



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV
Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

LAVORI DI DIFESA DELLA COSTA MOLISANA
LOTTO N°9 - VARIANTE

PROGETTO ESECUTIVO.

Elaborato:

RELAZIONE IDRAULICA

Tavola

TAV02

Scala

Data

-- LUG. 2014.

Rif.

Responsabile del Procedimento

Arch. Nicola Carovillano

Progettazione:



Geom. Angelo Quaglia
(Progettista Architettonico)

Geom. Nicola Pontarelli
(Coordinatore Sicurezza in fase di
Progettazione)



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

PROGETTO ESECUTIVO DEI LAVORI DI COMPLETAMENTO PER LA DIFESA DELLA COSTA MOLISANA – LOTTO N.9 VARIANTE

RELAZIONE IDRAULICA

1 - STUDIO METEOMARINO

Lo studio dello stato dei luoghi si basa essenzialmente sui dati disponibili presenti negli studi specialistici e nelle indagini già a disposizione, configurando una situazione ben definita per quanto riguarda gli agenti esogeni e la evoluzione dei luoghi.

L'intera costa molisana è stata oggetto negli anni 1988 - 1990 di uno studio eseguito dalla Società Aquater su incarico della Giunta Regionale del Molise e tale studio costituisce la base del progetto di che trattasi, per cui i dati di seguito indicati sono stralciati da detto studio.

Ad integrazione di tali dati sono stati acquisiti i rilievi ondametrici effettuati dalla stazione di Pescara nell'ultimo decennio e la rilevazione batimetrica del tratto posto a sud del porto di Termoli eseguito dalla Regione nell'anno 2001.

Ad ulteriore integrazione, la Regione Molise nell'anno 2001, ha affidato lo studio relativo all'erosione marina sull'intera costa, a un raggruppamento temporaneo di professionisti sempre, allo scopo di descrivere le possibili soluzioni di intervento previste al fine di salvaguardare l'intera costa Molisana.

L'unità fisiografica cui si riferisce il sito oggetto di studio si estende dalla zona di Punta Penna di Vasto a nord al promontorio Pietre Nere del Gargano a sud, individuando in tal modo un tratto del litorale nel quale è presumibilmente nulla la somma algebrica dei trasporti longitudinali di materiali che formano o contribuiscono a formare la costa, anche se la configurazione della stessa può variare nel tempo, per cui il **settore di traversia** è compreso tra i 310° ed i 110° nord.

Lo studio della **evoluzione storica della linea di costa** mostra, nel tratto in esame oggetto di intervento, situazioni diverse nel tempo :

1. lo studio CNR degli anni 1933 - 1940 indica la assenza di fenomeni erosivi ;
2. nel periodo che va dal 1940 al 1962 si riscontra una erosione alla foce del torrente Sinarca per una lunghezza di 1.700 metri con contestuale diminuzione della batimetria ;
3. la costruzione del porto di Termoli determina una deviazione verso il largo dei sedimenti provenienti da nord - ovest ed un blocco totale di quelli provenienti da sud - est, con impoverimento progressivo degli apporti sul litorale nord di Termoli ;
4. un fenomeno di generalizzata erosione avviene a partire dall'inizio degli anni '70 per poi portarsi ad una conformazione a falcate in corrispondenza delle scogliere realizzate dalla metà degli anni '80, con accentuazione della erosione nei tratti scoperti.

L'apporto solido a mare è dato prevalentemente dai fiumi Biferno e Trigno e dal torrente Sinarca, ma la recente realizzazione di escavazioni in alveo e di sbarramenti artificiali non consente una precisa formulazione dei quantitativi solidi sversati in mare, ad eccezione che per il Biferno, per il quale è stato valutato un apporto di circa 40.000 mc/anno.



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

Gli apporti solidi del fiume Biferno creavano in passato consistenti accumuli alla foce che venivano poi ripartiti sul litorale dalle correnti marine e dal moto ondoso, ma già prima della costruzione della diga di Ponte Liscione questa tendenza è andata smorzandosi fino a scomparire del tutto nella attuale configurazione, dove il regime del fiume Biferno è di costante magra, con portate gestite dalle paratie della stessa diga, ma anche il Saccione a sud ed il Trigno a nord hanno avuto la stessa evoluzione per i loro apporti solidi in mare, per cui la tendenza è ormai costante.

La **sedimentologia del litorale** presenta una prevalenza delle sabbie con diametro medio valutabile in 0,3 mm, mentre nelle zone più erose si nota l'incremento della porzione ghiaiosa a causa della erosione della costa alta e di alcuni tentativi di ripascimento artificiale effettuati nel tempo.

Gli studi granulometrici e penetrometrici effettuati negli anni passati hanno evidenziato in media una successione stratigrafica di sabbie a media granulometria, di sabbie con modesti livelli limosi e di un substrato di argille azzurre prevalentemente consolidato.

Lo studio effettuato per la valutazione del **trasporto solido trasversale** ha evidenziato la presenza di correnti parallele alla linea di costa a seguito della prevalente incisione obliqua del moto ondoso sotto i venti di maestrale e di scirocco, per cui il trasporto di materiale solido parallelo alla riva è di gran lunga superiore a quello trasversale, che determina una selezione granulometrica, ma non un vero e proprio trasporto netto.

Il bilancio delle sollecitazioni alla traslazione parallela alla linea di costa per effetto prevalente del moto ondoso è stato calcolato con il metodo dello "Shore Protection Manual" ed il risultato di tale studio ha evidenziato una prevalenza della traslazione di materiale solido da nord verso sud per effetto della predominanza dei venti di maestrale sia come intensità che come frequenza.

