del piede dell'opera.

Per questioni di disponibilità del canale marittimo, come preventivamente concordato con il Committente ed il Progettista, i test per la sezione M2 sono stati condotti limitando il numero dei moti ondosi da riprodurre, e inoltre, limitandoli a sole due serie temporali ciascuno, per un totale di 2000 periodi d'onda (invece di 3000).

Di seguito in Tabella 22 si riportano i parametri caratteristici dei moti ondosi utilizzati per la verifica della sezione M2.

Tabella 22 - Moti ondosi di prova per la sezione M2

CODICE	$H_{s,i}$ Prot. [m]	T_p Prot. [s]	s Prot. [m]
H02	4.0	9.5	0.50
H03	4.7	10.5	0.65
H07	4.7	10.5	1.15
H08	5.5	11.1	0.65

5.2.1. Risultati fase 1

In Tabella 23 vengono riportati i parametri caratteristici delle onde generate in canale, altezza significativa $H_{s,i}$ [m], periodo di picco T_p [s] e sovrizzo iniziale s [m], la portata media di overtopping q_{wo} [l/s/m], il valore della portata media di overtopping mediato sulle tre serie temporali riprodotte per ogni moto ondoso $q_{wo,mean}$ [l/s/m] ed il volume massimo di tracimazione registrato $V_{wo,max}$ [m³/m].

Tabella 23 - Diga Foranea Maestrale – sezione M2 – fase 1: Parametri caratteristici delle onde generate, portate e volumi di overtopping

ONDA	SEED	$H_{s,i}$	T_p	s	q_{wo}	$q_{wo, mean}$	$V_{wo, max}$
		[m]	[s]	[m]	[l/s/m]	[l/s/m]	[m ³ /m]
H02	S1	3.9	9.3	0.50	0.4	0.7	0.3
	S2	3.9	9.8	0.50	1.0		1.0
H03	S1	4.6	10.6	0.65	4.4	5.5	2.0
	S2	4.7	10.6	0.65	6.5		2.5

L'overtopping misurato risulta in linea con quanto misurato per la configurazione M1, leggermente maggiore, con portate medie di overtopping mediate sulle due serie temporali pari a 0.7l/s/m e 5.5l/s/m e volumi massimi pari a 1.0m³/m e 2.5m³/m rispettivamente per i moti ondosi H02 e H03.

In Tabella 24 sono riportati il numero di massi dislocati per singolo test, il numero di massi totali dislocati, il parametro di danno N_{od} parziale e cumulato ed il parametro di danno S parziale e cumulato per i test sulla sezione M2 – fase 1. In Figura 38 e Figura 39 sono rappresentati il parametro di danno S parziale e cumulato.

Tabella 24 - Diga Foranea Maestrale – sezione M2 – fase 1: Numero di massi dislocati durante i test e parametri di danno N_{od} e S parziali e cumulati

ONDA	SEED	Displaced boulders	Total displaced boulders	Partial N_{od}	Cumulative N_{od}	Partial S	Cumulative S
H02	S1	16	16	0.80	0.80	1.11	1.11
	S2	7	23	0.35	1.14	0.48	1.59
H03	S1	6	29	0.30	1.44	0.41	2.00
	S2	1	30	0.05	1.49	0.07	2.07

