



## UNITA' FISIOGRAFICA UF3 - PARAGGIO DI PINETO

### *Variante puntuale al Piano di Difesa della Costa UF3*

	16.03.23	AGGIORNAMENTO			
INDICE	DATA	MODIFICHE	DISEGN.	CONTR.	APPROV.

## PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO - ECONOMICA

### **RELAZIONE TECNICO ILLUSTRATIVA**

<b>COMMITTENTE</b>   <b>REGIONE ABRUZZO</b> DPE - DIPARTIMENTO INFRASTRUTTURE E TRASPORTI DPE012 SERVIZIO OPERE MARITTIME VIA CATULLO n.2 - PESCARA C.F. 80003170661	<b>ELABORATO:</b>  <b>A</b>
<b>TECNICI INCARICATI</b>  <i>prof. ing. Alessandro Mancinelli</i> <i>dott. ing. Enrico Gara</i> <i>Dott. Ing. Enrico GARA</i> Ordine Ingegneri Prov. Ancona N. 901  	<b>IL DIRIGENTE DEL SERVIZIO OPERE MARITTIME</b>  <i>dott. ing. Marcello D'Alberto</i>  Dott. Ing. Alessandro MANCINELLI Ordine Ingegneri Prov. Ancona n. 674  

## Sommario

1	INTRODUZIONE.....	1
2	LE CAUSE DELL'EROSIONE .....	2
3	PROGETTI IN CORSO DI REALIZZAZIONE.....	10
4	OPERE DI PROTEZIONE – VALUTAZIONE DELLE ALTERNATIVE.....	12
4.1	PROGETTAZIONE DELLE OPERE FORANEE EMERSE E SOMMERSE .....	13
4.2	EFFETTI SOTTOFLUTTO DELLE SCOGLIERE EMERSE.....	18
5	CARATTERISTICHE ONDOSE DEL PARAGGIO .....	22
6	CONFRONTO TECNICO – ECONOMICO TRA LE SOLUZIONI .....	26

## 1 INTRODUZIONE

La Giunta Regionale ha approvato la nuova scheda di Scenario di intervento UF03 – Variante Puntuale per il tratto di costa situato nel Comune di Pineto e denominato “Pineta Catucci”.

L’incarico affidatoci dal DPE – Dipartimento Infrastrutture e Trasporti DPE012 SERVIZIO OPERE MARITTIME è quello di predisporre un Progetto di Fattibilità Tecnico Economica che analizzi diverse soluzioni progettuali per la protezione del litorale prospiciente la “Pineta Catucci” affrontando tutte le tematiche riguardanti l’efficacia delle opere e degli effetti di bordo prodotti dalle opere foranee.

Nella Fig. 1.1 è riportata una immagine satellitare da Google con il litorale nord di Pineto ed in cui si può notare l’arretramento della linea di riva davanti alla “Pineta Catucci”.

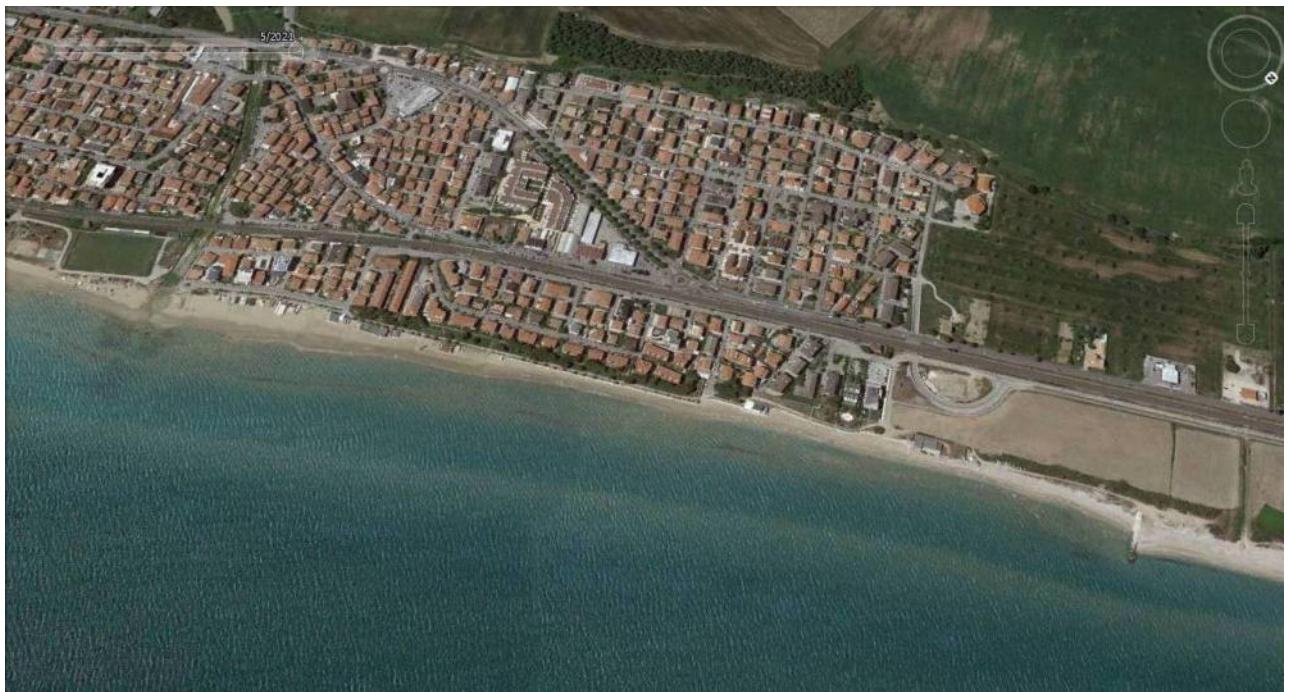


Fig. 1.1 Immagine satellitare del litorale di Pineto

## **2 LE CAUSE DELL'EROSIONE**

Il litorale di Pineto ha una lunghezza di circa 9,5 km a partire dalla foce del fiume Vomano sino al confine con il territorio del Comune di Silvi.

Il tratto di litorale in oggetto appartiene alla sub-unità fisiografica che va dalla foce armata in destra idrografica del fiume Vomano sino alla foce armata del fiume Saline per una lunghezza di circa 17 km. La sub-unità fisiografica UF-3 ha una evoluzione spiccatamente autonoma rispetto ai tratti limitrofi.

La spiaggia è prevalentemente sabbiosa, ghiaiosa ciottolosa a sud della foce del Vomano, priva di opere di difesa costiera ed esclusione nel tratto a sud del Vomano dove sono stati costruiti 6 pennelli in massi artificiali con l'interasse e aggetto in mare variabili rispetto alla linea di costa del rilievo topobatimetrico del 2020.

Opere di difesa rigide sono presenti nel litorale sud di Silvi ed in quello di città Sant'Angelo sino alla foce del F. Saline dove sono presenti scogliere emerse foranee e pennelli in massi naturali.

Nell'area centrale della sub-unità fisiografica vi è l'Area Marina Protetta Torre del Cerrano.

Nel Piano di difesa della costa (Relazione Generale) e nel Progetto di ricerca AnCoRA (Analisi di dettaglio) per l'unità fisiografica UF-3, dalla foce del Vomano alla Foce del Saline sono state valutate le cause dell'erosione, il tratto di litorale di Pineto nord appartiene a queste unità fisiografica.

Nello studio AnCoRA sono state confrontate le linee di riva dedotte dalle ortofoto del 1997, 2007, 2013, 2018 rappresentativi degli ultimi 20 anni (v. Fig. 2.1) per l'area in prossimità del centro abitato di Pineto e da cui risulta il sostanziale arretramento della linea di riva.



Fig. 2.1 Analisi della tendenza evolutiva recente del litorale (Analisi di dettaglio UF-3, Progetto AnCoRA)

Il litorale dell'UF-3 è per il 19.87% della lunghezza in arretramento (circa 3.4 km), il 29.68% (circa 5.10 km) stabile o in leggero avanzamento ed il 50.45% in avanzamento (circa 8.6km).

Le opere di difesa interessano il 35.40% della lunghezza della UF-3 con il 24% per opere trasversali e l'11.40% con sistemi a cella, sono in fase di completamento un ulteriore 5.70% di opere nel litorale nord del Comune di Silvi.

Le opere di difesa che hanno avuto un effetto sull'erosione del litorale Nord di Pineto sono i sei pennelli realizzati, a sud della foce del Fiume Vomano, a partire dal 1984 con interasse e lunghezza variabili su una spiaggia emersa ciottolosa. L'ultimo pennello verso sud, realizzato nel 2006 aveva l'obiettivo di limitare la migrazione delle ghiaie e ciottoli verso il litorale di Pineto, la cui spiaggia,

nel tratto nord, subiva un arretramento ed un invasione di ghiaia e ciottoli. In questo tratto edifici residenziali ed alberghieri insistono direttamente sulla spiaggia.

Nella Relazione Generale del Piano di Difesa della Costa viene richiesto che: *“Per il tratto di litorale prospiciente la porzione settentrionale del centro abitato di Pineto interessato da fenomeni erosivi (per una estensione circa pari a 750 m) gli effetti al contorno di qualsivoglia intervento devono essere evitati al fine di non influire sulla stabilità del litorale dell’Area Marina Protetta, attualmente alimentato dall’apporto solido del Torrente Calvano e dalla deriva sedimentaria proveniente da Nord”*. Secondo il Piano gli interventi possibili nel tratto in erosione non possono prescindere da interventi di ripascimento con eventuali soglie di contenimento con sommergenza  $R_c \geq -2.00$  ed eventuali pennelli di contenimento.

Per quanto concerne il bilancio dei sedimenti, fondamentale per dimensionare gli interventi di ripascimento, lo studio AnCoRA evidenzia che la UF-3, nella sua globalità presenta un bilancio sedimentario positivo con circa un +30'000 m<sup>3</sup>/anno di cui 11'500m<sup>3</sup>/anno imputabili ad apporti fluviali e la restante parte da ripascimenti effettuati a Pineto e Silvi. I maggiori contributi provengono dal fiume Vomano e dal torrente Calvano, lo studio stima gli apporti del Vomano pari a 15'739m<sup>3</sup>/anno, e del torrente Calvano di circa 1'702m<sup>3</sup>/anno, e del torrente Cerrano di 842m<sup>3</sup>/anno.

