Proponente:

"CALA CRAVIEU" Soc. Coop. a r.l.

Via Aurelia di ponente, 1/B - 17015 CELLE LIGURE (SV)

Oggetto:

INTERVENTI DI RIPRISTINO E RINFORZO DELLE OPERE DI DIFESA IN LOCALITA' "CALA CRAVIEU" A CELLE LIGURE (SV) DANNEGGIATE DALLA MAREGGIATA ECCEZIONALE DEL 29-30 OTTOBRE 2018

PROGETTO DEFINITIVO

Titolo elaborato:

PROVE SU MODELLO FISICO
(a cura di LABIMA - DICEA - Università degli Studi di Firenze)

Progettisti:



STUDIOGAGGERO

SAVONA Via Pia, 130R
Tel 019 829463 - Fax 019 8386702 - Cell 335/303133
Email ing.gaggero@libero.it

STUDIOELB Ingegneri Associati
Corso Torino 17/6 sc.A - 16129 Genova Tel. 010.5740568 - fax : 010.4211059
e-mail: inge@studioelb.it - PEC: studio@pec.studioelb.it - C.F. e P. I.V.A.: 01933110999

0	18.12.2019	LABIMA	LABIMA	Emissione
Revisione	Data	Redatto da:	Controllato da:	Descrizione

Data:	Scala:		
18.12.2019		B25	R06

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI FIRENZE
DICEA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE
Laboratorio di Ingegneria Marittima

LABIMA

Laboratorio di Ingegneria Marittima
www.labima.unifi.it

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - DICEA
Università degli Studi di Firenze
Via Santa Marta 3 - 50139 FIRENZE

STUDIO SPERIMENTALE SU MODELLO IN SCALA DI LABORATORIO DELLE INTERAZIONI ONDA-STRUTTURA PER L'OPERA DI DIFESA IN LOCALITÀ CALA CRAVIEU IN CELLE LIGURE (SV)

RELAZIONE TECNICA

COMMITTENTE:	CALA CRAVIEU SOC. COOP.
RESPONSABILE SCIENTIFICO:	PROF. ING. LORENZO CAPPIETTI
GRUPPO DI LAVORO:	INGG. A. ESPOSITO, M. MASCHERINI, I. SIMONETTI DOTT.SS. I. CREMA
DATA	18/12/2019

INDICE

PREMESSA **8**

1 OBIETTIVI E METODOLOGIA **11**

2 L'APPARECCHIATURA SPERIMENTALE E LA METODOLOGIA **13**

2.1 IL CANALE MARITTIMO 13
2.2 CRITERI DI SIMILITUDINE UTILIZZATI PER LA COSTRUZIONE DEL MODELLO 14
2.3 SIMILITUDINE CON IL PROTOTIPO NEL DECADIMENTO DELLE SOVRAPPRESSIONI ATTRAVERSO IL NUCLEO DELLA DIGA 15
2.4 MODELLAZIONE DEI FONDALI DI POSA 18
2.5 SELEZIONE DEI MASSI COSTITUENTI IL MODELLO DELL'OPERA DI DIFESA ESISTENTE 19
2.5.1 Massi naturali costituenti la mantellata 19
2.5.2 Massi naturali costituenti il filtro 19
2.5.3 Massi naturali costituenti il nucleo 20
2.6 COSTRUZIONE DELLA SEZIONE DELLA DIGA ATTUALE 20
2.7 SENSORI UTILIZZATI 22
2.7.1 Sensori di livello di tipo ultrasonico 22
2.7.2 Sensori di livello di tipo resistivo 22
2.7.3 Celle di carico per la misura dell'overtopping 23
2.7.4 Piezometri 25
2.7.5 Videocamera 25
2.8 DEFINIZIONE DELLE ONDE E DEI LIVELLI DI PROVA 26
2.8.1 Attacchi ondosi 26
2.8.2 Sovralzo 26
2.8.3 Condizioni di prova 26
2.9 MISURA DEL SOVRALZO E ANALISI DEL WAVE SET-UP 33

3 TEST PER FRONTI D'ONDA ORTOGONALI ALL'OPERA DI DIFESA **35**

3.1 CONFIGURAZIONE C0 35
3.1.1 Misura delle onde e wave set 36
3.1.2 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C0 37
3.1.3 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C0 39
3.1.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C0 39
3.2 CONFIGURAZIONE C1 41
3.2.1 Misura delle onde e wave set 41

3.2.2 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C1 42
3.2.3 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C1 43
3.2.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C1 44
3.3 CONFIGURAZIONE C2 45
3.3.1 Misura delle onde e wave set 45
3.3.2 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C2 46
3.3.3 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C2 46
3.3.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C2 48
3.4 CONFIGURAZIONE C3 49
3.4.1 Misura delle onde e wave set 50
3.4.2 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C3 51
3.4.3 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C3 52
3.4.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C3 52
3.5 CONFIGURAZIONE C4 54
3.5.1 Misura delle onde e wave set 55
3.5.2 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C4 56
3.5.3 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C4 57
3.5.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C4 57
3.6 CONFIGURAZIONE C5 58
3.6.1 Misura delle onde e wave set 59
3.6.2 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C5 60
3.6.3 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C5 61
3.6.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C5 61

4 TEST PER FRONTI D'ONDA INCIDENTI INCLINATI DI 30° SULL'OPERA DI DIFESA 63

4.1 CONFIGURAZIONE C1_I 63
4.1.1 Misura delle onde e wave set 63
4.1.2 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C1_i 64
4.1.3 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C1_i 64

4.2 CONFIGURAZIONE C3_I 66
4.2.1 Misura delle onde e wave set 66
4.2.2 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C3_i 67
4.2.3 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C3_i 67
4.3 CONFIGURAZIONE C5_I 69
4.3.1 Misura delle onde e wave set 69
4.3.2 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C5_i 70
4.3.3 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C5_i 70

5 OSSERVAZIONI CONCLUSIVE 72

ALLEGATI

ALLEGATO A - SETUP MODELLO
ALLEGATO B – OVERTOPPING
ALLEGATO C – STABILITÀ

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Sezione rilevata e sezione tipo scogliera "Stato Attuale" 9
Figura 2: Il canale utilizzato per la conduzione dello studio in esame, presso il LABIMA - Laboratorio di Ingegneria Marittima del DICEA-UNIFI. 13
Figura 3: Localizzazione dei punti della velocità di filtrazione nel nucleo. 16
Figura 4: Realizzazione del doppio fondo in canale per la riproduzione delle batimetriche dal piede della struttura alla -20.0m s.l.m. 18
Figura 5: Berma emersa: Frequenza % e Frequenza Cumulata. 19
Figura 6 - Filtro: Frequenza % e Frequenza Cumulata. 20
Figura 7 - Nucleo: Frequenza % e Frequenza Cumulata. 20
Figura 8: Costruzione della sezione della diga attuale. 21
Figura 9 - Sensori di livello: sonda ad ultrasuoni. 22
Figura 10 - Sonda resistiva e schema elettrico corrispondente. 23
Figura 11 – Cella di Carico - CELMI TIPO 54. 23
Figura 12 - Caratteristiche metrologiche, elettriche, meccaniche e ambientali - Celle di Carico a flessione CELMI TIPO 54. 24

Figura 13 - Strumentazione dei piezometri 4, 5 e 6. 25
Figura 14 - Videocamera SONY HDR-CX 405. 25
Figura 15 – Setup del canale marittimo per le prove sull'opera di difesa di Cala Cravieu in Celle Ligure. 27
Figura 16 – Esempio di taratura delle sonde resistive (effettuata il giorno 18/10/2019). .. 29
Figura 17 - Serie temporale degli spostamenti del wavemaker relativa all'attacco ondoso H02 (Tr50), (durata 1h in scala modello). 29
Figura 18 - Elaborazioni grafiche ottenute dall'analisi dei dati acquisiti per la configurazione C0 alla sonda WG3, sia nel dominio del tempo sia nel dominio della frequenza per l'onda H03. 30
Figura 19 – a) Piezometro di riferimento per la definizione del sovralzo davanti al muro; b) Esempio di misura dei livelli di wave set-up acquisiti. 34
Figura 20 – Sezione della configurazione C1. 36
Figura 21 – Posizione dell'apparato di misura dell'overtopping a tergo del muro per la configurazione C0. 38
Figura 22 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C0, prima e dopo la condizione H01 – Tr100. 39
Figura 23 – Sezione della configurazione C1. 41
Figura 24 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C1, prima e dopo la condizione H01 – Tr100. 43
Figura 25 – Sezione della configurazione C2. 45
Figura 26 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C2, prima e dopo la condizione H01 – Tr100. 46
Figura 27 – Sezione della configurazione C3. 49
Figura 28 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C3, prima e dopo la condizione H01 – Tr100. 51
Figura 29 – Sezione della configurazione C4. 54
Figura 30 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C4, prima e dopo la condizione H01 – Tr100. 56
Figura 31 – Sezione della configurazione C5. 58
Figura 32 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C5, prima e dopo la condizione H01 – Tr100. 60

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Condizioni target di prova. 9
Tabella 2 - Configurazioni da testare 9
Tabella 3. Fasi Dei Test Di Laboratorio. 11
Tabella 4. Scale di riduzione utilizzate nel modello. 15
Tabella 5. Analisi di sensitività della scala da utilizzare per il nucleo dell'opera al variare dei parametri del modello di Burcharth et al. 1999. 17
Tabella 6. – Parametri caratteristici target in scala prototipo e modello, delle condizioni di prova per i test su overtopping e stabilità. 27
Tabella 7 - Disposizione in canale delle sonde di livello 28
Tabella 8: Parametri di taratura delle sonde resistive 28
Tabella 9: Distanze dei piezometri (PZ-). 33
Tabella 10 - Parametri caratteristici e wave set-up misurati - configurazione C0 37
Tabella 11: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C0 38
Tabella 12 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C0 40
Tabella 13 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C0 40
Tabella 14 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m 40
Tabella 15 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C1 42
Tabella 16: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C1 43
Tabella 17 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C1 44
Tabella 18 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C1 44
Tabella 19 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m 44
Tabella 20 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C2 45
Tabella 21: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C2 47
Tabella 22 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C2 48
Tabella 23 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C2 48

Tabella 24 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m 48
Tabella 25 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C3 50
Tabella 26: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C3 52
Tabella 27 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C3 52
Tabella 28 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C3 53
Tabella 29 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m 53
Tabella 30 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C4 55
Tabella 31: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C4 57
Tabella 32 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C4 57
Tabella 33 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C4 57
Tabella 34 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m 58
Tabella 35 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C5 59
Tabella 36: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C5 61
Tabella 37 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C5 61
Tabella 38 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C5 61
Tabella 39 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m 62
Tabella 40 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C1_i 63
Tabella 41: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C1_i 64
Tabella 42 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C1_i 64
Tabella 43 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C1_i 65
Tabella 44 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m 65
Tabella 45 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C3_i 66
Tabella 46: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C3_i 67
Tabella 47 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C3_i 67

Tabella 48 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C3_i 67
Tabella 49 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m 68
Tabella 50 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C5_i 69
Tabella 51: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C5_i 70
Tabella 52 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C5_i 70
Tabella 53 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C5_i 70
Tabella 54 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m 71

PREMESSA

La presente relazione tecnica descrive l'attività di laboratorio eseguita nell'ambito di una convenzione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (nel seguito detto DICEA) e la CALA CRAVIEU Soc. Coop (nel seguito detto Committente).

A seguito della mareggiata di fine ottobre 2018 che ha interessato tutta la zona dell'Alto Tirreno, la struttura in località Cala Cravieu in Celle Ligure ha subito danni con crollo in più parti del muro paraonde posto a coronamento della diga marittima.

Il Laboratorio di Ingegneria Marittima (nel seguito detto LABIMA) è stato incaricato di eseguire studi su modello fisico in scala di laboratorio per la verifica della stabilità e dell'efficienza idraulica degli interventi previsti.

Con riferimento alle specifiche concordate con Ing. Gaggero e StudioElb Ingegneri Associati per il Committente in data 25-09-2019, gli studi su modello fisico hanno avuto i seguenti principali obiettivi:

- verifica della stabilità dei massi naturali della mantellata,
- misura della portata di tracimazione trasmessa oltre il muro paraonde,
- misura delle sollecitazioni d'onda sul muro paraonde.

In particolare, i seguenti dati sono stati forniti da Ing. Gaggero e StudioElb per il Committente:

- sezione rilevata, rilievo Drafinsub Survey del 27-11-2018, inviata in data 29-08-2019 ("**Sezione.dwg**"), (Figura 1);

I moti ondosi di prova (Tabella 1) e le configurazioni progettuali da testare Tabella 2), sono state definite a seguito della riunione con i suddetti professionisti ed il Committente presso il LABIMA in data 25-09-2019, sulla base anche dello "studio meteomarino al largo e propagazione a costa per la determinazione delle azioni di progetto della diga marittima di Cala Cravieu" redatto da LABIMA stesso;

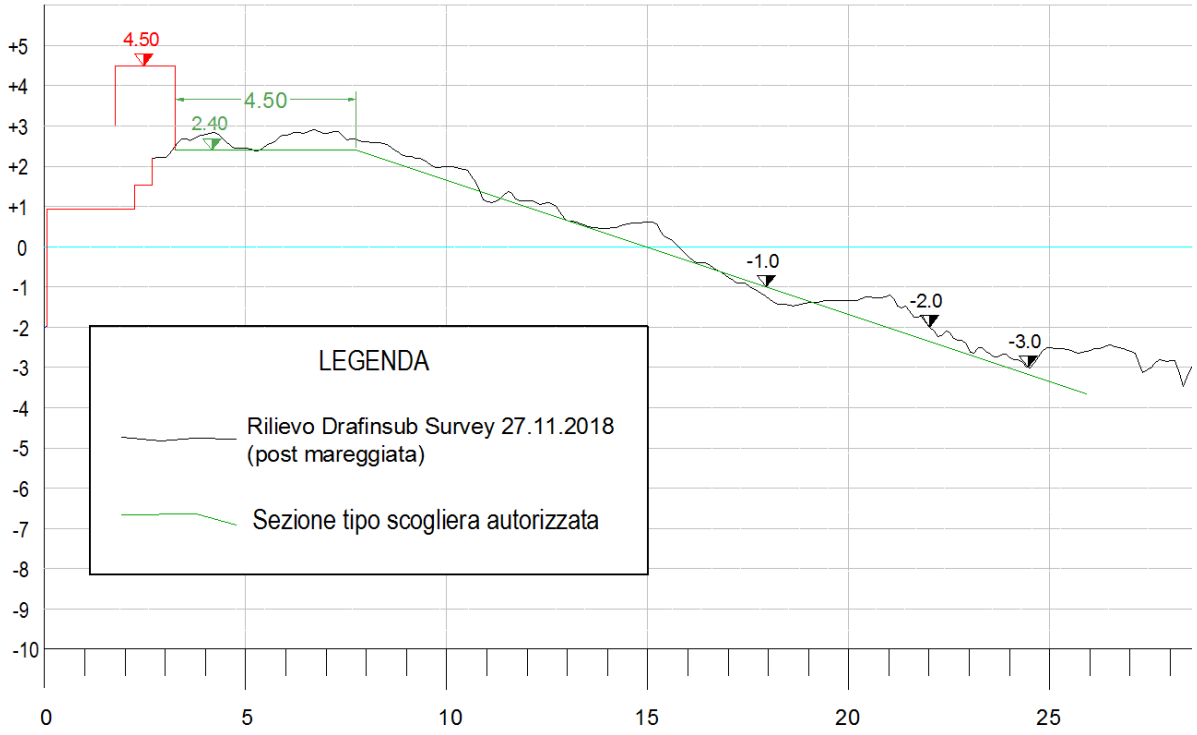


Figura 1 - Sezione rilevata e sezione tipo scogliera "Stato Attuale"

Tabella 1. Condizioni target di prova.

