



UNIVERSITA' Di FIRENZE
Dipartimento di Ingegneria Civile

Prove su Modello Fisico per la Verifica della diga del Porto di Ventimiglia



Firenze, Marzo 2004

PROVE SU MODELLO FISICO PER LA VERIFICA DELLA DIGA FORANEA DEL PORTO DI VENTIMIGLIA

1. Premessa

Le prove su modello fisico sono state effettuate, su incarico della Cala del Forte S.r.l. con sede Lungomare Cap. E. D'Albertis 8, Santo Stefano al Mare (IM) con l'obiettivo di verificare la stabilità degli elementi di mantellata e di berma di 2 sezioni tipo della diga frangiflutti a gettata prevista per il progetto definitivo del nuovo porto turistico di Ventimiglia (IM).

La Società committente ha fornito nella scala del modello, oltre alle configurazioni delle due sezioni tipo da provare, il muro paraonde previsto per la Sezione 1 ed i massi artificiali per la mantellata (Fig.1); inoltre sono state indicate le caratteristiche delle onde con le quali effettuare le prove.

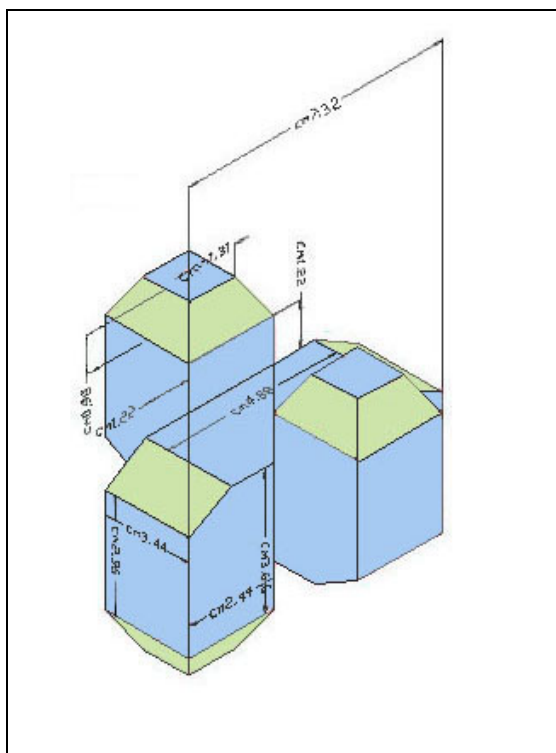


Fig. 1 – Tipologia degli elementi artificiali proposti dal Committente.

Sono state inoltre richieste le valutazioni della stabilità della struttura e dell'entità della tracimazione, in termini di portata oltre il muro paraonde.

2. Il modello fisico

2.1 L'apparato sperimentale

Le prove sono state effettuate presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Firenze in un canale bidimensionale (Figg.2a-2b) avente le seguenti caratteristiche:

- lunghezza 50 m;
- larghezza 0.80 m;
- profondità 0.80 m.

Il sistema di generazione del moto ondoso è composto da un elaboratore e da un canale attrezzato con una pala azionata da un sistema idraulico ad attuazione oleodinamica. La generazione digitale del segnale voluto avviene mediante un software appositamente sviluppato e dotato di una interfaccia grafica *windows oriented*. Tramite una conversione digitale-analogica, il segnale viene inviato al sistema di controllo della pala e, attraverso il posizionamento di sonde resistive lungo il canale, viene eseguita l'acquisizione analogica in tempo reale del livello della superficie libera.

Il sistema permette la generazione sia di onde sinusoidali, con periodo e altezza assegnata, che di stati di mare con spettro di energia uguale ad uno teorico scelto tra: Jonswap, Pierson-Moskowitz, Scott, Neuman, Bretschneider, Ochi-Hubble.

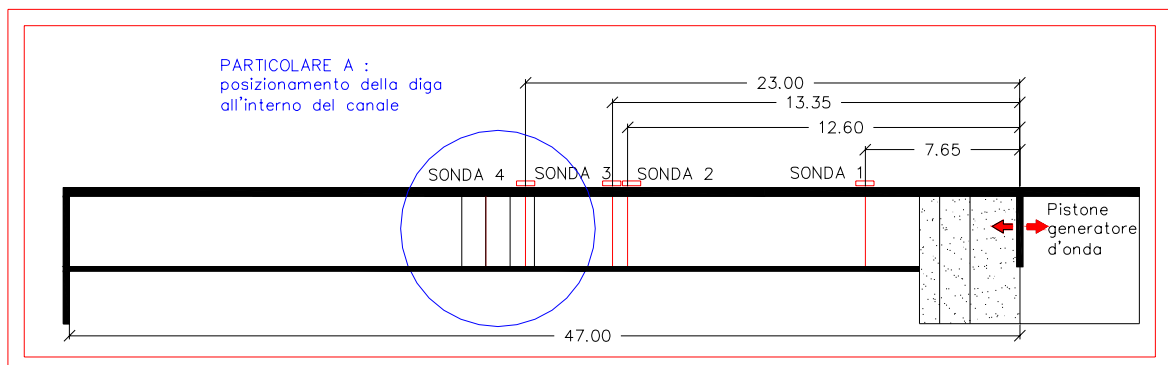


Fig.2a - Canale del Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile (Univ. di Firenze).