La portata solida litoranea nel transetto settentrionale del centro abitato di Pineto (compreso tra 4.1 e 5.7 km dalla foce armata del Vomano) è pari a circa a 3'000m<sup>3</sup>/anno mentre la portata solida cresce verso sud sino a circa 16'000m<sup>3</sup>/anno con uno squilibrio di circa 13'000m<sup>3</sup>/anno. La portata solida longitudinale è stata dedotta, nello studio AnCoRA, sia dall’analisi morfologica che da quella idrodinamica trovando valori coerenti tra le due stime.

In conclusione si può ritenere che l’arretramento prodottosi nel litorale nord di Pineto sia dovuto alla riduzione degli apporti solidi provenienti dal fiume Vomano e in parte alla realizzazione del pennello che ha bloccato il trasporto dei ciottoli e ghiaie ma ha prodotto una erosione sottoflutto caratteristica delle opere trasversali.

Successivamente alla stesura del Piano di Difesa della Costa due mareggiate molto intense hanno prodotto rilevanti danni al litorale di Pineto Nord con la sparizione totale della spiaggia emersa nei tratti più colpiti (v. Fig.2.2-2.4).

In particolare l’evento del Novembre 2019 è stato particolarmente gravoso.

La ricostruzione dell’evento dedotta dalla banca dati Copernicus mostra una mareggiata con valori dell’altezza H<sub>mo</sub> maggiori di 2m dalle ore 00.00 del 12 Novembre sino alle ore 00.00 del 14

Novembre con picco sino a  $H_{mo}=4.50m$ , il periodo di picco ha raggiunto valori di  $T_p=10 \div 11 S$ . La direzione di picco è oscillata nelle fasi di crescita e di picco della mareggiata intorno a valori di  $120^\circ \div 130^\circ N$ .

Si tratta quindi di una mareggiata proveniente da Est-SudEst con valori massimi dell'altezza d'onda, nell'ipotesi di distribuzione delle altezze d'onda di Rayleigh, pari a  $H_{max}=1.86 \cdot 4.50 = 8.37m$ .



Fig. 2.2 Stato del litorale dopo le mareggiate del novembre 2019 – febbraio 2020



Fig. 2.3 Stato del litorale dopo le mareggiate del novembre 2019 – febbraio 2020



Fig. 2.4 Stato del litorale dopo le mareggiate del novembre 2019 – febbraio 2020



Fig. 2.5 Stato del litorale prima dell'evento 2019

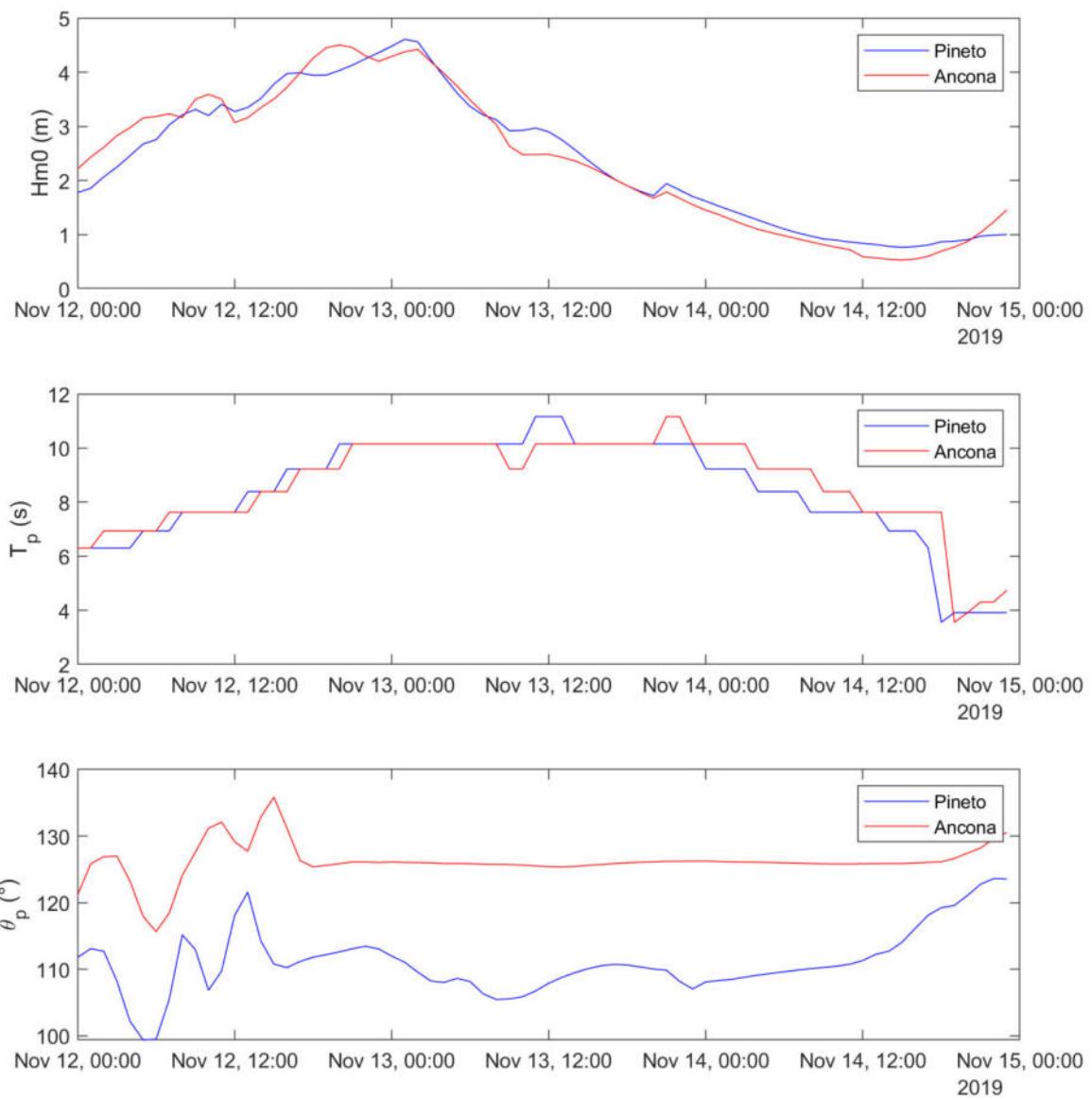


Fig. 2.6 Andamento temporale di altezza d'onda, periodo e direzione di picco della mareggiata di Novembre 2019 – dati estratti da *Copernicus* nei siti di Pineto e Ancona

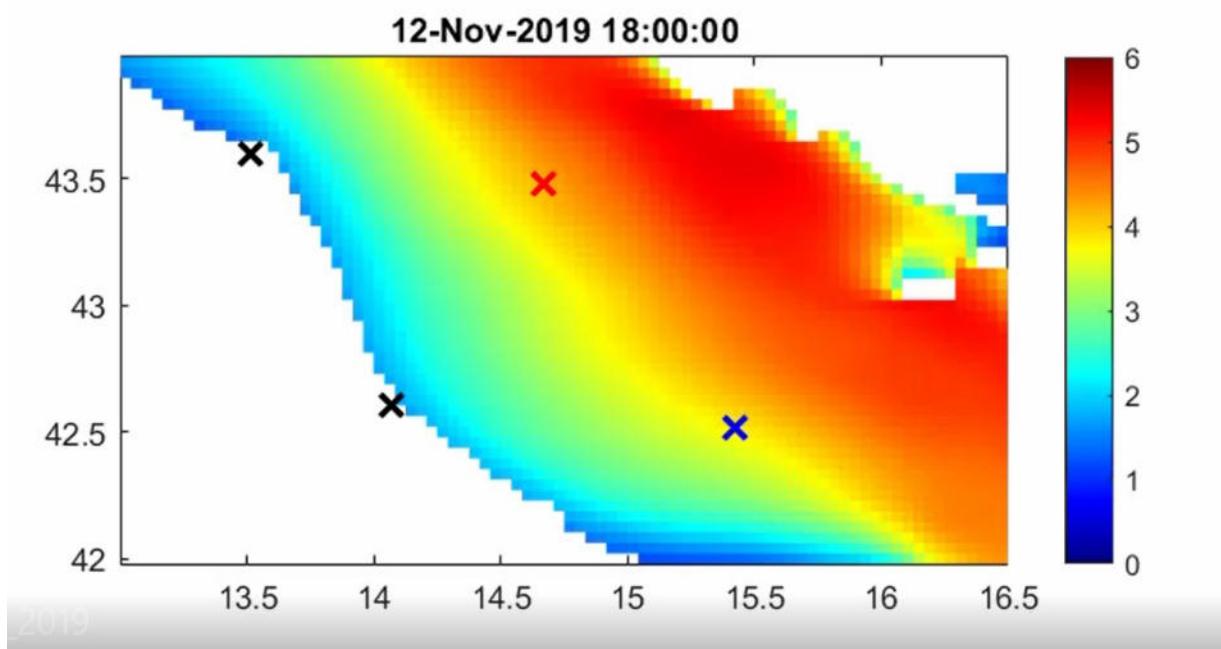


Fig. 2.7 Valori di altezza d'onda alle ore 18 della mareggia del 12 Novembre 2019 – dati estratti da Copernicus – litorale dal promontorio di Ancona al promontorio del Gargano

Si tratta quindi di una mareggia molto intensa sia nei valori di altezza e periodo sia nella durata. Sono mareggiate tipiche dell'Adriatico come già avvenuto nel 6-7 Novembre del 1999 e 14-17 Novembre del 2002 in questa ultima l'altezza significativa registrata ad Ancona nel picco è stata di  $H_s=5.23m$  (mareggia da Est-SudEst).

Questi eventi, accompagnati da valori elevati di storm-surge allagano completamente le spiagge emerse ed innescano forti correnti longitudinali e di undertow in grado di asportare completamente l'arenile.

In condizioni di trend di arretramento della linea di riva quali sono quelli in corso nel litorale nord di Pineto (vedi Fig. 2.1) gli eventi estremi producono erosioni difficilmente assorbibili dalla dinamica sedimentaria nel breve periodo soprattutto in mancanza di apporti fluviali.

