

Indice

Indice.....	1
INTRODUZIONE	3
Capitolo 1	5
INQUADRAMENTO DEL PARAGGIO E DETERMINAZIONE DEL SETTORE DI TRAVERSIA, DEI FETCH GEOGRAFICI ED EFFICACI	5
Capitolo 2	9
STUDIO ANEMOLOGICO E RICOSTRUZIONE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO	9
1. Premessa	9
2. Analisi dati anemometrici e individuazione degli eventi ondosi.....	10
3. Previsione indiretta del moto ondoso.....	13
3.1. Il modello SPM	13
3.2. Il metodo parametrico JONSWAP.....	16
Capitolo 3	19
STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DELLE ALTEZZE D'ONDA	19
1. Premessa	19
2. I dati per l'analisi degli estremi	20
3. Analisi dei valori estremi delle altezze significative	20
4. Funzioni di distribuzione di probabilità	21
5. Stima delle altezze in funzione del periodo di ritorno	24
Capitolo 4	27
STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO E DELL'AGITAZIONE INTERNA AL PORTO	27
1. Premessa	27
2. Fenomeno di rifrazione.....	27
3. Fenomeno di diffrazione.....	29
4. Fenomeno di riflessione.....	32
4.1. Riflessione in un bacino chiuso: Risonanza o risacca	33
5. Analisi della propagazione del moto ondoso e dell'agitazione interna al bacino portuale	33
5.1. Conclusioni	45
Bibliografia.....	47

ALLEGATO 1

Tabella contenente le mareggiate individuate dai dati di vento della stazione meteo di Cozzo Spadaro (SR) relative al settore di traversia ($60^{\circ}\text{NE} \div 280^{\circ}\text{NE}$).

ALLEGATO 2

Risultati dell'elaborazione dei dati di vento col metodo SPM.

ALLEGATO 3

Risultati dell'elaborazione dei dati di vento col metodo JONSWAP.

ALLEGATO 4

Risultati del calcolo delle grandezze caratteristiche relative alle altezze d'onda significative ricavate col metodo SPM.

ALLEGATO 5

Andamenti delle altezze significative H_s in funzione delle probabilità di non superamento, secondo la distribuzione di Weibull, con parametri di forma $k=0,75, 1,00, 1,40, 2,00$, relativi a tutte le direzioni interne al settore di traversia del paraggio di Portopalo di Capo Passero.

ALLEGATO 6

Risultati del calcolo delle grandezze caratteristiche relative alle altezze d'onda significative ricavate dall'analisi probabilistica.

INTRODUZIONE

Ai fini di una adeguata definizione della configurazione portuale si è condotto uno studio idraulico marittimo mirato ad esplicitare le caratteristiche meteomarine del paraggio di Portopalo di Capo Passero.

La caratterizzazione ondometrica di un paraggio avviene in primo luogo attraverso la definizione del regime ondometrico al largo, in secondo luogo attraverso lo studio del fenomeno di trasformazione del moto ondoso con l'analisi dei fenomeni di rifrazione e frangimento e, infine, attraverso l'analisi della diffrazione e penetrazione del moto ondoso all'interno del bacino portuale.

Per la ricostruzione del moto ondoso al largo è possibile scegliere tra due diverse metodologie: una di tipo diretto, basata sulla misura mediante boe ondometriche posizionate al largo; l'altra di tipo indiretto, basata sulla stima numerica dei valori di altezza e periodo delle mareggiate assumendo come dato di partenza i valori di velocità e direzione del vento.

I dati ondometrici utili sono quelli acquisiti direttamente dalla Rete Ondometrica Nazionale (RON). E' noto, tuttavia, che le serie storiche disponibili risultano insufficienti per una corretta analisi statistica del clima marino e che la dislocazione delle boe ondometriche sul litorale italiano non sempre consente un'esatta determinazione del clima ondoso nel sito d'interesse.

Appare, dunque, necessario avvalersi dei metodi indiretti per la previsione del moto ondoso, ossia di metodologie che, a partire da dati di vento, consentano la stima delle caratteristiche del moto ondoso. Questa procedura, essendo disponibili molti anni di registrazioni, permette di avere elaborazioni statistiche maggiormente attendibili.

Lo studio è stato condotto in diverse fasi:

- il primo passo è stato l'inquadramento geografico del paraggio, la determinazione del settore di traversia, dei fetch geografici ed efficaci;
- successivamente, acquisite le informazioni relative ai dati di vento, si è proceduto ad una loro elaborazione che ha consentito di individuare le mareggiate per ogni direzione di provenienza;
- in seguito si è proceduto alla ricostruzione del clima ondoso del paraggio al largo, valutando, al variare della direzione di propagazione del moto ondoso, l'altezza e il periodo delle onde;
- i valori delle altezze d'onda significative, ottenute dai metodi di ricostruzione indiretti del moto ondoso, sono state così assunte come campione statistico per la stima dell'altezza massima probabile. Si è adottato un *approccio di tipo probabilistico*, ovvero partendo dall'esame dei valori di altezza d'onda caratteristica, stimati in un certo periodo di tempo, si è determinato il valore massimo di altezza d'onda significativa più probabile che si verificherà entro un certo tempo futuro;
- infine, si è studiata la trasformazione delle condizioni ondometriche al largo fin sottocosta e, in particolare, all'interno del bacino portuale analizzando i fenomeni di rifrazione, frangimento e diffrazione attorno alle testate delle opere marittime di protezione. In particolare, si sono utilizzati opportuni modelli matematici che hanno consentito

la determinazione delle onde perturbative nel porto dovute alla penetrazione di onde irregolari, considerando anche fenomeni quali il raggruppamento di onde e gli effetti di riflessione in ogni direzione e di diverso ordine.

L'obiettivo dello studio è stato l'analisi del campo di agitazione interna al bacino del porto, nelle condizioni di stato attuale e di progetto.

Capitolo 1

INQUADRAMENTO DEL PARAGGIO E DETERMINAZIONE DEL SETTORE DI TRAVERSIA, DEI FETCH GEOGRAFICI ED EFFICACI

Per la ricostruzione del clima ondoso si individua il *settore di traversia*, vale a dire il settore angolare, centrato nel paraggio, comprendente tutte le direzioni da cui possono provenire le agitazioni ondose determinate dai venti foranei.

Nel nostro caso, in base alle carte fornite dall'Istituto Idrografico della Marina, le radenti al tratto di costa sotteso dal paraggio di Portopalo di Capo Passero sono individuate dalle direzioni 105° NE e 235° NE.

Il settore di traversia così determinato è stato suddiviso in spicchi di 5° ciascuno e, per ciascuna direzione così individuata, è stato calcolato il relativo *fetch geografico*, ovvero la distesa di mare libero su cui il vento può fornire energia al mare, distanza misurata tra il punto d'interesse e la terra più vicina.

In realtà, il vento trasmette la sua energia alla superficie del mare non solo secondo la sua direzione di propagazione ma anche secondo le direzioni a questa vicine. Pertanto, a partire dai diagrammi dei fetch geografici, si determinano i diagrammi dei *fetch efficaci*, che tengono in qualche modo conto della dispersione direzionale dell'energia dell'onda e di quella di vento. Si assume che la distribuzione direzionale dell'energia del moto ondoso abbracci un settore di $\pm 45^\circ$ rispetto alla direzione di provenienza del vento e che ciascuna direzione compresa in questo settore fornisca un contributo energetico proporzionale al quadrato del coseno dell'angolo che essa forma con la direzione di propagazione.

Con questa ipotesi la lunghezza di fetch efficace corrispondente a ciascuna direzione ϑ_m si può calcolare partendo dalle distanze geografiche $F_g(\vartheta_i)$ proiettate sulla stessa direzione secondo la relazione:

$$F_{eff}(\vartheta_m) = \frac{\sum_{\vartheta_i = \vartheta_m - 45}^{\vartheta_i = \vartheta_m + 45} F_g(\vartheta_i) \cos^2(\vartheta_i - \vartheta_m)}{\sum_{\vartheta_i = \vartheta_m - 45}^{\vartheta_i = \vartheta_m + 45} \cos^2(\vartheta_i - \vartheta_m)}$$

nella quale i simboli che compaiono hanno il seguente significato:

- \mathcal{G}_m è la direzione media (riferita al Nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso e per la quale si vuole valutare il relativo fetch efficace;
- $F_{eff}(\mathcal{G}_m)$ è la lunghezza del fetch efficace lungo la direzione \mathcal{G}_m ;
- \mathcal{G}_i è la i-esima direzione (sempre riferita al Nord geografico) compresa nel settore di ampiezza 90° , il cui relativo fetch geografico contribuisce alla determinazione di $F_{eff}(\mathcal{G}_m)$;
- $F_g(\mathcal{G}_i)$ è la lunghezza del fetch geografico lungo la i-esima direzione \mathcal{G}_i .

Di seguito si riportano i risultati.

Direzione [°]	Fetch geografici [m.m.]	Fetch efficaci [m.m.]
105	1009,40	338,42
110	983,17	367,14
115	807,80	392,85
120	680,55	414,23
125	535,52	431,51
130	388,97	444,79
135	369,76	453,91
140	362,79	457,11
145	370,14	456,18
150	430,34	451,16
155	439,25	415,40
160	416,78	383,04
165	369,61	358,46
170	346,12	332,87
175	334,76	311,46
180	323,14	293,73
185	258,19	275,50
190	254,60	254,94
195	243,74	233,18
200	246,07	209,18
205	245,96	184,99
210	253,18	161,80
215	55,50	140,44
220	53,17	120,28
225	54,69	101,13
230	53,21	83,17
235	2,37	68,01

Tabella 1 – Valori dei fetch geografici ed efficaci del paraggio di Portopalo di Capo Passero

In figura 1 e 2 sono mostrati rispettivamente i diagrammi dei fetch geografici ed efficaci.



Figura 1 – Diagramma dei fetch geografici



Figura 2 - Diagramma dei fetch efficaci

Di seguito si mostra la sovrapposizione grafica dei due diagrammi.

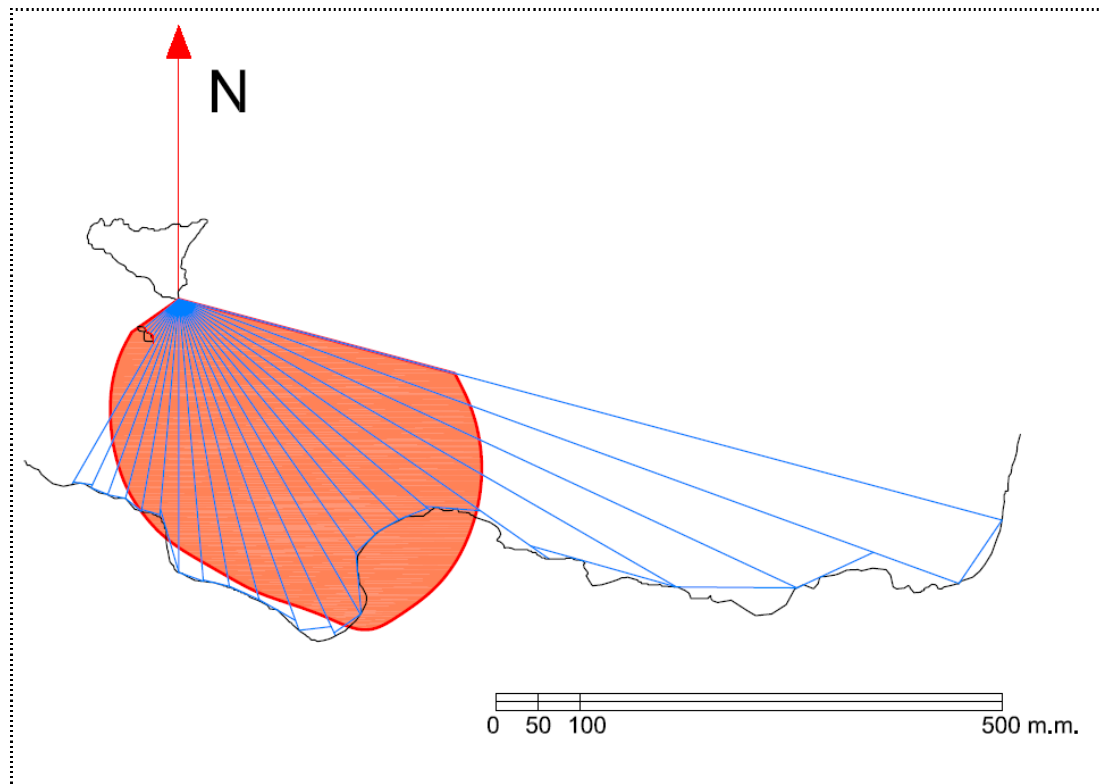


Figura 3 – Sovrapposizione dei diagrammi dei fetch geografici e dei fetch efficaci

Capitolo 2

STUDIO ANEMOLOGICO E RICOSTRUZIONE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO

1. Premessa

Per una corretta ed economica progettazione di un'opera marittima occorre una buona conoscenza dei parametri del moto ondoso e delle relative sollecitazioni sulle strutture. In particolare, sono necessarie notizie del clima ondoso estese a un periodo di tempo abbastanza ampio, tale da fornire un campione di dati statisticamente idoneo per un'affidabile previsione probabilistica estesa ad un prefissato intervallo di tempo futuro.

Poiché, come si è detto, non si dispone di registrazioni dirette del moto ondoso, si perviene ad una buona stima dei parametri del moto ondoso passando da una buona conoscenza del campo di vento sul mare, cioè della forza generatrice dello stesso moto ondoso.

In generale, per ricavare le caratteristiche dell'onda dalle informazioni meteorologiche è necessario:

- stimare la direzione e la velocità media del vento;
- definire un fetch (area di perturbazione), sul quale il vento sia ragionevolmente costante in velocità e direzione, e misurarne l'estensione;
- stimare la durata del vento sul fetch.

Per la definizione del fetch in corrispondenza di ogni direzione compresa nel settore di traversia si rimanda al Capitolo 1; la direzione, la velocità e la durata del vento si deducono, invece, dalle registrazioni disponibili presso gli Enti che si occupano di meteorologia e che fanno raccolta e rilevamenti di dati.

Nello specifico, si è fatta richiesta dei dati meteo al Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica (CNMCA) dell'Aeronautica Militare. I dati sono relativi alla stazione meteorologica di Cozzo Spadaro, prossima a Portopalo, e coprono un arco temporale di 20 anni, dal 1988 al 2007; inoltre, sono di tipo triorario, ovvero sono estratti dalle osservazioni giornaliere triorarie (Bollettini METAR) e forniscono, oltre alla data e all'ora della registrazione, la direzione di provenienza del vento in gradi e l'intensità del vento in nodi.

2. Analisi dati anemometrici e individuazione degli eventi ondosi

Ottenuti i dati di vento, si è proceduto all'extrapolazione delle cosiddette *mareggiate*, ovvero degli "eventi" in cui il vento è risultato avere:

- velocità non inferiore ai *10 nodi* (valore di soglia);
- direzione inclusa nel settore di traversia d'interesse, $105^\circ - 45^\circ \text{NE} \div 235^\circ + 45^\circ \text{NE}$ (l'ampliamento di $\pm 45^\circ$ tiene conto della dispersione direzionale dell'energia).

Gli eventi sono stati individuati e distinti tra loro in base ai seguenti criteri:

- una mareggiata differisce dalla precedente se vi è una variazione della velocità superiore a 5 nodi;
- oppure se vi è una variazione della direzione superiore a 45° ;
- oppure, infine, se si verificano entrambe le situazioni suddette.

Questo tipo di elaborazione è stata effettuata grazie al codice di calcolo (software dedicato) sviluppato dalla stessa FN Progettazioni.

Il campione è costituito complessivamente da 148.638 dati, di cui il codice ne evidenzia 22.069 nel solo settore di traversia oggetto di studio ($60^\circ \text{NE} \div 280^\circ \text{NE}$).

