



Autorità Portuale di Augusta

**LAVORI DEL PRIMO STRALCIO E DEL SECONDO STRALCIO
DELLA TERZA FASE DEL PORTO COMMERCIALE DI AUGUSTA
- BANCHINE CONTAINERS -**

IMPRESE:



Condotte S.p.A.

Fondata il 7 aprile 1880

(MANDATARIA)



**PIACENTINI
COSTRUZIONI** spa



Cosedil spa

(MANDANTI)

PROGETTO ESECUTIVO DI FUSIONE ED INTEGRAZIONE DEL I E II STRALCIO

3					
2					
1	310715	PRIMA REVISIONE	E. FOTI	F. GIORDANO	F. GIORDANO
0	081114	PRIMA EMISSIONE	E. FOTI	F. GIORDANO	F. GIORDANO
REV.	DATA	EMISSIONE	RED.	VER.	APPR.
	PROGETTO 1 0 7 3	OPERA G E 0 0	TIPO ELAB. C	N° ELAB. 0 0 7	REV. B
					SCALA:

TITOLO ELABORATO:

**STUDI E RELAZIONI SPECIALISTICHE
STUDIO IDRAULICO MARITTIMO**

PROGETTAZIONE:

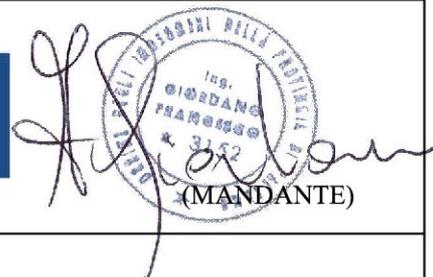
INCO



(MANDATARIA)



SIGMA INGEGNERIA s.r.l.
Via della Libertà, 201/A
90143 PALERMO
Tel. 091/6254742 - Fax 091/807909
C.F. e P.IVA 02639310826
e-mail: sigmaingefr@gmail.com



(MANDANTE)

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

DIPARTIMENTO INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA

CONVENZIONE TRA LA SOCIETÀ SIGMA INGEGNERIA s.r.l. E IL DIPARTIMENTO
INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

*Studio su modello fisico della riflessione prodotta dalla nuova configurazione
delle banchine del porto commerciale di Augusta*

Relazione sulle prove di laboratorio effettuate e sui risultati ottenuti



Il Responsabile Scientifico
(Prof. Ing. Enrico FOTI)

Il Direttore del DICAR
(Prof. Ing. Paolo LA GRECA)

Catania, ottobre 2014

Indice

Premessa	1
1 Introduzione.....	2
1.1 Posizione del problema	2
1.2 Obiettivi.....	3
1.3 Limiti.....	3
1.4 Descrizione del progetto.....	4
1.5 Fasi del lavoro svolto	12
2 Il fenomeno della riflessione del moto ondoso.....	13
2.1 Generalità	13
2.2 Il fenomeno della riflessione su un ostacolo verticale	14
2.3 Il fenomeno della riflessione su una parete inclinata	19
2.4 Effetti del processo di frangimento sul fenomeno della riflessione.....	21
2.5 Riflessione su cassoni cellulari con camera assorbente	23
2.6 Il fenomeno della riflessione su banchine su pali con scogliera sottostante	26
3 Studio del fenomeno della riflessione attraverso la modellazione fisica	27
3.1 Generalità	27
3.2 Metodo per la stima del coefficiente di riflessione in laboratorio.....	28
4 Modellazione fisica per la valutazione dei coefficienti di riflessione di banchine portuali.....	32
4.1 Generalità	32
4.2 Criteri di similitudine.....	33
4.2.1 Criteri di similitudine nell’Ingegneria Marittimo-Costiera	35
4.2.2 Controllo della densità del materiale del modello	39
4.2.3 Criteri di similitudine adottati nel presente studio	42
5 Apparato sperimentale e procedura sperimentale	45

5.1	Generalità	45
5.2	Descrizione dell'apparato sperimentale	45
5.2.1	La vasca di sperimentazione	45
5.2.2	Sistema per la generazione del moto ondoso.....	47
5.3	Scelta del rapporto geometrico di scala del modello	50
5.4	Descrizione delle caratteristiche dei modelli fisici adottati	51
5.4.1	Realizzazione del modello fisico della banchina a giorno proposta in fase di gara	53
5.4.2	Realizzazione del modello fisico della banchina su pali e palancole proposta in fase di progettazione esecutiva	57
5.5	Strumentazione di misura	60
5.5.1	Misura del moto ondoso.....	60
5.5.2	Misura della portata trascinata media	62
6	Prove sperimentali condotte per la stima del coefficiente di riflessione	64
6.1	Generalità	64
6.2	Prove effettuate	64
6.3	Risultati ottenuti	66
6.3.1	Configurazione 1	66
6.3.2	Configurazione 2	71
6.4	Analisi dei risultati ottenuti	76
7	Conclusioni.....	78
	Bibliografia	81
	Elenco dei simboli	84
	Indice delle Figure	87
	Indice delle Tabelle	91
	Appendice A - Schede degli esperimenti condotti	92

Premessa

La società SIGMA Ingegneria s.r.l. è incaricata, della progettazione esecutiva dei “Lavori del primo stralcio e del secondo stralcio della terza fase del porto commerciale di Augusta Banchine Containers”.

Durante la redazione del progetto esecutivo dell'opera è emersa la necessità di proporre una modifica delle banchine, per la quale sono necessari alcuni approfondimenti circa il comportamento idraulico-marittimo dell'opera.

Al fine di indirizzare opportunamente la progettazione esecutiva, si è ritenuto opportuno effettuare lo studio su modello fisico della riflessione indotta dalla configurazione proposta dalla stessa società per la banchina del primo stralcio e del secondo stralcio della terza fase del porto commerciale di Augusta.

In questo contesto, si inserisce la richiesta di collaborazione della SIGMA Ingegneria s.r.l. al Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura dell'Università degli Studi di Catania nell'ambito di una convenzione avente per oggetto: lo studio su modello fisico della riflessione prodotta dalla nuova configurazione delle banchine del porto commerciale di Augusta.

Tutto ciò premesso, nella presente relazione, così come previsto dalla citata convenzione, si riportano i risultati della sperimentazione condotta presso il Laboratorio di Idraulica del DICAR su modello fisico della banchina antiriflettente oggetto della convenzione, sia nella configurazione proposta in sede di gara sulla base del progetto definitivo, sia nella configurazione modificata proposta in sede di progetto esecutivo.

1 Introduzione

1.1 Posizione del problema

La presente relazione riporta i risultati relativi allo studio su modello fisico della banchina antiriflettente proposta dalla SIGMA Ingegneria s.r.l. nell'ambito della Progettazione Esecutiva dei "Lavori del primo stralcio e del secondo stralcio della terza fase del porto commerciale di Augusta Banchine Containers".

Lo studio su modello fisico è stato particolarmente rivolto all'analisi della interazione tra il moto ondoso e le banchine del porto commerciale di Augusta.

Il fenomeno della riflessione, ossia il fenomeno della interazione tra onde e ostacoli riflettenti assume in generale particolare rilevanza all'interno di un bacino portuale, ove la presenza di banchine, di pareti verticali, di scogliere in massi, etc., provoca un moto ondoso riflesso che, sovrapponendosi a quello incidente, dà luogo ad altezze d'onda superiori a quelle del moto ondoso incidente. In taluni casi, come è noto, se l'ostacolo che intercetta il moto ondoso è totalmente riflettente, come accade nel caso di una superficie piana e verticale, l'onda risultante è un'onda stazionaria di altezza doppia rispetto a quella dell'onda incidente.

Questo è, dunque, il motivo per cui occorre contenere il fenomeno della riflessione, specialmente all'interno di un bacino portuale, dove un'elevata agitazione può comportare sollecitazioni eccessive per le navi ormeggiate o in manovra.

La letteratura disponibile sull'argomento risulta lacunosa per quel che riguarda le banchine a parete verticale con camera assorbente e scogliera sottostante, ossia per le c.d. banchine antiriflettenti. Dette banchine sono realizzate tramite un impalcato su pali e, al di sotto dell'impalcato, presentano una scogliera su cui il moto ondoso dovrebbe dissipare la propria energia per frangimento.

In particolare, nel caso dei Lavori del primo stralcio e del secondo stralcio della terza fase del porto commerciale di Augusta Banchine Containers, la SIGMA Ingegneria s.r.l. ha proposto una tipologia di banchine su pali e palancole alternati: in corrispondenza delle palancole la parte sommitale delle banchine risulta essere aperta, in modo da accogliere così una scogliera interna. Tale soluzione è stata scelta al fine di garantire la possibilità di dragare successivamente alla realizzazione dell'opera, così da raggiungere in futuro una profondità operativa maggiore di quella attuale. Si comprende quindi come, a fronte delle caratteristiche complesse di questo

tipo di struttura, per essa non siano disponibili indicazioni progettuali sulla geometria da adottare né stime del coefficiente di riflessione del moto ondoso.

A causa di questa carenza di informazioni inerenti alla riflessione del moto ondoso generata dalle banchine in oggetto, si è reso necessario effettuare uno studio su modello fisico, al fine di fornire utili indicazioni per l'ottimizzazione del dimensionamento della geometria della banchina medesima. In particolare, lo studio è stato condotto in termini comparativi, considerando sia la riflessione indotta dalla innovativa tipologia di banchina proposta in fase di progettazione esecutiva, sia la riflessione indotta da banchina a giorno su pali, con scogliera sottostante, inizialmente offerta in fase di progettazione definitiva.

1.2 Obiettivi

Obiettivo della presente indagine sperimentale è quello di reperire utili informazioni sull'effetto della geometria proposta, in fase di Progettazione Esecutiva, delle Banchine Containers del primo stralcio e del secondo stralcio della terza fase del porto commerciale di Augusta. In particolare si vogliono verificare le capacità antiriflettenti della nuova soluzione proposta, comparandole con la configurazione scelta in fase di progettazione definitiva: banchina a giorno su pali con sottostante scarpata antirisacca.

In particolare, obiettivo specifico dell'indagine sperimentale è stimare i valori dei coefficienti di riflessione che si instaurano al variare delle condizioni idrodinamiche del moto ondoso incidente per le due configurazioni analizzate .

1.3 Limiti

In ambito marittimo i modelli fisici rappresentano la riproduzione in scala ridotta di una infrastruttura sollecitata da forzanti naturali. Rispetto all'osservazione sul campo, la modellistica fisica ha il vantaggio di potere realizzare condizioni simili a quelle osservabili in Natura, potendo ripeterle o modificarle a piacimento.

Tuttavia, la modellazione fisica è affetta da alcuni limiti che possono essere ricondotti all'impossibilità di riprodurre in laboratorio le condizioni presenti in Natura in maniera esatta. È noto, infatti, che le condizioni di similitudine dinamica tra modello in scala ridotta e prototipo non possono essere, nella stragrande maggioranza dei casi, tutte contemporaneamente soddisfatte. Ciò conduce a una similitudine incompleta che può causare differenze di comportamento tra prototipo e modello, note in letteratura

come effetti di scala. Nonostante tali effetti siano ineliminabili, si vedrà nel prosieguo dello studio come le prove condotte nell'ambito della presente convenzione siano state effettuate cercando di minimizzarne il più possibile gli errori indotti.

Pertanto, nonostante i sopracitati limiti, si ritiene che i risultati dello studio effettuato possano essere ritenuti ragionevolmente affidabili rispetto agli obiettivi prefissati.

1.4 Descrizione del progetto

La società SIGMA Ingegneria s.r.l. è incaricata della progettazione esecutiva dei "Lavori del primo stralcio e del secondo stralcio della terza fase del porto commerciale di Augusta Banchine Containers".

Si ricorda che l'analisi del progetto definitivo, posto a base di gara di appalto, ha evidenziato alcune problematiche tecniche ed ambientali con particolare riguardo allo smaltimento dei materiali dragati e alle tipologie costruttive della banchina a giorno e dei piazzali. In particolare, poiché l'intervento previsto in progetto ricade all'interno del S.I.N. di Priolo-Gargallo, sono state messe a punto, in gara e in sede di offerta, alcune soluzioni progettuali migliorative al fine di ridurre gli impatti sull'ambiente circostante.

La zona di interesse del Porto Commerciale di Augusta è costituita dalle Banchine Containers, evidenziate in Figura 1.1; inoltre in Figura 1.2 viene mostrata una rappresentazione di insieme degli interventi realizzati, di quelli oggetto del presente intervento e di quelli previsti nell'ambito delle Banchine Containers.



Figura 1.1 Vista aerea del porto di Augusta con indicazione dell'area di intervento (fonte Googlemaps – Settembre 2011).

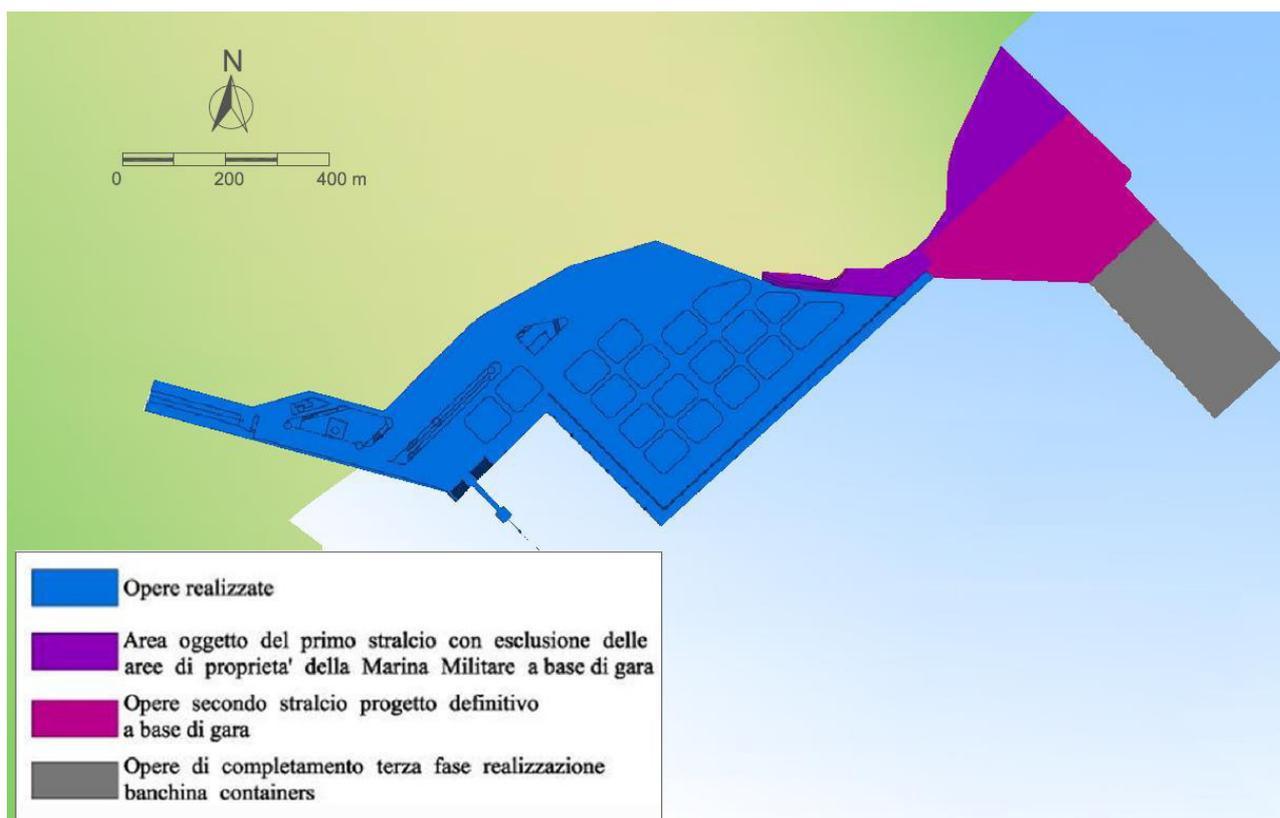


Figura 1.2 Dettaglio dell'area di intervento con indicazione dei lavori della terza fase del porto commerciale di Augusta: Banchine Containers.

Le banchine previste nel secondo stralcio della terza fase del progetto del porto commerciale di Augusta sono di tipo a giorno con scarpata antirisacca in massi naturali.

Il progetto definitivo posto a base di gara prevedeva una scarpata con pendenza 4:3 in massi naturali di peso compreso tra 300 e 500 kg (vedere Figura 1.3).

Sulla base dei risultati ottenuti per la valutazione della stabilità delle opere di protezione dall'erosione della banchina portuale e del fondale antistante dovuta sia all'azione del moto ondoso che all'azione delle correnti indotte dalle eliche e dai bow thruster delle navi, è stato dimostrato che la protezione prevista nel progetto definitivo posto a base di gara non era sufficientemente adeguata. Ciò è ancor più rilevante se si tiene in considerazione il fatto che la presenza dell'impalcato determinerebbe elevatissimi costi per una eventuale manutenzione della stessa massicciata di protezione.

Sulla base delle sopra esposte considerazioni, al fine di assicurare un corretto coefficiente di sicurezza per la stabilità dell'opera a gettata e dei fondali antistanti, è

stata proposta in fase di gara una soluzione migliorativa caratterizzata da una protezione con scogli di massa compresa tra 500 e 1000 kg nella scarpata sottostante l'impalcato e una protezione in scogli con massa compresa tra 200 e 400 kg sul fondo (vedere Figura 1.4).

In fase di Progettazione Esecutiva è emersa la necessità di ridurre i tempi di realizzazione e di garantire la possibilità di dragare il fondale successivamente alla esecuzione dell'opera. Si è dunque scelto di modificare ulteriormente la soluzione progettuale proponendo una banchina antiriflettente formata da pali e palancole alternati. Nella parte sommitale, in vicinanza del pelo libero le palancole vengono tagliate e viene ricavata una camera antiriflettente in massi, sottostante l'impalcato.

Sono state quindi richieste dal Committente delle prove sperimentali volte a verificare le caratteristiche antiriflettenti nell'effettivo layout di progetto esecutivo e a comparare i risultati con la soluzione proposta in fase di gara di appalto. Di seguito le Figure 5.7, 5.8 e 5.9 riportano la sezione, la pianta e la vista laterale della banchina caratterizzata dall'alternanza di pali e palancole.

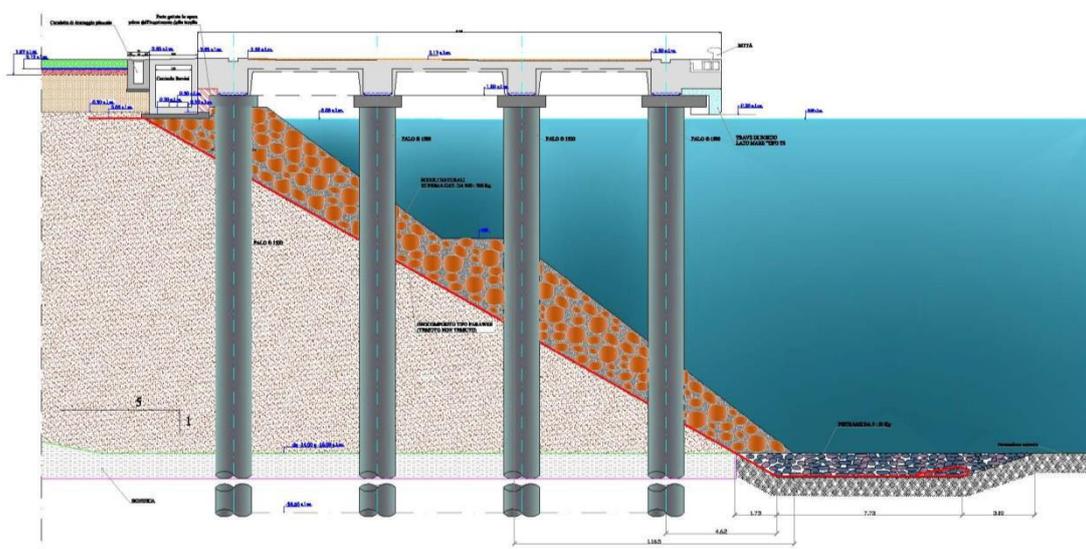


Figura 1.3 Sezione tipo delle banchine previste nel progetto definitivo, posto a base di gara, del secondo stralcio della terza fase del Porto Commerciale di Augusta.

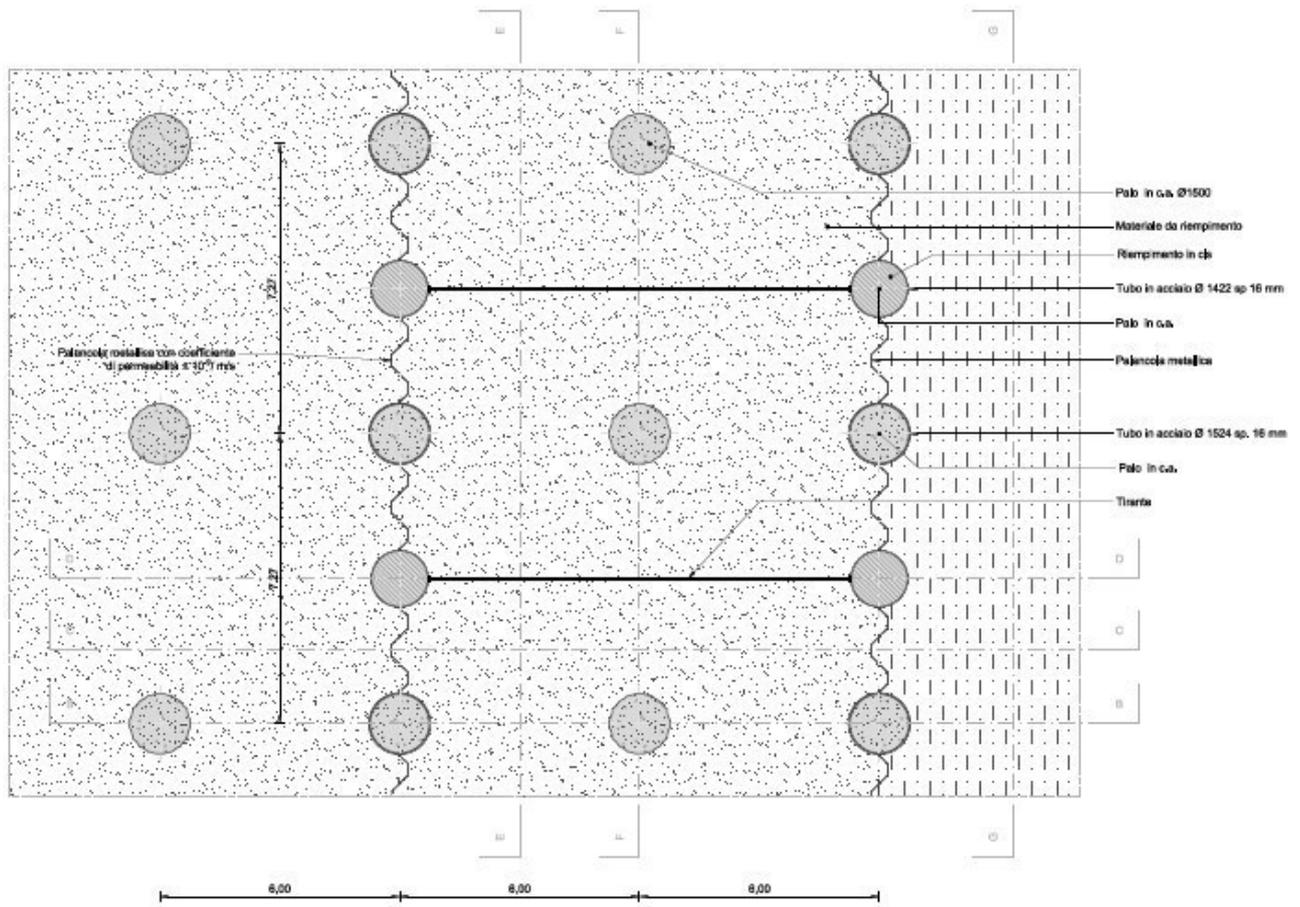


Figura 1.5 Pianta della banchina di riva su pali e palancole, proposta in sede di progetto esecutivo.

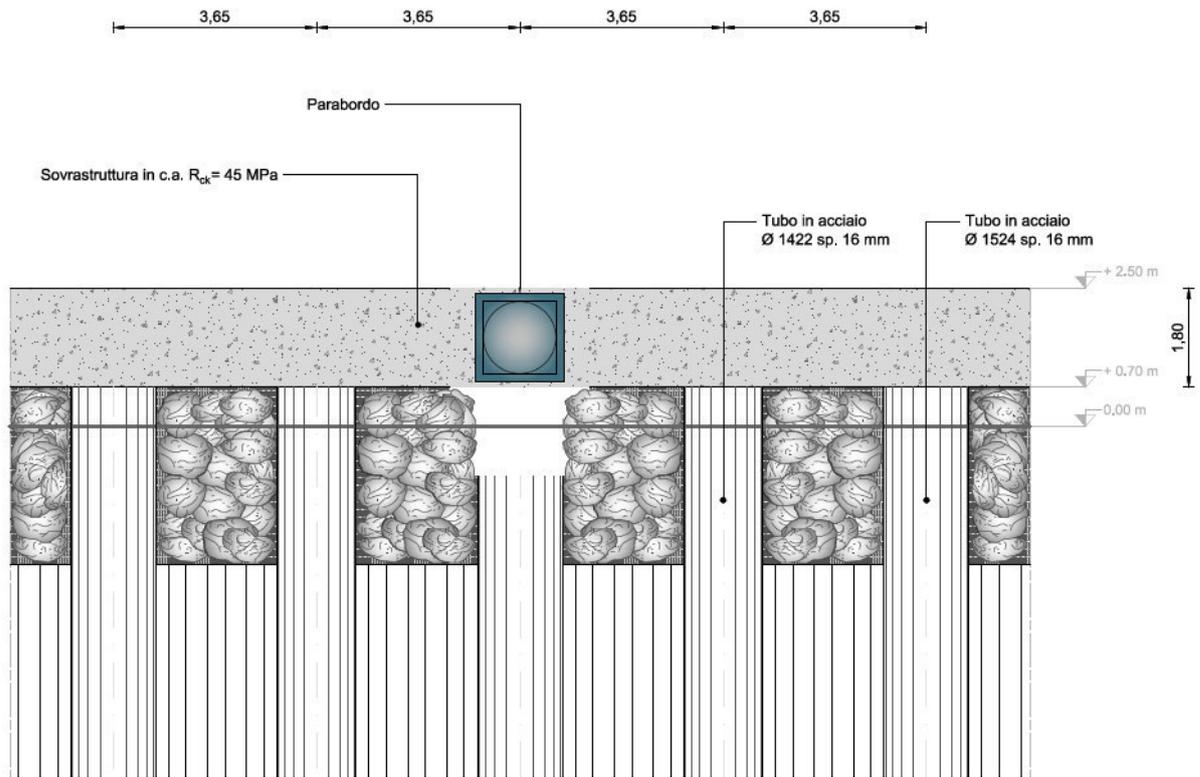


Figura 1.6 Vista frontale della banchina di riva su pali e palancole, proposta in sede di progetto esecutivo.

