

Monitoraggio della spiaggia di Cavallino (Venezia)

Paolo De Girolamo¹, Giovanni Cecconi², Alberto Noli¹,
Gian Paolo Maretto² e Paolo Contini³

¹Università di Roma "La Sapienza" - DITS

²Consorzio Venezia Nuova

³Modimar s.r.l., Roma

Riassunto

Le spiagge di Cavallino e Pellestrina, ubicate a nord dell'Adriatico lungo i litorali veneti, sono soggette a pronunciati processi di erosione. Per porre rimedio a questa situazione, nel 1990 il Consorzio Venezia Nuova decise di intraprendere un ripascimento artificiale dei suddetti litorali versando circa 2.000.000 m³ di sabbia a Cavallino e circa 4.000.000 m³ a Pellestrina. La principale funzione delle nuove spiagge artificiali è quella di proteggere i litorali dall'ingressione marina causata dal moto ondoso e dal sovrizzo di tempesta. Al fine di programmare gli interventi di manutenzione delle spiagge, è stato attivato un dettagliato programma di monitoraggio. In questa memoria si descrive il programma di monitoraggio e vengono forniti alcuni cenni sulla metodologia che verrà utilizzata per indirizzare gli interventi di manutenzione (analisi di rischio).

Introduzione

La città di Venezia è ubicata all'interno della omonima laguna ed è protetta dal mare Adriatico dai cordoni litoranei di Lido e Pellestrina e dalle spiagge di Cavallino e Sottomarina (Fig. 1). Originariamente, il trasporto solido longitudinale causato dal moto ondoso frangente alimentava naturalmente i cordoni litoranei. In questi ultimi secoli le tre bocche di porto (Lido, Malamocco e Chioggia) sono state gradualmente stabilizzate e rinforzate attraverso la costruzione di moli foranei. Purtroppo la costruzione dei moli ha interrotto il naturale apporto solido longitudinale di sabbia responsabile del mantenimento dei cordoni litoranei, innescando una marcata erosione lungo il litorale di Pellestrina e di Lido e, nel contempo, creando nella parte nord della bocca di Lido la spiaggia di Cavallino, e nella parte sud della bocca di Chioggia la spiaggia di Sottomarina.

Al fine di arrestare il processo erosivo, negli anni compresi tra il 1750 e il 1790 la Repubblica di Venezia costruì, lungo i litorali di Pellestrina e Lido, opere di difesa radenti (chiamate murazzi) e pennelli. Tuttavia nella seconda metà del XX secolo i processi erosivi hanno causato l'approfondimento dei fondali antistanti i litorali di Pellestrina e Lido mettendo a repentaglio la stabilità dei murazzi e la salvaguardia dei centri abitati retrostanti. Contemporaneamente il tratto nord della spiaggia di Cavallino è stato interessato da intensi processi erosivi.

Per porre rimedio a questa situazione il Consorzio Venezia Nuova decise nel 1990 di intraprendere il ripascimento artificiale dei litorali soggetti a erosione. Attualmente (novembre 1997) la nuova spiaggia artificiale di Cavallino, con estensione pari a 10,2 km, è stata completata (aprile 1997), mentre a Pellestrina è stato realizzato circa il 50% della nuova spiaggia (a Pellestrina l'estensione della spiaggia artificiale raggiungerà 8,8 km). Con il completamento di tutti gli interventi previsti verranno apportati complessivamente circa 6.000.000 m³ di nuova sabbia lungo entrambi i litorali.

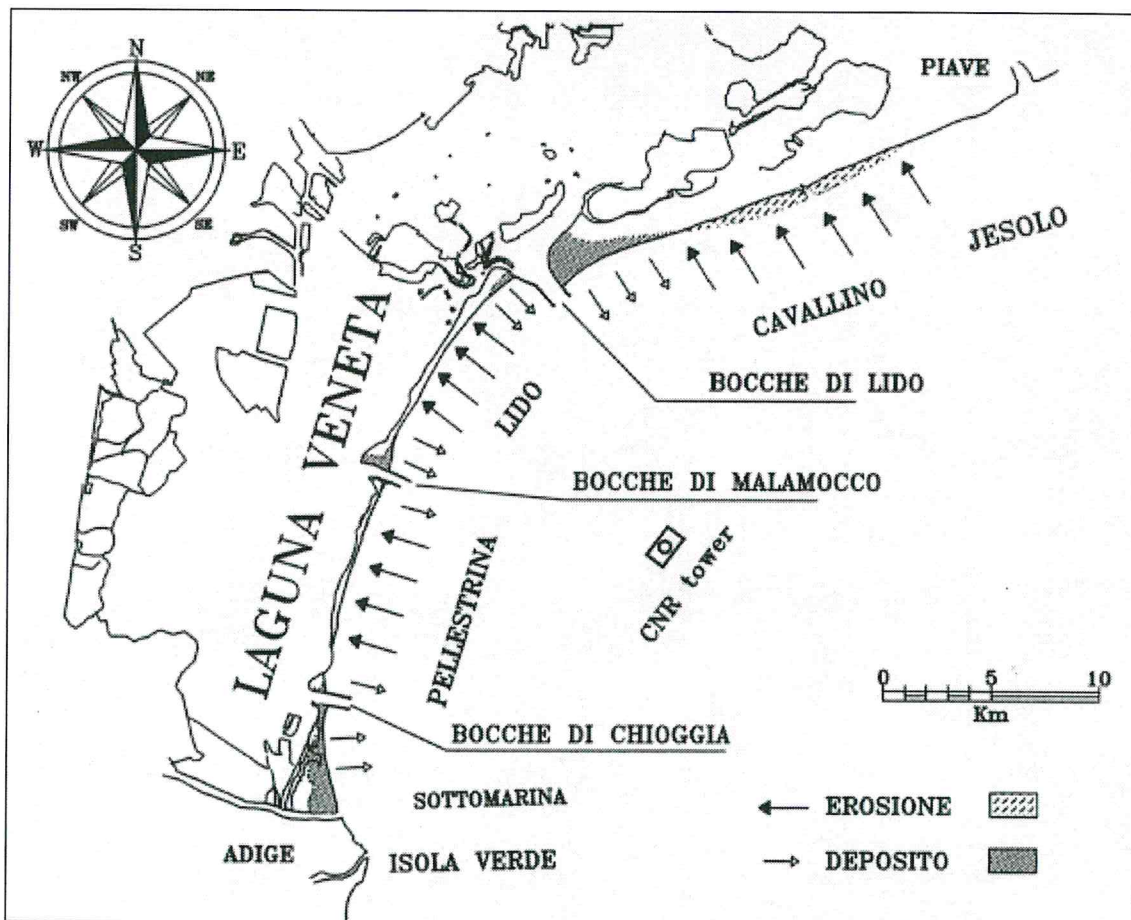


Figura 1 – Caratteristiche evolutive a lungo termine del litorale veneziano (1810 – 1990).

Le spiagge artificiali di Cavallino e Pellestrina sono contenute longitudinalmente da pennelli; nel caso di Pellestrina le estremità dei pennelli sono collegate con una barriera sommersa (quota di sommità -1,50 m s.m.m.) disposta parallelamente alla linea di battigia. Inoltre, lungo il litorale di Cavallino, sono state ricostruite alcune dune costiere protette da frangiventi e stabilizzate con piante ammfiole. Le opere relative al ripascimento di Cavallino sono illustrate nella Figura 2. Maggiori dettagli riguardanti il progetto di queste opere sono riportati nelle memorie di Silva e De Girolamo (1993), Noli et al. (1993), Cecconi e Maretto (1996) e Benassai et al. (1997).