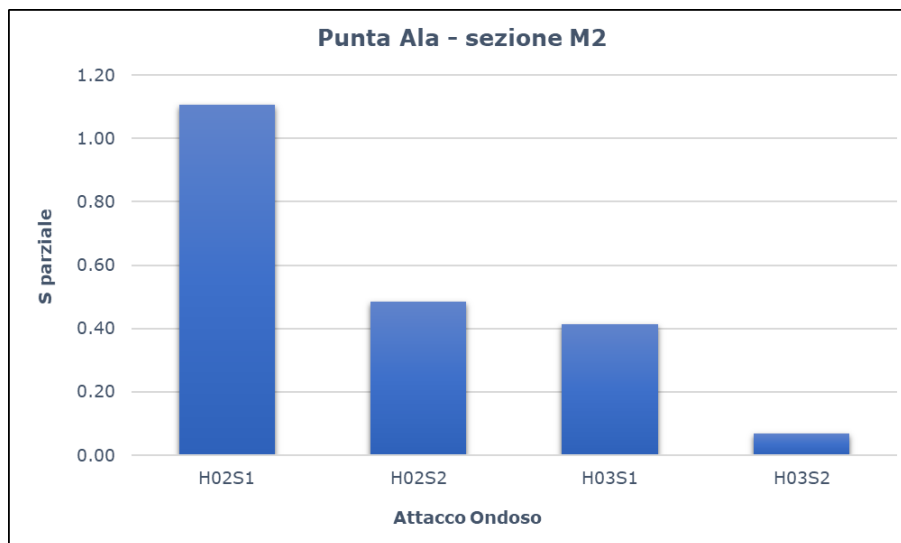


Figura 38 - Parametro di danno S parziale – CONFIGURAZIONE M2 – FASE I

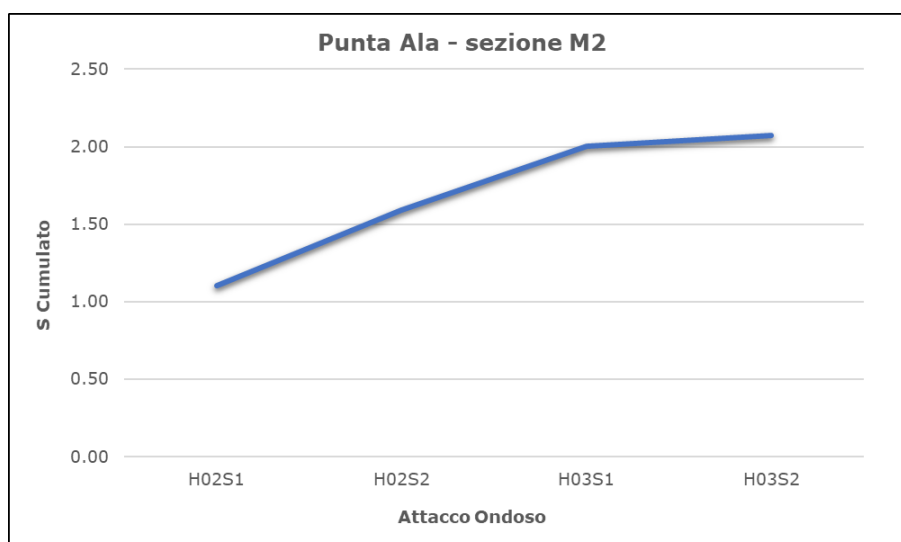


Figura 39 - Parametro di danno S cumulato – CONFIGURAZIONE M2 – FASE I

Nonostante il cambio di pezzatura, la berma al piede mostra ancora problemi di stabilità. Al termine dei test H02 e H03 risultano dislocati 12 massi da 8 - 11t del piede dell'opera e 18 massi da 5 - 8t della mantellata. A differenza della configurazione M1 l'andamento del numero di massi dislocati per serie temporale sembra mostrare un raggiungimento di una certa stabilità, evidenziato dallo spostamento di 1 solo masso durante l'ultima serie temporale. Il danno cumulato risulta in linea con quello misurato per la configurazione M1.

Il danno cumulato finale risulta pari a 2.07; il danno parziale è pari a 1.59 per il moto ondoso H02 e 0.48 per il test H03.

In Figura 40 è riportata l'evoluzione della sezione M2 per la fase 1.



Figura 40 – Configurazione M2 – fase 1: a sinistra M2 iniziale; al centro M2 post H02; a destra M2 post H03

5.2.2. Risultati fase 2

Al termine dei test di fase 1 si è provveduto alla riprofilatura della sezione M2 e successivamente sono stati condotte le prove con i moti ondosi H07 e H08. Le stesse elaborazioni di fase 1 sono state condotte sui risultati di fase 2. Durante i test H07 non è stato possibile misurare i singoli volumi di tracimazione per l'impossibilità di installare un box di raccolta al di sopra del livello del medio mare, analogamente a quanto avvenuto per le misure per la sezione D1 viene riportato solo il dato misurato della portata media.

