

L'IMPIEGO DELLA GHIAIA NEI RIPASCIMENTI E LA DIFESA DELLE COSTE

Antonio Felice Petrillo, Matteo G. Molfetta, Luigi Pratola, Antonio Rinaldi

*Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste
Politecnico di Bari - Dipartimento di Ingegneria delle Acque e di Chimica*

1. EROSIONE DELLE COSTE ITALIANE

Dagli anni cinquanta, lungo le coste italiane, si stanno manifestando in modo palese fenomeni di erosione locali e diffusi delle coste sabbiose. Invero questo fenomeno non si riscontra solo nella nostra penisola, ma in diverse parti del mondo e, in modo particolare, lungo le coste nel cui entroterra è stata più incisiva l'azione antropica. Esso si manifesta "visibilmente" con arretramenti della linea di riva che, talvolta, possono mettere in pericolo anche la stabilità di insediamenti abitativi o di infrastrutture realizzate lungo la fascia costiera, e "in modo non visibile" con un aumento della profondità dei fondali della spiaggia sommersa a causa dell'allontanamento della sabbia al largo, fuori dalla zona attiva della spiaggia. Variazioni stagionali e in alcuni casi anche annuali della linea di riva sono normali, tenendo presente la variabilità dello stato ondoso che è la principale causa della dinamica costiera a breve termine. Diversa è la situazione in cui si riscontra un arretramento della linea di riva costante negli anni. In questo caso l'ipotesi di un intervento esterno che ha alterato l'equilibrio dei sedimenti è certamente plausibile. E' ormai scientificamente dimostrato che le principali cause dell'erosione sono le azioni antropiche. In particolare si pensi:

- alla realizzazione di nuove opere a mare, che possono interferire in modo consistente con la dinamica dei sedimenti;
- alla urbanizzazione e infrastrutturazione della fascia costiera;
- alla regimazione dei corsi d'acqua (in particolare alla realizzazione di invasi artificiali);
- alle sistemazioni idrauliche forestali, etc..

Questi interventi, nel tempo, fanno risentire il loro impatto sulle coste, che consiste principalmente nel diminuire, se non, in taluni casi, annullare il trasporto di materiali terrigeni verso il mare, incidendo pesantemente sull'equilibrio medio esistente tra l'azione erosiva delle onde e l'apporto da terra.

Non si può, infine, trascurare il contributo all'erosione fornito dall'innalzamento del livello medio mare. Questo fenomeno, la cui entità non è certamente marginale, è, però, attualmente di diffi-

cile valutazione quantitativa in quando esistono pochi rilievi sistematici su lungo periodo. Per quanto riguarda l'Adriatico, i dati più significativi sono quelli rilevati a Trieste con lo stesso mareografo dalla metà del 1800 ai giorni nostri; tali dati indicherebbero un innalzamento del livello medio mare, in un secolo, di circa 15 cm, valore questo che, per le coste sabbiose, in genere caratterizzate da piccole pendenze, non è trascurabile.

Per far fronte al fenomeno dell'erosione dei litorali, tradizionalmente si è fatto ricorso ad interventi in genere molto impattanti sia dal punto di vista paesaggistico che della qualità delle acque, consistenti nella costruzione di opere rigide, quali barriere emerse, sommerse, pennelli, etc.. La crescita della sensibilità ambientale ha dato l'avvio ad una fase di studio, nei laboratori e in campo, di interventi morbidi che, con diverse metodologie, tendono ad instaurare condizioni idrodinamiche tali da riuscire a trattenere i sedimenti nella zona vicina alla riva, anche sotto l'azione di stati ondosi erosivi.