Nell'ipotesi di aggravamento dei fenomeni estremi, e quindi delle mareggiate più intense, per effetto del riscaldamento globale è necessario ipotizzare sistemi di difesa costiera che salvaguardano la stabilità del litorale dell'Area Marina Protetta, possono ridurre il rischio di danneggiamento delle abitazioni e delle infrastrutture esistenti.

Il problema è di difficile soluzione poiché la dissipazione dell'energia del moto ondoso incidente, per mettere in sicurezza l'abitato di Pineto Nord (Pineta Catucci), richiede opere strutturali di tipo rigido che avrebbero effetti di bordo che devono essere attenuati e controllati.

Gli interventi previsti dal Piano della Costa si configurano come “ripascimenti protetti” che riducono in parte l’energia delle onde incidenti e non bloccano la dinamica dei sedimenti che vengono apportati per il ripascimento prelevandoli da cave di prestito.

Si riducono così il rischio di allagamento ed erosione del litorale nord di Pineto senza penalizzare il litorale sud.

### 3 PROGETTI IN CORSO DI REALIZZAZIONE

Alla data odierna sono stati appaltati i lavori di:

- a) 1° LOTTO – Opere di difesa della costa nel Comune di Pineto (Te) località litorale Nord della foce del Torrnte Calvano – OCDPCN.622 del 17/12/2019 Completamento opere di difesa della costa del Comune di Pineto (Te);
- b) 2° LOTTO – Opere di difesa della costa nel Comune di Pineto (Te) località litorale Nord della foce del Torrente Calvano – Masterplan Piano per il Sud “Intervento previsto nel Comune di Pineto (Te) località litorale Nord della foce del Torrente Calvano”.

I due Progetti Esecutivi sono parte di un Progetto Definitivo che prevede la realizzazione complessiva di una barriera sommersa in massi naturali con berma di larghezza di 10 m sommergente di -2,00 m e lunghezza di 500 m a partire dal pennello esistente a Nord della spiaggia di Pineto con un ripascimento di 32.000 m<sup>3</sup>.

Nel 1° Lotto era prevista la realizzazione della scogliera sommersa per una lunghezza di 405 m alla profondità di 3,50-3,60 m mentre nel 2° Lotto si prevedeva la realizzazione di ulteriori 50 m di scogliera ed un ripascimento per 24.000 m<sup>3</sup> di sabbie provenienti da cave marine. Gli interventi di 1° e 2° Lotto da progetto sono riportati nella Fig. 3.1.

L’adeguamento ai prezzi 2023 ha ridotto la lunghezza complessiva della barriera sommersa a 428m (378m 1° Lotto e 50m 2° Lotto).

La barriera sommersa in corso di realizzazione è conforme a quanto previsto dal Piano di Difesa della Costa – Scenario UF3 Foce del Vomano – Foce del Saline – Secondo il Piano “gli effetti al contorno di qualsivoglia intervento devono essere evitati al fine al fine di non influire sulla stabilità del litorale dell’Area Marina Protetta attualmente alimentato dall’apporto solido del Torrente Calvano e dalla deriva sedimentaria proveniente da Nord.

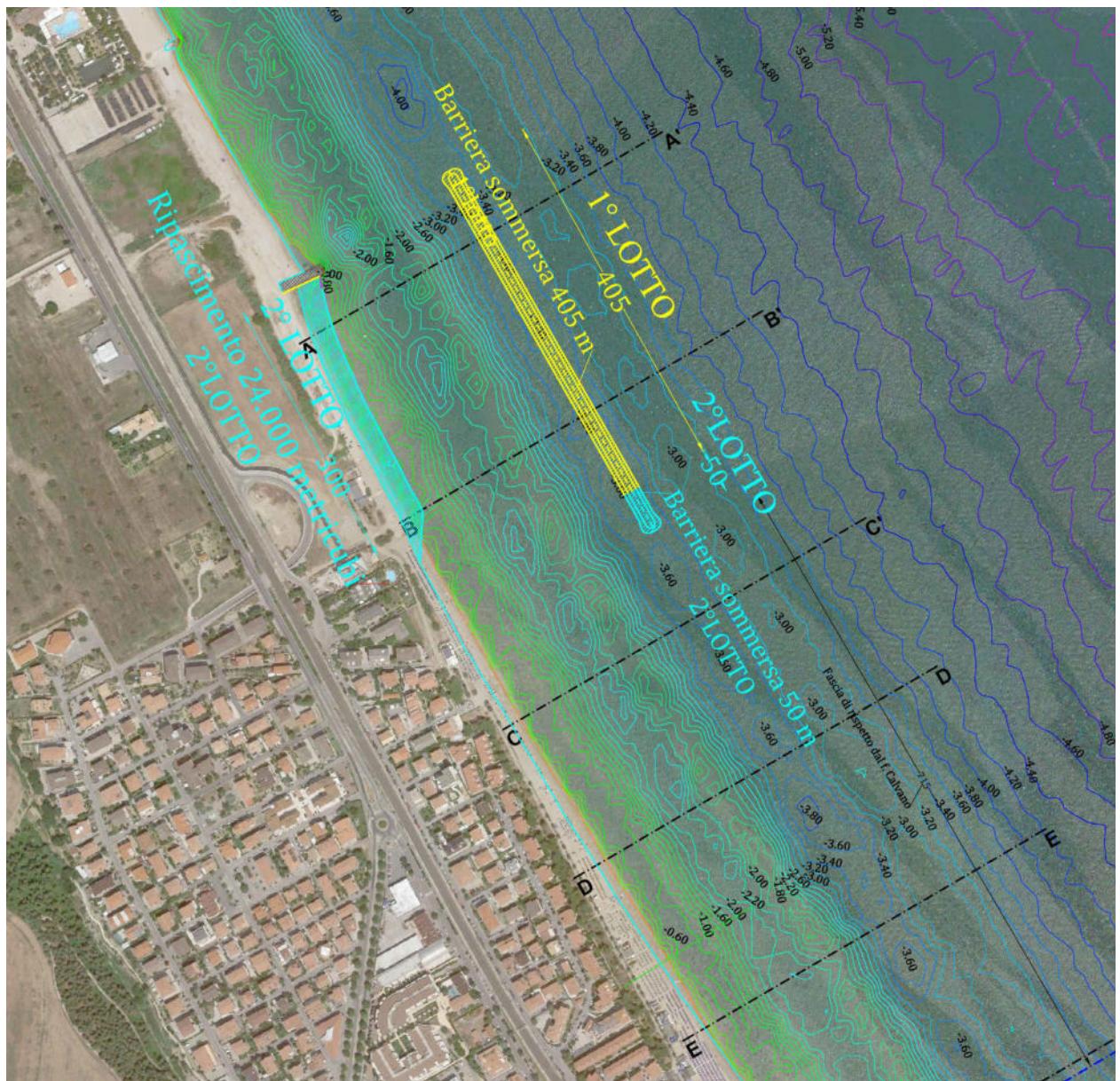


Fig. 3.1 Interventi di 1° e 2° Lotto da progetto

## 4 OPERE DI PROTEZIONE – VALUTAZIONE DELLE ALTERNATIVE

La nuova scheda di “Scenario di intervento UF03 – Variante Puntuale, approvata dalla Giunta Regionale, prevede di esaminare nel Presente Progetto di Fattibilità Tecnico Economica diverse soluzioni progettuali per la difesa del tratto di litorale prospiciente la “Pineta Catucci” valutando sia l’efficacia delle soluzioni sia degli effetti di bordo prodotti dalle opere stesse.

Il processo erosivo che colpisce il litorale Nord di Pineto in assenza di apporti solidi fluviali sembra irreversibile e le mareggiate estreme, sempre più intense e frequenti a causa del cambiamento climatico in corso, possono interessare la Pineta Catucci che non è più protetta dalla spiaggia emersa e sommersa. Spiaggia che rappresentava la difesa naturale in grado di dissipare gradatamente l’energia delle onde incidenti.

E’ necessario quindi valutare la possibilità di realizzare opere foranee emerse o sommerse per ridurre l’energia delle onde stabilizzando il ripascimento. La difficoltà di reperire materiali idonei al ripascimento è un altro elemento fondamentale da valutare nell’ambito delle soluzioni proposte .

Di seguito vengono discusse alcune caratteristiche salienti delle opere foranee e degli effetti che queste opere producono sottofondo.

In sintesi le soluzioni esaminate sono:

- 0) Barriera sommersa alla profondità di 3,50 m, sommergenza  $R_u = -2,00$  m, larghezza della berma  $B = 10$  m, lunghezza  $L = 455$  m. Questa soluzione è stata sviluppata nel Progetto Definitivo Generale in corso di realizzazione. Ripascimento  $m^3 24.000$  (v. Fig. 3.1);
- 1) Barriere emerse alla distanza di 100 m da riva, profondità di imbasamento di 2,00 m, sommergenza  $R_u = +1,50$  m, lunghezza dei setti di 90 m, varchi di 25 m; lunghezza complessiva dell’intervento  $I = 665$  m; ripascimento di  $m^3 27.000$  (v. Tav. 01);
- 2) Barriere emerse alla distanza da riva di 130 m, profondità di imbasamento di 2,50 m, sommergenza  $R_u = +1,50$  m, lunghezza dei setti di 85 m, varchi di 30 m; lunghezza complessiva dell’intervento  $I = 665$  m; ripascimento di  $m^3 36.000$  (v. Tav. 02);
- 3) Trasformazione della struttura sommersa in emersa con sommergenza  $R_u = +1,50$  m, lunghezza dei setti di 100 m e varchi di 30 m, realizzazione di barriere emerse in allineamento alle precedenti per una lunghezza complessiva dell’intervento di 990m con ripascimento di  $m^3 36.000$  (v. Tav. 04);

Il Comune di Pineto ha commissionato uno Studio al Prof. P. De Girolamo “Studio di fattibilità finalizzata alla progettazione di opere di difesa della costa nel tratto compreso tra la foce del torrente Calvano e la foce del fiume Vomano – 2017”, in cui è proposta la realizzazione di pennelli, celle e ripascimento.

Tutte le soluzioni analizzate nel presente Progetto di Fattibilità rispettano la fascia di 200 m dalla foce del T. Calvano per permettere che le portate solide fluviali continuino ad alimentare le spiagge dell’area marina protetta.

