



COMUNE DI CAGLIARI



**AUTORITA' PORTUALE
DI CAGLIARI**

ADEGUAMENTO TECNICO FUNZIONALE
DEL PIANO REGOLATORE PORTUALE

Elaborato:

R.2

Oggetto:

**STUDIO DELLA PENETRAZIONE
DEL MOTO ONDOSI**

AUTORITA' PORTUALE DI CAGLIARI

Dott. Ing. Sergio MURGIA

Dott. Ing. Alessandra MANNAI

CONSULENTI

Prof. Ing. Alberto NOLI

Dott. Ing. Marco TARTAGLINI

Data:

LUGLIO 2011

Scala:

Aggiornamento:



PORTO CANALE DI CAGLIARI AVAMPORTO EST

DISTRETTO DELLA CANTIERISTICA

ADEGUAMENTO TECNICO FUNZIONALE DEL PIANO REGOLATORE PORTUALE

STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSI

INDICE

1	PREMESSE, METODOLOGIA E RISULTATI	2
2	PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSI	3
2.1	<i>Configurazioni analizzate</i>	<i>3</i>
2.1	<i>Caratteristiche degli stati di mare simulati</i>	<i>4</i>
2.2	<i>Applicazione del sistema di modellazione SMS</i>	<i>5</i>
2.3	<i>Discretizzazione dello specchio liquido</i>	<i>6</i>
2.4	<i>Definizione delle condizioni al contorno</i>	<i>10</i>
2.5	<i>Risultati delle simulazioni</i>	<i>14</i>
3	ANALISI DEI RISULTATI	39
	Appendice: descrizione del modello matematico CGWAVE.....	41
3.1	<i>Introduzione.....</i>	<i>41</i>
3.2	<i>Equazioni di base</i>	<i>41</i>
3.3	<i>Condizioni al contorno</i>	<i>42</i>



1 PREMESSE, METODOLOGIA E RISULTATI

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio della penetrazione del moto ondoso all'interno dell'avamposto del porto canale di Cagliari eseguito a supporto dell'adeguamento tecnico funzionale del vigente Piano Regolatore Portuale che riguarda le opere a mare previste nell'avamposto est del porto canale.

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 gli eventi di moto ondoso più gravosi ai fini dell'agitazione ondosa residua, compatibilmente con le condizioni meteomarine raggiungibili nel paraggio in esame. In particolare sono state considerate due direzioni d'onda (130°N e 150°N) e due periodi (9 e 11 s) significativi per le condizioni meteo-marine raggiungibili nel paraggio in esame. Per i valori assunti si rimanda ai risultati ottenuti nello studio meteo-marino allegato al P.R.P..

Lo studio è stato condotto con l'obiettivo di fornire indicazioni oggettive sulla validità e funzionalità delle modifiche proposte alle opere previste nel vigente P.R.P. in relazione alle condizioni di sicurezza delle imbarcazioni che dovranno stazionare all'interno del bacino di servizio delle banchine del distretto della cantieristica, ovvero che si appresteranno ad effettuare le manovre d'ingresso e d'uscita dallo stesso bacino.

2 PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSONO

2.1 Configurazioni analizzate

Per lo studio della penetrazione del moto ondoso all'interno dell'avamposto del porto canale di Cagliari, ed in particolare della zona orientale dove è prevista la realizzazione delle opere a mare del distretto della cantieristica ed a servizio dei servizi ancillari del porto, sono state prese in considerazione la configurazione di P.R.P. (denominata nel seguito **configurazione 1**) e due configurazioni alternative (soluzioni 2 e 3) relative all'adeguamento tecnico funzionale proposto che contemplano i seguenti interventi:

- **configurazione 2:** prolungamento di circa 70 m del molo sud radicato al molo guardiano di levante, che oltre ad ospitare i servizi ancillari costituisce l'opera di difesa principale della darsena operativa del Distretto della cantieristica, e modifica della sua configurazione planimetrica così da realizzare un piazzale di circa 6 ha all'interno del quale potranno essere agevolmente collocate le infrastrutture terrestri dei servizi di supporto necessarie per garantire la sicurezza del sistema portuale (c.d. Servizi Ancillari: ormeggiatori, piloti, rimorchiatori etc.).
- **configurazione 3:** modifica della configurazione planimetrica del molo sud senza modificare la lunghezza prevista nel vigente P.R.P. e introduzione di un molo di sottoflutto a scogliera ad andamento curvilineo radicato al terrapieno dove è prevista la realizzazione del parco di S. Efisio, disposto in modo da riprodurre, insieme al molo Sud, uno schema di difesa tipico dei porti a bacino e da realizzare una imboccatura di larghezza minima riferita al livello medio marino pari a 80 m.

Nelle figure 2.1, 2.2 e 2.3 sono illustrate le tre configurazioni analizzate.

2.1 Caratteristiche degli stati di mare simulati

Per la determinazione dei livelli di agitazione ondosa residua che si verificano all'interno del nuovo Avamposto Est del porto canale di Cagliari sono stati esaminati gli scenari che prevedono le seguenti forzanti di moto ondoso che sono stati estratti dallo studio meteo marino redatto dal Prof. Atzeni allegato al nuovo PRP dei porti di Cagliari.

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

Direzione	Forzanti di moto ondoso
135° N	H=2.7m, T=9s – H=2.9m, T=11s
150° N	H=2.7m, T=9s – H=3.0m, T=11s

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.

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 del nuovo bacino portuale preso in esame secondo tre differenti configurazioni planimetriche.

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.



2.2 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. 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 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 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 le configurazioni prese in esame per il porto di Cagliari.

2.3 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 configurazioni portuali da simulare.

Per la batimetria dei fondali e gli schemi planimetrici da simulare (Figura 2.1÷Figura 2.3), si è fatto riferimento alle carte nautiche editate dall'Istituto Idrografico della Marina Militare ("CN. 45 – Da Capo Carbonara a Capo Spartivento – Scala 1:100.000" e "CN. 311 – Porto di Cagliari – Scala 1:10.000"), ai rilievi batimetrici di dettaglio effettuati di recente nella zona ove dovranno sorgere le nuove opere ed alle configurazioni planimetriche del nuovo Avamporto Est secondo le proposte di Adeguamento Tecnico Funzionale.

Nel dettaglio, il campo fluido è stato schematizzato nei modi seguenti.

1. Configurazione 1: griglia di calcolo costituita da 131356 elementi, 66620 nodi di calcolo, profondità minima e massima pari rispettivamente a 1.5 m e circa 23 m rispetto al medio mare (Figura 2.4);
2. Configurazione 2: griglia di calcolo costituita da 130558 elementi, 66222 nodi di calcolo, profondità minima e massima pari rispettivamente a 1.5 m e circa 23 m rispetto al medio mare (Figura 2.5);
3. Configurazione 3: griglia di calcolo costituita da 130254 elementi, 66088 nodi di calcolo, profondità minima e massima pari rispettivamente a 1.5 m e circa 23 m rispetto al medio mare (Figura 2.6);

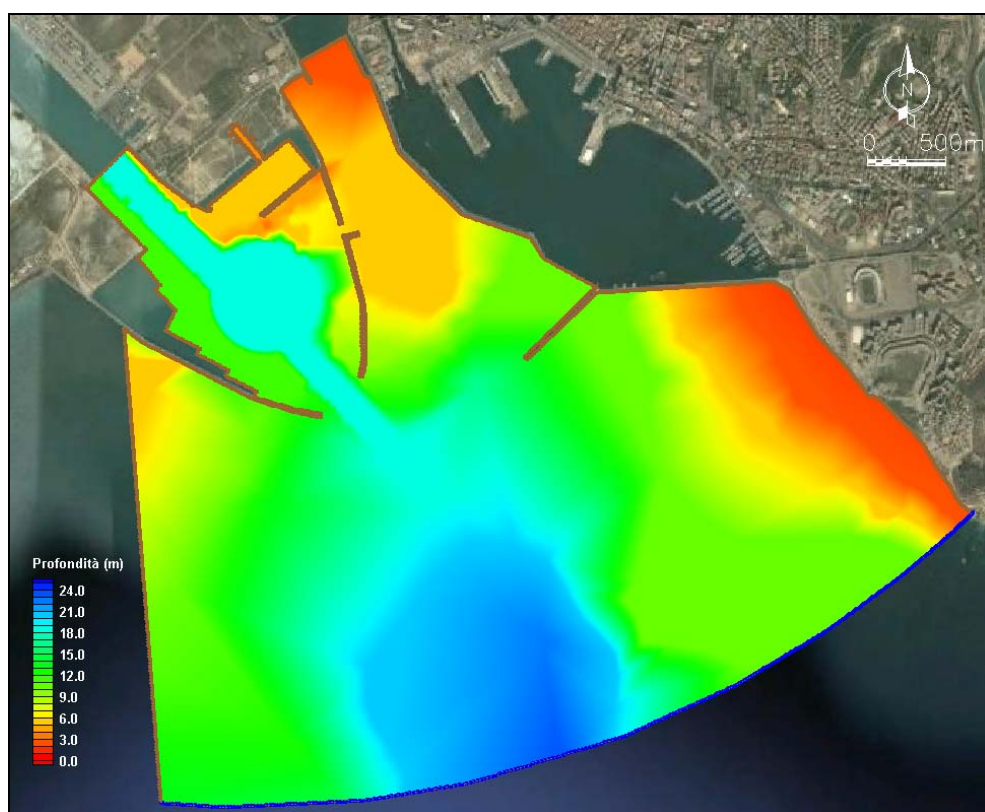


Figura 2.1 – Configurazione 1: batimetria di riferimento.

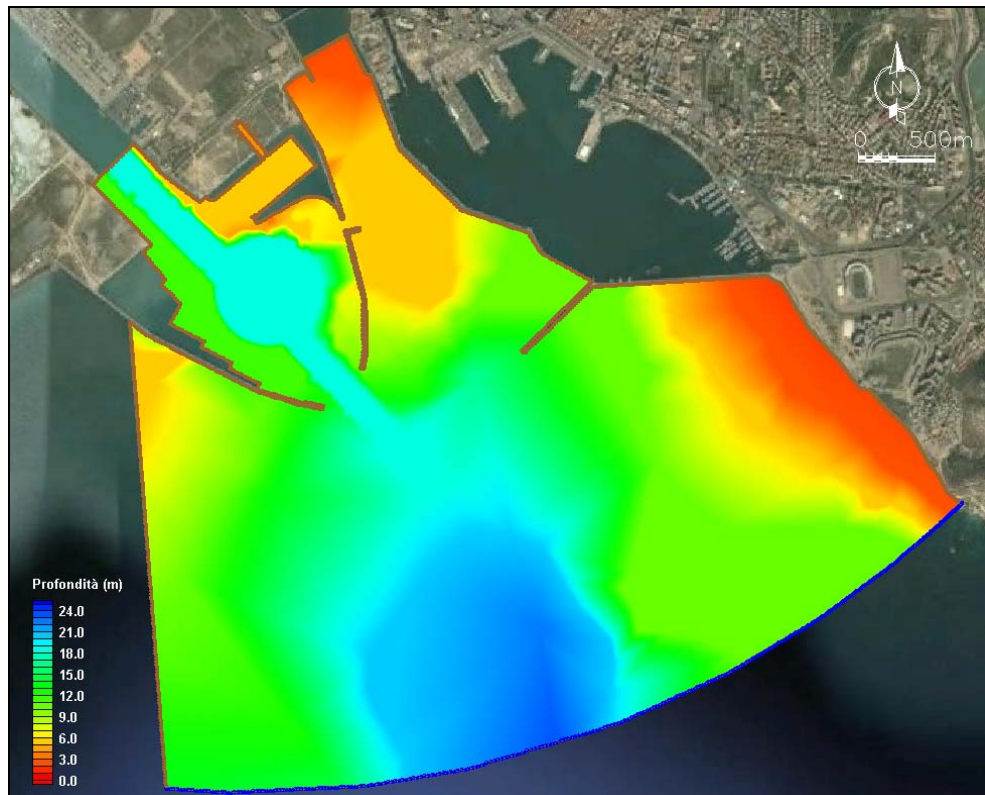


Figura 2.2 – Configurazione 2: batimetria di riferimento.