Il quadro delle possibili azioni finalizzate al ripristino della linea di costa è completato dai ripascimenti artificiali, accompagnati, in genere, dalla realizzazione di opere di protezione la cui funzione è quella di trattenere il materiale apportato, evitando la sua dispersione fuori dalla fascia attiva. Per questo tipo di interventi il materiale più frequentemente utilizzato è la sabbia, che viene solitamente prelevata sia dagli alti fondali che da cave di prestito; ultimamente, però, sta prendendo piede l'utilizzo di ghiaia che consente, talvolta, di associare all'indubbio effetto di protezione della spiaggia, uno di carattere estetico che permette di considerare tali tipologie di sistemazioni anche come interventi di arredo urbano. L'utilizzo della ghiaia è, inoltre, l'unico consentito per i ripascimenti nei casi, sempre più frequenti, di mancata o insufficiente disponibilità di sabbia nelle vicinanze dell'area oggetto della sistemazione (circostanza che incrementa notevolmente i costi, già alti, del ripascimento a causa dell'incidenza del trasporto) o di incompatibilità ambientale del sedimento disponibile. Nei casi, infine, in cui il litorale risulta particolarmente degradato, tanto da



richiedere idonei interventi di riqualificazione ambientale che creino una nuova interfaccia costa – mare, l'utilizzo della ghiaia risulta piuttosto efficace.

2. UTILIZZO DELLA GHIAIA PER I RIPASCIMENTI DELLE SPIAGGE

Il punto principale a favore di una spiaggia in ghiaia, rispetto ad una in sabbia, è la grande permeabilità del materiale che sotto l'azione del moto ondoso determina:

- una pendenza maggiore della spiaggia;
- la formazione, a ridosso della linea di riva, di una berma emersa, più o meno alta, che funge da scogliera naturale di difesa della costa retrostante.

I punti a sfavore di una spiaggia in ghiaia, rispetto ad una in sabbia, sono legati a:

- riduzione della fruibilità balneare della spiaggia, soprattutto nei casi in cui le dimensioni medie dei ciottoli sono troppo elevate; d'altra parte un eccessivo contenimento della granulometria della ghiaia determina un maggior arretramento della linea di riva sotto gli attacchi ondosi. Da qui nasce l'esigenza, in fase di progettazione, di un attento studio delle dimensioni e dei volumi di ghiaia, che consenta di contemperare le esigenze, talvolta con-

trapposte, di fruibilità della spiaggia e protezione della costa dall'erosione;

- grande mobilità per rotolamento della ghiaia; in presenza di ingenti correnti longitudinali, infatti, si può ritrovare la ghiaia anche a chilometri di distanza dal sito interessato dal ripascimento (non pochi sono i casi in cui spiagge sabbiose hanno subito variazioni granulometriche significative a causa del trasporto longitudinale di ghiaia da siti adiacenti); questo tipo di fenomeno viene solitamente mitigato dalla costruzione di opere laterali di contenimento, quali pennelli;

- più attenta e costante gestione necessaria per una spiaggia in ghiaia; infatti, allo scopo di preservare l'efficienza dell'intervento nel tempo e di consentire un'agevole fruizione della spiaggia, risulta necessario spianare le berme invernali che, a seconda delle intensità delle mareggiate, possono raggiungere altezze ragguardevoli, pari anche a 2 o 3 m, uniformando, in questo modo, lo spessore e la larghezza del ripascimento.

Nonostante queste significative limitazioni, in numerosi casi in cui il tasso di erosione della spiaggia è particolarmente elevato risulta consigliabile, sia da un punto di vista ambientale che econo-



Figura 1 - Visione aerea del porto di Ostia; è evidenziata la zona interessata dal ripascimento



Figura 2 - Particolare del ripascimento in ghiaia



Figura 3 - Ripascimento in ghiaia in località Fossa Cesia



Figura 4 - Ripascimento in ghiaia in località Punta Tesorino



mico, ricorrere all'uso della ghiaia preferendola alla sabbia la quale, anche se inserita in un contesto protetto, dà frequentemente luogo a ripascimenti instabili e, quindi, bisognevoli di frequenti ricariche con costi che non sempre sono giustificabili, soprattutto nei casi in cui le spiagge da proteggere non sono di particolare pregio.

3. ESEMPI IN ITALIA DEI RIPASCIMENTI CON GHIAIA

In Italia esistono non pochi esempi di utilizzo della ghiaia per ripascimenti.

All'interno del porto turistico di Roma, situato nelle immediate vicinanze della foce del Tevere, in località Ostia, ad esempio, è stato realizzato un ripascimento nella zona prospiciente l'imboccatura dell'area protetta (figg.1÷2); il risultato estetico risulta apprezzabile, tanto più che la linea di riva ha assunto una conformazione curvilinea che richiama la forma dell'imbocco del porto. La pezzatura media utilizzata per questo ripascimento si aggira intorno ai 2 cm.