Il numero di mareggiate ottenuto è pari a 5.752. Per ognuna delle mareggiate si sono calcolati:

- la velocità media e le sue componenti in direzione x e y;
- la velocità corretta (pari alla velocità media maggiorata di circa il 10% per tener conto che la velocità del vento è misurata ad una quota pari a quella dello strumento, mentre per la ricostruzione delle onde da vento si fa riferimento alla velocità del vento all'altezza di 8-10 metri sul l.m.m.);
- la direzione media (si noti che le direzioni medie sono state approssimate ai 5° più vicini);
- la durata.

Le mareggiate sono state poi ordinate secondo direzione crescente.

In **ALLEGATO 1** sono riportate le mareggiate ordinate e le relative caratteristiche.

Successivamente le mareggiate sono state raggruppate e conteggiate per uguale direzione. Le direzioni e le relative frequenze sono indicate in Tabella 2 (in rosso sono evidenziate le mareggiate verificatesi nel settore di traversia sotteso dal porto di Portopalo di Capo Passero, $105^\circ \text{NE} \div 235^\circ \text{NE}$), mentre la Fig. 4 ne mostra l'andamento. Si noti che le mareggiate nel solo settore di traversia risultano pari a 802.

Direzione [°]	n° mareggiate
60	653
65	189
70	301
75	95
80	174
85	57
90	133
95	37
100	54
105	21
110	37
115	20
120	32
125	10
130	32
135	15
140	18
145	6
150	30
155	6
160	21
165	4
170	16
175	6
180	26
185	3
190	28
195	6
200	41
205	8
210	55
215	18
220	89
225	31
230	140
235	83
240	233
245	161
250	442
255	272
260	548
265	305
270	627
275	205
280	464

Tabella 2 – Elenco di mareggiate ordinate per direzione di provenienza del vento

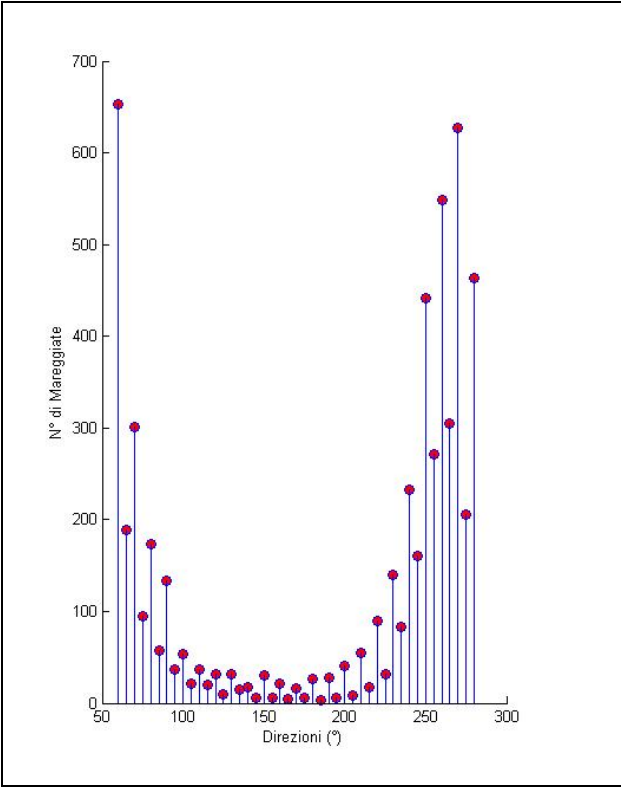


Figura 4 – Andamento del numero di mareggiate in funzione della direzione di provenienza del vento

3. Previsione indiretta del moto ondoso

I dati anemometrici, di cui si è precedentemente discusso, sono stati utilizzati per prevedere gli eventi ondosi. I metodi più comunemente impiegati per la ricostruzione del moto ondoso, partendo dalla conoscenza del campo di vento che lo genera, detti **metodi indiretti**, sono:

- *il metodo dell'onda significativa*, sviluppato originariamente da Sverdrup e Munk, ripreso e completato da Bretschneider;
- *il metodo dello spettro di energia*, introdotto da Pierson, Neumann e James.

Con il primo metodo si caratterizza la perturbazione ondosa, irregolare nell'area di generazione, con l'**onda significativa** che ha una realtà esclusivamente statistica: essa è un'onda sinusoidale semplice con un'ampiezza pari all'ampiezza media del terzo delle onde più alte e un periodo pari al periodo medio delle onde predette.

Il secondo caratterizza la perturbazione ondosa, irregolare nell'area di generazione, con la **funzione densità spettrale di energia**. Il suo integrale, esteso a tutte le frequenze angolari presenti nel "pacchetto" di onde sinusoidali componenti, fornisce una quantità che è proporzionale alla densità media di energia e che è direttamente correlata alle caratteristiche dell'onda significativa.

Entrambi i metodi, facendo riferimento a grandezze medie statistiche, rendono deterministico un processo stocastico.

I metodi di ricostruzione indiretti utilizzati nel presente studio sono:

- *Metodo **SPM** (Shore Protection Manual)*;
- *Metodo parametrico dello spettro **JONSWAP***.

Le grandezze fondamentali nella generazione del moto ondoso, alla base dei suddetti metodi, sono:

- velocità del vento;
- durata della perturbazione;
- lunghezza del fetch.

3.1. Il modello SPM

Nel comune uso ingegneristico tale metodo costituisce un aggiornamento semplificato del metodo SMB (Sverdrup, Munk, Bretschneider), approccio di previsione largamente usato grazie alla sua semplicità ed efficienza.

Una sua corretta interpretazione e applicazione passa da un'analisi del bilancio energetico nell'area di generazione del moto ondoso ad opera del vento. In particolare, il metodo è una combinazione di procedure empiriche ed analitiche per determinare l'altezza caratteristica delle onde nota la velocità e la durata del vento.

Per gli eventi ondosi si distinguono tre particolari condizioni:

- evento limitato dal fetch;
- evento limitato dalla durata;

- evento di mare completamente sviluppato.

Un *evento* risulta *limitato dal fetch* se il vento soffia costante per un tempo abbastanza lungo affinché l'altezza delle onde alla fine del fetch raggiunga l'equilibrio. In questo caso, i parametri richiesti per l'applicazione del metodo sono il fetch F e lo sforzo tangenziale U_A (velocità del vento corretta), che rappresenta un valore medio relativamente costante lungo il fetch.

E' opportuno sottolineare che la velocità del vento fornita dalle serie storiche è stata corretta in modo da tener in conto il fatto che il dato di vento è fornito a terra e va traslato a mare, che, a causa della differenza di temperatura terra-aria, si deve effettuare una correzione di stabilità, e che bisogna tenere in conto la relazione non lineare tra velocità del vento e sforzi tangenziali sulla superficie del mare, al fine di ottenere la velocità di attrito.

L'*evento* risulta *limitato dalla durata* se l'altezza delle onde risulta limitata dalla durata del tempo per cui il vento ha soffiato.

Qualora l'*evento* ondoso non risulti limitato né dal fetch né dalla durata, esso si dice *completamente sviluppato*. Questa è la condizione di mare nella quale le onde sono in equilibrio con il vento, uno stato di equilibrio in cui l'apporto di energia dovuta al vento è perfettamente bilanciato dalle dissipazioni; tale assunto permette la stima delle caratteristiche dell'onda come la totale energia dell'onda, l'altezza significativa e il periodo dell'energia massima che vengono a dipendere dalla sola velocità del vento. Ma lo stato di equilibrio fra vento ed onda si presenta raramente nella realtà e può non presentarsi mai per le più alte velocità del vento.

Allora un modello più generale è costruito assumendo che il mare sia calmo quando il vento comincia a soffiare; in tale caso le equazioni che governano la crescita dell'onda tengono conto del cambiamento della forma dello spettro all'aumentare del fetch e della durata.

Il metodo SPM può usarsi nelle ipotesi di *fetch limitato*, quindi in condizioni di *regime stazionario*. Nelle condizioni di *durata limitata* ci si trova in condizioni di *regime transitorio*.

Le equazioni che seguono rappresentano un'approssimazione del generale problema di crescita dell'onda nei due casi suddetti. L' **altezza d'onda spettrale** H_{m0} e il **periodo d'onda spettrale** T_m sono i parametri dell'onda ricostruita.

$$U_A = 0,71U^{1,23}$$

Velocità del vento corretta (dove U è la velocità del vento a circa 10m sul l.m.m.)

$$\frac{gH_{m0}}{U_A^2} = 1,6 \times 10^{-3} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2}$$

$$\frac{gT_m}{U_A} = 2,857 \times 10^{-1} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3}$$

$$\frac{gt}{U_A} = 6,88 \times 10 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{2/3} .$$

L'ultima equazione, da cui si ricava la durata dell'azione del vento t (s), è l'espressione integrata della curva caratteristica di propagazione e permette di verificare che la durata reale t_r , espressa in secondi, sia maggiore o uguale di t per il fetch dato. In caso contrario, cioè di *durata limitata*, nelle espressioni suddette va posto il valore F derivante dalla $t=t_r$.

I risultati dell'elaborazione sono contenuti nell'**ALLEGATO 2**; di seguito si mostra una rappresentazione grafica delle grandezze caratteristiche ottenute col metodo SPM.

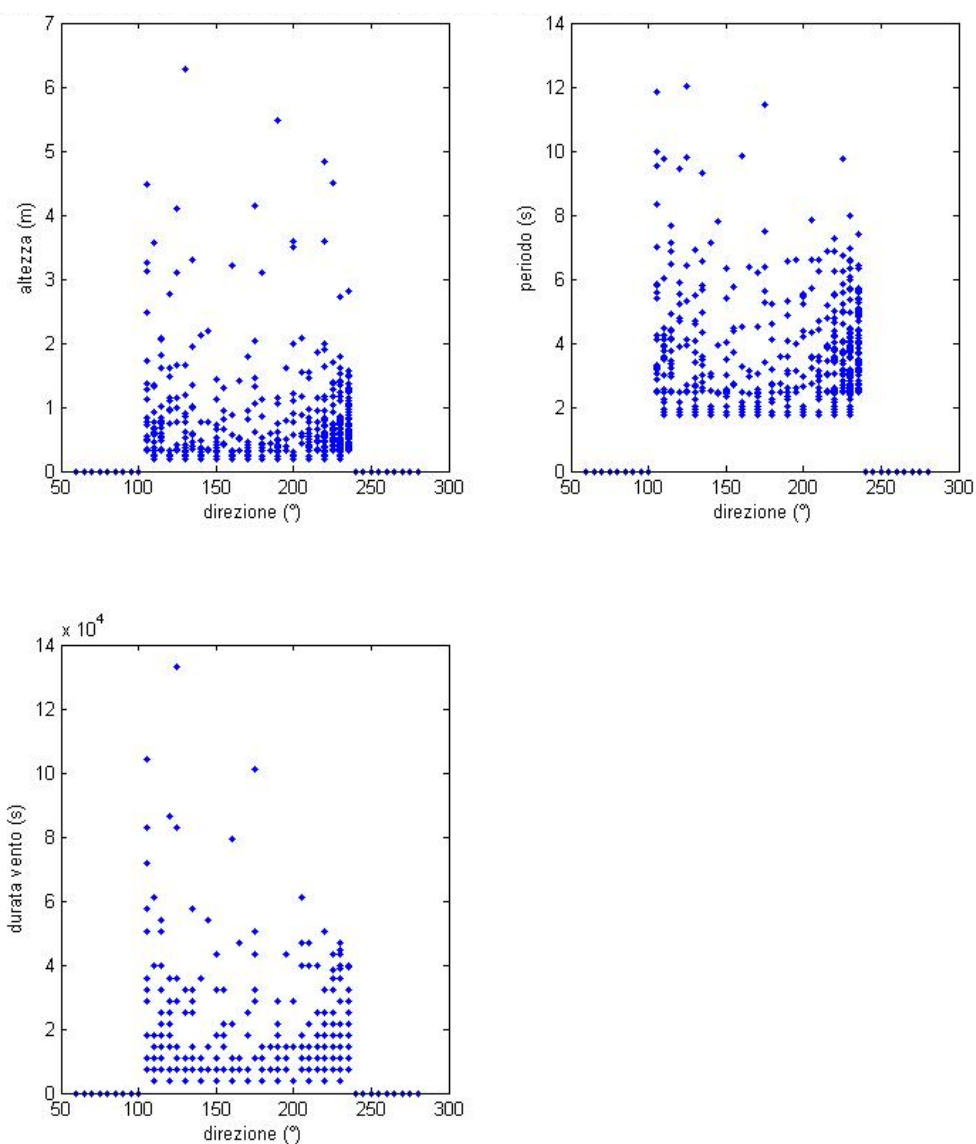


Figura 5 – Grandezze caratteristiche delle onde da vento ottenute col metodo SPM

3.2. Il metodo parametrico JONSWAP

Nei modelli parametrici si opera la semplificazione che la distribuzione spettrale dell'energia del mare da vento abbia, per effetto delle interazioni non lineari tra sistemi ondosi a diversa frequenza, una forma costante rappresentabile con una funzione nota dipendente da un numero limitato di parametri.

La forma del parametro più accreditata, specie nei *mari interni*, è quella dello **spettro Jonswap**:

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[-\frac{(f-f_m)^2}{2\sigma^2 f_m^2}\right] \quad \text{energia delle singole onde elementari}$$

In tale relazione i parametri possono essere espressi in funzione della sola velocità del vento a quota +10m sul l.m.m., e della lunghezza del fetch efficace, F , considerato fattore limitante l'accrescimento del moto ondoso, quindi:

- $f_m = \frac{1}{T_p} = \frac{3,5g}{U_{10}} \left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{-0,33}$ *frequenza corrispondente al massimo della densità spettrale;*
- $\sigma = 0,07$ per $f \leq f_m$ e $\sigma = 0,009$ per $f > f_m$ con σ *fattore di forma* dipendente dalla frequenza;
- $\alpha = 0,076 \left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{-0,22}$ *costante di Phillips;*
- $\gamma = 4,42 \left(\frac{f_m U_{10}}{g}\right)^{3/7}$ *fattore di picco.*

La *densità media d'energia* di una perturbazione ondosa è data dall'integrale rispetto alla frequenza della densità d'energia delle singole onde elementari.

In base all'analisi spettrale si può distribuire tale densità d'energia sulle frequenze delle diverse componenti armoniche (assumendo come range di frequenze l'intervallo da 0,01 Hz a 0,04 Hz, ad intervalli di discretizzazione 0,001 Hz) ottenendo uno *spettro d'energia discreto* che rappresenta compiutamente la distribuzione probabilistica delle altezze delle onde con cui descrivere le principali caratteristiche statistiche delle stesse perturbazioni ondose.

Successivamente si è proceduto con il calcolo della densità d'energia associata alla singola perturbazione ondosa m_0 (momento d'ordine zero pari all'area complessiva sotto la curva, pari alla varianza del segnale $m_0 = \sigma^2$).

A questo punto si è passati al calcolo dell'altezza quadratica media, che risulta correlata alla varianza dalla relazione:

$$H_{rms} = \sqrt{8m_0}$$

Il periodo di picco è dato da:

$$T_p = \frac{1}{f_m}$$

Le grandezze necessarie all'analisi statistica si sono ottenute dalle relazioni:

$$H_s = 1,32H_{rms} \quad \text{Altezza significativa,}$$

$$T_s = \frac{T_p}{1,07} \quad \text{Periodo significativo.}$$

La tabella completa con i risultati dell'applicazione del metodo Jonswap è contenuta nell' **ALLEGATO 3**, mentre di seguito si mostrano le rappresentazioni grafiche di tali risultati.

