

**Opere di difesa realizzate con strutture sommerse ed a cresta bassa
ad Alghero (SS), Perd'e Sali (CA), Marina di Massa (MS),
Marina di Pisa (PI), Porto Recanati (MC),
Marina di Montemarciano (AN), Lido di Dante (RA) e Pellestrina (VE)**

**Alessandro Mancinelli¹, Pier Luigi Aminti², Renata Archetti³, Andrea Atzeni⁴, Valeria Canu⁴,
Lorenzo Cappiotti², Carlo Lorenzoni¹, Barbara Zanuttigh³**

¹ Istituto di Idraulica e Infrastrutture Viarie, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce bianche - 60131 Ancona.
Tel.: +39-071-220-4529, Fax: +39-071-220-4528, E-mail: a.mancinelli@univpm.it, c.lorenzoni@univpm.it

² Dipartimento di Ingegneria Civile (DIC) - Università di Firenze, via S. Marta, 3 - 50139 Firenze.
Tel.: +39 055 4796316, Fax: +39 055 495333, E-mail: aminti@dicea.unifi.it, cappiotti@dicea.unifi.it

³ Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio (DISTART) -
Università di Bologna, viale Risorgimento, 2 - 40136 Bologna. Tel.: +39 051 2093745, Fax: +39 051 6448346,
E-mail: renata.archetti@unibo.it, barbara.zanuttigh@mail.ing.unibo.it

⁴ Facoltà di Ingegneria, DIT-Idraulica, Università di Cagliari, Piazza d'Armi - 09123 Cagliari. Tel. +39 070 6755312
E.mail: aatzeni@unica.it, punzita@unica.it

Riassunto

I casi di studio presentati forniscono degli esempi di applicazione di strutture costiere distaccate sommerse ed a cresta bassa in otto località italiane. Le condizioni ambientali in cui le opere di difesa sono state realizzate sono molto diverse tra loro. Tutte le opere descritte sono costruite in massi naturali, variano le dimensioni e le disposizioni planimetriche. Ad Alghero, Perd'e Sali, Marina di Pisa, Porto Recanati e Marina di Montemarciano le opere sono frangiflutti foranei costruiti in batterie con varchi, variano la sommergezza e le dimensioni. A Marina di Massa, Lido di Dante e Pellestrina le strutture foranee sommerse chiudono il lato verso mare di celle realizzate con pennelli emersi e sommersi. L'articolo fornisce un quadro generale che può essere utilizzato per un utile confronto critico sul funzionamento delle strutture tracimabili.

Parole chiave: frangiflutto, opere di difesa costiere, monitoraggio dei litorali protetti, frangiflutti tracimabili, evoluzione dei litorali, spiagge italiane.

Abstract

The study cases presented in this note provide examples of the application of coastal submerged and low crested detached structures at eight italian sites. The environmental conditions in which these defence structures were built varied. All the structures described are composed by rocky pieces, with different dimensions and planimetric layouts. Structures at Alghero, Perd'e Sali, Marina di Pisa, Porto Recanati and Marina di Montemarciano are contiguous detached breakwaters set in batteries with gaps, with different submergence and dimensions. At Marina di Massa, Lido di Dante and Pellestrina there are detached submerged structures that form the seaward side of cells closed by emerged and submerged groins. The present note provides a general description useful for a critical comparison of the behaviour of overtopping breakwaters.

Keywords: coastal structures, protected littoral monitoring, overtopping breakwaters, littoral evolution, italian beaches.

Introduzione

I casi di studio riportati rappresentano interventi di difesa realizzati nelle coste italiane, con opere sommerse o con cresta bassa facilmente tracimabili, a partire dal 1980.

La costruzione delle opere di difesa della costa cominciò in Italia all'inizio del XX secolo principalmente a protezione della rete ferroviaria, per molti tratti costruita sulla spiaggia emersa, ed a seguito della costruzione o ampliamento di molti porti.

L'enorme sviluppo dell'economia turistica degli anni 1960-70 di molte regioni, soprattutto adriatiche, evidenziò un fenomeno erosivo già in atto e la conseguente necessità di intervenire con opere di protezione per mantenere le spiagge che divennero un bene economico fondamentale.

Mentre le cause dell'erosione vennero indagate e studiate con metodologie scientifiche, grazie anche ai Piani di Difesa della Costa che le Regioni via via predisposero (Emilia Romagna, Marche, Lazio, Liguria, Abruzzo, ecc.) ed aggiornavano a partire dal 1970-80, la realizzazione delle opere di difesa seguì un percorso più tortuoso.

Gli interventi venivano di solito realizzati inseguendo l'emergenza senza una programmazione e senza un coordinamento tra i diversi Enti che si occupavano di protezione della costa.

Si cercarono, all'inizio degli anni '80, alternative alle scogliere foranee tradizionali, in massi naturali, ampiamente utilizzate nella fase precedente, si sperimentarono nuovi materiali e tipologie di opere.

In Emilia Romagna e nelle Marche, per la difficoltà di reperire massi naturali, furono utilizzati anche sacchi di polietilene riempiti di sabbia per formare sia pennelli sia soglie di fondo, tubi Longard, strutture prefabbricate in conglomerato cementizio armato, ecc.

I frangiflutti foranei sommersi rientrano in quegli interventi sperimentali iniziati intorno al 1980. In Italia i frangiflutti sommersi sono stati realizzati soprattutto con massi naturali, negli Stati Uniti Stauble e Tabar (2003) riferiscono invece di numerosi casi di opere realizzate con strutture prefabbricate in cemento armato.

Utilizzati per migliorare la circolazione idrodinamica evitando la formazione del tombolo, caratteristica delle barriere emerse, il loro scopo principale era quello di ridurre l'energia del moto ondoso trasmesso attraverso il frangimento delle onde più alte. Nelle prime applicazioni si era trascurata sia l'importanza della larghezza della berma (le prime berme avevano una lunghezza di 3 m assolutamente insufficiente a contenere la caduta del frangente con conseguenti erosioni lato terra delle strutture) sia la notevole influenza del sovrizzo di tempesta sulla trasmissione dell'energia ondosa. Infine erano anche sottovalutati lo spostamento dell'erosione sottoflutto e gli effetti di erosioni localizzati nei varchi ed in prossimità delle testate, quest'ultimo aspetto è trattato nel presente fascicolo da Aminti et al. (2005).

Le numerose esperienze in laboratorio eseguite su canali per onde da Aminti et al. (1983), Lamberti et al. (1985), Liberatore e Petri (1992), Smith e Kraus (1992), Beji e Battjes (1993), precisarono meglio il meccanismo di abbattimento dell'energia ondosa, il trasferimento dell'energia incidente alle alte frequenze dovuto alle interazioni non lineari nel passaggio delle onde sopra la berma, evidenziando il diverso comportamento delle onde lunghe rispetto alle onde corte. Losada et al. (1997) hanno indagato l'influenza della permeabilità delle strutture sulla dissipazione di energia e sulla generazione delle armoniche di alta frequenza.

A causa anche di numerosi insuccessi verificatisi nell'applicazione di barriere sommerse (Dean et al., 1997; Stauble e Tabar, 2003) l'attenzione di molti ricercatori si concentrò sul problema della circolazione idrodinamica indotta dalla presenza di strutture sommerse o a cresta bassa.

Le esperienze di laboratorio di Haller et al. (1997, 2002) e di Dronen et al. (2002) hanno evidenziato, all'interno di un moto molto complesso, la presenza di una "circolazione primaria" caratterizzata da correnti longitudinali e da correnti di ritorno concentrate nei varchi (*rip-currents*) ed una circolazione secondaria, in prossimità della riva, dove frangono le onde che si propagano attraverso i varchi.

Recentemente Bühler e Jacobson (2001), Brocchini et al. (2002) e Brocchini et al. (2004) hanno illustrato l'importanza, nella circolazione generale, delle grandi strutture vorticose ad asse verticale generate sia dal frangimento differenziale sulle testate delle barriere sia dai frangenti di lunghezza finita (Peregrine, 1998) nelle celle di circolazione secondaria.

La progettazione delle strutture sommerse risulta quindi fortemente influenzata dai fattori ambientali (pendenza del fondo, granulometria della spiaggia emersa e sommersa, ripidità delle onde di progetto) e da quelli progettuali (sommersione, larghezza della berma, dalla larghezza dei varchi e dalla distanza da riva), tutti fattori che interagiscono tra loro e influiscono sulla circolazione idrodinamica e quindi sull'efficacia delle opere.

I casi di studio rappresentano un'ampia gamma di situazioni per le diversità ambientali in cui sono collocati e per i risultati positivi e negativi che essi evidenziano. Essi rappresentano inoltre quegli adeguamenti progettuali realizzati nel tempo per migliorare il funzionamento delle opere fino alla tendenza attuale in cui le strutture sommerse non sono utilizzate soltanto come barriere frangiflutti ma sono collocate all'interno di sistemi di opere più complessi come si evince dai casi di Pellestrina, del Lido di Dante e Marina di Massa.

Gli otto casi presentati possono essere suddivisi in due sottogruppi principali. Nel primo gruppo vi sono Alghero, Perd'e Sali, Marina di Pisa, Porto Recanati e Marina di Montemarcano in cui le opere di difesa sono delle classi-

che barriere foranee in setti costruiti in gettate di massi naturali con varchi, variano solo la sommergenza e le dimensioni legate alla morfologia dei siti. Nel secondo gruppo rientrano Marina di Massa, Lido di Dante e Pellestrina e dove le barriere sommerse sono utilizzate con pennelli emersi e sommersi in modo da formare celle chiuse dove contenere il materiale di ripascimento. Gli interventi sono presentati seguendo un percorso geografico che parte dalla Sardegna e finisce in Alto Adriatico.

Spiaggia S.Giovanni di Alghero

Inquadramento fisico geografico e cause dell'intervento

La spiaggia della Rada di Alghero si sviluppa, con forma ad arco, nel tratto di litorale compreso fra le opere poste a difesa della bocca a mare dello Stagno di Calich a Nord e quelle portuali di Alghero a Sud (Fig. 1). Essa è caratterizzata, nella sua parte centrale, dalla presenza del piccolo promontorio di Punta del Paru (Fig. 2), in pratica costituito da un breve tratto con una altura poco sollevata leggermente proteso in aggetto, che la divide in due. In corrispondenza del predetto promontorio, fronteggiante l'Isolotto della Maddalenetta, è stato realizzato, in tempi non molto recenti, l'Ospedale Marino che, per la sua vicinanza alla riva, ha condizionato l'evoluzione della spiaggia anti-stante. Attualmente il litorale del promontorio, un tempo sabbioso, è protetto da una difesa radente realizzata a gettata.

Il tratto di litorale compreso tra la città ed il promontorio costituisce la spiaggia di Alghero, detta di S.Giovanni. Questa spiaggia è condizionata dalla presenza della strada litoranea e dai fabbricati fissi degli stabilimenti balneari che ne limitano la naturale libera evoluzione, irrigidendo il litorale.

Il tratto di spiaggia a Nord del promontorio, non presenta significative opere antropiche che ne condizionano la libera evoluzione naturale. Essa è infatti caratterizzata dalla presenza di una pineta, impiantata sui cordoni dunali del retro-spiaggia e, nella sua estremità settentrionale, da un molo guardiano, costruito a protezione della bocca a mare dello Stagno di Calich che completa l'estensione della retro-spiaggia lato terra (Fig. 1).

Secondo uno studio recente (Atzeni, 2003) la spiaggia della Rada di Alghero costituisce la zona di confluenza del flusso longitudinale medio annuo del moto ondoso ed appartiene all'ampia unità fisiografica a grande scala compresa tra Capo Argentiera e Capo Marargiu (come riportato da cartografia nautica ed I.G.M.). Tuttavia, l'effettivo trasporto di sedimenti proveniente dalla parte settentrionale verso la spiaggia si ritiene sia irrilevante a causa dei fondali molto profondi che lambiscono la riva e per il basso contenuto energetico del moto ondoso che interessa la parte di costa adiacente alla costa affacciata a Sud, oltre che per la modestissima disponibilità di sedimenti. Per le stesse cause, anche il trasporto da Sud è molto modesto.

Anche gli apporti continentali di sedimenti sabbiosi sono molto modesti in quanto il Rio Barca che li convoglia, e che è alimentato da un poco erodibile bacino idrografico di circa 400 km², porta, in condizioni di piene eccezionali, sedimenti limo-sabbiosi che vengono trattenuti dallo Stagno del Calich nel quale sbocca, prima di raggiungere il mare.



Figura 1 - Rada di Alghero.

Il parametro di flusso di energia del moto ondoso medio annuo, calcolato secondo i criteri illustrati nello studio nominato sopra, utilizzando i dati ondometrici della boa della R.O.N. (A.P.A.T., 1999-2005) al largo di Alghero, è diretto per 239° N. La normale alla corda che unisce le radici del molo guardiano, alla bocca dello Stagno di Calich, con la radice del molo di sottoflutto del Porto di Alghero è orientata per 230° N. Pertanto il regime di trasporto dei sedimenti della spiaggia da parte del moto ondoso è prevalentemente trasversale.

Il sedimento della spiaggia emersa è costituito da sabbia fine che risulta soggetta al trasporto eolico dei venti del sito. Dai dati anemometrici, registrati presso la vicina stazione meteorologica di Fertilia, risulta un regime di venti dominanti di NordOvest (Maestrale), seguiti, nell'ordine da quelli di terra di NordEst (Grecale) e da quelli di mare di SudOvest (Libeccio). I venti di NordEst, nei confronti dei quali la spiaggia è ben schermata, non producono una deflazione sensibile dei sedimenti di spiaggia. In ogni caso il trasporto verso mare non determina una perdita reale, ma soltanto un affidamento dei sedimenti al regime di trasporto marino. Viceversa i venti di Maestrale e quelli di Libeccio, a cui la spiaggia ed i suoi sedimenti risultano più direttamente esposti, con la loro deflazione, producono una effettiva perdita.

Pur senza poter, in questa sede, effettuare un bilancio, appare evidente che le spiagge della Rada di Alghero sono tendenzialmente soggette ad una perdita dei loro sedimenti e che quindi qualunque intervento nella zona può causare alterazioni negative del loro regime.

Il primo e consistente intervento che può avere influenzato il regime del litorale sabbioso è stato l'ampliamento del Porto di Alghero, realizzato negli anni '70 del novecento, con lo spostamento della testata del molo di sopraflutto dal fondale di 5 m a quello di 10 m e con la realizzazione di un nuovo molo di sottoflutto radicato più a Nord del vecchio molo.

Subito dopo l'ampliamento del porto si è evidenziato in maniera vistosa un arretramento della linea di riva del Lido di S.Giovanni. Come risulta dalla cartografia e dagli appositi rilievi, è risultato che la linea di riva, in corrispondenza del tratto settentrionale di tale spiaggia, in prossimità delle alture di Punta del Paru, era arretrata di circa 20 m a partire dal periodo dell'ampliamento portuale fino al 1981 (Fig. 2).

Le cause dell'arretramento non sono state ancora dimostrate, ma sono state fatte alcune ipotesi plausibili una delle quali (Musino, 2003) attribuisce l'erosione alle modifiche delle correnti indotte dal moto ondoso per effetto dei lavori di ampliamento del porto. Secondo questa ipotesi, a fronte di un precedente regime di correnti indotte dal moto ondoso dirette lungo costa verso Nord, l'introduzione della nuova infrastruttura portuale avrebbe prodotto una inversione verso Sud nella zona compresa tra il promontorio di Punta del Paru e il porto. Tale inversione ha favorito il trasporto dei sedimenti dalla zona dello stabilimento balneare verso la radice del molo di sottoflutto del porto, come risulta dal confronto dei rilievi cartografici disponibili (Fig. 2).

Una seconda ipotesi fa cenno al fatto che l'allungamento in mare del molo di sopraflutto abbia ridotto considerevolmente (Musino, 2003) l'apporto dei sedimenti convogliati dal flusso longitudinale proveniente da Sud, di cui si è detto sopra. Manca però, in questo caso, una valutazione, peraltro non facile.

Non risulta che il progettista delle opere di difesa abbia basato la sua scelta progettuale sulla verifica delle cause dell'arretramento.

Tipo di intervento attuato.

Aspetti paesistici

L'arretramento della linea di riva in corrispondenza del tratto settentrionale della spiaggia di S.Giovanni ha portato alla realizzazione di un intervento di difesa del litorale. L'intervento scelto, progettato dall'Ufficio del Genio Civile per le Opere Marittime della Sardegna, è stato di tipo rigido, composto da setti di scogliere distaccate dalla riva e paralleli ad essa. Nella Figura 2 è riportata la sezione tipo di progetto della scogliera. La larghezza al coronamento di progetto era di 3,5 m e la quota a +0,70 m s.l.m.m., la distanza dalla riva era di circa 150 m.

L'opera progettata era composta da otto segmenti disposti alternativamente su due diversi allineamenti paralleli tra loro, distanziati di 18,5 m, che seguono pure parallelamente l'andamento della linea di riva nella condizione di massima erosione. La profondità di imbasamento dei frangiflutti risultava variabile tra 3 e 4,5 m, l'apertura dei varchi fra le barriere successive, valutata perpendicolarmente ai predetti allineamenti, era di 22,8 m (Fig. 2).

La realizzazione dell'opera è avvenuta negli anni 1981÷1982. Successivamente, verso la fine del 1986, è stato realizzato, in proseguimento dell'estremità meridionale della batteria di scogliere descritta, un nono segmento delle stesse dimensioni e sezione dei primi otto, ma più staccato dagli altri e orientato in modo leggermente diverso (Fig. 2). A parte piccoli assestamenti, l'opera non ha subito modificazioni durante la fase di esercizio, anche perché fon-

data su un fondale prevalentemente composto da rocce calcaree.

Per effetto della modesta quota del coronamento delle scogliere sul livello del mare, che coincide con la quota della berma della spiaggia emersa, l'opera può essere considerata di tipo parzialmente tracimabile, come risulta dalla valutazione del sormonto ottenuto dal clima ondoso della boa della R.O.N. (A.P.A.T., 1999-2005) al largo di Alghero i cui dati sono stati elaborati nelle trasformazioni verso riva mediante il modulo *NSW* (*Near Shore Wave*) del codice commerciale di calcolo numerico *Mike21*. Il criterio di tracimazione è stato assunto seguendo lo schema riportato nel riquadro della Figura 2. Il *run-up* è stato calcolato mediante la formula empirica di Losada e Chimenez-Curto (1976 a, b) utilizzando come altezza dell'onda incidente l'altezza significativa estratta nella posizione centrale delle opere di difesa, alla profondità di 5 m. Risulta dal calcolo che, considerando un *set-up* ondoso di 0,4 m, la frequenza del sormonto, delle onde significative è contenuta nel 0,12% delle osservazioni.

Dal punto di vista paesaggistico l'opera, grazie anche alla modesta quota del coronamento che, come si è detto, coincide con la quota della berma, presenta un modesto impatto in quanto non interrompe la visuale dell'orizzonte marino neppure per le persone sedute sull'arenile.

Monitoraggio

Immediatamente prima della realizzazione delle opere di difesa (1981) sono stati effettuati i rilievi batimetrici e della linea di riva. Durante l'intervento è stata rilevata periodicamente la linea di riva ad opera della direzione dei lavori (rilievi del 1984 e 1985). Successivamente, nel 1986 è stato eseguito un rilievo batimetrico dell'intera zona dell'intervento, inoltre sono stati eseguiti alcuni campionamenti di sedimenti ed esplorazioni subacquee (Spano, 1986). Alcune delle linee di riva sono riportate nella Figura 2 assieme a quelle ricavate dalla cartografia I.G.M. alla scala 1:25000 e dalla Carta tecnica della Sardegna alla scala 1:10000.

Dalle esplorazioni subacquee risulta che nella zona lato mare il fondale è prevalentemente costituito da rocce di tipo calcareo, i sedimenti sono presenti solo in alcune nicchie ben riparate delle rocce. Dalle analisi granulometriche risulta che i sedimenti sono quasi esclusivamente composti da sabbie fini e molto fini.

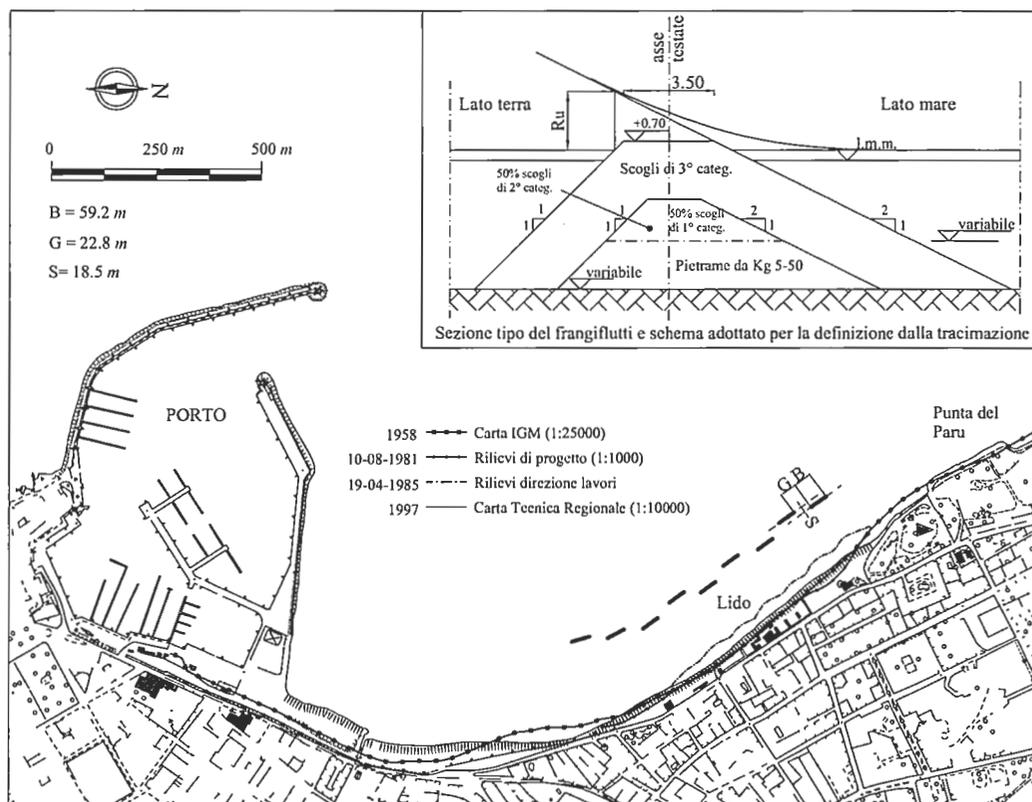


Figura 2 - Opere di difesa parallele della spiaggia di San Giovanni.