Anche in località "Fossa Cesia", in Abruzzo, è stato realizzato un intervento in ghiaia con pezzatura media di circa 5 cm (fig. 3).

Un altro esempio si trova in Toscana, in località

Punta Tesorino (fig. 4), nei pressi di Rosignano Marittimo in provincia di Livorno, dove l'erosione, negli anni precedenti all'intervento, era proceduta con un tasso superiore ai tre metri all'anno (Cipriani *et al.* 2001). In tutti questi casi è possibile notare il gradevole impatto visivo e la conseguente riqualificazione paesaggistica risultante da un intervento di questo tipo.

4. IL MODELLO TRIDIMENSIONALE DI MARINA DI PISA

Il litorale di Marina di Pisa ricade all'interno dell'unità fisiografica che va dalla Bocca del Magra, a nord, a Livorno, a sud. Questo tratto di costa è stato oggetto, da molti anni, a numerosi studi (Cipriani *et al.* 2001, Ghezzi *et al.* 1999) dai quali, tra le altre cose, si è chiaramente evinto l'andamento del trasporto solido long-shore prevalente che è illustrato nella figura 5.

E' evidente che il trasporto dei sedimenti presenta un *drift* prevalentemente diretto verso sud da Bocca di Magra a Forte dei Marmi e uno diretto verso nord da Bocca dell'Arno a Marina di Pietrasanta. A sud della Bocca dell'Arno si osserva una inversione della direzione del flusso dei sedimenti, che in questa zona è diretto a sud, verso Livorno. Nelle zone immediatamente adiacenti al fiume Arno, a partire dalla seconda metà del 1880, a causa anche della demolizione dell'apice del delta del fiume (Aiello *et al.* 1995), si è innescato un fenomeno erosivo che si è propagato in entrambe le direzioni long-shore.

A nord, nella zona della tenuta di S. Rossore, l'arretramento della linea di riva ha superato in alcuni punti 1.000 m e il fenomeno è ancora in atto.

A sud, nella zona di Marina di Pisa, sono state realizzate negli anni, numerose opere di difesa che hanno limitato il fenomeno erosivo nelle zone protette, lasciandolo però inalterato in quelle esterne. Le opere di difesa in parola sono state costruite in epoche differenti e consistono in un complesso di scogliere radenti, a protezione della strada litoranea, costruite all'inizio del secolo scorso a seguito dell'applicazione della legge (n. 542 del 14 luglio 1907) e da barriere emerse, caratterizzate da una notevole altezza e poste ad una distanza media di circa 100 m dalla linea di riva, realizzate successivamente. Nella fig. 6 è riportato un tratto del litorale dell'abitato di Marina di Pisa in cui sono presenti le opere sopra citate.

L'evidente impatto che l'insieme degli interventi posti in essere ha prodotto sul litorale, ha indotto le

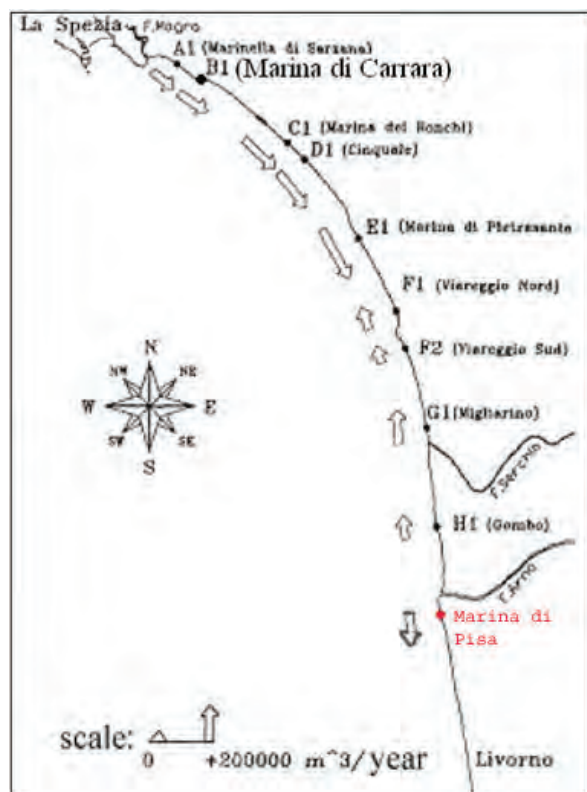


Figura 5 - Andamento medio delle correnti marine nell'unità fisiografica di Marina di Pisa



