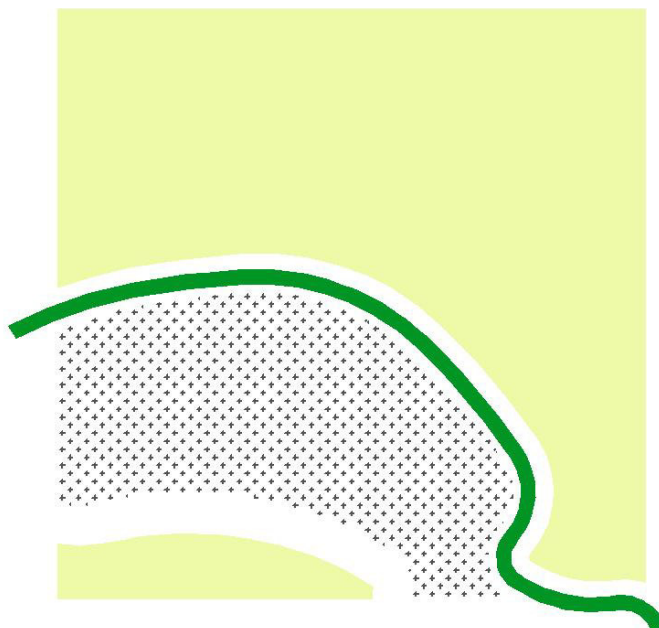


Comune di Palermo
Area dei Servizi alla Città
Servizio Ambiente
Mare e Coste



PO FESR Sicilia 2014-2020 - Asse 6 - Azione 6.2.1

“Bonifica di aree inquinate secondo le priorità previste dal Piano regionale di bonifica”

Messa in sicurezza permanente e ripristino ambientale dell'ex discarica di Acqua dei Corsari

Progetto di fattibilità

Novembre 2018

STUDIO METEOMARINO

Il Sindaco: Prof.On. Leoluca Orlando

Il Capo Area: Dott. Domenico Musacchia

Il R.U.P.: Funz. Tecn. Arch. Giovanni Sarta

Staff del RUP: Funz.Tecn.Arch. Giuseppina Liuzzo

Il gruppo di progettazione:

Architetto Achille Vitale (coordinatore)

Severino, Agronomo Antonino La Barbera, Geologo Gabriele Sapio, Arch. Marcantonio Virgadamo, Arch. Dimitrios

Katsireas, esp. di prog. Giuseppe Lazzara.

L'Assessore: Ing. Sergio Marino

Il Dirigente: Avv. Francesco Fiorino

Ing. Giuseppe Letizia, Biologo Claudio

INDICE

1. PREMESSA	3
2. INQUADRAMENTO DEL PARAGGIO	4
3. DEFINIZIONE DEL MOTO ONDOSO A LARGO	6
3.1. METODO DIRETTO: ANALISI DELLE OSSERVAZIONI CENSITE DAL K.N.M.I.	6
3.2. METODO INDIRETTO: PROCEDURA ANALITICA SULLA BASE DEL MODELLO S.M.B.	8
3.3. CONFRONTO TRA I RISULTATI DEI DUE METODI	12
4. ANALISI STATISTICA E PROIEZIONE PROBABILISTICA.....	15
4.1. VALUTAZIONE DELLA MAREGGIATA ENERGETICAMENTE EQUIVALENTE AL CLIMA ONDOSO DEL PERIODO DI OSSERVAZIONE.....	15
4.2. VALUTAZIONE DEI MASSIMI VALORI D'ALTEZZE D'ONDA PER DETERMINATI PERIODI DI RITORNO.....	17
5. INDIVIDUAZIONE DEL TEMPO DI RITORNO DELL'EVENTO DI PROGETTO.....	19
6. STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO VERSO COSTA.....	20
7. STUDIO DEL FRANGIMENTO	24
8. DEFINIZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI DEL MOTO ONDOSO DA PORRE A BASE DELLE VERIFICHE DI STABILITA' DELLE OPERE DI DIFESA COSTIERA.....	28
9. CONCLUSIONI.....	30
<u>ALLEGATI A1: FIGURE E GRAFICI</u>	31
<u>ALLEGATI A2: TABULATI DI CALCOLO S.M.B.</u>	32

1. PREMESSA

Il presente studio è finalizzato alla caratterizzazione del clima meteomarinico a cui è esposto il paraggio di “Acqua dei Corsari”, sul litorale orientale di Palermo, allo scopo di definire la configurazione delle opere di difesa costiera e di individuare le grandezze da porre a base del loro dimensionamento.

Per gli scopi esposti lo studio è stato articolato nelle seguenti fasi:

- 1- Caratterizzazione del paraggio di cui fa parte il litorale in esame;
- 2- Ricerca dei dati per la caratterizzazione del clima ondoso al largo;
- 3- Analisi dei dati, valutazioni statistiche ed elaborazioni probabilistiche volte alla determinazione delle caratteristiche del moto ondoso al largo;
- 4- Determinazione della risultante energetica del moto ondoso al largo;
- 5- Individuazione del tempo di ritorno dell'evento di progetto;
- 6- Studio della propagazione del moto ondoso verso costa;
- 7- Studio del frangimento.