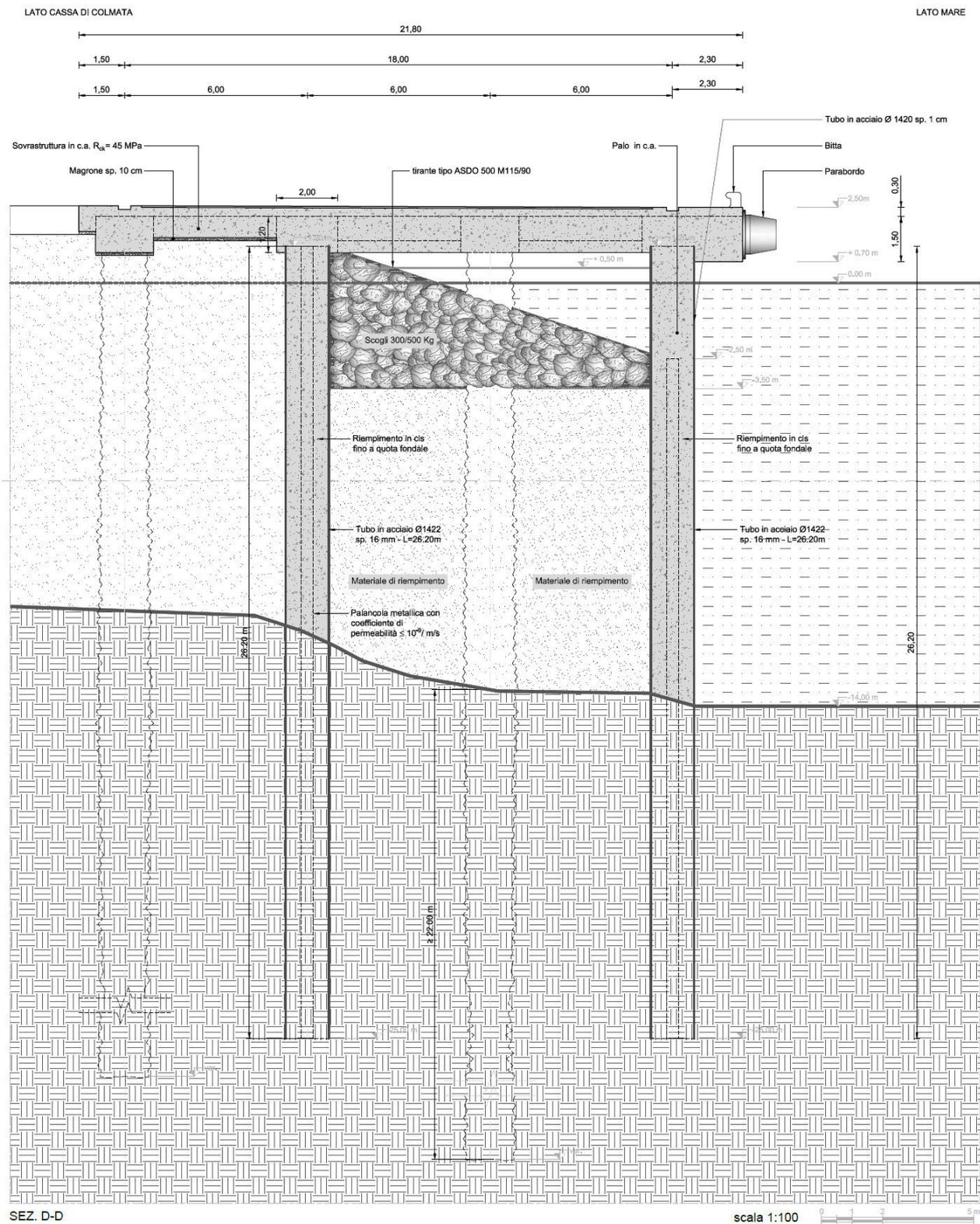


Figura 1.7 Sezione trasversale della banchina di riva su pali e palancole, sezione D-D di Figura 1.5, proposta in sede di progetto esecutivo.

1.5 Fasi del lavoro svolto

L'attività sperimentale è stata condotta presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura dell'Università degli Studi di Catania.

L'attività si è articolata in diverse fasi focalizzate su diversi aspetti del problema in esame.

Una prima fase, di cui si riporta una sintesi nel capitolo 2, è stata rivolta alle indagini sullo stato dell'arte del problema in esame, nonché a verificare se in letteratura fossero disponibili studi relativi al fenomeno della riflessione su banchine assimilabili a quella in progetto. Una volta verificato che non era possibile reperire utili informazioni in qualche modo relazionabili allo studio in oggetto, è stata pianificata la campagna di prove su modello fisico. A tale scopo, sono state innanzitutto individuate le metodologie più affidabili per la misura della riflessione in laboratorio, riportate nel capitolo 3.

In seguito si è progettata e messa a punto la campagna sperimentale basandosi sui criteri di similitudine adottati nell'Ingegneria Marittima e Costiera. In particolare, facendo riferimento a detti criteri, si è scelta la scala geometrica più opportuna e si è messo a punto l'apparato sperimentale, grazie anche alla progettazione e alla realizzazione "ad hoc" di modelli di banchine su pali con camera assorbente in scala 1:45. Infine si sono messi a punto i codici di calcolo necessari per l'analisi dei dati rilevati. I risultati di questa fase sono dettagliatamente descritti nel capitolo 4.

Il capitolo 5 riporta una descrizione dell'apparato sperimentale e della strumentazione utilizzata durante la presente campagna sperimentale. I risultati ottenuti sono riportati e discussi nel capitolo 6. Infine, il capitolo 7 riporta le considerazioni conclusive.

2 Il fenomeno della riflessione del moto ondoso

2.1 Generalità

Quando un'onda incontra un ostacolo, come ad esempio il paramento di una banchina, si genera un'onda che si propaga in verso opposto a quella incidente. Poiché le due onde, quella riflessa e quella incidente, si sovrappongono, ne risulta nello specchio d'acqua antistante uno stato di agitazione ondoso ben più rilevante in termini di altezza d'onda di quello che competerebbe alla sola onda incidente. È evidente come all'interno di una struttura portuale, il cui scopo principale è il ricovero delle imbarcazioni, risulti di estrema importanza che le perturbazioni della superficie libera generate dal moto ondoso siano ridotte il più possibile al fine di evitare eccessive sollecitazioni agli ormeggi e danni alle imbarcazioni in manovra. Ne consegue che nell'ammodernamento e messa in sicurezza di strutture esistenti, risulta necessario porre l'attenzione proprio sul problema della riflessione.

La riflessione di un'onda è totale solo nel caso teorico di una parete perfettamente riflettente. In questo caso si ha che l'altezza dell'onda riflessa H_r risulta esattamente uguale a quella dell'onda incidente H_i . Nella realtà, soprattutto all'interno dei porti, le banchine assolvono anche alla funzione di smorzatori di energia ondosa. In questi casi si ottiene una riflessione parziale descritta tramite il coefficiente di riflessione K_r , definito come:

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (2.1)$$

Dalla definizione appena data, appare evidente come K_r sia sempre minore di 1.

Ai fini di un inquadramento generale del problema e di un'agevole interpretazione dei risultati sperimentali acquisiti, nel seguito del Capitolo verrà brevemente illustrato il processo di riflessione con riferimento non soltanto alla fisica del problema, ma anche alla sua trattazione teorica, basata sull'applicazione della teoria lineare del moto ondoso. In particolare, verranno presentati separatamente i casi di riflessione totale su parete verticale e di riflessione parziale su parete inclinata o su ammasso poroso.

2.2 Il fenomeno della riflessione su un ostacolo verticale

Lo studio del campo di moto generato da un'onda incidente su di un ostacolo verticale totalmente riflettente è interessante in quanto simile a quello che si avrebbe in presenza di un'onda che insiste su una banchina di riva realizzata con cassoni cellulari sprovvisti di camera assorbente.

Per semplicità si analizzerà il caso di onda regolare che si propaga su di un fondale non erodibile di profondità h costante. Lo schema concettuale che si può adottare per tale studio è quello riportato in Figura 2.1 in cui è rappresentato lo schema di una vasca per lo studio del campo di moto in presenza di onde. Le onde vengono generate dalla paratoia a ventola che oscilla periodicamente. Le onde così generate iniziano a propagarsi verso l'ostacolo e qui si riflettono.



Figura 2.1 Schematizzazione del problema della riflessione di un'onda che incide su di un ostacolo verticale.

Si adotti un sistema di riferimento con l'asse x giacente sul livello di quiete con origine coincidente con l'ostacolo riflettente (vedere Figura 2.1) e con l'asse z generare onde di piccola ampiezza (per cui risulta ragionevole adottare la teoria lineare); appare chiaro che dal battitore parte un'onda progressiva caratterizzata da un sopralzo del pelo libero descritto dalla seguente espressione:

$$\eta_i(x,t) = \frac{H_i}{2} \cos(k_i x - \omega_i t) \quad (2.2)$$

con H_i altezza d'onda incidente, k_i numero d'onda dell'onda incidente e ω_i frequenza angolare dell'onda incidente.

A causa della presenza del muro verticale in $x=0$, all'onda incidente si sommerà l'onda riflessa (anch'essa di piccola ampiezza), caratterizzata dal profilo:

$$\eta_r(x,t) = \frac{H_r}{2} \cos(k_r x + \omega_r t + \varepsilon) \quad (2.3)$$

in cui il pedice r fa riferimento alle grandezze relative all'onda riflessa ed ε allo sfasamento tra l'onda incidente e quella riflessa.

Dal momento che il problema viene affrontato adottando un'analisi lineare (equazioni di Stokes al I ordine di approssimazione), risulta chiaro che se η_i e η_r e i rispettivi potenziali di velocità ϕ_i e ϕ_r soddisfano le equazioni che governano il problema, allora anche le loro somme $(\eta_i + \eta_r)$, $(\phi_i + \phi_r)$ saranno soluzioni del problema.

Attraverso opportuni passaggi matematici si ricava che il profilo del pelo libero e la funzione potenziale della velocità risultano rispettivamente essere pari a:

$$\eta(x, t) = H \cos(kx) \cos(\omega t) \quad (2.4)$$

$$\phi(x, z, t) = -gH(\omega)^{-1} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx) \sin(\omega t) \quad (2.5)$$

in cui H è l'altezza d'onda totale.

Ne segue quindi che nel caso di parete verticale impermeabile, il fenomeno della riflessione dà luogo a un'onda risultante ($H = H_i + H_r$) di altezza pari al doppio dell'altezza d'onda incidente, con lo stesso periodo e lo stesso numero d'onda (ovvero la stessa lunghezza d'onda). Si parla in questo caso di riflessione totale, essendo il coefficiente di riflessione K_r pari a uno.

Da ciò si comprende perchè il fenomeno della riflessione nell'ambito di un bacino portuale sia certamente da limitare il più possibile.

Si procede adesso alla illustrazione del campo di moto risultante, ossia alla determinazione del significato fisico delle (2.4) e (2.5).

All'istante $t=0$, il profilo dell'onda è descritto dalla relazione:

$$\eta(x, t) = H \cos(kx) \quad (2.6)$$

Lungo l'asse x si ha pertanto l'andamento rappresentato in Figura 2.2.

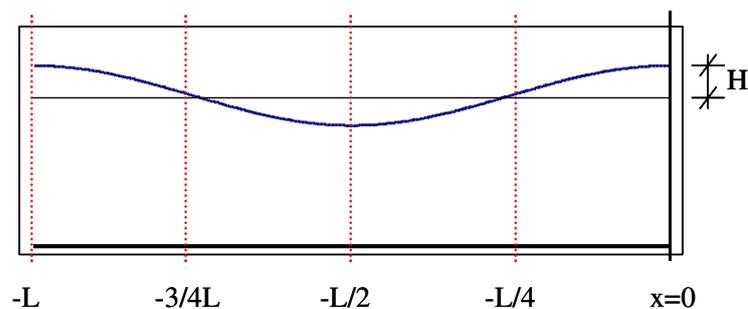


Figura 2.2 Rappresentazione del profilo dell'onda all'istante $t=0$.

Poiché il campo di velocità risulta descritto dalle relazioni:

$$\begin{aligned} v_x(x, z, t) &\equiv \frac{\partial \phi}{\partial x} = gH(\omega)^{-1} k \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \text{sen}(kx) \text{sen}(\omega t) = 0 \\ v_z(x, z, t) &\equiv \frac{\partial \phi}{\partial z} = -gH(\omega)^{-1} k \frac{\text{senh}[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx) \text{sen}(\omega t) = 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

all'istante $t=0$ si ha quindi un'apparente assenza di velocità, essendo $v_x=v_z=0$ per ogni x e per ogni z .

All'istante $t=T/4$, con T uguale la periodo, la situazione è quella rappresentata in Figura 2.3. In particolare, il profilo è descritto dalla relazione

$$\eta(x, t) = H \cos\left(\frac{2\pi}{L} x\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \Rightarrow \eta(x, t) = 0 \quad (\forall x) \quad (2.8)$$

Quindi si ha un momento di piatto, ossia di calma apparente.

Per quanto concerne le velocità, sempre all'istante $t=T/4$, esse risultano descritte dalle seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} v_x(x, z, t) &\equiv \frac{\partial \phi}{\partial x} = gH(\omega)^{-1} k \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \text{sen}(kx) \text{sen}(\omega t) \\ v_z(x, z, t) &\equiv \frac{\partial \phi}{\partial z} = -gH(\omega)^{-1} k \frac{\text{senh}[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx) \text{sen}(\omega t) \end{aligned} \quad (2.9)$$

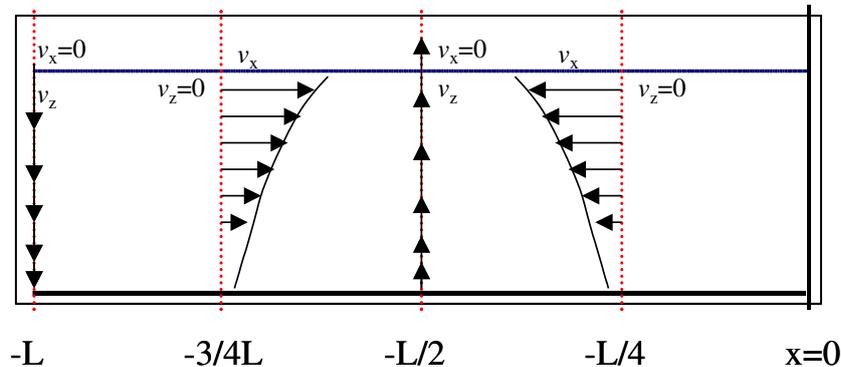


Figura 2.3 Rappresentazione del profilo dell'onda e del campo di velocità all'istante $t=T/4$.

Pertanto, v_x ha un massimo a $x=-L/4$ ed è diretta in verso negativo; il suo andamento lungo z varia con legge iperbolica (\cosh).

In corrispondenza di $x=-L/2$, $v_x=0$ e di $x=-3L/4$, v_x è massima e varia lungo z col \cosh . Alla sezione $x=-L$, $v_x=0$. Nello stesso istante, le velocità verticali v_z sono massime e rivolte verso il basso a $x=0$ variando lungo z col \cosh fino a zero. In corrispondenza di

$x=-L/4$ $v_z = 0$ e in corrispondenza di $x=-L/2$ la v_z è massima, diretta verso l'alto, e varia con z come anzi detto.

Anche per $t=T/2$ si ha una calma apparente. Infatti si ha $v_x = v_z = 0$ per ogni x e per ogni z . Il profilo risultante è quello rappresentato in Figura 2.4

In definitiva, dall'analisi dell'andamento nel tempo si evince come per $t=0$ e per $t=T/2$, si ha $v_x = v_z = 0$; mentre per $t=T/4$, si ha $\eta=0$.

Il campo di moto complessivamente dovuto alla riflessione è visualizzato in Figura 2.5, in cui nelle tre situazioni di acque profonde, intermedie e basse, sono riportate le traiettorie percorse dalle particelle d'acqua (Figura 2.5a) e le linee di corrente (Figura 2.5b), corrispondenti, rispettivamente, alla visione lagrangiana ed euleriana del campo di moto.

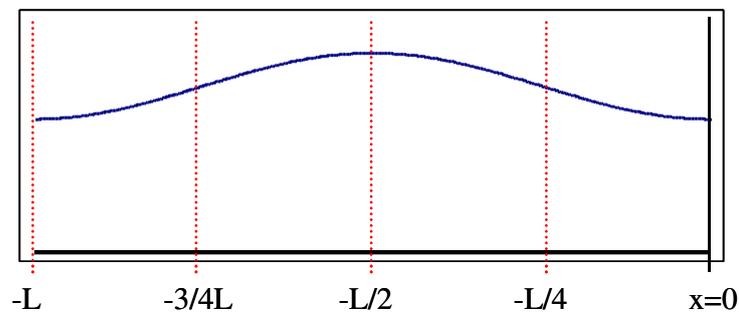


Figura 2.4 Rappresentazione del profilo dell'onda e del campo di velocità all'istante $t=T/2$.

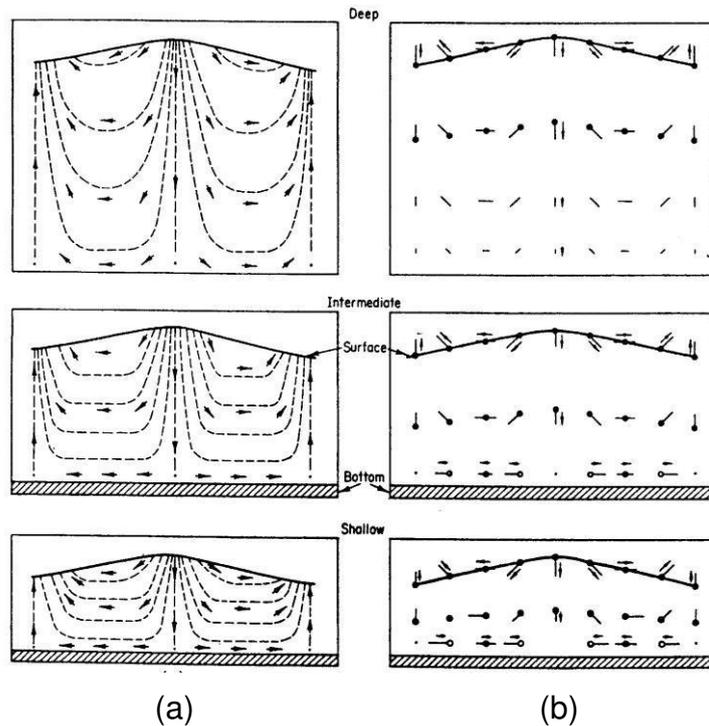


Figura 2.5 Andamento in acque profonde, intermedie e basse del percorso seguito dalle particelle; (a) andamento in acque profonde, intermedie e basse delle linee di corrente (b) (Dean e Dalrymple, 1992).

Noto l'andamento della funzione potenziale della velocità e della pressione, è possibile ricavare la distribuzione di pressione alla parete:

$$p = -\rho g z + \rho g H \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(\omega t), \quad (2.10)$$

che permette di calcolare la massima distribuzione istantanea pari a:

$$p = -\rho g z + \rho g H \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \quad (2.11)$$

Quest'ultima può essere riscritta nella forma equivalente (a meno di infinitesimi di ordine H^2):

$$p(z) = \begin{cases} -\rho g z + \rho g H \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} & \text{se } z \leq 0 \\ \rho g (H - z) & \text{se } 0 \leq z \leq H, \end{cases} \quad (2.12)$$

espressione che viene usualmente impiegata per le pratiche applicazioni.

2.3 Il fenomeno della riflessione su una parete inclinata

Per il caso in esame risulta interessante richiamare alcuni concetti relativi alla riflessione su parete inclinata. Infatti la tipologia di banchina antiriflettente che si intende analizzare risulta caratterizzata dalla presenza di un ammasso poroso inclinato all'interno della camera assorbente.

Con riferimento alla Figura 2.6, si consideri la parete piana inclinata, liscia e impermeabile. Il moto progressivo riflesso è tanto più importante quanto maggiore è l'angolo θ di inclinazione della parete rispetto all'orizzontale e quanto minore è la ripidità dell'onda $S_w=H/L$.

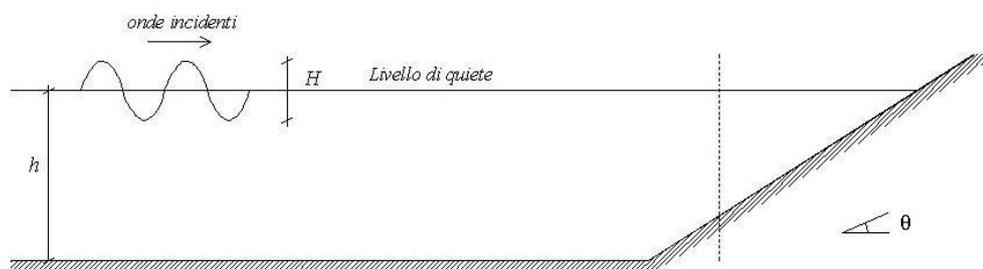


Figura 2.6 Schema adottato per lo studio della riflessione provocata da una parete impermeabile inclinata.

In particolare, si può avere la riflessione completa anche con parete inclinata purché θ superi un valore limite θ_L che, secondo Miche (1951), dipende dal parametro adimensionale H_o/gT^2 dove H_o è l'altezza d'onda al largo che è legata all'altezza d'onda locale H (immediatamente off-shore la parete) attraverso il processo di shoaling.

Ovvero:

$$H_o = \frac{H}{K_s} \quad (2.13)$$

con K_s coefficiente di shoaling, espresso come:

$$K_s = \frac{H}{H_o} = \sqrt{\frac{2 \cosh^2(kh)}{2kh + \sinh(2kh)}} \quad (2.14)$$

L'angolo θ_L si ricava invece dalla espressione:

$$\frac{H_o}{gT^2} = \sqrt{\frac{2\theta_L}{\pi}} \frac{\sin^2 \theta_L}{2\pi^2} \quad (2.15)$$

e il suo andamento in funzione del citato parametro adimensionale è riportato nella Figura 2.7.

In definitiva, per $\theta > \theta_L$, si ottiene $K_r = 1$, pertanto la riflessione è totale ed è equivalente a quella provocata da una parete verticale fittizia, la cui posizione (che condiziona la localizzazione dei nodi e degli antinodi) dipende da θ . Per $\theta < \theta_L$ si ottiene $K_r < 1$, pertanto la riflessione è parziale e il coefficiente di riflessione è espresso dalla seguente relazione:

$$K_r = \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \left(\frac{\sin^2 \theta_L}{2\pi^2} \right) \left(\frac{gT^2}{H_o} \right) \quad (2.16)$$

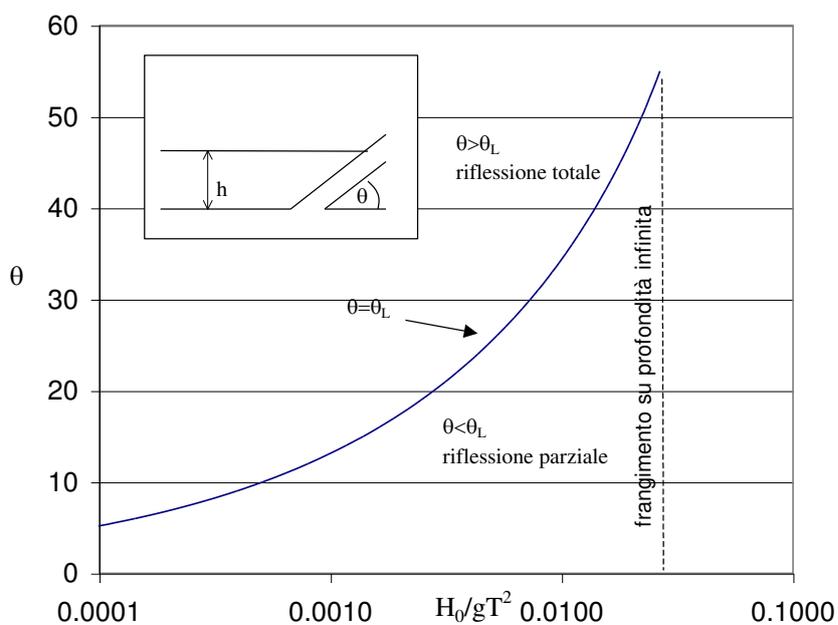


Figura 2.7 Andamento dell'angolo limite per cui si realizza una riflessione totale dovuta ad una parete inclinata.

Dal momento che, usualmente, l'ipotesi di parete liscia ed impermeabile difficilmente può essere adottata, soprattutto se, come nel caso in esame, si ha la presenza di ammassi porosi, si usa moltiplicare il coefficiente di riflessione per un coefficiente d'attrito $\alpha < 1$ che tiene conto del tipo di rivestimento della parete. I valori che usualmente vengono adottati nella pratica progettuale sono quelli riportati nella Tabella 2.I.

Tabella 2.I Valori del coefficiente d'attrito consigliati per "correggere" il coefficiente di riflessione.

Valori consigliati	Caratteristiche della parete
$\alpha = 0.9 \div 1.0$	Pareti rivestite in calcestruzzo
$\alpha = 0.8$	Spiagge in condizioni normali
$\alpha = 0.7 \div 0.8$	Pareti rivestite in pietra
$\alpha = 0.6 \div 0.7$	Scarpate in pietra
$\alpha = 0.5$	Paramenti in blocchi alla rinfusa

2.4 Effetti del processo di frangimento sul fenomeno della riflessione

La parete inclinata del paramento delle strutture costiere viene usualmente realizzata per agevolare il frangimento del moto ondoso, ciò consente di dissipare gran parte dell'energia del moto ondoso incidente e di ridurre sia la riflessione che la trasmissione del moto ondoso stesso.

In particolare, al fine di stimare la riduzione del coefficiente di riflessione, mettendo in conto gli effetti del processo di frangimento, sono state proposte sperimentalmente svariate espressioni che mettono in relazione il coefficiente di riflessione K_r con il parametro di Iribarren (surf similarity parameter) introdotto da Battjes (1974), espresso come:

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_o / L_o}} \quad (2.17)$$

in cui θ è la pendenza dell'ammasso, mentre altezza e lunghezza d'onda H_o e L_o sono valutate su profondità infinita. Tale parametro consente di identificare il tipo di frangimento che si realizza (vedi Tabella 2.II), ovvero di tipo spilling, plunging, collapsing o surging.

Tabella 2.II Tipo di frangimento in funzione del parametro di Iribarren (Okazaki e Sunamura, 1991).

Parametro di Iribarren	Tipo di frangimento
$\xi < 0.5$	Spilling
$0.5 < \xi < 2.5$	Plunging
$2.5 < \xi < 3.7$	Collapsing
$\xi > 3.7$	Surging

In particolare Battjes (1974), nel caso più semplice di una scarpata impermeabile e idraulicamente liscia ha proposto la seguente relazione

$$K_r = \begin{cases} 0.1\xi^2 & 0 < \xi < 3.2 \\ 1 & \xi > 3.2 \end{cases} \quad (2.18)$$

che fu corretta da Seeling e Ahrens (1981) come:

$$K_r = \tanh(0.1\xi^2) \quad (2.19)$$

e successivamente da Seeling (1983) in:

$$K_r = \frac{\xi}{\xi + 5.5} \quad (2.20)$$

Postma (1989), per una scarpata permeabile, sia liscia che scabra, suggerì la seguente relazione:

$$K_r = 0.125\xi^{0.73} \quad (2.21)$$

Inoltre Postma (1989) propose la seguente formula sulla base dei dati sperimentali di Van der Meer (1988), al fine di considerare anche l'effetto della permeabilità P della struttura:

$$K_r = 0.071P^{-0.082}(\cot \theta)^{-0.062}S_w^{-0.46}. \quad (2.22)$$

I valori utilizzabili per il coefficiente di permeabilità sono riportati in Figura 2.8 al variare delle caratteristiche della scogliera.

Infine, Sunamura e Okazaki (1996) sulla base di numerosi dati sperimentali di letteratura, hanno proposto la seguente relazione:

$$K_r = 0.84[1 - \exp(-12.8 \tan \theta)] \tanh(0.11\xi^{2.4}), \quad (2.23)$$

evidenziando come per frangimento di tipo spilling il coefficiente di riflessione può essere ridotto al valore $K_r=0.1$, mentre aumenta per frangimento di tipo plunging, collapsing e surging, in funzione della pendenza del paramento.

In tutte le formule precedenti, nel caso di onde irregolari, l'altezza dell'onda incidente può essere sostituita con l'altezza d'onda significativa H_s ed il periodo medio T_m o il periodo di picco T_p al posto del periodo.

Tutte le esperienze riportate sopra, fanno riferimento al caso in cui non c'è sormonto; qualora si voglia applicarle ad una struttura limitata in altezza ed in lunghezza bisogna verificare che il massimo run-up non ne superi l'altezza.

Inoltre, i dati sperimentali fanno sempre riferimento a strutture in pendenza che si raccordano al fondo; esse sono però probabilmente trasferibili al caso in cui la struttura in pendenza sia interrotta ad una profondità superiore a quella relativa ad acque profonde (cioè quella profondità a cui diventano trascurabili i valori delle velocità indotte dalle onde).

Esistono pochi e confusi risultati per quanto concerne configurazioni più complesse (berma prima della risalita, parete piana verticale dopo la risalita a quota più bassa del massimo run-up, etc). Qualora si decida di ricorrere a queste configurazioni bisogna svolgere prove specifiche su modello fisico.

