ASIS
ASSOCIAZIONE
PER L'INGEGNERIA
STRUTTURALE

Sede:
Via Fontevivo 21/N
19125 – LA SPEZIA
tel.: 0187-50.42.03
fax: 0187-51.82.19
e-mail: ingegneria.asis@email.it
P.iva/C.F.: 012 06 500 116

ing. Alfredo
MONTEFIORI

ing. Michele
SAPORITO

geom. Alessandro
MANCARDI

geom. Sergio
RAUCCI

geom. Gianni
PIOLI

geom. Andrea
MARTINELLI MONTI

Collaboratori
ing. Alessandro CASTRO
ing. Ilaria LEONARDI
geom. Riccardo GUASTINI
geom. Ivano TONELLI
geom. Alessio BATTISTINI

Relazione sulle opere di protezione della costa

Committente
Immobiliare Lido s.r.l.
II traversa Olivo- Portovenere (SP)

Oggetto
Variante al progetto della passeggiata lungo mare
Seno dell'Olivo- Portovenere (SP)

timbri e firme

ORDINE DEGLI INGEGNERI
ILARIA
LEONARDI
INGEGNERE
Civile ed Ambientale
Industriale
dell'Informazione
A 1192
PROVINCIA DELLA SPEZIA

Data: Marzo 2007

Protocollo: IML-021-04

Indice generale

1 Premessa **2**

2 Obiettivi **2**

3 Elaborazione dei dati meteo-marini **3**

3.1 Dati Meteomarini 3

3.2 Elaborazione statistica dei dati meteomarini 4

3.2.1 Direzione di incidenza compresa tra 120°N e 125°N 5

3.2.2 Direzione di incidenza compresa tra 126°N e 130°N 8

3.2.3 Direzione di incidenza compresa tra 131°N e 135°N 10

3.3 Moto ondoso nel Seno dell'Olivo 13

3.4 Idrodinamica nella zona del frangimento 17

3.5 Processi idrodinamici dovuti alla marea 19

4 Progettazione delle opere di difesa del litorale **21**

4.1 Scelta del tipo di struttura di protezione 22

4.2 Dimensionamento delle unità strutturali 23

4.2.1 Criteri di frangimento 23

4.2.2 Stabilità delle unità del rivestimento di protezione del litorale 26

4.2.3 Spessore dello strato 28

4.2.4 Resistenza di riserva 30

4.3 Determinazione del run-up potenziale per fissare l'elevazione della cresta 31

4.4 Determinazione dell'overtopping attendibile per la struttura 33

4.5 Progettazione della protezione al piede della struttura 34

5 Descrizione dell'intervento proposto **36**

5.1 Caratteristiche dei materiali lapidei 36

5.2 Classificazione dei materiali lapidei 37

5.3 Costruzione della scogliera 38

1Premessa

Con la presente relazione si intende illustrare il progetto di riqualificazione di un breve tratto costiero sito nel comune di Portovenere (SP), tramite realizzazione di opere atte a garantire una fruizione pedonale sicura dell'area circostante - già attrezzata per fini ricettivi e turistici - assieme alla relativa dotazione di arredo urbano, nonché alla realizzazione di opere marittime di lieve entità, limitate alla protezione di una piccola spiaggia. L'attenzione sarà focalizzata soprattuto su questo secondo punto, per cui si cercherà di tracciare un quadro esaustivo della situazione presente allo stato attuale, volto ad evidenziare le cause di asporto del materiale e le possibili soluzioni da attuare.

Per la precisione si parla di un tratto di area lungo la costa, che si estende nel Seno dell'Olivo dall'Albergo Royal ai pontili per lo svolgimento delle attività nautiche. E' l'unica porzione di litorale in cui si interrompe il camminamento pedonale lungo-mare che costeggia la strada. L'arenile sottostante è stato oggetto di forti aggressioni nel corso del tempo, aggressioni che hanno comportato un progressivo ritrarsi della linea di battigia fino a lasciare alla balneazione libera, destinazione prevista tutt'oggi dagli strumenti di pianificazione territoriale, una sottile fascia i cui pochi metri non ne garantiscono di sicuro una comoda fruizione.

Nel corso della presente relazione verranno precisati obiettivi, vincoli e conseguentemente le modalità di recepimento ed elaborazione delle informazioni necessarie a condurre lo studio richiesto.

2Obiettivi

Quanto esposto precedentemente è riferito al tratto del litorale di Portovenere che si estende dalla spiaggia di fronte all'albergo Royal a quella gestita dalla committenza.

In questa sede si intende definire un quadro illustrativo dell'area oggetto dell'intervento, allo scopo di individuare i criteri idonei per dimensionare le opere di protezione dell'arenile, secondo quanto previsto dagli strumenti di pianificazione territoriale e le modalità per attuarlo, in sintonia con gli "Indirizzi per il governo del comune di Portovenere 2004-2009": "Proponiamo quindi di puntare al percorso di qualità per poter agire sia nella direzione dello sviluppo turistico, sia nella direzione, prioritaria, di tutela delle risorse del territorio[1]".

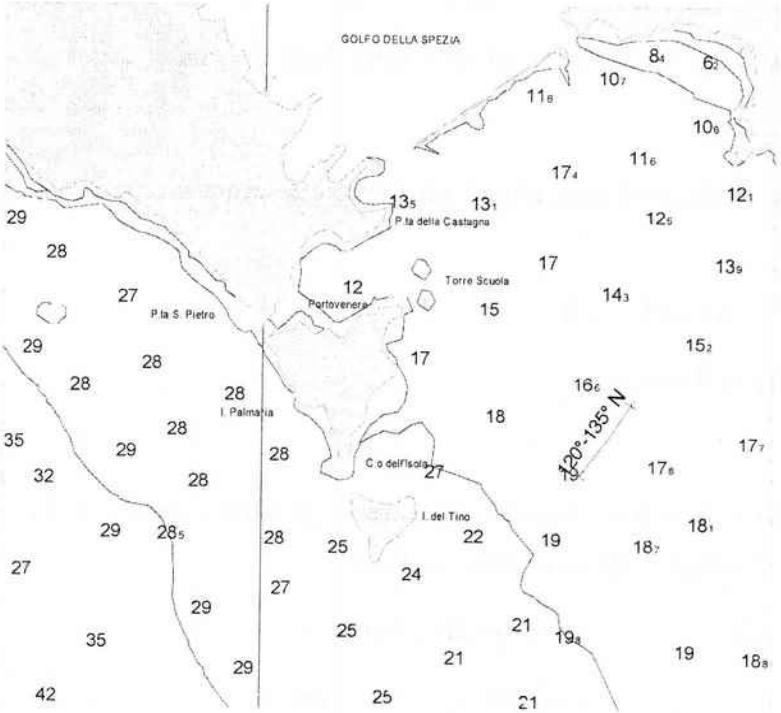
[1] Indirizzi per il governo del comune di Portovenere 2004-2009, La qualità territoriale pag.25

3Elaborazione dei dati meteo-marini

Il presente paragrafo è finalizzato a dipingere la situazione attuale, evidenziando i dati che verranno considerati come input per la progettazione delle opere di protezione dell'arenile. Il carattere di tali dati è di duplice natura, ovvero geo-meccanico e meteo-marino. Incrociando, secondo un opportuno modello di calcolo, i due tipi di input individuati si vuol ottenere una soluzione sufficientemente stabile, atta a garantire un adeguato livello di protezione non solo delle opere marittime che si trovano a diretto contatto con l'azione erosiva del mare, ma anche delle opere civili quali la passeggiata e il muro su cui essa si poggia a sbalzo. In questa sede, in particolare, vengono presentate le modalità di elaborazione dei dati meteo-marini per il calcolo delle grandezze di progetto.

3.1Dati Meteomarini

I dati meteomarini impiegati fanno riferimento alla serie storica raccolta dall'anno 1989 al 2001 dalla boa RON della Spezia, collocata in prossimità dell'isola Palmaria, alle coordinate 43°55.7 N 09°49.6 E. Sono facilmente reperibili dal sito dell'APAT- Servizio Mareografico.



La boa è indubbiamente rappresentativa del paraggio di Portovenere; tuttavia, la baia di Portovenere, protetta dall'isola Palmaria, presenta fetch trascurabili. I dati ondametrici, da riferire alla zona dell'intervento, devono pertanto essere opportunamente elaborati per dipingere lo stato erosivo effettivamente in atto. Il moto ondoso che aggredisce il lido oggetto di studio ha direzione S-E (in particolar modo nell'arco di direzioni comprese tra 120° N e 135° N) e viene rifatto dalla Palmaria nei pressi della Torre Scuola. Inoltre l'energia veicolata dal treno d'onda subisce una riduzione sensibile nel passaggio dall'acqua profonda all'acqua bassa. Queste considerazioni verranno adeguatamente approfondite nel prosieguo del presente paragrafo.

3.2Elaborazione statistica dei dati meteomarini

L'elaborazione dei dati meteomarini permette di dedurre un caso critico che ha la reale probabilità di verificarsi in un prefissato *tempo di ritorno* t_r. Generalmente, per le grandezze idrologiche, si presume che i dati seguano distribuzioni statistiche di equazione nota, i cui parametri di distribuzione vengono determinati sulla base di osservazioni effettuate in passato in un certo periodo[2]. Per cui, se t_r rappresenta il tempo di ritorno del valore x di una data grandezza idrologica, la *probabilità P(x) di superamento* in una anno del valore x è data da:

$$P(x)= 1/t_r;$$

e, ovviamente, la *probabilità di non superamento* $\Phi(x)$ viene definita come:

$$\Phi(x)= 1- P(x)= 1-1/ t_r.$$

Secondo la distribuzione di Gumbel quest'ultimo parametro è legato alla *variabile ridotta y* nel seguente modo:

$$y= -\ln [-\ln \Phi(x)]= -\ln [-\ln(1-1/t_r)]$$

e al valore x della grandezza idrologica:

$$x(t_r)= N+ 1/\alpha\, y$$

con N e α parametri della distribuzione, funzione dello scarto quadratico medio σ e della media M dei valori massimi annuali. Se n è il numero delle osservazioni si hanno:

$\sigma= \sqrt{[(x_i-M)^2/(n-1)]}$ scarto quadratico medio;

$N= M - 0{,}45\ \sigma$ norma della distribuzione;

$1/\alpha= 0{,}7797\ \sigma$.

A questo punto si riportano i dati sulla *carta probabilistica di Gumbel* e si opera la regressione.

[2] Valerio Milano, Costruzioni idrauliche- elementi di idrografia e idrologia- vol. 1 – SEU, Pisa

Nelle tabelle che seguono vengono riportati i valori massimi dell'altezza d'onda media registrati dalla boa RON per la direzione compresa tra tra 120 e 135° N[3], per ciascun anno durante l'intervallo di tempo che va dal 1989 al 2001, le misurazioni sono state effettuate su base trioraria[4].

Le n osservazioni disponibili devono essere ordinate in ordine crescente, riportando per ciascuna osservazione di ordine m la propria durata probabile, il relativo tempo di ritorno e la variabile ridotta y (cfr. sopra):

$\Phi(m)= m/ (n+1)$

$t_r= 1/(1-\Phi(m))= (n+1)/(n+1-m)$.

Conseguentemente si costruisce il grafico con l'interpolazione dei dati.

Analoga elaborazione viene effettuata per valutare il periodo di picco dell'onda di progetto.