Lo **studio del moto ondoso** ha individuato le condizioni di erosione con altezze d'onda comprese tra 0,8 e 1,2 m per pendenze del fondo marino maggiori a 1 / 50 e per periodo d'onda inferiore a 6 secondi, per cui, considerando le mareggiate medie annuali, si ha una situazione di equilibrio per circa il 33% dei casi, una situazione di erosione per il 37% dei casi ed una situazione di ripascimento naturale nel residuo 30% dei casi.

Il recente fenomeno rilevato su tutta la costa adriatica di incremento dei fondali in prossimità della battigia determina uno squilibrio sulle medie storiche sopra riportate, in quanto si innalza la percentuale dei casi in situazione di erosione.

Lo studio teorico della lunghezza d'onda in funzione della profondità dei fondali ha mostrato variazioni della lunghezza d'onda dai 99,6 m per una profondità del fondale di 50 m ad una lunghezza di 24,8 m per una profondità di fondale di 1 m.

L'esame delle frequenze delle altezze d'onda rilevate indica che le ondate con altezza d'onda $h = 2,00$ m e periodo $p = 6,3$ sec sono molto significative per la costa in esame per la loro frequenza.

La maggiore frequenza ed intensità del moto ondoso si rileva per direzioni da nord - nord ovest ed est - sud est, proprio in corrispondenza dei venti di maestrale e di scirocco.

Le maree rilevate nella zona hanno mostrato un innalzamento massimo del livello medio marino inferiore ai 30 cm nelle condizioni più sfavorevoli di vento di scirocco, tuttavia detti incrementi rivestono importanza sostanziale in presenza di barriere soffolte, in quanto l'onda marina supera agevolmente l'ostacolo e raggiunge la linea di costa con energia solo in parte ridotta dall'opera di difesa.



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

Le condizioni di mare con forza > 3 si verificano nel 10% dei casi, mentre le mareggiate mediamente più intense raggiungono forza 6 con venti di nord - ovest e forza 5 con venti di scirocco.

La climatologia di questo tratto di costa adriatica è caratterizzata da una variabilità più accentuata nel semestre invernale che in quello estivo e ciò è in stretta relazione alla presenza di un attivo processo di ciclogenesi che porta, nel periodo invernale, alla generazione sull'Adriatico centro settentrionale del 9% del totale delle depressioni di origine mediterranea.

I venti predominanti per intensità e durata sono quelli di nord - nord ovest e di nord ovest con frequenza del 35% e con velocità di punta anche superiori a 14 m/sec..

Lo studio geotecnico dei siti oggetto di intervento è stato effettuato mediante prove penetrometriche che hanno mostrato mediamente la presenza di un sottosuolo costituito da sabbie lievemente addensate intercalate con lenti di limo di potenza modesta, senza continuità in senso orizzontale, con i seguenti parametri geomeccanici :

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| - $g = 1,80$ ton/mc | peso specifico sommerso |
| - $f = 30^\circ$ | angolo di attrito |
| - $C = 0$ ton/mq | coesione |

Localizzati fenomeni di instabilità hanno interessato negli ultimi anni il litorale del Comune di Petacciato a causa del risveglio di una paleofrana con manifestazioni cicliche di dissesto ogni 10 – 15 anni.

I sondaggi geognostici in tale zona sono in corso di esecuzione, tuttavia si presume che il piano di scivolamento di detto movimento franoso sia posto ad una profondità superiore agli 80 metri ed i suoi effetti sulla costa si manifestano con unghie di rifluimento rilevabili anche a profondità di circa 1,50 metri sotto il livello medio marino e con fuoriuscita di argille azzurre in pressione sull'arenile.

I dati che vengono di seguito riportati riguardano in modo specifico i **parametri medi progettuali** forniti dallo studio Aquater nelle zone oggetto di intervento e discendono da un approfondito studio sui dati storici reperibili, sulle simulazioni teoriche di calcolo e sulla verifica degli effetti prodotti dalle opere già realizzate.

I dati progettuali di partenza forniti dall'Aquater per la verifica di fattibilità delle opere progettate sono i seguenti:

T = 50 anni	tempo di ritorno progettuale
St = $310^\circ - 110^\circ$ nord	settore di traversia
p = $1/150 = 0,007$	pendenza media fondale marino
Dv = ovest – nord ovest	direzione prevalente del vento
F = 250 km	fetch per direzione $310^\circ - 30^\circ$ nord
Ho = 5,00 m	altezza massima d'onda al largo
Ts = 10 sec	periodo significativo
h = 2,00 m	tirante massimo d'acqua alle scogliere
pe = $\frac{1}{2} = \text{tg } a = 0,50$	pendenza della mantellata esterna
gs = 2,60 ton/mc	peso specifico degli scogli
gw = 1,025 ton/mc	peso specifico acqua marina



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

Partendo dai dati sopra riportati è possibile procedere al dimensionamento delle opere di difesa della costa e quindi al computo metrico estimativo dell'intervento.

In merito ai dati di progetto occorre fornire alcuni chiarimenti:

- il tempo di ritorno progettuale è paragonabile alla vita media prevista per le opere progettate;
- la pendenza media del fondale marino prescinde dalle variazioni localizzate in corrispondenza delle opere già realizzate;
- il fetch è calcolato per la direzione prevalente del vento e delle mareggiate più significative;
- la profondità di frangimento dell'onda è più alta della profondità di posa delle scogliere, per cui l'onda raggiunge le stesse già attenuata;
- anche nelle condizioni più gravose di profondità di imbasamento e di limitato spessore della berma, le attenuazioni dell'onda di progetto a tergo delle scogliere supera il 50% in caso di scogliere anche solo lievemente emergenti;
- con le scogliere soffolte sarebbe necessario uno spessore elevato ed antieconomico della berma per ottenere un effetto di attenuazione del moto ondoso molto più limitato.