La soluzione progettuale adottata, basata su un intervento “protetto” di tipo “morbido”, richiede necessariamente che venga messo a punto un programma di manutenzione della spiaggia il cui scopo è quello di far fronte periodicamente alle inevitabili perdite di sedimento che si verificano lungo i litorali. Durante la progettazione delle spiagge artificiali furono effettuate prove con modelli numerici e fisici al fine di stimare la quantità di sabbia necessaria per la loro manutenzione (HR Walligford, 1992a e 1992b). Tuttavia, le effettive quantità di sabbia necessarie per la manutenzione, nonché la frequenza delle “ricariche”, possono essere determinate solo attraverso una attenta analisi della dinamica dei sedimenti supportata da un regolare monitoraggio. Per questa ragione fin dalla costruzione delle nuove spiagge è stato attivato un programma di monitoraggio. Poiché gli interventi non sono stati ancora completati, attualmente non è ancora disponibile un rilievo completo delle spiagge a fine lavori. Lo scopo della presente memoria è quello di descrivere il programma di monitoraggio in corso di attuazione e l’esperienza fino ad oggi acquisita; l’attenzione è focalizzata sul litorale di Cavallino, che si trova nello stadio più avanzato di intervento.

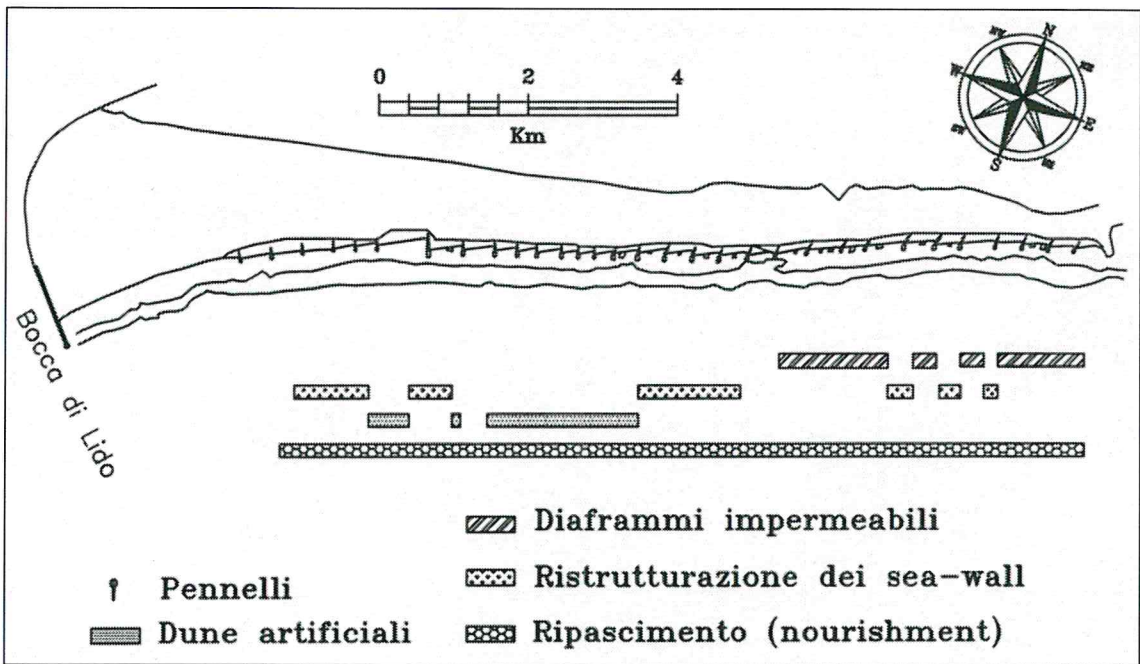


Figura 2 – Lavori eseguiti a Cavallino (Gennaio 1994 – Aprile 1997).

Il programma di monitoraggio è costituito dalle seguenti tre attività principali:

- campagne di raccolta dati (onde, vento, livelli di marea, linea di riva, prelievo di campioni di fondo);
- analisi e interpretazione dei dati raccolti;
- definizione dei lavori di manutenzione e della loro strategia di esecuzione.

Misure di campo

Onde, vento e livelli di marea

Le caratteristiche delle onde, compresa la loro direzione, il vento e i livelli di marea vengono misurati con continuità (ogni tre ore) alla torre del CNR localizzata in posizione baricentrica rispetto ai litorali veneziani e distante dalla costa circa 8 miglia nautiche, su un fondale di circa -15,5 m s.l.m.m. (vedi Fig. 1). L'intervallo di campionamento dei dati ondometrici viene ridotto ad un'ora quando l'altezza d'onda significativa supera la soglia di un metro. Attualmente i dati sopra menzionati sono disponibili in una serie storica pressoché continua a partire dal 1987.

Rilievo dei fondali e della linea di riva

Il monitoraggio periodico comprende il rilievo dei profili trasversali della spiaggia, della linea di riva e l'analisi granulometrica dei campioni di fondo. Mediamente i profili trasversali sono rilevati fino alla batimetrica -4,0, con un intervallo di circa 50,0 m e fino alla batimetrica -10,0 con un intervallo di circa 500 m. I campioni di fondo vengono raccolti sulla linea di battigia e alla profondità di -2,0 m e di -4,0 m s.l.m.m. lungo sezioni intervallate di circa 500 m.

Per ciascuna delle celle completate sono ad oggi (novembre 1997) disponibili quattro rilievi:

1. un rilievo effettuato prima dei lavori (utilizzato per il progetto);
2. un rilievo effettuato dopo la costruzione dei pennelli e prima del ripascimento;
3. un rilievo effettuato dopo il ripascimento;
4. un rilievo effettuato un anno dopo il completamento del ripascimento artificiale.

Le quantità di sabbia effettivamente impiegate per il ripascimento sono state misurate confrontando il secondo e il terzo rilievo. Per il futuro si è deciso di effettuare due rilievi batimetrici all'anno (uno

al termine della stagione estiva e l'altro al termine della stagione invernale). La Figura 3 mostra un esempio dei quattro profili trasversali misurati in una sezione di Cavallino.

