Autorità Di Sistema Portuale Del Mar Tirreno Settentrionale

NUOVO PIANO REGOLATORE PORTUALE DEL PORTO DI PIOMBINO

ADEGUAMENTO TECNICO FUNZIONALE 2020

Titolo elaborato:

STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO

Roma, 20 giugno 2020 **Dott. Ing. Marco Tartaglini**

INDICE

1 PREMESSE....2

2 PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO....3

2.1 APPLICAZIONE DEL SISTEMA DI MODELLAZIONE SMS....5

2.2 DISCRETIZZAZIONE DELLO SPECCHIO LIQUIDO....5

2.3 DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO....7

3 MOTI ONDOSI PROVENIENTI DAL SETTORE DI TRAVERSIA PRINCIPALE....9

3.1 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI....9

3.2 ANALISI DEI RISULTATI....16

4 MOTI ONDOSI PROVENIENTI DAL SETTORE DI TRAVERSIA SECONDARIA....18

4.1 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI....18

4.2 ANALISI DEI RISULTATI....25

5 CONCLUSIONI....26

APPENDICE: DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO CGWAVE....27

1 PREMESSE

La presente relazione illustra i risultati dello studio di penetrazione del moto ondoso, necessario per una corretta definizione ed ottimizzazione dello schema portuale definitivo previsto per l'Adeguamento Tecnico Funzionale 2020 del nuovo Piano Regolatore Portuale di Piombino.

Lo studio è stato condotto applicando il codice di calcolo agli elementi finiti CGWAVE, appartenente al modello SMS (Surfacewater Modeling System), che risolve le equazioni non lineari per le acque basse (non linear shallow water equations), con lo scopo di verificare in maniera oggettiva la validità e funzionalità dello schema portuale proposto dal presente progetto di Adeguamento Tecnico Funzionale 2020.

Tale modello, infatti, 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 gli eventi di moto ondoso più gravosi ai fini dell'agitazione ondosa residua, compatibilmente con le condizioni meteomarine raggiungibili nel paraggio in esame.

I risultati ottenuti dall'applicazione del modello CGWAVE hanno evidenziato come le nuove opere portuali garantiscono all'interno dello specchio acqueo protetto, anche con eventi estremi associati a tempi di ritorno decennali e cinquantennali, una sufficiente attenuazione del moto ondoso incidente con livelli di agitazione ondosa residua accettabili per le imbarcazioni in fase di stazionamento e durante le manovre necessarie per l'ingresso e l'uscita dal porto.

Lo studio è stato suddiviso in due parti: nella prima parte viene analizzata la penetrazione delle mareggiate più frequenti ed intense che provengono dal settore di traversia principale (145°N e 160°N) mentre nella seconda parte viene analizzata la penetrazione delle mareggiate che si formano all'interno del golfo di Follonica (90°N, 100°N e 115°N) che seppure molto meno intense potrebbero creare alcuni problemi alla operatività delle banchine portuali in quanto per queste direzioni le opere di difesa del porto di Piombino offrono una minore protezione.

2 PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO

Nella figura 2.1 e nella tabella 2.1, stralciate dallo studio meteo marino redatto nel Febbraio 2020 nell'ambito della progettazione del Pennello Molo Nord del Porto di Piombino a cui si rimanda per maggiori dettagli, sono riportate la rosa annuale della distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso ricostruita nel Punto P posizionato sotto costa in prossimità del porto di Piombino, su fondali di circa -15 m s.l.m., ed il regime annuale degli eventi di moto ondoso classificati per Hs e Dir -distribuzione %.

Dall'esame della figura 2.1 e della tabella 2.1 si ricava che le direzioni di provenienza delle mareggiate caratterizzate da altezze d'onda significative superiori ad 1.50 m sono concentrate nel settore compreso tra le direzioni 145°N e 185°N mentre le mareggiate più frequenti provengono dal settore compreso tra 160°N e 210°N.

Considerato che la protezione offerta dalle opere di difesa del porto di Piombino è completa per tutti i moti ondosi provenienti dal III e IV quadrante e si riduce progressivamente procedendo in senso antiorario verso il II e I quadrante, per la determinazione dei livelli di agitazione ondosa residua che si verificano all'interno del nuovo porto di Piombino, nella configurazione prevista dall'ATF 2020 del Piano Regolatore Portuale, sono state esaminate le mareggiate provenienti dal limite orientale del settore di provenienza delle mareggiate più intense e frequenti.

Figura 2.1 – Ubicazione del punto P scelto sotto costa in prossimità del porto di Piombino, su fondali di circa -15 m s.l.m., per la propagazione del moto ondoso da largo a riva e rosa annuale della distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso ricostruita nello stesso Punto (P)

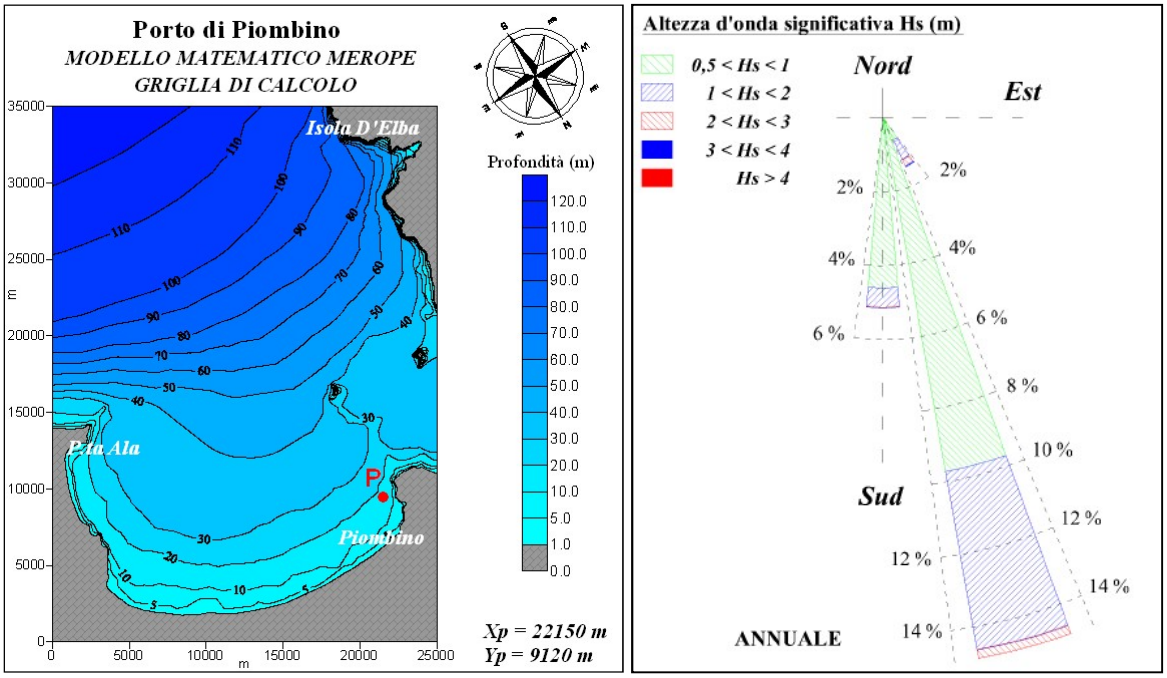


Tabella 2.1 - Punto P: regime annuale degli eventi di moto ondoso classificati per Hs e Dir -distribuzione %

Piombino Serie ondametrica sottocosta (Dati rilevati dal 03/02/1994 al 31/05/2013)
Distribuzione percentuale degli eventi ondosi per classi di Hs e direzione di provenienza. Regime ANNUALE

DIR	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)															
(°N)	0÷0.25	0.25÷0.5	0.5÷1	1÷1.5	1.5÷2	2÷2.5	2.5÷3	3÷3.5	3.5÷4	4÷4.5	4.5÷5	5÷5.5	5.5÷6	6÷6.5	>= 6.5	TOT
10																
20																
30																
40																
50																
60																
70																
80																
90																
100																
110																
120																
130	0.176															0.18
140	0.916	0.074	0.016	0.005												1.01
150	1.959	0.782	0.280	0.080	0.025	0.030	0.025	0.008								3.19
160	2.480	3.075	4.307	2.497	1.051	0.283	0.063	0.003								13.76
170	7.105	6.935	6.831	1.844	0.263	0.038	0.003									23.02
180	8.847	6.129	3.509	0.280	0.005	0.003										18.77
190	6.444	0.916	0.016													7.38
200	21.141	0.038														21.18
210	11.517															11.52
220																
230																
240																
250																
260																
270																
280																
290																
300																
310																
320																
330																
340																
350																
360																
TOT	60.59	17.95	14.96	4.70	1.34	0.35	0.09	0.01								100.00
Tot. cumul.		78.54	93.50	98.20	99.54	99.90	99.99	100.00								

Numero di eventi validi: **36451**

Nella tabella Tabella 2.2 sono riportati gli scenari esaminati per lo studio della penetrazione dei moti ondosi provenienti dal settore di traversia principale che prevedono forzanti di moto ondoso con valore unitario dell'altezza d'onda significativa.

Tabella 2.2 – Settore di traversia principale. Forzanti di moto ondoso imposte come condizioni al contorno per il modello CGWAVE

DIREZIONE	FORZANTI DI MOTO ONDOSO
145° N; 160° N	T=6s; T=8s; T=10s

Per lo studio della penetrazione all'interno del bacino portuale delle mareggiate che si generano all'interno del golfo di Follonica (settore di traversia secondaria) sono state esaminate tre direzioni, che presentano estensioni delle aree di generazione comprese tra 13 e 18 km, delle quali due (90°N e 115°N) poste ai limiti del settore e l'altra (100°N) centrata.

Nella Tabella 2.3 sono riportati gli scenari esaminati nello studio di penetrazione dei moti ondosi provenienti dal settore di traversia secondario che, anche in questo caso, prevedono forzanti di moto ondoso con valore unitario dell'altezza d'onda significativa.

Tabella 2.3 – Forzanti di moto ondoso imposte come condizioni al contorno per il modello CGWAVE

DIREZIONE	FORZANTI DI MOTO ONDOSO
90° N; 100° N, 115° N	T=6s; T=8s

Nei paragrafi successivi vengono ampiamente descritte le simulazioni condotte per lo studio dell'agitazione ondosa all'interno del porto di Piombino nella configurazione di progetto ipotizzata con l'ATF2020 per i due settori di traversia considerati, 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 ed all'attrito sul fondo. 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 particolare importanza in casi ove sono presenti bassi fondali caratterizzati da una batimetria sensibilmente variabile.

Nella fase preliminare dello studio (procedura di pre-processor) è stato utilizzato il codice GFGEN, agli elementi finiti, per la costruzione del reticolo geometrico 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) che di valori del coefficiente di riflessione da associare ai diversi contorni che caratterizzano lo schema portuale preso in esame per il porto di Piombino.

2.2 Discretizzazione dello specchio liquido

Per la corretta applicazione della routine di calcolo CGWAVE è stato necessario effettuare un'attenta e dettagliata discretizzazione del sistema liquido per la configurazione portuale da simulare.

Per la batimetria dei fondali e lo schema portuale da simulare (Figura 2.2), si è fatto riferimento alla carta nautica edita dall'Istituto Idrografico della Marina Militare (CN. 5 – Dal Canale di Piombino al Promontorio di Argentario e Scoglio Africa – Scala 1:100.000), ai

rilievi batimetrici di dettaglio effettuati di recente nella zona ove dovranno sorgere le nuove opere ed alla configurazione planimetrica di ATF2020 del Piano Regolatore Portuale.

Nel dettaglio, il campo fluido é stato schematizzato con tre differenti griglie di calcolo, caratterizzate da una profondità compresa tra 0.5 m e circa 29 m, in relazione ai tre differenti periodi d'onda scelti per le simulazioni, ovvero:

- per gli eventi di moto ondoso con periodo T=6s una griglia di calcolo costituita da 250801 elementi, 126611 nodi di calcolo (Figura 2.3);
- per gli eventi di moto ondoso con periodo T=8s una griglia di calcolo costituita da 125475 elementi, 63671 nodi di calcolo;
- per gli eventi di moto ondoso con periodo T=10s una griglia di calcolo costituita da 82211 elementi, 41948 nodi di calcolo.

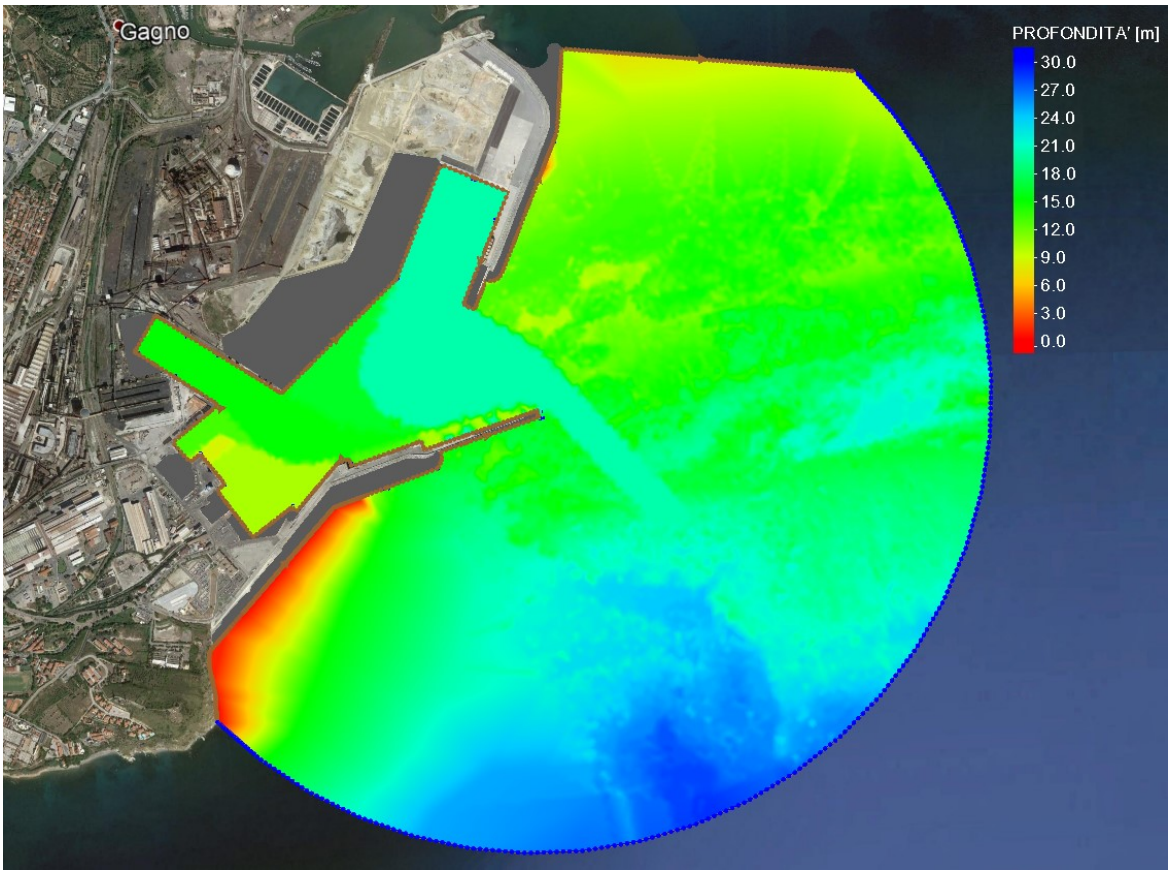


Figura 2.2 – Configurazione di progetto: batimetria di riferimento.