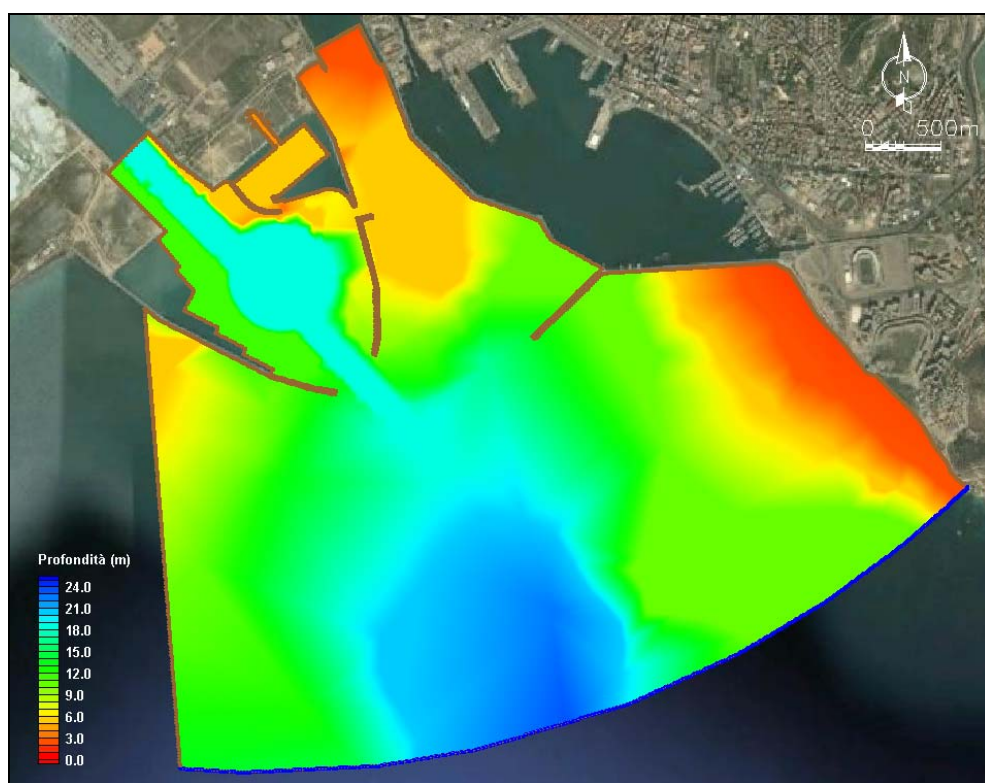


Figura 2.3 – Configurazione 3: batimetria di riferimento.



Figura 2.4 – Configurazione 1: discretizzazione dello specchio liquido.



Figura 2.5 – Configurazione 2: discretizzazione dello specchio liquido



Figura 2.6 – Configurazione 3: discretizzazione dello specchio liquido.

2.4 Definizione delle condizioni al contorno

Per le configurazioni di progetto previste per il nuovo Avamposto Est del porto canale di Cagliari, al fine di poter determinare i livelli di agitazione ondosa residua all'interno del bacino operativo del distretto della cantieristica, 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 dalla Figura 2.7 alla Figura 2.9, 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 | $R = 0.90$; |
| - Tratti rocciosi naturali ed opere a scogliera | $R = 0.35$; |
| - Spiagge assorbenti | $R = 0.15$; |
| - Pontili su pali o galleggianti (completamente permeabili) | $R = 0.00$. |

Inoltre, i domini di calcolo sono stati limitati da una linea semicircolare che rappresenta le condizioni in mare aperto, sufficientemente distante dall'area oggetto di studio, lungo la quale sono state imposte le forzanti di moto ondoso prese come riferimento (Tabella 2.1). 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 0.15 ed un coefficiente di attrito sul fondo pari a 0.12.



Figura 2.7 – Configurazione 1: indicazione dei coefficienti di riflessione adottati per le simulazioni effettuate con il modello CGWAVE.



Figura 2.8 – Configurazione 2: indicazione dei coefficienti di riflessione adottati per le simulazioni effettuate con il modello CGWAVE.



Figura 2.9 – Configurazione 3: indicazione dei coefficienti di riflessione adottati per le simulazioni effettuate con il modello CGWAVE.



2.5 Risultati delle simulazioni

Completata la fase di discretizzazione dei sistemi liquidi 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 dell'Avamporto Est del porto di Cagliari ed al bacino operativo del distretto della cantieristica, secondo tre diverse configurazioni, e successivamente di verificare per le stesse le condizioni di sicurezza necessarie alle imbarcazioni sia in fase di stazionamento che durante le manovre di ingresso ed uscita dal porto.

Dalla Figura 2.11 alla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, è possibile verificare il campo d'onda, all'interno dell'avamporto del porto canale di Cagliari e del bacino protetto del distretto della cantieristica previsto nell'Avamporto Est, conseguente a diversi stati di mare scelti per effettuare le simulazioni.

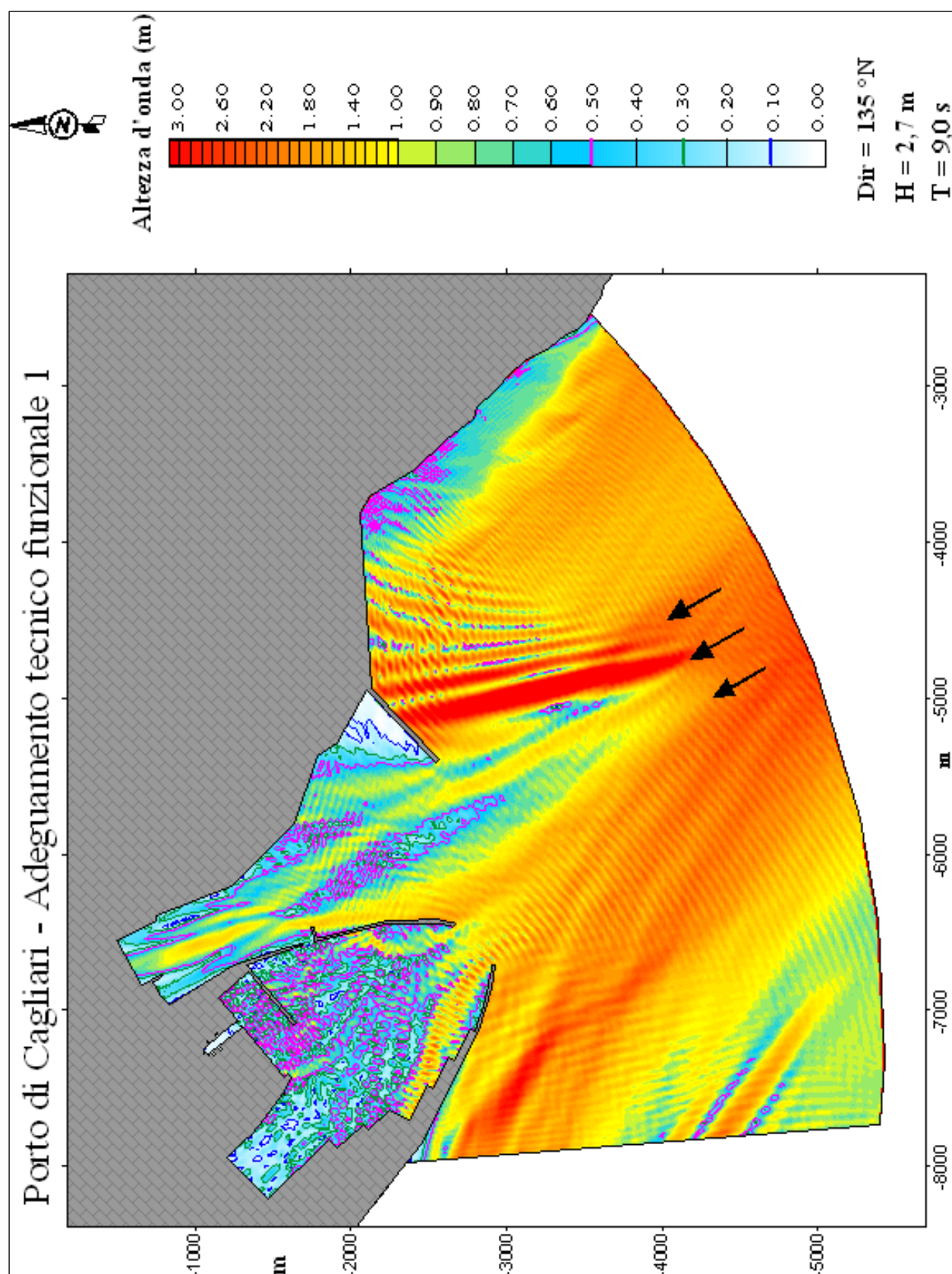


Figura 2.10 – Configurazione 1

Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H=2.7 m; T=9.0 s).

