



# SEZIONE DEL GENIO MILITARE PER LA MARINA DI CAGLIARI

Stazione VLF - Isola di Tavolara (OT)

RESTAURATION OF HEALTH AND SAFETY CONDITIONS TO  
OPERATE THE STATION - STAZIONE VLF - ISOLA DI  
TAVOLARA (OT)

# 003

## PROGETTO DEFINITIVO

## STUDIO PROPAGAZIONE MOTO ONDOSI SOTTOCOSTA

21

018

DR

003

0

MAR

### Committente

SEZIONE DEL GENIO MILITARE  
PER LA MARINA DI CAGLIARI

P.zza Marinai d'Italia snc

### Progettazione opere marittime:



MODIMAR s.r.l. Via Monte Zebio 40 - 00195 ROMA  
06.3269461 - www.modimar.it

### Progettazione:

Ing. Mauro MARINI

Ing. Davide SALTARI

Ing. Leonardo FARINA

Dott. Arch. Alessandro BARTOLESCHI

### Studi ambientali

Dott.ssa Scrimieri Sara

Dott. De Pirro Maurizio

Febbraio 2022	0	0	D.S.	D.S.	M.M.
Data	Rev.	DESCRIZIONE	Disegnato:	Verificato:	Approvato:
Dimensioni foglio: A1		La MODIMAR s.r.l. si riserva la proprietà di questo documento con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta. This document is property of MODIMAR s.r.l. Reproduction and divulgation forbidden without written permission			

---

## INDICE

1.	Premessa e introduzione .....	1
2.	Ubicazione ed esposizione del paraggio al moto ondoso .....	1
3.	Regime del moto ondoso .....	3
4.	Caratteristiche del moto ondoso al largo .....	4
5.	Propagazione da largo a riva con il metodo della rifrazione inversa spettrale .....	5
6.	Propagazione degli eventi estremi da largo a riva con metodo della rifrazione diretta spettrale .....	8
7.	Conclusioni .....	12

---

## 1. Premessa e introduzione

Il presente “studio del moto ondoso sotto costa” fa parte dell’insieme degli studi specialistici di idraulica marittima quali lo studio meteomarinario, lo studio del moto ondoso sottocosta (qui riportato) e lo studio di agitazione ondosa residua elaborati a supporto del progetto definitivo degli interventi relativi al "Restaurazione of health and safety conditions to operate the station - Stazione VLF - Isola di Tavolara (OT)" per la riqualificazione dell’approdo di Cala di Ponente, ubicato in località Spalmatore di fuori.

\*\*\*\*

I temi d’indagine principali che hanno riguardato lo “studio meteomarinario”, prodromico al presente studio, sono stati così articolati: caratteristiche geo-orografiche del paraggio; regime dei venti, esposizione al moto ondoso, determinazione del clima di moto ondoso al largo, individuazione dell’altezza d’onda di progetto mediante elaborazione statistica delle registrazioni disponibili e individuazione delle variazioni del livello medio marino.

Le finalità del presente studio sono quelle di determinare le caratteristiche del clima del moto ondoso sotto costa, che sono determinanti ai fini della valutazione dell’altezza delle onde in prossimità dell’opera di difesa dell’approdo oggetto di intervento. Tale determinazione è stata effettuata utilizzando due metodologie classiche del trasferimento da largo a riva del clima di moto ondoso.

Una prima analisi è stata eseguita utilizzando la consolidata metodologia della rifrazione inversa spettrale che permette di studiare la propagazione delle onde considerando come fenomeni dominanti la rifrazione e lo shoaling del moto ondoso nella sua propagazione verso costa. Successivamente è stato condotto il medesimo studio (eseguendo in questo modo una sorta di “verifica” dei risultati ottenuti) elaborando la propagazione di stati di mare estremi individuati al largo (descritti da uno spettro di energia dispersi in frequenza e direzione) tenendo conto degli stessi fenomeni fisici che intervengono nella propagazione su fondali intermedi e bassi, ma considerando anche l’influenza di altre variabili che il precedente metodo non è in grado di simulare. In particolare, i fenomeni fisici presi in esame dal modello di propagazione del moto ondoso (diretta spettrale) sono oltre alla rifrazione e lo shoaling indotti sia dal fondale sia dalle correnti, anche la generazione delle onde ad opera del vento, l’interazione non-lineare tra le componenti spettrali, la dissipazione di energia per frangimento e per attrito sul fondo e dal sovrizzo del livello del mare indotto dalle onde frangenti.

## 2. Ubicazione ed esposizione del paraggio al moto ondoso

Il paraggio costiero oggetto del presente studio idraulico marittimo è situato ad est della costa nord-orientale della Sardegna che si affaccia sul Mar Tirreno occidentale (Figura 2-1). Quindi è geograficamente esposto in prevalenza agli eventi di moto ondoso provenienti dal I° e dal IV° quadrante (Nord-Est e Nord-Ovest).



Figura 2-1 – Inquadramento geografico d'insieme dell'area di interesse. Il riquadro di colore rosso indica l'ubicazione dell'area di intervento

L'esposizione al moto ondoso del sito in esame è stata determinata con riferimento ai settori di traversia geografica, rappresentativi dell'estensione geografica della superficie marina ("fetch geografico") che contribuisce alla generazione del moto ondoso sotto l'azione dei venti e delle basse pressioni che possono interessare l'area.

In Figura 2-2 è riportato il fetch geografico che interessa il primo e quarto quadrante per il quale risulta limitato a sole poche miglia nautiche dalle coste sarde, per il settore di traversia contenuto compreso tra le direzioni di 350°N e 60°N la sua estensione raggiunge le coste liguri e laziali con una lunghezza massima pari a 370 km.

