

Indagine sperimentale per la ristrutturazione delle difese di Marina di Pisa

Pier Luigi Aminti¹ ed Enzo Pranzini²

¹Dipartimento di Ingegneria Civile - Università degli Studi di Firenze - Via S. Marta, 3 - 50139 Firenze

²Dipartimento di Scienze della Terra - Università degli Studi di Firenze - Via J. Nardi, 2 - 50132 Firenze

Riassunto

Nel presente lavoro vengono presentati i risultati di un modello fisico bidimensionale realizzato per valutare l'efficacia di un intervento di ristrutturazione delle difese di Marina di Pisa, ormai non più idonee alla protezione della strada litoranea. È stata presa in considerazione sia la riprofilatura delle scogliere parallele, innalzandone la quota di sommità dagli attuali 2.0 m circa agli originari 3.8 m, sia l'abbassamento delle stesse al livello del mare e l'assorbimento dell'energia incidente a riva da parte di una spiaggia in ghiaia.

I risultati dello studio dimostrano che quest'ultima soluzione è altrettanto efficace della prima in termini di limitazione della tracimazione sulla strada litoranea, mentre è certamente più vantaggiosa per una utilizzazione turistica del litorale. Le prove hanno inoltre dimostrato una grande stabilità della spiaggia in ghiaia, anche nell'ipotesi di un abbassamento del profilo della spiaggia sommersa sabbiosa nella zona protetta.

Abstract

The present paper shows the results obtained through a physical bi-dimensional model performed to evaluate the efficiency of a restructuration work planned on the structures protecting Marina di Pisa, which are no more able to defend the coastal road. Reshaping of the breakwater has been considered, raising its level from the present 2.4 m to the original 3.8 m. However, its lowering to the sea level has been also tested, together with the absorption of the incident energy with a gravel beach. As far as overtopping is concerned, the latter solution proved to be as efficient as the former one. In addition, it is more profitable since it produces a 30 meters wide beach, which can be used for tourism. Our tests proved great stability of gravel beaches, also in the case of a beach profile lowering.

Introduzione

Dopo una fase di rapido accrescimento, durata approssimativamente dal XIII sec. alla metà del XIX sec., il delta dell'Arno è stato interessato da una forte erosione, iniziata sull'apice deltizio e propagatasi successivamente alle spiagge laterali (Pranzini, 1989). Sul lobo settentrionale, in assenza di centri abitati, la linea di riva è stata lasciata libera di arretrare, tanto che negli ultimi 150 anni si è avuta una erosione di circa 1300 metri. Sul lobo meridionale, al contrario, è stato necessario difendere l'abitato di Marina di Pisa e la viabilità litoranea, cosa che ha comportato la costruzione, nel tempo, di opere diverse, fino al raggiungimento della configurazione attuale basata su di una scogliera radente continua e su 10 scogliere parallele, poste alla distanza di 80 - 100 m da riva, interrotte da varchi di circa 20 m in corrispondenza dei quali sono state costruite barriere sommerse (Fig.1). Vi sono inoltre alcune scogliere ortogonali che collegano la radente alla parallela, tanto che l'insieme delle protezioni dei 2.5 km di costa sui quali insiste l'abitato è superiore a 2 Km di scogliere per chilometro di litorale.

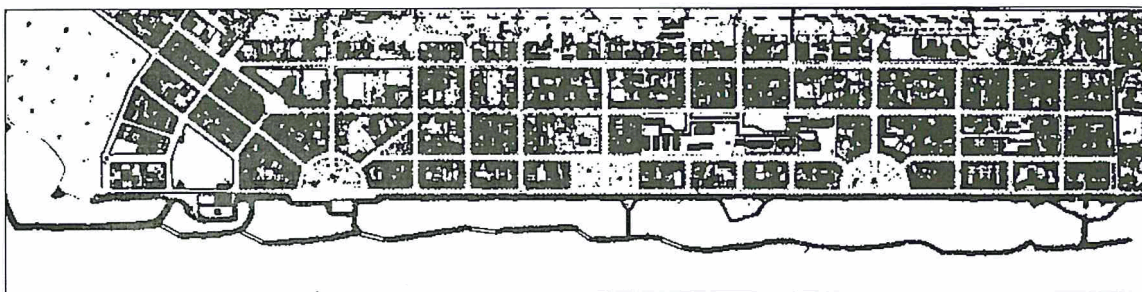


Figura 1a - Configurazione delle opere di difesa di Marina di Pisa (scogliere emerse in nero e sommerse in bianco).



Figura 1b - Vista delle opere di difesa nel tratto centrale dell'abitato di Marina di Pisa.

L'insieme di queste opere ha certamente evitato ogni ulteriore arretramento della linea di riva, ma non ha permesso la conservazione della spiaggia che costituiva la risorsa fondamentale di Marina di Pisa.

Le scogliere, inoltre, non hanno impedito, ma anzi hanno favorito l'approfondimento dei fondali antistanti, tanto che ai loro piedi, sul lato esterno, si hanno profondità che superano anche i 7 metri (Fig. 2). Ciò ha causato un incremento delle azioni del moto ondoso sulle scogliere stesse e la necessità di costosi interventi di manutenzione, consistenti nella loro riprofilatura con massi sempre più grandi.

Le metodologie di difesa oggi disponibili sono assai più evolute rispetto a quelle adottate fin dalla fine del secolo scorso e consentono la protezione del litorale con una utilizzazione più contenuta di difese rigide e mantenendo una buona fruibilità delle spiagge. Anche il ritorno a condizioni più

naturali, con il progressivo smantellamento delle strutture rigide esistenti e la costituzione di una nuova interfaccia terra-mare, basata sul ripascimento artificiale, sembra oggi un obiettivo raggiungibile.

Il ripascimento artificiale con materiali più grossolani (ghiaia) permetterebbe di risolvere alcuni dei problemi che limitano l'impiego dei ripascimenti artificiali, in quanto la maggiore stabilità di questi sedimenti riduce la frequenza e quindi il costo di manutenzione. Inoltre la buona disponibilità di questo materiale, dovuta anche alla possibilità di ottenerlo per frantumazione di elementi di maggior dimensione, risolve in molti casi il problema dell'approvvigionamento con il risultato di una sensibile riduzione dei costi.

La risposta di una spiaggia in ghiaia alla sollecitazione di un determinato stato di mare è stata intensamente studiata con un programma di prove in canale nel laboratorio di Delft Hydraulics (da van Hijum, 1982; van Hijum e Pilarczyk, 1982; Pilarczyk e de Boer, 1983; van der Meer, 1988). In modo sostanzialmente analogo è stata condotta un'analisi sperimentale anche nel laboratorio di Wallingford (Powell, 1990). Entrambe le sperimentazioni hanno portato alla formulazione di modelli parametrici dei profili di equilibrio delle spiagge. Esistono anche modelli numerici che permettono lo studio del profilo trasversale in condizioni bidimensionali (CIRIA CUR, 1983).