In Tabella 25 vengono riportati i parametri caratteristici delle onde generate in canale, altezza significativa $H_{s,i}$ [m], periodo di picco T_p [s] e sovrizzo iniziale s [m], la portata media di overtopping q_{wo} [l/s/m], il valore della portata media di overtopping mediato sulle tre serie temporali riprodotte per ogni moto ondoso $q_{wo,mean}$ [l/s/m] ed il volume massimo di tracimazione registrato $V_{wo,max}$ [m³/m].

Tabella 25 - Diga Foranea Maestrale – sezione M2 – fase 2: Parametri caratteristici delle onde generate, portate e volumi di overtopping

ONDA	SEED	$H_{s,i}$	T_p	s	q_{wo}	$q_{wo, mean}$	$V_{wo, max}$
		[m]	[s]	[m]	[l/s/m]	[l/s/m]	[m ³ /m]
H07	S1	4.6	10.3	1.15	8.7	7.8	*
	S2	4.8	10.5	1.15	6.8		*
H08	S1	5.6	10.7	0.65	10.2	10.4	7.0
	S2	5.5	10.8	0.65	10.6		4.8
	S6	5.4	10.5	0.65	10.1		4.0

* Misura non effettuata

Le misure della portata media di overtopping mediata sulle due serie temporali sono confrontabili per i test H07 e H08, leggermente maggiore per quest'ultima condizione. I volumi massimi tracimanti, misurati solo per il test H08 sono pari a 7 m³/m.

In Tabella 26 sono riportati il numero di massi dislocati per singolo test, il numero di massi totali dislocati, il parametro di danno Nod parziale e cumulato ed il parametro di danno S parziale e cumulato per i test sulla sezione M2 – fase 2. In Figura 41 e Figura 42 sono rappresentati il parametro di danno S parziale e cumulato.

Tabella 26 - Numero di massi dislocati durante i test e relativi parametri di danno Nod e S parziali e cumulati – CONFIGURAZIONE M2

ONDA	SEED	Displaced boulders	Total displaced boulders	Partial N _{od}	Cumulative N _{od}	Partial S	Cumulative S
H07	S1	22	22	1.09	1.09	1.51	1.51
	S2	0	22	0.00	1.09	0.00	1.51
H08	S1	8.00	30.00	0.40	1.49	0.55	2.06
	S2	8.00	38.00	0.40	1.88	0.55	2.61