Il confronto dei rilievi batimetrici del 1981 con quelli del 1986 ha indicato che nella zona protetta dalle opere di difesa si sono accumulati circa 14500 m³ di sedimenti, pari a circa 23 m³/m di spiaggia protetta.

Il rilievo del 1985 mostra la posizione più avanzata della linea di riva, specialmente nella zona centrale (Fig. 2). La linea di riva del 1997, tratta dalla suddetta Carta tecnica, mostra un certo arretramento rispetto ai rilievi del 1985 e del 1986. Però non sono disponibili i dati di eventuali perdite verso il largo. A tutt'oggi sembra che l'arretramento non stia più progredendo.

Conclusioni

Dai pochi dati disponibili appare che l'intervento protettivo del Lido di S. Giovanni di Alghero abbia sortito risultati di riequilibrio stabili e soddisfacenti, nonostante che dal 1986 al 1997 si sia verificato un modesto arretramento della linea di riva. Arretramenti più marcati si sono avuti a Nord dell'intervento, presso Punta del Paru, ove, come si è detto, è stato recentemente realizzata un'opera di difesa radente.

La particolare disposizione planimetrica degli elementi di frangiflutti della batteria, cui può essere dovuto anche il buon esito dell'intervento, merita di essere approfondita mediante studi idrodinamici mirati a stabilire il ruolo del loro disassamento rispetto alla lunghezza dei frangiflutti ed all'ampiezza dei varchi.

Spiaggia di Perd'e Sali

Inquadramento dell'area

Da uno studio sul regime litoraneo della spiaggia di Perd'e Sali eseguito per conto della Regione Autonoma della Sardegna (R.A.S., 1991) emergono i seguenti punti salienti.

1. la spiaggia è frutto dell'erosione della scarpata continentale composta da una miscela di sedimenti grossolani (ghiaia e ciottoli) cementati con argille limose delle alluvioni del quaternario. La sabbia è presente in piccolissima proporzione e nella frazione fina e finissima;
2. nell'area continentale l'alluvione è impostata su una formazione di vulcaniti emergenti fino ai promontori che delimitano la spiaggia, con formazioni a falesia e a piattaforme di abrasione;
3. i fondali marini costieri sono ricoperti in maniera discontinua da un sottile strato (dell'ordine dei 50 cm) di sedimenti sabbiosi, di granulometria fine e finissima, distribuiti su un substrato di rocce vulcaniche che frequentemente emergono;
4. dall'esame della cartografia storica (I.G.M., 1985) emerge che la linea di riva, a partire già dalla fine dell'ottocento fino agli anni sessanta del novecento, è mediamente arretrata di circa 0,75 m all'anno;
5. negli anni sessanta ha avuto inizio la realizzazione di un insediamento turistico che ha occupato la fascia costiera fino al limite della spiaggia, con le opere murarie delle recinzioni che hanno incorporato la scarpata continentale;
6. dalla realizzazione delle suddette recinzioni si è verificata una accelerazione del processo erosivo della debole spiaggia, anche a causa del mancato rifornimento di cui la spiaggia godeva per effetto dell'erosione della scarpata continentale.

All'inizio degli anni ottanta ha avuto luogo la realizzazione del piccolo porto turistico di Perd'e Sali con molo di sopraflutto radicato all'omonimo promontorio, all'estremità Nord della spiaggia. In poco tempo, la presenza del porto ha modificato ulteriormente l'equilibrio del litorale nella zona adiacente al molo di sottoflutto, tendendo a traspostare i sedimenti sabbiosi verso Nord a ridosso di tale molo portuale, contribuendo così ad aggravare ulteriormente la situazione.

Alla fine degli anni novanta è stato redatto il progetto di protezione della spiaggia con sei segmenti di frangiflutti longitudinali affioranti la cui realizzazione è avvenuta in due tempi. Nel 1997 sono stati realizzati i primi due segmenti settentrionali della batteria e per un anno dopo la costruzione è stato eseguito un monitoraggio (R.A.S., 1999). Nel 1999 l'intervento progettato è stato ultimato e a cavallo tra il 2000 ed il 2001, ancora per un anno, è stata eseguita una seconda campagna di monitoraggio (R.A.S., 2001).

Monitoraggio

I due programmi di monitoraggio hanno riguardato:

- i.* rilievi ondometrici lato mare e lato terra dei frangiflutti;
- ii.* rilievi batimetrici e della linea di riva con frequenza almeno quadrimestrali;
- iii.* campionamenti di sedimenti nelle zone a tergo di ogni frangiflutti e a riva.

Nella Figura 3 è riportata la planimetria della fascia costiera interessata dall'intervento e sono evidenziate le posizioni degli ondometri e delle stazioni di campionamento dei sedimenti.

Nel corso della "Ricerca sulla idrodinamica e morfodinamica di spiagge protette da opere trascinabili" (P.R.I.N. 2001) l'Unità Operativa di Cagliari ha eseguito un ulteriore monitoraggio, nell'ambito del quale sono stati compiuti, entrambi nel 2002, un nuovo rilievo topo-batimetrico ed un altro anno di rilievi ondometrici nelle zone esterna ed interna alle opere di difesa. La posizione degli ondometri e gli strumenti impiegati sono stati gli stessi dei precedenti rilievi.

Rilievi ondometrici

I rilievi ondometrici sono stati eseguiti con ondometri rilevatori di pressione alloggiati in piastre depositate sul fondo, con la presa di pressione ubicata sulla superficie superiore della piastra. Le registrazioni sono state programmate per un campionamento ogni sei ore, frequenza di misura 2 Hz, durata del campionamento 17' 4". L'intervallo di registrazione così scelto non è molto diverso dal valore *standard* suggerito (20') per la misura del moto ondoso.

Il limite dei trasduttori di pressione ubicati sul fondo marino per la misura del moto ondoso risiede nella non linearità della distribuzione delle pressioni nel corpo idrico animato da tale moto.

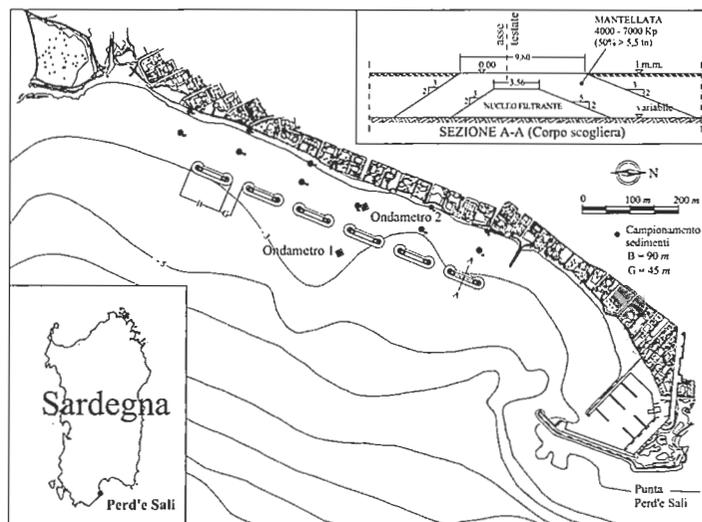


Figura 3 - Opere di difesa parallele della spiaggia di Perd'e Sali.

Nel presente monitoraggio gli ondometri sono stati ubicati sui fondali di profondità 4 m e 2 m, rispettivamente quello lato mare delle scogliere e quello lato terra (Fig. 3). Con questi fondali i due ondometri sono in grado di "sentire" le componenti ondose di periodo non inferiore a $T=2\sqrt{\rho d/g}$ che, per l'ondametro lato mare delle scogliere corrisponde al periodo minimo $T=2,26$ s (frequenza massima 0,40 Hz) e per l'ondametro lato terra al periodo minimo $T=1,60$ s (frequenza massima 0,62 Hz).

Nell'analisi spettrale eseguita per ogni registrazione, in considerazione del fatto che le frequenze superiori a 0,40 Hz non sono rilevate dall'ondametro lato mare, anche in vista dell'utilizzo dei dati per il calcolo dell'indice di agitazione, si è troncato lo spettro al limite superiore di 0,4 Hz anche per l'analisi del segnale ondoso dell'ondametro lato terra.

Gli strumenti, programmati come sopra indicato, hanno un'autonomia teorica di circa 45 giorni sia per quanto riguarda la capacità di memoria che per quanto riguarda l'energia delle batterie.

Nelle tre campagne di monitoraggio sono andati persi diversi dati sia a causa delle difficoltà di scaricare i dati alle scadenze previste, sia a causa dei ripetuti insabbiamenti dei corpi morti, specialmente quello lato mare. Per queste cause le osservazioni rilevate lato mare sono risultate pari a 682, corrispondenti al 47% delle osservazioni possibili in un anno, mentre quelle lato terra sono risultate pari a 857, corrispondenti al 59% delle osservazioni annuali. Le coppie di dati utili, osservati contemporaneamente ai due ondometri, sono risultate pari a 556, corrispondenti al 38% delle osservazioni di un anno.

Il calcolo dello spettro di frequenza del moto ondoso è stato eseguito mediante l'impiego dell'equazione seguente, integrata alle differenze finite:

$$S_{\eta}(f) = 2 \int_0^{\infty} \left(\frac{chkd}{\rho g} \right)^2 R_p(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau$$

ove il fattore $(chkd/\rho g)^2$ permette la trasformazione dello spettro di pressione in spettro di livello della superficie libera. Nella formula il termine $R_p(\tau)$ è la funzione autocorrelazione della pressione.

Nella Figura 4 è riportato, in funzione del periodo di picco dello spettro lato mare, l'indice di agitazione, ottenuto dai rilievi eseguiti tra il mese di dicembre del 2002 ed il mese di aprile dell'anno successivo e riferito alle altezze significative lato mare non inferiori a 0,5 m. Detto coefficiente è definito come rapporto tra l'altezza dell'onda significativa trasmessa (misurata dall'ondametro lato terra) e l'altezza dell'onda incidente (misurata dall'ondametro lato mare). Come mostra la figura gli indici di agitazione sono molto dispersi e rendono problematico un confronto con le formule di tipo sperimentale esistenti.

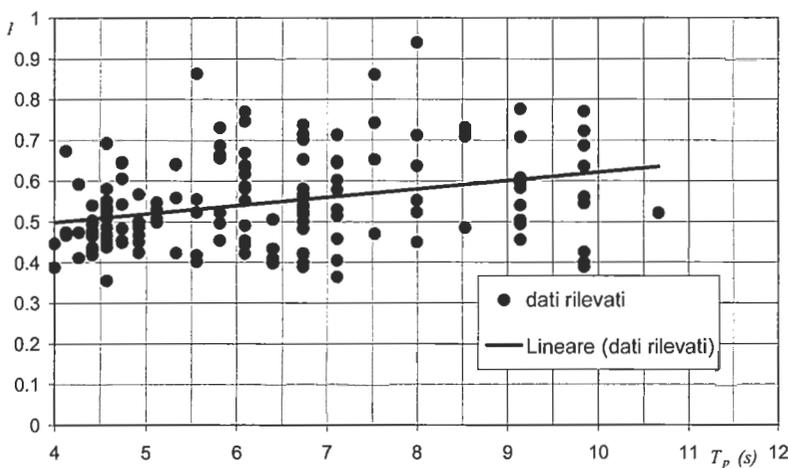


Figura 4 - Indice di agitazione ottenuto dai rilievi ondametrisi lato mare e lato terra delle opere di difesa in funzione del periodo di picco degli spettri di frequenza lato mare.

Rilievi batimetrici

I rilievi batimetrici effettuati durante le due fasi di monitoraggio precedenti e nel corso della ricerca P.R.I.N. 2001 di cui sopra sono stati eseguiti con l'impiego di un ecoscandaglio idrografico *Raytheon DE 719 C* capace di fornire una precisione teorica pari allo 0,5%, tale cioè da leggere, ad esempio, la profondità di 10 m con una precisione superiore ai 5 cm. Naturalmente, all'atto pratico, all'errore strumentale si sovrappongono altre cause d'errore quali quella dovuta alla variazione della densità dell'acqua e quella causata dall'oscillazione del natante.

Allo scopo di minimizzare gli errori dovuti alla variazione di densità, l'ecoscandaglio è stato tarato sistematicamente all'inizio e al termine di ogni giornata di rilievo. Per minimizzare gli errori dovuti alle oscillazioni dell'imbarcazione, i rilievi sono stati eseguiti in ore di calma di vento e di moto ondoso.

Per ogni punto scandagliato, le posizioni planimetriche dell'ecoscandaglio e della linea di riva sono state rilevate contemporaneamente a mezzo di una stazione topografica totale *Geotronics 422 LR*, che consente un errore planimetrico non superiore a 50 cm, e con un sistema G.P.S. differenziale che opera con la stessa precisione.

Nel rilievo batimetrico, la posizione letta alla stazione topografica veniva trasmessa via radio all'imbarcazione ove l'operatore poteva intervenire nella correzione della rotta in modo da ottenere sempre un profilo batimetrico rettilineo.

Dal confronto dell'ultimo rilievo batimetrico, effettuato nel 2002, con il rilievo del 2000, effettuato dopo un anno dall'ultimazione dei lavori, risulta che i volumi accumulati nelle zone lato terra e lato mare delle scogliere ammontano rispettivamente a circa 5000 m³ e 4000 m³, corrispondenti ad accumuli medi mensili rispettivamente di circa 7 mm e 5,5 mm.

Campionamenti dei sedimenti e analisi granulometriche

Durante le campagne di monitoraggio del 1999 e del 2000/01, nella zona a ridosso delle scogliere sono state individuate dodici posizioni su cui ripetere successivi campionamenti dei sedimenti: sei stazioni distribuite nel fondale marino e sei lungo linea di riva. L'ubicazione dei prelievi è stata controllata con il G.P.S. differenziale. I campionamenti nel fondale marino sono stati effettuati con la benna *Van Veen* con superficie di campionamento di forma rettangolare di 250 cm². Non è stato sempre possibile effettuare campionamenti nei punti previsti a causa della variabilità del fondale che non presenta un uniforme letto di sabbia, ma risulta costituito da nicchie rocciose che a volte sono state trovate piene di sabbia, a volte vuote. Anche i campionamenti sulla linea di riva sono stati eseguiti superficialmente e nella sua posizione all'istante del prelievo, ma sempre secondo lo stesso allineamento.

Complessivamente sono stati prelevati 35 campioni di cui sono state eseguite le analisi granulometriche. I risultati delle analisi possono sintetizzarsi come segue:

- nella zona dei fondali intermedi tra la linea di riva e le opere di difesa la sabbia presenta una distribuzione granulometrica uniforme (ben assortita) definibile come sabbia fine o molto fine secondo la *Wentworth Classification*;
- lungo la linea di riva, nelle zone laterali dell'intervento protettivo, i campioni prelevati presentano le stesse caratteristiche dei sedimenti di cui al precedente punto, mentre nella zona centrale si ha una miscela composta da sabbie fini e molto fini, ghiaia e pietrisco con diametri massimi dei granuli fino a 4mm, come risultava anche prima dell'intervento di protezione.

Conclusioni

Come mostra la Figura 4 dell'indice di agitazione ottenuto dai rilievi ondametrici, le opere di difesa parallele eseguite a protezione della spiaggia di Perd'e Sali hanno fornito esiti non sempre soddisfacenti ed omogenei.

In generale l'agitazione ondosa raggiunge spesso ancora il limite lato terra della spiaggia, interessando i muretti di recinzione lato mare dei giardini privati. Una maggiore efficacia protettiva potrebbe ottenersi aumentando la quota del coronamento dei frangiflutti, ma tale aumento non è ritenuto in linea con le esigenze di tipo paesistico.

L'opera di difesa realizzata ha avuto il vantaggio di stabilizzare in parte il tratto di litorale protetto, aumentandone, anche se di poco, il volume di sedimenti. Occorre osservare però che in corrispondenza della parte meridionale della spiaggia, oltre l'estensione della serie di opere di difesa, si è verificato un sensibile arretramento della linea di riva, valutabile mediamente in 3 ÷ 5 m.

Marina di Massa

Inquadramento dell'area

Il litorale di Marina di Massa il più ampio tratto di spiaggia soggetta ad erosione della Toscana. Le spiagge, alimentate dagli apporti solidi del Fiume Magra, avevano mostrato una continua tendenza all'avanzamento fino alla fine del 1800 ma già dai primi decenni del secolo scorso, è iniziato un generalizzato arretramento.

Il forte impatto sull'economia locale provocato dall'erosione delle spiagge ha spinto le amministrazioni locali a seguire con attenzione i processi in corso; gli effetti del sistema di difesa sono stati documentati da rilievi eseguiti con regolarità fino dal 1941. Nel 1999 e nella primavera del 2004 sono stati eseguiti due nuovi rilievi di grande dettaglio, che hanno permesso di valutare l'evoluzione del litorale, di quantificare i processi in atto e di definire le caratteristiche granulometriche dei sedimenti su tutta l'unità fisiografica (Cipriani et al., 2001).

Il clima ondoso è ben noto da quando è stato installato l'ondametro di La Spezia della Rete Ondametrica Nazionale (A.P.A.T., 1999-2005), che è ubicato in un tratto di mare esattamente ad Est della zona di studio e che risulta perfettamente idoneo a rappresentare il clima ondoso. Come si può osservare le mareggiate più intense provengono da un settore molto stretto e centrato sulla direzione 240° N (si veda il riquadro in Figura 5).

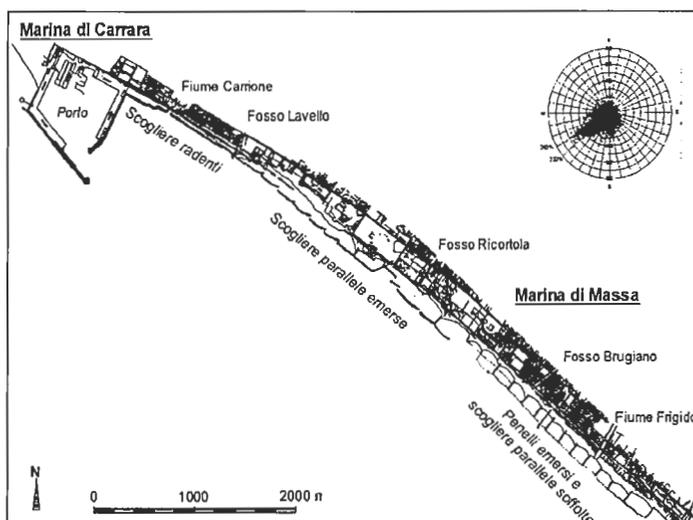


Figura 5 - Opere di difesa delle spiagge di Marina di Massa.

Il trasporto solido prevalente è diretto da Nord verso Sud ed i processi erosivi sono conseguenti alla forte riduzione degli apporti del Fiume Magra. La situazione si è ulteriormente aggravata con la costruzione del Porto commerciale di Marina di Carrara. Inizialmente il tratto soggetto ad erosione era limitato alle spiagge prossime al porto, ma successivamente sono stati interessati tratti sempre più estesi fino a raggiungere quasi 8 km di lunghezza.

Per contrastare l'erosione delle spiagge, che già mostravano la loro vocazione turistica, furono costruite a partire dal 1930 le prime scogliere radenti a Sud del porto a protezione di 1200 m di strada litoranea. Un più organico progetto di difesa del litorale fu redatto nel 1941 e prevedeva cinque scogliere parallele emerse lunghe ciascuna 180 m, distanti da riva da 60 a 100 m, che in buona parte proteggevano le scogliere radenti precedentemente realizzate dimostratesi insufficienti. Più a Sud furono costruite altre tre scogliere emerse, lunghe 350 m e con le estremità prolungate oltre le testate della barriere contigue, fino a sovrapporsi per uno sviluppo di 20 m, per limitare la penetrazione del moto ondoso attraverso i varchi.

Dai rilievi eseguiti per il progetto delle opere di difesa la spiaggia si presentava con un profilo piuttosto ripido fino alla profondità di 1,5 - 2 m e con pendenza molto regolare pari a circa il 1,5%, sul tratto più al largo.

La profondità di posa delle scogliere progettate nel 1941 era compresa fra 2 e 2,5 m. I lavori furono completati, con qualche modifica di carattere dimensionale e strutturale, nei primi anni '50. A quella data il sistema di protezione si estendeva per circa 5 km, ovvero dal porto fino ad oltre la Foce del Torrente Ricortola (Fig. 5). I fenomeni erosivi cominciarono a manifestarsi anche nel litorale a Sud non protetto che, dopo alcuni interventi sperimentali con opere isolate (piattaforme isola e scogliere parallele costruite a 20 m di distanza dalla riva), fu oggetto degli interventi nel periodo 1980-83 con 13 pennelli emersi distanti 180 - 200 m e lunghi 200 m, che arrivavano con la testata alla profondità di circa 4 m. Pochi anni dopo venne costruita una barriera sommersa parallela a riva che univa le testate dei pennelli creando un sistema di difesa di 12 celle. L'insieme delle protezioni del litorale di Marina di Massa come appare attualmente è riportato in Figura 5.

Tratto protetto da barriere parallele emerse (dalla Foce del Lavello alla Foce del Ritorcola)

Le barriere parallele emerse in massi naturali hanno, secondo il progetto, una berma con larghezza dell'ordine di 3 m ed una quota di sommità di 2 m s.l.m.m., ma hanno subito nel tempo consistenti assestamenti e da molti anni la quota di berma risulta compresa fra 0,50 e 1,20 m s.l.m.m. e quindi risultano ampiamente tracimabili anche in caso di mareggiate ordinarie.

Lungo il tratto protetto da barriere emerse la linea di riva ha lentamente continuato ad arretrare nel tratto settentrionale mentre, dopo la costruzione di un pennello a Nord della Foce del Ritorcola, si è verifi-

cato un sensibile avanzamento su un tratto di 500 m a Nord del pennello stesso. Tale comportamento può essere spiegato dal fatto che la presenza dei varchi di limitata ampiezza (dell'ordine del 10% delle lunghezze delle barriere) fa sì che queste barriere segmentate si comportino come un'unica barriera continua. Quando le portate di tracimazione raggiungono valori elevati si sviluppa all'interno della zona protetta una corrente litoranea che trasporta verso Sud i sedimenti di spiaggia che vengono trattenuti dal pennello. I profili di spiaggia presentano un accumulo di sabbia immediatamente a tergo delle scogliere mentre la maggiore profondità si ha al centro della zona protetta (Fig. 6). La corrente di ritorno attraverso i varchi ha causato forti erosioni locali (Aminti et al., 2005).