2.5 Riflessione su cassoni cellulari con camera assorbente

Come visto, i paramenti a parete verticale si oppongono all'azione delle onde incidenti riflettendole verso il largo. Essi vengono usualmente costruiti mediante l'utilizzo di cassoni cellulari in conglomerato cementizio armato.

L'utilizzo di questa tipologia costruttiva presenta numerosi vantaggi quali la monoliticità dell'opera, i ridotti tempi di esecuzione e posa in opera, i bassi costi di realizzazione e di manutenzione, l'ingombro limitato, la possibilità di accostare e attraccare lungo il paramento. Ed è quindi proprio a causa dei sopra citati motivi che i cassoni cellulari vengono ampiamente utilizzati per la realizzazione sia delle opere esterne sia per le opere interne dei porti.

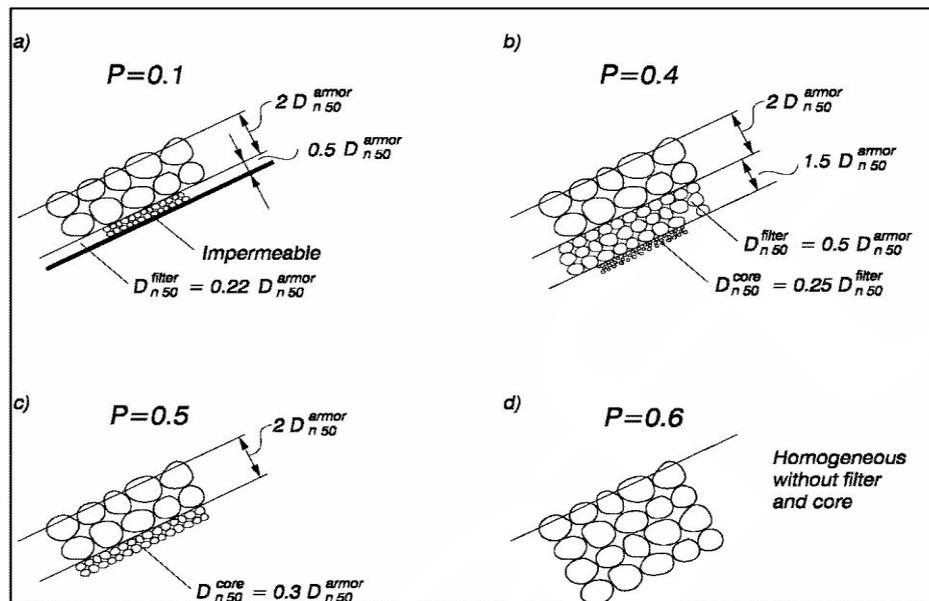


Figura 2.8 Definizione dei coefficienti di permeabilità utilizzati nella formula di Postma (1989) sulla base dei risultati sperimentali di Van der Meer (1988) (Coastal Engineering Manual, 2003).

Esistono tuttavia alcuni svantaggi nell'adozione di questa tipologia, tra questi uno dei più rilevanti è legato al problema della elevata agitazione ondosa all'interno dei bacini portuali, dovuta alla riflessione totale del moto ondoso incidente sulla parete verticale del cassone.

Al fine di ovviare a questo inconveniente, Jarlan (1961) ha introdotto una particolare tipologia di cassoni: i cassoni forati. Questi cassoni, infatti, presentando una o più camere interne di smorzamento dell'energia del moto ondoso (vedere Figura 2.9), consentono di ridurre notevolmente il problema della riflessione.

Al fine di investigare gli effetti sulla riflessione dell'uso di cassoni forati, sono stati condotti numerosi studi di laboratorio (Jarlan, 1961; Marks e Jarlan, 1968, Terret et al., 1968, Suh et al. 2001, Brossard et al., 2003, tra gli altri), ma anche svariati studi analitici e numerici (Kondo, 1979; Kakuno et al., 1992, Fugazza e Natale, 1992, Suh e Park, 1995, Suh et al. 2001, Takahashi et al. 2002).

I precedenti studi hanno dimostrato come il parametro fondamentale per caratterizzare la riflessione all'interno di cassoni perforati è il rapporto tra larghezza del cassone B , distanza tra la parete perforata e la parete piena retrostante, e la lunghezza d'onda L . Un altro parametro rilevante è la porosità P (rapporto tra superficie delle aperture e superficie totale della parete forata). Per onde regolari normalmente incidenti alla superficie del cassone, il coefficiente di riflessione risulta

minimo per un rapporto B/L pari a 0.25. Nel caso più generale in cui le onde presentano un angolo d'attacco ψ rispetto alla struttura, la riflessione minima si ha per:

$$\frac{B \cot \psi}{L} = 0.25 \quad (2.24)$$

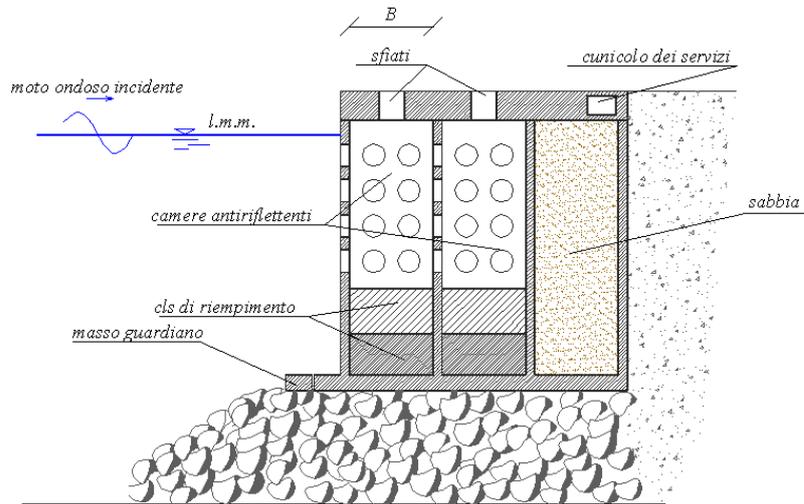


Figura 2.9 Schema di banchina realizzata con cassoni cellulari forati a doppia camera.

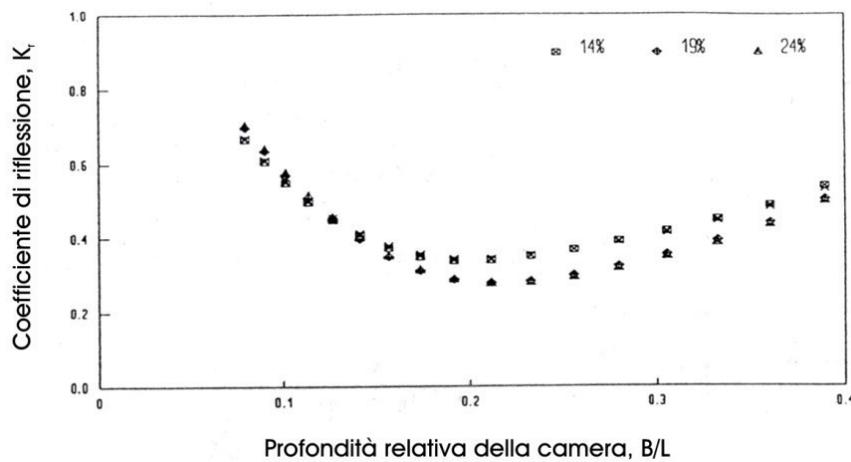


Figura 2.10 Coefficiente di riflessione in funzione del rapporto B/L (Allsop, 1995).

Una formula interpolante che può essere utilizzata per studi parametrici, è la seguente, sviluppata da Mc Bride e riportata da Allsop (1995) (vedere Figura 2.10):

$$K_r = \sin \left(910 \left(\frac{B}{L} - 0.225 \right)^2 \right) + 0.28. \quad (2.25)$$

I parametri si riferiscono a fori di diametro pari allo spessore della parete e non viene riportata alcuna indicazione in merito alla porosità. Le esperienze riportate non indicano in maniera chiara la dipendenza di K_r da quest'ultimo parametro, che viene fatto variare dal 14% al 28%.

2.6 Il fenomeno della riflessione su banchine su pali con scogliera sottostante

Una tipologia di banchine antiriflettenti particolarmente efficace è quella delle banchine "a giorno" su pali, in cui una scogliera posta al di sotto dell'impalcato consente di assorbire una quota considerevole dell'energia del moto ondoso incidente. Si stima che in questo caso il coefficiente di riflessione sia circa pari a 0.4. A questa tipologia di banchine sono ispirati i cassoni finestrati con scogliera interna, in cui il paramento esterno è una parete piana. Questa tipologia è stata indagata da Cavallaro et al. (2007) che hanno condotto una analisi comparativa, dimostrando come il coefficiente di riflessione dei cassoni finestrati sia generalmente inferiore a quella dei cassoni cellulari forati (Faraci, ICCE 2012).

La tipologia di banchina proposta dalla SIGMA Ingegneria s.r.l. è assimilabile, in prima battuta, a quella dei cassoni finestrati sebbene strutturalmente più complessa, in quanto il paramento esterno è costituito da un alternanza di pali e palancole, queste ultime sono troncate al di sotto del pelo libero dell'acqua, ottenendo una camera che viene riempita da materiale lapideo.

Dato il suo carattere innovativo, per questa tipologia non sono disponibili riferimenti di letteratura, pertanto per l'analisi del comportamento antiriflettente è necessario condurre prove su modello fisico.

3 Studio del fenomeno della riflessione attraverso la modellazione fisica

3.1 Generalità

In letteratura sono stati proposti vari metodi per la stima del coefficiente di riflessione sulla base di misure sperimentali sia in presenza di onde regolari (Isaacson, 1991) sia in presenza di onde irregolari, caso quest'ultimo di maggiore rilevanza ai fini ingegneristici (Thornton e Calhoun, 1972, Goda e Suzuki, 1976, Mansard e Funke, 1980).

Limitatamente al caso di onde regolari, il metodo concettualmente più semplice (ma operativamente più oneroso) per la stima della riflessione è il cosiddetto "metodo dell'inviluppo". Esso consiste nel misurare, tramite l'uso di una sonda di livello, l'altezza minima e massima dell'inviluppo ottenuto dalla sovrapposizione del moto ondoso incidente e di quello riflesso. L'onerosità operativa di questo metodo consiste nella necessità di dovere effettuare un elevato numero di misure, spostando in maniera pressoché continua la sonda all'interno di una lunghezza d'onda. Inoltre tale metodo non fornisce nessuna informazione sulla fase dell'onda riflessa.

Nel caso di onde random, sono stati proposti diversi metodi basati sull'adozione di due o più sonde di livello posizionate a una distanza fissata, che possono essere applicati anche al caso di onde regolari, a patto che la distanza tra le sonde sia scelta in modo tale da ricadere, per una fissata condizione idrodinamica, all'interno dei limiti di validità del metodo.

In particolare nel seguito verrà descritto il metodo proposto da Faraci et al. (2014) che fa uso di quattro sonde poste a una distanza fissata ma che può essere applicato anche con un numero minore di sonde. Tale metodo rappresenta una estensione del metodo a tre sonde proposto da Mansard e Funke (1980). La metodologia adoperata fa uso della tecnica della trasformata di Fourier e rappresenta una formulazione robusta e di elevata qualità per la misura della riflessione in laboratorio. Infatti, la stima del coefficiente di riflessione ottenuta applicando tale metodo si è rivelata più accurata rispetto a quella ricavata utilizzando altri metodi di letteratura, soprattutto nel caso di strutture ad alta capacità riflettente.

3.2 Metodo per la stima del coefficiente di riflessione in laboratorio

La situazione sperimentale è quella di una canaletta per la generazione del moto ondoso, all'interno della quale è installata una struttura (costituita da pali, palancole e elementi lapidei) che deve essere testata per quanto attiene alla sua efficacia nel ridurre l'entità del fenomeno della riflessione.

Le onde incidenti, prodotte da un battitore per la generazione del moto ondoso, vengono riflesse dal modello e si propagano in direzione opposta verso la pala del battitore stesso, dove sono soggette a una nuova riflessione. Quindi si propagano di nuovo verso la struttura e vengono ancora riflesse, e il processo si ripete molte volte. All'interno del canale si genera dunque un processo di riflessione multipla di treni d'onda.

Le onde che si propagano all'interno della canaletta sono dunque il risultato della sovrapposizione dell'onda incidente generata e della somma delle onde successivamente generate per riflessione dalla struttura e dalla pala stessa del battitore.

Benché il processo possa apparire complicato, nel caso di onde monocromatiche le componenti di queste onde generate dal processo di riflessione multipla hanno tutte la stessa frequenza e possono pertanto essere rappresentate come un singolo treno di onde. Inoltre, non solo tutte le componenti hanno la stessa frequenza ma anche le differenze di fase tra le varie componenti sono fissate. Volendone fare una trattazione analitica, per una data frequenza il profilo di onde rispettivamente incidenti e riflesse può essere sintetizzato come:

$$\begin{aligned}\eta_i &= a_i \cos(kx - \omega t + \varepsilon_i) \\ \eta_r &= a_r \cos(kx + \omega t + \varepsilon_r)\end{aligned}\tag{3.1}$$

in cui i pedici i e r indicano rispettivamente le grandezze relative all'onda incidente e all'onda riflessa e la coordinata spaziale x si assume positiva nel verso che va dal battitore al modello della struttura.

Estendendo tale concetto alle onde di mare (onde random), è possibile rappresentare il moto ondoso come una sovrapposizione lineare di una serie N di onde monocromatiche incidenti e di altrettante onde riflesse. La elevazione di superficie in una sezione distante x dal battitore e ad un istante t può essere scritta come

$$\eta = \sum_{n=1}^N C_{In} \cos(\omega_n t - k_n x + \phi_{In}) + C_{Rn} \cos(\omega_n t + k_n x + \phi_{Rn})\tag{3.2}$$

dove $\omega_n = 2\pi n / (MT)$ è la frequenza angolare della generica n-esima componente armonica, con T periodo di picco dello spettro di onde random, M numero di periodi di picco presenti nella serie temporale analizzata, k_n è il numero d'onda della n-esima componente armonica, pari a 2π diviso la lunghezza d'onda L_n della generica componente. Risulta opportuno evidenziare che nella presente formulazione la serie temporale da analizzare deve avere una estensione pari a un multiplo (M) del periodo di picco dello spettro di onde random generate nella canaletta. In genere il valore di M è dell'ordine di 100.

La frequenza angolare e il numero d'onda di ogni componente armonica sono collegate tra di loro mediante la nota legge di dispersione lineare $\omega_n^2 = gk_n \tanh(k_n D)$, dove D è la profondità. La sovrapposizione lineare di onde monocromatiche, qui applicata, è ampiamente adoperata in letteratura quando si studiano le onde random (Mansard e Funke, 1980) nei casi in cui gli effetti di non linearità sono ridotti. Un possibile approccio per stimare la non linearità è quello di calcolare il rapporto tra la componente del secondo ordine della espansione di Stokes e quella del primo ordine. Quando tale rapporto è minore di 1 la legge di dispersione lineare fornisce una buona approssimazione del comportamento reale del treno di onde. Nel caso in esame tale rapporto è ben al di sotto di tale valore limite e dunque la teoria lineare delle onde può essere applicata.

La eq. (3.2) può essere espressa in forma complessa come segue:

$$\eta = \sum_{n=-N}^N \left[f_{In} e^{i(\omega_n t - k_n x)} + f_{Rn} e^{i(\omega_n t + k_n x)} \right], \quad (\omega_n, k_n) \neq 0, \quad n \neq 0 \quad (3.3)$$

dove i è l'unità immaginaria e

$$f_{In} = \frac{1}{2} C_{In} e^{i\phi_{In}}, \quad f_{Rn} = \frac{1}{2} C_{Rn} e^{i\phi_{Rn}} \quad (3.4)$$

Inoltre la eq. (3.2) può essere riscritta come segue:

$$\eta = \sum_{n=-N}^N F_n e^{i\omega_n t} \quad (3.5)$$

$$F_n = f_{In} e^{-ik_n x} + f_{Rn} e^{ik_n x} \quad (3.6)$$

L'obiettivo è quello di ottenere le variabili complesse f_{In} e f_{Rn} , che contengono sia le ampiezze (C_{In} e C_{Rn}) che le fasi (ϕ_{In} e ϕ_{Rn}) delle onde incidenti e riflesse, utilizzando le misure di elevazione di superficie. Come desumibile dalla definizione di tali variabili formulata nella eq.(3.4), l'ampiezza delle onde è pari alla metà del modulo di f , la fase delle onde è pari all'argomento di ciascuna variabile complessa f .

Assumiamo che la elevazione di superficie sia misurata in m differenti sezioni lungo il canale. La posizione x_j delle generica sonda j può essere messa in relazione con la prima sonda: $x_{1j} = x_j - x_1$, da cui consegue che per la prima sonda $x_{11} = 0$. I valori assunti dalla variabile complessa F_n , definita nella eq. (3.6), possono essere calcolati mediante la trasformata di Fourier applicata per le serie di elevazione di superficie misurate nelle m sonde. E' dunque possibile derivare il seguente sistema di m equazioni, valido per ogni componente n -esima della serie di Fourier:

$$\begin{aligned} F_n^1 &= f_{In} + f_{Rn} \\ &\vdots \\ F_n^m &= f_{In}e^{-ik_n x_{1m}} + f_{Rn}e^{ik_n x_{1m}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Per $m = 2$ la formulazione derivata coincide con quella proposta da Goda e Suzuki (1976). In questo caso il sistema di equazioni proposto può essere risolto agevolmente per ottenere le variabili complesse f_{In} e f_{Rn} . Il determinante di tale sistema è pari a $2i \sin(k_n x_{12})$, che si azzerava per $x_{12}/L_n = 0,5$. Ne consegue che, allo scopo di ottenere risultati affidabili con il metodo delle due sonde, il rapporto x_{12}/L_n dovrebbe rientrare nell'intervallo 0,05-0,45. Tale limitazione risulta essere particolarmente restrittiva per onde random poichè non è facile da rispettare per tutte le lunghezze d'onda dello spettro.

Per $m > 2$ le variabili complesse f_{In} e f_{Rn} possono essere calcolate usando il metodo dei minimi quadrati. Tale formulazione per $m = 3$ corrisponde con quella descritta da Mansard e Funke (1980). Il corrispondente determinante è espresso come

$$\det_3 = -4 [\sin^2(k_n x_{12}) + \sin^2(k_n x_{13}) + \sin^2(k_n x_{32})] \quad (3.8)$$

Tale determinante risulta essere pari a zero quando $x_{12}/L_n = \ell_2/2$ e $x_{13}/L_n = \ell_3/2$ dove ℓ_2 e ℓ_3 sono numeri interi. Come conseguenza la condizione critica, in cui tale metodo non può essere applicato, è esprimibile come $x_{12} = \ell_2 L_n/2$ e $x_{13}/x_{12} = \ell_3/\ell_2$.

Per il caso con quattro sonde, il determinante del sistema lineare è

$$\begin{aligned} \det_4 &= -4 [\sin^2(k_n x_{12}) + \sin^2(k_n x_{13}) + \sin^2(k_n x_{14}) + \sin^2(k_n x_{32}) \\ &\quad + \sin^2(k_n x_{42}) + \sin^2(k_n x_{43})] \end{aligned} \quad (3.9)$$

L'annullamento del determinante per sonde di ha quando $x_{12}/L_n = \ell_2/2$, $x_{13}/L_n = \ell_3/2$, $x_{14}/L_n = \ell_4/2$, dove ℓ_2 , ℓ_3 e ℓ_4 sono numeri interi. La condizione di fallimento del metodo con quattro sonde è data dalla coesistenza delle seguenti eguaglianze: $x_{12} = \ell_2 L_n/2$, $x_{13}/x_{12} = \ell_3/\ell_2$, $x_{14}/x_{12} = \ell_4/\ell_2$. Il metodo applicato con

quattro sonde è tendenzialmente più stabile di quello con tre sonde poiché il numero di relazioni richieste per la condizione di fallimento aumenta di 1.

Per tutti i metodi descritti sopra, il coefficiente di riflessione K_R può essere calcolato a partire dagli spettri delle onde incidenti e riflesse, come proposto da Goda (2000):

$$K_R = \sqrt{\frac{\sum_{n=n_1}^{n_2} |f_{Rn}|^2}{\sum_{n=n_1}^{n_2} |f_{In}|^2}} \quad (3.10)$$

dove n_1 e n_2 rappresentano, rispettivamente, il limite inferiore e superiore del settore dello spettro usato per calcolare il coefficiente di riflessione.

I tre metodi qui analizzati per il calcolo del coefficiente di riflessione sono stati comparati da Faraci et al.(2014), come mostrato in Figura 3.1, al variare dell'ampiezza del settore di spettro usato (n_1-n_2). In particolare si osserva che il metodo delle tre sonde è stabile come quello delle quattro sonde, anche per ampi settori dello spettro. Viceversa il metodo delle due sonde risulta essere instabile per valori del parametro $2\pi(n_2-n_1)/(MT)$ maggiori di 6 rad/s, a causa del raggiungimento della condizione di fallimento del metodo stesso. Si nota inoltre come il metodo delle due sonde tenda generalmente a sottostimare il coefficiente di riflessione, rispetto agli altri due metodi.

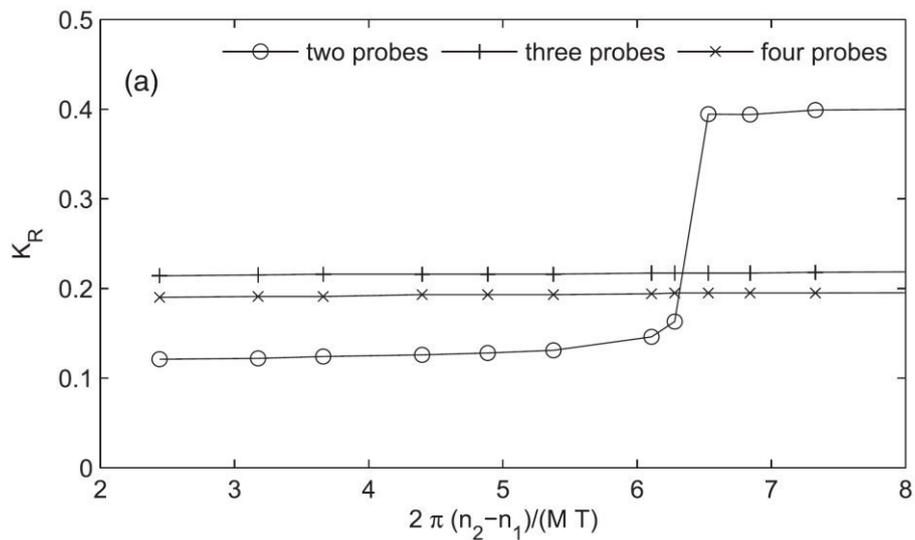


Figura 3.1 Coefficiente di riflessione K_R in funzione del periodo delle onde, mediante il parametro $2\pi(n_2-n_1)/(MT)$; comparazione tra i metodi delle 2, 3 e 4 sonde.

4 Modellazione fisica per la valutazione dei coefficienti di riflessione di banchine portuali

4.1 Generalità

Com'è noto nell'ingegneria marittima-costiera, quando non è possibile applicare metodologie consolidate, si può ricorrere ad approcci basati: 1) su osservazioni e misure in campo; 2) sulla soluzione numerica di modelli matematici; 3) su osservazioni e misure in laboratorio.

La tecnica basata su osservazioni e misure in campo è quella che fornisce i risultati più affidabili. Tuttavia, a causa dell'impossibilità di poter intervenire sulle variabili idrodinamiche di input, per esempio facendole variare in maniera sistematica, la raccolta e l'interpretazione dei risultati è piuttosto difficile. In particolare, negli studi sulla interazione del moto ondoso con le opere marittime, questa tecnica richiede la realizzazione di manufatti a scala reale e quindi risulta economicamente onerosa. Inoltre, se è richiesta l'esecuzione di test su configurazioni geometriche diverse dell'opera, come nel presente caso, occorre realizzare diverse tipologie di manufatti a scala reale con costi estremamente rilevanti, sia in termini economici, sia in termini di tempi.

La tecnica basata sulla soluzione numerica di modelli matematici sta diventando uno strumento di indagine sempre più importante, impiegata con successo nel predire i flussi di marea negli estuari, fenomeni di rifrazione, diffrazione e shoaling, circolazione costiera, ecc.

Esistono tuttavia situazioni come appunto la valutazione delle caratteristiche antiriflettenti della struttura in cui, per via della complessa idrodinamica che si instaura, lo studio non può essere condotto esclusivamente mediante modelli matematici.

In particolare, la complessità del fenomeno della riflessione di un'onda di mare che interagisce con cassoni cellulari deriva dal fatto che esso è caratterizzato da intense dissipazioni di energia ed inoltre la geometria del sistema è di volta in volta unica e non descrivibile con schemi semplici.

Nel presente studio è stato pertanto impiegato l'approccio basato su indagini in laboratorio condotte su modello fisico. Un modello fisico è la riproduzione, usualmente a scala ridotta, di un sistema fisico, eseguita in modo tale che tutti i fenomeni

quantificabili abbiano luogo in esso nella stessa proporzione nella quale si verificano nel sistema fisico (prototipo) che si vuole analizzare. Nel caso in studio, l'approccio basato su modello fisico permette di superare i limiti dei modelli numerici e di ottenere risultati affidabili a costi significativamente inferiori di quelli richiesti da esperimenti condotti in campo.

Alla base della modellazione fisica sta l'ipotesi che il modello si comporti in maniera simile al prototipo che si intende emulare. Se questa condizione viene soddisfatta, dagli studi sul modello è possibile estrarre informazioni di supporto alla progettazione del prototipo o alle decisioni riguardanti la gestione del sistema. In generale, occorre comunque tenere conto che esiste sempre la possibilità che i risultati del modello fisico possano essere condizionati da effetti di scala, che non consentano di trasferire direttamente detti risultati a scala di prototipo. Tale possibilità deve essere tenuta sotto controllo mediante una attenta progettazione e accurata validazione del modello stesso.

4.2 Criteri di similitudine

In generale, la similarità di comportamento fra prototipo e modello riguarda tutte le grandezze fisiche come velocità, accelerazioni, trasporto di massa e le forze che il fluido applica sui contorni solidi. La similitudine si ottiene quando le grandezze rilevanti per il fenomeno da studiare sono in proporzione fra il prototipo e il modello.

I requisiti di similarità possono essere imposti sulla base di considerazioni riguardanti l'analisi dimensionale o le equazioni differenziali che descrivono la dinamica del sistema. Tali requisiti possono essere imposti mediante criteri di similitudine o condizioni di similarità.

I criteri di similitudine sono espressi in termini di relazioni fra parametri. Si tratta di condizioni matematiche che devono essere soddisfatte dal rapporto fra certi parametri del prototipo e quelli del modello. I criteri di similitudine sono anche detti leggi di scala.

Le condizioni di similarità sono relazioni fra i parametri del prototipo e quelli del modello che lo sperimentatore sceglie in modo tale che il modello fisico riproduca risultati soddisfacenti. Queste relazioni possono includere uno o più criteri di similitudine ed altre condizioni determinate anche sulla base dell'esperienza.

I requisiti di similitudine dipendono dal fenomeno che si desidera studiare e dal grado di accuratezza che si vuole raggiungere nello studio.

I modelli a similarità completa sono quei modelli nei quali tutti i valori dei parametri adimensionali del prototipo sono mantenuti nel modello.

La corrispondenza fra i parametri del prototipo e quelli del modello si denota mediante il termine rapporto scala o semplicemente scala. Convenzionalmente il rapporto scala viene definito come il rapporto fra un parametro del prototipo ed il valore dello stesso parametro nel modello. In simboli si ha $N_G = \frac{G_p}{G_m}$ dove G_p è il valore di G nel modello e G_m è il valore di G nel prototipo, mentre N_G è il rapporto scala prototipo-modello per la generica grandezza G .

Per quanto riguarda la similarità, nello studio dei fenomeni idraulici si possono avere: similarità geometrica, similarità cinematica e similarità dinamica.

La similarità geometrica fra prototipo e modello si ha quando tutte le dimensioni del modello sono date dalle corrispondenti dimensioni del prototipo ridotte mediante un fattore comune. I modelli che soddisfano la similarità geometrica sono anche detti modelli non distorti.