Va notato che sono stati studiati profili costituiti da sola ghiaia, estesi fino a raggiungere una profondità tale da non subire modifiche al piede ed emergenti fino oltre il limite di run-up, sottoposti ad attacchi di onde di altezza non limitata dal frangimento al largo. Non è ben chiaro il comportamento di una spiaggia in ghiaia posta su un fondale relativamente basso e non si conoscono le interazioni fra la spiaggia artificiale in ghiaia ed il fondo in sabbia.

Un'indagine sperimentale su spiagge in ghiaia protette da barriere parallele segmentate, in presenza di forti escursioni di marea e di un forte trasporto lungo riva, è stata eseguita da Coates e Dodd (1994). L'analisi eseguita fornisce comunque solo informazioni utili per il progetto di barriere posizionate allo scopo di ridurre il trasporto lungo riva.

In Italia sono state eseguite alcune indagini sperimentali, talvolta di supporto alla progettazione di interventi specifici, dove è stata studiata l'evoluzione di profili di spiaggia in sabbia protetta con materiali più grossolani riportati artificialmente (Aminti, 1988; De Santis e Ruol, 1988). Sebbene le indagini sperimentali abbiano evidenziato i vantaggi, in termini di stabilità, dei ripascimenti in ghiaia, le realizzazioni sono state assai limitate e, anche se hanno raggiunto risultati positivi (Berriolo, 1999; Pacini et al., 1999), sono state comunque effettuate in contesti assai diversi da quelli qui analizzati.

Nel presente lavoro viene illustrata un'indagine sperimentale, eseguita su modello fisico bidimensionale, in cui si evidenzia l'efficacia di una spiaggia artificiale in ghiaia per la protezione di un tratto del litorale di Marina di Pisa, attualmente protetto da scogliere parallele e radenti, collegate da alcuni pennelli.

Indagine sperimentale

Geometria del modello

Le scogliere di protezione, nel tratto studiato, sono state costruite alla distanza di circa 90 m dalla strada litoranea di Marina di Pisa, hanno una lunghezza di 200 - 270 m e varchi di circa 10 m, la cui profondità non supera i 3 m per la presenza di una soglia sommersa. Il tratto di costa è stato rilevato nel 1997 con sezioni ortogonali alla riva distanziate di 50 m fino a raggiungere la profondità di 10 m.

La spiaggia sommersa, fra la scogliera radente e quella parallela, ha una profondità di circa 2 metri, mentre all'esterno si superano immediatamente i 7 metri di fondale (Fig. 2). Verso il largo il profilo della spiaggia è molto regolare e presenta solo una debole convessità la cui sommità è a circa 120 m dalla scogliera parallela, che indica l'allontanamento da riva del flusso sedimentario, dovuto proprio alla presenza delle difese rigide. Oltre questo punto il fondale degrada dolcemente, con una pendenza media dello 0.4% fino alla profondità scandagliata.

Non si dispone di rilievi dettagliati del periodo di costruzione delle scogliere, ma è certo che esse furono poste su di un fondale di circa 4 m. D'altra parte, dove ora corre l'isobata dei 10 m, nei rilievi I.I.M. del 1881 vi era l'isobata dei 5 m.

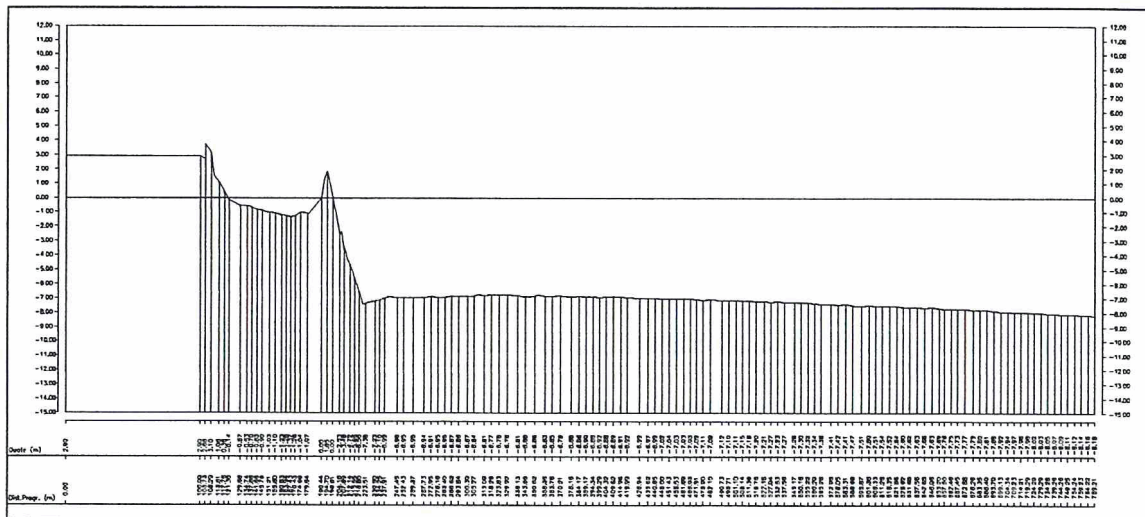


Figura 2 - Profilo di spiaggia antistante Marina di Pisa e riprodotto in modello (esagerazione verticale 1:10).

Parametri influenti e scale del modello

In letteratura esistono numerosissimi studi in cui viene evidenziata l'importanza di utilizzare un elevato numero di parametri nella riproduzione su modello di profili di spiaggia, ma i criteri più utilizzati fanno riferimento alla conservazione del numero di Froude e del parametro di Dean (Dean, 1973; Gourlay, 1980; Vellinga, 1986) :

$$N_0 = \frac{H_0}{V \cdot T} \quad [1]$$

dove H_0 è l'altezza d'onda in acque profonde, T è il relativo periodo e V è la velocità di caduta dei sedimenti in acqua ferma. Questo parametro permette di incorporare in una stessa relazione le dimensioni del materiale e la sua densità. Indicando con λ_x la scala di riduzione della grandezza x si ha che la conservazione di N_0 implica $\lambda_T = \lambda_d / \lambda_v$ mentre la conservazione del numero di Froude implica:

$$\lambda_T = \lambda_l / (\lambda_d)^{1/2} \quad [2]$$

dove con λ_l sono indicate le lunghezze orizzontali e con λ_d le verticali. Dalle due relazioni si ricava:

$$\lambda_l = (\lambda_d)^{3/2} / \lambda_v \quad [3]$$

Sulla base di questa ultima relazione sono possibili sia modelli distorti sia modelli con sedimenti di minore densità.