Figura 2.3 – Configurazione di progetto: discretizzazione dello specchio liquido per il periodo T=6s

2.3 Definizione delle condizioni al contorno

Per la nuova configurazione di progetto prevista dall'ATF2020 del Piano Regolatore Portuale del porto di Piombino, al fine di poter determinare i livelli di agitazione ondosa residua all'interno dei bacini portuali che lo caratterizzano ed in seguito all'azione del moto ondoso incidente, è stato necessario definire ed impostare opportune condizioni al contorno all'interno del modello matematico CGWAVE.

Nel dettaglio, così come riportato nella Figura 2.4, lungo i contorni che rappresentano la linea di costa sono stati imposti in maniera opportuna i seguenti coefficienti di riflessione R.

- Opere a pareti verticali piena R = 0.90;
- Opere a pareti verticali con elementi assorbenti R = 0.55;
- Tratti rocciosi naturali ed opere a scogliera R = 0.35;

- Pontili su pali o galleggianti (completamente permeabili) R = 0.00.

Inoltre, il dominio di calcolo è stato limitato da una linea semicircolare che rappresenta le condizioni in mare aperto, sufficientemente distante dal bacino portuale, lungo la quale sono state imposte le forzanti di moto ondoso riportate in Tabella 2.2.

Per tenere conto degli effetti dissipativi dovuti al frangimento del moto ondoso ed all'attrito sul fondo, all'interno del modello 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.

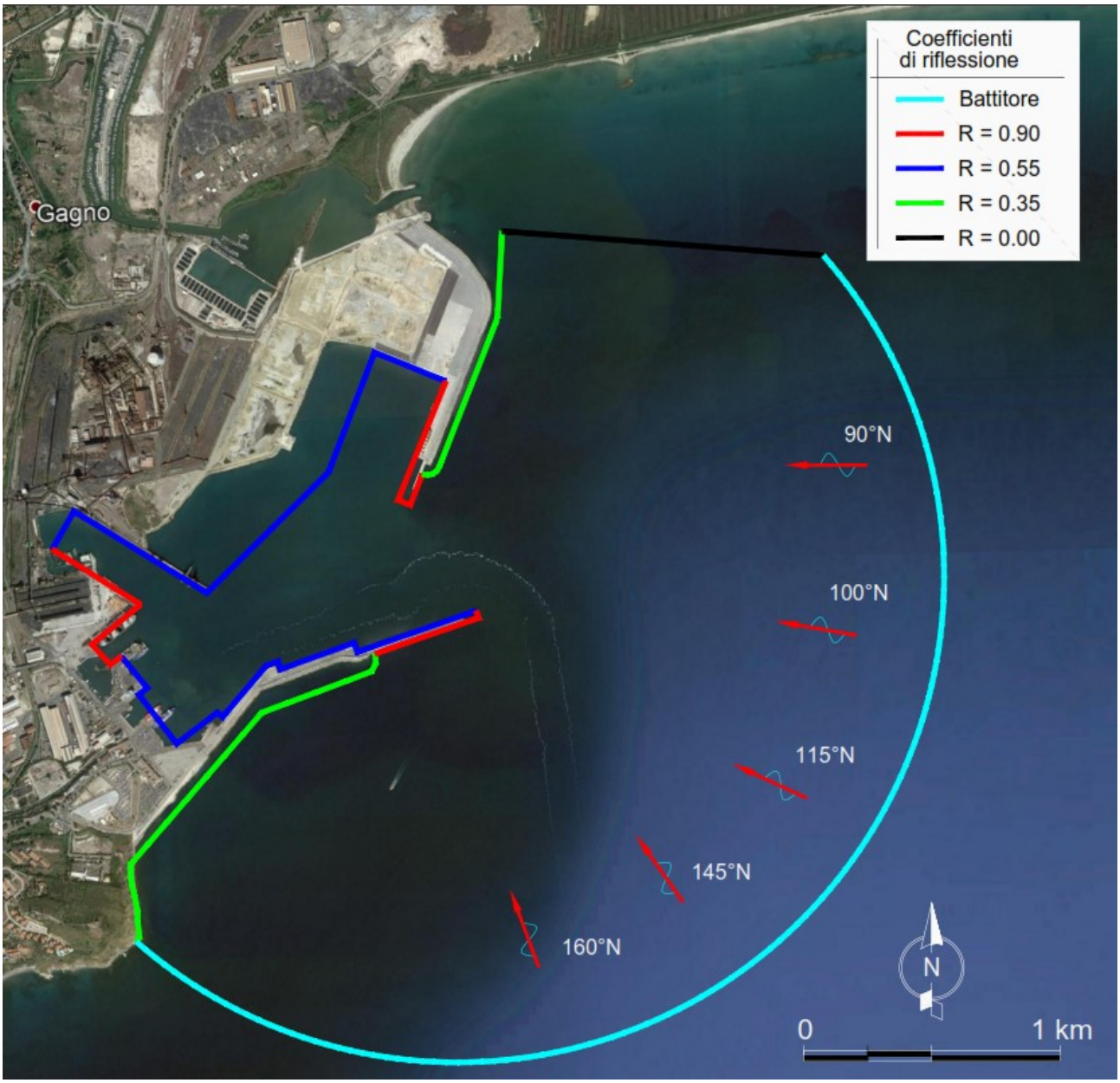


Figura 2.4 – Indicazione dei coefficienti di riflessione adottati per le simulazioni effettuate con il modello CGWAVE.

3 MOTI ONDOSI PROVENIENTI DAL SETTORE DI TRAVERSIA PRINCIPALE

3.1 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.

Attraverso l'applicazione di quest'ultimo programma, infatti, sono state condotte diverse simulazioni con lo scopo di determinare l'agitazione ondosa all'interno dei bacini protetti e, successivamente, di verificare per gli stessi le condizioni di sicurezza necessarie alle imbarcazioni, sia in fase di stazionamento che durante le manovre di ingresso ed uscita dal porto.

Dalla Figura 3.1 alla Figura 3.12, per la nuova configurazione portuale definita dall'ATF2020 del Piano Regolatore Portuale del porto di Piombino, è possibile verificare il campo d'onda conseguente ai diversi stati di mare scelti per il settore di traversia principale per le simulazioni e rappresentativi sia delle condizioni di operatività ordinaria, e perciò 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 – 10.0 s).

Tutte le simulazioni sono state effettuate in forma parametrica imponendo, come condizione di input nel modello matematico CGWAVE, un valore unitario dell'altezza d'onda incidente.

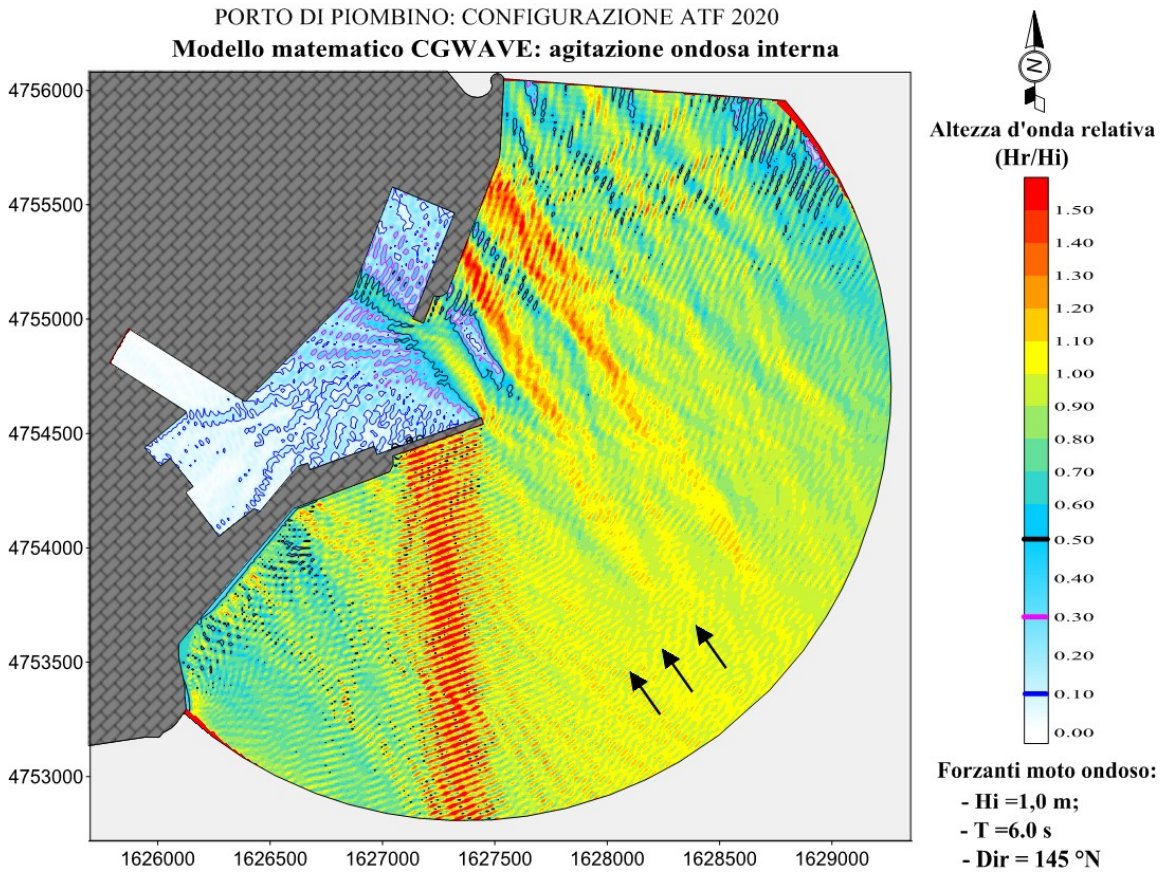


Figura 3.1 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=145°N;H =1 m; T=6 s).

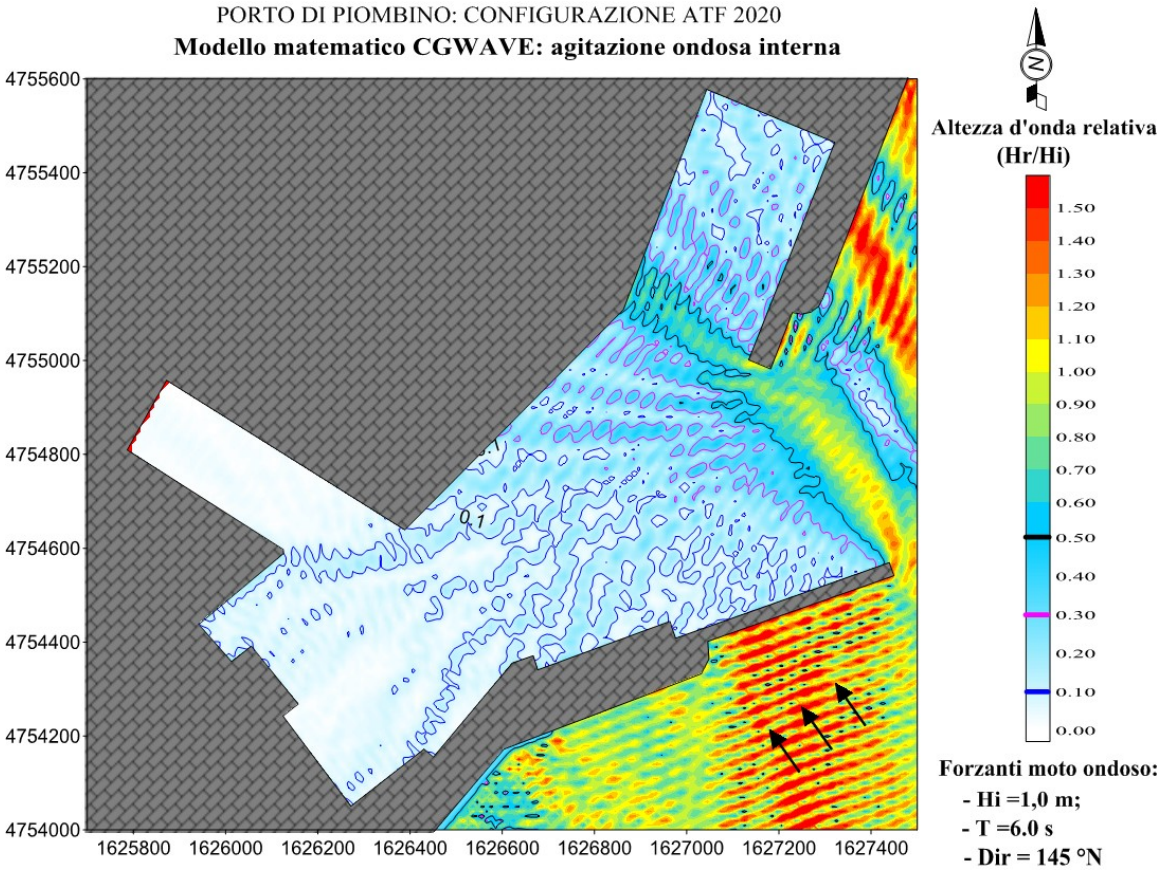


Figura 3.2 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con il modello CGWAVE (Dir=145°N;H=1 m; T=6s).