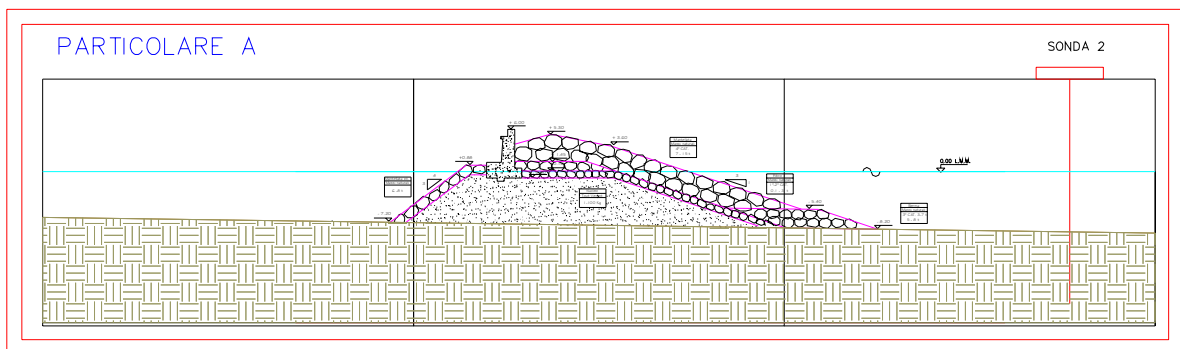


Fig.2b – Particolare A: posizionamento della diga all'interno del canale.

Il segnale random generato può essere memorizzato e riutilizzato per riprodurre più di una volta lo stesso stato di mare; una volta acquisito viene rielaborato in tempo reale con analisi sia nel dominio della frequenza (analisi spettrale) che nel dominio del tempo (analisi zero-crossing) e permette il calcolo dei seguenti parametri d'onda caratteristici: H_{m0} , $H_{1/3}$, $H_{1/10}$, H_{max} , H_{rms} , T_m , $T_{1/3}$, T_p .

Le sonde utilizzate sono di tipo resistive che 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]; V_0 è l'intercetta della relazione lineare di conversione [Volt] e k è il coefficiente angolare della relazione lineare di conversione. La linearità delle sonde è verificabile tramite taratura delle stesse, operazione eseguita regolarmente durante tutta la durata delle prove in canale.

La portata tracimante il muro paraonde è stata raccolta in un apposito contenitore posto a valle della struttura, il volume di tracimazione totale è stato misurato al termine di ciascuna prova e tradotto in termini di portata per unità di lunghezza.

2.2 Criteri di similitudine per la costruzione del modello

Il fondale antistante la struttura è caratterizzato da una pendenza uniforme del 1.4%. In canale è stato riprodotto il profilo del fondale fino alla quota di -21.50 m mediante la realizzazione di una rampa inclinata.

L'attrito fra il materiale che costituisce la diga e il fondale sabbioso è stato riprodotto mediante l'inserimento di una rete metallica opportunamente intasata da materiale granulare. Come livello di riferimento è stato assunto quello corrispondente al livello medio mare incrementato del sovrizzo di marea meteorologica pari a 0,50 m, mentre il sovrizzo d'onda viene generato automaticamente durante l'esecuzione delle prove; il livello dell'acqua in canale ha pertanto assunto il valore di 0.51 m.

Il modello bidimensionale ricostruito in canale è stato realizzato in similitudine di Froude, in scala 1:43. Per il modello è stata adottata una scala geometrica non distorta n_L ($n_L = \lambda_m / \lambda_p$, dove λ_m e λ_p sono rispettivamente le dimensioni lineari del modello e del prototipo) pari a:

$$n_L = \frac{\lambda_m}{\lambda_p} = \frac{1}{43}$$

Di conseguenza la scala dei tempi $n_T = \frac{T_m}{T_p}$ e delle velocità $n_V = \frac{V_m}{V_p}$ risultano pari a:

$$n_T = n_V = \sqrt{n_L} = \sqrt{\frac{1}{43}} = 0.152 .$$

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. Nella Tabella 1 vengono riportate le varie scale di riduzione adottate nel modello fisico.