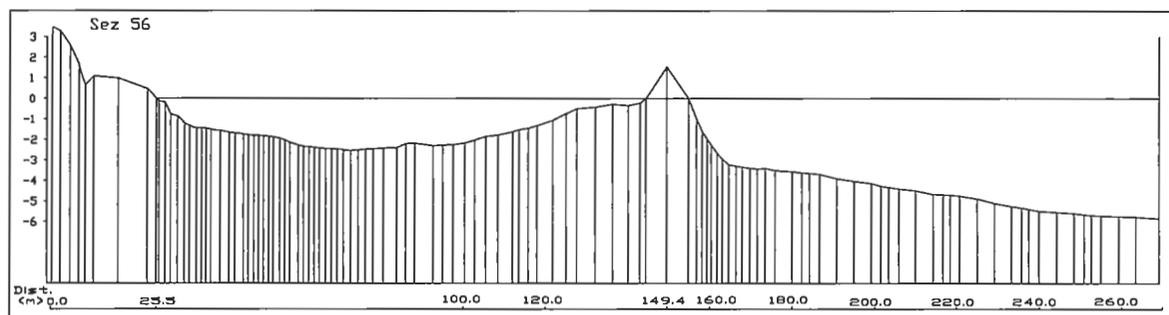


Figura 6 - Profilo di spiaggia nella zona protetta da barriere parallele emerse.

Tratto meridionale protetto da pennelli e barriera sommersa

La barriera sommersa, che raccorda la sommità dei pennelli, costruiti nel tratto più lontano dal porto, fu realizzata dopo il completamento dei pennelli ed aveva la berma di sommità appena sopra il livello del mare. Successivamente, per assestamenti naturali e danni conseguenti alle mareggiate, la sommità si è abbassata ed è attualmente ad una quota mediamente più bassa di circa 50 - 80 cm (Fig. 7).

La berma aveva una larghezza di progetto di 5 m con paramenti a pendenza 1:2. Attualmente il paramento lato mare ha una pendenza minore, a causa dei frequenti danneggiamenti e successivi rifiorimenti.



Figura 7 - Tratto di litorale difeso da pennelli e barriera sommersa.

Quando furono costruite queste opere di difesa, la linea di riva in qualche tratto era arretrata fino ad arrivare a pochi metri dalla strada litoranea ed erano stati demoliti diversi stabilimenti balneari presenti. Dai rilievi di prima pianta del progetto delle opere di protezione, eseguito dall'Ufficio del Genio Civile per le Opere Marittime di Genova, la scogliera sommersa era impostata ad una profondità variabile da 3,5 a 4,5 m, corrispondente alla profondità in testata dei pennelli. Al centro di ogni cella erano previsti varchi, larghi 10 m, con profondità 1 m circa, tali da consentire l'uscita di mezzi di salvataggio.

Conclusioni

Il sistema di protezione non solo è risultato idoneo ad arrestare l'arretramento della linea di costa, ma negli ultimi 20 anni si è osservato un generale avanzamento che ha raggiunto localmente anche i 50 m; solo in un limitato tratto sul limite settentrionale sono stati necessari interventi di ripascimento (Aminti, Pelliccia e Pranzini, 2002).

La linea di riva ha assunto in tutte le celle la tipica conformazione ad arco, è più avanzata in prossimità dei pennelli rispetto al centro della cella (Fig. 7). La profondità nella zona protetta attualmente non supera i 2 m ed il paramento lato terra delle barriere risulta quasi interamente insabbiato (Fig. 8).

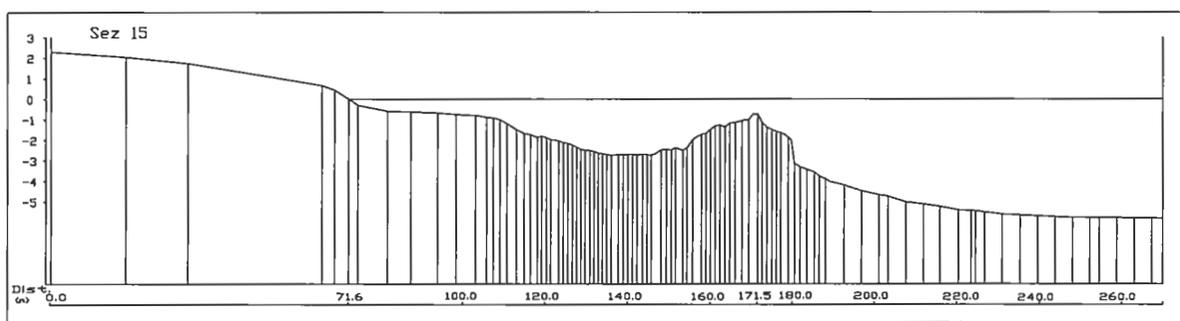


Figura 8 - Profilo di spiaggia nella zona protetta da barriere sommerse.

La dimensione dei sedimenti sulle spiagge protette si è modificata nel tempo con un sensibile incremento della frazione di sabbia fine.

Marina di Pisa

Inquadramento dell'area

Marina di Pisa è una cittadina sorta alla foce dell'Arno alla fine dell'ottocento, in un periodo in cui la foce aveva raggiunto il suo massimo protendimento e stava iniziando un sistematico arretramento dell'intero delta.

Sul lato Nord della foce è presente un'area non antropizzata, attualmente Parco Regionale, che non è stata protetta. In questa zona, su circa 3 km si è verificato un arretramento medio di oltre 500 m, con un valore massimo alla foce di 800 m negli ultimi 150 anni.

Caratteristiche dell'intervento di difesa attuato ed effetti sul litorale

Il litorale di Marina di Pisa è stato difeso per una lunghezza di 2,5 km, da una scogliera radente che è stata costruita nella prima metà del secolo scorso per tratti successivi a partire dalla Foce dell'Arno. Negli anni '60 fu costruito, a distanza di 80 - 100 m dalla scogliera radente, un sistema di dieci barriere parallele lunghe da 200 a 250 m ciascuna, con varchi di circa 15 m.

Tali barriere hanno raggiunto lo scopo di proteggere l'abitato di Marina di Pisa, ma hanno anche determinato una forte asimmetria della foce (Fig. 9). I processi erosivi sono proseguiti sui fondali; dai rilievi dei profili trasversali alla costa si evince che nella zona protetta i fondali raggiungono profondità massime intorno ai 2 - 3 m, mentre esternamente alle opere si raggiungono i 6 - 7 m, determinando dislivelli fra i due lati delle scogliere che superano i 3 m, (Fig. 10).

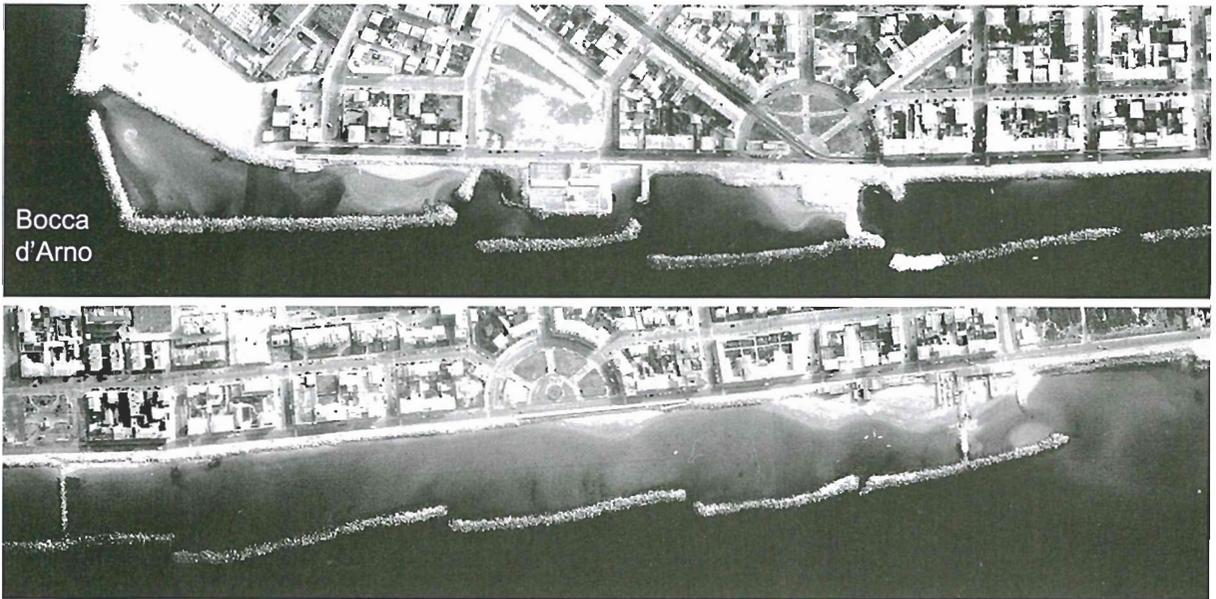


Figura 9 - Le difese costiere di Marina di Pisa.

A causa dell'approfondimento dei fondali le scogliere parallele hanno avuto necessità di continue manutenzioni e rifiorimenti, che hanno richiesto, in circa 50 anni, la posa di materiale per un volume da 2 a 3 volte quello utilizzato per la costruzione (Commisso, 2001).

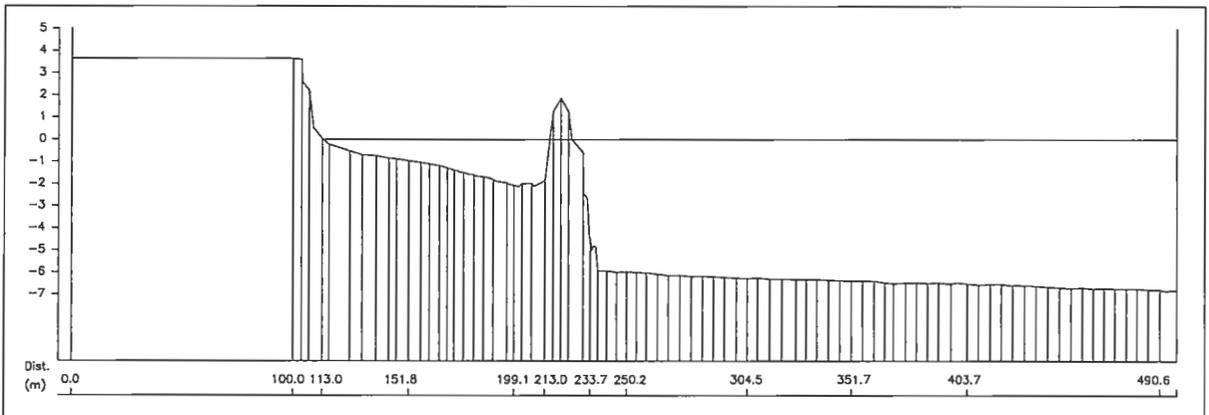


Figura 10 - Profilo tipico dei fondali nel tratto di mare antistante le difese costiere di Marina di Pisa.

Conclusioni

La quota di sommità delle scogliere è fortemente variabile in funzione delle manutenzioni eseguite: essa va da 3,8 m s.l.m.m., per opere recentemente sistemate, a circa 2 m s.l.m.m. per le scogliere dove da molti anni non si eseguono lavori di manutenzione (Fig. 11). Ne consegue che alcune scogliere sono ampiamente tracimabili e che in corrispondenza dei varchi, dove si concentrano correnti di ritorno, si sono verificati importanti canali di erosione al fondo. Per evitare instabilità delle testate questi sono stati parzialmente chiusi con soglie sommerse.



Figura 11 - Scogliera radente e scogliere distaccate parallele a Marina di Pisa.

Scossicci di Porto Recanati

Inquadramento dell'area

La spiaggia antistante la località Scossicci di Porto Recanati (MC) si trova nell'Adriatico centrale lungo la costa meridionale marchigiana (a Sud del promontorio del Monte Conero) ed è rivolta verso il mare aperto con ortogonale alla riva diretta verso i 66° N (Fig. 12).

Il tratto di litorale in questione è pressoché rettilineo, lungo circa 12 km, compreso fra i delta di foce del Fiume Musone a Nord e del Fiume Potenza a Sud (Fig. 12) e costituisce una singola unità fisiografica ristretta, che a sua volta rientra nella più ampia unità fisiografica di costa bassa (lunga circa 50 km) estesa dall'estremità meridionale del promontorio del Monte Conero (occupata dalle strutture del Porto di Numana) fino al piccolo promontorio, costituito dal tratto costiero leggermente proteso in aggetto, delle colline litoranee picene comprese fra Pedaso e Grottammare.

Già all'inizio del secolo scorso i suddetti apparati di foce dei fiumi Musone e Potenza erano solo debolmente sporgenti, ma oggi, dopo il progressivo arretramento avvenuto nel corso degli ultimi decenni, si presentano praticamente in allineamento con l'intera costa comunale di Porto Recanati, rendendo poco riconoscibile la delimitazione della predetta unità fisiografica ristretta.

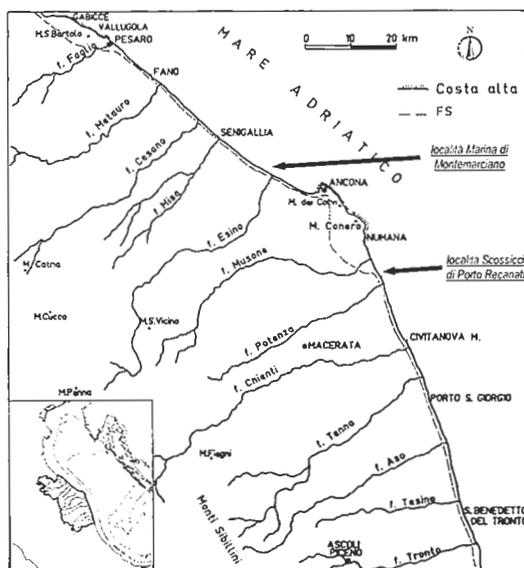


Figura 12 - Planimetria della regione Marche con localizzazione dei siti costieri presi in esame.

Il tratto di costa descritto in questo caso è quello compreso fra gli abitati della città di Porto Recanati e quello della località di Scossicci (Fig. 13), in particolare quello della zona dell'ex stabilimento Montecatini, funzionante fino ai primi anni '70 per la produzione di concimi chimici.

Nella zona sono presenti, praticamente a ridosso della spiaggia, tratti della strada litoranea, attrezzature turistico-balneari e ricreative, infrastrutture abitative di recente e recentissima costruzione (qualcuna tuttora in corso) ed appunto l'imponente vecchio edificio dell'ex stabilimento Montecatini realizzato nelle tipiche forme a volta su progetto dell'arch. Pier Luigi Nervi, in abbandono da anni ed attualmente in stato di degrado, probabilmente destinato ad un recupero strutturale per diventare un futuro sito di archeologia industriale.

Il tratto di spiaggia esaminato è lungo circa 1 km ed è compreso fra le vecchie scogliere emerse distaccate poste a difesa del lungomare del quartiere settentrionale dell'abitato di Porto Recanati ed altre, ormai insabbiate, poste più a Nord a protezione della strada litoranea antistante la località di Scossicci. Attualmente la spiaggia in questione, come d'altronde l'intero litorale comunale, è completamente irrigidita dalla presenza di opere costiere di protezione di varia tipologia. In particolare nel tratto esaminato troviamo barriere sommerse distaccate, diversi pennelli ed alcuni vecchi tratti di difese radenti. La situazione delle relative opere costiere di difesa, aggiornata all'anno 2000 è illustrata nella Figura 13.

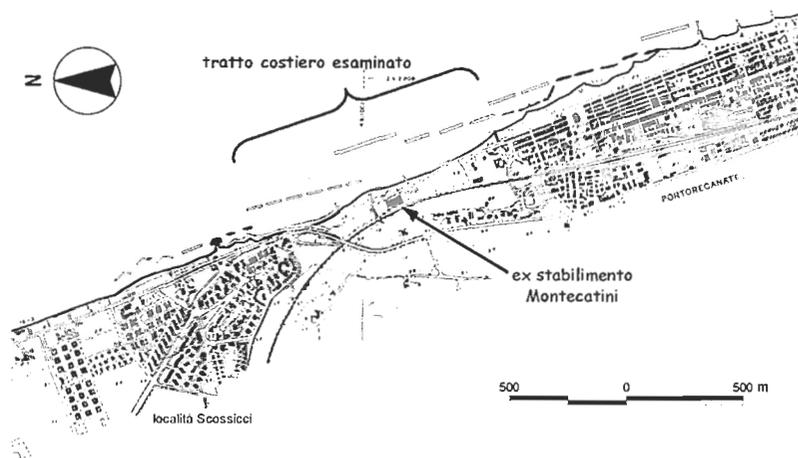


Figura 13 - Planimetria dell'area costiera indagata e dei tratti circostanti. La base cartografica terrestre è del novembre 1985, linea di costa e schemi delle opere marittime sono del 1999 e 2000.

Le caratteristiche granulometriche dei sedimenti originariamente presenti sulla spiaggia, nelle condizioni naturali ancora inalterate dalla presenza delle opere di protezione, erano di ghiaia ciottolosa mista a sabbia, con lo strato del sedimento più grossolano sormontante quello più fino nella fascia della spiaggia emersa e di quella sommersa fino a profondità di circa 2 m, oltre la quale si presenta la sabbia fine per la fascia fino a circa 10 - 12 m di profondità, oltre cui prevalgono i sedimenti fangosi ancora più fini (si veda anche l'Atlante delle spiagge italiane del Consiglio nazionale delle ricerche, 1985). Il diametro medio dei sedimenti di battigia, nel tratto di costa antistante l'ex stabilimento Montecatini, era di 1,4 mm secondo un rilievo del 1983.

Attualmente le condizioni risultano profondamente influenzate dalla presenza delle opere costiere presenti. Da indagini sedimentologiche effettuate nella stessa zona nel 1999 il diametro medio in battigia risultava compreso fra circa 1,4 e 4 mm, nella spiaggia emersa poteva giungere fino a 10 mm, mentre sulla -2 m esso era compreso fra 0,2 e 6 mm e sulla -5 m non superava i 0,2 mm.

I sedimenti della spiaggia sono di provenienza fluviale, in particolare provengono pressoché esclusivamente dai fiumi Musone e Potenza (le cui rispettive superfici dei bacini idrografici sono di circa 650 e 780 km²). L'azione del moto ondoso costiero produce anche una redistribuzione lungo il litorale dei sedimenti di spiaggia, che altrimenti si presentano, come detto, generalmente disposti con granulometria pressoché uniforme lungo fasce parallele alla riva. La direzione preferenziale del trasporto solido longitudinale è da Sud verso Nord, come d'altronde per l'intero tratto costiero marchigiano, secondo la direzione prevalente della corrente lungocosta prevalente (Mancinelli e Lorenzoni, 1993, Mancinelli et al., 1999).

I caratteri principali del regime meteomarinò presente nel paraggio di mare descritto sono sinteticamente

illustrati sul grafico della Figura 14, ottenuto dall'elaborazione dei dati ondosi rilevati, nei primi quattro anni di funzionamento, dalla boa della Rete ondometrica nazionale (A.P.A.T., 1999-2005) posta al largo di Ancona. E' significativo notare che, seppure fra i moti ondosi agenti nel paraggio rimanga generalmente dominante quello da Scirocco-Levante, il quale origina la suddetta corrente di trasporto solido prevalente diretta verso NordOvest, talvolta tale regime di dominanza sia fortemente influenzato dalle pur importanti (numerose, intense e prolungate) ondate settentrionali (si tratta soprattutto dei mari da Bora o Greco-Tramontana), le quali producono trasporti solidi lungocosta nella direzione opposta. In diverse stagioni si verifica addirittura l'inversione direzionale nella dinamica prevalente dei sedimenti di spiaggia (Istituto di Idraulica, 2001; Lorenzoni e Mancinelli, 2002).

Le diversità delle caratteristiche ondometriche fra le due suddette importanti fenomenologie meteomarine intense, agenti nel paraggio adriatico centrale, risultano abbastanza evidenti, soprattutto per effetto delle diverse lunghezze dei rispettivi *fetches*. Le onde di mareggiata di provenienza dai quadranti meridionali sono infatti nettamente più lunghe rispetto a quelle provenienti da Bora, che generalmente si presentano con più evidenti caratteri di mare vivo, con onde corte ed in presenza di vento. Le ondate di provenienza meridionale giungono lungo le spiagge marchigiane, in conseguenza della loro maggior lunghezza ondosa, oltre che con un contenuto energetico maggiore (si veda la Figura 14) e conseguentemente una risalita di maggior entità lungo i paramenti delle spiagge, anche con un considerevole sovrizzo del livello medio superficiale, di entità crescente passando dai litorali meridionali a quelli più settentrionali delle Marche.

Le differenti caratteristiche con cui si presentano le due descritte fenomenologie di eventi meteomarini intensi nel paraggio marchigiano risultano avere una notevole influenza diretta ovviamente anche sulle diverse caratteristiche del trasporto solido lungocosta presente. Si pensi solamente alla maggior incisività con cui le onde di provenienza meridionale siano ovviamente in grado di aggredire le coste marchigiane in generale e ad intaccare anche le parti più alte delle spiagge emerse.