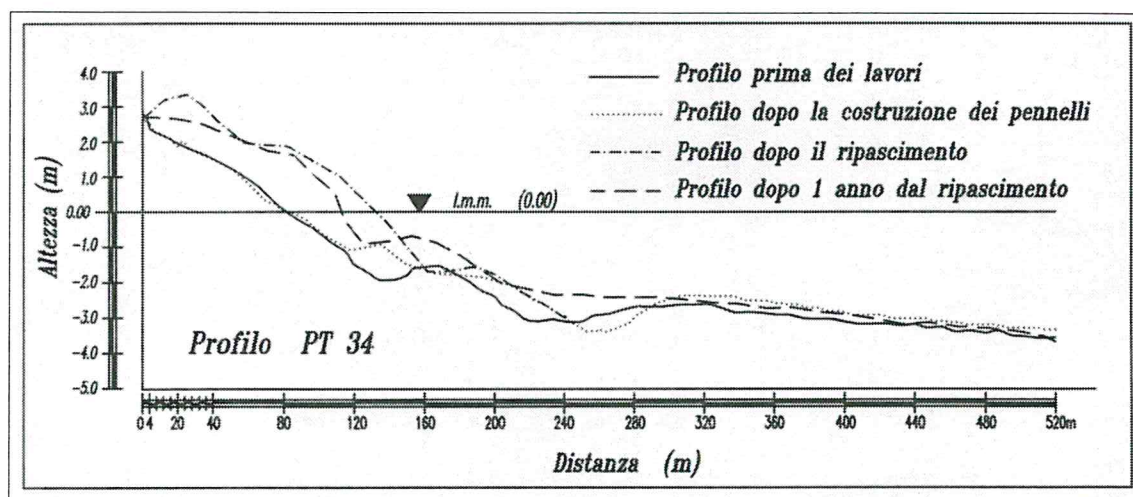


Figura 3 – Esempio di profili trasversali monitorati a Cavallino.

A Cavallino l'esecuzione dei lavori ha richiesto un periodo di circa tre anni (da gennaio 1994 ad aprile 1997), mentre a Pellestrina la durata prevista è di circa tre anni e mezzo (ottobre 1994 - giugno 1998). Per questa ragione in ogni cella il secondo, il terzo e il quarto rilievo sono stati effettuati in tempi diversi. Il primo rilievo che verrà realizzato simultaneamente in tutte le celle dopo il completamento dei lavori, sarà effettuato nell'autunno 1997 a Cavallino e nell'autunno 1998 a Pellestrina. Quindi ad oggi (novembre 1997) non è ancora possibile effettuare una valutazione omogenea del comportamento complessivo dei ripascimenti artificiali sugli interi litorali di Cavallino e Pellestrina.

Analisi dei dati

L'analisi dei dati è normalmente eseguita dopo l'esecuzione di un rilievo periodico e prevede:

- aggiornamento del clima del moto ondoso (medio ed estremo) per l'intera serie storica. Questa analisi include la definizione della relazione intercorrente tra l'altezza d'onda significativa e il periodo medio sia per le onde frequenti (medie) che per quelle estreme;
- la definizione del clima di moto ondoso al largo per il periodo di tempo compreso tra gli ultimi due rilievi;
- la propagazione del moto ondoso da largo verso alcuni punti ubicati alla batimetrica $-10,0$ m s.l.m.m. posti di fronte ai litorali. La propagazione viene effettuata con il modello numerico Orione sviluppato dalla Modimar s.r.l. di Roma. Il modello permette di propagare in tempo reale le caratteristiche del moto ondoso misurate alla torre del CNR in circa 15 punti localizzati lungo i litorali compresi tra Isola Verde (sud della Bocca di Chioggia) e Iesolo (litorale a nord di Cavallino). La propagazione viene effettuata utilizzando il metodo detto della "rifrazione inversa spettrale" (vedi: Dorrenstein, 1960; Abernethy e Gilbert, 1975);
- una elaborazione del clima di moto ondoso per la determinazione delle onde morfologiche.

Analisi dei rilievi batimetrici:

I risultati dei rilievi batimetrici sono rappresentati sotto forma di sezioni trasversali del profilo della spiaggia e planimetrie della linea di riva.

Analisi dei campioni di fondo:

Dai campioni di fondo vengono ottenute le curve granulometriche.

In Figura 4 è rappresentato il clima di moto ondoso misurato al CNR e relativo al periodo 1987-1997. La figura mostra la tipica distribuzione bimodale del clima ondoso; la risultante del flusso di energia del moto ondoso al largo ha direzione $101,7^\circ$ N.

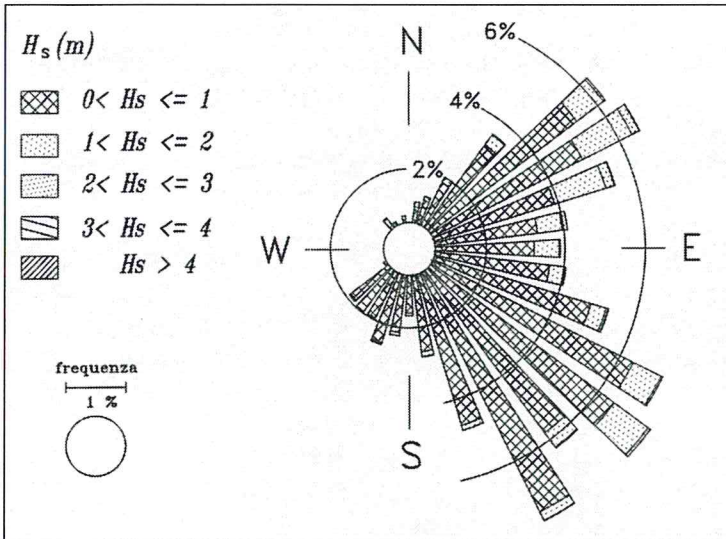


Figura 4 – Moto ondoso al largo misurato alla torre del C.N.R. (1987-1997).

Interpretazione dei dati misurati

In linea di principio l'effettiva quantità di materiale perso lungo il litorale (o all'interno di ciascuna cella confinata da una coppia di pennelli) può essere determinata confrontando le variazioni dei profili trasversali e della linea di riva, avvenute tra due successivi rilievi topobatimetrici. Tuttavia un'analisi di questo tipo è affetta da inevitabili incertezze (per esempio approssimazioni nel rilievo batimetrico) nonché da limitazioni causate dall'impossibilità di separare le componenti longitudinali e trasversali dal bilancio complessivo dei sedimenti lungo il litorale. Quest'ultimo aspetto è molto importante per indirizzare la manutenzione di una spiaggia artificiale perché la perdita irreversibile di sedimenti è dovuta principalmente alla loro fuoriuscita dalla "zona attiva" in direzione trasversale alla spiaggia. Inoltre, questo tipo di analisi non fornisce alcune informazioni sulle perdite occasionali di materiale dovute al verificarsi di eventi estremi di moto ondoso e non permette di prevedere il comportamento futuro della spiaggia.

Sulla base di queste considerazioni si può affermare che una corretta analisi dei dati ricavati da campagne di misure deve essere sempre accompagnata da uno studio che riguardi la dinamica dei sedimenti. Il principale scopo di questo studio è quello di fornire un'interpretazione dei cambiamenti morfologici osservati tra due rilievi batimetrici consecutivi con l'obiettivo di calibrare idonei modelli numerici, i quali, oltre a permettere di quantificare le effettive perdite di materiale che si sono verificate lungo i litorali separando i contributi longitudinali e trasversali del trasporto solido totale, possono essere utilizzati a fini previsionali per definire la migliore strategia dei lavori di manutenzione. Partendo dalla consueta schematizzazione la quale prevede che il trasporto solido trasversale influenzi soprattutto l'evoluzione a breve termine del profilo trasversale della spiaggia, mentre il trasporto solido longitudinale sia la principale causa dell'evoluzione a lungo termine della linea di battigia, l'interpretazione dei dati misurati si basa sulle seguenti assunzioni:

- sia il trasporto solido longitudinale che quello trasversale possono essere studiati separatamente;
- il trasporto solido longitudinale non ha una forte influenza sulla dinamica trasversale;
- la dinamica trasversale influenza l'evoluzione della linea di riva fundamentalmente attraverso i due seguenti meccanismi:
 1. la risagomatura del profilo trasversale (formazione di barre o di berme);

2. la perdita irreversibile di materiale al di fuori della “zona attiva” del litorale;

Il secondo meccanismo è dovuto principalmente al verificarsi di condizioni meteomarine estreme (caratterizzate da tempi di ritorno superiori ad un anno) e/o alla formazione di correnti di “rip” le quali, nel presente caso, possono essere favorite dalla presenza dei pennelli di conterminazione di ciascuna cella.