Test n°	Descrizione	Livello [m s.l.m.m.]	H_s [m]	T_p [s]
1	Onda 1 (o Tr100)	+1.00	4.1	12.0
2	Onda 2 (o Tr50)	+1.00	3.9	12.0
3	Onda 3	+1.00	3.5	12.0
4	Onda 4	+1.00	3.5	10.0
5	Onda 5	+1.00	3.0	13.0
6	Onda 6	+1.00	3.0	10.0

Tabella 2 - Configurazioni da testare

Configurazione	Descrizione
C0	"Stato Attuale": sezione scogliera come da rilievo fornito dal Committente, coronamento muro paraonde pari a +4.50 m s.l.m.m.
C1*	Sezione scogliera come da rilievo fornito dal Committente, coronamento muro paraonde pari a +5.00m s.l.m.m.
C2	Sezione scogliera come da rilievo fornito dal Committente, coronamento muro paraonde pari a +6.00m s.l.m.m.
C3*	Aggiunta di uno strato di massi naturali di IV categoria al di sopra della scogliera esistente fino ad una profondità di chiusura di circa -3.00m s.l.m.m.; estradosso della berma emersa pari a +3.80m s.l.m.m.; coronamento muro paraonde pari a +5.00m s.l.m.m..
C4	Come la configurazione C3 con l'aggiunta di un prolungamento al piede della struttura, con quota di estradosso alla -1.5m s.l.m.m. e larghezza di 4.2m.
C5*	Sezione scogliera come da rilievo fornito dal Committente, coronamento muro paraonde pari a +5.00m s.l.m.m; aggiunta di massi di IV categoria solo in corrispondenza della berma emersa (4 file).

*Queste configurazioni sono state testate anche ricostruendo le relative sezioni secondo un allineamento inclinato di 30° gradi rispetto alla direzione ortogonale all'asse longitudinale dell'opera (nel seguito C1_i, C3_i e C5_i).

1 OBIETTIVI E METODOLOGIA

Lo studio su modello fisico bidimensionale eseguito nel canale marittimo del LABIMA, il Laboratorio di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università di Firenze (www.labima.unifi.it) è stato finalizzato al conseguimento dei seguenti obiettivi:

1. Misura delle portate di overtopping a tergo della opera di difesa per le configurazioni concordate con il Committente (vedi Tabella 2);
2. Misura delle forze d'impatto orizzontali e del relativo centro di applicazione per le configurazioni concordate con il Committente.
3. Misura della stabilità dei massi della mantellata.

La metodologia di lavoro è stata suddivisa nelle fasi riportate in Tabella 3.

Tabella 3. Fasi Dei Test Di Laboratorio.

ALLESTIMENTO DEL SETUP SPERIMENTALE
• Definizione della scala geometrica di riproduzione dell'opera
• Realizzazione dei fondali dalla batimetrica dei -15.0m 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
• Costruzione della sezione tipo della diga attuale
• Ricerca onde
TEST SULLE CONFIGURAZIONI DEFINITE PER FRONTI D'ONDA ORTOGONALI LA DIGA
• Costruzione della configurazione C0
• Conduzione delle misure
• Modifica del muro paraonde per la realizzazione della configurazione C1
• Conduzione delle misure
• Modifica del muro paraonde per la realizzazione della configurazione C2
• Conduzione delle misure

• Modifica del muro paraonde e aggiunta di uno strato di massi di IV cat. per la realizzazione della configurazione C3
• Conduzione delle misure
• Modifica del piede della scogliera per la realizzazione della configurazione C4
• Conduzione delle misure
• Modifica della scogliera per la realizzazione della configurazione C5
• Conduzione delle misure
TEST SULLE CONFIGURAZIONI DEFINITE PER FRONTI D'ONDA INCIDENTI LA DIGA CON UN ANGOLO DI 30°
• Costruzione della configurazione C1_i per fronti d'onda inclinati
• Conduzione delle misure
• Modifica della scogliera con aggiunta di uno strato di massi di IV cat. per la realizzazione della configurazione C3_i per fronti d'onda inclinati
• Conduzione delle misure
• Modifica della scogliera per la realizzazione della configurazione C5_i per fronti d'onda inclinati
• Conduzione delle misure

2 L'APPARECCHIATURA SPERIMENTALE E LA METODOLOGIA

2.1 IL CANALE MARITTIMO

Il LABIMA - Laboratorio di Ingegneria Marittima presso il DICEA è dotato di un canale marittimo lungo 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 generatore 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 50cm - 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 -15m s.l.m., il fattore di scala ottimale per la costruzione del modello, concertato con il Committente, è stato individuato in 1:30.

$$n_L = {\lambda_m}/{\lambda_p} = {1}/{30}$$

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:

$$n_T = n_V = \sqrt{n_L} = \sqrt{{1}/{30}} = {1}/{5.48}$$

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 4 sono riportate le varie scale di riduzione adottate nel modello fisico.

Tabella 4. 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 problema principale nella determinazione della scala di riduzione degli elementi del nucleo è dovuto alla variabilità spaziale e temporale del gradiente idraulico e delle velocità attraverso gli interstizi. Il diametro del materiale del nucleo è scelto in funzione della velocità caratteristica del flusso idrico attraverso i pori, calcolata come la media spazio-temporale sui 6 punti indicati in Figura 3.

[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.*

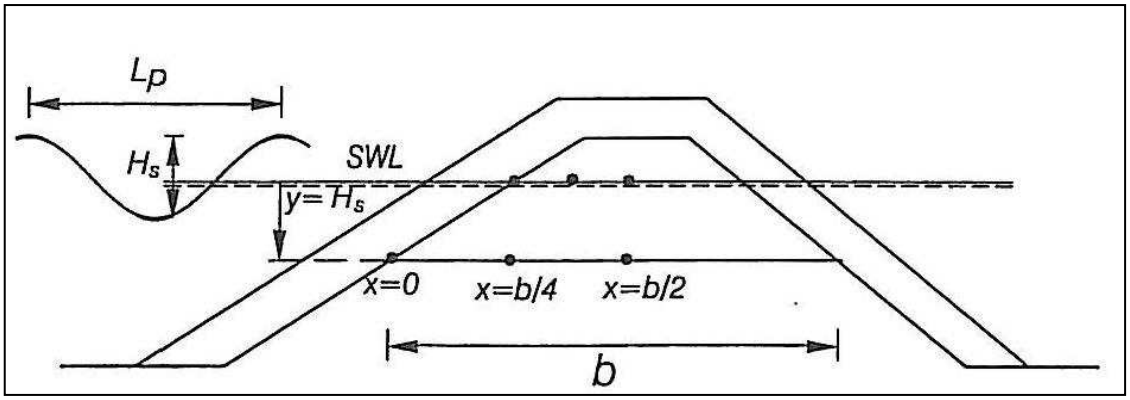


Figura 3: Localizzazione dei punti della velocità di filtrazione nel nucleo.

L'algoritmo implementato richiede i seguenti parametri in ingresso:

- Hs = altezza significativa incidente;
- Tp = periodo di picco;
- d = profondità al piede della struttura;
- n = grado di porosità dell'ammasso;
- λ = fattore di scala geometrica per i massi costituenti il nucleo nel modello;
- b0 = larghezza del nucleo in corrispondenza del livello medio marino;
- b1 = larghezza del nucleo alla profondità pari a Hs;
- D50 = diametro medio dei sedimenti nel prototipo.

Il gradiente di pressione e la velocità di filtrazione in punti e in tempi differenti sono stati calcolati attraverso le equazioni (1) e (2).

1. $I_x = \frac{1}{\rho g}\frac{dp(x,t)}{dx} = -\frac{\pi H_s}{L'}e^{-\delta\frac{2\pi}{L'}x}\left[\delta cos\left(\frac{2\pi}{L'}x + \frac{2\pi}{T_p}t\right) + sin\left(\frac{2\pi}{L'}x + \frac{2\pi}{T_p}t\right)\right]$
2. $I_x = \alpha\left(\frac{1-n}{n}\right)^2\frac{\nu}{gd_{50}^2}\left(\frac{U}{n}\right) + \beta\frac{1-n}{n}\frac{1}{gd_{50}}\left(\frac{U}{n}\right)^2$

Vista l'incertezza nella assunzione di precisi valori inerenti alle effettive caratteristiche di alcuni elementi caratterizzanti o costituenti l'opera in fase di realizzazione, la determinazione del fattore di scala per il nucleo è avvenuta variando alcuni dei parametri in ingresso.

È stata considerata la condizione rappresentativa d'onda incidente al piede dell'opera di difesa con parametri caratteristici Hs=4m e Tp=12s e in corrispondenza di tale condizione il parametro b1 è risultato pari a 12.7m.

Sono state effettuate inoltre simulazioni di calcolo al variare della porosità, n, dell'ammasso, fatta variare nel range 0.3÷0.5, al variare del diametro medio caratteristico dell'ammasso, facendo variare il D50 nel range 0.1÷0.6m ed infine al variare della tolleranza ammessa nella differenza delle velocità ottenute nel modello e nel prototipo, variandola tra 0.001m/s, 0.003m/s e 0.005m/s.

Per quanto concerne i coefficienti α e β da utilizzare nell'equazione 2 per il modello e per il prototipo sono stati utilizzati i valori tabellati da Burcharth and Andersen (1995). In particolare, per l'equazione nel modello sono stati utilizzati i parametri α=900 e β=2.5, caratteristici di condizioni di moto laminare e/o di transizione, mentre per l'equazione nel prototipo sono stati utilizzati α=0 e β=3,6 per condizioni di moto assolutamente turbolento. Nella Tabella 5, si riportano, le elaborazioni effettuate.

Tabella 5. Analisi di sensitività della scala da utilizzare per il nucleo dell'opera al variare dei parametri del modello di Burcharth et al. 1999.

b_0/b_1 [m]	D_{50} [m]	n	Scala (toll<0.005)	Scala (toll<0.003)	Scala (toll<0.001)
4.3/12.7	0.1	0.3	18.4	13.8	11.2
	0.2	0.3	23.9	19.7	16.7
	0.3	0.3	28.3	24.0	20.8
	0.4	0.3	30.0	27.3	23.9
	0.5	0.3	30.0	30.0	26.5
	0.6	0.3	30.0	30.0	28.6
4.3/12.7	0.1	0.4	18.7	16.3	14.4
	0.2	0.4	26.1	23.3	21.1
	0.3	0.4	30.0	28.0	25.4
	0.4	0.4	30.0	30.0	28.7
	0.5	0.4	30.0	30.0	30.0
	0.6	0.4	30.0	30.0	30.0
4.3/12.7	0.1	0.5	21.6	19.5	18.1
	0.2	0.5	29.6	27.1	25.4
	0.3	0.5	30.0	30.0	30.0

	0.4	0.5	30.0	30.0	30.0
	0.5	0.5	30.0	30.0	30.0
	0.6	0.5	30.0	30.0	30.0

Infine, il fattore di scala geometrico adottato per la riproduzione, nel modello di laboratorio, del nucleo costituente l'opera di difesa di Cala Cravieu è stato assunto pari a 1:25.

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 -15.0m posta a circa 350m dal piede della struttura. Dal piede della diga marittima posto ad una profondità di circa -5÷-6m s.l.m.m. fino alla batimetrica dei -15.0m s.l.m.m. è stata realizzata una rampa con pendenza variabile, il più possibile fedele al rilievo fornito dal Committente, mentre per la restante parte del canale è stato riprodotto un fondo orizzontale fino al generatore di moto ondoso.



Figura 4: 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 DELL'OPERA DI DIFESA ESISTENTE

I massi utilizzati per la riproduzione dei diversi strati costituenti l'esistente opera di difesa di Cala Cravieu sono stati selezionati mediante pesatura di un numero di campioni statisticamente rappresentativo di tutti gli elementi costituenti l'opera.

2.5.1 Massi naturali costituenti la mantellata

Lo strato della mantellata della diga risulta, dai dati forniti dal Committente, realizzata con massi di IV categoria con massi compresi tra 5t÷8t. Definito il fattore di scala geometrica del modello pari a 1:30, i massi selezionati per la realizzazione della berma emersa sono stati scelti in un range compreso tra 180gr÷300gr. In Figura 5 si riportano i grafici che si riferiscono all'analisi granulometrica effettuata su un campione di circa 125 massi presi a caso tra quelli utilizzati.

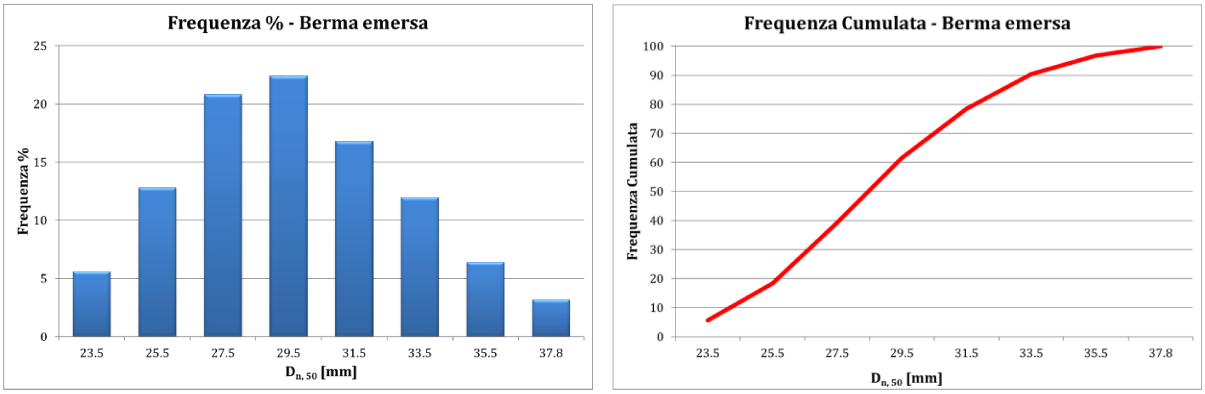


Figura 5: Berma emersa: Frequenza % e Frequenza Cumulata.

2.5.2 Massi naturali costituenti il filtro

Lo strato filtro della sezione in progetto è realizzato con massi naturali di II categoria, con peso compreso tra 1t e 3t. I massi utilizzati per la realizzazione del modello dello strato filtro sono stati scelti in un range compreso tra 36g÷108g.

In Figura 6 si riportano i grafici relativi all'analisi granulometrica effettuata su un campione di circa 600 massi presi a caso tra quelli utilizzati.

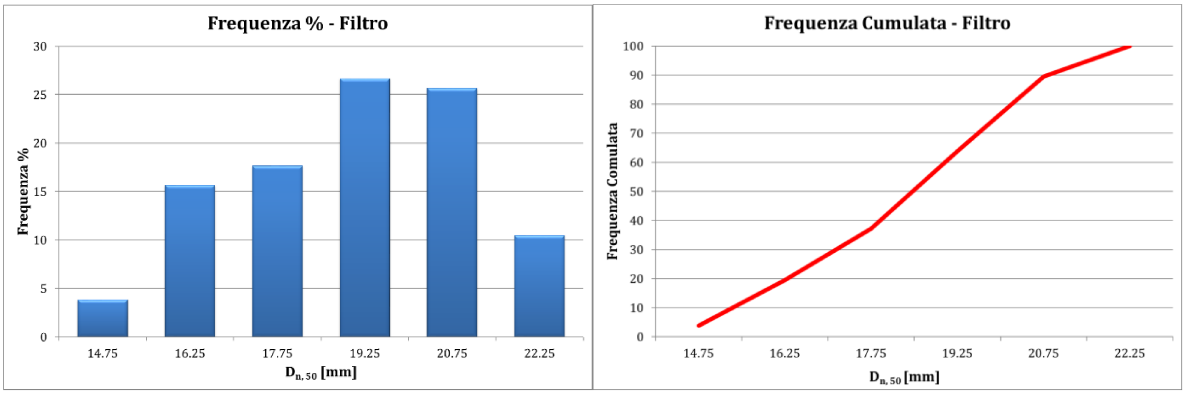


Figura 6 - Filtro: Frequenza % e Frequenza Cumulata.