2 - STUDIO DELLA EVOLUZIONE DELLA LINEA DI COSTA

La linea di costa della Regione Molise si sviluppa longitudinalmente per circa 34 km dal confine con la Regione Abruzzo a nord della foce del fiume Trigno fino al confine con la Regione Puglia alla foce del fiume Saccione.

Il settore di traversia è compreso tra i 310° ed i 110° nord ed è delimitato a nord dal promontorio di Punta Penna a Vasto e dalla Punta Pietre Nere sul promontorio del Gargano a sud.

Lo studio della evoluzione storica della linea di costa mostra, nel tratto in esame oggetto di intervento, situazioni diverse nel tempo :

- 1) lo studio CNR degli anni 1933 - 1940 indica la assenza di fenomeni erosivi ;
- 2) nel periodo che va dal 1940 al 1962 si riscontra una erosione alla foce del torrente Sinarca per una lunghezza di 1.700 metri con contestuale diminuzione della batimetria ;
- 3) la costruzione del porto di Termoli determina una deviazione verso il largo dei sedimenti provenienti da nord - ovest ed un blocco totale di quelli provenienti da sud - est, con impoverimento progressivo degli apporti sul litorale nord di Termoli ;
- 4) un fenomeno di generalizzata erosione avviene a partire dall'inizio degli anni '70 per poi portarsi ad una conformazione a falcate in corrispondenza delle scogliere realizzate dalla metà degli anni '80, con accentuazione della erosione nei tratti scoperti.

La naturale evoluzione della linea di costa in funzione delle correnti marine, del moto ondoso e del regime dei venti ha portato nel tempo una alternanza di periodi di erosione e di ripascimento nell'ambito della unità fisiografica, tuttavia oggi queste mutazioni portano a conseguenze più apprezzabili e dannose per gli interessi della comunità residente, in quanto in alcuni tratti del litorale si è verificato un intenso fenomeno di urbanizzazione.

Le infrastrutture viarie e residenziali ubicate in prossimità della linea di riva rendono più evidente e misurabile il fenomeno della erosione marina, minacciando da vicino le opere realizzate e determinando la necessità di intervenire a difesa del patrimonio sia pubblico che privato ormai esistente.



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

La normativa ambientale in vigore nella Regione Molise consente di eseguire opere pubbliche e private a distanza di trenta metri dall'ultima infrastruttura viaria parallela alla linea di costa ed in alcuni tratti la SS n.16 "Adriatica" è ubicata a distanza anche minore di 30 metri dalla stessa linea di costa, per cui si sono realizzati complessi residenziali praticamente sull'arenile, con tutte le conseguenze del caso.

Lo studio della variazione morfologica della linea di costa non può limitarsi al rilievo dello stato di fatto oppure ad una analisi storica dei dati disponibili, sia attraverso i documenti ufficiali che per mezzo del rilievo fotografico, ma deve prevedere la possibile evoluzione del fenomeno mediante modelli matematici e schemi previsionali.

In tal senso è indirizzato lo studio commissionato dalla Giunta Regionale del Molise alla ditta Aquatec negli anni 1988 – 1990 e dall'Assessorato Regionale all'Ambiente nell'anno 1997, gli aggiornamenti di tali studi sono stati eseguiti nell'anno 2001 da parte del prof. Edoardo Benassai della Università di Napoli.

I rilievi delle stazioni meteorologiche hanno indicato come prevalenti i venti di maestrale provenienti da nord – nord ovest sia per intensità che per frequenza, mentre importanza secondaria rivestono anche i venti di scirocco provenienti da est – sud est.

Anche **il moto ondoso ed il regime delle correnti** risentono di questa prevalenza dei venti di maestrale e di scirocco.

Le valutazioni sperimentali sono state desunte elaborando i dati anemometrici della stazione meteorologica di Termoli ed applicando ad essi le procedure di calcolo JONSWAP e SBM.

Gli studi disponibili hanno affrontato in modo completo il problema del modellamento del moto ondoso mediante una serie di approfondimenti di seguito elencati per sommi capi:

- a) determinazione delle caratteristiche meteomarine;
- b) studio del modello di rifrazione;
- c) determinazione dell'altezza dell'onda rifratta;
- d) modello matematico di post frangimento;
- e) definizione dell'onda di progetto;
- f) attenuazione dell'onda a tergo delle scogliere;
- g) valutazione del coefficiente di riflessione.

Tali studi si intendono integralmente riportati nella presente relazione e rappresentano la base scientifica per le scelte progettuali a suo tempo effettuate che si intendono sostanzialmente confermate nella presente progettazione per completare, anche se solo parzialmente, l'opera iniziata.

L'apporto solido a mare nella zona oggetto di intervento è determinato prevalentemente dal fiume Biferno che attualmente, a seguito dei dragaggi di materiale fino e della costruzione di sbarramenti artificiali, porta alla foce circa 40.000 mc/anno di materiale solido.

Apporti molto minori possono essere attribuiti al fiume Trigno (a causa dell'intenso sfruttamento dei dragaggi), al torrente Sinarca ed al fiume Saccione (a causa delle limitate portate e dello sfruttamento delle acque a scopo irriguo).

Il bilancio sedimentologico deve tener conto localmente anche degli apporti trasversali e longitudinali delle correnti derivate dalla scomposizione del moto ondoso prevalente.