3.2.1Direzione di incidenza compresa tra 120°N e 125°N

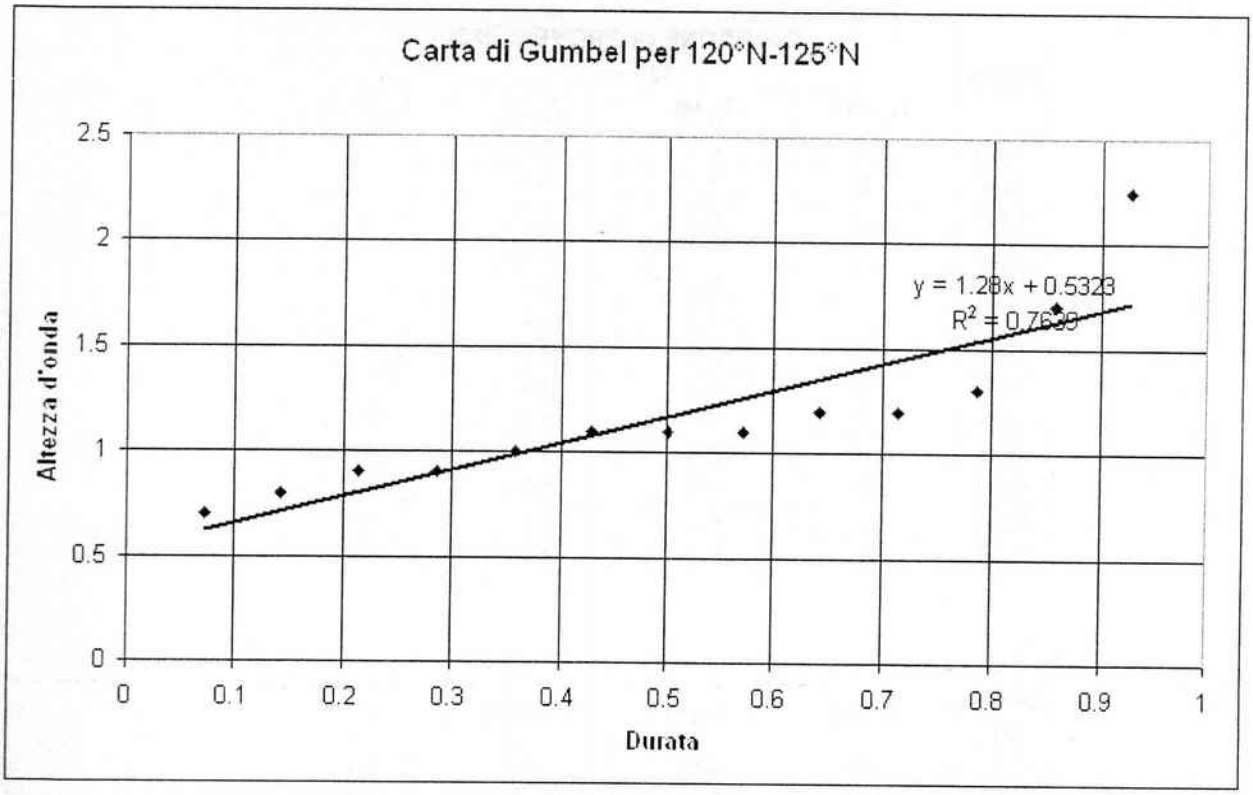
ANNO	DIREZIONE DI PROVENIENZA			
	120°-125°N			
	H_s (m)	T_p (s)	T_m(s)	T_{mp} (°C)
1989	0,9	4	3,8	-
1990	0,8	3,8	3,6	-
1991	0,9	4	3,9	-
1992	1	4	3,5	-
1993	1,7	7,1	4,4	-
1994	1,2	4,2	4,9	-
1995	1,2	5	4,3	-
1996	0,7	3,6	3,4	13,1
1997	1,1	4,3	4	14,8
1998	1,3	5	4,3	14,1
1999	2,24	8,3	5,6	24
2000	1,1	4,5	3,7	14
2001	1,1	4,3	3,7	19

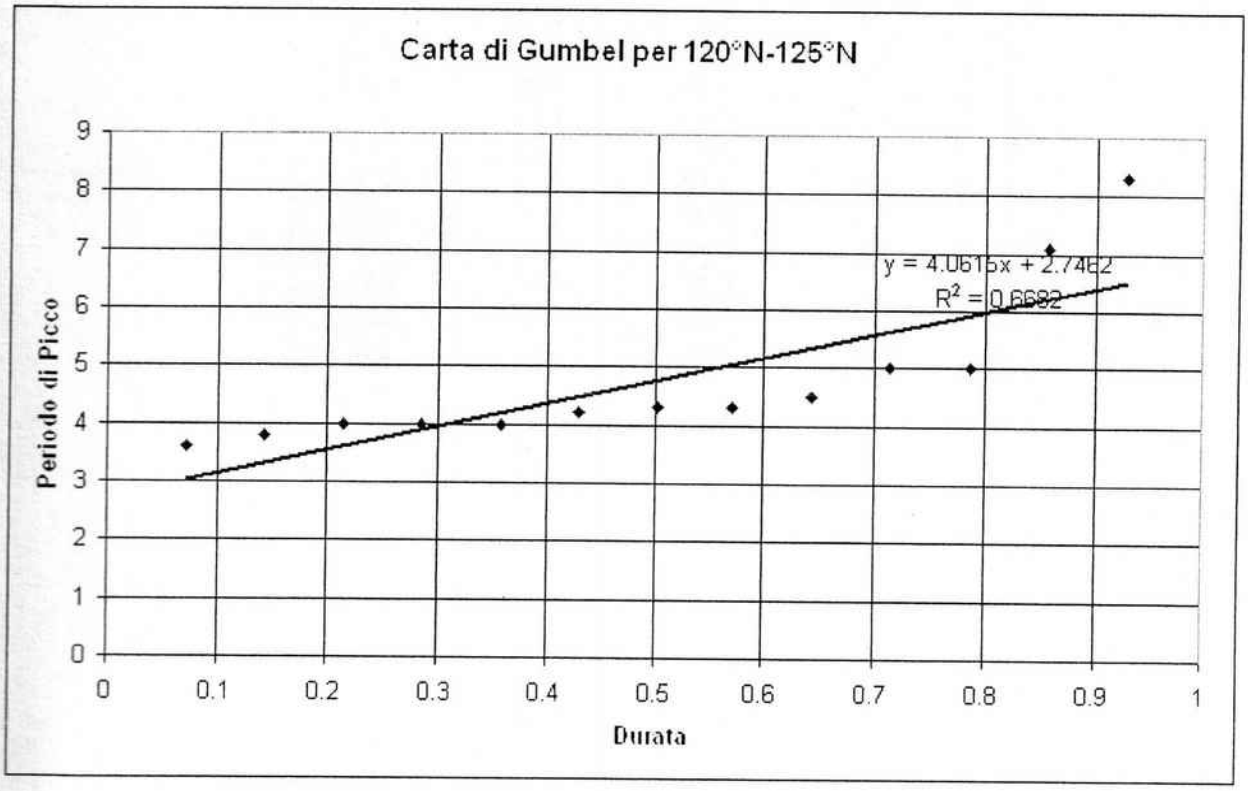
[3] Si considerano tre campi di variazione della dizione, di ampiezza pari a 5°, come specificato nella tabella.

[4] In via cautelativa vengono elaborati i valori massimi annuali (e non quella che viene definita *onda significativa*) per trovare l'onda di progetto.

Ordine m	H_s (m)	Φ (m)	t_r (anni)	y
1	0,7	0,07	1,08	-0,97
2	0,8	0,14	1,17	-0,67
3	0,9	0,21	1,27	-0,43
4	0,9	0,29	1,4	-0,23
5	1	0,36	1,56	-0,03
6	1,1	0,43	1,75	0,17
7	1,1	0,5	2	0,37
8	1,1	0,57	2,33	0,58
9	1,2	0,64	2,8	0,82
10	1,2	0,71	3,5	1,09
11	1,3	0,79	4,67	1,42
12	1,7	0,86	7	1,87
13	2,24	0,93	14	2,6

Ordine m	T_p (s)	Φ (m)	t_r (anni)	y
1	3,6	0,07	1,08	-0,97
2	3,8	0,14	1,17	-0,67
3	4	0,21	1,27	-0,43
4	4	0,29	1,4	-0,23
5	4	0,36	1,56	-0,03
6	4,2	0,43	1,75	0,17
7	4,3	0,5	2	0,37
8	4,3	0,57	2,33	0,58
9	4,5	0,64	2,8	0,82
10	5	0,71	3,5	1,09
11	5	0,79	4,67	1,42
12	7,1	0,86	7	1,87
13	8,3	0,93	14	2,6


Carta di Gumbel per 120°N-125°N
Altezza d'onda
Durata
y = 1.28x + 0.5323
R^2 = 0.7639
0
0.5
1
1.5
2
2.5
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9

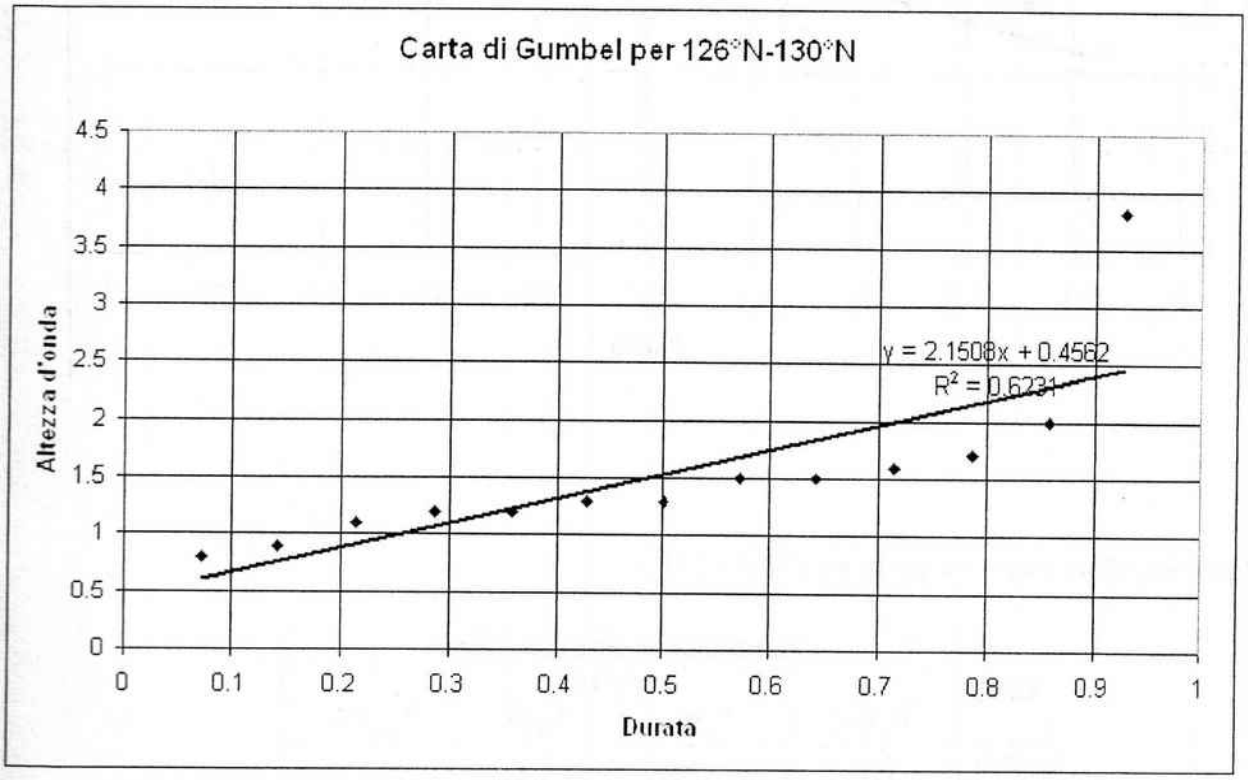

Carta di Gumbel per 120°N-125°N
Periodo di Picco
Durata
y = 4.0615x + 2.7462
R^2 = 0.6682
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9