2.5.3 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 1:25. Il tout-venant di cava simulato è stato dunque realizzato con massi compresi in un range 2g÷14g.

Sono stati pesati circa 1000 massi presi a caso tra quelli utilizzati, di cui si riporta l'analisi granulometrica in Figura 7.

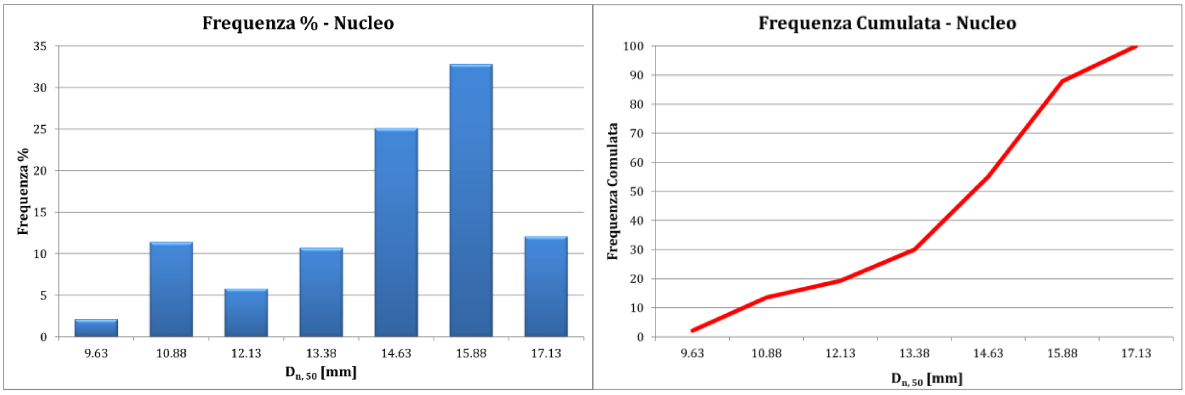


Figura 7 - Nucleo: Frequenza % e Frequenza Cumulata.

2.6 COSTRUZIONE DELLA SEZIONE DELLA DIGA ATTUALE

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 8 è riportata la documentazione fotografica, relativa a tutte le fasi di costruzione della sezione della diga di Cala Cravieu in Celle Ligure.

Le quote dell'estradosso del muro paraonde, della berma emersa in corrispondenza del muro paraonde e della berma emersa in corrispondenza dello spigolo 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).



Figura 8: Costruzione della sezione della diga attuale.

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 9) e permettono di misurare variazioni della posizione della superficie libera con ripetibilità della misura di ±1mm (±4.0cm 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.



OUTPUT	TERMINATION	REFERENCE
0-10 V	Connector	943-F4V-2D-1C0-300E
0-10 V	Cable	943-F4Y-2D-1C0-300E
4-10 mA	Connector	943-F4V-2D-1D0-300E
4-20 mA	Cable	943-F4Y-2D-1D0-300E

Max. sensing distance:	500 mm
Min. sensing distance:	60 mm
Switching frequency:	100 ms
Repeatability:	0,2 % or ±1 mm

OUTPUT	TERMINATION	REFERENCE
0-10 V	Connector	943-F4V-2D-1C0-330E
0-10 V	Cable	943-F4Y-2D-1C0-330E
4-10 mA	Connector	943-F4V-2D-1D0-330E
4-20 mA	Cable	943-F4Y-2D-1D0-330E

Figura 9 - 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 Sensori di livello di tipo resistivo

In parallelo alle sonde del tipo ad ultrasuoni sono state installate in canale delle sonde di livello di tipo resistivo, al fine di avere una misura ridondante delle altezze d'onda misurate in canale.

Le sonde di tipo resistivo (vedi Figura 10) forniscono una misura in Volt da convertire in unità metriche, tramite una relazione lineare del tipo:

$$\eta = V_0 + kV$$

dove η è la misura dell'oscillazione della superficie libera [cm]; V è la misura dell'oscillazione della superficie libera [Volt]. La calibrazione delle sonde è verificata quotidianamente prima dell'inizio delle prove, tramite taratura delle stesse.

La sensibilità delle sonde nella misura statica di livello è pari a 0.2mm (±0.8cm a scala del prototipo).

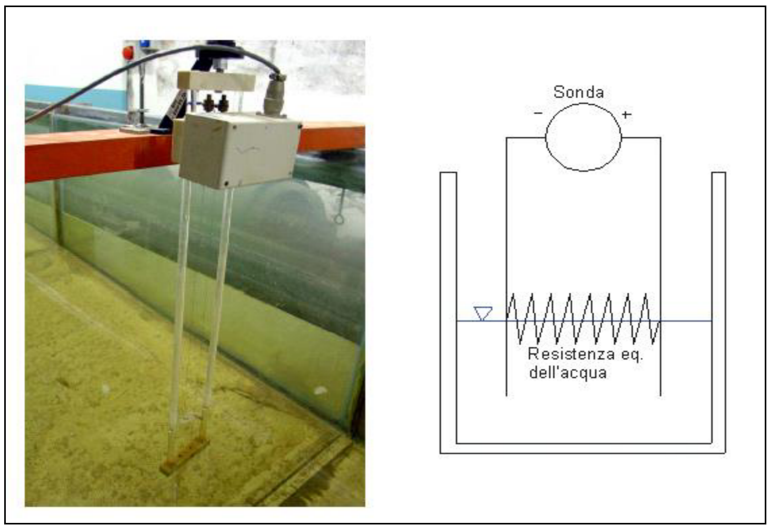


Figura 10 - Sonda resistiva e schema elettrico corrispondente.

2.7.3 Celle di carico per la misura dell'overtopping

La misura delle forze impattanti sul muro e la misura dell'overtopping a tergo di esso sono state effettuate realizzando un sistema di raccolta della portata tracimante.

L'acqua incanalata sullo scivolo viene convogliata in un cassone di raccolta alla base del quale sono installate 4 celle di carico del tipo bending moment (Figura 11), che acquisiscono in continuo il peso delle tracimazioni oltre il muro paraonde.



Figura 11 – Cella di Carico - CELMI TIPO 54.

Le celle di carico utilizzate hanno sensibilità pari a 35gr, fondo scala di 100kg e carico di rottura pari a 150kg.

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

Caratteristiche Elettriche			
Uscita Nominale	Cn	mV/V	2
Tolleranza dell'uscita nominale	Dc	±%Cn	0,1
Tensione di alimentazione nominale	Bsu	V	1÷12
Tensione di alimentazione massima	Usmax	V	15
Resistenza di ingresso	Re	Ω	390±10%
Resistenza di uscita	Ra	Ω	350±1%
Resistenza di isolamento @ 20V	Ris	MW	>2000
Tolleranza uscita a carico zero	Do	±%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	°C	-40+80
Campo temperatura di stoccaggio	Bts	°C	-40+80
Grado di protezione			IP 66/68

Figura 12 - Caratteristiche metrologiche, elettriche, meccaniche e ambientali - Celle di Carico a flessione CELMI TIPO 54.

2.7.4 Piezometri

La valutazione del sovralzo del livello medio marino indotta dal frangimento delle onde a ridosso della mantellata della diga è stata eseguita tramite l'installazione di 6 prese piezometriche, a partire dal piede della struttura per finire a tergo del muro paraonde nella zona corrispondente alla banchina lato porto (Figura 13). Ciascuna presa piezometrica è stata collegata ad un piezometro esterno.



Figura 13 - Strumentazione dei piezometri 4, 5 e 6.

2.7.5 Videocamera

La stabilità degli elementi costituenti la mantellata della diga è stata valutata mediante riprese video effettuate dall'alto per l'intera durata dei test. Inoltre, con lo scopo di fornire una misura quantitativa dei massi movimentati, sono state realizzate, sempre dall'alto una foto prima di ogni singolo test e alla fine dello stesso. Per le riprese video e le foto è stata utilizzata una videocamera SONY HDR-CX 405.



Figura 14 - Videocamera SONY HDR-CX 405.

2.8 DEFINIZIONE DELLE ONDE E DEI LIVELLI DI PROVA

2.8.1 Attacchi ondosi

In canale sono stati simulati un totale di 6 attacchi ondosi irregolari concordati con la committenza e i suoi tecnici Ing. Gaggero e Studioelb Ingegneri associati, e individuati anche sulla base delle risultanze dello studio meteomarino.

In particolare, in considerazione dell'interazione dei moti ondosi con i bassi fondali antistanti l'opera di difesa (circa 5-6 metri), è stato scelto di eseguire prove con l'onda con tempo di ritorno Tr=100 anni, l'onda con tempo di ritorno Tr=50 anni e con moti ondosi di intensità via via decrescente. Il moto ondoso relativo alla mareggiata del 29 Ottobre 2018 è risultato avere altezza significativa, sui fondali al piede della scogliera, praticamente pari a quella dei moti ondosi con Tr=100 anni. I moti ondosi 100-ennali e 50-ennali che si formano davanti all'opera sono tipo "broken waves" e per questo hanno altezza significativa praticamente uguale e pari alla massima possibile sui fondali antistanti l'opera. Inoltre, in questa condizione di fondali relativamente bassi, anche se i moti ondosi al largo avessero una maggiore altezza significativa questi si ridurrebbero sempre ai valori uguali a quelli dell'evento con tempo di ritorno 50-ennale o 100-ennale e per questo non è necessario provare condizioni di moto ondoso al largo ancora più energetiche.

2.8.2 Sovralzo

Gli attacchi ondosi sono stati riprodotti su un livello di sovralzo del mare pari a 1m al fine di tenere conto dei fenomeni di sovralzo barico, sovralzo di marea e wind surge. Il wave set-up, invece, avviene nel modello analogamente a quanto accade nella realtà ed è stato misurato durante i test.

2.8.3 Condizioni di prova

Una volta scelta la scala di riproduzione del modello, è stata effettuata la ricerca onde in canale per la definizione dei parametri caratteristici alla generazione (vedi Tabella 6).

Tabella 6. – Parametri caratteristici target in scala prototipo e modello, delle condizioni di prova per i test su overtopping e stabilità.

ONDA	Prototipo			Modello		
	H_s [m]	T_p [s]	sopralzo [m]	H_s [cm]	T_p [s]	sopralzo [cm]
H01 – Tr100	4.1	12.0	1.0	13.67	2.19	+3.33
H02 – Tr50	3.9	12.0	1.0	13.00	2.19	+3.33
H03	3.5	12.0	1.0	11.67	2.19	+3.33
H04	3.5	11.0	1.0	11.67	2.00	+3.33
H05	3.0	13.0	1.0	10.00	2.37	+3.33
H06	3.0	10.0	1.0	10.00	1.83	+3.33

La misura delle onde è stata effettuata strumentando il canale marittimo con 5 sonde di livello di tipo ultrasonico (WG#) e 4 sonde di livello di tipo resistivo (WG#r) configurate con una frequenza di campionamento pari a 1000Hz e posizionate come mostrato in Figura 15 (vedi ALLEGATO A).

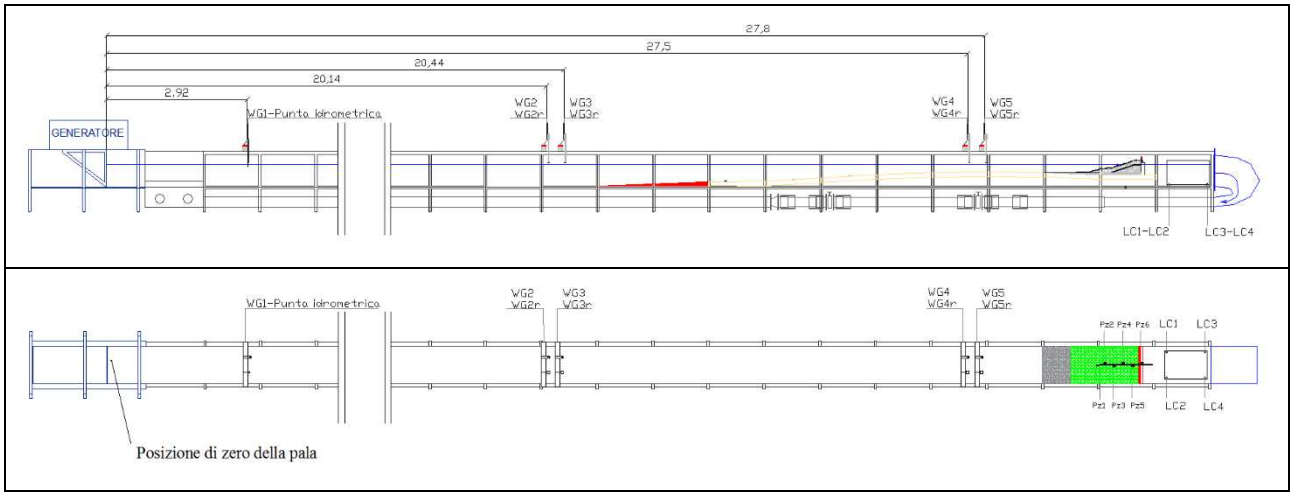


Figura 15 – Setup del canale marittimo per le prove sull'opera di difesa di Cala Cravieu in Celle Ligure.

In Tabella 7 sono riportate le distanze di ciascun sensore (in scala modello e in scala prototipo) rispetto al generatore di moto ondoso.

Tabella 7 - Disposizione in canale delle sonde di livello

NOME	Scala del modello	Scala del prototipo		
	Distanza dal Wave Maker [m]	Distanza dal Wave Maker [m]	Distanza dal piede della diga [m]	Fondale [m]
WG1	2.92	87.6	861.9	15.00
WG2	20.14	604.2	345.3	15.00
WG2r	20.14	604.2	345.3	15.00
WG3	20.44	613.2	336.3	15.00
WG3r	20.44	613.2	336.3	15.00
WG4	27.50	825.0	124.5	6.00
WG4r	27.50	825.0	124.5	6.00
WG5	27.80	834.0	115.5	6.00
WG5r	27.80	834.0	115.5	6.00

All'inizio di ogni giornata di prova le sonde resistive sono state calibrate, impostando i parametri riportati in Tabella 8 ed elaborando i risultati ottenuti come mostrato in Figura 16.