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

Gli studi disponibili indicano un diametro medio delle particelle trasportate di 0,3 mm con relativa velocità di sedimentazione $V_f = 4$ cm/sec, per cui si ha un'altezza di onda limite variabile da 0,4 m per pendenza del fondo 1/50 e periodo $T = 4$ sec fino a 1,5 m per pendenza di fondo 1/100 e periodo $T = 8$ sec.

Nella sostanza, l'onda media di altezza compresa tra 0,8 e 1,2 metri erode la costa con pendenza superiore a 1/50 e ripasce la stessa costa con pendenza minore o per periodi d'onda maggiori o uguali a 6 sec.

L'onda massima al largo e l'onda di progetto al livello di imbasamento delle scogliere sono di altezza nettamente superiore ad 1,5 metri, mentre la pendenza media della costa si aggira intorno al valore di 1/150 ed il periodo significativo d'onda è stato stimato in circa 10 sec e da ciò è stata valutata la seguente ripartizione di situazioni:

- costa in equilibrio	33%
- costa in erosione	37%
- costa in ripascimento	30%

Le onde incidono in genere la costa in modo obliquo e la componente del flusso di quantità di moto diretta parallelamente alla costa determina la "longshore current" con relativo trasporto nettamente superiore a quello trasversale.

Il trasporto trasversale non è associato ad un vero e proprio trasporto netto, ma determina una prevalente selezione granulometrica.

La zona interessata dal trasporto longitudinale è quella che va dalla linea di frangimento fino alla spiaggia, ma la fascia soggetta a trasporto longitudinale effettivo può essere stimata mediante la formula di Hallermeyer a cui si rimanda per ulteriori approfondimenti.

Il settore principale di traversia è quello di nord – nord ovest e quello secondario è quello di est – sud est, per cui le isobate risultano inclinate rispetto alla direzione di propagazione del moto ondoso e la rifrazione determina alcune modificazioni dei moti ondosi in prossimità del paraggio, in quanto il fronte ondoso, procedendo dal largo verso riva, tende a ruotare, orientandosi quasi parallelamente rispetto alle isobate.

Il trasporto solido medio litoraneo netto è la somma algebrica degli apporti solidi nelle due direzioni possibili nord – sud e sud – nord ed è dato dalla seguente formula:

$$Q_s = 0,19 \times A \times H^3 \times d^{0,66} / a^{0,5}$$

A = coeff. dipendente dalla pendenza del fondo

H° = altezza d'onda al largo in ft

L° = lunghezza d'onda al largo in ft

$d = H^\circ / L^\circ$ = ripidità dell'onda al largo

a = diametro medio delle particelle di sabbia in micron

La applicazione della precedente formula fornisce un valore complessivo del trasporto solido medio litoraneo netto, tra la linea di riva e la profondità di 8,00 metri, di 4.383.504 mc/anno con punte massime di 3.626.640 mc/anno per la direzione 330° N e punte minime di 283.824 mc/anno per la direzione 60° N.

Il trasporto solido assume dunque una rilevante importanza per l'equilibrio della fascia costiera ed in presenza di erosione occorre intercettare questo flusso per ripristinare l'originario allineamento della battigia mediante opere fisse di sostegno al ripascimento.



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

3 – MODELLO MATEMATICO DELLA LINEA DI COSTA

La modellazione matematica della linea di costa si rivela necessaria quando occorre intervenire a difesa della stessa con opere fisse o mobili alterando lo stato dei luoghi, in modo da prevedere gli effetti degli interventi progettati.

Una importanza preponderante assumono in questo caso le condizioni al contorno legate alla antropizzazione dei luoghi ed a eventuali interventi di difesa precedenti.

Il modello di calcolo adottato è quello "a una linea" corredato da sistemi di calcolo per la diffrazione e la rifrazione e si basa sulla equazione di conservazione della massa applicata al sedimento della zona costiera.

Per quantificare l'effetto che una scogliera può avere nella intercettazione del flusso di materiale solido trasportato dalla corrente marina occorre calcolare prima **l'energia totale di un'onda** che viaggia in acque basse verso riva per unità di sviluppo di cresta mediante la teoria delle onde sinusoidali:

$$E_r = g \times H^2 \times L \times C_g / 8 \times C$$

$$C_g = 0,5 \times C \times (1 + (2 \times K \times h / (\sinh(2 \times K \times h)))) = \text{velocità di gruppo}$$

$$K = 2 \times 3,14 / L = \text{numero d'onda}$$

$$C = (g \times \tanh(K \times h) / K)^{0,5} = \text{celerità dell'onda}$$

La modificazione della linea di riva è legata all'entità della **forza che agisce sulla battigia** e tale connessione si ottiene mediante la quantificazione della forza agente sulla costa con inclinazione di 45°:

$$F_{45} = r \times g \times a^2 \times (1 + (2 \times K \times h / (\sinh(2 \times K \times h)))) / 8 \text{ (kg/m)}$$

$$r = \text{rapporto tra altezza d'onda al frangim. e prof. del frangim.} = 0,8$$

$$a = \text{ampiezza dell'onda}$$

$$K = 2 \times 3,14 / L = \text{numero d'onda}$$

$$h = \text{profondità del livello medio marino in corrisp. della scogliera}$$

Il **trasporto solido** che si ha in un tubo di flusso orientato dal largo verso riva, riferito allo sviluppo di un metro lineare di costa, è dato da:

$$Q = 0,707 \times F_{45} \times K' \times (g \times h)^{0,5} / m \times (g_s - g_a) \text{ (mc/sec)}$$