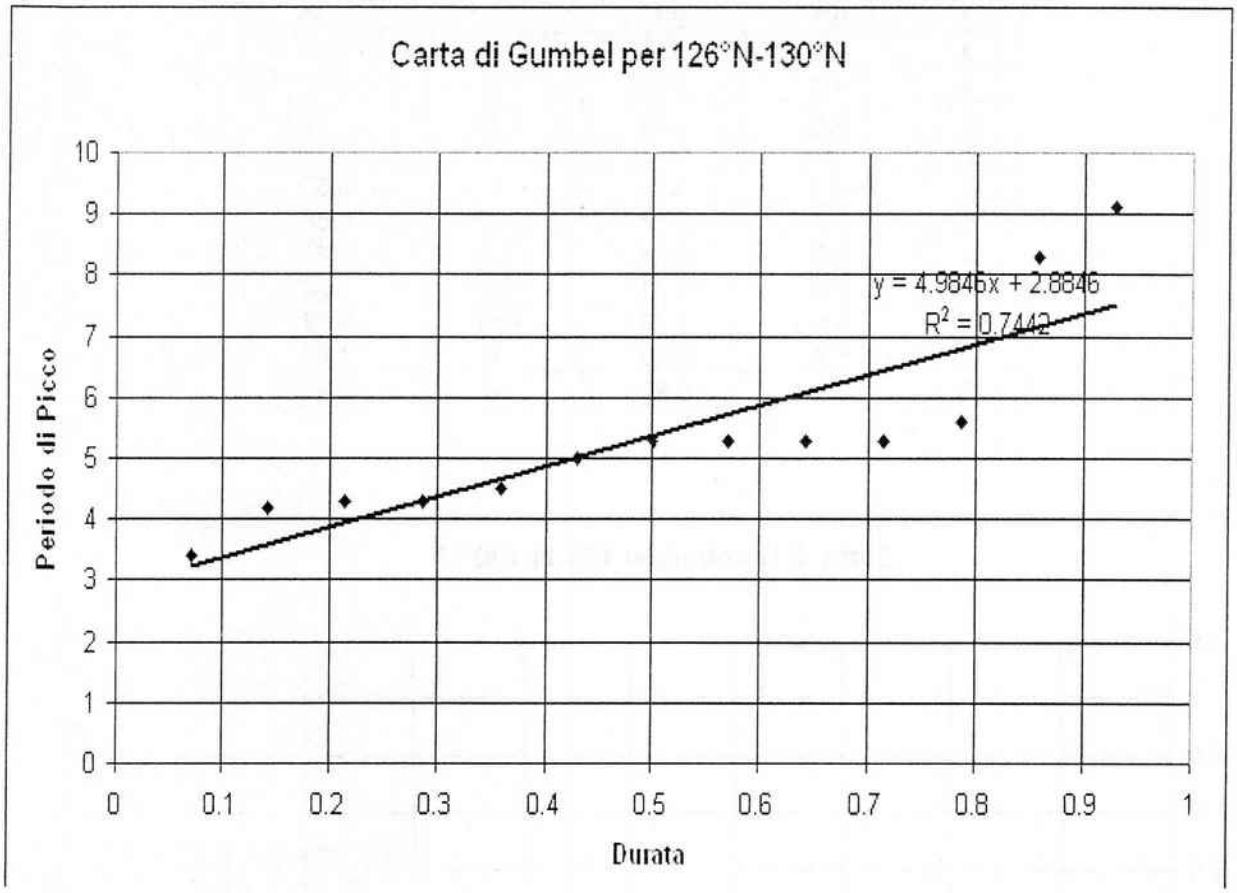
3.2.2Direzione di incidenza compresa tra 126°N e 130°N

ANNO	DIREZIONE DI PROVENIENZA			
	126°-130°			
	H_s (m)	T_p (s)	T_m(s)	T_{mp} (°C)
1989	1,2	4,3	3,9	-
1990	0,8	3,4	3,6	-
1991	1,3	5,3	4,6	-
1992	1,5	9,1	4,6	-
1993	1,2	5,3	3,9	-
1994	0,9	4,3	3,8	-
1995	1,5	5,3	4,7	-
1996	1,3	4,2	4,8	21,8
1997	1,7	5	4,6	14,8
1998	1,6	5,3	4,8	14,1
1999	3,81	8,3	6,5	14
2000	1,1	4,5	4,1	14
2001	2	5,6	4,7	-14

Ordine m	H_s (m)	Φ (m)	t_r (anni)	y
1	0,8	0,07	1,08	-0,97
2	0,9	0,14	1,17	-0,67
3	1,1	0,21	1,27	-0,43
4	1,2	0,29	1,4	-0,23
5	1,2	0,36	1,56	-0,03
6	1,3	0,43	1,75	0,17
7	1,3	0,5	2	0,37
8	1,5	0,57	2,33	0,58
9	1,5	0,64	2,8	0,82
10	1,6	0,71	3,5	1,09
11	1,7	0,79	4,67	1,42
12	2	0,86	7	1,87
13	3,81	0,93	14	2,6

Ordine m	T_p (s)	Φ (m)	t_r (anni)	y
1	3,4	0,07	1,08	-0,97
2	4,2	0,14	1,17	-0,67
3	4,3	0,21	1,27	-0,43
4	4,3	0,29	1,4	-0,23
5	4,5	0,36	1,56	-0,03
6	5	0,43	1,75	0,17
7	5,3	0,5	2	0,37
8	5,3	0,57	2,33	0,58
9	5,3	0,64	2,8	0,82
10	5,3	0,71	3,5	1,09
11	5,6	0,79	4,67	1,42
12	8,3	0,86	7	1,87
13	9,1	0,93	14	2,6



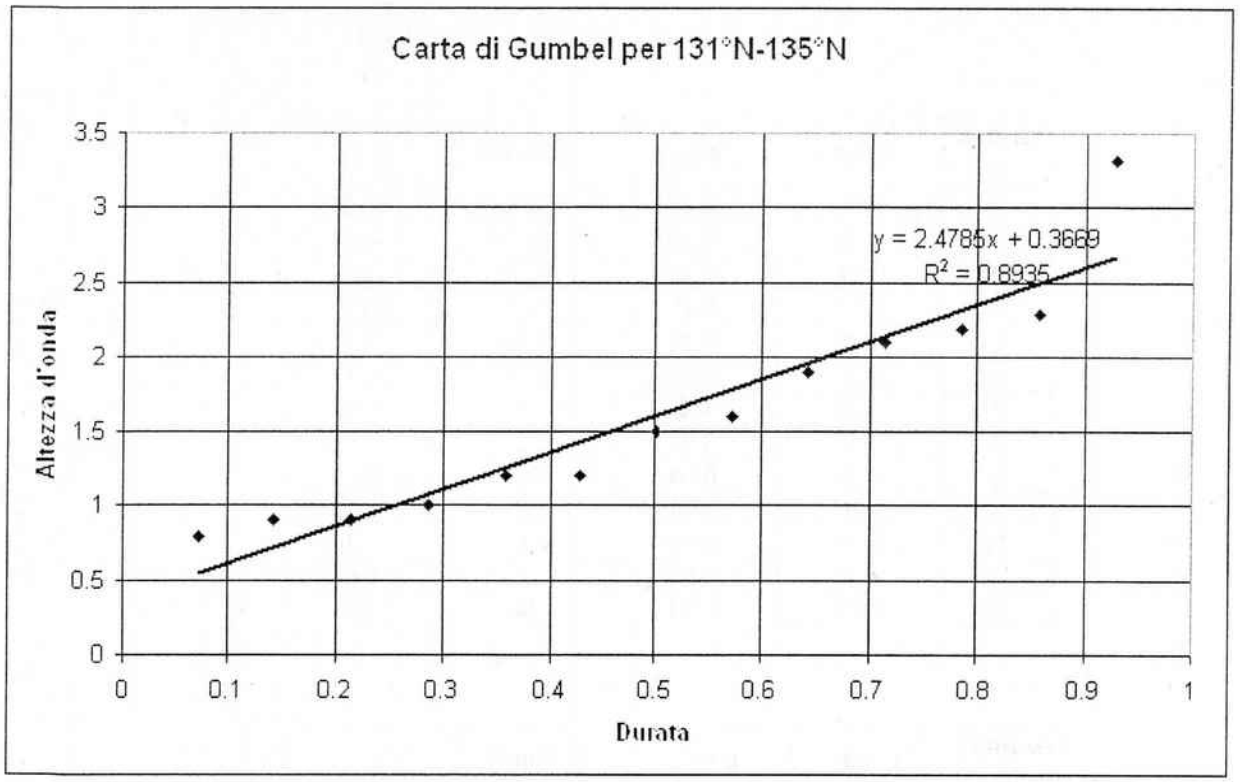


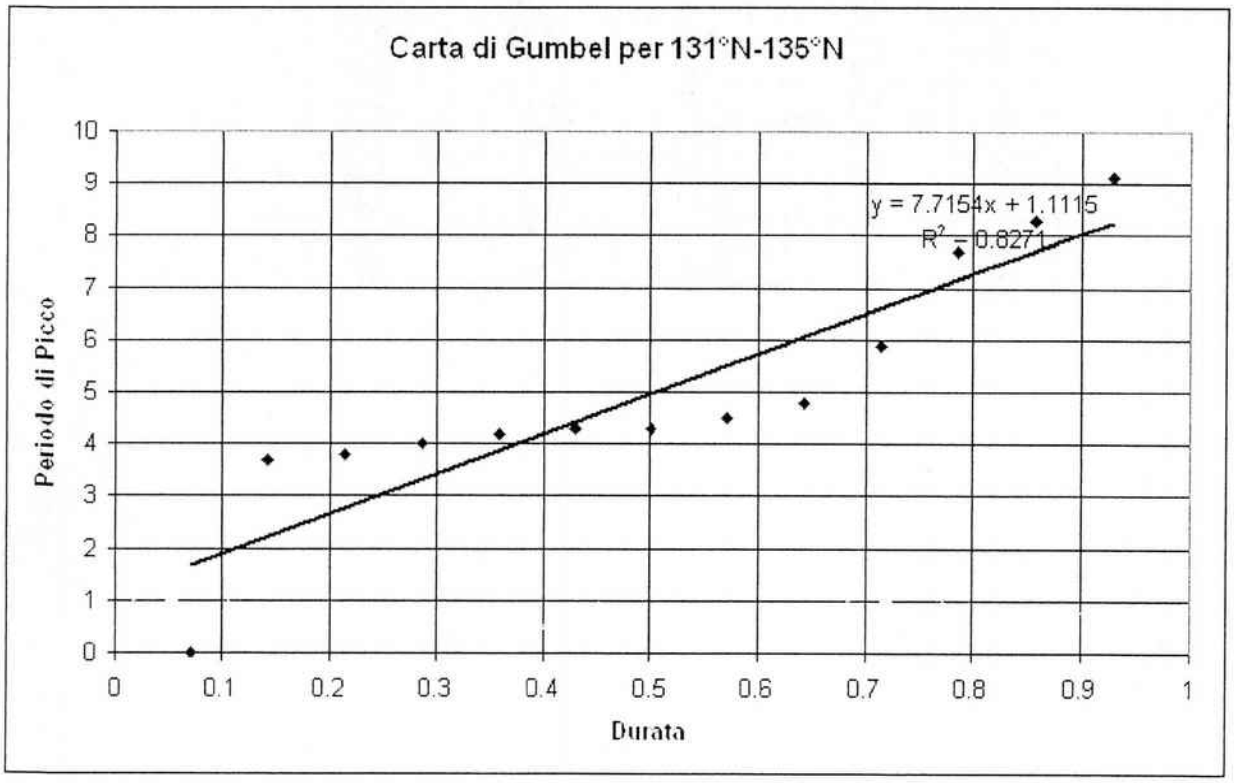
3.2.3Direzione di incidenza compresa tra 131°N e 135°N

ANNO	DIREZIONE DI PROVENIENZA			
	131°-135°			
	H_s (m)	T_p (s)	T_m(s)	T_{mp} (°C)
1989	0,8	4,3	3,8	-
1990	0,9	4	3,8	-
1991	1,2	4,3	4,2	-
1992	1,9	5,9	4,4	-
1993	2,1	8,3	5,1	-
1994	1	3,8	4	-
1995	1,5	4,8	4,2	-
1996	1,2	4,2	4,2	20
1997	0,9	3,7	3,7	15,4
1998	1,6	4,5	5,1	14,5
1999	2,28	9,1	6,4	13
2000	2,19	7,7	6,2	14
2001	3,31	0	0	0

Ordine m	H_s (m)	Φ (m)	t_r (anni)	y
1	0,8	0,07	1,08	-0,97
2	0,9	0,14	1,17	-0,67
3	0,9	0,21	1,27	-0,43
4	1	0,29	1,4	-0,23
5	1,2	0,36	1,56	-0,03
6	1,2	0,43	1,75	0,17
7	1,5	0,5	2	0,37
8	1,6	0,57	2,33	0,58
9	1,9	0,64	2,8	0,82
10	2,1	0,71	3,5	1,09
11	2,19	0,79	4,67	1,42
12	2,28	0,86	7	1,87
13	3,31	0,93	14	2,6

Ordine m	T_p (s)	Φ (m)	t_r (anni)	y
1	0	0,07	1,08	-0,97
2	3,7	0,14	1,17	-0,67
3	3,8	0,21	1,27	-0,43
4	4	0,29	1,4	-0,23
5	4,2	0,36	1,56	-0,03
6	4,3	0,43	1,75	0,17
7	4,3	0,5	2	0,37
8	4,5	0,57	2,33	0,58
9	4,8	0,64	2,8	0,82
10	5,9	0,71	3,5	1,09
11	7,7	0,79	4,67	1,42
12	8,3	0,86	7	1,87
13	9,1	0,93	14	2,6


Carta di Gumbel per 131°N-135°N
y = 2.4785x + 0.3669
R² = 0.8935
Altezza d'onda
Durata
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9


Carta di Gumbel per 131°N-135°N
y = 7.7154x + 1.1115
R² = 0.8271
Periodo di Picco
Durata
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9

Per il problema in analisi risulta sufficiente ipotizzare un periodo di ritorno pari a 50 anni, individuando una altezza d'onda di progetto pari a:

$H_s(50)= 1,28\ \Phi(50)+ 0,5323 \sim 1,80$ m per una direzione compresa tra 120°N e 125°N

$H_s(50)= 2,1508\ \Phi(50)+ 0,4562 \sim 2,60$ m per una direzione compresa tra 126°N e 130°N

$H_s(50)= 2,4785\ \Phi(50)+ 0,3669 \sim 2,80$ m per una direzione compresa tra 131°N e 135°N

essendo la durata probabile $\Phi(50)= 1- P(50)= 1-1/ t_r= 0,98$.

