

# AUTORITA' PORTUALE NORD SARDEGNA

SEDE DI PORTO TORRES

## HUB PORTUALE DI PORTO TORRES

### PROLUNGAMENTO DELL'ANTEMURALE DI PONENTE E RESECAZIONE BANCHINA ALTI FONDALI 1° e 2° STRALCIO

PROGETTO PRELIMINARE ●  
PROGETTO DEFINITIVO ○  
PROGETTO ESECUTIVO ○  
PROGETTO DI VARIANTE ○

DATA: GIUGNO 2014  
LUOGO: PORTO TORRES  
SCALA:

ELABORATO

#### RELAZIONE IDRAULICA

STUDIO DI PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO ALL'INTENO DEL PORTO CIVICO E DEL PORTO INDUSTRIALE E ANALISI DEL CAMPO D'ONDA INCIDENTE SUL LUNGOMARE BALAI

COLLABORATORI:  
DOTT.SA MONICA COZZI  
SIG. CARLO PITURRU

I PROGETTISTI

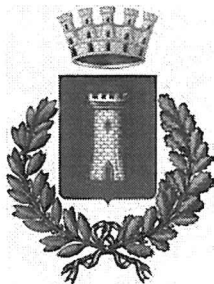
IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Bastiano Deledda

IL COMMISSARIO STRAORDINARIO

C.A. (C.P.) Nunzio Martello

**AUTORITA' PORTUALE NORD SARDEGNA**



**COMUNE DI PORTO TORRES  
PORTO DI PORTO TORRES**

**PIANO REGOLATORE PORTUALE 2011**

**STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSI  
ALL'INTERNO DEL PORTO CIVICO E DEL PORTO  
INDUSTRIALE E ANALISI DEL CAMPO D'ONDA  
INCIDENTE SUL LUNGOMARE BALAI**

Roma, Luglio 2012

Redatto:

Prof. Ing. Paolo De' Girolamo



---

## INDICE

<b>1</b>	<b>Premesse e obiettivi del lavoro.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Penetrazione del moto ondoso .....</b>	<b>5</b>
2.1	<i>Applicazione del sistema di modellazione SMS.....</i>	5
2.2	<i>Discretizzazione dello specchio liquido .....</i>	6
2.3	<i>Definizione delle condizioni al contorno e delle onde incidenti.....</i>	9
2.4	<i>Risultati delle simulazioni.....</i>	12
<b>3</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>36</b>
	<b>Riferimenti bibliografici.....</b>	<b>37</b>
	<b>Appendice: descrizione del modello matematico CGWAVE.....</b>	<b>38</b>
3.1	<i>Introduzione .....</i>	38
3.2	<i>Equazioni di base.....</i>	38
3.3	<i>Condizioni al contorno.....</i>	39

---

## 1 Premesse e obiettivi del lavoro

Il Provveditorato Interregionale alle Opere Pubbliche per il Lazio, L'Abruzzo e la Sardegna, sede coordinata di Cagliari, del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, ha conferito, con Disciplinare di Incarico rep. N. 182, del 12/10/2010, al Prof. Ing. Paolo De Girolamo l'incarico di consulenza per gli aspetti meteo-marini ed idrodinamici e collaborazione tecnica per attività connesse alla redazione del Piano Regolatore Portuale di Porto Torres. Il presente studio idraulico-marittimo dal titolo: "Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del Porto Civico e del Porto Industriale e analisi del campo d'onda incidente sul lungomare Balai", è stato condotto nell'ambito del citato incarico.

In particolare con lo studio ci si è posti l'obiettivo di analizzare i seguenti aspetti:

- la penetrazione del moto ondoso all'interno del Porto Industriale e del Porto Civico in relazione sia alla configurazione attuale delle opere marittime sia alla configurazione prevista dal PRP 2011;
- la variazione del campo di moto ondoso indotta rispetto alla situazione attuale, dalle opere previste dal PRP 2011 lungo il tratto di costa in cui ricade il Lungomare Balai allo scopo di verificare eventuali potenziali impatti esercitati dalle nuove opere portuali sulla dinamica delle spiaggette ("pocket beaches") presenti nella zona stessa.

Lo studio è stato condotto (ai sensi del D.M. 14/4/1998) applicando il modello numerico di propagazione di moto ondoso denominato CGWAVE, facente parte del "pacchetto" SMS (Surfacewater Modeling System).

CGWAVE risolve l'equazione alle derivate parziali del secondo ordine di tipo ellittico detta di "mild-slope" mediante la tecnica numerica agli elementi finiti. Per la descrizione del modello si rimanda all'appendice, mentre per un inquadramento generale della problematica si rimanda a De Girolamo, Kostense e Dingemans (1988), De Girolamo (1988), De Girolamo, Nicolai e Noli (1989), Beltrami, Bellotti, De Girolamo, Sammarco (2001), Bellotti, Beltrami e De Girolamo (2003).

Il modello consente di simulare la propagazione di onde periodiche lineari all'interno di rade e di bacini portuali tenendo conto dei fenomeni combinati di diffrazione, rifrazione e riflessione, nonché degli effetti dissipativi dovuti al frangimento ed all'attrito sul fondo. Per



---

quanto riguarda la diffrazione, il modello tiene conto sia di quella indotta dal fondale, sia di quella indotta da strutture emergenti.

Le simulazioni sono state condotte utilizzando come forzanti gli eventi di moto ondoso più gravosi ai fini dell'agitazione ondosa residua, compatibilmente con le condizioni meteomarine raggiungibili nel paraggio in esame. A tal fine si è fatto riferimento allo studio meteomarino redatto dal Prof. Paolo De Girolamo nell'ambito dello stesso incarico.

Il presente studio, come precedentemente accennato, è stato condotto con l'obiettivo di fornire indicazioni oggettive sulla validità e funzionalità dei nuovi schemi portuali proposti per la redazione del Piano Regolatore Portuale 2011, in relazione alle condizioni di sicurezza delle navi sia in fase di stazionamento sia durante le manovre di ingresso ed uscita dai bacini portuali.

In particolare sono stati esaminati e confrontati i due schemi portuali rappresentati dalla configurazione attuale e dalla configurazione di Piano Regolatore Portuale 2011. Il confronto ha ovviamente riguardato i valori dei campi d'onda ottenuti al variare delle condizioni di moto ondoso incidente. Per il moto ondoso incidente si è fatto riferimento sia a condizioni frequenti sia a condizioni estreme.

Inoltre, al fine di verificare l'impatto esercitato dalla nuova opera a gettata prevista dal PRP 2011 che andrà a costituire il nuovo molo di sopraflutto del bacino turistico, sulle spiaggette ("pocket beaches") localizzate lungo il tratto di costa ricadente sul Lungomare Balai, posto subito ad Est del Porto Civico, per tale tratto di costa sono stati confrontati i livelli di agitazione ondosa che si verificano attualmente con quelli che si verificheranno ad opere ultimate.

I risultati delle simulazioni effettuate hanno evidenziato come le nuove opere portuali previste dal PRP 2011 siano in grado di attenuare, rispetto alla situazione attuale, in maniera significativa l'azione del moto ondoso incidente, garantendo all'interno dei bacini portuali dei livelli di agitazione ondosa residua pienamente accettabili in relazione alle finalità e funzionalità previste per i bacini stessi.

Lungo il tratto di costa prospiciente il lungomare Balai, si è riscontrato che il campo d'onda rimane pressoché invariato nelle due configurazioni prese in esame, pertanto si ritiene che le "pocket beach" presenti non verranno influenzate in modo rilevante dal punto di vista morfodinamico dalle nuove opere portuali.

---

## 2 Penetrazione del moto ondoso

Per la determinazione dei livelli di agitazione ondosa residua che si verificano all'interno degli specchi acquei protetti che costituiscono i bacini portuali di Porto Torres nelle configurazioni attuale e di PRP 2011, sono stati esaminati, come già anticipato, 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 ( $H=1\text{m}, T=5\text{s}$ ;  $H=2.5\text{m}, T=7\text{s}$ ;  $H=4.0\text{m}, T=8.5\text{s}$ ), sia delle condizioni più rare e gravose associate a tempeste con tempo di ritorno decennale e cinquantennale ( $H=4.3\text{m}, T=9.0\text{s}$ ;  $H=4.5\text{m}, T=9.0\text{s}$ ).

Per la scelta delle forzanti di moto ondoso, oltre a tener conto delle finalità e degli obiettivi prefissatesi, si è tenuto conto dei risultati riportati nello studio meteomarinario condotto sempre nell'ambito del presente Piano e a cui si rimanda per maggiori dettagli.

Le simulazioni, condotte attraverso il modulo CGWAVE del codice di calcolo numerico SMS, hanno permesso di determinare e verificare la penetrazione del moto ondoso all'interno dei bacini portuali nelle due diverse configurazioni portuali prese in esame ed i conseguenti livelli di agitazione ondosa residua.

Nei paragrafi successivi vengono 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, descritto nell'appendice, 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 ed all'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 maggiore importanza nei casi in cui siano presenti bassi fondali caratterizzati da una batimetria sensibilmente variabile. Per la descrizione del modello si rimanda all'appendice.

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 gli schemi planimetrici dei bacini portuali di Porto Torres.

## **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 delle configurazioni portuali prese come riferimento.

Per la batimetria dei fondali e gli schemi planimetrici da simulare (Figura 2.1÷Figura 2.2), si è fatto riferimento alle carte nautiche edite dall'Istituto Idrografico della Marina Militare ("CN. 289 – Golfo dell'Asinara – Scala 1:50.000" e "CN. 286 – Porte di Porto Torres – Scala 1:10.000"), ai rilievi batimetrici di dettaglio effettuati all'interno dell'attuale bacino portuale del porto civico di Porto Torres ed alla configurazione planimetrica proposta dal presente studio di Piano.

Nel dettaglio, il campo fluido è stato schematizzato per ogni schema portuale nel modo seguente.

### **Configurazione Attuale**

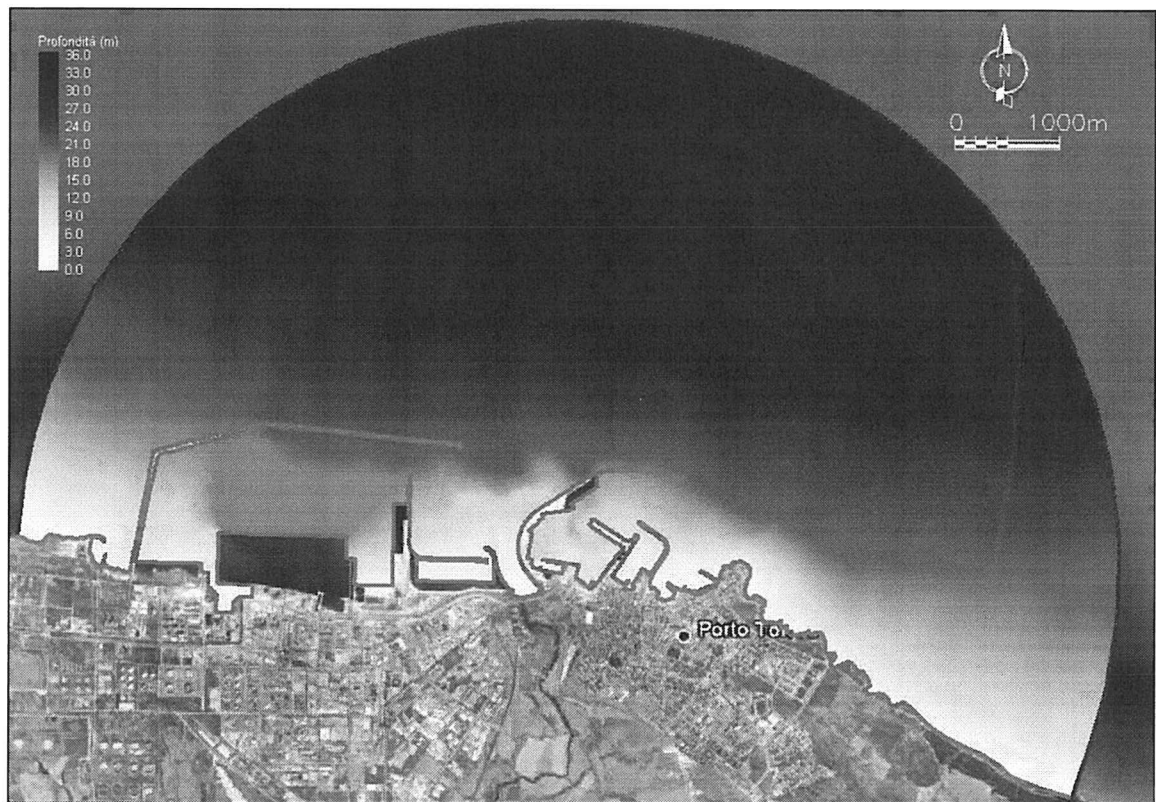
Griglia di calcolo costituita da 306926 elementi, 155502 nodi di calcolo, profondità minima e massima pari rispettivamente a circa 0.7 m e circa 34 m rispetto al medio mare (Figura 2.3).

### **Configurazione di PRP 2011**

Griglia di calcolo costituita da 286848 elementi, 145487 nodi di calcolo, profondità minima e massima pari rispettivamente a circa 1.0 m e circa 34 m rispetto al medio mare (Figura 2.4).

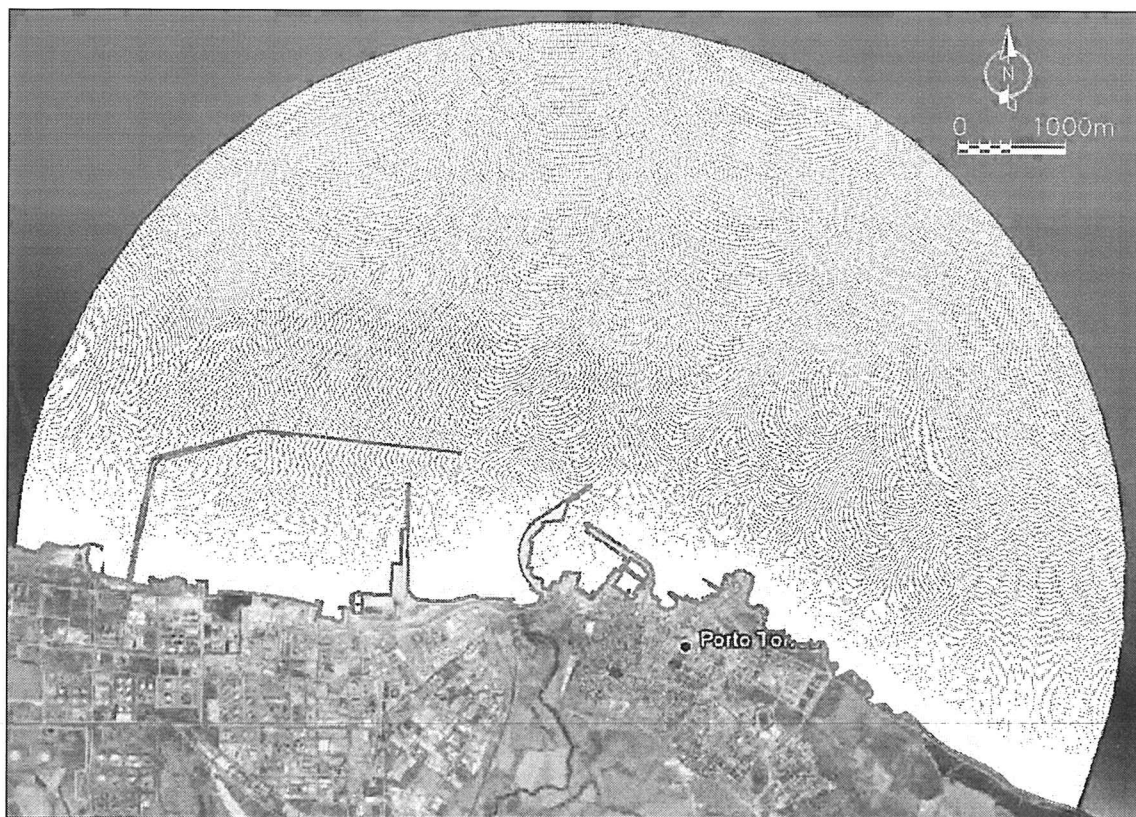


*Figura 2.1 – Configurazione attuale: batimetria di riferimento utilizzata per le simulazioni con il modello CGWAVE.*

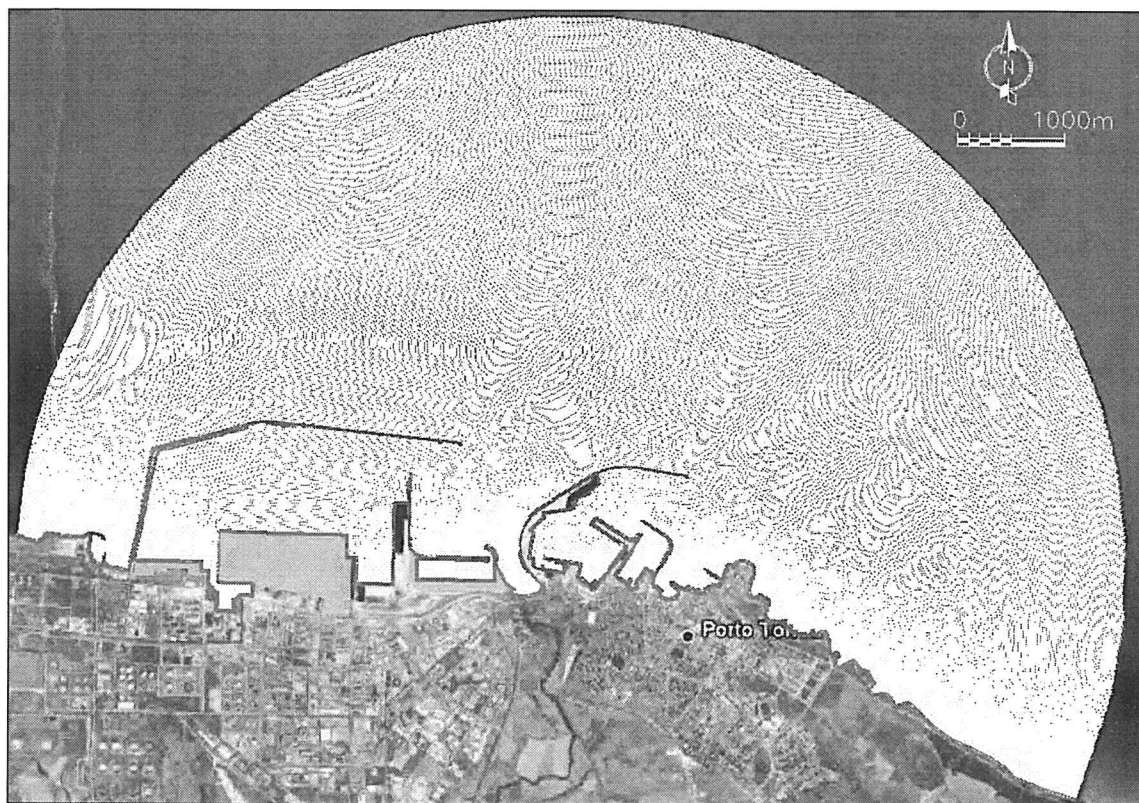


*Figura 2.2 – Configurazione di PRP 2011: batimetria di riferimento utilizzata per le simulazioni con il modello CGWAVE.*





*Figura 2.3 – Configurazione attuale: discretizzazione dello specchio liquido utilizzata per le simulazioni con il modello CGWAVE.*



*Figura 2.4 – Configurazione di PRP 2011: discretizzazione dello specchio liquido utilizzata per le simulazioni con il modello CGWAVE.*

---

### 2.3 Definizione delle condizioni al contorno e delle onde incidenti

Per le configurazioni planimetriche prese in esame per i due porti che nell'insieme definiscono la portualità di Porto Torres, al fine di poter determinare i livelli di agitazione ondosa residua causata dall'azione del moto ondoso incidente, è stato necessario definire ed impostare all'interno del modello matematico CGWAVE le opportune condizioni al contorno.