$$K' = K \times (C_d / r)^{0,5} = 0,89$$

$$C_d = \text{coeff. di diffrazione}$$

$$r = \text{rapporto tra altezza d'onda al frangim. e prof. del frangim.} = 0,8$$

$$h = \text{profondità del livello medio marino in corrisp. della scogliera}$$

$$m = \text{tangente dell'angolo di attrito interno della sabbia}$$

$$g_s = \text{peso specifico della sabbia}$$

$$g_a = \text{peso specifico dell'acqua}$$

Conoscendo la forza F_{45} agente sulla scogliera e la quantità di trasporto solido per unità di lunghezza Q determinata dal tubo di flusso sull'arenile si può ottenere mediante il metodo di Dean (1992) la **previsione della tendenza alla evoluzione della battigia** per effetto dell'inserimento della scogliera attraverso l'equazione di conservazione dei sedimenti:

$$dY / dt = dQ / ((hb + b) \times dx)$$

$$Y = \text{posizione della linea di battigia (+ se di ripascimento)}$$

$$t = \text{tempo}$$

$$Q = \text{portata di materiale di fondo}$$



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

hb = profondità al frangimento

b = altezza della berma della scogliera sul livello medio marino

x = ascissa di riferimento lungo la linea di costa partendo da un estremo della scogliera

Il calcolo della **velocità dell'onda parallela alla scogliera U e di quella critica dei sedimenti V** è stato effettuato secondo le seguenti formule:

$$U = K \times (g \times H^2 \times i \times \sin(2 \times a) / T)^{0,33}$$

K = coeff. di calcolo = 2,60

H = altezza dell'onda frangente

T = periodo dell'onda

i = pendenza media della scarpata della scogliera

a = angolo tra le creste delle onde e la linea di riva

$$V = (g \times h \times i_f)^{0,5}$$

h = profondità del fondale = 3,5 m

i_f = pendenza del fondo marino = 0,235 – 0,0083

Il risultato degli studi sopra descritti è riportato nella tabella seguente con le seguenti precisazioni:

D = direzione di provenienza del moto ondoso

I = intensità del moto ondoso

H = altezza d'onda

U (m/sec) = velocità dell'onda parallela alla scogliera

V (m/sec) = velocità critica dei sedimenti

F₄₅ (kg/m) = forza massima agente sulla scogliera

Er (kg/m) = energia dell'onda

D	I	H	U	V	F ₄₅	Er
10° N	MAX	5.54	1.53	0.54	> 343	> 23843
351° N	MED	1.44	0.76	“	> 21	> 906
19° N	MAX	4.03	1.41	“	>180	> 11966
7° N	MED	1.27	0.74	“	>20	> 778
32° N	MAX	3.75	1.23	“	> 187	> 11781
31° N	MED	1.02	0.69	“	> 10	> 411
47° N	MAX	3.27	1.18	“	> 118	> 7141
57° N	MED	0.66	0.58	“	> 4	> 111
57° N	MAX	3.91	1.18	“	> 113	> 6882
86° N	MED	0.75	0.59	“	> 6	> 158

In generale il trasporto di fondo Q, dipendente dalla forza trasmessa dall'onda F₄₅, è molto significativo e deve essere intercettato per consentire un ripascimento naturale dei litorali.

La **tendenza evolutiva della linea di costa sotto l'effetto dell'inserimento di una scogliera parallela alla linea di riva** può essere schematizzata mediante il modello di Hsu e Silvester mediante la formula:

$$X = 0.68 \times B \times (B / S)^{-1.21}$$

X = distanza della nuova linea di riva dalla scogliera



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

B = lunghezza della scogliera

S = distanza della scogliera dalla originaria linea di riva

Tale modello è indipendente dalle dimensioni delle onde, ma è studiato nel caso di fronti ondosi incidenti in modo perpendicolare alle scogliere, cosa non pienamente rispondente al caso molisano.

Nelle opere realizzate nel Molise si sono manifestati effetti positivi solo dove la costa è perpendicolare ai moti ondosi dominanti, oppure dove le scogliere sono state poste ruotate rispetto alla riva in modo perpendicolare ai moti ondosi.

La modellazione attuata ha compreso la presenza delle esistenti scogliere soffolte, utilizzando per il **calcolo della attenuazione del moto ondoso** la formula di Wallingford di seguito riportata:

$$H' / H = 0,69 - 0,05 \times H$$

H' = altezza dell'onda smorzata

H = altezza dell'onda di progetto sulla scogliera.

Dal confronto tra la situazione senza scogliere e con le scogliere deriva la convinzione che la realizzazione del porto di Termoli, per la parte a sud di esso, ha determinato una modificazione sostanziale delle correnti e del trasporto solido, creando i presupposti per una situazione di forte erosione sul litorale sud di Termoli e sulla costa nord di Campomarino.

La conclusione dello studio su modello sta nella irrinunciabilità dell'opera di difesa costiera mediante scogliere valutando come trascurabili gli effetti negativi della presenza delle scogliere a fronte dei vantaggi conseguibili.

Lo studio della evoluzione della linea di costa, sulla base dei calcoli e delle considerazioni che precedono, ha mostrato la necessità di integrare parzialmente la modellazione studiata dall'Aquater sulla base dei seguenti criteri

- preferire le scogliere parzialmente emergenti solo nelle zone di completamento degli allineamenti esistenti (in modo da chiudere i varchi residui), altrimenti utilizzare quelle soffolte disposte a profondità di circa 2,00 metri con un idoneo spessore della berma, in modo da avere lo stesso coefficiente di smorzamento che può garantire una scogliera emergente posta a profondità maggiore;
- intercettare il trasporto solido parallelo alla costa mediante piccoli pennelli fino alla profondità massima di 2,00 metri disposti ortogonalmente alla linea di riva integrati da ripascimenti localizzati in sabbia, aventi la unica funzione di ripristinare la preesistente linea di riva rinforzando l'arenile.