Si elencano anche i relativi periodi di picco:

$T_p(50)= 4,0616\ \Phi(50)+ 2,7462 \sim 6,7$ s per una direzione compresa tra 120°N e 125°N

$T_p(50)= 4,9846\ \Phi(50)+ 2,8846 \sim 7,8$ s per una direzione compresa tra 126°N e 130°N

$T_p(50)= 7,7154\ \Phi(50)+ 1,1115 \sim 8,7$ s per una direzione compresa tra 131°N e 135°N

Questi dati, ovviamente, non rappresentano il valore di progetto che potrà essere preso alla base della progettazione delle opere nel seno dell'Olivo. Sono rappresentativi delle condizioni di moto ondoso in acqua profonda, per cui necessitano di ulteriori modellazioni che tengano conto della reale batimetria e dei fenomeni di rifrazione e diffrazione a cui sono soggetti i treni d'onda prima di raggiungere la riva.

3.3Moto ondoso nel Seno dell'Olivo

Le condizioni meteo-marine nel Seno dell'Olivo vengono influenzate dalla presenza dell'isola Palmaria e dalla riduzione della profondità del fondale. Data la modesta entità dell'opera in progetto, si propone la modellazione della propagazione del moto ondoso attraverso i metodi manuali tradizionali, descritti nei manuali di costruzioni idrauliche marittime. Il riferimento in questione viene tratto dal Costal Engeneering Manual[5] (2002), che rappresenta un'aggiornata revisione del più vecchio Shore Protection Manual del 1984. Si descrive brevemente la procedura adottata.

Data la posizione protetta del sito dell'intervento, appare accettabile ipotizzare che le onde si siano originate lontano, che si siano propagate in zone con fondali più bassi e condizioni trascurabili di vento, fino a raggiungere la costa come onde di mare morto. Consideriamo una situazione stazionaria, con un'onda monocromatica che si propaga in una regione costiera, con linee batimetriche pressoché parallele alla linea di

[5] Costal Engeneering Manual, Part II – Chapter 3 Estimation of nearshore waves

costa. Supponiamo di essere altresì in assenza di correnti. Se le linee che approssimano la posizione delle creste del treno d'onda formano con le linee batimetriche un angolo diverso da zero, allora il treno d'onda subisce una deformazione delle linee di cresta, che tenderanno a posizionarsi parallelamente alla costa. La rifrazione subita è dipendente alla variazione di velocità puntuale causata dalla riduzione della profondità. Infatti, se A e B sono due punti della stessa linea di cresta ma, allo stesso istante t A si trova in corrispondenza di una profondità h_a e B ad una profondità h_b, con $h_a<h_b$, la celerità del punto B sarà maggiore di quella del punto A valendo la seguente relazione:

$$C_a=g/\omega \tanh(k\, h_a) < C_b=g/\omega \tanh(k\, h_b)$$

dove g rappresenta l'accelerazione di gravità

$\omega=2\pi/T$ la pulsazione, con T periodo dell'onda (valore che rimane costante)

$k=2\pi/L$ numero d'onda, con L lunghezza d'onda.

A livello grafico, il problema della propagazione ondosa può essere risolto tramite la costruzione dei raggi d'onda, ovvero tracciando una trama di linee ortogonali alle linee di cresta che si propagano verso la costa. Indicando con il pedice zero le caratteristiche di moto delle onde in acqua profonda, l'angolo θ e la velocità cambiano con la batimetria nel seguente modo:

$$\sin\theta / C = \sin\theta_o / C_o$$

La variazione dell'altezza d'onda si calcola attraverso considerazioni basate su principi di natura energetica, applicati a due raggi adiacenti. Indicando con i pedici 0 e 1 gli angoli che lo stesso raggio forma all'intersezione con due linee batimetriche differenti, le altezze d'onda sono legate tra loro nel seguente modo:

$$H_1 = H_0\, K_s\, K_r$$

dove i coefficienti K sono definiti come:

$K_s=(C_{g0}/C_{g1})^{1/2}$ (coefficiente di shoaling, funzione delle velocità di gruppo C_g)

$K_r=(\cos\theta_0/\cos\theta_1)^{1/2}$ (coefficiente di rifrazione).

Nella tabella seguente vengono riportate le espressioni che permettono il calcolo delle caratteristiche delle onde, differenziate in relazione alla profondità relativa. Tali relazioni, elaborate da Airy in merito alla teoria lineare, verranno impiegate per la razionalizzazione della propagazione ondosa.

Profondità relativa	*Acqua bassa* *d/L<1/25*	*Profondità di transizione* *1/25<d/L<1/2*	*Acqua alta* *d/L>1/2*
Velocità d'onda	$C= L/T= (gd)^{1/2}$	$C= L/T= gT/(2\pi)\tanh(2\pi d/L)$	$C= C_0= L/T= gT/(2\pi)$
Lunghezza d'onda	$L= T(gd)^{1/2}= CT$	L[6]$= gT^2/(2\pi)\tanh(2\pi d/L))$	$L= L_0= gT^2/(2\pi)= C_0T$

[6] La soluzione viene valutata per iterazioni successive

Profondità relativa	*Acqua bassa d/L<1/25*	*Profondità di transizione 1/25<d/L<1/2*	*Acqua alta d/L>1/2*
Velocità di gruppo	$C_g = C = (gd)^{1/2}$	$C_g = nC = \frac{1}{2}[1+(4\pi d/L)/\sinh(4\pi d/L)]C$	$C_g = C/2 = gT/(4\pi)$

L'analisi della propagazione del moto ondoso viene eseguita lungo le direzioni di provenienza medie all'interno di archi di 5° per diverse profondità incontrate fino alla punta della Palmaria e alla Torre Scuola. I risultati saranno riassunti nella tabella posta sotto.

	Grandezza		Valore		Valore		Valore	
Dati iniziali	Direzione media di propagazione	Θ	123	°N	127	°N	133	°N
	Profondità iniziale	d_0	57	m	57	m	57	m
	Altezza d'onda iniziale	H_0	1,8	m	2,6	m	2,8	m
	Periodo	T	6,7	s	7,8	s	8,7	s
	Profondità finale	d_1	12,5	m	12,5	m	12,5	m
	Direzione media di incidenza con la batimetrica	Θ_0	0	°	32	°	26	°
Situazione iniziale	Tipo di propagazione		Acqua alta		Acqua alta		Acqua di transizione	
	Celerità	C_0	10,47	m/s	12,18	m/s	13,53	m/s
	Lunghezza d'onda	L	70,12	m	95,04	m	117,7	m
	Velocità di gruppo	C_{g0}	5,23	m/s	6,09	m/s	6,95	m/s
	Pulsazione	ω	0,94	s-1	0,81	s-1	0,72	s-1
	Numero d'onda	k	0,09	m-1	0,07	m-1	0,05	m-1
Situazione rifratta	Tipo di propagazione		Acqua di transizione		Acqua di transizione		Acqua di transizione	
	Celerità	C_1	9,21	m/s	9,55	m/s	9,84	m/s
	Lunghezza d'onda	L	61,71	m	74,46	m	85,64	m
	Velocità di gruppo	C_{g1}	6,46	m/s	7,25	m/s	7,88	m/s
	Pulsazione	ω	0,94	s-1	0,81	s-1	0,72	s-1
	Numero d'onda	k	0,1	m-1	0,08	m-1	0,07	m-1
	Angolo di rifrazione	Θ_1	0	°	24,53	°	18,6	°
	Coefficiente di shoaling	K_s	0,9		0,92		0,94	
	Coefficiente di rifrazione	K_r	1		0,97		0,97	
	Altezza d'onda rifratta	H_1	1,62	m	2,3	m	2,56	m
	Nuova direzione di propagazione	Θ'	123	°N	119,53	°N	125,6	°N

Prima di procedere ad un'analisi di questo tipo per il Seno dell'Olivo, si deve valutare l'ulteriore modifica causata dalla rifrazione. Anche in questo caso il problema verrà affrontato in termini semplificati, secondo le indicazioni riportate dal Costal Engeneering Manual[7]. La soluzione varia in relazione alla lunghezza d'onda L e al suo rapporto con l'ampiezza B del passaggio tra le due isole, nonché dall'angolo α di

[7] Costal Engeneering Manual, Part II – Chapter 7 Harbour Hydrodynamics

incidenza del raggio d'onda con l'apertura (che permette di calcolare l'ampiezza equivalente immaginaria B'= B/cosα). Questi dati permettono di individuare il coefficiente di rifrazione $K_r=H_1/H_0$, come rapporto tra l'altezza d'onda rifratta e d'onda incidente. Si ricorda che le leggi di trasmissione delle onde prevedono diffrazione quando la lunghezza dell'onda è almeno pari alle dimensioni dell'apertura attraversata. Nel caso la lunghezza d'onda risultasse significativamente inferiore a B' (K_r~1), l'effetto diffrattivo può essere considerato ininfluente ai fini del presente studio e, pertanto, essere trascurato.

Nel caso della diffrazione si assume come costante del moto la lunghezza d'onda; le relazioni di Airy verranno pertanto invertite allo scopo di risalire al nuovo periodo di picco che regola la propagazione delle onde massime nel Seno dell'Olivo.

Per maggiori dettagli in merito si rimanda agli studi condotti da Johnson nel 1952.

	Grandezza		Valore		Valore		Valore	
Dati iniziali	Direzione media di propagazione	Θ	123	°N	119,53	°N	125,6	°N
	Direzione media di incidenza con la batimetrica	Θ_0	0	°	32	°	26	°
	Periodo	T	6,7	s	7,8	s	8,7	s
	Lunghezza d'onda	L	61,71	m	74,46	m	85,64	m
	Altezza d'onda	H_1	1,62	m	2,3	m	2,56	m
	Ampiezza del passaggio	B	109	m	109	m	109	m
	Ampiezza equivalente immaginaria	B'	109	m	130,66	m	168,49	m
	Rapporto	B'/L	1,77		1,75		1,97	
	Coefficiente di rifrazione	K_r	1		0,97		0,97	
Altezza diffratta		H_2	1,62	m	2,22	m	2,49	m
Lunghezza d'onda		L	61,71	m	74,46	m	85,64	m
Periodo		T	6,61	s	7,52	s	8,36	s

Per terminare si riportano le caratteristiche delle onde significative che si propagano all'interno del Seno dell'Olivo, in particolare all'incidenza della batimetrica di 10 m.