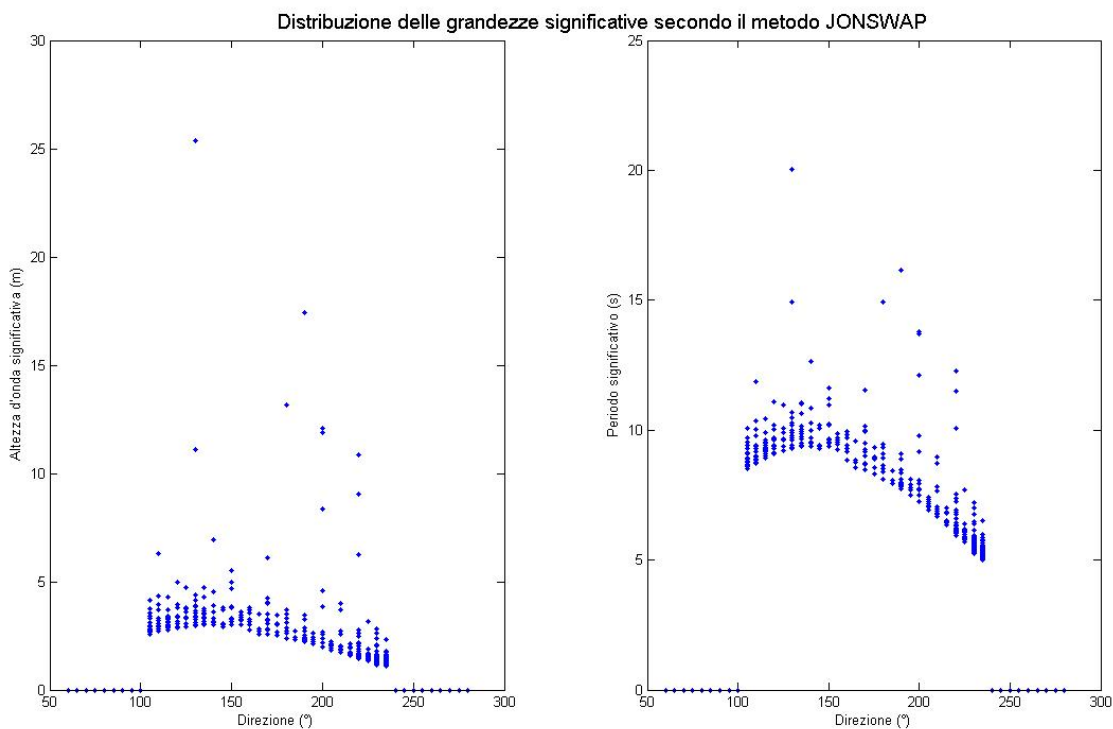


Figura 6 – Andamento delle grandezze significative in funzione della direzione ottenute col metodo Jonswap

Per l'analisi statistica sono state utilizzate le altezze significative risultate minori confrontando i due metodi, ovvero quelle derivate dall'applicazione del metodo SPM.

Successivamente, per ogni altezza significativa si sono individuati gli altri parametri caratterizzanti l'evento ondoso, ovvero:

$$T_p = 4,51\sqrt{H_s} \quad \text{Periodo di picco;}$$

$$T_s = 0,92T_p \quad \text{Periodo significativo;}$$

$$L_0 = 1,56T_s^2 \quad \text{Lunghezza d'onda al largo;}$$

$$H_b = \frac{H_s}{3,3 \left(\frac{H_s}{L_0} \right)^{1/3}} \quad \text{Altezza d'onda al frangimento;}$$

$$d_b = 1,28H_b \quad \text{Profondità di frangimento.}$$

I risultati sono contenuti nell'**ALLEGATO 4**.

Capitolo 3

STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DELLE ALTEZZE D'ONDA

1. Premessa

Per progettare in maniera adeguata le opere marittime occorre conoscere, con sufficiente approssimazione, il valore dell'altezza d'onda (H_s di progetto) che non sia superato in lunghi periodi di tempo futuro. Per far ciò si ricorre ai metodi propri della statistica.

Gli eventi di un processo stocastico, la cui intensità è caratterizzata da una variabile, risultano di regola separati da intervalli di natura deterministica o casuale. Nel caso in esame gli eventi sono le *mareggiate* o *eventi ondosi* e la variabile che li caratterizza è rappresentata dall' *altezza significativa massima nel corso della mareggiata*; se si considera, inoltre, la serie degli eventi che eccedono una soglia assegnata, l'intervallo tra tali eventi è di tipo casuale. Normalmente si assume che gli eventi siano distinti e stocasticamente indipendenti, cioè che l'intensità di eventi distinti sia indipendente, così come indipendenti siano gli intervalli tra gli eventi.

La stima dell'*altezza massima probabile* viene condotta nel modo seguente:

- definizione dell'evento (eccedenze sopra un determinato livello di soglia);
- scelta del campione degli eventi, caratterizzante tutti gli eventi statistici;
- valutazione della distribuzione di probabilità dell'altezza massima (verifica della adattabilità della distribuzione scelta al campione tramite confronto con altra distribuzione equivalente).

Il procedimento indicato prende il nome di **approccio probabilistico**, in quanto la variabile statistica in esame non ha un limite superiore entro cui il fenomeno può verificarsi come nell'approccio deterministico. Partendo dall'esame dei valori di altezza d'onda caratteristica, scelti come valori che superano un'assegnata soglia e stimati in un certo periodo di tempo, l'approccio probabilistico porta alla determinazione del valore massimo $H_{s_{max}}$ più probabile che si verificherà entro un certo tempo futuro. Le altezze d'onda sono, quindi, fornite in funzione del loro "**periodo di ritorno**", ovvero del tempo durante il quale esse possono essere uguagliate o superate mediamente una sola volta.

Ai fini di tali stime sono necessari lunghi periodi di osservazione del moto ondoso; quando questo non è possibile, si ricorre a valori delle altezze d'onda ottenuti mediante

l'applicazione dei metodi di ricostruzione indiretta del moto ondoso, partendo dai dati meteorologici (*modelli di hindcasting*). Come si è innanzi detto, questa è la procedura adottata nel presente studio, ricostruendo i valori di altezze d'onda dai dati meteorologici rilevati nel corso di 20 anni di osservazioni.

Scelto il campione di dati e considerata la frequenza cumulata, si procede successivamente all'estrapolazione dei dati secondo la funzione di distribuzione scelta, operazione che viene spesso condotta per via grafica utilizzando carte probabilistiche.

La scelta della distribuzione di probabilità con la quale elaborare il campione di dati non è un'operazione da sottovalutare. Non è in alcun modo scontato all'inizio del lavoro, che una distribuzione si adatti ai dati meglio di un'altra; la preferenza va, in genere, alle distribuzioni di Gumbell e Weibull, che hanno il notevole vantaggio di una agevole verifica ad occhio nudo grazie alla loro rappresentazione grafica lineare in scala logaritmica.

2. I dati per l'analisi degli estremi

Come già innanzi illustrato, il campione delle altezze d'onda significative per un'**analisi degli estremi** è estratto da ricostruzioni da dati meteorologici.

L'affidabilità della previsione dei valori estremi negli anni futuri è strettamente correlata all'accuratezza dei dati disponibili e al numero degli anni di registrazione.

In genere, le altezze possono essere estrapolate per periodi di ritorno intorno a 3 volte la lunghezza della registrazione. Pertanto, 20 anni di dati possono essere ragionevolmente usati per stimare le altezze d'onda con periodo di ritorno di 60 anni.

Ogni altezza significativa del campione statistico sta a rappresentare il massimo di un evento di mareggiata. Il campione di altezze significative costituisce così una serie di durata parziale rappresentativa dell'intera popolazione di dati nel sito.

3. Analisi dei valori estremi delle altezze significative

Per estrapolare i valori statistici stimati delle altezze d'onda sono proposte in letteratura numerose leggi o funzioni di distribuzione, tra cui le più usate e suggerite, tra l'altro, dall'AIPCN, sono:

- la *funzione di distribuzione di Fisher-Tippet I (Gumbel)*;
- la *funzione di distribuzione di Weibull*.

Non esiste una dimostrazione rigorosa che attesti l'adeguatezza di una distribuzione rispetto all'altra, per cui bisogna procedere, nel caso specifico, ad un esame dei dati disponibili e verificare la migliore adattabilità di essi all'uno o all'altro tipo di distribuzione.

Le suddette distribuzioni hanno il grosso vantaggio di una comoda rappresentazione grafica mediante relazioni lineari, cioè rappresentabili graficamente mediante una retta; da ciò deriva la facilità di estrapolare relazioni così configurabili.

In particolare si nota, in letteratura, l'uso preferenziale della distribuzione di Weibull per l'applicazione al moto ondoso, grazie alla sua tendenza a linearizzare i dati nella regione dei valori estremi, che è quella di maggiore interesse.

4. Funzioni di distribuzione di probabilità

Come già detto, per la valutazione delle altezze d'onda estreme, si verifica l'adattabilità di alcune distribuzioni al campione e si sceglie quella che meglio ad esso si adatta.

Se si rappresentano graficamente in scala logaritmica sia le frequenze statistiche che le funzioni di distribuzione di probabilità, la scelta è affidata al controllo visivo poiché tutte tali funzioni di probabilità sono rappresentate graficamente da rette o a tale andamento si avvicinano molto.

Per valutare i parametri della distribuzione con un metodo numerico si utilizza il *metodo della massima verosimiglianza* suggerito da Goda (1988): l'approccio consiste nel ricercare, fra cinque distribuzioni di probabilità selezionate ed applicate al campione di valori di altezze d'onda significativa, quella che meglio si adatta. Le distribuzioni scelte sono la **Fisher-Tippet I (Gumbel)** e le **Weibull** con parametro di forma compreso tra 0,75 e 2. Il metodo permette così di identificare la distribuzione che meglio rappresenta i dati di input.

Distribuzione di Fisher-Tippet I (Gumbel):

$$F(H_s \leq \hat{H}_s) = e^{-e^{-\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)}}$$

Distribuzione di Weibull:

$$F(H_s \leq \hat{H}_s) = 1 - e^{-\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)^k}$$

dove:

$F(H_s \leq \hat{H}_s)$ è la probabilità che H_s non superi il valore assegnato \hat{H}_s ;

H_s è l'altezza d'onda significativa;

\hat{H}_s è un valore dato dell'altezza d'onda significativa;

B è un parametro del sito;

A è un parametro di scala;

k è un parametro di forma ($k = 0,75; 1,00; 1,40; 2,00$ distintamente per ognuna delle distribuzioni scelte).

I dati di input vanno ordinati andando dai valori più alti ai più bassi; ad ogni altezza viene assegnata una probabilità (plotting position) data dalle espressioni:

$$F(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0,44}{N_T + 0,12}; \quad \text{Fisher-Tippet I (Gumbel)}$$

$$F(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0,20 - \frac{0,27}{\sqrt{k}}}{N_T + 0,20 + \frac{0,23}{\sqrt{k}}}; \quad \text{Weibull}$$

dove:

$F(H_s \leq H_{sm})$ è la probabilità che la 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 = 1,2,...,N_T;

N_T è il numero totale degli eventi durante la lunghezza della registrazione (dati disponibili).

Durante lo studio condotto si sono rappresentate graficamente in scala logaritmica le altezze significative in corrispondenza delle funzioni di distribuzione di probabilità. Questo è stato fatto per ogni campione di altezze significative compreso nel cono di 90° individuato da ogni direzione di propagazione interna al settore di traversia, e per tutte e cinque le distribuzioni di probabilità (una di Gumbel e quattro di Weibull). Dai grafici si è potuto constatare che le distribuzioni, plottate in scala logaritmica, seguono un andamento di tipo lineare. Pertanto, si è verificata l’adattabilità delle cinque distribuzioni ai dati calcolando, col metodo dei minimi quadrati, il coefficiente di determinazione R² e il coefficiente angolare e l’intercetta di ogni retta interpolante.

Il parametro R² confronta i valori previsti con quelli effettivi e può avere un valore compreso tra 0 e 1: se è uguale a 1, significa che esiste una perfetta correlazione, vale a dire, non sussiste alcuna differenza tra i valori previsti e i valori effettivi; se, invece, il coefficiente è uguale a 0, la regressione non sarà di alcun aiuto nella stima dei valori cercati.

Nel caso in esame si è scelta la distribuzione a cui corrispondeva il più alto coefficiente di determinazione.

I calcoli sono stati effettuati esplicitando le relazioni:

$$H_{sm} = \hat{A}y_m + \hat{B}, \quad \text{con } m=1,2,\dots, N_T$$

dove:

$$y_m = -\ln[-\ln F(H_s \leq H_{sm})] \quad \text{Fisher-Tippet I (Gumbel)}$$

$$y_m = \{-\ln[1 - F(H_s \leq H_{sm})]\}^{\frac{1}{k}} \quad \text{Weibull}$$

\hat{A} e \hat{B} = stima dei parametri di scala e di sito dall’analisi di regressione lineare.

Dall'analisi si è evinto che la funzione di distribuzione che meglio si adatta ai dati, per tutte le direzioni del settore di traversia, è quella di Weibull con $k=0,75$.

In Figura 7 si mostrano i grafici delle altezze significative in funzione delle rispettive probabilità di non superamento per la direzione di propagazione di 180°NE : la distribuzione di probabilità è quella di Weibull con parametri di forma pari a $0,75$, $1,00$, $1,40$ e $2,00$. Nei grafici sono state inserite anche le relative rette interpolanti. Si noti che in figura è evidenziato anche il coefficiente di determinazione R^2 , diverso a seconda del parametro di forma k utilizzato per la rappresentazione della distribuzione di probabilità.

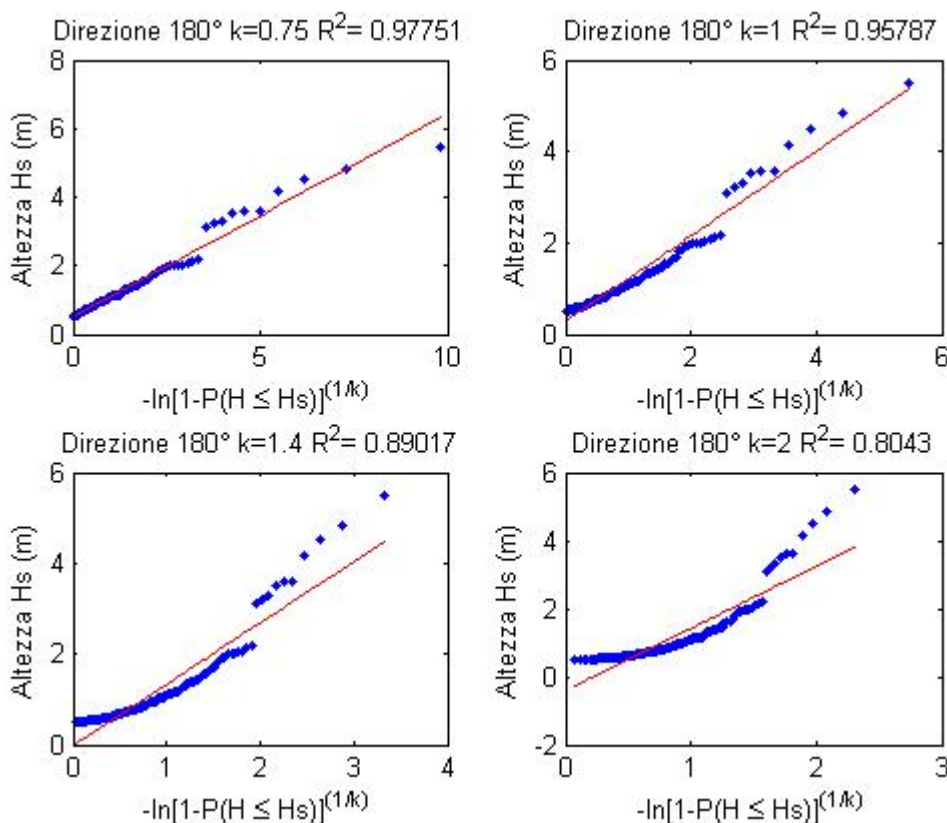


Figura 7 – Andamento delle altezze significative H_s in funzione delle probabilità di non superamento, secondo la distribuzione di Weibull, con parametri di forma $k=0,75$, $1,00$, $1,40$, $2,00$ per la direzione di 180°NE . In rosso è rappresentata la retta che meglio si adatta ai dati.