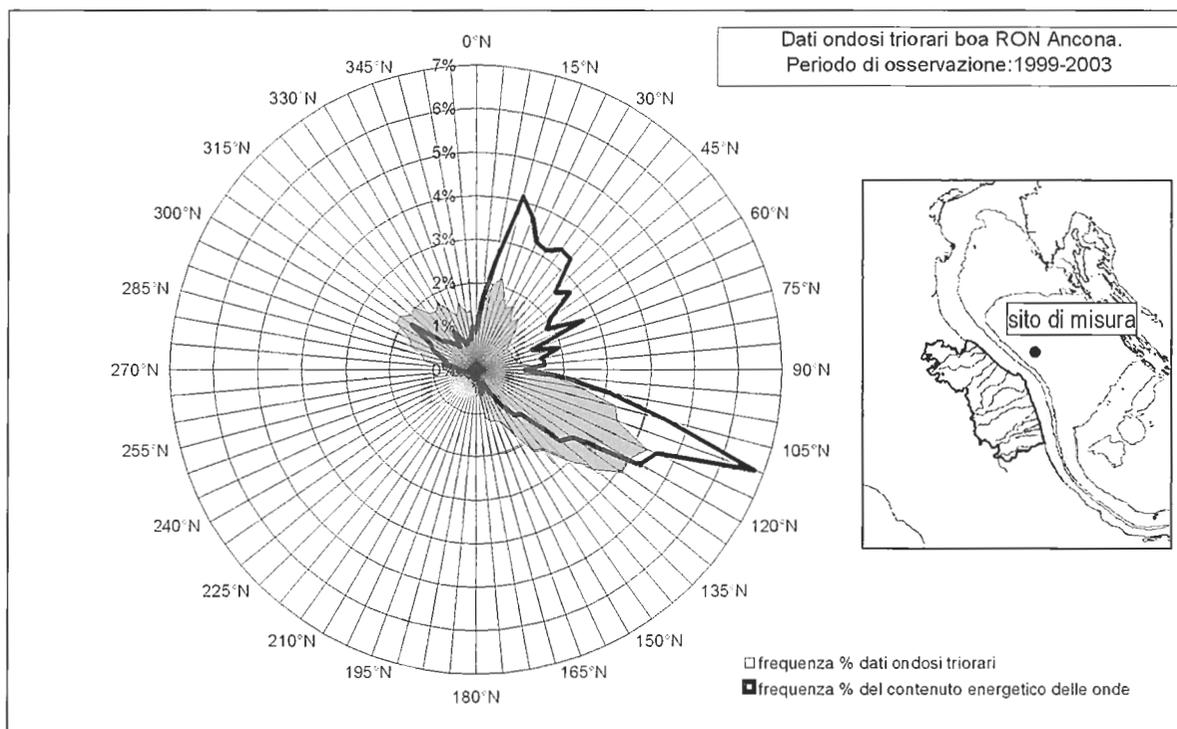


Figura 14 - Distribuzione direzionale (direzione media totale della componente spettrale di picco) delle frequenze percentuali dei dati ondosi triorari e del relativo contenuto energetico per i valori rilevati dalla boa della R.O.N. al largo di Ancona dal marzo 1999 al marzo 2003 (quattro anni di rilevazioni).

Inoltre, a causa della loro diversa esposizione geografica, i litorali marchigiani settentrionali (a Nord del Conero) e quelli meridionali (a Sud del Conero), rivolti rispettivamente verso NordEst e verso EstNordEst, risultano subire l'attacco delle due suddette tipiche condizioni ondose intense con direzioni di incidenza diverse. Così le ondatazioni da Bora (provenienti da NordNordEst) risultano incidere quasi perpendicolarmente i litorali settentrionali ed invece con componenti longitudinali piuttosto rilevanti quelli meridionali, quindi sono in grado di produrre correnti di trasporto solido lungocosta notevolmente più intense per le coste meridionali. Al contrario invece le ondatazioni meridionali più intense, provenienti generalmente da EstSudEst, incidono i litorali settentrionali quasi parallelamente e quelli meridionali con direzioni relativamente più perpendicolari, quindi sono in grado di sviluppare un trasporto solido litoraneo notevolmente più intenso per i litorali settentrionali rispetto che per quelli meridionali.

Proprio per effetto delle differenti caratteristiche descritte il litorale portorecanatese, come tutto quello meridionale marchigiano, risente in maniera abbastanza significativa, oltre che per le mareggiate prevalenti di provenienza meridionale, anche per i frequenti ed intensi eventi ondosi provenienti dai quadranti settentrionali. Pur essendo pressoché interamente protetta da opere costiere di difesa di tipo rigido, la spiaggia della zona dell'ex stabilimento Montecatini ha una pendenza notevole: già a 150 m dalla riva si ritrovano mediamente profondità di oltre 5 m, quindi le pendenze medie, fino alla -5 m, superano il 3% (confermato anche dall'Atlante delle spiagge italiane, C.N.R., 1985).

Evoluzione e difesa del tratto costiero in esame

La spiaggia del tratto in questione ha sofferto di problemi erosivi sin dagli anni '70 del secolo scorso. Le cause degli squilibri litoranei vanno ricercate ovviamente sopraflutto, rispetto alla direzione prevalente del trasporto solido lungocosta, quindi in questo caso a Sud della spiaggia presa in esame.

Il litorale della zona centrale della città di Porto Recanati, in cui è storicamente presente una fila continua di insediamenti abitativi direttamente a ridosso del lungomare, quindi in prossimità della riva, fu a sua volta oggetto di problemi erosivi, innescati probabilmente a partire dagli anni '30, da una prima serie di tre pennelli, realizzati nella zona della foce del Fiume Potenza, per evitare le continue deviazioni verso Nord dell'ultimo tratto del corso fluviale per effetto delle intense mareggiate meridionali (Buli e Ortolani, 1947) con conseguente minaccia dell'abitato cittadino. Negli anni '50 furono realizzati altri pennelli trasversali nella parte meridionale della spiaggia cittadina.

Nei primissimi anni '60, con l'aggravamento dei fenomeni erosivi (Figg. 15a e 15b), furono poste in opera le prime scogliere foranee emerse parallele alla riva a protezione delle abitazioni cittadine nella parte meridionale. In seguito alle tipiche ripercussioni erosive a catena verificatesi sul lato sottoflutto delle opere costiere di tipo rigido, furono realizzate, in più fasi successive, altre scogliere emerse distaccate a difesa della spiaggia. A metà degli anni '70 fu completata la realizzazione dell'intera fila di scogliere foranee emerse parallele alla riva a protezione dell'intero sviluppo del litorale antistante l'abitato cittadino e del "borgo" storico, il quartiere più settentrionale (Fig. 16).



Figure 15a e 15b - Azione devastante della mareggiata del 15 ottobre 1960 sul litorale e sul lungomare della cittadina circa 1 km a Nord della foce del Fiume Potenza.

Pur essendo riuscita a mettere in sicurezza il lungomare antistante la zona abitata, tale difesa non ha potuto impedire lo spostamento dei fenomeni erosivi litoranei nel tratto ancora più sottoflutto (settentrionale), arrivando quindi ad interessare anche l'area dell'ex stabilimento Montecatini vicino alla località di Scossicci (Figg. 17a e 17b).

Nel tentativo di salvare in particolare la preesistente strada litoranea antistante il suddetto stabilimento industriale, seriamente danneggiata dall'azione erosiva del mare, a metà degli anni '70 era stata realizzata una scogliera radente nella parte meridionale. Presto però l'erosione ha interessato anche il tratto sottoflutto della spiaggia e della strada antistante la località di Scossicci (Fig. 18). Infine tale strada, con la carreggiata ormai irrimediabilmente danneggiata nel tratto centrale della zona indagata, fu abbandonata.



Figura 16 - Stato del litorale settentrionale di Porto Recanati e delle difese costiere nel gennaio 1976.



Figure 17a e 17b - Effetti dell'erosione costiera sulla spiaggia e sulla carreggiata della strada litoranea antistanti all'ex stabilimento Montecatini nel gennaio 1976.



Figura 18 - Effetti dell'erosione costiera sulla spiaggia e sulla strada litoranea antistanti alla località Scossicci di Porto Recanati nel dicembre 1977.



La nuova infrastruttura viaria, con un tracciato che aggirava la cittadina all'interno, si riallacciava al tratto litoraneo proprio all'estremità settentrionale della zona indagata in questo caso. A difesa di tale reinnesto di carreggiata, della spiaggia antistante ed anche delle altre infrastrutture presenti nella stessa zona, furono realizzati altri tratti di scogliere radenti sul finire degli anni '70, nonché diversi pennelli ortogonali alla riva, specie sull'arenile della parte centrale dell'area indagata, nei primi anni '80.

Le opere costiere realizzate, pur garantendo una relativa protezione dall'aggressione delle mareggiate alle suddette infrastrutture, non avevano però consentito la formazione di un consistente arenile, di dimensioni sufficientemente ampie per poter sfruttare adeguatamente tale spiaggia per fini turistico-ricreativi (Aquater, 1987a; Aquater, 1987b).

Nella parte più settentrionale del tratto di costa in questione, fra l'agosto 1983 e l'aprile 1984, allo scopo di ricostruire la spiaggia e proteggerla, attenuando l'energia ondosa incidente, fu realizzato un intervento di ripascimento artificiale protetto al largo da una barriera frangiflutti sommersa a gettata di scogli posta parallelamente alla linea di riva. La batteria di scogliere foranee era lunga complessivamente 520 m, imbasata su fondali medi di 5,2 m ad una distanza media dalla linea di riva di circa 150 m e risultava costituita da sei setti lunghi 70 m ciascuno e con varchi intermedi ampi 20 m. La berma di sommità era prevista, nel progetto iniziale, con sommergenza di 1 m ed ampia 4 m. Ulteriori dettagli sulla planimetria dell'intervento, sulle caratteristiche geometriche ed i materiali costituenti il corpo originario delle scogliere sono riportati nella Figura 19. Furono realizzati anche quattro isolotti emersi di segnalazione in massi naturali ad intervalli di circa 180 m, poste sulle testate di alcuni segmenti di scogliera (Aquater, 1987a; Lorenzoni et al., 1987).

Per il ripascimento dei circa 700 m di arenile interessato furono utilizzati 16000 m³ di sabbia grossolana proveniente da due cave terrestri attive, site lungo i terrazzamenti di dune fossili. I diametri medi D_{50} sono risultati rispettivamente circa 1,8 e 2,2 mm per i materiali di apporto, mentre il diametro teorico del sedimento stimato stabile era risultato di 1,5 mm, a fronte di quello originario della spiaggia pari, come detto, ad 1,4 mm. Il trasporto del materiale per la distanza dalle cave di prestito comprese fra 10 e 20 km è stato effettuato su strada con autocarri; la distribuzione lungo la spiaggia del materiale di apporto è stata effettuata con l'ausilio di mezzi meccanici.

Probabilmente in questo caso si è trattato proprio del primo intervento con scogliere sommerse realizzato in tutta Italia a difesa della costa.

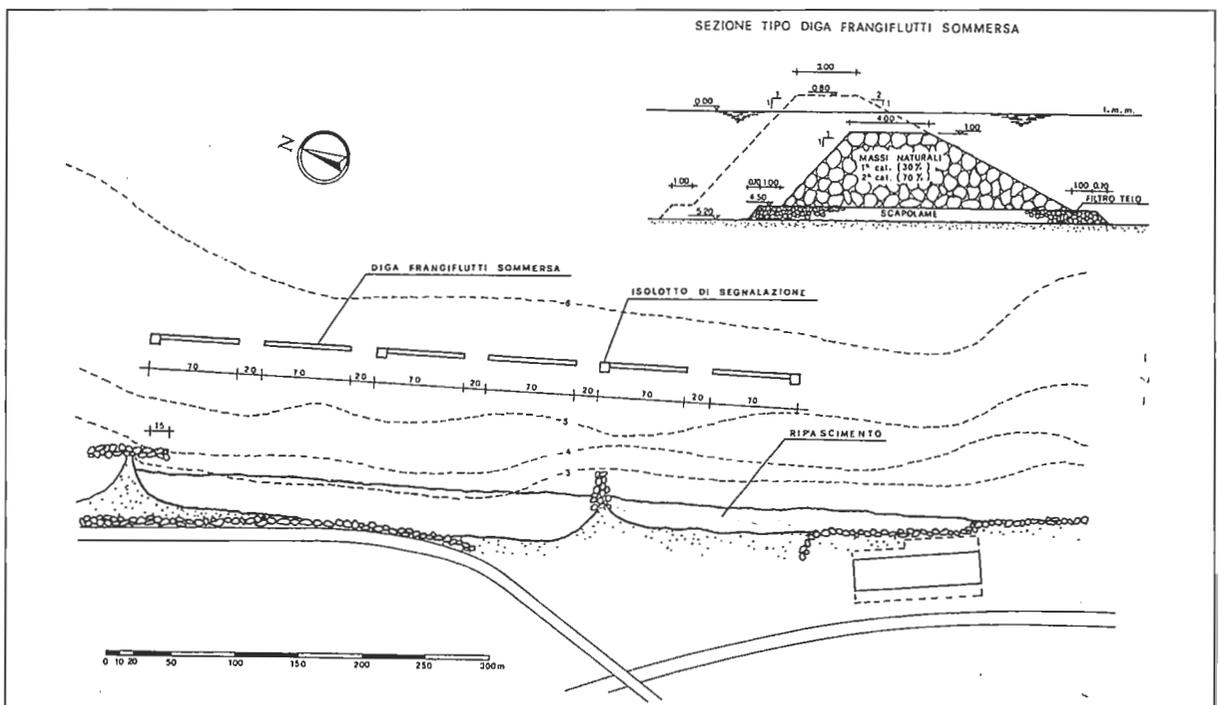


Figura 19 - Planimetria dell'intervento e sezione trasversale delle opere sommerse realizzate in località Scossicci di Porto Recanati nel 1983-84.

Con la realizzazione di tale innovativo (a quel tempo) sistema di difesa costiera, l'obiettivo ricercato era stato quello di trattenere il materiale di battigia rimosso dall'agitazione ondosa, il quale, anche a causa della notevole pendenza del fondo della spiaggia in questione, sarebbe stato altrimenti rapidamente disperso in mare aperto. L'intervento, all'atto della realizzazione, aveva determinato un avanzamento della linea di riva di circa 20 - 30 m. I rilievi batimetrici eseguiti nell'aprile 1985 (ad un anno dal termine dei lavori) mostravano una discreta stabilizzazione della spiaggia. Rispetto alla situazione precedente al ripascimento, si notava ovunque l'avanzamento di 10 - 15 m della linea di riva, il miglioramento delle pendenze ed un pressoché generalizzato innalzamento dei fondali nella zona protetta e nel tratto immediatamente al largo della scogliera. I rilievi successivi (ottobre '85 e maggio '86) evidenziavano tale tendenza con modeste oscillazioni della linea di riva dovute pressoché alle naturali modifiche stagionali del profilo di spiaggia (vedi lo stato della costa nel novembre 1985 sulla Figura 20).



Figura 20 - Vista aerea generale del tratto costiero di Scossicci di Porto Recanati nel novembre 1985 in cui risulta visibile l'intervento di protezione con le opere sommerse.

In seguito le scogliere sommerse hanno subito gli attesi naturali assestamenti successivi alla posa in opera, quindi hanno necessitato di ripetute ricariche dei massi di rivestimento e della risagomatura della sezione trasversale, adattandola alle mutate dimensioni strutturali divenute, nel corso del tempo, più comunemente usate per questo tipo di interventi (quali minore sommersenza, berme di sommità più ampie, scarpate laterali con pendenze più dolci, ecc.). Inoltre a completamento di questa sorta di evoluzione delle caratteristiche strutturali subita dalle scogliere sommerse, dagli isolotti emersi di segnalazione in scogli furono sostituiti da più economici e pratici pali di segnalazione in c.a. (Fig. 21).



Figura 21 - Vista della costa settentrionale di Porto Recanati e della località Scossicci nel novembre 1999, in cui risultano visibili i nuovi pali di segnalazione allineati sulle vecchie scogliere sommerse.

Tra la fine degli anni '80 e l'inizio dei '90 si posero in opera altre due opere foranee di tipo sommerso, in particolare antistanti alla parte centrale ed a quella meridionale dell'area indagata. La prima barriera, realizzata nel 1988/89, è lunga circa 250 m e posta a distanza di oltre 200 m dalla riva, su profondità che superano anche i 6 m, con sviluppo che parzialmente fronteggia direttamente (in sovrapposizione di protezione costiera) parte della suddetta barriera preesistente posta più a riva di questa. L'altra scogliera posta in opera in quegli anni ha la lunghezza di circa 240 m, è costituita da due setti di circa 100 m ciascuno e varco intermedio di circa 40 m, ma è posta pressoché in allineamento, a circa 160 m dalla riva, con l'ultima barriera emersa più settentrionale preesistente a difesa dell'abitato storico. Alla sua realizzazione (intorno al 1990) anche la parte più settentrionale della suddetta scogliera emersa più settentrionale fu trasformata in sommersa, andando di fatto a costituire una sorta di terzo setto della difesa sommersa realizzata. Lo stato generale delle opere costiere nell'anno 2000 (Istituto di Idraulica, 2001) è stato riportato, come detto, nella planimetria della suddetta Figura 13.

Recentemente (autunno 2004) nel tratto più meridionale della zona in esame sono stati realizzati tre pennelli paralleli di egual lunghezza, con un ripascimento artificiale del litorale intermedio, al fine di creare una adeguata fascia di spiaggia direttamente antistante i nuovi insediamenti turistico-abitativi e di renderla sufficientemente stabile, in modo da poterla più facilmente sfruttare per le attività ricreative-balneari, soprattutto ad immediato vantaggio dei turisti-fruitori di tali retrostanti abitazioni (Figg. 22a e 22b).

Effetti dell'opera di difesa sul litorale

Le tre citate opere foranee sommerse degli anni '80-'90, si trovano su differenti allineamenti e si presentano sovrapposte parzialmente (in termini di protezione costiera) fra loro e/o con altre difese preesistenti o più recenti.

Questa situazione, già abbastanza complessa da esaminare per quanto riguarda le ripercussioni sulla spiaggia dovute alle singole tipologie di difesa, è resa ulteriormente più confusa dal fatto che alcune delle opere più vecchie, rimaste prive di manutenzione, sono state gradualmente demolite e/o smantellate parzialmente da parte dell'azione del mare oppure sono finite insabbiate per effetto dell'accumulo dei sedimenti sulla spiaggia. Ciò in definitiva ha reso tale tratto di costa protetto in modo alquanto disordinato (Fig. 23a) e scarsamente distinguibili gli effetti costieri delle singole tipologie di difesa (Fig. 23b).

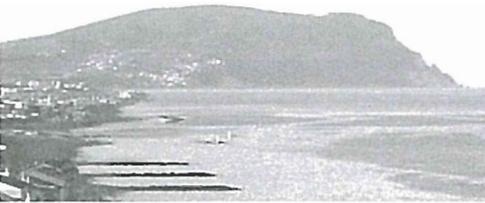


Figure 22a e 22b - La costa di Scossicci di Porto Recanati con i tre pennelli di recente realizzazione.



Figure 23a e 23b - Stato generale della spiaggia e delle opere di difesa della costa meridionale di Porto Recanati alla fine del 2004 in condizioni tranquille ed in occasione di una mareggiata del dicembre 2004.

Il sistema di difesa adottato delle scogliere longitudinali foranee sommerse sembra essere risultato discretamente efficace nella protezione del tratto di spiaggia ghiaiosa immediatamente retrostante. Infatti, in seguito alla realizzazione di ogni opera sommersa, i tratti immediatamente protetti non hanno più manifestato gravi problemi di erosione, anzi in qualche tratto la spiaggia è pure avanzata, fino a poche decine di metri, specie nella zona delle scogliere più vicine alla riva.

Non disponendo di idonee campagne di misura per poter compiere adeguati confronti sull'evoluzione dei fondali, si può solamente stimare che la variazione delle profondità nella zona indagata non sia stata eccessiva, ma si ritiene comunque che non sia distribuita omogeneamente (vedi Figura 24), soprattutto a causa delle diversità fra le opere costiere realizzate e che sia risultata molto influenzata localmente dalla presenza delle opere più vicine. Si ritiene inoltre che la presenza delle opere di protezione abbia consentito e favorito una certa stabilizzazione e l'irrigidimento dei fondali stessi, oltre che, come detto, della linea di riva e della spiaggia emersa.

Attualmente la spiaggia formatasi nel tratto esaminato risulta costituita da materiale sabbioso-ghiaioso con un buon assortimento granulometrico, come descritto in precedenza. Se originariamente i granuli della spiaggia tendevano alle dimensioni più grossolane (C.N.R., 1985), la presenza delle recenti opere di difesa di tipo rigido ha favorito il deposito sulla spiaggia e la stabilizzazione sulla battigia di sedimenti di dimensioni minori. Per cui anche i pur modesti ripascimenti artificiali di sabbia avvenuti lungo tale spiaggia protetta possono ritenersi idonei.

Anche la qualità dell'acqua presente nella zona di battigia protetta dalle barriere risulta generalmente di buona qualità, essendo essa favorita, in questo caso, dalla buona intensità della circolazione idrodinamica superficiale innescata proprio dalla presenza delle barriere di tipo sommerso, che sono in grado di evitare i fenomeni di ristagno nella zona di riva.

Tutti questi fattori positivi hanno favorito una successiva discreta fruibilità di tale spiaggia sia dal punto di vista turistico-balneare che come superficie di stazionamento a terra per la vivace nautica minore locale.

A completamento di tale tipo di indagine, occorre rilevare che tutte le predette opere di difesa (non si può prescindere, come detto, dall'intero sistema di protezione della spiaggia, anche nelle condizioni piuttosto disordinate in cui esso si trova attualmente) sono state inserite non in una spiaggia completamente libera, ma in una realtà costiera in cui, all'atto della loro realizzazione, le condizioni naturali originarie del sito risultavano già ampiamente alterate anche dalla presenza delle opere costiere di tipo rigido preesistenti alle estremità laterali del tratto preso in considerazione. Infatti, come già detto sopra, su entrambi i lati, sopraflutto e sottoflutto, del tratto in questione erano già presenti sistemi organizzati di protezione costiera costituiti da batterie longitudinali alla riva di scogliere foranee di tipo emerso. Per cui la spiaggia ed il litorale protetti dalle opere sommerse di cui si sta trattando, risultavano già stabilizzate lateralmente dalle strutture costiere emerse preesistenti.

In definitiva, per quanto sopra detto, nulla si può dire, in questo caso, per quanto riguarda le ripercussioni riscontrate nei tratti limitrofi conseguenti alla realizzazione delle opere di difesa di tipo sommerso descritte, fenomeni che invece risulterebbero assai significativi ed assumerebbero una grande importanza, per la valutazione complessiva del funzionamento del sistema di protezione adottato, su un spiaggia libera da opere rigide di difesa.

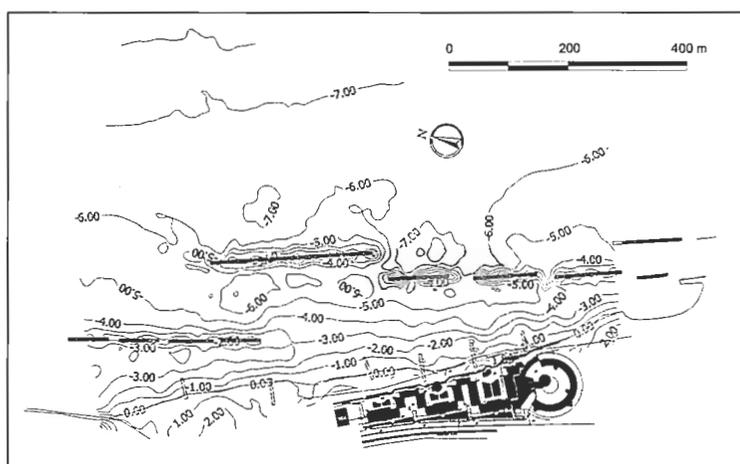


Figure 24 - Batimetria del tratto della spiaggia di Scossicci antistante i tre interventi con le opere sommerse (rilievi del 2003). Sono solo indicati in progetto i tre pennelli e gli insediamenti abitativi a terra di recente realizzazione.