Le soluzioni 1, 2, 3 prevedono barriere emerse con diversa caratteristiche tutte e tre permettono una maggiorazione dissipazione dell’energia delle onde incidenti rispetto alla soluzione 0 e quindi sono in grado di stabilizzare in maniera più efficace la linea di riva e quindi contenere le perdite del ripascimento che è comunque necessario per ripristinare la spiaggia emersa.

Le soluzioni 1, 2, 3 si differenziano per l’impatto sotto flutto (verso Sud) dove è prevedibile (sicura) una erosione che può essere attenuata con ripascimenti programmati a seguito di un Piano di Monitoraggio semestrale.

Per valutare il funzionamento delle opere previste nei paragrafi seguenti sono riportate alcune formulazioni tecniche necessarie per predisporre un confronto tecnico-economico tra le diverse soluzioni.

#### **4.1 PROGETTAZIONE DELLE OPERE FORANEE EMERSE E SOMMERSE**

Le opere foranee emerse hanno lo scopo di dissipare l’energia delle onde incidenti: l’energia incidente viene in parte dissipata ed in parte riflessa dalla struttura, in parte viene trasmessa sulla spiaggia protetta attraverso i varchi e nel caso per tracimazione dell’opera.

La realizzazione di difesa della costa con barriere foranee emerse presenta due principali conseguenze, la prima è lo spostamento dell’erosione sottoflutto, la seconda è la possibile formazione dei tomboli con scarsa circolazione idrodinamica che permette il deposito dei limi nelle zone protette (v. Fig. 4.1). Questo produce uno scadimento delle condizioni ambientali della balneazione.

La formazione dei tomboli nei tratti di costa difesi da scogliere foranee emerse è un fenomeno molto comune nella costa Adriatica nei litorali sabbiosi.

I primi interventi di difesa della costa realizzati negli anni 50-60 del novecento sulle coste dell’Adriatico avevano lo scopo prioritario di difesa dei centri abitati e/o di difesa di infrastrutture

stradali e ferroviarie. Le scogliere foranee emerse rappresentavano l'opera più semplice e meno costosa da realizzare e la vicinanza dalla riva garantiva un minor costo dell'intervento.

Si sono costruiti lunghi tratti di difese foranee molto vicine a riva (gli interventi sono proseguiti sino agli anni 80 del 900) dove si sono formati i tomboli, cioè il collegamento della linea di riva con la scogliera. Solo negli anni 70-80 del 900 per ottenere maggiori spiagge e aumentare la qualità della balneazione si sono ricercate soluzioni alternative alle scogliere o si è cercato di allontanare le opere foranee dalla linea di riva.

Il fenomeno della formazione del tombolo raramente si verifica nelle spiagge ghiaiose, sia per la profondità, sia per i diametri in gioco, si creano di solito dei salienti, cioè delle ondulazioni a forma sinusoidale della linea di riva che non raggiungono le scogliere. Si può prevedere la formazione di salienti dimensionando opportunamente  $L_B$ ,  $Y$  e  $G$ .

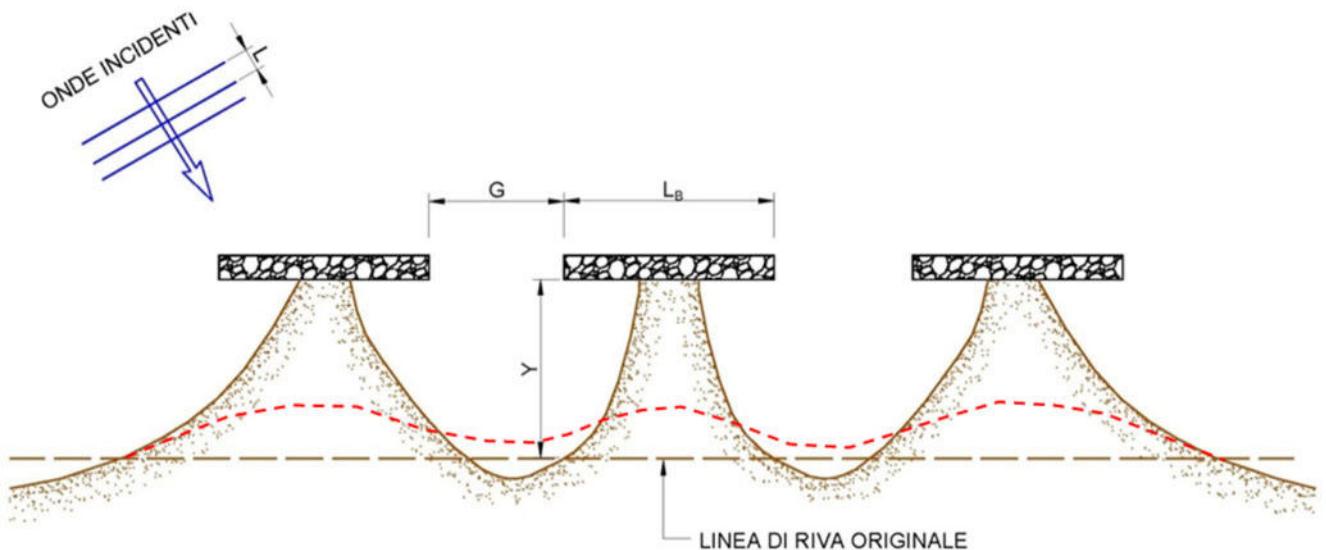


Fig. 4.1 Rappresentazione schematica della formazione di tomboli e/o salienti (tratteggio rosso)

Le numerose prove di laboratorio o di modellazione numerica reperibili in letteratura hanno evidenziato che la formazione del tombolo, in una difesa foranea emersa con lunghezza dei setti pari a  $L_B$ , distanza dalla linea di costa iniziale  $Y$ , larghezza dei vanchi  $G$ , lunghezza d'onda  $L$ , dipende principalmente da queste condizioni:

- al diminuire della lunghezza della scogliera diminuisce la sedimentazione;
- allontanando la serie di scogliere dalla linea di riva la sedimentazione diminuisce;
- la larghezza dei vanchi non influisce in modo sostanziale nella formazione del tombolo fino a che  $G$  rimane più piccolo di  $L_B$ . Quando  $G$  è uguale a circa  $L_B$  finisce il comportamento combinato delle scogliere e ogni barriera funziona come se fosse una barriera singola.

Nelle scogliere foranee emerse la circolazione idrodinamica è dominata dalla diffrazione e dall'overtopping. La tracimazione (overtopping) delle onde frangenti che presentano una altezza di cresta maggiore della quota di sommità della berma delle opere foranee di difesa apporta un volume d'acqua che innalza il livello medio lato terra della struttura fino a quando il livello raggiunto forza il flusso di ritorno attraverso i varchi e la struttura porosa. La portata di overtopping ed il flusso di ritorno si equivalgono. Per queste strutture emerse il processo di overtopping non è significativamente influenzato ne dalle quote di piling-up che si determina lato terra della scogliera, ne dal flusso di ritorno. La circolazione indotta dal passaggio delle onde tra i varchi è dominata dalla diffrazione delle onde e dipende quindi dalla dimensione del varco e dalla sua distanza da riva. Un esempio è riportato nella Fig. 4.2.



*Fig. 4.2 Diffrazione ed overtopping in presenza di scogliere emerse durante una mareggiata*

Al contrario la circolazione idrodinamica in presenza di scogliere sommerse è dominata dal frangimento delle onde sulla berma che rilasciano quantità di moto al fluido circostante e che è la causa dell'innalzamento del livello medio attraverso la struttura (piling-up) come avviene nel fenomeno del set-up sulla spiaggia. Il piling-up forza le correnti di ritorno attraverso i varchi, attraverso la scogliera ed al di sopra della scogliera.

Questo sistema di correnti sempre attivo è accentuato dal livello di piling-up che aumenta al diminuire della sommergenza ed evita la formazione del tombolo, provoca scalamenti nei varchi e nelle testate delle opere.

Aumentando la sommergenza (abbassando le scogliere) il piling-up diminuisce ma aumenta l'altezza dell'onda trasmessa.

La scelta di optare per strutture sommerse induce quindi una idrodinamica completamente differente che può anche produrre un arretramento della linea di riva. La scogliera sommersa protegge comunque la spiaggia riducendo l'energia trasmessa, bisogna verificare se questa trasmissione di energia è compatibile con l'equilibrio e la sicurezza della spiaggia retrostante.

Con strutture emerse ma con quota di sommità contenute si migliora l'impatto visivo e si attiva la portata di overtopping quando la quota di run-up sulla struttura supera l'emersione. E' chiaro che il meccanismo si attiva per gli eventi ondosi che superano appunto la quota di  $R_c$ , dipende quindi dalla frequenza delle mareggiate, e quindi dal clima del moto ondoso. Il fenomeno dello storme surge (innalzamento del livello medio mare) frequente in Adriatico soprattutto, ma non esclusivamente, con i mari di scirocco-levante può trasformare nei casi estremi, cioè quando lo storme surge supera  $R_c$ , la struttura emersa in una struttura sommersa.

La progettazione deve quindi garantire un compromesso tra due esigenze contrastanti quali l'attivazione della portata di overtopping con una certa frequenza annuale per eliminare la sedimentazione di limi nell'area protetta e nello stesso tempo evitare allagamenti della spiaggia emersa con conseguenti erosioni e danni alle infrastrutture durante gli eventi estremi.

Nelle scogliere foranee emerse l'energia delle onde è trasmessa principalmente attraverso i varchi.

La larghezza del varco permette inoltre l'ingresso diretto delle onde che vengono poco ridotte lungo il suo asse per cui la spiaggia retrostante il varco, se le scogliere sono vicine a riva, può subire allagamenti ed erosioni durante le mareggiate estreme.