La similarità cinematica si ha quando il rapporto delle componenti del vettore velocità fra punti corrispondenti del prototipo e del modello è lo stesso a tutti gli istanti e in tutti i punti. In un modello non distorto la similarità cinematica da luogo a percorsi delle particelle fluide che sono geometricamente simili a quelli del prototipo.

La similarità dinamica fra due sistemi geometricamente e cinematicamente simili richiede che il rapporto di tutte le componenti dei vettori forza nel prototipo e nel modello sia lo stesso. I requisiti per la similarità dinamica derivano dalla seconda legge di Newton la quale impone l'uguaglianza fra la forza d'inerzia di una massa m e le forze che agiscono sulla massa stessa:

$$F_{\vec{r}} = F_g + F_{\mu} + F_{\sigma} + F_e + F_{pr} \quad (4.1)$$

dove:

F_i è la forza d'inerzia;

F_g è la forza di gravità;

F_{μ} è la forza viscosa;

F_{σ} è la forza dovuta alla tensione superficiale;

F_e è la forza elastica;

F_{pr} è la forza di pressione.

La perfetta similitudine dinamica richiede che il rapporto fra la forza d'inerzia e una qualsiasi delle forze che figurano a secondo membro della (4.1) sia lo stesso nel prototipo e nel modello. Questa condizione conduce alle seguenti relazioni:

$$\frac{(F_i)_p}{(F_i)_m} = \frac{(F_g)_p}{(F_g)_m} = \frac{(F_\mu)_p}{(F_\mu)_m} = \frac{(F_\sigma)_p}{(F_\sigma)_m} = \frac{(F_e)_p}{(F_e)_m} = \frac{(F_{pr})_p}{(F_{pr})_m} \quad (4.2)$$

che possono essere riscritte in termini di rapporti scala come segue:

$$N_{F_i} = N_{F_g} = N_{F_\mu} = N_{F_\sigma} = N_{F_e} = N_{F_{pr}} \quad (4.3)$$

Poiché nel caso in cui il modello sia più piccolo del prototipo non è noto nessun fluido che soddisfi tutti i rapporti della (4.2), un importante aspetto della progettazione di un modello è quello di evidenziare quali rapporti tra le forze stesse siano di maggior rilievo nel fenomeno che deve essere studiato e quindi debbano essere mantenuti nel modello, naturalmente fornendo la giustificazione del motivo per il quale gli altri rapporti possano essere trascurati.

4.2.1 Criteri di similitudine nell'Ingegneria Marittimo-Costiera

Nel seguito vengono illustrati i più importanti criteri di similitudine di cui occorre tenere conto quando si studia un fenomeno idraulico (Hughes, 1993).

Il primo passo consiste nell'individuare le forze che giocano un ruolo significativo nel fenomeno che si deve studiare e quali, fra quelle che a stretto rigore dovrebbero essere considerate, possono invece essere trascurate.

Nei fenomeni idraulici le forze d'inerzia sono sempre presenti, quindi il problema viene qui ricondotto al trovare quali delle forze a secondo membro della (4.1) bilanciano la forza d'inerzia. L'esperienza indica che nella grande maggioranza dei problemi idraulici solo una delle forze che figurano a secondo membro della (4.1) fornisce un contributo significativo nel bilanciare la forza d'inerzia. Restringendo l'attenzione ai problemi pratici di idraulica marittima, la forza dovuta alla tensione superficiale e la forza elastica possono essere sicuramente trascurate, la prima perché la curvatura della superficie libera è grande e quindi la tensione superficiale non ha possibilità di giocare un ruolo importante, la seconda perché la deformabilità del fluido è molto bassa.

Il primo passo consiste nell'esprimere gli ordini di grandezza dei rapporti tra la forza d'inerzia e le altre forze.

A questo fine, l'ordine di grandezza di ciascuna forza deve essere espresso in termini della lunghezza L_s , velocità V_s e tempo T_s caratteristici del fenomeno in studio oltre che in termini della densità ρ e viscosità μ del fluido e dell'accelerazione di gravità g . Quindi si ha:

$$F_i = (\rho L_s^3)(V_s^2 / L_s) = \rho L_s^2 V_s^2, \quad (4.4)$$

$$F_g = \rho L_s^3 g, \quad (4.5)$$

$$F_\mu = \mu(V_s / L_s)L_s^2 = \mu V_s L_s, \quad (4.6)$$

$$F_{pr} = p_s L_s^2. \quad (4.7)$$

Il rapporto fra la forza d'inerzia e una delle altre forze fornisce l'influenza relativa delle due forze. Imponendo che il rapporto fra le forze sia lo stesso nel modello e nel prototipo si ottiene un criterio di similitudine per ciascun rapporto.

Criterio di Froude

L'influenza della forza di gravità rispetto alla forza d'inerzia è espressa dalla radice quadrata del rapporto fra la forza d'inerzia e la forza di gravità, il quale viene chiamato numero di Froude:

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho L_s^2 V_s^2}{\rho L_s^3 g}} = \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}}. \quad (4.8)$$

Imponendo che il numero di Froude sia lo stesso nel modello e nel prototipo si ha:

$$\left(\frac{V_s}{\sqrt{gL_s}} \right)_p = \left(\frac{V_s}{\sqrt{gL_s}} \right)_m, \quad (4.9)$$

la quale conduce alla relazione:

$$\frac{V_{sp}}{V_{sm}} = \sqrt{\frac{L_{sp}}{L_{sm}}}. \quad (4.10)$$

Esprimendo la (4.10) in termini di rapporti di scala si ha:

$$N_V = \sqrt{N_L}. \quad (4.11)$$

L'equazione (4.11) rappresenta il criterio di Froude, che, da solo, risulta sufficiente per modellare quei casi nei quali la forza d'inerzia risulta bilanciata quasi esclusivamente dalla forza di gravità, come accade in molti flussi a superficie libera. In ingegneria marittima, così come nell'ambito del presente lavoro, la maggior parte dei modelli idraulici vengono realizzati secondo il criterio di Froude.

Criterio di Reynolds

L'importanza relativa della forza viscosa rispetto alla forza d'inerzia è data dal rapporto fra la forza d'inerzia e la forza viscosa il quale è noto come numero di Reynolds:

$$Re = \frac{\rho L_s^2 V_s^2}{\mu V_s L_s} = \frac{\rho L_s V_s}{\mu}. \quad (4.12)$$

Il criterio di Reynolds si ha quando il numero di Reynolds del modello è uguale a quello del prototipo:

$$\left(\frac{\rho V_s L_s}{\mu} \right)_p = \left(\frac{\rho V_s L_s}{\mu} \right)_m. \quad (4.13)$$

Sviluppando la (4.13) si ottiene

$$\frac{V_{s_p} L_{s_p} \rho_p}{V_{s_m} L_{s_m} \rho_m} = \frac{\mu_p}{\mu_m}. \quad (4.14)$$

In termini di rapporti di scala si ha:

$$\frac{N_V N_L N_\rho}{N_\mu} = 1. \quad (4.15)$$

Il criterio di Reynolds è importante in quei fenomeni nei quali le forze viscosive sono predominanti come per esempio nello strato limite laminare.

Criterio di Eulero

L'importanza delle forze di pressione rispetto a quelle di inerzia è espressa dal numero di Eulero:

$$Eul = \frac{p_s L_s^2}{\rho L_s^2 V_s^2} = \frac{p_s}{\rho V_s^2}. \quad (4.16)$$

Il criterio di Eulero si trova uguagliando il numero di Eulero del prototipo con il numero di Eulero del modello:

$$\left(\frac{P_s}{\rho V_s^2} \right)_p = \left(\frac{P_s}{\rho V_s^2} \right)_m, \quad (4.17)$$

che si può ancora scrivere come:

$$\left(\frac{P_{sp}}{P_{sm}} \right) = \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left(\frac{V_{sp}}{V_{sm}} \right)^2. \quad (4.18)$$

In termini di rapporti scala si ha:

$$\frac{N_p}{N_\rho N_V^2} = 1. \quad (4.19)$$

Criterio di Strouhal

La forza d'inerzia in un fluido è dovuta alla somma di due contributi: l'accelerazione convettiva e l'accelerazione locale. L'accelerazione convettiva è dovuta alle differenti velocità del fluido in punti diversi del campo di moto, mentre l'accelerazione locale deriva da variazioni della velocità che si verificano nel tempo in ogni punto del campo di moto. In termini di grandezze caratteristiche le forze che derivano da queste due accelerazioni possono essere espresse come segue:

$$\text{forza d'inerzia locale} = (\rho L^3)(V_s / T_s) \quad (4.20)$$

$$\text{forza d'inerzia convettiva} = (\rho L_s^3)(V_s^2 / L_s) \quad (4.21)$$

Il rapporto fra la forza d'inerzia locale e la forza d'inerzia convettiva è denominato numero di Strouhal St :

$$St = \frac{(\rho L^3)(V_s / T_s)}{(\rho L_s^3)(V_s^2 / L_s)} = \frac{L_s}{V_s T_s}. \quad (4.22)$$

Il criterio di Strouhal si ha imponendo che il valore del numero di Strouhal nel modello sia lo stesso di quello del prototipo e quindi si ha:

$$\left(\frac{L_s}{V_s T_s} \right)_p = \left(\frac{L_s}{V_s T_s} \right)_m, \quad (4.23)$$

la quale può essere riscritta come segue:

$$\left(\frac{L_{sp}}{L_{sm}} \right) = \left(\frac{V_{sp}}{V_{sm}} \right) \left(\frac{T_{sp}}{T_{sm}} \right). \quad (4.24)$$

In termini di rapporti di scala si ha:

$$\frac{N_L}{N_V N_T} = 1 \quad (4.25)$$

Il criterio di Strouhal è rilevante nei moti oscillanti nei quali l'accelerazione locale risulta essere significativa. Il tempo T deve essere basato sul periodo di oscillazione del moto, per esempio nel caso delle onde T è il periodo delle onde.

4.2.2 Controllo della densità del materiale del modello

L'ultimo criterio di similitudine da rispettare nella realizzazione di un modello di strutture con presenza di scogli è dato dalla relazione seguente:

$$\left(\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w} \right)_p = \left(\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w} \right)_m \quad (4.26)$$

Essa stabilisce che la densità relativa del materiale delle unità della mantellata deve essere uguale nel prototipo e nel modello. Il numero adimensionale così definito è pari al rapporto tra la densità del fluido e la densità immersa delle unità della mantellata. L'eq.(4.26) può anche essere riscritta come

$$\left(\frac{\rho_a}{\rho_w} \right)_p = \left(\frac{\rho_a}{\rho_w} \right)_m \quad (4.27)$$

In particolare, quest'ultima relazione è utile per determinare la densità delle unità della mantellata nel modello, poiché gli esperimenti di laboratorio, per ragioni pratiche, vengono condotti in acqua dolce, piuttosto che in acqua salata. Nel caso si abbia a che fare con massi naturali, il rispetto della condizione (4.27) è fortemente vincolato alla disponibilità di materiale di cava di adeguate caratteristiche. Nel caso di massi artificiali (come nel caso oggetto di studio) il rispetto della relazione (4.27) avviene mediante la realizzazione di una speciale miscela, costituita da resine opportunamente caricate (Hughes, 1993).

Un metodo alternativo per compensare l'incremento di spinta idrostatica dell'acqua salata rispetto all'acqua dolce è quello di regolare il peso delle unità della mantellata nel modello.

A tal fine si definisce la scala del peso delle unità della mantellata, che può essere ottenuta semplicemente eseguendo il rapporto tra prototipo e modello della seguente espressione:

$$W_a = \gamma_a V \quad (4.28)$$

dove

- W_a rappresenta il peso dell'unità della mantellata;
- $\gamma_a = \rho_a g$ rappresenta il peso specifico dell'unità della mantellata;
- V è il volume dell'unità della mantellata.

Definendo i seguenti rapporti:

$$N_{wa} = \frac{(W_a)_p}{(W_a)_m} \quad (4.29)$$

$$N_{\gamma a} = \frac{(\gamma_a)_p}{(\gamma_a)_m} \quad (4.30)$$

$$N_{va} = \frac{(v)_p}{(v)_m} \quad (4.31)$$

si ottiene la seguente scala del peso:

$$N_{wa} = N_{\gamma a} N_L^3 \quad (4.32)$$

Nell'ambito del presente lavoro è stato utilizzato il criterio descritto nel seguito e introdotto da Hudson (1958), che si basa sulla conservazione del valore del "numero di stabilità" tra prototipo e modello. In particolare, Hudson (1958) adattò l'eq. (4.8), elevando al quadrato il numero di Froude delle unità della mantellata e moltiplicando il risultato per il parametro della densità relativa

$$\frac{V_w^2}{gl_a} \frac{\rho_w}{(\rho_a - \rho_w)} = G \left(\frac{l_a}{h}, \frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \alpha, \beta, \Delta, \theta, \frac{V_w l_a \rho_w}{\mu}, \frac{\xi_a}{l_a}, D \right) \quad (4.33)$$

Assumendo che:

- V_w è direttamente proporzionale a \sqrt{gH}
- W_a è direttamente proporzionale a $\gamma_a l_a^3$
- $\gamma = \rho g$

il parametro adimensionale a primo membro della (4.33) diventa

$$\frac{(\gamma_a)^{\frac{1}{3}} H}{\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_w} - 1 \right) (W_a)^{\frac{1}{3}}} \quad (4.34)$$

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

$$\frac{(\gamma_a)H^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_w}-1\right)^3(W_a)} = (k_{\Delta} \cot g\alpha) \quad (4.35)$$

dove k_{Δ} è una costante che dipende dalla tipologia dei massi della mantellata. Tale formula è ancor oggi largamente utilizzata per il dimensionamento dei massi della mantellata di frangiflutti a gettata.

Per quanto concerne il problema dello "scaleggiamento" dei massi per prove di stabilità su strutture a scogliera, Hudson et al. (1979) raccomandano che il peso delle unità della mantellata nel modello, sia scalato attraverso l'uguaglianza del numero di stabilità tra prototipo e modello. In termini di rapporti di scala si ottiene

$$N_{wa} = \frac{N_{\gamma_a} N_L^3}{N_{(\gamma_a/\gamma_w-1)}} \quad (4.36)$$

in cui si osserva che $N_H = N_L$.

Altri studiosi, come Sharp e Khader (1984) e Sharp (1985), sottolineano che il raggruppamento dei prodotti adimensionali nel numero di stabilità di Hudson (1958) è solo una delle possibili combinazioni che possono essere ottenute dall'analisi dimensionale. Essi indicano che sarebbe più appropriato ottenere una relazione di scaleggiamento per il peso dell'unità della mantellata, riferendosi ad approcci più fisici, nei quali siano mantenuti costanti tra prototipo e modello i rapporti tra le forze principali. In particolare, considerano come forze che controllano la stabilità di un frangiflutti la forza d'inerzia ed il peso immerso, ottenendo la seguente relazione

$$N_{wa} = \frac{N_{\gamma_a} N_L^3}{N_{(\gamma_a/\gamma_w-1)}} \quad (4.37)$$

In conclusione, si può osservare che l'unica differenza tra il rapporto di scala proposto da Sharp e Khader (4.37) e quello di Hudson (4.36), in termini analitici, è data dalla presenza di un cubo al denominatore nella relazione di Hudson. Inoltre, poiché, come si è verificato anche nell'ambito della presente sperimentazione, il rispetto del criterio di Hudson fornisce unità della mantellata nel modello di circa l'8% più leggere di quelle indicate dall'applicazione del criterio di Sharp e Khader, è

possibile asserire che il criterio di Hudson produce risultati più conservativi per la verifica della stabilità di strutture a scogliera, in quanto fornisce unità della mantellata più facilmente mobilitabili. Pertanto, sulla base delle considerazioni precedentemente esposte, in questa sede è stato adottato il criterio di Hudson al fine di dimensionare i massi della mantellata del modello fisico realizzato.

4.2.3 Criteri di similitudine adottati nel presente studio

L'obiettivo del presente studio è quello di analizzare la riflessione delle onde su una innovativa tipologia di banchina su pali e palancole con scogliera interna. Inoltre, solo le onde corte che sono generate dal vento all'interno della rada di Augusta sono di rilievo nel problema in oggetto.

I requisiti per la scelta della scala delle onde corte possono essere determinati facendo riferimento alle equazioni di Navier-Stokes e all'equazione di continuità, che governano il moto di un fluido a superficie libera, scritte in forma adimensionale sulla base di appropriate grandezze scala. Tali grandezze scala sono di seguito riportate.

V_s = velocità caratteristica in direzione orizzontale;

W_s = velocità caratteristica in direzione verticale;

X_s = lunghezza caratteristica in direzione orizzontale;

Z_s = lunghezza caratteristica in direzione verticale;

T_s = tempo caratteristico;

ρ_s = pressione caratteristica.

Per brevità le equazioni di Navier-Stokes o equazioni del moto non vengono riportate, basti qui sapere che quando queste equazioni vengono poste in forma adimensionale in esse compaiono alcuni parametri adimensionali. Per due sistemi fisici (prototipo e modello) governati dalle stesse equazioni differenziali, la similitudine completa si ottiene quando ciascun parametro adimensionale assume lo stesso valore per i due sistemi. I parametri adimensionali che figurano nelle equazioni di Navier-Stokes sono quelli descritti al paragrafo precedente e cioè: il numero di Froude, il numero di Reynolds, il numero di Eulero, il numero di Strouhal oltre al parametro $(X_s W_s)/(Z_s V_s)$.

Per prima cosa si vuole verificare se è possibile usare un modello fisico geometricamente distorto. Imponendo l'uguaglianza dei numeri di Eulero del prototipo e del modello si ottengono le seguenti due uguaglianze:

$$\frac{N_p}{N_\rho N_V^2} = 1, \quad \frac{N_p}{N_\rho N_W^2} = 1, \quad (4.38)$$

dove la prima delle (4.26) deriva dall'equazione del moto in direzione orizzontale e la seconda deriva dall'equazione del moto in direzione verticale. Siccome i primi membri delle equazioni (4.26) sono entrambi uguali a 1, essi sono anche uguali fra di loro, ne segue che:

$$N_V = N_W. \quad (4.39)$$

Secondo la (4.27), la scala della componente orizzontale della velocità deve essere uguale a quella della componente verticale. Imponendo l'uguaglianza del parametro $(X_s W_s)/(Z_s V_s)$ fra modello e prototipo si ha:

$$\frac{N_X N_W}{N_Z N_V} = 1. \quad (4.40)$$

In virtù della (4.27), dalla (4.28) segue:

$$N_X = N_Z. \quad (4.41)$$

Quindi si può affermare che una corretta modellazione dell'idrodinamica delle onde corte richiede che il modello fisico sia geometricamente non distorto.

Dall'uguaglianza dei numeri di Froude deriva la condizione (4.11) e dall'uguaglianza dei numeri di Strouhal si ha la condizione (4.25). Nel caso di modelli di onde, la condizione (4.25) viene rispettata scegliendo N_T come rapporto fra i periodi delle onde.

Ricavando N_V dalla (4.25) e sostituendo in (4.11) si ha:

$$N_T = \sqrt{N_L}. \quad (4.42)$$

Dall'uguaglianza dei numeri di Reynolds si ha poi la (4.15) e dall'uguaglianza dei numeri di Eulero si ha la (4.19). La (4.11) e la (4.25) costituiscono le principali relazioni per lo scaleggiamento dei modelli idrodinamici di onde corte. Se viene rispettata anche la relazione (4.15), dalle relazioni (4.2), trascurando F_e e F_σ , si può vedere che la (4.19) è automaticamente soddisfatta.

Tuttavia, a causa di difficoltà nel mantenere la similitudine di Froude e di Reynolds nello stesso modello, la condizione (4.15) sul numero di Reynolds non viene solitamente soddisfatta. Questa approssimazione è del tutto accettabile anche nel

presente caso in quanto il moto indotto dalle onde è affetto dalla viscosità solo in una misura molto debole.

In definitiva, il modello fisico per lo studio della riflessione è stato progettato imponendo che sia non distorto, quindi esso deve essere una riproduzione in scala del prototipo. Una volta fissata la scala delle lunghezze N_L , pari nel presente studio a 1:45, la scala dei periodi delle onde è stata determinata tramite la (4.30).

5 Apparato sperimentale e procedura sperimentale

5.1 Generalità

Per la valutazione della riflessione generata dalle onde di mare sulle due tipologie di banchine a giorno oggetto di studio è stato progettato e realizzato un modello fisico le cui caratteristiche sono state determinate in base al prototipo e alle caratteristiche dell'apparato sperimentale di laboratorio a disposizione. In particolare, tali caratteristiche hanno suggerito l'appropriato rapporto di scala geometrico da adottare per la costruzione del modello fisico.

Nel presente capitolo vengono descritti l'apparato sperimentale a disposizione, la scelta della scala di riduzione del modello, le caratteristiche del modello fisico adottato ed infine la strumentazione di misura.

5.2 Descrizione dell'apparato sperimentale

L'apparato sperimentale è costituito da una vasca per la generazione del moto ondoso ubicata presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura dell'Università degli Studi di Catania. Detta installazione è costituita da una vasca, da una paratoia del tipo a ventola per la generazione delle onde irregolari e da una serie di dispositivi per la misura del moto ondoso e delle caratteristiche idrodinamiche delle onde.

5.2.1 La vasca di sperimentazione

Le prove sperimentali sul modello sono state effettuate in una vasca, realizzata in cemento, con sezione rettangolare di lunghezza 18.00 m, larghezza 3.60 m e profondità 1.20 m, con fondo inerodibile (Figura 5.1 e Figura 5.2).

La vasca presenta delle pareti in c.a. nella parte iniziale e finale, mentre le pareti laterali sono interamente costituite da pannelli di vetro dello spessore di circa 1 cm, fissati su un'intelaiatura metallica, che consentono di osservare ciò che avviene all'interno della vasca. L'apparecchiatura per la generazione del moto ondoso si trova nella parte iniziale della vasca, mentre in quella finale è ubicato il modello fisico della banchina oggetto di indagine.



Figura 5.1 Vista panoramica della vasca con ondogeno in dotazione al Laboratorio di Idraulica dell'Università di Catania.

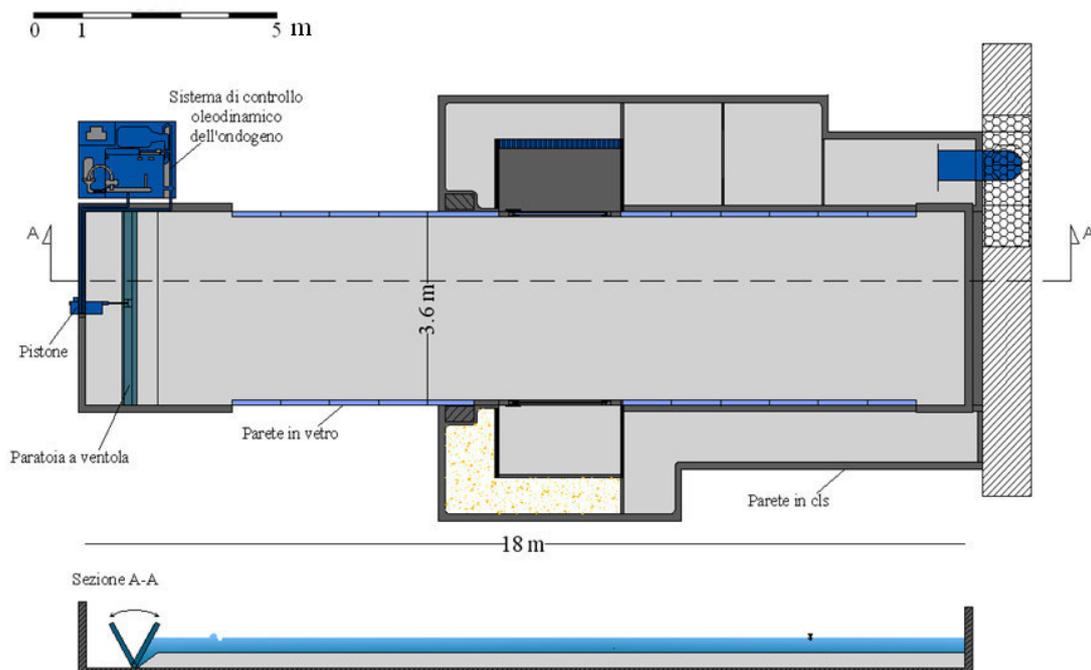


Figura 5.2 Planimetria e sezione trasversale della configurazione originale della vasca di sperimentazione.

Al fine di ridurre i tempi e i costi di realizzazione del modello fisico e di conduzione delle prove, si è ritenuto opportuno parzializzare la vasca tramite una parete verticale di separazione in lamiera d'acciaio, riducendo la larghezza utile a 1.00 m (Figura 5.3).

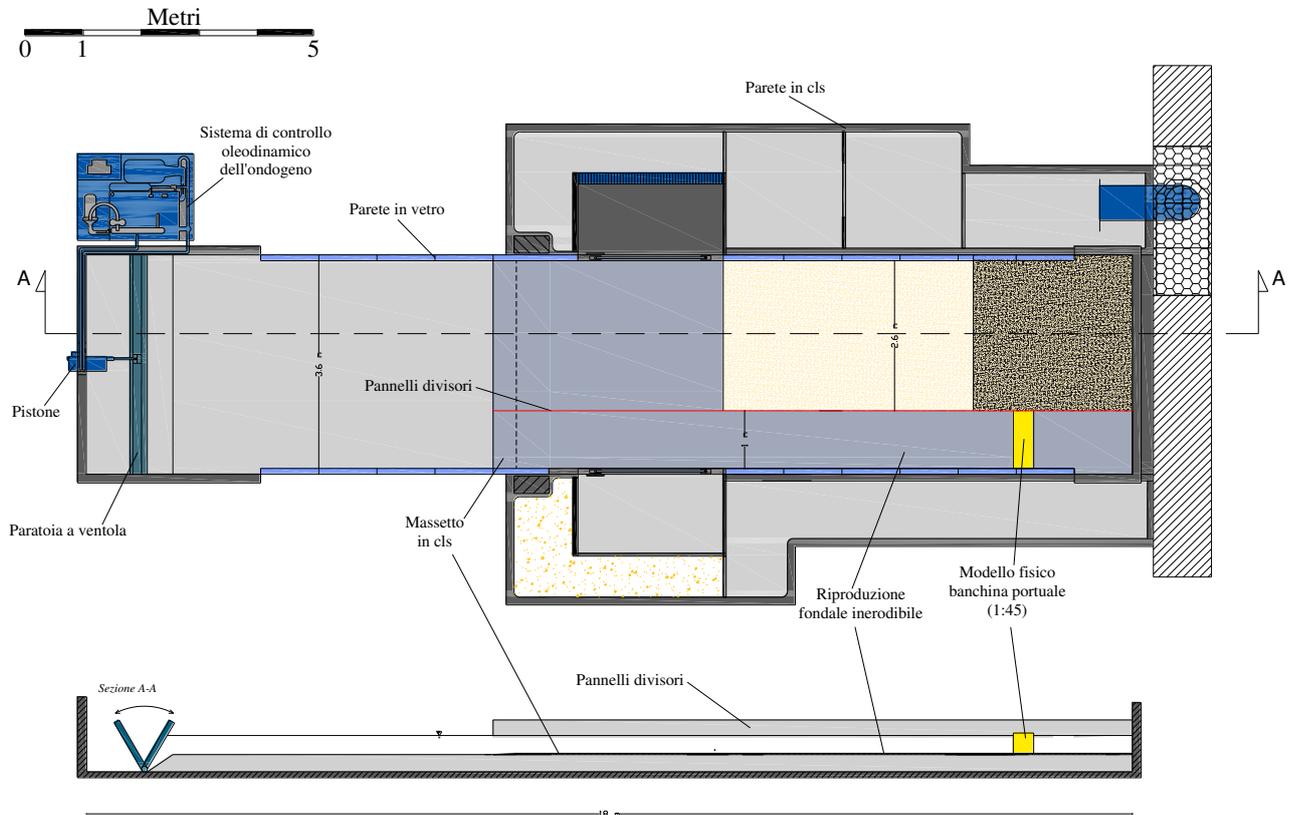


Figura 5.3 Vasca di sperimentazione per la modellazione fisica delle nuove banchine del porto commerciale di Augusta: planimetria e sezione trasversale della configurazione della vasca parzializzata e ubicazione del modello fisico.