Poiché il modello risolve un'equazione alle derivate parziali del secondo ordine di tipo ellittico, è necessario imporre condizioni al contorno sull'intera frontiera geometrica del dominio di calcolo.

Per quanto riguarda i contorni costituiti dalla costa e dalle opere marittime emergenti dal livello medio marino, si è imposta una condizione sul coefficiente di riflessione  $R$ , ovvero sul rapporto tra l'altezza dell'onda riflessa e l'altezza dell'onda incidente sugli stessi contorni. I valori di  $R$  sono stati imposti in relazione alle varie tipologie costruttive o morfologiche della costa in esame, come di seguito indicato:

- Opere a pareti verticali piena  $R = 0.90$ ;
- Opere a parete verticale parzialmente assorbenti  $R = 0.65$ ;
- Tratti rocciosi naturali ed opere a scogliera  $R = 0.35$ ;
- Spiagge assorbenti  $R = 0.15$ ;
- Pontili su pali o galleggianti (completamente permeabili)  $R = 0.00$ .

La Figura 2.5 e la Figura 2.6 mostrano, per ciascuna configurazione esaminata, i valori dei coefficienti di riflessione che sono stati attribuiti ai vari tratti di opere e di costa che delimitano il dominio di calcolo.

Lato mare il dominio di calcolo è stato delimitato da una linea semicircolare in corrispondenza della quale sono state imposte le caratteristiche del moto ondoso incidente (forzanti di moto ondoso) secondo quanto riportato nella tabella 2.1.

*Tabella 2.1 – Forzanti di moto ondoso imposte come condizioni al contorno per il modello CGWAVE*

<b>Altezza d'onda</b>	<b>Periodo</b>	<b>Direzione</b>
$H_i = 1.0$ m	$T = 5$ s	$70^\circ N$
$H_i = 2.5$ m	$T = 7$ s	$70^\circ N$
$H_i = 4.0$ m	$T = 8.5$ s	$350^\circ N - 20^\circ N - 50^\circ N$
$H_i = 4.3$ m - $H_i = 4.5$ m	$T = 9.0$ s	$350^\circ N - 20^\circ N - 50^\circ N$

Con riferimento alla tabella 2.1 e allo studio meteo-marino, si evidenzia quanto di seguito esposto.

---

Le onde provenienti dalla direzione 70° N (greco-levante), ovvero dal promontorio di Castelsardo, sono, tra quelle esaminate, le più frequenti. Tali onde, dirette grossomodo parallelamente alla costa, sono generate localmente dai venti di greco-levante e non posseggono altezze elevate rispetto a quelle che provengono dal settore settentrionale (350° N – 50° N). Tuttavia, essendo tra quelle possibili le più angolate, sono in grado di penetrare con maggiore facilità, rispetto a quelle provenienti dalle altre direzioni, all'interno dei due specchi d'acqua portuali. Con riferimento allo studio meteomarino, per quanto riguarda la loro frequenza di occorrenza si ha:

- onde provenienti da 60° N – 70° N frequenza media annua = 10,4 % (circa 38 gg/anno);
- onde provenienti da 60° N – 70° N con  $H_s \leq 1,0$  m frequenza media annua = 9,2 % (circa 34 gg/anno).

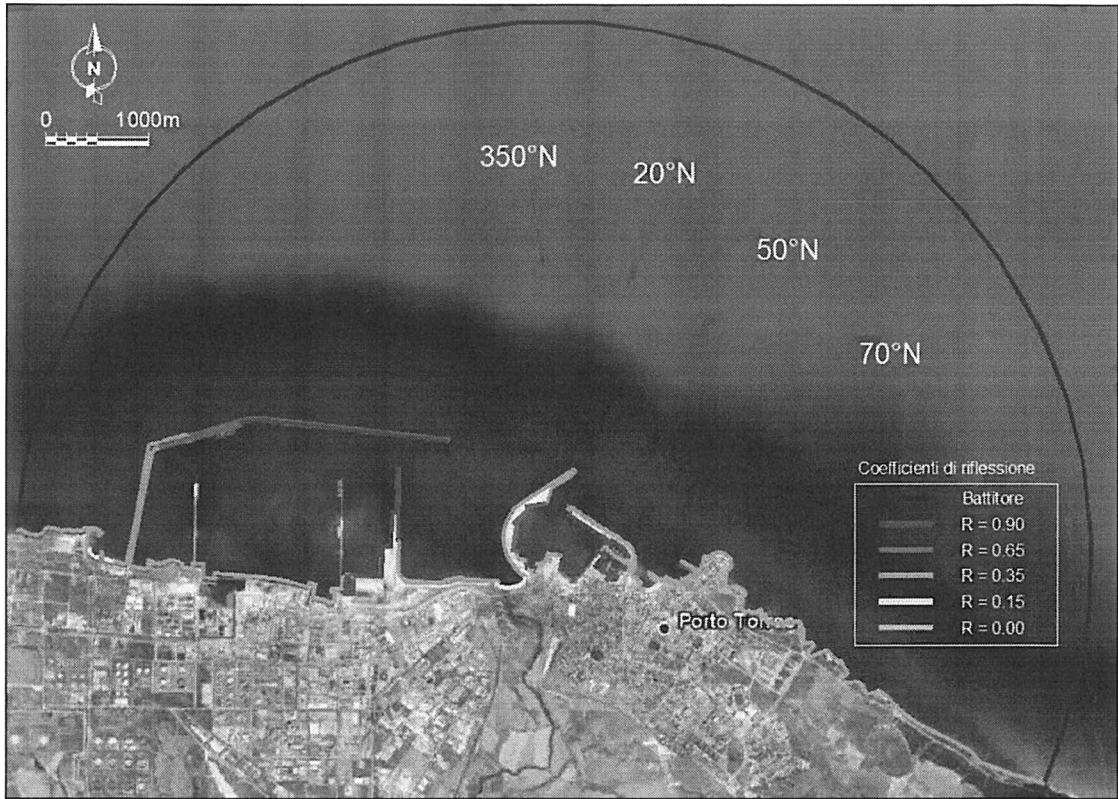
Tali valori devono essere interpretati tenendo conto delle seguenti frequenze di occorrenza ottenute, per il sito in esame, a prescindere dalla direzione di provenienza delle onde:

- frequenza delle calme di moto ondoso, ovvero condizioni di moto ondoso caratterizzate da  $H_s$  inferiore a 0,5 m, 84,83 % del tempo (circa 310/giorni all'anno);
- frequenza di stati di mare con  $H_s \leq 1,0$  m, 96,48 % del tempo (circa 352 gg/anno);
- frequenza di stati di mare con  $H_s \leq 2,5$  m, 99,88 % del tempo (circa 364 gg/anno).

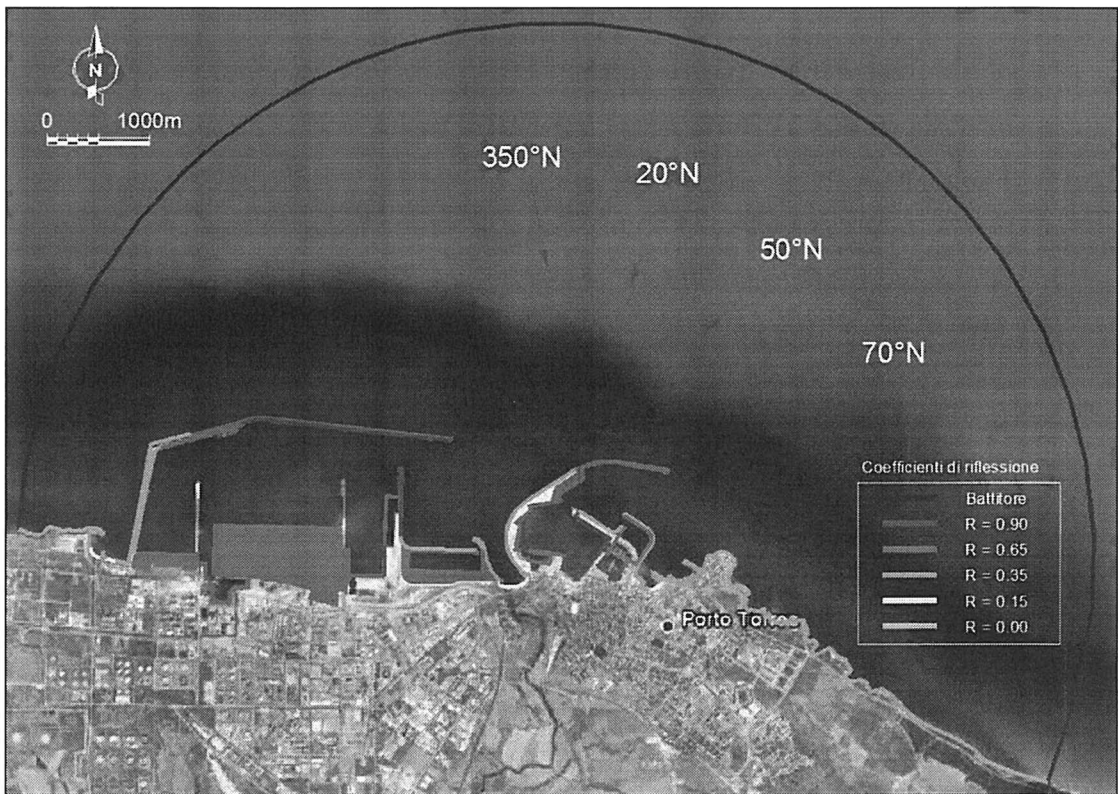
Con riferimento alla Tab. 2.1, le onde provenienti dal settore settentrionale 350°N - 50°N, rappresentano le onde meno frequenti che rientrano nella categoria delle "onde estreme" essendo caratterizzate dai seguenti tempi di ritorno  $Tr$ :

- $H_s = 4,0$  m –  $Tr = 2$  anni;
- $H_s = 4,3$  m –  $Tr = 10$  anni;
- $H_s = 4,5$  m –  $Tr = 50$  anni.

Per tenere conto degli effetti dissipativi dovuti al frangimento del moto ondoso ed all'attrito sul fondo, con riferimento al codice CGWAVE si è assunto un valore del coefficiente di frangimento pari a 0.15 ed un coefficiente di attrito sul fondo pari a 0.12.



**Figura 2.5 – Configurazione attuale: indicazione dei coefficienti di riflessione adottati per le simulazioni effettuate con il modello CGWAVE.**



**Figura 2.6 – Configurazione di PRP 2011: indicazione dei coefficienti di riflessione adottati per le simulazioni effettuate con il modello CGWAVE.**



---

## **2.4 Risultati delle simulazioni**

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

Con quest'ultimo programma sono state condotte 22 simulazioni con lo scopo di determinare l'agitazione ondosa all'interno degli specchi acquei costituenti il porto di Porto Torres, secondo le due diverse configurazioni planimetriche prese in esame, rappresentative dello stato attuale e del PRP 2011.

Inoltre i risultati delle simulazioni sono stati analizzati al fine di valutare in maniera oggettiva eventuali possibili ripercussioni negative sul tratto di costa posto subito ad Est del porto Civico in seguito alla realizzazione del nuovo molo di sopraflutto del porto turistico previsto dal presente Piano.

Nelle figure seguenti sono riportati, per le varie condizioni di moto ondoso esaminate, i risultati ottenuti in termini di campo di moto ondoso all'interno dei due bacini portuali (Porto Civico e Porto Industriale) che costituiscono i porti di Porto Torres, sia per la configurazioni planimetrica attuale (dalla Figura 2.7 alla Figura 2.17) sia per la configurazione prevista dal PRP 2011 (dalla Figura 2.18 alla Figura 2.28).

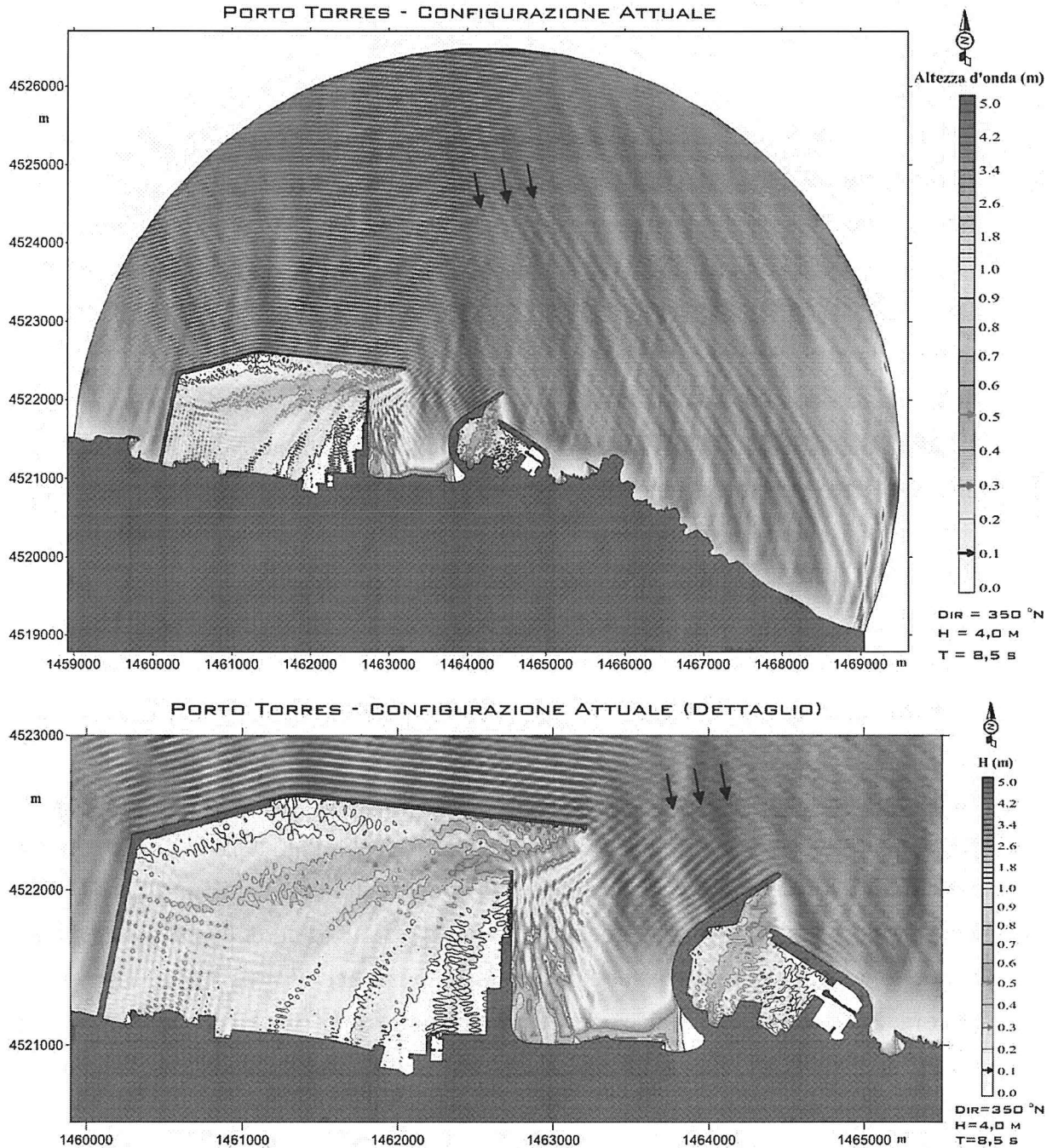
La scala di rappresentazione dei valori dell'altezza d'onda (m) mostra come le nuove opere previste dal PRP 2011 per il Porto Civico siano tali da garantire per tutti gli scenari di moto ondoso simulati, livelli di agitazione ondosa residua pienamente accettabili in relazione alle condizioni di sicurezza delle navi e delle imbarcazioni sia durante lo stazionamento sia durante le manovre di ingresso e uscita dal porto. Il paragone con la situazione attuale mostra il deciso miglioramento apportato in termini di agitazione ondosa residua all'interno del Porto Civico dalle nuove opere previste dal PRP 2011.

Per quanto riguarda invece le possibili ripercussioni sul tratto di costa posto subito ad Est del porto dovute alla realizzazione delle nuove opere, per tre aree opportunamente definite (Figura 2.29) sono stati analizzati e messi a confronto, tra la configurazione attuale e quella di PRP 2011, i livelli di agitazione ondosa ottenuti in seguito all'azione del moto ondoso associato alle condizioni estreme (Tabella 2.2).

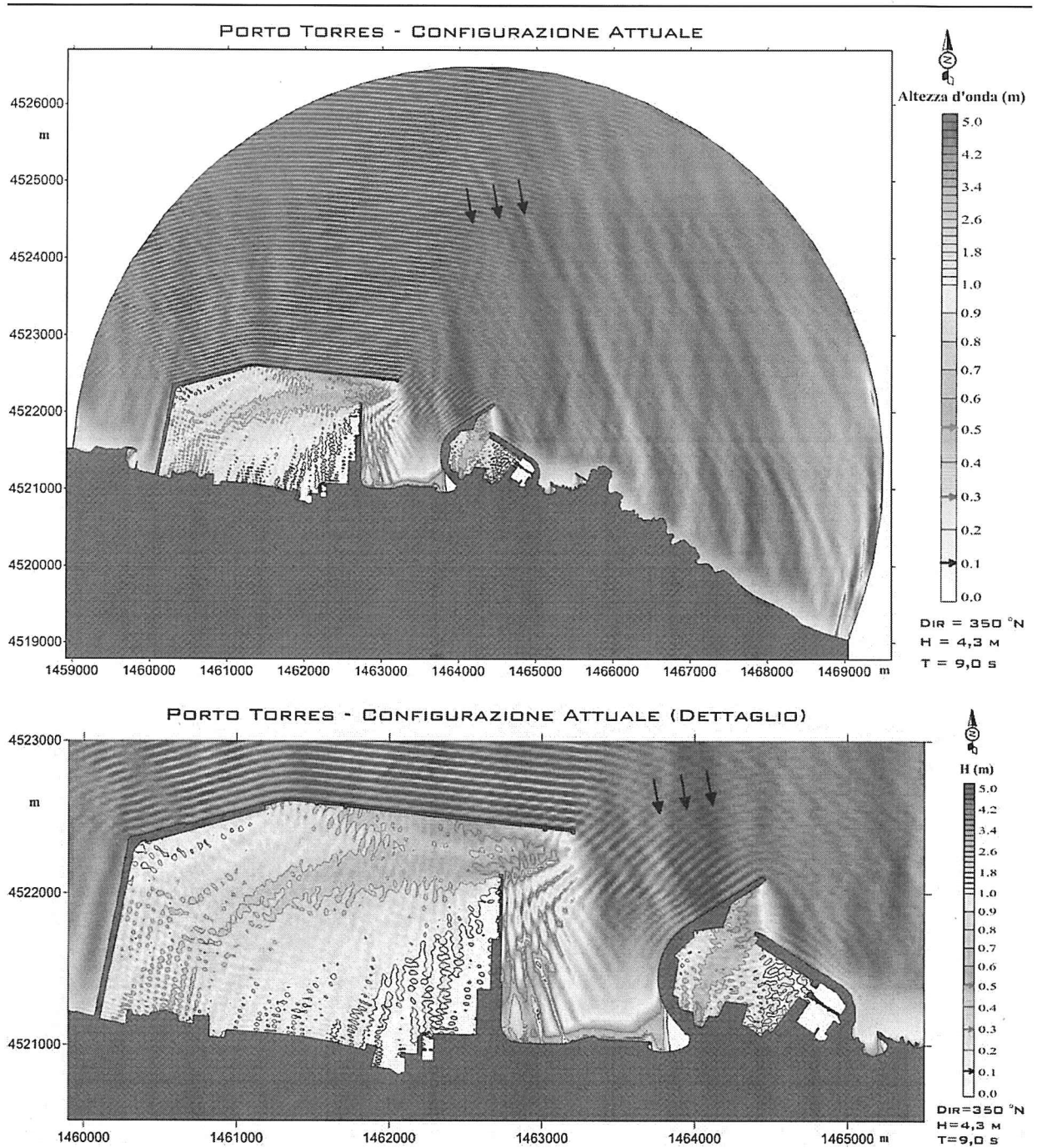
Dal confronto emerge che le nuove opere, con particolare riferimento al molo di sopraflutto del nuovo porto turistico, non alterano in maniera significativa il moto ondoso incidente, ovvero lungo le spiaggette prospicienti il Lungomare Balai non si riscontrano sensibili

variazioni dei livelli di agitazione ondosa dovuti al campo d'onda riflesso dalle nuove opere e pertanto si ritiene che tali spiagge non subiranno rilevanti variazioni dal punto di vista morfodinamico.