Per le spiagge in ghiaia è stato evidenziato, da ricerche svolte prevalentemente sulle spiagge inglesi (Powell, 1990; Coates e Dodd, 1994; Coates, 1994) che la buona riproduzione in modello della permeabilità dell'ammasso è una condizione necessaria per la fedele riproduzione della pendenza del profilo, ma questa condizione non è compatibile con la [3] se si usano sedimenti della stessa densità.

La spiaggia in ghiaia è stata riprodotta in due diversi modelli: nel primo caso è stata utilizzata sabbia grossa rispettando solo il vincolo imposto dalla riproduzione in scala della velocità di caduta, [1] mentre nel secondo è stato utilizzato PVC, riproducendo correttamente anche la porosità dell'ammasso, seguendo la procedura illustrata in dettaglio da Aminti (1998).

I risultati dei due modelli possono essere interpretati come due situazioni limite: il primo rappresenta il comportamento della spiaggia artificiale con un ridotto volume di vuoti e fornisce una stima per eccesso del livello di risalita delle onde e della tracimazione, mentre il secondo rappresenta la condizione di una spiaggia in ghiaia molto ben classata con un indice dei vuoti compreso fra 0,35 e 0,40 e quindi una condizione più favorevole per quanto riguarda il contenimento della risalita e della tracimazione.

Per la scelta del materiale di ripascimento o di costituzione di una spiaggia artificiale devono essere tenute in considerazione anche le caratteristiche di fruibilità dell'arenile. Per spiagge utilizzate a scopo turistico è sconsigliabile la presenza di elementi di dimensioni superiori a 30 mm, se non a costo di una forte penalizzazione da parte dell'utenza. Fissato quindi come diametro medio del materiale di ripascimento un valore di 16 mm, si è determinata la velocità di caduta con misure sperimentali. I valori misurati sono risultati nell'intervallo 0.5-0.6 m/s. Sono stati presi in esame sia materiali di forma molto spigolosa (provenienti da frantumazione) sia di forma arrotondata.

Date le caratteristiche dell'attrezzatura sperimentale, è stato realizzato il modello alla scala 1/25; i materiali di prototipo simulati ed il materiale utilizzato nel modello hanno le velocità di caduta determinate sperimentalmente, riportate nella Tabella 1.

Tabella 1 - Caratteristiche fisiche dei materiali di prototipo simulati e di quelli utilizzati nel modello.

| Materiale | Densità (g/cm ³) | Diametro in modello (mm) | Velocità di caduta modello (m/s) | Velocità di caduta scalata (m/s) | Peso medio modello 1 grano (g) | Diametro in prototipo (mm) |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------|---|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Sabbia | 2.65 | 1.20 | 0.12 | 0.60 | | 16 |
| PVC | 1.344 | 3.80 | 0.11 | 0.55 | 0.031 | 16 |

La velocità di caduta della sabbia del modello si colloca in un regime intermedio fra il regime di Stokes e quello di Newton, mentre quella del materiale della spiaggia artificiale è certamente nel campo newtoniano. Il diverso contributo delle forze viscosi in modello e in prototipo lascia prevedere non trascurabili effetti di scala, che si tradurranno in una maggiore mobilità dei sedimenti ed in una minore pendenza dei profili. Quest'ultimo fattore, unito alla minore permeabilità riprodotta nel modello, è la principale causa della sovrastima dei livelli di risalita e quindi di tracimazione.

Attrezzatura sperimentale e prove eseguite

Le prove sono state effettuate nel canale bidimensionale del laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze, avente una lunghezza di 50 m, una larghezza di 0.8 m ed una profondità di 0.8 m (Fig. 3).

La simulazione del moto ondoso è stata effettuata mediante un generatore ad attuazione oleodinamica, comandato da un sistema integrato di generazione/acquisizione. Il sistema, che utilizza un personale computer dotato di schede elettroniche A/D e D/A a 12 bit, oltre a permettere la generazione di una qualsiasi forma d'onda, incluse quelle random a spettro assegnato, permette la visualizzazione in tempo reale sia del segnale generato sia dei profili d'onda acquisiti da ciascuno dei punti di misura. Le prove sono state effettuate simulando attacchi ondosi di tipo irregolare, caratterizzati da spettri di tipo JONSWAP, ricercando, per ciascun attacco, lo spettro che riproducesse le caratteristiche d'onda incidente $H_{1/3}$ e $T_{1/3}$ riportate in Tabella 2.

La durata di ciascuna prova in modello è stata fissata in 45', rappresentativi di circa 4 ore reali secondo la similitudine di Froude; oltre alle misure di altezza d'onda è stato misurato il volume trascinato oltre la scogliera di protezione della strada con il raccogliitore raffigurato in Figura 3.

Il moto ondoso generato è stato misurato mediante cinque sonde, disposte a distanza variabile dalla pala meccanica del generatore d'onda e quindi a profondità d'acqua variabile, come indicato nella Figura 3.

Le registrazioni delle sonde 1 e 2 sono state analizzate col metodo zero crossing; le prime per il controllo della correttezza della generazione, mentre quelle della sonda 2 sono state utilizzate per definire le caratteristiche del moto ondoso incidente sulle opere.

I livelli rilevati dalle sonde, acquisiti con una frequenza di campionamento di 20 Hz, sono stati elaborati, oltre che nel dominio del tempo (analisi zero-up-crossing), anche in quello delle frequenze (analisi spettrale).

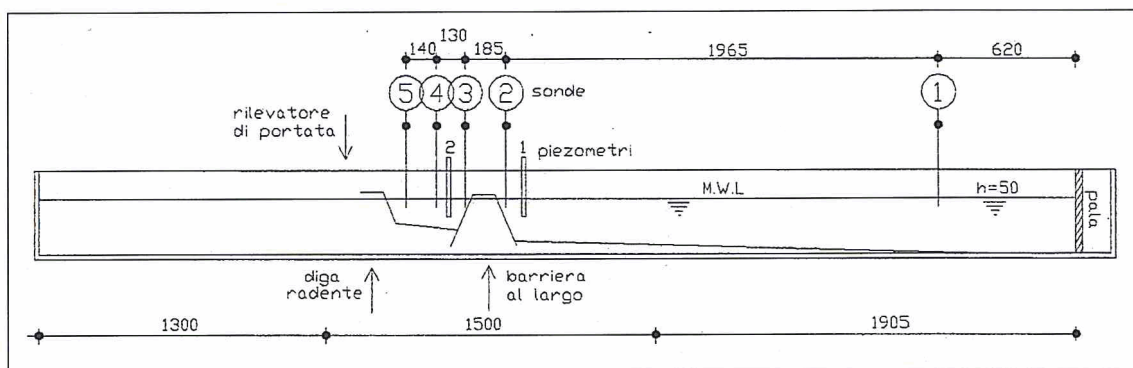


Figura 3 - Schema dell'attrezzatura sperimentale.