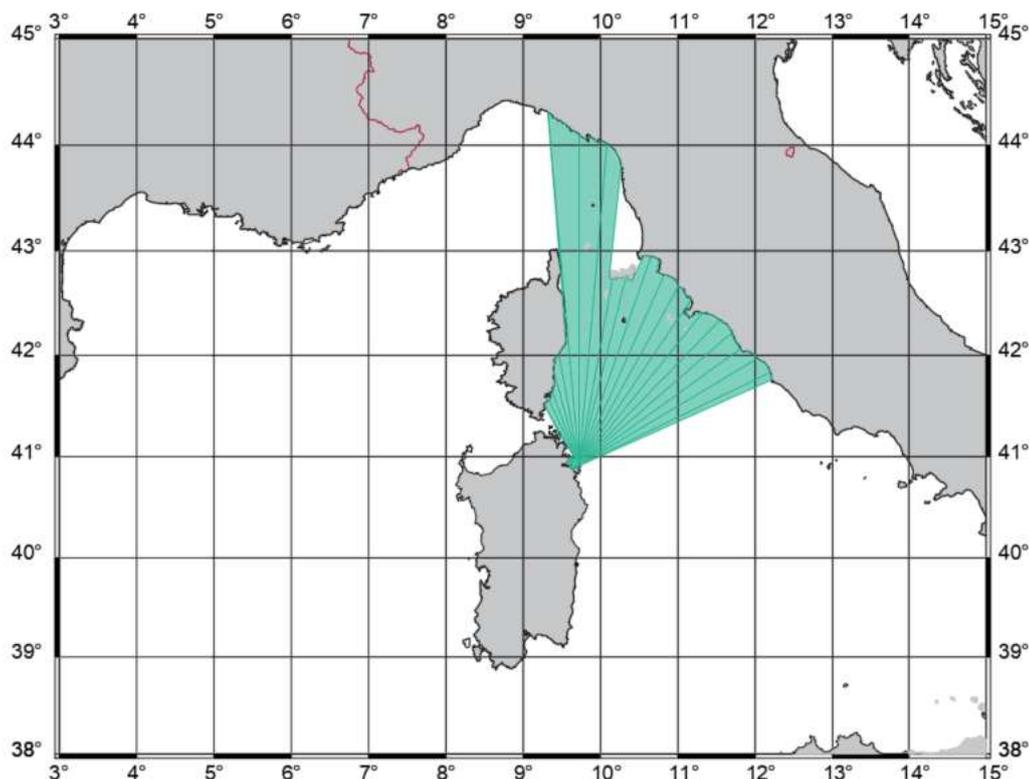


Figura 2-2 Fetch geografico al largo dell'isola di Tavolara

Oltre al fetch geografico è stato individuato il fetch efficace (riportato in Figura 2.3) che rappresenta la “traversia” o lunghezza della porzione di mare sulla quale si esplica “effettivamente” l’azione del vento responsabile della generazione del moto ondoso.

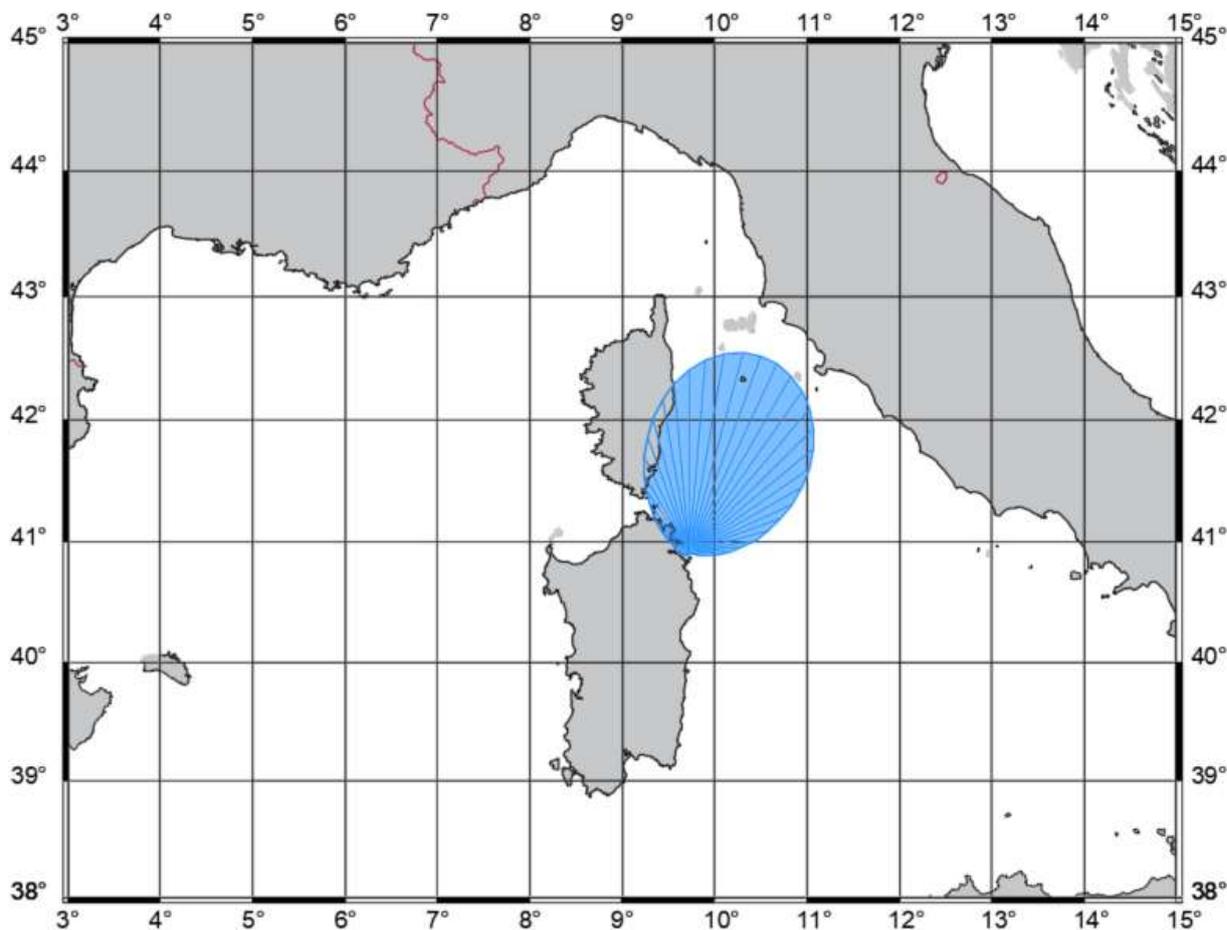


Figura 2-3. Fetch Efficace al largo di Tavolara

L’esame della figura mostra che i fetch efficaci aventi estensione superiore a 150 km si hanno tra 0°N e 40° N con il massimo di 181 km per la direzione di 20° N.

### 3. Regime del moto ondoso

Elemento indispensabile ai fini di una corretta valutazione del clima medio del moto ondoso e degli eventi estremi (necessario per il dimensionamento delle opere di difesa) è la ricostruzione del regime del moto ondoso che contraddistingue il paraggio costiero in esame.

La conoscenza "climatica" del moto ondoso, cioè la definizione delle frequenze annuali delle principali grandezze (quali l’altezza d’onda significativa  $H_s$ , il periodo d’onda  $T$  e la direzione media di provenienza  $\theta$ ), è stata effettuata acquisendo le registrazioni ondometriche in aree prossime al sito in esame; nel caso specifico sono state utilizzate le serie ERA5 fornite dal centro meteorologico europeo (ECMWF) nell’ambito del Programma Copernicus della Comunità Europea.

La serie di dati è stata quindi elaborata ai fini della determinazione della distribuzione in frequenza delle onde con definizione del clima d’onda (medio annuale) e delle probabilità di occorrenza degli eventi ondosi estremi per il dimensionamento delle opere di difesa.

## 4. Caratteristiche del moto ondoso al largo

Per la determinazione del moto ondoso al largo dell'approdo di Cala di Ponente, ubicato sull'isola di Tavolara, sono state utilizzate le informazioni delle misure ondametriche ERA5, ricostruite in rianalisi, relative all'intervallo temporale 1979 ÷ 2019.

Nella figura 4.1 (grafico polare) e nella tabella 4.1 sono rappresentate le distribuzioni annuali del numero di eventi di moto ondoso (in forma percentuale) suddivisi per classi di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) e direzione di provenienza ( $^{\circ}N$ ).