Conclusioni

Le prime scogliere sommerse realizzate a Porto Recanati (nei primi anni '80) avevano berme di sommità larghe circa 4 m con sommergenza di circa 1 m. Tali dimensioni si rivelarono inadeguate e relativamente poco idonee a smorzare le onde, specie in occasione di ampi sovralti di tempesta del livello medio superficiale che rendeva inefficaci quelle dimensioni di sommergenza e quelle ampiezze di berma. Inoltre con tali dimensioni si favoriva la ricaduta dei frangenti nello specchio acqueo del lato terra alle strutture, con conseguenti agevoli approfondimenti del fondale nei casi più critici. Nelle opere della generazione successiva, come pure nelle operazioni di manutenzione delle prime scogliere stesse, sono state adottate dimensioni ben più ampie per la larghezza della berma (dell'ordine di 10 - 12 m) ed invece ben più contenute per la sommergenza (al massimo 0,5 m). Anche le pendenze dei paramenti laterali delle opere furono migliorate adottando valori relativi a scarpate più dolci. Le nuove dimensioni adottate hanno sicuramente migliorato l'efficacia delle strutture sommerse. Questo stesso schema evolutivo delle strutture sommerse può essere ritenuto valido anche per le altre opere costiere sommerse realizzate nelle Marche.

Sulle distanze delle barriere sommerse dalla riva si può rilevare che forse quelle adottate per le prime opere potevano essere adeguate, infatti con la loro posizione esse hanno favorito una discreta stabilizzazione della linea di riva e della spiaggia emersa. Le opere più recenti con distanze maggiori sono risultate meno efficaci nella stabilizzazione della spiaggia protetta. Dall'osservazione complessiva dei diversi sistemi di difesa posti sull'area indagata, si può notare che le notevoli ampiezze delle aperture rimaste fra le tre batterie di barriere sommerse può aver favorito la mancata stabilizzazione di tratti localizzati del litorale retrostante in occasione delle mareggiate più violente, con la formazione di forti correnti di ritorno dirette verso il largo e notevoli risalite ondose sulla spiaggia emersa.

Marina di Montemarciano (AN)

Inquadramento dell'area

La spiaggia antistante la località di Marina di Montemarciano (AN) si trova nell'Adriatico centrale lungo la costa settentrionale marchigiana (a Nord del promontorio del Monte Conero) ed è rivolta verso il mare aperto in direzione di 26,5° N (si veda la suddetta Figura 12).

Il litorale in questione fa parte dell'unità fisiografica (lunga circa 16 km) costituita dall'ampio arco di litorale compreso fra la foce del Fiume Esino a Sud e quella del Fiume Misa a Nord, che a sua volta rientra nella più ampia unità fisiografica di costa bassa (lunga circa 60 km) che si estende dall'estremità settentrionale del promontorio del Monte Conero (praticamente occupata dal Porto di Ancona) a Sud fino a quella meridionale del promontorio del Colle San Bartolo (che si innalza dalla periferia settentrionale della città di Pesaro) a Nord (si veda la suddetta Figura 12).

Il tratto costiero di Marina di Montemarciano ha andamento pressoché rettilineo. La spiaggia del tratto in esame è caratterizzata da sedimenti ghiaioso-sabbiosi. Essi si presentano disposti con granulometria pressoché uniforme lungo fasce parallele alla riva. La ghiaia (granuli o ciottoli fini, con valori dei diametri medi compresi fra 2 ed oltre 10 mm) costituisce il materiale dello strato superficiale della spiaggia emersa e del fondale fino a circa 2 m di profondità, raggiunta la quale tendono gradualmente a diminuire per scomparire del tutto su fondali oltre i 3 m circa di profondità. Lo strato di ghiaia sovrasta quello della sabbia, la quale risulta emergere sul fondale (sabbia fine o molto fine, con valori dei diametri medi compresi fra 0,11 e 0,85 mm) a partire dalle suddette profondità ed estendersi anche a quelli più al largo fino a circa 10 -12 m di profondità, ove lascia spazio ai limi dei fondali più profondi (Lorenzoni et al., 1998c). Le ghiaie della spiaggia di Marina di Montemarciano sono di provenienza fluviale, in particolare provengono pressoché esclusivamente dal Fiume Esino (la cui superficie del bacino idrografico è di circa 1200 km²).

L'azione del moto ondoso costiero produce la redistribuzione delle ghiaie lungo il litorale circostante, preferenzialmente verso NordOvest lungo i circa 10 km che si estendono dalla foce fluviale fino ad oltre la frazione di Marzocca di Senigallia, secondo la direzione prevalente della corrente lungocosta presente. Infatti, come già spiegato, per l'intero tratto costiero marchigiano, esso avviene prevalentemente da Sud verso Nord. Il trasporto solido costiero delle ghiaie non arriva ad interessare la spiaggia ancora più settentrionale di Senigallia, non intaccando quindi le sue tipiche e caratteristiche sabbie fini, caratteristica tale che è all'origine della nota denominazione di "spiaggia di velluto" e che ha reso famosa Senigallia come apprezzata meta del turismo balneare.

I caratteri del regime meteomarinario presente sono del tutto simili a quelli illustrati per l'altro sito marchigiano descritto precedentemente in questa stessa nota, Scossicci di Porto Recanati (si veda la suddetta Figura 14). Come già ampiamente spiegato in precedenza il litorale di Marina di Montemarciano, a causa della esposizione e delle caratteristiche delle diverse ondate più intense, risente in maniera nettamente preponderante degli eventi ondosi dominanti provenienti dai quadranti meridionali e quindi accusa evidenti problemi di erosione in occasione di mareggiate intense da Scirocco-Levante.

La pendenza dei fondali della spiaggia in esame è abbastanza variabile in funzione delle condizioni di stabilità e della sedimentologia presente nella particolare sezione presa in considerazione. Infatti misurando dalla linea di riva sino alla isobata di -5 m, la pendenza media è dello 0,66% (1:150) nel litorale che va da Marina di Montemarciano a Marzocca, dello 0,86% (1:115) nel tratto fra Marina di Montemarciano e la Foce dell'Esino, mentre essa arriva anche al 1,3% (1:75) nei tratti in cui le condizioni di stabilità della spiaggia indagata risultano più critiche (Lorenzoni et al., 1998b), che generalmente corrispondono alle localizzazioni sottoflutto alle opere costiere rigide presenti. Si ricorda che la profondità di chiusura valutata mediamente per l'intera costa regionale dalla società Aquater (1987b) è stata di 6,1 m.

Il tratto della spiaggia di Marina di Montemarciano di cui si tratta specificatamente nel presente paragrafo è lungo circa 600 m ed è ora protetto da una barriera longitudinale foranea di tipo sommerso, costituita da quattro setti allineati (come riferimento della posizione si veda la Figura 25, anche se va notato che in tale planimetria compare la traccia dello sviluppo dell'intera opera sommersa appare suddiviso in soli tre elementi). Esso ha sofferto di problemi erosivi sin dagli anni '80.

Le cause dell'erosione della spiaggia sono da ricercarsi sopraflutto, quindi in tal caso verso SudEst, in particolare negli squilibri litoranei prodotti dall'enorme arretramento della foce del Fiume Esino (documentata da Lorenzoni et al., 1998c, Mancinelli et al., 1999 e Mancinelli et al., 2000) e dal conseguente progressivo avanzamento, in avvicinamento, delle opere costiere di tipo rigido realizzate a protezione del litorale del vicino comune di Falconara Marittima. Originariamente, ad innescare i maggiori problemi erosivi al litorale in questione, furono in particolare soprattutto i lavori, realizzati nei primi anni '60, di costruzione del vasto terrapieno, in ampio aggetto, a servizio della raffineria API sulla sponda destra alla foce del Fiume Esino, che si trova circa 3 km a SudEst del tratto di spiaggia protetta preso in considerazione antistante la località di Marina di Montemarciano (Figg. 25 e 26).

Infatti, come rilevato anche da molteplici studi (ad esempio Dal Cin e Simeoni, 1987; Lorenzoni et al., 1998; Ripanti, 1987), la spiaggia di Marina di Montemarciano è sempre stata strettamente legata alle alterne vicende dell'Esino ed in misura minore alle sistemazioni del vicino Torrente Rubiano.



Figura 25 - Mappa orientata del paraggio del litorale di Marina di Montemarciano e della foce del Fiume Esino (base da I.G.M. 1995).

Tra l'altro proprio il Fiume Esino, che, come detto, costituiva la copiosa fonte di alimentazione naturale dei sedimenti ghiaiosi per tali spiagge, contemporaneamente ai citati massicci lavori sulla foce, ha manifestato gravissimi problemi di diminuzione degli apporti dei sedimenti solidi al mare, a causa delle pesanti manipolazioni operate artificialmente lungo il proprio intero bacino idrografico nel corso dei decenni precedenti. Si fa riferimento soprattutto all'estrazione indiscriminata di inerti dall'alveo fluviale ed alla costruzione di opere di regolazione sull'asta fluviale. La conseguente scarsità di apporti sedimentari ha quindi inesorabilmente aggravato ulteriormente la già precaria situazione di stabilità delle spiagge limitrofe alla Foce dell'Esino.

I conseguenti fenomeni erosivi emersi inizialmente nell'abitato di Marina di Rocca Priora, posto a NordOvest e nelle estreme vicinanze della sponda sinistra di Foce dell'Esino (Fig. 25), sono stati affrontati negli anni '70 ed '80 mediante la realizzazione di scogliere emerse foranee. Esse furono poste dapprima nella sola parte meridionale e poi successivamente estese sempre più in direzione NordOvest, a causa del propagarsi sottoflutto della conseguente erosione, fino a completare una intera serie continua di setti distinti, disposti in una batteria parallelamente alla costa, per tutto il tratto antistante l'intero sviluppo del litorale occupato dalle strutture abitative. Ciò ha di fatto spostato l'erosione trasladandola al tratto di spiaggia ancora sottoflutto (più verso NordOvest) con vistosi arretramenti della linea di riva (anche di qualche centinaio di metri) finendo, già con le mareggiate degli anni '78, '79 ed '80, oltre che ad interessare la spiaggia e le strutture di diversi chioschi e stabilimenti balneari ivi compresi, anche ad intaccare il tratto della strada litoranea retrostante ed infine anche a minacciare la massicciata della linea ferroviaria adriatica, che corre nel retrospiaggia di fronte allo stabilimento ex Montecatini, nonché la stessa stazione ferroviaria di Marina di Montemarciano (Aquater, 1982).



Figura 26 - Vista aerea (ripresa del luglio 1991) del litorale di Marina di Montemarciano fino alla foce del Fiume Esino in primo piano.

Nella prima metà degli anni '80, dopo pochi interventi localizzati e di piccole dimensioni, quali brevi scogliere radenti poste a difesa di chioschi minacciati sulla spiaggia, l'esigenza di proteggere soprattutto le importanti infrastrutture viarie suddette ha portato a prevedere la realizzazione di sistemi di difesa della spiaggia in tre tipologie diverse, sia di carattere "morbido" e sperimentale, sia di carattere più rigido e tradizionale, che globalmente non hanno sempre fornito i risultati di protezione attesi (Aquater, 1987). Si tratta in particolare di una cosiddetta "spiaggia sospesa", realizzata per un tratto di 680m a SudEst del Fosso Avena, litorale rientrante nel Comune di Falconara Marittima, costituita da un non cospicuo ripascimento artificiale di materiale ghiaioso-sabbioso contenuto da un sistema di pennelli trasversali e barriere longitudinali sommersi, realizzati con sacchi di tessuto sintetico riempiti con 1 m³ di sabbia, che in definitiva si configuravano come delle celle di riempimento, intervento completato nel giugno 1984. La seconda difesa è consistita nella posa in opera, fra il 1984 ed il 1985, di una massiccia scogliera radente nel tratto, lungo oltre 400 m, compreso fra il Fosso Avena ed il Torrente Rubiano, poste a diretta protezione della suddetta stazione ferroviaria e della strada litoranea. Il terzo quasi contemporaneo intervento interessava un tratto di costa di circa 1700 m, che nella parte meridionale risultava in completa sovrapposizione (in termini di protezione costiera) a quello difeso dall'ultimo intervento descritto. Esso consisteva nel posizionamento di due file di barriere sommerse (poste a 2,40 e 2,10 m di profondità), formate da tubi contenitori di polietilene con diametro di 180 cm riempiti di sabbia (detti Tubi Longard) e di pennelli sommersi formati da sacchi di tessuto sintetico riempiti di sabbia che costituivano la radice a riva della prima fila delle strutture parallele.

Il primo tipo di questi interventi ha fornito risultati sicuramente di scarso rilievo, inoltre le strutture che lo costituivano subirono dei danneggiamenti per effetto delle gravose mareggiate agenti. Il secondo intervento ha consentito la riapertura, garantendo nel contempo una maggior sicurezza di stabilità, del tratto di strada litoranea interessata, ma il ripido paramento a mare adottato per la scogliera radente non ha consentito la formazione di una fascia di spiaggia adeguatamente usufruibile. Il terzo intervento non fu invece neanche terminato perché, in fase di realizzazione, le strutture di sezione circolare poggiate sul fondale, non si rivelarono idonee a resistere al moto ondoso agente in condizioni di mareggiata, infatti le parti costruite furono completamente distrutte e/o disperse dalle ondate di mareggiata dell'inverno 1984-85, per cui furono sospesi i relativi lavori prima del completamento dell'intervento.

Modalità dell'intervento attuato a difesa del tratto costiero in esame

In pratica, dei precedenti interventi, rimase vistosamente operativa solo la scogliera radente a protezione del tratto di litorale antistante la stazione di Marina di Montemarciano, fra le foci dei torrenti Avena e Rubiano. Oltre ai problemi suindicati, tale tipologia di struttura non è stata ovviamente in grado di arrestare la propagazione sottoflutto. Di conseguenza l'erosione negli anni immediatamente successivi, ha inevitabilmente interessato il tratto di spiaggia ghiaiosa sottoflutto, a NordOvest della foce del Torrente Rubiano, procurando danni alla sede stradale della litoranea già a partire dalla mareggiata avvenuta fra il gennaio ed il febbraio del 1986 (Ripanti, 1987).

A seguito delle altre devastanti mareggiate succedutesi nel corso degli anni '86 e '87, dopo alcuni interventi parziali, temporanei e localizzati, ridotti al minimo nel tentativo di non arrecare ulteriori problemi al litorale, fu predisposta la messa in opera d'urgenza di un tratto di 100 m di una consistente scogliera radente a partire dalla sponda sinistra alla foce del Torrente Rubiano, realizzata nel 1988, rinforzata e prolungata l'anno successivo. Nel provvedimento ministeriale d'urgenza era stato previsto anche un progetto definitivo per la difesa costiera del tratto in questione (Istituto di Idraulica, 2001). Esso consisteva nella posa in opera di una batteria di barriere sommerse foranee di scogli allineate parallelamente alla riva e lunga complessivamente 530 m, costituita da quattro setti lunghi 110 m ciascuno, intervallati da varchi ampi 30 m, su un fondale di circa 4 m a circa 170 m di distanza dalla riva. La berma di sommità, di 10 m di ampiezza, fu impostata in sede realizzativa alla quota del livello medio del mare, in modo tale che, ad avvenuto assestamento della struttura, potesse raggiungere la sommergezza prevista in progetto, pari a 0,50 m. I paramenti inclinati dell'opera erano previsti con pendenze 1:2,5 lato mare, 1: 1,5 lato terra e 1: 2 alle testate d'estremità delle barriere (Fig. 27).

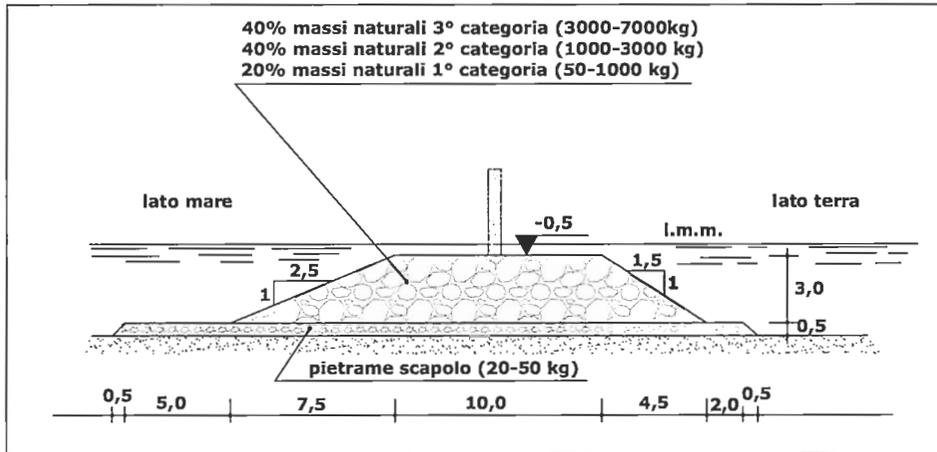


Figura 27 - Sezione corrente tipica delle scogliere sommerse realizzate a Marina di Montemarciano.

Le barriere furono realizzate in due fasi successive: i due setti meridionali nell'autunno del 1989, quelli settentrionali nella primavera del 1991 (vedi immagini aeree nelle Figure 28a e 28b).

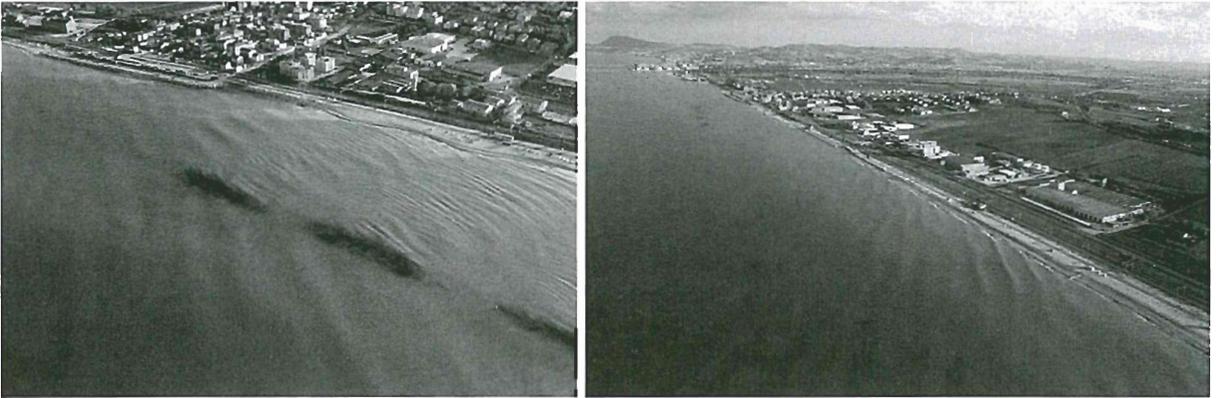


Figure 28a e 28b - Immagini aeree (dell'aprile 1996) delle scogliere sommerse realizzate sulla spiaggia di Marina di Montemarciano e del tratto di litorale interessato dall'intervento (visibile sullo sfondo).

Effetti dell'opera di difesa sul litorale

Il sistema di difesa adottato delle scogliere foranee sommerse longitudinali è risultato efficace nella protezione del tratto di spiaggia ghiaiosa immediatamente retrostante. In seguito, infatti, tale litorale direttamente interessato e protetto non ha più manifestato gravi problemi di erosione, anzi la spiaggia è pure avanzata, fino a circa una ventina di metri nella parte centrale, inoltre la pendenza dei fondali si presenta abbastanza addolcita e ciò ha favorito il mantenimento della stabilità della spiaggia retrostante alle scogliere anche in condizioni di intenso moto ondoso incidente. Tale nuova spiaggia è risultata essere costituita da materiale ghiaioso con un buon assortimento granulometrico. Anche la qualità dell'acqua presente nella zona di battigia protetta dalle barriere risulta generalmente di buona qualità, essendo essa favorita, in questo caso, dalla buona intensità della circolazione idrodinamica superficiale innescata proprio dalla presenza delle barriere di tipo sommerso, che sono in grado di evitare i negativi fenomeni di ristagno nella zona di riva. Tutti questi fattori positivi hanno favorito una successiva completa usufruibilità di tale tratto di spiaggia sia dal punto di vista turistico-balneare che come superficie di stazionamento a terra per le imbarcazioni al servizio della vivace attività della piccola pesca locale. Sullo stesso tratto di spiaggia, conseguentemente allo sviluppo di queste suddette attività, per effetto del ridosso offerto dallo specchio acqueo protetto

dalle barriere, hanno potuto trovare agevolmente spazio e margini di incremento anche altre diverse attività stabili di servizio, connesse alle prime, di tipo commerciale, di carattere turistico-balneari, che a volte hanno anche raggiunto discrete dimensioni ed importanza.

Mentre un esame più dettagliato sulla morfologia del fondale protetto, in particolare sulle erosioni localizzate dovute a quest'opera costiera, è stato descritto nell'articolo di Aminti et al. (2005) presente in questo stesso fascicolo, nella presente nota si analizzano invece più specificatamente le ripercussioni che la tipologia adottata per la difesa del tratto di litorale preso in considerazione ha avuto sulla costa circostante.

In tal caso l'opera di difesa di tipo sommerso non è risultata efficace ed adeguata ad impedire (o ad attenuare decisamente) il trasferimento dell'erosione al tratto ulteriormente sottoflutto. Forse tali ripercussioni sono risultate in misura meno accentuata rispetto agli effetti prodotti dalle strutture simili, ma realizzate nella versione tipologica emersa (come quelle vicine di Marina di Rocca Priora).

Infatti in questo caso i problemi alla spiaggia cominciano a manifestarsi sia subito dopo la realizzazione delle opere, ma addirittura anche in corso d'opera. Infatti si sono evidenziati arretramenti progressivi sottoflutto alle opere già con le piccole mareggiate avvenute nel corso del 1990, che avevano procurato minaccia anche alla stabilità della sede stradale del tratto di litoranea sottoflutto ai tratti delle opere sommerse già realizzate. In seguito le mareggiate da Scirocco-Levante alla fine dell'anno seguente (dicembre 1991) ne hanno eroso una intera corsia di marcia del lungomare sottoflutto per una lunghezza di un centinaio di metri. La situazione si è aggravata con altre ondate nel marzo successivo, intaccando anche la corsia più interna della strada litoranea, in pratica demolendo l'intera carreggiata nel tratto più colpito (Figg. 29a e 29b).