Tabella 1 - Scale di riduzione utilizzate nel modello

Grandezza	Dimensione	Scala di riduzione	
Lunghezza	L	N_L	1:43
Altezza d'onda	L	$n_{H_0} = n_L$	1:43
Periodo	T	$n_T = n_L^{1/2}$	1:6.56
Velocità	L/T	$n_V = n_L^{1/2}$	1:6.56
Portata	L ³ /LT	$n_Q = n_L^{3/2}$	1:282
Forza (peso)	F	$n_P = n_L^3$	1:79507

2. Modalità di esecuzione delle prove

2.1 Caratteristiche delle configurazioni

Le prove eseguite, in accordo con il Committente, sono state condotte su due sezioni; per ottimizzare i parametri di progetto, in funzione dei risultati ottenuti, sono state definite due configurazioni modificate, una per ciascuna sezione. Complessivamente sono state eseguite prove su quattro diverse configurazioni. (Tavole 1, 2,3,4)

1. Sezione 1;
2. Sezione 1, variante 1;
3. Sezione 2;
4. Sezione 2, variante 1.

Le caratteristiche geometriche di ciascuna variante progettuale esaminata sono sintetizzate nella Tabella 2, riportata di seguito.

Tabella 2 – Caratteristiche delle configurazioni riprodotte su modello

Sezione	Mantellata		Berma al piede		Particolari costruttivi
	Quota [m]	Pendenza	Quota [m]	Pendenza	
1	+5.30	3/1	-5.40	3/1	Sezione di progetto 1
2	+5.40	2/1	+5.40	2/1	Variazione della pendenza della mantellata da 3/1 a 2/1 con conseguente spostamento della berma al piede. Realizzazione di una vasca di raccolta per la tracimazione mediante opportuna disposizione dei massi della mantellata.
3	+4.55	3/2	-6.60	3/2	Sezione di progetto 2
4	+4.55	3/2	-6.60	3/2	Sostituzione del muro paraonde

Per la costruzione della mantellata in massi naturali sono stati utilizzati elementi del peso compreso fra 88 e 188g, con peso medio pari a circa 140g, corrispondenti al peso in prototipo di 7-15 t. I massi artificiali forniti dal Committente hanno invece un peso medio di 200g, corrispondente a circa 16t.

Di seguito vengono riportate le Tavole relative alle quattro configurazioni su cui sono state eseguite le prove ed in Allegato se ne riporta la documentazione fotografica.