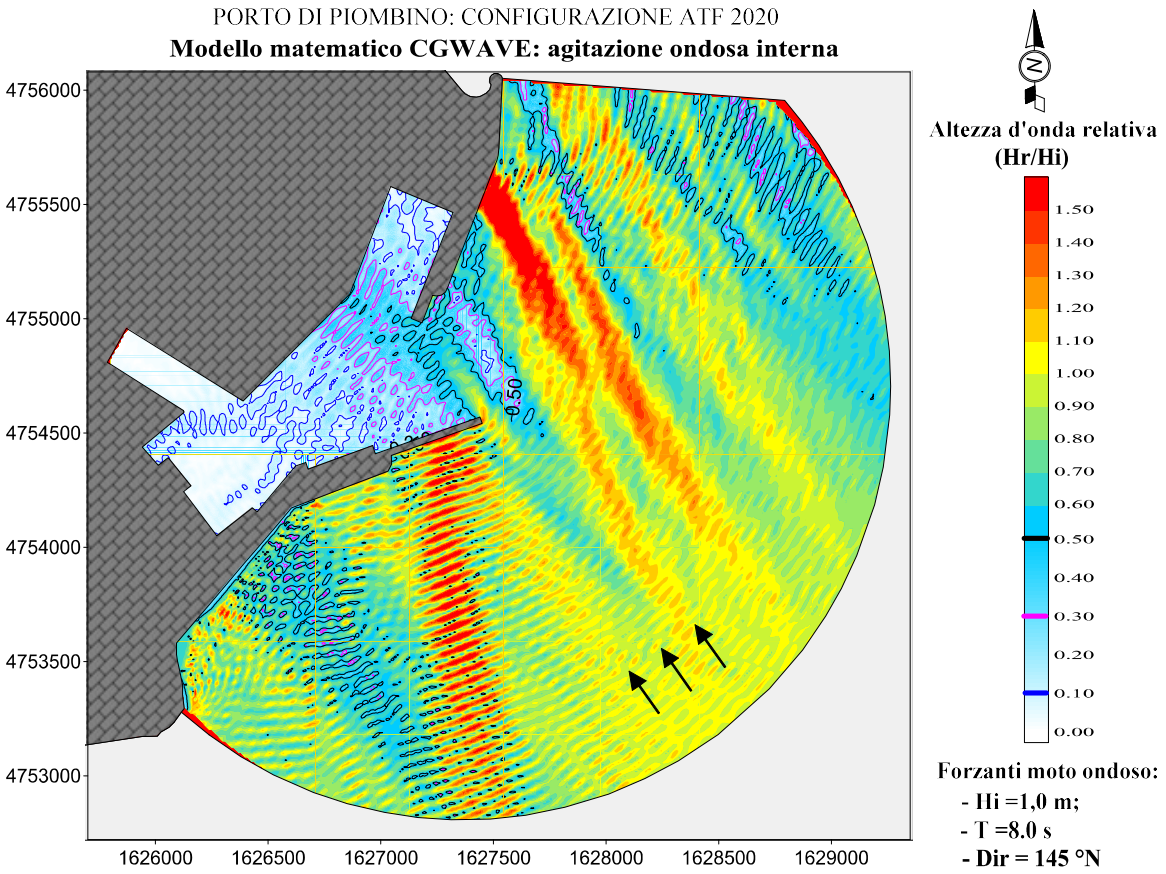


Figura 3.3 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=145°N;H =1 m; T=8 s).

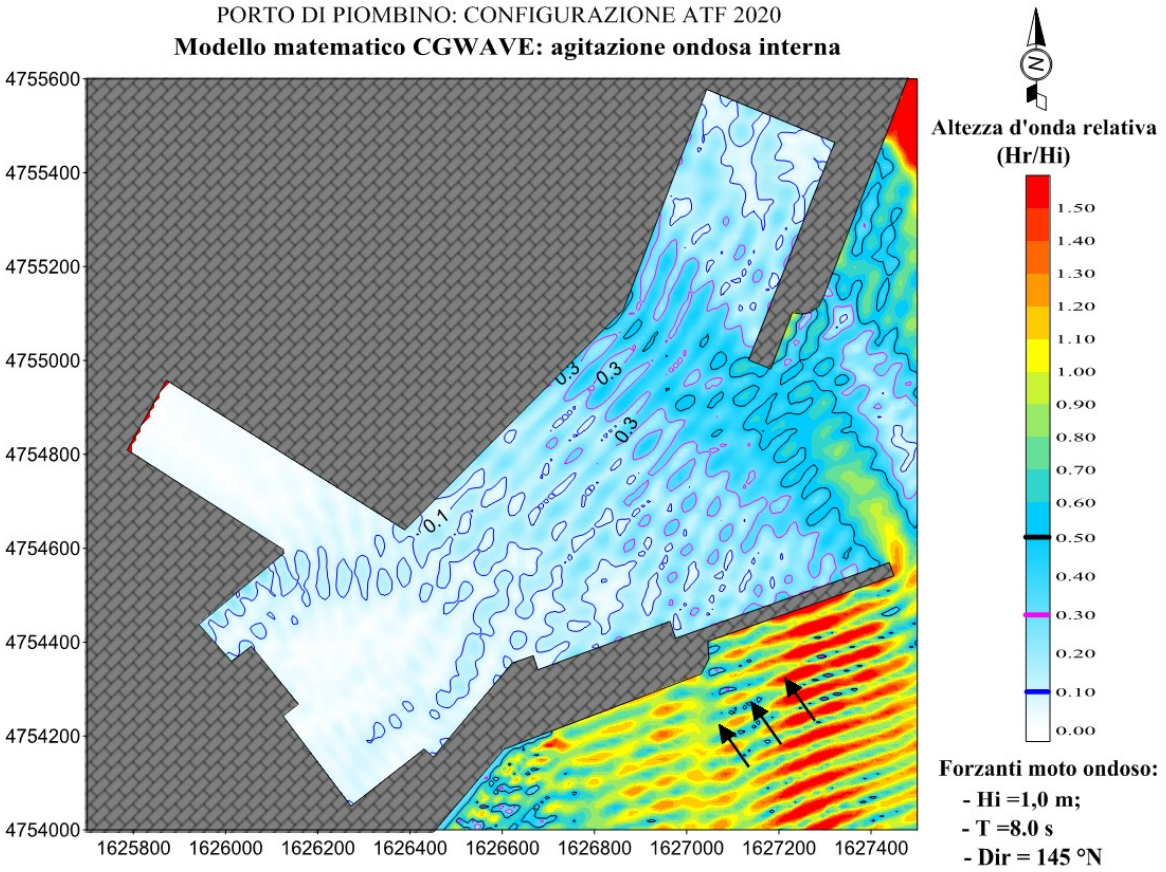


Figura 3.4 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con il modello CGWAVE (Dir=145°N;H=1 m; T=8s).

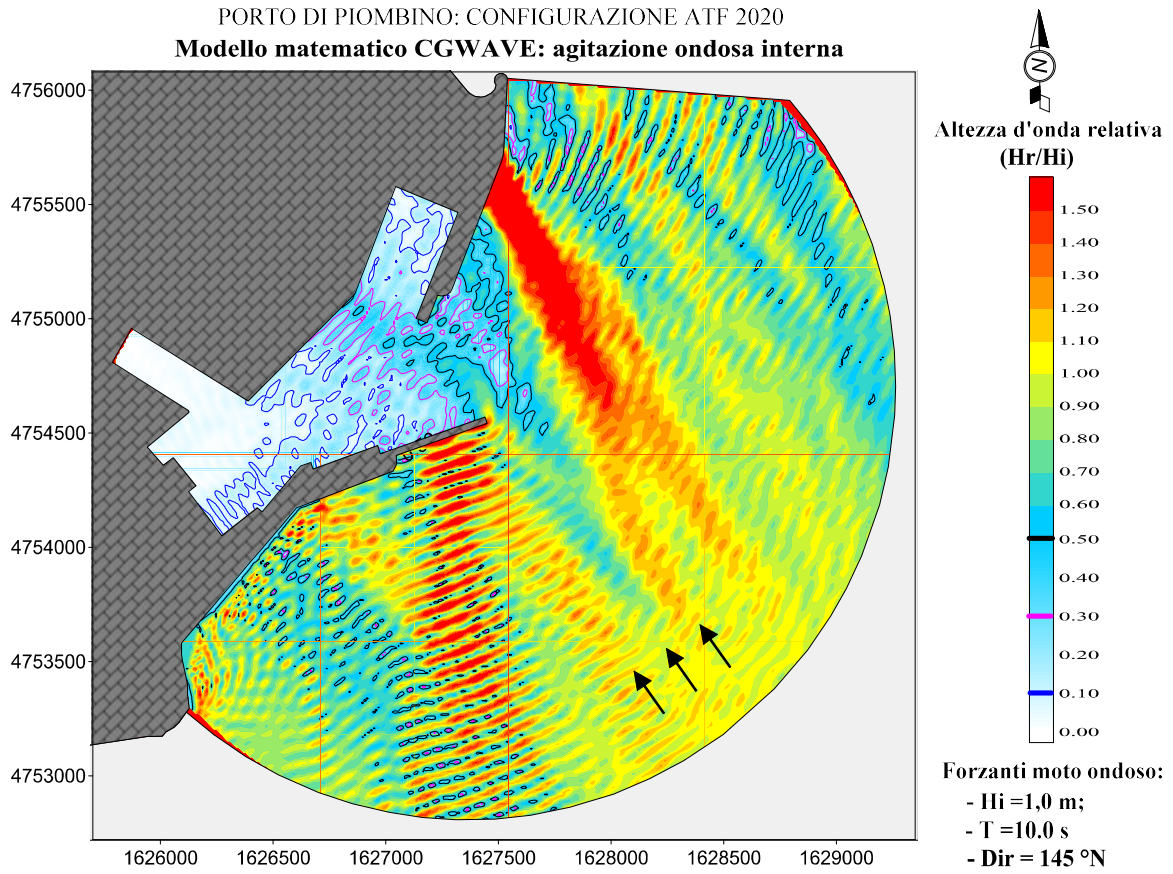


Figura 3.5 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=145°N;H =1 m; T=10s).

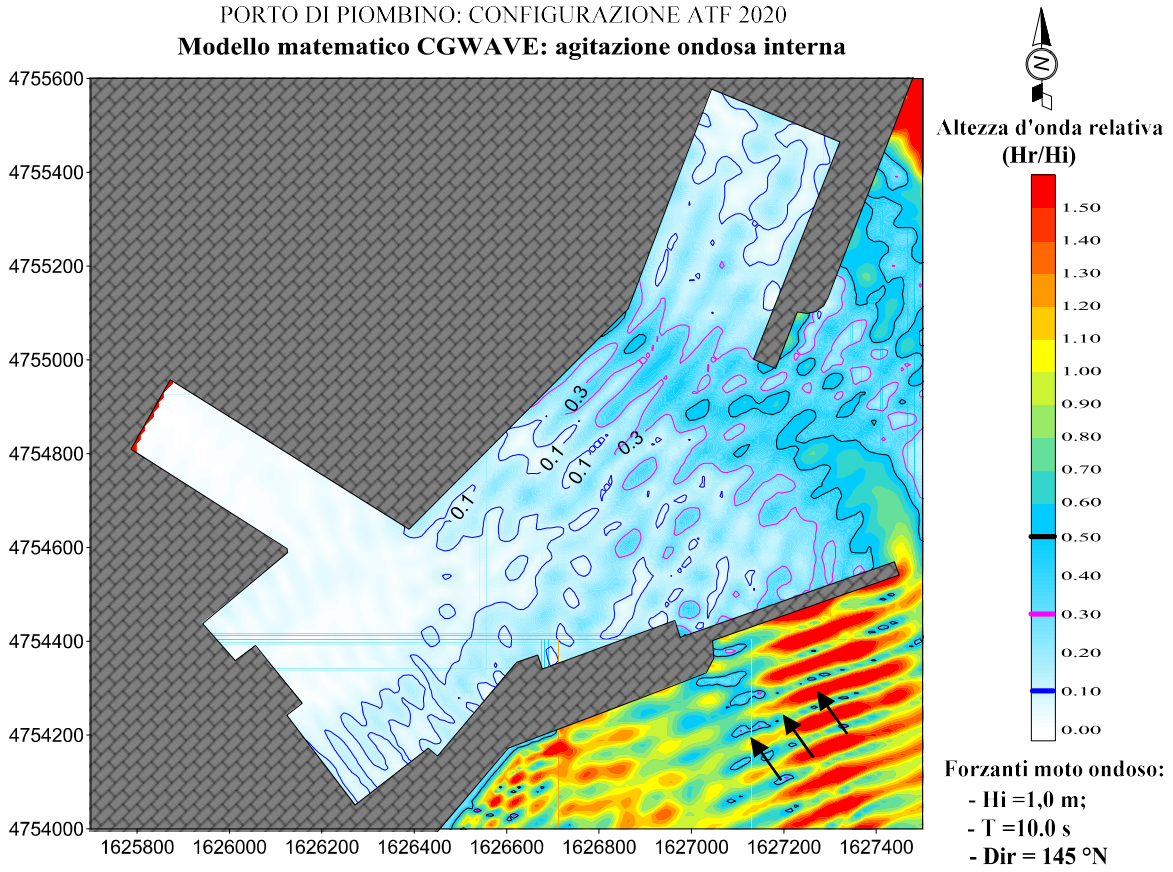


Figura 3.6 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con CGWAVE (Dir=145°N;H=1m; T=10s).