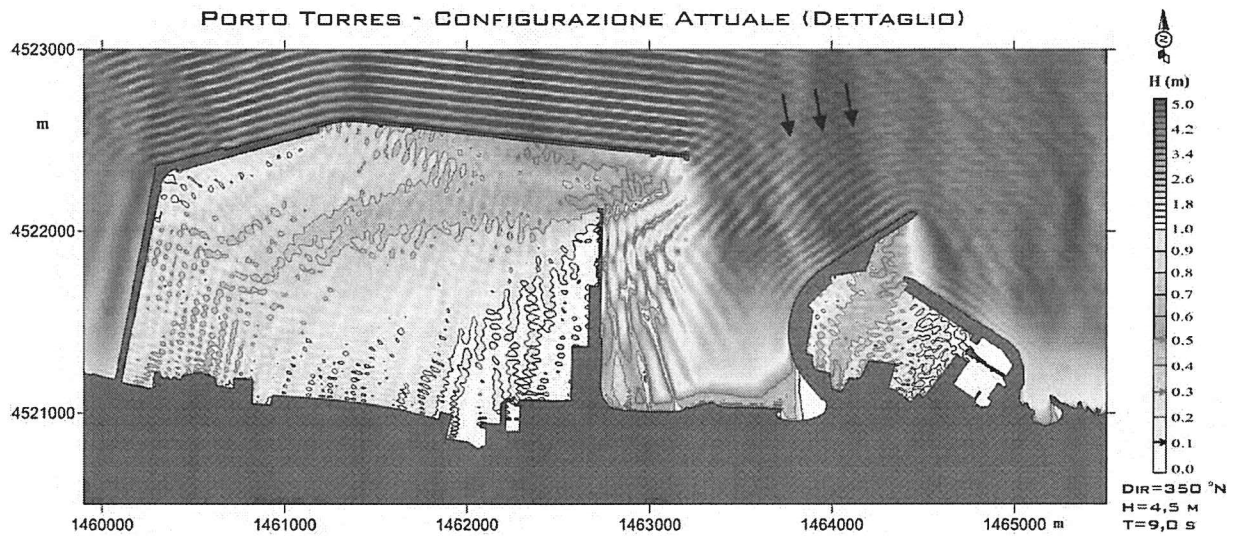
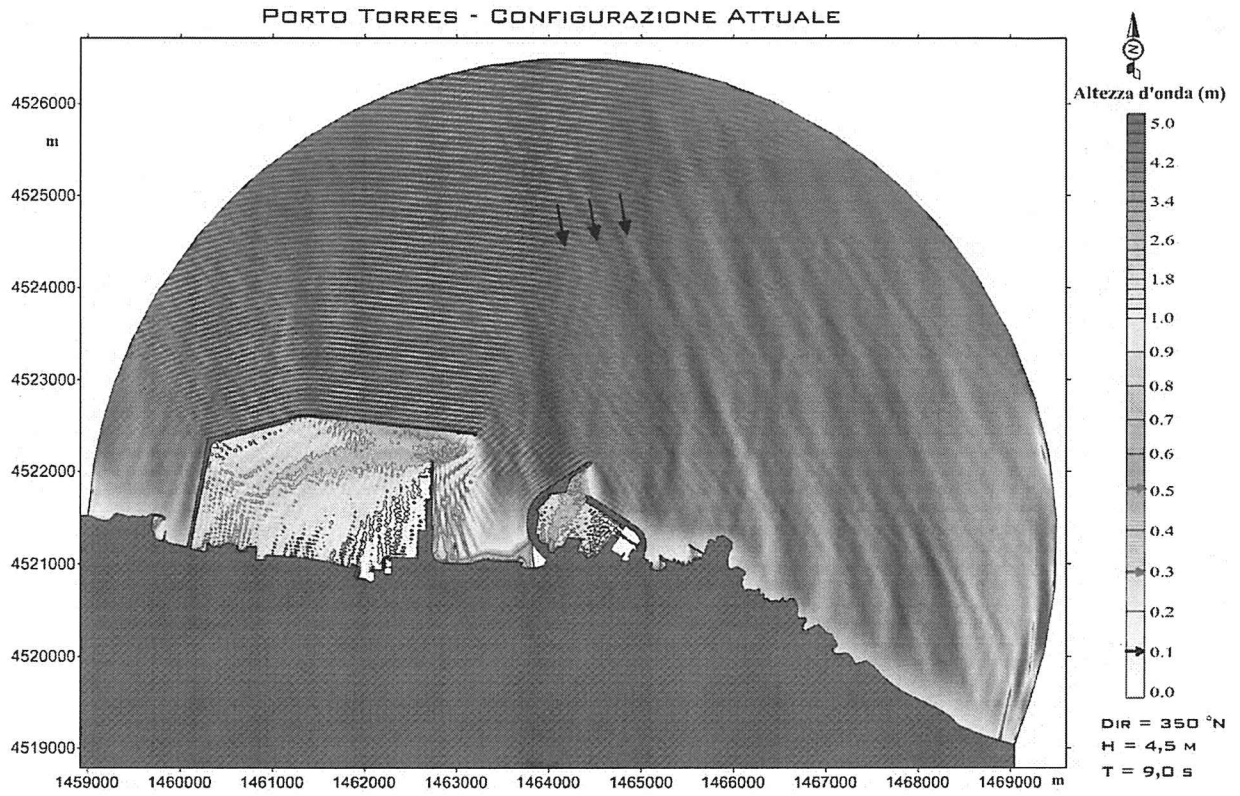
### CONFIGURAZIONE ATTUALE



**Figura 2.7 – Configurazione attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=350°N; H=4.0 m; T=8.5 s).**

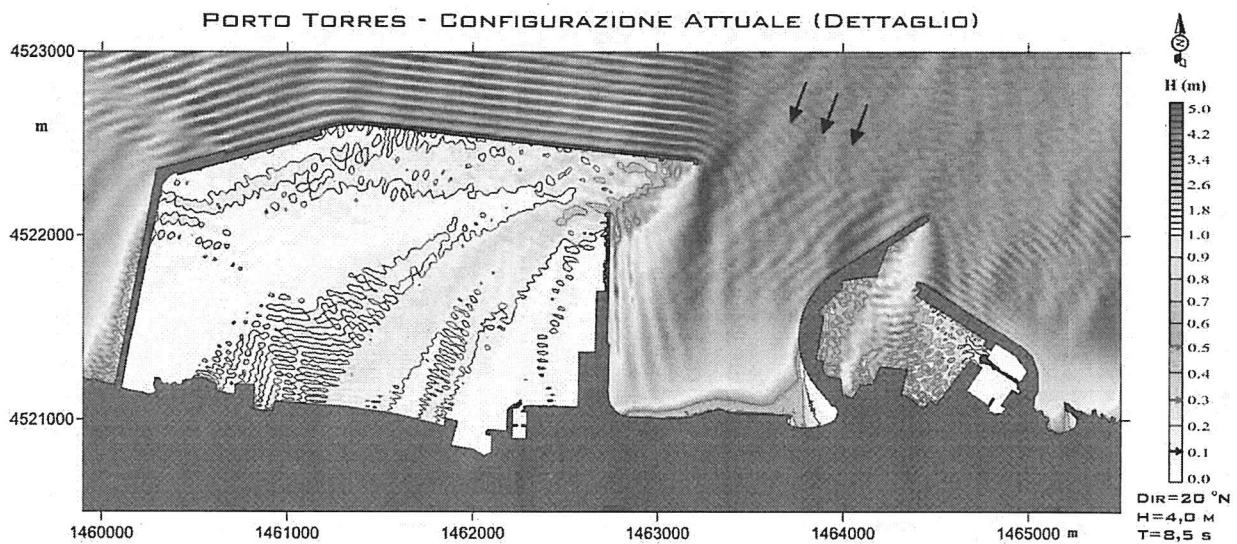
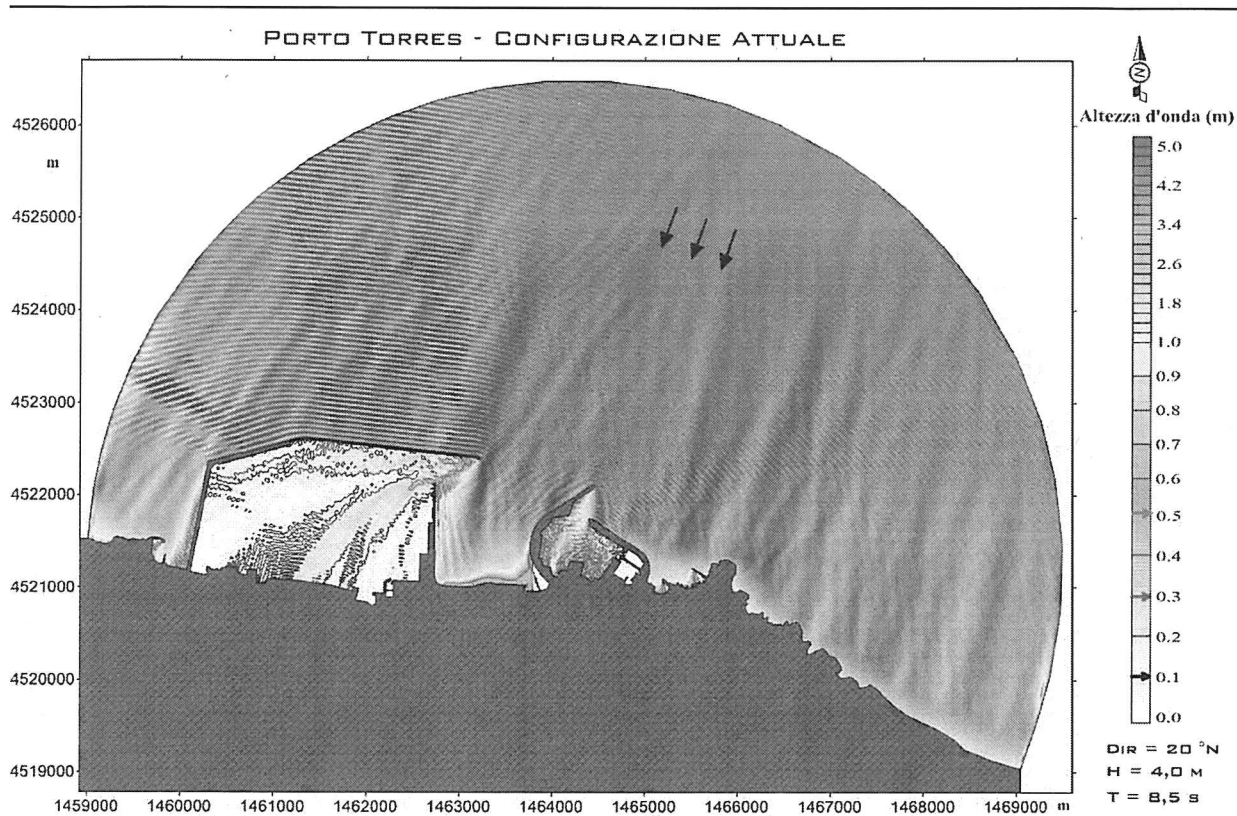


*Figura 2.8 – Configurazione attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE  
(Dir=350°N; H=4.3 m; T=9.0 s).*

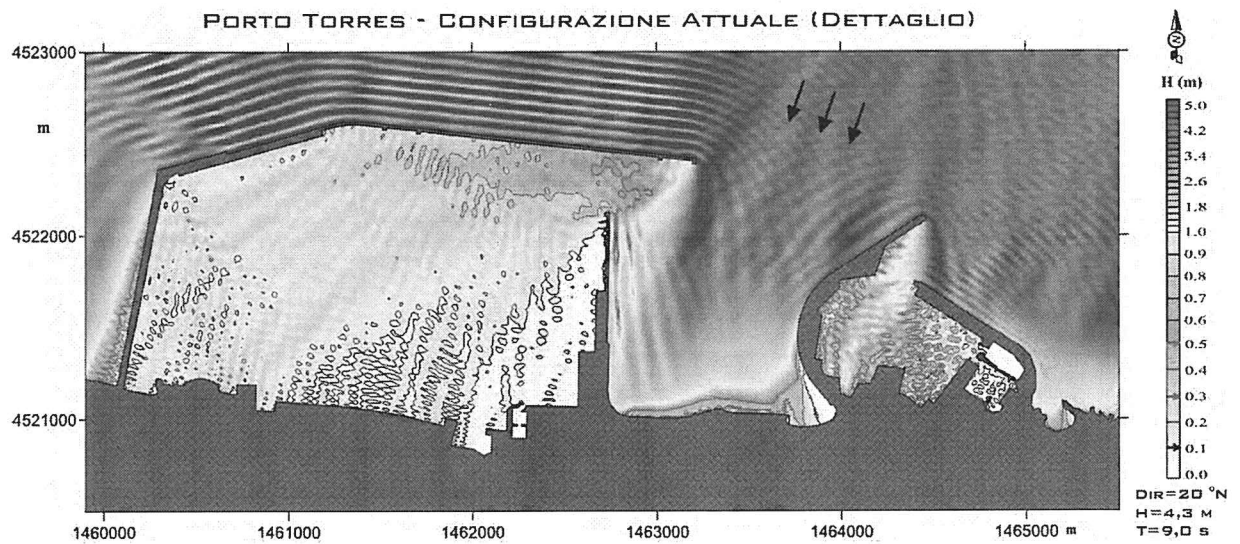
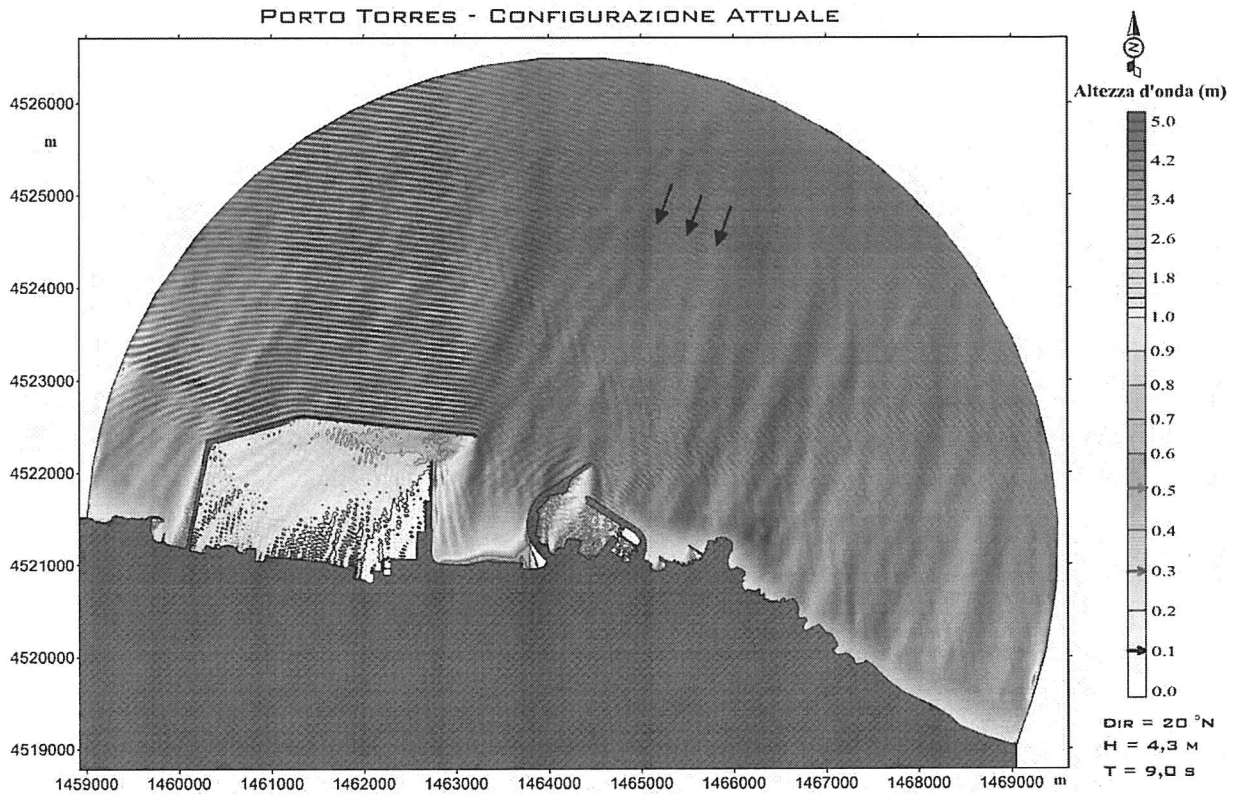


*Figura 2.9 – Configurazione attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=350°N; H=4.5 m; T=9.0 s).*