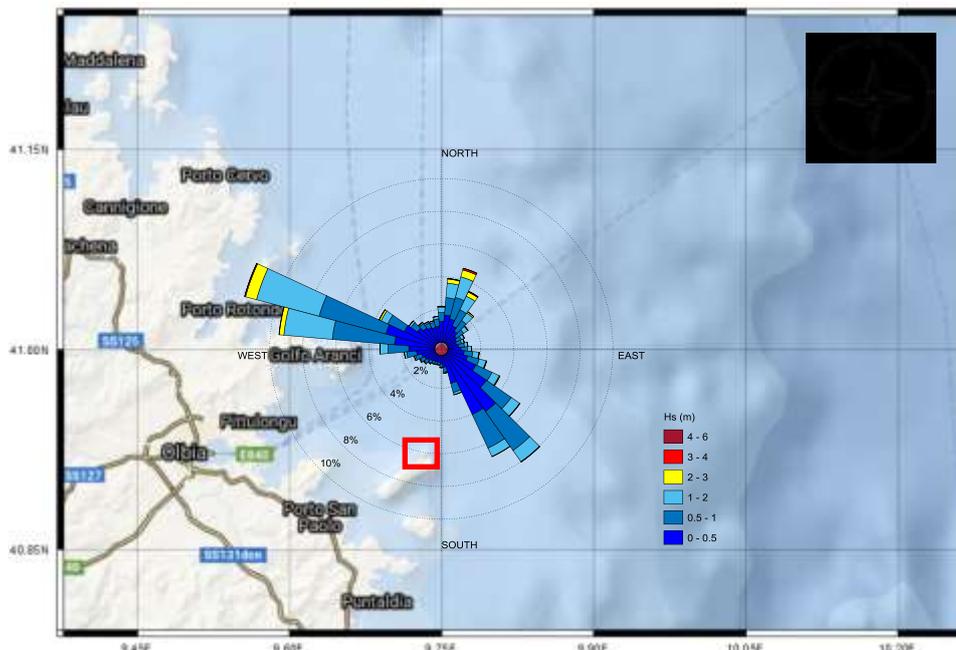


Figura 4-1. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  al largo della costa sarda per il punto scelto al largo in relazione all'area di interesse (individuata con il riquadro rosso).

Direzione d'onda $^{\circ}N$	Distribuzione percentuale del clima d'onda per classi di $H_s$ e direzione di provenienza													Tot
	Altezza d'onda $H_s$ (m)													
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 4.50	4.50 5.00	5.00 5.50	> 5.50	
10	0.73	0.95	1.06	0.56	0.33	0.17	0.08	0.02	0.01					3.91
20	0.61	0.9	1.35	0.79	0.51	0.31	0.13	0.07	0.02	0.02				4.71
30	0.46	0.69	1.08	0.6	0.32	0.18	0.09	0.04	0.01					3.47
40	0.37	0.57	0.79	0.39	0.17	0.06	0.02	0.01						2.38
50	0.28	0.45	0.53	0.21	0.09	0.02	0.01	0.01						1.60
60	0.24	0.36	0.33	0.13	0.06	0.01	0.01							1.14
70	0.22	0.32	0.32	0.12	0.05	0.01								1.04
80	0.24	0.41	0.35	0.14	0.05	0.02								1.21
90	0.31	0.48	0.39	0.18	0.06	0.02								1.44
100	0.42	0.57	0.52	0.26	0.11	0.02	0.01							1.91
110	0.54	0.71	0.72	0.33	0.1	0.03	0.01	0.01						2.45
120	0.76	1.15	1.07	0.38	0.1	0.03	0.01							3.50
130	1.1	1.84	1.83	0.54	0.08	0.01								5.40
140	1.34	2.93	2.9	0.67	0.17	0.02								8.03
150	1.22	2.81	2.26	0.46	0.1	0.01								6.86
160	0.72	1.06	0.58	0.11	0.03									2.50
170	0.3	0.43	0.3	0.06	0.01									1.10
180	0.2	0.32	0.2	0.03										0.75
190	0.17	0.26	0.16	0.02										0.61
200	0.19	0.25	0.16	0.02										0.62
210	0.18	0.27	0.18	0.03										0.66
220	0.21	0.29	0.2	0.03										0.73
230	0.28	0.35	0.24	0.03	0.01									0.91
240	0.34	0.39	0.28	0.05	0.01									1.07
250	0.36	0.48	0.39	0.07	0.01									1.31
260	0.44	0.67	0.59	0.13	0.02									1.85
270	0.56	1.02	1.25	0.4	0.09	0.01								3.33
280	0.7	1.75	3.78	2.13	0.81	0.22	0.06	0.02	0.01					9.48
290	0.65	2.43	4.2	2.63	1.31	0.52	0.17	0.04	0.02					11.97
300	0.62	1.47	1.11	0.3	0.14	0.09	0.03	0.01						3.77
310	0.5	0.89	0.47	0.11	0.03	0.01								2.01
320	0.47	0.69	0.35	0.06	0.02									1.59
330	0.41	0.63	0.31	0.07	0.02									1.44
340	0.37	0.59	0.32	0.07	0.02	0.01								1.38
350	0.37	0.63	0.44	0.11	0.03	0.01								1.59
360	0.54	0.73	0.54	0.23	0.1	0.04	0.02							2.20
Totale	17	31	32	12	5	2	1	0	0	0	0	0	0	100
Totale cumulato		48	80	92	97	99	100	100	100	100	100	100	100	

Tabella 4-1. Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso, al largo di Tavolara ricostruiti dall'ECMWF, suddivisi per classi di altezza significativa e direzione. Periodo di riferimento 1979 ÷ 2019.

## 5. Propagazione da largo a riva con il metodo della rifrazione inversa spettrale

Per definire le condizioni di moto ondoso che si vengono a realizzare nell'area marina immediatamente antistante l'approdo di Cala di Ponente è stato necessario effettuare una propagazione del moto ondoso da largo verso riva utilizzando un opportuno modello matematico di rifrazione inversa spettrale.

A tal fine si è scelto un modello numerico normalmente utilizzato per effettuare un'analisi dei principali fenomeni fisici che condizionano l'evoluzione delle onde durante la loro propagazione. Per quanto riguarda i meccanismi che possono alterare la propagazione delle onde su fondali via via decrescenti, che collegano il mare aperto alla zona di intervento, la sufficiente regolarità dell'andamento delle linee batimetriche che caratterizzano il paraggio d'interesse ha permesso di ritenere che essi siano costituiti, in modo dominante, dalla rifrazione e dallo shoaling, mentre possono essere ritenuti trascurabili i processi diffrattivi (diffrazione interna ed esterna).

Per quanto riguarda i processi dissipativi (attrito sul fondo e frangimento), nel caso in esame, si può affermare che la loro importanza diventa rilevante solo su fondali aventi profondità inferiori a 10÷15 m. Quindi sulla base delle considerazioni appena effettuate si è scelto per la propagazione sottocosta della serie storica di dati di moto ondoso, di utilizzare in un primo momento il modello numerico di propagazione inversa spettrale MEROPE, sviluppato dalla società Modimar S.r.l. e ampiamente utilizzato in studi passati.

Il modello numerico MEROPE risolve la rifrazione inversa spettrale dei fronti d'onda a partire da un punto scelto all'interno di un dominio di calcolo costituito dai dati batimetrici del paraggio costiero in esame desunti da cartografie ufficiali (solitamente carte nautiche emesse dall'I.M.M.).