Tabella 8: Parametri di taratura delle sonde resistive

NOME		Posizionamento Asta Graduata		
	Range Taratura [cm]	Cavo [cm]	Cresta [cm]	Zero [cm]
WG2r	30	40	10	25
WG3r	30	40	10	25
WG4r	18	40	22	31
WG5r	18	41	23	32

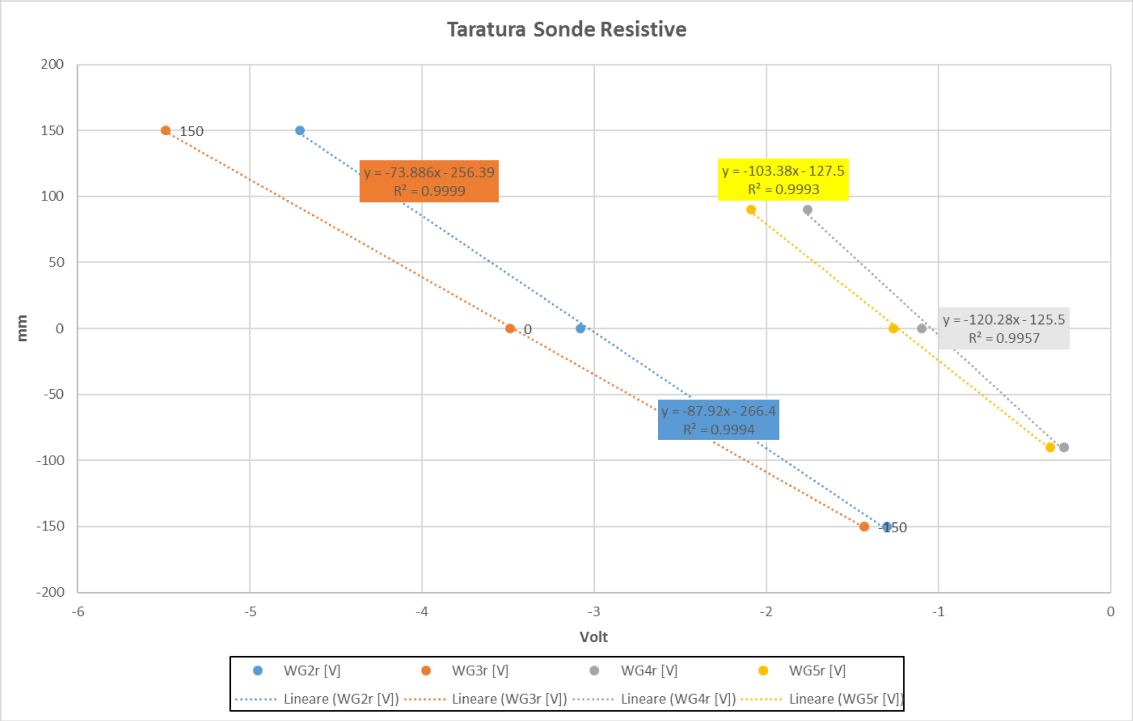


Figura 16 – Esempio di taratura delle sonde resistive (effettuata il giorno 18/10/2019).

In Figura 17 si riporta, a titolo di esempio, la serie temporale degli spostamenti del wavemaker per l'attacco ondoso denominato H02 (Tr50).

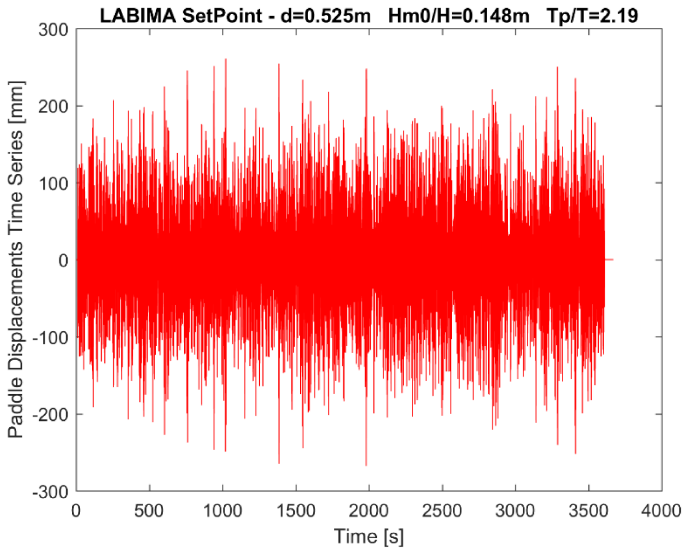


Figura 17 - Serie temporale degli spostamenti del wavemaker relativa all'attacco ondoso H02 (Tr50), (durata 1h in scala modello).

L'utilizzo di sonde di livello distribuite lungo il canale ha permesso di misurare i moti ondosi e i livelli medi della superficie del mare durante le condizioni di prova, con particolare attenzione alla zona d'interesse progettuale. 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 18 si riporta un esempio di analisi eseguita per i dati registrati alla sonda WG3.

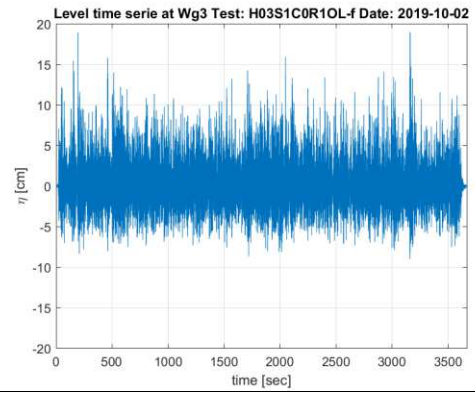
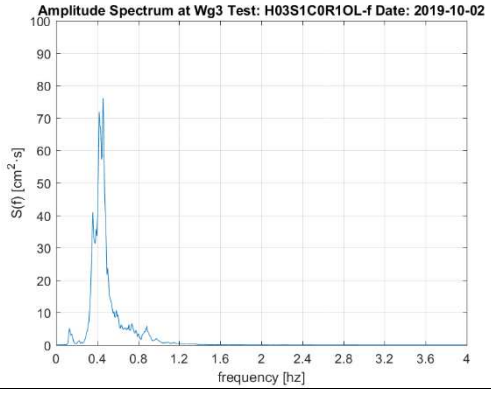
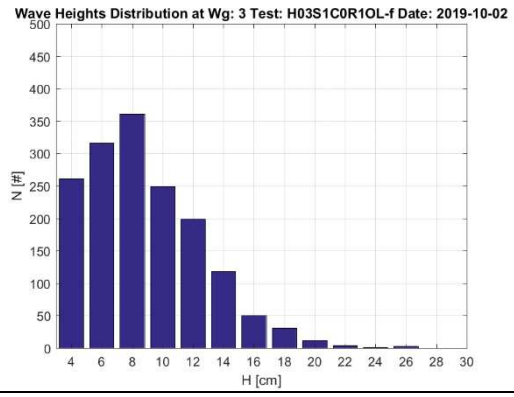
a) Serie temporale delle altezze d'onda	
b) Spettro in frequenza delle altezze d'onda	
c) Istogramma di frequenza delle altezze d'onda	

Figura 18 - Elaborazioni grafiche ottenute dall'analisi dei dati acquisiti per la configurazione C0 alla sonda WG3, sia nel dominio del tempo sia nel dominio della frequenza per l'onda H03.

La misura delle onde incidenti al piede della barriera lato mare è stata condotta mediante 2 sonde ultrasoniche (WG3 e WG4) installate a distanza opportuna l'una dall'altra (30.0cm) e 2 sonde resistive (WG3r e WG4r) in posizione parallela alle ultrasoniche. 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.

Il metodo in questione appartiene ai metodi che operano nel campo dell'analisi del dominio della frequenza ed ha lo scopo di conoscere la distribuzione dell'energia associata a ciascuna onda rispetto alla frequenza (f=1/T).

Condizioni fondamentali per l'attuazione di tale metodo sono:

- che la superficie del mare sia considerata come il risultato della sovrapposizione di infinite onde sinusoidali, di ampiezze, lunghezze e periodi differenti. La sommatoria che meglio si adatta a tale procedura è la rappresentazione in serie di Fourier:

$$\eta(t) = \sum_{\eta=1}^{N} a_n \cos(k_n x - \omega_n t + \phi_n)$$

dove, il numero d'onda $k=2\pi/L$ descrive la periodicità nello spazio, la frequenza angolare $\omega=2\pi/T$ descrive la periodicità nel tempo e ϕ è la fase all'istante iniziale;

- che ogni onda componente la serie si muova con una propria velocità di fase (C). Per definizione la velocità di fase è data dal rapporto tra L e T oppure dal rapporto di ω e k. Se ad essa si sostituisce la relazione di dispersione $\omega^2=gk*tanh(kd)$ ottenuta dalla teoria lineare di Airy, si ottiene che tale velocità sia uguale a:

$$C^2 = \frac{g}{k}\tanh(kd)$$

dove *d* rappresenta la profondità del fondale.

Dunque, quando il moto ondoso generato da un *wavemaker* incontra un ostacolo, si genera un treno di onde riflesse che si propagherà in direzione opposta e di conseguenza il profilo dell'onda registrato nello stesso istante di tempo, da due sonde addicenti in posizione x1 e x2 poste ad una distanza Δx, sarà dato dalla somma delle due componenti:

$$\eta_i = a_i \cos(kx_1 - \omega t + \phi_i) + a_r \cos(kx_1 - \omega t + \phi_r)$$
$$\eta_r = a_i \cos(kx_2 - \omega t + \phi_i) + a_r \cos(kx_2 - \omega t + \phi_r)$$

Le due equazioni precedenti possono essere riscritte anche nel modo seguente:

$$\eta_1 = A_1 \cos(\omega t) + B_1 \sin(\omega t)$$
$$\eta_2 = A_2 \cos(\omega t) + B_2 \sin(\omega t),$$

dove:

$$A_1 = a_i \cos(kx_1 + \phi_i) + a_r \cos(kx_1 + \phi_r)$$
$$B_1 = a_i \sin(kx_1 + \phi_i) + a_r \sin(kx_1 + \phi_r)$$
$$A_2 = a_i \cos(k\Delta x + kx_1 + \phi_i) + a_r \cos(k\Delta x + kx_1 + \phi_r)$$
$$B_2 = a_i \sin(k\Delta x + kx_1 + \phi_i) + a_r \sin(k\Delta x + kx_1 + \phi_r).$$

Risolvendo il suddetto sistema di equazioni, utilizzando la relazione di dispersione, è possibile ottenere l'ampiezza della componente incidente e di quella riflessa nel modo seguente:

$$a_i = \frac{1}{2|\sin(k\Delta x)|}\left[A_2 - A_1 \cos(k\Delta x) - B_1 \sin(k\Delta x)\right] + \left[B_2 + A_1 \sin(k\Delta x) - B_1 \cos(k\Delta x)\right]$$

$$a_r = \frac{1}{2|\sin(k\Delta x)|}\left[A_2 - A_1 \cos(k\Delta x) + B_1 \sin(k\Delta x)\right] + \left[B_2 - A_1 \sin(k\Delta x) - B_1 \cos(k\Delta x)\right]$$

Tramite l'analisi di Fourier è possibile dunque stimare i coefficienti A1, A2, B1 e B2 per tutte le frequenze in cui si può scomporre lo stato di mare; noti tali valori, è possibile risalire all'ampiezza dell'onda riflessa e dell'onda incidente e infine calcolare il coefficiente di riflessione.

Il metodo fallisce, fornendo valori di K_r prossimi all'unità, quando la distanza fra le due sonde (Δx) presenta valori prossimi a multipli interi di una semi lunghezza d'onda:

$$\Delta x/L = n/2 \qquad \text{con } n=0, 1, 2, \ldots$$

Goda e Suzuki, inoltre, raccomandano di restringere l'analisi delle componenti spettrali all'intervallo di lunghezze d'onda:

$$0.05 < \Delta x/L < 0.45$$

Ciò vuol dire che la frequenza spettrale minima e quella massima adottabili affinché potranno ritenersi affidabili i valori di altezza d'onda incidente e riflessa desunti col metodo, deriveranno dalle seguenti uguaglianze:

$$L(f_{min}) = \Delta x/0.05$$

$$L(f_{max}) = \Delta x/0.45$$

2.9 MISURA DEL SOVRALZO E ANALISI DEL WAVE SET-UP

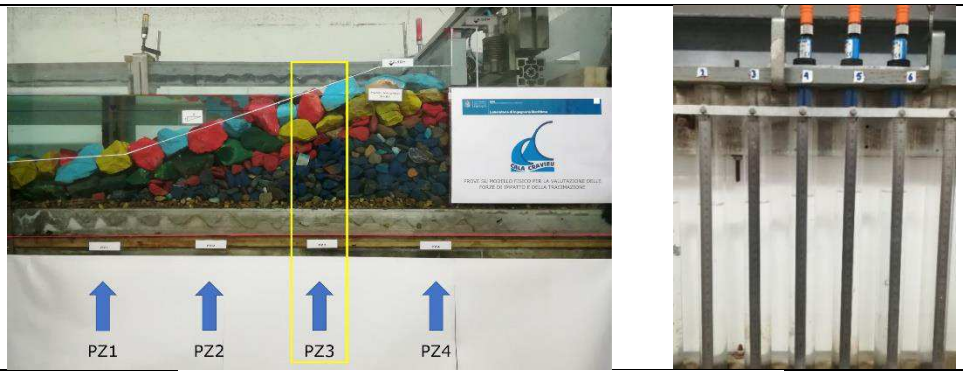
L'analisi dell'andamento del wave set-up è stata effettuata mediante l'installazione di 4 piezometri e monitorando in continuo il livello idrico durante le prove mediante 4 sonde di tipo ultrasonico come riportato in Figura 19. In Tabella 9 sono riportate le posizioni dei piezometri utilizzati durante i test.

Tabella 9: Distanze dei piezometri (PZ-).

NOME	Distanze progressive dal piede della scogliera [cm]	Distanza dalla pala battionde [m]
PZ1	+45.0	32.22
PZ2	+65.0	32.42
PZ3	+85.0	32.62
PZ4	+105.0	32.82

In particolare, per la definizione del sovralzo davanti al muro sono state utilizzate le misure acquisite al piezometro PZ3 localizzato in corrispondenza del margine lato mare della berma emersa.

a)



b)

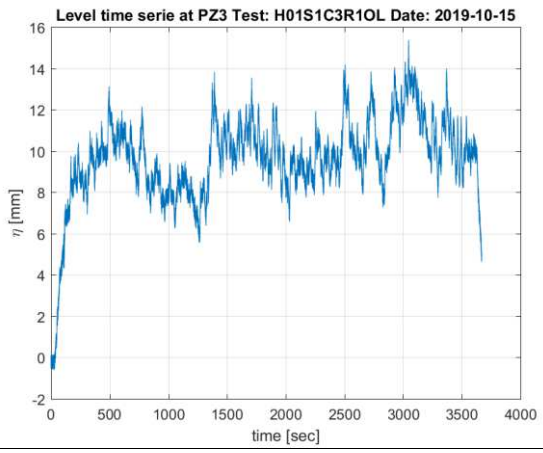


Figura 19 – a) Piezometro di riferimento per la definizione del sovralzo davanti al muro; b) Esempio di misura dei livelli di wave set-up acquisiti.

Per l'analisi dei livelli è stato inoltre scelto di escludere la fase transitoria iniziale di durata 10min e di calcolare il valore medio dei restanti 50min di prova per ciascun piezometro installato.

3 TEST PER FRONTI D'ONDA ORTOGONALI ALL'OPERA DI DIFESA

L'obiettivo di questa fase sperimentale è stato quello di misurare le portate tracimanti a tergo del muro paraonde, la stabilità degli elementi della mantellata e le forze di impatto sul muro paraonde per le configurazioni concordate con il Committente e i progettisti incaricati per fronti d'onda incidenti ortogonalmente la diga foranea.

Ogni configurazione studiata è stata testata sotto l'azione dei moti ondosi con tempo di ritorno 50 e 100 anni (rispettivamente H01 e H03). I restanti moti ondosi, i.e. H03, H04, H05 e H06 sono stati testati a partire dal più energetico e fino e quello meno energetico che comunque dava luogo a tracimazioni dell'opera.

Le misure sono state condotte riproducendo attacchi ondosi della durata di 1800 periodi d'onda (Tabella 11), corrispondenti a circa 3 ore in scala prototipo.

3.1 CONFIGURAZIONE C0

La configurazione C0 (Figura 20) rappresenta la sezione dello "stato attuale" ricostruita seguendo il rilievo fornito dal Committente.

Il muro paraonde ha sommità a quota +4,50 m s.l.m.m. e la quota di sommità della berma emersa è pari a +2.40 m s.l.m.m..

CONFIGURAZIONE C0: sezione tipo dello "stato attuale"	
	
• Coronamento muro paraonde → +4.50m s.l.m. • Quota del piano della berma emersa → +2.40m s.l.m. • Pendenza paramento alto mare della scogliera → 1:3 • Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.	

Figura 20 – Sezione della configurazione C1.