Il grafico che segue dimostra ad esempio l'influenza della lunghezza del varco,  $G$ ,  $L$  è la lunghezza d'onda al varco, sul coefficiente di diffrazione  $K_D = H_D / H_i$ , dove  $H_D$  è l'altezza d'onda nella zona interna e  $H_i$  è l'altezza d'onda incidente,  $y$  è la distanza misurata dall'asse del varco

$$B=L/2 \quad y = 2L \quad K_D = 0.38$$

$$y = 3L \quad K_D = 0.3$$

$$y = 4L \quad K_D = 0.27$$

$$B=L \quad y = 2L \quad K_D = 0.7$$

$$y = 3L \quad K_D = 0.6$$

$$y = 4L \quad K_D = 0.5$$

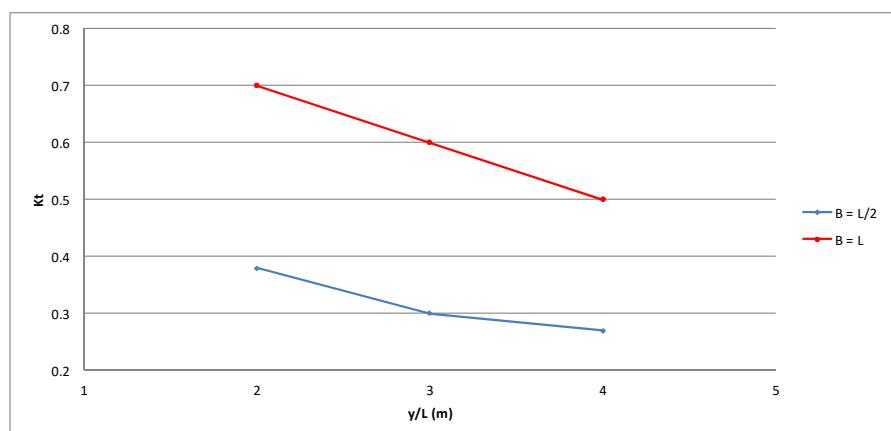


Fig. 4.3 Coefficiente di diffrazione attraverso il varco per onde perpendicolari

Ad una distanza di  $2L$  dal varco l'onda incidente viene abbattuta del 70% con larghezza del varco  $B=L$  e del 40% con  $B=2L$ .

Ad esempio, con la dimensione dei varchi di 25m, per un onda perpendicolare all'ingresso, con la lunghezza dell'onda di circa 40m, il coefficiente di diffrazione sulla battigia, alla distanza di 150m pari a  $3.5L$  circa, è di 0.35. Aumentando il varco a 30m il coefficiente di diffrazione diverrebbe 0.48 e quindi l'altezza dell'onda al varco verrebbe dimezzata.

Alcune formule di letteratura consentono di calcolare il coefficiente di trasmissione  $K_t$ , il run-up e la portata di overtopping sulle scogliere.

La trasmissione può essere valutata stimando il coefficiente di trasmissione  $K_t$  con le formule di Van der Meer et al. (*Wave transmission and reflection at low crest structures: design formulae oblique wave attack and spectral change*. Coastal Engineering, 2005). Per  $B/H_i < 8$  si ha:

$$K_t = 0.4 \cdot \frac{R_c}{H_i} + 0.64 \cdot \left( \frac{B}{H_i} \right)^{-0.81} \cdot (1 - e^{-0.5\zeta})$$

dove  $B$  è la larghezza della cresta,  $H_i$  l'altezza dell'onda incidente,  $R_c$  la sommergenza della struttura e  $\zeta$  il parametro di Iribarren calcolato con il periodo di picco  $T_p$  dello spettro.

Stimato il coefficiente di trasmissione è possibile calcolare l'altezza d'onda trasmessa dalla struttura ( $H_t = K_t \cdot H_i$ ).

Le seguente formula valuta l'altezza di risalita dell'onda sul paramento della scogliera in progetto:

$$\frac{R_{up}}{H_s} = b(\xi_m)^c$$

per  $\xi_m > 1.5$  con  $b = 1.17$  e  $c = 0.46$  per un livello di superamento del 2%.

L'entità della tracimazione ondosa a tergo delle scogliere è stata valutata tramite la formula di van der Meer e Janssen, 1995:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.2 \exp \left( -2.6 \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{Y_r Y_b Y_h Y_\beta} \right)$$

per  $\xi_{op} > 2$  con  $y$  fattori correttivi che tengono conto rispettivamente della scabrezza del paramento della scogliera, dell'eventuale presenza di berma al piede, delle condizioni di acque basse e dell'inclinazione dell'attacco ondoso.

Durante gli eventi ondosi alcune onde raggiungono una quota di Run-up superiore al livello di cresta, la loro distribuzione segue la legge di Weibull, o di Rayleigh, così come seguono la legge di Weibull i volumi di overtopping.

La portata tracimata determina un aumento del volume di acqua lato spiaggia delle scogliere che torna verso il largo principalmente attraverso i varchi esistenti. In questa situazione i materiali fini esistenti sui fondali possono essere sollevati se il rapporto  $u^*/w$  è maggiore di 1, dove  $u^*$  è la velocità di attrito prodotta dalle onde che si creano nella zona protetta e  $w$  è la velocità di sedimentazione dei granuli.

Sono sufficienti piccole altezze d'onda per garantire il sollevamento del materiale fine che le correnti trasportano verso il largo. Tali correnti non sono in grado di trasportare le ghiaie, ma consentono il ricambio di acqua lato terra delle scogliere.

## 4.2 EFFETTI SOTTOFLUTTO DELLE SCOGLIERE EMERSE

L'effetto negativo principale prodotto dalle scogliere emerse è lo spostamento dell'erosione (arretramento della linea di costa) sottoflutto. Quando si realizzano difese foranee emerse in un tratto di costa rettilineo, sabbioso, sottoflutto dell'ultimo setto di scogliera si determina un arretramento della linea di costa dovuto al gradiente della portata solida longitudinale ed agli effetti locali di diffrazione prodotti dall'opera.

Per quantificare questo fenomeno si può studiare l'andamento planimetrico della linea di riva utilizzando la "STATIC EQUILIBRIUM SHORELINE" determinando così l'entità del ripascimento necessario per compensare il gradiente negativo di trasporto solido longitudinale ed eventualmente prevedere opere di contenimento del fenomeno erosivo. Quando si ricorre alla costruzione di opere foranee è evidente che il fenomeno erosivo è già presente in un tratto di spiaggia (nell'ipotesi di litorale a costa bassa senza ostacoli) e si sta propagando nella direzione sottoflutto delle onde principali.

Nel caso di Pineto il processo erosivo è già in atto davanti alla Pineta Catucci (v. Fig. 1.1) e si sta propagando verso Sud, verso la foce del torrente Calvano. Il litorale Sud di Pineto riceve gli apporti solidi della parte Nord in erosione ma, in assenza di interventi o di apporti solidi, sarà nel breve termine interessata dal processo erosivo.

L'ipotesi di realizzare a difesa della pineta Catucci scogliere foranee emerse che finiscono al limite della fascia di rispetto del T. Calvano deve quindi misurarsi con la necessità di quantificare gli effetti sottoflutto per mitigare l'erosione.

Come già detto le scogliere foranee producono nell'area protetta una circolazione idrodinamica dominata dalla diffrazione delle onde incidenti attraverso i varchi e dalle correnti di ritorno, sempre attraverso i varchi quando si verifica la tracimazione delle opere con mareggiate e onde in grado di superare la quota di sommità delle scogliere. La distanza da riva, la lunghezza dei setti la dimensione dei varchi, la granulometria della sabbia, sono le variabili principali che governano la morfodinamica e quindi la formazione di salienti o tomboli nell'area protetta.

La distanza da riva influenza inoltre l'entità dell'erosione sottoflutto, allontanandosi da riva aumenta la zona di erosione. La progettazione deve quindi combinare tutti questi elementi per raggiungere la soluzione ottimale.

Di seguito si espongono alcuni concetti riguardanti la teoria dell'equilibrio statico della linea di costa dedotti da M. Gonzales – R. Medina "On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches" Coast. Eng. 43 (2001) 209-225.

La forma planimetrica di un litorale dipende dalla corrente longshore e dalle condizioni al contorno. La forma della spiaggia raggiunge una condizione di equilibrio statico quando la velocità media della corrente longitudinale e quindi del trasporto dei sedimenti si annulla ciò accade se i fronti delle onde incidenti diventano paralleli alla linea di riva.

Il fenomeno è molto evidente nelle spiagge, senza opere di difesa, sopraflutto di moli portuali o strutture perpendicolari alla costa. L'approccio teorico di Gonzales et al. individua la corrente longitudinale media come forzante principale trascurando il trasporto della zona di swash, gli effetti del trasporto trasversale, la dinamica delle barre sommerse, nonostante questi limiti può comunque fornire utili indicazioni progettuali nel medio lungo periodo.

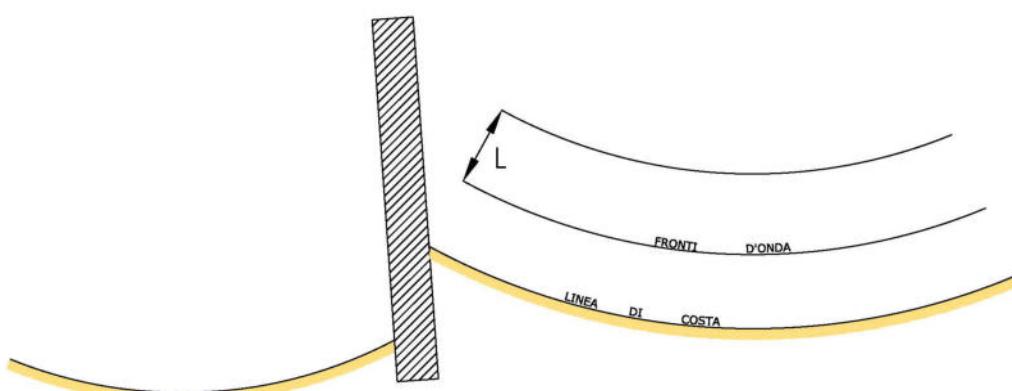


Fig. 4.4 Fronti d'onda paralleli alla linea di riva

Se esiste una portata solida longitudinale la linea di costa tende ad una condizione di equilibrio dinamico, i fronti d'onda rimangono inclinati rispetto alla linea di riva ed esiste una componente di trasporto longshore.

Gli autori sopracitati ricavano un'espressione della linea di equilibrio statico (SES) che si può ottenere dalla posizione dei fronti d'onda al frangimento (WFB) meno un termine proporzionale al gradiente longitudinale dell'altezza d'onda ( $K\Delta H_i$ ) che determina quindi l'andamento della SES. Un'opera foranea, quale una barriera emersa, produce la diffrazione delle onde incidenti e quindi determina una variazione longitudinale dell'altezza d'onda  $H_i$ .