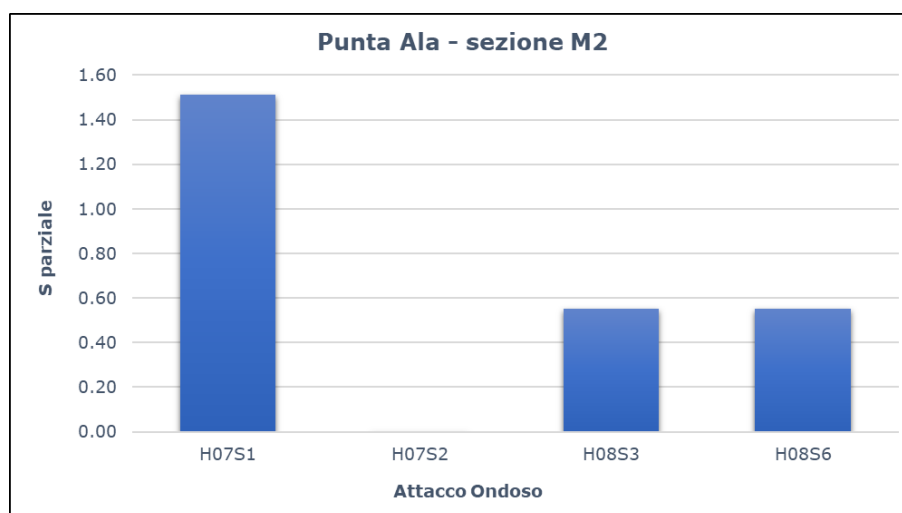


Figura 41 - Parametro di danno S parziale – CONFIGURAZIONE M2 – FASE II

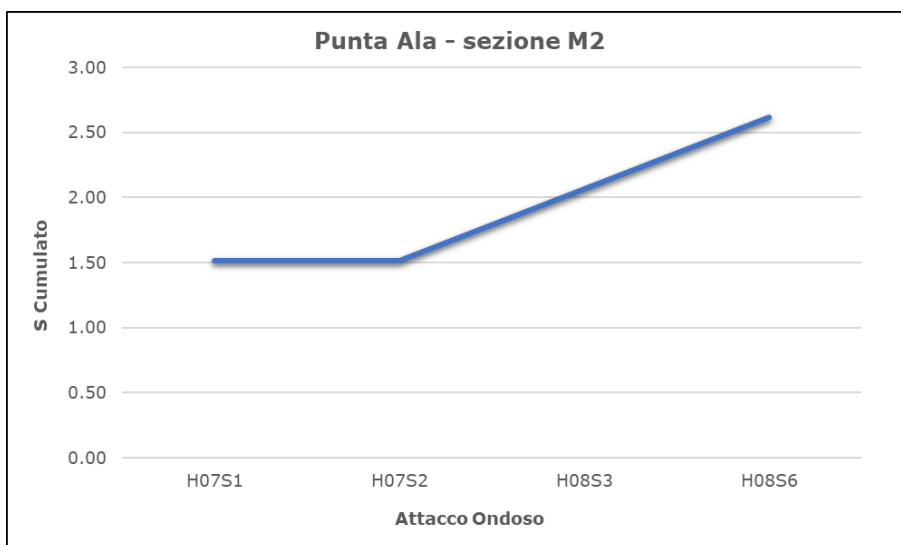


Figura 42 - Parametro di danno S cumulato – CONFIGURAZIONE M2 – FASE II

Al termine dei test H07 e H08 risultano dislocati 38 massi complessivamente, di cui 14 dal piede dell’opera (8-11t) e 24 dalla mantellata (5-8t), come mostrato in Figura 43. Durante il test H07 il dislocamento dei massi avviene tutto durante la prima serie temporale (22 massi); invece, durante il test H08 il dislocamento dei massi è uniforme durante le serie temporali.

Al termine delle prove il danno cumulato è maggiore di 2.6, con danni parziali pari a 1.51 e 1.10 rispettivamente per i test H07 e H08.



Figura 43 – Configurazione M2 – fase 2: a sinistra M2 iniziale; al centro M2 post H07; a destra M2 post H08

CONCLUSIONI

Lo studio sperimentale condotto è stato volto alla verifica di alcune sezioni del layout di progetto del nuovo tratto della diga foranea previsto per la Riqualificazione e l'Ampliamento del porto di Punta Ala.

Nello specifico sono state studiate:

- La sezione dell'Avandiga Foranea Maestrale con focus sulla stabilità dei massi costituenti la mantellata e la berma al piede e sulla misura della portata media di tracimazione a tergo del muro paraonde e dei massimi volumi di tracimazione.
- La sezione provvisoria dell'Avandiga Foranea Maestrale con focus sulla stabilità dei massi posti a protezione della pista di lavoro durante la fase di cantiere.
- La sezione della Diga Foranea Maestrale con focus sulla stabilità dei massi costituenti la mantellata e la berma al piede e sulla misura della portata media di tracimazione a tergo della pensilina dei box dietro il muro paraonde e dei massimi volumi di tracimazione.

Per la valutazione dei livelli di danno della mantellata è stato misurato il parametro di danno S. I valori del parametro di danno S per differenti livelli di danno per data pendenza di una mantellata in doppio strato di massi naturali sono riportati in Tabella 27.

Tabella 27 – Limiti del parametro di danno S

Armor Slope	Initial Damage	Intermediate Damage	Failure
1:1.5	2	3-5	8
1:2	2	4-6	8
1:3	2	6-9	12
1:4-1:6	3	8-12	17

Per la sezione dell'Avandiga Foranea Maestrale è stato rilevato un valore del parametro di danno S cumulato pari a 1.16 al termine dei moti ondosi di Fase 1; al termine dei moti ondosi di Fase 2 il parametro di danno S cumulato è pari a 2.44.

Per quanto concerne la sezione provvisoria dell'Avandiga Foranea Maestrale i massi posti a protezione della pista di lavoro non hanno mostrato livelli di danno importanti.

