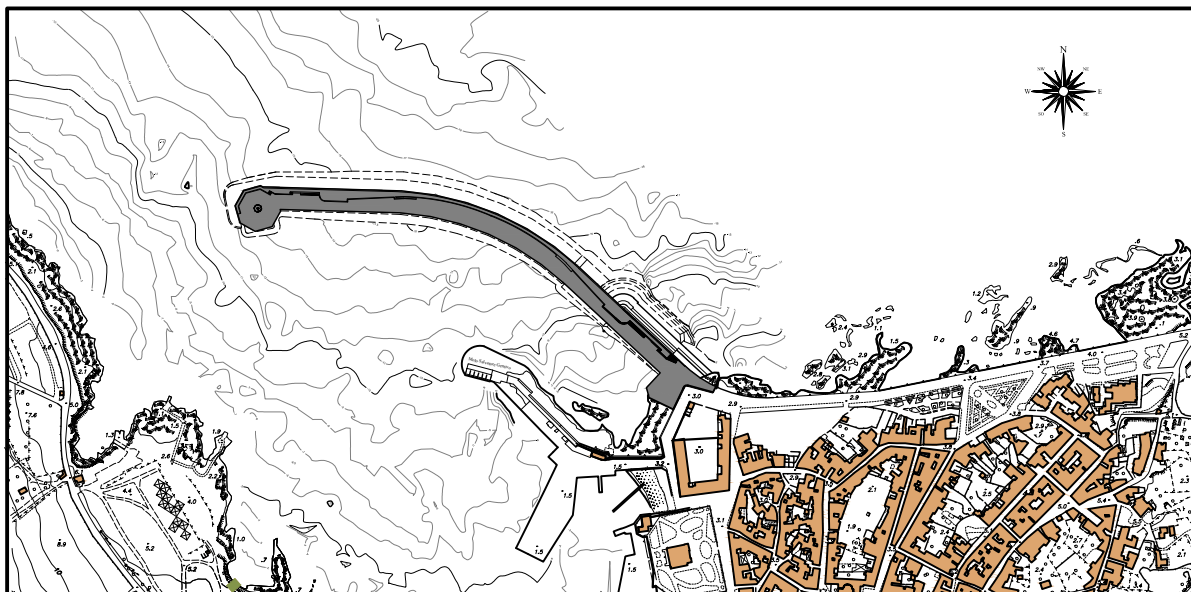


# COMUNE DI FAVIGNANA

PROVINCIA DI TRAPANI



## LAVORI DI MESSA IN SICUREZZA DEL PORTO DI FAVIGNANA

### PROGETTO DEFINITIVO

Titolo elaborato :

STUDIO DELL'AGITAZIONE INTERNA PORTUALE

Progettisti:

Ufficio Tecnico Comune di Favignana  
Responsabile Ing. Pietro Vella

Consulente:

Prof. Ing. Alberto Noli

N° elaborato:

# B2

Data	Rev.	DESCRIZIONE
Giugno 2012	0	EMISSIONE

## COMUNE DI FAVIGNANA

Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana

### B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

#### INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSE, METODOLOGIA E RISULTATI .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO .....</b>	<b>3</b>
2.1	<i>Applicazione del sistema di modellazione SMS .....</i>	<i>3</i>
2.2	<i>Discretizzazione dello specchio liquido .....</i>	<i>4</i>
2.3	<i>Definizione delle condizioni al contorno .....</i>	<i>6</i>
2.4	<i>Risultati delle simulazioni .....</i>	<i>7</i>
<b>3</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>APPENDICE: DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO CGWAVE ...</b>	<b>25</b>
4.1	<i>Introduzione .....</i>	<i>25</i>
4.2	<i>Equazioni di base .....</i>	<i>25</i>
4.3	<i>Condizioni al contorno.....</i>	<i>26</i>

## **1    PREMESSE, METODOLOGIA E RISULTATI**

Il presente rapporto riguarda lo studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto di Favignana secondo le configurazioni planimetriche attuale e di progetto delle nuove opere per la messa in sicurezza.

Lo studio è stato condotto (ai sensi del D.M. 14/4/1998) applicando il modello matematico agli elementi finiti denominato SMS (Surfacewater Modeling System), che risolve le equazioni non lineari per le acque basse (non linear shallow water equations).

Tale modello consente di simulare la propagazione del moto ondoso all'interno di un bacino portuale tenendo conto dei fenomeni combinati di diffrazione, rifrazione e riflessione, nonché degli effetti dissipativi dovuti al frangimento ed all'attrito sul fondo.

Le simulazioni sono state condotte utilizzando come forzanti le condizioni di moto ondoso più gravose ai fini dell'agitazione ondosa residua, compatibilmente con le condizioni meteomarine raggiungibili nel paraggio in esame.

Tale studio è stato condotto con l'obiettivo di fornire indicazioni oggettive sulla scelta ed ottimizzazione di alcune varianti proposte per l'attuale schema portuale in grado di garantire alle imbarcazioni che frequenteranno il porto adeguate condizioni di sicurezza durante lo stazionamento all'interno delle aree di ormeggio nonché durante le manovre d'ingresso e d'uscita dal porto.

I risultati delle diverse simulazioni effettuate mostrano come le nuove opere proposte per la messa in sicurezza dell'attuale bacino portuale siano in grado di attenuare in maniera soddisfacente il moto ondoso generato dagli stati di mare provenienti dall'intero settore di traversia, cui il porto in esame risulta esposto, anche con eventi estremi associati a tempi di ritorno decennali e cinquantennali.

## 2 PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSI

Per la determinazione dei livelli di agitazione ondosa residua che si verificano all'interno del porto di Favignana, nelle configurazioni attuale e in progetto per la messa in sicurezza del porto stesso, sono stati esaminati gli scenari che prevedono come forzanti di moto ondoso gli eventi rappresentativi sia delle condizioni di operatività ordinaria, raggiungibili qualche volta nel corso dell'anno ( $T = 6.0$  s), sia delle condizioni più rare e gravose associate a tempeste con tempo di ritorno decennale e cinquantennale ( $T = 8.0 \div 10 \div 12$  s).

A tal scopo sono state effettuate diverse simulazioni attraverso l'applicazione del codice di calcolo numerico SMS che hanno permesso di verificare la penetrazione del moto ondoso all'interno dei bacini portuali presi in esame.

Nei paragrafi successivi vengono ampiamente descritte le simulazioni condotte ponendo particolare attenzione alle ipotesi di base nonché alle condizioni al contorno cui si è fatto riferimento.

### **2.1 Applicazione del sistema di modellazione SMS**

Il codice di calcolo impiegato nel presente studio appartiene al sistema di modellazione SMS e consente di simulare i fenomeni combinati di diffrazione, riflessione e rifrazione, tenendo conto degli effetti dissipativi dovuti al frangimento ad attrito sul fondo. Particolarmente i primi tre fenomeni sono di fondamentale importanza durante la propagazione del moto ondoso all'interno di un bacino portuale, mentre gli altri due assumono importanza in casi particolari, fra i quali ricade quello in esame a causa della variabilità dei fondali in alcune zone portuali.

Nella fase preliminare dello studio (procedura di pre-processor), è stato utilizzato il codice GFGEN per la costruzione del reticolo geometrico, agli elementi finiti, con cui sono stati discretizzati gli specchi liquidi da simulare. Successivamente, all'interno del modello di calcolo sono state definite le condizioni al contorno sia in termini di forzanti di moto ondoso (altezza, periodo e direzione dell'altezza d'onda incidente) sia come valori del coefficiente di riflessione da associare ai diversi contorni che caratterizzano i due schemi portuali presi in esame per il porto di Favignana.

## 2.2 Discretizzazione dello specchio liquido

Per la corretta applicazione della routine di calcolo CGWAVE agli elementi finiti, appartenente al modello SMS, è stato necessario effettuare un'attenta e dettagliata discretizzazione del sistema liquido per le due configurazioni portuali da simulare.

A tal proposito (Figura 2.1 e Figura 2.2), si è fatto riferimento allo stato attuale ed alla planimetria di progetto con le opere per la messa in sicurezza del porto.

Nel dettaglio, il campo fluido è stato suddiviso nel modo seguente:

1. configurazione attuale: griglia di calcolo costituita da 101761 elementi, 52281 nodi di calcolo, profondità minima e massima pari rispettivamente a 1 m e 30 m (Figura 2.3);
2. configurazione di progetto: griglia di calcolo costituita da 101005 elementi, 51892 nodi di calcolo, profondità minima e massima pari rispettivamente a 1 m e 30 m (Figura 2.4);

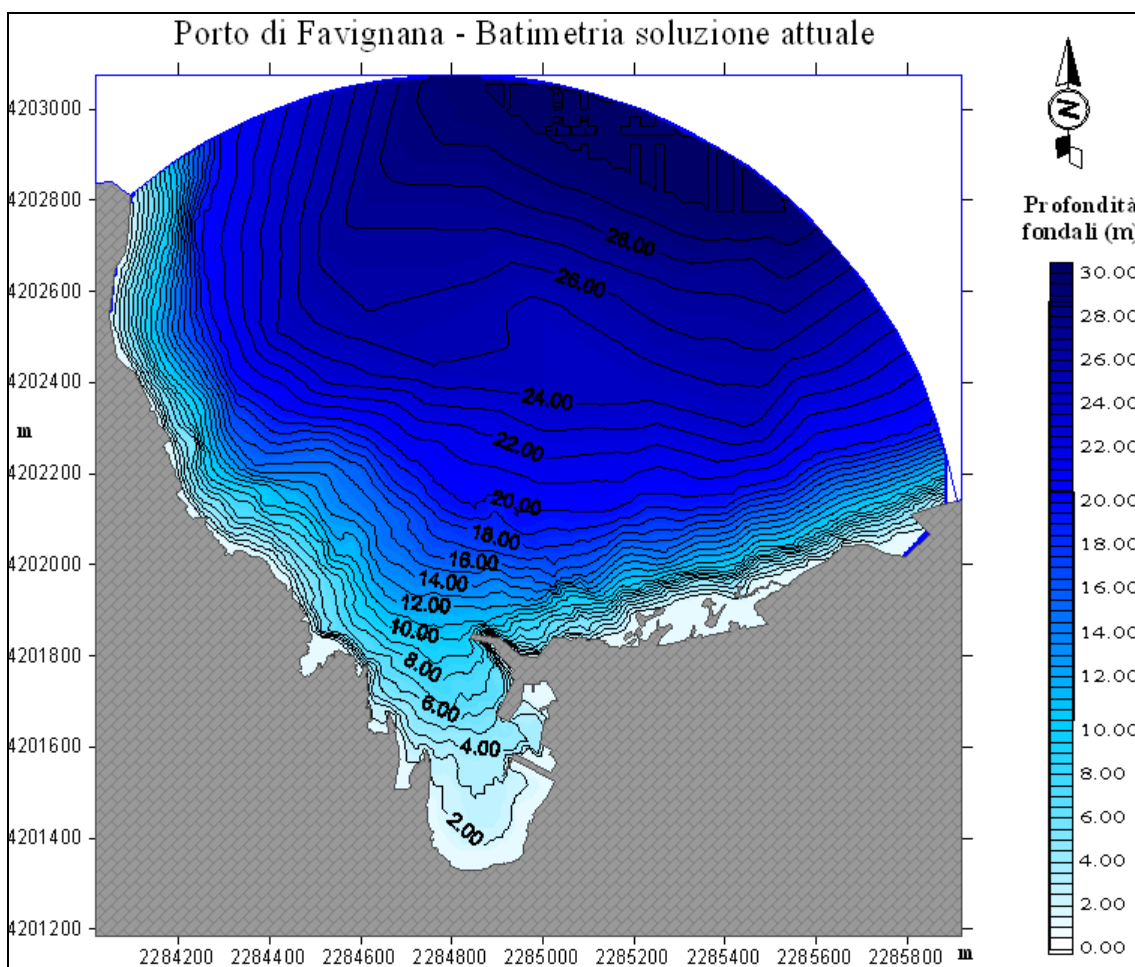
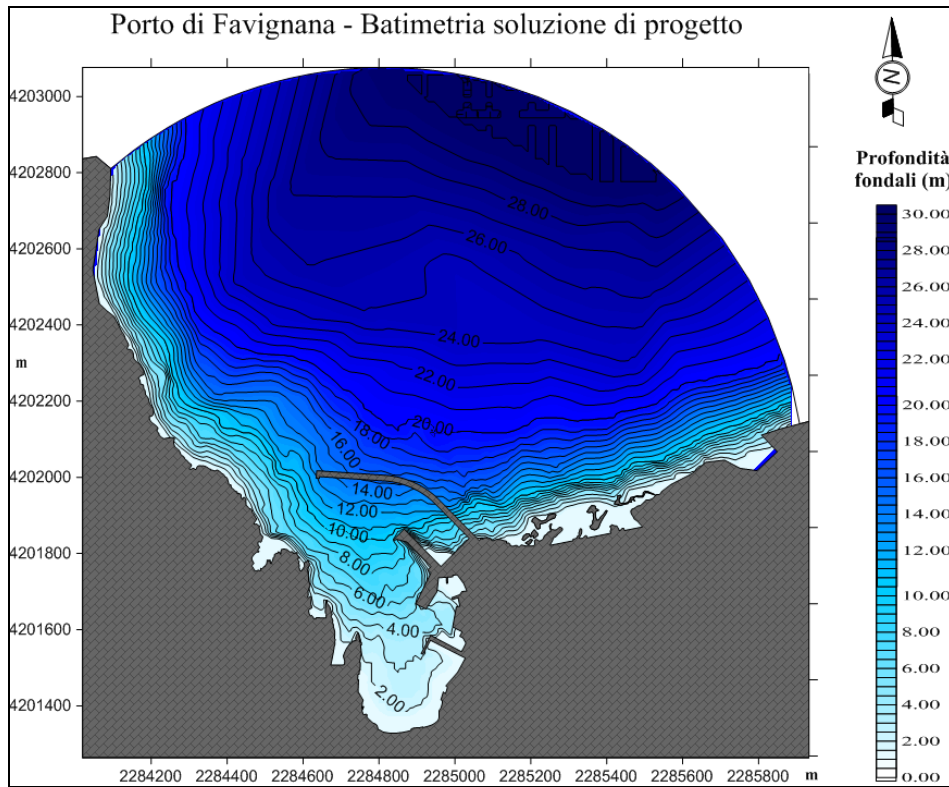
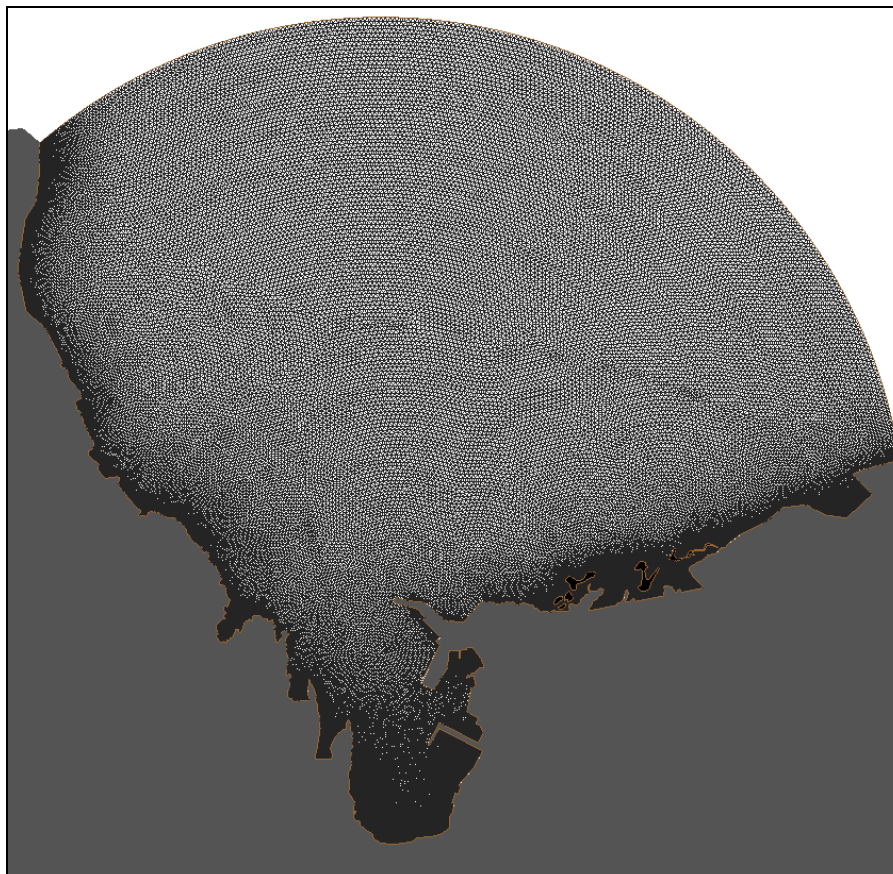


Figura 2.1 – Stato attuale: batimetria di riferimento.