Nell'area protetta e nell'area di sottofondo si determinano tre aree in cui prevalgono rispettivamente la diffrazione (dietro la scogliera) la diffrazione e rifrazione nell'area limitrofa e l'area in cui termina l'influenza della scogliera a partire dal punto  $P_0$ , schematicamente le tre aree sono rappresentate in figura 4.5.

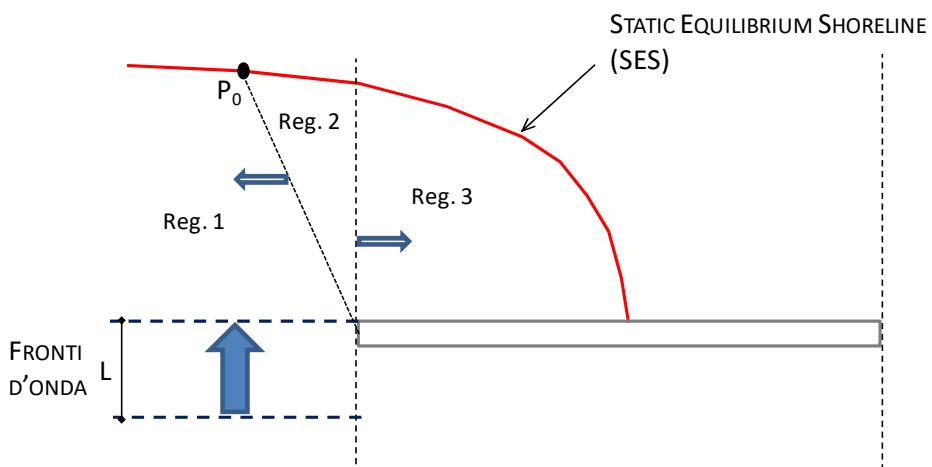


Fig. 4.5 Schema per spiagge in equilibrio statico

Per prevedere l'andamento della linea di costa si può utilizzare la formula parabolica proposta da J.R.C. Hsu, R. Silvester "Static equilibrium bays: new relationships" J. Wat. Port. Coast Dc. En ASCE n. 513 - 1989.

Il punto  $P_0$  può essere determinato, utilizzando prove sperimentali e di campo in funzione di  $Y/L$  ( $Y$  è la distanza della barriera da riva,  $L$  la lunghezza d'onda e  $\alpha_{min}$  e  $\beta = 90^\circ - \alpha_{min}$ .

La lunghezza del setto di scogliera foranea e la distanza da riva della stessa determinano la formazione del tombolo o del salient e gli autori sopra citati forniscono le equazioni, anche in forma grafica, per disegnare la nuova linea di costa prodotta dalla presenza dell'opera.

Nel caso di Pineto la procedura viene applicata per determinare la zona di erosione sottofondo dell'ultimo setto di scogliera avendo preventivamente fissato la lunghezza dei setti e la distanza da riva in modo da prevedere la formazione di un salient.

Con tali formulazioni, in relazione alle onde incidenti, la distanza da riva delle scogliere, è possibile prevedere l'entità dell'erosione e quindi del ripascimento programmato da effettuare.

## 5 CARATTERISTICHE ONDOSE DEL PARAGGIO

Per la caratterizzazione delle onde del paraggio si fa riferimento alla dettagliata analisi riportata nello studio meteo marino del Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica “Progetto di fattibilità delle opere di difesa della costa nel tratto compreso tra la foce del torrente Calvano e la foce del fiume Vomano” redatto da TPS Ingegneria S.r.l. per il Comune di Pineto e al Rapporto 19-03-R0 “ANALISI DI DETTAGLIO Unità fisiografia UF-3 (dalla Foce del Vomano alla Foce del Saline)” redatto dall’Università dell’Aquila nell’ambito del Progetto AnCoRA (STUDI PROPEDEUTICI PER L’ANALISI DI RISCHIO DELLA FASCIA COSTIERA DELLA REGIONE ABRUZZO).

In questo paragrafo vengono riportati i dati principali delle elaborazioni effettuate per la caratterizzazione del clima ondoso del paraggio di intervento, rimandando agli studi sopracitati per l’analisi di dettaglio.

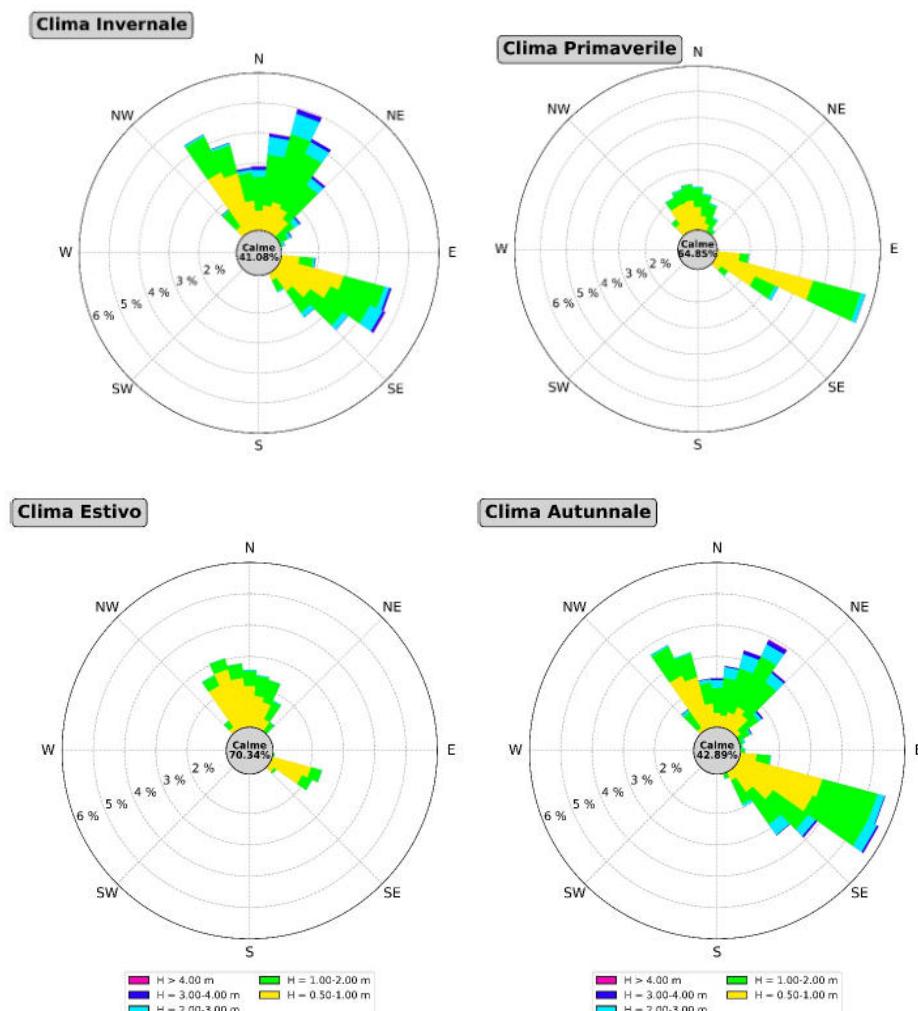


Fig. 5.1 Rappresentazione polare della distribuzione direzionale stagionale degli eventi di moto ondoso a largo del paraggio di Pineto (da Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica TPS)

Tr (anni)	Hs max (m)	Tp (s)
5	4.50	8.75
10	4.90	9.02
25	5.55	9.42
50	6.14	9.76
100	6.84	10.13

Tr (anni)	Hs max (m)	Tp (s)
5	4.02	8.45
10	4.39	8.68
25	4.96	9.06
50	5.49	9.38
100	6.09	9.73

Fig. 5.2 Stima degli eventi estremi in relazione alle onde provenienti dal settore direzionale principale 300°N-60°N (tabella a sinistra) e secondario 60°N-150°N (tabella a destra) (da Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica TPS)

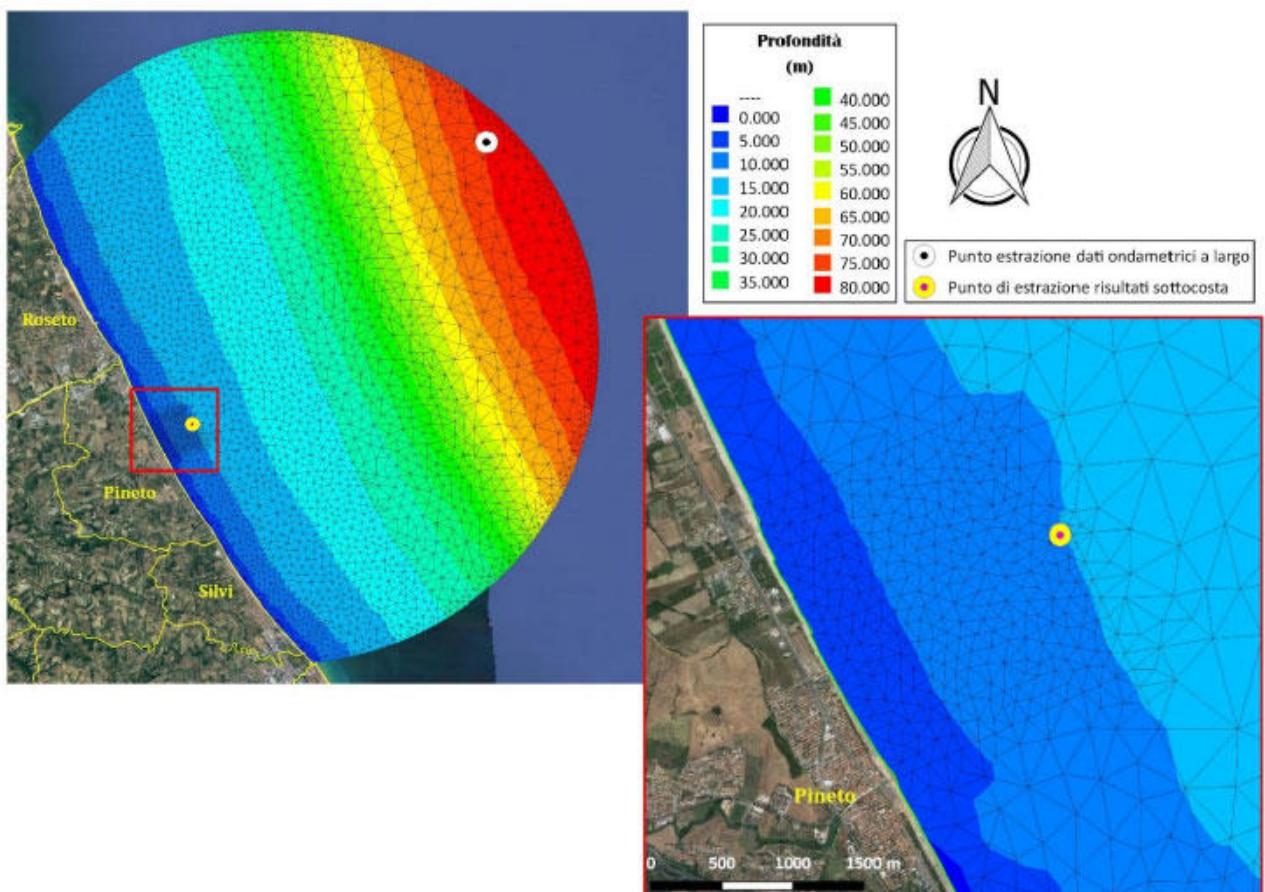


Fig. 5.3 Rappresentazione della griglia di calcolo per la propagazione del moto ondoso tramite il modello numerico SWAN e il dettaglio della griglia di calcolo in corrispondenza dell'area di intervento, con evidenziato il punto di estrazione dei risultati sottocosta alla batimetrica -10m l.m.m. (da Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica TPS)