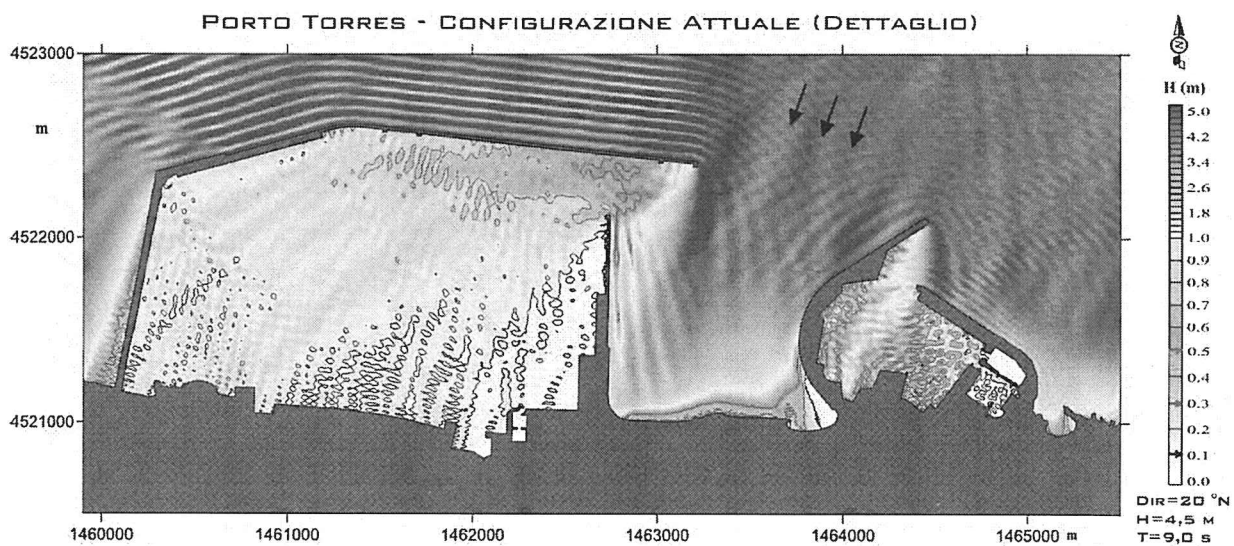
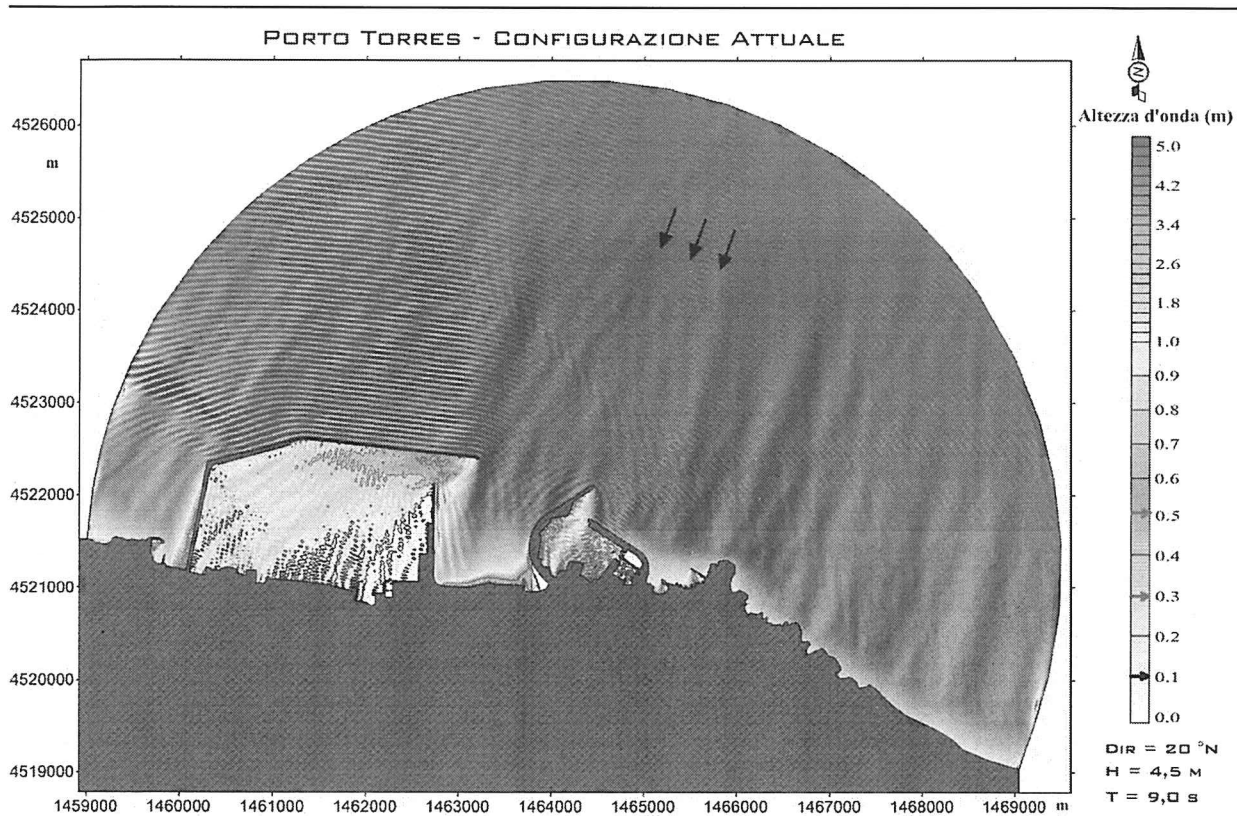




**Figura 2.10 – Configurazione attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=20°N;H=4.0 m; T=8.5 s).**

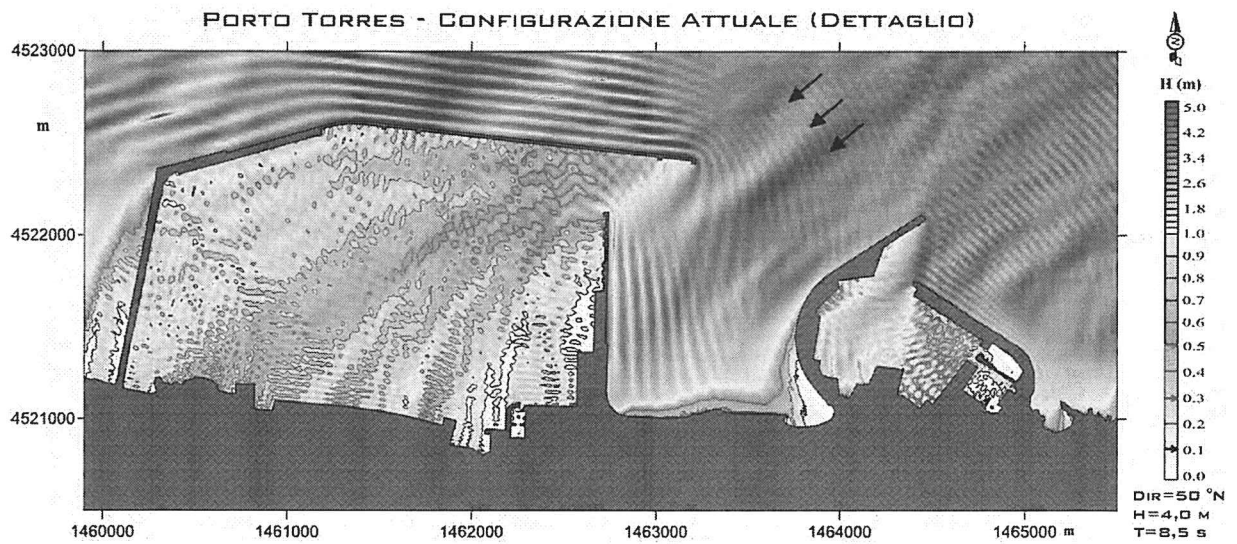
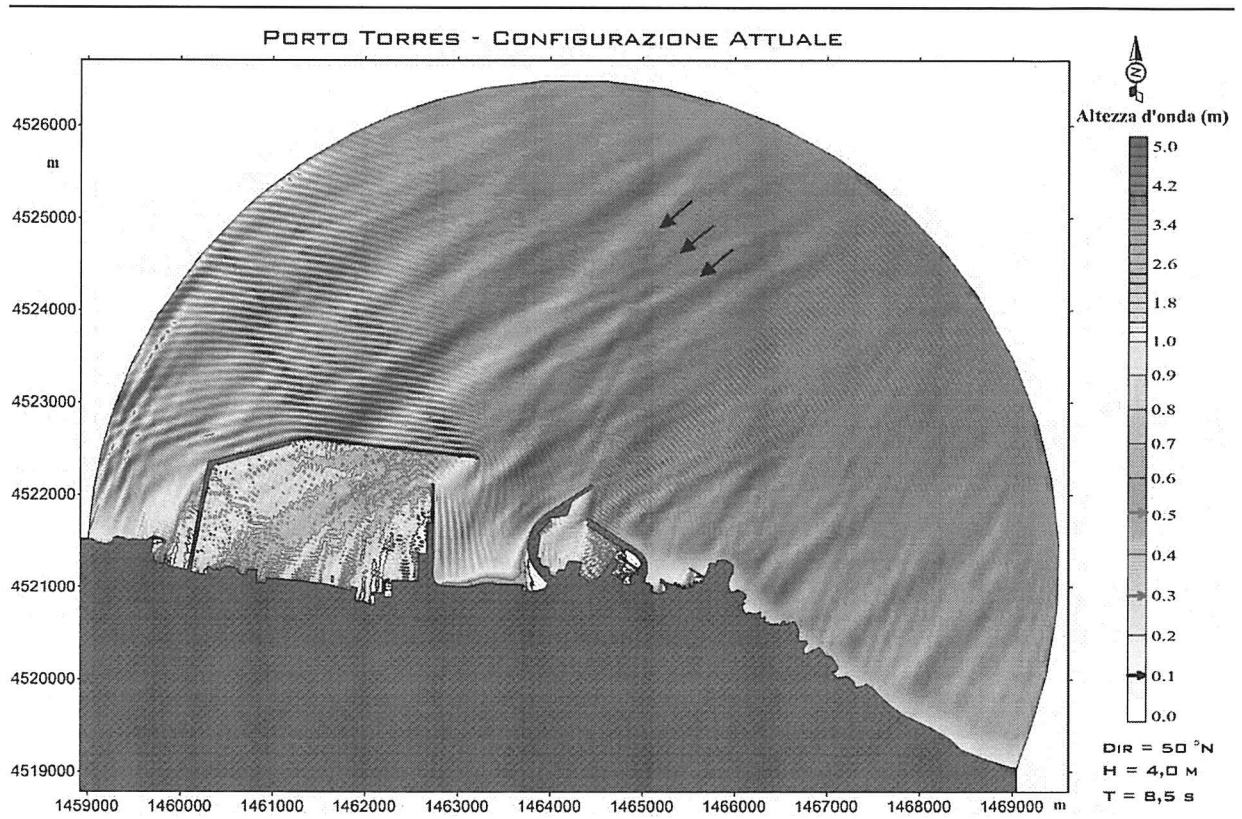


**Figura 2.11 – Configurazione ATTUALE: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=20°N; H=4.3 m; T=9.0 s).**



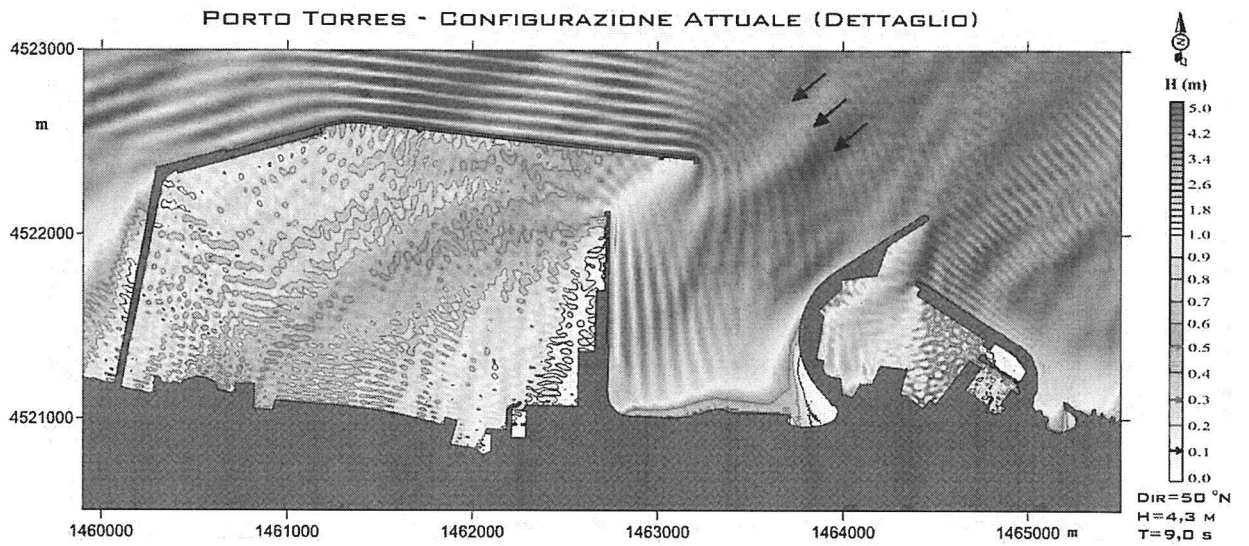
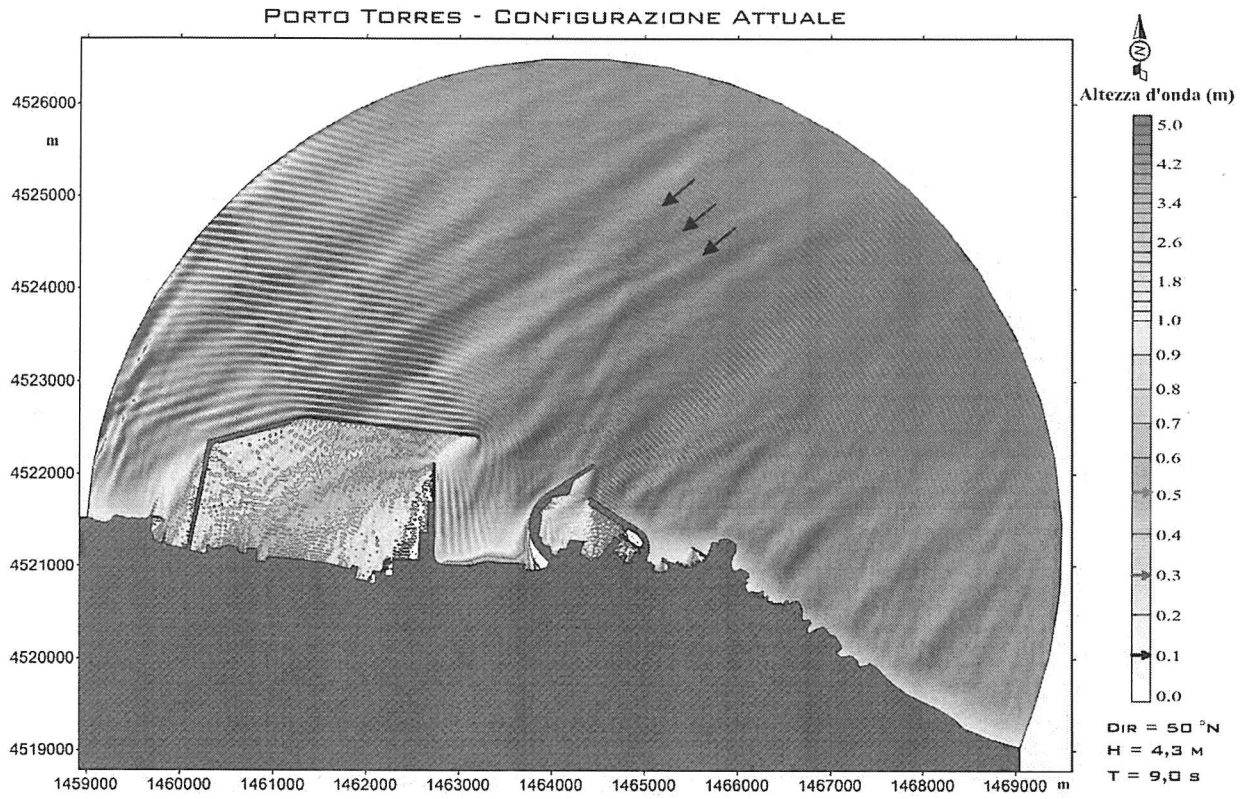
**Figura 2.12 – Configurazione ATTUALE: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=20°N; H=4.5 m; T=9.0 s).**



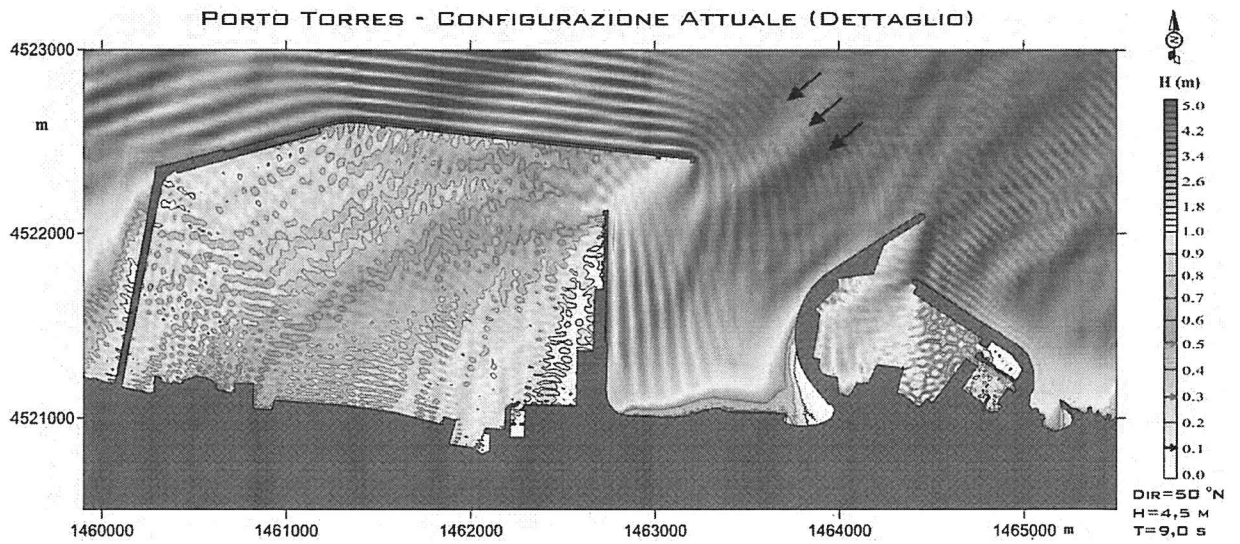
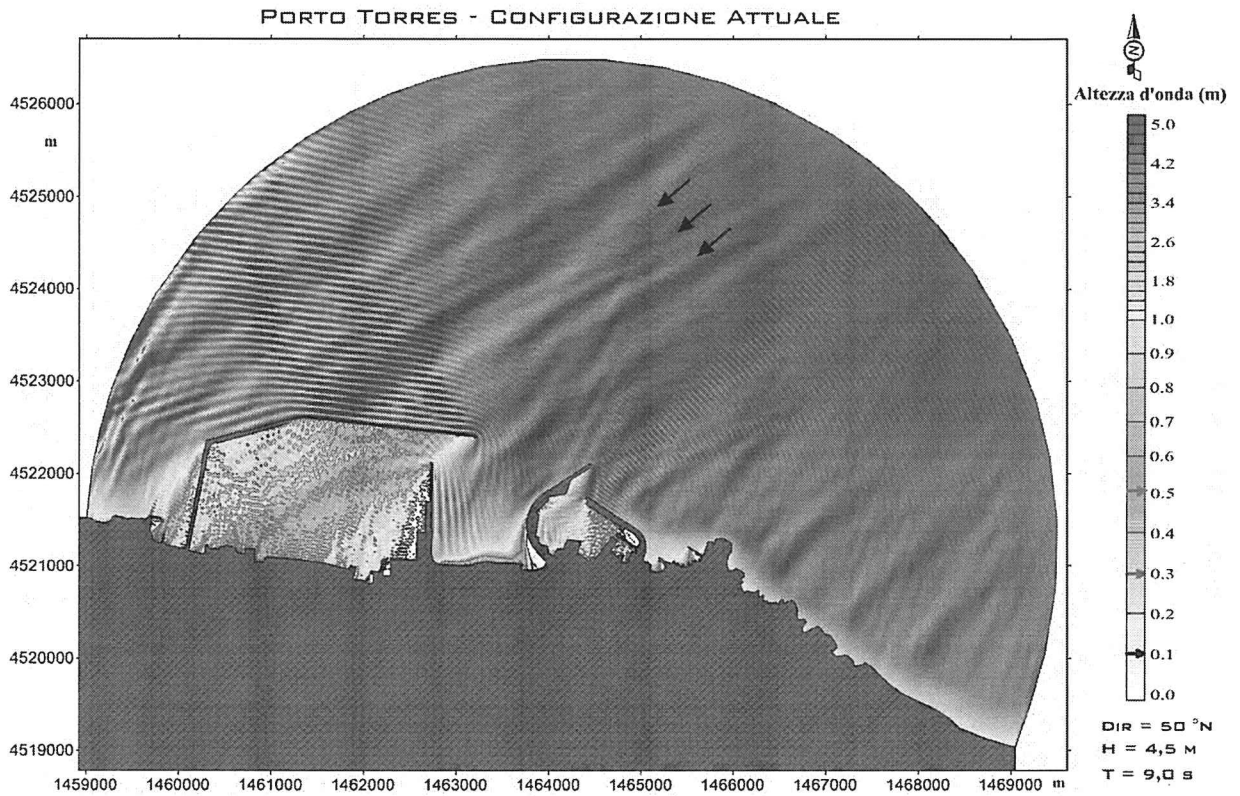