I grafici relativi a tutte le altre direzioni di propagazione del settore di traversia del paraggio sono contenuti nell' **ALLEGATO 5**.

5. Stima delle altezze in funzione del periodo di ritorno

Si definisce **periodo di ritorno** l'intervallo di tempo medio fra successivi eventi di ritorno durante il quale un evento di altezza d'onda significativa estrema possa essere eguagliato o superato.

Le altezze d'onda per un assegnato periodo di ritorno sono state calcolate dalle funzioni di distribuzione di probabilità mediante le seguenti equazioni:

$$H_{sr} = \hat{A}y_r + \hat{B}$$

dove:

H_{sr} è l'altezza d'onda significativa con periodo di ritorno T_r ;

$$y_r = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{\lambda T_r}\right)\right] \quad \text{Fisher-Tippet I (Gumbel)}$$

$$y_r = [\ln(\lambda T_r)]^{\frac{1}{k}} \quad \text{Weibull}$$

λ è il numero medio degli eventi per anno = $\frac{N_T}{K}$;

T_r è il periodo di ritorno (anni);

K è la lunghezza della registrazione (anni);

\hat{A} e \hat{B} = stima dei parametri di scala e di sito dall'analisi di regressione lineare.

Fissato un tempo di ritorno $T_r=60$ anni, pari a 3 volte la lunghezza della registrazione ($K=20$ anni) e, considerato che la distribuzione di probabilità che meglio si adatta alle serie dei dati è quella di Weibull con parametro di forma $k=0,75$, si sono calcolate le altezze d'onda significative relative ad ogni direzione del settore di traversia. I risultati ottenuti si elencano in Tabella 3.

La Figura 8 mostra, invece, la rappresentazione di tali risultati su assi cartesiani: in ascissa vi sono le direzioni, in ordinata le altezze significative stimate; in corrispondenza di ogni punto è indicata, inoltre, la probabilità di non superamento calcolata, per ogni altezza, mediante la funzione di distribuzione di Weibull, ovvero:

$$F(H_s \leq \hat{H}_s) = 1 - e^{-\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)^k} \quad \text{probabilità che l'altezza } \hat{H}_s \text{ non sia superata;}$$

\hat{H}_s = valore di altezza d'onda stimato per $T_r=60$ anni;

$k = 0,75$;

\hat{A} e \hat{B} = stimati dall'analisi di regressione lineare.

Direzione [°]	Stima Altezza significativa H [m] con $T_r=60$ anni
105	6,9699
110	6,9105
115	6,9976
120	6,9778
125	6,9473
130	7,1419
135	7,1869
140	7,1805
145	7,6064
150	7,5852
155	7,4334
160	7,3682
165	7,382
170	7,3487
175	7,3782
180	6,8408
185	6,5342
190	6,2537
195	6,2277
200	6,254
205	6,2817
210	6,1816
215	6,1888
220	6,1937
225	5,9606
230	5,8639
235	5,8693

Tabella 3 – Elenco delle altezze significative stimate per un periodo di ritorno $T_r= 60$ anni, per ogni direzione del settore di traversia

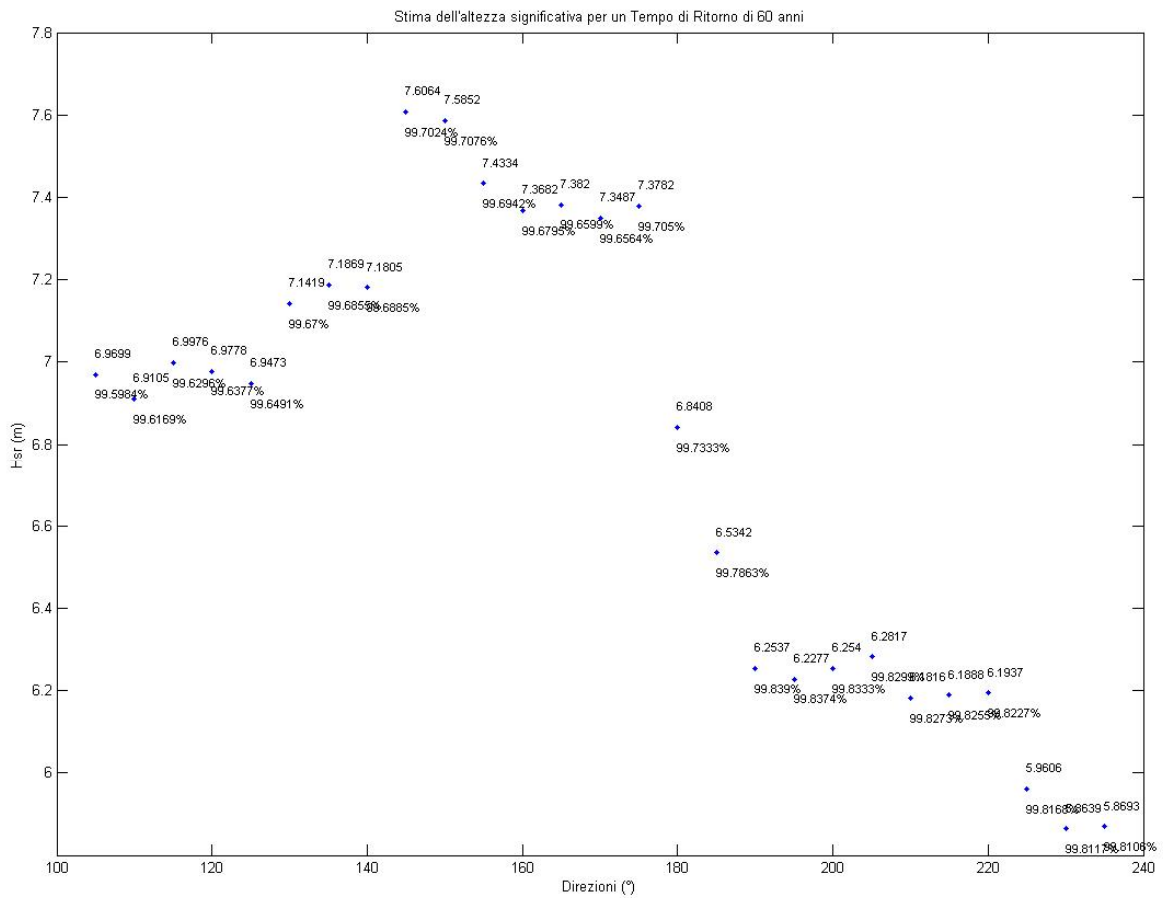


Figura 8 – Diagramma delle altezze significative per $T_r = 60$ anni, con indicazione della probabilità di non superamento

Successivamente, per ogni altezza significativa così determinata si sono individuati gli altri parametri caratterizzanti l'evento ondoso, ovvero:

$T_p = 4,51\sqrt{H_s}$ Periodo di picco;

$T_s = 0,92T_p$ Periodo significativo;

$L_0 = 1,56T_s^2$ Lunghezza d'onda al largo;

$H_b = \frac{H_s}{3,3\left(\frac{H_s}{L_0}\right)^{1/3}}$ Altezza d'onda al frangimento;

$d_b = 1,28H_b$ Profondità di frangimento.

I risultati numerici sono contenuti nell'**ALLEGATO 6**.

Capitolo 4

STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO E DELL'AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

1. Premessa

La fase più importante di questo studio idraulico marittimo riguarda la trasformazione delle condizioni ondometriche dal largo fin sottocosta ed in particolare all'interno del bacino portuale. E' noto infatti che le onde, avanzando da largo verso riva, subiscono trasformazioni dovute ai fenomeni di rifrazione e di frangimento; a questi si aggiungono i mutamenti dovuti alla diffrazione, fenomeno localizzato attorno alle testate delle opere foranee, il quale comporta la penetrazione di buona parte dell'agitazione ondosu all'interno dello specchio liquido protetto.

Nel presente capitolo, dopo una descrizione dei fenomeni suddetti, si presenta lo studio effettuato al fine della valutazione del campo di agitazione interna al bacino del porto di Portopalo di Capo Passero. L'analisi è stata effettuata per la configurazione attuale e per la configurazione prevista con il progetto definitivo.

2. Fenomeno di rifrazione

Le onde provenienti dal largo avanzano disposte secondo linee di cresta parallele tra loro ma non, in generale, alla linea di battigia.

Pertanto, un'onda può trovarsi contemporaneamente ad avere tratti di cresta che ricadono in acque a diversa profondità. Quando ciò accade, i diversi tratti si propagano con

celerità differenti e il fronte d'onda tende così a disporsi parallelamente alle linee di livello del fondale.

Il processo che descrive questo comportamento viene detto "**rifrazione**" ed è di grande interesse per la progettazione di opere marittime.

Gli effetti della rifrazione intervengono sulle profondità intermedie ed in acque basse, dove l'onda "sente" i fondali e non in acque profonde, nelle quali la celerità dell'onda non è condizionata dalla profondità.

Lo studio della rifrazione mira a determinare, partendo da un assegnato moto ondoso al largo, l'altezza delle onde in prossimità della battigia, l'andamento delle linee di cresta attraverso gli angoli che queste formano con le isobate, nonché la distribuzione dell'energia lungo la costa.

Le ipotesi normalmente assunte alla base di tale studio sono le seguenti:

1. il flusso di energia del moto ondoso trasmesso verso riva e compreso fra due "raggi" o "ortogonali d'onda" (linee perpendicolari a fronti d'onda) rimane costante (cioè è nullo il flusso dell'energia attraverso i predetti raggi);
2. le onde sono supposte lineari e monocromatiche (periodo costante): quest'ultima condizione comporta che, in un determinato tratto transiti, nello stesso tempo, un uguale numero di onde;
3. la batimetria è ritenuta variare gradualmente.

In acque profonde, il flusso medio di energia in un treno d'onda riferito al tratto di cresta tra due ortogonali poste alla distanza b_0 vale:

$$P_0 = E_0 b_0 \frac{1}{2} C_0$$

Tale flusso si ritrova fra le due stesse ortogonali alla distanza b , in acque basse:

$$P = EbnC$$

Pertanto:

$$\frac{1}{2} b_0 E_0 C_0 = nbEC;$$

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{2} \frac{1}{n} \frac{b_0}{b} \frac{C_0}{C}. \quad (1)$$

Tenendo presente che:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{E}{E_0}},$$

si ha:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{1}{n} \frac{b_0}{b} \frac{C_0}{C}} = K_s K_r.$$

L'ultima equazione consente di conoscere l'altezza d'onda a profondità decrescenti, noti l'altezza d'onda in acque profonde e la distanza b_0 fra ortogonali contigue.

La radice quadrata $\sqrt{\frac{b_0}{b}}$ è il **coefficiente di rifrazione** K_r , mentre la radice quadrata $\sqrt{\frac{C_0}{2nC}}$ è il coefficiente K_s di diminuzione del fondale, noto come **coefficiente di shoaling**.

L'espressione (1), insieme alla legge che individua l'angolo di rifrazione (le linee di propagazione d'onda sono assimilate a raggi luminosi monocromatici che viaggiano in un mezzo con indice di rifrazione variabile secondo la legge di Snell), consente il tracciamento del piano d'onda, cioè del grafico costituito da un reticolo rappresentante un sistema di linee ortogonali (creste e raggi) sovrapposte alla batimetrica del paraggio.

Il coefficiente K_s può essere ricavato in funzione del rapporto $\frac{d}{L}$ mediante tabelle e grafici forniti da vari manuali.

Analogamente il coefficiente K_r può ricavarsi facilmente mediante grafici o direttamente in base alla legge di Snell:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_0} = \left(\frac{C}{C_0} \right)$$

da cui si ricava:

$$\sin \alpha = \frac{C}{C_0} \sin \alpha_0,$$

dove α_0 ed α indicano gli angoli formati dalle creste d'onda con le isobate rispettivamente in acqua profonda e in profondità finite.

Poiché α_0 è noto, individuati i rapporti tra le celerità, si ricava:

$$\alpha = \arcsin\left(\sin \alpha_0 \frac{C}{C_0}\right)$$

e si individua quindi:

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}}.$$

In ogni punto, per onde provenienti dal largo secondo le diverse direzioni del moto ondoso che si hanno nel paraggio, si possono calcolare i coefficienti K_r , K_s e, quindi, i valori $H = K_r K_s H_0$ che interessano maggiormente la progettazione di opere marittime, cioè quelli corrispondenti alle altezze d'onda di diversa provenienza, in corrispondenza dell'opera.

3. Fenomeno di diffrazione

Per la valutazione dello stato di agitazione interno ad uno specchio liquido riveste particolare importanza il fenomeno della **diffrazione**.

Si definisce genericamente diffrazione il processo che conduce alla esistenza di un moto ondoso nella zona d'ombra a valle di un ostacolo, di dimensioni finite, che intercetta un treno d'onde incidenti.

La diffrazione avviene con trasferimento di energia in direzione parallela alle creste dell'onda. Infatti, se non vi fosse tale trasferimento di energia, le onde che oltrepassano, ad esempio, la testata di una struttura frangiflutti consentirebbero l'esistenza di una regione di perfetta calma nella zona sottoflutto, mentre a lato della testata procederebbero senza cambiare né forma né altezza.

Il calcolo degli effetti della diffrazione è importante per numerosi motivi. La distribuzione dell'altezza d'onda in un porto o in una baia riparata è determinata in qualche modo dalle caratteristiche della diffrazione dovuta alla presenza di strutture naturali o artificiali che proteggono lo specchio dalle onde incidenti. Pertanto, la conoscenza dei processi di diffrazione è essenziale nella progettazione; in particolare, per ubicare correttamente le varie zone del bacino portuale, nonché per ridurre i problemi dell'insabbiamento e della risonanza di un porto.

Le ipotesi generalmente adottate nell'approccio teorico al fenomeno della diffrazione sono quelle utilizzate per lo studio delle onde bidimensionali, tenendo presente che nel caso in esame le onde risultano tridimensionali.

Il calcolo della diffrazione presenta maggiori difficoltà rispetto a quelle che si incontrano nel calcolo della rifrazione. Esistono, comunque, dei metodi che agevolano tale compito come il metodo grafico di Iribarren, di frequente impiego grazie alla sua semplicità e generalità.

Il metodo si fonda sulle seguenti considerazioni:

- l'onda dal largo trasmette energia, e quindi agitazioni, alla zona a ridosso attraverso il confine, detto limite di espansione, che individua la zona d'ombra geometrica;
- l'energia viene prelevata da una zona di alimentazione, il cui limite verso il largo è costituito da una semiretta inclinata a 45° rispetto alla direzione di propagazione del moto ondoso e con vertice distante una lunghezza d'onda dalla testata dell'ostacolo;
- l'onda dal largo diffonde la suddetta energia nella zona di agitazione che presenta una larghezza uguale a quella della zona di alimentazione. La curva che costituisce il limite di agitazione si ottiene, pertanto, misurando le larghezze lungo i fronti dell'onda incidente (segmenti rettilinei) e lungo i fronti dell'onda diffratta (circonferenze concentriche con centro O nell'estremo della testata);
- l'altezza d'onda decresce da $2 \cdot a$ (limite di alimentazione) a O (limite di agitazione) con legge sinusoidale funzione della distanza misurata lungo il fronte.

La costruzione grafica è riportata in Figura 9.

La legge di variazione dell'altezza d'onda secondo Iribarren soddisfa all'uguaglianza dell'energia ceduta dalla zona di alimentazione alla zona di agitazione.