5.2.2 Sistema per la generazione del moto ondoso

Il moto ondoso è generato dal movimento oscillatorio di un battitore di tipo a ventola. Il battitore è azionato da un servosistema oleodinamico a controllo elettronico, i cui componenti sono alloggiati in un pannello di controllo esternamente alla vasca.

L'apparato comprende un serbatoio di capacità pari a 400 l, diviso internamente da un setto che separa l'olio da filtrare dall'olio filtrato, che, attraverso il circuito di ricircolo, alimenta il circuito di mandata. Ognuna delle due parti è dotata di un

indicatore per il controllo del livello e della temperatura; la temperatura di regime è di circa 50°C.

Il circuito di ricircolo funziona grazie ad una motopompa centrifuga trifase di potenza pari a 3 kW e portata 200 l/min; nella condotta di aspirazione del circuito è alloggiata una valvola a sfera collegata ad un microinterruttore con controllo a leva.

Dopo il filtraggio, l'olio viene raffreddato passando attraverso uno scambiatore di calore ad acqua. Nella parte di serbatoio contenente l'olio filtrato sono presenti un indicatore elettrico del livello dell'olio e un termostato tarato a 65°C, che, al superamento di tale temperatura, interrompe automaticamente il funzionamento della centrale.

Il circuito di mandata è messo in pressione da un motore asincrono trifase e da una pompa.

Sulla condotta di mandata sono alloggiati in linea i seguenti dispositivi:

- valvola di non ritorno;
- elettrovalvola di massima pressione, tarata alla pressione di 100 bar, superata la quale si ha l'interruzione del fluido al circuito di mandata;
- manometro, per il controllo della pressione di regime (80 bar);
- regolatore di flusso;
- accumulatore da 10 l ad azoto, che permette la compensazione della pressione al valore di regime.

A valle del circuito di mandata si trovano un filtro in pressione e un manometro. L'olio in pressione giunge, quindi, al pistone del battitore. Il pistone di diametro pari a 40 mm, è costituito da un cilindro a doppio stelo il quale, per avere un'escursione di ± 210 mm con frequenza di 2 Hz, richiede una portata d'olio di 100 l/min; il doppio stelo garantisce l'uguaglianza delle sezioni di lavoro in entrambe le direzioni, mantenendo, quindi, costante la portata di funzionamento, il movimento del cilindro è guidato da un servosistema oleodinamico.

Tutto il sistema elettronico del battitore è posto su un pannello di controllo nel quale un generatore di funzioni è in grado di produrre segnali ad andamento sinusoidale, quadro e triangolare; il segnale può essere modulato in frequenza ed in ampiezza. Inoltre il controllo dell'offset consente di fissare la posizione di partenza del pistone. Il segnale d'input è amplificato e convertito in corrente, dei trasduttori dotati di potenziometri permettono la selezione manuale dei valori dei parametri di tensione e di frequenza desiderati.

Il sistema prevede anche la possibilità di un input esterno del segnale. In particolare treni di onde irregolari vengono prodotte collegando una scheda di I/O della National Instrument per mezzo di un cavo coassiale (tipo RG-59), al quadro di controllo del battitore ed a un computer portatile dedicato.

Il software di controllo è il programma "jwg.exe" (Figura 5.4), appositamente sviluppato, per la generazione di onde random, mediante spettri di tipo JONSWAP. Il segnale così prodotto viene inviato alla scheda di I/O che permette di convertire il segnale da digitale a analogico per l'invio al quadro di controllo del battitore.

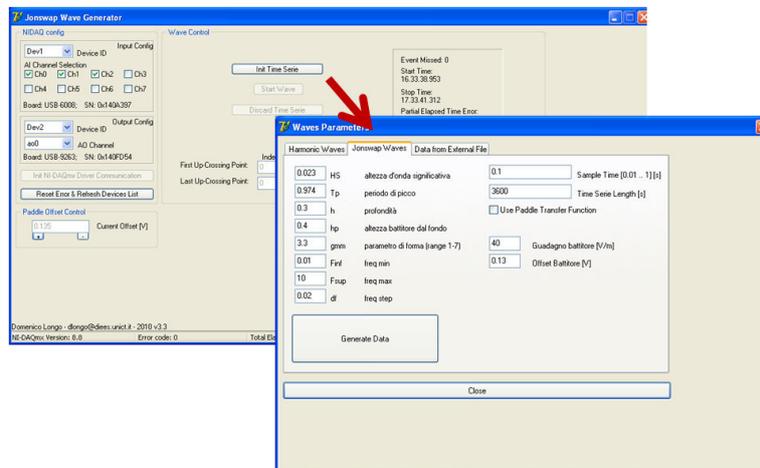


Figura 5.4 Interfaccia del software "jwg.exe" per la generazione delle onde irregolari.

Nella Figura 5.5 sono mostrate le componenti del sistema di controllo per la generazione di onde random appena descritto.

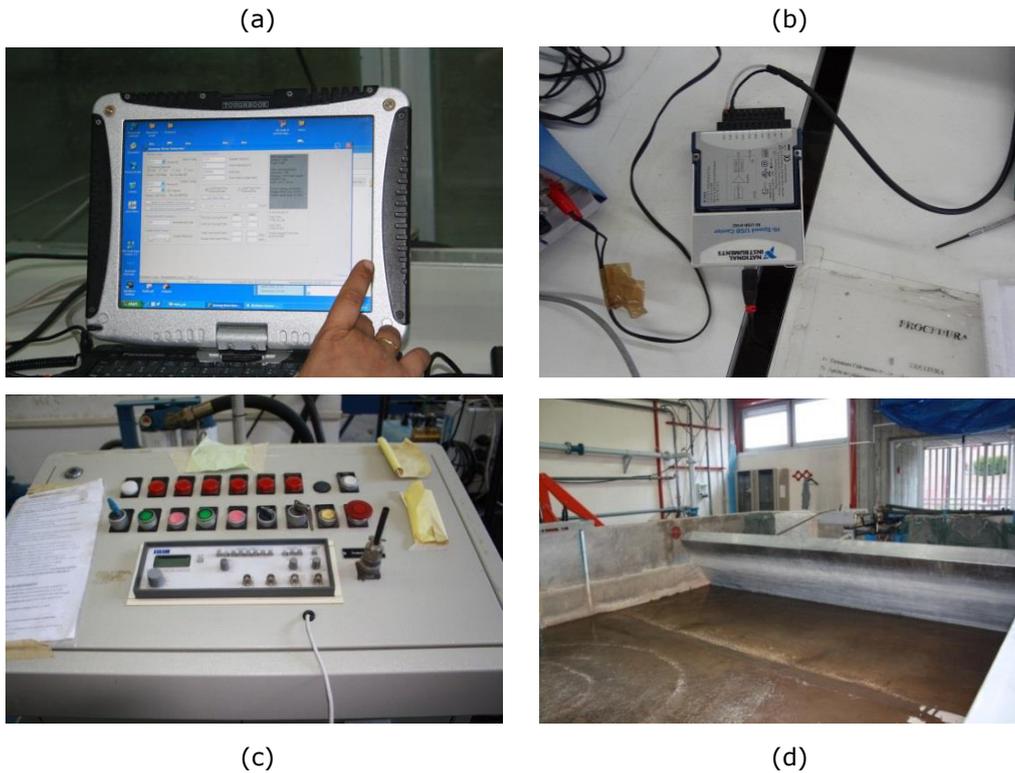


Figura 5.5 Componenti del sistema di generazione delle onde irregolari: a) Toughbook Panasonic dotato di software di controllo "jwg.exe"; b) trasformazione del segnale digitale in segnale analogico mediante la scheda NI-9162; c) quadro di controllo; d) paratoia a ventola per la generazione del moto ondoso.

5.3 Scelta del rapporto geometrico di scala del modello

La scelta della scala del modello è influenzata da alcuni fattori, i più importanti fra i quali sono:

- dimensioni dell'apparecchiatura sperimentale a disposizione;
- necessità di contenere i costi dell'esperimento.

Le dimensioni del modello devono essere compatibili con le dimensioni dell'apparecchiatura sperimentale disponibile nel laboratorio presso il quale deve essere eseguito lo studio. Questo aspetto rappresenta un limite superiore alle dimensioni del modello che è possibile adottare.

I modelli idrodinamici di flussi a superficie libera, in genere, non tengono conto della similitudine di Reynolds. A causa di ciò il comportamento del modello può essere

diverso da quello del prototipo. Per esempio, nello studio del fenomeno della riflessione delle onde da un ammasso poroso, le onde riflesse tendono ad essere più ampie nel modello che nel prototipo. Ciò deriva dal fatto che mentre il moto attraverso i pori dell'ammasso nel prototipo non è influenzato dalla viscosità, in quanto il numero di Reynolds è molto elevato, il moto attraverso i pori nel modello può essere influenzato dalla viscosità perché la similitudine di Reynolds non viene rispettata e quindi la struttura si comporta come se fosse meno porosa. Questo effetto indesiderato è noto come effetto scala e può essere corretto nel modello aumentando le dimensioni dei massi al di sopra del valore determinato dalla scala geometrica.

Allo scopo di ridurre gli effetti scala, sarebbe opportuno realizzare i modelli a scale molto grandi. Tuttavia, considerazioni sui costi di realizzazione dei modelli suggeriscono che i modelli a scala molto grande risultano nel complesso non economici.

Come soluzione di compromesso tra le problematiche sopra descritte, si è pertanto deciso di adottare nel presente studio una scala geometrica di riduzione di 1:45 tra prototipo e modello.

5.4 Descrizione delle caratteristiche dei modelli fisici adottati

I modelli fisici oggetto del presente studio, in accordo con i criteri di similitudine presentati al Capitolo 4, sono stati realizzati in scala geometrica non distorta 1:45.

Oggetto della modellazione, come visto in precedenza, sono la banchina a giorno su pali, proposta nel progetto definitivo in fase di gara, avente una scarpata sottostante con pendenza pari a 4:3 in massi naturali di peso compreso tra 500 e 1000 kg, e la banchina a giorno su pali e palancole, proposta in fase di progettazione esecutiva, la quale presenta una camera assorbente sottostante l'impalcato con scogliera in massi di pendenza pari a 3:1 che assolve alla funzione di assorbimento dell'energia residua del moto ondoso e dell'eventuale risacca. Le due configurazioni testate, inoltre, differiscono per quanto concerne la tipologia d'impalcato.

In Figura 5.6 ed in Figura 5.7 sono rappresentate le sezioni tipo dei due modelli fisici realizzati sulla base delle sezioni tipo di progetto riportate al Capitolo 1; al paragrafo seguente verranno descritte nel dettaglio le loro fasi costruttive.

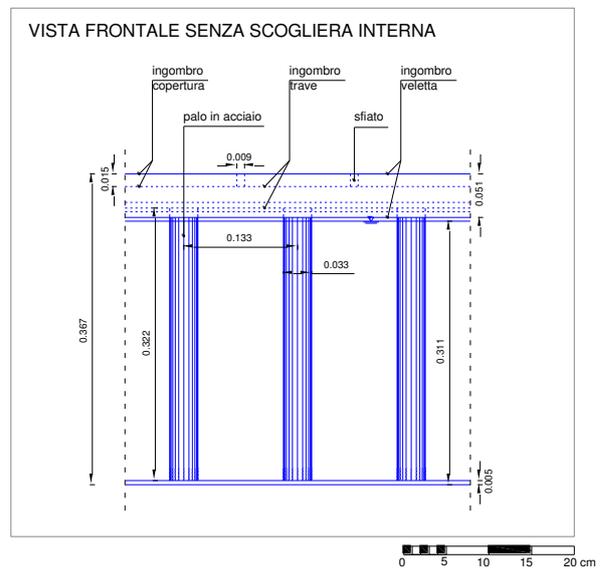
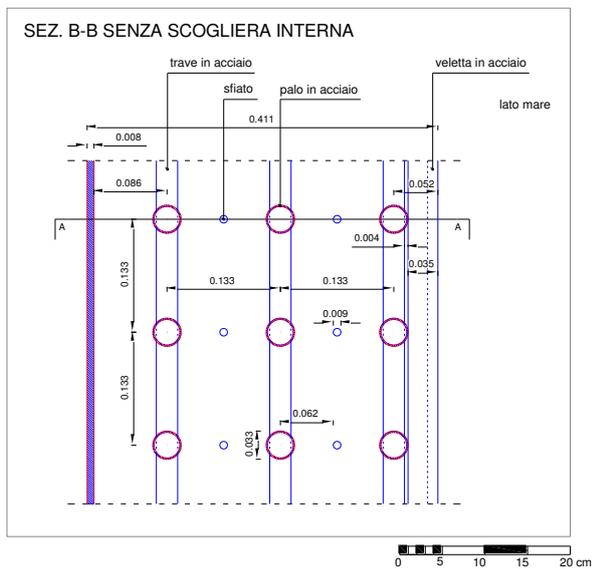
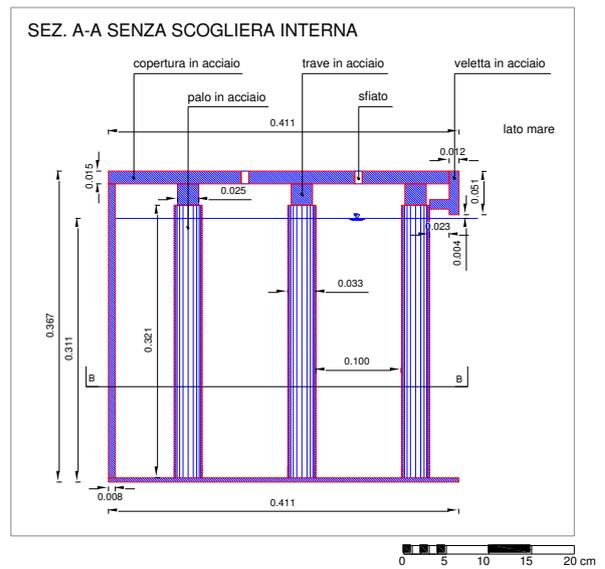
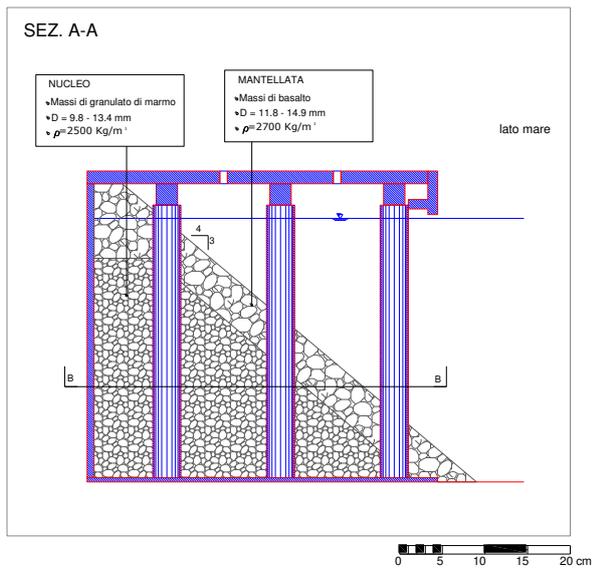


Figura 5.6 Sezioni tipo del modello della banchina a giorno realizzato in scala 1:45 (rif. progetto definitivo).

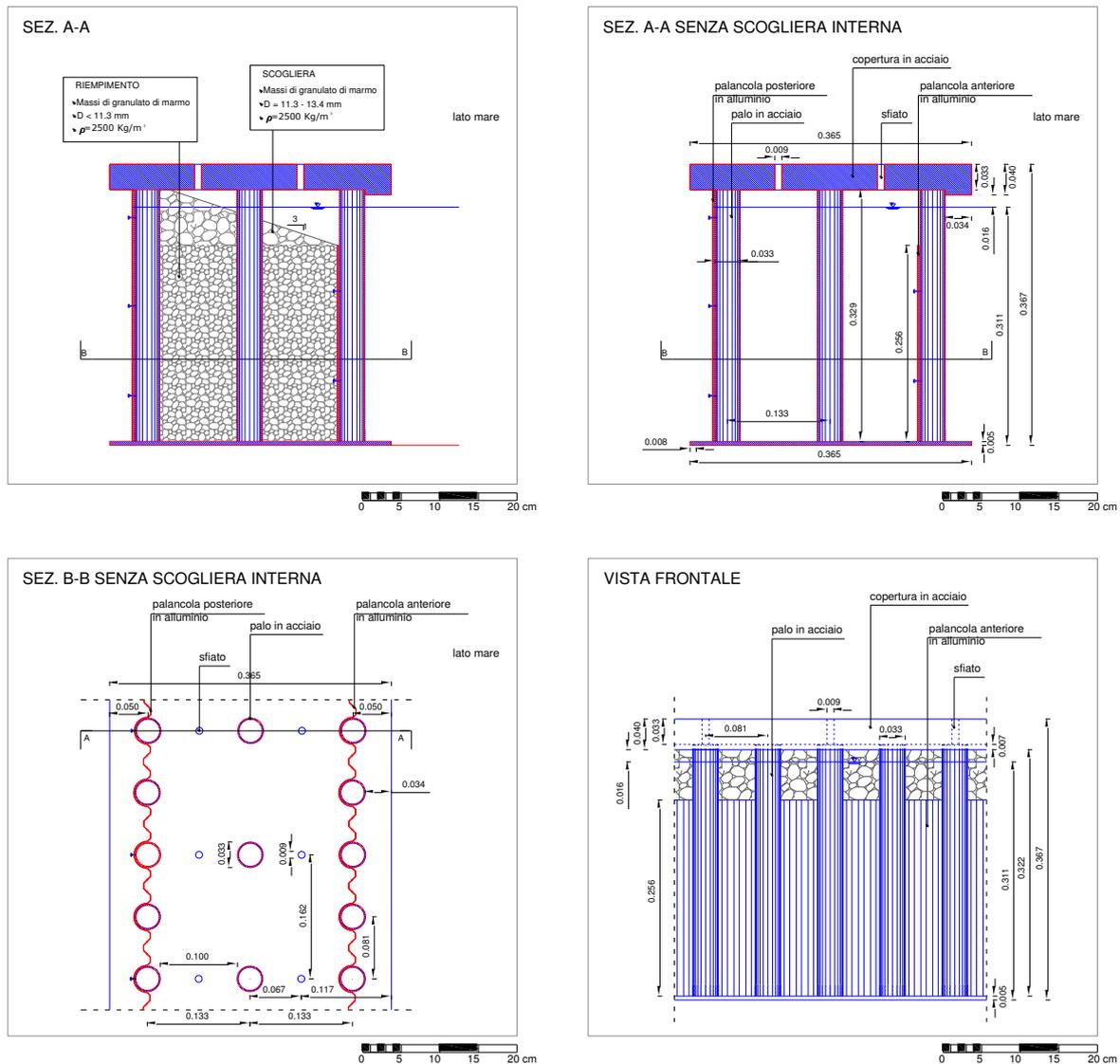


Figura 5.7 Sezioni tipo del modello della banchina a giorno su pali e palancole realizzato in scala 1:45 (rif. progetto esecutivo)

Si precisa che entrambi i modelli fisici della banchina presentano, nella parte superiore, degli sfiati che hanno la funzione di consentire il libero flusso d'aria verso le camere interne, generato dalle variazioni del livello idrico.

5.4.1 Realizzazione del modello fisico della banchina a giorno proposta in fase di gara

Il modello di banchina a giorno, realizzato interamente in acciaio, presenta una struttura fissa costituita dal fondo e dalla parete posteriore, che rappresenta la palancola di chiusura, ed una struttura rimovibile consistente nei pali cilindrici e nella

copertura rappresentante l'impalcato superiore. La scelta è ricaduta su tale configurazione sia per facilitare le operazioni di mobilitazione della struttura e di posizionamento all'interno del canale di simulazione, sia per avere la possibilità di realizzare la scogliera interna dall'alto una volta posta in opera. Si ricorda, infatti, come le fasi di realizzazione di un modello fisico debbano il più possibile essere simili alle fasi costruttive previste in cantiere.

In Figura 5.8 vengono mostrate le fasi di fissaggio dei pali alla struttura fissa.

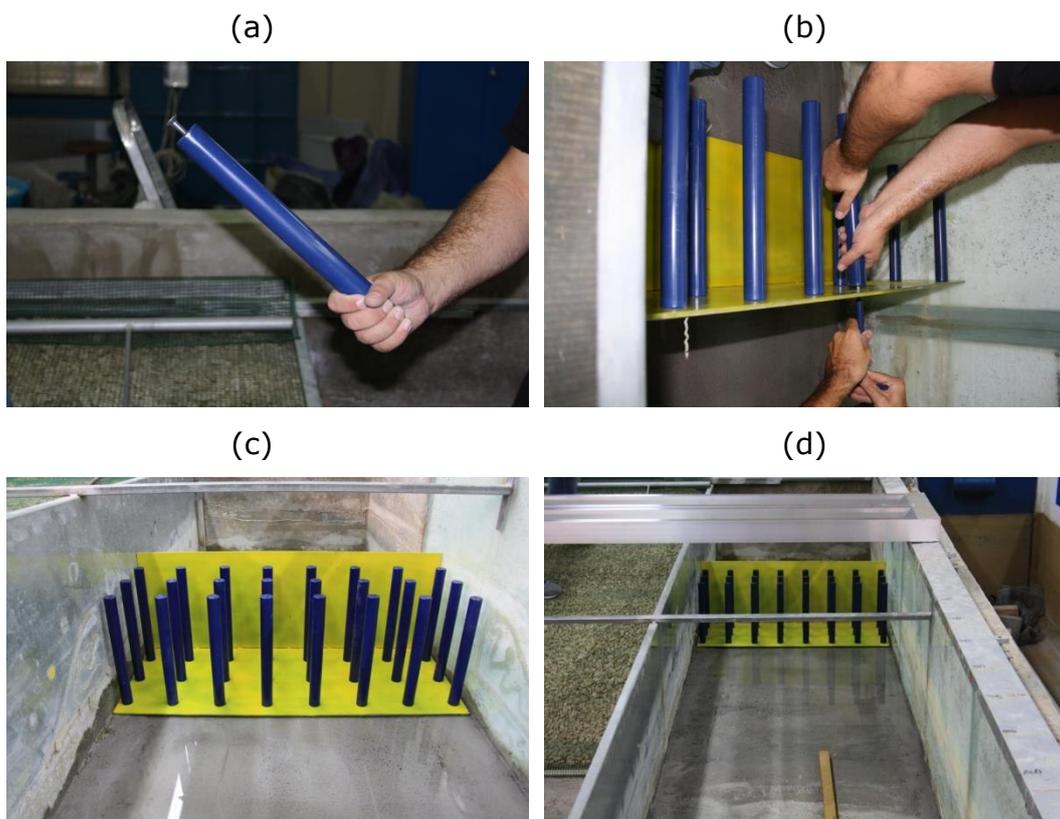


Figura 5.8 Banchina a giorno: (a) particolare del sistema di avvitemento del palo cilindrico; (b) fissaggio dei pali alla struttura fissa; (c) e (d) vista della struttura posta in opera.

Per individuare il materiale da utilizzare per la realizzazione della scogliera interna è necessario fare riferimento ai criteri di similitudine descritti nel Capitolo 4. In particolare, si è fatto riferimento alla metodologia di Hudson et al. (1979) per la definizione del "numero di stabilità".

Si è fatto riferimento ad una densità dell'acqua pari a 1000 kg/m^3 nel modello (acqua dolce) e pari a 1030 kg/m^3 nel prototipo (acqua salata).

Nel caso della riduzione in scala degli scogli naturali, la metodologia è stata applicata a due tipologie di materiale lapideo: granulato di marmo e basalto. Per

entrambi i materiali, nel prototipo, è stato utilizzato lo stesso valore di densità pari a 2650 kg/m^3 mentre per il modello sono stati utilizzati valori di densità pari a 2500 kg/m^3 per il marmo e 2700 kg/m^3 per il basalto.

Tabella 5.I Valutazione del numero di stabilità secondo il metodo di Hudson et al. (1979) per i sedimenti di basalto e di marmo.

Parametro	Valore	
	Marmo	Basalto
N_L	45	45
N_{γ_a}	1.06	0.98
$N_{(\gamma_a/\gamma_{w-1})}$	1.05	0.93
N_{wa} (Hudson et al,1979)	83788	112936

Mediante l'applicazione della relazione 4.29 e assumendo i massi di forma approssimativamente cubica è stato possibile ricavare il peso (vedi Tabella 5.II) e il diametro (vedi Tabella 5.III) dei massi costituenti il nucleo e la mantellata della scogliera interna con pendenza 4:3.

Tabella 5.II Peso dei massi naturali, a scala di modello, della scogliera interna alla banchina a giorno su pali, ottenuti mediante la similitudine del numero di stabilità.

Tipologia di massi	Massa [kg]			
	granulato di marmo		basalto	
	min	max	min	max
I categoria selezionata (200 - 500 kg) - nucleo	0.002	0.006	0.002	0.004
I categoria (500 - 1000 kg) - mantellata	0.006	0.012	0.004	0.009

Tabella 5.III Dimensioni dei massi naturali, a scala di modello, della scogliera interna alla banchina a giorno su pali.

Tipologia di massi	Diametro [mm]			
	granulato di marmo		basalto	
	min	max	min	max
I categoria selezionata (200 - 500 kg) -nucleo	9.8	13.4	8.7	11.8
I categoria (500 - 1000 kg) - mantellata	13.4	16.8	11.8	14.9

Dall'analisi incrociata delle caratteristiche dei massi necessari per la realizzazione della scogliera a scala di prototipo e dei materiali più facilmente reperibili o già disponibili si è deciso di impiegare granulato di marmo per il nucleo e basalto per la mantellata selezionati tramite setacciatura manuale. In Figura 5.9 vengono mostrate le fasi di realizzazione della scogliera, con particolare riferimento alla fase di selezione granulometrica mediante setacci unificati, la posa del nucleo e la posa della mantellata.

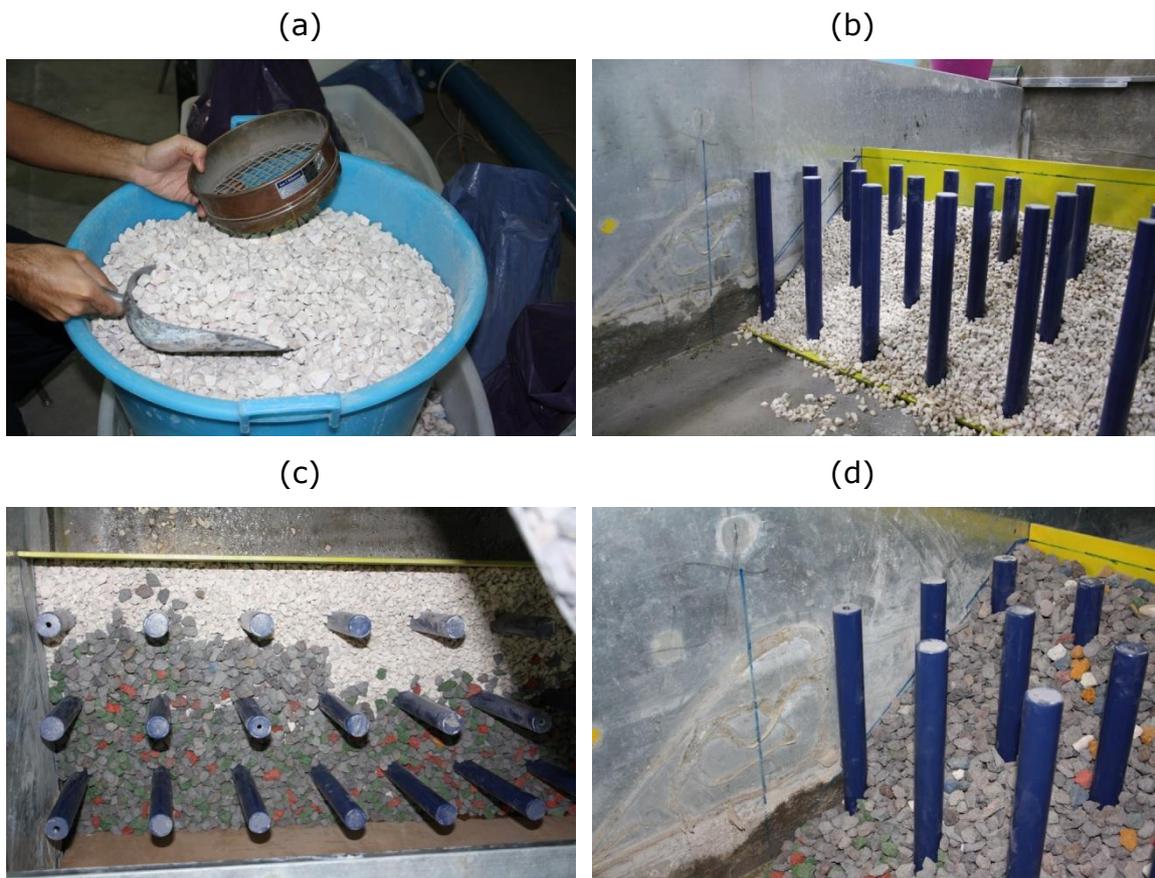


Figura 5.9 Banchina a giorno: (a) setacciatura manuale dei massi; (b) nucleo in marmo calcareo; (c) vista dall'alto durante la fase di realizzazione della mantellata; (d) mantellata in basalto con pendenza 4:3.