Sulla base delle sopra citate assunzioni, un modello numerico del tipo a “una linea” accoppiato con un modello di evoluzione trasversale del profilo di spiaggia possono essere molto utili sia in fase di progettazione che di manutenzione di spiagge artificiali. La più importante limitazione all’uso di questi modelli numerici è data dal fatto che essi non sono in grado di fornire buoni risultati laddove la tridimensionalità dei processi risulti dominante (per esempio in prossimità di strutture rigide). Tuttavia modelli numerici morfologici più complessi (bi- o tridimensionali) non sono ancora in grado di simulare aree molto estese ed evoluzioni morfologiche a lungo termine. A fini pratici, la sopra citata limitazione dei modelli ad una linea e dei modelli trasversali può essere in parte attenuata da rilievi topografici dettagliati da eseguire in prossimità delle strutture. Si evidenzia che l’attendibilità di questi modelli dipende in modo particolare dalla loro calibrazione. È opinione degli autori che quest’aspetto sia molto importante per il successo del lavoro. Nel seguito verrà mostrato, con un esempio, come le limitazioni dei modelli numerici possono essere sopperite dai rilievi batimetrici.

L’interpretazione delle variazioni morfologiche può essere suddivisa in due fasi:

1. analisi dell’evoluzione a lungo termine del litorale;
2. analisi dell’evoluzione del litorale tra due rilievi consecutivi.

Analisi dell’evoluzione a lungo termine del litorale

Quest’analisi è molto importante per capire le cause che hanno indotto le variazioni morfologiche delle spiagge. Essa di solito si basa sui dati storici dell’evoluzione della linea di riva e sui dati disponibili riguardo l’apporto dei sedimenti da parte dei corsi d’acqua. La conoscenza dei profili trasversali prima dell’esecuzione degli interventi può essere molto utile per interpretare la dinamica dei sedimenti che si verifica dopo il ripascimento artificiale. I principali obiettivi di quest’analisi sono i seguenti:

- ottenere un “set” base di parametri (profondità di chiusura della “zona attiva”, quota massima di risalita del moto ondoso, profili trasversali, valori medi del trasporto longitudinale, efficienza dei pennelli, etc.) e di condizioni al contorno da usare per la calibrazione del modello numerico ad una linea allo scopo di simulare l’evoluzione a lungo termine delle spiagge;
- individuare il clima di moto ondoso che può essere considerato rappresentativo dell’evoluzione a lungo termine delle spiagge.

Gli studi effettuati nel passato durante la fase di progettazione degli interventi di Cavallino e Pellestrina hanno messo in evidenza una particolare tendenza evolutiva a lungo termine dei sedimenti (vedi Fig. 1). Per esempio, le variazioni storiche della linea di riva di Cavallino mostrano che lungo il litorale si è verificato un flusso netto di sedimenti diretto da nord-est verso sud-ovest. Questo flusso litoraneo ha provocato l’avanzamento della spiaggia di Cavallino in prossimità della bocca di Lido. Nello stesso tempo l’apporto complessivo di sedimenti è diminuito a causa della costruzione di opere che hanno ridotto sia il trasporto solido longitudinale sia l’apporto dei sedimenti da parte dei corsi d’acqua che sfociano lungo il litorale. Come conseguenza di tutto ciò la spiaggia di Cavallino ha subito una rotazione attorno ad un punto neutro situato a circa 3 km dalla bocca di Lido. Ad est di questo punto la spiaggia è stata soggetta ad erosione, ad ovest, invece, si è progressivamente accresciuta.

Durante la fase di progettazione, le variazioni storiche della linea di riva sono state utilizzate dal laboratorio di HR Wallingford per calibrare un modello numerico denominato Beachplan (del tipo ad “una linea”). Questa attività è stata ripetuta con successo con il modello Aries (sviluppato dalla Modimar in collaborazione con l’ENEL-PIS di Milano) che verrà utilizzato per la gestione dei litorali.

In Figura 5 sono riportati alcuni profili trasversali rilevati lungo il litorale di Cavallino prima

dell'esecuzione dei lavori. Nella stessa figura è rappresentata la curva che involupa le creste delle barre secondo l'equazione di Silvester (1993):

$$h_c = 0,111 X_c^{0,575} \quad [1]$$

dove X_c è la distanza tra la cresta della barra e la linea di battigia e h_c è la profondità della cresta della barra rispetto al livello medio marino. L'equazione 1 è riportata in Figura 6 insieme alla coppia di valori X_c e h_c , ottenuti dai profili trasversali di Figura 5.

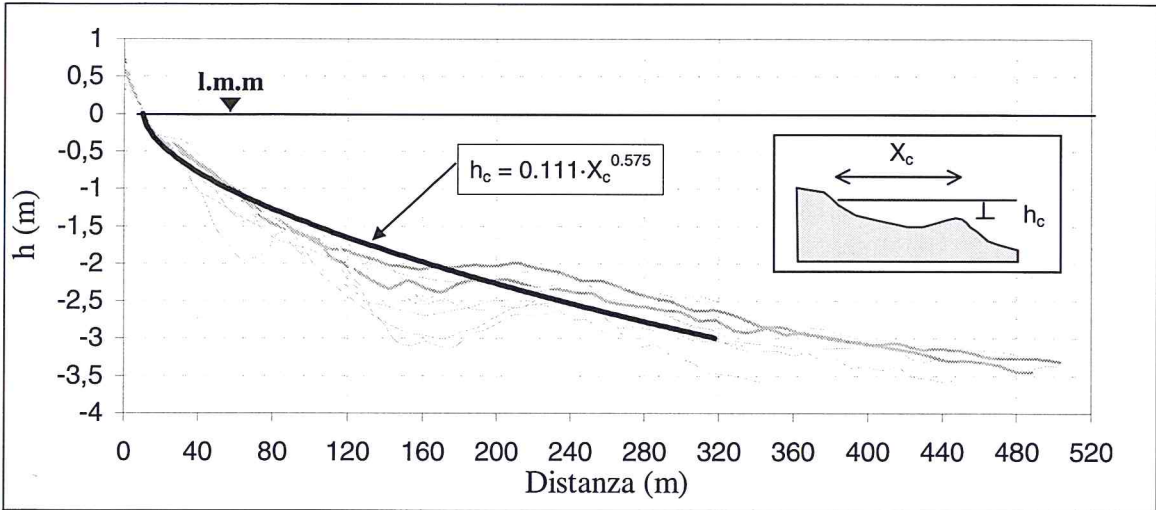


Figura 5 – Profili trasversali rilevati prima dei lavori.