Tabella 2 - Caratteristiche d'onda. I pedici 1 e 2 indicano che i valori si riferiscono a misure effettuate, tramite le sonde, poste rispettivamente in corrispondenza della pala generatrice ed in prossimità della scogliera parallela (vedi Fig. 3).

| H_{0s} [m] | $(H_{1/3})_1$ [m] | $(H_{1/3})_2$ [m] | $(T_{1/3})_2$ [s] | $(H_{1/10})_2$ [m] |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 2.60 | 2.34 | 1.89 | 6.3 | 2.30 |
| 3.50 | 3.36 | 3.00 | 7.7 | 3.50 |
| 4.00 | 3.81 | 3.32 | 8.4 | 3.79 |
| 4.50 | 4.25 | 3.45 | 8.9 | 3.91 |
| 5.30 | 4.98 | 3.69 | 9.95 | 4.13 |

In Tabella 2 sono riportati i valori di altezza d'onda al largo H_{0s} , i valori alla profondità di 12.5 m corrispondenti alla profondità di generazione nel canale $(H_{1/3})_1$ e quelli in prossimità della scogliera alla profondità di 7 m $(H_{1/3})_2$. I valori osservati di $(H_{1/3})_2$ e di $(H_{1/10})_2$ indicano che le onde più alte frangono prima di raggiungere la scogliera.

Le registrazioni delle sonde 3, 4 e 5 sono state analizzate col metodo zero crossing per determinare il livello di agitazione nella zona protetta. Su queste registrazioni è stata eseguita anche una media di tutti i valori misurati, escludendo i primi 10 minuti di transitorio iniziale, per la determinazione del livello medio e quindi per la determinazione del sovrizzo a tergo della scogliera durante la mareggiata.

Configurazioni di prova

Per quanto riguarda le diverse configurazioni delle opere di protezione studiate, è stata presa in esame inizialmente la situazione attuale, i cui risultati sono stati assunti quale riferimento per un giudizio sull'efficienza delle diverse alternative proposte.

Le soluzioni proposte hanno preso in esame possibili modifiche sia sulla scogliera al largo sia sulla difesa radente (Fig. 4). Le prove sono state eseguite su sistemi di difesa ottenuti apportando modifiche sia alle opere radenti (R^*) sia alle scogliere al largo (L^*). Nel caso del suo abbassamento, si è prevista l'utilizzazione degli scogli in esubero per il consolidamento della sua base esterna.

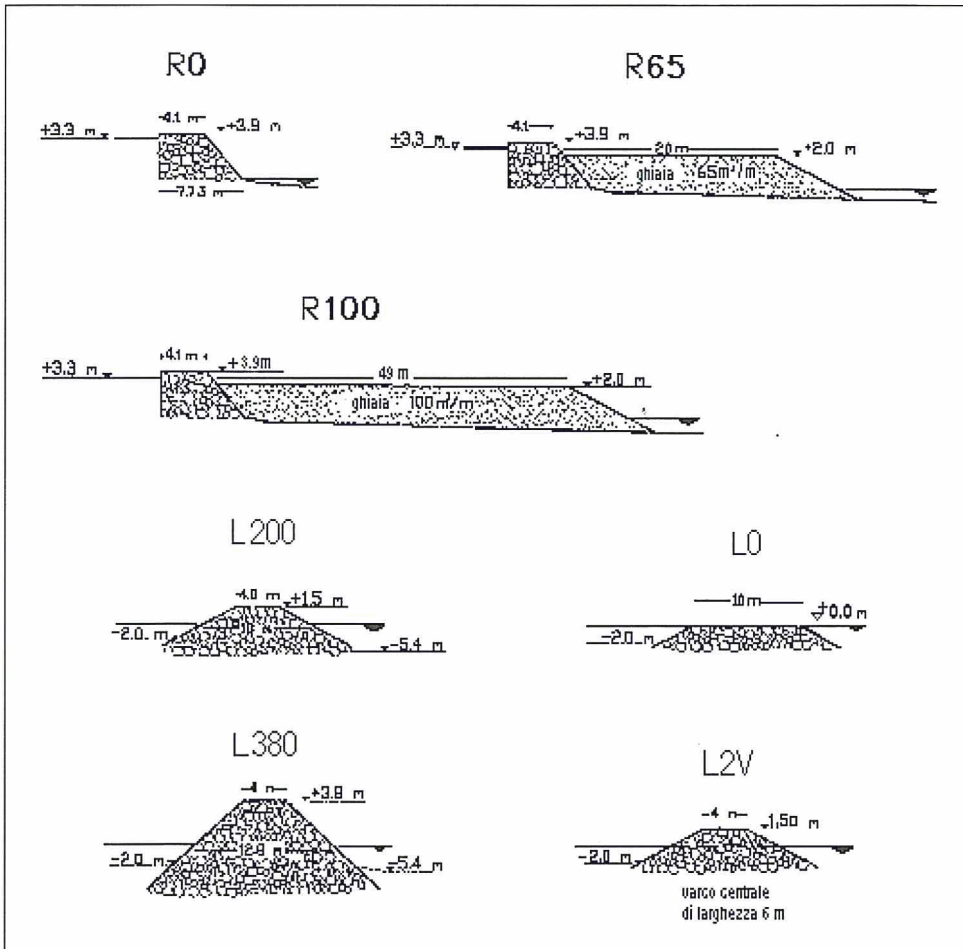


Figura 4 - Configurazioni delle opere di difesa riprodotte in modello.

A seguito di un'analisi preliminare sono state scelte le configurazioni di opere radenti e distaccate sulle quali proseguire le indagini.

Le prime due configurazioni geometriche rappresentano la situazione attuale (R0L200) e la prima proposta progettuale che prevede la sola riprofilatura della scogliera al largo alla quota di + 3.8 m s.l.m. (R0L380). Successivamente è stata costruita una spiaggia artificiale in ghiaia di $65 \text{ m}^3/\text{m}$ (R65) ed è stata modificata la scogliera al largo sia abbassandone la sommità alla quota del livello medio del mare (L0), sia aprendo dei varchi nella scogliera attuale fino alla profondità di - 0,50 m, con una lunghezza pari a quella dei tratti emersi (L2V). Sulla base dei risultati acquisiti è stato aumentato il volume della spiaggia artificiale a $100 \text{ m}^3/\text{m}$ con la quota di sommità della scogliera portata al livello del medio mare (R100L0).