In Figura 5.1 è rappresentata la batimetria implementata all'interno del modello di propagazione MEROPE desunta dalla carta nautica n° 322 "Golfi di Olbia e degli Aranci – Isole Tavolara e Molara.

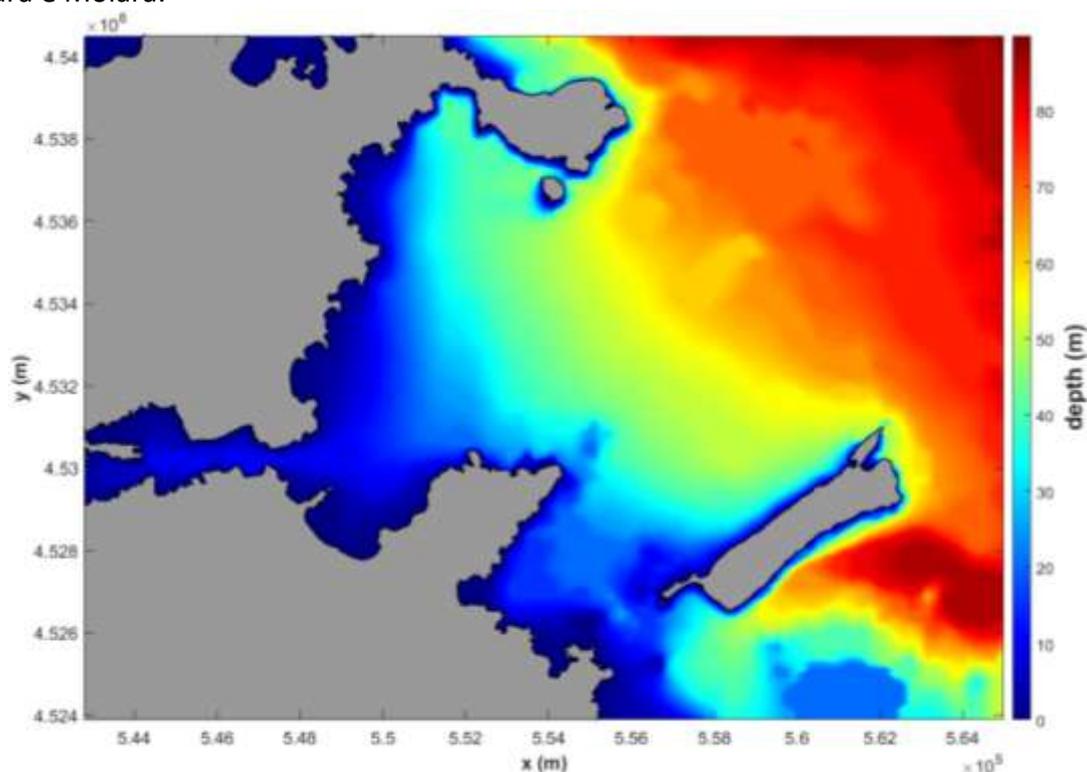


Figura 5-1 – Dominio di calcolo utilizzato per il modello di inversa spettrale MEROPE - Batimetria

Per il punto di rifrazione inversa  $P_{inv}$  considerato (ubicato immediatamente davanti la diga foranea esistente) sono stati calcolati 20 piani d'onda inversi per altrettanti periodi compresi tra 2 e 22 secondi, tracciando una serie di raggi (ortogonali ai fronti d'onda), spaziatosi di  $0.5^\circ$ , sino a coprire l'intero settore (geografico) di traversia.

Nella Figura 5.2 è riportata a titolo di esempio la rappresentazione del dominio di calcolo ed il piano d'onda per il periodo  $T = 6,0$  sec calcolato con il metodo della propagazione inversa dal punto  $P_{inv}$  scelto.

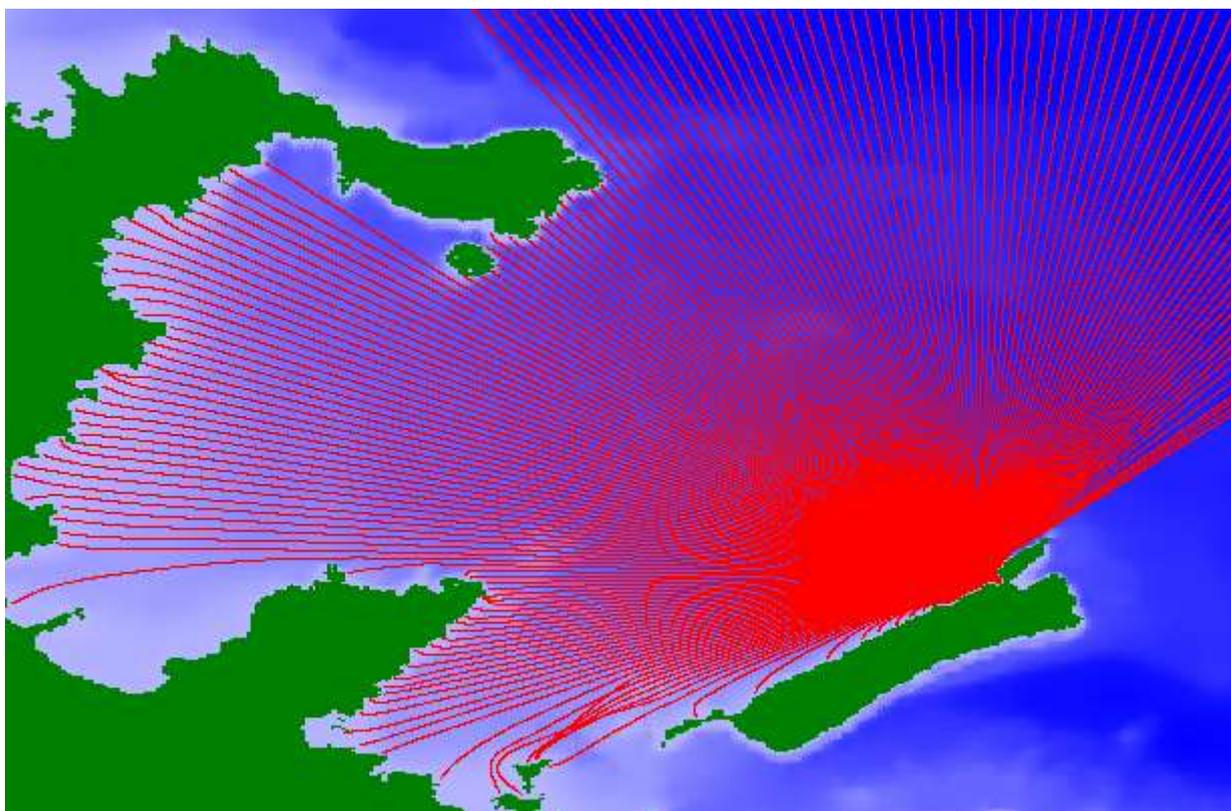


Figura 5-2 – Modello numerico MEROPE. Dominio di calcolo e tracciamento inverso del piano d'onda nel punto di inversa spettrale  $P_{inv}$  per il periodo  $T = 6,0$  sec

I 4000 piani d'onda inversi ( $20 \times 200$ ) così calcolati hanno consentito di costruire un database di correlazione. Mediante tale database l'intera serie storica dei dati ERA5 al largo dell'isola di Tavolara è stata propagata sotto costa nel punto prescelto  $P_{inv}$ .