Nel caso dell'imboccatura di un porto aperto alla traversia, il metodo grafico proposto dall'Iribarren può ancora essere applicato, a condizione che si tenga conto della doppia espansione laterale che l'onda subisce nelle due zone d'ombra geometrica a tergo delle opere foranee.

Considerando due frangiflutti semidefiniti F_1 , F_2 ed un'onda incidente con direzione, ad esempio, normale ad F_2 , il moto ondoso nella sua propagazione incontra prima la testata di F_1 ed intorno ad essa ha inizio una prima espansione laterale (vedi Figura 10). Nel

procedere oltre incontra la testata di F_2 e si determina intorno ad essa una seconda espansione. Fino a quando l'agitazione ondosa non sia giunta nella posizione contrassegnata dalle lettere $C' A' F' R' B' D'$, l'altezza d'onda nei diversi punti del fronte è ricavabile mediante la costruzione per il caso della espansione semplice. In particolare l'altezza d'onda in F e in R risulta uguale a $2 \cdot a$.

Dopo che le semirette delle linee di alimentazione si incrociano, la costruzione indicata per la diffrazione semplice non è più sufficiente ad individuare l'altezza d'onda ed occorre fare riferimento al principio di conservazione dell'energia. Assumendo che l'energia propria dell'onda, in una posizione successiva a quella passante per P, sia pari a quella posseduta dall'onda nella posizione originaria $A_0 B_0$, è possibile valutare l'altezza media H_m dell'onda in corrispondenza della posizione $C'' D''$ nel seguente modo:

$$H_m = H_i \sqrt{\frac{A_0 B_0}{C'' D''}}$$

L'altezza media dell'onda che avanza diminuisce, perciò, in proporzione alla radice quadrata dell'allungamento del suo fronte.

Lungo il fronte l'altezza aumenta dal valore zero in corrispondenza degli estremi al massimo valore H_{max} che si verifica nel punto P'' e che vale:

$$H_{max} = \sqrt{2} H_m$$

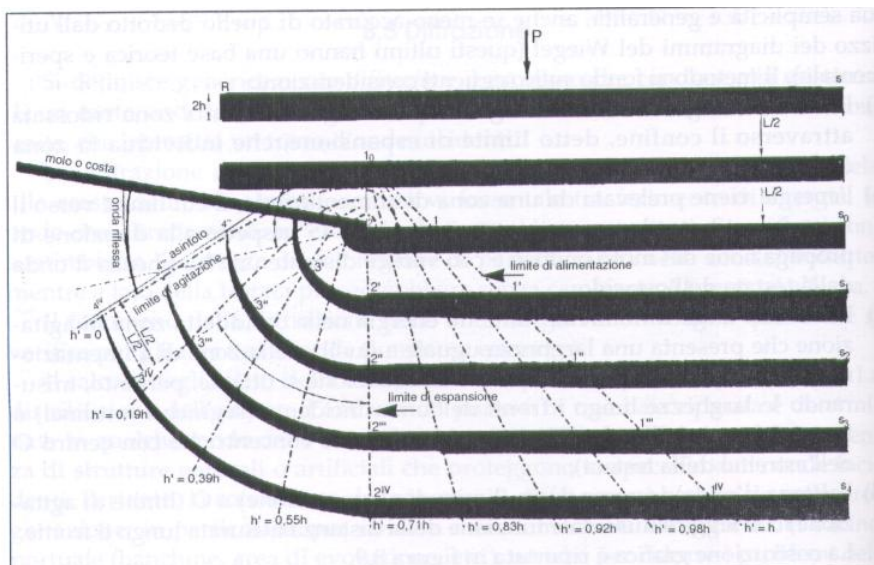


Figura 9 – Piano dell'onda diffratta in fondale costante o indefinito

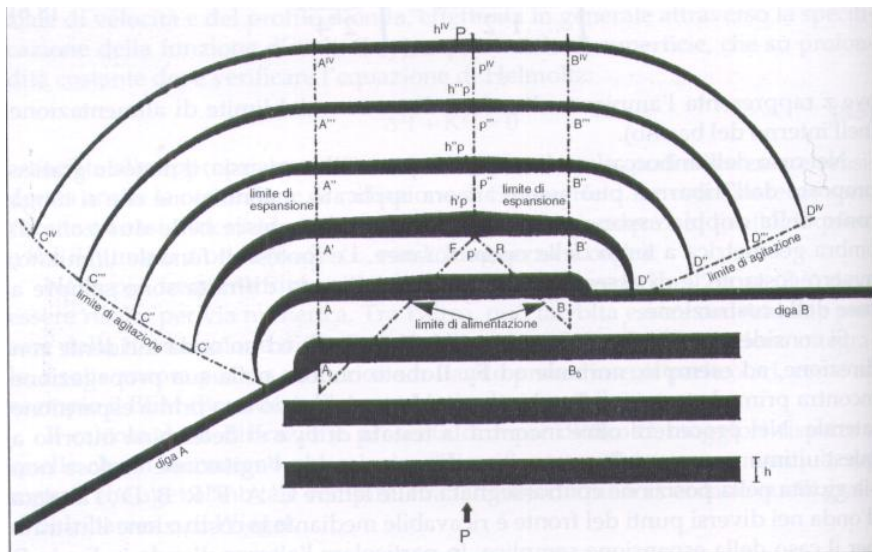


Figura 10 – Doppia diffrazione in corrispondenza dell'imboccatura di un porto

4. Fenomeno di riflessione

L'onda incidente su una parete verticale si riflette dando luogo ad un'onda che si propaga in verso opposto (onda riflessa). Nello specchio acqueo antistante l'ostacolo si genera quindi uno stato di agitazione ondosa ben più evidente di quello che compete all'onda incidente.

Lo studio della riflessione, che viene condotto in base alle leggi dell'ottica, è quindi importante sia per le sollecitazioni indotte sulle strutture, sia per quanto attiene all'efficienza dei porti in termini di smorzamento delle perturbazioni.

Il fenomeno, per determinati valori della profondità al piede della parete e dell'angolo di incidenza dell'onda, si manifesta con una serie di oscillazioni del livello liquido intorno a punti fissi, senza propagazione, con sopralzamento del livello stesso.

La riflessione di un'onda può essere parziale; in tal caso, l'energia che compete all'onda riflessa è minore di quella posseduta dall'onda incidente.

In generale, tenuto presente la proporzionalità fra energia e quadrato dell'altezza d'onda, si considera il seguente bilancio energetico:

$$H_i^2 = H_r^2 + H_t^2 + H_p^2$$

dove H_i è l'altezza d'onda incidente, H_r l'altezza d'onda riflessa, H_t l'altezza d'onda trasmessa al di là dell'ostacolo ed H_p quella dissipata dall'ostacolo.

Il rapporto fra l'altezza dell'onda incidente e quella dell'onda riflessa prende il nome di coefficiente di riflessione:

$$K_r' = \frac{H_r}{H_i}$$

Il coefficiente di riflessione, a parità di altre condizioni, dipende dall'angolo di inclinazione dell'ostacolo (manufatto). In generale, l'agitazione risultante è pari a $(1 + K_r)H_i$ e nel caso di riflessione totale, $2H_i$ (condizione più gravosa per una struttura).

Le pareti verticali impermeabili riflettono, sostanzialmente per intero, l'energia dell'onda incidente a meno che non siano protette da scogli o siano molto rugose. Di conseguenza esse presentano un coefficiente di riflessione prossimo ad 1.

4.1. Riflessione in un bacino chiuso: Risonanza o risacca

Per comprendere il fenomeno della risonanza che si osserva nei porti e in altri bacini d'acqua chiusi considerati a fondo orizzontale, occorre esaminare il sistema di onde stazionarie. Le possibili oscillazioni di risonanza possono essere individuate ponendo due pareti verticali agli antipodi; per esempio, se le pareti sono poste a $x=0$ ed $x=\pi$, la risonanza si produce per $L_b = \frac{L}{2}$, dove L_b è la lunghezza del bacino ed L la lunghezza d'onda dentro il bacino.

La risonanza si ha inoltre quando le pareti si trovano in corrispondenza di $x=0$ ed $x=2\pi$, cioè per $L_b = L$. In generale si ha risonanza per: $L_b = j\frac{L}{2}$, con $j = 1,2,3\dots$. In realtà, la lunghezza dell'onda di risonanza contenuta nel bacino è variabile, quindi il valore:

$$L = 2\frac{L_b}{j} \quad j=1,2$$

può essere assunto per definire le lunghezze d'onda capaci di causare la risonanza in un bacino di lunghezza L_b .

Inoltre, la risacca si ha quando il periodo dell'onda incidente è uguale o si discosta poco da quello naturale di un porto.

5. Analisi della propagazione del moto ondoso e dell'agitazione interna al bacino portuale

Il presente studio è stato finalizzato a valutare le dinamiche di propagazione del moto ondoso, le caratteristiche dello stesso sottocosta e lo stato di agitazione interna al bacino del porto di Portopalo, nelle condizioni di stato attuale e di progetto.

L'analisi è stata condotta utilizzando il modulo BW, Boussinesq Waves, del codice di calcolo bidimensionale MIKE 21, software specialistico di cui la FN Progettazioni possiede regolare licenza d'uso.

Il BW, basato su opportuni modelli matematici, è un codice di simulazione che consente di determinare le onde perturbative nei porti, in bacini chiusi e in aree costiere, dovute alla penetrazione di onde irregolari lunghe e corte. Il modello è in grado di simulare anche le correnti generate dalle onde, il frangimento, il run up e tutti i fenomeni fondamentali di propagazione delle onde (rifrazione, attrito col fondo, diffrazione, riflessione) che è

necessario conoscere a supporto della progettazione e dell'ottimizzazione del layout portuale.

Nel caso in esame, a partire dal clima ondoso caratteristico, sono state individuate una serie di onde significative per il bacino, per le quali sono stati calcolati con il modello numerico i valori di altezza residua e di disturbo all'interno del bacino portuale.

In particolare, dallo studio idraulico marittimo le onde più gravose sono risultate essere quelle corrispondenti alle direzioni di 130°NE, di 190°NE e di 220°NE con caratteristiche riportate in Tabella 4.

Le onde sono state immesse nel dominio di calcolo sotto forma di vettori tempovarianti del flusso in ingresso e attraverso linee di generazione definite in modo tale da proiettare nel dominio di calcolo tutte le componenti direzionali dello spettro di onde (a tal fine si è impostato uno spread direzionale di 20°).

Le linee di generazione d'onda (una per la direzione 130°NE, una per 190°NE e due per la direzione 220°NE) sono state posizionate a circa 2 Km dalla costa e a circa 1,2 Km dal molo di sopraflutto di levante e inclinate di 60° rispetto al Nord geografico. La seconda linea per la direzione di 220°NE è ortogonale alla prima.

Per poter procedere alle simulazioni si sono definite le caratteristiche di porosità delle opere (si veda la Tabella 5), il grado di assorbimento della costa e la geometria del porto; inoltre, in riferimento alla batimetria sono stati inseriti i dati ricavati dai rilievi batimetrici.

	Direzione [°]	Altezza significativa Hm0 [m]	Periodo di picco Tp [s]	Periodo medio Tm [s]	Lunghezza d'onda al largo max Lo [m]	Altezza d'onda di frangimento [m]	Profondità di frangimento [m]
Onda n° 1	130	6,3	6,9	5,2	74,87	4,35	5,5
Onda n° 2	190	5,5	6,6	4,9	67,19	3,83	4,7
Onda n° 3	220	4,8	6,2	4,7	60,61	3,40	4,0

Tabella 4 – Onde più gravose risultate dal metodo SPM

Tratto	Tipologia	Criflessione
--------	-----------	--------------

Molo sopraflutto lato esterno (levante)	Scogliera in massi (2:3)	0,3
Molo sopraflutto lato interno (levante)	Scogliera in massi (1:1)	0,5
Molo sottoflutto lato esterno	Scogliera in massi (2:3)	0,4
Molo sottoflutto lato interno	Cassoncini antiriflettenti	0,2
Banchina di ripa	Cassoncini antiriflettenti	0,2
Molo di ponente -lato esterno	Scogliera in massi (2:3)	0,3
Molo di ponente - lato interno	Scogliera in massi (1:1)	0,5

Tabella 5 – Coefficienti di riflessione

Lo studio è stato realizzato per lo stato attuale e per la configurazione di progetto assumendo un periodo di simulazione pari ad un'ora.

I risultati dell'elaborazione sono riportati sotto forma di livello del mare, di valori di altezze d'onda residue e dei rispettivi coefficienti di disturbo: il **coefficiente di disturbo** in un punto è definito come il rapporto tra l'altezza d'onda in quel punto e l'altezza d'onda incidente in ingresso al dominio di calcolo.

Le figure che seguono evidenziano i risultati per la direzione di propagazione 220°NE.