Figure 29a e 29b - Danni sottoflutto alle barriere sommerse per effetto delle mareggiate del dicembre 1991 e del marzo 1992.

Ovviamente all'erosione più evidente sulla parte emersa della spiaggia, corrispondente cioè al notevole arretramento della linea di costa ed ai profondi danni direttamente sulle infrastrutture, risulta in ogni caso strettamente correlato anche un progressivo approfondimento dei fondali della spiaggia sommersa, che risulta più evidente nella parte più prossima alla riva in corrispondenza della zona più erosa. Chiaramente anche questo tipo di squilibrio trasla in modo strettamente correlato allo spostamento sottoflutto dell'erosione della spiaggia emersa, andando quindi a coinvolgere ed interessare l'intera fascia di litorale anche per lunghi tratti longitudinali alla costa. Come esempio si può osservare l'andamento dei fondali, in particolare delle batimetriche di -0,5, -1 e -1,5 m, in relazione a quello della linea di riva nell'unico rilievo batimetrico disponibile in questo periodo nella zona in esame, che è stato riportato nella successiva Figura 36, anche se esso è stato eseguito nel 1996, cioè molto tempo dopo che si sono verificati i fenomeni evolutivi del litorale che si stanno descrivendo.

Per consentire il ripristino della circolazione carrabile sul lungomare, si è provveduto alla realizzazione in emergenza di opere di protezione di limitato impegno economico e di semplice e veloce realizzazione.

Così furono realizzate, in fasi successive, fra il 1992 ed il 1997, diversi tratti di scogliere radenti nel litorale sottoflutto alla barriera sommersa posta a Marina di Montemarciano. Nel frattempo la spiaggia davanti a tali difese è ovviamente sparita del tutto ed inoltre i problemi di stabilità si andavano trasferendosi ai tratti di litorale limitrofi sottoflutto, quindi sempre più verso NordOvest. La strada di lungomare venne chiusa più volte al traffico e rima-

se interrotta anche per lunghi periodi di tempo e per tratti continuamente prolungati verso sottoflutto (NordOvest) conseguentemente ai progressivi danneggiamenti subiti dalla carreggiata. Nel corso degli anni si provvide perfino a trasferire la sede stradale progressivamente su fasce di aree disponibili più interni, nel tentativo di renderla più preservata dall'aggressione del mare, ma i margini di spazio disponibile erano limitati dalla presenza della linea ferroviaria immediatamente retrostante, per cui ci si dovette arrestare, nel tratto più arretrato, fino ad incontrare il limite lato mare della rete di recinzione della massicciata delle rotaie più avanzate.

Anche questi provvedimenti non furono sufficienti a proteggere la carreggiata, infatti, dopo aver subito ripetuti danneggiamenti parziali (si vedano ad esempio gli effetti sulla sede stradale dall'esito del rilievo batimetrico della zona eseguito dopo la mareggiata di ottobre del 1996, riportato in Figura 30), all'inizio del 1997 l'azione incisiva ed erosiva del mare, oltre a distruggere completamente la strada, giunse anche a danneggiare seriamente il muretto e le opere di recinzione della sede ferroviaria, arrivando a minacciare anche la stabilità della massicciata dei binari più avanzati (Fig. 31a). Anche l'ente gestore della linea ferrata cercò, in quel caso, di tamponare in piena emergenza l'avanzamento del mare sfruttando propri mezzi con provvedimenti di fortuna e di discutibile efficacia: scaricò e accumulò, nel punto che aveva subito la maggior erosione, qualche vagone di materiale vario e di risulta della propria gestione, come addirittura grandi quantità di vecchie traversine ferroviarie di legno in disuso (si veda l'eloquente immagine nella Figura 31b).

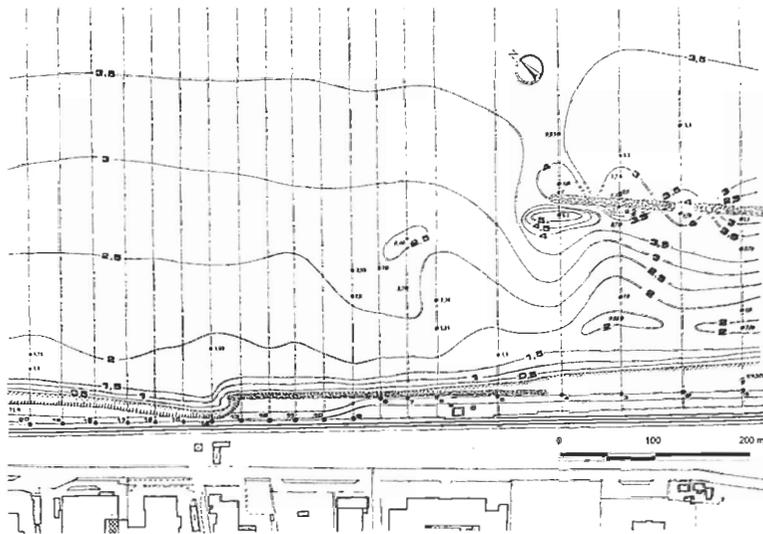


Figura 30 - Planimetria del rilievo batimetrico effettuato nell'ottobre 1996 nella zona sottoflutto alle scogliere sommerse poste a difesa della spiaggia di Marina di Montemarciano.



Figure 31a e 31b - Danni alle opere di recinzione ferroviaria nell'inverno all'inizio del 1997 e conseguenti provvedimenti-tampone sul sito eroso da parte dell'ente gestore della rete.

Successivamente furono eseguiti lavori di sistemazione di tutta la zona sottoflutto alla barriera sommersa longitudinale con sistemi di difesa e protezione del ripascimento artificiale in ghiaia aventi un carattere più stabile e duraturo (si vedano le Figure 32a, 32b e 33).

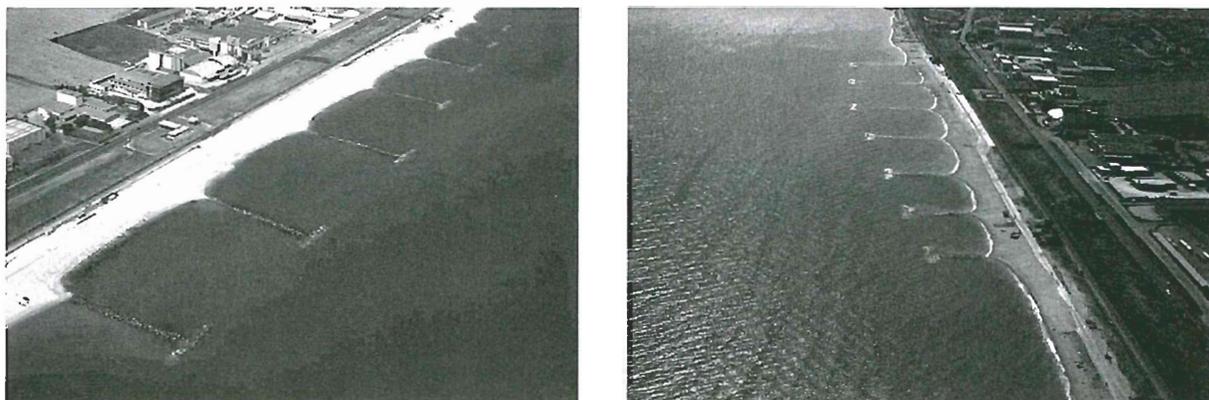


Figure 32a e 32b - Riprese aeree di ottobre 1998 del sistema di difesa adottato sottoflutto alle barriere sommerse longitudinali.



Figura 33 - Mappa della costa di Marina di Montemarçiano con le difese costiere realizzate fino al 1999.

Nonostante i lavori più recenti, il tratto di spiaggia ancora sottoflutto risulta minacciato in occasione delle mareggiate di provenienza meridionale.

Conclusioni

Limitatamente alla zona immediatamente retrostante le opere di difesa costiera foranee sommerse adottate nel tratto di costa indagato in questo caso hanno avuto un ottimo comportamento sulla stabilizzazione del litorale ghiaioso. Le caratteristiche dimensionali adottate per la disposizione planimetrica del sistema di difesa (in particolare distanza dalla riva, lunghezza delle barriere ed ampiezza dei varchi intermedi) sembrano adeguate. Il sistema di protezione ha prodotto un avanzamento della linea di riva di qualche decina di metri, anche abbastanza uniforme, cioè senza aver formato sulla riva una evidente alternanza planimetrica di protendimenti o tomboli. Parziali carenze di efficacia protettiva si possono invece osservare specie in occasione di mareggiate intense con associati ampi sovralti di tempesta del livello medio superficiale, in particolare di provenienza meridionale, che sono in grado di produrre notevoli risalite lungo la spiaggia ghiaiosa ed anche sporadici allagamenti della strada litoranea presente nel retrospiaggia. Ciò può essere legato alle dimensioni anche della berma di sommità delle scogliere (ampiezza e som-

mergenza) e all'eccessiva esposizione marittima degli specchi acquei rimasti liberamente aperti (cioè non protetti) alle estremità terminali della batteria di setti sommersi.

Nella zona sottoflutto si sono osservati invece i maggiori problemi, dovuti alla presenza delle barriere sommerse prese in esame. La velocità media di arretramento della linea di riva nella zona a NordOvest delle barriere emerse di Marina di Rocca Priora era di 5 - 6 m/anno nel periodo 1948-1978, mentre, riferendosi allo stesso periodo, era di circa 2 - 3 m/anno nella zona indagata di Marina di Montemarignano più lontana da esse (Aquater, 1982). La costruzione delle barriere sommerse, per fronteggiare i danneggiamenti delle altre opere costiere degli anni '80, e la concomitanza di mareggiate intense provenienti da SudEst ha modificato il *trend* evolutivo, facendo scomparire completamente la spiaggia emersa immediatamente sottoflutto e distruggendo circa 200 m della strada litoranea. Quindi, a fronte di un *trend* evolutivo medio non troppo rapido e rischioso, si è innescata un'erosione concentrata nello spazio e nel tempo, per effetto di sole poche mareggiate intense, non più recuperabili dal regime ondoso medio. L'erosione sottoflutto causata dalla presenza delle barriere sommerse è stata quindi paragonabile a quella prodotta dalle barriere emerse. Tale constatazione ha indotto i tecnici progettisti ad interrompere la costruzione delle barriere sommerse per non propagare, con il classico effetto a catena, l'erosione nella spiaggia sottoflutto.

Lido di Dante

Inquadramento dell'area

L'abitato di Lido di Dante si trova sulla costa romagnola, circa 10 km a Sud del Porto canale di Ravenna ed è compreso nel tratto tra Foce Fiumi Uniti a Nord e Foce Bevano a Sud. L'arenile prospiciente l'abitato di Lido di Dante ha una lunghezza di 1300 m e una superficie di 70000 m², quindi l'ampiezza della spiaggia è mediamente di oltre 50 m.

Sotto il profilo morfodinamico il litorale in esame è costituito da una costa bassa e sabbiosa, con andamento leggermente concavo ed orientazione prevalente in senso NordOvest-SudEst. Tale morfologia è tipica di tutto il litorale ravennate e, più in generale, emiliano-romagnolo.

Originariamente la costa romagnola era limitata a terra da un sistema di dune; purtroppo sin dall'inizio del novecento e soprattutto negli ultimi decenni gli apparati dunosi sono stati in gran parte distrutti lungo questo tratto di litorale per lasciare spazio agli stabilimenti balneari; presso Lido di Dante ne restano solo tracce immediatamente a Sud della zona protetta.

I fondali antistanti sono caratterizzati da un profilo trasversale con pendenze relativamente modeste (mediamente 6 m/km) nell'intervallo compreso fra la linea di riva e l'isobata dei -6 m (intervallo entro il quale avviene la quasi totalità del trasporto litoraneo), dove prevalgono sabbie medio fini.

La granulometria su tutto l'arco del territorio ravennate indica una spiaggia emersa costituita prevalentemente da sabbia fine con un valore di diametro medio (D_{50}) compreso tra 0,2 e 0,3 mm, mentre entro la batimetrica dei -2 m si ha una riduzione del D_{50} medio a valori compresi tra 0,1 e 0,2 mm; a partire dall'isobata dei -3 m le percentuali di matrice limo-argillosa vanno via via aumentando fino ad assumere le caratteristiche di pelite, pelite-sabbiosa verso i fondali maggiori (Casadei, 1996).

Condizioni meteo-climatiche

La distribuzione dei venti presenta una certa variabilità stagionale: in autunno, periodo di inizio delle mareggiate, vi è la percentuale più bassa di eventi di calma con un certo equilibrio tra venti di Bora (presenti per il 20%) e venti di Scirocco (24%). In inverno, invece, l'equilibrio si sposta a favore dei venti di Bora superiori del 14%. In questo periodo si verificano le tempeste più intense, oltre i 22 nodi, provenienti principalmente da Nord-NordEst. Con la primavera lo Scirocco diviene nettamente dominante con una frequenza del 41% contro il 28% del vento di Bora. In estate si verifica un'alta percentuale (88%) di eventi di calma. La distribuzione direzionale delle altezze d'onda evidenzia una serie di caratteristiche legate alla fenomenologia nota dell'Adriatico settentrionale: le condizioni ondose più frequenti sono da SudEst (Scirocco) spesso associate ad un incremento del livello medio del mare e le più intense (con altezze d'onda superiori a 3 m) da NordEst (Bora).

Le onde al largo, con periodi di ritorno di 25 anni, utilizzate come parametro progettuale, risultano rispettivamente di 5,4 m da 60° N e da 90° N e di 4,7 m da Scirocco, come si desume dalla Tabella 1 in cui si riportano i valori dei parametri ondosi significativi di altezza H_s e periodo T_s , per i tre settori direzionali di provenienza principali per l'esposizione del litorale romagnolo, per i periodi di ritorno TR pari ad 1, 5, 10, 25 anni.

Tabella 1 - Valori dei parametri ondosi validi per il litorale romagnolo.

TR	1 anni		5 anni		10 anni		25 anni	
	H _s	T _s						
60°N	3,6m	7,4s	4,5m	8,1s	4,9m	8,3s	5,4m	8,7s
90°N	3,5m	8,4s	4,4m	9,1s	4,9m	9,6s	5,4m	10,1s
120°N	2,8m	7,8s	3,8m	8,9s	4,2m	9,4s	4,7m	9,9s

I livelli del mare sono misurati dal mareografo di Porto Corsini, localizzato all'interno dei moli portuali, ed appartenente alla rete del Servizio Idrografico Mareografico Nazionale (S.I.M.N.-A.P.A.T., annate varie). In questa zona l'escursione di marea risulta in genere compresa tra 30 cm ed 80 cm (regime micromareale). Le maree più importanti sono semidiurne e la marea montante che entra nel bacino portuale ha una minor durata ma maggior velocità rispetto all'onda mareale di riflusso che si propaga più lentamente su tempi più lunghi. Le maggiori escursioni di marea si registrano durante il periodo dell'equinozio primaverile ed autunnale (febbraio-marzo e settembre-ottobre). Durante i mesi invernali fenomeni di *storm surge* possono amplificare la marea, determinando un innalzamento del livello marino sino a circa 150 cm con tempi di ritorno pari ad un anno.

Il fenomeno della subsidenza interessa tutto il territorio ravennate e si manifesta con particolare intensità nella zona di Lido di Dante. L'abbassamento del suolo prodotto da processi naturali è dell'ordine dei mm/anno, a partire dagli anni '30 del novecento la subsidenza ha subito un notevole incremento per le attività antropiche (quali la bonifica dei terreni paludosi, il forte emungimento di acque di falda e l'estrazione di metano da pozzi in terraferma e in mare). A partire dagli anni '80 sono state attuate politiche volte alla riduzione del fenomeno della subsidenza antropica, riportandola sull'ordine dei mm/anno. La velocità di abbassamento del caposaldo di livellazione presso Lido di Dante è stata di 16 mm/anno per il periodo 1984-93 e di 4,2 mm/anno per il periodo 1993-99 (Preti, 2001).

Gli interventi realizzati a Lido di Dante

Per limitare il progressivo arretramento del litorale si è intervenuti in questa zona sin dal 1978 mediante una serie di opere di protezione.

L'attuale sistema di protezione del litorale presso Lido di Dante è stato realizzato in quattro fasi qui brevemente riassunte.

I fase 1978-1983

La prima opera risale all'anno 1978 e consiste nella costruzione di un pennello in massi di cava, tuttora presente nella zona più a Nord del litorale. Nel 1983 si ritenne necessario intervenire ulteriormente con un secondo progetto, che prevedeva la realizzazione di due pennelli in massi di cava posti rispettivamente a 300 e 600 m verso Sud rispetto a quello già esistente, di uno sbarramento subacqueo parallelo alla costa e il versamento di 60000 m³ di sabbia. Purtroppo questa struttura, molto simile concettualmente a quella realizzata successivamente, non ha funzionato: il suo effetto si è disperso nel tempo e il materiale di ripascimento in parte si è ridistribuito al largo e in parte è stato trattenuto dai pennelli, creando zone di accumulo nel lato meridionale di essi e zone di erosione nella parte centrale. Successivamente i fenomeni di erosione e di accrescimento si sono aggravati, accentuando ulteriormente gli effetti di variazione della linea di riva all'interno delle celle. Nelle sole due stagioni successive all'intervento l'erosione è stata mediamente valutata pari a 90 m oltre il pennello Nord, a 40 m nella cella settentrionale ed a 30 m nella cella Sud.

II fase 1995-1997 L'intervento "pilota" di ripascimento artificiale protetto

L'opera consiste in una barriera sommersa, disposta parallelamente alla linea di riva ad una distanza di 180 m ed è lunga 770 m; di questi 600 m sono localizzati nel tratto compreso tra i tre pennelli in roccia già esistenti, 140 m e 30 m sono i prolungamenti rispettivamente in direzione Nord e Sud. La barriera ha forma trapezia e la sua base è posta ad una profondità di circa 3 m e la sommergenza è pari a 0,5 m. Nella parte terminale della struttura sono state realizzate due scarpate con pendenza 1:2 e forma semicircolare per attenuare gli effetti dovuti alla diffrazione dell'onda incidente, che sono particolarmente pericolosi nelle zone di testata. L'opera è stata realizzata con massi

naturali, mediante il filtro di transizione costituito da una georete con maglie di 20 mm di lato e deriva dall'unione, previa cucitura, di una geogriglia e di un geotessile non tessuto, entrambi in poliestere puro. Al di sopra del filtro è stato posto uno strato di scapolame con uno spessore di 0,5 m, una larghezza alla base di 24 m ed una larghezza alla sommità di 21 m. Infine la mantellata è stata realizzata con massi appartenenti alla II categoria per l'80% e alla I categoria per il restante 20%; lo spessore della mantellata è di 2 m con una larghezza alla base di 18 m e alla sommità di 12 m.

La sezione della barriera sommersa così come è stata realizzata in questa fase è rappresentata in Figura 34. Circa davanti al pennello centrale è stato realizzato un varco di circa 30 m di ampiezza per permettere il ricircolo dell'acqua e l'ingresso di piccoli natanti. La spiaggia al termine dell'intervento è rappresentata in Figura 35.

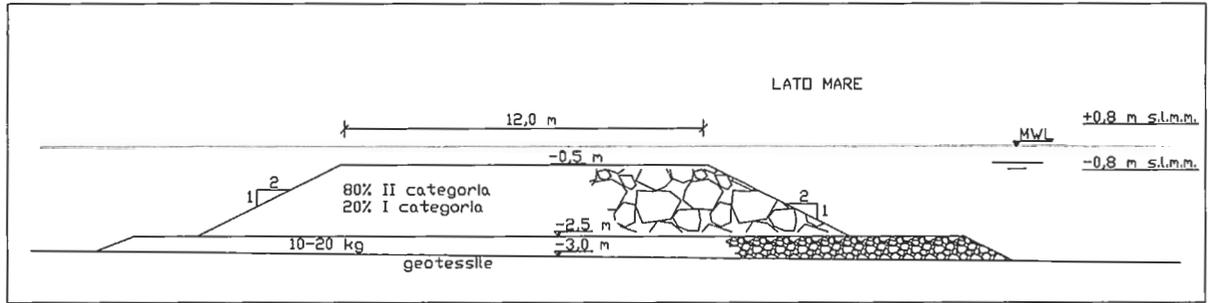


Figura 34 - Sezione della barriera sommersa realizzata nel 1995 al largo di Lido di Dante.

Presso il pennello settentrionale è stato realizzato un trasversale sommerso in massi naturali in continuità col pennello, con la funzione di limitare il trasporto longitudinale dei sedimenti. Il trasversale è stato realizzato su fondali di profondità da 2 fino a 3,5 m davanti alla barriera sommersa. Nel 1996 è stato eseguito un ripascimento della spiaggia, che ammontava a circa 70000 m³ di sabbia, suddivisa in 18000 m³ versati nel tratto compreso tra il pennello centrale e quello a Sud ed i rimanenti 52000 m³ nel tratto di litorale compreso tra il pennello centrale e quello posto a Nord. Considerando che ogni troncone di spiaggia è lungo circa 600 m, i versamenti unitari ammontavano a 30 m³/m nel tratto Sud e ad 86 m³/m nel tratto Nord. Con il ripascimento, realizzato con sabbie di granulometria simile a quella della spiaggia nativa (0,23 mm), ci si prefiggeva di ottenere l'avanzamento della spiaggia di 33 m nella cella Nord e di 16 m nella cella Sud.

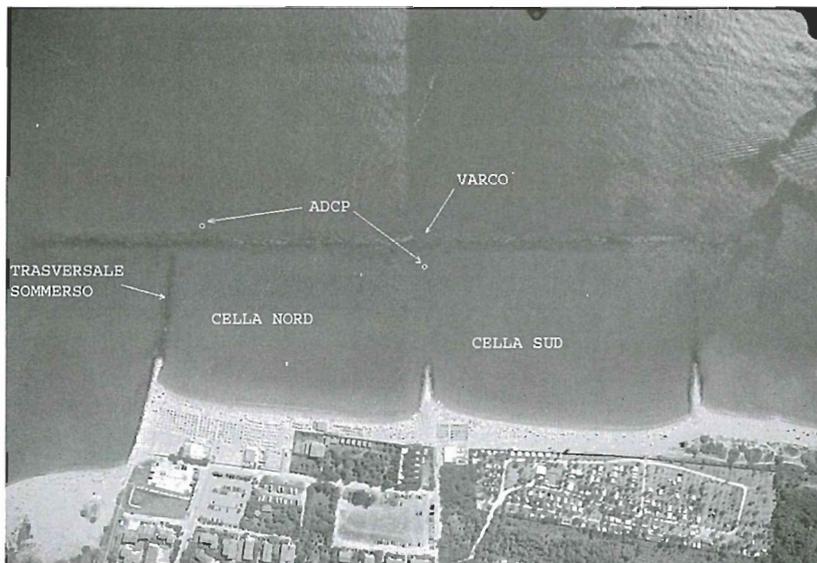


Figura 35 - Vista aerea del sito litoraneo di Lido di Dante.