	Grandezza		Valore		Valore		Valore	
Dati iniziali	Direzione media di propagazione	Θ	123	°N	119,53	°N	125,6	°N
	Profondità iniziale	d_0	12,5	m	12,5	m	12,5	m
	Altezza d'onda iniziale	H_0	1,62	m	2,22	m	2,49	m
	Periodo	T	6,61	s	7,52	s	8,36	s
	Profondità finale	d_1	10	m	10	m	10	m
	Direzione media di incidenza con la batimetrica	Θ_0	40	°	22	°	16	°
Situazione iniziale	Tipo di propagazione		Acqua di transizione		Acqua di transizione		Acqua di transizione	
	Celerità	C_0	9,34	m/s	9,9	m/s	10,24	m/s
	Lunghezza d'onda	L	61,71	m	74,46	m	85,64	m
	Velocità di gruppo	C_{g0}	6,54	m/s	7,52	m/s	8,2	m/s
	Pulsazione	ω	0,95	s-1	0,84	s-1	0,75	s-1
	Numero d'onda	k	0,1	m-1	0,08	m-1	0,07	m-1
Situazione rifratta	Tipo di propagazione		Acqua di transizione		Acqua di transizione		Acqua di transizione	
	Celerità	C_1	8,8	m/s	9,18	m/s	9,41	m/s
	Lunghezza d'onda	L	58,15	m	69,06	m	78,67	m
	Velocità di gruppo	C_{g1}	6,62	m/s	7,37	m/s	7,88	m/s
	Pulsazione	ω	0,95	s-1	0,84	s-1	0,75	s-1
	Numero d'onda	k	0,11	m-1	0,09	m-1	0,08	m-1
	Angolo di rifrazione	Θ_1	37,28	°	20,33	°	14,67	°
	Coefficiente di shoaling	K_s	0,99	0	1,01	0	1,02	0
	Coefficiente di rifrazione	K_r	0,98	0	0,99	0	1	0
	Altezza d'onda rifratta	H_1	1,58	m	2,23	m	2,54	m
	Nuova direzione di propagazione	Θ'	120,28	°N	117,86	°N	124,27	°N

3.4Idrodinamica nella zona del frangimento

Si indagano ora le condizioni di frangimento[8] del treno d'onda, che verranno successivamente elaborate per la definizione dei fenomeni erosivi.

La zona di frangimento è la regione costiera soggetta ai fenomeni idrodinamici più intensi, con trasporto dei sedimenti e modificazioni della batimetria dettate dal frangimento delle onde. Man mano che un'onda si avvicina alla spiaggia, la lunghezza d'onda L diminuisce, mentre l'altezza H aumenta, con la

[8] Costal Engeneering Manual, Part II – Chapter 4 Surf Zone Hydrodynamics

conseguenza di far incrementare la ripidità H/L. L'onda frange quando raggiunge il valore limite della ripidità, valore che dipende dalla profondità relativa e dalla pendenza del fondale β.

Esistono diverse forme di frangimento, in relazione al rapporto delle grandezze di cui sopra. Indicando con il pedice 0 le caratteristiche del moto ondoso al largo (in questo caso delle onde che si sono riformate a seguito della diffrazione), si definisce il surf similarity parameter[9]:

$\zeta_0 = \tan\beta\,(H_0/L_0)^{-1/2}$

Seguono le condizioni di frangimento per le diverse onde significative.

	Grandezza		Valore		Valore		Valore	
Frangimento	Direzione media di propagazione	Θ	120,28	°N	117,86	°N	124,27	°N
	Altezza d'onda	H	1,58	m	2,23	m	2,54	m
	Lunghezza d'onda	L	58,15	m	69,06	m	78,67	m
	Pendenza media fondale	β	10	°	10	°	10	°
	tanβ		0,58		0,58		0,58	
	Similarity parameter	ζ_0	0,1		0,1		0,1	
	Tipo di frangimento		**Spilling**		**Spilling**		**Spilling**	

Lo studio del frangimento è di sostanziale importanza perché i cambiamenti di altezza d'onda attraverso la surf zone hanno risvolti importanti in fenomeni quali il wave setup, runup, le correnti lungo costa nonché il trasporto dei sedimenti. Si calcolano, a questo punto, la profondità e l'altezza dell'onda frangente.

Nell'ipotesi, già a lungo usata, di onde monocromatiche, si calcola l'altezza H'_0 di un'onda equivalente non rifratta in acqua profonda:

$$H'_0 = K_r H_0$$

dove il coefficiente di rifrazione è stato calcolato al punto precedente per le diverse direzioni di incidenza. La corrispondente lunghezza d'onda sarà:

$$L_0 = gT^2/(2\pi).$$

Introducendo l'indice di frangimento dell'altezza d'onda

$$\Omega_b = 0{,}56\,(H'_0/L_0)^{-1/5}$$

si ricava l'altezza di frangimento

---

[9] Surging/collapsing $\zeta_0 > 3{,}3$
Plunging $0{,}5 < \zeta_0 < 3{,}3$
Spilling $\zeta_0 < 0{,}5$

$$H_b = \Omega_b \, H'_0$$

Noto l'angolo di inclinazione β, si ricava l'indice della profondità di frangimento γ_b dal diagramma di Weggel (1972), che permette di calcolare la profondità di frangimento:

$$d_b = H_b / \gamma_b .$$

	Grandezza		Valore		Valore		Valore	
Dati iniziali	Direzione media di propagazione rispetto al N	Θ	120,28	°N	117,86	°N	124,27	°N
	Altezza d'onda iniziale	H_0	1,58	m	2,23	m	2,54	m
	Periodo	T	6,61	s	7,52	s	8,36	s
	Pendenza media fondale	β	10	°	10	°	10	°
	Coefficiente di rifrazione	K_r	0,98		0,99		1	
Dati di frangimento	Altezza d'onda equivalente non rifratta in acqua alta	H_0'	1,55	m	2,22	m	2,53	m
	Lunghezza d'onda equivalente non rifratta in acqua alta	L_0	68,25	m	88,34	m	109,17	m
	Indice di frangimento dell'altezza d'onda	Ω_b	1,19		1,17		1,19	
	Altezza d'onda di frangimento	H_b	1,89	m	2,61	m	3,02	m
	Parametro tanβ		0,6		0,6		0,6	
	Parametro $H_b/(gT^2)$		0,004		0,005		0,004	
	Indice della profondità di frangimento	γ_b	1,3		1,3		1,35	
	Profondità di frangimento	d_b	1,45	m	2,01	m	2,23	m

3.5Processi idrodinamici dovuti alla marea[10]

Il Seno delle Grazie si trova immediatamente fuori la diga foranea del Golfo della Spezia, protetto dall'antistante isola Palmaria. La conformazione di questo sito marino, tuttavia assicura un continuo ricambio d'acqua, in quanto le emergenze naturali presenti non costituiscono un difficile ostacolo alla correnti di marea che interessano il mare aperto.

[10] Costal Engeneering Manual, Part II – Chapter 6 Hydrodynamics of Tidal Inlets

Data la piccola dimensione del bacino oggetto di studio, nonché la sua condizione di apertura nei confronti del mare aperto, si può concludere che l'onda di marea comporta un innalzamento uniforme del livello dell'acqua nel bacino stesso.

Le valutazioni che verranno effettuate si baseranno pertanto sul livello medio del mare che può essere dedotto dalle carte batimetriche.

4Progettazione delle opere di difesa del litorale

Nel presente paragrafo vengono presentati i criteri progettuali per il recupero di una porzione di lido collocato nel Seno dell'Olivo. La soluzione proposta prevede la posa in opera di più strati di materiale inerte, differenziati per funzione e granulometria. Si parte da uno strato o più strati filtro, posti a diretto contatto con il sedime originale, su cui verrà posizionato uno strato di finitura, che permetterà la fruizione del lido. Lo strato filtro assicura il drenaggio e il trattenimento del terreno sottostante. Al piede di questa "matrice ordinata di elementi strutturali che si interconnettono a formare una trama geometrica"[11], verrà collocata una protezione finalizzata ad assicurare la stabilità al fondo della struttura. Infatti queste opere di rivestimento hanno fondalmentalmente lo scopo di difendere l'area emersa posta immediatamente dietro ad esse; se non si ponesse adeguata attenzione alla progettazione dell'inclinazione della struttura e della protezione al piede, le potenzialità riflessive della struttura stessa potrebbero comportare un incremento dell'ammontare dell'energia dell'onda incidente, anziché il suo assorbimento e la sua dissipazione. La conseguenza che si vuole evitare è essenzialmente quella di spostare il fenomeno erosivo al piede della berma, con riflessi che pregiudicherebbero la statica complessiva della struttura.

Dall'elaborazione dei dati meteo-marini, inoltre, è evidente come il frangimento dell'onda per eventi con tempo di ritorno pari a 50 anni interessi una fascia batimetrica di profondità variabile tra 1,40 m e 2,30 m (cfr. Elaborazione dei dati-meteo-marini – Par. 3.4 Idrodinamica nella zona del frangimento, pag. 17). La zona di frangimento dovrà essere arretrata verso il mare, e la progettazione sarà finalizzata al controllo dei fenomeni dissipativi dell'energia, in modo da ridurre significativamente l'asportazione del materiale solido di protezione alle opere stradali nonché i fenomeni di run-up e over-topping che pregiudicherebbero la fruizione del lido.

La sezione di progetto dell'intervento verrà verificata sulla base dei risultati dell'elaborazione statistica della propagazione del moto ondoso nel Seno dell'Olivo. Tali dati di input vengono brevemente richiamati sotto;

Direzione originaria di provenienza °N		120-125		126-130		131-145	
Altezza d'onda	H	1,58	m	2,23	m	2,54	m
Periodo di picco	T_p	6,61	s	7,52	s	8,36	s

Per il dimensionamento e la verifica di quanto segue si fa esplicito riferimento al manuale del US Army Corps of Engineers, *Design of Coastal Revetments, Seawalls and Bulkhead*, 1995.

[11] US Army Corps of Engineers, Design of Coastal Revetments, Seawalls and Bulkhead, 1995

Si rimanda alla consultazione degli elaborati grafici redatti e allo schema esplicativo allegato allo scopo di comprendere il significato dei simboli adoperati.

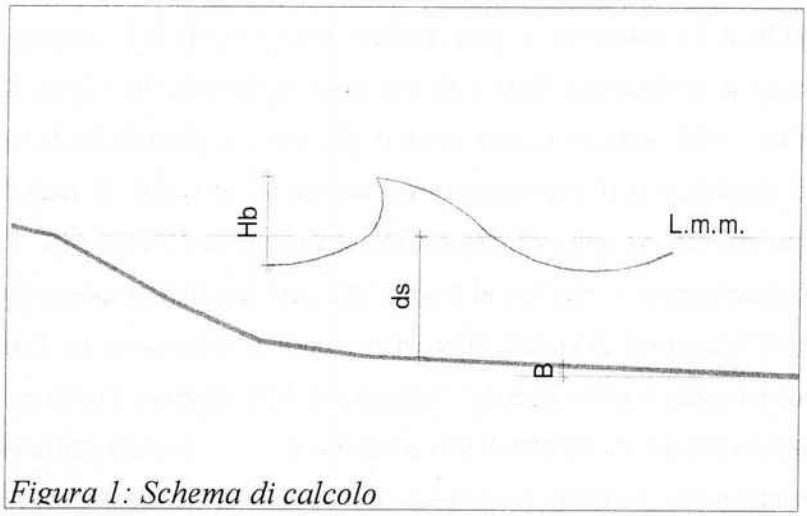


Figura 1: Schema di calcolo

4.1Scelta del tipo di struttura di protezione

Si riportano le caratteristiche dei *rivestimenti in pietra di cava a strati di pezzatura variabile in maniera graduale.*[12]

Sono costituiti da pietre di grandezza abbastanza uniforme, poste in strati di pezzatura variabile dal basso verso l'alto, in relazione alla funzione ricoperta dallo strato ma anche in dipendenza della stabilità al trasporto solido dell'onda di progetto.

Il principale vantaggio di queste strutture è la flessibilità, che permette un facile assestamento sul suolo sottostante e minori cedimenti in fase di esercizio. Inoltre, grazie alla loro rugosità, manifestano fenomeni di runup e di overtopping ridotti rispetto a strutture lisce. Per contro, sono strutture molto pesanti.

La pendenza massima consigliabile della struttura è del 50%; il materiale di riempimento consente una maggiore uniformità della pendenza della struttura, ma deve essere compattato e stabilizzato adeguatamente nel corso della costruzione. Gli strati di filtro, adeguatamente dimensionati, permettono di prevenire la perdita del materiale di fondazione e di riempimento attraverso i vuoti del rivestimento in pietra.