2. INQUADRAMENTO DEL PARAGGIO

Il litorale in esame fa parte della costa orientale del Comune di Palermo; più esattamente ricade in località Acqua dei Corsari (Fig. 1a). Il paraggio è esposto ad un settore di traversia principale compreso tra le direzioni 340° N (Punta La Barbera) e 80° N (Capo Zafferano), che si sviluppa tra le coste del Tirreno centro-meridionale, con fetches estesi tra 218 e 495 km. (Fig.1b).

I venti che contribuiscono significativamente alla generazione del moto ondoso al largo sono quelli settentrionali (Maestrale e Grecale) del IV e del I quadrante della rosa dei venti.

In Tab. 1 sono indicati i valori dei fetches reali ed efficaci; per la determinazione di questi ultimi è stata eseguita la procedura di Saville espressa dalla relazione seguente:

$$F_{\text{efficace}} = \frac{\sum F_i \cos^2 \alpha_i}{\sum \cos^2 \alpha_i}, \quad (1)$$

nella quale:

F_i : fetch reale della i-esima direzione [km]

α_i : angolo che la direzione i-esima forma con quella in cui spira il vento

Nella Fig. 1c sono rappresentati i diagrammi polari dei fetches reali ed efficaci.

DIREZIONE [° N]	FETCHES REALI [KM]	FETCHES EFFICACI [KM]
340°	495	212
350°	371	248
360°	344	278
10°	315	300
20°	286	312
30°	263	289
40°	263	273
50°	268	252
60°	260	222
70°	254	190
80°	218	157

Tab. 1 - Valori dei fetches relativi al paraggio di Palermo- Acqua dei Corsari.

3. DEFINIZIONE DEL MOTO ONDOSO A LARGO

Per il paraggio oggetto di analisi non è disponibile una serie storica di eventi meteomarini rilevata da boe ondametriche e pertanto, ai fini della caratterizzazione del clima ondoso a largo, si è fatto ricorso sia ad un metodo di valutazione diretta, basato sulle registrazioni a vista delle navi in transito censite dal K.N.M.I. (*Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut*) sia al metodo di determinazione indiretta di Sverdrup, Munk e Bretschneider (metodo "S.M.B."), basato sulle registrazioni anemometriche.

3.1. METODO DIRETTO: ANALISI DELLE OSSERVAZIONI CENSITE DAL K.N.M.I.

I dati del K.N.M.I., provenienti da osservazioni a vista di navi in transito, sono riferiti all'area compresa tra le latitudini 38,0° N e 38,4° N e tra le longitudini 15,3° e 15,7° E.

I dati sono raccolti nella Tab. 2a nella quale compaiono i numeri di avvistamenti, effettuati nel periodo 1961÷1980, per diversi valori della semialtezza d'onda e per diversi settori di ampiezza 30°.

L'esame di tali dati evidenzia che le mareggiate di maggiore intensità sono state osservate nei settori settentrionali (345° N÷15° N).

La successiva Tab. 2b è stata compilata determinando le relative frequenze di avvistamento; dall'esame dei risultati si evince che le frequenze delle osservazioni sono pressoché omogenee nei tre settori in cui è stata divisa la traversia principale.

H (m)	Settori (°N)		
	345°-15°	15°-45°	45°-75°
0,0<Hs<0,5	142	118	147
0,5<Hs<1,0	74	67	78
1,0<Hs<1,5	26	32	51
1,5<Hs<2,0	14	11	31
2,0<Hs<2,5	9	1	11
2,5<Hs<3,0	2	5	4
3,0<Hs<3,5	2	2	1
3,5<Hs<4,0	0	1	1
4,0<Hs<4,5	0	1	0
4,5<Hs<5,0	0	0	2
5,0<Hs<5,5	0	0	0
5,5<Hs<6,0	0	0	0
Hs>6,0	2	0	0

Tab. 2a – Numero di avvistamenti KNMI

H (m)	Settori (°N)		
	345°-15°	15°-45°	45°-75°
0,0<Hs<0,5	52.40%	49.58%	45.09%
0,5<Hs<1,0	27.31%	28.15%	23.93%
1,0<Hs<1,5	9.59%	13.45%	15.64%
1,5<Hs<2,0	5.17%	4.62%	9.51%
2,0<Hs<2,5	3.32%	0.42%	3.37%
2,5<Hs<3,0	0.74%	2.10%	1.23%
3,0<Hs<3,5	0.74%	0.84%	0.31%
3,5<Hs<4,0	0.00%	0.42%	0.31%
4,0<Hs<4,5	0.00%	0.42%	0.00%
4,5<Hs<5,0	0.00%	0.00%	0.61%
5,0<Hs<5,5	0.00%	0.00%	0.00%
5,5<Hs<6,0	0.00%	0.00%	0.00%
Hs>6,0	0.74%	0.00%	0.00%

Tab. 2b – Frequenze percentuali di avvistamenti KNMI

3.2. METODO INDIRETTO: PROCEDURA ANALITICA SULLA BASE DEL MODELLO S.M.B.

Il metodo di valutazione indiretto trova le basi teoriche sul fenomeno di trasferimento dell'energia dal vento al mare ed è sviluppato in funzione dei parametri anemometrici di velocità e durata nonché sui valori dei fetches.