3.1.1 Misura delle onde e wave set

La definizione dei parametri caratteristici degli attacchi ondosi riprodotti in laboratorio è avvenuta mediante analisi dei segnali acquisiti condotta sia nel dominio del tempo che nel dominio della frequenza. In particolare, si riportano in Tabella 10 i parametri caratteristici misurati alle coppie di sonde posizionate su fondali di 6m (WG4-WG5 e WG4r-WG5r). Inoltre, si riporta anche il valore del wave set-up misurato tramite piezometro PZ3 di Figura 19.

Tabella 10 - Parametri caratteristici e wave set-up misurati - configurazione C0

C0	Hm0 [m]	Hmax [m]	Hs,i [m]	H1/3 [m]	Tp [s]	T1_3 [s]	wave set-up [m]
H01 – Tr100	4.3	9.0	4.2	4.4	12.4	12.1	0.27
H02 – Tr50	4.0	9.1	3.9	4.0	12.4	12.1	0.25
H03	3.7	8.0	3.5	4.3	11.8	12.0	0.20
H04	3.6	8.9	3.4	3.5	11.1	11.0	0.19
H05	3.0	8.2	2.8	2.8	13.0	13.0	0.15
H06	3.0	6.1	3.0	2.8	10.1	10.0	0.12

***H_{m0}=altezza significativa spettrale ($H_{m0}=4*\sqrt{m0}$, dove m0 è il momento di ordine zero dello spettro in frequenza); H_{max}= massima altezza "zero-crossing"; $H_{s,i}$=altezza significativa incidente (i.e. decurtata della componente riflessa); $H_{1/3}$=altezza media del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; T_p=periodo di picco; $T_{1/3}$=periodo medio del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; wave set-up=sovralzo del mare indotto dal frangimento delle onde sulla struttura.**

3.1.2 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C0

La misura dell'overtopping a tergo del muro paraonde è stata effettuata per mezzo di un sistema di raccolta della portata tracimante (Figura 21).

Sull'estradosso del muro paraonde è stato collocato uno scivolo di raccolta dell'acqua tracimante in posizione centrata e con larghezza di 20 cm; l'acqua incanalata sullo scivolo viene convogliata in un cassone di raccolta alla base del quale sono installate 4 celle di carico (LC1-LC4), (vedi Figura 11 e Figura 12 per le caratteristiche tecniche), che acquisiscono in continuo il peso delle tracimazioni oltre il muro paraonde. Per la valutazione delle tracimazioni a tergo del muro paraonde sono stati sommati istante per istante i valori registrati alle 4 celle di carico poste sotto il cassone di raccolta localizzato dietro al muro (vedi ALLEGATO B).



Figura 21 – Posizione dell'apparato di misura dell'overtopping a tergo del muro per la configurazione C0.

Tabella 11: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C0

ONDA	Onde tracimanti	Percentuale onde tracimanti [%]	Portate di Tracimazione [l/s/m]
H01 – Tr100	71	3.8	**5.9**
H02 – Tr50	43	2.4	**2.7**
H03	25	1.4	**2.2**
H04	11	0.6	**0.4**
H05	11	0.7	**0.4**
H06	0	0.0	**0.0**

3.1.3 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C0

Per una valutazione della stabilità dei massi costituenti la mantellata è stata effettuata una analisi comparativa mediante foto realizzate prima e dopo gli attacchi ondosi.

L'analisi comparativa non ha evidenziato movimenti dei massi costituenti della mantellata che è risultata stabile. In Figura 22, a titolo di esempio, sono riportate le foto realizzate prima e dopo l'attacco ondoso H01 - Tr100.

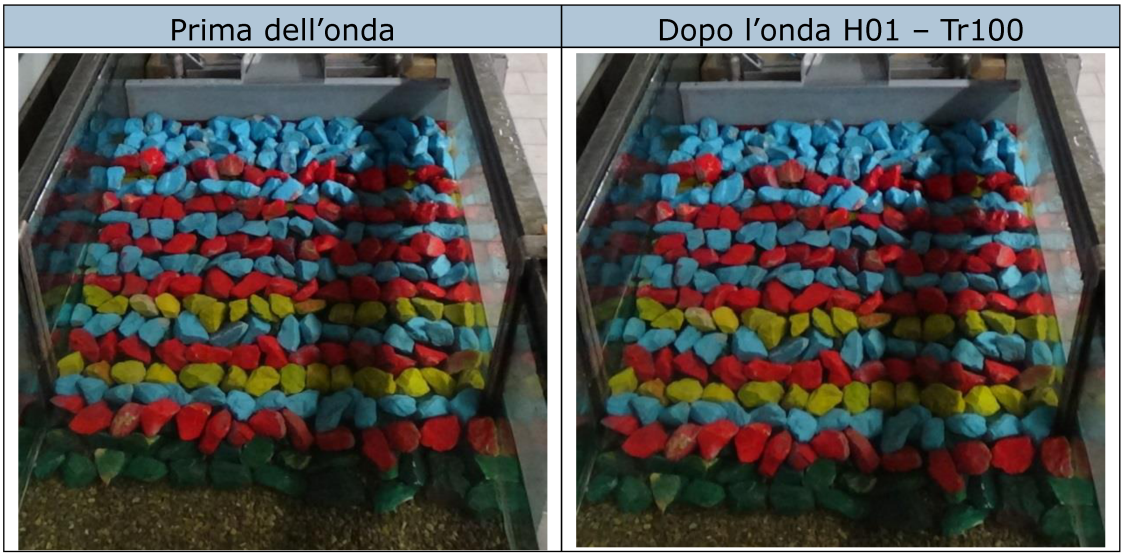


Figura 22 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C0, prima e dopo la condizione H01 – Tr100.

3.1.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C0

La misura degli impatti sul muro paraonde previsto per la prima ipotesi di intervento (configurazione C0) sono state eseguite mediante l'utilizzo di tre celle di carico tipologia *bending moment* (vedi Figura 11). I centri di applicazione delle forze di impatto registrate sono stati calcolati a partire dal piano di banchina posizionato a quota +1.00m s.l.m.m. I momenti sono stati calcolati sulla base della misura delle componenti di forza e dei rispettivi bracci di applicazione delle forze vincolari e riferiti al polo di rotazione individuato dall'intersezione tra il muro paraonde ed il piano di banchina a +1.00m s.l.m.m..

In Tabella 12 e Tabella 13 si riportano rispettivamente i risultati dall'analisi statistica delle componenti orizzontali degli impatti sul muro e dei relativi momenti per le condizioni d'onda relative a tempi di ritorno di 100 e 50 anni. Vengono riportati i valori

della forza d'impatto massima registrata (F_{max}), la media dei 3 impatti più grandi ($F_{_3}$) e la media dei primi 10 impatti ($F_{_10}$).

Infine, in Tabella 14 vengono riportati il numero degli impatti registrati sopra il valore di soglia utilizzato, pari a 3t/m.

Tabella 12 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C0

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	54.9	44.5	32.7
Centro di applicazione relativo [m]	2.2	2.0	2.0
Momento corrispondente [t m/m]	120.8	89.0	65.4

Tabella 13 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C0

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	35.3	33.2	24.7
Centro di applicazione relativo [m]	2.4	2.1	2.1
Momento corrispondente [t m/m]	84.7	69.7	51.9

Tabella 14 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m

Attacco ondoso	N impatti sopra soglia
H01 – Tr100	328
H02 – Tr50	241

3.2 CONFIGURAZIONE C1

La configurazione C1 (Figura 23) rappresenta la prima ipotesi di intervento concordata con il Committente. La modifica rispetto alla configurazione C0 consiste nell'elevazione del muro paraonde, con coronamento pari a quota +5.00m s.l.m.m.

CONFIGURAZIONE C1: sezione tipo della prima ipotesi d'intervento	
	
• Coronamento muro paraonde → +5.00m s.l.m. • Quota dle piano della berma emersa → +2.40m s.l.m. • Pendenza del apramento lato mare della scogliera → 1:3 • Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.	

Figura 23 – Sezione della configurazione C1.

3.2.1 Misura delle onde e wave set

In Tabella 15 si riportano per la configurazione C1 i parametri caratteristici degli attacchi ondosi riprodotti in canale e il wave set-up misurato al piezometro di riferimento.

Tabella 15 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C1

C1	Hm0 [m]	Hmax [m]	Hs,i [m]	H1/3 [m]	Tp [s]	T1_3 [s]	wave set-up [m]
Tr100	4.4	9.4	4.2	4.5	12.6	12.1	0.28
Tr50	4.0	8.5	4.1	4.1	12.6	12.0	0.25
Onda 3	3.6	7.8	3.5	3.5	11.8	12.0	0.20
Onda 4	3.5	8.7	3.4	3.4	11.1	11.0	0.20
Onda 5	3.1	6.6	3.0	2.9	13.1	13.1	0.15
Onda 6	3.0	6.7	3.0	2.9	10.1	10.0	0.13

***H_{m0}=altezza significativa spettrale (H_{m0}=4*√m0, dove m0 è il momento di ordine zero dello spettro in frequenza); H_{max}= massima altezza "zero-crossing"; $H_{s,i}$=altezza significativa incidente (i.e. decurtata della componente riflessa); $H_{1/3}$=altezza media del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; T_p=periodo di picco; $T_{1/3}$=periodo medio del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; wave set-up=sovralzo del mare indotto dal frangimento delle onde sulla struttura.**

3.2.2 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C1

Per una valutazione della stabilità dei massi costituenti la mantellata è stata effettuata una analisi comparativa mediante foto realizzate prima e dopo gli attacchi ondosi.

L'analisi comparativa non ha evidenziato movimenti dei massi costituenti della mantellata che è risultata stabile. In Figura 24, a titolo di esempio, sono riportate le foto realizzate prima e dopo l'attacco ondoso H01 - Tr100.

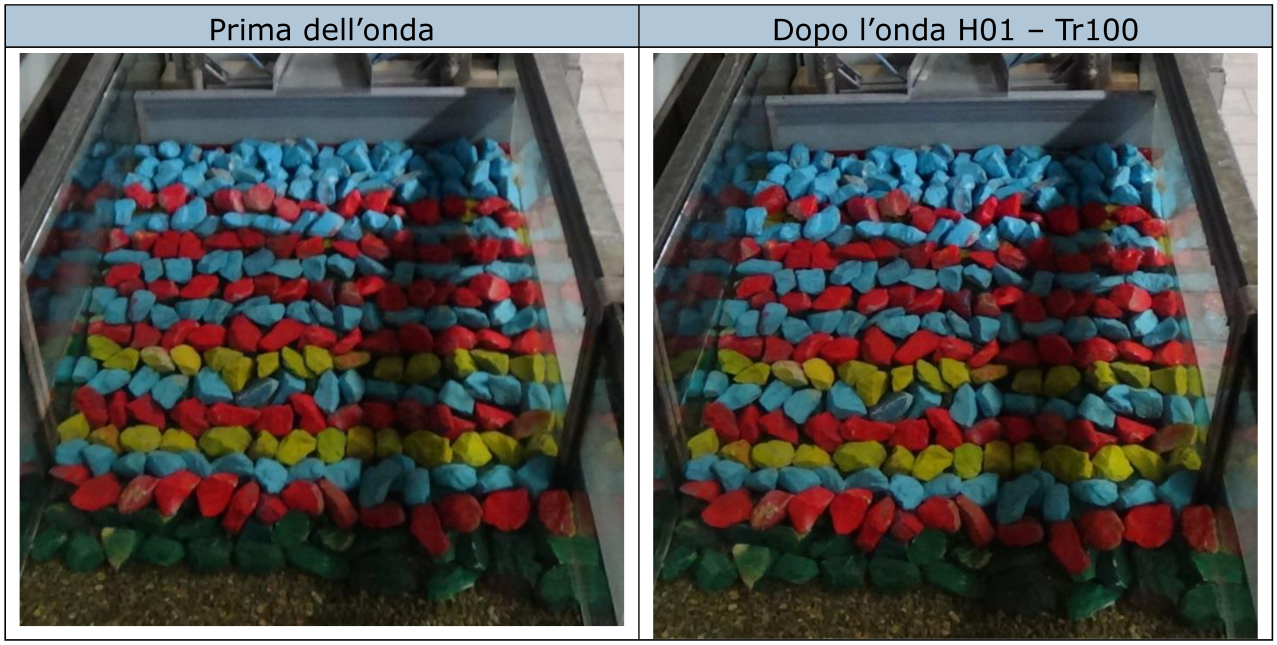


Figura 24 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C1, prima e dopo la condizione H01 – Tr100.

3.2.3 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C1

La misura dell'overtopping a tergo del muro paraonde è stata effettuata tramite il sistema di raccolta della portata tracimante (Figura 21).

In Tabella 16 si riportano il numero di tracimazioni registrate, la percentuale di onde tracimanti ed il valore della portata media di overtopping per gli attacchi ondosi simulati per la configurazione C1.

Tabella 16: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C1

ONDA	Onde tracimanti	Percentuale onde tracimanti [%]	Portate di Tracimazione [l/s/m]
H01 – Tr100	40	2.2	**2.6**
H02 – Tr50	22	1.2	**1.3**
H03	15	0.8	**1.0**
H04	8	0.4	**0.2**
H05	11	0.7	**0.3**
H06	SPRAY	SPRAY	**<0.01**

3.2.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C1

Analogamente a quanto fatto per la configurazione C0, in Tabella 17 e Tabella 18 si riportano rispettivamente i risultati dall'analisi statistica delle componenti orizzontali degli impatti sul muro e dei relativi momenti per le condizioni d'onda relative a tempi di ritorno di 100 e 50 anni per la configurazione C1.

Tabella 17 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C1

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	56.5	43.6	31.3
Centro di applicazione relativo [m]	1.7	2.0	2.2
Momento corrispondente [t m/m]	96.1	87.2	68.9

Tabella 18 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C1

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	36.4	32.0	23.3
Centro di applicazione relativo [m]	2.4	2.2	2.0
Momento corrispondente [t m/m]	87.4	70.4	46.6

Tabella 19 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m

Attacco ondoso	N impatti sopra soglia
H01 – Tr100	322
H02 – Tr50	230

3.3 CONFIGURAZIONE C2

La configurazione C2 (Figura 25) rappresenta la seconda ipotesi concordata con il Committente. Anche in questo caso la modifica rispetto alla configurazione C0 consiste nella sola elevazione del muro paraonde, con coronamento pari a quota +6.00m s.l.m.m.

CONFIGURAZIONE C2: sezione tipo della seconda ipotesi d'intervento





- Coronamento muro paraonde → +6.00m s.l.m.
- Quota del piano della berma emersa → +2.40m s.l.m.
- Pendenza del paramento lato mare della scogliera → 1:3
- Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.

Figura 25 – Sezione della configurazione C2.

3.3.1 Misura delle onde e wave set

In Tabella 20 si riportano per la configurazione C2 i parametri caratteristici degli attacchi ondosi riprodotti in canale e il wave set-up misurato al piezometro di riferimento.

Tabella 20 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C2

C2	Hm0 [m]	Hmax [m]	Hs,i [m]	H1/3 [m]	Tp [s]	T1_3 [s]	wave set-up [m]
Tr100	4.4	9.4	4.3	4.6	12.6	12.1	0.28
Tr50	4.1	9.0	4.1	4.1	12.6	12.0	0.27
Onda 3	3.7	8.0	3.5	3.6	11.8	12.2	0.20
Onda 4	3.5	8.6	3.4	3.3	11.1	11.1	0.21

***H_{m0}=altezza significativa spettrale (H_{m0}=4*√m0, dove m0 è il momento di ordine zero dello spettro in frequenza); H_{max}= massima altezza "zero-crossing"; $H_{s,i}$=altezza significativa incidente (i.e. decurtata della componente riflessa); $H_{1/3}$=altezza media del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; T_p=periodo di picco; $T_{1/3}$=periodo medio del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; wave set-up=sovralzo del mare indotto dal frangimento delle onde sulla struttura.**

Come concordato con la Committenza, sono stati effettuati i test per le sole condizioni di prova rilevanti da un punto di vista di risposta idraulica e dunque di portate medie di overtopping.