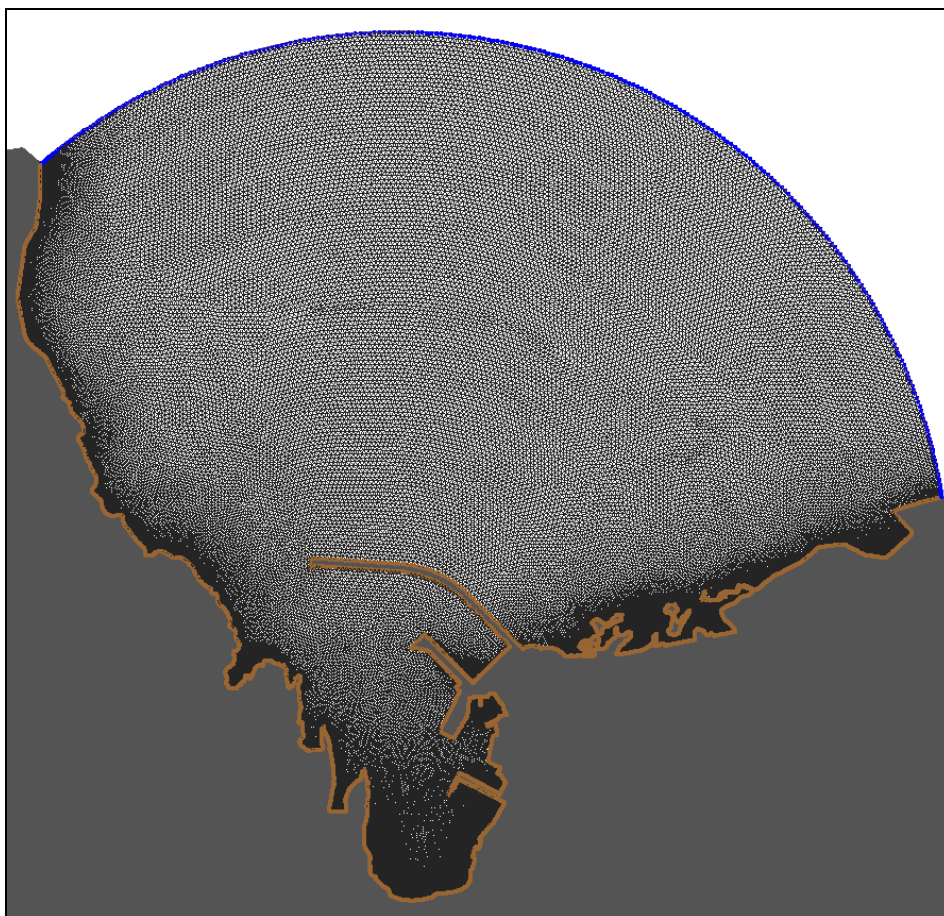
**COMUNE DI FAVIGNANA**  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
**B2 - Studio dell'agitazione interna portuale**



*Figura 2.2 – Configurazione di progetto: batimetria di riferimento*



*Figura 2.3 – Configurazione attuale: discretizzazione dello specchio liquido*



*Figura 2.4 – Configurazione di Progetto: discretizzazione dello specchio liquido.*

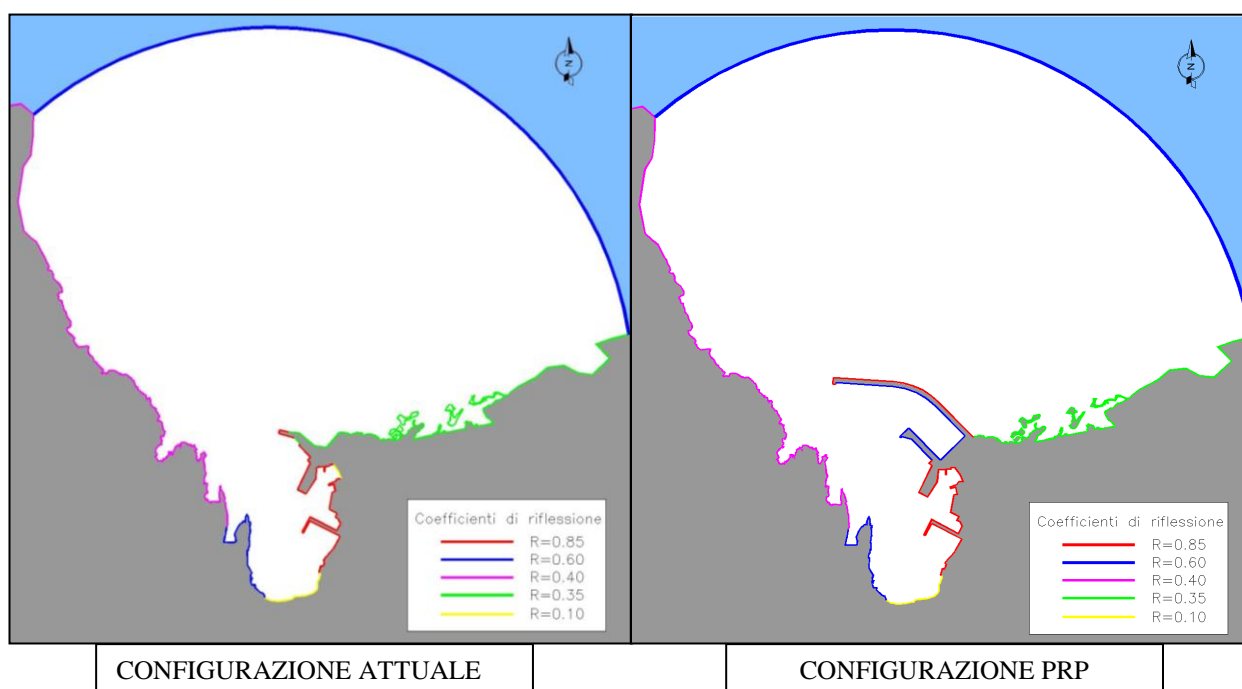
### **2.3 Definizione delle condizioni al contorno**

Per le due configurazioni prese in esame nel presente studio, al fine di poter determinare i livelli di agitazione ondosa residua all'interno dei bacini portuali che caratterizzano il porto di Favignana in seguito all'azione del moto ondoso incidente, è stato necessario definire ed impostare all'interno del modello matematico SMS le opportune condizioni al contorno. Nel dettaglio, così come riportato nella Figura 2.5, lungo i contorni che rappresentano la linea di costa, per i due diversi schemi portuali presi in esame sono stati imposti opportuni coefficienti di riflessione.

Inoltre, per entrambe le configurazioni, il dominio di calcolo è stato limitato da una linea semicircolare, sufficientemente distante dall'imboccatura portuale e che rappresenta le condizioni in mare aperto, lungo la quale sono state imposte le seguenti forzanti di moto ondoso.

<i>Altezza d'onda</i>	<i>Periodo</i>	<i>Direzione</i>
$H_i=1\text{m}$	T=6s, 8s, 10s, 12s	350°N – 360°N
$H_i=1\text{m}$	T=6s, 8s	340°N – 10°N – 20°N

Inoltre, per tenere conto degli effetti dissipativi dovuti al frangimento del moto ondoso ed all'attrito sul fondo, all'interno del modello SMS si è assunto un valore del coefficiente di frangimento pari a 0.08 ed un coefficiente di attrito sul fondo pari a 0.12.



*Figura 2.5 – Indicazione dei coefficienti di riflessioni adottati per le simulazioni effettuate con il modello CGWAVE*

## **2.4 Risultati delle simulazioni**

Completata la fase di discretizzazione del sistema liquido da simulare e di definizione delle condizioni al contorno è stato applicato il programma GFGEN per la predisposizione dei file di input (in codice binario) utilizzati successivamente dal codice di calcolo agli elementi finiti CGWAVE.

Con quest'ultimo programma infatti sono state condotte diverse simulazioni con lo scopo di determinare l'agitazione ondosa all'interno dei bacini protetti del porto di Favignana nelle due configurazioni in esame e successivamente di verificare per le stesse le



condizioni di sicurezza necessarie alle imbarcazioni in fase di stazionamento e durante le manovre in fase di ingresso ed uscita dal porto.

Dall'analisi delle figure (dalla Figura 2.6 alla Figura 2.33), è possibile verificare, per gli schemi portuali presi in esame, il campo d'onda all'interno del porto di Favignana conseguente a diversi stati di mare rappresentativi sia delle condizioni ordinarie che estreme. La scala di rappresentazione dei valori dell'altezza d'onda (m) mostra come le nuove opere in progetto per la messa in sicurezza del porto assicurano all'interno degli specchi acquei protetti condizioni pienamente accettabili per lo stazionamento in sicurezza delle imbarcazioni all'interno di tutte le zone di ormeggiare. Peraltro, il nuovo molo di sopraflutto garantisce su un'ampia zona avamportuale livelli di agitazione ondosa tali da consentire più agevoli e sicure manovre di ingresso e di uscita dal porto.

CONFIGURAZIONE ATTUALE

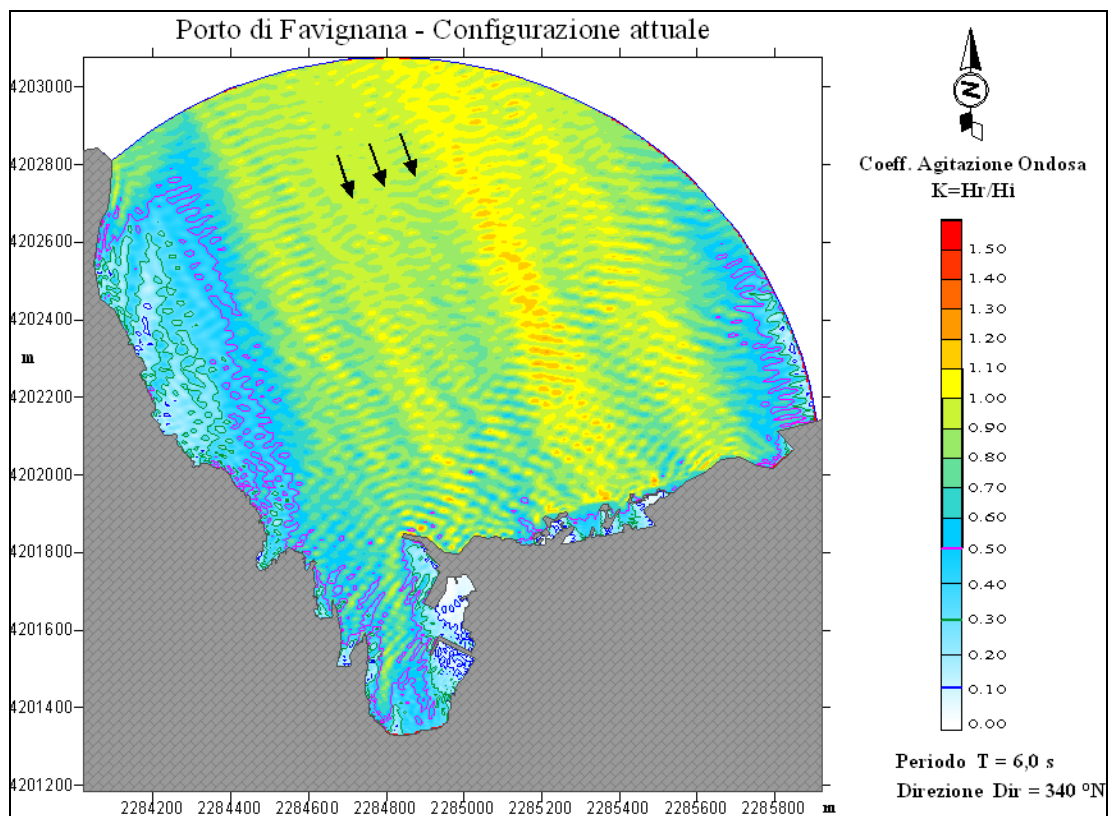


Figura 2.6 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=340^\circ N; T=6s$ )