4 – STUDIO DI PREVISIONE DEGLI EFFETTI

La costa molisana è stata interessata nell'ultimo periodo di tempo da un consistente fenomeno di erosione costiera che ha determinato ricorrenti condizioni di pericolo per la pubblica incolumità.

Gli interventi inseriti nella presente progettazione assumono il carattere di soluzioni definitive a fronte di situazioni di emergenza, inquadrata nella progettazione generale delle opere di difesa della costa molisana come stralcio esecutivo, in quanto ripetono le stesse scelte progettuali adottate per gli studi più completi.

Lo studio dello stato dei luoghi si basa sulle contabilità finali dei lavori ultimati disponibili in ufficio con relativi rilievi di seconda pianta, batimetrie e studi fotografici.



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

Gli interventi di difesa della costa molisana finora eseguiti dalla Regione Molise e dal Genio Civile Opere Marittime di Ancona hanno perseguito principalmente il fine di opporre resistenza passiva all'azione erosiva del moto ondoso ed in tale ottica si inquadrano le varie scogliere prevalentemente soffolte parallele alla linea di costa realizzate.

Le **scelte di dettaglio finora operate** consistono nella realizzazione di scogliere della lunghezza media di 150 – 200 metri poste a circa 150 metri dalla linea di riva su fondali di profondità media di 3,50 – 4,00 metri.

La profondità di frangimento dell'onda di largo è di circa 5,00 metri, per cui le onde arrivano alle scogliere già parzialmente private della loro energia originaria e le scogliere sono state progettate per un coefficiente di ulteriore smorzamento pari a circa il 50%.

La lunghezza delle scogliere, la pendenza media dei fondali e la distanza dalla linea di riva concorrono ad evitare il fenomeno del "tombolo", ad eccezione di alcuni casi isolati riferiti prevalentemente a scogliere emergenti, come a Campomarino e nell'estremo nord della costa di Termoli.

Sono stati effettuati anche dei tentativi di ripascimento artificiale, ma non hanno dato esito soddisfacente a causa della mancanza di opere fisse di sostegno quali pennelli trasversali o scogliere parallele alla linea di costa poste in corrispondenza degli stessi ripascimenti.

Ulteriori tentativi sperimentali sono stati effettuati agli inizi degli anni '80 mediante il posizionamento trasversale alla linea di costa di tubazioni soffolte in materiale sintetico riempite di inerti, ma anche questa tipologia di intervento non ha dato esiti positivi a causa della eccessiva profondità di posizionamento dei tubi e della loro vulnerabilità rispetto agli agenti esogeni e alle attività di pesca praticate nella zona.

Il principio prevalentemente seguito è stato comunque quello di realizzare scogliere soffolte sostanzialmente parallele alla linea di costa disposte in senso quasi ortogonale alla direzione di propagazione del moto ondoso nella traversia principale, la quale in prossimità della linea di costa ruota lievemente per effetto della configurazione delle isobate.

Sotto l'effetto delle mareggiate e delle correnti marine il trasporto solido interessa mediamente, per la costa molisana, un tratto di mare compreso tra la linea di riva e la profondità di circa 6 metri, tuttavia la presenza del promontorio di Termoli e del suo porto determina un allontanamento dei flussi dalla linea di riva fino alla zona posta a sud della foce del fiume Biferno, per cui le opere di difesa non riescono ad intercettare la sabbia trasportata dal mare nel tratto compreso tra lo stesso porto e la parte centrale del litorale di Campomarino.

L'effetto del vento di scirocco non determina una ridistribuzione dell'apporto solido, ma solo una erosione di questo tratto di costa con trasporto da sud verso nord.

Da questo rapido accenno alla situazione determinata anche dal prolungamento del molo di sud est del porto di Termoli si possono dedurre anche gli **effetti riscontrati dalla esecuzione delle varie opere di difesa:**

1. nel tratto di costa riferito ai Comuni di Montenero di Bisaccia e Petacciato le scogliere eseguite, recentemente anche rifiorite, hanno consentito di limitare sostanzialmente l'effetto erosivo, determinando in alcuni tratti un evidente ripascimento naturale dell'arenile;



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

- nel tratto a nord di Termoli hanno determinato un ottimo risultato di ripascimento naturale dell'arenile sia le scogliere anche solo parzialmente emergenti disposte parallelamente alla linea di riva, sia le scogliere soffolte realizzate con idonei spessori della berma;
- sempre nel tratto a nord di Termoli, la linea di riva presenta oggi un andamento irregolare con ripascimenti notevoli in corrispondenza delle scogliere emergenti eseguite e con insenature nei tratti posti ai bordi delle stesse scogliere, mentre la presenza di varchi di ampiezza superiore a 30 metri ha determinato evidenti falcature sulla linea di riva;
- nel tratto compreso tra il porto di Termoli e la zona del depuratore comunale di Campomarino lido, a parte un primo breve tratto adiacente al molo sud dove si è registrato un forte insabbiamento per l'effetto pennello determinato dal porto, si è in presenza di un notevole fenomeno di erosione solo parzialmente limitato dalle barriere soffolte realizzate, con trasporto solido da sud verso nord;
- nel tratto intermedio della costa di Campomarino, dove arrivano i flussi di correnti e di apporti solidi devianti dal porto di Termoli, le scogliere realizzate, sia emergenti che soffolte, hanno dato un esito molto soddisfacente con la formazione di un cospicuo ripascimento naturale;
- nel tratto posto più a sud del litorale di Campomarino, in prossimità del molo realizzato per la costruzione del locale porto turistico, si registra la formazione di ampie falcature sulla linea di costa con erosioni che minacciano la retrostante pineta e le infrastrutture pubbliche.