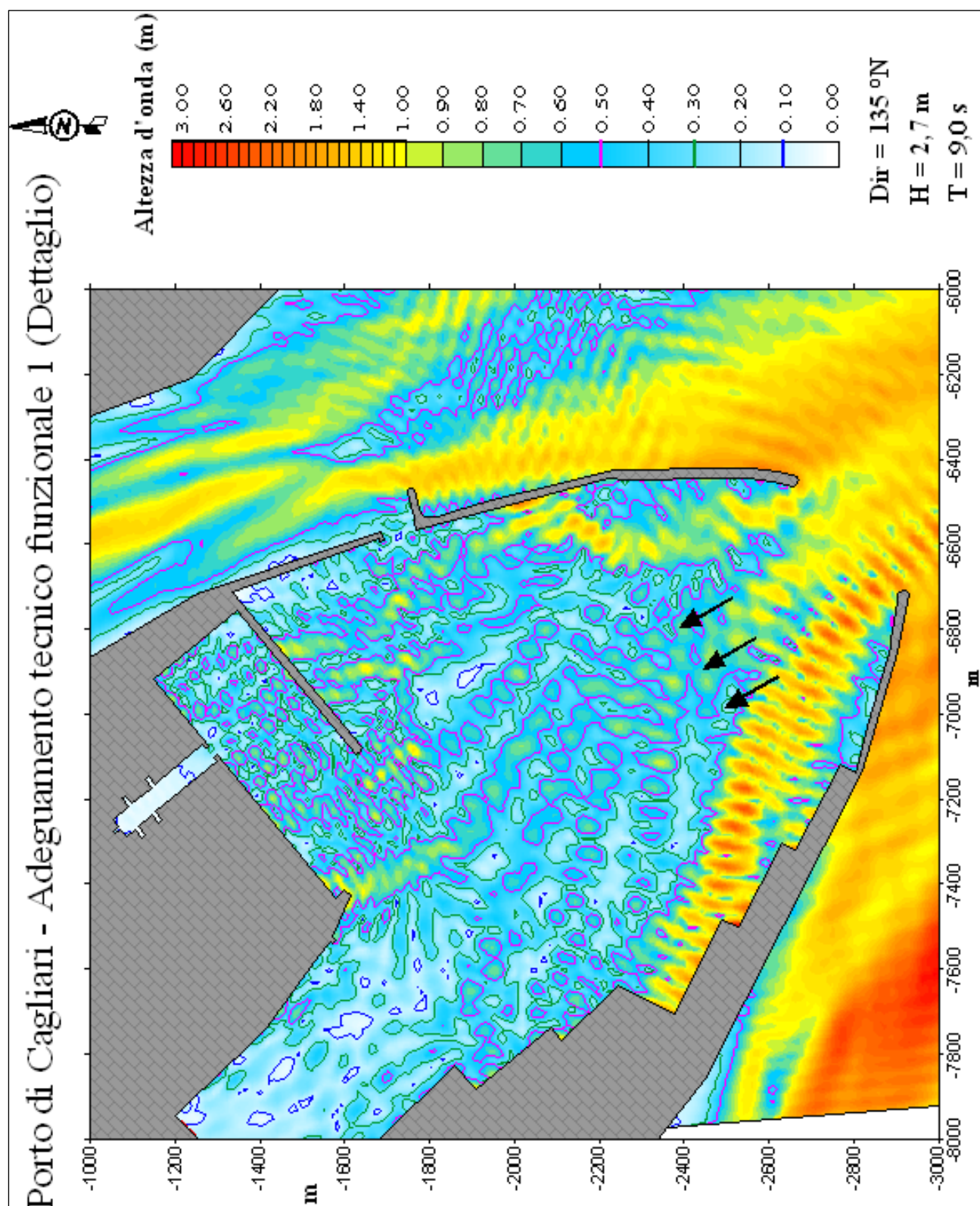


Figura 2.11 – Configurazione 1

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H=2.7 m; T=9.0 s).

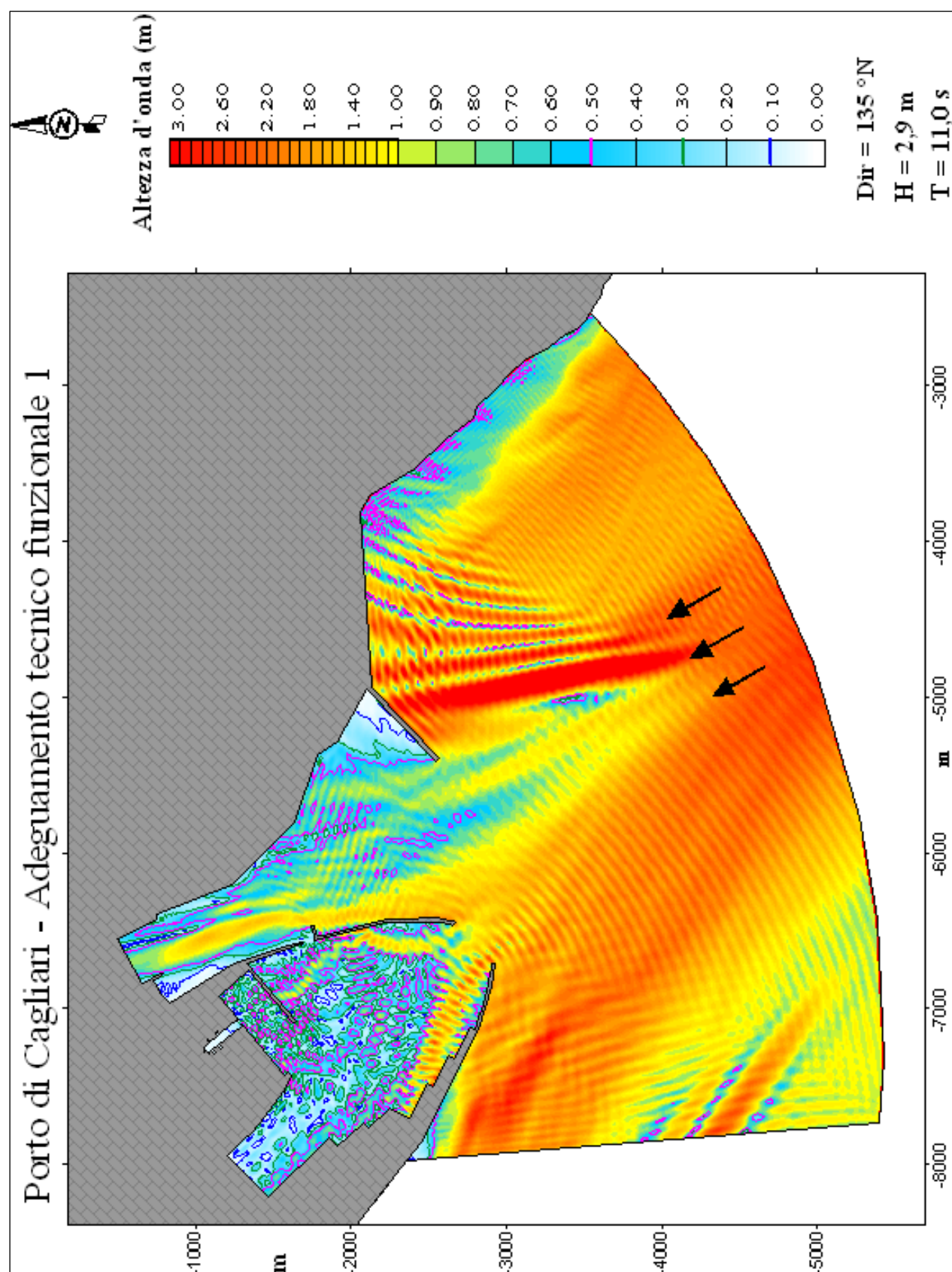


Figura 2.12 – Configurazione 1

Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H=2.9 m; T=11.0 s).

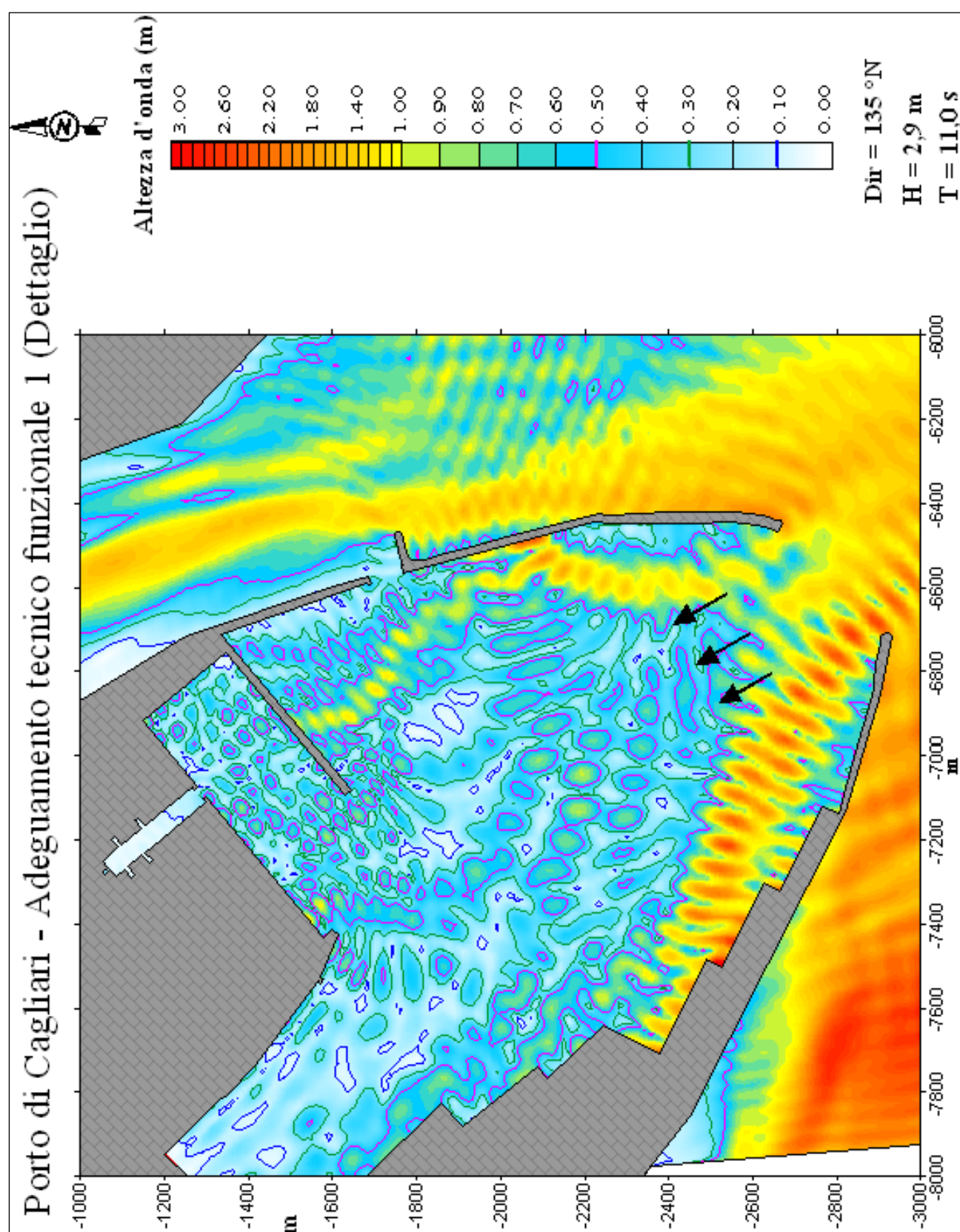


Figura 2.13 – Configurazione 1

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H=2.9 m; T=11.0 s).