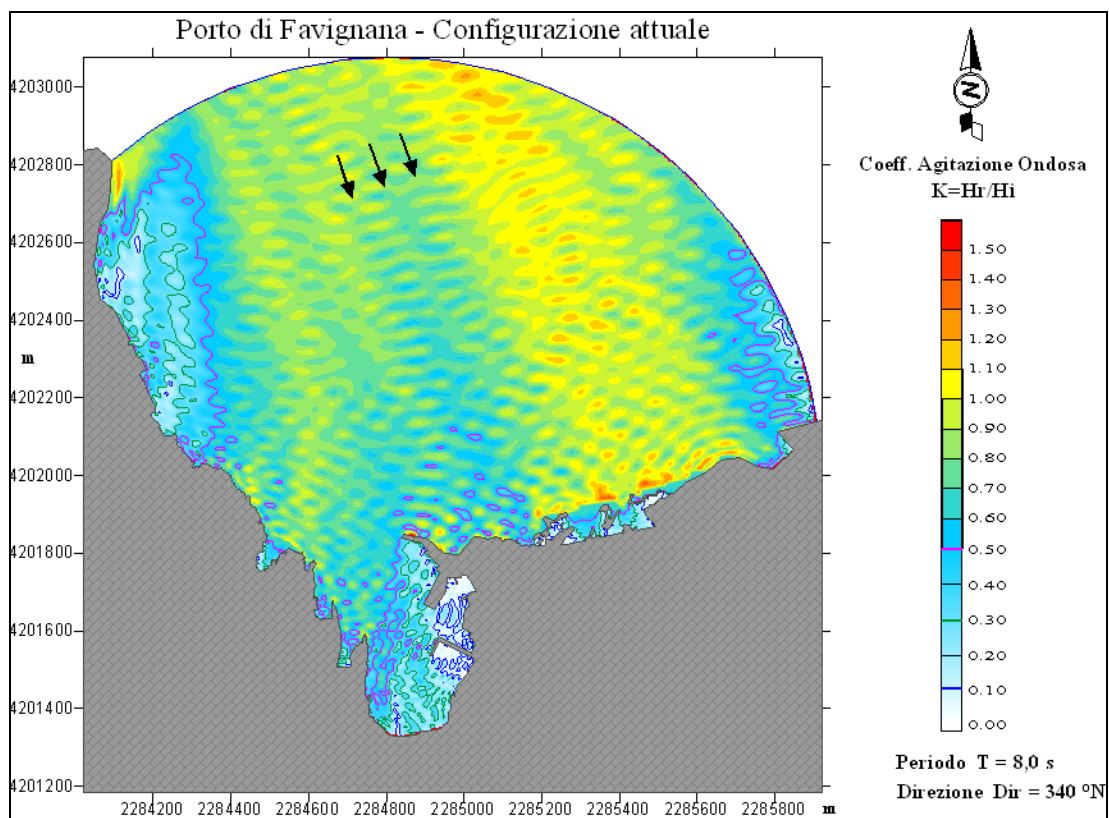


Figura 2.7 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=340^\circ N; T=8s$ )

COMUNE DI FAVIGNANA  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

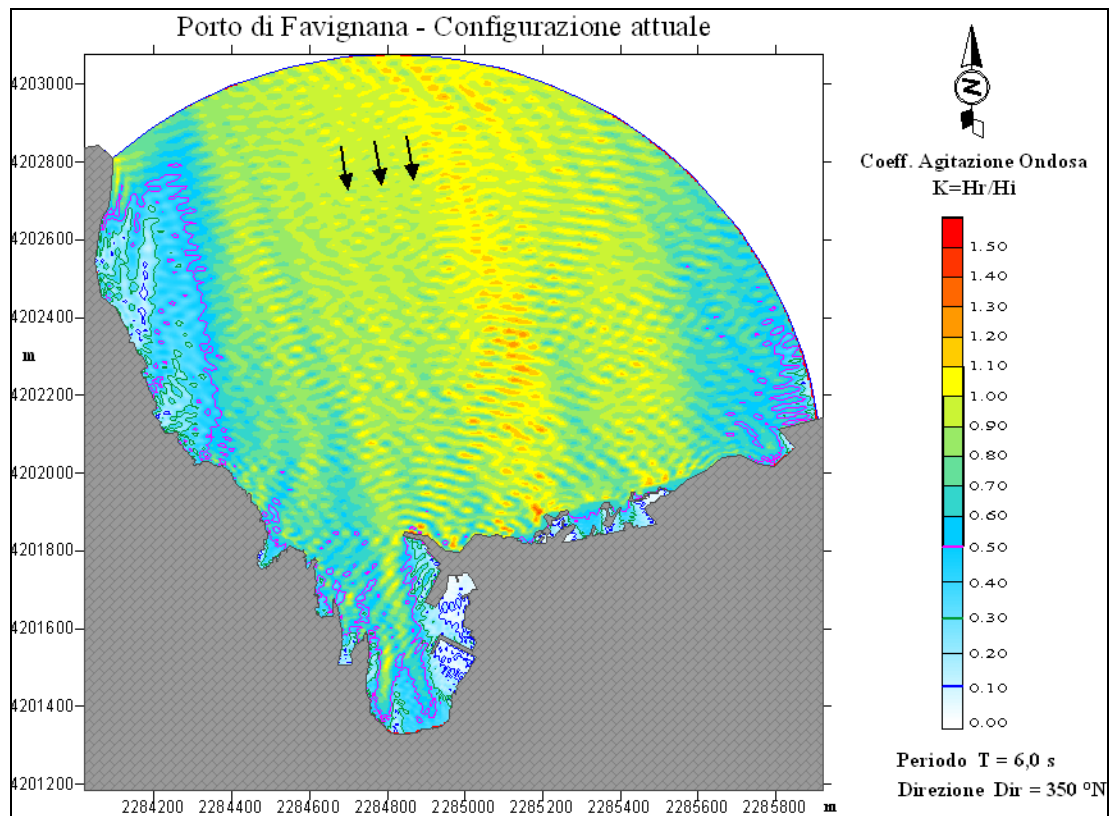


Figura 2.8 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=350^{\circ}N;T=6s$ )

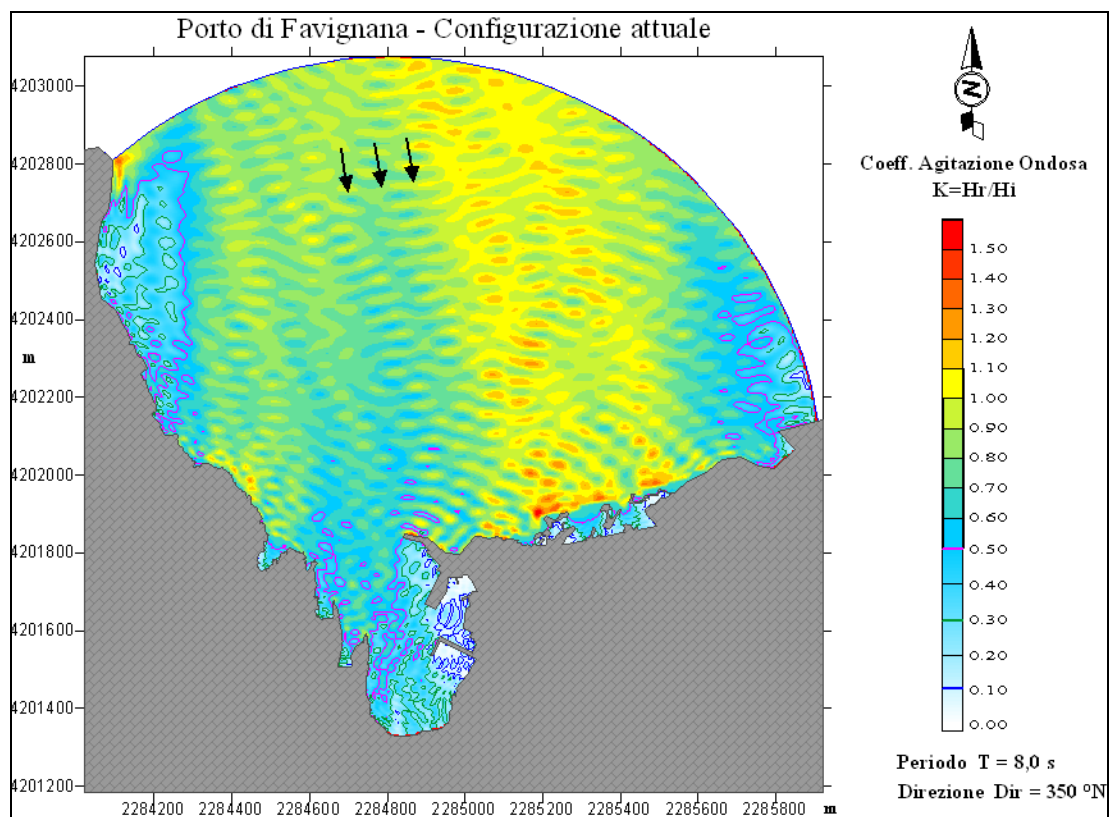


Figura 2.9 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=350^{\circ}N;T=8s$ )

COMUNE DI FAVIGNANA  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

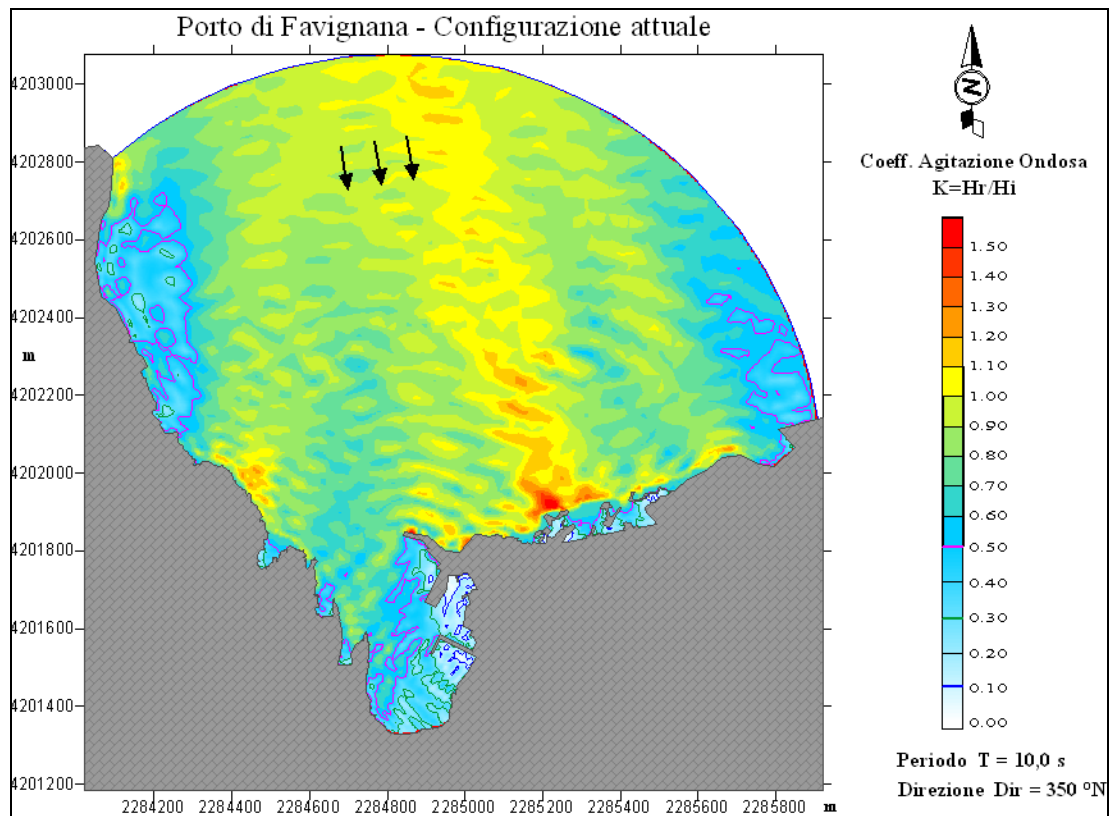


Figura 2.10 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=350^\circ N; T=10s$ )

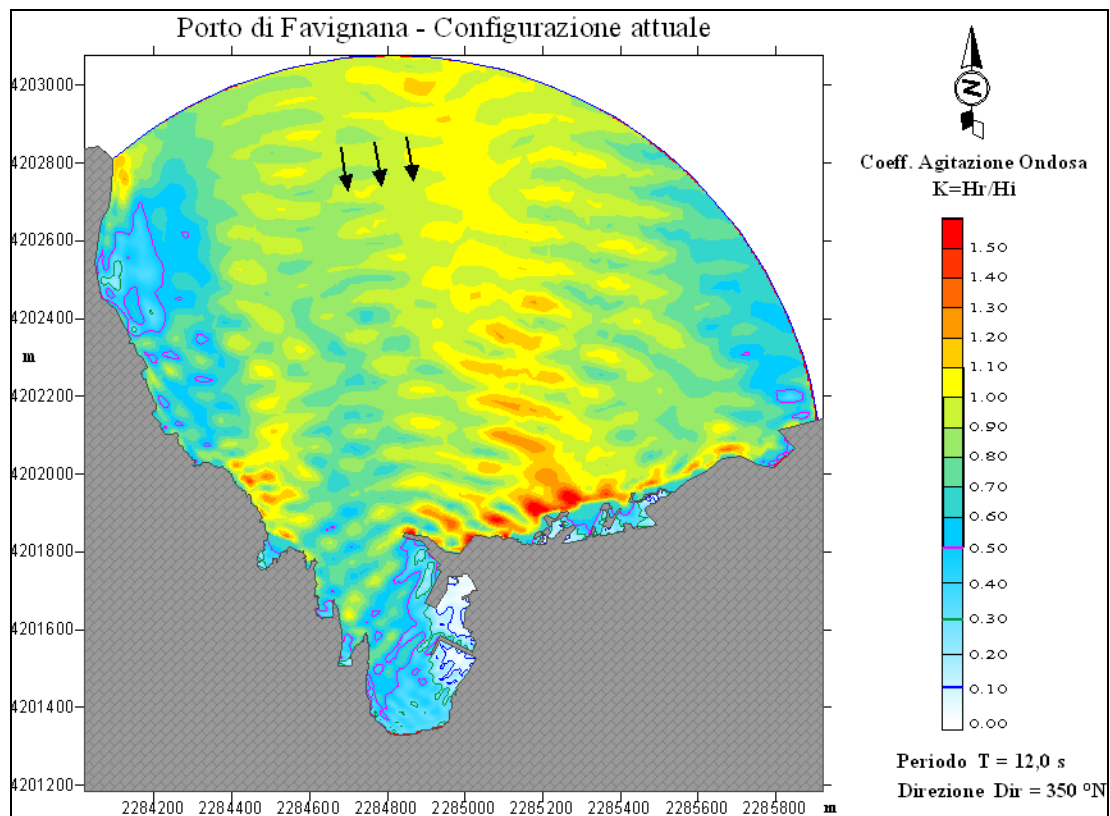


Figura 2.11 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=350^\circ N; T=12s$ )