CAMBIAMENTI CLIMATICI E RISCHI GEOLOGICI IN PUGLIA

CASTELLO DI SANNICANDRO DI BARI - 30 Novembre 2007

autorità competenti ad avviare una serie di studi allo scopo di effettuare una riqualificazione ambientale dell'intero tratto di litorale.

A seguito di alcune prove condotte nel canale del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze (Aminti e Pranzini, 2000), per quello che riguarda in particolare il fronte mare di Marina di Pisa, si è presa in considerazione la possibilità di abbassare le scogliere emerse, trasformandole in sommerse, e demandare l'assorbimento dell'energia del moto ondoso ad una spiaggia in ghiaia da realizzare a tergo della scogliera aderente. Seppure il

modello bidimensionale abbia fornito alcuni preziosi risultati circa la stabilità delle scogliere sommerse, il loro funzionamento idraulico e il volume di ghiaia necessario alla creazione di una spiaggia retrostante fruibile e stabile, è parsa evidente la necessità di un ulteriore studio dei fenomeni in gioco da realizzarsi su modello fisico tridimensionale, in grado di completare i dati raccolti sul bidimensionale con quelli derivanti dalla possibilità di generare attacchi ondosi con fronte d'onda obliquo rispetto alla linea di riva. Per questo, nel 2002 l'Autorità di Bacino del fiume Arno ha stipulato una convenzione