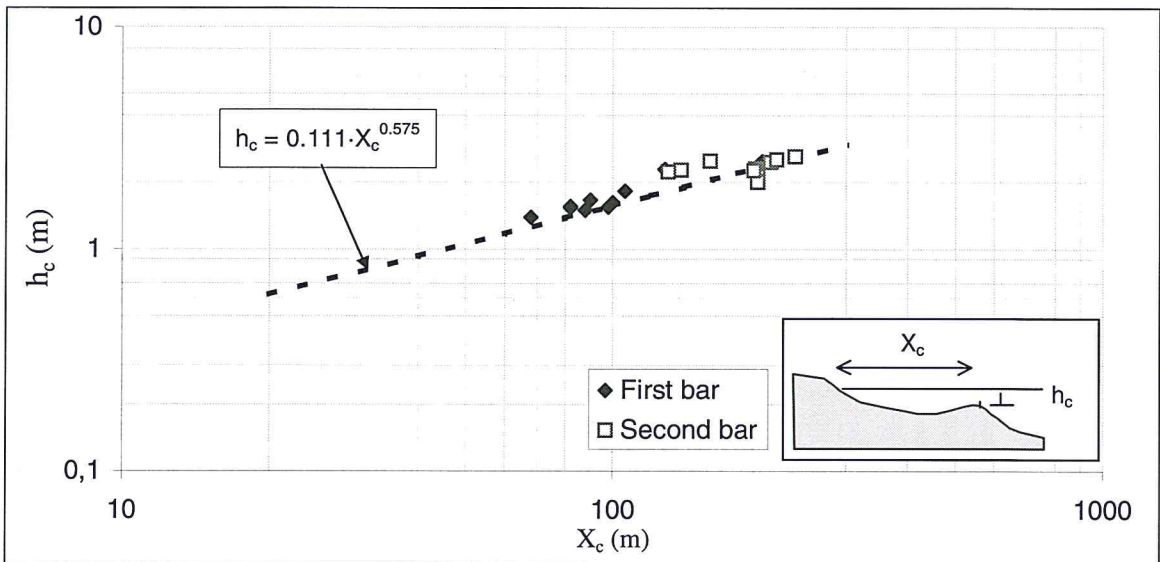


Figura 6 – Analisi delle caratteristiche morfologiche della prima e seconda serie di barre prima dei lavori

Sulla base delle Figure 5 e 6 si possono fare alcune osservazioni. Il profilo trasversale della spiaggia di Cavallino prima dei lavori è un tipico profilo a barra caratterizzato da due sistemi di barre. Utilizzando la seguente espressione (Horikawa, 1988):

$$h_c = 0,59 H_b \quad [2]$$

la profondità della cresta della barra può essere messa in relazione con l'altezza d'onda frangente

H_b . Inserendo nell'equazione 2 i valori medi di h_c , ottenuti dai rilievi di campo sia per il primo che per il secondo sistema di barre, è possibile derivare le altezze significative delle onde frangenti che hanno creato le barre. In tal modo si ottiene per la prima barra $H_b \cong 3$ m e per la seconda barra $H_b \cong 4$ m. Le corrispondenti altezze d'onda significative al largo sono caratterizzate rispettivamente dal tempo di ritorno di 1 anno e di 10 anni.

Analisi dell'evoluzione del litorale tra due rilievi consecutivi

Il principale scopo di questa analisi è quello di quantificare le perdite irreversibili di materiale che si verificano lungo il litorale e all'interno di ciascuna cella. Queste perdite, dovute principalmente al movimento della sabbia verso il largo al di fuori della "zona attiva", presentano sicuramente degli oneri di manutenzione superiori rispetto a quelle causate dal movimento longitudinale dei sedimenti. Come è stato specificato all'inizio del paragrafo, questa analisi di solito viene effettuata utilizzando un modello numerico del tipo ad una linea.

Prima dell'applicazione dello strumento numerico, è importante eseguire una analisi preliminare dei dati misurati. Per esempio, dall'analisi dei dati di moto ondoso registrati tra due rilievi consecutivi è possibile accertare se si sono verificate condizioni di moto ondoso che si discostano dai valori medi caratteristici del sito in esame. Inoltre l'analisi dei profili trasversali può fornire indicazioni attendibili per quanto riguarda l'effettiva profondità di chiusura della "zona attiva" e sulla formazione delle barre, le quali possono fornire una utile protezione al litorale nel caso si verificano condizioni di moto ondoso estremo.

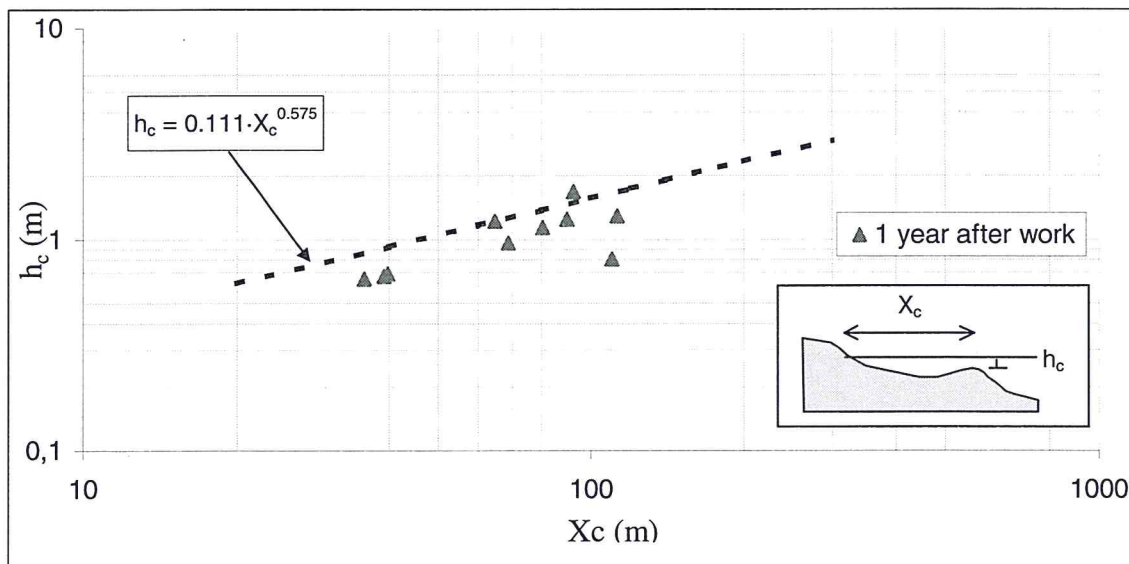


Figura 7 – Analisi delle caratteristiche morfologiche della prima e seconda serie.

In questa fase l'applicazione di un modello del tipo ad una linea si prefigge di raggiungere due obiettivi:

1. quantificare il volume di sabbia scambiato in direzione trasversale al litorale;
2. calibrare il modello per una sua successiva applicazione rivolta a definire le strategie di manutenzione.

L'applicazione del modello ad una linea deve essere effettuata utilizzando il "set" di parametri di base derivato dall'analisi dell'evoluzione a lungo termine del litorale e il clima del moto ondoso registrato durante il periodo di tempo preso in esame. Se il clima di moto ondoso registrato e il set di parametri di base sono corretti, l'unico fattore di calibrazione che deve essere affinato durante l'applicazione del modello è la quantità del trasporto solido che si è verificato in direzione trasversale.