3.3.2 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C2

Per una valutazione della stabilità dei massi costituenti la mantellata è stata effettuata una analisi comparativa mediante foto realizzate prima e dopo gli attacchi ondosi.

L'analisi comparativa non ha evidenziato movimenti dei massi costituenti della mantellata che è risultata stabile. In Figura 26, a titolo di esempio, sono riportate le foto realizzate prima e dopo l'attacco ondoso H01 - Tr100.

Prima dell'onda	Dopo l'onda H01 – Tr100
	

Figura 26 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C2, prima e dopo la condizione H01 – Tr100.

3.3.3 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C2

La misura dell'overtopping a tergo del muro paraonde è stata effettuata tramite il sistema di raccolta della portata tracimante (Figura 21).

In Tabella 21 si riportano il numero di tracimazioni registrate, la percentuale di onde tracimanti ed il valore della portata media di overtopping per gli attacchi ondosi simulati per la configurazione C2.

Tabella 21: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C2

ONDA	Onde tracimanti	Percentuale onde tracimanti [%]	Portate di Tracimazione [l/s/m]
H01 – Tr100	10	0.5	**0.3**
H02 – Tr50	8	0.4	**0.2**
H03	4	0.2	**0.1**
H04	SPRAY	SPRAY	**<0.01**

3.3.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C2

In Tabella 22 e Tabella 23 si riportano rispettivamente i risultati dall'analisi statistica delle componenti orizzontali degli impatti sul muro e dei relativi momenti per le condizioni d'onda relative a tempi di ritorno di 100 e 50 anni per la configurazione C2.

Tabella 22 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C2

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	53.0	41.3	29.7
Centro di applicazione relativo [m]	1.8	1.9	2.0
Momento corrispondente [t m/m]	95.4	78.5	59.4

Tabella 23 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C2

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	33.9	29.4	22.6
Centro di applicazione relativo [m]	1.8	1.8	2.0
Momento corrispondente [t m/m]	61.0	52.9	45.2

Tabella 24 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m

Attacco ondoso	N impatti sopra soglia
H01 – Tr100	338
H02 – Tr50	264

3.4 CONFIGURAZIONE C3

La configurazione C3 (Figura 27) è caratterizzata da un modifica non solo sul coronamento del muro paraonde, ma anche sulla scogliera dell'opera di difesa. Al di sopra del doppio strato di massi costituenti la mantellata è stato aggiunto un carapace costituito da un singolo strato di massi di IV categoria con un peso compreso tra le 7t e le 9t fino a d una profondità di circa 3m.

Il muro paraonde presenta coronamento a quota +5.00m s.l.m.m., mentre la berma emersa prospiciente il muro è a quota +3.8m s.l.m.m..

CONFIGURAZIONE C3: sezione tipo della terza ipotesi d'intervento





- Coronamento muro paraonde → +5.00m s.l.m.
- Quota del piano della berma emersa → +3.80m s.l.m.
- Pendenza del paramento lato mare della scogliera → 1:3
- Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.

Figura 27 – Sezione della configurazione C3.

3.4.1 Misura delle onde e wave set

In Tabella 25 si riportano per la configurazione C3 i parametri caratteristici degli attacchi ondosi riprodotti in canale e il wave set-up misurato al piezometro di riferimento.

Tabella 25 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C3

C3	Hm0 [m]	Hmax [m]	Hs,i [m]	H1/3 [m]	Tp [s]	T1_3 [s]	wave set-up [m]
Tr100	4.4	9.3	4.2	4.5	12.6	12.1	0.28
Tr50	3.9	8.6	4.0	4.0	12.7	12.0	0.28
Onda 3	3.5	7.7	3.4	3.5	12.8	12.1	0.22

***H_{m0}=altezza significativa spettrale (H_{m0}=4*√m0, dove m0 è il momento di ordine zero dello spettro in frequenza); H_{max}= massima altezza "zero-crossing"; $H_{s,i}$=altezza significativa incidente (i.e. decurtata della componente riflessa); $H_{1/3}$=altezza media del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; T_p=periodo di picco; $T_{1/3}$=periodo medio del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; wave set-up=sovralzo del mare indotto dal frangimento delle onde sulla struttura.**

3.4.2 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C3

Per una valutazione della stabilità dei massi costituenti la mantellata è stata effettuata una analisi comparativa mediante foto realizzate prima e dopo gli attacchi ondosi.

L'analisi comparativa non ha evidenziato movimenti dei massi costituenti della mantellata che è risultata stabile. In Figura 28, a titolo di esempio, sono riportate le foto realizzate prima e dopo l'attacco ondoso H01 - Tr100.

Prima dell'onda	Dopo l'onda H01 – Tr100
	

Figura 28 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C3, prima e dopo la condizione H01 – Tr100.

3.4.3 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C3

La misura dell'overtopping a tergo del muro paraonde è stata effettuata tramite il sistema di raccolta della portata tracimante (Figura 21).

In Tabella 26 si riportano il numero di tracimazioni registrate, la percentuale di onde tracimanti ed il valore della portata media di overtopping per gli attacchi ondosi simulati per la configurazione C3.

Tabella 26: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C3

ONDA	Onde tracimanti	Percentuale onde tracimanti [%]	Portate di Tracimazione [l/s/m]
H01 – Tr100	42	2.2	**1.7**
H02 – Tr50	27	1.5	**0.9**
H03	16	0.9	**0.7**

3.4.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C3

Per la configurazione C3 si riportano le tabelle per le condizioni d'onda con tempi di ritorno di 100 e 50 anni.

Tabella 27 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C3

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	17.7	13.3	9.4
Centro di applicazione relativo [m]	2.4	2.4	2.3
Momento corrispondente [t m/m]	42.5	31.9	21.6

Tabella 28 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C3

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	20.8	16.3	9.6
Centro di applicazione relativo [m]	2.4	2.4	2.3
Momento corrispondente [t/m]	49.9	39.1	22.1

Tabella 29 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m

Attacco ondoso	N impatti sopra soglia
H01 – Tr100	55
H02 – Tr50	30

3.5 CONFIGURAZIONE C4

La configurazione C4 (Figura 29) si differenzia dalla configurazione C3 per la presenza di una piccola berma al piede, con quota di estradosso pari a -1.50m s.l.m.m. e larghezza di 4.2m.

Il muro paraonde presenta coronamento a quota +5.00m s.l.m.m., mentre la berma emersa prospiciente il muro è a quota +3.8m s.l.m.m..

CONFIGURAZIONE C4: sezione tipo della quarta ipotesi d'intervento





- Coronamento muro paraonde → +5.00m s.l.m.
- Quota del pinao della berma emersa → +3.80m s.l.m.
- Pendenza del paramento lato amre della scogliera → 1:3
- Berma al piede → -1.50m s.l.m.
- Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.

Figura 29 – Sezione della configurazione C4.

3.5.1 Misura delle onde e wave set

In Tabella 30 si riportano per la configurazione C4 i parametri caratteristici degli attacchi ondosi riprodotti in canale e il wave set-up misurato al piezometro di riferimento.

Tabella 30 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C4

C4	Hm0 [m]	Hmax [m]	Hs,i [m]	H1/3 [m]	Tp [s]	T1_3 [s]	wave set-up [m]
Tr100	4.3	9.8	4.1	4.5	12.6	12.1	0.27
Tr50	3.9	9.1	4.0	4.0	12.7	12.0	0.24

***H_{m0}=altezza significativa spettrale ($H_{m0}=4*\sqrt{m0}$, dove m0 è il momento di ordine zero dello spettro in frequenza); H_{max}= massima altezza "zero-crossing"; $H_{s,i}$=altezza significativa incidente (i.e. decurtata della componente riflessa); $H_{1/3}$=altezza media del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; T_p=periodo di picco; $T_{1/3}$=periodo medio del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; wave set-up=sovralzo del mare indotto dal frangimento delle onde sulla struttura.**

3.5.2 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C4

Per una valutazione della stabilità dei massi costituenti la mantellata è stata effettuata una analisi comparativa mediante foto realizzate prima e dopo gli attacchi ondosi.

L'analisi comparativa non ha evidenziato movimenti dei massi costituenti della mantellata che è risultata stabile. In Figura 30, a titolo di esempio, sono riportate le foto realizzate prima e dopo l'attacco ondoso H01 - Tr100.

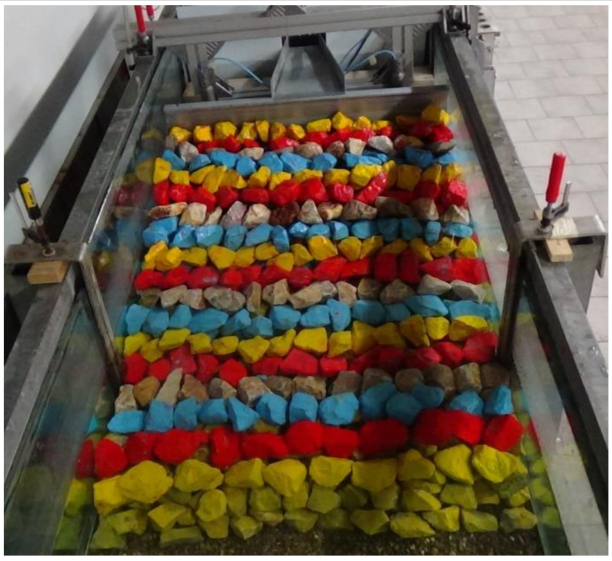
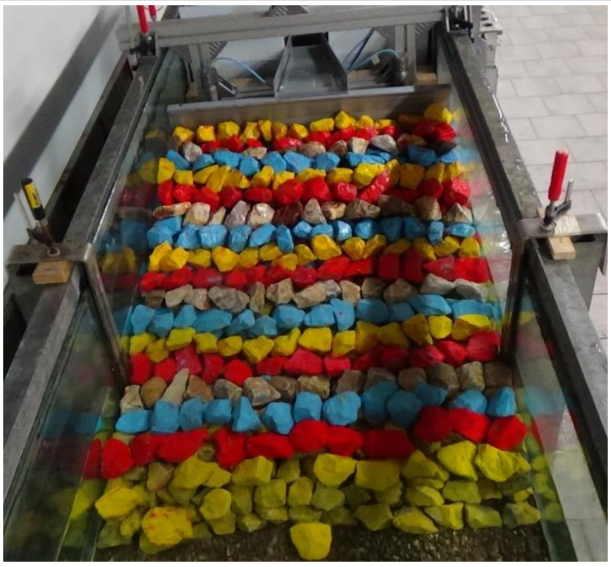
Prima dell'onda	Dopo l'onda H01 – Tr100
	

Figura 30 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C4, prima e dopo la condizione H01 – Tr100.

3.5.3 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C4

La misura dell'overtopping a tergo del muro paraonde è stata effettuata tramite il sistema di raccolta della portata tracimante (Figura 21).

In Tabella 31 si riportano il numero di tracimazioni registrate, la percentuale di onde tracimanti ed il valore della portata media di overtopping per gli attacchi ondosi simulati per la configurazione C4; per questa configurazione sono stati testati i soli attacchi ondosi H01 – Tr100 e H02 – Tr50. Non sono stati effettuati ulteriori attacchi ondosi in quanto la configurazione non ha mostrato netti miglioramenti rispetto alla configurazione precedente (C3) sia in termini di riduzione delle portate medie di overtopping, sia in termini di riduzione delle forze di impatto agenti sul muro paraonde.

Tabella 31: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C4

ONDA	Onde tracimanti	Percentuale onde tracimanti [%]	Portate di Tracimazione [l/s/m]
H01 – Tr100	43	2.3	**1.7**
H02 – Tr50	33	1.8	**0.7**

3.5.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C4

Per la configurazione C4 si riportano le tabelle relative alle condizioni d'onda con tempi di ritorno di 100 e 50 anni.

Tabella 32 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C4

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	19.4	15.3	9.8
Centro di applicazione relativo [m]	2.4	2.5	2.4
Momento corrispondente [t m/m]	46.6	38.3	23.5

Tabella 33 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C4

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$

Forze di impatto [t/m]	16.9	12.7	7.3
Centro di applicazione relativo [m]	2.5	2.4	2.3
Momento corrispondente [t m/m]	42.3	30.5	16.8

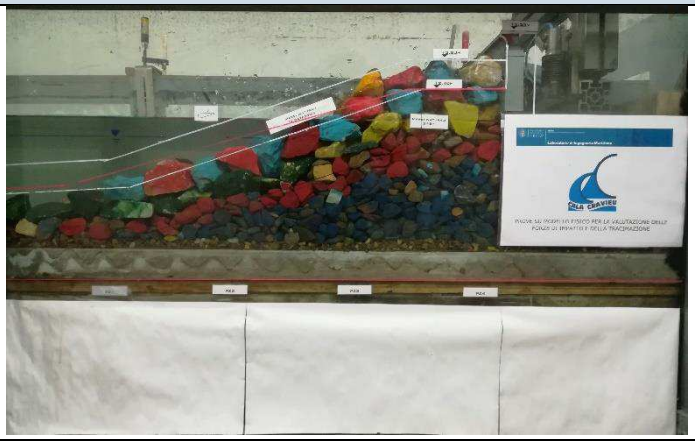
Tabella 34 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m

Attacco ondoso	N impatti sopra soglia
H01 – Tr100	50
H02 – Tr50	21

3.6 CONFIGURAZIONE C5

Infine, è stata testata un'ultima configurazione, la C5 (Figura 31), caratterizzata da quota del muro paraonde a +5.0m s.l.m.m. e presenza di massi di IV categoria non su tutto lo sviluppo della scogliera ma solo in corrispondenza della berma emersa, precisamente 4 file di massi.

CONFIGURAZIONE C5: sezione tipo della quinta ipotesi d'intervento





- Coronamento muro paraonde → +5.00m s.l.m.
- Quota del piano della berma emersa → +3.80m s.l.m.
- Pendenza del paramento lato mare della scogliera → 1:3
- Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.

Figura 31 – Sezione della configurazione C5.

3.6.1 Misura delle onde e wave set

In Tabella 40 si riportano per la configurazione C5 i parametri caratteristici degli attacchi ondosi riprodotti in canale e il wave set-up misurato al piezometro di riferimento.

Non sono stati effettuati i test con altezze d'onda inferiori in quanto la risposta della configurazione in oggetto si è mostrata peggiorativa rispetto alla configurazione C3 sia in termini di risposta all'overtopping che di forze di impatto agenti sul muro paraonde. Inoltre, come evidenziato nel paragrafo seguente, è stata notata una instabilità dello spigolo formato tra lo strato di massi aggiunti e la scogliera esistente.

Tabella 35 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C5

C5	Hm0 [m]	Hmax [m]	Hs,i [m]	H1/3 [m]	Tp [s]	T1_3 [s]	wave set-up [m]
Tr100	4.3	9.6	4.1	4.3	12.6	12.1	0.22
Tr50	3.9	9.2	3.9	3.8	12.7	12.0	0.20

***H_{m0}=altezza significativa spettrale ($H_{m0}=4*\sqrt{m0}$, dove m0 è il momento di ordine zero dello spettro in frequenza); H_{max}= massima altezza "zero-crossing"; $H_{s,i}$=altezza significativa incidente (i.e. decurtata della componente riflessa); $H_{1/3}$=altezza media del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; T_p=periodo di picco; $T_{1/3}$=periodo medio del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; wave set-up=sovralzo del mare indotto dal frangimento delle onde sulla struttura.**

3.6.2 Misura e analisi della stabilità dei massi della mantellata della configurazione C5

L'analisi comparativa delle foto realizzate prima e dopo gli attacchi ondosi ha evidenziato una instabilità dello spigolo creatosi a seguito della posa delle 4 file di massi di IV categoria in corrispondenza della berma emersa.