Per la progettazione, il manuale guida fornisce le seguenti indicazioni:

- il peso di progetto del materiale di stabilizzazione del rivestimento è funzione dell'altezza d'onda;

[12] US Army Corps of Engineers, Design of Coastal Revetments, Seawalls and Bulkhead, Appendix B-Revetments-B1 Quarrystone and Graded Riprap, 1995

•il fenomeno del runup si riduce di oltre il 50% rispetto a quanto avviene per strutture lisce;

•la riflessione dell'onda incidente è bassa.

4.2Dimensionamento delle unità strutturali

Le strutture possono essere costruite usando massi monolitici di grandi dimensioni che resistono alla forza delle onde, oppure dall'aggregazione di unità di dimensioni inferiori, disposte casualmente o, come nel nostro caso, secondo una "matrice ordinata". I grandi massi e i blocchi artificiali interconnessi reciprocamente, mostrano inizialmente una notevole resistenza superiore, ma mancando di flessibilità, manifestano sensibili cedimenti differenziali per assestamento oppure fenomeni di erosione al piede che rendono fallimentare il loro impiego. Differentemente, l'impiego di unità con pezzatura variabile, anche posizionata casualmente, ha dato un buon esito sia nelle proprie capacità di assestamento anche sotto l'azione ondosa, sia nel mostrare una resistenza residua in condizioni di progetto.

4.2.1Criteri di frangimento

L'altezza d'onda e il periodo devono essere scelti in modo di produrre la più critica combinazione di forze sulla struttura, in relazione alla vita economica, all'integrità strutturale, a situazioni accidentali di intensità superiore alle condizioni di progetto. Come dati di input si assumono:

d_s profondità dell'acqua nel punto considerato, in genere coincidente con quella a cui si pone la berma;

T_p periodo di propagazione dell'onda;

m tangente dell'angolo di pendenza del fondale.

Il rapporto $d_s/(gT^2)$ permette di risalire al rapporto tabellato H_b/d_s, da cui si risale all'altezza di frangimento, in relazione alle caratteristiche batimetriche.

I rapporti adimensionali sono stati elaborati nel seguente diagramma.

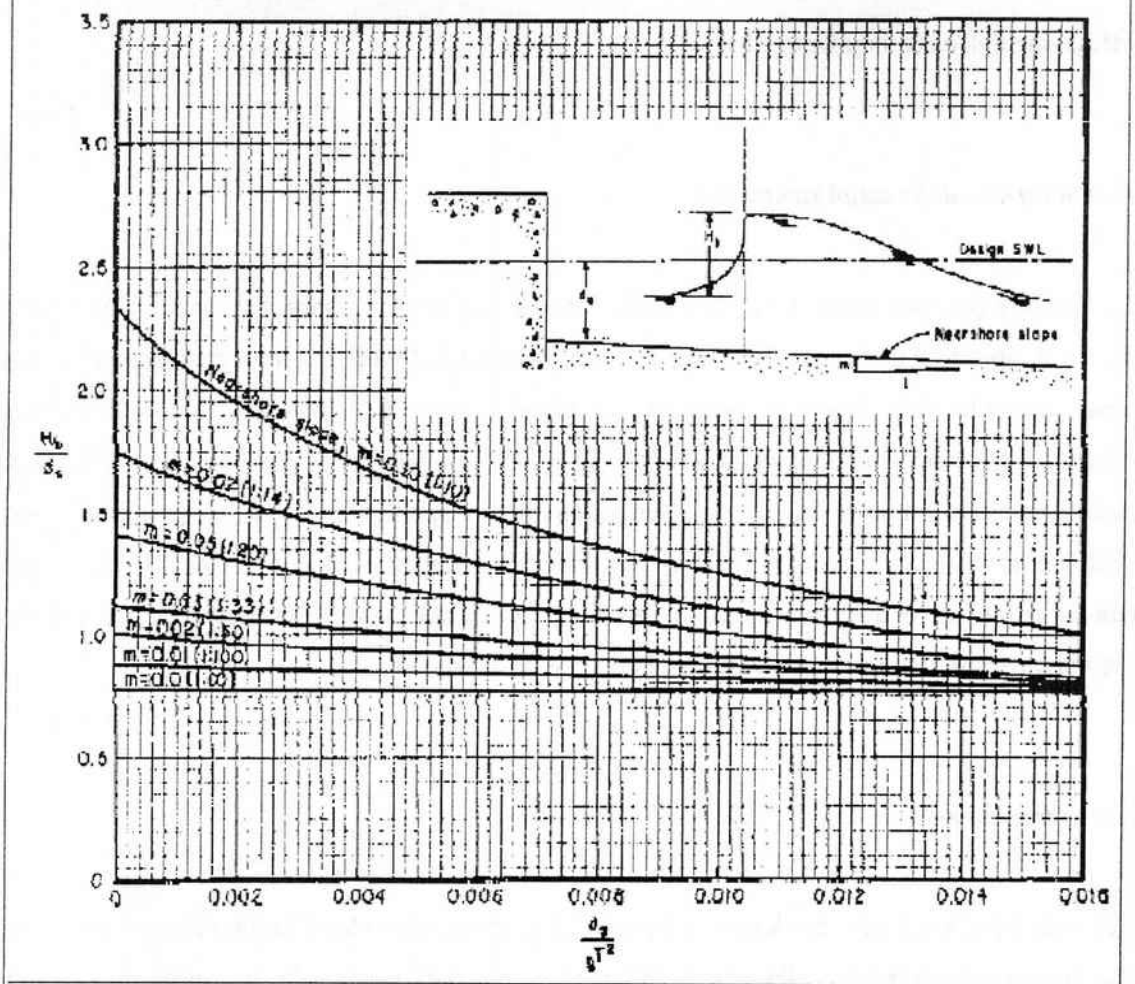


Figura 2: Design breaker height (Weggel 1972) tratto da US Army Corps of Engineers, Design of Coastal Revetments, Seawalls and Bulkhead

Nel caso qui in analisi, si ritiene opportuno considerare il valore limite massimo dell'altezza di frangimento:

$$(H_{mo})_{max} = 0{,}10\ L_p \tanh(2\pi d_s/L_p)$$

dove la lunghezza d'onda L_p viene calcolata in relazione a d_s e T_p. Per le modalità di calcolo di quest'ultimo elemento, si rimanda alla Relazione sull'elaborazione dei dati meteo-marini, dove si è provveduto a spiegare l'applicazione della teoria di Airy.

Il valore di H_{mo} permette di risalire all'altezza significativa dell'onda, che verrà utilizzata come dato di progetto nel corso dei seguenti dimensionamenti e che pertanto verrà semplicemente indicata con H. La relazione che lega questi due valori dell'altezza d'onda è la seguente:

$$H_s/H_{mo} = \exp\left[C_0(d/(g\,T_p^2)^{-C1}\right]$$

che preserva la sua validità finché risulta verificato il rapporto: $d/(gT_p^2) > 0{,}0005$.

I coefficienti di regressione assumono il valore:

$C_0 = 0{,}00089$

$C_1 = 0{,}834$.

In fine bisogna correlare i valori trovati con il relativo periodo di propagazione. Il periodo di picco T_p, trovato tramite regressione della serie storica analizzata, è correlato a quello dell'onda significativa T_s (che in seguito verrà indicato semplicemente con T), tramite una proporzione diretta, mediata a meno di un coefficiente moltiplicativo tabellato. Data la posizione sufficientemente riparata del sito dell'intervento, si sceglie il coefficiente relativo alle onde di mare morto, generate da agitazioni meteo-marine distanti.

Table 2-1
Relationships among T_p, T_e, and T_z

T_z/T_p	T_z/T_e	Comments	γ
0.67	0.80	Severe surf zone conditions[1]	NA
0.74	0.88	Pierson-Moskowitz spectrum[2]	1.0
0.80	0.93	Typical JONSWAP spectrum[2]	3.3
0.87	0.96	Swell from distant storms[2]	10.0

[1] Developed from data in Ahrens (1987).
[2] Developed from Goda (1987).

Figura 3: Rapporti numerici tra i periodi di propagazione delle onde tratti da US Army Corps of Engineers, Design of Coastal Revetments, Seawalls and Bulkhead

Nella tabella che segue sono riportate le grandezze che sono state ricavate secondo le indicazioni riportate sopra.

Direzione originaria di provenienza	**°N**	**120-125**		**126-130**		**131-145**	
Profondità dell'acqua al piede della berma	d_s	4,90	m	4,90	m	4,90	m
Periodo di propagazione dell'onda	T_p	6,61	s	7,52	s	8,36	s
Lunghezza d'onda	L_p	34,2	m	39,34	m	44,05	m
Limite superiore dell'altezza media dell'onda frangente	$(H_{mo})_{max}$	1,71	m	1,97	m	2,21	m
Rapporto	$d_s/(gT_p^2)$	0,011		0,009		0,163	
Verifica della validità del procedimento	$d_s/(gT_p^2) > 0{,}0005$	Verificato		Verificato		Verificato	
Coefficiente di regressione	C_0	0,00089		0,00089		0,00089	
Coefficiente di regressione	C_1	0,834		0,834		0,834	
Altezza significativa di frangimento al piede della berma	H_s	1,77	m	2,06	m	2,33	m
Rapporto	T_s/T_p	0,96		0,96		0,96	
Periodo d'onda significativa	T_s	6,35	s	7,22	s	8,03	s

Da quanto premesso e dai risultati dell'elaborazione dei dati meteo-marini, si può concludere che il moto ondoso di progetto frange in corrispondenza di una profondità all'incirca pari a quella a cui verrà collocata la berma.

4.2.2Stabilità delle unità del rivestimento di protezione del litorale

Generalmente, la stabilità degli elementi di protezione del litorale viene espressa in termini di peso; Hudston (1961) la traduce nella seguente equazione:

$$W= \gamma_r H^3/[K_d (\gamma_r/\gamma_w-1)^3 \cot \beta]$$

dove

- W peso richiesto per l'unità del rivestimento o peso W_{50} per strutture a strati di pezzatura variabile in maniera graduale;
- γ_r peso specifico del materiale da impiegare;
- H altezza dell'onda monocromatica;
- K_d coefficiente tabellato;
- γ_w peso specifico dell'acqua salata in sito;
- β pendenza della struttura rispetto all'orizzontale.

Nel caso in questione si assumono i seguenti valori, suggeriti per altro dalla bibliografia reperibile in internet:

γ_r= 2.300 kg/m^3, valore minimo, e quindi cautelativo, scelto tra i valori medi di 2.300 e 2.600 kg/m^3, pesi specifici dei materiali comunemente impiegati in questo tipo di opere;

H altezza dell'onda significativa calcolata al punto precedente;

K_d=2, scelto tra i valori della tabella seguente in relazione al tipo di opera da realizzare;

γ_w= 1.024 kg/m^3;

β= 30°, valore leggermente superiore a quello attualmente in sito.

Table 2-3
Suggested Values for Use In Determining Armor Weight (Breaking Wave Conditions)

Armor Unit	n^1	Placement	Slope (cot θ)	K_D
Quarrystone				
Smooth rounded	2	Random	1.5 to 3.0	1.2
Smooth rounded	>3	Random	1.5 to 3.0	1.6
Rough angular	1	Random	1.5 to 3.0	Do Not Use
Rough angular	2	Random	1.5 to 3.0	2.0
Rough angular	>3	Random	1.5 to 3.0	2.2
Rough angular	2	Special[2]	1.5 to 3.0	7.0 to 20.0
Graded riprap[3]	2[4]	Random	2.0 to 6.0	2.2
Concrete Armor Units				
Tetrapod	2	Random	1.5 to 3.0	7.0
Tripod	2	Random	1.5 to 3.0	9.0
Tripod	1	Uniform	1.5 to 3.0	12.0
Dolos	2	Random	2.0 to 3.0[5]	15.0[5]

[1] n equals the number of equivalent spherical diameters corresponding to the median stone weight that would fit within the layer thickness.

[2] Special placement with long axes of stone placed perpendicular to the slope face. Model tests are described in Markle and Davidson (1979).

[3] Graded riprap is not recommended where wave heights exceed 5 ft.

[4] By definition, graded riprap thickness is two times the diameter of the minimum W_{50} size.

[5] Stability of dolosse on slope steeper than 1 on 2 should be verified by model tests.

[6] No damage design (3 to 5 percent of units move). If no rocking of armor (less than 2 percent) is desired, reduce K_D by approximately 50 percent.