Nel presente studio è stato utilizzato il metodo previsionale di Sverdrup, Munk e Bretschneider (S.M.B.) espresso dal seguente sistema di equazioni:

$$\frac{gH}{U^2} = 0.283 \tanh \left[0.0125 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42} \right] \quad (2)$$

$$\frac{gt}{2U\pi} = 1.20 \tanh \left[0.077 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.25} \right] \quad (3)$$

$$\frac{gt}{U} = K \exp \left\{ \sqrt{\left[A \left(\ln \frac{gF}{U^2} \right)^2 - B \left(\ln \frac{gF}{U^2} \right) + C \right]} + D \left(\ln \frac{gF}{U^2} \right) \right\} \quad (4)$$

nelle quali i simboli hanno il seguente significato:

- F: fetch;
- U: velocità del vento;
- g: accelerazione di gravità;
- T: durata dell'evento eolico;
- H: altezza dell'onda;

ed i coefficienti numerici hanno i seguenti valori:

$$K = 6,5882; \quad A = 0,0161; \quad B = 0,3692; \quad C = 2,2024; \quad D = 0,8798.$$

Pertanto, note la durata t dell'evento, l'intensità U dello stesso ed il fetch, la soluzione del sistema costituito dalle (2), (3) e (4) consente di determinare le caratteristiche significative dello stato del mare: altezza d'onda H_s e periodo T_s .

Per quanto attiene agli eventi eolici sono stati presi in esame i dati anemometrici trionari rilevati alla stazione anemografica di Ustica (Aeronautica Militare) dal 1960 al 1990.

Tale stazione, essendo situata su un'isola posta al centro del Tirreno meridionale, si trova all'interno della zona di generazione del moto ondoso e pertanto le serie di registrazioni in essa effettuate sono certamente valide per gli scopi del presente studio.

L'analisi dei dati anemometrici è stata effettuata utilizzando il criterio della "falda mobile" che consiste nel suddividere il settore di traversia in sub-settori di ampiezza pari a 20° sovrapposti l'uno all'altro per 10°.

Nella Tab. 3 è indicata la successione delle falde, il settore interessato e la relativa bisettrice e sono raccolti i valori dei rispettivi fetches reali.

FALDA	SETTORE [°N]	BISETTRICE [°N]	FETCH REALI [KM]
1	330°-350°	340°	494
2	340°-360°	350°	370
3	350°-10°	360°	344
4	360°-20°	10°	315
5	10°-30°	20°	285
6	20°-40°	30°	263
7	30°-50°	40°	263
8	40°-60°	50°	269
9	50°-70°	60°	259
10	60°-80°	70°	254
11	70°-90°	80°	219

Tab. 3 – Falde e fetches reali

Dopo aver ordinato cronologicamente gli eventi per le singole direzioni, si è proceduto alla determinazione delle caratteristiche significative, H_s e T_s , del moto ondoso di largo e quindi alla determinazione dell'altezza d'onda media H_m e del periodo medio T_m .

quest'ultima finalità è sono state utilizzate le seguenti relazioni che esprimono H_m e T_m in funzione di H_s e T_s :

$$H_m = 0.625 H_s \quad (5)$$

$$T_m = 0.876 T_s \quad (6)$$

È stata, infine valutata l'energia connessa ad una generica ondatazione avvalendosi dell'espressione

$$E = n H_m^2 T_m^2 \quad (7)$$

nella quale n è il numero d'onda definito come rapporto tra durata dell'evento ed periodo di oscillazione del moto ondoso.

Per gli scopi del presente studio, sono stati esaminati i dati relativi a 31 anni di osservazione dai quali si evince che le mareggiate caratterizzate da maggiore frequenza ed intensità sono quelle comprese nel settore 360° N-30° N.

Nell'applicazione del modello di calcolo, sono stati presi in considerazione 2.064 eventi caratterizzati da altezze significative non inferiori a 0,5 m.

I risultati a cui si è pervenuti sono sintetizzati nelle tabelle 4a, 4b e 4c allegate.

In particolare, la Tab. 4a raccoglie, per ogni direzione esaminata, il numero di eventi e la relativa percentuale di apparizione.

Nella Tab. 4b e nella Tab. 4c i risultati sono raccolti in termini di classi di altezza d'onda e sono riferiti all'anno medio. Più precisamente nella Tab. 4b sono indicate le percentuali di apparizione rispetto alla durata media annua totale delle mareggiate; i valori sono riportati per ogni classe in funzione delle singole direzioni. Nella Tab. 4c sono indicate le ore medie annue di apparizione per ogni direzione e classe.

Infine, nelle figure 2÷12 sono rappresentate, per ogni direzione, le ore di persistenza delle altezze d'onda riferite all'anno medio.

Il grafico di Fig.13 illustra la persistenza omnidirezionale.

DIREZIONE [°N]	EVENTI [n]	%
340°	198	9,60
350°	307	14,9
360°	309	15,0
10°	247	12,0
20°	193	9,3
30°	177	8,6
40°	131	6,3
50°	124	6,0
60°	114	5,5
70°	120	5,8
80°	144	7,0
totale	2064	100,0