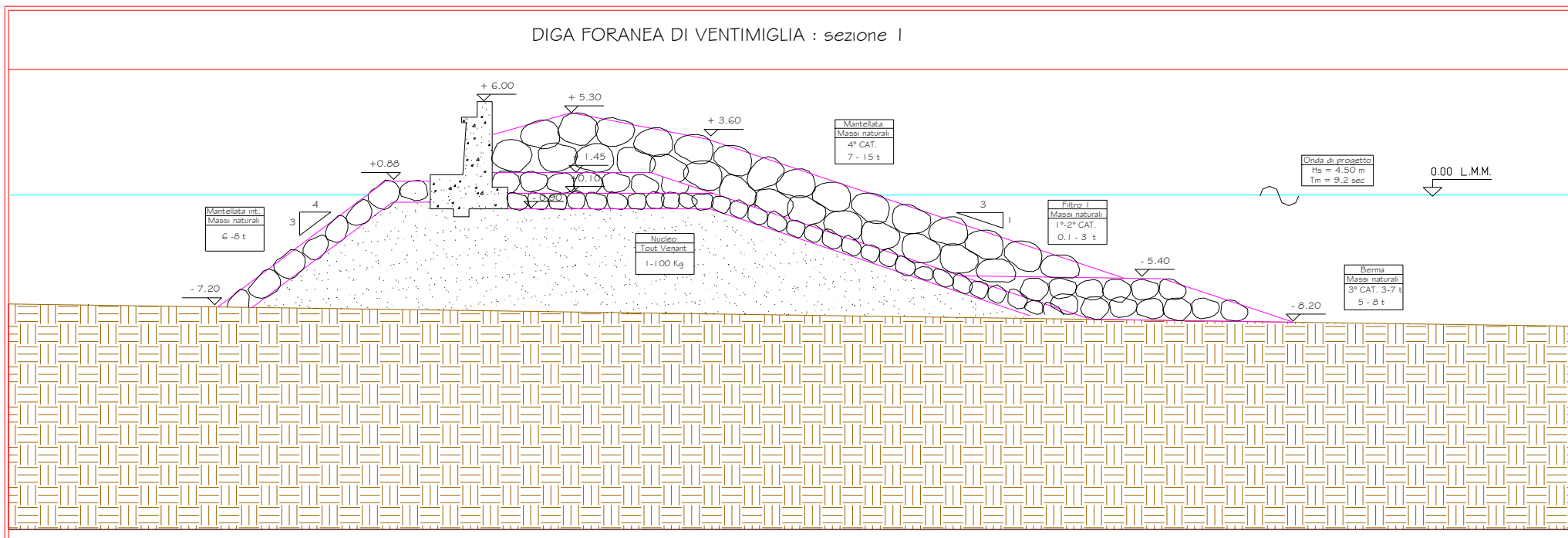


Tavola 1 – Configurazione 1: mantellata in massi naturali

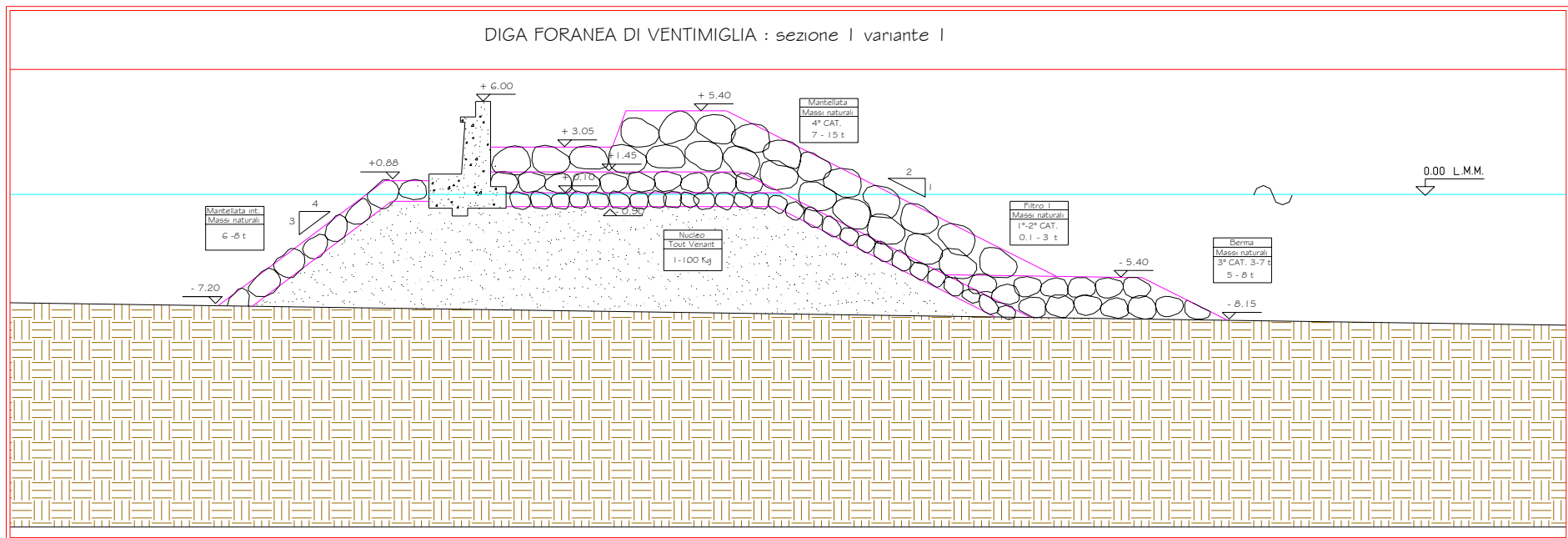


Tavola 2 – Configurazione 1 variante 1 con mantellata in massi naturali

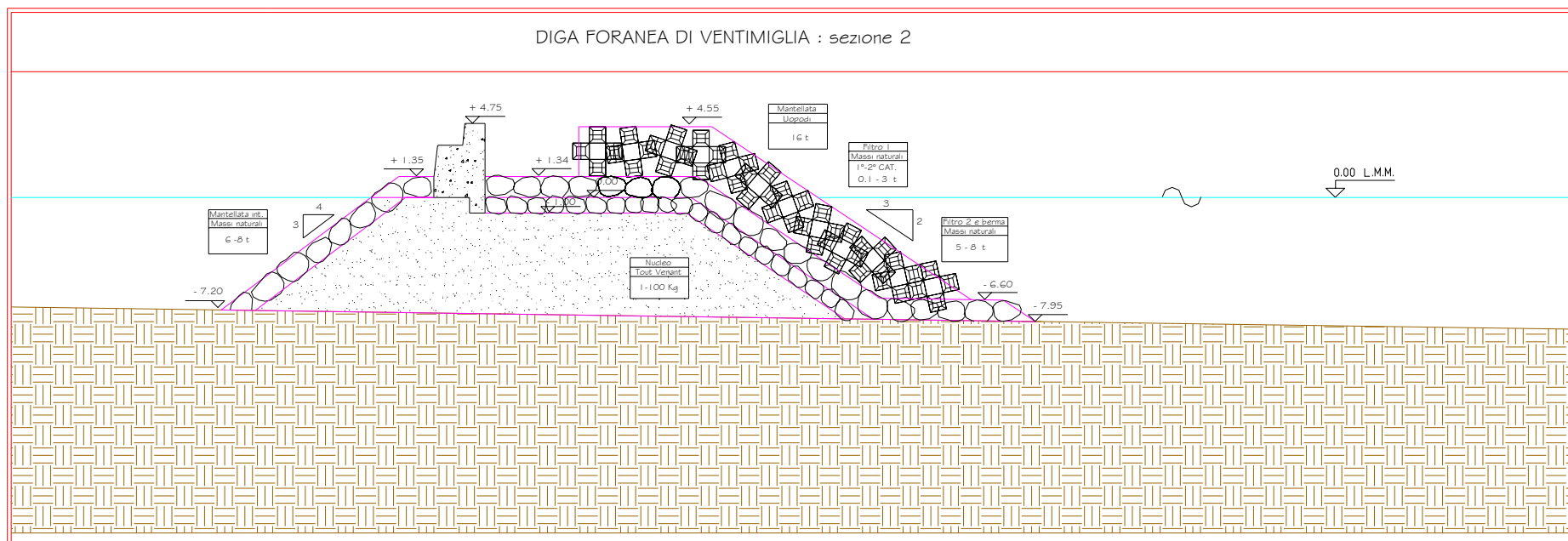


Tavola 3 – Configurazione 2: mantellata in massi artificiali

DIGA FORANEA DI VENTIMIGLIA : sezione 2 variante 2

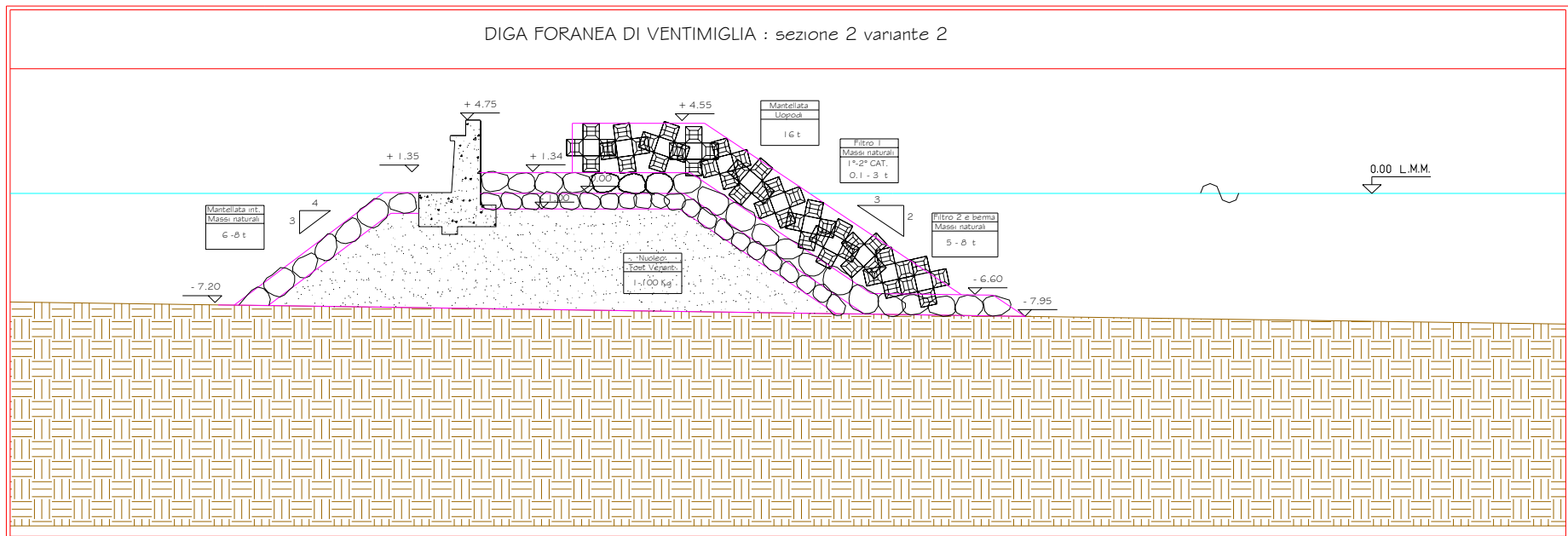


Tavola 4 – Configurazione 2 variante 2 con mantellata in massi artificiali

2.2 Condizioni di attacco del moto ondoso

Le caratteristiche del moto ondoso di progetto riprodotto in laboratorio sono state indicate dal Committente sulla base dell'analisi statistica delle informazioni ricavate da modelli di generazione del moto ondoso. Sono stati concordati i valori di altezza d'onda significativa da riprodurre in canale ed il periodo di picco.