Figura 4: Tabella dei coefficienti Kd tratta da US Army Corps of Engineers, Design of Coastal Revetments, Seawalls and Bulkhead

Prima di illustrare i risultati ottenuti, si precisa che le pietre dello strato di copertura possono avere un peso tra 0,75 e 1,25 W fino a raggiungere il minimo del 50%, nel caso di una variazione graduale della granulometria attraverso la struttura. Per completezza di relazione si riporta anche l'entità di tali pesi.

Direzione originale di provenienza del moto ondoso	**°N**	**120-125**		**126-130**		**131-145**	
Peso specifico del materiale da mettere in opera	γ_r	2300	kg/m³	2300	kg/m³	2300	kg/m³
Peso specifico dell'acqua salata in sito	γ_w	1024	kg/m³	1024	kg/m³	1024	kg/m³
Altezza dell'onda monocromatica	**H**	1,77	m	2,06	m	2,33	m
Pendenza della struttura rispetto all'orizzontale	**cotg β**	1,73		1,73		1,73	
Coefficiente tabellato	K_d	2		2		2	
Peso del 50% del materiale	W_{50}	1919,88	kg	3014,91	kg	4371,4	kg
Massimo valore del peso dell'unità	**1,25 W_{50}**	2399,85	kg	3768,64	kg	5464,24	kg
Minimo valore del peso dell'unità	**0,75 W_{50}**	1439,91	kg	2261,18	kg	3278,55	kg
Minimo valore del peso unitario dello strato superficiale	**0,50 W_{50}**	959,94	kg	1507,46	kg	2185,7	kg

La condizione di progetto più gravosa è indubbiamente la terza, per la quale risulta necessario impiegare materiale di granulometria media con peso di 4371 kg. Questo valore, tuttavia, è enormemente maggiore degli altri due; pertanto, anche in relazione alla collocazione prevista per tale opera di protezione della costa (nella fattispecie non si tratta di dighe foranee o di opere oggetto dell'aggressione ondosa di mare aperto) si ritiene sufficiente prevedere l'impiego di massi di seconda e prima categoria, tanto da realizzare una stesa di materiale di base dell'ordine di 1000-3000 kg, ricoperto via via di strati a granulometria più piccola, fino 100 kg. Quest'ultimo strato dovrà essere ricoperto di scapolame e ghiaia, dello stesso tipo di quella attualmente in opera, al fine di garantire un ricoprimento che renda possibile la fruizione balneare e che si integri con l'ambiente circostante in soluzione di continuità. La scelta compiuta in merito alla pezzatura di mantellata della barriera soffolta si ritiene soddisfacente anche in relazione al fatto che risulta adeguata ad affrontare le condizioni medie di sollecitazione calcolate tra le massime prevedibili sulla base della bibliografia raccolta. Un sovradimensionamento di tale opera rispetto alle reali esigenze e all'impiego previsto, può essere considerato più uno svantaggio economico che non un investimento in termini sicurezza dell'opera stessa. L'opera, infatti, esercita durante tutto l'anno la sua funzione di protezione della costa, ma viene fruita dal pubblico durante la sola stagione estiva, ovvero limitatamente a condizioni meteo-marine non proibitive per la balneazione.

La serie di considerazioni sopra riportate è da considerarsi valida anche nel prosieguo della presente relazione di calcolo. Si ribadisce, quindi, che il principio guida dei dimensionamenti qui operati si basa anche su considerazioni in relazione al livello di soddisfacimento delle esigenze espresse o implicite (ovvero primarie) tradotte in termini utilità/costi globali.

4.2.3Spessore dello strato

Lo spessore del singolo strato può essere definito dalla seguente espressione:

$$r = n\, k_{\Delta} (W/w_r)^{1/3}$$

indicando con

r lo spessore dello strato;

n=2 nella generalità dei casi;

k_{Δ} coefficiente di strato (tabellato).

Table 2-4
Layer Coefficients and Porosity for Various Armor Units

Armor Unit	n	Placement	K_Δ	P (%)
Quarrystone (smooth)	2	Random	1.00	38
Quarrystone (rough)	2	Random	1.00	37
Quarrystone (rough)	≥3	Random	1.00	40
Graded riprap	2[a]	Random	N/A	37
Tetrapod	2	Random	1.04	50
Tribar	2	Random	1.02	54
Tribar	1	Uniform	1.13	47
Dolos	2	Random	0.94	56

[a] By definition, riprap thickness equals two cubic lengths of W_{50} or 1.25 W_{100}.

Figura 5: Tabella dei coefficienti e della porosità tratta da US Army Corps of Engineers, Design of Coastal Revetments, Seawalls and Bulkhead

Per gli strati di pietrame con granulometria variabile in maniera graduale, lo spessore minimo misurato perpendicolarmente alla direzione di pendenza è fissato pari a:

$$r_{min} = \max[2{,}0\ (W_{50min}/\gamma_r)^{1/3};\ 1{,}5\ (W_{100}/\gamma_r)^{1/3};\ 0{,}30\ \text{m}].$$

Spessori maggiori incrementano la resistenza all'onda rispetto alle condizioni di progetto; la variazione graduale della granulometria, contenuta all'interno di limiti sufficientemente ampi, influisce in maniera trascurabile sulla stabilità valutata usando come valore caratteristico dello strato W_{50}.

I passi da seguire per il dimensionamento sono i seguenti:

- calcolare il valore limite di W_{50min}, attraverso la formula di stabilità riportata al punto precedente;
- si fissa W_{50} al massimo pari a 1,5 W_{50min};
- 1,5 $W_{50min} < W_{100min}$;
- $W_{100min} < 4\ W_{50min}$;
- il minimo valore di W_{15} è pari a 0,4 W_{50min}.

Nella tabella che segue sono riepilogati i risultati ottenuti sulla base delle stime condotte ai punti precedenti, per le diverse direzioni di provenienza del moto ondoso. Sulla base delle indicazioni sopra riportate si è scelto di porre:

- $W_{50min} = 0{,}75\ W_{50}$;

- $W_{100min} = 3{,}00\ W_{50}$.

Direzione originale di provenienza del moto ondoso	°N	120-125		126-130		131-145	
Peso specifico del materiale da mettere in opera	γ_r	2300	kg/m³	2300	kg/m³	2300	kg/m³
Peso del 50% del materiale	W_{50}	1919,88	kg	3014,91	kg	4371,4	kg
Minimo valore del peso dell'unità	W_{50min}	1439,91	kg	2261,18	kg	3278,55	kg
Minimo valore del peso dell'unità del 100%	W_{100min}	4319,73	kg	6783,55	kg	9835,64	kg
$2{,}0*(W_{50min}/\gamma_r)^{1/3}$		1,71	m	1,99	m	2,25	m
$1{,}5*(W_{100}/\gamma_r)^{1/3}$		1,85	m	2,15	m	2,43	m
Spessore minimo dello strato	r_{min}	1,85	m	2,15	m	2,43	m

Anche in questo caso le condizioni di progetto più gravose sono quelle che relative ad una direzione di provenienza compresa tra 131 e 145°N. Si conclude che per soddisfare le istanze medie necessarie a garantire la stabilità del rivestimento nelle tre condizioni di progetto, lo spessore minimo dello strato stabilizzante deve essere almeno pari a 2,20 m.

4.2.4Resistenza di riserva

Strutture costituite da elementi di granulometria variabile hanno la capacità di adattarsi con maggior facilità a sollecitazioni di modesta entità. Questa potenzialità assicura prestazioni sufficientemente soddisfacenti anche sotto l'azione di condizioni meteo-marine più gravose di quelle di progetto. La stessa resistenza di riserva non è manifestata da strutture costruite con unità di dimensioni uniformi messe in opera con regolarità.

Nel caso di studio la resistenza di riserva è direttamente correlata allo spessore degli strati, nonché alla pendenza e al peso W_{50}.

La scelta del coefficiente di stabilità K_d assicura un livello di rischio inferiore al 5%, che si incrementa al crescere dell'altezza d'onda rispetto all'onda di progetto. A titolo informativo, si riporta la tabella che descrive questa variazione.

Table 2-5
$H/H_{D=0}$ for Cover Layer Damage Levels for Various Armor Types ($H/H_{D=0}$ for Damage Level in Percent)

Unit	$0 \le \%_D < 5$	$5 \le \%_D < 10$	$10 \le \%_D < 15$	$15 \le \%_D < 20$	$20 \le \%_D \le 30$
Quarrystone (smooth)	1.00	1.08	1.14	1.20	1.29
Quarrystone (angular)	1.00	1.08	1.19	1.27	1.37
Tetrapods	1.00	1.09	1.17	1.24	1.32
Tribars	1.00	1.11	1.25	1.36	1.50
Dolos	1.00	1.10	1.14	1.17	1.20

Figura 6: Livello di rischio di danneggiamento per gli strati di copertura per tipo di struttura e per tipo di struttura e per $H/H_{D=0}$ tratta da US Army Corps of Engineers, Design of Coastal Revetments, Seawalls and Bulkhead

4.3Determinazione del run-up potenziale per fissare l'elevazione della cresta

Il run-up è la distanza, misurata in direzione verticale rispetto al livello medio del mare, dello spruzzo generato da un'onda che si alza sulla struttura.

Il massimo valore del run-up R_{max} generato da un'onda può essere stimato con la relazione di Ahrens e Heimbaugh (1988):

$R_{max}/H_{mo} = a\,\zeta_0/(1+b\,\zeta_0)$

con a,b coefficienti di regressione fissati rispettivamente pari a 1,286 e 0,247;

$\zeta_0 = \tan\beta\,(H_{m0}/L_0)^{-1/2}$ surf similarity parameter

H_{mo}, altezza massima dell'onda frangente da determinare in base alle profondità del sito e al periodo di picco dell'onda[13].

Il valore di R_{max} così ottenuto dovrà essere corretto tramite un coefficiente tabellato, dipendente dal tipo di struttura che verrà messa in opera.

Si ricorda che il valore della lunghezza dell'onda in acqua alta è: $L_0=gT_p^2/(2\pi)$.

[13] Il limite superiore viene definito dalle condizioni di frangimento nel seguente modo:
$(H_{mo})_{max}= 0{,}10\ L \tanh(2\pi d/L)$,
dove la lunghezza d'onda in acqua bassa, secondo la teoria di Airy, è $L= T(gd)^{1/2}$.

Table 2-2
Rough Slope Runup Correction Factors (Carstea et al. 1975b)

Armor Type	Slope (cot θ)	Relative Size H'/K_r[a,b]	Correction Factor r
Quarrystone	1.5	3 to 4	0.60
Quarrystone	2.5	3 to 4	0.63
Quarrystone	3.5	3 to 4	0.60
Quarrystone	5	3	0.60
Quarrystone	5	4	0.68
Quarrystone	5	5	0.72
Concrete Blocks[c]	Any	6[b]	0.93
Stepped slope with vertical risers	1.5	$1 \le H_o'/K_r$[d]	0.75
Stepped slope with vertical risers	2.0	$1 \le H_o'/K_r$[d]	0.75
Stepped slope with vertical risers	3.0	$1 \le H_o'/K_r$[d]	0.70
Stepped slope with rounded edges	3.0	$1 \le H_o'/K_r$[d]	0.86
Concrete Armor Units			
Tetrapods random two layers	1.3 to 3.0	-	0.45
Tetrapods uniform two layers	1.3 to 3.0	-	0.51
Tribars random two layers	1.3 to 3.0	-	0.45
Tribars uniform one layer	1.3 to 3.0	-	0.50

[a] K_r is the characteristic height of the armor unit perpendicular to the slope. For quarrystone, it is the nominal diameter; for armor units, the height above the slope.
[b] Use H_o' for $d_s/H_o' > 3$; and the local wave height, H_s for $d_s/H_o' \le 3$.
[c] Perforated surfaces of Gobi Blocks, Monoslaps, and concrete masonry units placed hollows up.
[d] K_r is the riser height.