Per simulare la dispersione dell'energia in frequenza e direzione si è utilizzata la funzione di densità spettrale:

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta)$$

dove la funzione  $S(f)$  è stata espressa con uno spettro JONSWAP con  $\gamma = 3,3$ .

La funzione  $G(f, \theta)$  viene esplicitata nel modello MEROPE sulla base dell'equazione fornita da Goda ponendo  $s_{max} = 18$  (onde di mare vivo). Si ricorda che le "onde di mare vivo" (sea), tipiche dell'area di generazione (fetch), hanno una elevata dispersione direzionale dell'energia e per tale ragione vengono anche chiamate "onde a cresta corta".

Per il punto di inversa spettrale  $P_{inv}$ , la Figura 5-3 riporta in forma grafica la corrispondenza tra le direzioni del moto ondoso al largo ed i corrispondenti valori di direzione calcolati a riva, mentre nella figura successiva (grafico di Figura 5-4) sono rappresentati gli andamenti del coefficiente

K ( $K = K_r \times K_s$  con  $K_r$  coefficiente di rifrazione e  $K_s$  coefficiente di shoaling), per alcuni valori del periodo di onda compresi tra 4 e 12 sec rispetto alla direzione di incidenza al largo.

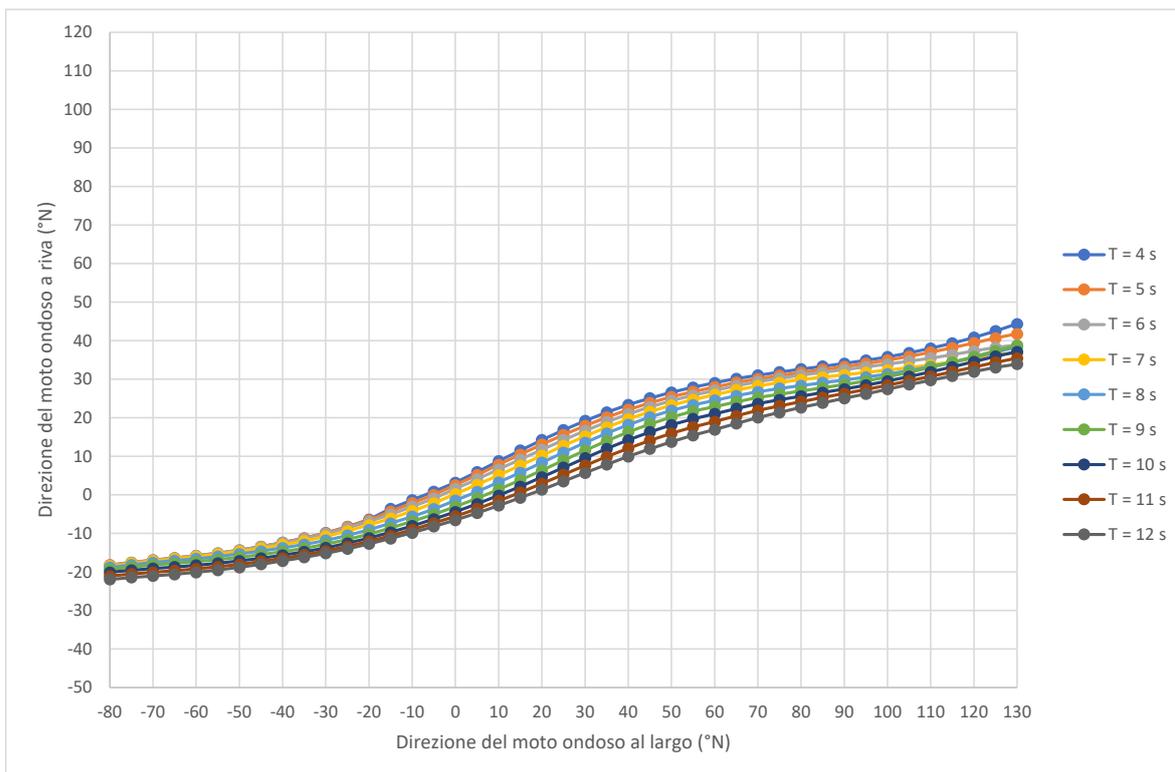


Figura 5-3 - Codice di calcolo MEROPE: Corrispondenza tra le direzioni del moto ondoso al largo ed i corrispondenti valori di direzione calcolati a riva

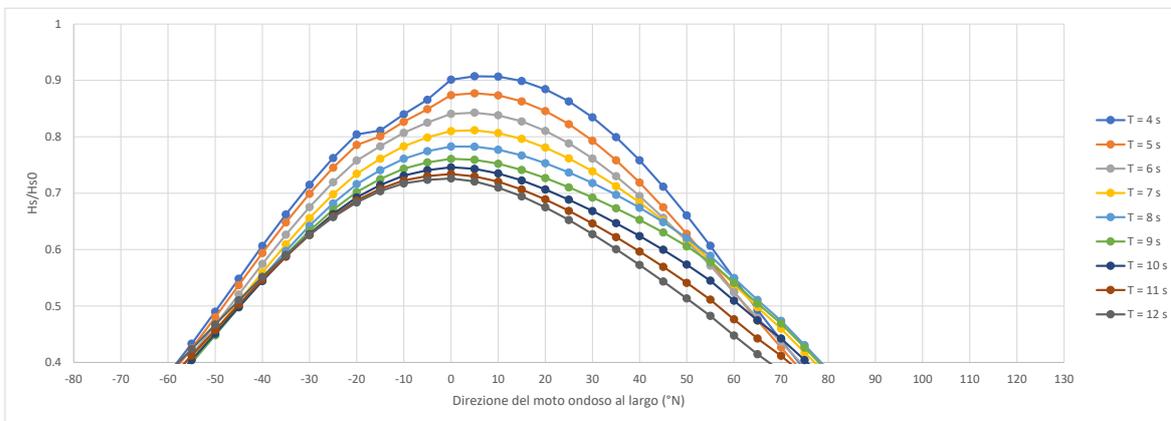


Figura5-4 - Codice di calcolo MEROPE: Andamento del rapporto  $H_s/H_{s0}$  in funzione delle direzioni del moto ondoso al largo

Si sono quindi propagati i singoli eventi estremi determinati nel paragrafo precedente i cui risultati sono stati sintetizzati nella seguente tabella (Tabella 5.1).

Tr (anni)	Largo			Propagato		
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
2	3.6	7.7	15	2.79	7.30	6.35
10	4.6	8.3	15	3.49	8.47	5.17
20	5.0	8.5	15	3.76	8.47	4.78
50	5.6	8.8	15	4.17	9.12	4.20
100	6.0	8.9	15	4.46	9.12	4.02

Tabella 5-1 – Stati di mare relativi ai tempi di ritorno selezionati rispettivamente calcolati al largo e sotto costa tramite il modello di propagazione di inversa spettrale MEROPE.