Infine si è riposizionata e opportunamente fissata la copertura rimovibile il cui intradosso presenta, in analogia con il prototipo, tre travi poggiate sui pali, vedi Figura 5.10.

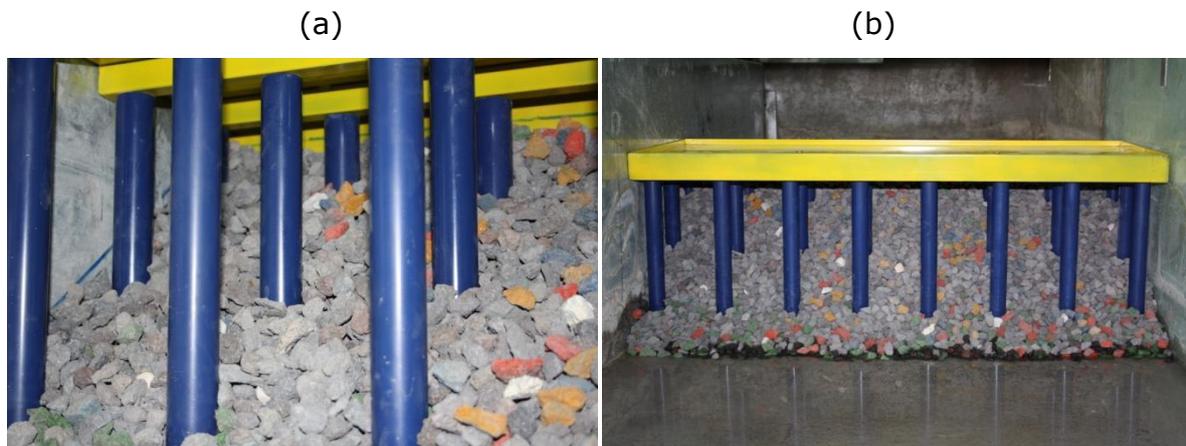


Figura 5.10 Banchina a giorno: (a) particolare delle travi nell'intradosso della copertura; (b) vista del modello della banchina a giorno messa in opera all'interno del canale di simulazione.

5.4.2 Realizzazione del modello fisico della banchina su pali e palancole proposta in fase di progettazione esecutiva

Il modello, realizzato in acciaio, presenta una piastra forata come base su cui installare i pali cilindrici, la copertura superiore rimovibile e due palancole in alluminio anch'esse rimovibili, di diversa altezza, realizzate attraverso una piegatrice a controllo numerico, che riproducono la sagoma delle palancole previste per il prototipo.

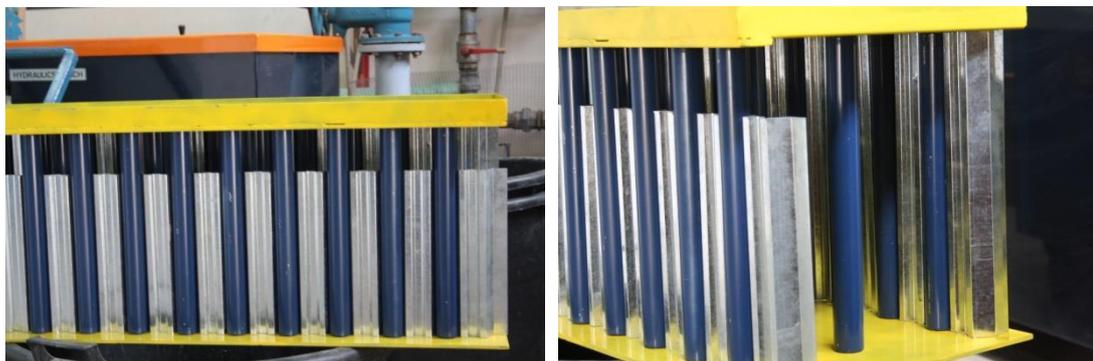


Figura 5.11 Banchina su pali e palancole: vista frontale e laterale della struttura in acciaio.

Una volta conclusa la posa in opera della struttura del modello si è proceduto alla selezione manuale dei massi costituenti il riempimento fra le palancole e la scogliera sovrastante di pendenza 3:1.

Così come precedentemente descritto nel paragrafo 5.4.1 si è ricavato il peso (vedi Tabella 5.IV) e il diametro (vedi Tabella 5.V) dei massi costituenti la scogliera interna alla camera assorbente.

Tabella 5.IV Peso dei massi naturali, a scala di modello, della scogliera interna della banchina su pali e palancole, ottenuti mediante la similitudine del numero di stabilità.

Tipologia di massi	Massa [kg]			
	granulato di marmo		basalto	
	min	max	min	max
I categoria selezionata (300 – 500 kg) - scogliera	0.004	0.006	0.003	0.004

Tabella 5.V Dimensioni dei massi naturali, a scala di modello, della scogliera interna della banchina su pali e palancole.

Tipologia di massi	Diametro [mm]			
	granulato di marmo		basalto	
	min	max	min	max
I categoria selezionata (300 – 500 kg) - scogliera	11.3	13.4	9.9	11.8

Dall'analisi incrociata delle caratteristiche dei massi necessari per la realizzazione della scogliera a scala di prototipo e dei materiali più facilmente reperibili o già disponibili si è deciso di impiegare granulato di marmo selezionato tramite setacciatura manuale. Come materiale di riempimento si è adoperato granulato di marmo più fine rispetto quello selezionato per la scogliera, così da evitare un'eventuale infiltrazione di massi dalla scogliera all'interno del riempimento. In Figura 5.12 vengono mostrate le fasi di realizzazione della scogliera, con particolare riferimento alla fase di riempimento in corrispondenza delle palancole e alla realizzazione della scogliera antirisacca.

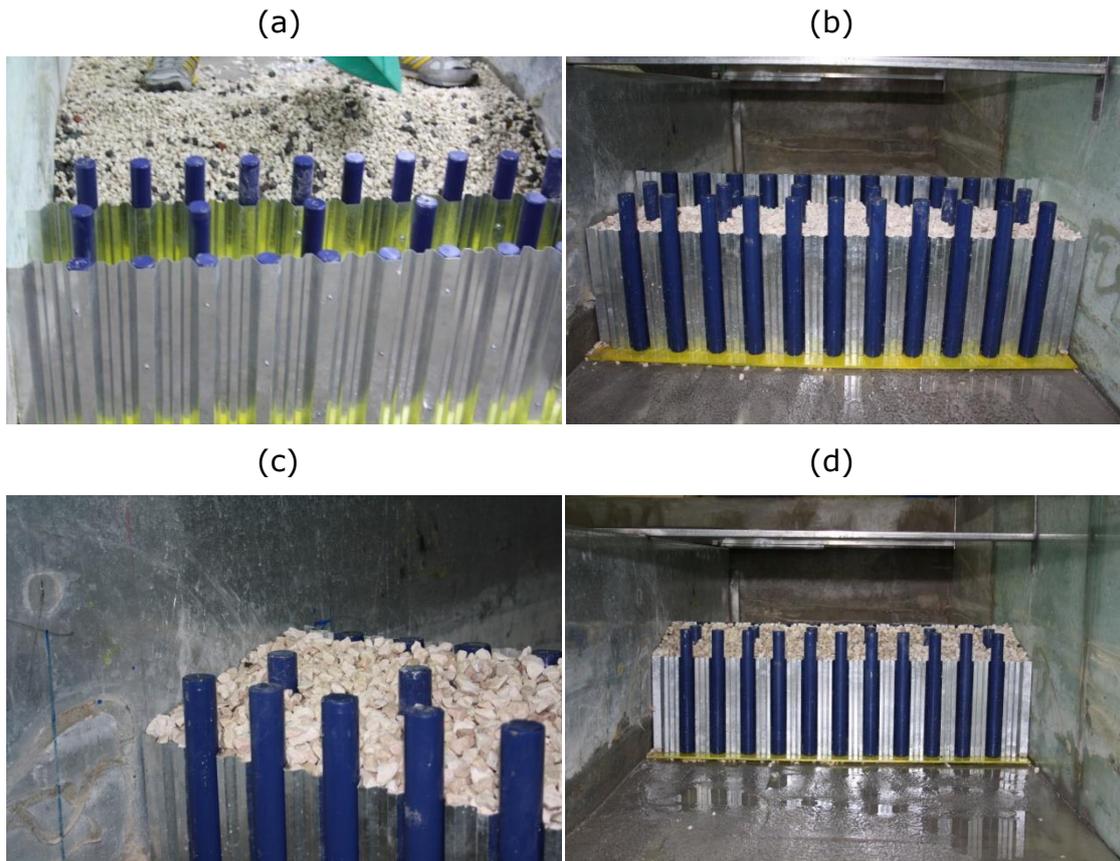


Figura 5.12 Banchina su pali e palancole: (a) vista della struttura del modello in opera; (b) riempimento in marmo calcareo; (c) particolare della scogliera interna con pendenza 3:1; (d) vista frontale del modello.

Una volta realizzata la scogliera e verificato che la pendenza interna dei massi rispettasse quella desiderata, si è proceduto al riposizionamento e fissaggio della copertura, vedi Figura 5.13.



Figura 5.13 Banchina su pali e palancole: (a) particolare della scogliera interna alla camera assorbente; (b) vista del modello della banchina su pali e palancole messa in opera all'interno del canale di simulazione.

5.5 Strumentazione di misura

5.5.1 Misura del moto ondoso

La misura delle caratteristiche delle onde è stata effettuata mediante 3 sonde resistive posizionate a 1.74 m dalla struttura (sonde S1, S2 e S3), ed una sonda resistiva (sonda S4) affiancata ad una sonda a ultrasuoni poste a 8 m dalla struttura (vedere Figura 5.14). Ognuna delle 4 sonde resistive è costituita da due fili metallici in acciaio inossidabile, di lunghezza pari a 300 mm e diametro 1.5 mm, disposti parallelamente ad una distanza di 12.5 mm (vedere Figura 5.15). Le 3 sonde prossime al modello sono distanziate 10.3 cm la prima sonda dalla seconda e 17.3 cm la seconda dalla terza al fine di misurare la riflessione dell'onda da parte della struttura stessa con il metodo delle tre sonde di Mansard e Funke (1980), così come modificato da Faraci et al. (2014), descritto al Capitolo 3.

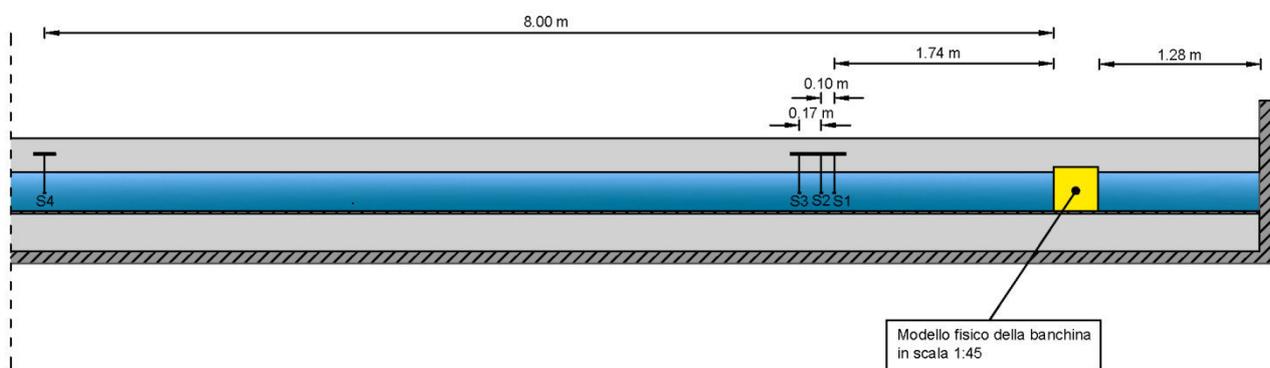


Figura 5.14 Schema raffigurante la disposizione delle sonde resistive di livello (S1, S2, S3, S4) rispetto al modello fisico della banchina

Le sonde resistive vengono alimentate da una differenza di potenziale nota e una volta immerse in acqua, risultano cortocircuitate, generando in uscita un segnale in tensione proporzionale alla profondità d'immersione della sonda. Il segnale viene quindi trasmesso alla *scheda d'acquisizione National Instrument (NIUSB 6008)* e convertito da analogico a digitale e quindi acquisito dal calcolatore. La misura della sopraelevazione d'onda è ottenuta attraverso un'opportuna funzione di trasferimento tensione-sopraelevazione del pelo libero. Tale funzione, nell'ipotesi di comportamento lineare dello strumento, si ottiene mediante un'operazione di taratura di tutte le sonde in condizioni di quiete.

La sonda a ultrasuoni calcola invece la sopraelevazione d'onda sulla base del tempo che un impulso a ultrasuoni impiega per percorrere la distanza tra il sensore e la superficie del mezzo e viceversa, non è inoltre influenzata dalle proprietà fisiche e chimiche del mezzo.

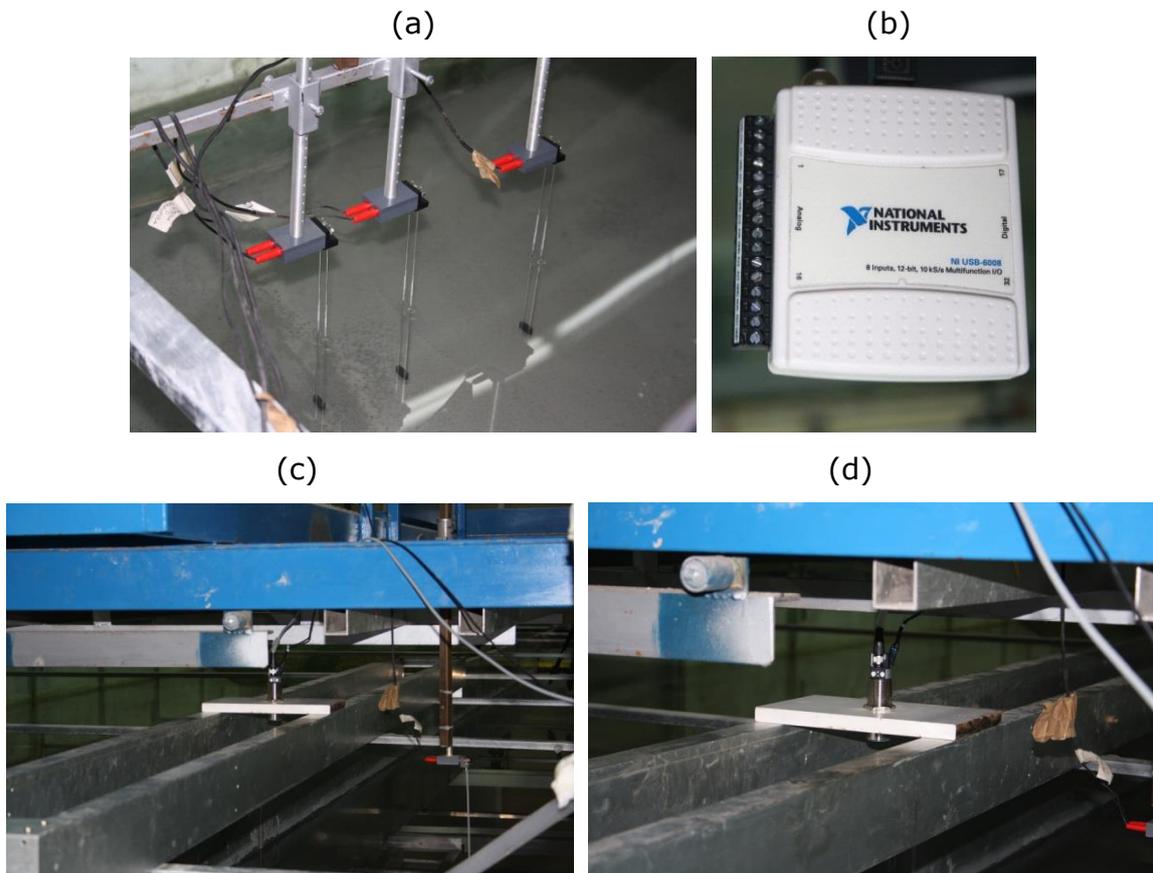


Figura 5.15 Sonde di livello: (a) vista delle tre sonde resistive per la stima del coefficiente di riflessione; (b) scheda d'acquisizione scheda d'acquisizione National Instrument (NIUSB 6008); (c) vista della quarta sonda resistiva e della sonda acustica; (d) sonda acustica.

Sono state inoltre installate due unità di ripresa video in alta definizione, una prima telecamera, modello Sony HDR-CX410VE, distante 1.5 m dall'opera allo scopo di valutare qualitativamente il reale effetto di abbattimento del moto ondoso riflesso ottenuto dalle due differenti configurazioni di banchina simulate, una seconda telecamera, dello stesso modello della precedente, posta ad una distanza tale da riprendere sia il modello fisico della banchina sia le tre sonde di livello resistivo così da poter effettuare, in fase di post-processing, una verifica qualitativa del segnale acquisito analizzando i dati di output.

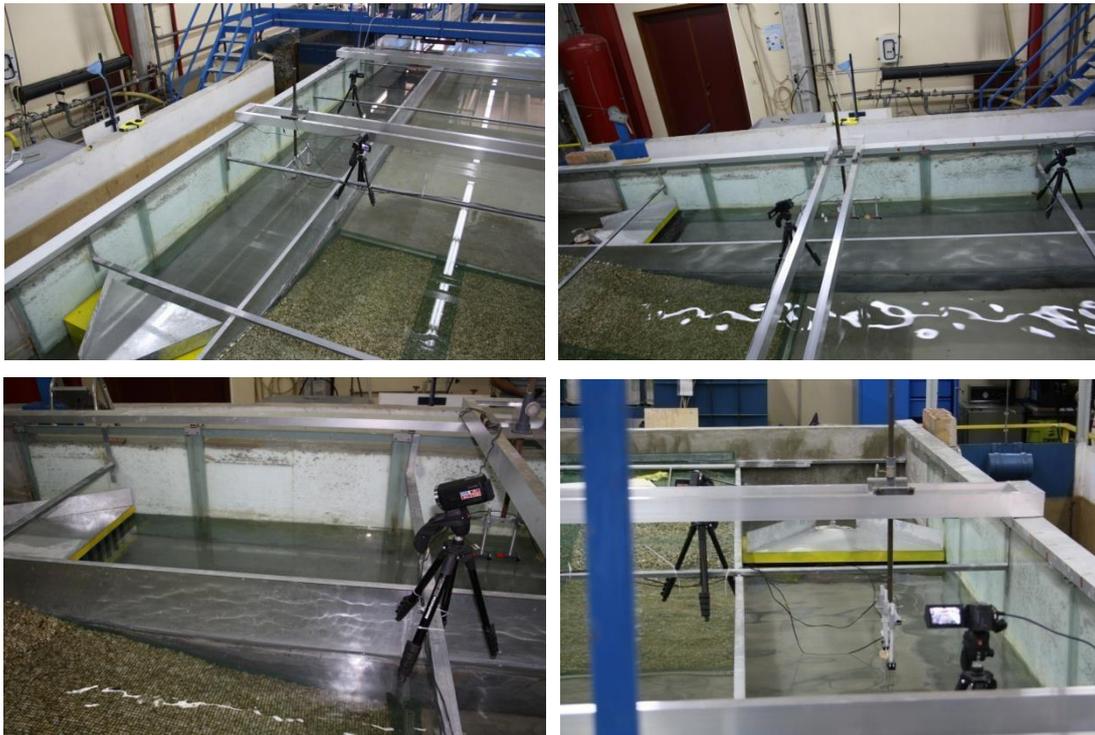


Figura 5.16 Vista e particolare delle due videocamere Sony HDR-CX410VE, con caratteristiche: Full HD, obiettivo G grandangolare con zoom ottico 30x, sensore CMOS Exmor R, stabilizzatore ottico SteadyShot, GPS integrato.

5.5.2 Misura della portata tracimata media

Nell'ambito della presente sperimentazione è stata misurata anche la portata di tracimazione media. Allo scopo è stato appositamente realizzato il sistema di misurazione, costituito da una vasca e da uno scivolo per il convogliamento della portata tracimata a tergo della struttura (vedi Figura 5.17).

L'indirizzatore di flusso, costruito in lamiera d'acciaio sagomata con forma trapezia, avente la base maggiore larga 100 cm e quella minore larga 40 cm, consente

l'incanalamento della portata trascinata all'interno di un contenitore rettangolare in plastica (dimensioni 32 cmx48 cm). Inoltre, una volta raccolta l'acqua all'interno della vaschetta ne è stato misurato il suo volume mediante un boccale graduato di plastica da 1000 ml con un errore di ± 10 ml.

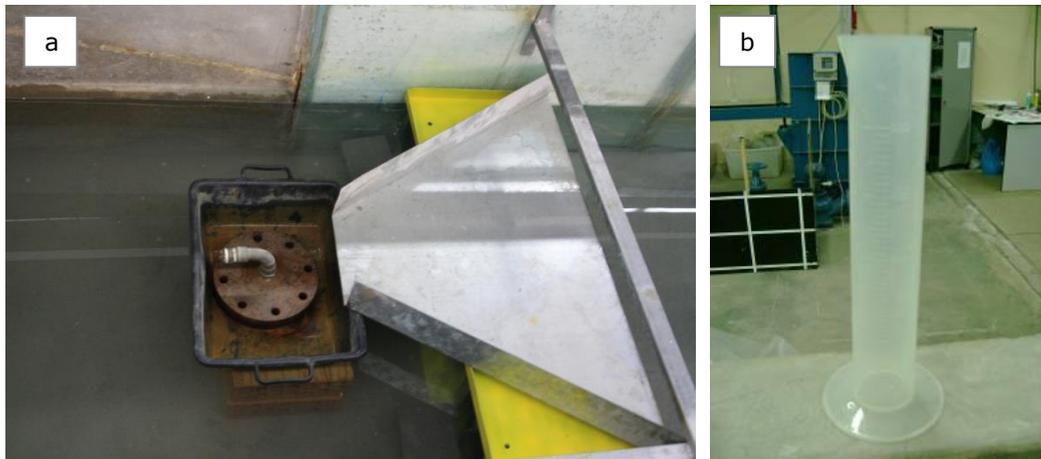


Figura 5.17 Sistema per l'acquisizione della portata trascinata: (a) contenitore di raccolta della portata trascinata (32x48 cm) e scivolo in acciaio per l'incanalamento dell'acqua all'interno della stessa vaschetta; (b) boccale graduato (1000 ml) usato per la misura del volume d'acqua trascinata in un intervallo di tempo predefinito.

6 Prove sperimentali condotte per la stima del coefficiente di riflessione

6.1 Generalità

Come accennato in precedenza, lo studio del fenomeno della riflessione del moto ondoso sulle Banchine Containers del porto commerciale di Augusta caratterizzate da un impalcato sorretto da pali è stato eseguito su modello fisico utilizzando le configurazioni già descritte al paragrafo 1.4.

Come dimostrato dagli studi meteomarinari disponibili per l'area in esame, le onde più alte che possono arrivare sulle banchine del porto commerciale sono generate localmente dal vento che spira sulla rada di Augusta. Sulla base di caratteristiche ondose incidenti variabili in un range ampio, la sperimentazione che segue è finalizzata a valutare l'entità dei coefficienti di riflessione generati dalle due differenti configurazioni della banchina, in modo da indirizzare opportunamente la progettazione.

Per ciascuna delle due configurazioni considerate, al variare delle condizioni idrodinamiche, sono stati valutati l'altezza d'onda incidente, l'altezza d'onda riflessa, il valore del coefficiente di riflessione; è stata inoltre monitorata la eventuale tracimazione delle onde. È opportuno ricordare come i valori delle forzanti idrodinamiche siano stati scelti in modo abbastanza ampio, al fine di ottenere dei risultati di tipo parametrico che possano corrispondere a differenti tipologie di moto ondoso riscontrabili nell'area in esame.

Nel presente capitolo verranno descritti gli esperimenti condotti e i risultati ottenuti.

6.2 Prove effettuate

Sono state sottoposte a prova due differenti configurazioni della banchina di riva su pali con scogliera sottostante, già descritte al paragrafo 1.4 e sono state effettuate complessivamente 50 prove, 25 per ogni configurazione.

I parametri idrodinamici considerati per le prove sono stati determinati a scala di prototipo. Partendo da queste informazioni, le dimensioni spaziali sono state ridotte in

scala 1:45, mentre i tempi sono stati ridotti in scala $(1:45)^{1/2}$ in accordo con le considerazioni svolte al capitolo 4.

Nello specifico, a scala di modello, sono state generate onde random basate su spettro JONSWAP o TMA in funzione delle caratteristiche del moto ondoso. In particolare i periodi di picco scelti sono compresi tra 0,5 s e 1,5 s (ovvero a scala di prototipo compresi tra 3,4 s e 10,1 s) e le altezze d'onda significative tra 0,004 m e 0,03 m (ovvero a scala di prototipo comprese tra 0,18 m e 1,35 m). Si precisa che, al fine di avere una quanto più completa caratterizzazione delle caratteristiche antiriflettenti delle banchine, i valori di altezza d'onda e periodo hanno una forte variabilità in modo da ottenere dei risultati parametrici. Così facendo è possibile coprire tutte le possibili combinazioni di moto ondoso che effettivamente si verificano nello specchio acqueo antistante il Porto commerciale di Augusta, per i tempi di ritorno assunti alla base della progettazione.

Nella Tabella 6.I vengono riportate le informazioni relative ai parametri di controllo utilizzati in laboratorio al fine di simulare le 25 condizioni idrodinamiche considerate per le prove sperimentali.

Tabella 6.I Dati di input al software di controllo del battitore utilizzati per le prove sperimentali condotte.

Prova	H _s [m]	T _p [s]	Prova	H _s [m]	T _p [s]	Prova	H _s [m]	T _p [s]	Prova	H _s [m]	T _p [s]	Prova	H _s [m]	T _p [s]
001	0,008	0,5	006	0,016	0,7	011	0,018	0,9	016	0,02	1,1	021	0,004	1,5
002	0,014	0,5	007	0,022	0,7	012	0,026	0,9	017	0,006	1,3	022	0,008	1,5
003	0,018	0,5	008	0,03	0,7	013	0,006	1,1	018	0,01	1,3	023	0,01	1,5
004	0,022	0,5	009	0,008	0,9	014	0,012	1,1	019	0,012	1,3	024	0,014	1,5
005	0,01	0,7	010	0,014	0,9	015	0,016	1,1	020	0,016	1,3	025	0,016	1,5
<u>Altri parametri costanti utilizzati:</u>														
h=0,311 m;			h _p = 0,40 m;			γ=3,3;			ST=0,01 s;			quad. battitore=40;		
f _{sup} =10 Hz;			f _{inf} =0,01 Hz;			df=0,02 Hz;			TS=3600 s;			Offset=0,13		

6.3 Risultati ottenuti

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per le due configurazioni della banchina di riva esaminate. In particolare, per ogni configurazione si riporta una schematizzazione della tipologia di banchina analizzata a scala di modello e la stima delle grandezze ottenute mediante il metodo delle tre sonde, descritto al capitolo 3. I risultati sono forniti in termini di altezze d'onda incidenti e riflesse, periodi di picco, coefficienti di riflessione. I valori di dette grandezze sono riportati sia a scala di modello che a scala di prototipo, per una maggiore facilità di lettura. Si precisa inoltre come, durante gli esperimenti condotti, sia stata monitorata la tracimazione delle onde che però è risultata assente, nel senso che in nessuna condizione ondosa verificata si è avuto il fenomeno della tracimazione ed i pochi getti che hanno oltrepassato la quota del piano di calpestio non hanno raggiunto la parte retrostante del filo banchina.