In particolare, è stata rilevata la movimentazione di 2 massi su un totale di 11 massi costituenti la fila. In Figura 32 si riportano le foto prima e dopo l'onda H01 – Tr100.

Prima dell'onda	Dopo l'onda H01 – Tr100
	

Figura 32 – Esempio di misura della stabilità dei massi della mantellata prevista per la configurazione C5, prima e dopo la condizione H01 – Tr100.

3.6.3 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C5

La misura dell'overtopping a tergo del muro paraonde è stata effettuata tramite il sistema di raccolta della portata tracimante (Figura 21).

In Tabella 36 si riportano il numero di tracimazioni registrate, la percentuale di onde tracimanti ed il valore della portata media di overtopping per gli attacchi ondosi simulati per la configurazione C5.

Tabella 36: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C5

ONDA	Onde tracimanti	Percentuale onde tracimanti [%]	Portate di Tracimazione [l/s/m]
H01 – Tr100	63	3.4	**3.9**
H02 – Tr50	40	2.2	**1.8**

3.6.4 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C5

Per la configurazione C5 si riportano le tabelle relative alle condizioni d'onda con tempi di ritorno di 100 e 50 anni.

Tabella 37 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C5

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	35.1	30.4	23.5
Centro di applicazione relativo [m]	2.4	2.3	2.2
Momento corrispondente [t m/m]	84.2	69.9	51.7

Tabella 38 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C5

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	33.7	24.4	15.0
Centro di applicazione relativo [m]	2.4	2.4	2.3
Momento corrispondente [t m/m]	80.9	58.6	34.5

Tabella 39 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m

Attacco ondoso	N impatti sopra soglia
H01 – Tr100	108
H02 – Tr50	59

4 TEST PER FRONTI D'ONDA INCIDENTI INCLINATI DI 30° SULL'OPERA DI DIFESA

Dalle osservazioni delle mareggiate verificatesi negli ultimi anni e incidenti sulla struttura di difesa di Cala Cravieu è stato notato come la maggior parte di queste impattino l'opera di difesa con un angolo di incidenza compreso tra 30° e 60°. Sulla base di tale osservazione è stato convenuto con il Committente di effettuare anche ulteriori test, su alcune delle configurazioni testate (C1, C3 e C5), realizzando le relative sezioni secondo una direzione inclinata di 30° rispetto all'ortogonale all'asse longitudinale della diga. In questo caso sono stati riprodotti gli attacchi ondosi più rilevanti e non la serie completa.

4.1 CONFIGURAZIONE C1_i

La configurazione C1 prevedeva la sola modifica del layout del muro paraonde, con una quota del coronamento pari a +5.0m s.l.m.m. Sono stati effettuati test per la misura dell'overtopping e la misura delle forze di impatto sul muro paraonde per gli attacchi ondosi H01 – Tr100, H02 – Tr50 e H03.

4.1.1 Misura delle onde e wave set

In Tabella 40 si riportano per la configurazione C1_i i parametri caratteristici degli attacchi ondosi riprodotti in canale e il wave set-up misurato al piezometro di riferimento.

Tabella 40 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C1_i

C1_i	Hm0 [m]	Hmax [m]	Hs,i [m]	H1/3 [m]	Tp [s]	T1_3 [s]	wave set-up [m]
Tr100	4.4	9.7	4.2	4.5	12.6	12.1	0.30
Tr50	4.0	9.3	4.0	4.0	12.7	12.0	0.28
H03	3.5	7.7	3.4	3.3	12.8	12.1	0.22

***H_{m0}=altezza significativa spettrale ($H_{m0}=4*\sqrt{m0}$, dove m0 è il momento di ordine zero dello spettro in frequenza); H_{max}= massima altezza "zero-crossing"; $H_{s,i}$=altezza significativa incidente (i.e. decurtata della componente riflessa); $H_{1/3}$=altezza media del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; T_p=periodo di picco; $T_{1/3}$=periodo medio del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; wave set-up=sovralzo del mare indotto dal frangimento delle onde sulla struttura.**

4.1.2 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C1_i

La misura dell'overtopping a tergo del muro paraonde è stata effettuata tramite il sistema di raccolta della portata tracimante (Figura 21).

In Tabella 41 si riportano il numero di tracimazioni registrate, la percentuale di onde tracimanti ed il valore della portata media di overtopping per gli attacchi ondosi simulati per la configurazione C1_i.

Tabella 41: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C1_i

ONDA	Onde tracimanti	Percentuale onde tracimanti [%]	Portate di Tracimazione [l/s/m]
H01 – Tr100	38	2.0	**1.9**
H02 – Tr50	20	1.1	**0.9**
H03	14	0.8	**0.8**

4.1.3 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C1_i

Per la configurazione C1_i si riportano le tabelle relative alle condizioni d'onda con tempi di ritorno di 100 e 50 anni.

Tabella 42 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C1_i

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	29.2	27.9	21.1
Centro di applicazione relativo [m]	2.6	2.4	2.4
Momento corrispondente [t m/m]	75.9	67.0	50.6

Tabella 43 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C1_i

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	29.7	25.6	17.8
Centro di applicazione relativo [m]	2.3	2.2	2.1
Momento corrispondente [t m/m]	68.3	56.3	37.4

Tabella 44 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m

Attacco ondoso	N impatti sopra soglia
H01 – Tr100	272
H02 – Tr50	189

4.2 CONFIGURAZIONE C3_i

Nella configurazione C3, oltre al coronamento del muro paraonde a +5.0m s.l.m.m è presente un rinforzo di tutta la scogliera, con l'aggiunta di uno strato di massi di IV categoria su tutta l'estensione della scogliera fino ad una profondità di 3m. Sono stati effettuati test per la misura dell'overtopping e la misura delle forze di impatto sul muro paraonde per gli attacchi ondosi H01 – Tr100, H02 – Tr50.

4.2.1 Misura delle onde e wave set

In Tabella 45 si riportano per la configurazione C3_i i parametri caratteristici degli attacchi ondosi riprodotti in canale e il wave set-up misurato al piezometro di riferimento.

Tabella 45 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C3_i

C3_i	Hm0 [m]	Hmax [m]	Hs,i [m]	H1/3 [m]	Tp [s]	T1_3 [s]	wave set-up [m]
Tr100	4.4	9.4	4.2	4.5	12.6	12.0	0.28
Tr50	4.0	9.3	4.0	4.0	12.7	12.0	0.25

***H_{m0}=altezza significativa spettrale (H_{m0}=4*√m0, dove m0 è il momento di ordine zero dello spettro in frequenza); H_{max}= massima altezza "zero-crossing"; $H_{s,i}$=altezza significativa incidente (i.e. decurtata della componente riflessa); $H_{1/3}$=altezza media del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; T_p=periodo di picco; $T_{1/3}$=periodo medio del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; wave set-up=sovralzo del mare indotto dal frangimento delle onde sulla struttura.**

4.2.2 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C3_i

La misura dell'overtopping a tergo del muro paraonde è stata effettuata tramite il sistema di raccolta della portata tracimante (Figura 21).

In Tabella 46 si riportano il numero di tracimazioni registrate, la percentuale di onde tracimanti ed il valore della portata media di overtopping per gli attacchi ondosi simulati per la configurazione C3_i.

Tabella 46: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C3_i

ONDA	Onde tracimanti	Percentuale onde tracimanti [%]	Portate di Tracimazione [l/s/m]
H01 – Tr100	19	1.0	**0.6**
H02 – Tr50	12	0.7	**0.2**

4.2.3 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C3_i

Per la configurazione C3_i si riportano le tabelle relative alle condizioni d'onda con tempi di ritorno di 100 e 50 anni.

Tabella 47 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C3_i

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	9.6	7.6	5.2
Centro di applicazione relativo [m]	2.3	2.3	2.2
Momento corrispondente [t m/m]	22.1	17.5	11.4

Tabella 48 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C3_i

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	10.2	7.8	4.7
Centro di applicazione relativo [m]	2.1	2.2	2.1
Momento corrispondente [t m/m]	21.4	17.2	9.9

Tabella 49 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m

Attacco ondoso	N impatti sopra soglia
H01 – Tr100	41
H02 – Tr50	31

4.3 CONFIGURAZIONE C5_i

La configurazione C5 si differenzia dalla configurazione C3 per la presenza dello strato di massi di IV categoria solo in corrispondenza della berma emersa, 4 file di massi. Sono stati effettuati test per la misura dell'overtopping e la misura delle forze di impatto sul muro paraonde per i soli attacchi ondosi H01 – Tr100 e H02 – Tr50.

4.3.1 Misura delle onde e wave set

In Tabella 50 si riportano per la configurazione C5_i i parametri caratteristici degli attacchi ondosi riprodotti in canale e il wave set-up misurato al piezometro di riferimento.

Tabella 50 - Parametri caratteristici e wave set-up - configurazione C5_i

C5_i	Hm0 [m]	Hmax [m]	Hs,i [m]	H1/3 [m]	Tp [s]	T1_3 [s]	wave set-up [m]
Tr100	4.3	9.8	4.1	4.3	12.6	12.1	0.19
Tr50	3.9	10.1	3.9	3.8	12.7	12.0	0.18

***H_{m0}=altezza significativa spettrale ($H_{m0}=4*\sqrt{m0}$, dove m0 è il momento di ordine zero dello spettro in frequenza); H_{max}= massima altezza "zero-crossing"; $H_{s,i}$=altezza significativa incidente (i.e. decurtata della componente riflessa); $H_{1/3}$=altezza media del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; T_p=periodo di picco; $T_{1/3}$=periodo medio del terzo delle onde "zero-crossing" più alte; wave set-up=sovralzo del mare indotto dal frangimento delle onde sulla struttura.**

4.3.2 Misura e analisi dell'overtopping della configurazione C5_i

La misura dell'overtopping a tergo del muro paraonde è stata effettuata tramite il sistema di raccolta della portata tracimante (Figura 21).

In Tabella 51 si riportano il numero di tracimazioni registrate, la percentuale di onde tracimanti ed il valore della portata media di overtopping per gli attacchi ondosi simulati per la configurazione C5_i.

Tabella 51: Numero di tracimazioni, percentuale di onde tracimanti e portata media di overtopping per ciascuna condizione di prova sulla configurazione C5_i

ONDA	Onde tracimanti	Percentuale onde tracimanti [%]	Portate di Tracimazione [l/s/m]
H01 – Tr100	59	3.2	**3.3**
H02 – Tr50	36	2.0	**1.5**

4.3.3 Misure e analisi degli impatti agenti sul muro paraonde della configurazione C5_i

Per la configurazione C5_i si riportano le tabelle relative alle condizioni d'onda con tempi di ritorno di 100 e 50 anni.

Tabella 52 – Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H01 – Tr100 per la configurazione C5_i

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	31.7	23.4	16.9
Centro di applicazione relativo [m]	2.5	2.5	2.5
Momento corrispondente [t m/m]	79.3	58.5	42.3

Tabella 53 - Valori statistici delle forze di impatto orizzontali sul muro paraonde relativi all'attacco ondoso H02 – Tr50 per la configurazione C5_i

	F_{max}	$F_{_3}$	$F_{_10}$
Forze di impatto [t/m]	33.4	27.1	17.7
Centro di applicazione relativo [m]	2.3	2.5	2.5
Momento corrispondente [t m/m]	76.8	67.8	44.3

Tabella 54 - Numero di impatti sopra soglia pari a 3t/m

Attacco ondoso	N impatti sopra soglia
H01 – Tr100	94
H02 – Tr50	58

5 OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

I test di laboratorio condotti hanno avuto come obiettivi principali:

- la verifica della stabilità dei massi naturali della mantellata,
- la misura della portata di tracimazione trasmessa oltre il muro paraonde,
- la misura delle sollecitazioni d'onda sul muro paraonde.

I massi costituenti la mantellata esistente sono risultati stabili per le diverse configurazioni testate ad eccezion fatta per la configurazione C5 che ha evidenziato una instabilità nello spigolo di raccordo tra lo strato di massi aggiunti e la scogliera esistente.

Per quanto riguarda l'ottimizzazione della sezione della diga marittima occorre valutare sia l'efficienza idraulica, in termini di portate medie di overtopping, sia la riduzione delle forze di impatto agenti sul muro paraonde.

La configurazione che meglio soddisfa entrambi i requisiti è la configurazione C3, che presenta un coronamento del muro paraonde pari a 5.0m s.l.m.m. e un rinforzo della mantellata esistente ottenuto con la sovrapposizione di uno strato di massi naturali di IV categoria. Lo strato di massi aggiunto porta la berma prospiciente il muro paraonde alla quota di 3.8m s.l.m.m., diminuendo l'area esposta del muro alle onde.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI FIRENZE
DICEA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE
Laboratorio di Ingegneria Marittima

UNIFI-LABIMA

Laboratorio di Ingegneria Marittima
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA)
Università degli Studi di Firenze
Via Santa Marta 3 - 50139 FIRENZE

ALLEGATO A

SET-UP Modello in laboratorio

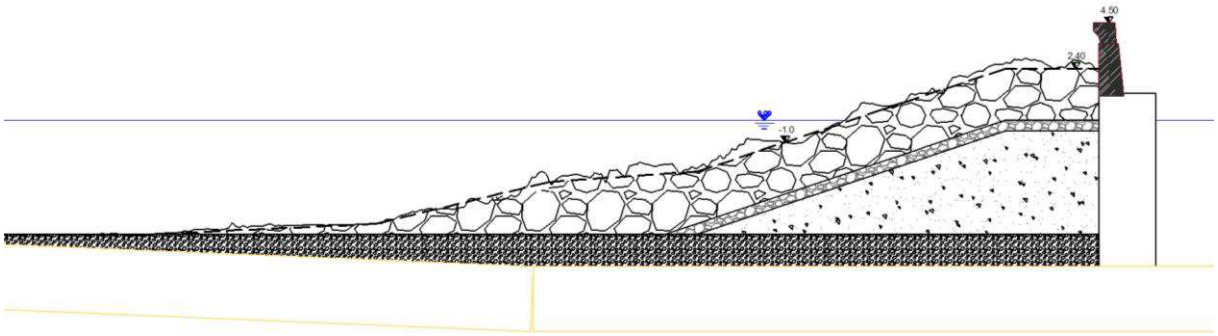
STUDIO SPERIMENTALE SU MODELLO IN SCALA DI LABORATORIO DELLE INTERAZIONI ONDA-STRUTTURA PER L'OPERA DI DIFESA IN LOCALITÀ CALA CRAVIEU IN CELLE LIGURE (SV)

- **ALLEGATO A1:** configurazioni riprodotte in scala modello
- **ALLEGATO A2:** setup strumentazione

ALLEGATO A1

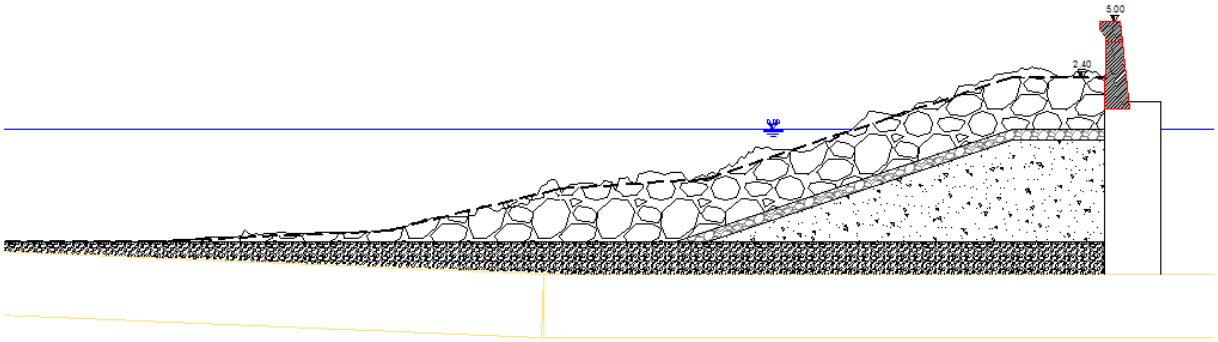
CONFIGURAZIONI RIPRODOTTE IN SCALA MODELLO

SCALA GEOMETRICA	1:30
CONFIGURAZIONE	C0



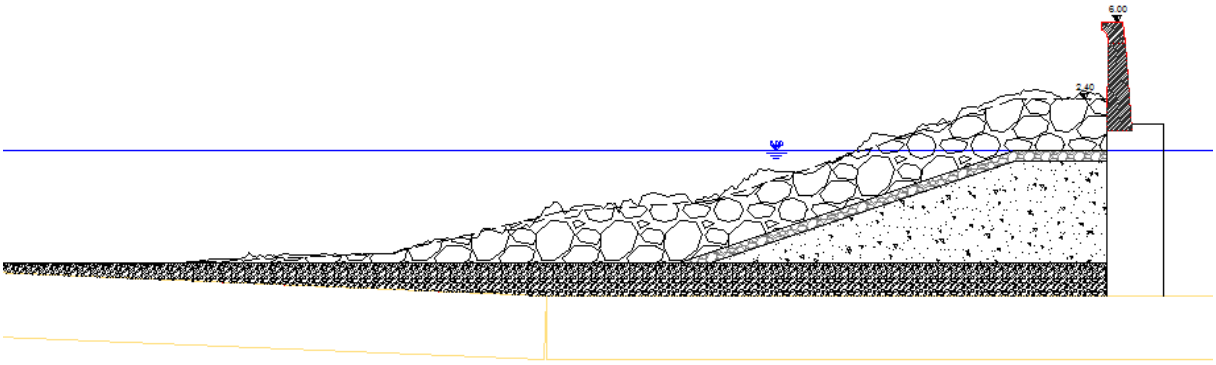
- Coronamento muro paraonde → +4.50m s.l.m.
- Estradosso berma emersa → +2.40m s.l.m.
- Pendenza tratto scogliera → 1:3
- Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.