---

## 6. Propagazione degli eventi estremi da largo a riva con metodo della rifrazione diretta spettrale

Definite le condizioni a riva applicando il modello di inversa spettrale MEROPE si sono verificati i risultati anche mediante l'esecuzione di specifiche simulazioni con il modello spettrale SWAN.

Il codice open source SWAN (Simulating Waves Nearshore) è un modello spettrale di terza generazione sviluppato dall'Università olandese "Delft University of Technology".

Il codice, che può essere scaricato ed utilizzato liberamente, consente di studiare la propagazione di stati di mare descritti da uno spettro di energia disperso in frequenza e direzione tenendo conto dei principali fenomeni fisici che intervengono su fondali intermedi e bassi in presenza dell'azione del vento. In particolare, i fenomeni fisici presi in esame dal modello sono:

- propagazione del moto ondoso sia in condizioni stazionarie che in condizioni transitorie tenendo conto dei fenomeni di rifrazione e shoaling indotti sia dal fondale che dalla presenza di correnti;
- generazione delle onde ad opera del vento;
- interazione non-lineare tra le componenti spettrali indotta da "triplette" e da "quadruplette";
- dissipazioni di energia per frangimento in acqua profonda e in acqua bassa;
- dissipazioni di energia per attrito sul fondo;
- sovrizzo del livello del mare indotto dalle onde frangenti;
- diffrazione del moto ondoso (approccio semplificato).

Il modello SWAN è un modello mediato sulla fase delle onde che risolve l'equazione di bilancio della densità di azione  $N = E/\sigma$  dove  $E(\sigma, \theta)$  è la densità di energia dello spettro con  $\sigma$  frequenza delle onde (osservata in un sistema di riferimento mobile che si sposta con la velocità della corrente) e  $\theta$  direzione di propagazione delle onde (direzione normale alla cresta delle onde di ciascuna componente spettrale). Si evidenzia che mentre la densità di azione  $N$  si conserva nella propagazione delle onde in presenza di una corrente preesistente (corrente ambientale), la stessa cosa non vale per la densità di energia  $E$ .

L'evoluzione nello spazio e nel tempo della densità di azione  $N$  è governata dall'equazione di bilancio dell'azione che può essere espressa nella seguente forma:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{p}} \left[ \left( \vec{c}_g + \vec{U} \right) N \right] + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

Il termine di sinistra dell'equazione esprime la parte cinematica dell'evoluzione delle onde. Il termine di destra esprime invece tutti i processi fisici che determinano:

- la generazione delle onde ad opera del vento (termini "sorgente");
- la dissipazione di energia delle onde (termini "pozzo")
- lo scambio di energia tra le componenti spettrali.

Questi processi sono riferiti alla densità di energia dello spettro.

Il secondo termine della parte sinistra dell'equazione esprime la propagazione dell'energia nello spazio geografico coincidente con il livello medio marino;  $c_g$  è celerità di gruppo definita dalla relazione:

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial \vec{k}}$$

e dalla relazione di dispersione:

$$\sigma^2 = g|\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d)$$

dove  $|\vec{k}|$  è il vettore numero d'onda e  $d$  è la profondità locale.

Il terzo termine della parte sinistra dell'equazione esprime l'effetto della variazione della frequenza  $\sigma$  indotta dalla variazione della profondità e dalla variazione della corrente. Il quarto termine della parte sinistra esprime l'effetto di rifrazione indotto dalla profondità e dalla corrente.

I termini  $c_\sigma$  e  $c_\theta$  sono le celerità di propagazione nel dominio della frequenza e della direzione.

Per maggiori dettagli sul codice SWAN ci si può riferire alla documentazione scientifica e tecnica del codice disponibile in rete (<http://swanmodel.sourceforge.net/>, <http://www.swan.tudelft.nl>).

In Figura 6.1 è rappresentata la griglia di calcolo suddivisa in due griglie, una di tipo COARSE (a maglia grande) e una di DETTAGLIO (a maglia più fitta). La prima è caratterizzata da celle la cui dimensione massima risulta pari a 150 m, mentre quella di DETTAGLIO è caratterizzata invece da celle di 15 m di lato.

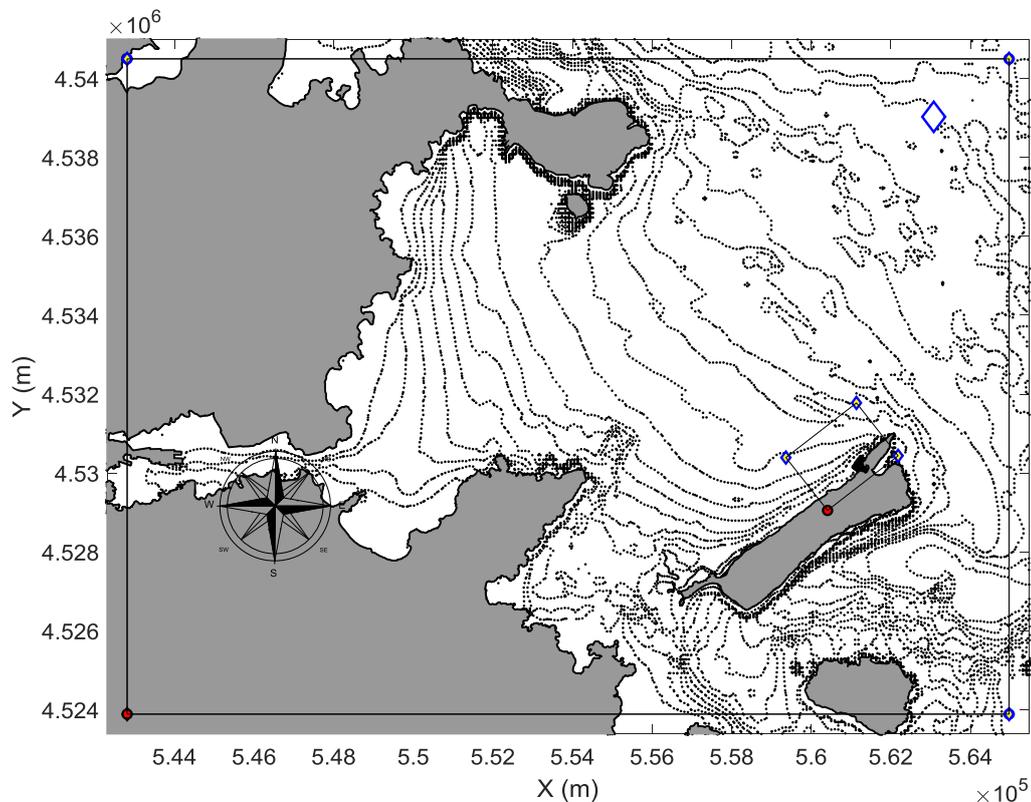


Figura 6-1. Rappresentazione della griglia su grande scala e la griglia di dettaglio che comprende il Porto di Tavolara.

I risultati relativi alla propagazione dei soli valori estremi considerati sono riportati nelle seguenti figure (da Figura 6.2 a Figura 6.6).