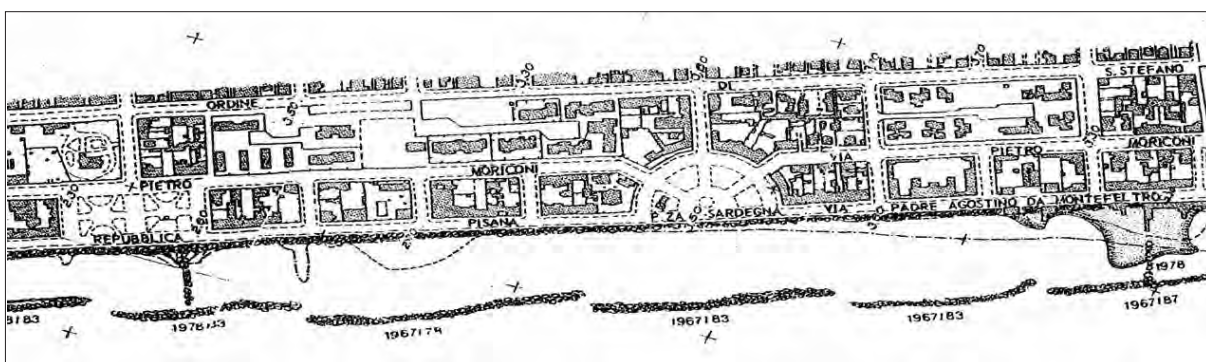


Figura 6 - Opere di protezione a Marina di Pisa

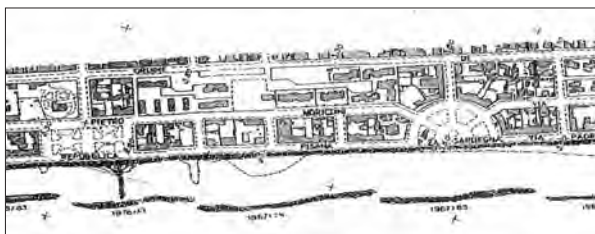


Figura 7 - Planimetria della zona modellata

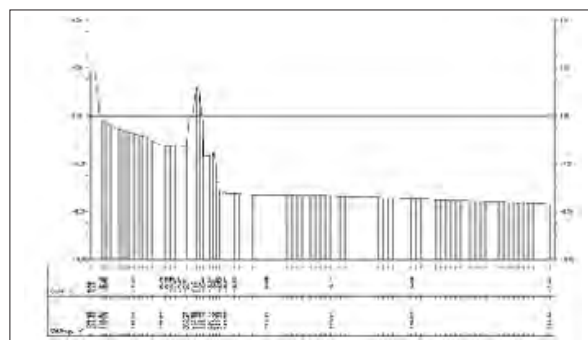


Figura 8 - Profilo trasversale della zona modellata



Figura 9 - Immagine del modello con la configurazione attuale delle opere



con il Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste del Politecnico di Bari. Scopo di questa convenzione era, appunto, la "esecuzione della sperimentazione su modello fisico tridimensionale delle opere per la protezione del litorale di Marina di Pisa".

Il modello fisico è stato realizzato nella vasca per studi di dinamica costiera del Laboratorio, avente una lunghezza di 90 m, larghezza di 50 m e profondità di 1,20 m e dotata di ondogeno in grado di generare stati ondosi di diverse caratteristiche, con un fronte d'onda massimo di 28,8 m. Il modello è stato realizzato in analogia di Froude, con scala geometrica indistorta di 1:30; si sono simulate diverse condizioni meteomarine tali da avere, ai fondali di 24 metri (scala prototipo), fronti d'onda inclinati di 10° e 0° rispetto alla linea di riva. Il tratto di litorale preso in considerazione per la modellazione, interamente ricadente nell'abitato di Marina di Pisa, è lungo, in scala prototipo, circa 860 m e comprende un totale di cinque scogliere emerse, tre delle quali - quelle centrali - sono state riprodotte in vasca nella loro interezza, mentre le rimanenti due solo parzial-

mente. Le batimetrie del modello sono state realizzate sulla scorta dei dati di alcuni rilievi in situ, forniti al laboratorio dall'Autorità di Bacino committente.

Nella figure 7 ed 8 sono riportate, rispettivamente, una planimetria del tratto interessato dal modello e un profilo tipo della batimetria della zona; da questo, in particolare, si nota la presenza della scogliera emersa e le notevoli profondità nella zona immediatamente off-shore ad essa che, talvolta, raggiungono i 7 metri sotto il livello medio del mare.

La batimetria del prototipo è stata riprodotta in modello fino alla profondità di 8 m, utilizzando sabbia silicea avente diametro medio pari a 0,185 mm, e garantendo la conservazione del parametro di Dean per riprodurre correttamente il fenomeno del trasporto solido.

Per quello che concerne i parametri caratteristici degli attacchi ondosi studiati, basandosi sui dati rilevati dalla boa ondometrica di La Spezia si è deciso di inviare ondate con altezze d'onda significative comprese tra 3 e 7,50 m (0,10 e 0,25 m in scala modello), e periodi compresi tra 7 e 11,50 sec (1,28



Figura 10 - Immagine del modello con la prima configurazione progettuale delle opere

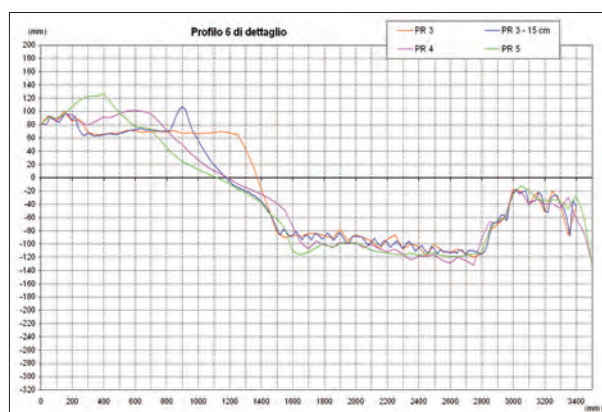


Figura 11 - Esempio di profili batimetrici rilevati in momenti diversi dello studio



Figura 12 - Canaletta per la valutazione del fenomeno dell'overtopping (configurazione attuale delle opere)



e 2,10 sec in scala modello); lo stato ondoso a più alto contenuto energetico corrisponde ad un tempo di ritorno maggiore di 50 anni.