COMUNE DI FAVIGNANA  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

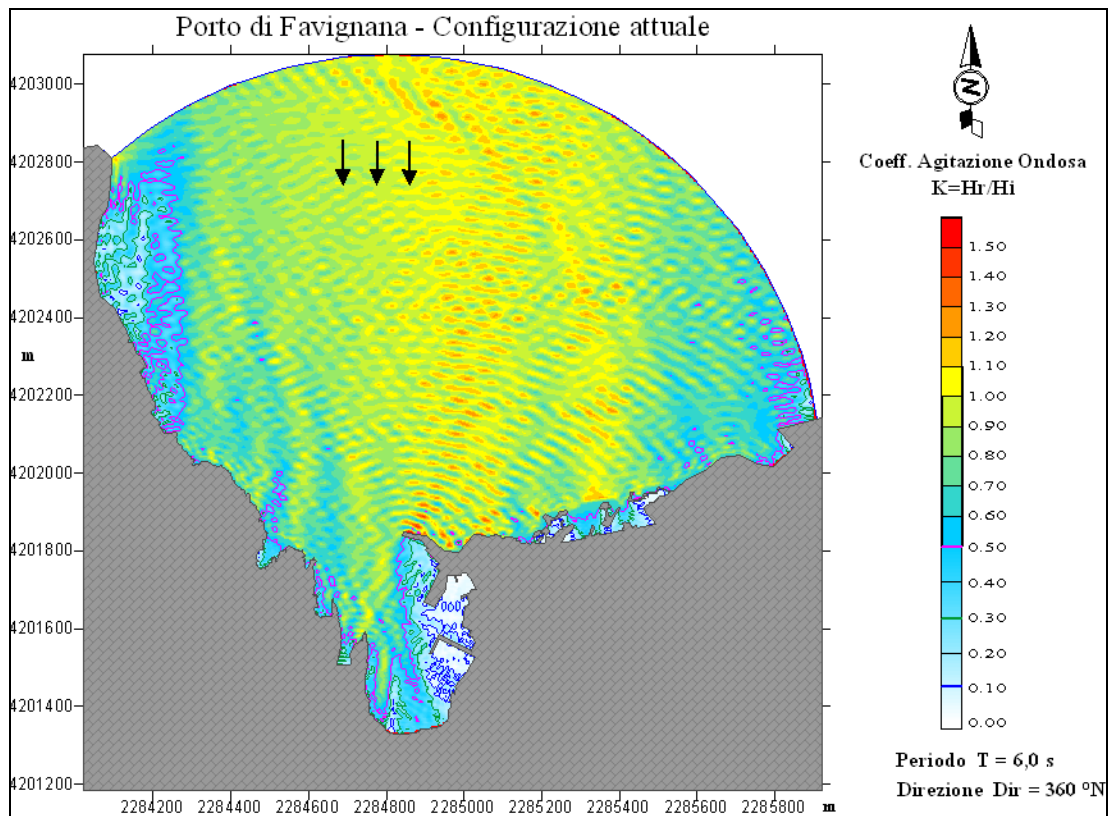


Figura 2.12 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=360^\circ N; T=6s$ )

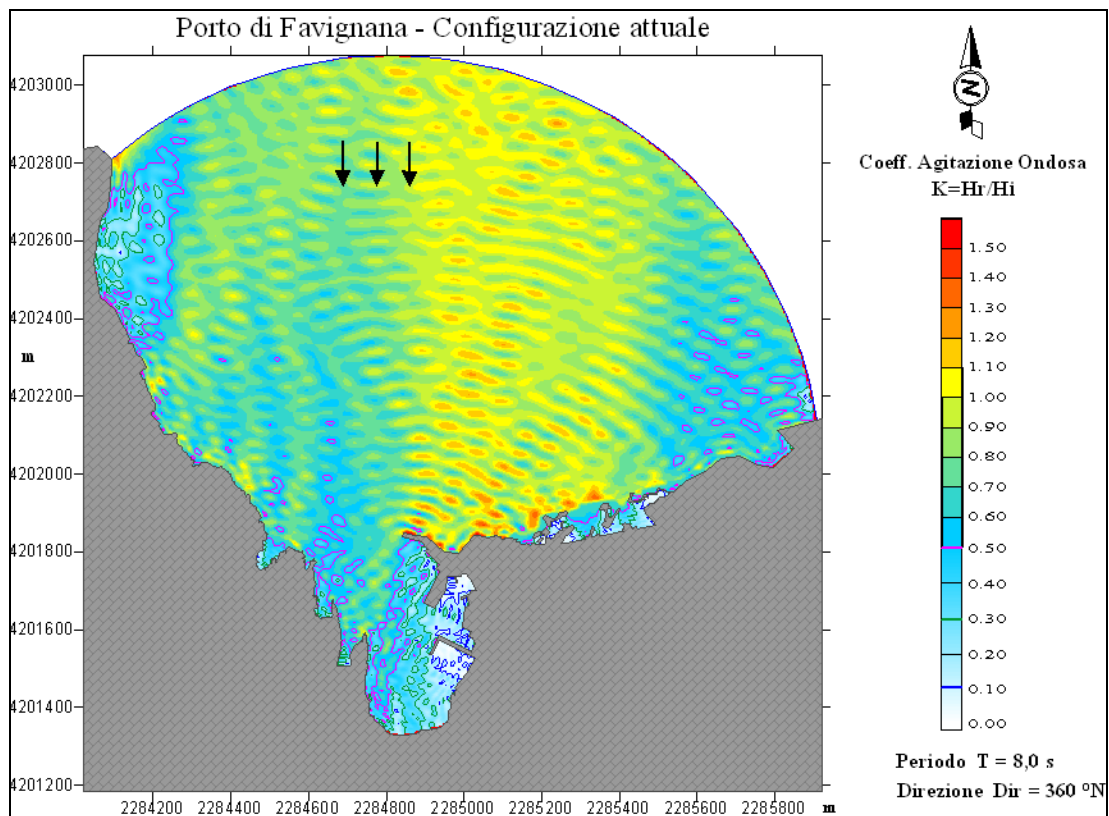


Figura 2.13 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=360^\circ N; T=8s$ )

COMUNE DI FAVIGNANA  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

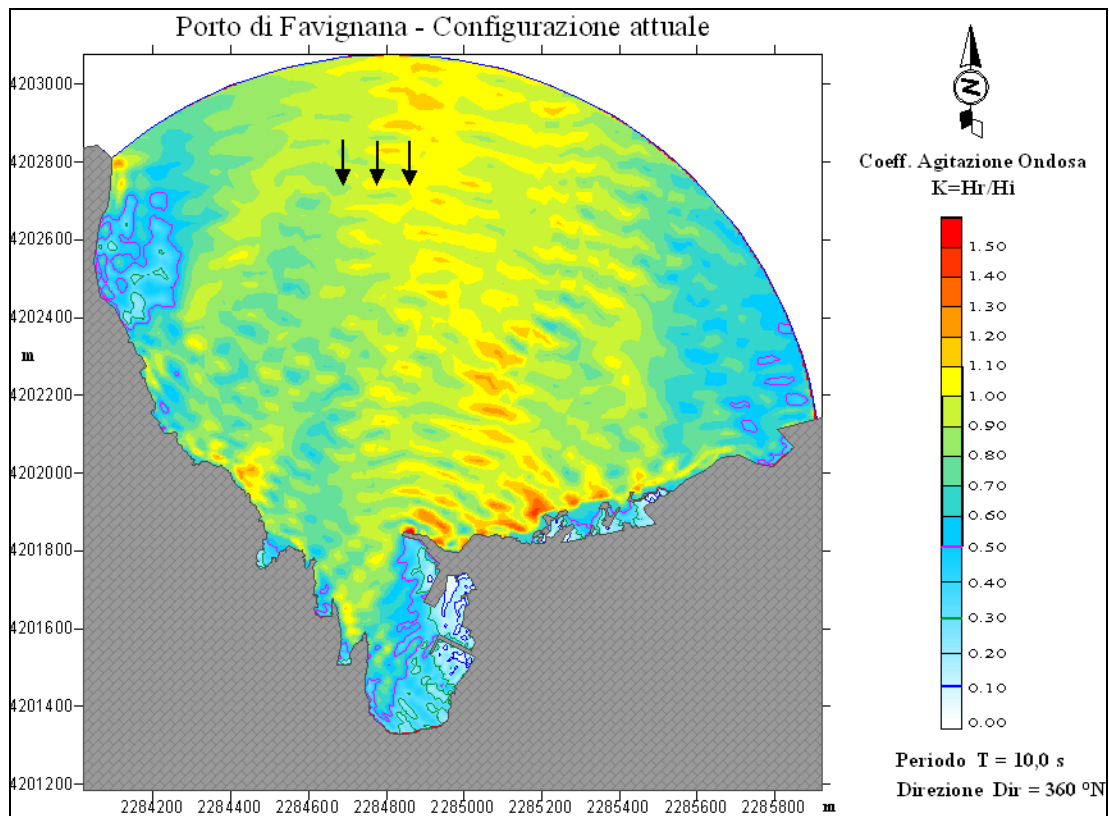


Figura 2.14 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=360^\circ N; T=10s$ )

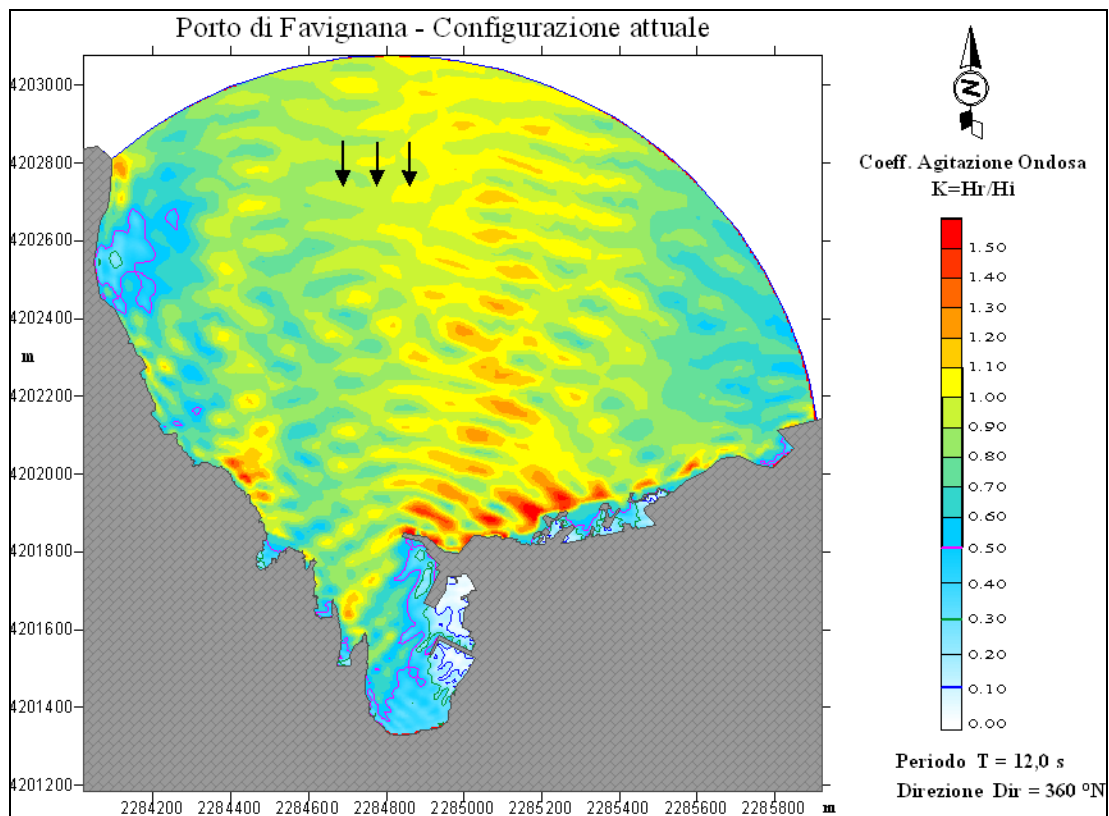


Figura 2.15 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=360^\circ N; T=12s$ )

COMUNE DI FAVIGNANA  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

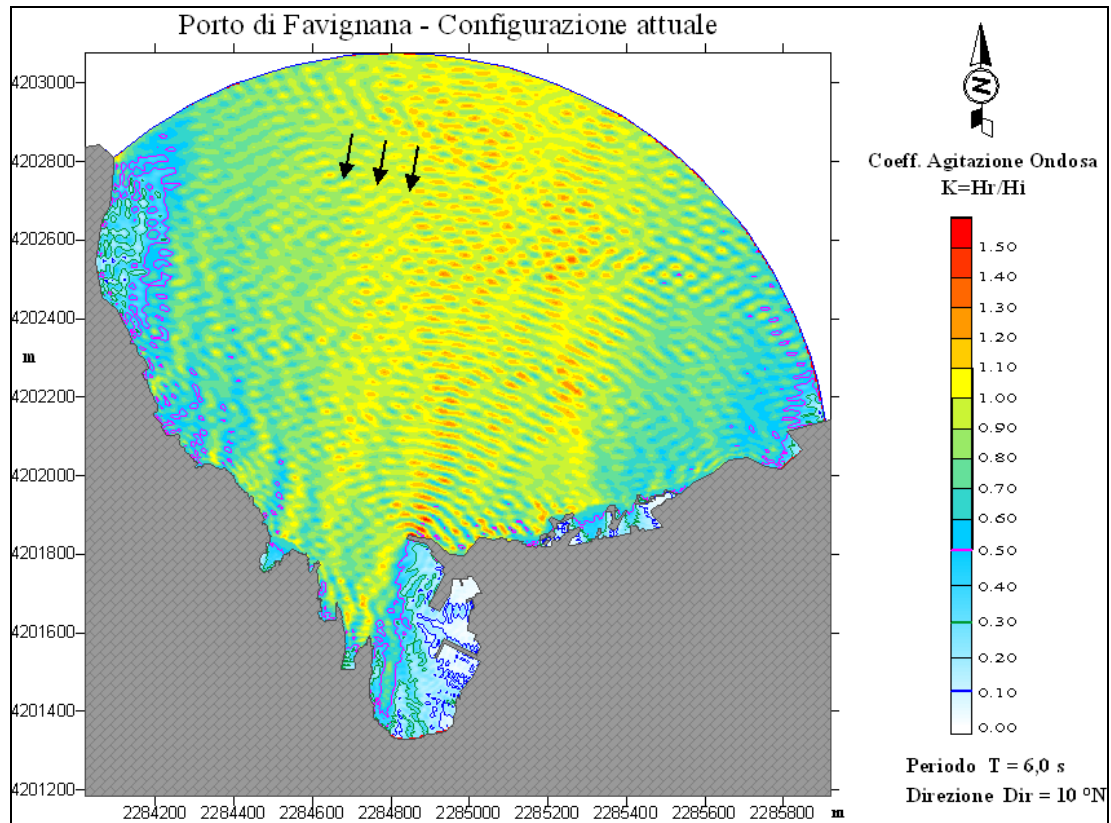


Figura 2.16 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=10^\circ N; T=6s$ )