Inoltre per ogni configurazione considerata vengono presentati i grafici degli andamenti dei coefficienti di riflessione al variare del parametro adimensionale kh , pari al prodotto del numero d'onda per la profondità al piede dell'opera.

6.3.1 Configurazione 1

La Configurazione 1, corrispondente alla soluzione migliorativa proposta in fase di gara, è rappresentata da una banchina a giorno su pali con sottostante scogliera di pendenza 4/3 che arriva fino al fondo, di profondità 14m in scala di prototipo (0,311 m in scala di modello, come mostrato in Figura 6.1). La veletta ha intradosso a quota +0,2 rispetto al livello medio del mare in scala di prototipo. Nella Tabella 6.II si riportano, le altezze d'onda rilevate dalle 4 sonde resistive durante le prove sperimentali (con H_{s1} relativa alla sonda vicina all'opera e H_{s4} relativa alla sonda più lontana dall'opera), il periodo di picco (T_p), le altezze d'onda incidente e riflessa (H_{si} e H_{sr}) e il coefficiente di riflessione (K_r) a scala di modello valutate utilizzando il metodo delle tre sonde; la Tabella 6.III riporta le stesse grandezze a scala di prototipo, vengono inoltre riportate le lunghezze d'onda di picco L_p e il corrispondente parametro adimensionale kh , pari al prodotto del numero d'onda di picco ($2\pi/L_p$) per la profondità (h) al piede dell'opera .

L'andamento dei coefficienti di riflessione ottenuti è mostrato in Figura 6.2 in funzione del sopracitato parametro kh ; i risultati ottenuti vengono suddivisi per classi

di altezza d'onda significativa, al fine di indagare l'eventuale incidenza di tale grandezza sul fenomeno della riflessione.

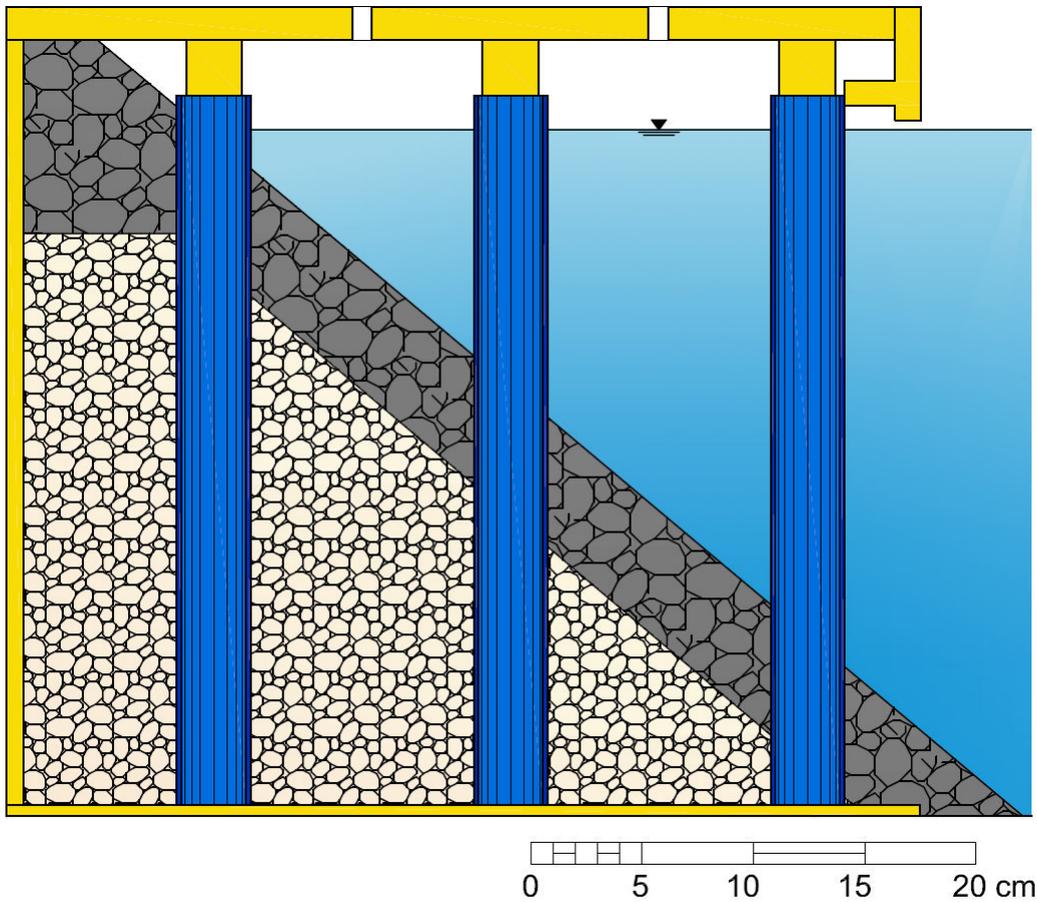


Figura 6.1 Configurazione 1 (Gara): schematizzazione della banchina di riva a scala di modello.

Tabella 6.II

Configurazione 1:grandezze stimate a scala di modello.

Prova	H _{s1} [m]	H _{s2} [m]	H _{s3} [m]	H _{s4} [m]	T _p [s]	H _{si} [m]	H _{sr} [m]	K _r [-]
G_001	0,010	0,010	0,010	0,011	0,49	0,008	0,002	0,24
G_002	0,017	0,017	0,017	0,018	0,53	0,014	0,003	0,23
G_003	0,022	0,022	0,021	0,024	0,58	0,018	0,004	0,21
G_004	0,026	0,026	0,027	0,031	0,60	0,022	0,005	0,22
G_005	0,013	0,013	0,014	0,014	0,71	0,010	0,003	0,32
G_006	0,020	0,020	0,020	0,023	0,71	0,016	0,004	0,27
G_007	0,027	0,027	0,028	0,030	0,71	0,021	0,006	0,29
G_008	0,036	0,038	0,039	0,039	0,71	0,030	0,008	0,27
G_009	0,012	0,012	0,011	0,013	0,87	0,008	0,003	0,41
G_010	0,018	0,018	0,017	0,019	0,86	0,012	0,005	0,40
G_011	0,026	0,026	0,026	0,025	0,88	0,018	0,007	0,39
G_012	0,036	0,036	0,035	0,038	0,86	0,026	0,010	0,38
G_013	0,010	0,010	0,009	0,010	1,06	0,007	0,003	0,47
G_014	0,015	0,015	0,015	0,016	1,10	0,011	0,005	0,44
G_015	0,022	0,021	0,021	0,023	1,07	0,015	0,006	0,42
G_016	0,028	0,028	0,027	0,028	1,09	0,020	0,008	0,42
G_017	0,008	0,008	0,008	0,009	1,24	0,005	0,003	0,50
G_018	0,013	0,012	0,013	0,014	1,24	0,008	0,004	0,47
G_019	0,017	0,017	0,016	0,018	1,28	0,011	0,006	0,49
G_020	0,022	0,022	0,021	0,023	1,30	0,015	0,007	0,46
G_021	0,006	0,006	0,006	0,007	1,38	0,004	0,002	0,58
G_022	0,012	0,012	0,011	0,011	1,47	0,007	0,004	0,55
G_023	0,015	0,015	0,015	0,016	1,42	0,010	0,005	0,51
G_024	0,018	0,018	0,018	0,019	1,43	0,012	0,006	0,49
G_025	0,023	0,023	0,022	0,023	1,41	0,016	0,007	0,46

Tabella 6.III

Configurazione 1: grandezze stimate a scala di prototipo.

Prova	T _p [s]	L _p [m]	k h [-]	H _{si} [m]	H _{sr} [m]	K _r [-]
G_001	3,31	17,1	5,13	0,36	0,09	0,24
G_002	3,55	19,7	4,46	0,61	0,14	0,23
G_003	3,88	23,5	3,74	0,81	0,17	0,21
G_004	4,00	24,9	3,53	0,97	0,22	0,22
G_005	4,74	34,6	2,54	0,46	0,14	0,32
G_006	4,74	34,6	2,54	0,71	0,19	0,27
G_007	4,78	35,1	2,50	0,95	0,28	0,29
G_008	4,74	34,6	2,54	1,33	0,36	0,27
G_009	5,85	50,2	1,75	0,37	0,15	0,41
G_010	5,79	49,5	1,78	0,56	0,23	0,40
G_011	5,91	51,1	1,72	0,83	0,33	0,39
G_012	5,79	49,5	1,78	1,17	0,44	0,38
G_013	7,10	67,7	1,30	0,29	0,14	0,47
G_014	7,38	71,6	1,23	0,47	0,21	0,44
G_015	7,19	69,0	1,27	0,67	0,29	0,42
G_016	7,28	70,3	1,25	0,88	0,37	0,42
G_017	8,33	84,4	1,04	0,25	0,12	0,50
G_018	8,33	84,4	1,04	0,38	0,18	0,47
G_019	8,58	87,7	1,00	0,51	0,25	0,49
G_020	8,72	89,5	0,98	0,66	0,31	0,46
G_021	9,26	96,6	0,91	0,18	0,11	0,58
G_022	9,88	104,6	0,84	0,34	0,18	0,55
G_023	9,55	100,3	0,88	0,45	0,23	0,51
G_024	9,58	100,7	0,87	0,54	0,27	0,49
G_025	9,44	98,9	0,89	0,71	0,33	0,46

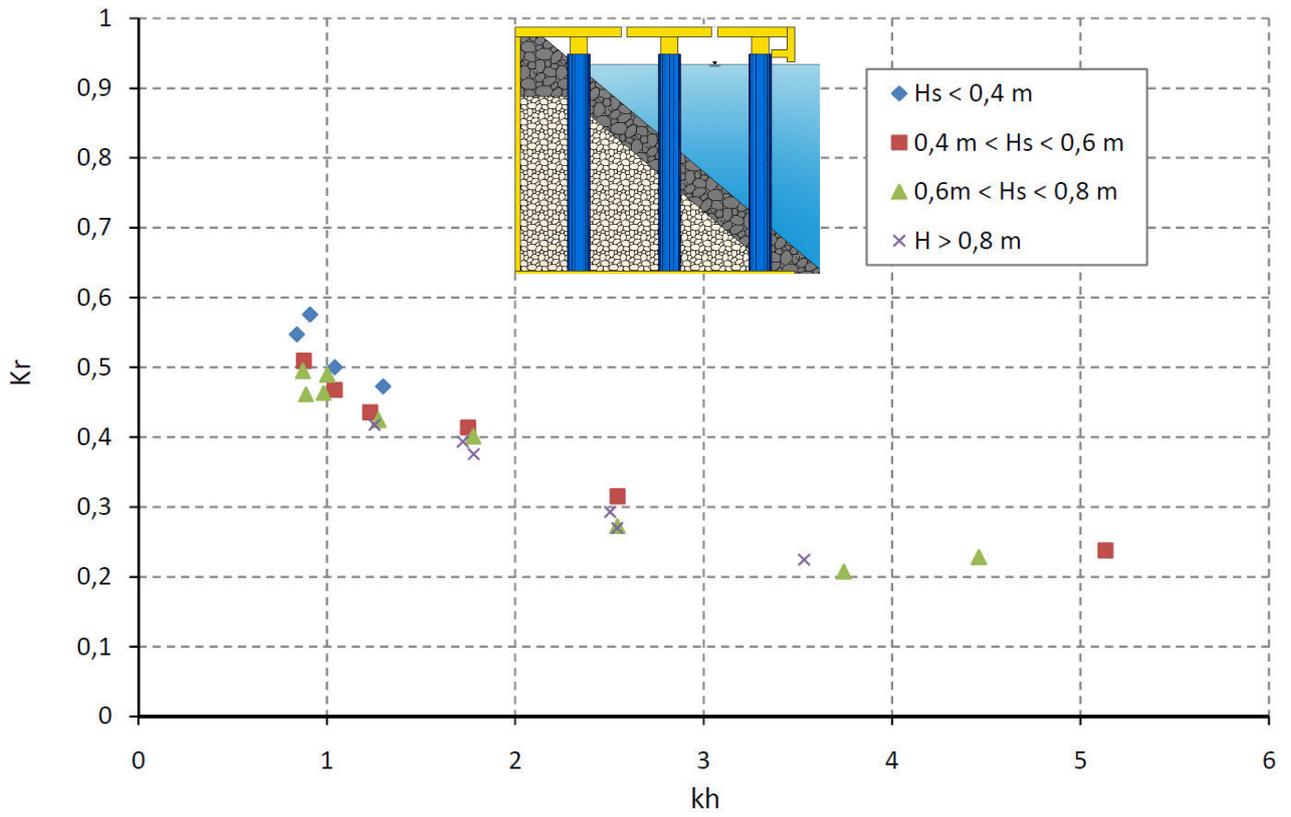


Figura 6.2 Andamento dei coefficienti di riflessione in funzione del parametro kh per onde random per la Configurazione 1 (Gara).

6.3.2 Configurazione 2

La Configurazione 2, corrispondente alla soluzione elaborata in fase di progettazione esecutiva, presenta la stessa profondità al piede dell'opera e la medesima quota del piano di calpestio. La soluzione progettuale è rappresentata sempre da una banchina su pali, che però viene delimitata da due palancole. La palancole posta lato mare non raggiunge l'intradosso del piazzale ma termina a profondità di 2,25m (0,05 m in scala di modello), ricavando così una camera assorbente, sottostante al piazzale, in cui vengono collocati scogli di pezzatura compresa tra 300 e 500 kg con pendenza 3/1. La Figura 6.3 riporta lo schema della banchina di riva a scala di modello. Nella Tabella 6.IV si riportano: le altezze d'onda rilevate dalle sonde durante le prove sperimentali (numeri progressivi da 1 a 4 procedendo dall' opera verso il battitore ondogeno), il periodo di picco (T_p), le altezze d'onda incidente e riflessa (H_{si} e H_{sr}) e il coefficiente di riflessione (K_r) a scala di modello; la Tabella 6.V riporta le stesse grandezze a scala di prototipo, vengono inoltre riportate le lunghezze d'onda di picco L_p e il corrispondente parametro adimensionale kh , pari al prodotto del numero d'onda di picco ($2\pi/L_p$) per la profondità (h) al piede dell'opera.

L'andamento dei coefficienti di riflessione ottenuti in funzione del parametro adimensionale kh è riportato in Figura 6.4.

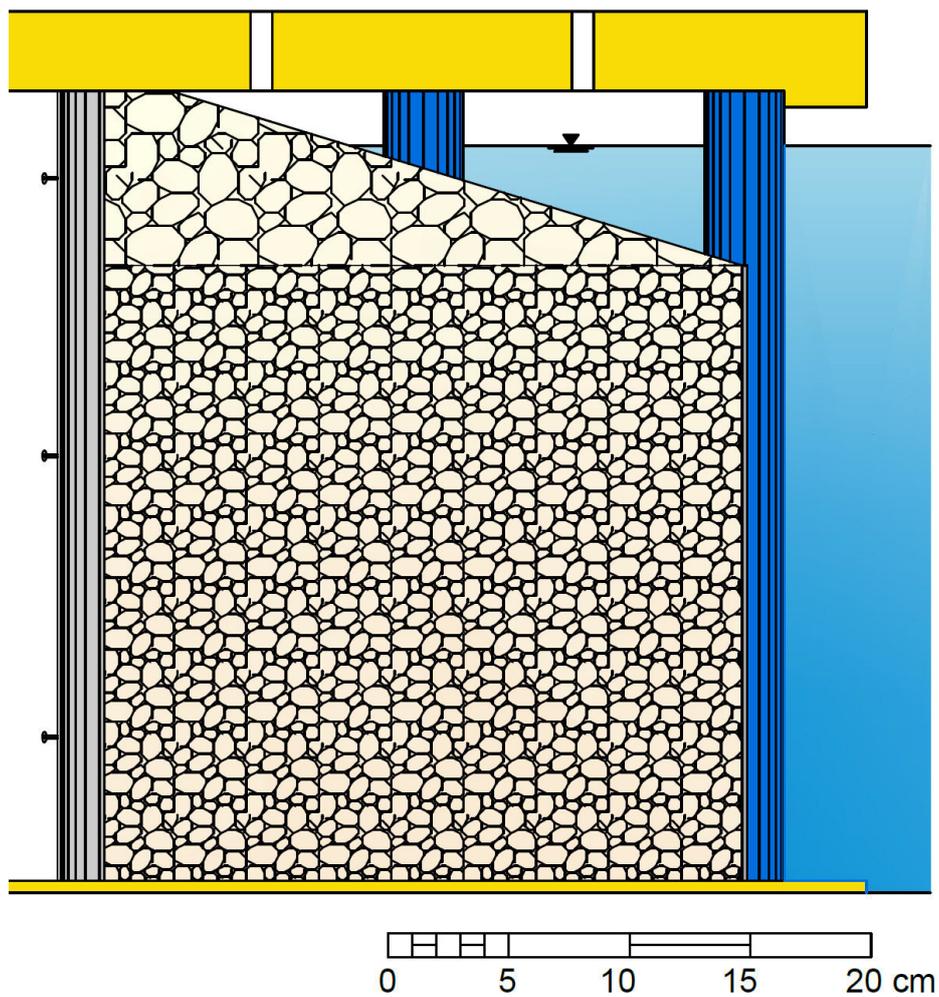


Figura 6.3 Configurazione 2 (Esecutivo): schematizzazione del cassone a scala di modello.

Tabella 6.IV

Configurazione 2: grandezze stimate a scala di modello.

Prova	H _{s1} [m]	H _{s2} [m]	H _{s3} [m]	H _{s4} [m]	T _p [s]	H _{si} [m]	H _{sr} [m]	K _r [-]
E_001	0,012	0,012	0,012	0,013	0,50	0,009	0,003	0,31
E_002	0,018	0,017	0,017	0,020	0,54	0,014	0,004	0,31
E_003	0,023	0,024	0,023	0,026	0,59	0,017	0,006	0,34
E_004	0,028	0,029	0,029	0,032	0,63	0,021	0,008	0,36
E_005	0,015	0,015	0,015	0,015	0,69	0,010	0,004	0,42
E_006	0,024	0,023	0,022	0,024	0,70	0,016	0,007	0,40
E_007	0,032	0,033	0,031	0,035	0,70	0,023	0,009	0,41
E_008	0,042	0,044	0,043	0,046	0,74	0,031	0,012	0,40
E_009	0,013	0,013	0,013	0,014	0,88	0,009	0,004	0,44
E_010	0,020	0,020	0,020	0,021	0,88	0,014	0,006	0,41
E_011	0,027	0,026	0,026	0,029	0,88	0,019	0,008	0,40
E_012	0,037	0,038	0,037	0,039	0,86	0,027	0,011	0,40
E_013	0,010	0,010	0,009	0,010	1,07	0,007	0,003	0,44
E_014	0,017	0,017	0,016	0,017	1,09	0,012	0,005	0,40
E_015	0,022	0,022	0,021	0,024	1,06	0,015	0,006	0,42
E_016	0,032	0,031	0,030	0,032	1,09	0,022	0,009	0,40
E_017	0,008	0,008	0,008	0,008	1,28	0,006	0,002	0,40
E_018	0,013	0,014	0,014	0,014	1,26	0,010	0,004	0,38
E_019	0,019	0,020	0,019	0,019	1,24	0,014	0,005	0,37
E_020	0,024	0,024	0,024	0,026	1,24	0,017	0,006	0,37
E_021	0,007	0,007	0,007	0,007	1,42	0,005	0,002	0,37
E_022	0,011	0,012	0,011	0,012	1,47	0,009	0,003	0,34
E_023	0,015	0,015	0,015	0,016	1,47	0,011	0,004	0,35
E_024	0,019	0,019	0,019	0,021	1,47	0,014	0,005	0,35
E_025	0,023	0,024	0,024	0,026	1,45	0,018	0,006	0,35

Tabella 6.V

Configurazione 2: grandezze stimate a scala di prototipo.

Prova	T _p [s]	L _p [m]	k h [-]	H _{si} [m]	H _{sr} [m]	K _r [-]
E_001	3,35	17,6	5,00	0,41	0,13	0,31
E_002	3,60	20,2	4,35	0,61	0,19	0,31
E_003	3,96	24,4	3,60	0,79	0,27	0,34
E_004	4,24	28,0	3,14	0,94	0,34	0,36
E_005	4,62	33,0	2,67	0,47	0,20	0,42
E_006	4,70	34,1	2,58	0,73	0,29	0,40
E_007	4,70	34,1	2,58	1,03	0,42	0,41
E_008	4,99	38,1	2,31	1,38	0,56	0,40
E_009	5,91	51,1	1,72	0,42	0,18	0,44
E_010	5,91	51,1	1,72	0,65	0,27	0,41
E_011	5,91	51,1	1,72	0,86	0,34	0,40
E_012	5,78	49,3	1,78	1,21	0,48	0,40
E_013	7,19	69,0	1,28	0,30	0,13	0,44
E_014	7,28	70,2	1,25	0,54	0,22	0,40
E_015	7,09	67,6	1,30	0,69	0,29	0,42
E_016	7,28	70,2	1,25	0,99	0,40	0,40
E_017	8,59	87,8	1,00	0,26	0,10	0,40
E_018	8,45	86,0	1,02	0,44	0,17	0,38
E_019	8,32	84,3	1,04	0,64	0,24	0,37
E_020	8,32	84,3	1,04	0,79	0,29	0,37
E_021	9,54	100,2	0,88	0,22	0,08	0,37
E_022	9,88	104,6	0,84	0,39	0,13	0,34
E_023	9,88	104,6	0,84	0,51	0,18	0,35
E_024	9,88	104,6	0,84	0,64	0,22	0,35
E_025	9,70	102,3	0,86	0,79	0,28	0,35

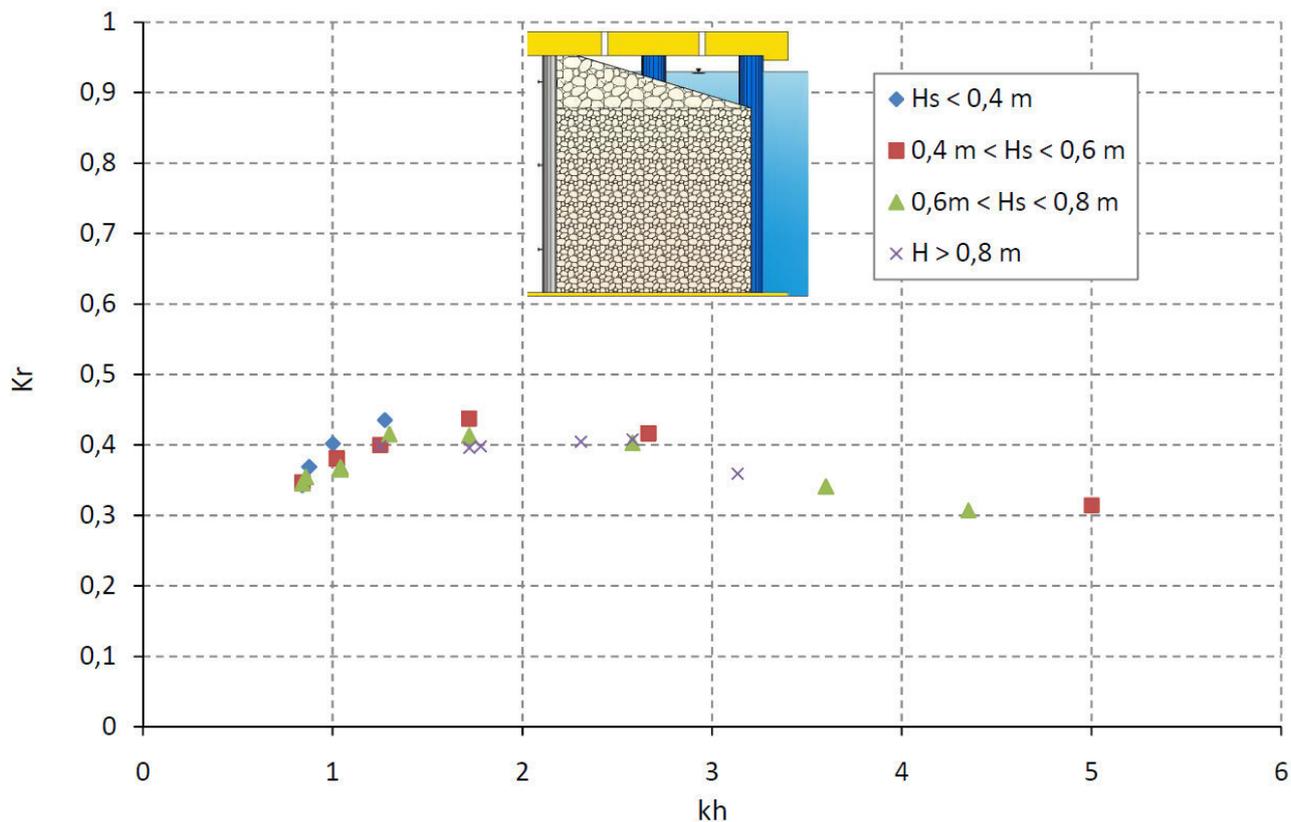


Figura 6.4 Andamento dei coefficienti di riflessione in funzione del periodo di picco dell'onda per onde random per la Configurazione 2 (Progetto Esecutivo).

6.4 Analisi dei risultati ottenuti

I risultati sperimentali ottenuti mostrano come entrambe le configurazioni della banchina di riva esaminate presentino in generale caratteristiche di antiriflessione soddisfacenti. Infatti, il valore del coefficiente di riflessione si mantiene generalmente inferiore a 0,5, tranne che per alcuni casi della Configurazione 1 (banchina su pali a giorno, offerta in sede di progetto definitivo) in presenza di onde più lunghe.

È possibile effettuare un confronto complessivo tra le due configurazioni testate in laboratorio, analizzando i grafici che riportano i valori del coefficiente di riflessione al variare del parametro adimensionale kh , funzione del periodo di picco (vedi Figura 6.5).

Si osserva in particolare che la prima configurazione, proposta in fase di gara, assume dei coefficienti di riflessione che variano in un ampio range, ossia tra 0,21 e 0,58. I valori più elevati dei coefficienti di riflessione, maggiori di 0,5, si hanno per periodi di picco superiori a 9 s. Al contrario, per periodi minori di 5 s il coefficiente di riflessione è sempre inferiore a 0,4.

La Configurazione 2, corrispondente alla banchina su pali e palancole con sottostante camera assorbente con scogliera di pendenza 3/1, assume dei valori più uniformi del coefficiente di riflessione al variare del periodo di picco delle onde. Il massimo coefficiente di riflessione calcolato è pari a 0,44 e viene raggiunto per condizioni ondose con periodo di picco compreso tra 5,9 e 7,2 s. Tale uniformità di comportamento è da attribuirsi verosimilmente alla scabrezza aggiuntiva della parete introdotta dalla presenza delle palancole. Un simile risultato era stato ottenuto da Bosco et al. (2014).

Dalla analisi comparativa dei risultati ottenuti nelle due configurazioni (vedere Figura 6.5) si nota che in entrambi i casi il coefficiente di riflessione si aggira mediamente su un valore di poco inferiore a 0,4, con scarti, sostanzialmente giustificabili con gli errori di misura connessi alla metodologia adottata. Gli errori sono stati propagati, a partire dalle misure della elevazione di superficie, sulla base della formulazione proposta da Longo e Petti (2006), ottenendo che l'errore medio sulla stima del parametro K_r è pari a 0,1. Ne deriva che le due soluzioni progettuali possono ragionevolmente definirsi equivalenti dal punto di vista del fenomeno della riflessione. Ciò è tanto più vero per valori del parametro adimensionale kh maggiori di 1, corrispondenti a periodi di picco minori di 1,3 s (8,7 s in scala di prototipo). Per valori maggiori del periodo di picco si ha che la configurazione n.2, corrispondente alla

nuova soluzione elaborata in fase di progettazione esecutiva, è leggermente migliorativa ai fini della minimizzazione della riflessione delle onde.