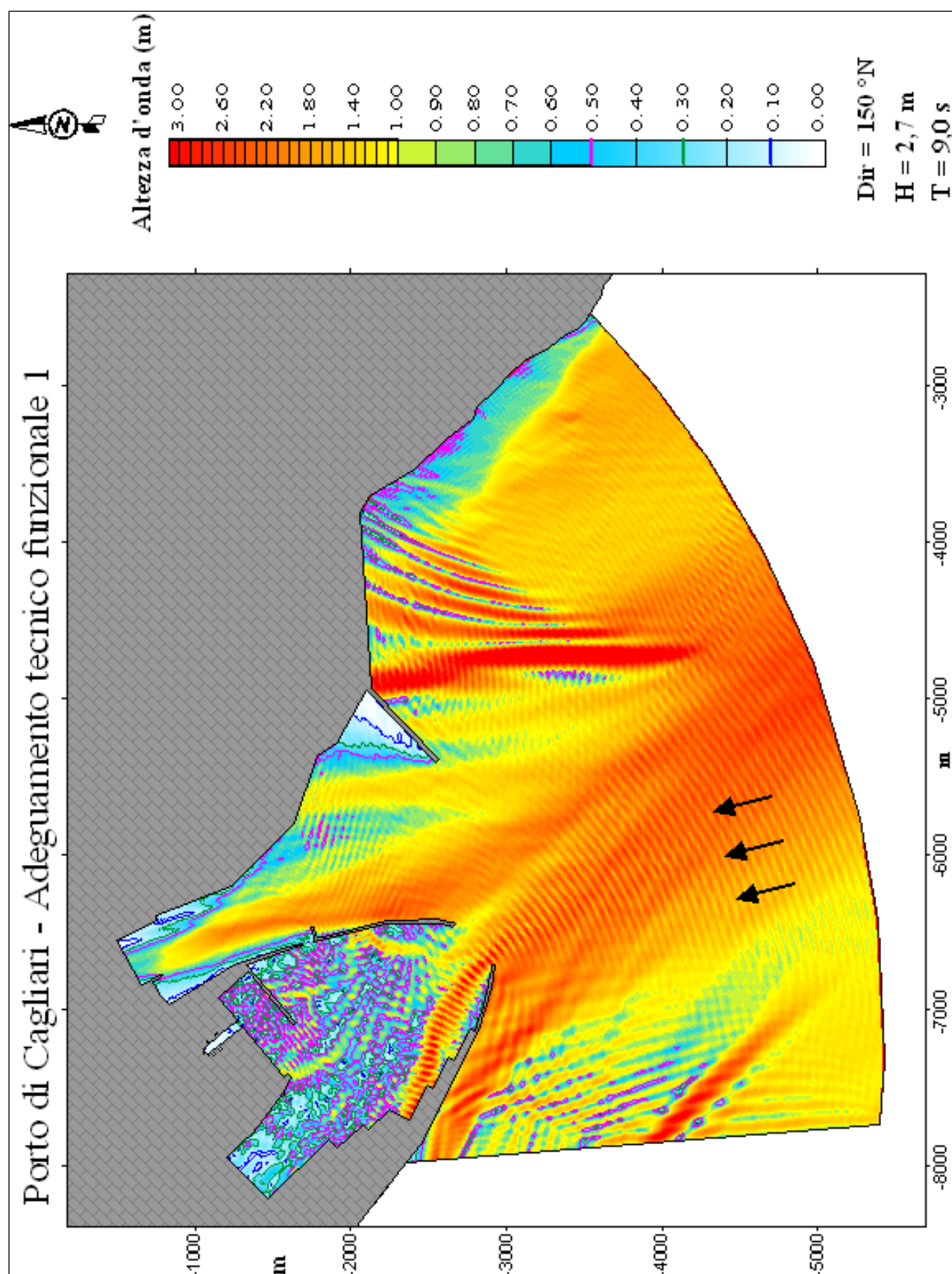


Figura 2.14 – Configurazione 1

Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=2.7 m; T=9.0 s).

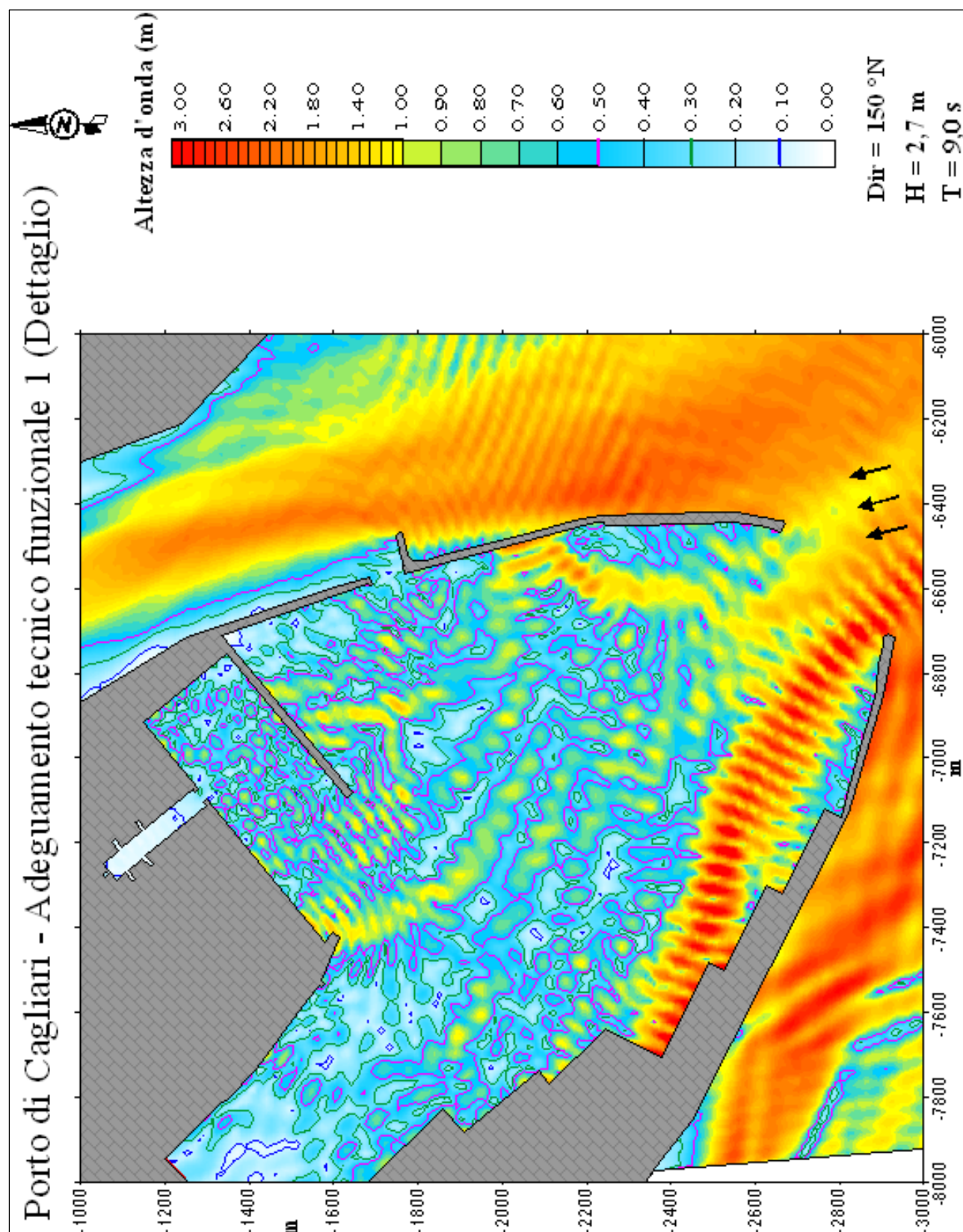


Figura 2.15 – Configurazione 1

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=2.7 m; T=9.0 s).

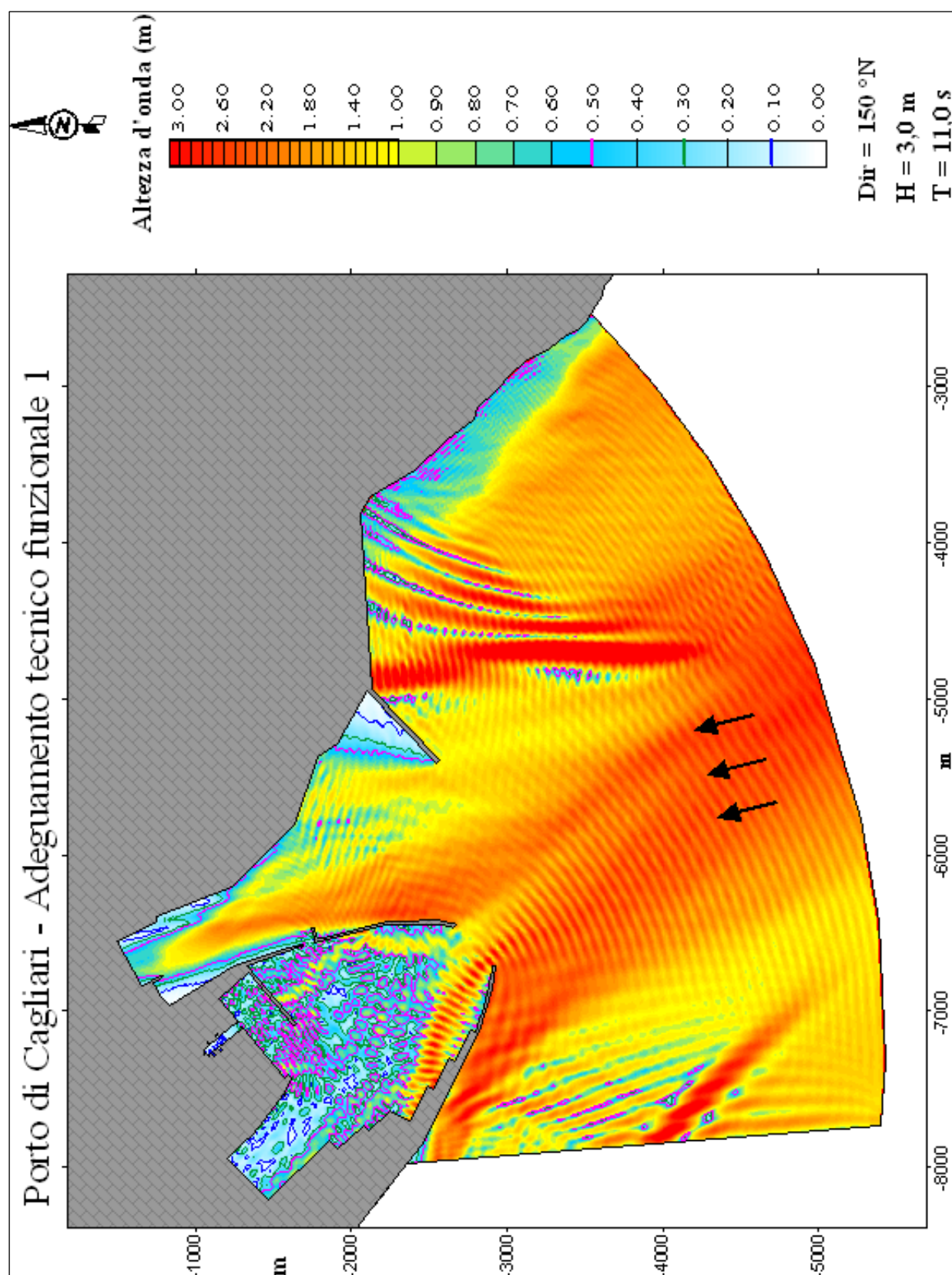


Figura 2.16 – Configurazione 1

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=3.0 m; T=11.0 s).