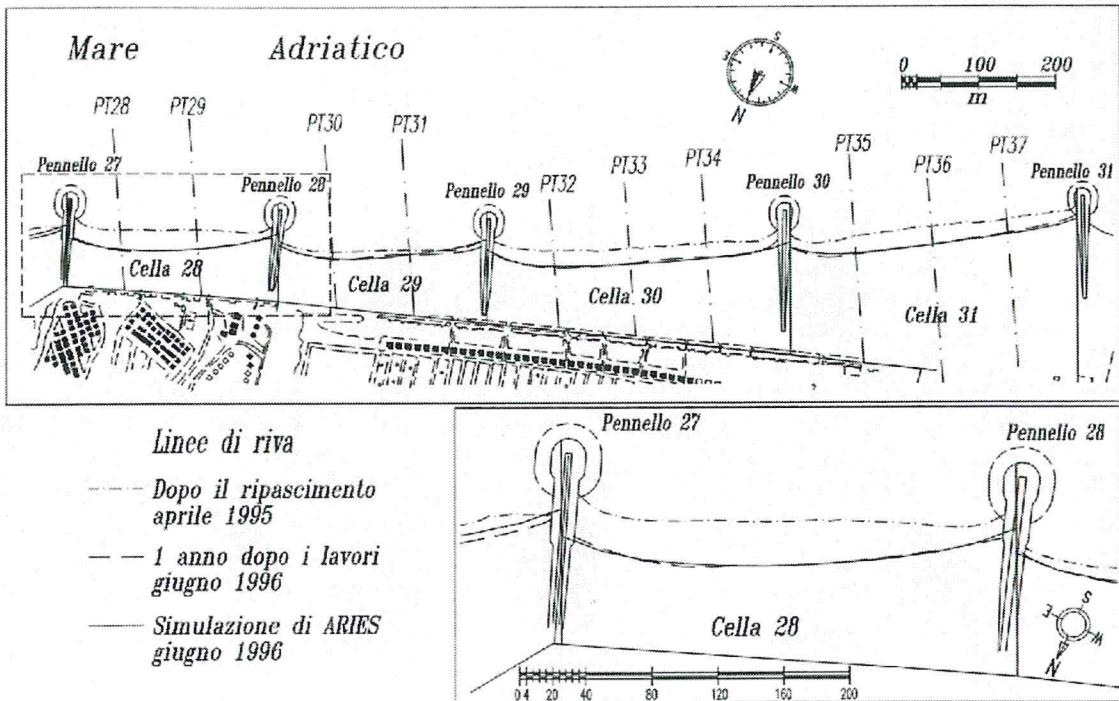


Figura 8 – Monitoraggio della linea di riva e simulazione dell'evoluzione con il modello ad una linea.

Si riporta nel seguito un esempio di applicazione per quattro celle del litorale di Cavallino (celle n. 28–31) che sono state completate nel mese di aprile del 1995.

La Figura 8 mostra l'arretramento della linea di riva che si è verificato nelle quattro celle che risulta compreso tra circa 11 e 25 m. I dati di moto ondoso registrati tra aprile '95 e giugno '96 mostrano che in questo periodo il massimo valore d'altezza d'onda significativa misurata al largo (torre del CNR) è risultato pari a 3,49 m (tempo di ritorno di un anno). Nel medesimo periodo il clima di moto ondoso registrato non ha evidenziato variazioni significative rispetto al clima degli ultimi dieci anni.

I profili trasversali effettuati nell'agosto '96 hanno evidenziato la presenza di un solo sistema di barre. Le coppie di valori X_c e h_c dedotte da questi rilievi sono riportati insieme all'equazione 1 nella Figura 7. Confrontando la Figura 7 con la Figura 6, e assumendo che i profili misurati prima dell'esecuzione dei lavori (vedi Figg. 5 e 6) siano rappresentativi del profilo trasversale di quasi equilibrio della spiaggia, è possibile concludere che un anno dopo la fine dei lavori di ripascimento le barre sono ancora in fase di sviluppo. In particolare non vi è la presenza della seconda barra che come visto in precedenza si forma con onde caratterizzate da un tempo di ritorno di circa 10 anni. Inoltre la prima barra non si è ancora completamente sviluppata in tutte le sezioni poiché le coppie di valori di X_c e h_c non risultano allineate lungo la retta di Figura 7. Si evidenzia che lo sviluppo delle barre è importante per la vita della spiaggia emersa anche se i volumi di sabbia necessari per la loro formazione determinano l'arretramento della linea di riva. Questo aspetto verrà ripreso con un esempio nel prossimo paragrafo.

La calibrazione del modello ad una linea ha mostrato che in un anno si è verificato un flusso medio trasversale di circa 35 m^3 di sabbia per metro di spiaggia. Tenendo conto della variazione di volume ottenuta dal confronto tra i profili trasversali misurati nell'aprile '95 e giugno '96 e il flusso longitudinale netto fornito dal modello ad una linea, si è calcolata che circa il 66% del flusso trasversale è servito per la costruzione delle barre e che solo il 34% di esso costituisce una perdita irreversibile di materiale disperso al di fuori dell'area attiva. La linea di riva calcolata con il modello ad una linea alla

fine della simulazione è mostrata in Figura 8. La variazione della densità di volume della sabbia di ripascimento che si verifica a causa del suo miscelamento con la sabbia preesistente (perdita di "overfill") non è stata presa in esame nel calcolo. Questa variazione di volume (stimata per il caso in esame pari a circa il 5%), che risulta essere molto importante nel primo periodo seguente al ripascimento artificiale, potrebbe ridurre la stima della quantità di materiale perso al di fuori dell'area attiva.

Definizione dei lavori di manutenzione

Come già evidenziato nell'introduzione, la vera fase di manutenzione dei litorali non è ancora iniziata perché i lavori a Pellestrina verranno completati solo nel mese di giugno '98, mentre i lavori a Cavallino sono stati completati recentemente (primavera 1997). Pertanto questa fase entrerà nel suo pieno sviluppo non prima del '98 per Cavallino e non prima del '99 per Pellestrina, quando saranno disponibili i risultati di due campagne di monitoraggio consecutive eseguite dopo il completamento dei lavori. Ciò nonostante in questo paragrafo si descrive un approccio che potrà essere utilizzato per definire i lavori di manutenzione e la loro strategia di esecuzione.

Le nuove spiagge di Cavallino e Pellestrina sono state realizzate al fine di proteggere le aree retrostanti del litorale da fenomeni di allagamento, causati da condizioni meteomarine estreme. A tal riguardo si ricorda la mareggiata del 1966, che causò gravi danni alle strutture e che allagò il paese di Pellestrina. Oltre alla loro funzione di difesa è importante rilevare che queste nuove spiagge offrono una importante opportunità di sviluppo per il turismo.