**Figura 2.13 – Configurazione ATTUALE: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=50°N; H=4.0 m; T=8.5 s).**

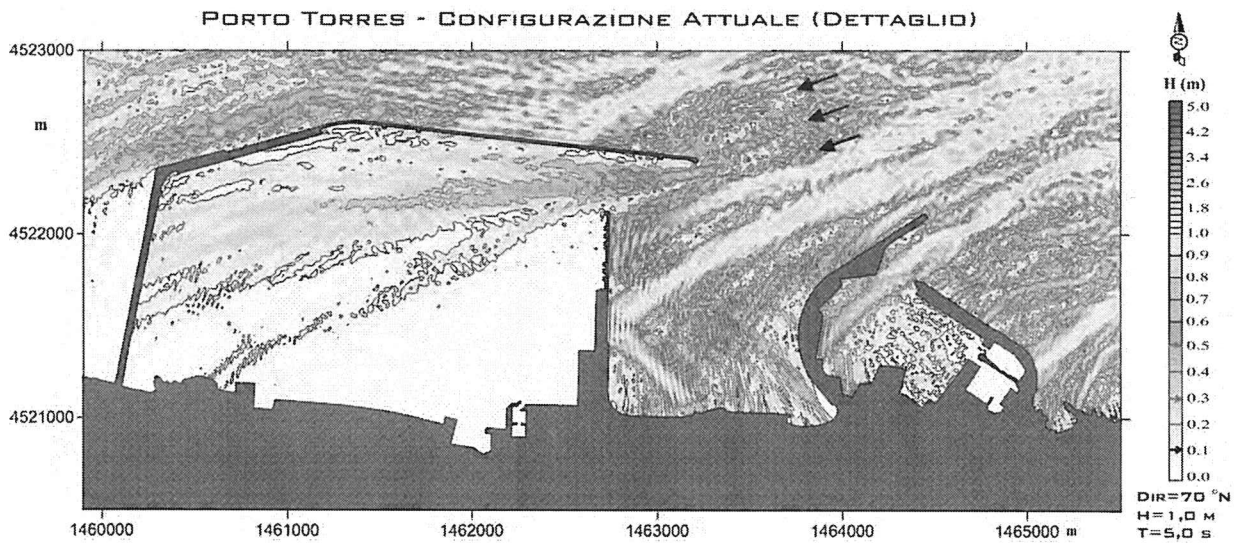
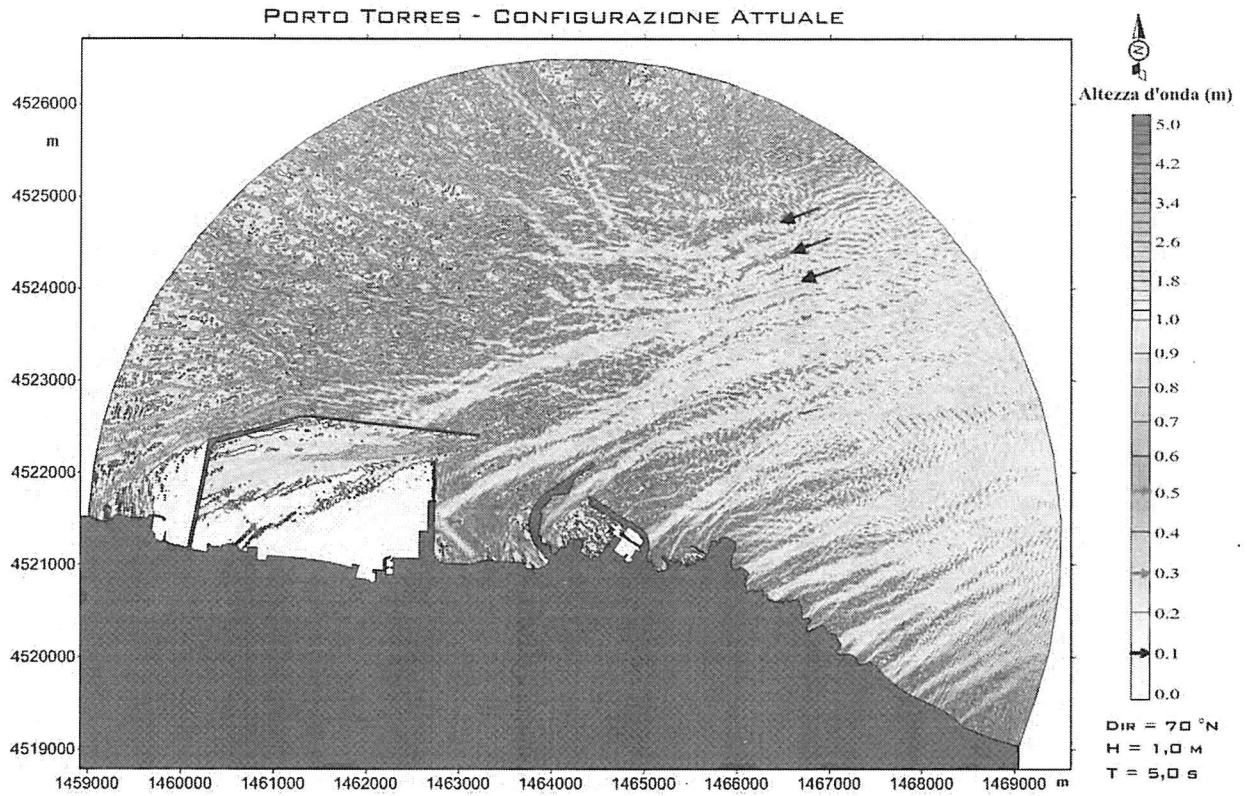




**Figura 2.14 – Configurazione ATTUALE: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=50°N; H=4.3 m; T=9.0 s).**

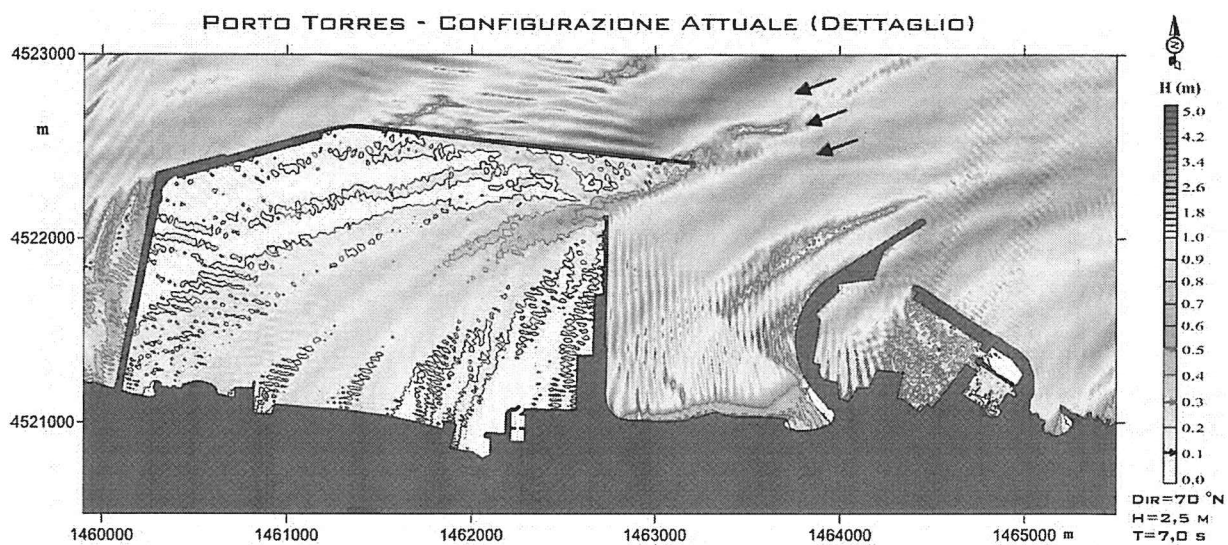
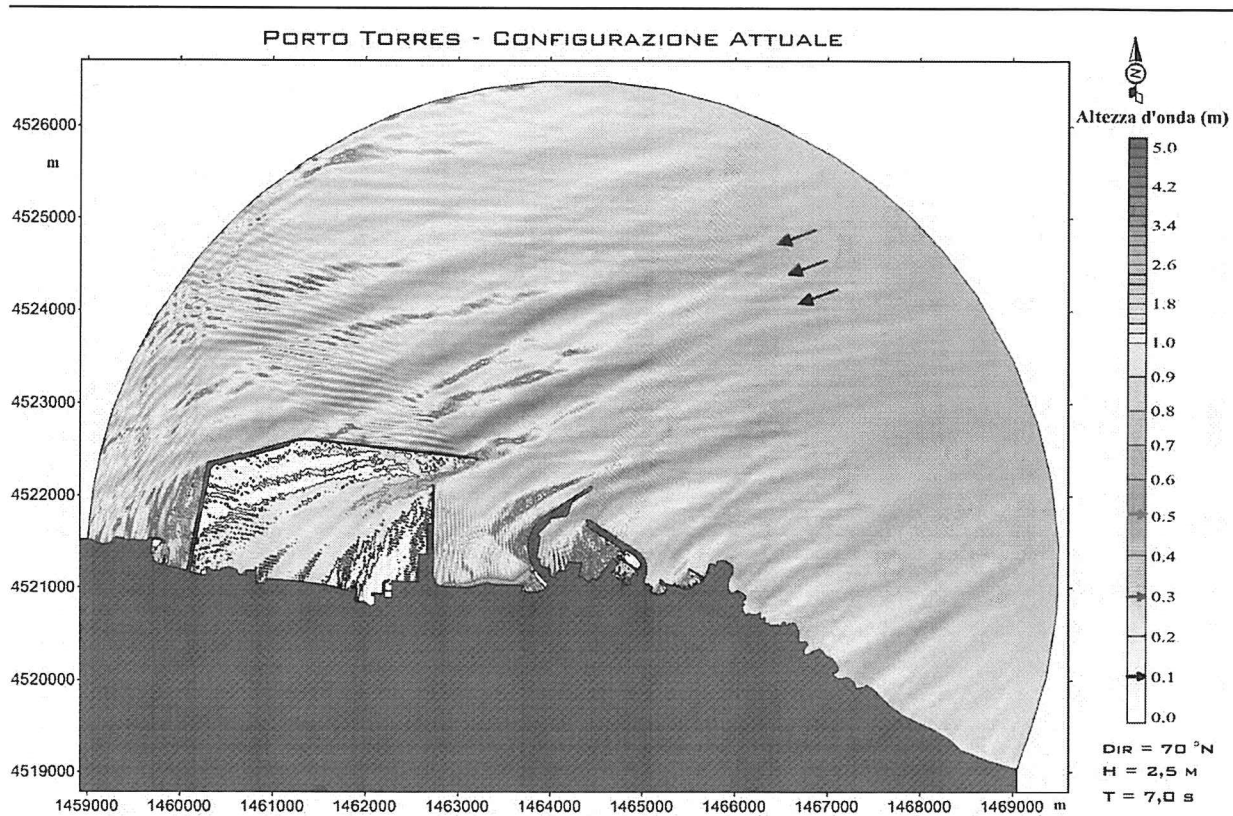


**Figura 2.15 – Configurazione ATTUALE: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=50°N; H=4.5 m; T=9.0 s).**



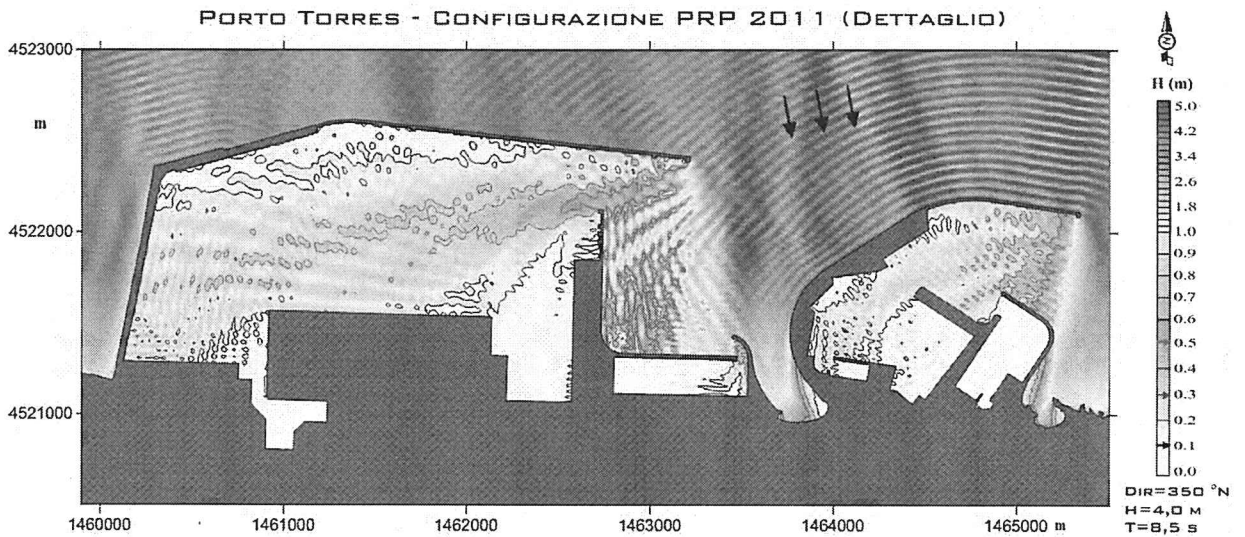
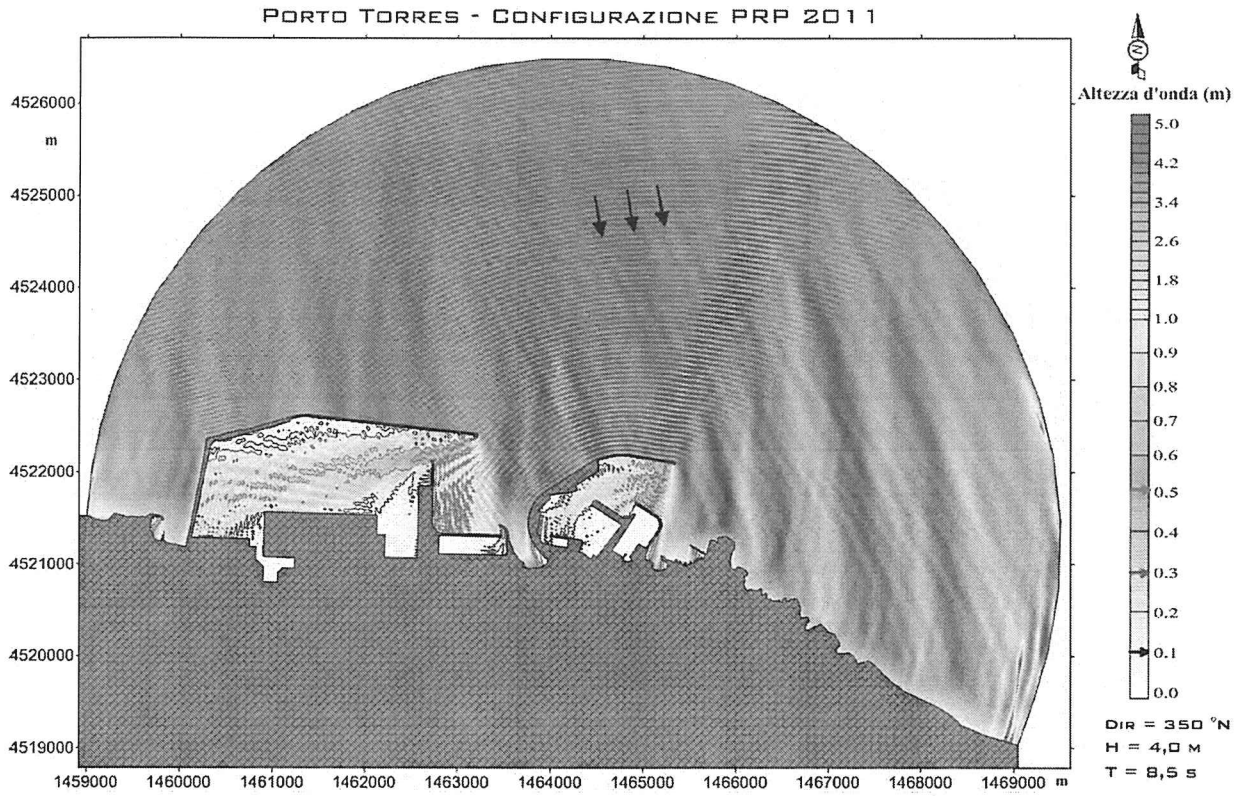
**Figura 2.16 – Configurazione ATTUALE: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=70°N; H=1.0 m; T=5.0 s).**