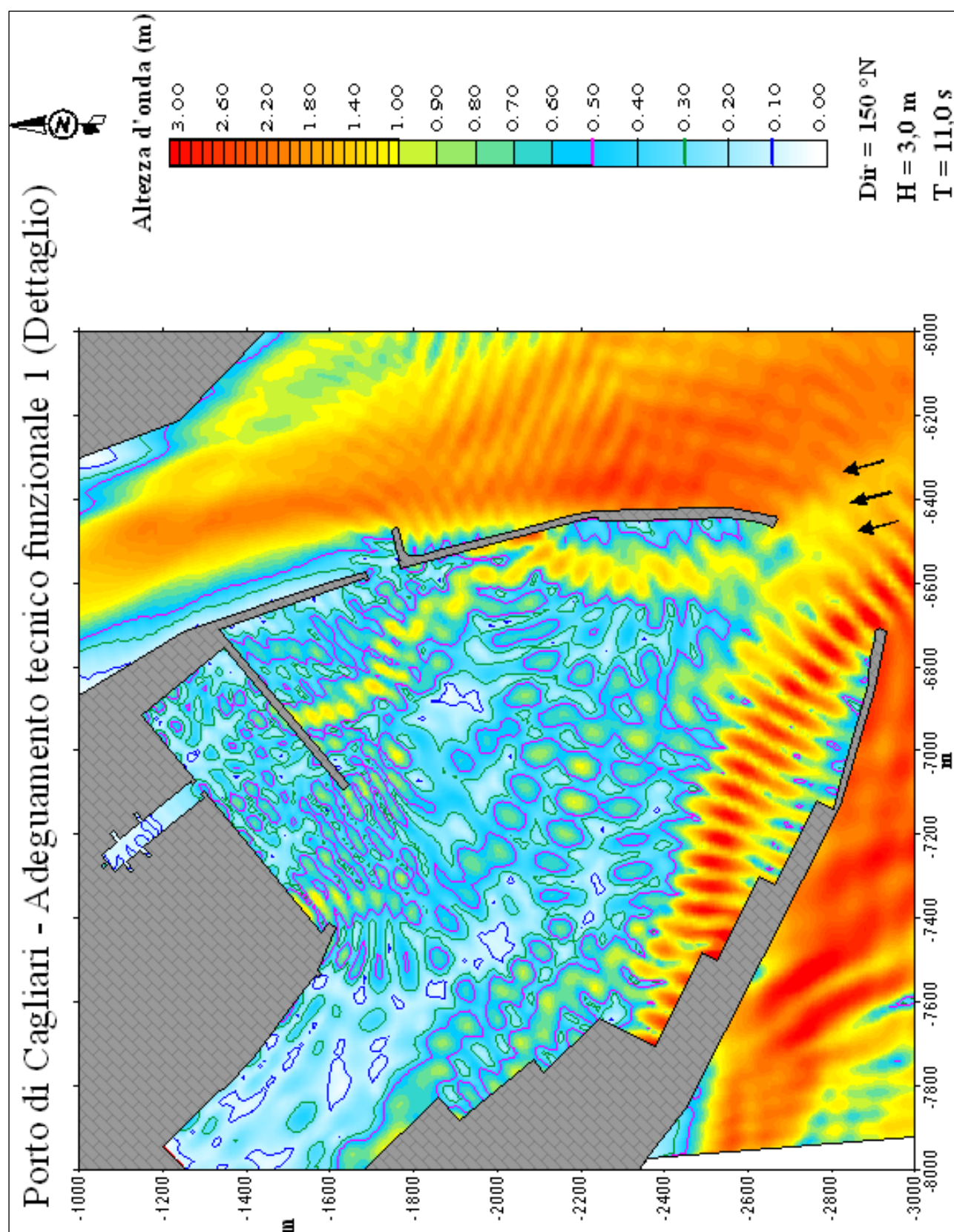


Figura 2.17 – Configurazione 1

Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=3.0 m; T=11.0 s).

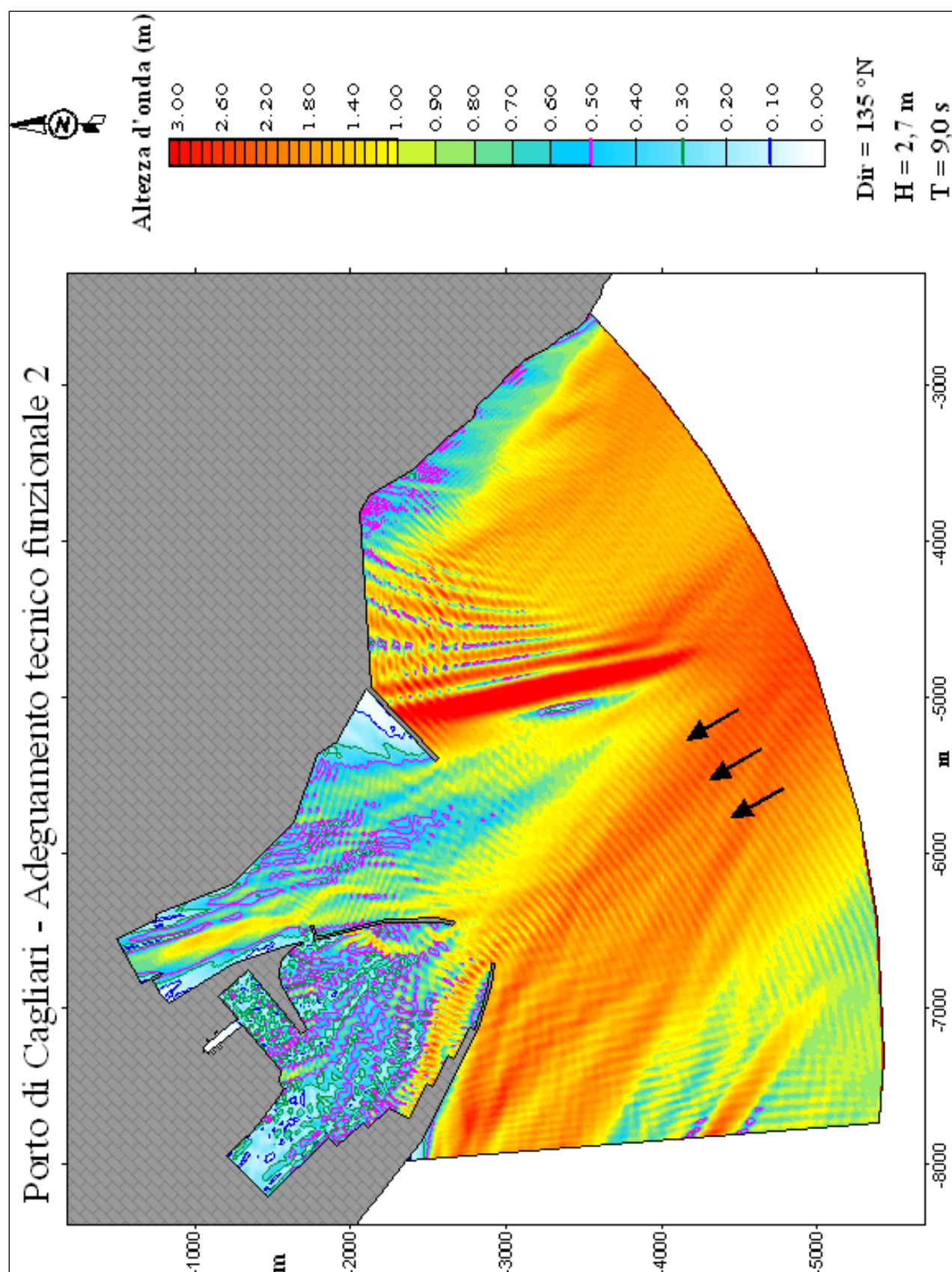


Figura 2.18 – Configurazione 2

Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H=2.7 m; T=9.0 s).

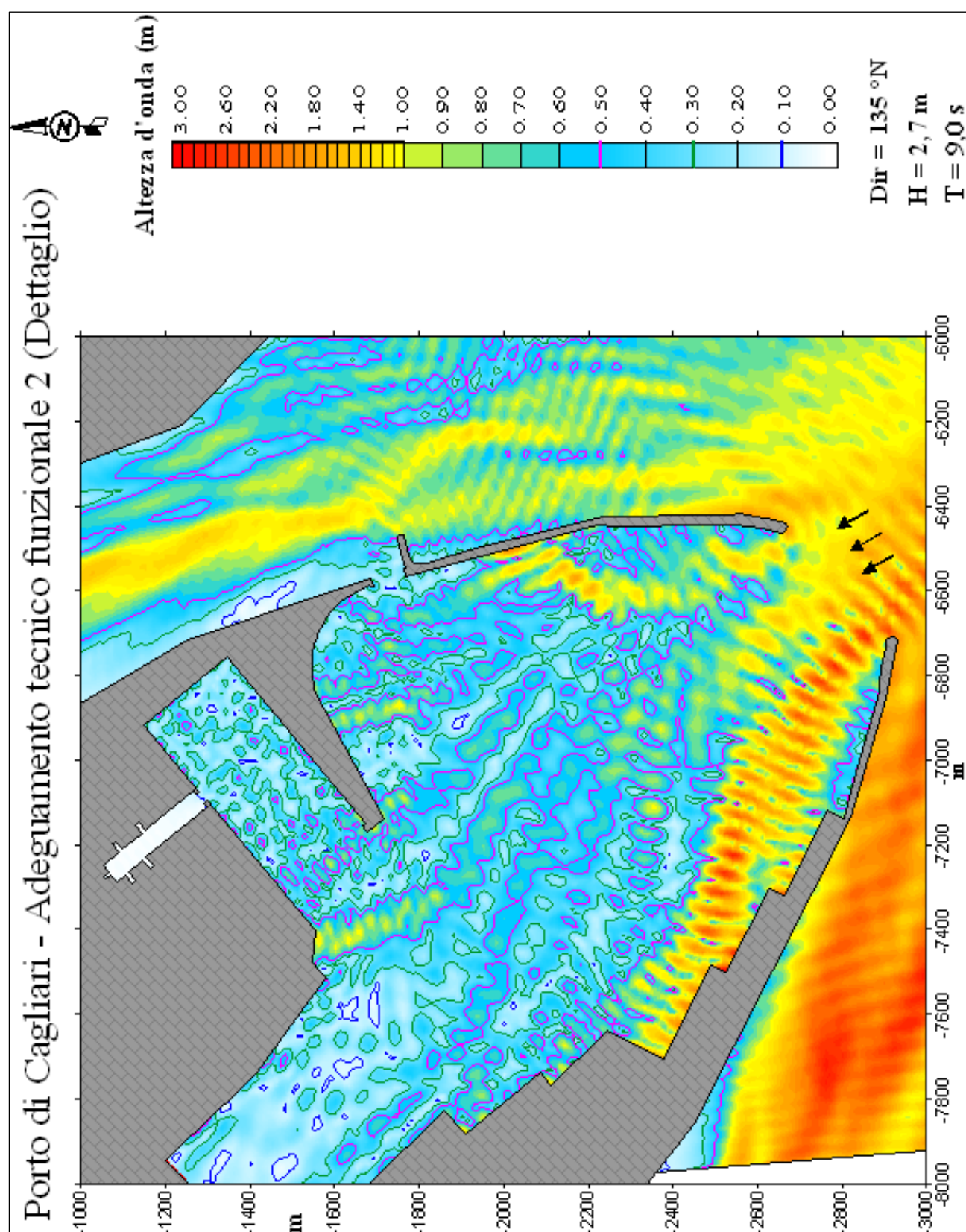


Figura 2.19 – Configurazione 2

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H=2.7 m; T=9.0 s).