Per l'esame comparativo dell'efficacia delle diverse soluzioni esaminate il principale parametro di controllo è rappresentato dalla portata media di tracimazione oltre la scogliera radente.

Nel modello bidimensionale non possono essere riprodotti i fenomeni relativi alle perdite di sedimenti attraverso i varchi ad opera delle correnti di ritorno verso il largo originate dalla differenza fra il livello che viene a formarsi nella zona protetta ed il livello al largo. Una valutazione indiretta dell'importanza di questi fenomeni è stata fatta determinando il sovrizzo del livello medio ed il valore dell'altezza d'onda presente nella zona protetta

Analisi dei risultati

Portata di tracimazione

I valori della portata di tracimazione misurati nel corso dell'intera sperimentazione sono stati riportati nella Tabella 3.

Tabella 3 - Portata di tracimazione misurata.

| Configurazione | Altezza d'onda H_{0s} [m] | Portata di overtopping Q [l/s.m] |
|----------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| R0 L200 | 4.00 | 0.10 |
| R0 L200 | 4.50 | 0.43 |
| R0 L200 | 5.30 | 2.07 |
| R0 L380 | 5.30 | 0.00 |
| R65 L0 | 4.50 | 0.04 |
| R65 L0 | 5.30 | 0.14 |
| R65 L2V | 5.30 | 0.09 |
| R100 L0 | 5.30 | 0.00 |

Si può osservare che nella situazione attuale (R0 L200) si ha tracimazione a partire da attacchi ondosi di 4.0 m, mentre per onde di 5.3 m si raggiungono valori molto elevati (2.07 l/s.m) in grado di danneggiare le pavimentazioni stradali.

Con la riprofilatura della scogliera fino alla quota di + 3.8 m s.l.m. la portata di tracimazione è sempre nulla. Questo risultato era del resto prevedibile in quanto nei tratti vicini alla foce dell'Arno, dove sono stati eseguiti alcuni anni indietro lavori di manutenzione con analoghi innalzamenti della parallela, non sono stati osservati allagamenti della sede stradale dopo l'intervento. Dalle prove eseguite risulta che la quota prevista per la sommità delle scogliere è strettamente necessaria, in quanto con gli attacchi ondosi più intensi sono state osservate limitate tracimazioni sebbene con portate non significative.

Con la costruzione di una spiaggia artificiale in ghiaia, con un volume di 65 m³/m, si ha tracimazione solo in presenza di mareggiate con H_{0s} uguale o maggiore a 4.5 m nel caso di abbassamento della scogliera al largo alla quota del medio mare (Configurazione R65L0), mentre si ha tracimazione solo con stati di mare con H_{0s} pari 5.3 m, se sulla scogliera attuale vengono aperti dei varchi di 10 m con quota di soglia alla profondità di - 0.5 m, intervallati da tratti di ugual lunghezza di scogliera alla quota attuale (Configurazione R65L2V).

Nel caso di spiaggia artificiale realizzata con 100 m³/m e scogliera con la quota di sommità al livello del mare. (Configurazione R100 L0) non è stata misurata in nessun caso tracimazione.

Altezza d'onda incidente sulla spiaggia artificiale

Il livello di agitazione, in termini di altezza d'onda significativa osservata in prossimità delle scogliere radenti o del piede delle spiagge artificiali, varia in funzione del coefficiente di trasmissione delle barriere e del coefficiente di riflessione delle opere presenti a riva.

Quando a riva è presente una spiaggia artificiale con un basso coefficiente di riflessione, l'incremento di agitazione indotto dalla riduzione di altezza delle scogliere al largo risulta solo parzialmente compensato dalla ridotta influenza delle onde riflesse dalle difese a riva. Trascurando quindi il caso della scogliera al largo con quota a + 3.8 m, per la quale la tracimazione è praticamente nulla, negli altri casi si hanno valori di altezza d'onda nella zona protetta abbastanza simili (Fig.5).

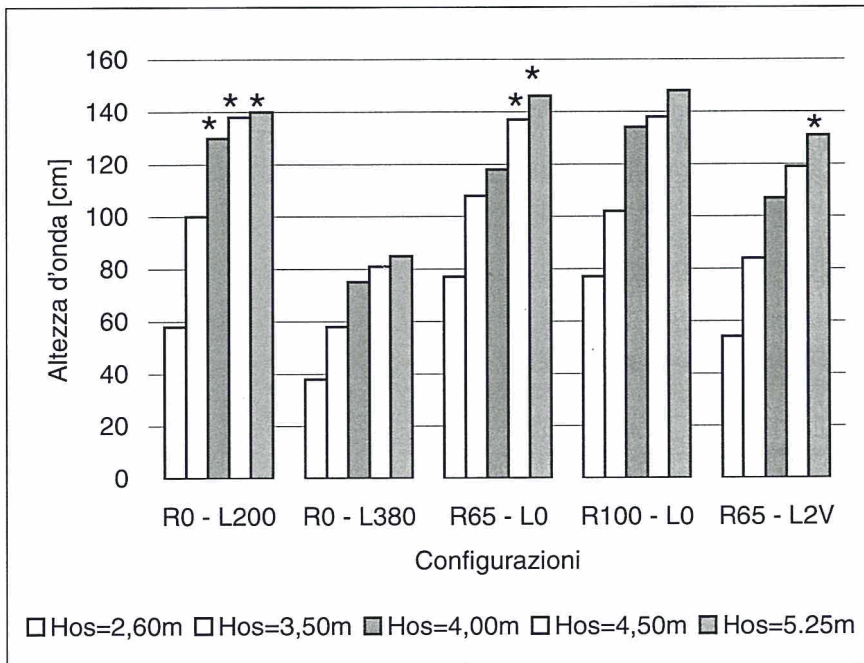


Figura 5 - Valori di altezza d'onda osservate al piede del ripascimento per diversi attacchi ondosi sulle varie configurazioni analizzate. Gli asterischi indicano i casi in cui si è verificata tracimazione sulla strada litorea.

Sovralzo

I sovralti misurati (Fig. 6) risultano chiaramente influenzati da due fattori: la tracimazione delle onde incidenti sulle opere al largo e la possibilità di riequilibrio dei livelli ad opera delle correnti di ritorno verso il largo.

Il sovralto immediatamente dietro le scogliere ha un valore compreso fra 80 e 85 cm, quando la loro altezza è compresa fra 1.5 e 2.5 m, ed assume un valore minimo di 48 cm nel caso di scogliera alta 3.5 m, dati i valori molto limitati di tracimazione. In questo caso il riequilibrio dei livelli avviene ad opera della portata di filtrazione attraverso i massi.