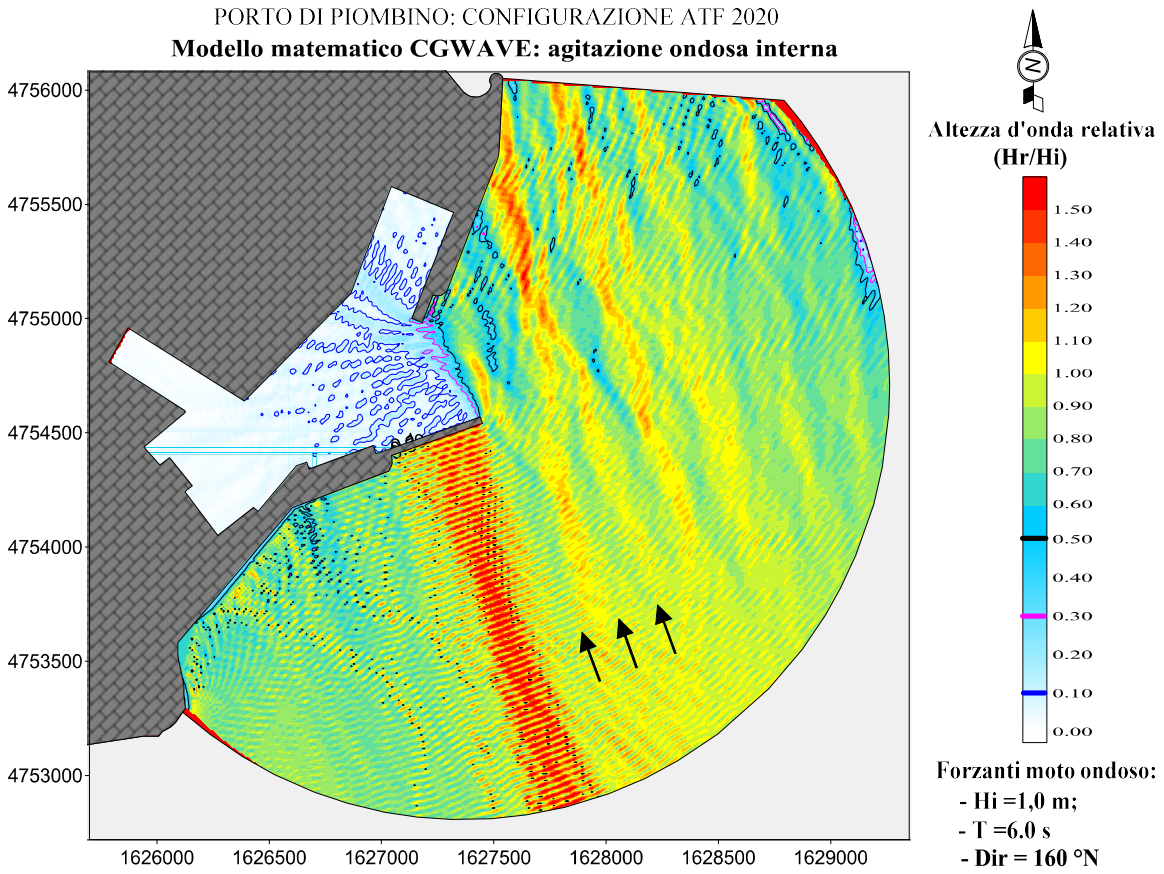


Figura 3.7 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=160°N;H =1 m; T=6 s).

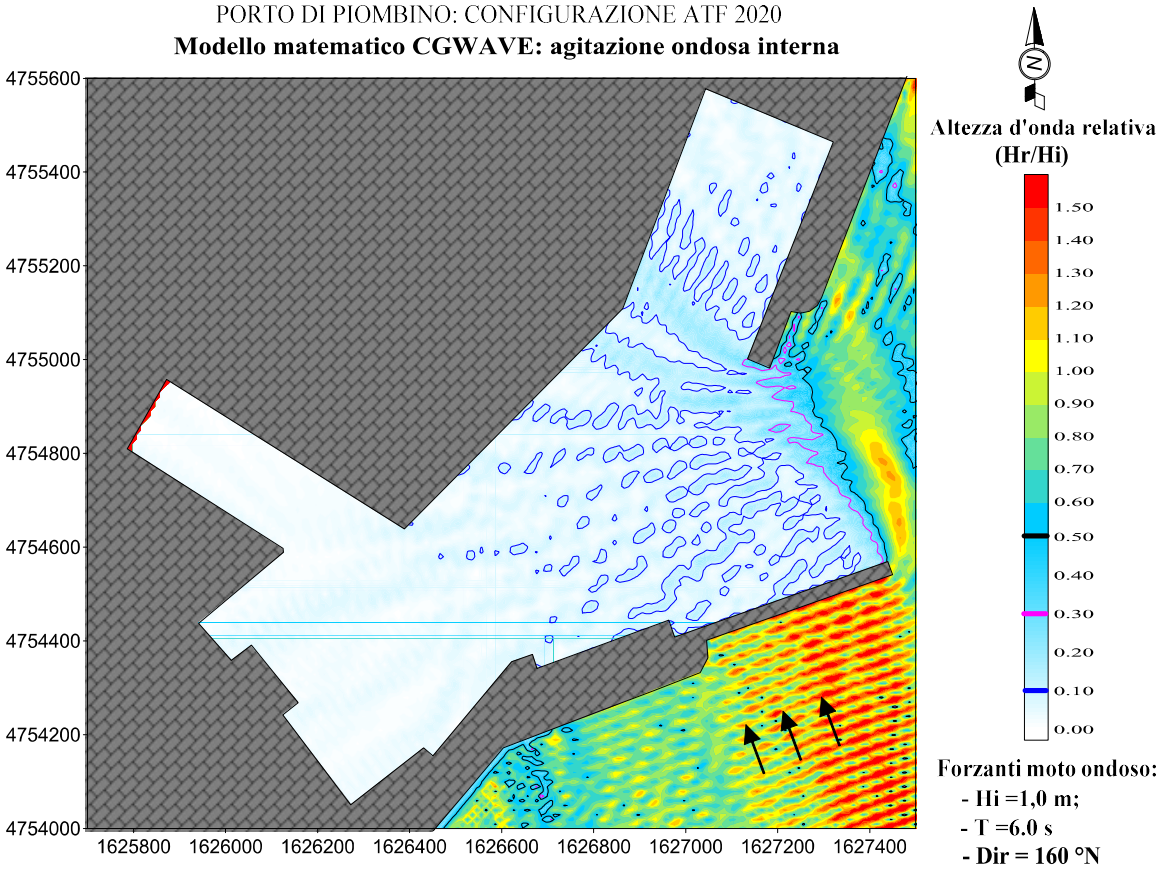


Figura 3.8 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con il modello CGWAVE (Dir=160°N;H=1 m; T=6s).

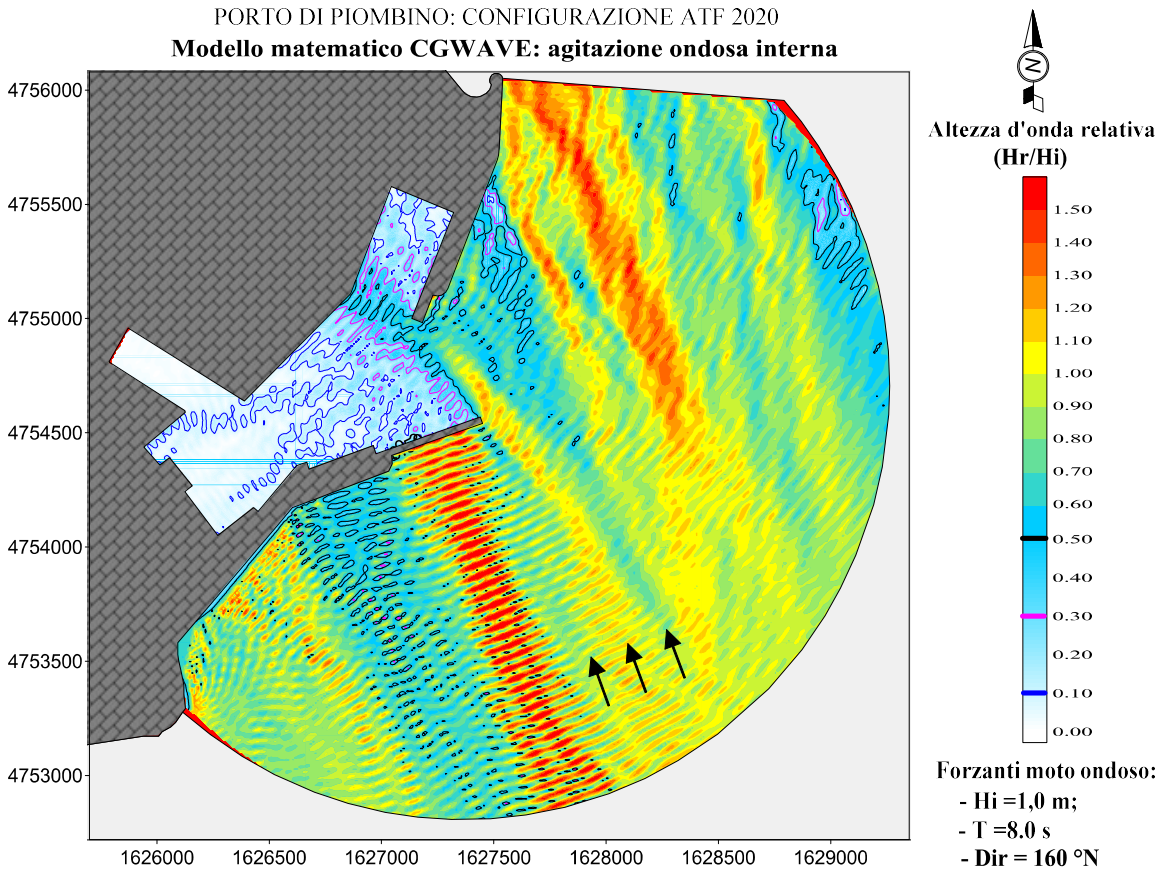


Figura 3.9 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=160°N;H =1 m; T=8 s).

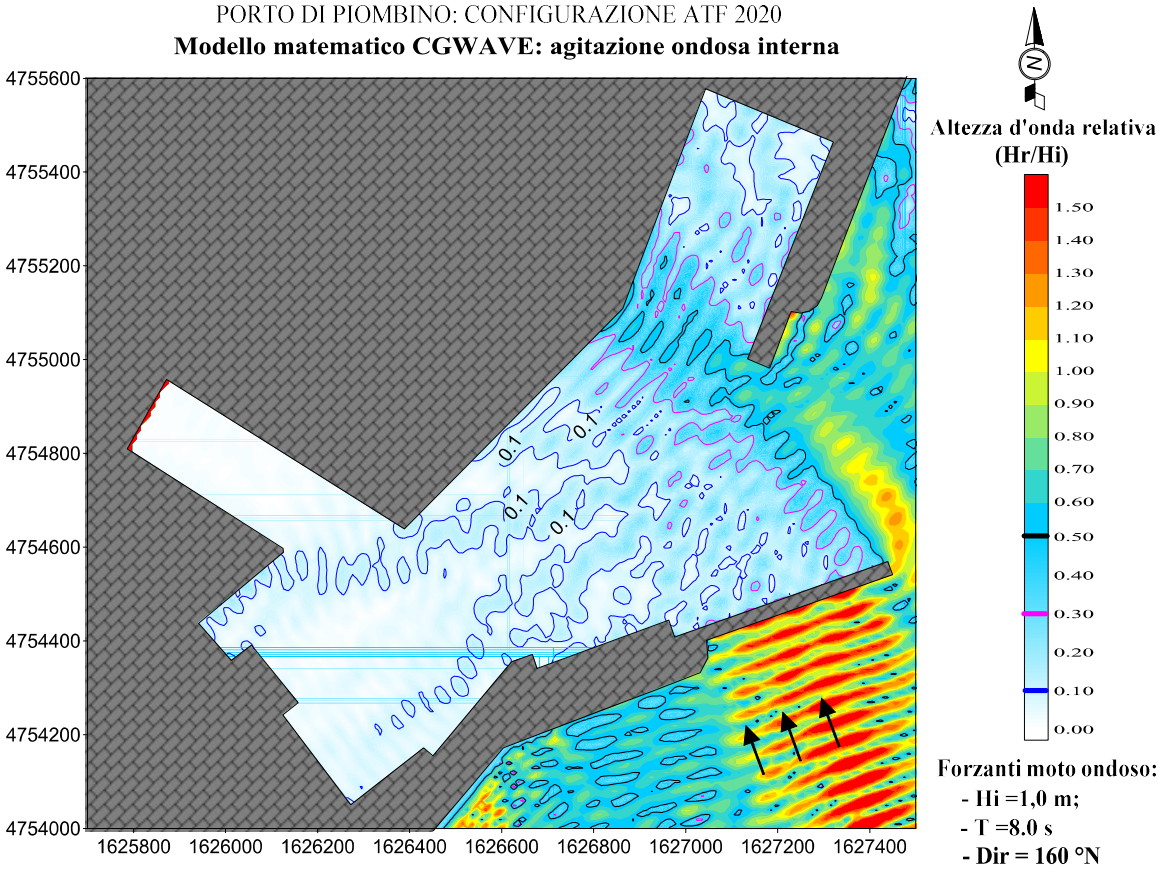


Figura 3.10 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con il modello CGWAVE (Dir=160°N;H=1 m; T=8s).