Oltre allo studio del modello realizzato in configurazione tale da riprodurre fedelmente lo stato attuale delle opere, passo necessario per testare la rispondenza del modello stesso con il prototipo (fig. 9), sono state riprodotte altre configurazioni delle opere corrispondenti a diverse ipotesi progettuali.

La prima configurazione progettuale (fig. 10) prevedeva una risistemazione delle scogliere emerse, fino a portarle ad una sommersenza di circa 0.5 m, la chiusura dei varchi esistenti con degli isolotti emersi di circa 1m, collegati a terra con dei pennelli in parte sommersi, ed infine un ripascimento in ghiaia che, partendo dalle barriere radenti, si estendeva per una larghezza di 30 metri con una quota costante di 2m s.l.m.m..

Per simulare il ripascimento si sono utilizzate due diverse granulometrie della ghiaia (3÷4 cm e 5÷6 cm, che nel modello corrispondono rispettivamente a 2÷3 mm e 4÷6 mm), sistemandole in due diverse zone del modello allo scopo di studiarne le differenze di comportamento.

La seconda configurazione progettuale differiva dalla prima per il solo abbassamento degli isolotti emersi, portati allo stesso valore di sommersenza della scogliera adiacente. La terza configurazione progettuale prevedeva la sostituzione della ghiaia con granulometria di 2÷3 mm con quella di 4÷6 mm. Con quest'ultima configurazione delle opere si sono anche effettuate delle prove tese a studiare il comportamento della spiaggia in seguito ad un intervento di sistemazione della stessa, consistente nello spianamento della berma di tempesta invernale.

Le analisi effettuate su tutte queste configurazioni hanno riguardato: i rilievi del moto ondoso, effettuati con sonde di tipo resistivo; i rilievi delle correnti ai varchi, effettuati con un apparecchio ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*); le evoluzioni dei profili batimetrici (fig. 11) rilevati con un apposito profilatore di fondo e con una stazione totale; le portate di *overtopping* misurate dopo la loro raccolta in un pozzetto collegato ad una canaletta appositamente realizzata (fig. 12) a tergo della scogliera radente. Inoltre tutte le prove sono state documentate tramite fotografie e filmati digitali.

I risultati della sperimentazione hanno evidenziato alcuni aspetti che qui, per brevità, si espongono sinteticamente:

- le prove condotte con la configurazione attuale delle opere hanno confermato la buona risposta del

modello ai fenomeni che avvengono nella realtà, mostrando anche un buon accordo con i risultati ottenuti nelle prove su modello bidimensionale condotte presso l'Università degli Studi di Firenze;

- dalle prove si è visto che gli isolotti emersi provocano effetti diffrattivi non desiderati. La loro presenza, infatti, determina accumuli irregolari di energia del moto ondoso incidente in corrispondenza dei pennelli, depositi irregolari di ghiaia e scalzamenti locali dei pennelli stessi;
- il ripascimento realizzato con ghiaia avente granulometria pari a 2÷3 mm ha subito dei forti spostamenti verso le scogliere aderenti, arrivando fino alla canaletta (ossia sulla strada litoranea, nel prototipo) oltre che in direzione long-shore verso i pennelli di contenimento; questo fenomeno è risultato molto attenuato laddove è stata utilizzata ghiaia con granulometria pari a 4÷6 mm;
- si sono osservati fenomeni di risalita della sabbia sul ripascimento in ghiaia, con formazione, talvolta, di estese chiazze superficiali: questo ha evidentemente creato una diminuzione della permeabilità della ghiaia stessa e, quindi, una riduzione della pendenza della spiaggia; in questo modo il fenomeno di risalita del moto ondoso viene agevolato e può arrivare a causare la distruzione della berma e, conseguentemente, eventi di tracimazione;
- la chiusura dei varchi ha fortemente ridimensionato il fenomeno delle *rip currents*, riducendo conseguentemente le escavazioni localizzate;
- l'insieme delle prove eseguite ha sostanzialmente indicato la efficacia della terza proposta progettuale nella quale, in presenza di scogliere parallele sommerse senza varchi e di pennelli di separazione delle celle, un ripascimento di 0,111 mc/m (100mc/m in scala prototipo), con ghiaia di 4-6 mm (60 mm in scala prototipo), riesce ad assorbire l'energia del moto ondoso incidente senza tracimazione sulla strada litoranea;
- si è infine evidenziata l'opportunità, anche ai fini della fruizione della spiaggia, di gestire il ripascimento, nel senso di ridistribuire la ghiaia della berma che si forma dopo gli attacchi ondosi con maggiore energia, e comunque alla fine della stagione invernale, al fine di diminuire le possibilità di tracimazione sulla strada litoranea.