Le caratteristiche degli eventi ondosi significativi sono riassunte in Tabella 3.

Tabella 3 - Caratteristiche del moto ondoso riprodotte in laboratorio

Onda	1	2	3	4	5	6
$H_{1/3}$ [m]	4.50	5.30	5.40	5.60	6.10	6.20
T_p [s]	9.18	10.50	9.84	11.80	11.80	11.15

La durata di ciascuna prova sulle sezioni prescelte è stata fissata pari a 30 minuti, equivalente ad una situazione reale di mare di circa 3 ore. Per alcune configurazioni non sono state provate tutte le onde.

Gli spettri simulati sono di tipo Jonswap mentre le altezze significative sono derivate da analisi zero-crossing.

Al termine di ogni prova sono state eseguite le seguenti operazioni:

1. acquisizione del moto ondoso lungo il canale;
2. misura del volume di acqua tracimata;
3. registrazione con telecamera digitale.

Il volume di acqua raccolto è stato rapportato alla durata della prova per ricavare la portata media tracimata per unità di larghezza e l'esecuzione delle prove su più configurazioni è stata eseguita con l'obiettivo di determinare la sezione che rende minima la portata tracimante Q_T [l/s m] assicurando contemporaneamente la stabilità della struttura e della berma al piede.

Per le acquisizioni dei valori caratteristici di moto ondoso sono state posizionate lungo il canale quattro sonde (cfr. Fig.2a): la prima, a 7.5m dalla pala, per la verifica del moto ondoso generato e corrispondente a condizioni di onde al largo, la seconda e la terza rispettivamente a 12.60m e 13.35m allo scopo di valutare la riflessione indotta dall'onda simulata, la quarta, infine, a 1.0m dal piede della struttura a rilevare le caratteristiche dell'onda incidente.

La posizione delle sonde è rimasta invariata per tutte le prove effettuate.

L'analisi delle caratteristiche di riflessione è stata effettuata con il metodo di Goda (1976) che consente di determinare il coefficiente di riflessione K_r e le altezze d'onda incidente e riflessa a partire dalle registrazioni della seconda e terza sonda opportunamente posizionate: utilizzando la tecnica della trasformata di Fourier per estrapolare da un sistema di treni d'onda multiriflettenti il valore dell'altezza d'onda incidente si ottiene:

$$H_i = \frac{1}{\sqrt{1 + K_r^2}} H_s$$

$$H_r = \frac{K_r}{\sqrt{1 + K_r^2}} H_s$$

dove si assume che

$$H_s = \sqrt{H_i^2 + H_r^2}.$$

3. Risultati delle prove

3.1 Configurazione 1 (Tav.1)

I risultati delle misure di tracimazione ottenuti sotto l'azione dei vari attacchi ondosi per la configurazione 1 sono riportati in Tabella 4. Va tenuto conto del fatto che nella costruzione della mantellata sono stati utilizzati massi da 7 a 15 t ma per lo strato esterno sono stati utilizzati solo massi di peso superiore a 10 t.

Tabella 4 – Risultati Configurazione 1

	$H_{1/3}=4.5$ m $T_p=9.18$ s	$H_{1/3}=5.3$ m $T_p=10.50$ s	$H_{1/3}=5.4$ m $T_p=9.84$ s	$H_{1/3}=5.6$ m $T_p=11.8$ s	$H_{1/3}=6.1$ m $T_p=11.8$ s	$H_{1/3}=6.2$ m $T_p=11.5$ s
Portata media tracimazione [l/s m]	0.22	4.97	0.88	4.15	4.15	7.52

3.2 Configurazione 1 variante 1 (Tav.2)

Le modifiche apportate rispetto alla configurazione 1 sono:

- creazione di una vasca di dissipazione in fronte al muro paraonde;
- variazione di pendenza della mantellata da 3/1 fino a 2/1.

Questo tipo di variante garantisce forti riduzioni dei valori delle portate medie di tracimazione come riportato in Tabella 5.

Tabella 5 – Risultati Configurazione 1 variante 1

	$H_{1/3}=4.5$ m $T_p=9.18$ s	$H_{1/3}=5.3$ m $T_p=10.50$ s	$H_{1/3}=5.4$ m $T_p=9.84$ s	$H_{1/3}=5.6$ m $T_p=11.8$ s	$H_{1/3}=6.1$ m $T_p=11.8$ s	$H_{1/3}=6.2$ m $T_p=11.5$ s
Portata media tracimazione [l/s m]	0.78	0.31	0.40	0.70	1.02	1.10

3.3 Configurazione 2 (Tav.3)

Questa configurazione prevede l'utilizzo dei massi artificiali forniti dal Committente per la mantellata.