Figura 7: Tabella dei fattori correttivi del run up tratta da US Army Corps of Engineers, Design of Coastal Revetments, Seawalls and Bulkhead

Direzione originale di provenienza del moto ondoso	**°N**	**120-125**		**126-130**		**131-145**	
Profondità dell'acqua al piede della berma	d_s	4,90	m	4,90	m	4,90	m
Pendenza della struttura rispetto all'orizzontale	tg β	0,58		0,58		0,58	
Periodo di propagazione dell'onda	T_p	6,61	s	7,52	s	8,36	s
Lunghezza d'onda in acqua bassa	L	45,83	m	52,14	m	57,96	m
Lunghezza d'onda in acqua alta	L_o	68,25	m	88,34	m	109,17	m
Altezza massima dell'onda frangente	H_{mo}	1,71	m	1,97	m	2,21	m
Surf similarity parameter	ζ_o	3,66		3,88		4,08	
Coefficiente di regressione	a	1,286		1,286		1,286	
Coefficiente di regressione	b	0,247		0,247		0,247	
Massimo run up	R_{max}	2,47	m	2,55	m	2,61	m
Coefficiente correttivo tabellato		0,6		0,6		0,6	
Massimo run up attendibile	R	1,48	m	1,53	m	1,57	m

Per quanto riguarda il tipo di frangimento, i valori del surf similarity parameter, essendo superiori a 3,3, rivelano un tipo di frangimento a surging/collapsing, e quindi sostanzialmente diverso da quello che attualmente si verifica, come evidenziato in sede di elaborazione della propagazione delle onde.

4.4Determinazione dell'overtopping attendibile per la struttura

Generalmente si preferisce progettare le strutture di protezione costiera in modo da evitare il fenomeno dell'overtopping. Quest'ultimo viene stimato in termini di un fattore adimensionale Q':

$Q' = C_0 \, e^{C1F'} \, e^{C2m}$

ed è definito in funzione della portata di overtopping Q

$Q' = Q / (g \, H_{mo}^{3})^{1/2}$.

Il fuoribordo F' adimensionale, analogamente, risulta funzione di quello dimensionale F, che in termini fisici rappresenta la distanza, misurata in direzione verticale, della cresta rispetto alla linea del livello medio del mare:

$F' = F/(H_{mo}^{2} L_0)^{1/3}$ $\qquad (0,25 < F' < 0,43)$

Gli altri termini della relazione sono

$m = \text{cotg}\, \beta$

e tre coefficienti di regressione fissati pari a

$C_0 = 0,4578$

$C_1 = -29,45$

$C_2 = 0,8464$.

Tuttavia è possibile ipotizzare che, data la ridotta altezza dell'onda di progetto, le condizioni al contorno portino ad escludere il verificarsi di questo fenomeno. In particolare, si attende che il valore del fuoriborbo adimensionale F' ricada al di fuori del range previsto, così che viene meno la validità della relazione di calcolo. In quest'ultimo caso l'onda di progetto non è in grado di produrre un over-topping significativo

Direzione originale di provenienza del moto ondoso	°N	120-125		126-130		131-145	
Lunghezza d'onda in acqua alta	L_o	68,25	m	88,34	m	109,17	m
Altezza dell'onda monocromatica	H	1,77	m	2,06	m	2,33	m
Altezza massima dell'onda frangente	H_{mo}	1,71	m	1,97	m	2,21	m
Fuoribordo	F	0,86	m	0,99	m	1,11	m
Fuoribordo adimensionale	F'	0,15		0,14		0,14	
Verifica	0,25< F'<0,43	Non verificato		Non verificato		Non verificato	
Coefficiente di regressione	C_0	0,46		0,46		0,46	
Coefficiente di regressione	C_1	-29,45		-29,45		-29,45	
Coefficiente di regressione	C_2	0,85		0,85		0,85	
Cotangente della pendenza	m	1,73		1,73		1,73	
Overtopping adimensionale	Q'	0,03		0,03		0,04	
Portata di Overtopping	Q	0,19	kg/(m²/s)	0,27	kg/(m²/s)	0,37	kg/(m²/s)

Come atteso si può concludere che per periodi di ritorno di 50 anni il moto ondoso provoca fenomeni di over-topping trascurabili.

4.5Progettazione della protezione al piede della struttura

Il posizionamento di elementi di protezione del piede della struttura è finalizzato a ridurre l'entità dei fenomeni erosivi che si focalizzano proprio in questo nodo critico, soggetto a sollecitazioni di natura idraulica e al cambiamento del profilo batimetrico, con grande pericolo per la stabilità delle unità poste in opera.

Nel caso delle massicciate, i principi alla base della protezione del piede sono di natura idraulica. La stabilità viene, anche questa volta, assicurata dal peso dell'elemento strutturale:

$W_{min}= \gamma_r H^3/(N_s^3(\gamma_r/\gamma_w-1))^3$

con $N_s= (K_d \cot g \beta)^{1/3}$ numero di stabilità di progetto.

Direzione originale di provenienza del moto ondoso	°N	120-125		126-130		131-145	
Altezza dell'onda monocromatica	H	1,77	m	2,06	m	2,33	m
Peso specifico del materiale da mettere in opera	γ_r	2300	kg/m³	2300	kg/m³	2300	kg/m³
Peso specifico dell'acqua salata in sito	γ_w	1024	kg/m³	1024	kg/m³	1024	kg/m³
Coefficiente tabellato	K_d	2		2		2	
Cotangente della pendenza	m	1,73		1,73		1,73	
Numero di stabilità	N_s	1,51		1,51		1,51	
Peso minimo degli elementi di protezione al piede	W_{min}	1919,88	kg	3014,91	kg	4371,4	kg

Per la protezione al piede della struttura dovranno essere utilizzati massi di III categoria che conferiscano stabilità e riducano il pericolo dell'erosione al piede per frangimento ondoso.

5Descrizione dell'intervento proposto

I massi dimensionati nei paragrafi precedenti hanno la funzione di costituire una sorta di "scogliera sommersa" a protezione del retrostante lido. Quest'ultimo verrà a configurarsi come una "spiaggia sospesa" realizzata in modo da non alterare l'equilibrio presente oggi in termini di ricambio idrico e di ridurre l'impiego di opere fisse che potrebbero causare fenomeni erosivi nelle aree limitrofe. L'intervento qui proposto è finalizzato al riequilibrio di un tratto di costa in erosione, tramite un intervento antropico, essendo venuti meno, sempre per ragioni di origine antropica, il naturale rinnovo dei sedimenti di alimentazione del lido. La costruzione di opere di consolidamento a tergo della scogliera e la stessa realizzazione della strada hanno impedito l'approvvigionamento a causa del naturale degrado della parete rocciosa soprastante.

La scelta progettuale, pertanto, si prefigge la ricostruzione della spiaggia come elemento stesso di difesa e stabilizzazione costiera. La spiaggia sospesa costituisce un intervento che media i benefici delle barre o scogliere sommerse, che permettono il controllo del frangimento del moto ondoso, con interventi morbidi tipo il ripascimento. In questo caso, infatti, non si tratta di un ripascimento puro: la ghiaia verrà collocata per formare uno strato di finitura della porzione emersa, anche al fine di allargare la spiaggia destinata alla balneazione. Pertanto si costruirà una scogliera con i classici strati, ovvero un nucleo interno costituito da massi di prima categoria, per uno spessore di 1,80 m aventi funzione drenante; su essi, lato mare, verrà collocata una mantellata, dello spessore di 2,20 m, realizzata con massi di seconda categoria, aventi la funzione vera e propria di frangiflutti sommersi, massi che verranno collocati fino a formare la protezione al piede (berma con massi III categoria).

Si rimanda agli elaborati grafici per una miglior comprensione di quanto sopra descritto.

Nei sotto-paragrafi che seguono verranno elencati i requisiti dei materiali che dovranno essere adoperati. Per tali caratteristiche si fa riferimento a quanto previsto dal Dipartimento Territorio e Ambientte della regione Marche, contenuto all'interno del documento *SERVIZIO PROGETTAZIONE OPERE PUBBLICHE DI INTERESSE REGIONALE, V.I.A. E GESTIONE INTEGRATA DELLE AREE COSTIERE*, che costituisce una ricca bibliografia sull'argomento in questione. Ovviamente quanto riportato è stato opportunamente modificato per essere adattato al contesto oggetto del presente studio.

5.1Caratteristiche dei materiali lapidei

Per la formazione delle difese marittime, verranno utilizzati, in diverse percentuali, materiali lapidei del tipo di quelli presenti in sito -e che originariamente alimentavano il sito di intervento -aventi peso specifico non inferiore a 2,3 t/mc. Essi dovranno rispondere ai requisiti essenziali di compattezza,

omogeneità, durabilità, essere esenti da giunti, fratture e piani di sfaldamento, e risultare inoltre inalterabili all'acqua di mare e al gelo. Le prove di resistenza del materiale alla compressione, all'abrasione, alla salsedine marina e alla gelività, seguendo le norme in vigore per l'accettazione delle pietre naturali da costruzione (R.D. 16.11.1939, n.2232), dovranno rispettare i seguenti limiti:

- resistenza alla compressione: >500 kg/cmq
- coefficiente di usura (R.D. 16.11.1939, n.2232, art.11): < 7,5 mm
- coefficiente di imbibizione: <4%
- resistenza chimica (ASTMC-88-5 cicli solfato di sodio): perdita <10%
- gelività (R.D. 16.11.1939, n.2232, art.8).

5.2Classificazione dei materiali lapidei

La classificazione dei materiali costituenti la scogliera è la seguente:

a) tout-venant o scapolame di cava con pezzatura compresa tra 2 e 50 cm e peso fino a kg 50;

b) scogli (o massi) delle varie categorie di peso:
   - prima categoria da 51 a 1000 kg;
   - seconda categoria da 1001 a 3000 kg;
   - terza categoria da 3001 a 7000 kg ed oltre.

Gli scogli vengono impiegati per costruire strati-filtro e mantellate di rivestimento: essi vengono suddivisi in categorie definite dal peso minimo e massimo degli elementi ammessi in ogni singola categoria. Nell'ambito di ogni categoria, almeno il 50% in peso di materiale deve essere un peso superiore a P. Gli scogli non devono presentare notevoli differenze tra le dimensioni e resta, pertanto, stabilito che la loro forma è definita dai rapporti di appiattimento b/a e di allungamento c/b (con a,b,c i lati del prisma inviluppo e a>b>c), che devono sempre avere valori superiori a 2/3. Il grado di arrotondamento degli spigoli viene definito qualitativamente e corrisponderà almeno alla classe "vivi" o "quasi vivi". Nella formazione della sagoma delle sezioni delle diverse tipologie previste, si terrà conto di una percentuale di vuoti pari al 30%.

5.3Costruzione della scogliera

Le varie parti dell'opera a gettata devono corrispondere sia per categoria, che per quantità alle indicazioni progettuali esplicitate negli elaborati che costituiscono parte integrante del contratto di appalto. I materiali di cava per la formazione del nucleo e gli scogli fino a 1.000 kg potranno essere versati direttamente da automezzi o da bettoline. I massi di peso superiore dovranno essere posizionati individualmente con attrezzature opportune.

La mantellata in prima fase può essere eseguita secondo una sagoma diversa da quella definitiva, purché venga raggiunta una quota di sommità tale da evitare danni in conseguenza di mareggiate nel corso dei lavori.

Si ammette che la sagoma esecutiva della scogliera, rispetto a quella di progetto, possa discostarsi al massimo - verso riva e per la scarpata e la berma della mantellata- di più o meno m 0,50.

La scogliera sarà formata da materiali lapidei aventi pezzatura delle due categorie di peso individuate,fondati su di un basamento di pietrame (tout-venant o scapolame di cava).

Il basamento in scapolame è previsto di uno spessore pari a 0,50 m, per il quale si può ipotizzare, in un periodo molto breve, un completo inglobamento nel fondale.

La ricostruzione della spiaggia emersa consente un avanzamento della linea di battigia mediante la ricostituzione della più consistente spiaggia sommersa che si presenta, in questo caso, nella forma della scogliera sommersa. Il rivestimento con granulometria di dimensioni ridotte verrà pertanto attuato in una zona di ridotte dimensioni e in condizioni protette e ridossate rispetto alle mareggiate che creano, in quel tratto di litorale, il fenomeno erosivo: questo per non vedere presto vanificato l'intervento attuato.

Il materiale che verrà posto in opera verrà asportato con ogni probabilità da cava di prestito, collocata nelle vicinanze del sito dell'intervento. Questo anche in funzione delle ridotte possibilità di mobilità su strada e non solo per assicurare la reintegrazione con materiale dello stesso tipo di quello attualmente in sito.