Quando sono presenti scogliere basse, e quindi facilmente tracimabili, risulta facilitato anche un riequilibrio dei livelli, e quindi il sovralto assume un valore intermedio di poco superiore ai 70 cm.

Esaminando il comportamento del sovralto dietro la scogliera rimodellata con l'apertura dei varchi, (L2V) risulta prevalente l'effetto dovuto alla portata entrante nella zona protetta, ed in questo caso si è registrato il sovralto maggiore.

Questa analisi è comunque da intendersi solo indicativa della situazione di prototipo, dove risultano certamente importanti gli effetti tridimensionali ed in particolare la circolazione lungo riva, ma è evidente che a sovralti più elevati corrisponderanno correnti di ritorno più intense attraverso i varchi e quindi anche una maggiore tendenza alle escavazioni ed al trasporto di sedimenti verso il largo.

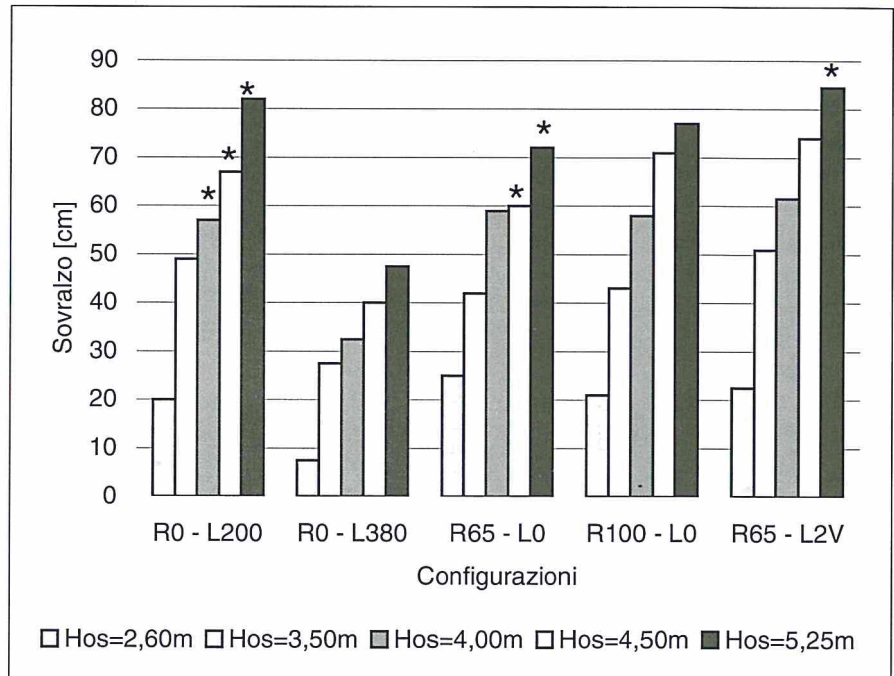


Figura 6 - Valori del sovrizzo d'onda osservati al piede del ripascimento per diversi attacchi ondosi sulle varie configurazioni analizzate. Gli asterischi indicano i casi in cui si è verificata tracimazione sulla strada litoranea.

Indagini aggiuntive sulla configurazione prescelta

Al termine della prima parte della sperimentazione è stato ritenuto che la costruzione di una spiaggia artificiale in ghiaia ottenuta con un riporto di 100 m³/m, associata ad un abbassamento della scogliera al largo (Fig. 7) potesse assicurare un'adeguata protezione alla strada litoranea e nello stesso tempo creare i presupposti per una riqualificazione ed una migliore fruibilità del litorale.

Su questa configurazione sono state eseguite alcune indagini di approfondimento tese ad evidenziare le possibili variazioni dovute sia ad una diversa scelta sul materiale per la realizzazione del modello, che a differenti scelte sulle condizioni di prova.

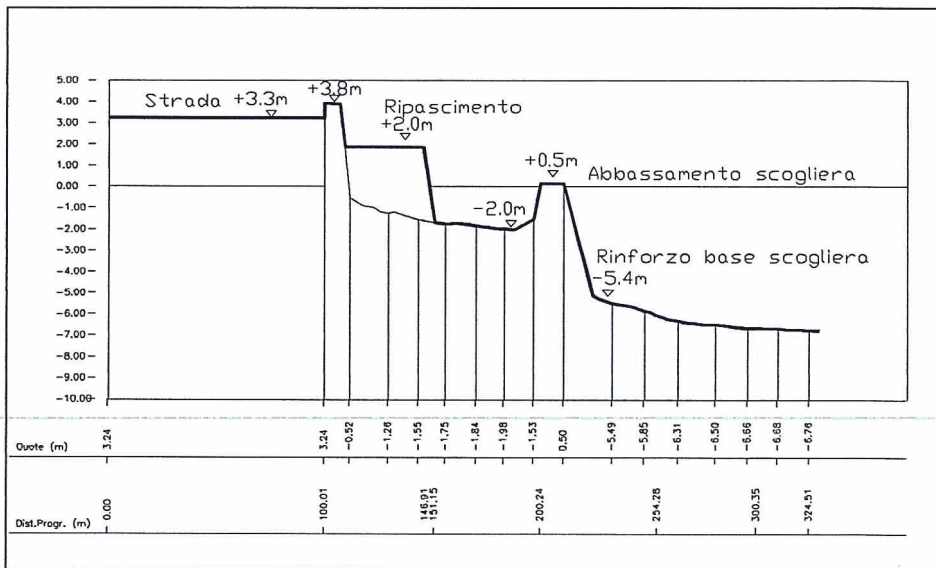


Figura 7 - Modifica proposta.

Modello in materiale leggero

Il modello in materiale leggero è stato eseguito per raccogliere ulteriori indicazioni sulla morfologia del profilo della spiaggia artificiale, nella condizione ottimale di ammasso molto permeabile (non intasato dalla sabbia del fondo).

La morfologia del profilo in PVC, rilevato al termine del ciclo di prove, è risultata sensibilmente diversa da quella ottenuta nelle prove con sabbia grossa: in generale la pendenza risulta notevolmente maggiore e si osserva la formazione di una cresta sulla spiaggia emersa di altezza tale da proteggere la spiaggia retrostante.

Il profilo della spiaggia di ghiaia, ottenuto al termine della prova, è stato confrontato con quello previsto sulla base delle relazioni di van der Meer (1988) (Fig. 8).

Il profilo è stato ottenuto utilizzando il valore dell'altezza d'onda e periodo misurati (sonda 5) alla base del ripascimento, per il diametro caratteristico del materiale quello del materiale di prototipo simulato dal PVC con un soddisfacente accordo.