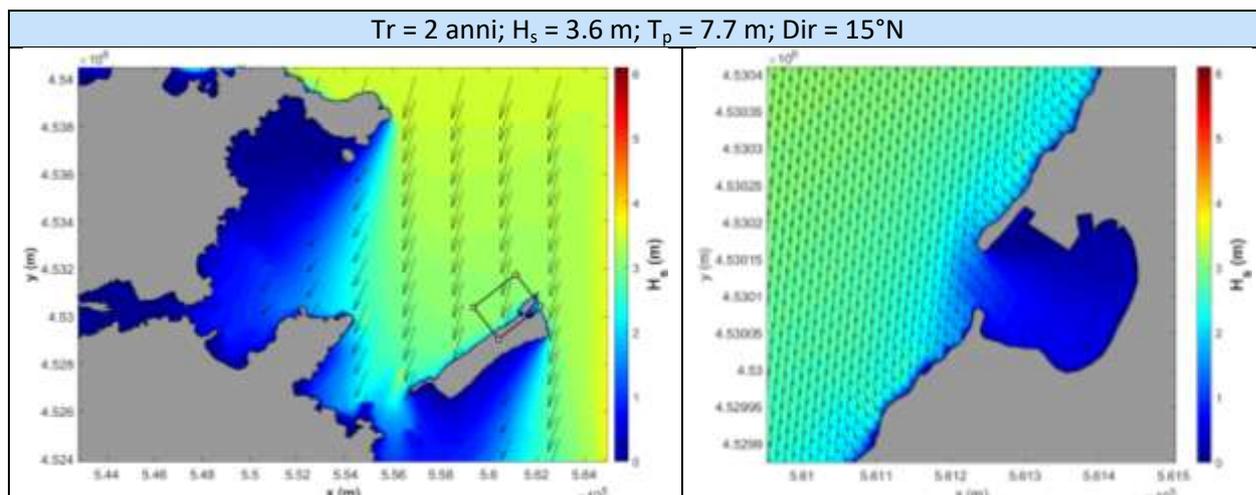


Figura 6-2. Risultati relativi alle condizioni di moto ondoso caratterizzate da Tr = 2 anni.

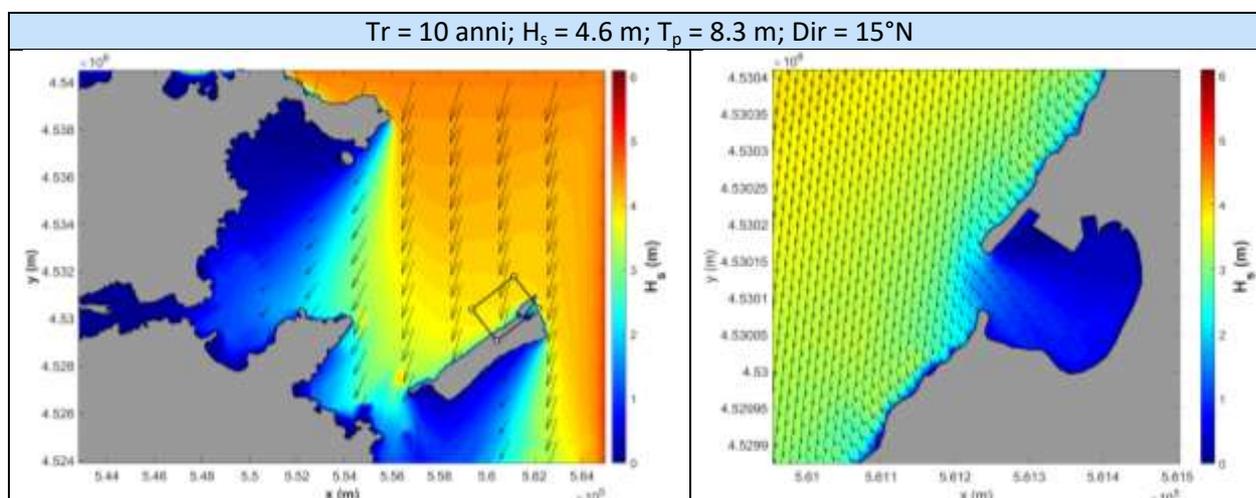


Figura 6-3. Risultati relativi alle condizioni di moto ondoso caratterizzate da Tr = 10 anni.

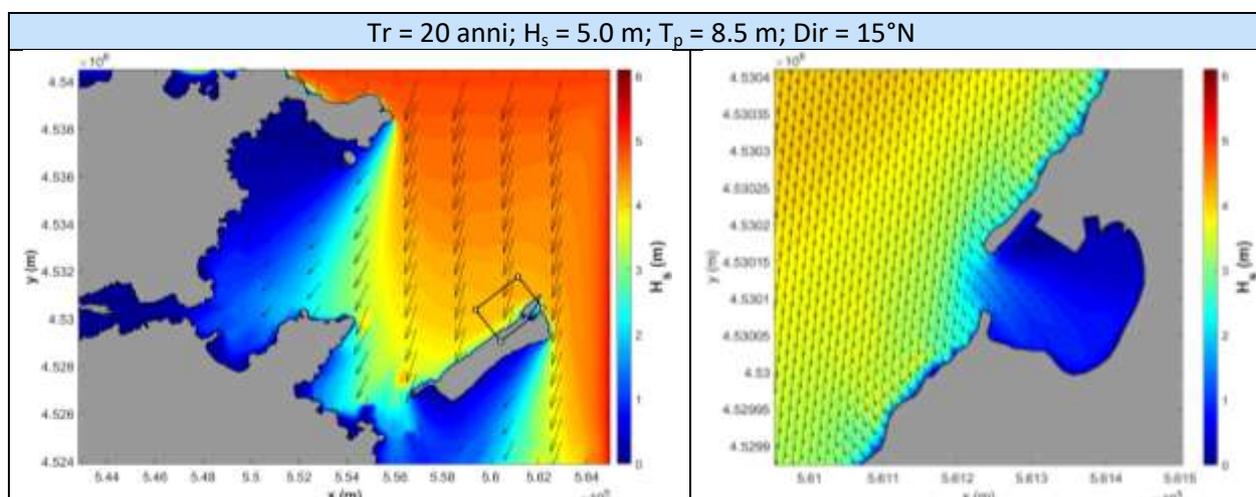


Figura 6-4. Risultati relativi alle condizioni di moto ondoso caratterizzate da Tr = 20 anni.