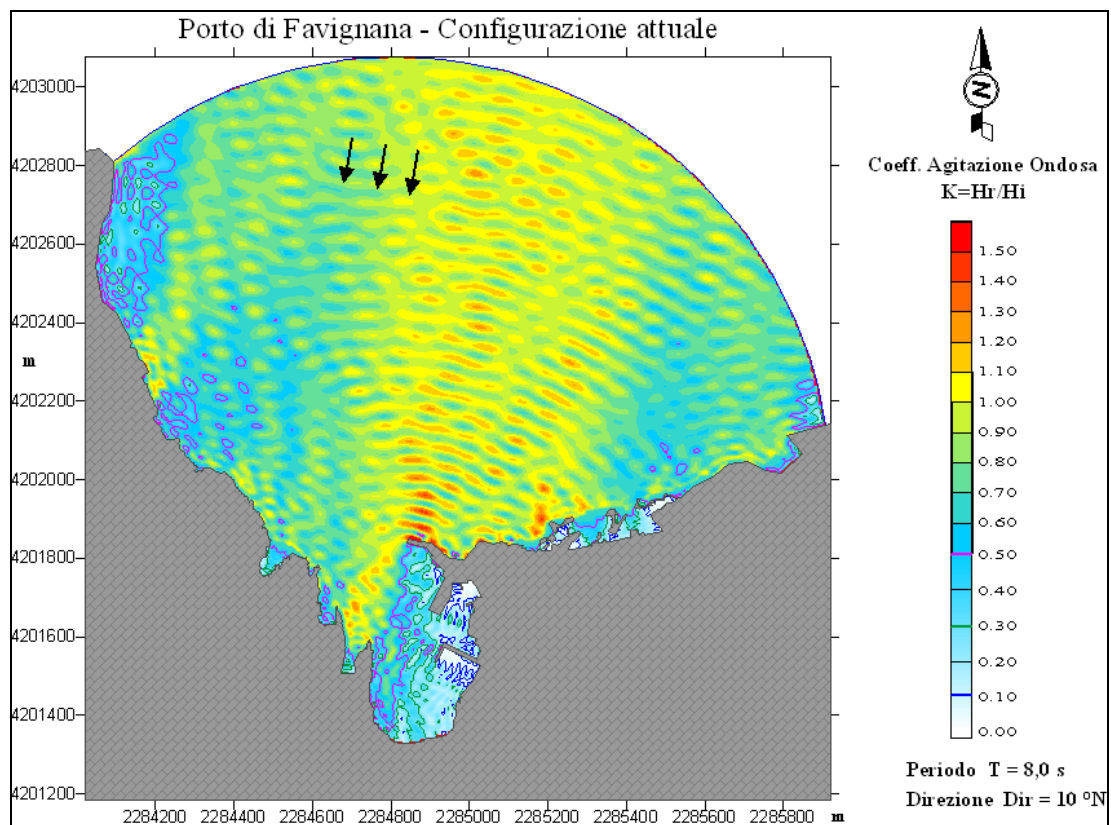
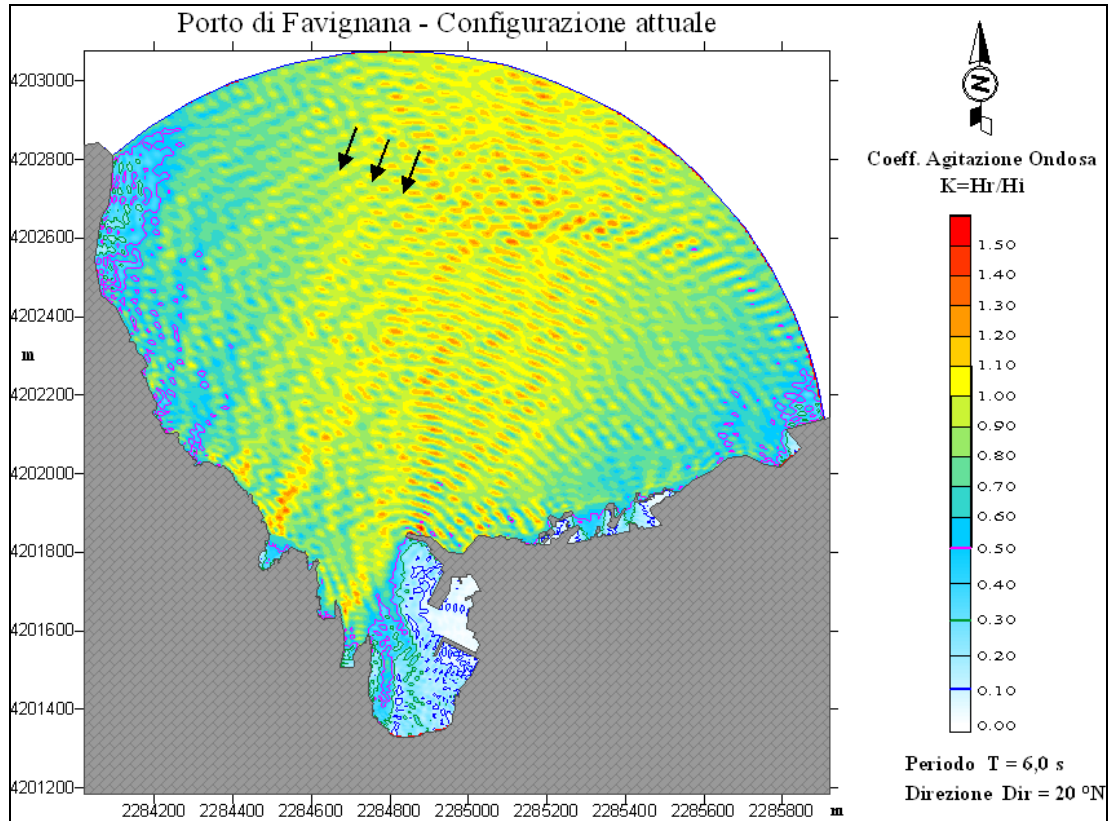
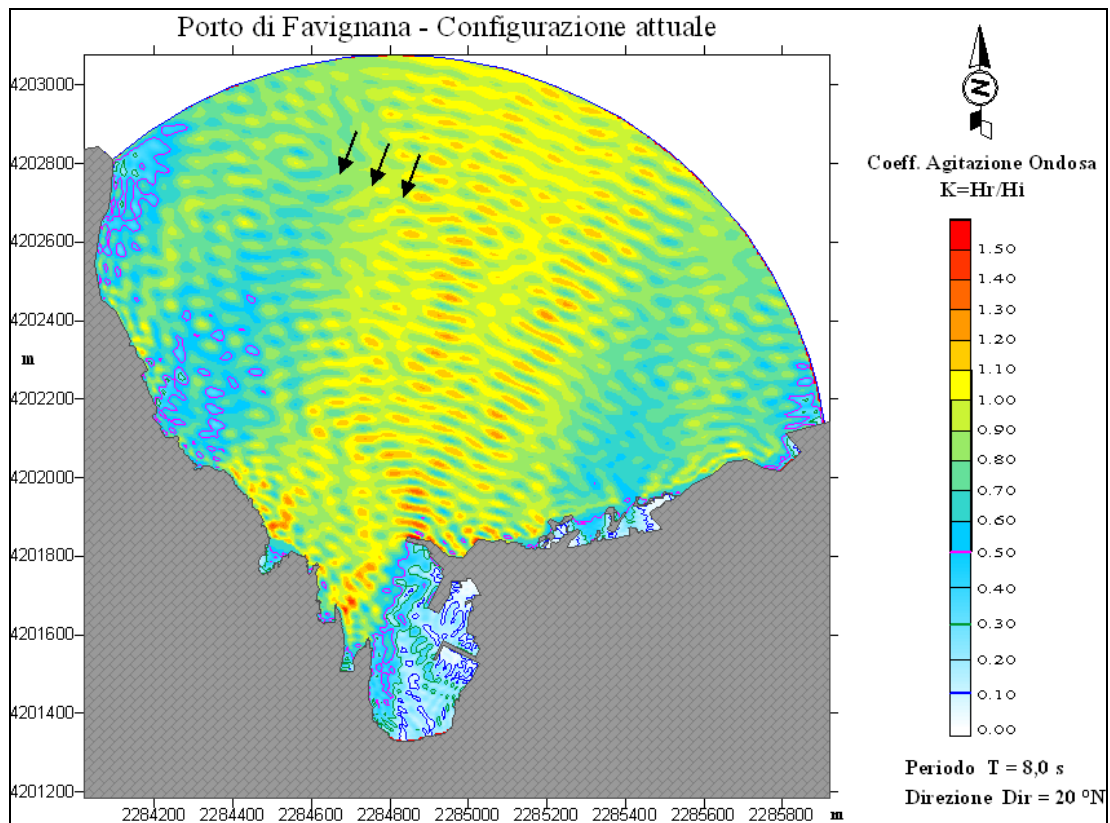


Figura 2.17 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=10^\circ N; T=8s$ )

**COMUNE DI FAVIGNANA**  
 Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
**B2 - Studio dell'agitazione interna portuale**



*Figura 2.18 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=20°N;T=6s)*



*Figura 2.19 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=20°N;T=8s)*



CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

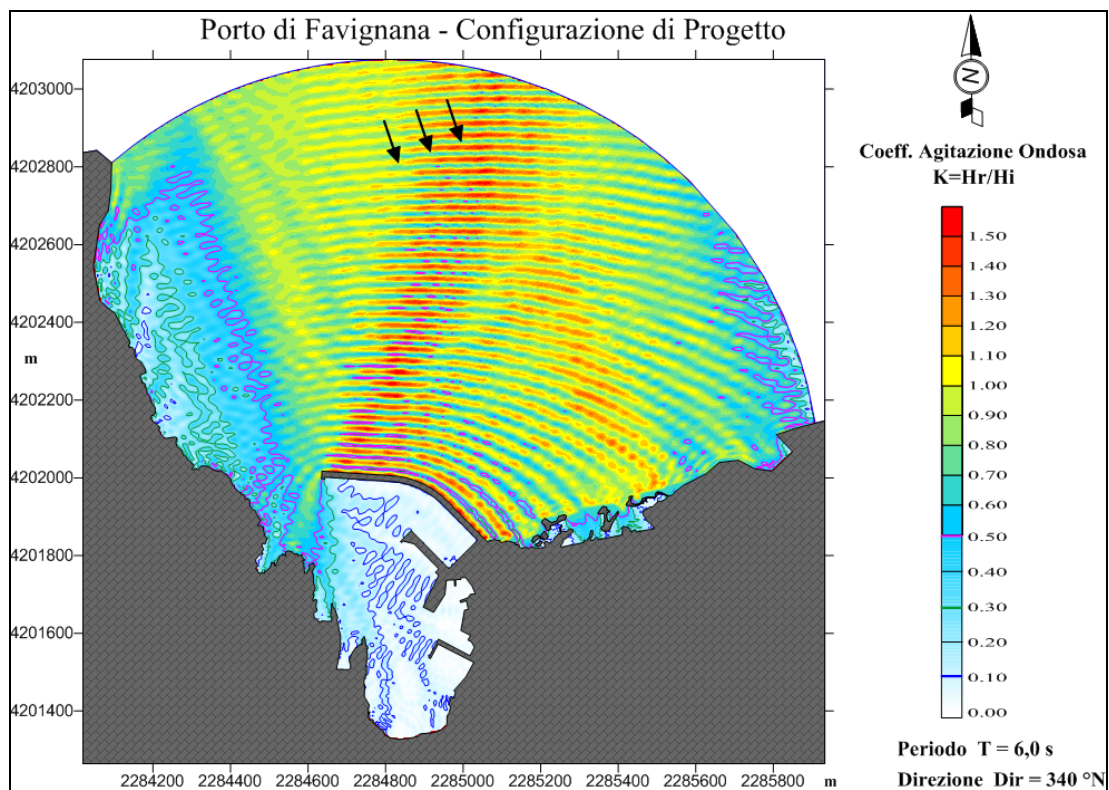


Figura 2.20 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=340^{\circ}N;T=6s$ )

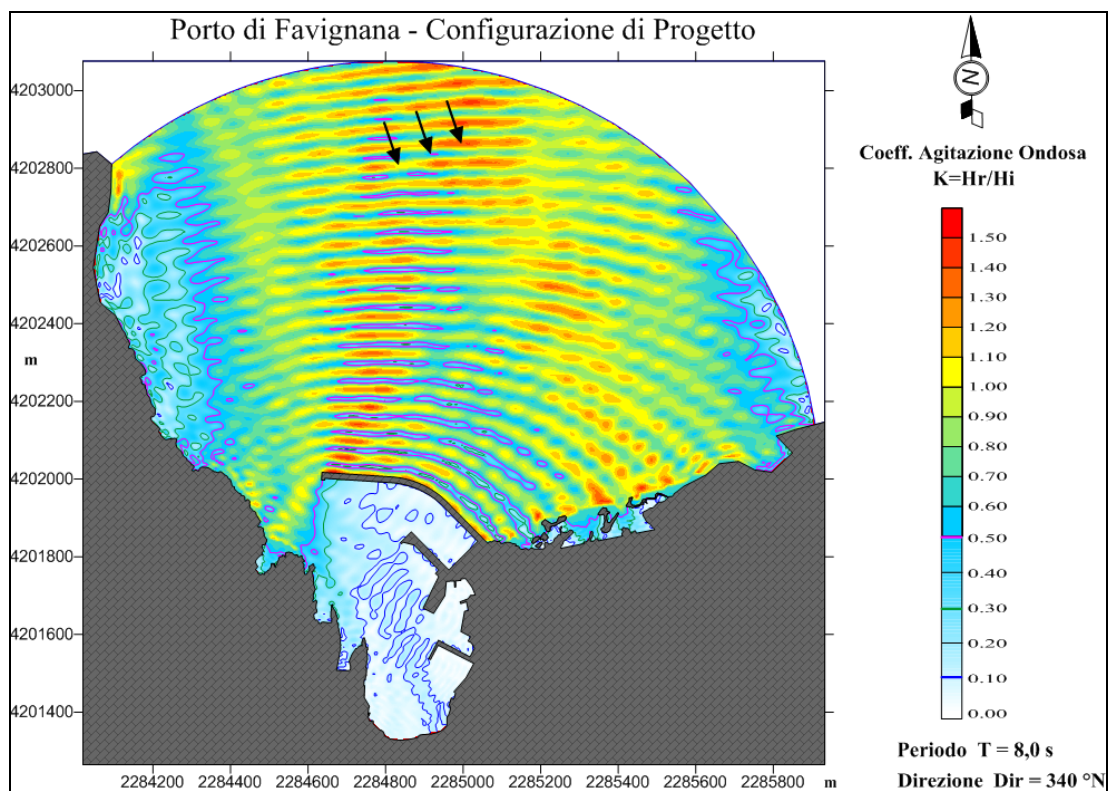


Figura 2.21 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=340^{\circ}N;T=8s$ )