SCALA GEOMETRICA	1:30
CONFIGURAZIONE	C1



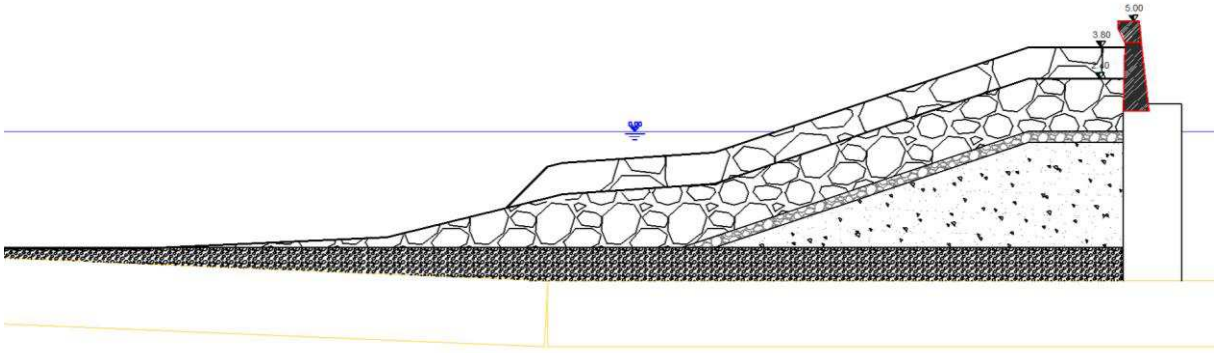
- Coronamento muro paraonde → +5.00m s.l.m.
- Estradosso berma emersa → +2.40m s.l.m.
- Pendenza I° tratto scogliera → 1:3
- Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.

SCALA GEOMETRICA	1:30
CONFIGURAZIONE	C2



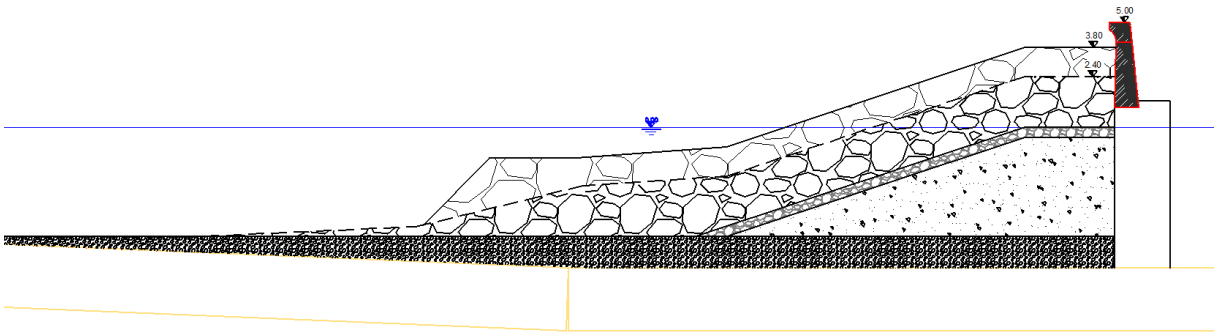
- Coronamento muro paraonde → +6.00m s.l.m.
- Estradosso berma emersa → +2.40m s.l.m.
- Pendenza I° tratto scogliera → 1:3
- Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.

SCALA GEOMETRICA	1:30
CONFIGURAZIONE	C3



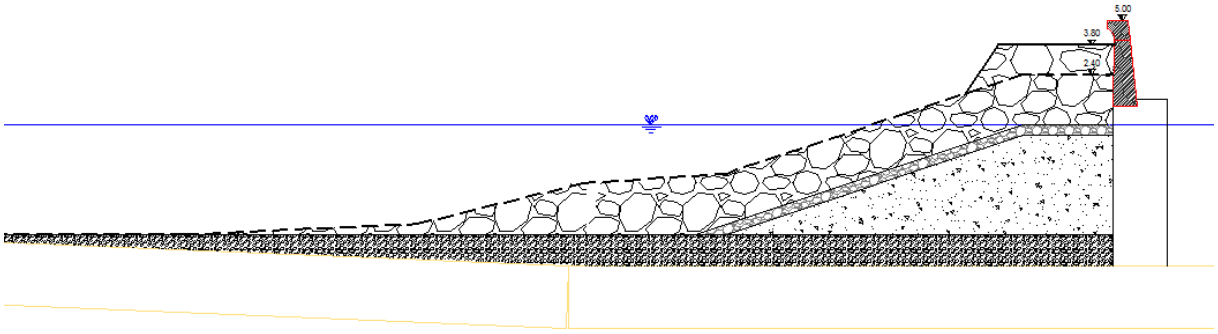
- Coronamento muro paraonde → +5.00m s.l.m.
- Estradosso berma emersa → +3.80m s.l.m.
- Pendenza I° tratto scogliera → 1:3
- CARAPACE - Massi IV categoria 1 strato
- Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.

SCALA GEOMETRICA	1:30
CONFIGURAZIONE	C4



- Coronamento muro paraonde → +5.00m s.l.m.
- Estradosso berma emersa → +3.80m s.l.m.
- Pendenza I° tratto scogliera → 1:3
- CARAPACE - Massi IV categoria 1 strato
- Berma al piede → -1.50m s.l.m. – larghezza 4.20m
- Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.

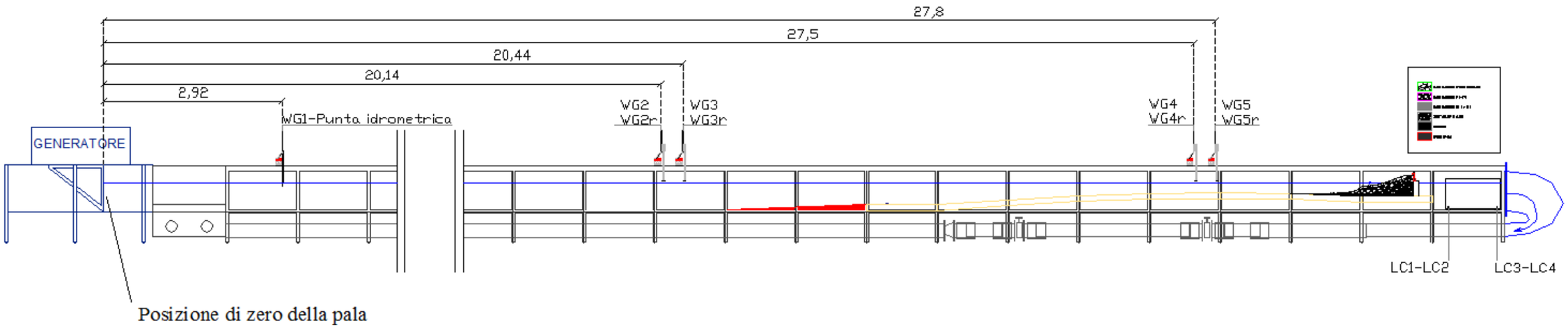
SCALA GEOMETRICA	1:30
CONFIGURAZIONE	C5



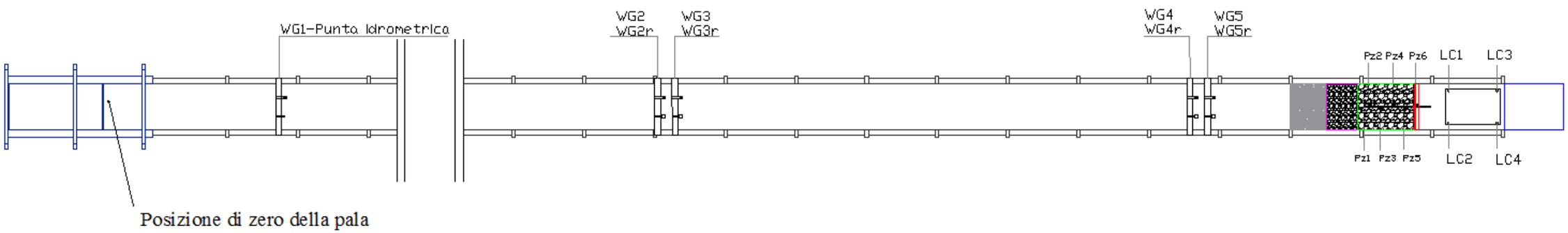
- Coronamento muro paraonde → +5.00m s.l.m.
- Estradosso berma emersa → +3.80m s.l.m.
- Pendenza I° tratto scogliera → 1:3
- CARAPACE - Massi IV categoria 1 strato x 4 file (in corrispondenza della berma)
- Piede della scogliera → -5.50m s.l.m.

ALLEGATO A2
SETUP STRUMENTAZIONE

Vista in prospetto



Vista in pianta



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI FIRENZE
DICEA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE
Laboratorio di Ingegneria Marittima

UNIFI-LABIMA

Laboratorio di Ingegneria Marittima
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA)
Università degli Studi di Firenze
Via Santa Marta 3 - 50139 FIRENZE

ALLEGATO B

Overtopping

STUDIO SPERIMENTALE SU MODELLO IN SCALA DI LABORATORIO DELLE INTERAZIONI ONDA-STRUTTURA PER L'OPERA DI DIFESA IN LOCALITÀ CALA CRAVIEU IN CELLE LIGURE (SV)

ANALISI DELLE TRACIMAZIONI

Config.	ONDA	Onde tracimanti	Percentuale onde tracimanti [%]	Portate di Tracimazione [l/s/m]
C0	**H01 – Tr100**	71	3.8	**5.9**
	H02 – Tr50	43	2.4	**2.7**
	H03	25	1.4	**2.2**
	H04	11	0.6	**0.4**
	H05	11	0.7	**0.4**
	H06	0	0.0	**0.0**
C1	**H01 – Tr100**	40	2.2	**2.6**
	H02 – Tr50	22	1.2	**1.3**
	H03	15	0.8	**1.0**
	H04	8	0.4	**0.2**
	H05	11	0.7	**0.3**
	H06	SPRAY	SPRAY	**<0.01**
C2	**H01 – Tr100**	10	0.5	**0.3**
	H02 – Tr50	8	0.4	**0.2**
	H03	4	0.2	**0.1**
	H04	SPRAY	SPRAY	**<0.01**
C3	**H01 – Tr100**	42	2.2	**1.7**
	H02 – Tr50	27	1.5	**0.9**
	H03	16	0.9	**0.7**
C4	**H01 – Tr100**	43	2.3	**1.7**
	H02 – Tr50	33	1.8	**0.7**
C5	**H01 – Tr100**	63	3.4	**3.9**
	H02 – Tr50	40	2.2	**1.8**
C1_i	**H01 – Tr100**	38	2.0	**1.9**
	H02 – Tr50	20	1.1	**0.9**
	H03	14	0.8	**0.8**
C3_i	**H01 – Tr100**	19	1.0	**0.6**
	H02 – Tr50	12	0.7	**0.2**
C5_i	**H01 – Tr100**	59	3.2	**3.3**
	H02 – Tr50	36	2.0	**1.5**



UNIFI-LABIMA
Laboratorio di Ingegneria Marittima
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA)
Università degli Studi di Firenze
Via Santa Marta 3 - 50139 FIRENZE

ALLEGATO C

Stabilità degli elementi costituenti la mantellata

STUDIO SPERIMENTALE SU MODELLO IN SCALA DI LABORATORIO DELLE INTERAZIONI ONDA-STRUTTURA PER L'OPERA DI DIFESA IN LOCALITÀ CALA CRAVIEU IN CELLE LIGURE (SV)

- **ALLEGATO C1:** report fotografico

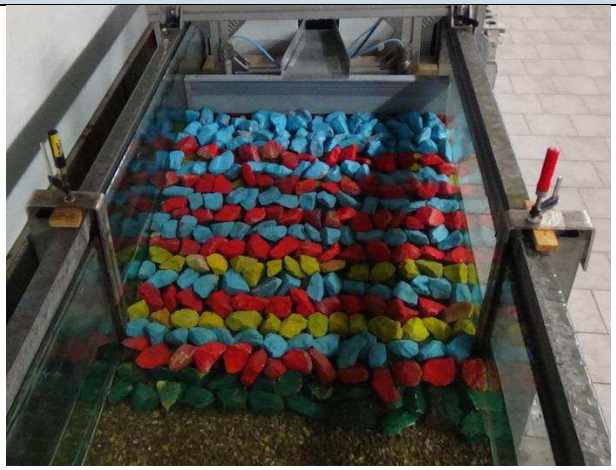
ALLEGATO C1

C0 – REPORT FOTOGRAFICO PRIMA E DOPO OGNI TEST EFFETTUATO

Iniziale	Post H01 – Tr100
	
Post H02 – Tr50	**Post H03**
	

Post H04	Post H05
	
Post H06	
	

C1 – REPORT FOTOGRAFICO PRIMA E DOPO OGNI TEST EFFETTUATO

Iniziale	Post H01 – Tr100
	
Post H02 – Tr50	**Post H03**
	

Post H04	Post H05
	
Post H06	
	

C2 – REPORT FOTOGRAFICO PRIMA E DOPO OGNI TEST EFFETTUATO

Iniziale	Post H01 – Tr100
	
Post H02 – Tr50	**Post H03**
	

Post H04	
	

C3 – REPORT FOTOGRAFICO PRIMA E DOPO OGNI TEST EFFETTUATO

Iniziale	Post H01 – Tr100
	
Post H02 – Tr50	**Post H03**
	

C4 – REPORT FOTOGRAFICO PRIMA E DOPO OGNI TEST EFFETTUATO

Iniziale	Post H01 – Tr100
	
Post H02 – Tr50	
	

C5 – REPORT FOTOGRAFICO PRIMA E DOPO OGNI TEST EFFETTUATO

Iniziale	Post H01 – Tr100
	
Post H02 – Tr50	**Post H03**
	