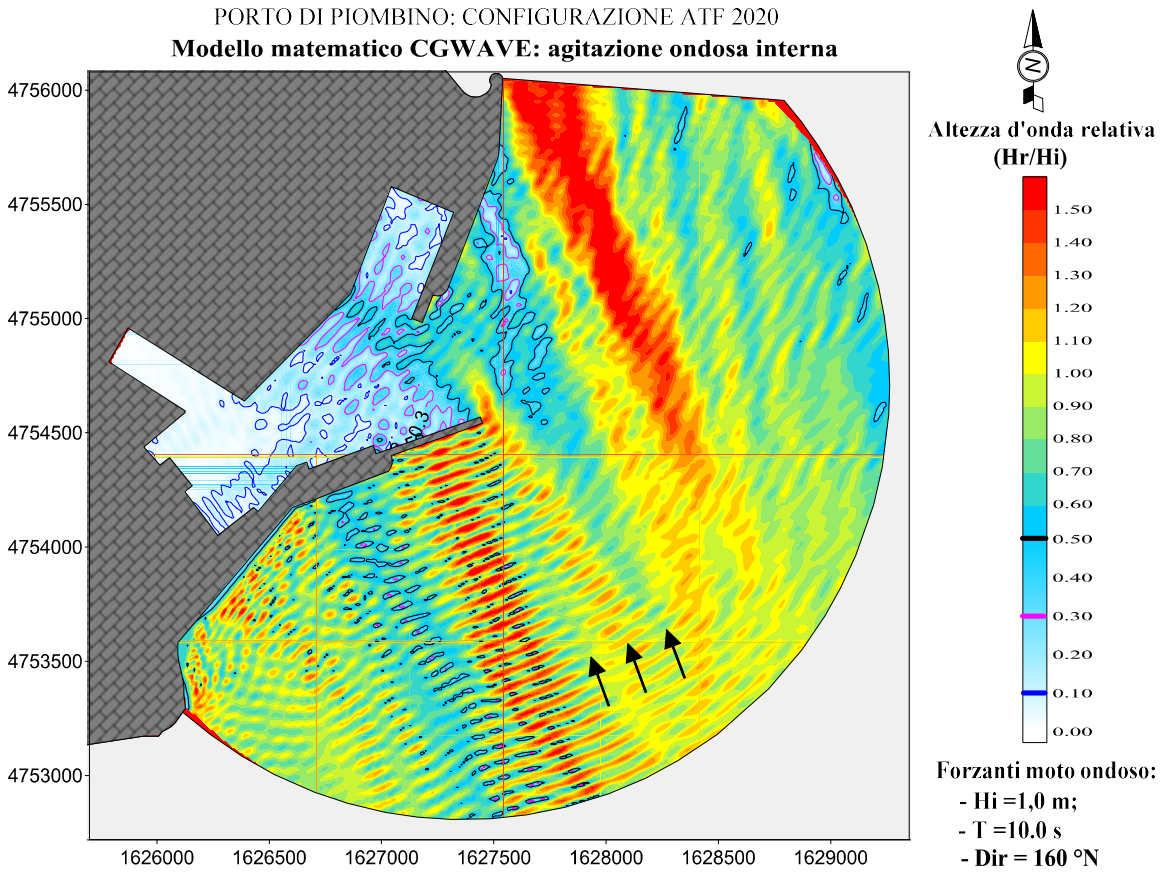


Figura 3.11 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=160°N;H =1 m; T=10s).

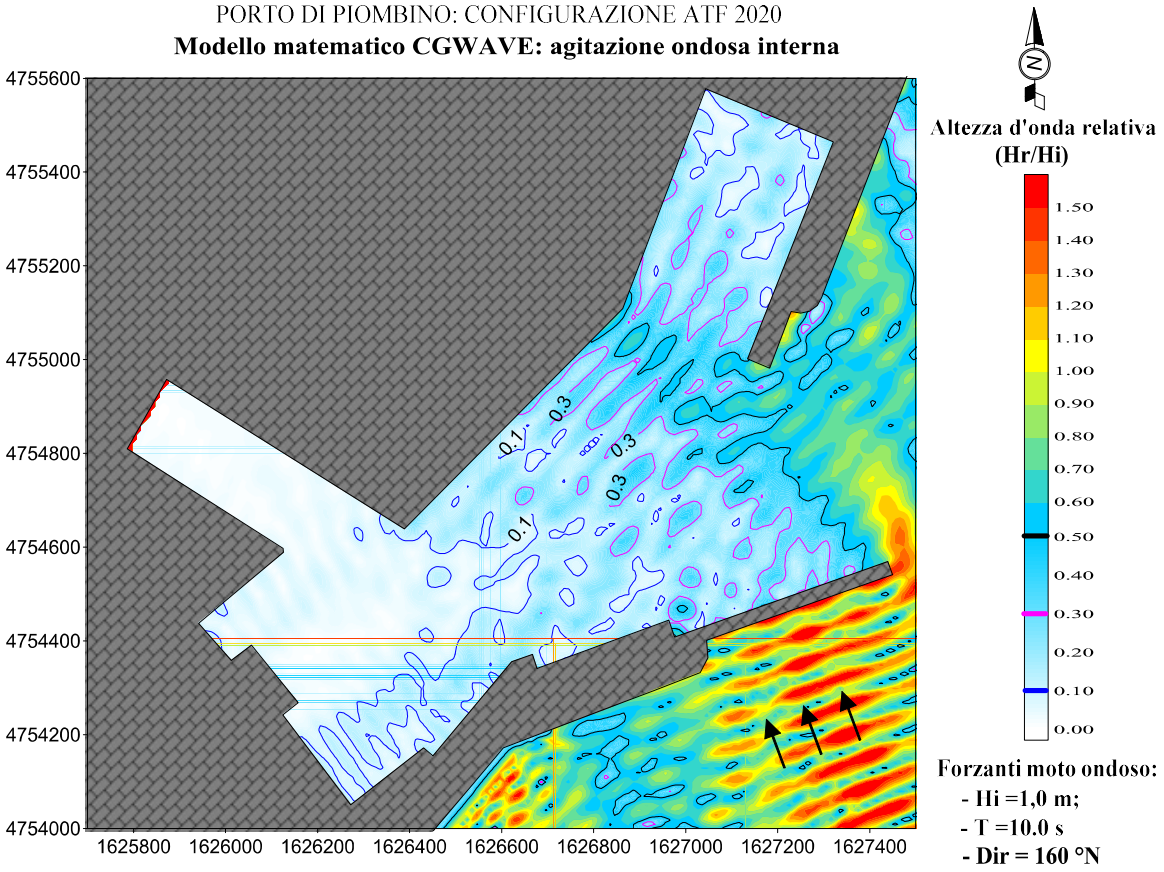


Figura 3.12 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con CGWAVE (Dir=160°N;H=1m; T=10s).

3.2 Analisi dei risultati

I risultati delle elaborazioni, riportati graficamente dalla Figura 3.1 alla Figura 3.12, indicano la distribuzione planimetrica dei coefficienti di agitazione (moltiplicatori dell'altezza d'onda incidente) con una scala di intensità cromatica avente una risoluzione di 0.1. Per chiarezza sono evidenziate solo le curve di iso-altezza d'onda di 0.1, 0.3 e 0.5. Avendo imposto altezza d'onda unitaria, i risultati sono stati rappresentati utilizzando il coefficiente di diffrazione k (altezza d'onda relativa) che esprime il rapporto tra l'altezza d'onda calcolata nel punto e l'altezza d'onda incidente. Per ottenere il valore dell'altezza d'onda in un punto è sufficiente moltiplicare il coefficiente di diffrazione per l'effettiva altezza dell'onda incidente all'imboccatura esterna.

I valori ottenuti dall'applicazione del modello numerico CGWAVE sono stati elaborati con il programma di interpolazione "SURFER" che restituisce i dati come curve di uguale intensità dell'agitazione ondosa e/o scale cromatiche differenziate.

L'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni evidenzia l'irradiazione al largo del campo d'onda riflesso e l'attenuazione di energia nella propagazione all'interno delle aree portuali.

Infatti, nella configurazione portuale presa in esame, il moto ondoso incidente viene progressivamente attenuato dalla diffrazione operata dall'imboccatura delimitata dalle opere esterne di difesa, dalle sostanziali variazioni della batimetria e dalla dissipazione di energia causata dalle opere a parete verticale con celle antiriflettenti e a scogliera, che nel modello sono state riprodotte utilizzando opportuni coefficienti di riflessione (Figura 2.4).

Nel dettaglio in occasione delle mareggiate provenienti dalle direzioni 145°N e 160°N, rappresentative degli eventi provenienti dal settore di traversia principale, a cui sono associati i valori maggiori dell'altezza d'onda significativa incidente (Figura 3.1÷Figura 3.12), l'altezza d'onda relativa risulta quasi ovunque inferiore a 0.3. Infatti, solo in corrispondenza della zona avamportuale e nel tratto di raccordo tra la banchina Ovest della darsena Nord e la banchina Avamporto, prospiciente l'imboccatura portuale, si riscontrano valori dell'altezza d'onda relativa compresi tra 0.3 e 0.5.

Peraltro occorre osservare che le mareggiate provenienti dalla direzione 145°N, corrispondente al limite del settore di traversia principale (v. Figura 2.1) , anche in condizioni estreme sono associate altezze d'onda significativa compresa tra 1.00 m e 1.50 m (v Tabella 2.1). Pertanto anche in occasione di tali eventi le condizioni di agitazione residua massima che si verificano in corrispondenza nel tratto di raccordo tra la banchina Ovest della darsena Nord e la banchina Avamporto, prospiciente l'imboccatura portuale, non limitano la loro operatività.

Relativamente alle mareggiate più frequenti ed intense provenienti da 160°N in occasione di eventi ordinari (T = 6 s), che si verificano qualche volta nel corso dell'anno, la protezione fornita dalle opere di difesa garantisce valori della agitazione residua che non condiziona l'operatività portuale. Solo in occasione delle mareggiate più rare e gravose associate a tempeste con tempo di ritorno decennale e cinquantennale (T = 8.0 – 10.0 s) e solo in corrispondenza del tratto di raccordo tra la banchina Ovest della darsena Nord e la banchina Avamporto si registrano valori dell'altezza d'onda residua che non pregiudicano la sicurezza delle navi ormeggiate ma potrebbero richiedere l'interruzione delle operazioni di carico-scarico, operazioni che in occasione di tali eventi andrebbero comunque interrotte a causa del vento.

4 MOTI ONDOSI PROVENIENTI DAL SETTORE DI TRAVERSIA SECONDARIA

4.1 Risultati delle simulazioni

Dalla Figura 4.1 alla Figura 4.12, per la nuova configurazione portuale definita dall'ATF2020 del Piano Regolatore Portuale del porto di Piombino, è possibile verificare il campo d'onda conseguente ai diversi stati di mare scelti per il settore di traversia secondaria per le simulazioni e rappresentativi sia delle condizioni di operatività ordinaria, e perciò 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 cinquantennale (T = 8.0 s).

Tutte le simulazioni sono state effettuate in forma parametrica imponendo, come condizione di input nel modello matematico CGWAVE, un valore unitario dell'altezza d'onda incidente.

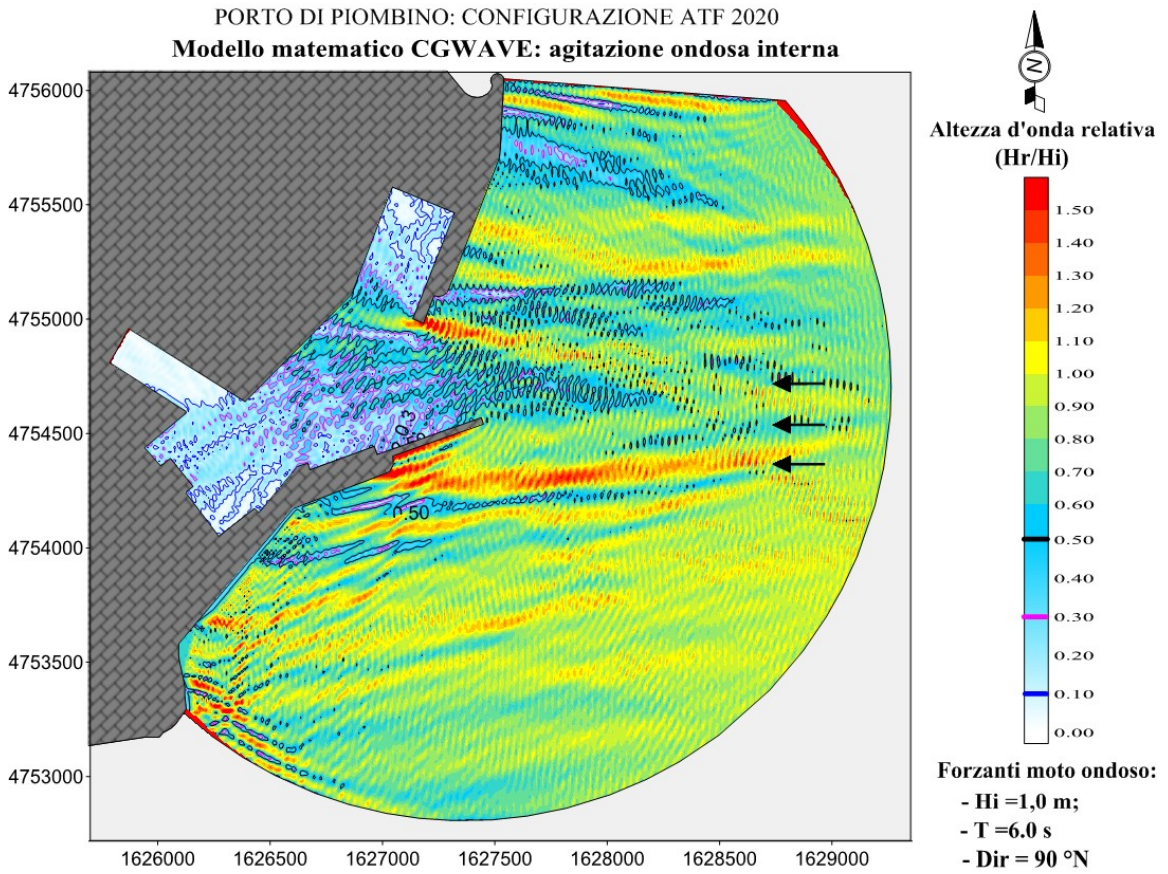


Figura 4.1 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=90°N;H =1 m; T=6 s).