Nonostante il PVC risulti più mobile della sabbia nella parte immersa del profilo, non è stata osservata neppure in questo caso una significativa dispersione verso il largo.

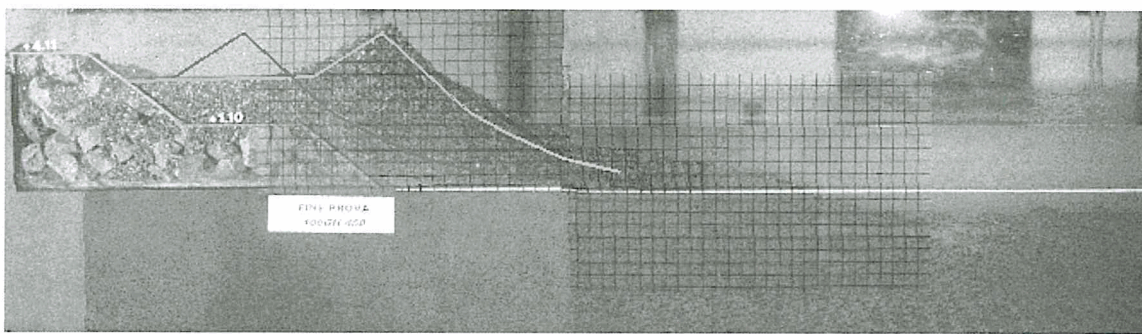


Figura 8 - Confronto fra i risultati ottenuti al termine della prova e quello previsto sulla base del modello di van der Meer.

Influenza della durata degli attacchi ondosi

Per studiare il comportamento della configurazione prescelta, sotto l'azione di una mareggiata di lunga durata, questa è stata sottoposta ad una serie ripetuta di attacchi ondosi con le onde più alte per una durata complessiva di 16 ore (circa 80 ore reali secondo la similitudine di Froude).

Le prove sono state suddivise in quattro serie, ognuna delle quali costituita da:

- 2 ore di onde $H_{0s} = 5.30$ m;
- 2 ore di onde $H_{0s} = 4.00$ m.

Al termine di ogni serie di prove è stato rilevato il profilo della spiaggia artificiale (Fig. 9). Si può osservare che dopo i primi due cicli di prove il profilo raggiunge una sostanziale stabilità.



Figura 9 - Modifica dei profili di spiaggia in seguito ad un attacco ondoso di lunga durata (80 ore equivalenti).

Durante i primi due cicli di prove è stata misurata la portata di tracimazione che è risultata nulla. Le misure non sono state proseguite nei cicli successivi, in quanto la spiaggia artificiale è risultata coperta da uno strato di sabbia fine trasportata verso riva che ha ridotto a valori non realistici la permeabilità dell'ammasso.

Approfondimento dei fondali antistanti il piede del ripascimento

La configurazione R100L0 prevede un ripascimento artificiale, ma anche l'abbassamento della struttura al largo. Tenendo conto del fatto che la morfologia della spiaggia artificiale è controllata dalle caratteristiche delle onde incidenti la cui altezza è influenzata sia dall'altezza della scogliera al largo sia dalla profondità nella zona retrostante, non potendo escludere a priori che si possa verificare una perdita di sabbia dovuta all'abbassamento della scogliera, si è indagato sui possibili effetti indotti dall'approfondimento del fondo.

E' quindi stata simulata in canale una situazione di erosione: il fondale è stato approfondito progressivamente dal piede della spiaggia artificiale fino ad avere, dietro la struttura esterna, una profondità di 4 m invece degli attuali 2 m.

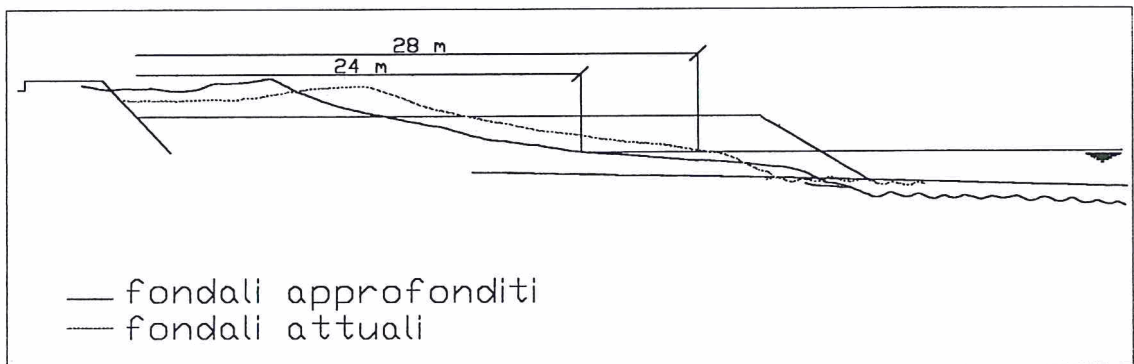


Figura 10 - Confronto fra i profili finali ottenuti con i fondali attuali e con i fondali approfonditi.

Le prove sono state condotte sul modello in sabbia con le stesse modalità. I profili finali ottenuti nella configurazione di progetto ed in quella modificata sono riportati in Figura 10, dalla quale si può osservare che il profilo finale risulta traslato verso riva ed assume una maggiore ripidità nella parte emersa, ma non si evidenziano significative differenze di stabilità; in particolare rimane evidente la netta separazione fra il materiale di ripascimento e quello di fondo al piede del profilo sommerso. La berma sulla spiaggia emersa raggiunge una quota leggermente superiore e comunque sufficiente ad impedire tracimazioni. L'ampiezza della spiaggia emersa risulta, in questo caso, ridotta di 4 m.

Conclusioni

L'indagine sperimentale ha permesso di valutare l'efficacia di una spiaggia in ghiaia per la protezione della strada litoranea in alternativa al rialzamento di una scogliera parallela. In particolare le prove hanno permesso di determinare il volume di materiale da riportare per ottenere una spiaggia stabile riducendo l'altezza della scogliera di protezione.

In accordo con quanto è possibile osservare sulle spiagge naturali (Orford e Carter, 1985), i sedimenti più grossolani rimangono confinati in prossimità della riva e non si verifica il mescolamento dei due materiali sulla spiaggia sommersa, dove è presente, alla base dello step, una evidente discontinuità granulometrica (Fig. 11).

In alcune condizioni si è verificata la risalita della sabbia del fondo naturale sulla berma; ciò può determinare l'intasamento dei pori e la conseguente riduzione della permeabilità e della porosità della spiaggia.