Con riferimento alla loro funzione di difesa, la manutenzione delle spiagge deve basarsi sul mantenimento, al di sotto di un determinato valore di sicurezza, del rischio potenziale di allagamento dei cordoni litoranei da esse protetti. Il rischio può essere riferito oltre che alla probabilità del verificarsi delle mareggiate che causano gli allagamenti, anche al valore economico e alla vulnerabilità dei beni da proteggere. Ad esempio, utilizzando un approccio applicato di frequente in idraulica fluviale, la valutazione del rischio di allagamento causato dalle mareggiate può essere espresso in base alla seguente formula:

$$R_t = E \times V \times t / T \quad [3]$$

in cui:

R_t = rischio di allagamento stimato su un periodo di t anni;

E = valore economico dei beni esposti agli allagamenti;

V = vulnerabilità dei beni ($0 \leq V \leq 1$, adimensionale);

t = orizzonte temporale della valutazione di rischio. Questo tempo può coincidere con il tempo necessario per effettuare la ricarica della spiaggia e ovviamente deve comprendere il tempo necessario per appaltare i lavori;

T = tempo di ritorno minimo, espresso in anni, della mareggiata che causa gli allagamenti. Questo tempo di ritorno è funzione della larghezza della spiaggia.

L'equazione 3 mostra che, per valori costanti di E , V e t , R_t aumenta al decrescere della larghezza della spiaggia poiché in tal caso si riduce il valore minimo del tempo di ritorno della mareggiata che causa gli allagamenti.

Al fine di applicare l'equazione 3 per scopi di manutenzione due aspetti sono importanti:

- è necessario fissare il valore massimo accettabile per il rischio di allagamento (R_t);
- è necessario mettere in relazione l'allagamento, che può essere espresso in relazione al valore massimo accettabile della portata di tracimazione, con parametri idraulici di più facile calcolo, quali ad esempio l'altezza d'onda significativa che si verifica al piede dell'opera di difesa localizzata alle spalle della spiaggia.

Per quanto riguarda il secondo punto, la relazione tra le portate di tracimazione e l'altezza d'onda al piede dell'opera di difesa può essere ottenuta sulla base di prove sperimentali. Il calcolo di T può essere effettuato mediante l'applicazione di un modello numerico di evoluzione del profilo trasver-

sale della spiaggia che dovrà essere applicato per diversi valori delle condizioni al contorno (onde + livelli) e per differenti sezioni del litorale. Nel caso in esame si applicherà il modello numerico denominato Taurus che è stato sviluppato dalla Cattedra di Costruzioni Marittime dall'Università di Roma "La Sapienza" in collaborazione con l'ENEL-PIS di Milano. Il modello è stato verificato e calibrato utilizzando i risultati di prove eseguite su modello fisico (Cartoni e De Girolamo, 1996). L'analisi di rischio verrà eseguita dopo ciascuna campagna di monitoraggio. La posizione della linea di riva di riferimento, per l'applicazione del modello numerico di dinamica trasversale, verrà prevista al tempo t con il modello ad una linea. Il profilo trasversale della spiaggia per l'applicazione di Taurus verrà derivato sulla base dell'ultimo rilievo disponibile. Il modello ad una linea sarà anche utilizzato per ottimizzare le strategie di ricarica della spiaggia. Per aumentare la precisione dei modelli numerici, il modello ad una linea verrà calibrato dopo ogni rilievo, mentre il modello di trasporto solido trasversale verrà calibrato sulla base di alcune prove eseguite su un modello fisico. Si riporta nel seguito un esempio di applicazione del modello di dinamica trasversale. Con questo esempio si evidenzia la funzione delle barre per la salvaguardia della spiaggia emersa.

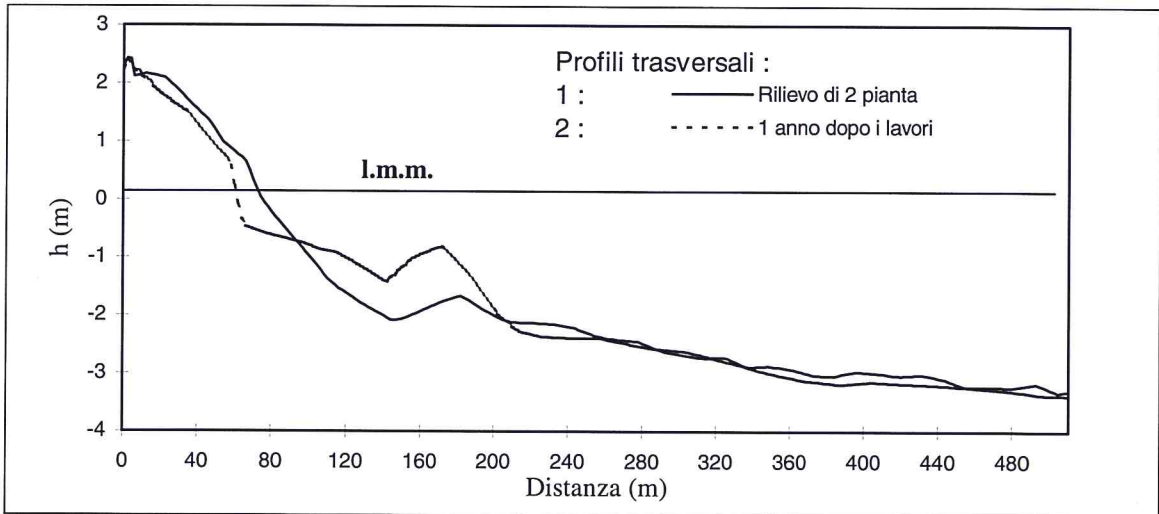


Figura 9 – Profili trasversali misurati a Cavallino al termine dei lavori di ripascimento e dopo 1 anno.

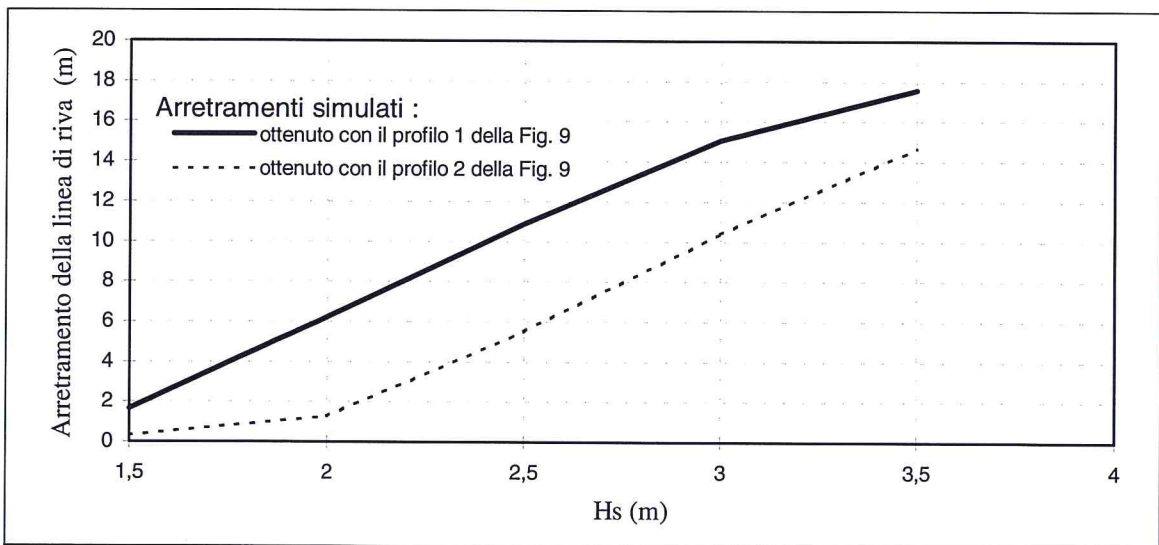


Figura 10 – Arretramenti del profilo trasversale simulati con il modello trasversale TAURUS.