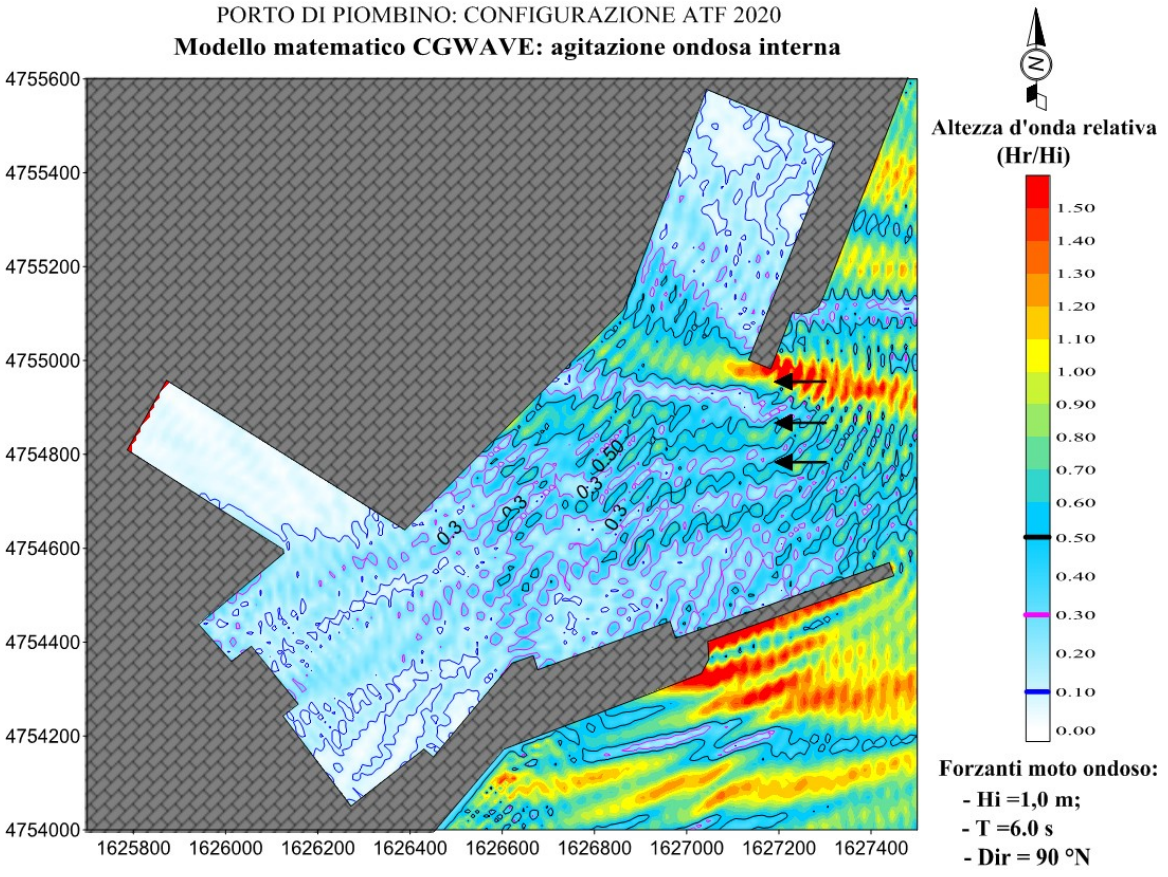


Figura 4.2 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con il modello CGWAVE (Dir=90°N;H =1 m; T=6 s).

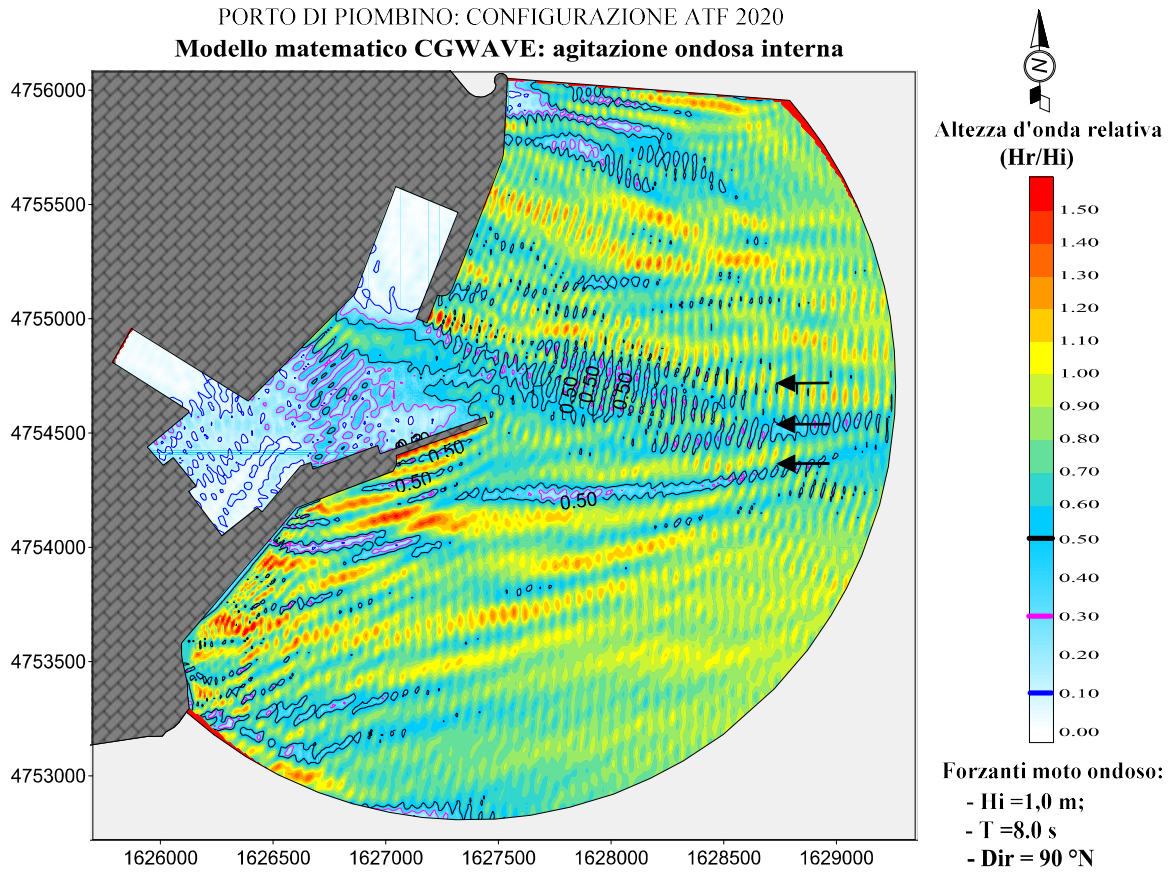


Figura 4.3 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=90°N;H =1 m; T=8 s).

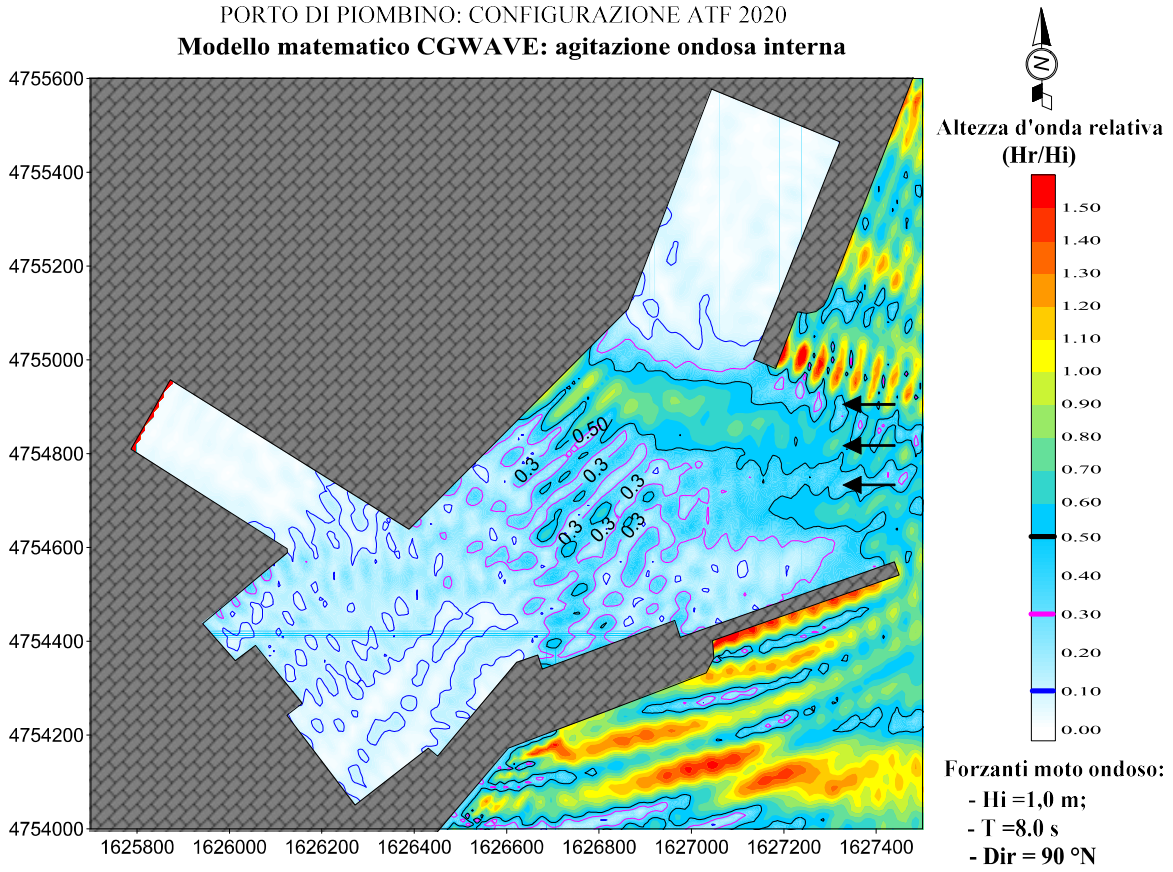


Figura 4.4 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con il modello CGWAVE (Dir=90°N;H =1 m; T=8 s).

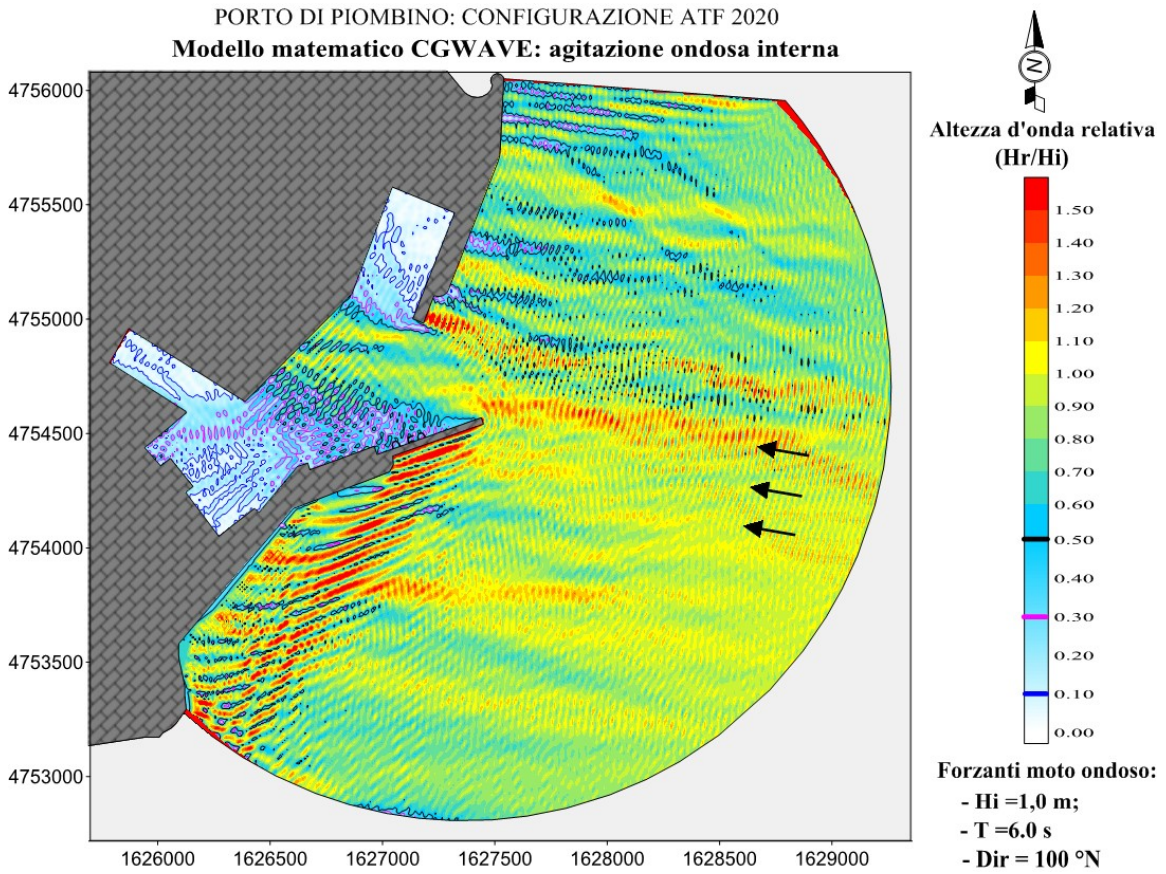


Figura 4.5 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=100°N;H =1 m; T=6 s).