III fase 2001 Formazione del trasversale sommerso (prolungamento del pennello Sud) e protezione delle testate
 Durante il corso del 2001 sono stati realizzati dal Servizio Geologico del Comune di Ravenna una serie di interventi progettuali aventi lo scopo di completare e rafforzare le strutture preesistenti a protezione del litorale di interesse in questo studio. Dato che presso l'estremità della cella meridionale il trasporto entrante era poco significativo rispetto alla perdita dei sedimenti dovuta alle forti correnti durante gli eventi di Bora, è stato realizzato un trasversale sommerso anche presso il pennello Sud, avente una lunghezza complessiva di 120 m, che si sviluppa lungo l'asse del pennello stesso fino a raccordarsi all'attuale barriera semisommersa. Il trasversale sommerso, realizzato in massi naturali, è stato progettato con lo scopo di smorzare l'intensità delle correnti generate dalle onde trasmesse lungo la barriera in occasione di mareggiate di Bora. Queste, infatti, con la loro azione, hanno eroso e approfondito il fondale che attualmente si trova ad una profondità di 3,5 m nelle vicinanze del pennello e ad una profondità di 4,5 m procedendo verso la barriera semisommersa.

IV Fase Innalzamento dei trasversali e della barriera

Nel giugno 2003 è stato realizzato l'ultimo intervento consistente nella rifioritura della barriera e dei due pennelli sommersi alle due estremità della zona protetta. La attuale difesa è pertanto costituita da una cella chiusa con troppo poca energia al suo interno, in cui l'unica via di uscita è il varco centrale.

Osservazioni

Presso Lido di Dante la realizzazione delle opere di difesa è stata associata all'esecuzione di ripascimenti della spiaggia, è quindi difficile attribuire i cambiamenti della morfologia alla presenza delle strutture protettive o del ripascimento.

Negli anni 1999-2001 si è osservata una riduzione media dei diametri delle sabbie nella zona lato terra della struttura. Di conseguenza si è verificato un aumento della torbidità dell'acqua e della presenza di alghe.

Dopo la messa in posa delle opere di protezione e del ripascimento artificiale del 1995, si è assistito, nella cella Nord, ad un avanzamento della linea di riva particolarmente rilevante nel suo settore più settentrionale. Nel corso del solo anno 1997, infatti, si è registrato un avanzamento di circa 20 m. Sempre nella cella Nord nel biennio '98-'99 la linea di riva ha poi subito un ulteriore avanzamento di 7 - 8 m, ma nel contempo, nella zona più a Sud della medesima cella, si è registrato un marcato arretramento di 15 m. E' infatti in questo intervallo di tempo che si è evidenziato che l'unica zona stabile è quella compresa all'interno della cella Nord, mentre la cella Sud e le zone adiacenti il tratto protetto sono in continua erosione (Lamberti et al., 2002). Inoltre nella cella Sud si è creata una zona fortemente erosa lungo la barriera, con maggiore accentuazione presso la testata.

Tale caratteristica è facilmente visibile nella batimetria eseguita nel marzo 2001 (Fig. 36), poco tempo prima dell'inizio della terza fase di intervento. Nella parte erosa il fondale supera la profondità di 5 m, mentre a tale distanza dalla costa dovrebbe essere inferiore ai 3,5 m.

Per meglio capire la complessa idrodinamica in presenza di strutture a cresta bassa, sono state eseguite una serie di simulazioni numeriche idrodinamiche con il codice di calcolo *Mike21* ed una serie di misure idrodinamiche in campo mediante lancio di *drifters* e strumenti A.D.C.P. (Archetti et al., 2000; Drei et al., 2001; Archetti et al., 2003a; Archetti et al., 2003b).

Durante mareggiate di Bora si verifica una intensa corrente longitudinale parallela alla barriera e presso le testate della barriera si osserva la formazione di vortici ben riproducibile mediante le simulazioni numeriche (Lamberti et al., 2002; Lamberti et al., 2004). Presso il varco si concentra una corrente di ritorno.

Tale complesso sistema di correnti è stato la causa delle evoluzioni morfologiche osservate dalla costruzione delle opere, quali le erosioni alle testate. Mediante le misure eseguite con i *drifters* nella configurazione II è stato osservato che durante le mareggiate di Bora la velocità della corrente longitudinale all'interno della barriera aumenta sensibilmente dalla cella Nord alla cella Sud, tale caratteristica è responsabile delle significative erosioni nella cella meridionale. Tale tendenza è stata confermata dai risultati delle simulazioni numeriche, mediante le quali è stato simulato che durante intensi eventi di Bora le correnti più intense si verificano presso la testata (fino a 1,8 m/s). In Figura 36 è riportato come esempio il tracciato della traiettoria percorsa da un *drifter* lanciato il 5 aprile 2001, le condizioni al largo erano: $H_s=2$ m, $T_p=8$ s e direzione di provenienza da 30° N. Sulla stessa immagine sono proposte le linee di corrente e le direzioni dei rilievi individuate mediante bussole da rilevamento utilizzate per seguire il tracciato del *drifter*. Si vede una buona corrispondenza tra il tracciato del *drifter* ed i vettori velocità: il *drifter* lanciato dalla mezzera del trasversale Nord costeggia la barriera e nella cella Sud accelera fino ad uscire velocemente dalla parte protetta.

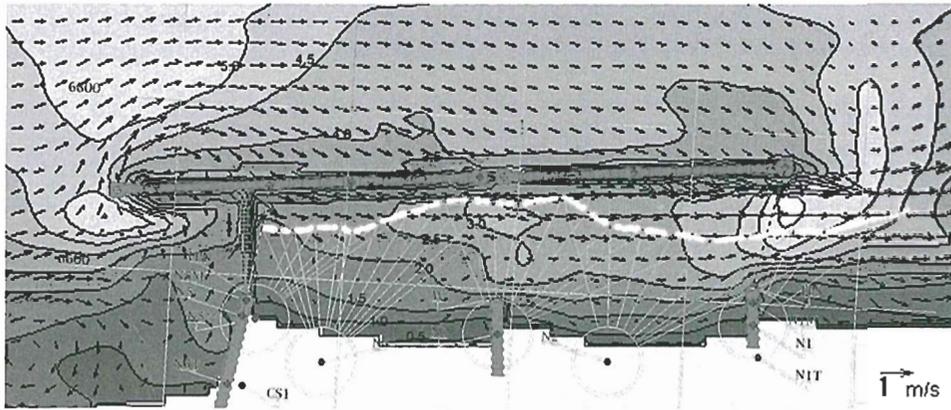


Figura 36 - Esempio di traiettoria percorsa da un *drifter* su risultati di simulazione numerica (relativa al 5 aprile 2001) sulla batimetria del marzo 2001.

Simulazioni eseguite sulla configurazione successiva (fase III), durante la quale è stato aggiunto un trasversale sommerso a Sud, confermano come le correnti longitudinali e di conseguenza il trasporto solido verso Sud siano fortemente ridotte durante le mareggiate di Bora.

Le onde e le correnti sono state misurate durante due campagne intensive (novembre 2002 e novembre 2003 - gennaio 2004) mediante l'uso di due A.D.C.P. installati nelle posizioni riportate nella suddetta Figura 35. La massima H_s misurata dall'A.D.C.P. posto dentro la area protetta, ha raggiunto 0,9 m durante una intensa mareggiata di Bora. Il coefficiente di trasmissione k_r , stimato mediante la contemporanea misura della H_s dentro e fuori la barriera, varia da 0,35 a 0,65, in funzione del livello medio del mare, molto alto durante le mareggiate di Scirocco. Si è inoltre misurato un *set up* durante le mareggiate più intense variabile da 0 a 0,4 m.

Presso il varco sono state misurate correnti fino a 0,5 m/s; tali correnti sono responsabili di una intensa erosione davanti al varco, tendenza che si è accentuata dopo l'ultimo intervento.

Nel giugno 2002 e nel gennaio 2004 sono state eseguite due batimetrie di dettaglio dell'area con sistema *multi-beam*. Confrontando la batimetria nel giugno 2002 con la precedente, eseguita nel marzo 2001, (Fig. 37) è emerso che l'impatto dovuto alla chiusura della cella Sud mediante trasversale sommerso è stato positivo, infatti la tendenza erosiva in tale cella è diminuita. La batimetria del gennaio 2004 è mostrata in Figura 31 in Aminti et al. (2005). In entrambe le batimetrie sono visibili delle depressioni a circa 70 m dalle testate, dovuti agli intensi vortici che si generano presso le testate stesse, presso la testata Sud durante venti di Scirocco e presso la testata Nord durante venti di Bora.

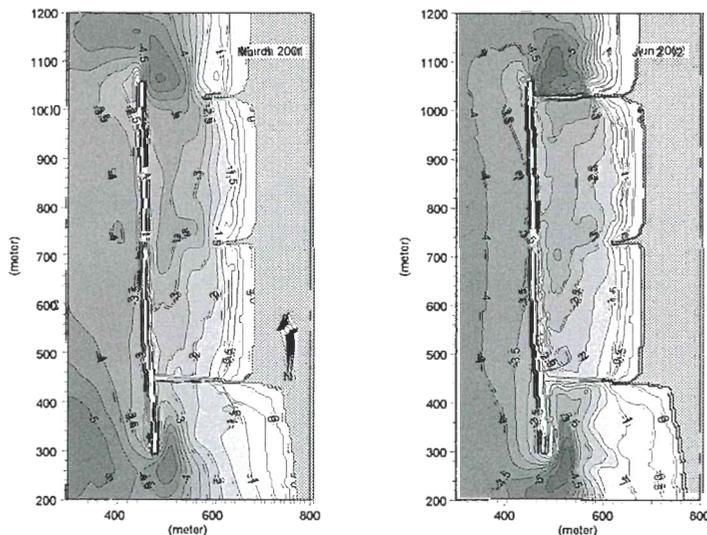


Figure 37 - Batimetrie di dettaglio eseguite nel marzo 2001 e nel giugno 2002.

Nell'ultimo rilievo è ben riconoscibile un canale davanti al varco, dovuto alla chiusura della cella Sud. È interessante inoltre notare come dall'ultimo intervento la qualità dell'acqua sia peggiorata per il limitato riflusso.

Considerazioni finali

Le opere di difesa presso Lido di Dante sono state realizzate per garantire il mantenimento di una adeguata dimensione della spiaggia a scopo turistico balneare e per ridurre il rischio di inondazione del retrospiaggia. Tale intervento di protezione dopo anni di osservazioni ed in seguito a modifiche ed assestamenti della configurazione delle opere, ha mostrato complessivamente un buon funzionamento, tenendo conto del fatto che è stato eseguito presso un litorale caratterizzato da un'apprezzabile subsidenza e riduzione di apporto sedimentario. Presso il litorale Sud rispetto alla zona protetta si è verificato nel tratto immediatamente vicino all'opera un arretramento della linea di battigia, che ha spinto l'amministrazione locale ad eseguire un intervento di ripascimento. Tale effetto è localizzato nelle prime centinaia di metri. Le forti correnti indotte dalla presenza delle opere, presso la testata, lungo le opere parallele e nel varco, possono raggiungere valori intensi pericolosi per la balneazione, è quindi necessario un opportuno sistema informativo per avvertire i turisti della pericolosità della balneazione in determinate zone.

Pellestrina

Inquadramento dell'area

L'isola di Pellestrina delimita la laguna Sud di Venezia nel tratto compreso tra l'isola del Lido a Nord e la penisola costituita dal litorale di Sottomarina e Chioggia a Sud. L'estremità Nord si affaccia sulla bocca lagunare di Malamocco, mentre quella Sud è delimitata dalla bocca di Chioggia (Fig. 38).

L'isola si sviluppa per una lunghezza di circa 14 km ed ha una larghezza minima di 25 m prima dell'estremità Sud in località Cà Roman e una massima di 210 m nella parte centrale.

Lungo il litorale marino dell'isola sono presenti imponenti opere chiamate "Murazzi" che dal 1751 la Repubblica Veneta fece edificare per difendere gli abitati dell'isola dalla sinergica forza del mare e dell'alta marea. I "Murazzi", mantenuti e ripristinati nei secoli, raggiungono mediamente i 5 m di altezza sul livello medio del mare, nel passato sono rimasti esposti al pericolo della tracimazione come avvenne durante la famosa e storica mattina del 4 novembre 1966, quando il mare aprì tre brecce e costrinse gli abitanti all'evacuazione dell'isola. Oggi l'isola di Pellestrina è stata messa in sicurezza dopo il completamento degli interventi realizzati nell'ambito della salvaguardia di "Venezia e della sua laguna" da un gruppo di imprese facenti parte del Consorzio Venezia Nuova, Concessionario dello Stato, per conto del Magistrato delle Acque di Venezia e Ministero dei Lavori Pubblici, tali opere sono parte di un più articolato progetto per la salvaguardia di Venezia.



Figura 38 - Posizione dell'isola di Pellestrina.

L'intervento di protezione costiera comprende i 9 km di costa dalla curvatura di Cà Roman (a Sud) fino alla diga Nord della bocca lagunare di Malamocco. L'estremità Sud dell'isola non è stata interessata dal progetto perché già difesa dal ripascimento "naturale" provocato dal blocco del trasporto lungo riva dei sedimenti diretto verso Sud. Le opere per la difesa del litorale di Pellestrina (terminate nel 1997) consistono in un ripascimento artificiale (circa 4.600.000 m³ prelevati da antichi depositi litoranei di basso stazionamento, in una vasta area a circa 20 km davanti al litorale veneziano e ad una profondità media di 20 m) atto a creare una spiaggia inizialmente larga 100 m protetta con un sistema articolato di opere di contenimento. Le opere sono state realizzate procedendo da Sud verso Nord, in senso opposto alla corrente lungo riva.

Le opere di contenimento sono organizzate in 17 celle costituite da pennelli ortogonali al litorale e da una barriera sommersa, che funge da berma naturale, longitudinale alla linea di costa, che chiude le celle alle testate dei pennelli. Le celle sono state realizzate con massi naturali (provenienti da 28 cave istriane, friulane e venete) posati su uno strato di geotessile (Ceconi e Maretto, 1996).

La sabbia prelevata nelle cave sottomarine ha una granulometria media (D_{n50}) intorno ai 0,2 mm, decisamente simile alla sabbia naturale di riva a Pellestrina (0,17 mm), ma caratterizzata da una colorazione grigiastria, in contrasto con la sabbia naturale di colore tendente al giallo.

I 18 pennelli ortogonali a costa sono lunghi ciascuno da 150 m a 210 m e distano tra loro mediamente 500 m. Ogni pennello si prolunga quindi per un tratto sommerso lungo in media 120 m fino a congiungersi alla barriera sommersa a circa 300 m dalla spiaggia artificiale.

L'opera sommersa trasversale ai pennelli è stata realizzata su fondali sabbiosi ad una profondità di 4,5 m; essa è stata realizzata con una sommergenza, come per i pennelli sommersi, di circa 1,5 m ed è costituita da una base di pietrame da 50 a 500 kg, poggiata su di un filtro geosintetico sul quale sono posati massi naturali da 500 a 2000 kg verso mare e da 50 a 500 kg verso riva (Consorzio Venezia Nuova, 1990). In Figura 39 è riportata la sezione della barriera e lo schema dell'intervento di protezione.

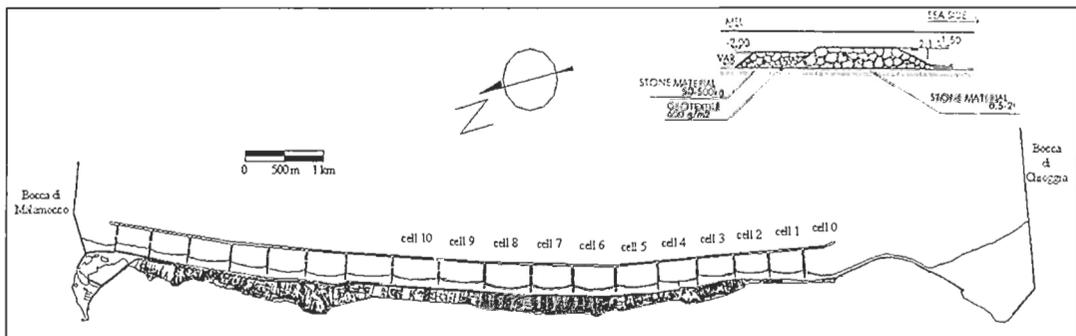


Figura 39 - Planimetria dell'intervento di protezione presso Pellestrina e sezione della barriera parallela.

Ad opera conclusa, sono stati piantati tre filari di tamerici distanziati di un metro l'uno dall'altro lungo tutta la spiaggia artificiale, con lo scopo di limitare il trasporto eolico della sabbia versata nel ripascimento verso i centri abitati. A tal scopo si sono piantate ulteriori barriere frangivento artificiali costituite da reti con porosità simile alla dimensione dei granelli di sabbia. La Figura 40 mostra una vista del litorale di Pellestrina dopo l'intervento.



Figura 40 - Litorale di Pellestrina dopo l'intervento.

Condizioni meteo-climatiche

Tra i venti regionali caratteristici che spirano sul litorale, è dominante la Bora che spira da NordEst, e regnante lo Scirocco che spira da SudEst.

La Bora è un vento che interessa principalmente la stagione autunnale ed invernale ed è particolarmente intenso e frequente nel periodo da novembre a gennaio. La Bora in estate è di gran lunga meno frequente e molto più debole energeticamente. Lo Scirocco domina la stagione primaverile estiva e si instaura nel Nord Adriatico in maniera più graduale, raggiungendo velocità minori con picchi massimi di 55 nodi circa. Nonostante ciò è responsabile, nei mesi invernali, di frequenti mareggiate in concomitanza del fenomeno dell'acqua alta.

Il regime ondoso è caratterizzato da una maggiore frequenza di onde prodotte da venti di Scirocco, con altezze attorno al metro e provenienti da $130^\circ - 140^\circ$ N, mentre le onde di Scirocco più grandi provengono da $110^\circ - 120^\circ$ N.

Le onde di Bora più alte provengono da 80° N, direzione che coincide con quella delle onde di Bora più frequenti. La Figura 41 riporta il clima ondoso relativo alla analisi dei dati registrati presso la piattaforma del C.N.R., posta circa 10 miglia al largo di Venezia (Cavaleri, 2000).

Sempre con maggiore frequenza la laguna di Venezia è allagata, soprattutto durante i mesi invernali. Tale fenomeno prende il nome di acqua alta. La marea alla sizigie è di 1 m, ma le maggiori acque alte sono dovute al fenomeno di *storm surge* causate dallo Scirocco.

La direzione del trasporto longitudinale è da Nord a Sud. La media della pendenza della spiaggia è circa 1:60 e aumenta fino a 1:90 nella parte meridionale dell'isola. La profondità di chiusura si trova a circa 5 m.

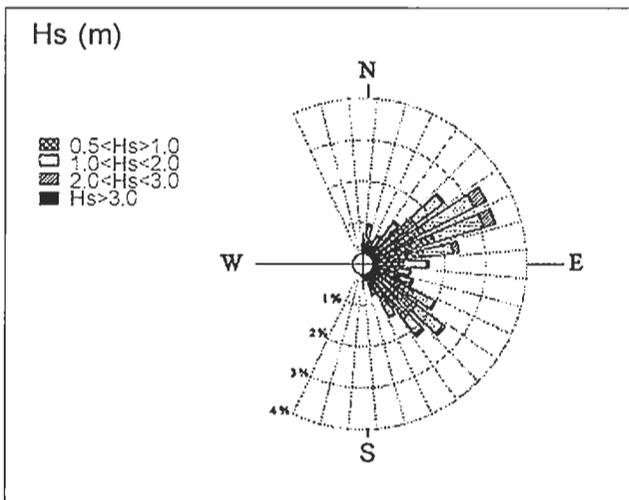


Figure 41 - Clima ondoso registrato presso la piattaforma del C.N.R. al largo di Venezia (periodo: ottobre 1987-dicembre 2002).

Osservazioni

Data l'importanza dell'intervento, il Consorzio Venezia Nuova ha eseguito dei rilievi regolari di sezioni e della linea di riva due volte l'anno, per tenere sotto osservazione l'evoluzione del litorale. Il rilievo della barriera non è stato eseguito con la stessa frequenza degli altri rilievi, ma in modo più sporadico, circa ogni 3 anni.

Un esempio di sezioni rilevate è mostrato in Figura 42 che si riferisce alla prima cella (vedi Figura 39). L'arretramento della linea di riva, in assenza di varchi, è omogeneo ed il profilo interno si irripidisce in prossimità delle opere. Dai confronti dei rilievi della barriera, disponibili a distanza di tre anni dalla posa in opera, si nota un abbassamento della sommità della cresta pari a circa mezzo metro,

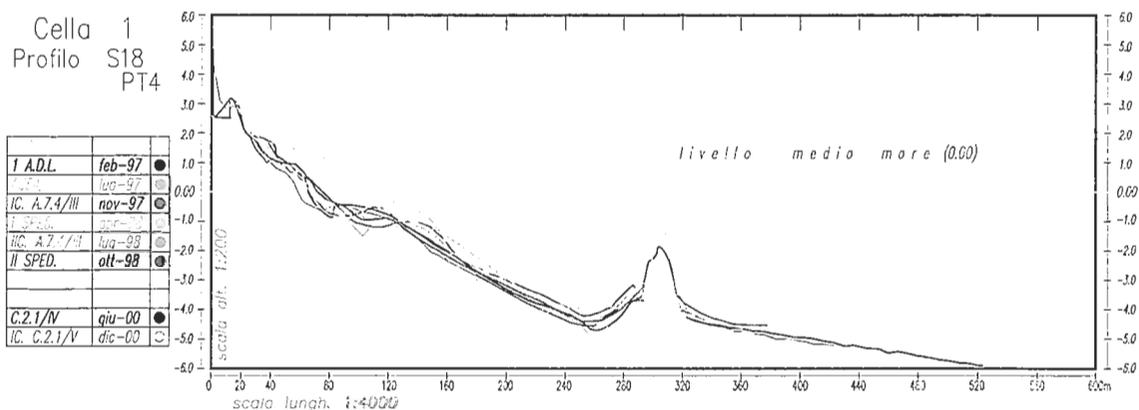


Figura 42 - Evoluzione delle sezioni presso la cella 1. Si notino i rilievi della barriera eseguiti nel febbraio 1997 (in chiaro) e nel settembre 1999 (in scuro). La cresta si è abbassata di circa 0,50 m.

probabilmente dovuto all'assestamento dei massi. Presso la cella 9 (vedi la Figura 22 in Aminti et al.) è stato eseguito nel 2002 un rilievo batimetrico di dettaglio con sistema *multibeam*. La sommergenza dell'opera risulta essere variabile da sezione a sezione, in alcune sezioni supera i 2 m ed in altre, più prossime ai pennelli, è stata misurata pari a circa 1,80 m. Mediamente la sommergenza della cresta nel 2002 è risultata essere pari a 2 m, confermando un affondamento dell'opera di 0,50 m.