COMUNE DI FAVIGNANA  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

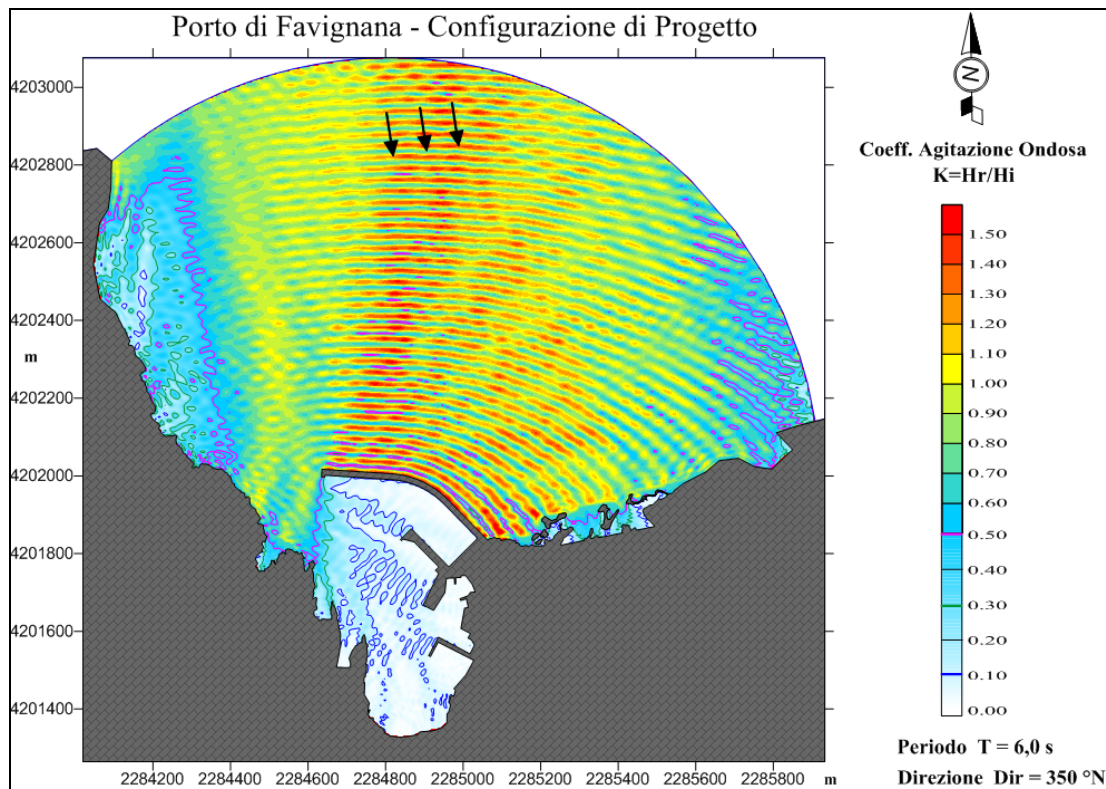


Figura 2.22 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=350^\circ N; T=6s$ )

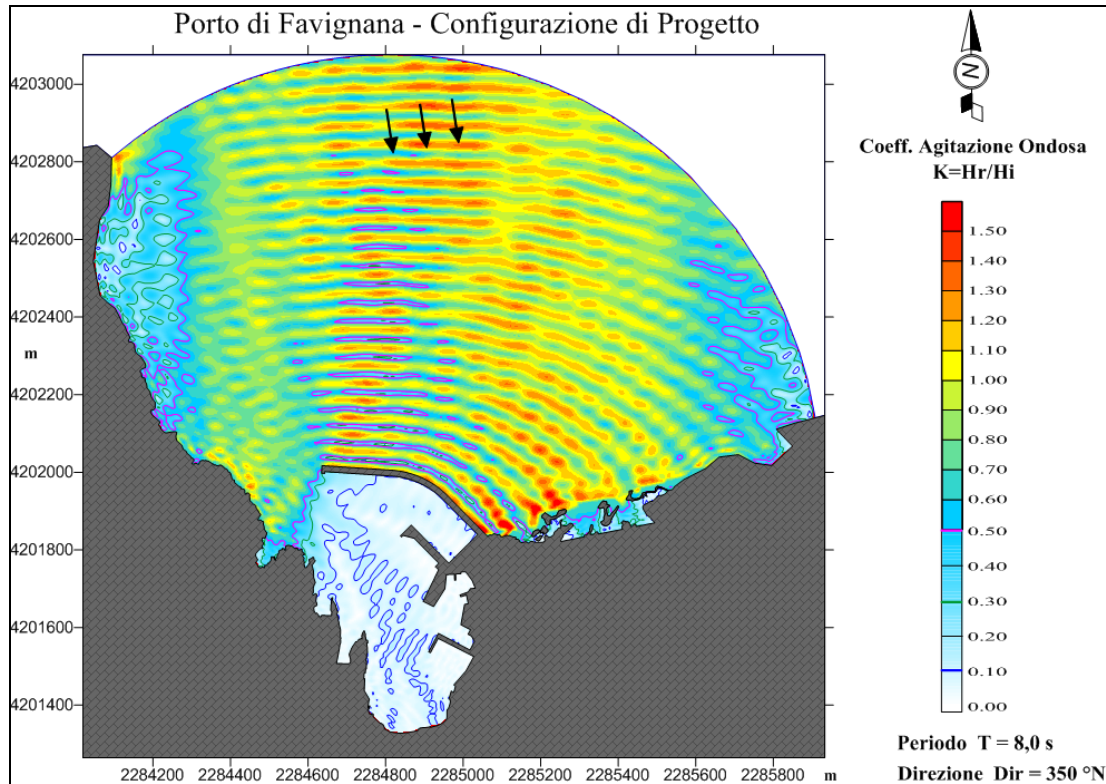


Figura 2.23 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=350^\circ N; T=8s$ )

COMUNE DI FAVIGNANA  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

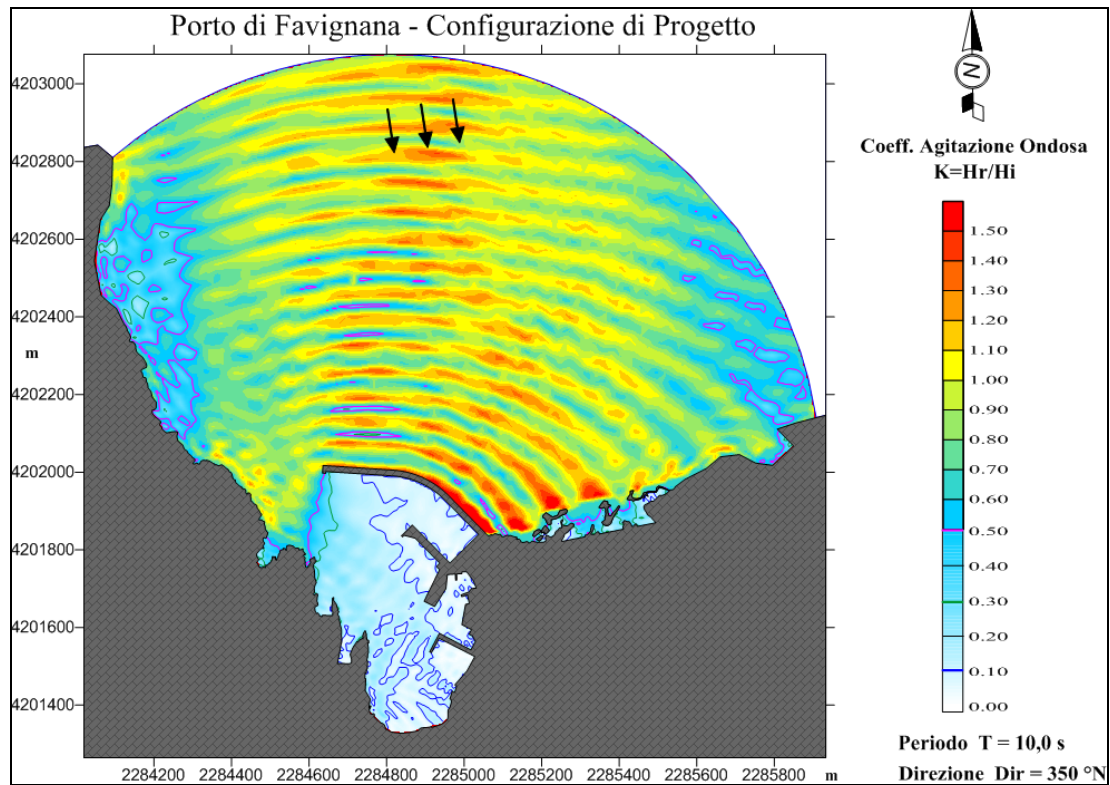


Figura 2.24 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=350^\circ N; T=10s$ )

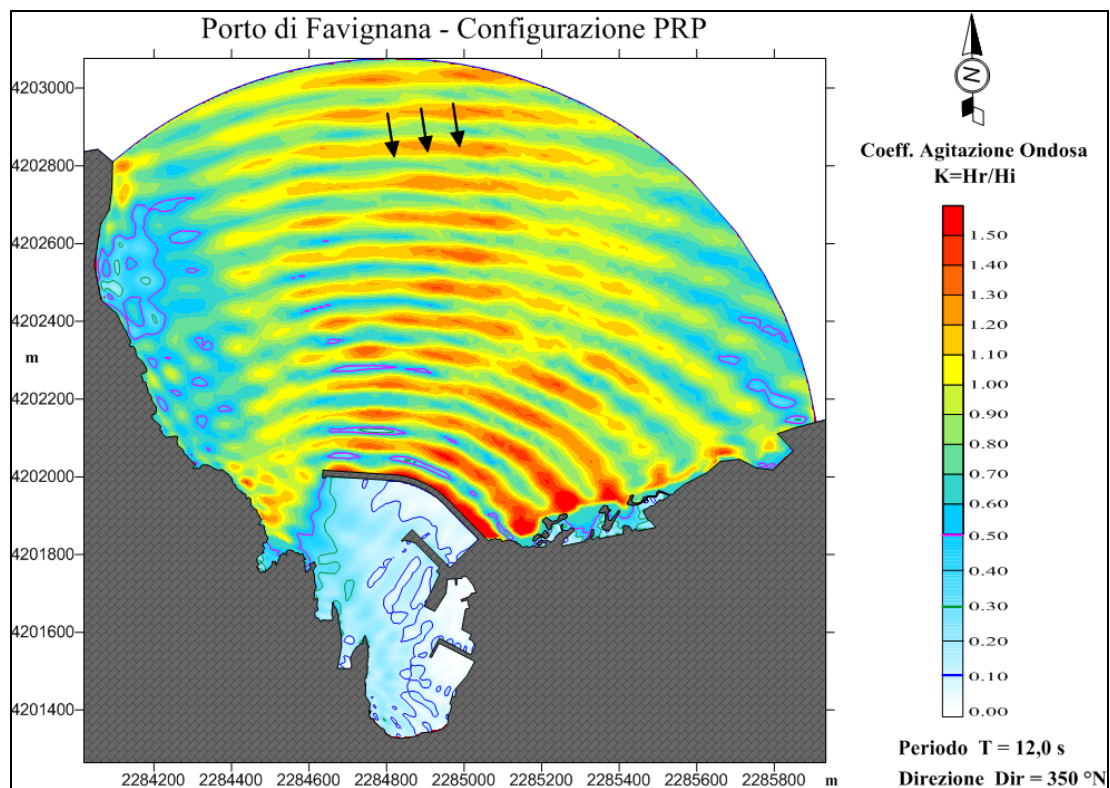


Figura 2.25 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=350^\circ N; T=12s$ )

COMUNE DI FAVIGNANA  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

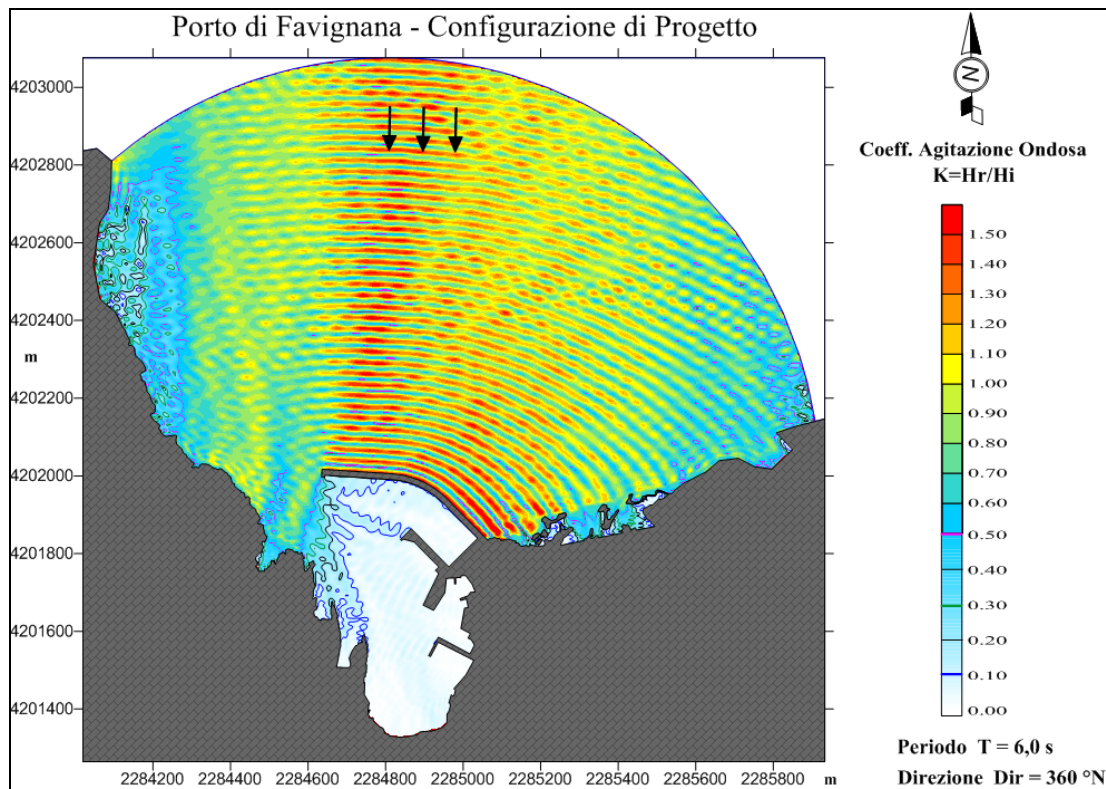


Figura 2.26 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=360^\circ N; T=6s$ )