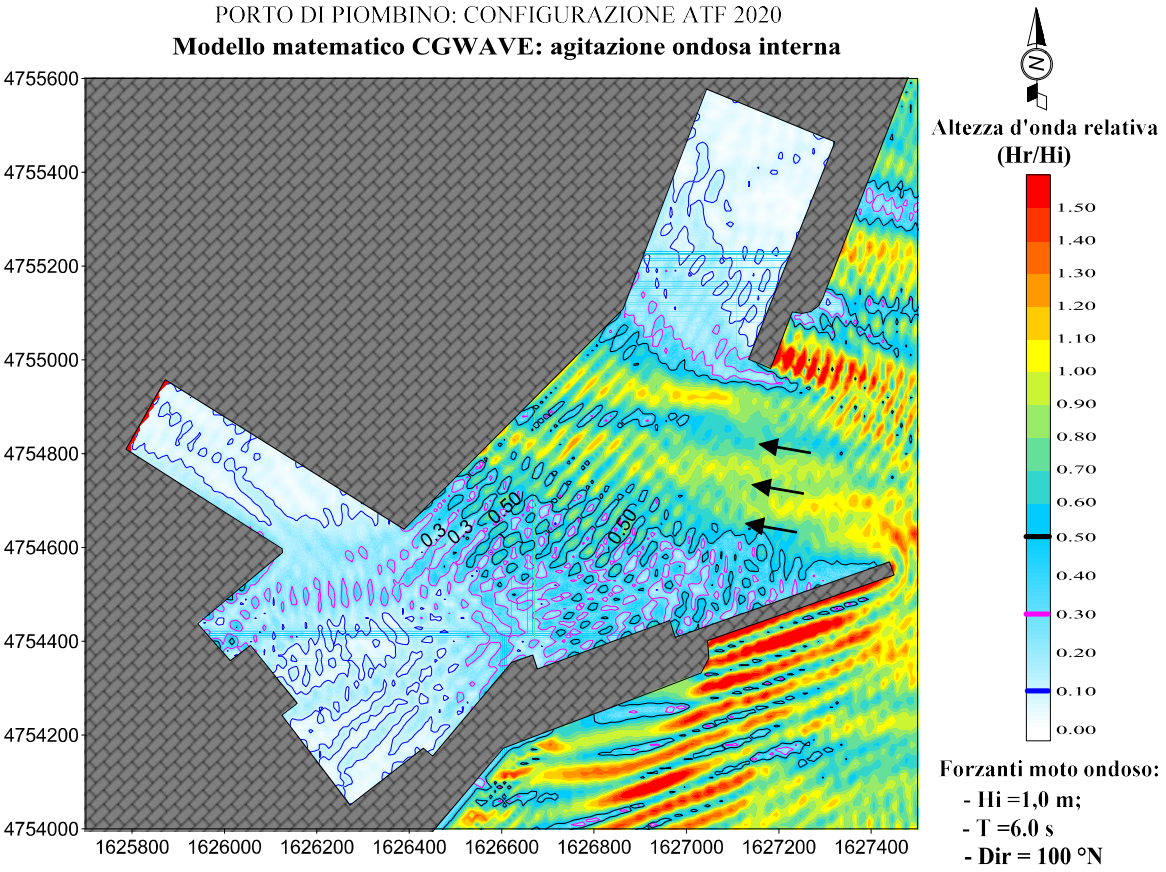


Figura 4.6 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con il modello CGWAVE (Dir=100°N;H =1 m; T=6 s).

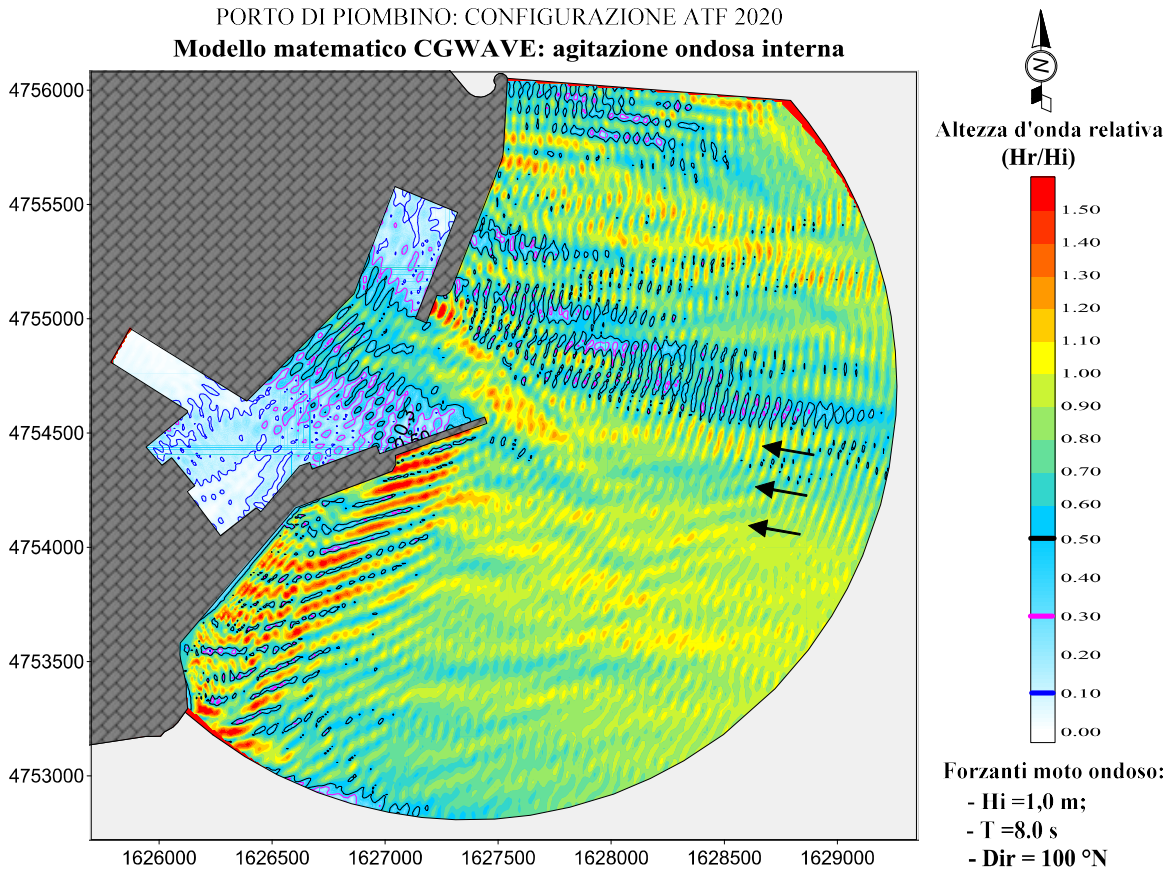


Figura 4.7 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=100°N;H =1 m; T=8 s).

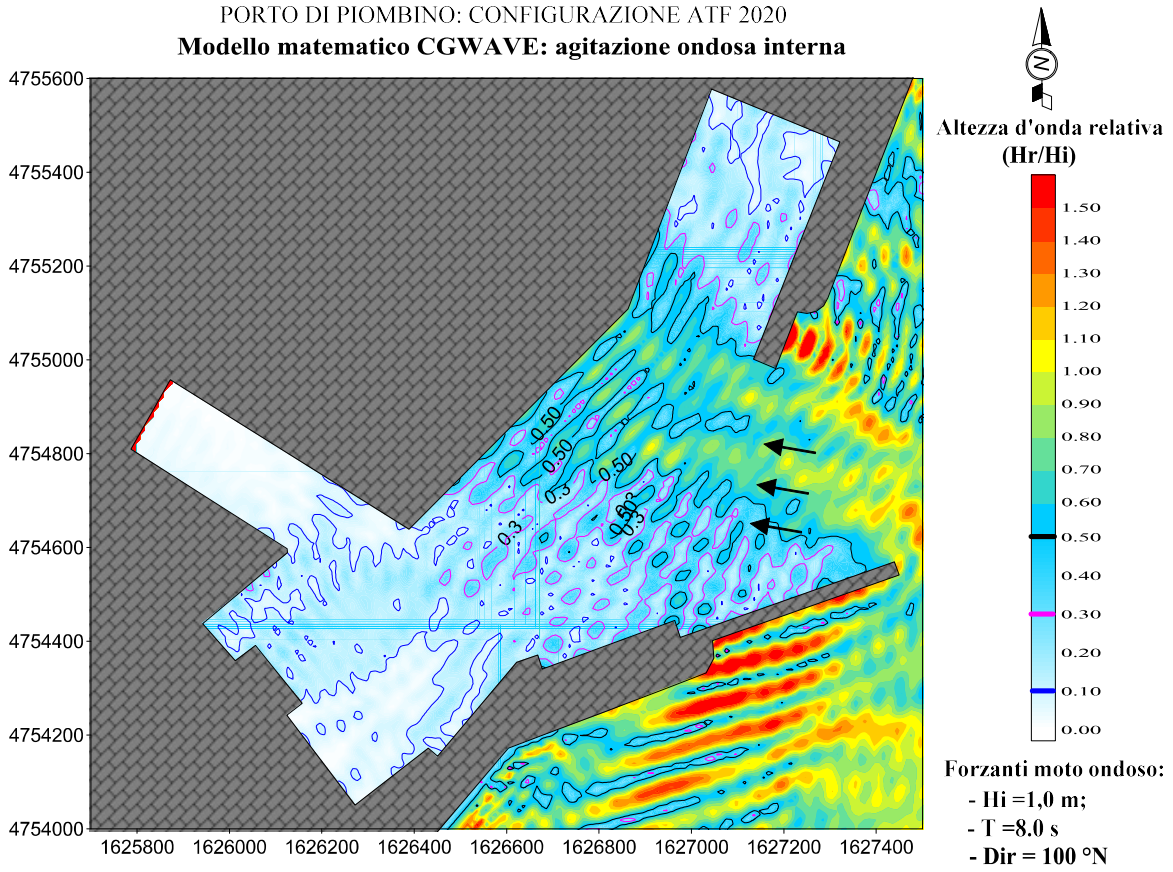


Figura 4.8 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con il modello CGWAVE (Dir=100°N;H=1 m; T=8s).

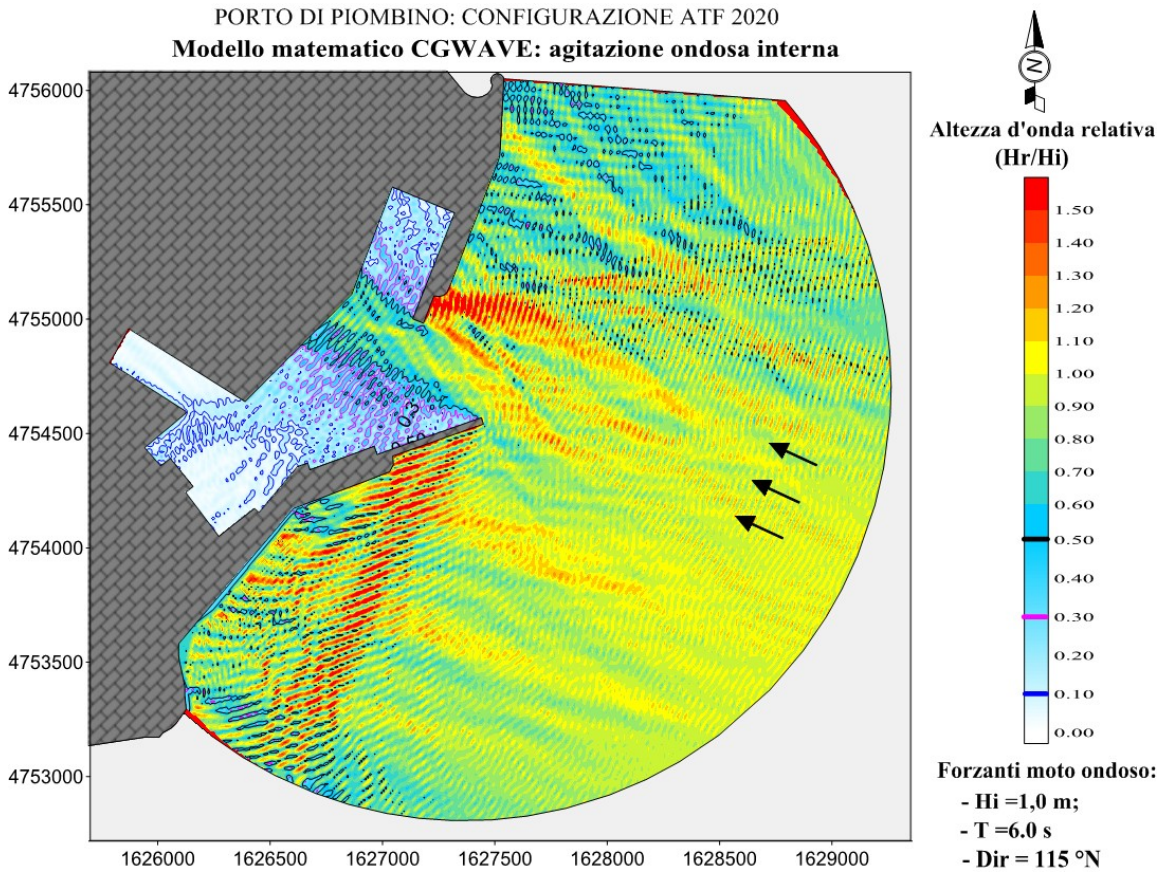


Figura 4.9 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=115°N;H =1 m; T=6 s).