Per quanto riguarda la tracimazione, si rileva che non si sono osservati valori misurabili della portata tracimata, che dunque è assente per entrambe le configurazioni studiate.

Con riferimento ai massi della scogliera da impiegare al disotto del piazzale, durante gli esperimenti in laboratorio non è stata osservata alcuna instabilità della scogliera. Tale osservazione induce a confermare la correttezza del dimensionamento degli scogli in entrambe le soluzioni studiate in laboratorio.

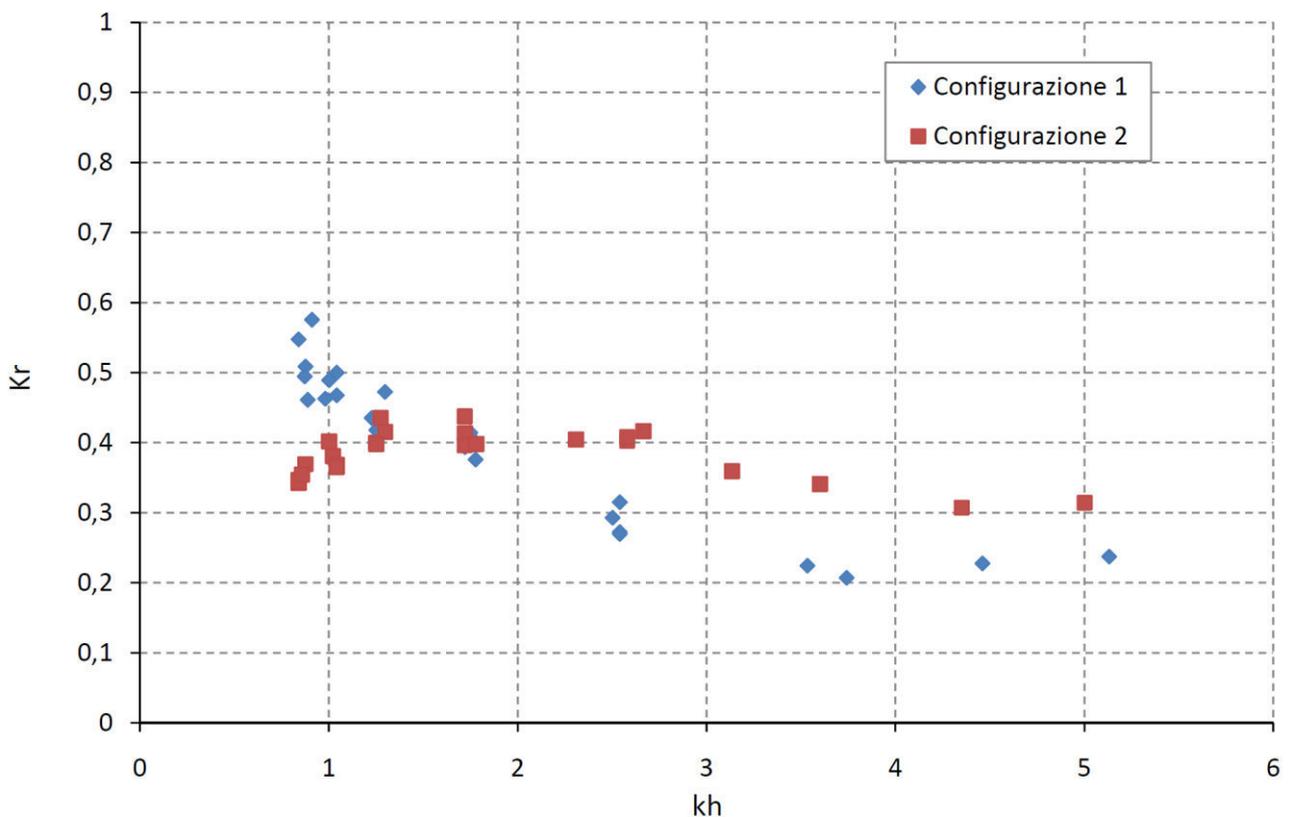


Figura 6.5 Confronto grafico tra l'andamento dei coefficienti di riflessione ottenuti per la Configurazione 1 (proposta in fase di gara) con quelli ottenuti per la Configurazione 2 (elaborata in fase di progettazione esecutiva).

7 Conclusioni

Nell'ambito della convenzione tra la società SIGMA Ingegneria s.r.l. e il Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Catania è stato condotto uno studio sperimentale volto a verificare sotto il profilo idraulico-marittimo gli effetti sulla agitazione ondosa della soluzione proposta nell'ambito della progettazione esecutiva dei "Lavori del primo stralcio e del secondo stralcio della terza fase del porto commerciale di Augusta Banchine Containers". Tale soluzione, in particolare, è caratterizzata dalla presenza di palancole e di una camera assorbente con scogli (300÷500 kg) disposti con scarpata di pendenza 3/1.

Le indagini sperimentali condotte su modello fisico hanno avuto come obiettivo la verifica delle capacità antiriflettenti della nuova soluzione proposta, comparandole con la configurazione offerta in fase di gara: banchina a giorno su pali con sottostante scarpata antirisacca con pendenza 4/3. La campagna sperimentale è stata condotta nella vasca con ondogeno in dotazione al Laboratorio di Idraulica del Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Catania.

Il modello fisico è stato realizzato all'interno della vasca adottando una scala geometrica di riduzione pari a 1:45, rispettando il criterio di similitudine di Froude.

Sono state riprodotte due diverse configurazioni della banchina di riva corrispondenti alle sopra citate soluzioni progettuali ossia quella posta a base di gara e quella da progetto esecutivo. Complessivamente sono state condotte 50 prove (25 per ogni configurazione).

Le due configurazioni hanno permesso di verificare l'effetto delle differenti geometrie sul fenomeno della riflessione delle onde riscontrabili nella rada di Augusta. A questo riguardo è opportuno precisare che si è scelto di utilizzare un ampio range di condizioni ondose, al fine di ottenere dei risultati parametrici che possano risultare validi al variare di tutte le possibili condizioni ondose effettivamente riscontrabili nella rada. E' stata inoltre monitorata la tracimabilità della banchina di riva, che è risultata assente in entrambe le configurazioni studiate.

Il coefficiente di riflessione è stato valutato mediante l'applicazione del metodo delle tre sonde (Mansard e Funke, 1980 modificato da Faraci et al., 2014), consistente nell'elaborazione e acquisizione di dati forniti da tre sonde accoppiate e posizionate a circa una lunghezza d'onda dal modello fisico in grado di misurare le altezze d'onda incidente e riflessa e quindi lo stesso coefficiente di riflessione.

La struttura è stata sollecitata da onde random (con spettro Jonswap o TMA in funzione delle caratteristiche del moto ondoso); il range di altezze d'onda significativa considerato è stato: 0,18 m ÷ 1,35 m (a scala di prototipo); il range dei periodi di picco è stato: 3,4 s ÷ 10,1 s (a scala di prototipo). Si precisa che, sebbene non tutte le condizioni di moto ondoso adottate potranno realizzarsi nella rada con elevate probabilità, esse hanno tuttavia permesso di definire in maniera completa le caratteristiche antiriflettenti della struttura.

I risultati sperimentali ottenuti mostrano come entrambe le configurazioni della banchina di riva esaminate presentino, in generale, caratteristiche di antiriflessione soddisfacenti. Infatti, il valore del coefficiente di riflessione si mantiene generalmente inferiore a 0,5, tranne che per alcuni casi della Configurazione 1 (banchina su pali a giorno, offerta in sede di progetto definitivo) in presenza di onde più lunghe.

È possibile effettuare un confronto complessivo tra le due configurazioni testate in laboratorio, analizzando i grafici che riportano i valori del coefficiente di riflessione al variare del parametro adimensionale kh , funzione del periodo di picco (vedi Figura 6.5).

Si osserva, in particolare, che la prima configurazione, proposta in fase di gara, assume dei coefficienti di riflessione che variano in un ampio range, ossia tra 0,21 e 0,58. I valori più elevati dei coefficienti di riflessione, maggiori di 0,5, si hanno per periodi di picco superiori a 9 s. Al contrario, per periodi minori di 5 s il coefficiente di riflessione è sempre inferiore a 0,4.

La Configurazione 2, corrispondente alla banchina su pali e palancole con sottostante camera assorbente con scogliera di pendenza 3/1, assume dei valori più uniformi del coefficiente di riflessione al variare del periodo di picco delle onde. Il massimo coefficiente di riflessione calcolato è pari a 0,44 e viene raggiunto per condizioni ondose con periodo di picco compreso tra 5,9 e 7,2 s. Tale uniformità di comportamento è da attribuirsi, verosimilmente, alla scabrezza aggiuntiva della parete introdotta dalla presenza delle palancole.

Dalla analisi comparativa dei risultati ottenuti nelle due configurazioni (vedere Figura 6.5) si nota che in entrambi i casi il coefficiente di riflessione si aggira mediamente su un valore di poco inferiore a 0,4, con scarti sostanzialmente giustificabili anche con gli errori di misura connessi alla metodologia adottata. Ne deriva che le due soluzioni progettuali possono ragionevolmente definirsi equivalenti dal punto di vista del fenomeno della riflessione. Ciò è tanto più vero per valori del parametro adimensionale kh maggiori di 1, corrispondenti a periodi di picco minori di

1,3 s (8,7 s in scala di prototipo). Per valori maggiori del periodo di picco si ha che la configurazione n.2, corrispondente alla nuova soluzione elaborata in fase di progettazione esecutiva, è leggermente migliorativa ai fini della minimizzazione della riflessione delle onde.

Con tutto quanto sopra riportato si ritiene di avere assolto agli obblighi del mandato ricevuto tramite convenzione.

Si resta comunque a disposizione per eventuali ulteriori chiarimenti.

Bibliografia

- Allsop, N.W.H. (1995) Vertical walls and breakwaters: optimization to improve vessel safety and wave disturbance by reducing wave reflections. Ch.10 in Wave forces on inclined and vertical wall structures. Ed. Kobayashi N. & Demirbilek Z., ASCE, New York.
- Battjes, J. A. (1974). Surf similarity. *Proc. 14th Coastal Engineering Conference (ASCE)*, pp. 466-480.
- Brossard, J., Jarno-Druaux, A., Marin, F., Tabet-Aoul, E. H. (2003). Fixed absorbing semi-immersed breakwater. *Coastal Engineering*, 49, pp. 25-41.
- Boccotti, P. (2000) Wave mechanics for ocean engineering. Elsevier Oceanographic Series, n. 64.
- Bosco, C., Musumeci, R.E., Indelicato, G., Foti, E., (2014). A new sheet pile berth for controlling wave reflection within ports located in seismic areas, 3rd IAHR Europe Congress, Porto, Portugal.
- Cavallaro, L., Faraci, C., Foti, E., Musumeci R.E., Scandura, P. (2007) An experimental comparative analysis on wave reflection of two types of caissons. Coastal Structures 2007, Venezia, 2-4 Luglio 2007
- Coastal Engineering Manual (2003). U.S. Corps of Engineers.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., (1992). Water wave mechanics for engineers and scientist. World Scientific.
- Fan, Q. (1988). Separation of time series on incident and reflected waves in model test with irregular waves. *China Ocean Engineering*, 2(4), pp. 45-60.
- Faraci, C., Cammaroto, B., Cavallaro, L., Foti, E. (2012). Wave reflection generated by caissons with internal rubble mound of variable slope. 33rd International Conference on Coastal Engineering. ICCE 2012, Santander, Spain 1-6 July 2012.
- Faraci, C., Scandura, P., Foti, E. (2014). Reflection of Sea Waves by Combined Caissons. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000275 , 04014036.
- Fugazza, M., Natale, L. (1992). Hydraulic performance of perforated breakwater. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 118, pp. 1-14.
- Goda, Y., Suzuki, Y., (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Proc. 15th Int. Coastal Engineering Conference (ASCE)*, 828-845.

- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific.
- Hughes, S. A. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. World Scientific.
- Isaacson, M. (1991). Measurement of regular wave reflection. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 117, pp. 553-569.
- Jarlan, G. E. (1961). A perforated vertical wall breakwater. *DockHarbour Auth. XII*, 486, pp. 394-398.
- Kakuno, S., Oda, K, Liu, P.L.-F. (1992). Scattering of water waves by vertical cylinders with a back wall. *Proc. 23rd Coastal Engineering Conference*, 2, pp. 1258-1271.
- Kondo, H. (1979). Analysis of breakwaters having two porous walls. *Proc. Coastal Structures '79*, 2, pp. 962-977.
- Longo, S., Petti, M. (2006). *Misure e controlli idraulici*. McGraw-Hill.
- Mansard, E. P. D., Funke, E. R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least square method. *Proc. 17th Int. Coastal Engineering Conference*, 1, pp. 154-172.
- Marks, M., Jarlan, G. E. (1968). Experimental study on a fixed perforated breakwater. *Proc. 11th Coastal Engineering Conference (ASCE)*, 3, pp. 1121-1140.
- Miche, A., 1951. Pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposés à l'action de houle. *Annales des Ponts et Chaussées*, 121, 285-319.
- Postma, G. M. (1989). Wave reflection from rock slopes under random wave attack. MSc. Thesis, DelftUniversity of Technology.
- Seeling, W.N., 1983. Wave reflection from coastal structures. *Proceedings of Coastal Structures '83*, ASCE, 961-973.
- Seeling, W.N., Ahrens, J.P., 1981. Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments, and breakwaters. Technical Paper no. 81-1, *U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Center, Fort Belvoir, Virginia*.
- Suh., K. D., Choi, J. C., Kim, B. H., Park, W. S., Lee, K. S. (2001). Reflection of irregular waves from perforated-wall caisson breakwaters. *Coastal Engineering*, 44, pp. 141-151.
- Suh, K. D., Park, W. S. (1995). Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters. *Coastal Engineering*, 26, pp. 177-193.
- Sunamura, T., Okazaki, S. (1996). Breaker types and wave reflection coefficient: laboratory relationships. *J. Coastal Res.*, 12 (1), pp. 240-245.

- Takahashi, A., Yasuo, K., Fujiwara, R. Isobe, M. (2002). Performance evaluation of perforated-wall caissons by VOF numerical simulations. *Proc. 29th Int. Coastal Engineering Conference (ASCE)*, pp. 1364-1376.
- Terret, F. L., Osorio, J. D. C., Lean G. H. (1968). Model studies of a perforated breakwater. *Proc. 11th Coastal Engineering Conference (ASCE)*, 3, pp. 1104-1120.
- Thorton, E. B., Calhoun, R. J., (1972). Spectral resolution of breakwater reflected waves". *Proc. ASCE 98 (WW4)*, pp. 443-460.
- Van der Meer, J. (1988). Rock Slopes and GravelBeaches Under Wave Attack. Delft Hydraulics Laboratory, Ph.D. Dissertation.

Elenco dei simboli

- a_i ampiezza dell'onda incidente [m];
 a_r ampiezza dell'onda riflessa [m];
 f_{max} limite superiore del campo delle frequenze [Hz];
 f_{min} limite inferiore del campo delle frequenze [Hz];
 g accelerazione di gravità [m/s²];
 g_{mm} parametro di forma;
 h profondità dell'acqua [m];
 k numero d'onda [m⁻¹];
 k_s coefficiente di shoaling;
 p_s pressione caratteristica [Pa];
 x coordinata orizzontale in direzione cross-shore [m];
 B larghezza della banchina [m];
 Dir direzione d'attacco del moto ondoso [°N];
 Eul numero di Eulero;
 F_i forza d'inerzia [N];
 F_g forza di gravità [N];
 F_μ forza viscosa [N];
 F_σ forza dovuta alla tensione superficiale [N];
 F_e forza elastica [N];
 F_{pr} forza di pressione [N];
 Fr numero di Froude;
 H altezza d'onda [m];
 H_0 altezza in acque profonde [m];
 H_i altezza d'onda incidente [m];
 H_r altezza d'onda riflessa [m];
 H_s altezza d'onda significativa [m];
 K_r coefficiente di riflessione;
 I_i periodogramma dell'onda incidente;
 I_r periodogramma dell'onda riflessa;

L lunghezza d'onda [m];
 L_{max} lunghezza d'onda associata al limite superiore della frequenza [m];
 L_{min} lunghezza d'onda associata al limite inferiore della frequenza [m];
 N_{Fr} rapporti tra i numeri di Froude del prototipo e del modello;
 N_g rapporti tra l'accelerazione gravitazionale del prototipo e del modello;
 N_L rapporti tra le lunghezze del prototipo e del modello;
 N_t rapporti tra i tempi del prototipo e del modello;
 N_v rapporti tra le velocità del prototipo e del modello;
 N_{wa} rapporti tra i volumi del prototipo e del modello;
 N_ρ rapporto tra le densità del prototipo e del modello;
 Re numero di Reynolds;
 S_i densità spettrale dell'onda incidente;
 S_r densità spettrale dell'onda riflessa;
 St numero di Strouhal;
 T periodo di picco del moto ondoso [s];
 T_R tempo di ritorno [anni];
 V_s velocità caratteristica in direzione orizzontale [m/s];
 V_w velocità dell'acqua in prossimità dello strato di copertura [m/s];
 W_s velocità caratteristica in direzione verticale [m/s];
 X_s lunghezza caratteristica in direzione orizzontale [m];
 Z_s lunghezza caratteristica in direzione verticale [m];
 β angolo d'inclinazione dell'onda incidente [°];
 ε_i sfasamento dell'onda incidente;
 ε_r sfasamento dell'onda riflessa;
 η coefficiente di viscosità dinamica dell'acqua in prossimità della diga [Ns/m²];
 η_i sopraelevazione del pelo libero incidente [m];
 η_r sopraelevazione del pelo libero riflessa [m];
 $\bar{\eta}$ variazione media del livello idrico [m];
 θ angolo di attacco del moto ondoso [°];
 θ_L angolo limite di una parete inclinata riflettente [°];
 ν viscosità cinematica [m²/s];

- ρ_w densità di massa dell'acqua in prossimità della banchina [kg/m^3];
- φ_i fase angolare dell'onda incidente;
- φ_r fase angolare dell'onda riflessa;
- ω frequenza angolare [s^{-1}].

Indice delle Figure

Figura 1.1	Vista aerea del porto di Augusta con indicazione dell'area di intervento (fonte Googlemaps – Settembre 2011).	5
Figura 1.2	Dettaglio dell' area di intervento con indicazione dei lavori della terza fase del porto commerciale di Augusta: Banchine Containers.....	6
Figura 1.3	Sezione tipo delle banchine previste nel progetto definitivo, posto a base di gara, del secondo stralcio della terza fase del Porto Commerciale di Augusta.	7
Figura 1.4	Sezione tipo della soluzione migliorativa per le banchine proposte in fase di gara per il secondo stralcio della terza fase del Porto Commerciale di Augusta.	8
Figura 1.5	Pianta della banchina di riva su pali e palancole, proposta in sede di progetto esecutivo.....	9
Figura 1.6	Vista frontale della banchina di riva su pali e palancole, proposta in sede di progetto esecutivo.....	10
Figura 1.7	Sezione trasversale della banchina di riva su pali e palancole, sezione D-D di Figura 1.5, proposta in sede di progetto esecutivo.	11
Figura 2.1	Schematizzazione del problema della riflessione di un'onda che incide su di un ostacolo verticale.....	14
Figura 2.2	Rappresentazione del profilo dell'onda all'istante $t=0$	15
Figura 2.3	Rappresentazione del profilo dell'onda e del campo di velocità all'istante $t=T/4$	16
Figura 2.4	Rappresentazione del profilo dell'onda e del campo di velocità all'istante $t=T/2$	17
Figura 2.5	Andamento in acque profonde, intermedie e basse del percorso seguito dalle particelle; (a) andamento in acque profonde, intermedie e basse delle linee di corrente (b) (Dean e Dalrymple, 1992).	18
Figura 2.6	Schema adottato per lo studio della riflessione provocata da una parete impermeabile inclinata.	19
Figura 2.7	Andamento dell'angolo limite per cui si realizza una riflessione totale dovuta ad una parete inclinata.	20

Figura 2.8	Definizione dei coefficienti di permeabilità utilizzati nella formula di Postma (1989) sulla base dei risultati sperimentali di Van der Meer (1988) (Coastal Engineering Manual, 2003).	24
Figura 2.9	Schema di banchina realizzata con cassoni cellulari forati a doppia camera.	25
Figura 2.10	Coefficiente di riflessione in funzione del rapporto B/L (Allsop, 1995).	25
Figura 3.1	Coefficiente di riflessione K_R in funzione del periodo delle onde, mediante il parametro $2\pi(n_2-n_1)/(MT)$; comparazione tra i metodi delle 2, 3 e 4 sonde.	31
Figura 5.1	Vista panoramica della vasca con ondogeno in dotazione al Laboratorio di Idraulica dell'Università di Catania.....	46
Figura 5.2	Planimetria e sezione trasversale della configurazione originale della vasca di sperimentazione.	46
Figura 5.3	Vasca di sperimentazione per la modellazione fisica delle nuove banchine del porto commerciale di Augusta: planimetria e sezione trasversale della configurazione della vasca parzializzata e ubicazione del modello fisico. .	47
Figura 5.4	Interfaccia del software "jwg.exe" per la generazione delle onde irregolari.	49
Figura 5.5	Componenti del sistema di generazione delle onde irregolari: a) Toughbook Panasonic dotato di software di controllo "jwg.exe"; b) trasformazione del segnale digitale in segnale analogico mediante la scheda NI-9162; c) quadro di controllo; d) paratoia a ventola per la generazione del moto ondoso.	50
Figura 5.6	Sezioni tipo del modello della banchina a giorno realizzato in scala 1:45 (rif. progetto definitivo).	52
Figura 5.7	Sezioni tipo del modello della banchina a giorno su pali e palancole realizzato in scala 1:45 (rif. progetto esecutivo).....	53
Figura 5.8	Banchina a giorno: (a) particolare del sistema di avvituamento del palo cilindrico; (b) fissaggio dei pali alla struttura fissa; (c) e (d) vista della struttura posta in opera.	54
Figura 5.9	Banchina a giorno: (a) setacciatura manuale dei massi; (b) nucleo in marmo calcareo; (c) vista dall'alto durante la fase di realizzazione della mantellata; (d) mantellata in basalto con pendenza 4:3.....	56

Figura 5.10	Banchina a giorno: (a) particolare delle travi nell'intradosso della copertura; (b) vista del modello della banchina a giorno messa in opera all'interno del canale di simulazione.....	57
Figura 5.11	Banchina su pali e palancole: vista frontale e laterale della struttura in acciaio.	57
Figura 5.12	Banchina su pali e palancole: (a) vista della struttura del modello in opera; (b) riempimento in marmo calcareo; (c) particolare della scogliera interna con pendenza 3:1; (d) vista frontale del modello.....	59
Figura 5.13	Banchina su pali e palancole: (a) particolare della scogliera interna alla camera assorbente; (b) vista del modello della banchina su pali e palancole messa in opera all'interno del canale di simulazione.	60
Figura 5.14	Schema raffigurante la disposizione delle sonde resistive di livello (S1, S2, S3, S4) rispetto al modello fisico della banchina	60
Figura 5.15	Sonde di livello: (a) vista delle tre sonde resistive per la stima del coefficiente di riflessione; (b) scheda d'acquisizione scheda d'acquisizione National Instrument (NIUSB 6008); (c) vista della quarta sonda resistiva e della sonda acustica; (d) sonda acustica.	61
Figura 5.16	Vista e particolare delle due videocamere Sony HDR-CX410VE, con caratteristiche: Full HD, obiettivo G grandangolare con zoom ottico 30x, sensore CMOS Exmor R, stabilizzatore ottico SteadyShot, GPS integrato.	62
Figura 5.17	Sistema per l'acquisizione della portata tracimata: (a) contenitore di raccolta della portata tracimata (32x48 cm) e scivolo in acciaio per l'incanalamento dell'acqua all'interno della stessa vaschetta; (b) boccale graduato (1000 ml) usato per la misura del volume d'acqua tracimato in un intervallo di tempo predefinito.....	63
Figura 6.1	Configurazione 1 (Gara): schematizzazione della banchina di riva a scala di modello.	67
Figura 6.2	Andamento dei coefficienti di riflessione in funzione del parametro kh per onde random per la Configurazione 1 (Gara).	70
Figura 6.3	Configurazione 2 (Esecutivo): schematizzazione del cassone a scala di modello.....	72
Figura 6.4	Andamento dei coefficienti di riflessione in funzione del periodo di picco dell'onda per onde random per la Configurazione 2 (Progetto Esecutivo).	75

Figura 6.5 Confronto grafico tra l'andamento dei coefficienti di riflessione ottenuti per la Configurazione 1 (proposta in fase di gara) con quelli ottenuti per la Configurazione 2 (elaborata in fase di progettazione esecutiva).77

Indice delle Tabelle

Tabella 2.I Valori del coefficiente d'attrito consigliati per "correggere" il coefficiente di riflessione.	21
Tabella 2.II Tipo di frangimento in funzione del parametro di Iribarren (Okazaki e Sunamura, 1991).....	22
Tabella 5.I Valutazione del numero di stabilità secondo il metodo di Hudson et al. (1979) per i sedimenti di basalto e di marmo.....	55
Tabella 5.II Peso dei massi naturali, a scala di modello, della scogliera interna alla banchina a giorno su pali, ottenuti mediante la similitudine del numero di stabilità.....	55
Tabella 5.III Dimensioni dei massi naturali, a scala di modello, della scogliera interna alla banchina a giorno su pali.....	56
Tabella 5.IV Peso dei massi naturali, a scala di modello, della scogliera interna della banchina su pali e palanconle, ottenuti mediante la similitudine del numero di stabilità.	58
Tabella 5.V Dimensioni dei massi naturali, a scala di modello, della scogliera interna della banchina su pali e palanconle.	58
Tabella 6.I Dati di input al software di controllo del battitore utilizzati per le prove sperimentali condotte.	65
Tabella 6.II Configurazione 1: grandezze stimate a scala di modello.	68
Tabella 6.III Configurazione 1: grandezze stimate a scala di prototipo.	69
Tabella 6.IV Configurazione 2: grandezze stimate a scala di modello.	73
Tabella 6.V Configurazione 2: grandezze stimate a scala di prototipo.	74

Appendice A - Schede degli esperimenti condotti

Vengono di seguito riportati i risultati delle singole prove eseguite sulle due configurazioni della banchina di riva: le prove da G_001 a G_025 corrispondono alla Configurazione 1, proposta in fase di gara; le prove da E_001 a E_025 sono relative alla Configurazione 2, proposta nell'ambito della progettazione esecutiva.

Per ogni singola prova è stata predisposta una tavola contenente i parametri del moto ondoso incidente e riflesso stimati a scala di modello e di prototipo, viene infine riportato il coefficiente di riflessione K_r risultante.

Per ogni prova vengono inoltre mostrati i grafici delle elevazioni di superficie (η), misurate nelle quattro sonde posizionate lungo il canale. Le sonde hanno numerazione crescente a partire da quella più vicina alla banchina e procedendo verso il battitore. Sulla base delle registrazioni della elevazione di superficie sono stati ottenuti gli spettri del moto ondoso incidente e riflesso, mediante la trasformata in serie di Fourier sul segnale misurato e la applicazione del metodo delle tre sonde. Il risultato di tale procedura può essere rappresentato nel cosiddetto spettro "a righe" in cui si riporta, per ogni settore di frequenza angolare $\delta\omega$ (avente valore medio $\omega_i = 2\pi/T_i$), un segmento proporzionale al quadrato della ampiezza dell' onda a_i corrispondente a ω_i .

Sulla base dello spettro fornito dal metodo delle tre sonde può essere ottenuto lo spettro "continuo" $E(\omega)$, definito come

$$E(\omega)\delta\omega \equiv \sum_i \frac{1}{2} a_i^2 \quad \text{per i t.c. } \omega - \delta\omega/2 < \omega_i < \omega + \delta\omega/2 \quad (\text{A.1})$$

Lo spettro continuo è stato ricavato sulla base della autocovarianza dello spettro a righe, secondo la procedura definita da Boccotti (2000). Ciascuno spettro è normalizzato rispetto al valore massimo dello spettro continuo dell'onda incidente. Nelle tavole allegate vengono riportati gli spettri (continui e a righe) delle onde incidenti e riflesse ottenuti per le singole prove.