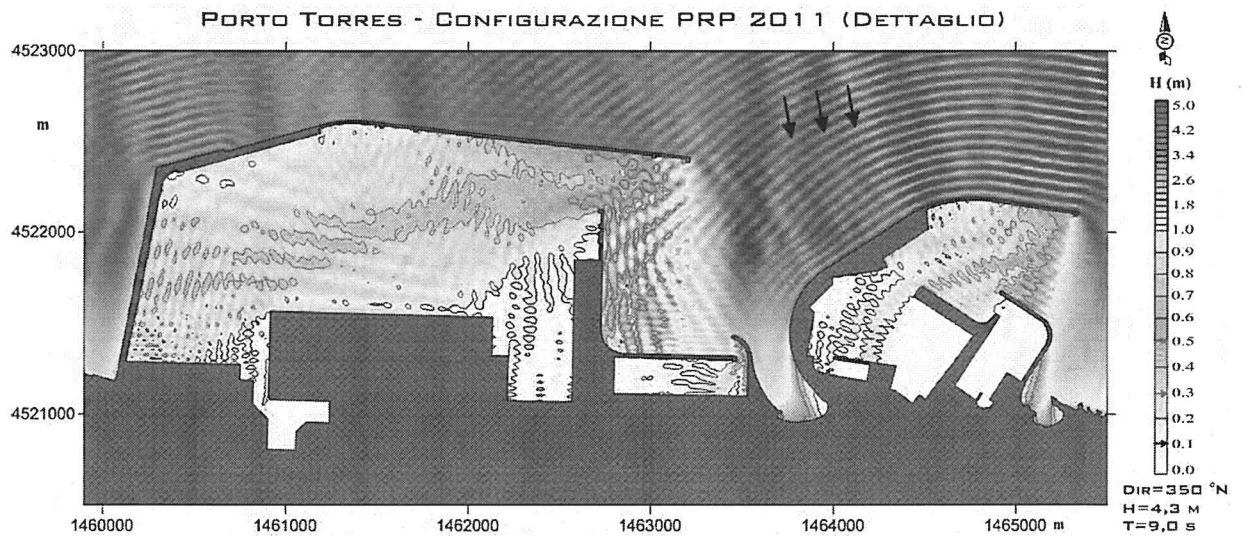
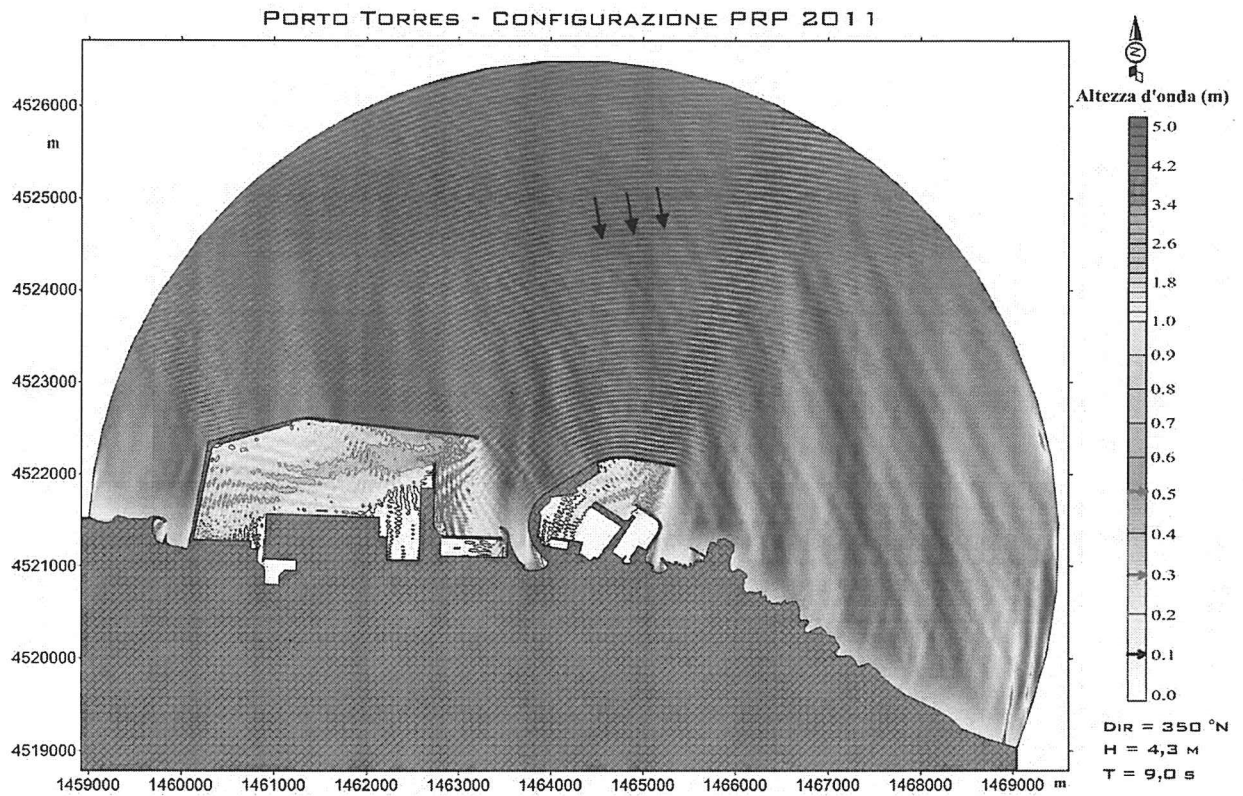


**Figura 2.17 – Configurazione ATTUALE: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=70°N; H =2.5 m; T=7.0 s).**

**CONFIGURAZIONE DI PIANO REGOLATORE PORTUALE 2011**

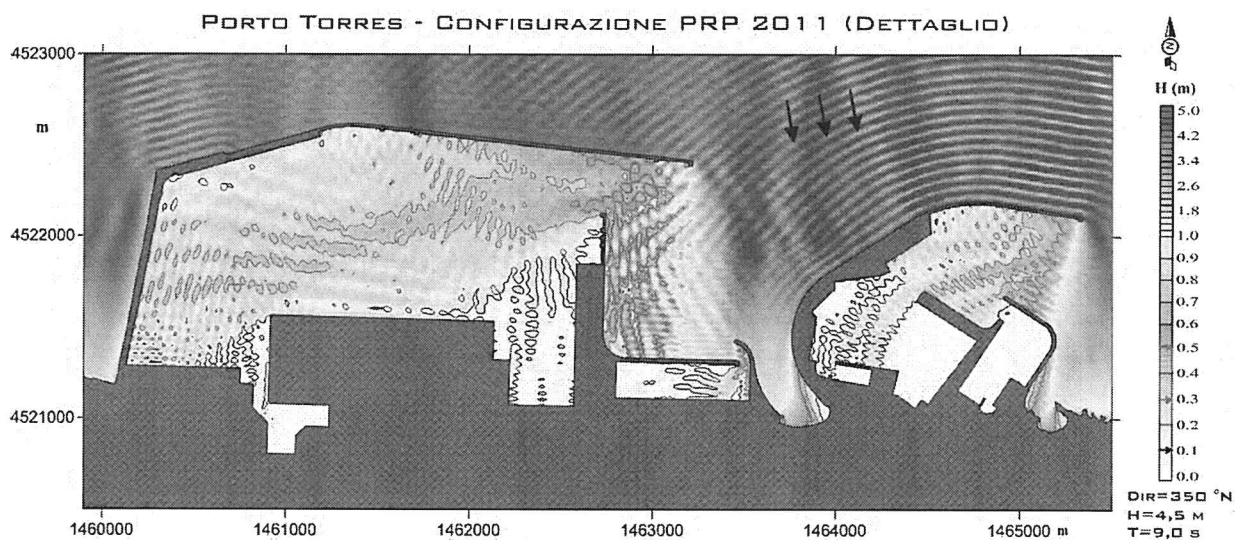
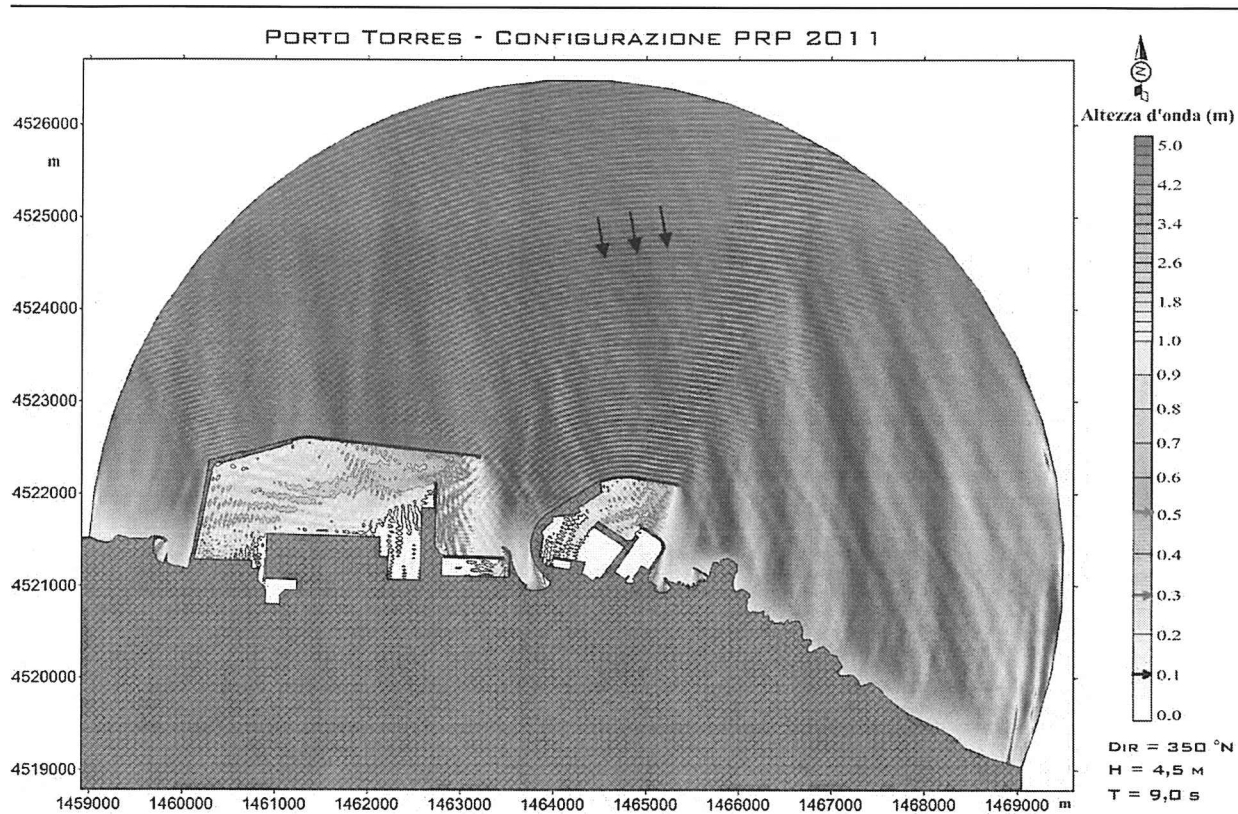


**Figura 2.18 – Configurazione PRP 2011: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=350°N; H=4.0 m; T=8.5 s).**

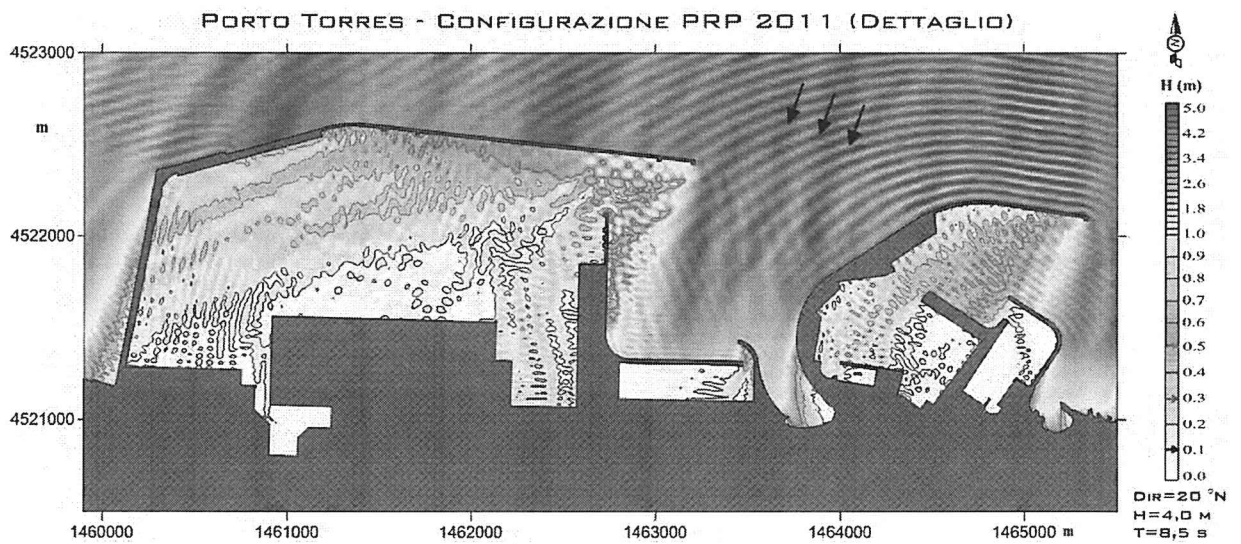
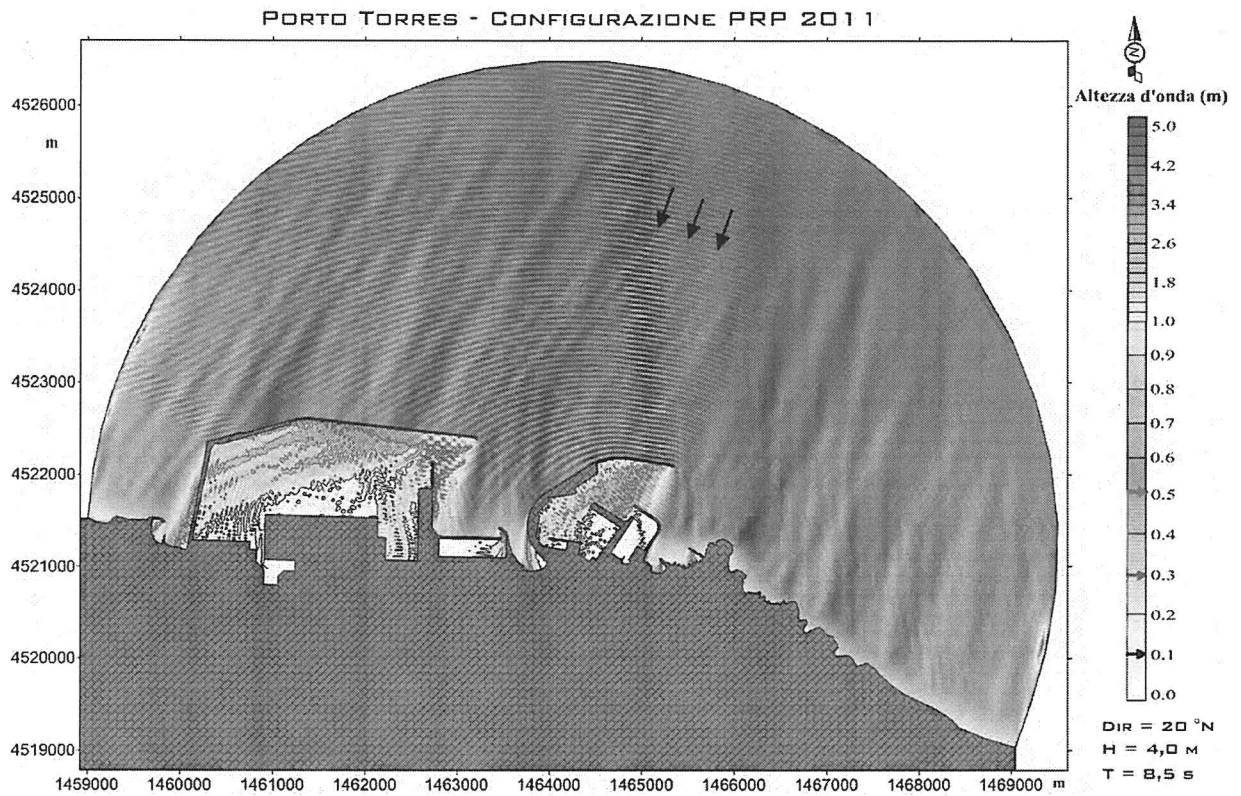


*Figura 2.19 – Configurazione PRP 2011: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=350°N;H =4.3 m; T=9.0 s).*



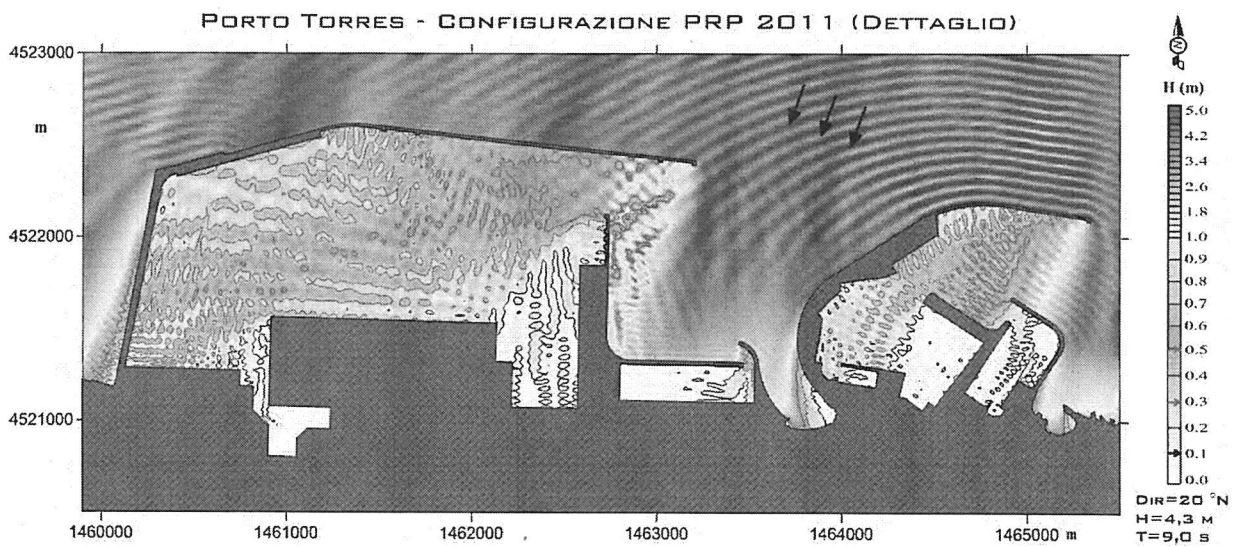
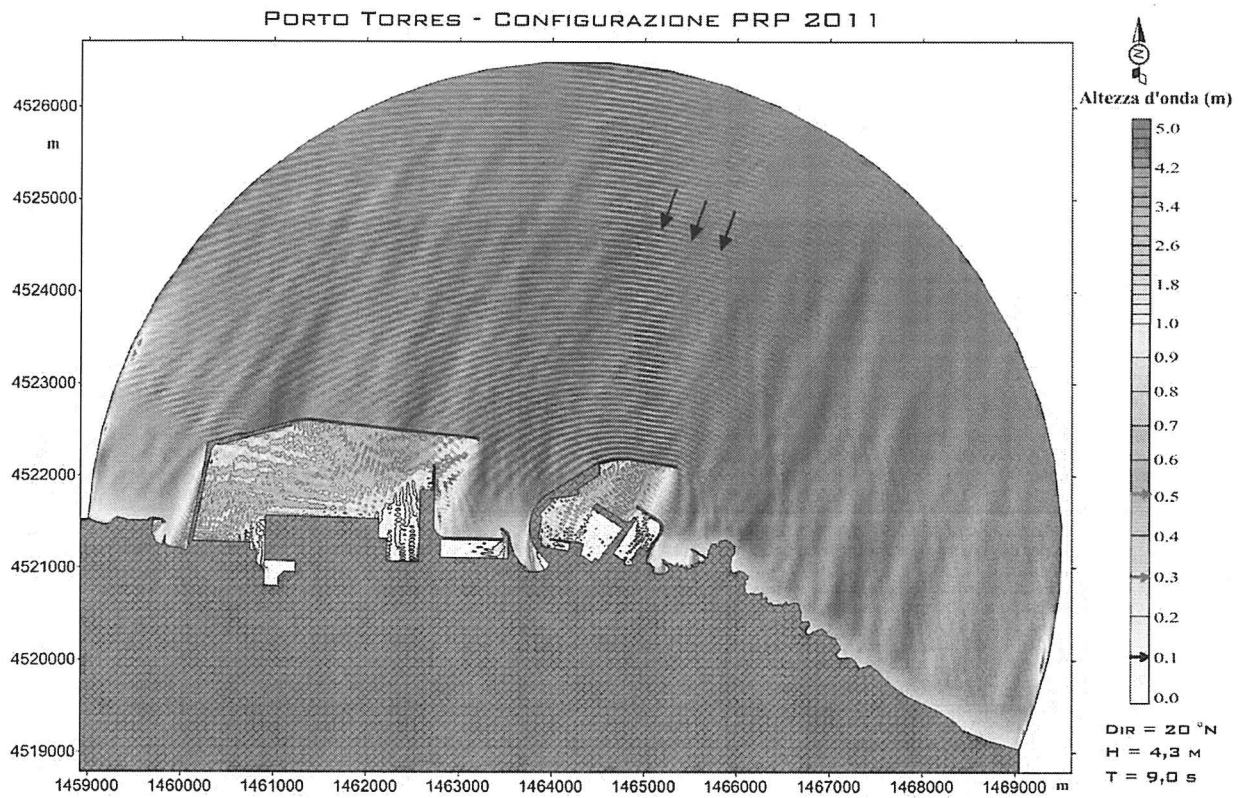