5. INTERVENTI REALIZZATI A SEGUITO DEGLI STUDI

I primi interventi di protezione, riguardanti un tratto di litorale di soli 500 metri, venivano aggiudi-



cati mentre ancora le sperimentazioni in laboratorio non erano terminate. Per prima cosa si procedeva alla sistemazione di un ripascimento in ghiaia, utilizzando però, e in questo contravvenendo alle indicazioni fornite dalla sperimentazione condotta sul modello tridimensionale, un diametro medio del

materiale di circa 1÷2 cm; questa scelta veniva dettata dall'esigenza, evidentemente rappresentata da più parti, di conservare il più possibile la fruibilità della spiaggia.

Il 5 ottobre 2003 il litorale in oggetto veniva interessato da una mareggiata eccezionale con altezze



Figura 13 - Ghiaia riversata sulla strada litoranea nell'ottobre 2003



Figura 16 - Confronto tra le ghiaie utilizzate per i due ripascimenti



Figura 14 - Particolare della tracimazione della ghiaia



Figura 17 - Vista dal pennello di confine della zona oggetto dell'intervento



Figura 15 - Dimensione della ghiaia utilizzata per il primo ripascimento



Figura 18 - Profilo della spiaggia dopo una mareggiata



d'onda, registrate dalla boa ondometrica di La Spezia, anche di 6,50 m, corrispondenti ad un tempo di ritorno di cinquanta anni. Per effetto di tale mareggiata, la ghiaia appena sistemata sulla spiaggia si riversava copiosamente sulla strada litoranea (figg. 13÷15).

Nel ottobre del 2006, si riprendevano i lavori per la riqualificazione del litorale, procedendo innanzitutto alla costruzione dei pennelli di confinamento delle celle su cui in precedenza si era eseguito il ripascimento e, in seguito, realizzando un secondo ripascimento con ghiaia, del diametro medio di 7÷8 cm (fig. 16). I lavori quindi proseguivano con l'abbassamento delle scogliere emerse che, secondo le indicazioni fornite dal modello 3D, venivano sommerse ad una quota di -0,5 m (fig. 17).

Le opere così realizzate hanno mostrato la loro efficacia durante diverse mareggiate significative che si sono avute sul litorale dal gennaio al maggio 2007.

L'aver ecceduto nella scelta del diametro della ghiaia (le sperimentazioni su modello fisico 3D avevano indicato che un diametro medio di 6 cm era in grado di assorbire il moto ondoso), ha determinato la formazione di una berma con una pendenza abbastanza grande (fig. 18).

Comunque, l'intervento ha determinato una notevole riqualificazione del litorale, sia dal punto di vista visivo che per la qualità delle acque di balneazione.

BIBLIOGRAFIA

AIELLO E., BARTOLINI C., CAPUTO, D'ALESSANDRO L., FANUCCI F., GNACCOLINI M., LA MONICA G.B., LUPIA PALMIERI E., PICAZZO M. E PRANZINI E. (1995) - *Il trasporto litoraneo lungo la costa Toscana fra la foce del fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina*. Bollettino Società Geologica Italiana, n. 94.

AMINTI P. L., PRANZINI E. (2000) - *Indagine sperimentale per la ristrutturazione delle difese di Marina di Pisa*. Studi Costieri, n. 3.

CIPRIANI L. E., FERRI S., AMINTI P.L., PAOLIERI F., PRANZINI E. (2001) - *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana Settentrionale*. Studi Costieri n. 4.

GHEZZI G., MILANI V., NOLI A. (1999) - *Verifica su modello numerico di un intervento per il contenimento dell'erosione a sud di Marina di Pisa*. Studi Costieri n. 1.