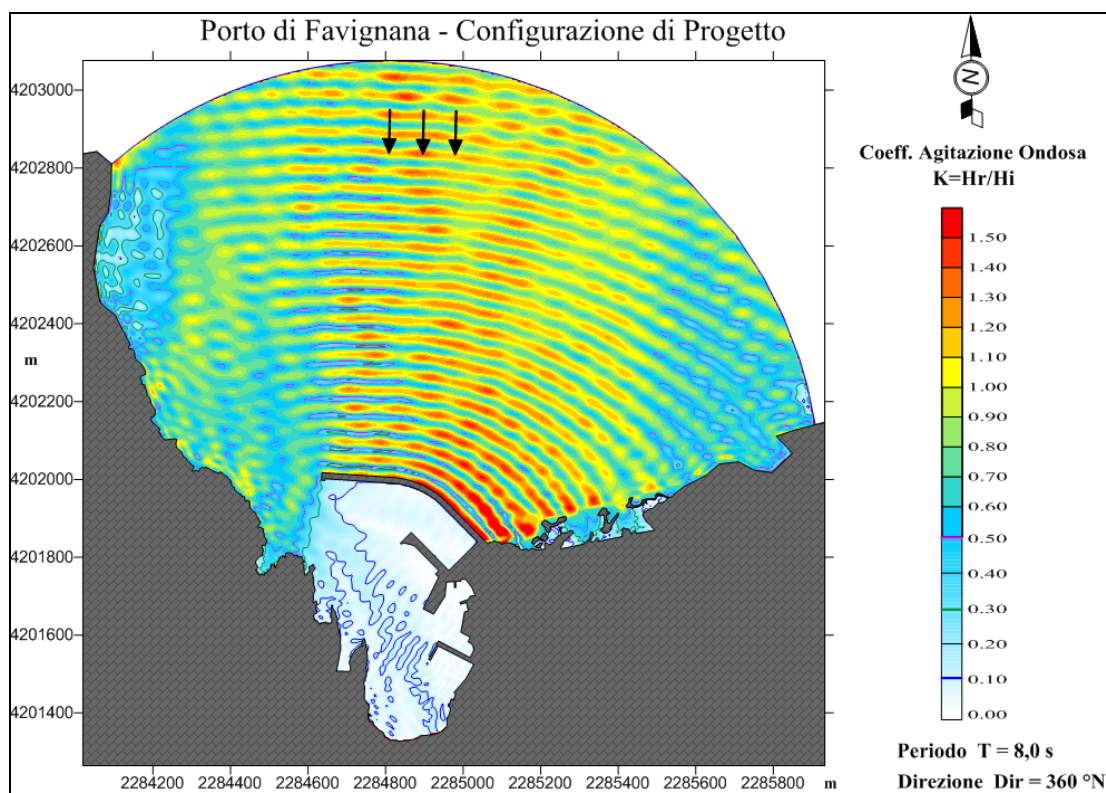


Figura 2.27 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=360^\circ N; T=8s$ )

COMUNE DI FAVIGNANA  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

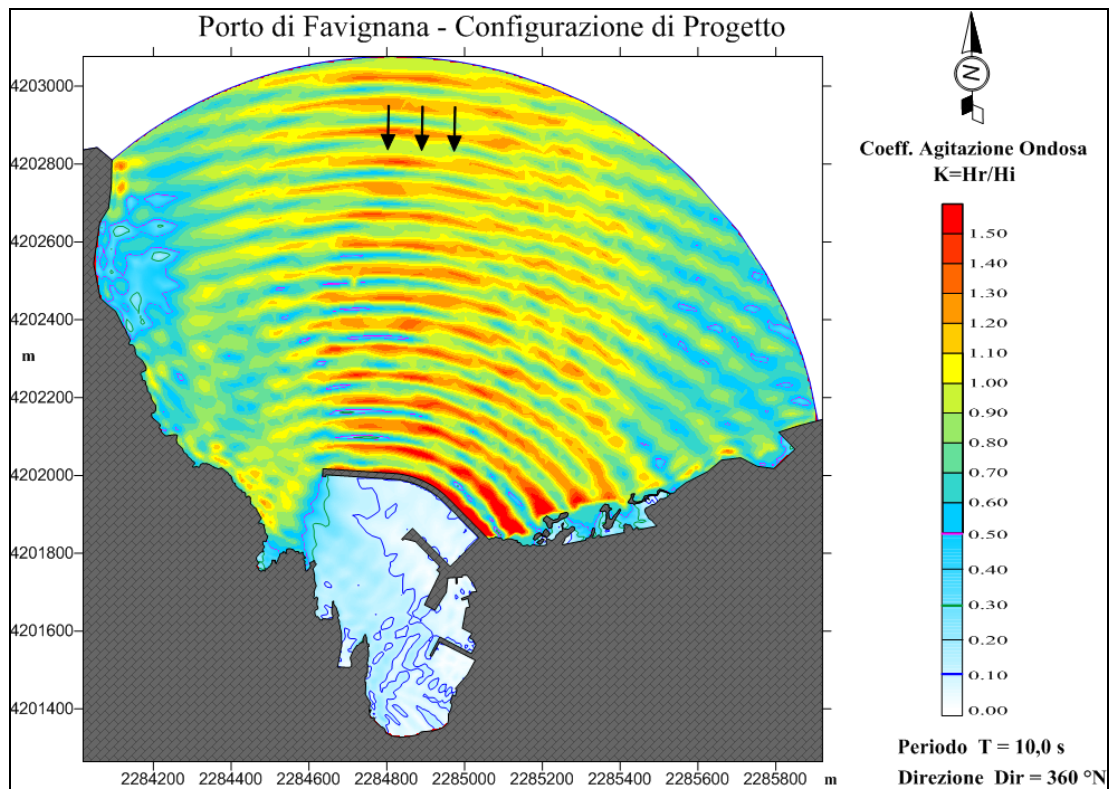


Figura 2.28 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=360^\circ N; T=10s$ )

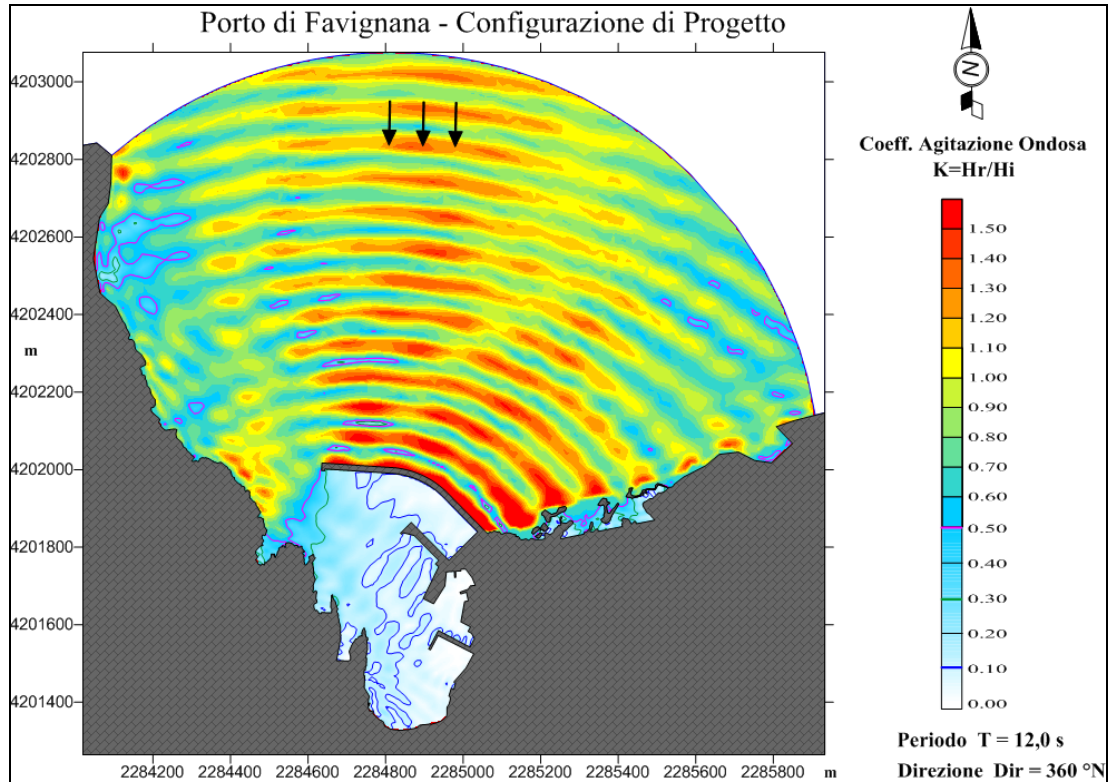


Figura 2.29 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=360^\circ N; T=12s$ )

COMUNE DI FAVIGNANA  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

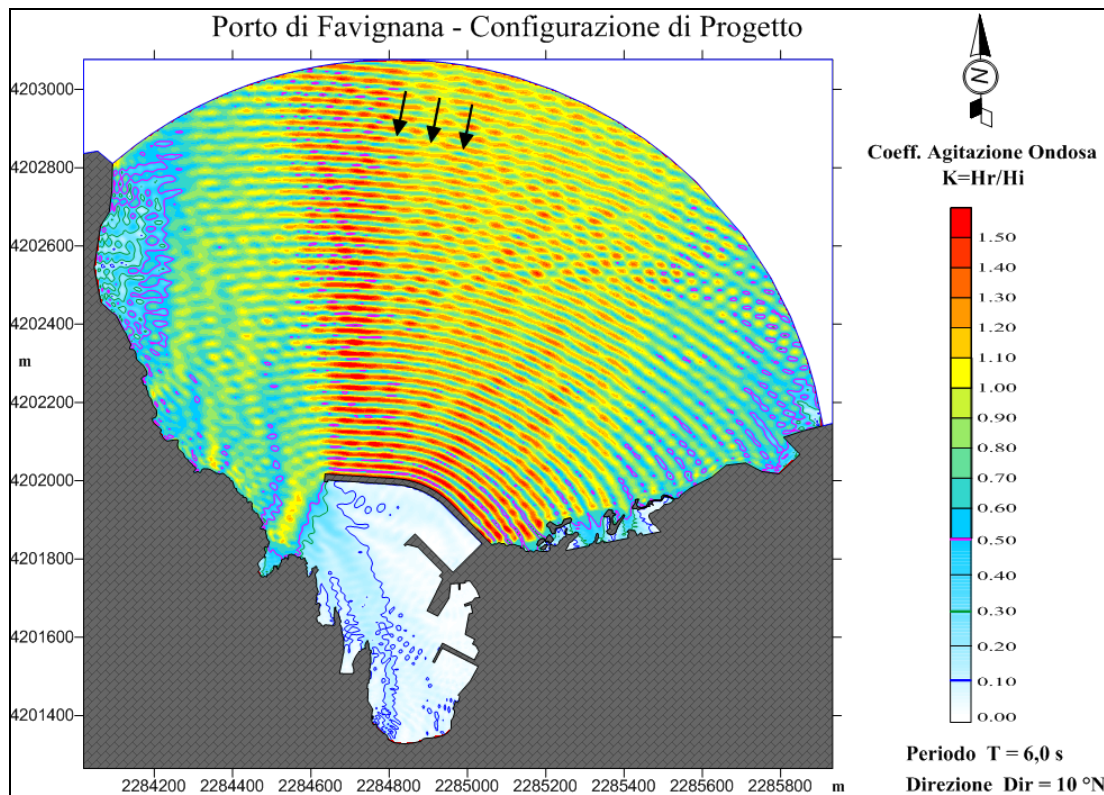


Figura 2.30 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=10^\circ N; T=6s$ )

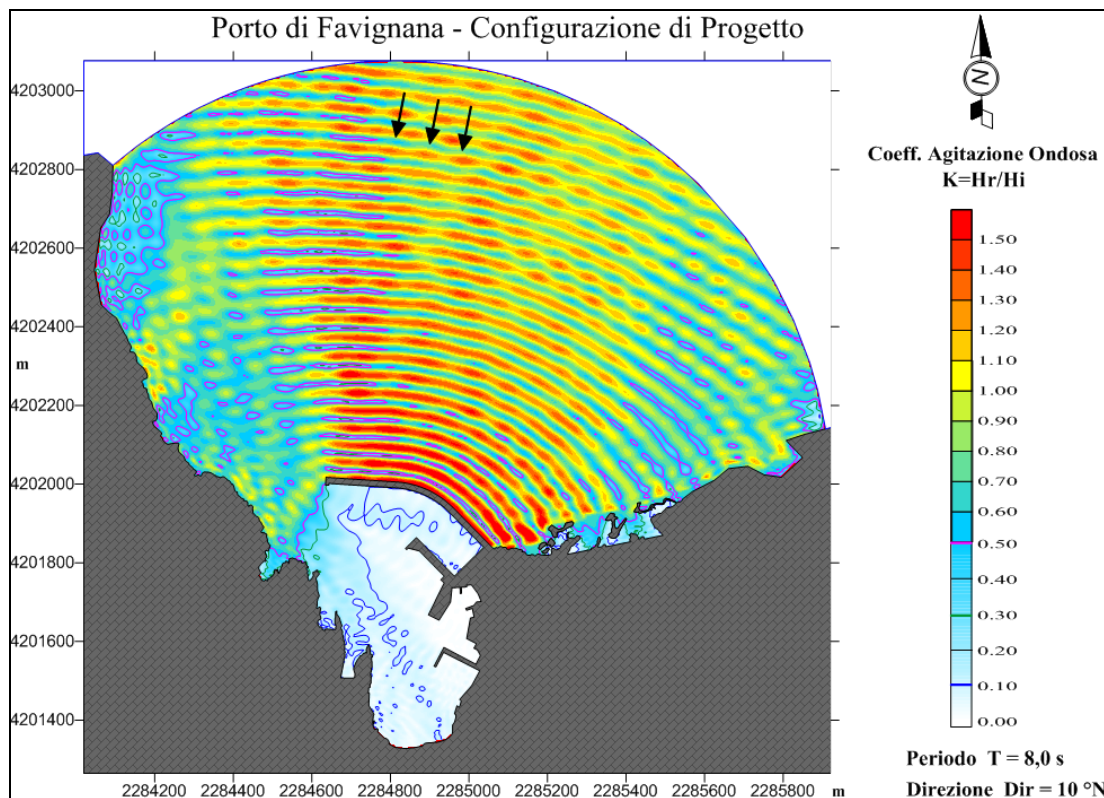


Figura 2.31 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=10^\circ N; T=8s$ )

COMUNE DI FAVIGNANA  
Lavori di messa in sicurezza del Porto di Favignana  
B2 - Studio dell'agitazione interna portuale