*Figura 2.20 – Configurazione PRP 2011: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=350°N; H=4.5 m; T=9.0 s).*

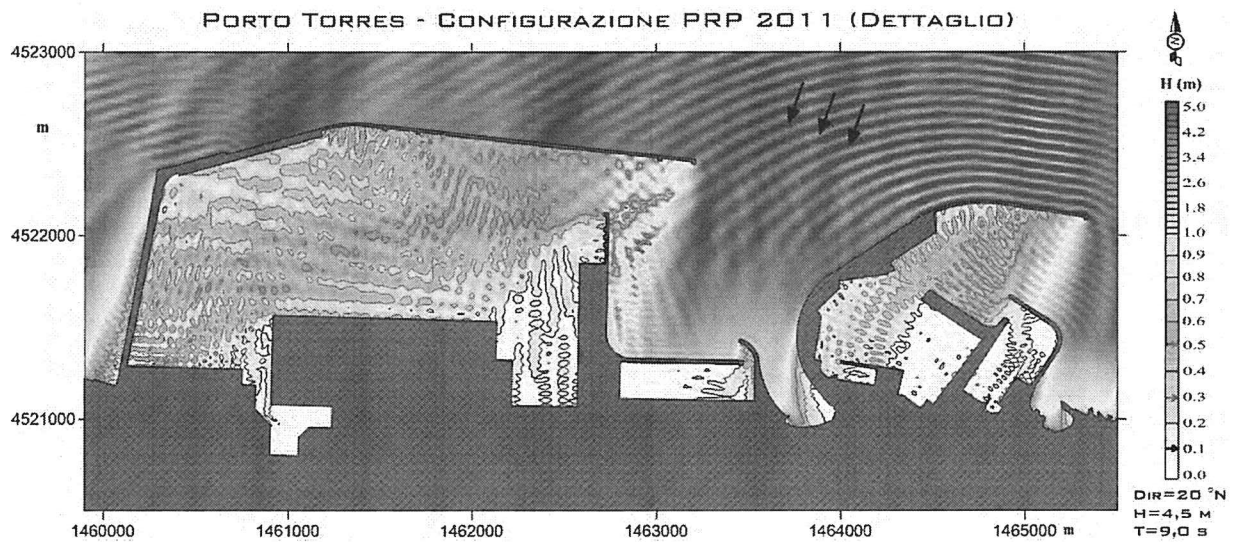
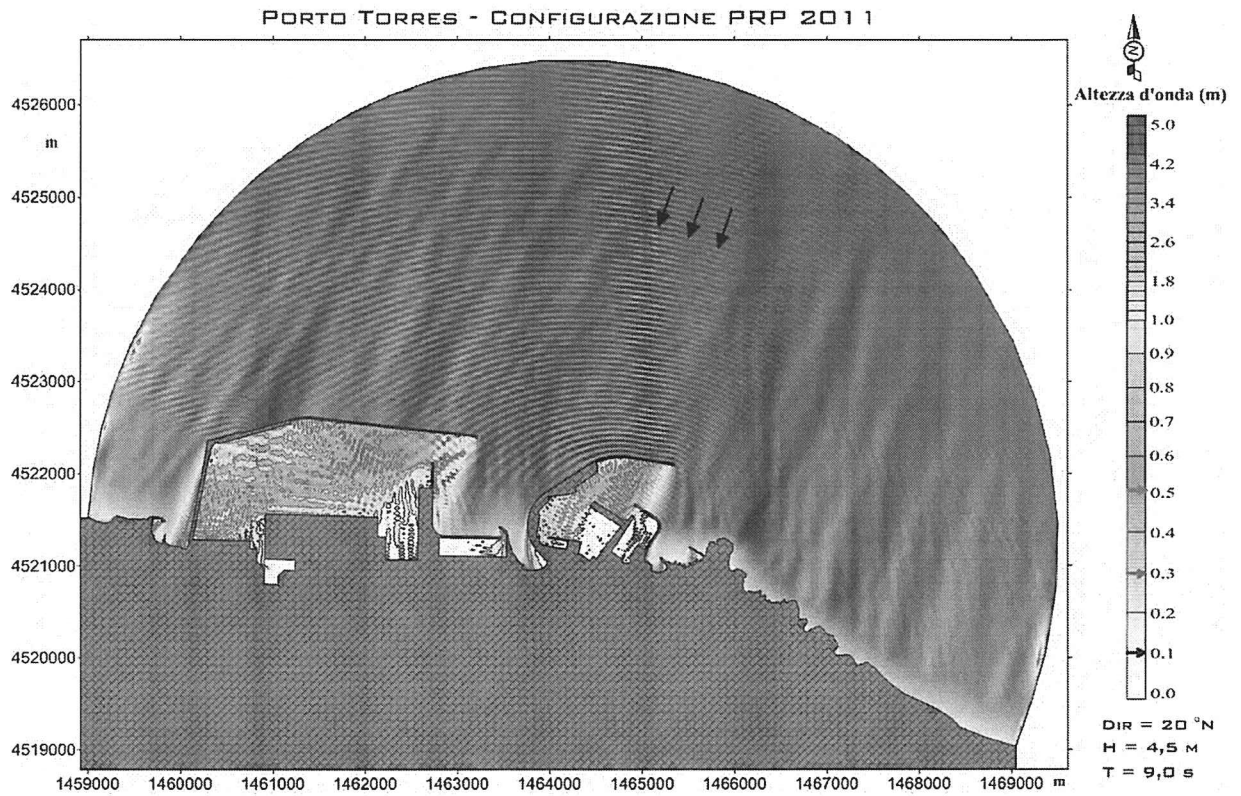


**Figura 2.21 – Configurazione PRP 2011: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=20°N; H=4.0 m; T=8.5 s).**

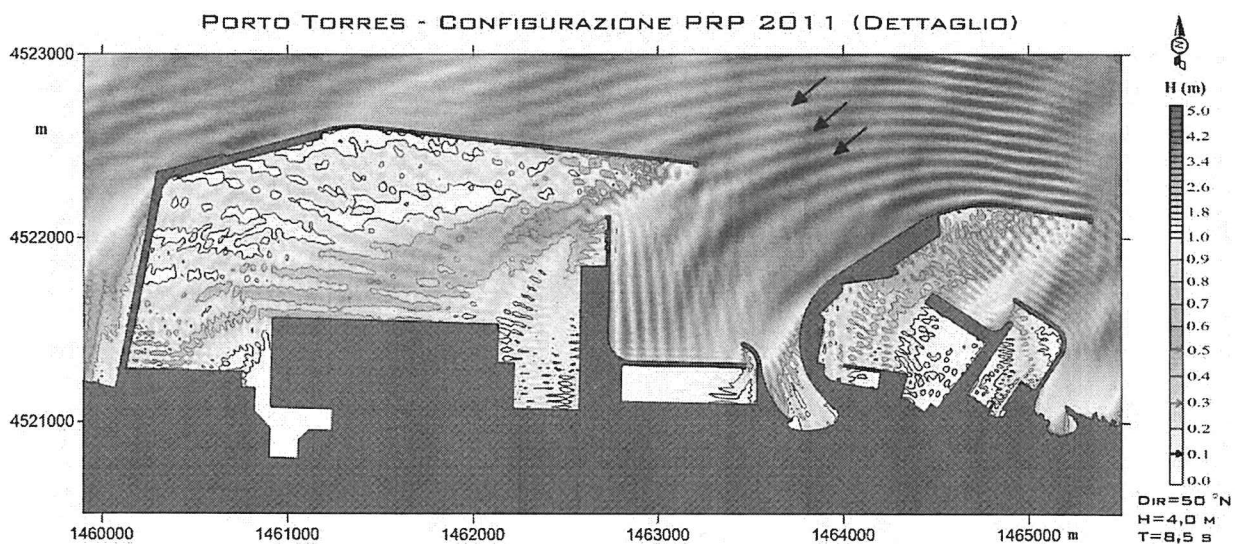
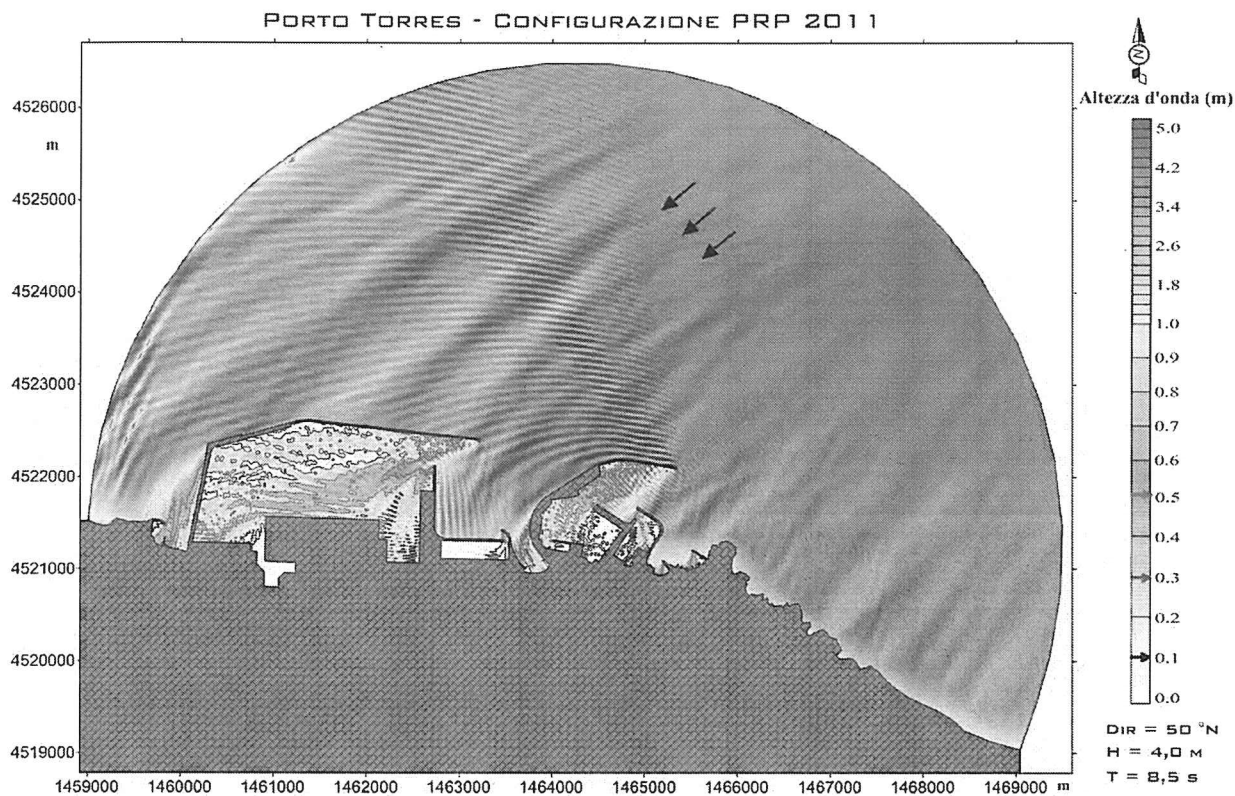




**Figura 2.22 – Configurazione PRP 2011: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=20°N; H=4.3 m; T=9.0 s).**

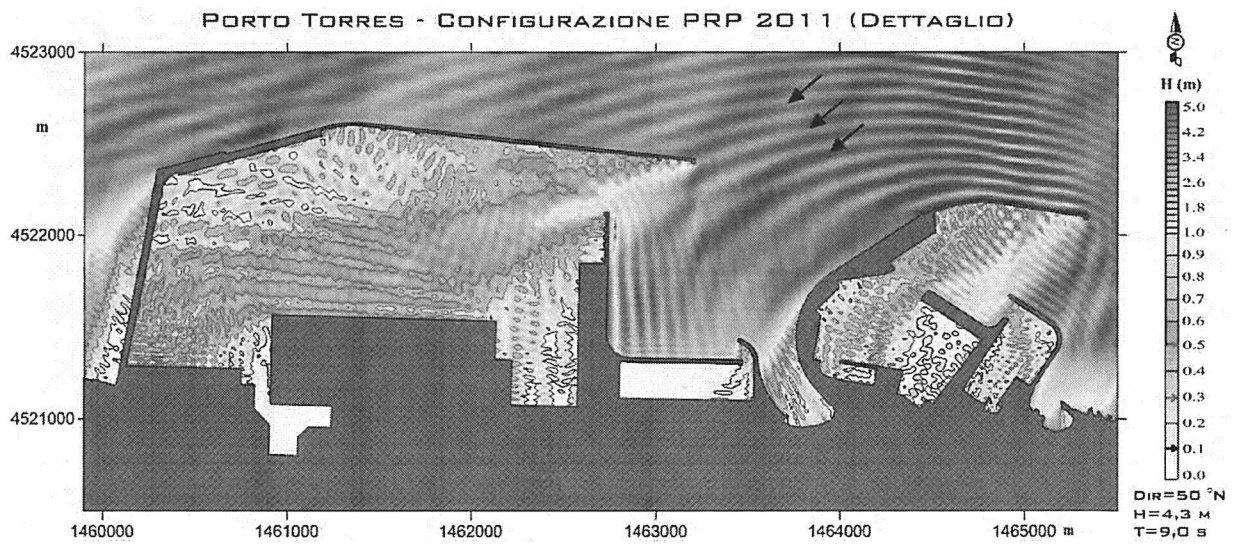
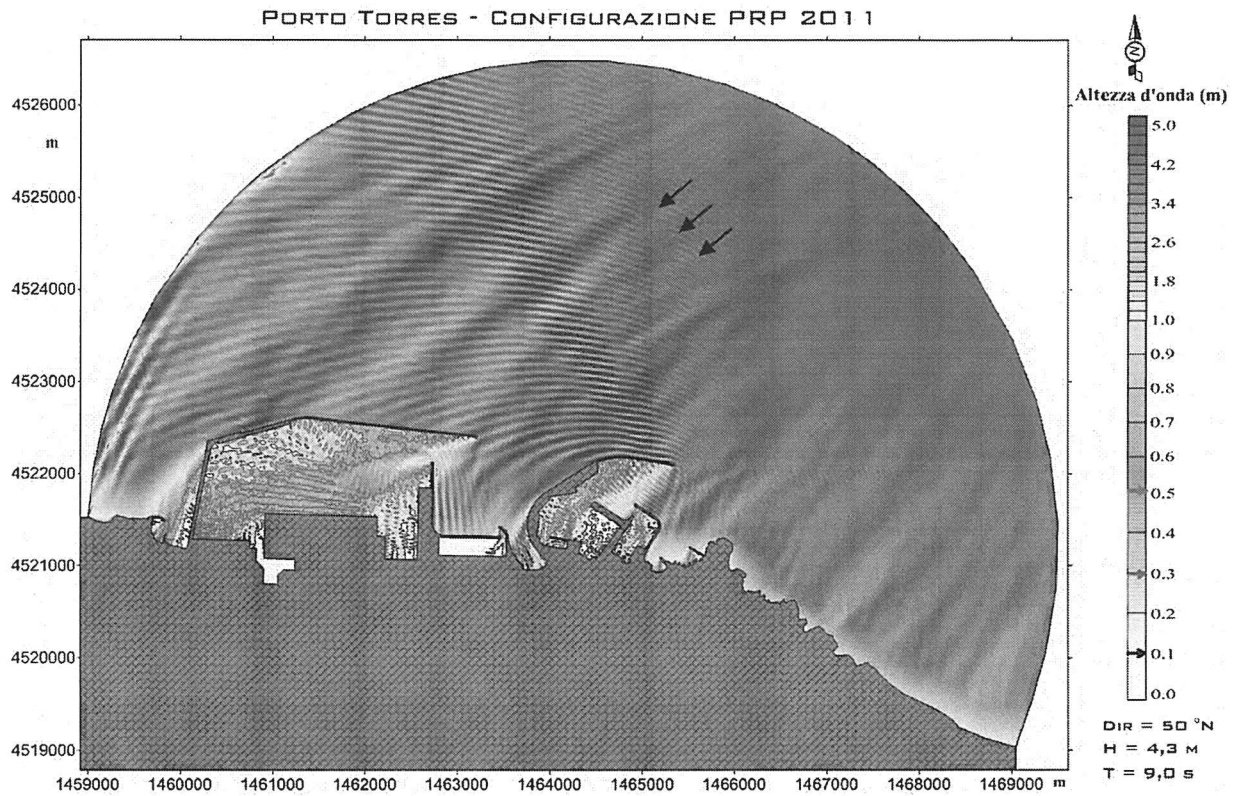


**Figura 2.23 – Configurazione PRP 2011: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=20°N; H=4.5 m; T=9.0 s).**

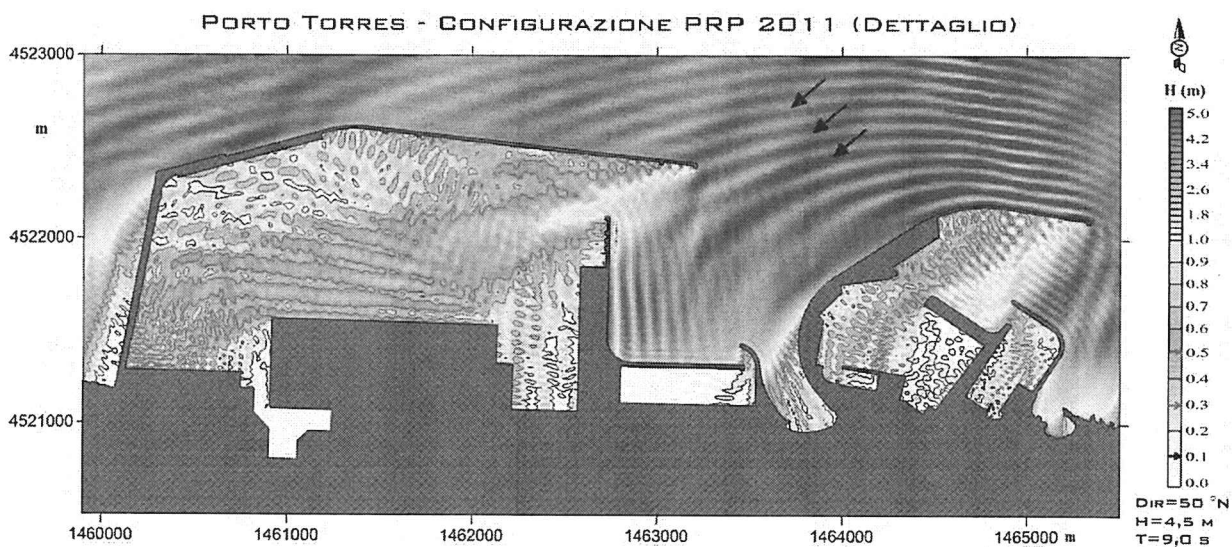
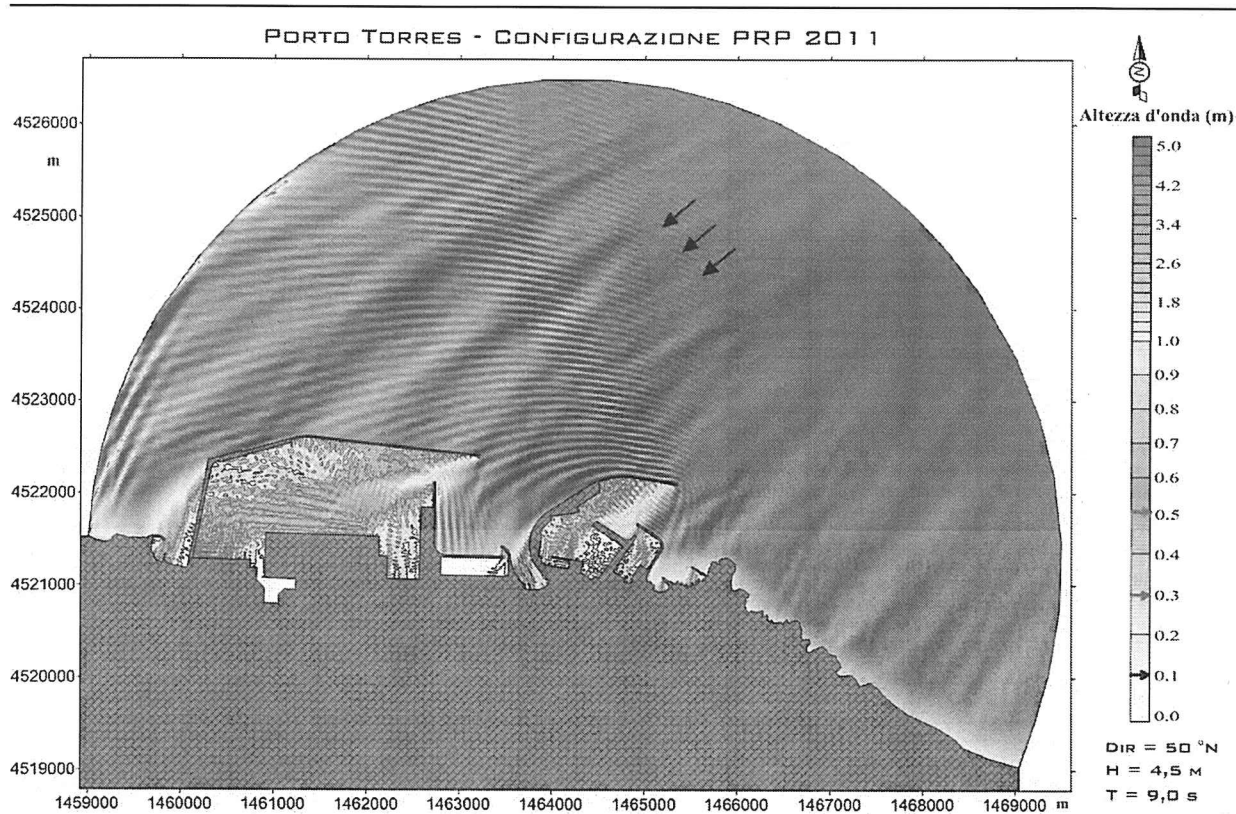