Tab. 4a – Eventi e relative frequenze di apparizione

DIREZIONE (°N)	Classi di altezze d'onda (m)							
	$H_m < 0,5$	$0,5 < H_m < 1$	$1 < H_m < 2$	$2 < H_m < 3$	$3 < H_m < 4$	$4 < H_m < 5$	$H_m > 5$	
340°	0,81%	1,09%	1,39%	0,17%	0,00%	0,00%	0,02%	3,48%
350°	2,36%	2,75%	2,33%	0,99%	0,23%	0,00%	0,00%	8,66%
360°	3,33%	4,83%	3,54%	0,51%	0,27%	0,08%	0,01%	12,58%
10°	3,11%	4,63%	3,18%	1,10%	0,41%	0,27%	0,13%	12,83%
20°	2,47%	4,72%	4,10%	1,15%	0,86%	0,00%	0,01%	13,31%
30°	2,57%	5,46%	3,91%	1,17%	0,68%	0,09%	0,00%	13,89%
40°	1,92%	3,66%	3,44%	1,20%	0,09%	0,00%	0,00%	10,31%
50°	2,20%	3,02%	2,08%	0,63%	0,12%	0,00%	0,00%	8,04%
60°	2,43%	3,05%	1,65%	0,21%	0,00%	0,00%	0,00%	7,34%
70°	1,46%	1,94%	1,56%	0,52%	0,00%	0,00%	0,00%	5,48%
80°	1,20%	1,70%	1,18%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	4,08%
	23,87%	36,86%	28,36%	7,65%	2,65%	0,43%	0,17%	100,00%

Tab.4b – Durate percentuali per classi di altezza d'onda rispetto alla durata totale delle mareggiate riferite all'anno medio.

DIREZIONE (°N)	Classi di altezze d'onda (m)						
	Hm<0,5	0,5<Hm<1	1<Hm<2	2<Hm<3	3<Hm<4	4<Hm<5	Hm>5
340°	11,81	15,87	20,23	2,52	0,00	0,00	0,29
350°	34,45	40,16	33,97	14,42	3,29	0,00	0,00
360°	48,58	70,45	51,68	7,45	3,97	1,16	0,19
10°	45,39	67,55	46,45	16,06	6,00	3,87	1,84
20°	36,00	68,81	59,81	16,84	12,48	0,00	0,19
30°	37,55	79,65	57,10	17,03	9,97	1,26	0,00
40°	28,06	53,42	50,13	17,52	1,26	0,00	0,00
50°	32,03	44,03	30,29	9,19	1,74	0,00	0,00
60°	35,52	44,52	24,10	3,00	0,00	0,00	0,00
70°	21,29	28,35	22,74	7,55	0,00	0,00	0,00
80°	17,52	24,77	17,23	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab.4c – Durate medie annue di apparizione (in ore) per classi di altezza d'onda

3.3. CONFRONTO TRA I RISULTATI DEI DUE METODI

Per effettuare correttamente il confronto tra i risultati ai quali si perviene con il metodo diretto, basato come si è già precisato, sui rilievi a vista del K.N.M.I., e quelli ottenuti con l'applicazione di un modello matematico, metodo indiretto, è necessario effettuare alcune considerazioni preliminari sui dati che caratterizzano le due serie.

Così i dati rilevati dal K.N.M.I. seppure costituiscano valori significativi in termini di grandezze caratteristiche (altezza e periodo) non sempre possono essere considerati espressivi per quanto attiene alla frequenza degli eventi, poiché la consistenza del campione dipende dalla presenza casuale, nel corso delle mareggiate, di navi dalle quali avviene l'avvistamento.

I dati che scaturiscono dalla elaborazione del modello matematico S.M.B., se dedotti in base a serie sufficientemente estese di osservazioni di fenomeni eolici, costituiscono serie in grado di rappresentare bene, dal punto di vista statistico, la distribuzione delle frequenze per direzioni e durate e consentono pertanto stime affidabili delle grandezze caratteristiche (altezza e periodo) delle onde a largo.

I dati raccolti nella Tab. 4d e la rappresentazione della Fig. 14 consentono, per il caso in esame, un agevole confronto tra i valori ottenuti con l'applicazione del metodo indiretto S.M.B. ed i dati raccolti dal K.N.M.I.

Nel confronto tra le altezze significative riportate in Tab. 4d, occorre considerare che i dati del K.N.M.I non esplicitano i valori superiori a 6,00 m.

Nella stessa tabella i valori di altezza significativa H_s sono correlati a quelli censiti a vista H_v tramite la relazione di Nordenström di seguito riportata:

$$H_s = 1,68 \times H_v^{0,75} \quad (8)$$

DIREZIONE (°N)	SMB H_s	KNMI H_v	$H_s=1,68 \times H_v^{0,75}$
340°	9,06	---	---
350°	6,30	> 6	> 6,4
0°	9,8	> 6	> 6,4
10°	8,6	> 6	> 6,4
20°	9,2	4,5	5,2
30°	7,5	4,5	5,2
40°	5,3	4,5	5,2
50°	5,0	5,0	5,6
60°	4,4	5,0	5,6
70°	4,4	5,0	5,6
80°	2,7	---	---

Tab.4d – Altezze significative ed altezze visuali

In Fig. 14 sono illustrate, in forma di istogrammi, le frequenze di apparizione per settori di provenienza del moto ondoso.

Da tale figura si evince che per la caratterizzazione del clima ondoso in termini di frequenze di apparizione, nel caso in esame e per i motivi già esposti, la popolazione di dati desunti dal metodo S.M.B. offre risultati più attendibili rispetto ai dati K.N.M.I.

Inoltre la stessa popolazione, costituita da dati relativi ad un periodo di tempo (1960÷1990) più ampio di quello al quale si riferiscono le osservazioni del K.N.M.I. (1961÷1980) è sufficientemente numerosa da consentire attendibili elaborazioni statistiche.

Su queste si riferirà nel prossimo capitolo.