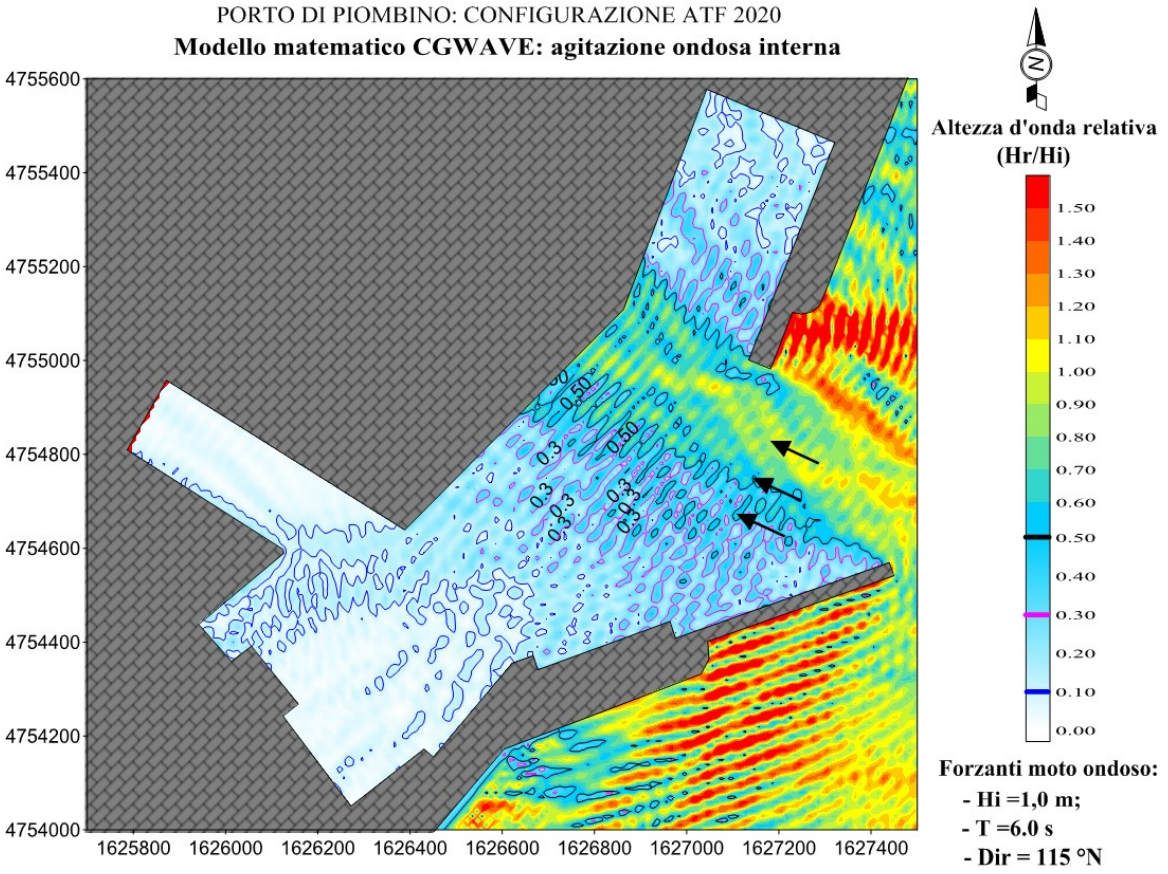


Figura 4.10 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con il modello CGWAVE (Dir=115°N;H=1 m; T=6s).

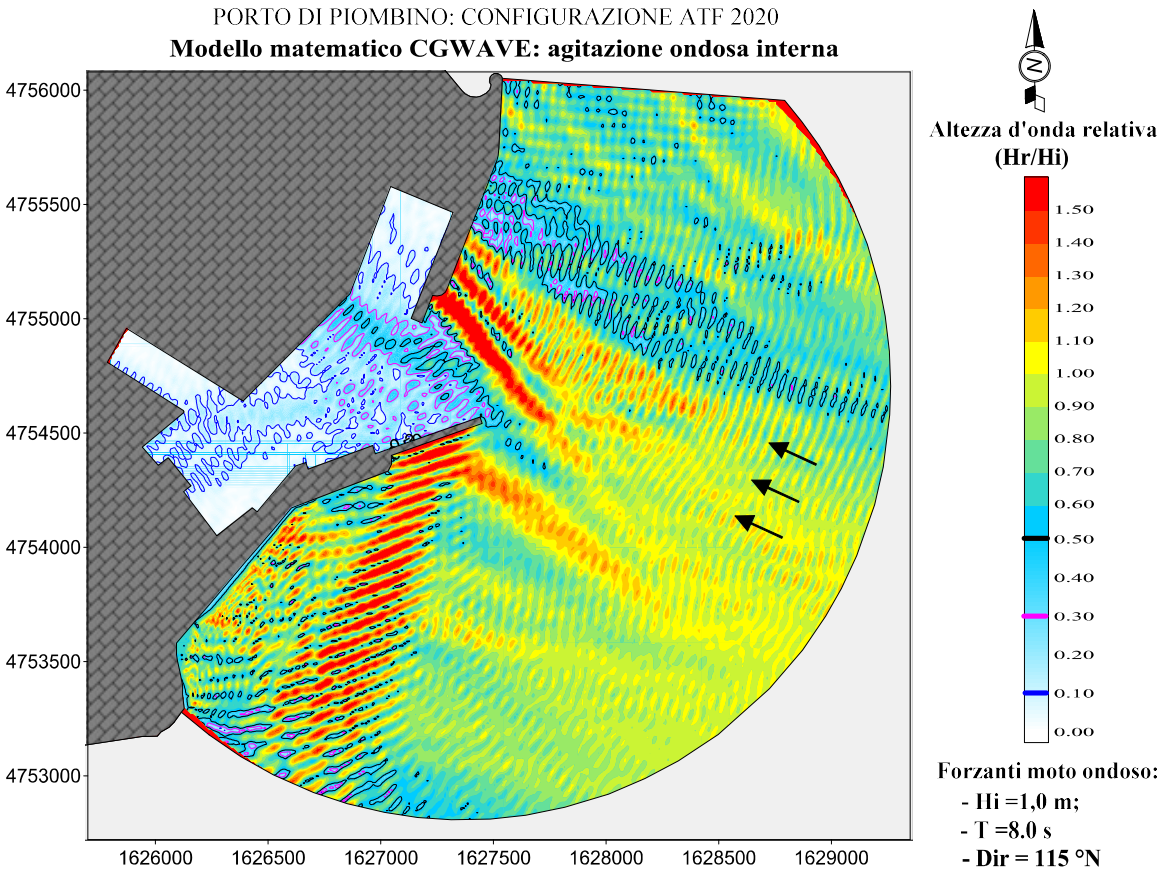


Figura 4.11 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=115°N;H =1 m; T=8 s).

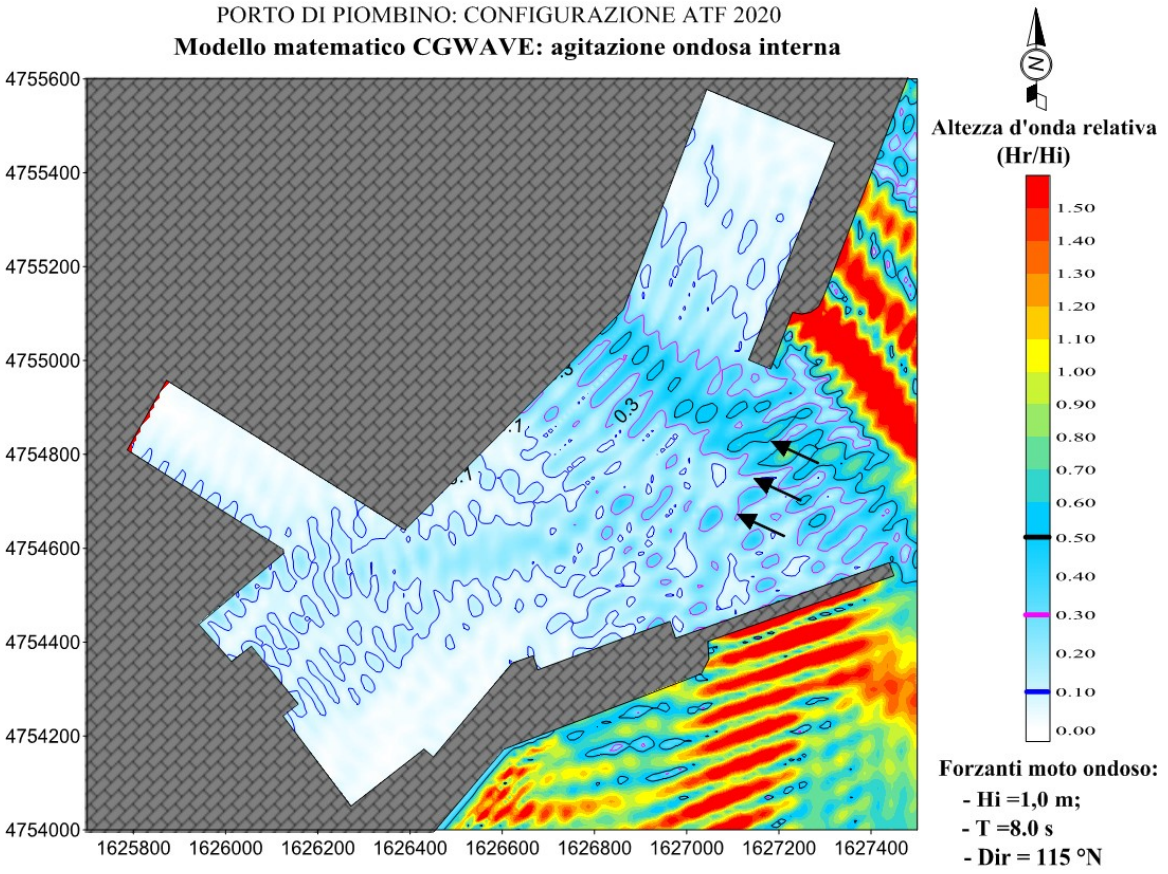


Figura 4.12 – Dettaglio agitazione ondosa simulata con il modello CGWAVE (Dir=115°N;H=1 m; T=8s).

4.2 Analisi dei risultati

I risultati delle elaborazioni, riportati graficamente dalla Figura 4.1 alla Figura 4.12, indicano la distribuzione planimetrica dei coefficienti di agitazione (moltiplicatori dell'altezza d'onda incidente) con una scala di intensità cromatica avente una risoluzione di 0.1. Per chiarezza sono evidenziate solo le curve di iso-altezza d'onda di 0.1, 0.3 e 0.5. Avendo imposto altezza d'onda unitaria, i risultati sono stati rappresentati utilizzando il coefficiente di diffrazione k (altezza d'onda relativa) che esprime il rapporto tra l'altezza d'onda calcolata nel punto e l'altezza d'onda incidente. Per ottenere il valore dell'altezza d'onda in un punto è sufficiente moltiplicare il coefficiente di diffrazione per l'effettiva altezza dell'onda incidente all'imboccatura esterna.

I valori ottenuti dall'applicazione del modello numerico CGWAVE sono stati elaborati con il programma di interpolazione "SURFER" che restituisce i dati come curve di uguale intensità dell'agitazione ondosa e/o scale cromatiche differenziate.

L'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni evidenzia l'irradiazione al largo del campo d'onda riflesso e l'attenuazione di energia nella propagazione all'interno delle aree portuali.

Anche per i moti ondosi provenienti dal settore di traversia principale, nella configurazione portuale presa in esame, il moto ondoso incidente viene progressivamente attenuato dalla diffrazione operata dall'imboccatura delimitata dalle opere esterne di difesa, dalle sostanziali variazioni della batimetria e dalla dissipazione di energia causata dalle opere a parete verticale con celle antiriflettenti e a scogliera, che nel modello sono state riprodotte utilizzando opportuni coefficienti di riflessione (Figura 2.4).

Nel dettaglio per i moti ondosi provenienti dal settore di traversia secondario si registrano livelli di agitazione più intensi all'interno dei bacini portuali rispetto agli eventi provenienti dal settore di traversia principale.

Peraltro occorre osservare che in questo caso gli eventi di moto ondoso provenienti da Levante presentano un'intensità (Hs < 1.00 m) ed una frequenza di accadimento complessiva ben inferiore rispetto a quelli provenienti dal settore di traversia principale e quindi i livelli di agitazione ottenuti non producono alcuna limitazione alla operatività delle banchine interne del porto di Piombino.

Anche per queste mareggiate l'agitazione ondosa rimane comunque limitata in corrispondenza della zona avamportuale ed interessa sostanzialmente la sola banchina Avamporto prospiciente l'imboccatura portuale senza condizionarne l'operatività.

5 CONCLUSIONI

L'applicazione del modello numerico CGWAVE, 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, ha consentito la valutazione oggettiva della funzionalità ed efficacia delle opere previste dall'ATF 2020 del Piano Regolatore Portuale del porto di Piombino.

Esaminando in dettaglio i risultati ottenuti dalle diverse simulazioni (settore di traversia principale Figura 3.1÷Figura 3.12; settore di traversia secondario Figura 4.1÷Figura 4.12) si nota che il nuovo schema portuale, risultato come adeguamento tecnico della configurazione di Piano Regolatore Portuale, risulta interessato da contenuti fenomeni di ingressione del moto ondoso.

In particolare, sia in condizioni climatiche ordinarie che estreme, si ottengono, quasi ovunque, valori del coefficiente d'agitazione che garantiscono un adeguato livello di sicurezza alle imbarcazioni, sia in fase di stazionamento che durante le manovre per l'ingresso e l'uscita dal porto.

Limitatamente a due limitati tratti della banchina Ovest della darsena Nord e della banchina Avamporto, prospicienti l'imboccatura portuale, in occasione degli eventi più gravosi provenienti dal settore di traversia principale (160°N) associati a tempeste con tempo di ritorno decennale e cinquantennale (T = 8.0 – 10.0 s), si verificano valori della agitazione ondosa che potrebbero richiedere l'interruzione delle operazioni di carico e scarico delle navi ormeggiate che peraltro in occasione di tali eventi andrebbero comunque interrotte a causa del vento forte.

APPENDICE: DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO CGWAVE

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.

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:

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

dove:

$\hat{\eta}(x,y)$: funzione complessa dell'elevazione della superficie libera dalla quale può essere stimato il valore dell'altezza d'onda;

σ = frequenza angolare;

$C(x,y)$: celerità di fase (σ/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:

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

dove w è un fattore d'attrito e γ 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 χ è una costante assunta nel modello pari a 0.15 e Γ è una costante empirica assunta nel modello pari a 0.4.

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:

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

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

Per semplicità α 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:

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

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:

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

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):

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

dove

$$p = \frac{k^2r^2 + k_0^2r^2 + ik_0r + \frac{1}{4}}{2ik_0r^2} \text{ e } q = \frac{1}{2ik_0r^2}.$$

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".