Partendo dal concetto che il settore principale di traversia è quello di nord – nord ovest e quello secondario è quello di est – sud est, si è studiato l'effetto della rifrazione sottocosta.

La **rifrazione** determina alcune modificazioni dei moti ondosi in prossimità del paraggio, in quanto il fronte ondosso, procedendo dal largo verso riva, tende a ruotare, orientandosi quasi parallelamente rispetto alle isobate.

La tabella che segue riporta i risultati dello studio sopra descritto nella condizione semplificativa di isobate parallele alla linea di costa e di profondità di calcolo di 6,00 metri con le seguenti precisazioni:

D =	direzione di provenienza del moto ondoso
Hs =	altezza d'onda in metri
L max =	lunghezza d'onda in metri
a° =	angolo tra la direzione del fronte ondoso al largo e le isobate
a* =	angolo tra la direz. del fronte ondoso sottocosta e le isobate

D	Hs (m)	L max (m)	a°	a*
330° N	5.53	82.267	64°	24°
360° N	4.02	75.179	34°	15°
30° N	3.74	67.976	4°	2°
60° N	3.26	63.145	- 26°	- 13°
90° N	3.20	63.758	- 56°	- 23°

Anche il **calcolo del trasporto solido** è stato tenuto in conto per dimensionare le opere in progetto e per prevedere il loro effetto futuro sull'ambiente circostante.

Lo studio è stato effettuato utilizzando la formula dell'U.S. Corpy degli U.S.A. che tiene conto sia del trasporto per getto di riva che del trasporto lungo riva (longshore), rappresentando la portata solida espressa come metri cubi di sabbia che attraversano nell'unità di tempo una superficie perpendicolare alla linea di riva:



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

$$Q = K' \times L^\circ \times g \times H^2 \times \sin(7 \times a^* / 4) / H^\circ$$

K' = coeff. dipendente dalle caratteristiche della sabbia

L° = lunghezza d'onda al largo

H° = altezza d'onda al largo

g = accelerazione di gravità

H = altezza d'onda in prossimità del paraggio

a^* = angolo tra la direz. del fronte ondoso sottocosta e le isobate

Il **trasporto solido medio litoraneo netto** è la somma algebrica degli apporti solidi nelle due direzioni possibili nord – sud e sud – nord ed è dato dalla seguente formula:

$$Q_s = 0,19 \times A \times H^\circ{}^3 \times d^{0,66} / a^{0,5}$$

A = coeff. dipendente dalla pendenza del fondo

H° = altezza d'onda al largo in ft

L° = lunghezza d'onda al largo in ft

$d = H^\circ / L^\circ$ = ripidità dell'onda al largo

a = diametro medio delle particelle di sabbia in micron

La tabella seguente mostra i risultati dello studio effettuato per varie direzioni di provenienza del moto ondoso con le seguenti precisazioni:

D = direzione del moto ondoso

f = percentuale di frequenza

a° = angolo tra la direzione del fronte ondoso al largo e le isobate

D	A	a°	H° (ft)	L° (ft)	D (micr.)	F (%)
330° N	0.015	64°	5.6	140.10	200	11.5
360° N	0.033	34°	5.0	119.35	200	3.4
30° N	0.0045	4°	4.7	114.44	200	1.3
60° N	0.026	- 26°	2.3	56.41	200	0.9
90° N	0.024	- 56°	2.6	56.40	200	1.4

I risultati dello studio precedente forniscono un valore complessivo del trasporto solido medio litoraneo netto, tra la linea di riva e la profondità di 8,00 metri, di 4.383.504 mc/anno con punte massime di 3.626.640 mc/anno per la direzione 330° N e punte minime di 283.824 mc/anno per la direzione 60° N.

Il trasporto solido assume dunque una rilevante importanza per l'equilibrio della fascia costiera ed in presenza di erosione occorre intercettare questo flusso per ripristinare l'originario allineamento della battigia mediante opere fisse di sostegno al ripascimento.

Per quantificare l'effetto che una scogliera può avere nella intercettazione del flusso di materiale solido trasportato dalla corrente marina occorre calcolare prima **l'energia totale di un'onda** che viaggia in acque basse verso riva per unità di sviluppo di cresta mediante la teoria delle onde sinusoidali:

$$E_r = g \times H^2 \times L \times C_g / 8 \times C$$

$C_g = 0,5 \times C \times (1 + (2 \times K \times h / (\sinh(2 \times K \times h))))$ = velocità di gruppo

$K = 2 \times 3,14 / L$ = numero d'onda

$C = (g \times \tanh(K \times h) / K)^{0,5}$ = celerità dell'onda

La modificazione della linea di riva è legata all'entità della **forza che agisce sulla battigia** e tale connessione si ottiene mediante la quantificazione della forza agente sulla costa con inclinazione di 45°:

$$F_{45} = r \times g \times a^2 \times (1 + (2 \times K \times h / (\sinh(2 \times K \times h)))) / 8 \text{ (kg/m)}$$



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

r = rapporto tra altezza d'onda al frangim. e prof. del frangim. = 0.8

a = ampiezza dell'onda

$K = 2 \times 3,14 / L$ = numero d'onda

h = profondità del livello medio marino in corrisp. della scogliera

Il trasporto solido che si ha in un tubo di flusso orientato dal largo verso riva, riferito allo sviluppo di un metro lineare di costa, è dato da:

$Q = 0,707 \times F_{45} \times K' \times (g \times h)^{0,5} / m \times (g_s - g_a)$ (mc/sec)

$K' = K \times (C_d / r)^{0,5} = 0,89$

C_d = coeff. di diffrazione

r = rapporto tra altezza d'onda al frangim. e prof. del frangim. = 0.8

h = profondità del livello medio marino in corrisp. della scogliera

m = tangente dell'angolo di attrito interno della sabbia

g_s = peso specifico della sabbia

g_a = peso specifico dell'acqua

Conoscendo la forza F_{45} agente sulla scogliera e la quantità di trasporto solido per unità di lunghezza Q determinata dal tubo di flusso sull'arenile si può ottenere mediante il metodo di Dean (1992) la **previsione della evoluzione della battigia per effetto dell'inserimento della scogliera** attraverso l'equazione di conservazione dei sedimenti:

$dY / dt = dQ / ((hb + b) \times dx)$

Y = posizione della linea di battigia (+ se di ripascimento)

t = tempo

Q = portata di materiale di fondo

hb = profondità al frangimento

b = altezza della berma della scogliera sul livello medio marino

x = ascissa di riferimento lungo la linea di costa partendo da un estremo della scogliera

Un altro studio che è stato svolto consiste nel calcolo della **velocità dell'onda parallela alla scogliera U e di quella critica dei sedimenti V** secondo le seguenti formule:

$U = K \times (g \times H^2 \times i \times \sin(2 \times a) / T)^{0,33}$

K = coeff. di calcolo = 2,60

H = altezza dell'onda frangente

T = periodo dell'onda

i = pendenza media della scarpata della scogliera

a = angolo tra le creste delle onde e la linea di riva

$V = (g \times h \times i_f)^{0,5}$

h = profondità del fondale = 3,5 m

i_f = pendenza del fondo marino = 0,235 – 0,0083

Il risultato degli studi sopra descritti è riportato nella tabella seguente con le seguenti precisazioni:

D = direzione di provenienza del moto ondoso

I = intensità del moto ondoso

H = altezza d'onda

U (m/sec) = velocità dell'onda parallela alla scogliera

V (m/sec) = velocità critica dei sedimenti

F_{45} (kg/m) = forza massima agente sulla scogliera



Regione Molise

DIREZIONE AREA IV

Servizio Difesa del Suolo, Opere Idrauliche e Marittime

Er (kg/m) = energia dell'onda

D	I	H	U	V	F ₄₅	Er
10° N	MAX	5.54	1.53	0.54	> 343	> 23843
351° N	MED	1.44	0.76	“	> 21	> 906
19° N	MAX	4.03	1.41	“	>180	> 11966
7° N	MED	1.27	0.74	“	>20	> 778
32° N	MAX	3.75	1.23	“	> 187	> 11781
31° N	MED	1.02	0.69	“	> 10	> 411
47° N	MAX	3.27	1.18	“	> 118	> 7141
57° N	MED	0.66	0.58	“	> 4	> 111
57° N	MAX	3.91	1.18	“	> 113	> 6882
86° N	MED	0.75	0.59	“	> 6	> 158

Il limite di azione delle onde al di sotto del livello medio del mare è variabile tra 1,3 e 1,5 volte l'altezza dell'onda H ed il caso più significativo sopra riportato è quello corrispondente alla direzione 10° N dove siamo in corrispondenza di frangimento e quindi le onde frangono prima di arrivare sulla scogliera ed hanno un notevole trasporto di fondo.

In generale, comunque, il trasporto di fondo Q, dipendente dalla forza trasmessa dall'onda F₄₅, è molto significativo e deve essere intercettato per consentire un ripascimento naturale dei litorali.

La **tendenza evolutiva della linea di costa** sotto l'effetto dell'inserimento di una scogliera parallela alla linea di riva può essere schematizzata mediante il modello di Hsu e Silvester mediante la formula:

$$X = 0.68 \times B \times (B / S)^{-1.21}$$

X = distanza della nuova linea di riva dalla scogliera

B = lunghezza della scogliera

S = distanza della scogliera dalla originaria linea di riva

Tale modello è indipendente dalle dimensioni delle onde, ma è studiato nel caso di fronti ondosi incidenti in modo perpendicolare alle scogliere, cosa non pienamente rispondente al caso molisano.

Nel complesso pertanto, sulla base dei calcoli e delle considerazioni che precedono, occorre effettuare delle **scelte progettuali** che tengano conto della situazione dei moti ondosi prevalenti, della pendenza media del fondo marino e della inclinazione delle isobate nel modo seguente:

1. completare l'allineamento delle scogliere parzialmente emergenti con idoneo spessore della berma, ma preferire nelle nuove opere le scogliere soffolte con spessore della berma tale da avere lo stesso coefficiente di smorzamento delle scogliere emergenti;
2. posizionare le nuove scogliere soffolte ad una profondità media di circa 2,00 - 2,50 metri, a fronte del precedente orientamento progettuale di posizionarle a profondità di circa 4,00 metri, in modo da accelerare il ripascimento naturale dell'arenile;
3. disporre le scogliere al largo tenendo conto della direzione del moto ondoso prevalente di nord - nord ovest e della rifrazione sotto costa determinata dal diverso orientamento delle creste d'onda e delle isobate;
4. intercettare il trasporto solido parallelo alla costa mediante piccoli pennelli fino alla profondità massima di 2,00 metri disposti ortogonalmente alla linea di riva e completati da ripascimenti localizzati dell'arenile, aventi la unica funzione di ripristinare la preesistente linea di riva rinforzando l'arenile.