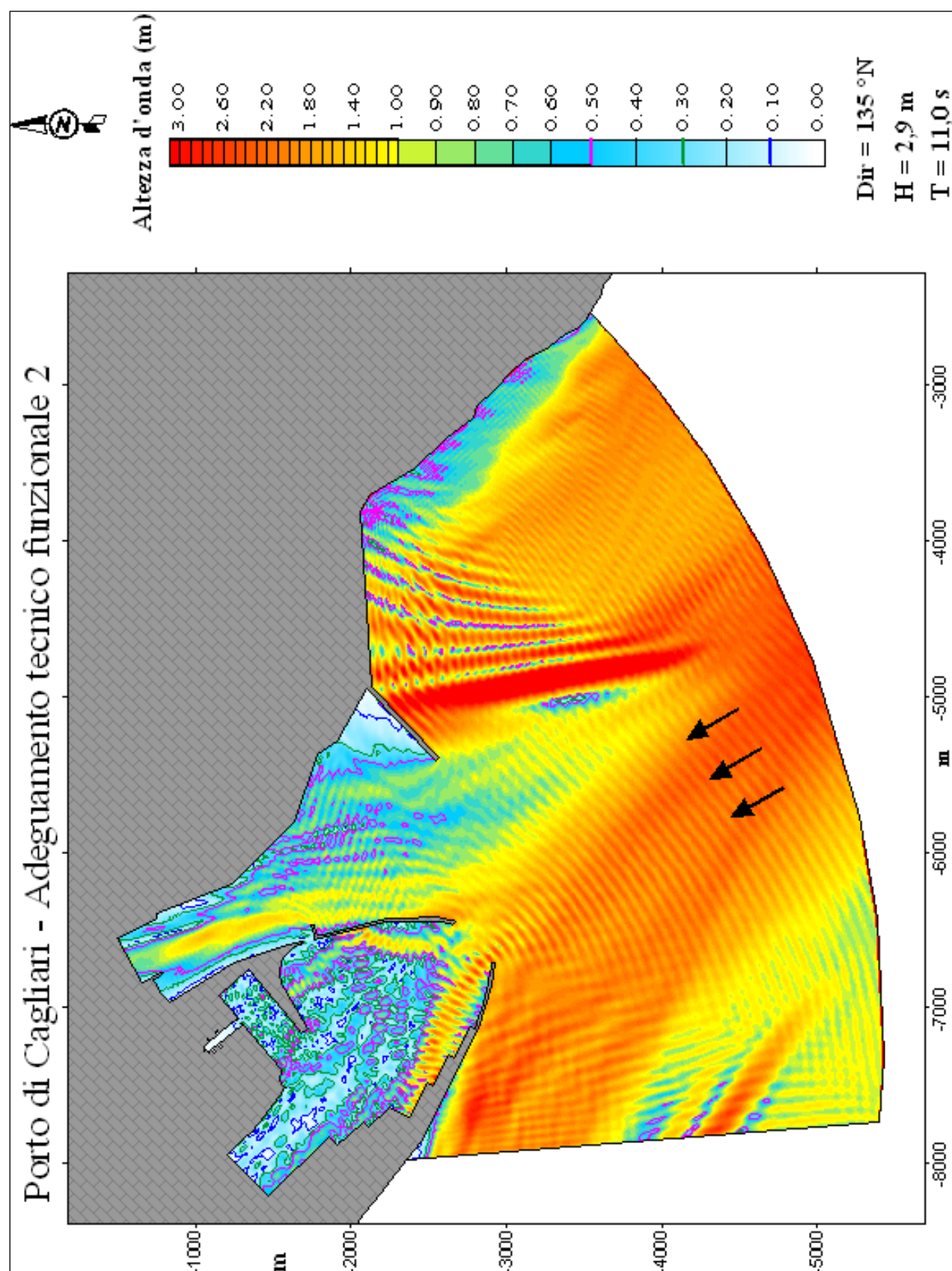


Figura 2.20 – Configurazione 2

Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H =2.9 m; T=11.0 s).

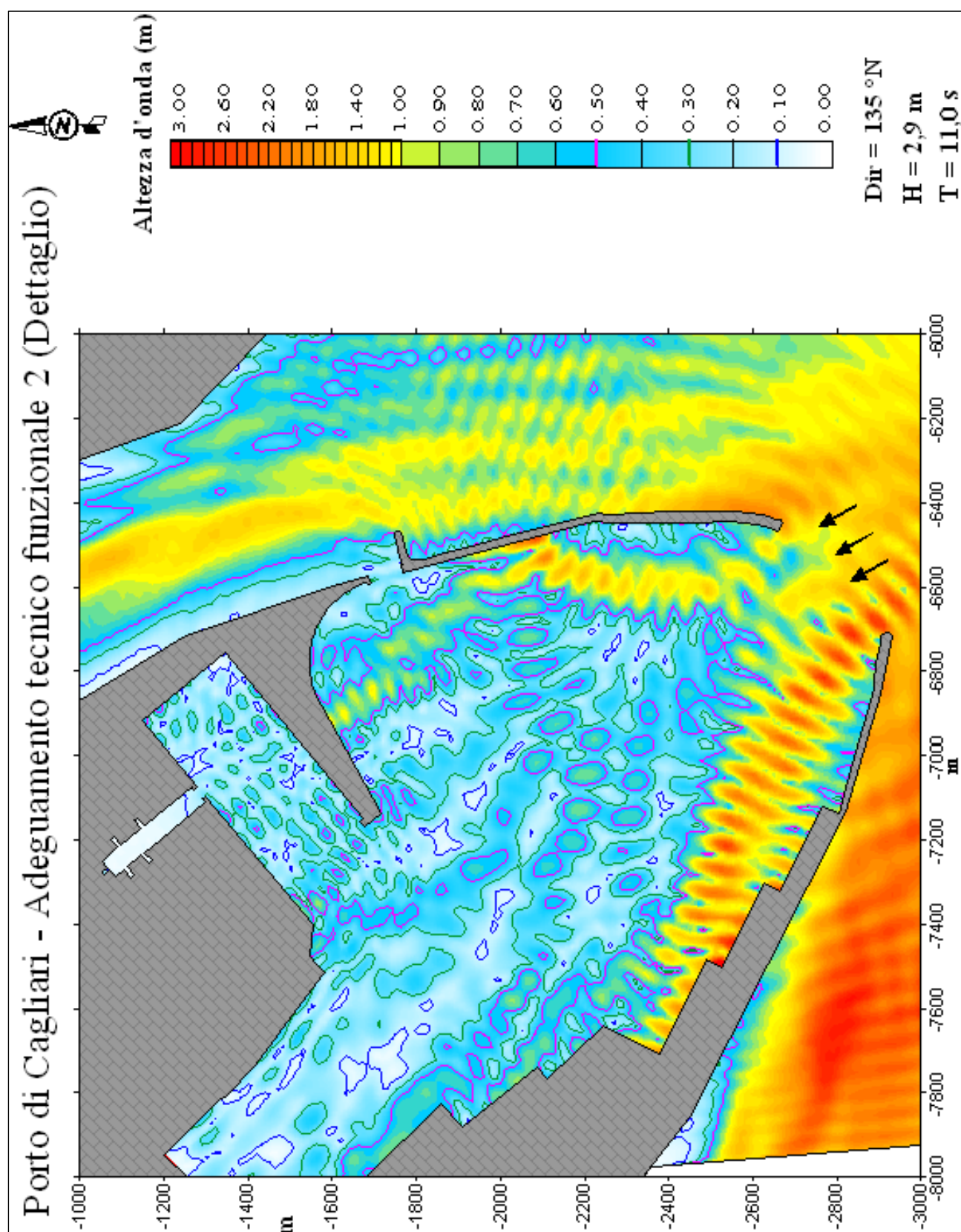


Figura 2.21 – Configurazione 2

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H=2.9 m; T=11.0 s).