Entrambi i metodi portano comunque a concludere che le mareggiate dei settori settentrionali presentano caratteristiche di maggiore frequenza ed intensità rispetto a quelle provenienti dalle direzioni orientali.

4. ANALISI STATISTICA E PROIEZIONE PROBABILISTICA

In questo capitolo viene illustrata l'analisi statistica effettuata sui dati determinati con il metodo S.M.B. a partire dalle osservazioni anemometriche relative al periodo 1960÷1990.

Tali dati possono, infatti, essere riguardati come serie storiche, relative allo stesso periodo, di mareggiate contraddistinte dalle stesse grandezze caratteristiche medie e significative (altezze d'onda e periodi).

Le elaborazioni svolte sono state effettuate allo scopo di:

- determinare le caratteristiche della mareggiata energeticamente equivalente al clima ondoso storicamente sviluppatosi, nel senso già precisato, nel periodo di osservazione considerato;
- determinare i massimi valori d'altezze d'onda associati a determinati tempi di ritorno ($Tr = 5, 10, 20, 30, 50$ e 100 anni)

4.1. VALUTAZIONE DELLA MAREGGIATA ENERGETICAMENTE EQUIVALENTE AL CLIMA ONDOSO DEL PERIODO DI OSSERVAZIONE

Al fine di determinare le caratteristiche della mareggiata energeticamente equivalente al clima ondoso sviluppatosi nel periodo di osservazione, si è proceduto associando, ad ogni direzione considerata, il vettore energia il cui modulo rappresenta il contenuto energetico globale delle ondatazioni (Tab.5).

È stata quindi valutata la direzione D_R della mareggiata energeticamente equivalente tramite la seguente relazione:

$$D_R = \frac{\sum D_i E_i}{\sum E_i} = 21,7^\circ N \quad (9)$$

in cui: D_i è la direzione i-esima ed E_i è il contenuto energetico relativo alla stessa direzione.

La direzione della mareggiata energeticamente equivalente è risultata pari a $21,7^\circ N$.

DIREZIONE [°N]	E _{tot}	DIREZIONE RISULTANTE [°N]
340°	49.824.045	21,7°
350°	152.852.774	
360°	175.710.718	
10°	362.261.469	
20°	294.734.199	
30°	325.487.341	
40°	176.901.043	
50°	960.45.052	
60°	55.982.087	
70°	66.425.415	
80°	25.642.859	

Tab. 5 – Contenuti energetici per ogni direzione e risultante .

4.2. VALUTAZIONE DEI MASSIMI VALORI D'ALTEZZE D'ONDA PER DETERMINATI PERIODI DI RITORNO.

La determinazione del clima ondoso del paraggio di "Acqua dei corsari" con a prefissati tempi di ritorno è stata effettuata riferendosi alla distribuzione di probabilità di Fisher-Tippet (Gumbel).

Essa è espressa dalla seguente relazione:

$$F(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0.44}{N_T + 0.12} \quad (10)$$

nella quale:

- $F(H_s \leq H_{sm})$ è la probabilità che l' m-esima altezza d'onda significativa non sia superata;
- H_{sm} è l'm-esimo valore nel campione delle altezze significative;
- m è il livello del valore dell'altezza significativa pari a 1,2,...,N;
- N_T è numero totale degli eventi che costituiscono il campione;

Operativamente si ordina la popolazione di dati in modo decrescente, associando ad ogni dato il rispettivo numero d'ordine m.

Quindi, posto:

$$y_m = -\ln[-\ln F(H_s \leq H_{sm})] \quad (11)$$

$$H_{sm} = Ay_m + B \quad (12)$$

si calcola, per ogni dato H_{sm} della serie, il corrispondente valore correlato y_m in funzione di F, espresso dalla (11) e si determinano i parametri A e B della regressione lineare espressa dalla (12).

Successivamente si calcolano i valori di altezza d'onda connessi ai tempi di ritorno prefissati avvalendosi delle relazioni:

$$H_{sr} = Ay_r + B \quad (13)$$

$$y_r = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{\lambda T_r} \right) \right] \quad (14)$$

dove:

- H_{sr} é l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno T_r ;
- λ è il numero medio degli eventi per anno espresso dal rapporto N_T/K ;
- T_r è il tempo di ritorno [anni];
- K é lunghezza della serie [anni];

I risultati delle elaborazioni svolte sono raccolti nella Tab.6 e rappresentati graficamente nelle Figg. 15÷25.

DIREZIONE [° N]	H(T_r) [m]					
	$T_r=5$	$T_r=10$	$T_r=20$	$T_r=30$	$T_r=50$	$T_r=100$
340°	4,28	4,84	5,39	5,70	6,11	6,65
350°	4,65	5,24	5,81	6,14	6,57	7,13
360°	4,70	5,44	6,16	6,58	7,11	7,82
10°	5,65	6,57	7,47	7,98	8,64	9,53
20°	4,82	5,64	6,43	6,87	7,46	8,23
30°	4,43	5,17	5,89	6,29	6,81	7,51
40°	3,51	3,98	4,43	4,68	5,01	5,45
50°	3,31	3,94	4,52	4,83	5,25	5,80
60°	2,44	2,88	3,25	3,43	3,71	4,04
70°	3,03	3,45	3,84	4,05	4,34	4,72
80°	2,46	2,58	2,69	2,75	2,83	2,94

Tab.6 - Valori di altezze d'onda significative per vari tempi di ritorno.