I risultati delle misure di tracimazione ottenuti dall'interazione tra i vari attacchi ondosi e la configurazione 2 sono riportati in Tabella 6.

Tabella 6– Risultati Configurazione 2

	$H_{1/3}=4.5\text{ m}$ $T_p=9.18\text{ s}$	$H_{1/3}=5.3\text{ m}$ $T_p=10.50\text{ s}$	$H_{1/3}=5.6\text{ m}$ $T_p=11.8\text{ s}$	$H_{1/3}=6.1\text{ m}$ $T_p=11.8\text{ s}$	$H_{1/3}=6.2\text{ m}$ $T_p=11.5\text{ s}$
Portata media tracimazione [l/s m]	1.02	0.23	Instabilità del muro paraonde	#	#

Durante l'esecuzione delle prove relative ai primi due attacchi ondosi si è rilevato un lieve fenomeno di “rocking” dei massi artificiali della mantellata, mentre la prova successiva è stata interrotta a causa della forte instabilità manifestata dal muro paraonde, come illustrato nell'allegato fotografico.

3.4 Configurazione 2 variante 1 (Tav.4)

La variante 1 della configurazione 2 prevede la sostituzione del muro paraonde previsto nella configurazione 2 con quello utilizzato in configurazione 1.

I risultati delle misure di tracimazione ottenuti dall'interazione tra i vari attacchi ondosi e la configurazione 2 variante 1 sono riportati in Tabella 7.

Tabella 7– Risultati Configurazione 2 variante 1

	$H_{1/3}=4.5\text{ m}$ $T_p=9.18\text{ s}$	$H_{1/3}=5.3\text{ m}$ $T_p=10.50\text{ s}$	$H_{1/3}=5.6\text{ m}$ $T_p=11.8\text{ s}$	$H_{1/3}=6.1\text{ m}$ $T_p=11.8\text{ s}$	$H_{1/3}=6.2\text{ m}$ $T_p=11.5\text{ s}$
Portata media tracimazione [l/s m]	0.16	0.70	2.5	3.7	3.9

Durante tutte le prove si è osservato rocking sui massi artificiali, crescente con gli attacchi ondosi simulati.

3.5 Considerazioni sui valori di tracimazione misurati

Per quanto riguarda la quantificazione dei danni indotti dalla portata di tracimazione, in riferimento alla Figura 3 riportata di seguito, si rileva sempre la possibilità di situazioni a

rischio per veicoli e pedoni che vengano a trovarsi nella zona immediatamente retrostante il muro paraonde in caso di mareggiate caratterizzate da un' altezza d'onda superiore a 4.5 m. Relativamente alla configurazione 1 variante 1 i valori di tracimazione misurati si collocano invece in una zona del grafico di riferimento che non fa presumere danni strutturali per nessun attacco ondoso fra quelli provati.

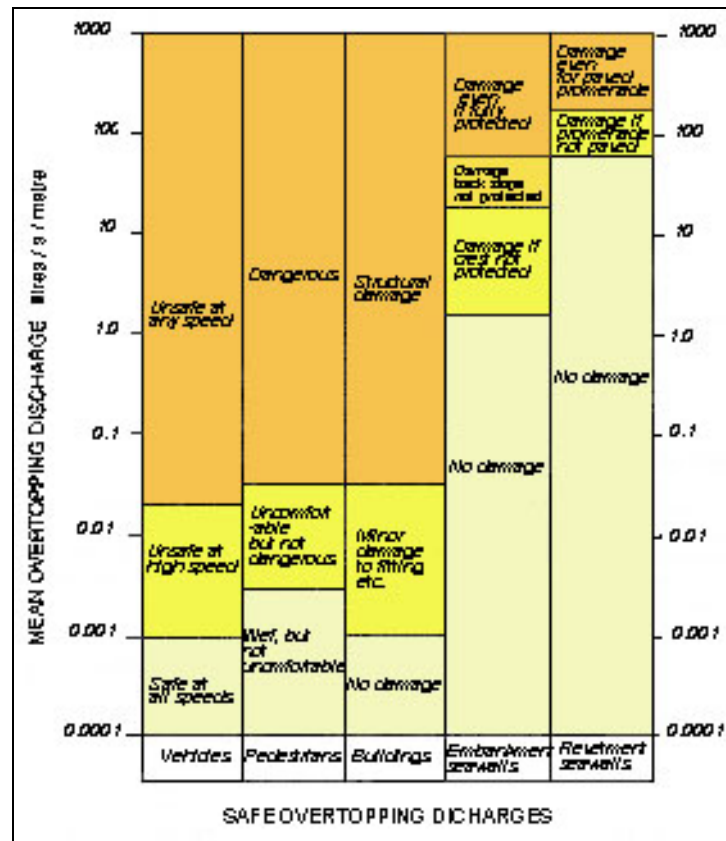


Figura 3– Schema di riferimento per la valutazione dei danni da overtopping.