**Figura 2.24 – Configurazione PRP 2011: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=50°N;H =4.0 m; T=8.5 s).**

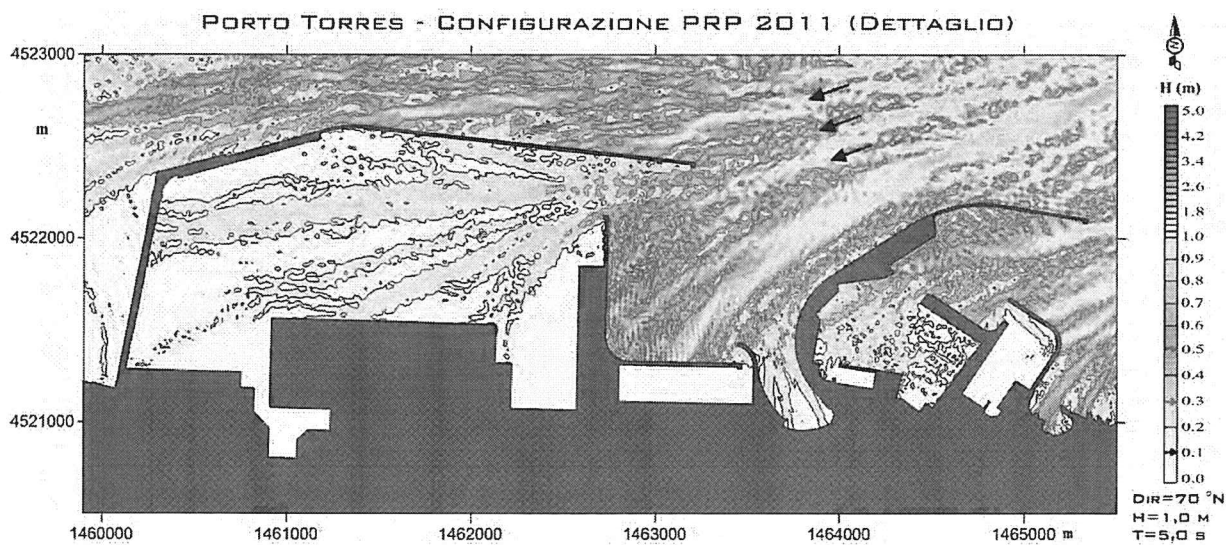
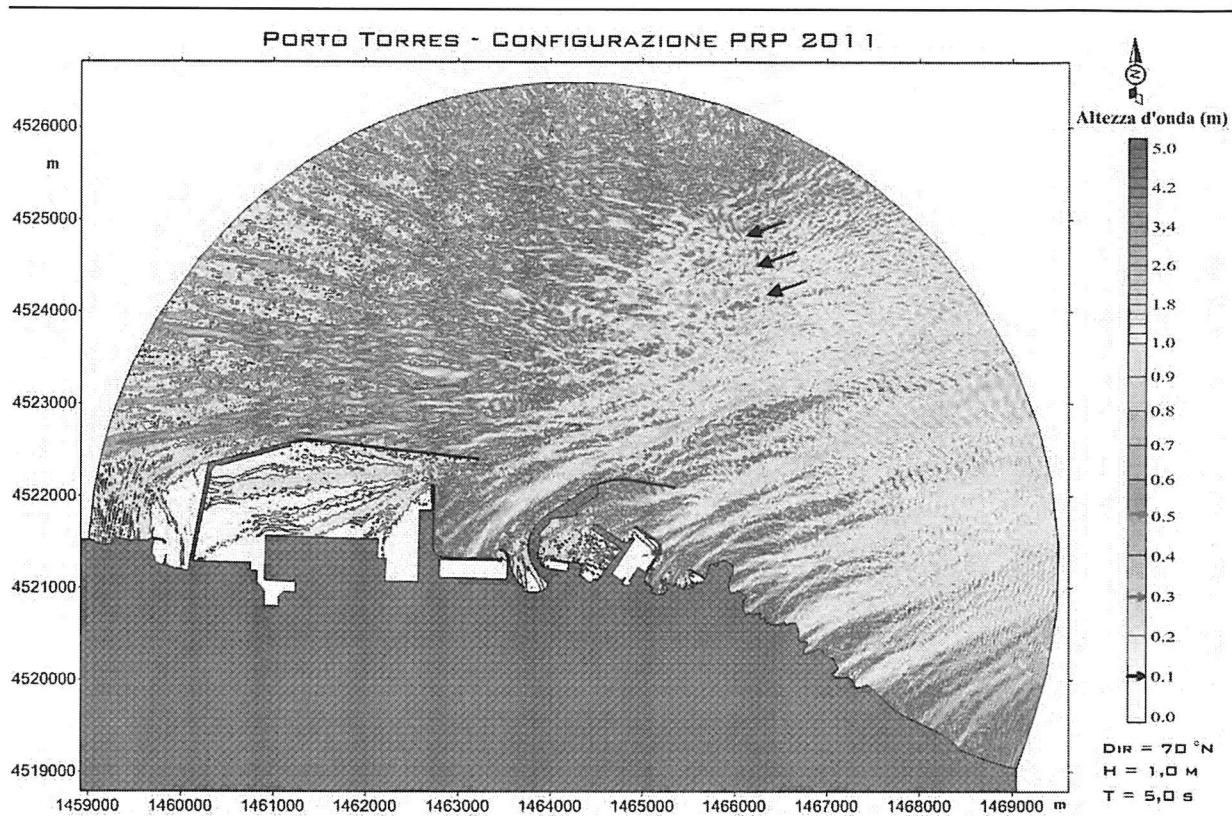




*Figura 2.25 – Configurazione PRP 2011: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=50°N; H=4.3 m; T=9.0 s).*

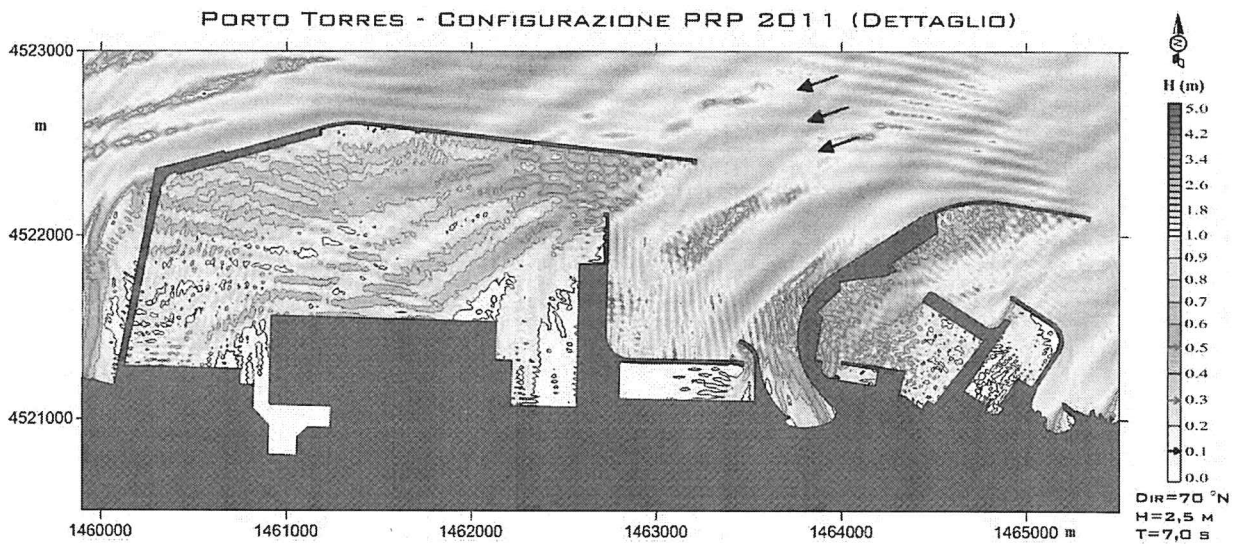
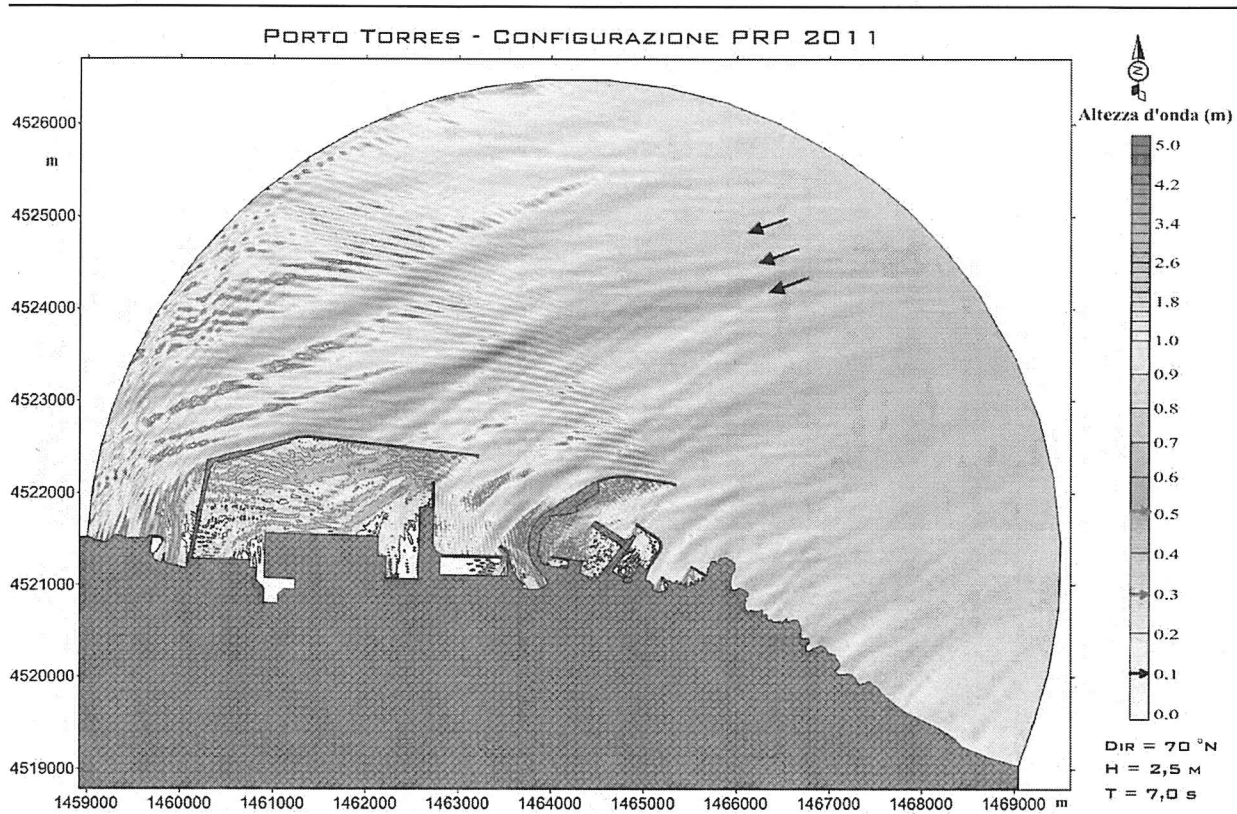


**Figura 2.26 – Configurazione PRP 2011: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=50°N; H=4.5 m; T=9.0 s).**



*Figura 2.27 – Configurazione PRP 2011: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=70°N; H=1.0 m; T=5.0 s).*





**Figura 2.28 – Configurazione PRP 2011: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=70°N; H=2.5 m; T=7.0 s).**



Figura 2.29 – Aree di studio utilizzate per il confronto dei livelli di agitazione ondosa ottenuti con le configurazioni attuale e di PRP 2011.

Tabella 2.2 - Valori medi dell'altezza d'onda calcolati in condizioni meteomarine estreme per tre aree opportunamente scelte in prossimità del tratto di costa ad Est del porto di Porto Torres .

Dir=350°N; H=4.5m; T=9s			Dir=20°N; H=4.5m; T=9s		
VALORE MEDIO H			VALORE MEDIO H		
Area	ATT	PRP 2011	Area	ATT	PRP 2011
A1	1.18	0.94	A1	1.15	1.15
A2	1.51	1.50	A2	1.51	1.50
A3	2.91	3.08	A3	2.96	3.02
Dir=50°N; H=4.5m; T=9s			Dir=70°N; H=2.5m; T=7s		
VALORE MEDIO H			VALORE MEDIO H		
Area	ATT	PRP 2011	Area	ATT	PRP 2011
A1	1.15	1.16	A1	1.10	1.05
A2	1.45	1.44	A2	1.02	1.30
A3	2.86	2.57	A3	1.18	1.57



---

### 3 CONCLUSIONI

Il presente studio, redatto nell'ambito delle attività inerenti la redazione del PRP 2011 per il porto di Porto Torres, ha lo scopo di fornire tutte le indicazioni necessarie per una corretta ed oggettiva valutazione della validità degli schemi portuali proposti e dell'efficacia della tipologia delle opere scelte in relazione alla penetrazione del moto ondoso incidente e dei conseguenti livelli di agitazione ondosa residua all'interno dei bacini portuali.

Il raggiungimento di tali obiettivi è stato possibile attraverso l'utilizzo di un apposito modello matematico (CGWAVE), in grado di tener conto dei principali fenomeni combinati di rifrazione, diffrazione, riflessione, frangimento ed all'attrito sul fondo.

Infatti, attraverso l'applicazione del modello CGWAVE, per diverse condizioni di moto ondoso opportunamente scelte, è stato possibile dapprima effettuare la propagazione del moto ondoso all'interno dei bacini portuali nelle due configurazioni attuale e di PRP 2011 e successivamente, per le stesse, confrontare i livelli di agitazione ondosa residua lungo tutte le banchine e le aree di evoluzione.

Dall'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni (Figura 2.7 ÷ Figura 2.28) si evidenzia come in generale il moto ondoso incidente propagandosi all'intero degli specchi acquei portuali viene rapidamente attenuato per effetto delle nove opere foranee previste dal PRP 2011.

In particolare, risulta evidente come, anche nelle condizioni più gravose, le nuove opere marittime previste dal PRP 2011 siano in grado di ridurre sensibilmente i livelli di agitazione ondosa residua all'interno dei bacini portuali con evidenti miglioramenti rispetto alla situazione attuale sulle condizioni di sicurezza delle imbarcazioni che dovranno stazionarvi e manovrarvi durante le fasi di ingresso ed uscita dai porti.

E' possibile quindi affermare che il nuovo PRP 2011, oltre a creare nuovi bacini portuali ovvero riqualificare le attività marittime e di navigazione, garantisce una maggiore protezione dagli eventi di moto ondoso, anche quelli più estremi, con evidenti benefici sull'operatività dei porti e sulla sicurezza delle imbarcazioni che li frequenteranno.

---

Inoltre, sempre dall'analisi dei risultati effettuata su tre aree opportunamente scelte (Figura 2.29), è emerso che le stesse opere, con particolare riferimento alla scogliere del molo di sopraflutto del nuovo porto turistico, non provocano alcuna sensibile variazione sul campo d'onda riflesso lungo il tratto di costa posto subito ad Est del porto stesso (Tabella 2.2). Questo lascia presagire che non vi saranno ripercussioni negative sulle piccole spiagge presenti lungo il litorale in esame in seguito alla realizzazione delle nuove opere previste dal PRP 2011.

## Riferimenti bibliografici

- DE GIROLAMO, P, KOSTENSE, J.K., DINGEMANS, M.W.  
"Inclusion of wave breaking in a mild slope model".  
Proc. Int. Con. on Computer Modelling in Ocean Engineering, Ed. by B.A. Schrefler & O.C. Zienkiewicz,  
Venice, 19-23 September, 1988.
- DE GIROLAMO, P.  
"Modelli irrotazionali lineari: frangimento del moto ondoso e calcolo delle spinte totali".  
Tesi di dottorato per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca in Idraulica (078) II ciclo, sede  
amministrativa Un. di Napoli "Federico II", febbraio, 1988.
- DE GIROLAMO, P., NICOLAI, L., NOLI, A.  
"Wave propagation along undersea canals".  
Atti del II Congresso AIOM, Napoli, 15-17 ottobre, 1989.
- BELTRAMI, G.M., BELLOTTI, G., DE GIROLAMO, P., SAMMARCO, P.  
"Treatment of wave breaking and total absorption in a mild-slope FEM model"  
Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, New York (USA), vol. 127, no. 5, 2001.
- BELLOTTI G., BELTRAMI G.M., DE GIROLAMO, P.  
"Internal generation of waves in 2D fully elliptic mild-slope equation FEM models"  
Coastal Engineering, Elsevier Science, Amsterdam (the Netherlands), Vol. 49 (1-2), pp. 71-  
81, 2003.

---

## Appendice: descrizione del modello matematico CGWAVE

### 3.1 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.

### 3.2 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.

### 3.3 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

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

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 semicircolare che delimita, lato mare, il dominio di calcolo; all'interno del dominio stesso viene applicata l'equazione di "mild-slope".