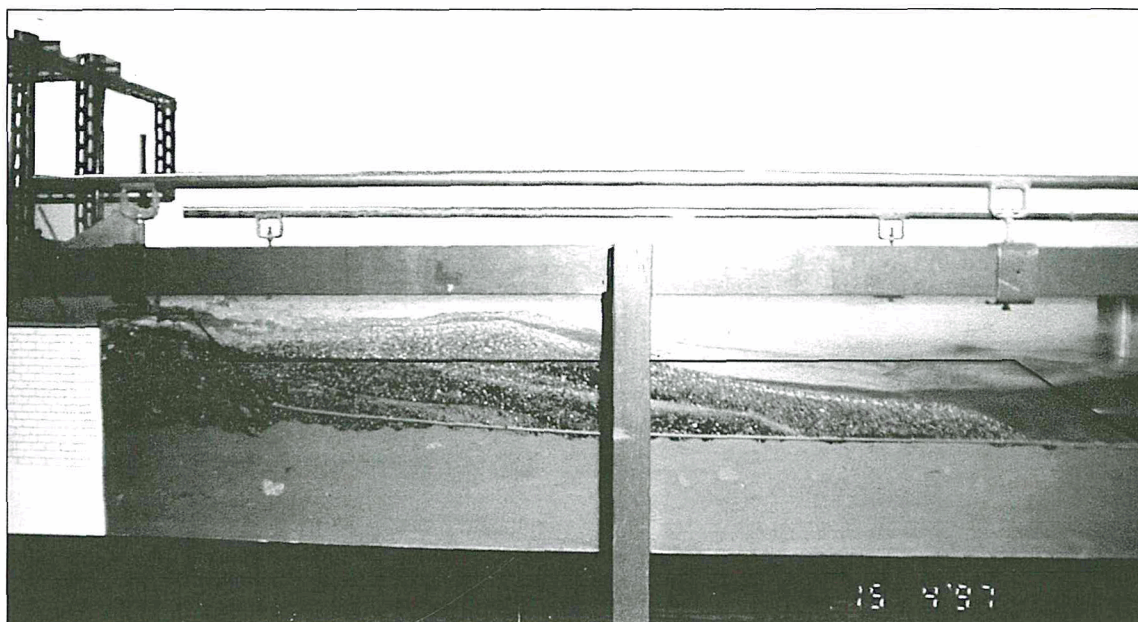


Figura 11 - Modello fisico dell'intervento; si nota la netta separazione fra i materiali di ripascimento, che simulano la ghiaia, e la sabbia nativa del fondale.

Le prove, comunque, hanno messo in evidenza la possibilità di abbassare le difese parallele presenti lungo ampi tratti di litorale, con una evidente ricaduta positiva sulla qualità delle acque costiere. Le spiagge in ghiaia potrebbero addirittura sostituire in diversi casi le scogliere radenti, anche in assenza di scogliere al largo.

Mentre le prove hanno permesso di determinare i volumi ottimali da impiegare nei ripascimenti, non è stato possibile trarre indicazioni esatte sulle dimensioni della ghiaia da utilizzare a causa degli effetti di scala presenti in un modello ridotto a 1/25. Per conoscere più in dettaglio il ruolo delle dimensioni e dell'assortimento granulometrico della ghiaia sulla morfologia del profilo, sono necessarie ulteriori informazioni che possono essere ottenute solo da modelli in scala molto più grande o dal monitoraggio di interventi sperimentali quali quelli da poco realizzati sulle coste toscane.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ing. Francesca Agostini e la Dott.ssa Deborah Bresci per l'aiuto prestato nell'esecuzione delle prove di laboratorio.

La ricerca è stata condotta nell'ambito di una convenzione con il Comune di Pisa e del progetto COFIN'98 (Resp. Prof. E. Benassai), mentre la pubblicazione avviene grazie al contributo del G.N.D.C.I., Linea 2 (Resp. Prof. G.B. La Monica).

Bibliografia

- Aminti P. (1988) - *Indagine sperimentale sulla protezione delle spiagge con ripascimenti artificiali*. Conv. Idr e Costr. Idr., L'Aquila, pp. 562-575.
- Aminti P. (1998) - *Confronto fra i profili di spiaggia in ghiaia ottenuti con diverse tecniche di modellazione*. Conv. Idr e Costr. Idr., Catania, Vol.1.
- Berriolo G. (1999) - L'intervento di riequilibrio della spiaggia di Fondi-Sperlonga. Studi costieri, 1: 33-41.
- CIRIA-CUR (1983) - *Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering*.
- Coates T. (1994) - *Physical modelling of the response of shingle beaches in the presence of control structures*. Coa-

- stal Dynamics '94, Barcelona, pp. 924-937.
- Coates T. e Dodd N. (1994) - *The response of Gravel Beaches in the presence of Control Structures*. ICCE, pp. 1880-1993.
- De Santis M. e Ruol P. (1988) - *Studio sperimentale su un particolare intervento per la salvaguardia delle spiagge in erosione*. Ist. di Costruzioni Marittime e Geotecnica, Padova.
- Dean R.G. (1973) - *Heuristic model of sand transport in the surf zone*. Conf. on Engineering Dynamics in the coastal zone.
- Gourlay M.R. (1980) - *Beaches profiles, process and permeability*. Coastal Eng. Conf.
- Pacini M., Pranzini E. e Siritto G. (1999) - *La ricostruzione della spiaggia di Cala Gonone*. Studi costieri, 1: 43-55.
- Orford J.D. e Carter R.W.G. (1985) - Storm-generated dune armouring on a sand-gravel barrier system, Southeast Ireland. Sed. Geol., 42: 65-82.
- Pranzini E. (1989) - *A model for cusped river delta erosion*. 6th Symp. on Coastal and Ocean Management/ASCE. Charleston, SC. Coastal Zone '89. pp. 4345-4357.
- Pilarczyk K.W. e den Boer K. (1983) - *Stability and profile development of coarse materials and their application in coastal Engineering*. Int. Conf. on Coastal and Port Eng. In developing countries, Colombo, pp. 43-60.
- Powell K.A. (1990) - *Predicting short term profile response for shingle beaches*. HR Wallingford Report R219.
- van der Meer J. (1988) - *Rock Slopes and gravel beaches under wave attack*. Delft Tech. Univ., Pubbl. N. 396.
- van der Meer J. (1992) - *Conceptual design of rubble mound breakwaters* - Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures., Venezia.
- van Hijum E. e Pilarczyk K.W. (1982) - *Gravel beaches: equilibrium profile and longshore transport of coarse material under regular and irregular wave attack*. Delft Hydr. Lab., Pubbl. N. 274.
- Vellinga P. (1986) - *Beach and dune erosion during storm surges*. Delft Hydraulic Communication, N 372.

Manoscritto ricevuto il 20/6/2000, accettato il 30/9/2000.