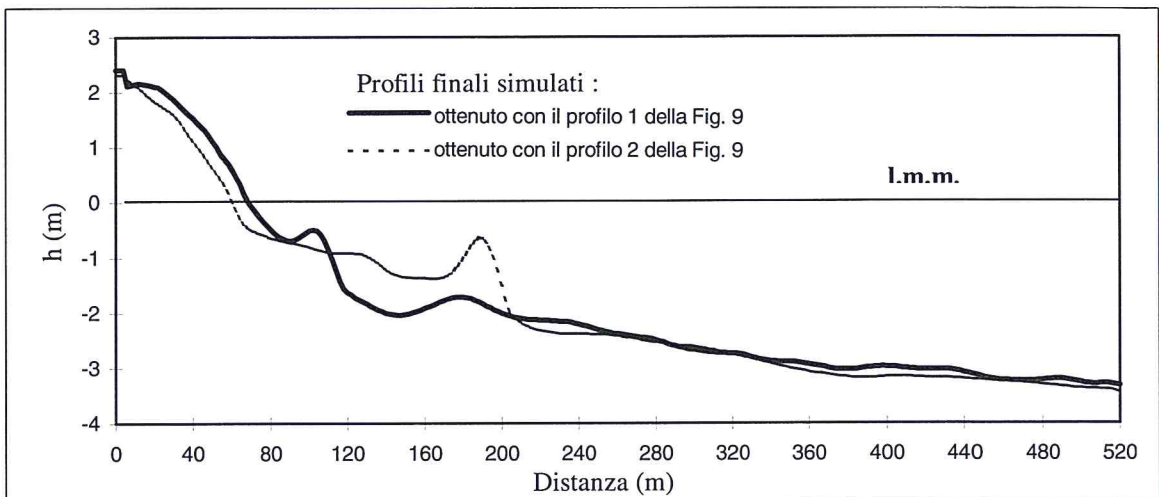


Figura 11 – Profili trasversali simulati per $H_s = 2\text{ m}$.

Le simulazioni sono state eseguite partendo da due differenti profili trasversali, misurati, nella stessa sezione trasversale del litorale, nell'ambito di due diverse campagne di monitoraggio. Il primo profilo trasversale, è stato misurato subito dopo l'esecuzione del ripascimento. Il secondo profilo è stato misurato un anno dopo la fine dei lavori. Il primo profilo non presenta ancora nessuna barra mentre il secondo mostra la presenza di una barra sviluppatasi durante il primo anno di vita della nuova spiaggia. I due profili sono rappresentati, nella pagina precedente, in Figura 9. Utilizzando questi due profili come batimetrie iniziali per le simulazioni, sono state eseguite una serie di prove variando l'altezza d'onda incidente e misurando, dopo ogni esecuzione, l'arretramento della linea di riva. L'arretramento ottenuto è rappresentato, nella pagina precedente, in Figura 10 in funzione dell'altezza d'onda incidente. Come si evince dalla figura la presenza della barra riduce l'arretramento della linea di riva. La figura 11 mostra i profili trasversali ottenuti alla fine delle simulazioni con una altezza d'onda incidente di 2 m.

Conclusioni

La manutenzione di una spiaggia artificiale non può prescindere dall'esecuzione di un attento monitoraggio che permetta di indirizzare le strategie di manutenzione. Questi aspetti assumono una particolare importanza se la funzione principale della nuova spiaggia è quella di proteggere il litorale dalle mareggiate. Al fine di definire le attività di manutenzione nonché la loro strategia di esecuzione, due aspetti devono essere evidenziati:

1. la necessità di effettuare un monitoraggio periodico del litorale basato su misure di campo (onde, vento, livello di marea, linea di riva, prelievo di campioni di fondo);
2. la necessità di applicare modelli numerici che sono essenziali sia per la valutazione delle perdite di sabbia sia per decidere le migliori strategie per la manutenzione delle spiagge.

Infine occorre evidenziare che può risultare importante eseguire una analisi di rischio per stabilire le priorità degli interventi di manutenzione.

Ringraziamenti

Il lavoro descritto nella presente memoria è stato finanziato dal Consorzio Venezia Nuova con l'approvazione del Magistrato alle Acque di Venezia. Il progetto delle spiagge artificiali è stato eseguito dalla Technital s.p.a. Si ringraziano inoltre l'ing. Fabio Mondini e l'ing. Davide Saltari per la preziosa collaborazione e per aver curato l'esecuzione di alcune simulazioni condotte con i modelli numerici.

Bibliografia

- Abernety C.L. e Gilbert, G. (1975) - *Refraction of wave spectra*, HR Wallingford, Report No INT 117, England.
- Benassai E., Gentilomo M., Ragone A. Setaro F. e Tomasicchio U. (1997) - *Littoral restoration by means of protected beach nourishment. Recent Italian works (Venetian and Tyrrhenian-Calabrian coasts)*, AIPCN, PIC '97, Venezia, Italia.
- Cartoni S., De e Girolamo P. (1996) - *Un recente modello numerico per lo studio dell'evoluzione del profilo trasversale di una spiaggia (in Italian)*. Proc. of the XXV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Torino, Italia.
- Cecconi G. e Maretto G.P. (1996) - *La cava sottomarina per il ripascimento del litorale della Laguna di Venezia*. 4° Congresso AIOM, Padova, Italia.
- Dorrestein R. (1960) - *Simplified method of determining refraction coefficients for sea waves*. J. Geophys. Res., V 65, No 2.
- Hanson H. e Kraus N.C. (1989) - *GENESIS: generalized model for simulating shore-line change, Report 1, technical reference*. Tech. Rep. CERC-89-19, U.S. Army Engr. Waterways Exp. Stn., Coastal Engrg. Res. Centre, Vicksburg, MS.
- Horikawa K. (1988) - *Nearshore dynamics and coastal processes*. University of Tokyo press, Japan.
- HR Wallingford, (1992a), *Venice Lagoon Study B7.2/3rd Phase: Model Tests for the Pellestrina Littoral*. HR Wallingford, Report EX 2524, England.
- HR Wallingford (1992b) - *Venice Lagoon Study B7.2/4th Phase: Model Tests for the Cavallino Littoral*. HR Wallingford, Report EX 2661, England.
- Longuet-Higgins M.S. (1957) - *On the transformation of a continuous spectrum by refraction*. Proc. Camb. Phil. Soc., V 53, No 1.
- Noli A., Galante F. e Silva P. (1993) - *Il progetto di ripascimento dei litorali veneziani eseguito dal Concessionario dello Stato sotto il controllo dell'Ufficio G.C.OO.MM. di Venezia*. Giornate Italiane di Ingegneria Costiera, Genova, Italia.
- Silva P. e De Girolamo P. (1993) - *Interventi di ripascimento artificiale sul litorale di Pellestrina (VE)*. In: Aminti P. e Pranzini E. Ed. "La difesa dei litorali in Italia", Edizioni delle Autonomie, Roma, Italia, pp. 269-282.
- Silvester R. e Hsu J.R.C. (1993) - *Coastal stabilization*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.