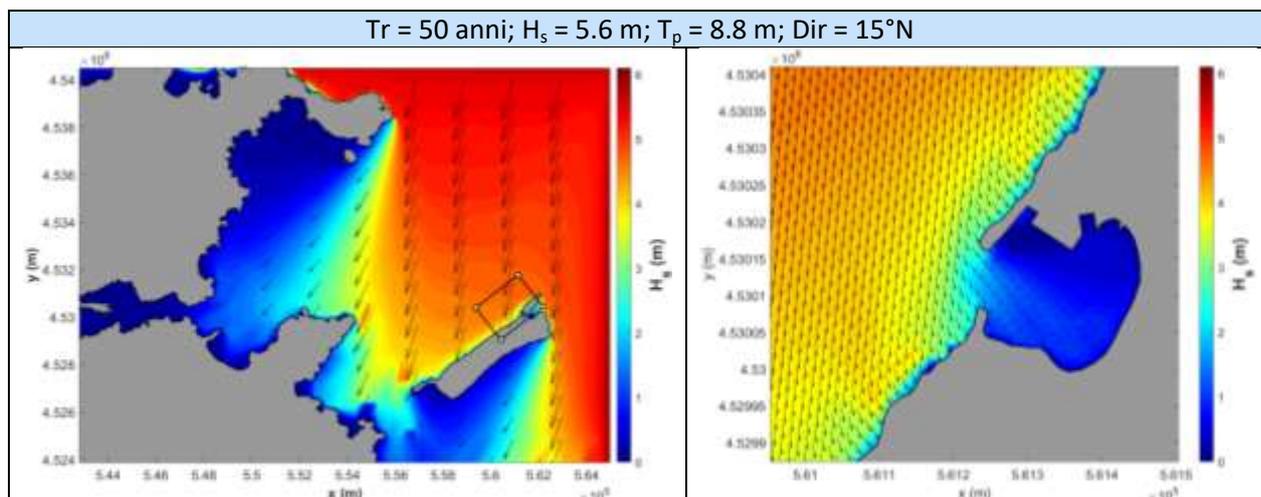


Figura 6-5. Risultati relativi alle condizioni di moto ondoso caratterizzate da Tr = 50 anni.

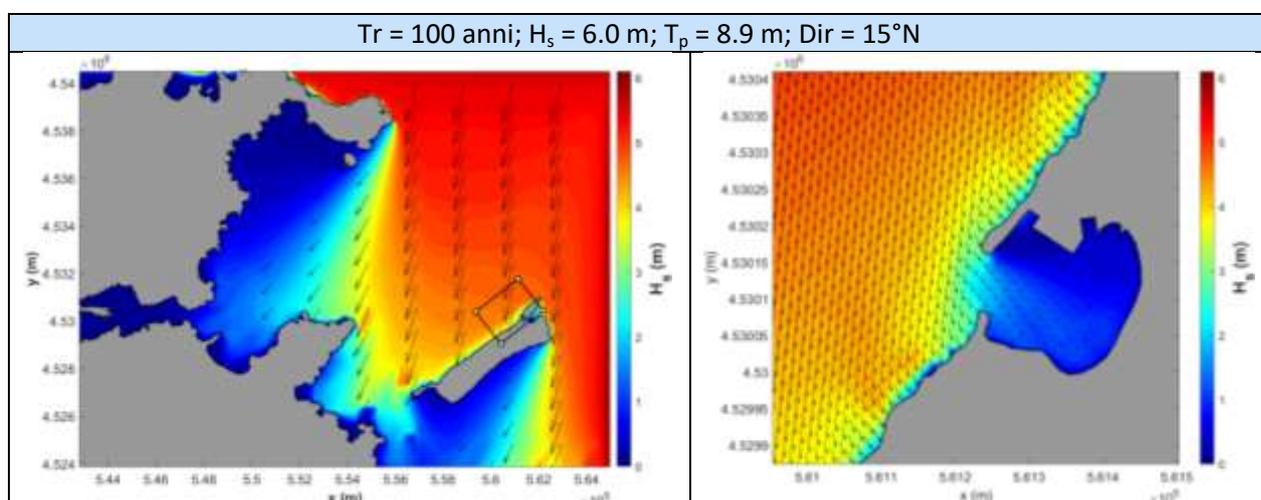


Figura 6-6. Risultati relativi alle condizioni di moto ondoso caratterizzate da Tr = 100 anni.

Si riporta nella seguente Tabella la sintesi dei risultati per un punto posto a ridosso dell'approdo di Cala di Ponente sull'isola di Tavolara. Come è possibile osservare il moto ondoso subisce una leggera rotazione in termini di direzione, in senso antiorario.

In generale è possibile affermare che per qualsiasi condizione di moto ondoso si verifica una rotazione della direzione, tendendo i fronti d'onda a disporsi ortogonalmente alla costa.

Si sono infine sintetizzati i risultati della propagazione degli estremi in Tabella 6.1 Tali dati fanno riferimento ad un punto di estrazione posto in prossimità del molo sopraflutto del Porto di Tavolara.

Tr (anni)	Largo			Propagato		
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
2	3.6	7.7	15	2.4	8.20	6.15
10	4.6	8.3	15	3.1	8.41	5.07
20	5.0	8.5	15	3.3	8.47	4.32
50	5.6	8.8	15	3.7	8.92	4.12
100	6.0	8.9	15	3.9	9.06	3.94

Tabella 6-1 - Stati di mare relativi ai tempi di ritorno selezionati rispettivamente calcolati al largo e sotto costa tramite il modello di propagazione spettrale SWAN.

---

## 7. Conclusioni

Dall'analisi dei risultati ottenuti si evince che nella propagazione da largo a riva, nei punti ubicati davanti l'opera foranea di interesse, su fondali di circa -15-20 m sul l.m.m., il clima di moto ondoso subisce una leggera variazione, presentando una rotazione in senso antiorario (di 10-20°) per le onde provenienti dal settore di grecale, mentre per quelle provenienti da maestrale – tramontana si può dedurre una sostanziale invarianza tra largo e sotto costa.

In particolare si osserva che per il settore di traversia principale (350 – 40°N), come dimostrato dalla selezione delle onde di maggiore altezza utilizzate per la statistica delle onde estreme, le onde provenienti dalle direzioni comprese tra 10 e 30°N sono quelle caratterizzate dai valori più elevati ( $H_s > 3,0$  m).

Le conclusioni sulla propagazione del moto ondoso dal largo a riva confermano quanto indicato nella relazione idraulico marittima del progetto di fattibilità, in cui viene citato l'evento estremo (definito come burrasca) del 05 Marzo 2015 ha fortemente danneggiato la diga foranea. Infatti, estraendo i parametri caratteristici della citata burrasca dalla registrazione del moto ondoso ERA5 (utilizzata per la redazione degli studi meteo marino e di trasferimento sotto costa del presente progetto), si è potuto individuare come al largo il valore dell'altezza d'onda significativa è risultato pari ad  $H_s = 5,80$  m, mentre la direzione di provenienza era 13 °N con un periodo significativo  $T_p = 9,3$  s.

Come dimostrano i risultati delle simulazioni eseguite sia con il modello di rifrazione inversa sia con quello della diretta spettrale, l'onda di progetto associata al  $T_r = 50$  anni (individuata al largo e pari a 5,60 m) è molto simile al valore estremo che si è verificato in passato.

La simulazione riportata nella figura 6.5, confermata anche dai risultati della rifrazione inversa spettrale riportati nelle figure 5.3 e 5.4, dimostra che l'onda al largo subisce una modificazione in direzione (di circa 10°) ed una attenuazione dell'altezza (stimabile in circa il 70%) che porta a concludere come l'altezza d'onda della burrasca del marzo 2015 in prossimità dell'opera foranea di Cala di Ponente può essere valutata in  $H_s = 4,0$  m con periodo  $T \approx 9,0$  sec e con direzione al largo 15°N, mentre in prossimità dell'opera circa 5 °N.

Tali forzanti sono state quindi fornite al laboratorio sperimentale dell'Università di Roma Tre per eseguire le simulazioni su modello fisico cui si rimanda per tutti i necessari ed ulteriori approfondimenti.