L'analisi di questi profili ha mostrato che la variazione volumetrica in ogni cella è stata circa del 2% all'anno nei primi anni e si è ridotta in seguito. Il progetto prevedeva una perdita di materiale di circa 10% in 10 anni (Ceconi e Maretto, 1996).

Da simulazioni numeriche eseguite sulla cella centrale (la nona) si è stimato un trasporto netto da Nord a Sud pari a 912 m³/anno, che rappresenta il 2,8% del volume, dello stesso ordine di grandezza della stima progettuale (Barbanti, 2003).

Nel periodo 5-15 novembre 2001 sono state fatte delle misure di onde e correnti presso la cella centrale di Pellestrina mediante un A.D.C.P. installato dentro la cella a pochi metri dalla barriera sommersa (Zanutigh et al., 2004). Contemporaneamente sono state acquisite misure di onde e livelli presso la piattaforma del C.N.R. Durante la campagna si sono verificate una serie di mareggiate di Bora molto significative, con tempo di ritorno di 10 anni: la altezza d'onda al largo ha raggiunto i 3 m ed i venti il livello 9 della scala Beaufort.

Le condizioni al largo sono state simulate dal modello *Mike21* e sono stati calibrati alcuni parametri, al termine di questa fase di calibrazione si è avuta una ottima corrispondenza tra le onde misurate all'interno della cella in studio ed il risultato del modello.

Nell'ottobre 2002 sono state eseguite batimetrie di dettaglio della cella 9 e della testata Sud dell'opera (vedi la suddetta Figura 39).

In Figura 43 è mostrata la fotografia elaborata dai dati batimetrici di dettaglio presso la testata: si nota una erosione significativa a circa 80 m generata sia dalle forti correnti che dal gradiente di intensità dell'agitazione ondosa che si instaurano presso la testata stessa, e una piccola erosione vicino all'opera, lato riva, che può essere interpretata come forma di erosione localizzata dovuta ai frangenti.

La relativa batimetria di dettaglio è proposta come Figura 30 nell'articolo Aminti et al. (2005) di questo stesso volume. E' interessante notare come la forma della testata si sia mantenuta suggerendo che presso la testata non ci sono stati rilevanti spostamenti di massi.

Anche osservando la fotografia della barriera sommersa nella cella 9 (Fig. 44) si vede come la barriera sommersa non mostri segni di danneggiamento, si osserva solo qualche masso spostato al largo dell'opera, probabilmente durante la fase di realizzazione della barriera stessa. La batimetria di dettaglio della cella 9 (vedi Figura 22 in Aminti et al.) è coerente con le sezioni eseguite dal C.V.N.: si osserva un irripidimento della spiaggia a ridosso dell'opera.



Figure 43 - Ricostruzione del fondale presso la testata Sud.

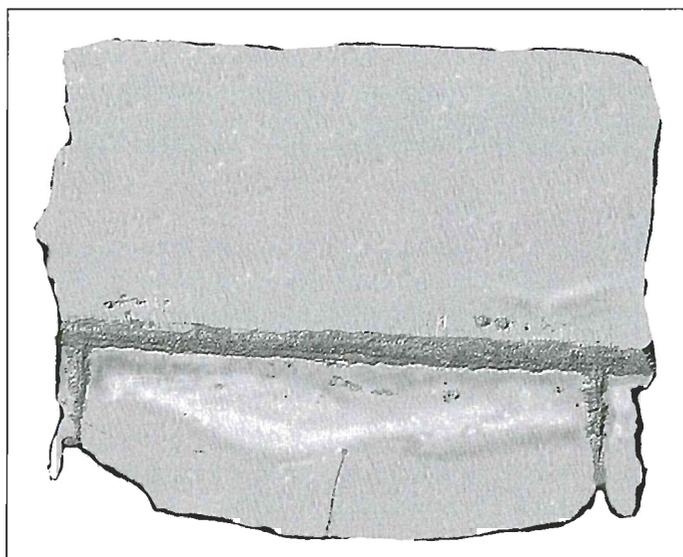


Figure 44 - Ricostruzione del fondale presso la cella 9.

Considerazioni finali

A distanza di circa 7 anni dal termine dei lavori si può concludere che le opere di protezione del litorale di Pellestrina hanno funzionato con successo. Dopo i primi anni successivi al ripascimento, in cui si è osservato un arretramento della linea di battigia, la linea di costa sembra tendere ad un equilibrio. Da osservazioni di campo si è individuata una erosione presso la testata Sud, presumibilmente generata sia dalle forti correnti che dal gradiente di intensità dell'agitazione ondosa che si instaurano presso la testata stessa. L'opera mostra un generale abbassamento pari a circa 0,50 m, probabilmente dovuto all'assestamento dei massi ed allo sprofondamento dei massi nella sabbia.

Conclusioni generali

Nella presente nota sono state descritte alcune applicazioni di strutture di difesa costiera foranee sommerse ed a cresta bassa, localizzate in otto siti distribuiti su cinque regioni italiane. L'articolo fornisce un quadro generale sui casi di studio analizzati. Le condizioni ambientali dei siti in cui le opere di difesa sono state realizzate sono molto diverse tra loro, essendo relative a mari (Mar di Sardegna, Mar Ligure, Mar Tirreno e Mare Adriatico) con condizioni meteomarine e morfologiche notevolmente differenti. Tutte le opere descritte sono costruite in massi naturali, variano le dimensioni (sommersione, dimensioni delle berme di sommità, pendenza dei paramenti laterali, ampiezza e configurazione dei varchi, ecc.), le disposizioni planimetriche (distanza dalla riva e profondità di imbasamento delle scogliere) e le configurazioni adottate (frangiflutti foranei costruiti in batterie con varchi o strutture foranee sommerse che chiudono il lato verso mare di celle realizzate con pennelli emersi e sommersi).

Per le ragioni sopraddette trarre conclusioni di carattere generale è abbastanza difficile anche per la diversità degli strumenti di analisi (rilievi batimetrici, ondametrici, sedimentologici, ecc.) disponibili ed utilizzati nelle ricerche locali. Nonostante ciò alcuni elementi di carattere comune possono essere evidenziati, essi sono i seguenti.

a - l'erosione è principalmente dovuta alla diminuzione degli apporti solidi fluviali o alla costruzione di opere portuali, la subsidenza amplifica il fenomeno già in atto;

b - il complesso delle opere realizzate nei vari siti, se si esclude l'intervento di Pellestrina, sembra inseguire l'emergenza "erosione" sintomo della mancanza di finanziamenti adeguati, di progetti generali di intervento e di idonei strumenti di controllo;

c - le opere foranee sommerse o di bassa sommersione generano erosioni sottoflutto e quindi esse non attenuano il problema della propagazione dell'erosione nelle aree libere; in alcuni casi le velocità di erosione sottoflutto sono state rapidissime manifestandosi addirittura in sede di completamento delle opere foranee;

d - la presenza dei varchi con la formazione delle correnti di *rip* produce la dispersione dei sedimenti verso il largo e notevoli rischi per la balneazione; erosioni localizzate sulle testate delle scogliere e nei varchi aggravano ulteriormente il fenomeno e la stabilità delle opere;

e - la tendenza attuale, alla luce dei risultati ottenuti, è quella di costruire celle chiuse combinando pennelli emersi e/o sommersi con barriere foranee sommerse, nelle quali però è necessario verificare opportunamente le dimensioni dell'opera longitudinale per non ridurre troppo la circolazione idrica interna alle celle e quindi attivare il deposito di sabbie fini o la proliferazione di alghe;

f - all'interno delle zone protette da opere foranee, in assenza di opere trasversali sommerse, sono presenti correnti longitudinali che possono spostare il materiale al di fuori della zona protetta; quando sono presenti anche opere trasversali sommerse il materiale viene spostato all'interno delle celle o tra celle contigue, il fenomeno è amplificato dallo *storm surge* che si verifica in occasione di mareggiate intense.

Bibliografia

- Aminti P., Lamberti A. e Liberatore G. (1983) - *Indagini sperimentali su barriere sommerse per la difesa della spiaggia*. Note e Pub. di Ing. Idr., n.30, Università di Firenze, pp. 22.
- Aminti P., Pelliccia F. e Pranzini E. (2002) - *Evoluzione del profilo di spiaggia a seguito di unripascimento artificiale in ghiaia su di una spiaggia altamente protetta*. Studi costieri, 5: 47-57.
- Aminti P., Clementi E., Lorenzoni C., Martinelli L. e Zanuttigh B. (2005) - *Esperimenti di laboratorio ed osservazioni di campo sulle modifiche indotte al fondo da opere tracimabili*. Studi costieri, numero speciale sulle strutture tracimabili, stampa nel presente volume.
- A.P.A.T. Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici nazionali (1999-2005) - *Dati ondosi della rete ondometrica nazionale (R.O.N.)*. Servizio idrografico e mareografico nazionale, Servizi tecnici nazionali, Presidenza del Consiglio dei ministri, www.apat.gov.it.
- A.P.A.T. Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici nazionali (annate varie) - *Dati mareografici della rete mareografica nazionale*. Servizio idrografico e mareografico nazionale, Servizi tecnici nazionali, Presidenza del Consiglio dei ministri, www.apat.gov.it.
- Aquater (1982) - *Studio generale per la difesa delle coste - prima fase*. Regione Marche, relazione generale, pp. 706.

- Aquater (1987a) - *Interventi di difesa della costa realizzati con fondi F.I.O. 82*. Regione Marche, pp. 75.
- Aquater (1987b) - *Piano di monitoraggio e controllo dell'erosione costiera. Primo anno di attività*. Regione Marche, relazione generale, pp. 58.
- Archetti R., Drei E. e Lamberti L. (2000) - *Monitoring Low Crested Structures: Hydrodynamic Aspects*. Proc. AGU Meeting Fall 2000, Vol. I, pp. 683.
- Archetti R., Tirindelli M., Gamberini G. e Lamberti A. (2003a) - *Analysis of Currents Around a Low Crested Barrier: Comparison Between Field and Numerical Results*. Proc. MEDCOAST International Conference, 7-10 October 2003, Ravenna, Italy, pp. 1731-1740.
- Archetti R., Tirindelli M. e Lamberti A. (2003b) - *Field Measurements of Hydrodynamics Around a Beach Defense System*. Proc. Coastal Structures 2003, ASCE: 663-675.
- Atzeni A. (2003) - *Effetti idrodinamici sulle spiagge della costa occidentale della Sardegna*. Studi costieri, 7: 61-80.
- Barbanti C. (2003) - *Il litorale di Pellestrina: stima del valore d'uso e di esistenza della spiaggia artificiale e della sua conservazione*. Tesi di laurea non pubblicata, Corso di laurea in Scienze Ambientali, Università degli studi di Bologna, sede di Ravenna, anno accademico 2002/03.
- Beji S. e Battjes J.A. (1993) - *Experimental Investigation of Wave Propagation Over a Bar*. Coastal Engineering, 19: 151-162.
- Brocchini M., Mancinelli A., Soldini L. e Bernetti R. (2002) - *Structure-generated Macrovortices and their Evolution in Very Shallow Depths*. Proc. 28th Int. Conf. Coast. Eng., ASCE, vol.1: 772-783.
- Brocchini M., Kennedy A., Soldini L. e Mancinelli A. (2004) - *Topographically-controlled, Breaking Wave-Induced Macrovortices. Part 1. Widely Separated Breakwaters*. Journal of Fluid Mechanics, 507: 289-307.
- Bühler O. e Jacobson T.E. (2001) - *Wave-driven Current and Vortex Dynamics on Barred Beaches*. Journal of Fluid Mechanics, 449: 313-339.
- Buli U. e Ortolani M. (1947) - *Le spiagge marchigiane*. Consiglio nazionale delle ricerche, pp. 148.
- Casadei C. (1997) - *Idrodinamica, trasporto dei sedimenti ed associazioni algali presenti nell'area di Lido di Dante*. Tesi di laurea non pubblicata, Corso di laurea in Scienze Ambientali, Università degli studi di Bologna, sede di Ravenna, anno accademico 1996/97.
- Cavaleri L. (2000) - *The Oceanographic Tower Acqua Alta. Activity and Prediction of Sea States at Venice*. Coastal Engineering, 39: 29-70.
- Cecconi G. e Maretto G.P. (1996) - *La cava sottomarina per il ripascimento del litorale della laguna di Venezia*. Atti del IV Congresso AIOM, Ancona, ottobre 1996: 179-190.
- Cipriani L.E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F. e Pranzini E. (2001) - *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della toscana settentrionale*. Studi Costieri, 4: 119-156.
- Commisso A. (2001) - *Analisi degli interventi di protezione delle coste del litorale pisano*. Tesi di laurea non pubblicata, Facoltà di ingegneria, Università degli studi di Firenze, anno accademico 2000/2001.
- Consiglio nazionale delle ricerche (1985) - *Atlante delle spiagge italiane*. Progetto finalizzato: conservazione del suolo, sottoprogetto: dinamica dei litorali, C.N.R., fogli 110, 117 e 118.
- Consorzio Venezia Nuova (1990) - *Relazione Tecnica sul progetto di massima riguardante gli interventi di difesa del litorale veneziano dal fiume Brenta al fiume Sile facenti parte dei nuovi interventi per la salvaguardia di Venezia*. Genio Civile Opere Marittime, Ministero dei lavori pubblici, progettazione TECHNICAL (Verona), report VE0706 PMRT 01, vol 1, pp. 200 circa.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1987) - *Analisi ambientale quantitativa dei litorali marchigiani fra Gabicce ed Ancona. Livello del rischio naturale e del degrado, distribuzione dei sedimenti e loro possibile impiego per ripascimenti artificiali*. Bollettino Società Geologica Italiana, vol. 106: 377-423.
- Dean R.G., Chen R. e Browder A.E. (1997) - *Full Scale Monitoring Study of a Submerged Breakwater*. Coastal Engineering, 29: 291-315.
- Drei E., Turchetto A., Archetti R. e Lamberti A. (2001) - *Wave and Current Field Measurements Around Low Crested Structure*. Proc. Ocean Waves Measurements and Analysis, ASCE, Vol.1, pp. 115-124.
- Dronen N., Karunarathna A., Fredsøe J., Sumer M.B. e Deigaard R. (2002) - *An Experimental Study of Rip Channel Flow*. Coastal Engineering, 45: 223-238.
- Haller M.C., Dalrymple R.A. e Svendsen I.A. (1997) - *Rip Channel and Nearshore Circulation*. Proc. Coastal Dynamics '97, ASCE, vol.1: 594-603.

- Haller M.C., Dalrymple R.A. e Svendsen I.A. (2002) - *Experimental Study of Nearshore Dynamics on Barred Beach with Rip Channel*. Journal Geophysical Research-Ocean, 107(C6): 14/1-14/21.
- Istituto di Idraulica, Università di Ancona (2001) - *Studi, indagini, modelli matematici finalizzati alla redazione del piano di difesa della costa*. Regione Marche, pp. 800 circa.
- Istituto geografico militare (annate varie) - *Carta d'Italia*. Cartografia militare, I.G.M., Firenze.
- Istituto idrografico della Marina (annate varie) - *Cartografia nautica*. Marina militare, I.I.M., Genova.
- Lamberti A., Petrillo A. e Ranieri M. (1985) - *A Comparative Analysis of Some Types of Submerged Barriers as Beach Defense Structure*. Proc. 21st IAHR Cong., Melbourne, pp. 19-23.
- Lamberti A., Gabbianelli G., Airoidi L., Archetti R., Bacchiocchi F. e Soldati M. (2002) - *Monitoraggio triennale e studio del comportamento delle opere di difesa del ripascimento protetto del lido di Dante-Ravenna*. Rapporto Finale AGIP, pp. 180.
- Lamberti A., Archetti R. e Tirindelli M. (2004) - *Description of the Site: Lido di Dante. Final Report Delos Project. Deliverable D58*. Electronic publication at <http://www.delos.unibo.it>.
- Liberatore G. e Petti M. (1992) - *Wave transformations over a submerged bar; experiments and theoretical interpretations*. Proc. 23rd Int. Conf. Coast. Eng., Venezia, vol.1: 447-459.
- Lorenzoni C., Perucci P. e Riccioni M. (1987) - *Ripascimento artificiale di alcuni litorali marchigiani: criteri di progetto, modalità di esecuzione e conseguente evoluzione delle spiagge*. Atti del IV Colloquio nazionale A.I.O.M., Ancona, 24-26 settembre 1987, parte I: 196-221.
- Lorenzoni C., Mancinelli A. e Soldini L. (1998a) - *Misure di moto ondoso al largo di Ancona. Caratteristiche spettrali in acque basse*. Atti dell'Istituto di Idraulica dell'Università degli studi di Ancona, giugno 1998, pp. 56.
- Lorenzoni C., Mancinelli A. e Soldini L. (1998b) - *Evoluzione batimetrica del litorale a Nord di Ancona. Analisi del trasporto solido trasversale*. Atti dell'Istituto di Idraulica dell'Università degli studi di Ancona, giugno 1998, pp. 46.
- Lorenzoni C., Mancinelli A. e Soldini L. (1998c) - *Caratteristiche sedimentologiche del litorale a Nord di Ancona. Analisi del movimento delle ghiaie*. Atti dell'Istituto di Idraulica dell'Università degli studi di Ancona, giugno 1998, pp. 54.
- Lorenzoni C. e Mancinelli A. (2002) - *Erosione e opere di difesa per il litorale: la costa delle Marche*. Quaderno dell'Istituto di Disegno Architettura Urbanistica dell'Università di Ancona: "Orli d'acqua: il disegno della costa e della città porto" a cura di Fausto Pugnalone - Istituto di Disegno, Architettura e Urbanistica, Ancona, 2002: 73-96.
- Losada I.J., Patterson M.D. e Losada M.A. (1997) - *Harmonic Generation past a Submerged Porous Step*. Coastal Engineering, 31: 281-304.
- Losada M.A. e Gimenez-Curto L.A. (1979a) - *The Joint Effect of the Wave Height and Period on the Stability of Rubble-mound Breakwaters using Iribarren's Number*. Coastal Engineering, 3: 77-96.
- Losada M.A. e Gimenez-Curto L.A. (1979b) - *An Approximation to the Failure Probability of Maritime Structures under a Sea State*. Proc. 5th Conf. on Port and Ocean Engineering, Trondheim, Norway: 1269-1281.
- Mancinelli A. e Lorenzoni C. (1993) - *Le opere di protezione dei litorali marchigiani*. La difesa dei litorali in Italia, Edizioni delle Autonomie, Roma 1993: 309-326.
- Mancinelli A., Soldini L. e Lorenzoni C. (1999) - *Dinamica delle foci fluviali nelle Marche. Proposte di sistemazione e gestione*. Atti delle Giornate di studio su "La difesa idraulica del territorio", Trieste, 23-24 settembre 1999, pp. 463-482.
- Mancinelli A., Lorenzoni C. e Soldini L. (2000) - *Evoluzione di una foce fluviale in presenza di prevalente azione erosiva marina*. Atti del 27° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Genova, 12-15 settembre 2000, volume IV: 191-194.
- Musino G. (2003) - *Studio della dinamica evolutiva del litorale di Alghero e piano di intervento*. Tesi di laurea non pubblicata, Facoltà di ingegneria, Università degli studi di Pisa, anno accademico 2002/03.
- Peregrine D.H. (1998) - *Surf Zone Currents*. Theor. Comp. Fluid Dyn., 10: 295-309.
- Preti M. (2001) - *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2000*. I quaderni dell'ARPA, pp. 123.
- Regione Autonoma della Sardegna (1991) - *Studio del regime litoraneo tra Punta Furcadizzo e Punta Perd'e Sali nel Comune di Sarroch*. Rapporto non pubblicato. Relazione pp. 72, 2 allegati e 32 tavole.

- Regione Autonoma della Sardegna (1998) - *Monitoraggio nel litorale di Perd'e Sali (Sarroch) interessato dalle opere di protezione costiera e dall'insabbiamento dell'approdo per piccole imbarcazioni. Secondo intervento.* Rapporto non pubblicato. Relazione, pp. 27 e 5 allegati.
- Regione Autonoma della Sardegna (2001) - *Monitoraggio nel litorale di Perd'e Sali (Sarroch) interessato dalle opere di protezione costiera e dall'insabbiamento dell'approdo per piccole imbarcazioni. Terzo intervento.* Rapporto non pubblicato. Relazione pp. 42, 4 allegati e 8 tavole.
- Ripanti D. (1987) - *Note storiche sul litorale di Montemarçiano. Volume I - Cronaca illustrata.* Comitato per il recupero e la valorizzazione della spiaggia, Montemarçiano, dicembre 1987, pp. 200 circa.
- Smith E.R. e Kraus N.C. (1992) - *Laboratory Study of Wave Transformation on Barred Beach Profiles.* Proc. 23rd Int. Conf. Coast. Eng., Venezia, ASCE, vol.1: 630-643.
- Spano A. (1986) - *Sul regime di trasporto solido nella fascia costiera del lido S. Giovanni di Alghero.* Tesi di laurea non pubblicata, Facoltà di ingegneria, Università degli studi di Cagliari, anno accademico 1985/86.
- Stauble D.K. e Tabar J.R. (2003) - *The Use of Submerged Narrow-crested Breakwaters for Shoreline Erosion Control.* Journal of Coastal Research, 19: 684-722.
- Zanuttigh B., Archetti R. e Barbanti C. (2004) - *Hydrodynamics and Morphodynamics at a Protected Beach: the Study Site of Pellestrina, Italy.* Proc. 28th International Conference on Coastal Engineering, Lisbon, ASCE: 2784-2796.

Manoscritto ricevuto il 15/07/2005, accettato il 20/10/2005.