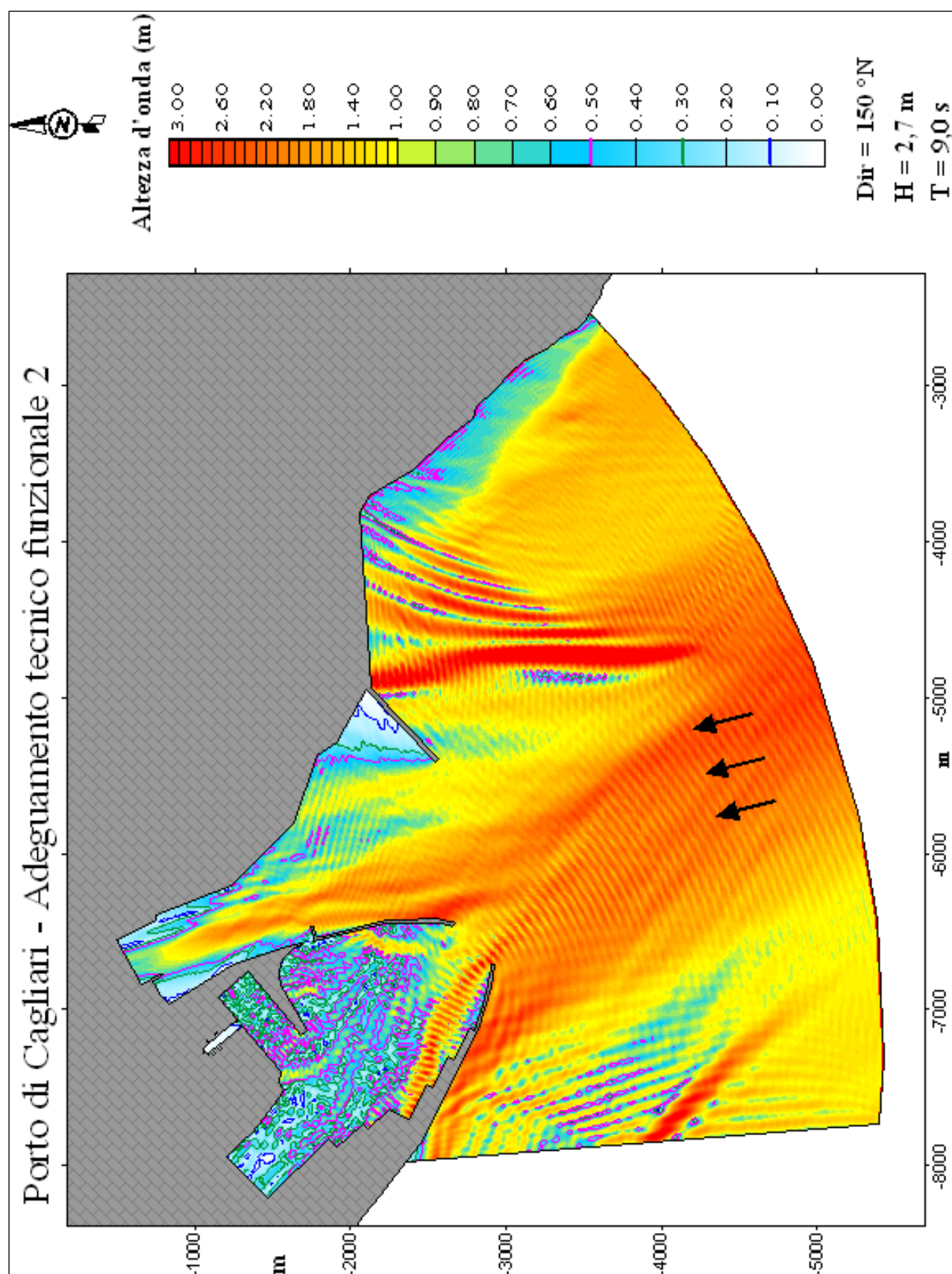


Figura 2.22 – Configurazione 2

Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=2.7 m; T=9.0 s).

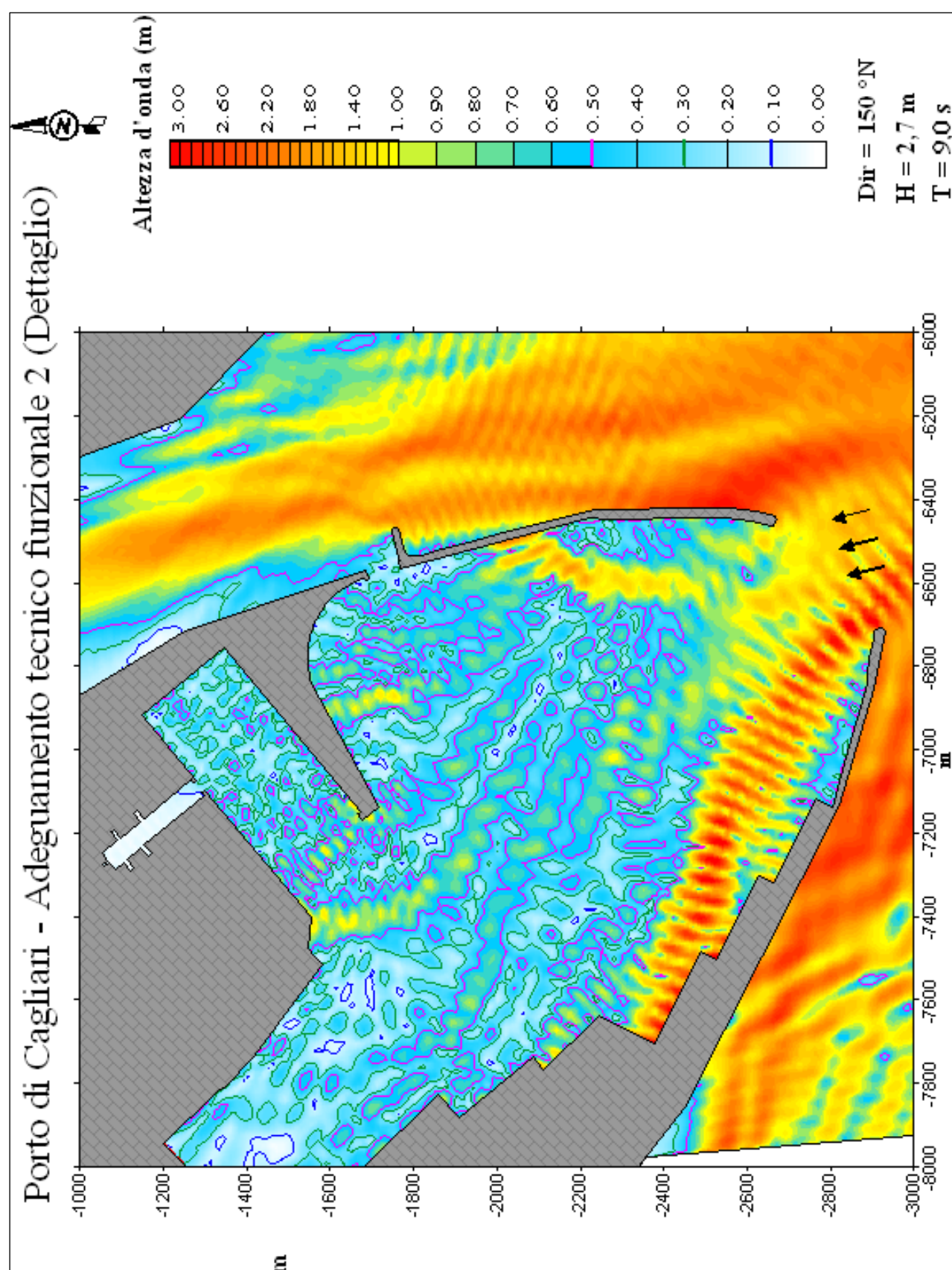


Figura 2.23 – Configurazione 2

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H =2.7 m; T=9.0 s).

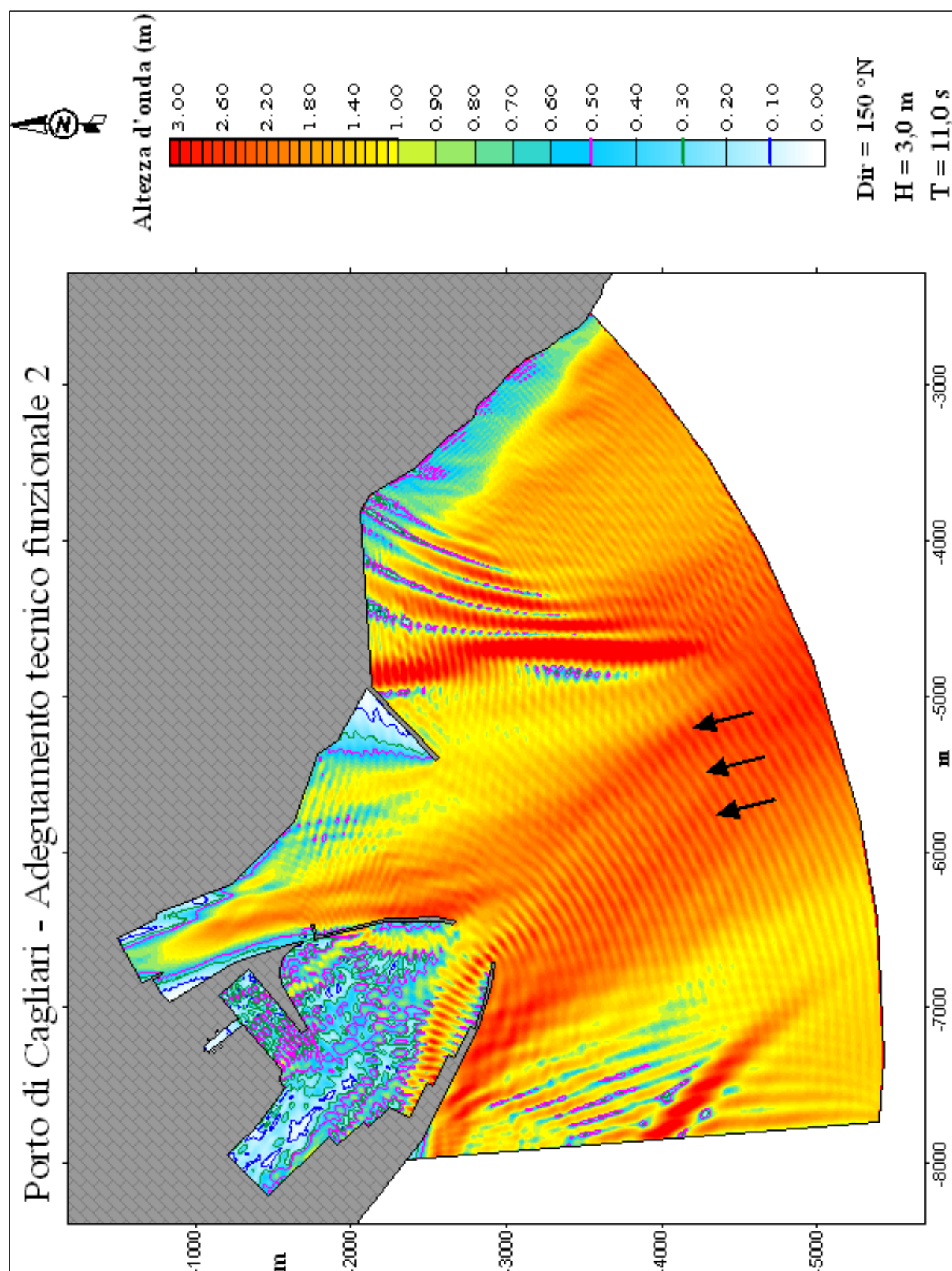


Figura 2.24 – Configurazione 2

Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=3.0 m; T=11.0 s).