La sezione della Diga Foranea Maestrale è stata caratterizzata da un parametro di danno S cumulato al termine dei moti ondosi di Fase 1 e Fase 2 rispettivamente pari a 2.07 e 2.61.

Per la valutazione dell'overtopping, intesa come misura della portata media e dei massimi volumi tracimanti, è possibile fare riferimento ai limiti di tollerabilità tabellati nell'*EuroTop Manual* e relativi alla sicurezza per le strutture (Tabella 28), i beni a tergo delle opere (Tabella 29) e a veicoli e persone (Tabella 30).

Tabella 28 - Limits for wave overtopping for structural design of breakwaters, seawalls, dikes and dams

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V _{max} (l per m)
Rubble mound breakwaters; H _{m0} > 5 m; no damage	1	2,000-3,000
Rubble mound breakwaters; H _{m0} > 5 m; rear side designed for wave overtopping	5-10	10,000-20,000
Grass covered crest and landward slope; maintained and closed grass cover; H _{m0} = 1 – 3 m	5	2,000-3,000
Grass covered crest and landward slope; not maintained grass cover, open spots, moss, bare patches; H _{m0} = 0.5 – 3 m	0.1	500
Grass covered crest and landward slope; H _{m0} < 1 m	5-10	500
Grass covered crest and landward slope; H _{m0} < 0.3 m	No limit	No limit

Tabella 29 - General limits for overtopping for property behind the defence

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V _{max} (l per m)
Significant damage or sinking of larger yachts; H _{m0} > 5 m	>10	>5,000 – 30,000
Significant damage or sinking of larger yachts; H _{m0} = 3-5 m	>20	>5,000 – 30,000
Sinking small boats set 5-10 m from wall; H _{m0} = 3-5 m Damage to larger yachts	>5	>3,000-5,000
Safe for larger yachts; H _{m0} > 5 m	<5	<5,000
Safe for smaller boats set 5-10 m from wall; H _{m0} = 3-5 m	<1	<2,000
Building structure elements; H _{m0} = 1-3 m	≤1	<1,000
Damage to equipment set back 5-10m	≤1	<1,000

Tabella 30 - Limits for overtopping for people and vehicles

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V _{max} (l per m)
People at structures with possible violent overtopping, mostly vertical structures	No access for any predicted overtopping	No access for any predicted overtopping
People at seawall / dike crest. Clear view of the sea.		
H _{m0} = 3 m	0.3	600
H _{m0} = 2 m	1	600
H _{m0} = 1 m	10-20	600
H _{m0} < 0.5 m	No limit	No limit
Cars on seawall / dike crest, or railway close behind crest		
H _{m0} = 3 m	<5	2000
H _{m0} = 2 m	10-20	2000
H _{m0} = 1 m	<75	2000
Highways and roads, fast traffic	Close before debris in spray becomes dangerous	Close before debris in spray becomes dangerous

La portata media di tracimazione a tergo del muro paraonde per la sezione dell'Avandiga Foranea Maestrata è risultata pari a 8.3l/s/m per il moto ondoso H03 (altezza d'onda incidente pari a 4.7m, periodo di picco pari a 10.5s e sovrizzo del medio mare pari a 0.65m) e pari a 28.9l/s/m per il moto ondoso H08 (*overload* altezza d'onda incidente pari a 5.5m, periodo di picco pari a 11.1s e sovrizzo del medio mare pari a 0.65m). I volumi massimi tracimanti registrati per singola lama tracimante sono risultati pari a 10mc/m e 13mc/m rispettivamente per i moti ondosi H03 e H08.

La sezione della Diga Foranea Maestrata caratterizzata dalla presenza della pensilina dei box a tergo del muro paraonde ha mostrato livelli di tracimazione inferiori sotto le stesse condizioni di moto ondoso. Nello specifico, la portata media di tracimazione è risultata pari a 5.5l/s/m per il moto ondoso H03 e 10.4l/s/m per il moto ondoso H08. I volumi massimi registrati per singola lama tracimante sono risultati pari a 2.5mc/m e 7.0mc/m per i moti ondosi H03 e H08.