5. INDIVIDUAZIONE DEL TEMPO DI RITORNO DELL'EVENTO DI PROGETTO

Il tempo di ritorno dell'evento di progetto T_{RP} al quale fare riferimento per il dimensionamento delle opere è stato fissato tenendo conto delle Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe marittime emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Secondo tali "Istruzioni" T_{RP} è espresso dalla relazione:

$$T_{RP} = T_V / [-\ln(1 - P_f)] \quad (15)$$

nella quale:

- T_V rappresenta la durata minima di vita dell'opera definita, in relazione alle sue caratteristiche funzionali e al livello di sicurezza richiesto;
- P_f rappresenta la massima probabilità di danneggiamento ammissibile nel periodo di vita dell'opera.

Con riferimento alle "Istruzioni" sopracitate, considerato che la struttura prevista è di uso specifico e di interesse locale e che, in caso di collasso vi è un rischio minimo di perdita di vite umane e una ripercussione economica bassa, la durata minima di vita delle opere risulta fissata in 15 anni.

Inoltre, ammettendo che la massima probabilità di danneggiamento P_f sia pari a 0,40, valore che esprime ripercussioni economiche da *medie* a *basse* nel caso di danneggiamento incipiente delle opere, l'applicazione della (15) porta a determinare in 30 anni il tempo di ritorno dell'evento di progetto T_{RP} al quale fare riferimento per il dimensionamento delle opere.

6. STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO VERSO COSTA

Com'è noto, un treno d'onde che provenga da una qualunque direzione, avanza con altezza e celerità costanti fino ad una profondità h_0 pari alla metà della lunghezza d'onda L_0 .

In acque di profondità illimitata, e cioè fino al raggiungimento del suddetto limite, la celerità dell'onda è espressa dalla:

$$C_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (16)$$

Essa dipende, pertanto, solo dal periodo T , che si mantiene costante al variare della profondità.

Tutti i punti di un fronte viaggiano quindi alla stessa velocità; il fronte si mantiene allora parallelo a se stesso ed agli altri fronti.

Al diminuire della profondità h al di sotto del suddetto limite, la celerità è espressa dalla nota relazione di Airy:

$$C = C_0 \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (17)$$

nella quale L è la lunghezza d'onda alla profondità h .

Se, pertanto, il fondo marino si presenta gradualmente acclive man mano che si ci approssimi alla riva, la celerità dell'onda decresce con gradualità dal valore C_0 assunto in profondità illimitata, fino al valore:

$$C = \sqrt{gh} \quad (18)$$

che si raggiunge in acqua bassa ossia per profondità h minori di $L/20$.

I punti di uno stesso fronte sono allora animati da diverse celerità, tanto minori quanto minori sono le profondità.

I fronti d'onda subiranno pertanto una deformazione ed una rotazione progressiva man mano che si approssimano alla linea di riva; il risultato finale di tale fenomeno è quello di una tendenza dei fronti stessi a disporsi parallelamente all'andamento delle batimetriche.

Il fenomeno suddetto prende il nome di rifrazione; in esso si individuano due aspetti tipici: il primo, di matrice geometrica, è connesso alla variazione della celerità; il secondo, di natura energetica, comporta una variazione di altezza d'onda.

L'altezza d'onda H in corrispondenza della generica profondità h può essere ricavata scrivendo, fra due ortogonali contigue fra loro, un bilancio tra il flusso energetico entrante al largo e quello uscente alla profondità h stessa.

In tal caso è possibile legare la ricercata altezza d'onda H a quella al largo H_0 , mediante la seguente relazione:

$$H = K_R K_S H_0 \quad (19)$$

nella quale con K_R e K_S sono indicati i coefficienti di rifrazione e di acclività.

Il coefficiente di rifrazione K_R è definito dalla radice quadrata del rapporto fra la distanza di due ortogonali al largo b_0 e sottocosta b :

$$K_R = \sqrt{b_0 / b} \quad (20)$$

Per determinare i valori di b sono state tracciate le linee ortogonali per le direzioni di 340° , 360° , 20° , 40° e 60° per periodi da 8 s a 14 s con incrementi di 2 s avvalendosi del metodo grafico di Huyghens.

Per ciascuna direzione considerata si è assunta come distanza delle linee ortogonali al largo il valore $b_0 = 200$ m; come già accennato la direzione di tali linee e la loro distanza non varia finché ci si trova a profondità illimitata. Allorché si raggiungano profondità limitate la lunghezza d'onda passa dal valore L_0 al valore L espresso dalla:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \operatorname{tgh} \frac{2\pi h}{L} \quad (21)$$

e la celerità dell'onda passa dal valore C_0 al valore C espresso dalla:

$$C = \frac{L}{T} \quad (22)$$

Pertanto il fronte d'onda, nel periodo T , avanza di L e raggiunge una profondità h in corrispondenza della quale la lunghezza d'onda è espressa ancora dalla (21) e la celerità dalla (22).

La nuova posizione del fronte d'onda può essere allora determinata graficamente, a partire dalla profondità illimitata, costruendo cerchi di raggio L aventi centro sulle intersezioni delle linee ortogonali con l'isobata che definisce la profondità illimitata.

Ripetendo la costruzione e tracciando le ortogonali ai fronti d'onda man mano determinati sono state tracciate le linee di flusso relative alle direzioni e ai periodi sopra indicati.