4. Conclusioni

La sezione 1 si è dimostrata strutturalmente stabile sotto tutti gli attacchi ondosi, con valori di tracimazione compresi fra 0.22 l/ms e 7.52 l/ms; la sua variante, in cui è stata inserita la vasca di dissipazione, ha avuto un comportamento analogo dal punto di vista strutturale ma ha fatto registrare i valori minori di portata tracimante fra tutte le sezioni provate.

Va tenuto conto del fatto che nella costruzione della mantellata per lo strato esterno sono stati utilizzati solo massi di peso superiore a 10 t.

Per la sezione 2 si è osservato il ribaltamento del muro paraonde, durante l'attacco ondo caratterizzato da altezza significativa 5.60 m e periodo di picco 11.80 sec, tanto da indurre alla sospensione delle prove; la sua variante invece, pur conservando una buona stabilità strutturale, presenta valori delle portate di tracimazione maggiori di quelli osservati per la sezione 1 ed alla sua variante, almeno per le onde di altezza maggiore o uguale a 5,6 m.

Per quanto riguarda la stabilità della mantellata non sono stati osservati spostamenti di massi ma solo oscillazioni (rocking), anche in conseguenza degli attacchi ondosi meno intensi.

Il Responsabile Scientifico delle prove
Prof. Ing. P. L. Aminti

Il Direttore del Dipartimento
Prof. Ing. A. Vignoli

Il presente studio è stato condotto con la collaborazione di: ing. Lorenzo Cappietti, Martina Conti, ing. Claudia D'Eliso e dei tecnici del laboratorio di Idraulica Mauro Gioli e Muzio Mascherini

ALLEGATO FOTOGRAFICO



Foto 1 – Configurazione 1.



Foto 2 – Configurazione 1, variante 1



Foto 3 – Configurazione 1, variante 1: particolare vasca di dissipazione.



Foto 4 – Configurazione 2.



Foto 5 – Configurazione 2: ribaltamento muro paraonde.

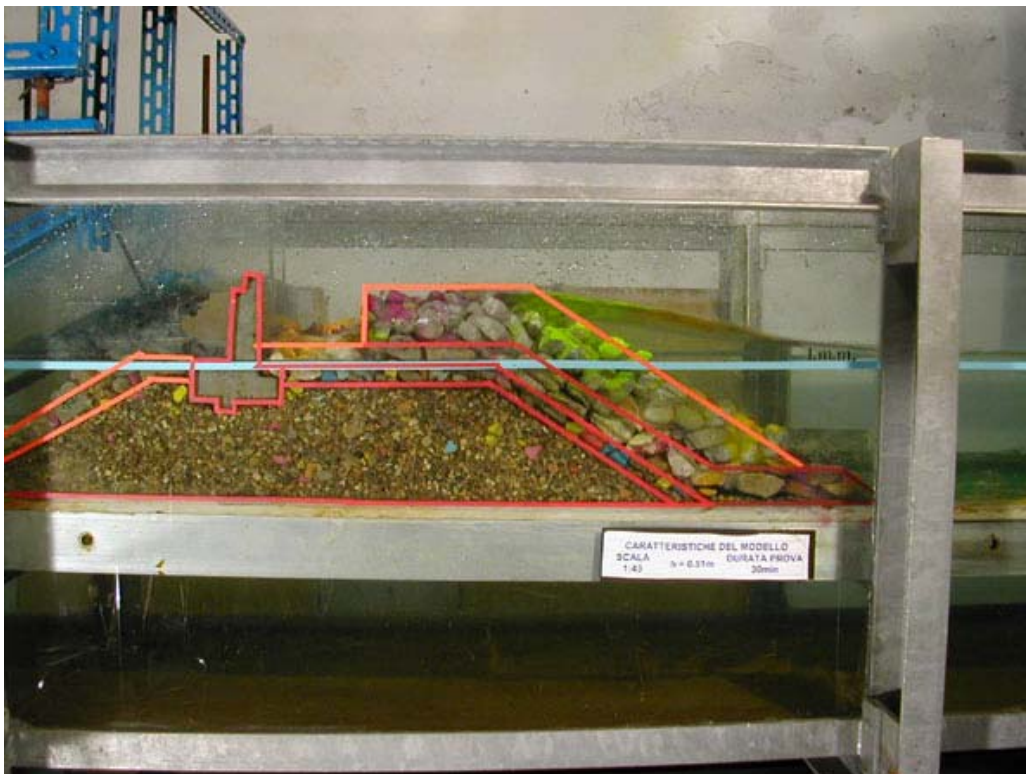


Foto 5 – Configurazione 2, variante 1.



Foto 6 – Configurazione 2, variante 1: particolare mantellata.