Estremi sottocosta Settore Principale				Estremi sottocosta Settore Secondario			
T <sub>r</sub> (anni)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	Dir (°N)	T <sub>r</sub> (anni)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	Dir (°N)
5	3.26	8.66	48	5	2.87	8.30	89
10	3.50	8.95	48	10	3.16	8.60	88
25	3.79	9.41	49	25	3.54	9.06	88
50	3.96	9.83	50	50	3.78	9.42	87
100	4.06	10.26	51	100	3.95	9.79	86

Fig. 5.4 Risultati delle simulazione degli eventi estremi nel punto sottocosta per il settore di provenienza principale (a sinistra) e secondario (a destra) per i vari tempi di ritorno (Tr) (da Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica TPS)

Alle mareggiate di riferimento con tempi di ritorno di 5 e 25 anni viene associato il possibile fenomeno di sovrалzo del livello medio mare che si verifica in concomitanza di alte maree, set-up prodotti dalle onde e dal vento. Per i valori da associare allo storm surge con i diversi tempi di ritorno si è fatto riferimento all'analisi statistica dei valori estremi eseguita dall'università dell'Aquila i cui risultati, per diverse funzioni di distribuzione di probabilità teoriche, sono riportati nella figura seguente.

	Tr (anni)	Lev <sub>GPD</sub> (m)	IC (m)	Lev <sub>0.95</sub> (m)	Lev <sub>GEV</sub> (m)	Lev <sub>WEI</sub> (m)	Lev <sub>GUM</sub> (m)
	1	0.38	0.00	0.38	0.50	0.51	0.52
<i>Soglia:</i> 0.38 m	2	0.45	0.01	0.46	0.56	0.57	0.57
<i>Num. Campione:</i> 111	5	0.53	0.03	0.56	0.65	0.65	0.63
<i>Num. medio annuo:</i> 4.83	10	0.58	0.03	0.61	0.72	0.71	0.68
<i>Durata blocchi:</i> 2.49 mesi	20	0.63	0.04	0.67	0.80	0.77	0.73
<i>Anni osservazione:</i> 20	25	0.65	0.05	0.70	0.83	0.79	0.74
<i>Massimo osservato:</i> 0.75 m	30	0.66	0.05	0.71	0.86	0.81	0.75
<i>Media osservata:</i> 0.47 m	50	0.70	0.07	0.77	0.93	0.85	0.79
	100	0.74	0.09	0.83	1.05	0.91	0.83
	200	0.78	0.12	0.90	1.10	0.93	0.85

Fig. 5.5 Risultati delle analisi dei livelli di marea (funzioni di distribuzione teorica generalizzata di Pareto (GPD), degli eventi estremi (GEV), di Weibull, di Gumbel.e limiti di confidenza) - Rapporto 19-03-R0  
“ANALISI DI DETTAGLIO Unità fisiografia UF-3”

Evidenziati in rosso nella figura precedente sono i valori da utilizzare nelle verifiche di progetto. A questi valori potrebbe essere associato anche l'innalzamento del livello medio marino per cambiamenti climatici; la previsione degli effetti del cambiamento del clima sul livello medio nel prossimo futuro (2040) determina un innalzamento di circa 0.15m (vedi ricerca Progetto AnCoRA). Per il trasferimento delle onde dalla profondità di -10.0m al litorale di Pineto è stato applicato il modello numerico Delft3D sviluppato da Deltares (istituto di ricerca olandese specializzato in ambiti che spaziano dall'acqua, al suolo, al sottosuolo) che permette di modellare ambienti naturali come aree costiere, lacustri e fluviali ma è adatto anche per simulazioni in porti o aree urbane. Il programma è composto da diversi moduli che, essendo raccolti all'interno di un'unica interfaccia condivisa, possono interagire tra di loro. Ciascun modulo permette di simulare specifici fenomeni come *storm surge*, tsunami, correnti, variazioni di livelli idrici, onde, trasporto solido, morfologia e qualità dell'acqua. La componente principale di Delft3D è il modello numerico idrodinamico FLOW che simula il moto bidimensionale (2DH, mediato sulla verticale) o tridimensionale (3D) di fluidi in condizioni non stazionarie e i fenomeni di trasporto dovuti a maree e/o forzanti metereologici.

Il modulo WAVE calcola la propagazione non stazionaria di onde corte su fondale non costante, considerando l'azione del vento, la dissipazione di energia dovuta all'attrito al fondo, l'interazione non lineare tra le onde, il frangimento, la rifrazione, lo *shoaling* e lo *spreading* direzionale. Al momento, due modelli (entrambi mediati in fase) sono disponibili: un modello di seconda generazione (HISWA) e il suo successore di terza generazione (SWAN) che è stato utilizzato nelle simulazioni oggetto di questo studio.

Il modello di terza generazione SWAN (*Simulating WAves Nearshore*) risolve l'equazione di bilancio dell'azione spettrale e permette di valutare l'evoluzione di onde random a cresta corta in acque profonde, intermedie e basse. In SWAN le onde sono descritte da spettri bidimensionali di densità dell'azione dell'onda anche quando prevalgono fenomeni non lineari (ad esempio nella *surf zone*). Tuttavia, trattandosi di un modello spettrale, SWAN non risolve la fase dell'onda, ma fornisce risultati mediati nel periodo dell'onda, pertanto risulta un po' approssimato nel modellare propriamente la diffrazione ne in grado di prevedere la variazione del periodo d'onda spettrale  $Tm-1,0$  che si osserva quando le onde si propagano su fondali molto bassi a causa della generazione di onde a bassa frequenza o onde infragravitative (in questi casi è preferibile l'uso di altri modelli come XBeach, SWASH o modelli tipo Boussinesq).

Le operazioni preliminari per l'applicazione del modello di trasferimento ondoso riguardano la creazione di una griglia strutturata nella zona oggetto di studio e la definizione della batimetria da associare al paraggio marino da analizzare, in questo caso la batimetria adottata è quella del rilievo batimetrico fornito dal Comune di Pineto.

Il modello è stato applicato per diverse condizioni ondose:

onda 1: settore principale – Tr 5 anni – caratteristiche alla -10 H<sub>s</sub>=3.26m T<sub>s</sub>=8.66s Dir=48°N

onda 2: settore principale – Tr 25 anni – caratteristiche alla -10 H<sub>s</sub>=3.79m T<sub>s</sub>=9.41s Dir=49°N

onda 3: settore secondario – Tr 25 anni – caratteristiche alla -10 H<sub>s</sub>=3.54m T<sub>s</sub>=9.06s Dir=88°N

## 6 CONFRONTO TECNICO – ECONOMICO TRA LE SOLUZIONI

Le soluzioni che prevedono la realizzazione di scogliere emerse sono tre, la 1) la 2) e la 3) (v. parag. 4) riportate nelle Tav. 01-02-03, in ciascuna, variano la distanza da riva, la lunghezza dei setti e le dimensioni dei varchi, tutte rispettano la fascia di salvaguardia di 200 m dalla foce del T. Calvano in modo che i sedimenti fluviali continuino ad alimentare il litorale Sud.

Mentre la soluzione 3) (barriera emersa alla distanza di 235 m dalla battigia costruita in parte sopra la struttura foranea sommersa, in corso di realizzazione) si trova al limite della zona dei frangenti e quindi la circolazione idrodinamica deriva totalmente dalla presenza della barriera, le soluzioni 1) (barriera emersa alla distanza di 100 m dalla linea di battigia) e 2) (barriera emersa alla distanza di 130 m dalla linea di battigia) rimangono all'interno della zona dei frangenti, come risulta anche dai rilievi batimetrici, all'interno della seconda barra sommersa. In queste condizioni la corrente longitudinale, che determina il trasporto dei sedimenti lungo costa (corrente longshore) sarà modificata confinandosi al di fuori delle barriere. Nelle soluzioni 1) e 2) nella parte esterna alle scogliere si può mantenere un flusso parziale di trasporto sedimentario verso Sud (verso l'Area Marina Protetta) in relazione alle onde incidenti. La direzione prevalente del trasporto solido longitudinale è diretta verso Sud anche se esiste una forte componente verso Nord.

Per le barriere emerse la distanza da riva influisce sull'ampiezza della zona di erosione sottofondo che aumenta allontanandosi dalla battigia.

Il confronto tecnico-economico tra le tre soluzioni viene di seguito effettuato attraverso cinque parametri:

- Ampiezza dell'erosione sottofondo valutata con il metodo Hsu-Silvester riportato nel paragrafo 4.3;
- Coefficiente di trasmissione  $K_t = H_b / H_i$  e portata di overtopping sopra le scogliere;
- Altezza dell'onda difratta, alla distanza di 20m dalla linea di riva, in corrispondenza dei varchi per onda incidente perpendicolare (situazione più gravosa);
- Costo delle sole opere strutturali e del ripascimento.