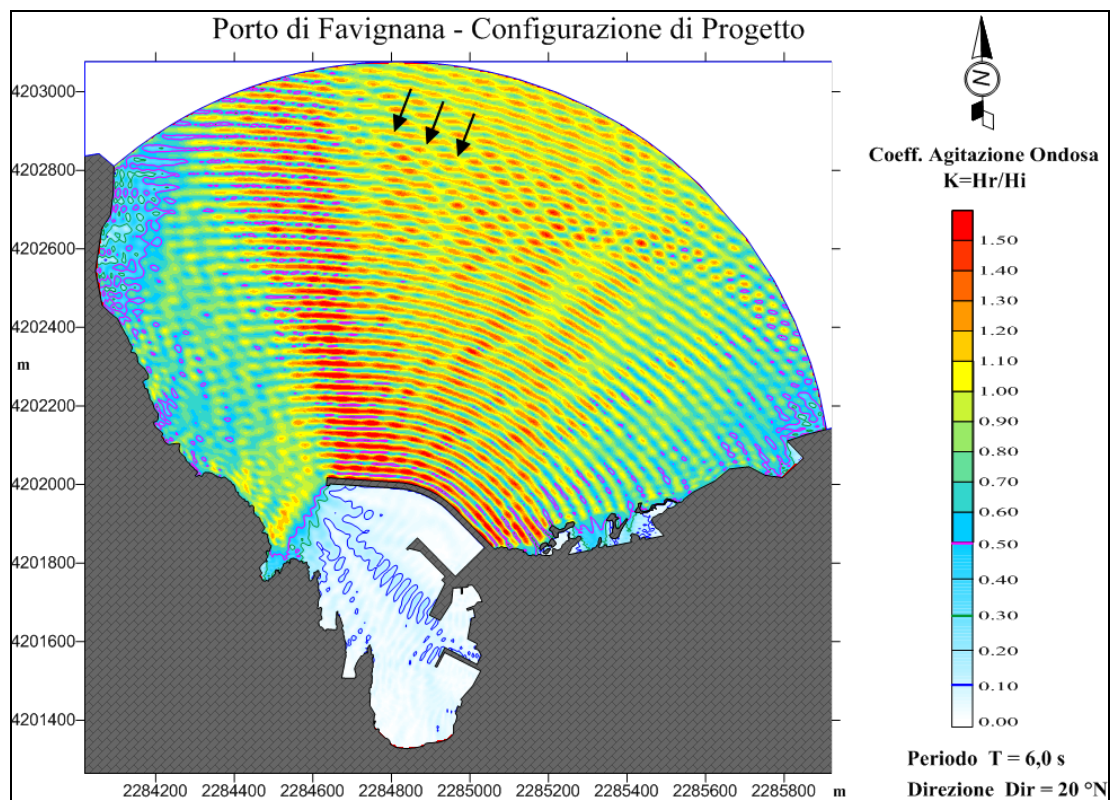


Figura 2.32 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=20^\circ N; T=6s$ )

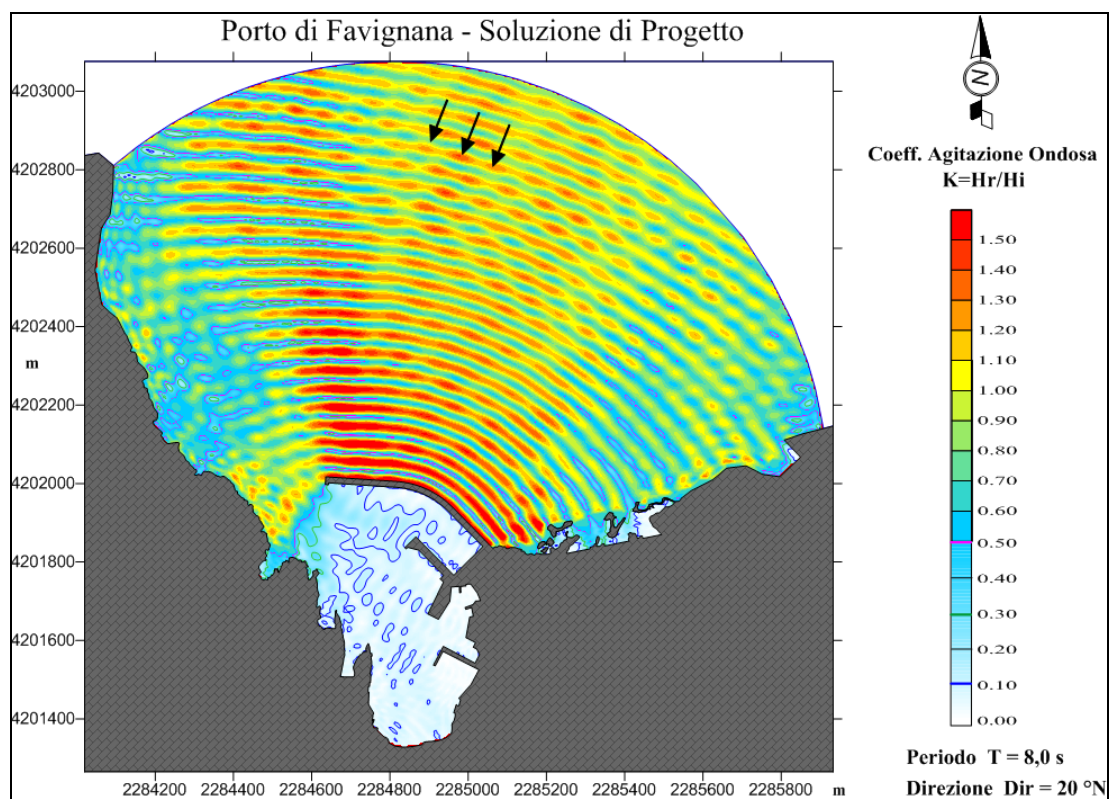


Figura 2.33 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ( $Dir=20^\circ N; T=8s$ )

### **3 CONCLUSIONI**

Al fine di verificare l'effettiva efficacia delle nuove opere previste per la messa in sicurezza del porto di Favignana, in relazione all'ingressione del moto ondoso all'interno dei bacini portuali e dei conseguenti livelli di agitazione lungo le banchine che li costituiscono, è stato applicato un opportuno modello matematico agli elementi finiti.

Tale modello, denominato CGWAVE ed appartenente agli applicativi del sistema di modellazione SMS (Surface-water Modeling System), ha consentito di determinare, per diversi eventi di moto ondoso opportunamente scelti e rappresentativi sia delle condizioni ordinarie che estreme, il campo d'onda all'interno dei bacini portuali oggetto di studio tenendo conto dei fenomeni combinati di diffrazione, rifrazione e riflessione, nonché degli effetti dissipativi dovuti al frangimento ed all'attrito sul fondo.

Nel modello numerico tutte le opere, che costituiscono il contorno bagnato delle due configurazioni portuali simulate, sono state riprodotte utilizzando opportuni coefficienti di riflessione.

Le forzanti di moto ondoso scelte per le simulazioni sono state imposte nel modello numerico lungo un contorno semicircolare (battitore) che delimita lato mare lo specchio liquido discretizzato.

L'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate ha consentito di verificare ed accertare in maniera oggettiva i benefici derivanti dall'attenuazione del moto ondoso incidente all'interno dei bacini portuali che costituiscono il porto di Favignana in seguito alla realizzazione delle nuove opere per la messa in sicurezza dello stesso.

Nel dettaglio, le simulazioni mostrano in maniera evidente come l'attuale opera a gettata del molo di sopraflutto non sia in grado di fornire un sufficiente ridosso agli stati di mare più gravosi provenienti dalle direzioni 350° e 360° Nord.

Attualmente, infatti, gli specchi acquei che costituiscono il porto di Favignana risultano essere interessati da fenomeni di ingressione del moto ondoso tali da causare livelli di agitazione ondosa inaccettabili per lo stazionamento e le manovre delle imbarcazioni nelle dovute condizioni di sicurezza (Figura 2.6 ÷ Figura 2.19).

Contrariamente, nella nuova configurazione portuale proposta dal presente progetto (Figura 2.20 ÷ Figura 2.33), sia in condizioni climatiche ordinarie che estreme, si ottengono, quasi ovunque, valori del coefficiente d'agitazione ondosa inferiori a circa il 20% del valore dell'altezza d'onda incidente ovvero un' area avamportuale che assicura



un ampio spazio per le evoluzioni delle imbarcazioni che si apprestano ad entrare ed uscire dal bacino portuale protetto.

Inoltre, in tutte le zone destinate all'ormeggio delle imbarcazioni, tale valore del coefficiente di riflessione risulta essere ancora più basso e più precisamente mediamente inferiori al 10% del valore dell'altezza d'onda incidente.

Ne consegue quindi che per un'altezza d'onda incidente pari a 5 m si ottengono valori dell'altezza d'onda residua non superiori a circa 0.5 m, pienamente accettabile per le condizioni di sicurezza dei natanti all'ormeggio.

A tal proposito nella Tabella 1 vengono riportati i valori assoluti di altezza d'onda residua ritenuti accettabili all'interno dei bacini turistici secondo la letteratura corrente.

**Tabella 1: Altezza d'onda (in m) accettabile all'interno di una marina per periodo d'onda  $T > 2$  s**

<i>Direzione di incidenza dell'onda sul natante</i>	<b>Tempo di ritorno</b>		
	50 anni	1 anno	1 settimana
<i>longitudinale (frontale)</i>	0,61	0,30	0,26
<i>trasversale (laterale)</i>	0,23	0,15	0,12

Se all'interno del porto si accettano condizioni "moderate" di ondosità, allora tutti i valori in tabella possono essere aumentati del 25%, mentre il criterio di "eccellenza" del clima d'onda è soddisfatto riducendo gli stessi valori del 25%.

In conclusione, sulla base delle simulazioni effettuate si può affermare che le nuove opere proposte per la messa in sicurezza del porto di Favignana garantiscono, oltre ad un sostanziale incremento dello specchio acqueo portuale protetto, un adeguato livello di sicurezza alle imbarcazioni che dovranno stazionarvi, sia in condizioni meteomarine ordinarie che estreme.

## 4 APPENDICE: DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO CGWAVE

### 4.1 Introduzione

Il sistema CGWAVE è stato sviluppato dalla University of Maine per conto della United States Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station per stimare il campo d'onda all'interno dei porti, in prossimità della costa, nelle insenature costiere ed in prossimità delle strutture fisse e mobili.

Infatti tale modello è in grado di simulare la propagazione del moto ondoso tenendo conto degli effetti combinati della rifrazione, diffrazione e riflessione, e dei fenomeni dissipativi dovuti al frangimento del moto ondoso ed all'attrito sul fondo, di fondamentale importanza per la determinazione dell'agitazione ondosa residua all'interno dei bacini portuali.

Il modello SMS è provvisto di pre-post processore grafico per programmi che richiedono griglie 2D agli elementi finiti sviluppato dall'Engineering Computer Graphics Laboratory a Brigham.

### 4.2 Equazioni di base

La soluzione della forma ellittica bidimensionale dell'equazione delle onde che si propagano su fondali lentamente variabili (mild-slope wave equation) è un criterio generalmente adottato per lo studio delle onde di gravità nelle aree costiere.

Questa equazione, che simula la diffrazione, la rifrazione e la riflessione delle onde in una regione costiera caratterizzata da fondali aventi pendenza variabile, può essere scritta nel modo seguente:

$$\nabla(CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (1)$$

dove:

- $\hat{\eta}(x, y)$ : funzione complessa dell'elevazione della superficie libera dalla quale può essere stimato il valore dell'altezza d'onda;
- $\sigma$  = frequenza angolare;
- $C(x, y)$ : celerità di fase ( $\sigma/k$ );
- $C_g(x, y)$ : celerità di gruppo ( $\partial\sigma/\partial k = nC$ ) con  $n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$ ;

- $k(x, y)$ : numero d'onda ( $= 2\pi/L$ ) correlato alla profondità locale  $d(x, y)$  attraverso la relazione di dispersione lineare  $\sigma^2 = gk \tanh(kd)$ .

Per tenere conto degli effetti dissipativi dovuti all'attrito sul fondo ad al frangimento del moto ondoso l'equazione 1 può essere modificata nel modo seguente:

$$\nabla(CC_g \nabla \hat{\eta}) + \left( \frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma \gamma \right) \hat{\eta} = 0 \quad (2)$$

dove  $w$  è un fattore d'attrito e  $\gamma$  il parametro di frangimento dell'onda.

Seguendo la formulazione di Dalrymple et al. (1984), CGWAVE utilizza la seguente espressione per il fattore di dissipazione  $w$ :

$$w = \left( \frac{2n\sigma}{k} \right) \left[ \frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right]$$

dove  $a = H/2$ , ampiezza d'onda, e  $f_r$ , coefficiente d'attrito, sono parametri scelti come condizioni di input per il modello e definiti dall'utente.

Per il parametro che tiene conto del frangimento viene utilizzata la seguente espressione:

$$\gamma = \frac{\chi}{d} \left( 1 - \frac{\Gamma^2 d^2}{4a^2} \right)$$

Dove  $\chi$  è una costante assunta nel modello pari a 0.15 e  $\Gamma$  è una costante empirica assunta nel modello pari a 0.4.

### **4.3 Condizioni al contorno**

L'equazione 2 utilizzata dal modello CGWAVE per la stima del campo d'onda richiede l'imposizione di opportune condizioni al contorno da introdurre lungo tutto il perimetro del dominio di calcolo. In generale lungo il contorno che rappresenta la costa o le strutture viene applicata la seguente condizione di riflessione:

$$\frac{\partial \hat{\eta}}{\partial n} = \alpha \hat{\eta} \quad (3)$$

dove  $\alpha = \alpha_1 + i\alpha_2$  è un coefficiente di riflessione complesso e vale  $\alpha = 0$  per strutture completamente riflettenti.

Per semplicità  $\alpha$  è generalmente rappresentato come:

$$\alpha = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r}$$

dove  $K_r$  è il coefficiente di riflessione.

Lungo il contorno che rappresenta le condizioni di mare aperto, dove le onde direzionate verso il largo devono propagarsi verso l'infinito viene applicata la condizioni di radiazione Sommerfeld:

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left( \frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \hat{\eta}_s \rightarrow 0 \quad (4)$$

dove  $\hat{\eta}_s$  è il potenziale dell'onda dispersa, la quale è una soluzione dell'equazione 1 (mild-slope equativo) e soddisfa la condizione di radiazione appena sopra riportata (equazione 4), che può essere scritto come:

$$\hat{\eta}_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) (\alpha_n \cos n\vartheta + \beta_n \sin n\vartheta) \quad (5)$$

dove  $H_n(kr)$  sono le funzioni di Hankel del primo genere.

Il potenziale  $\hat{\eta}_s$  dato nella (4) richiede una profondità costante all'esterno del dominio di calcolo. Inoltre nei problemi portuali lo stesso potenziale richiede nella regione esterna al porto stesso una linea di costa rettilinea, allineata e completamente riflettente. Per superare questo problema all'interno del modello, lungo il contorno che rappresenta le condizioni di mare aperto, viene utilizzata la seguente approssimazione parabolica (Xu, Panchang e Demirbilek, 1996):

$$\frac{\partial \hat{\eta}_s}{\partial r} + p \hat{\eta}_s + q \frac{\partial \hat{\eta}_s^2}{\partial \vartheta^2} = 0 \quad (6)$$

dove

$$p = \frac{k^2 r^2 + k_0^2 r^2 + ik_0 r + \frac{1}{4}}{2ik_0 r^2} \quad \text{e} \quad q = \frac{1}{2ik_0 r^2}.$$

Nell'equazione sopra riportata  $k_0$  può essere assunto pari al numero d'onda corrispondente alla profondità media che si ha lungo il contorno aperto del dominio di calcolo schematizzato.

L'equazione 6 viene utilizzata dal modello CGWAVE solo lungo la linea di contorno semi-circolare che delimita, lato mare, il dominio di calcolo; all'interno del dominio stesso viene applicata l'equazione di "mild-slope".