Tali linee, rappresentate rispettivamente nelle Figg. 26.1÷ 26.4, 27.1÷27.4, 28.1÷28.4, 29.1÷29.4, 30.1÷30.4, consentono di determinare i rapporti tra le distanze di due ortogonali al largo e sottocosta e di valutare tramite la (20) i valori dei coefficienti di rifrazione K_R .

Il coefficiente di acclività K_S è definito dalla:

$$K_S = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_g}} \quad (23)$$

nella quale C_{g0} è la celerità di gruppo al largo pari a $C_0/2$ e C_g è la celerità di gruppo alla profondità h espressa dalla:

$$C_g = \frac{1}{2}C \left(1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh 4\pi h/L} \right) \quad (24)$$

Avvalendosi della costruzione di Huyghens e delle equazioni sopra richiamate sono stati determinati i valori delle altezze d'onda H sottocosta per varie direzioni di provenienza e per differenti periodi; tali dati sono raccolti nella seguente Tab. 7.

DIREZIONE AL LARGO	PERIODO DELL'ONDA							
	8 s		10 s		12 s		14 s	
	H [m]	α [°]	H [m]	α [°]	H [m]	α [°]	H [m]	α [°]
340°	9,35	86,9	9,08	87,5	9,08	87,7	7,96	89,3
360°	9,38	95,0	9,80	91,9	11,31	94,5	10,23	92,0
20°	9,21	110,2	8,06	105,4	8,36	108,5	7,63	107,9
40°	5,53	121,5	5,71	122,0	6,08	117,8	5,73	119,6
60°	3,28	133,5	3,08	134,2	3,29	129,4	3,01	128,2

Tab.7 - Altezze e direzioni sottocosta delle onde significative

7. STUDIO DEL FRANGIMENTO

Un treno d'onde che si propaga su un fondale a profondità decrescente subisce il fenomeno del frangimento che inizia a manifestarsi quando la componente orizzontale della velocità orbitale delle particelle in cresta uguaglia la celerità dell'onda.

Nel caso in esame il fenomeno è stato studiato con riferimento al caso di onde oblique monocromatiche provenienti dal largo con fronte inclinato dell'angolo α_0 rispetto alla linea di riva e celerità C_0 , propagantisi su fondali poco acclivi.

Si è precedentemente esposto che nel passare da profondità illimitata a profondità finita il fronte d'onda subisce una rotazione e tende a formare con la linea di riva un angolo $\alpha_i < \alpha_0$.

Per la legge di rifrazione di Descartes, indicando con α_f l'angolo rispetto alla riva del fronte d'onda frangente e con L_f la lunghezza d'onda in condizioni di frangimento, sussiste la relazione:

$$\text{sen}\alpha_f = \text{sen}\alpha_0 \frac{L_f}{L_0} \quad (25)$$

essendo:

$$\frac{L_f}{L_0} = \text{tgh} \frac{2\pi h}{L_f} \quad (26)$$

nella quale h è il fondale in corrispondenza della zona dei frangenti.

Considerate due ortogonali al fronte dell'onda che procede verso riva ed indicata con l_0 la distanza tra esse allorchè l'onda procede in profondità infinita e con l_f la loro distanza in corrispondenza della profondità di frangimento, stante che le proiezioni di tali segmenti sulla linea di riva hanno la stessa lunghezza, ne deriva che:

$$\frac{l_0}{\cos \alpha_0} = \frac{l_f}{\cos \alpha_f} \quad (27)$$

Inoltre, in assenza di dissipazioni nel percorso dalla profondità infinita a quella in cui avviene il frangimento, l'energia trasmessa dall'onda nell'unità di tempo in ciascuna sezione parallela alla linea di riva limitata da due ortogonali è costante; si può allora scrivere l'uguaglianza:

$$\frac{H_0}{H_f} = \frac{\cos \alpha_f}{\cos \alpha_0} \operatorname{tgh} \frac{2\pi h}{L_f} n_f \quad (28)$$

nella quale:

$$n_f = 1 + \frac{\frac{4\pi h}{L_f}}{\operatorname{senh} \frac{4\pi h}{L_f}} \quad (29)$$

Introducendo adesso le condizioni per le quali l'onda si frange, secondo il criterio suggerito da Scarsi, si ottiene la seguente relazione tra la ripidità H_f / L_f e la profondità relativa h / L_f :

$$\gamma_f = \frac{H_f}{L_f} = \frac{0,095 \operatorname{tgh} \frac{2\pi h}{L_f}}{1,00 - 0,324 \operatorname{tgh} \frac{2\pi h}{L_f}} \quad (30)$$

Avvalendosi delle espressioni sopra riportate si possono determinare i valori delle grandezze α_f , H_f , L_f ed h , in funzione delle caratteristiche dell'onda in profondità infinita α_0 , H_0 e L_0 .

Fissato un valore di primo tentativo della profondità di frangimento h , dalla (26) si ricava L_f che introdotta nella (25) consente di determinare α_f .

Con tali valori, utilizzando la (23) e la (28) si ricava L_f . Si può allora calcolare il valore della ripidità dell'onda al frangimento e verificare se l'applicazione della (30) porta alla stessa determinazione.

I valori determinati con il metodo appena descritto sono raccolti nelle Tabb. 8.1÷8.5.