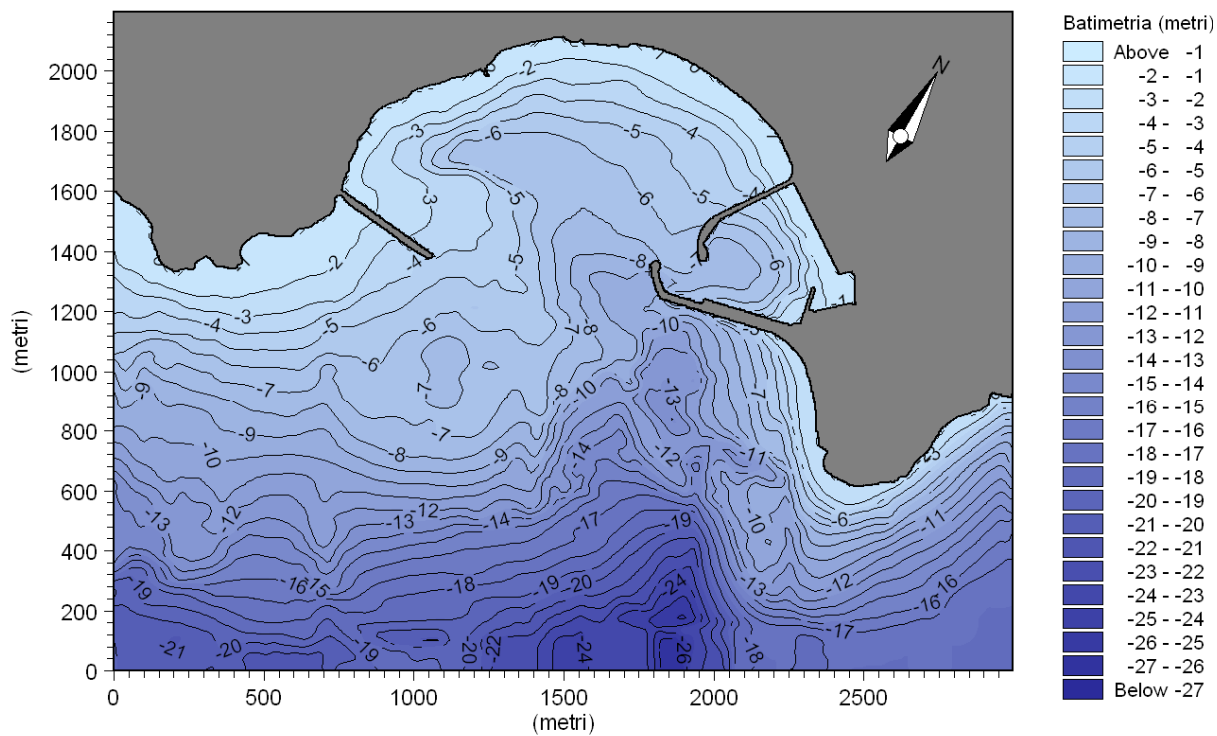


Figura 11 - Batimetria

STATO ATTUALE
 Direzione di propagazione 220°NE

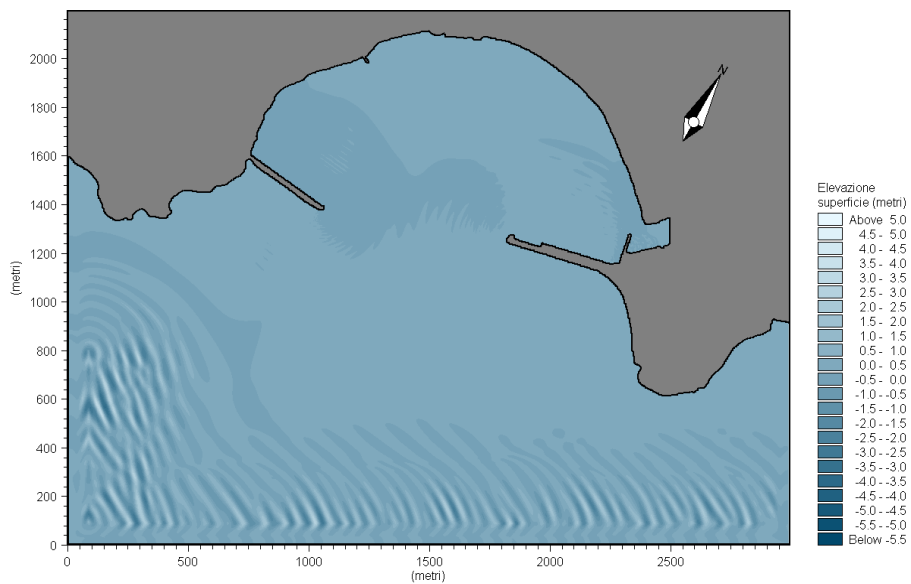


Figura 12 – Livello del mare al tempo t=2 minuti

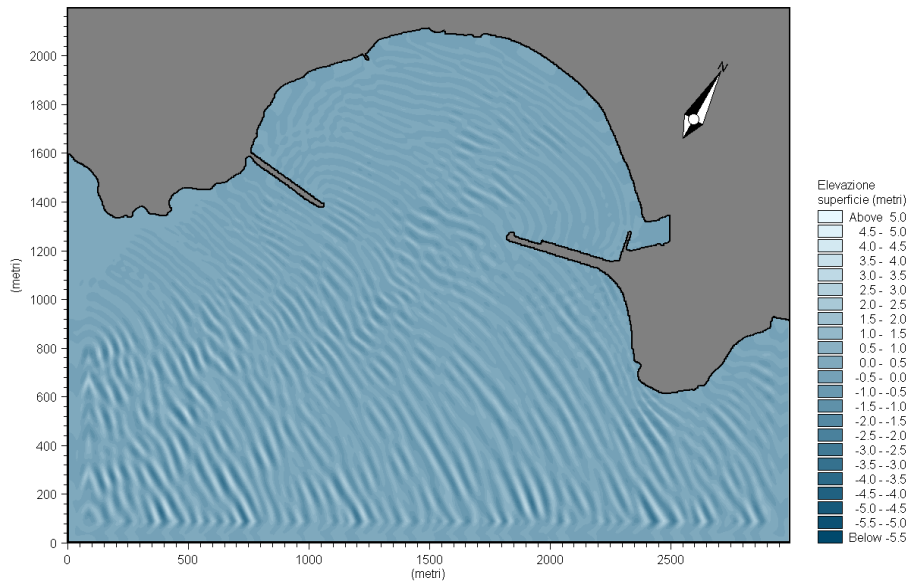


Figura 13 – Livello del mare al tempo t=60 minuti

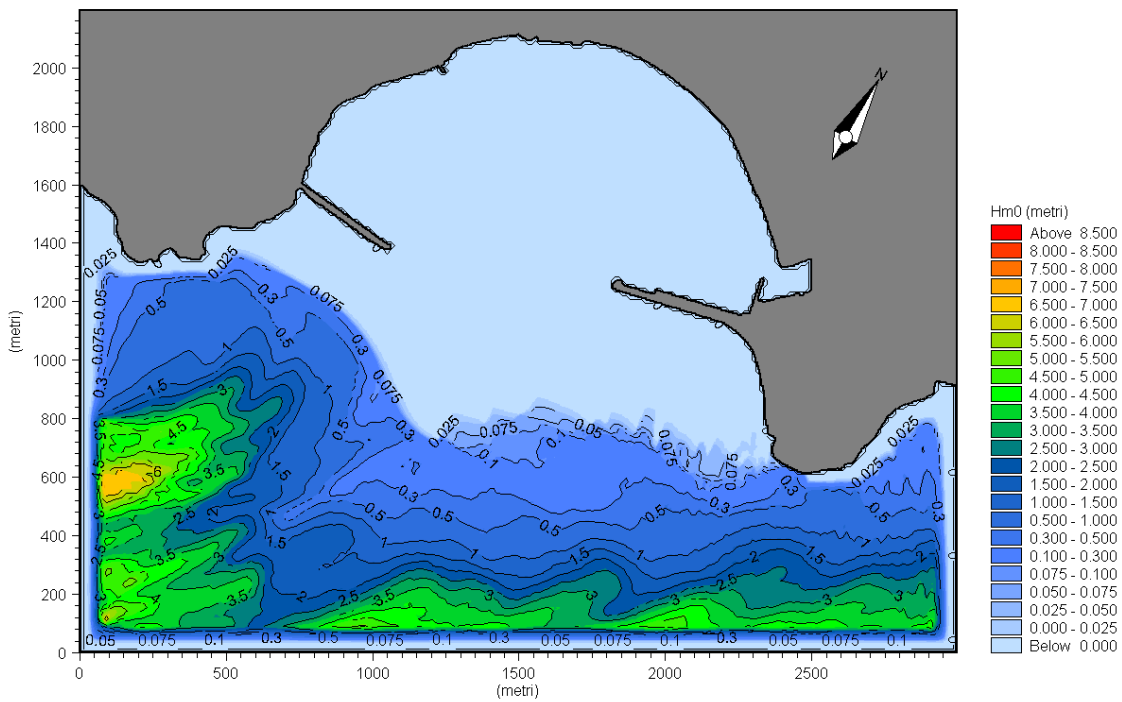


Figura 14 – Altezza d'onda significativa al tempo t=2 minuti

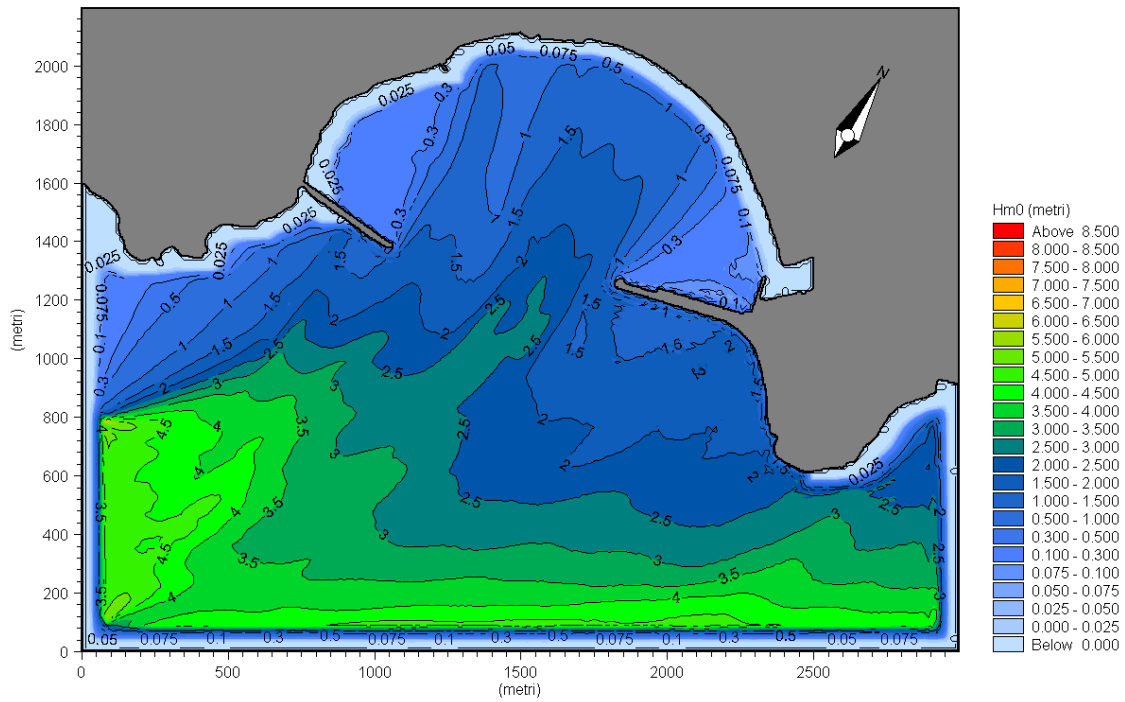


Figura 15 – Altezza d’onda significativa al tempo $t=60$ minuti

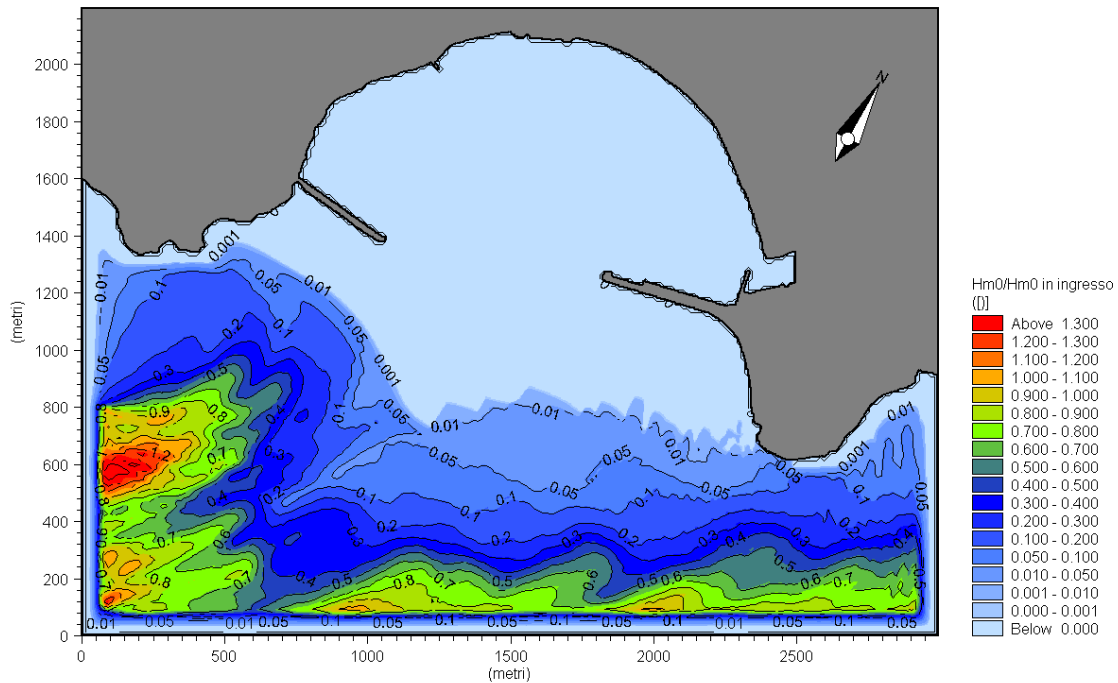


Figura 16- Coefficiente di disturbo al tempo $t=2$ minuti

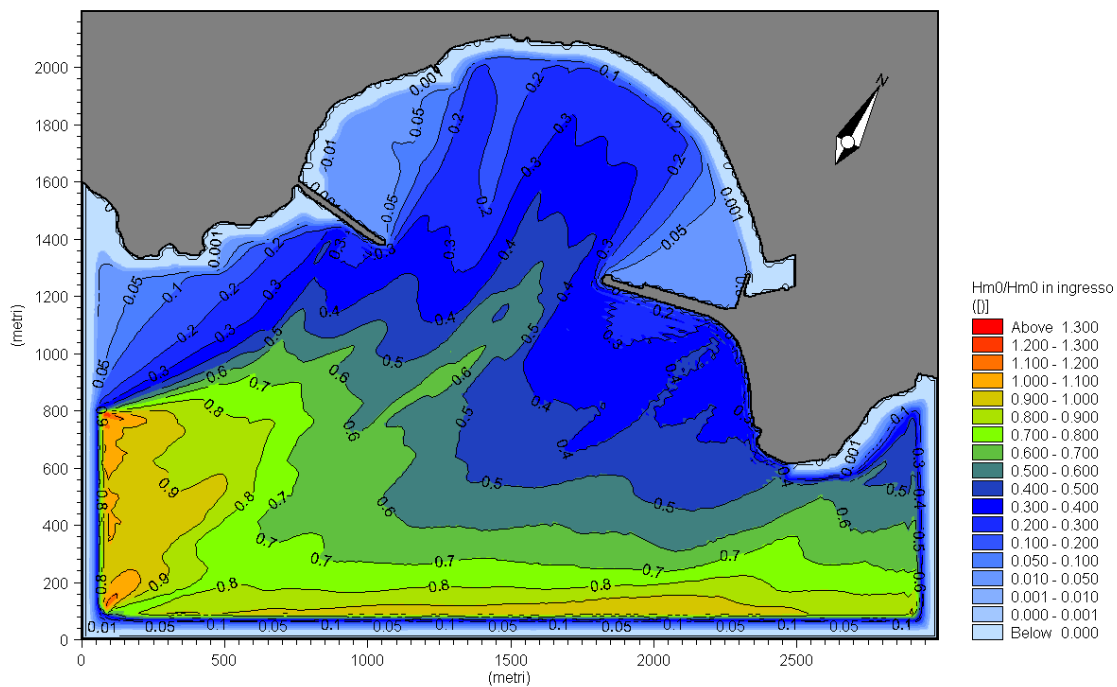


Figura 17 - Coefficiente di disturbo al tempo $t=60$ minuti

STATO DI PROGETTO
 Direzione di propagazione 220°NE

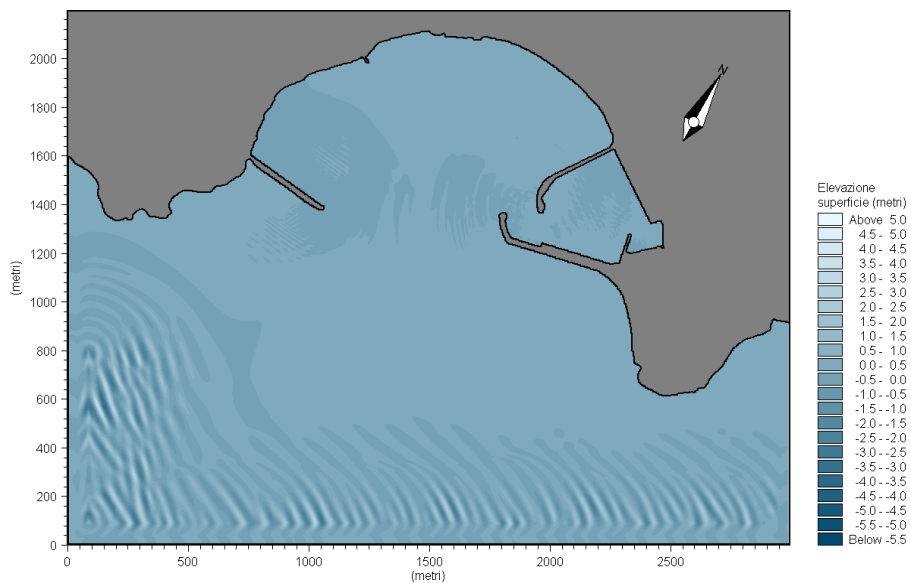


Figura 18 - Livello del mare al tempo $t=2$ minuti

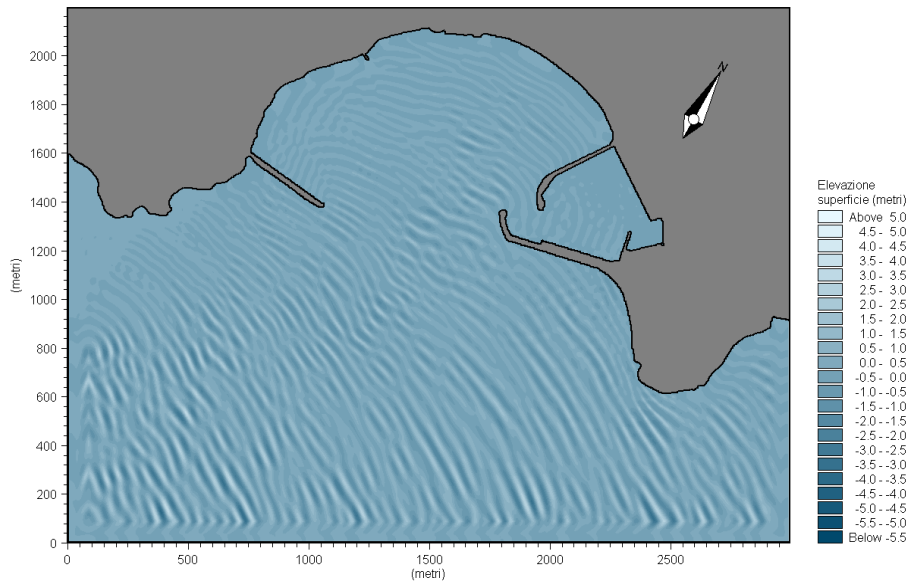