Il ripascimento è necessario sia per ricostruire in parte la spiaggia emersa in corrispondenza della Pineta Catucci (si è prevista una quantità pari a 20 m<sup>3</sup>/m) sia per contrastare l'erosione sottofondo prevedendo 50 m<sup>3</sup>/m per arretramento della linea di riva inferiore a 20 m e di 80 m<sup>3</sup>/m per arretramenti superiori a 20 m. Il ripascimento nell'area di rispetto del torrente Calvano va programmato per almeno tre anni successivi all'eventuale completamento delle opere, accompagnato da un monitoraggio batimetrico almeno semestrale, in modo da avere il controllo adeguato dell'evoluzione morfolologica della spiaggia emersa e sommersa.

I parametri sopra riportati, sono stati calcolati con un onda significativa al largo con tempo di ritorno di 25 anni, e con direzione di 30°N, trasferita alla profondità di 4,00 m e 2,5 m.

La tabella 6.1 riassume i dati di moto ondoso utilizzati nei calcoli.

T <sub>r</sub> (anni)	T <sub>p</sub> (s)	Direzione onde (°N)			H <sub>1/3</sub> (progetto)	
		largo	-4.0m l.m.m.	-2.5m l.m.m.	-4.0m l.m.m.	-2.5m l.m.m.
25	9.42	0	40	43	2.56	1.78
		30	47	50	2.58	1.80
		60	59	59	2.58	1.80
	9.06	90	69	67	2.51	1.73
		120	76	72	2.50	1.72
		150	92	82	2.50	1.72

Tab. 6.1 Tabella riassuntiva dei risultati del trasferimento a riva delle onde estreme

Nella Fig. 6.1 è riportato lo schema di formazione di un salient (la teoria vale per una singola scogliera) con la linea di costa di forma parabolica nelle condizioni sviluppate da Hsu-Silvester per le condizioni di equilibrio statico e che permette di calcolare,  $\Delta Y = Y_1 - Y$ , l'arretramento della linea di riva, in funzione della lunghezza B del setto di scogliera e della distanza Y dalla linea di riva originale, Y<sub>1</sub> è la linea di costa dopo l'arretramento.

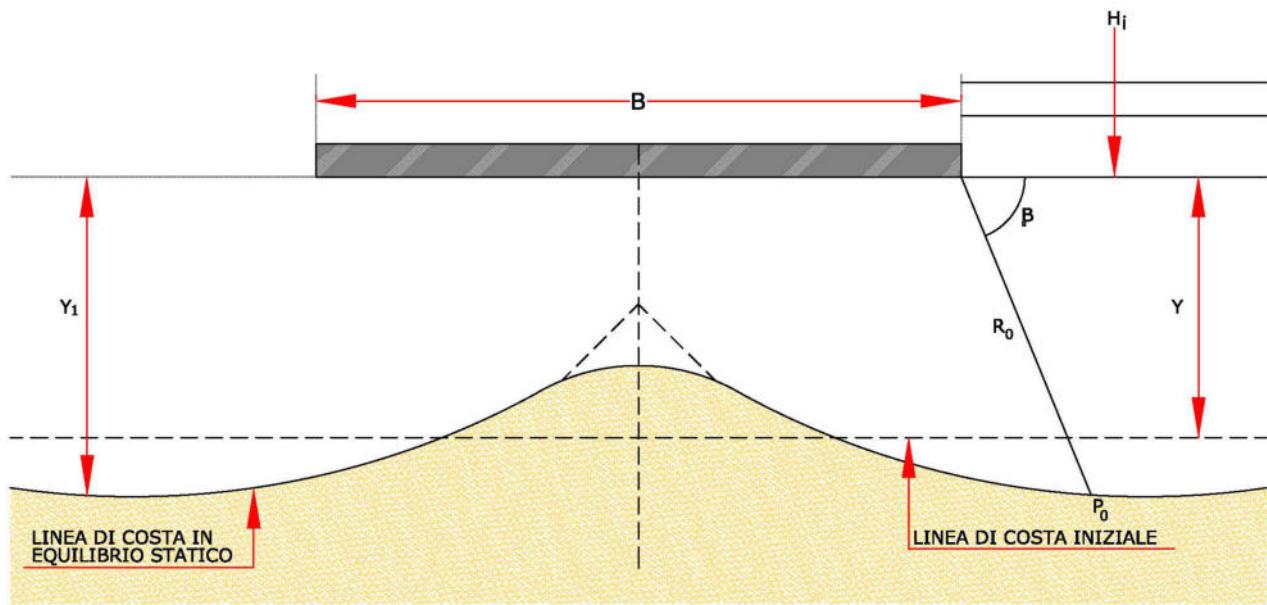


Fig. 6.1 Schema di evoluzione della linea di costa nella teoria Hsu-Silvester

Le relazioni della teoria di Hsu-Silvester utilizzate sono:

$$\frac{Y_1}{B} = 0,1112 + 1,082 \left( \frac{Y}{B} \right) \quad \frac{R_0}{B} = 0,1737 + 1,683 \left( \frac{Y}{B} \right)$$

Nella Tab. 6.2 sono confrontati i risultati ottenuti per le soluzioni 1), 2) e 3) al variare di B (si sono utilizzate le lunghezze di 85 m, 90 m, 100 m, 120 m) ottenendo in relazione al rapporto Y/B, sia Y<sub>1</sub>/B sia la dimensione del raggio R<sub>0</sub>, distanza dal punto di diffrazione sulla testata della scogliera al punto P<sub>0</sub> in cui la linea di riva diventa parallela alla linea di costa iniziale. Si sono scelti i valori che producono un arretramento minimo.

B (m)	sol 1) Y = 100m			sol 2) Y = 130m			sol 3) Y = 235m		
	Y/B	Y <sub>1</sub> /B	R <sub>0</sub> /B	Y/B	Y <sub>1</sub> /B	R <sub>0</sub> /B	Y/B	Y <sub>1</sub> /B	R <sub>0</sub> /B
85	1.18	1.38	2.15	1.53	1.77	2.75	2.76	3.10	4.83
90	1.11	1.31	2.04	1.44	1.67	2.60	2.61	2.94	4.57
100	1.00	1.19	1.86	1.30	1.52	2.36	2.35	2.65	4.13
120	0.83	1.01	1.58	1.08	1.28	2.00	1.96	2.23	3.47

B (m)	Y <sub>1</sub> (m)			ΔY (m)		
	sol 1)	sol 2)	sol 3)	sol 1)	sol 2)	sol 3)
85	118	150	264	18	20	29
90	118	151	264	18	21	29
100	119	152	265	19	22	30
120	122	154	268	22	24	33

Tab. 6.2 Valori adimensionali e dimensionali dell'arretramento sottoflutto dell'ultimo setto di scogliera

I valori del coefficiente di trasmissione,  $K_t$ , e quindi dell'altezza dell'onda trasmessa  $H_t$ , l'overtopping, il coefficiente di diffrazione  $K_D$  e l'altezza diffratta  $H_D$  alla distanza di 20 m dalla linea di riva attuale sono stati ottenuti dalle formule riportate al paragrafo 4.1 e riassunti nella tabella dei confronti tra le soluzioni. I parametri sono stati calcolati con un onda significativa al largo con periodo di ritorno di 25 anni, trasferita alla profondità di 4,00 m e 2,5 m vedi Tab. 6.1.

Il costo totale delle scogliere è stato ottenuto con il prezzario della Regione Abruzzo considerando la sezione corrente con le dimensioni riportate nelle Tav. 01-02-03, aggiungendo il costo delle testate di ogni setto di scogliera. Il costo del ripascimento è quello dedotto dal criterio sopra riportato.

I risultati dei confronti sono i seguenti indicando con B la lunghezza dei setti, G la larghezza del varco e Y la distanza da terra,  $\Delta Y$  l'arretramento sottoflutto.

SOLUZIONE 1	B = 90 m	G = 25 m	Y = 100 m
arretramento linea di riva $\Delta Y$ (m) =	18.00		
altezza d'onda trasmessa $H_t$ (m) =	0.22		
portata tracimata (l/sm) q =	21.40		
altezza d'onda diffratta (in corrispondenza del varco) $H_D$ (m) =	0.65		
costo struttura (€) =	1.434.192,00		
costo ripascimento (€) =	660.290,00		

SOLUZIONE 2	B = 85 m	G = 30 m	Y = 130 m
arretramento linea di riva $\Delta Y$ (m) =	20.00		
altezza d'onda trasmessa $H_t$ (m) =	0.27		
portata tracimata (l/sm) q =	29.40		
altezza d'onda diffratta (in corrispondenza del varco) $H_D$ (m) =	0.61		
costo struttura (€) =	1.696.070,00		
costo ripascimento (€) =	869.720,00		

SOLUZIONE 3	B = 100 m	G = 30 m	Y = 235 m
arretramento linea di riva $\Delta Y$ (m) =	30.00		
altezza d'onda trasmessa $H_t$ (m) =	0.72		
portata tracimata (l/sm) q =	166.22		
altezza d'onda diffratta (in corrispondenza del varco) $H_D$ (m) =	0.78		
costo struttura (€) =	3.534.674,00		
costo ripascimento (€) =	869.720,00		

Tab. 6.3 Parametri idrodinamici e costi delle 3 soluzioni analizzate

Dal confronto tra le tre soluzioni che prevedono l'utilizzo di barriere emerse la soluzione 1 presenta il minore impatto sottoflutto, il minor costo con abbattimento dell'altezza di tracimazione e di quella diffratta tali da poter essere compatibili con la stabilità del litorale protetto.

La soluzione 1 protegge maggiormente il tratto Sud della Pineta Catucci, per la vicinanza dalla riva, dalle onde provenienti da Est-SudEst, rispetto alle soluzioni 2) e 3).

Con il metodo di Hsu-Silvester, che vale per un singolo setto di scogliera, le soluzioni adottate rientrano nel campo della formazione di salient. Secondo la relazione di Hsu-Dalrymple,  $B/Y < 2G/Y$  e ottenuta per serie di scogliere, potrebbe determinarsi anche la formazione dei tomboli.

Le relazioni empiriche reperibili in letteratura sono molto dipendenti dalle condizioni locali. È quindi necessario un approfondimento in sede esecutiva utilizzando una modellazione bi/tridimensionale che permetta di dettagliare la morfodinamica prodotta dalle opere.