PERIODO T [s]	PROFONDITA' h_f [m]	ALTEZZA DELL'ONDA H_f [m]	LUNGHEZZA D'ONDA L_f [m]	ANGOLO DI INCIDENZA α_f [°]
8	7,10	4,54	61,8	350,8
10	7,53	4,88	81,6	352,2
12	8,00	5,19	102,3	353,2
14	8,44	5,47	123,7	354,0

Tab.8.1 - Direzione 340° - Profondità di frangimento e caratteristiche dell'onda frangente

PERIODO T [s]	PROFONDITA' h_f [m]	ALTEZZA DELL'ONDA H_f [m]	LUNGHEZZA D'ONDA L_f [m]	ANGOLO DI INCIDENZA α_f [°]
8	6,97	4,46	61,30	360,0
10	7,42	4,81	81,06	360,0
12	7,88	5,11	101,62	360,0
14	8,33	5,39	122,94	360,0

Tab.8.2 - Direzione 360° - Profondità di frangimento e caratteristiche dell'onda frangente

PERIODO T [s]	PROFONDITA' h_f [m]	ALTEZZA DELL'ONDA H_f [m]	LUNGHEZZA D'ONDA L_f [m]	ANGOLO DI INCIDENZA α_f [°]
8	5,95	3,83	57,3	12,7
10	6,36	4,13	75,6	10,7
12	6,78	4,39	94,8	9,3
14	7,18	4,64	114,6	8,2

Tab.8.3 - Direzione 20° - Profondità di frangimento e caratteristiche dell'onda frangente

PERIODO	PROFONDITA'	ALTEZZA DELL'ONDA	LUNGHEZZA D'ONDA	ANGOLO DI INCIDENZA
T [s]	h_f [m]	H_f [m]	L_f [m]	α_f [°]
8	4,75	3,08	51,9	21,5
10	5,09	3,30	68,2	18,0
12	5,44	3,52	85,4	15,6
14	5,77	3,72	103,2	13,8

Tab.8.4 - Direzione 40° - Profondità di frangimento e caratteristiche dell'onda frangente

PERIODO	PROFONDITA'	ALTEZZA DELL'ONDA	LUNGHEZZA D'ONDA	ANGOLO DI INCIDENZA
T [s]	h_f [m]	H_f [m]	L_f [m]	α_f [°]
8	2,95	1,91	41,7	22,7
10	3,21	2,07	54,9	19,0
12	3,46	2,22	68,8	16,4
14	3,69	2,35	83,2	14,5

Tab.8.5 - Direzione 60° - Profondità di frangimento e caratteristiche dell'onda frangente

8. DEFINIZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI DEL MOTO ONDOSI DA PORRE A BASE DELLE VERIFICHE DI STABILITA' DELLE OPERE DI DIFESA COSTIERA

Le opere di difesa costiera in progetto saranno impostate su fondali di profondità variabile tra -3.5 e -5.5 m.s.m., per cui i valori massimi connessi ai periodi di ritorno 30 anni, calcolati nel precedente paragrafo, frangeranno a largo rispetto alle batimetrie di imposta dei manufatti.

Per quanto esposto, il valore da utilizzare per il dimensionamento delle strutture in progetto deve essere pari all'altezza d'onda frangente. Inoltre, poiché il fondale antistante i manufatti presenta pendenze molto acclivi (10% circa), a scopo cautelativo, è opportuno considerare come inizio frangimento la batimetrica – m.s.m.

Per il dimensionamento delle sezioni tipo, l'altezza d'onda di progetto, assunta pari all'altezza limite al frangimento H_b , viene calcolata con la relazione di Kamphuis:

$$H_b = 0.56 d_b \text{ e } 3.5 \text{ m} \quad (31)$$

dove d_b è la profondità di frangimento ed m la pendenza del fondale antistante.

La determinazione di d_b è stata effettuata in funzione della profondità al piede della scogliera e del sopralzo del livello medio marino.

Il sopralzo del livello del medio mare viene stimato come somma del contributo del sopralzo di tempesta e della marea barometrica; il primo contributo è calcolabile dalla seguente relazione:

$$S1 = 0.19(1 - 2.82(H_b/gT^2)^{1/2}) H_b \quad (32)$$

Il contributo della marea, da dati del Tirreno meridionale, risulta al massimo pari a +0,20 m s.m.

Pertanto nei calcoli di proporzionamento delle strutture si adottano i seguenti parametri.

- Profondità di imposta delle opere $h_d = -5.0$ m s.m.;
- Pendenza media del fondale $m = 0,10$ m/m;
- Sopralzo di marea $S_2 = 0,20$ m;
- Sopralzo di tempesta $S_1 = 0,70$ m;
- Massimo sopralzo $S = 0,90$ m
- Sopralzo + profondità $d+S = 4,70$ m;
- Altezza d'onda al frangimento di progetto $H = 4,70$ m;

9. CONCLUSIONI

- Il paraggio oggetto di intervento è esposto al clima ondoso che si sviluppa nel settore di traversia compreso tra le direzioni 340°N e 80°N. Le mareggiate caratterizzate da maggiore frequenza ed intensità sono quelle relative alle direzioni settentrionali 350°N-30°N
- La mareggiata energeticamente equivalente al clima ondoso relativo al periodo di osservazione esaminato presenta direzione pari a 22 °N
- Per il dimensionamento delle opere di difesa in progetto, il valore di altezza d'onda da utilizzare è quello relativo alle massime onde frangenti su quei fondali, e pari a 4,70 m.

ALLEGATI A1: FIGURE E GRAFICI

ALLEGATI A2: TABULATI DI CALCOLO S.M.B.