Figura 19 - Livello del mare al tempo t=60 minuti

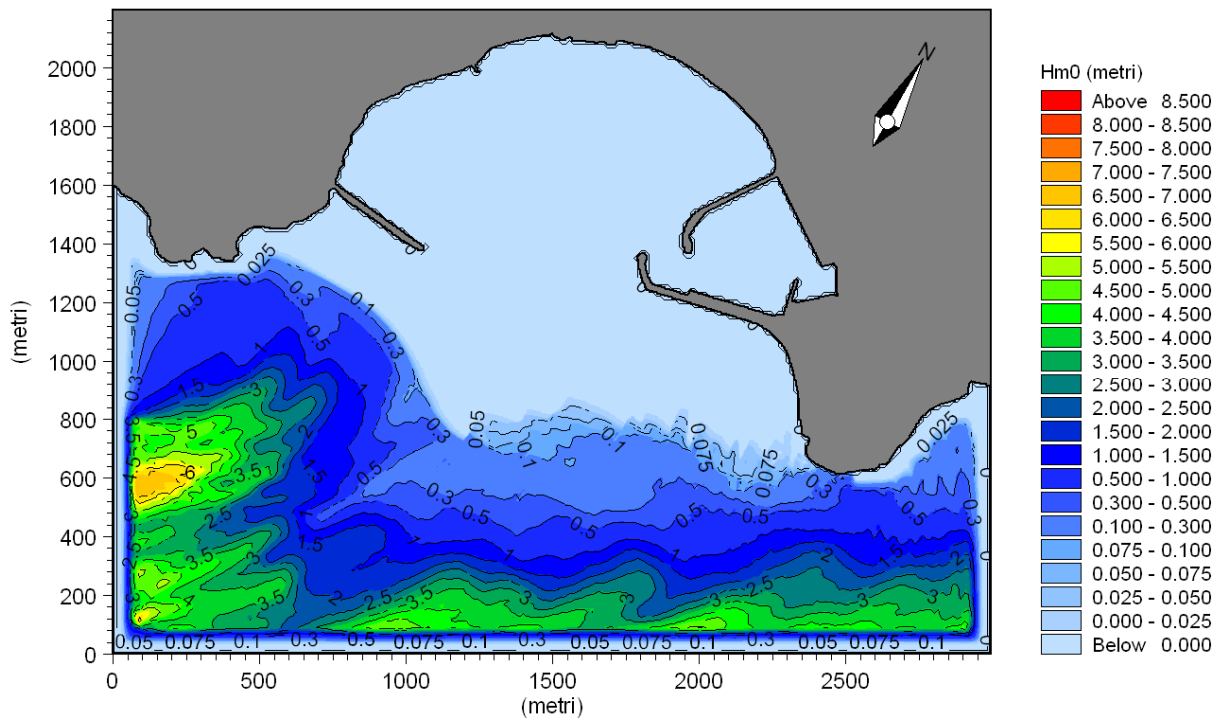


Figura 20 - Altezza d'onda significativa al tempo t=2 minuti

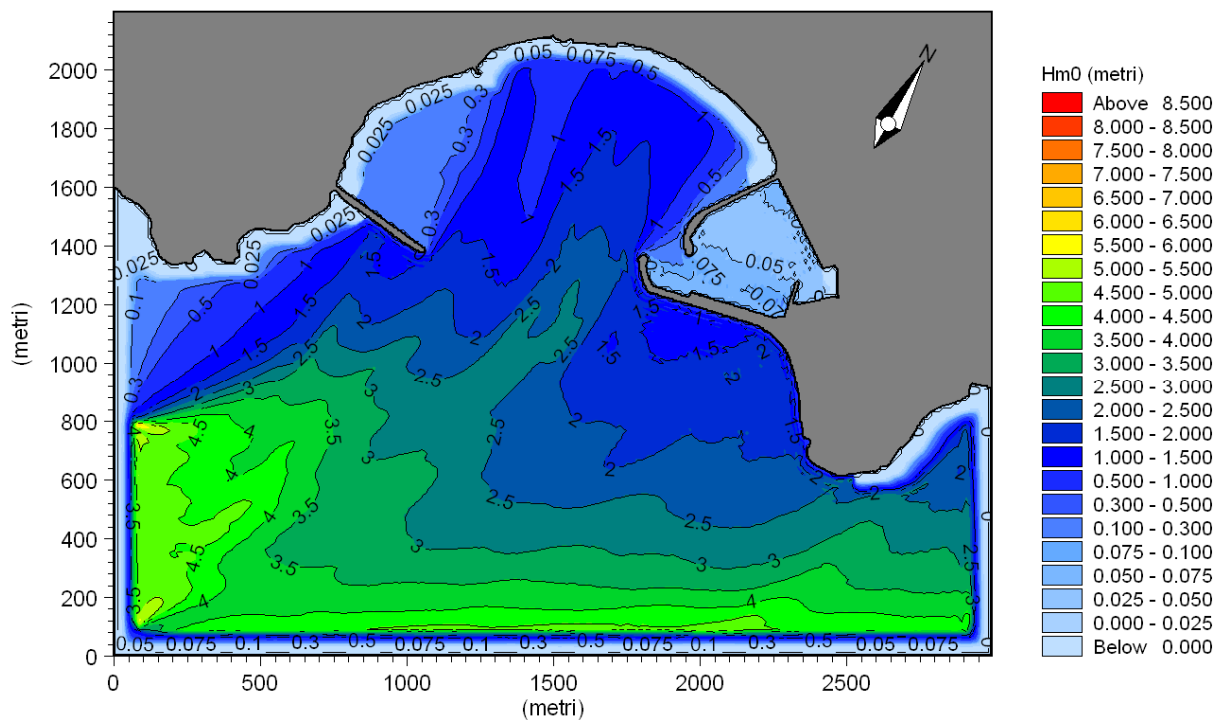


Figura 21 - Altezza d’onda significativa al tempo t=60 minuti

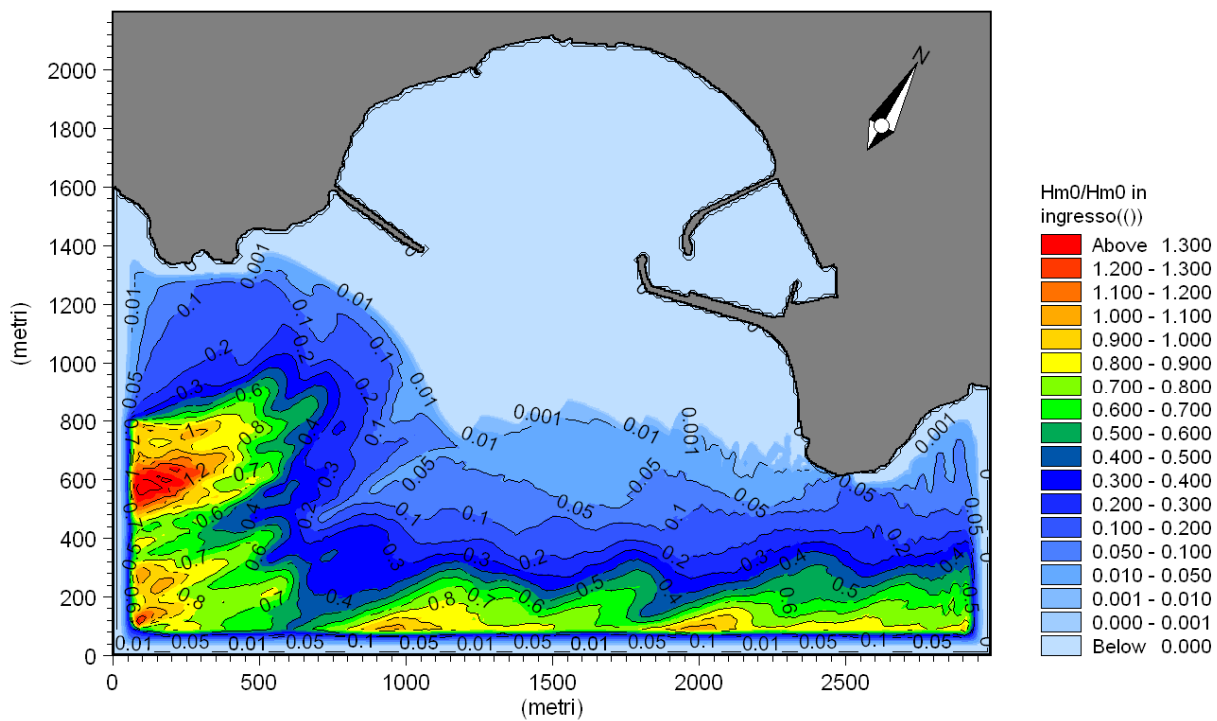


Figura 22 - Coefficiente di disturbo al tempo t=2 minuti

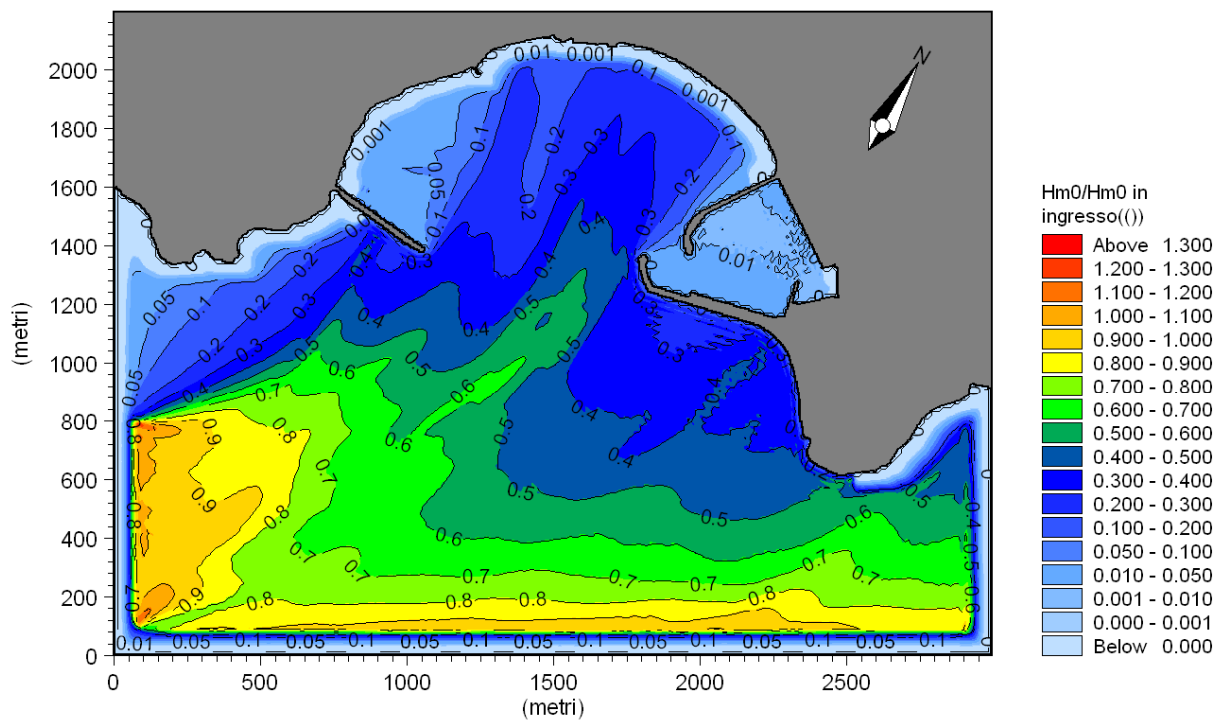


Figura 23 - Coefficiente di disturbo al tempo t=60 minuti

Nelle figure seguenti sono riportati i valori di altezza significativa e i coefficienti di disturbo al tempo t=60 minuti nell'area di intervento, rispetto alle due configurazioni; le zone contrassegnate dal cerchio e dal rettangolo sono quelle in cui i valori sono stati messi a confronto.

STATO ATTUALE

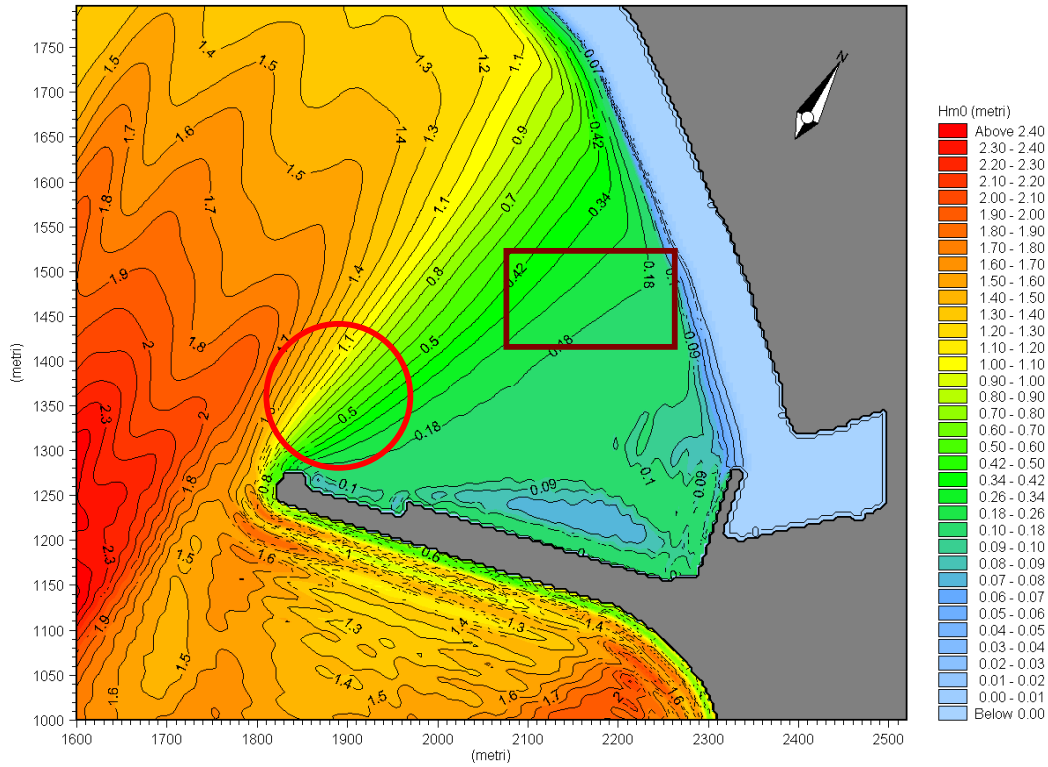


Figura 24 – Altezza d’onda significativa nell’area di intervento al tempo t=60 minuti

STATO DI PROGETTO

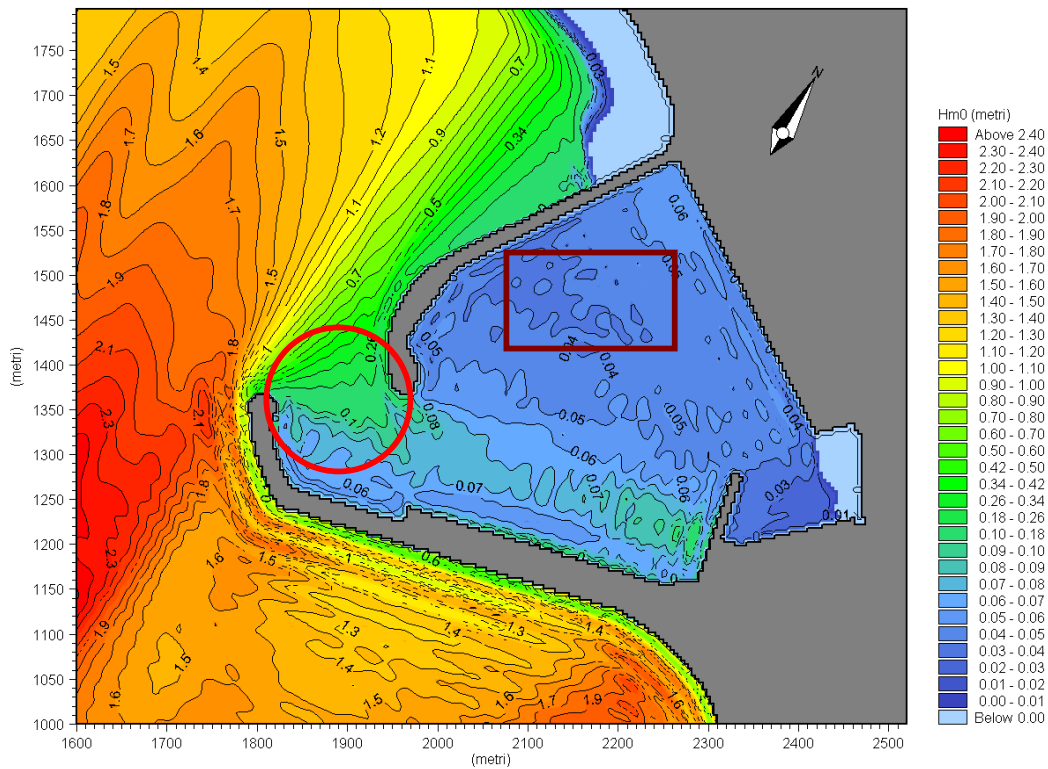


Figura 25 - Altezza d'onda significativa nel bacino portuale al tempo t=60 minuti
STATO ATTUALE

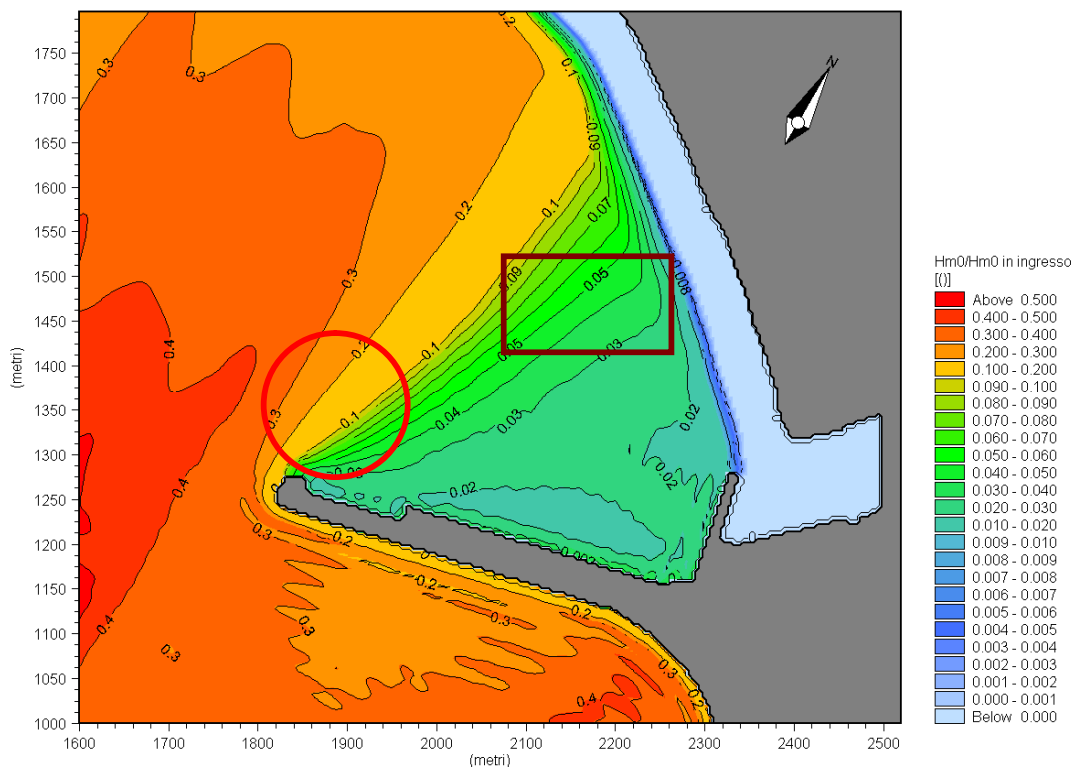


Figura 26 – Coefficiente di disturbo nell'area di intervento al tempo t=60 minuti

STATO DI PROGETTO

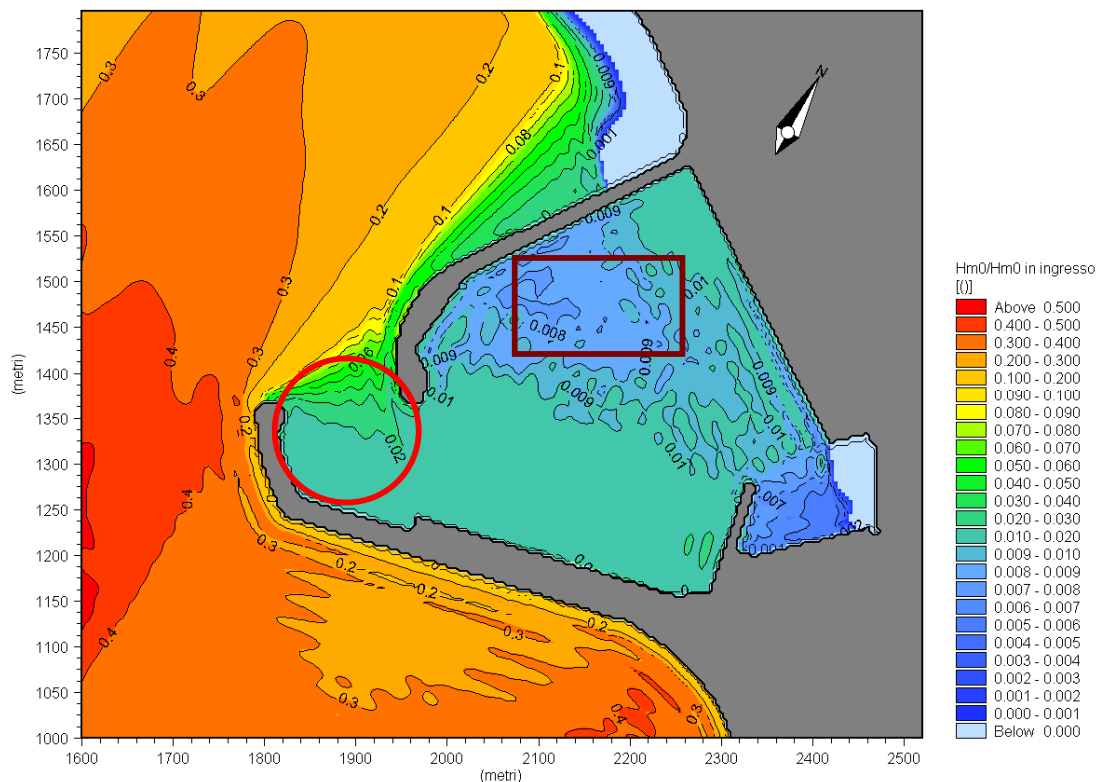


Figura 27 - Coefficiente di disturbo nel bacino portuale al tempo t=60 minuti

Dai risultati si evince che, in presenza di una mareggiata proveniente da una direzione di 220°NE con altezza d'onda significativa di 4,8 m e periodo di picco di 6,2 secondi, si ha nella zona dell'imboccatura (contrassegnata dal cerchio in rosso) un'altezza d'onda residua pari a 0,48 m nella configurazione attuale e a circa 0,09 m nella configurazione di progetto. I coefficienti di disturbo risultano pari a 0,1 e 0,02 rispettivamente.

Nella zona in prossimità del molo di sottoflutto, contrassegnata dal rettangolo, si ha, invece, un'altezza d'onda residua di 0,24 m nello stato attuale e di 0,04 nello stato di progetto con coefficienti di disturbo pari a 0,05 e a 0,008 rispettivamente.

I due layout sono stati confrontati anche per le direzioni di propagazione dell'onda incidente 130°NE e 190°NE, ottenendo i risultati mostrati in Tabella 6.

Direzione onde [°]	Hm0 in ingresso [m]	Zona	Hm0 stato attuale [m]	Hm0 stato di progetto [m]	Cdisturbo stato attuale	Cdisturbo stato di progetto
130	6,3	Imboccatura	0,25	0,08	0,04	0,013
		Area prossima al molo sottoflutto	0,09	0,012	0,015	0,002
190	5,5	Imboccatura	0,44	0,08	0,08	0,014
		Area prossima al molo sottoflutto	0,14	0,044	0,025	0,008
220	4,8	Imboccatura	0,48	0,096	0,1	0,02
		Area prossima al molo sottoflutto	0,24	0,04	0,05	0,008

Tabella 6 – Confronto delle altezze residue e del disturbo nell'area di intervento relativamente alla configurazione attuale e a quella di progetto

Tutti i risultati delle elaborazioni effettuate sono riportati nelle Tavole 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7.

5.1. Conclusioni

Lo studio della penetrazione del moto ondoso e delle agitazioni in corrispondenza dell'area di intervento ha messo in evidenza che, nella situazione attuale, il bacino a ridosso del molo foraneo esistente non risulta abbastanza protetto dalle mareggiate pro-

venienti dal II e III quadrante. Questo influenza negativamente sia la navigabilità all'imboccatura che l'ancoraggio delle imbarcazioni.

Per migliorare le condizioni di agitazione interna è stata definita una nuova configurazione portuale che prevede il prolungamento del molo esistente e la sistemazione di un molo di sottoflutto al fine di realizzare uno specchio liquido protetto da destinare all'uso diportistico-peschereccio.

Lo studio idraulico marittimo e l'analisi dell'agitazione interna al bacino hanno consentito di definire la giacitura e lo sviluppo delle opere foranee; per le mareggiate più gravose sono stati calcolati i valori delle altezze d'onda residue per lo stato attuale e per la configurazione di progetto: dallo studio si evince che la soluzione progettuale soddisfa le esigenze di sicurezza per lo specchio acqueo ridossato dalle opere.

I risultati sono desunti dal confronto tra lo stato di agitazione in due zone significative nella configurazione attuale e in quella di progetto.

Dall'esame dei valori di altezza d'onda residua in corrispondenza dei marosi più significativi si evince, nella configurazione attuale, un valore massimo all'imboccatura pari a 0,48 m che si riduce a 0,096 m nella configurazione di progetto.

Dalla Tabella 6 si può notare, inoltre, come nel layout di progetto, il valore di altezza d'onda si abbatta notevolmente rispetto a quello dello stato attuale anche nell'area in prossimità del molo di sottoflutto.

Tali valori dello stato di agitazione consentono di assicurare gli standard per un porto turistico-peschereccio.

Bibliografia

- NOLI A. 1979 – Corso di costruzioni marittime – Oceanografia Applicata La Gioliardica, Roma
- ING. GUIDO BENNASSAI – Corso su regime e protezione dei litorali – Analisi dati Meteomarini – Istituto Universitario Navale di Napoli
- ING. GIORGIO GALATEI – Corso su regime e protezione -dei litorali – Analisi delle Onde Estreme – ENEL- CRIS-Mestre (VE).
- Dott. ROBERTO RANGOGNI- Corso su regime e protezione dei litorali- Propagazione del Moto Ondoso da Largo a Riva- ENEL-DER-CRIS- Milano.
- ERNST NEUFERT- Enciclopedia Pratica- Norme e prescrizioni per PROGETTARE e COSTRUIRE- settima edizione Italiana- Editore ULRICO HOELPLI Milano.
- UGO MAIORE e ARMANDO BRATH- La difesa idraulica del territorio-Atti del corso di aggiornamento- Programma di Istruzione Permanente- Politecnico di Milano - 7-11 ottobre 1996- EDITORIALE BIOS-
- GIULIO SUPINO – LE RETI IDRAULICHE – Bonifiche Fognature Fiumi e Torrenti – Patron Editore Bologna.
- LEOPOLDO FRANCO e RENATO MARCONI – PORTI TURISTICI – Guida alla pianificazione, progettazione e costruzione dei marina – Maggioli Editore.
- ASSOCIAZIONE INTERNAZIONALE DI NAVIGAZIONE – AIPCN – PIANC - Sezione Italiana - Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici- FEBBRAIO 2002.
- DESING AND RELIABILITY OF COASTAL STRUCTURES – Venice, Scuola di S. Giovanni Evangelista – 1-3 Ottobre 1992 – attached to the 23th International Conference on Coastal Engineering – ICCE 92.
- Prof. Ing. A. LAMBERTI – SURF ZONE HYDRODYNAMICS –Appunti corso di COSTRUZIONI MARITTIME – Università Degli Studi di Bologna- DIPARTIMENTO DI IDRAULICA.
- CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI, 1994- Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe marittime, ROMA.
- U. TOMASICCHIO – Manuale di Ingegneria Portuale e Costiera- EDITORIALE BIOS, 1998.

SITI INTERNET

- (www.imputitalia.it) - Istituto Nazionale della Portualità Turistica-
- (www.marina.difesa.it) - Marina Militare Italiana
- (www.dstm.it) – Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale-
- (www.coastal.udel.edu/faculty/rad/wavetheory.html) – University of Delaware – Wave Calculator-
- (www.eurometeo.com) - Servizio meteomarinò- METEOMAR-
- (www.meteoam.it) –Aeronautica Militare Italiana- Servizio Meteorologico- Ufficio Generale per la Meteorologia-
- (www.idromare.com) –APAT (Agenzia per la protezione dell'Ambiente e per i servizi tecnici).

ALLEGATO 1

Tabella contenente le mareggiate individuate dai dati di vento della stazione meteo di Cozzo Spadaro (SR) relative al settore di traversia (60°NE÷ 280°NE)

ALLEGATO 2

Risultati dell'elaborazione dei dati di vento col metodo SPM

ALLEGATO 3

Risultati dell'elaborazione dei dati di vento col metodo JONSWAP

ALLEGATO 4

Risultati del calcolo delle grandezze caratteristiche relative alle altezze d'onda significative ricavate col metodo SPM

ALLEGATO 5

Andamenti delle altezze significative H_s in funzione delle probabilità di non superamento, secondo la distribuzione di Weibull, con parametri di forma $k=0,75, 1,00, 1,40, 2,00$, relativi a tutte le direzioni interne al settore di traversia del paraggio di Portopalo di Capo Passero

ALLEGATO 6

Risultati del calcolo delle grandezze caratteristiche relative alle altezze d'onda significative ricavate dall'analisi probabilistica