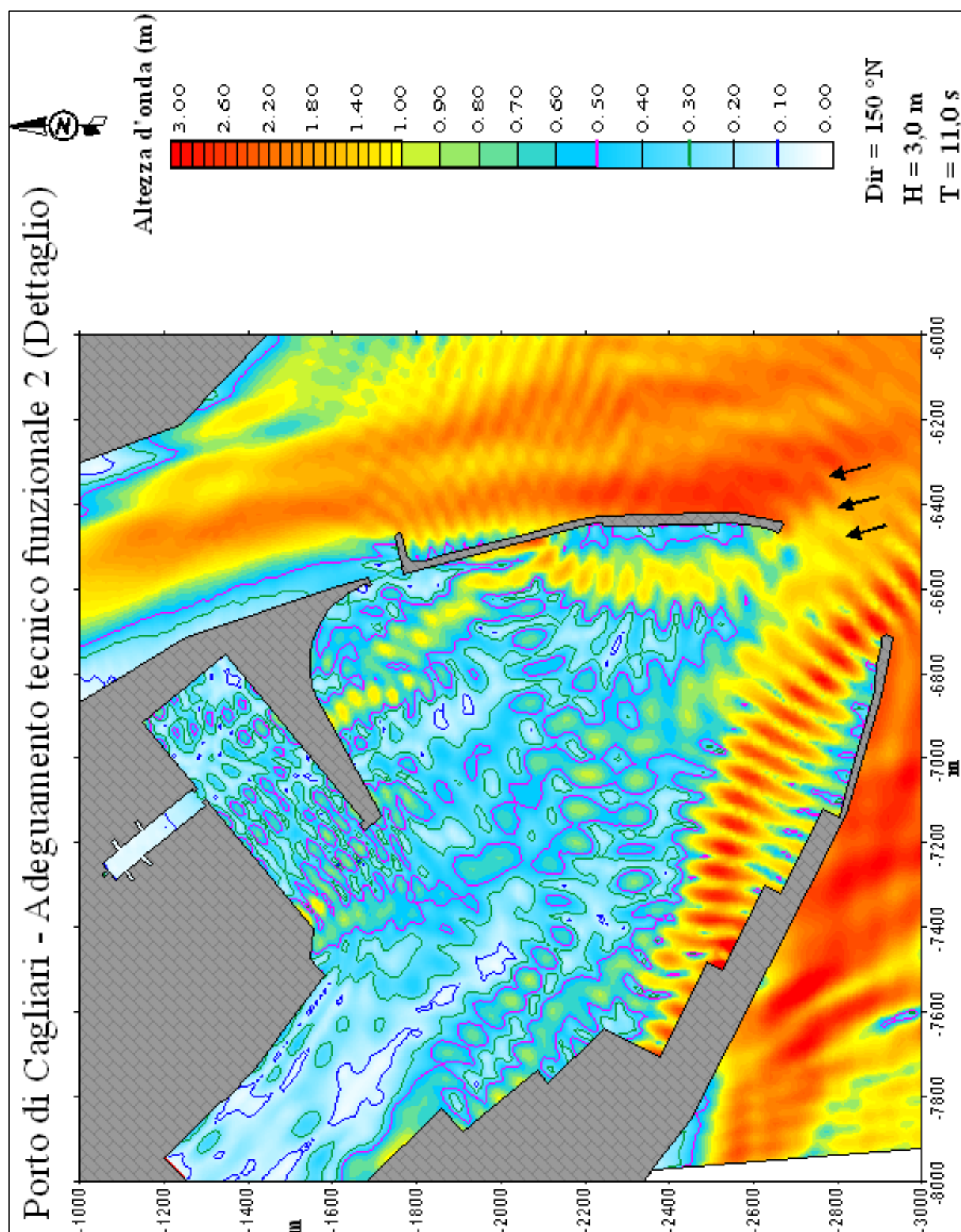


Figura 2.25 – Configurazione 2

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=3.0 m; T=11.0 s).

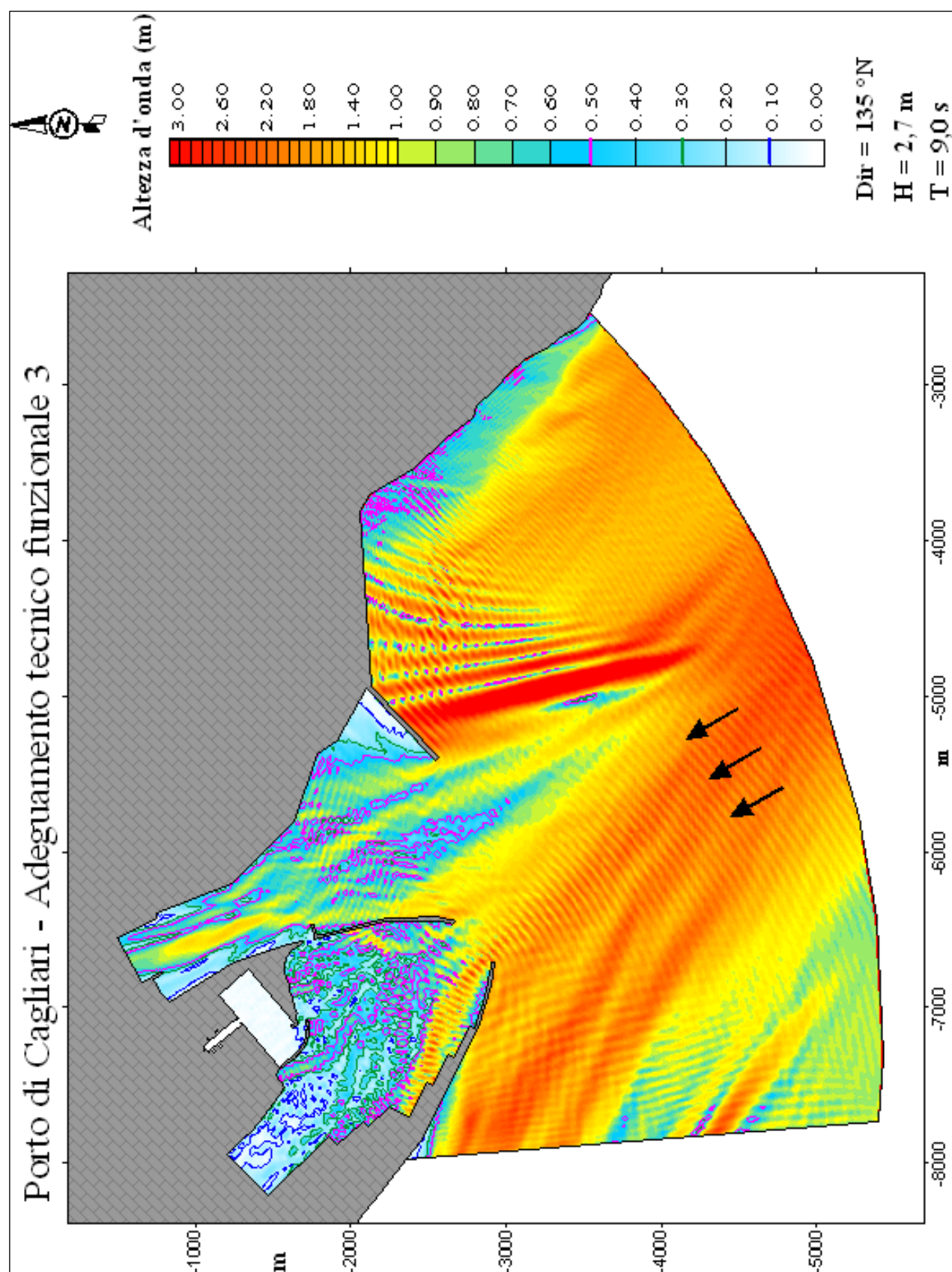


Figura 2.26 – Configurazione 3

agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H=2.7 m; T=9.0 s).

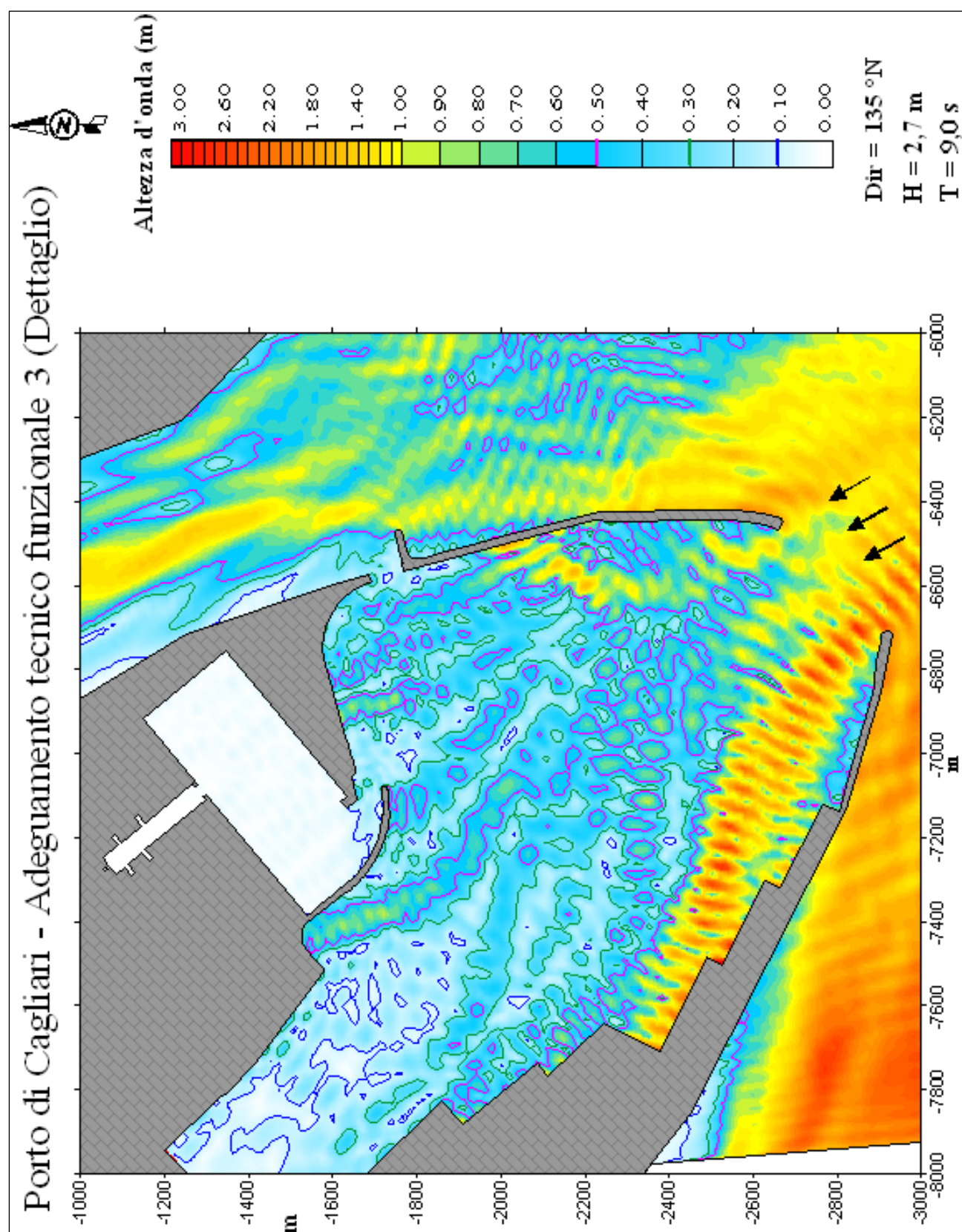


Figura 2.27 – Configurazione 3

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H=2.7 m; T=9.0 s).

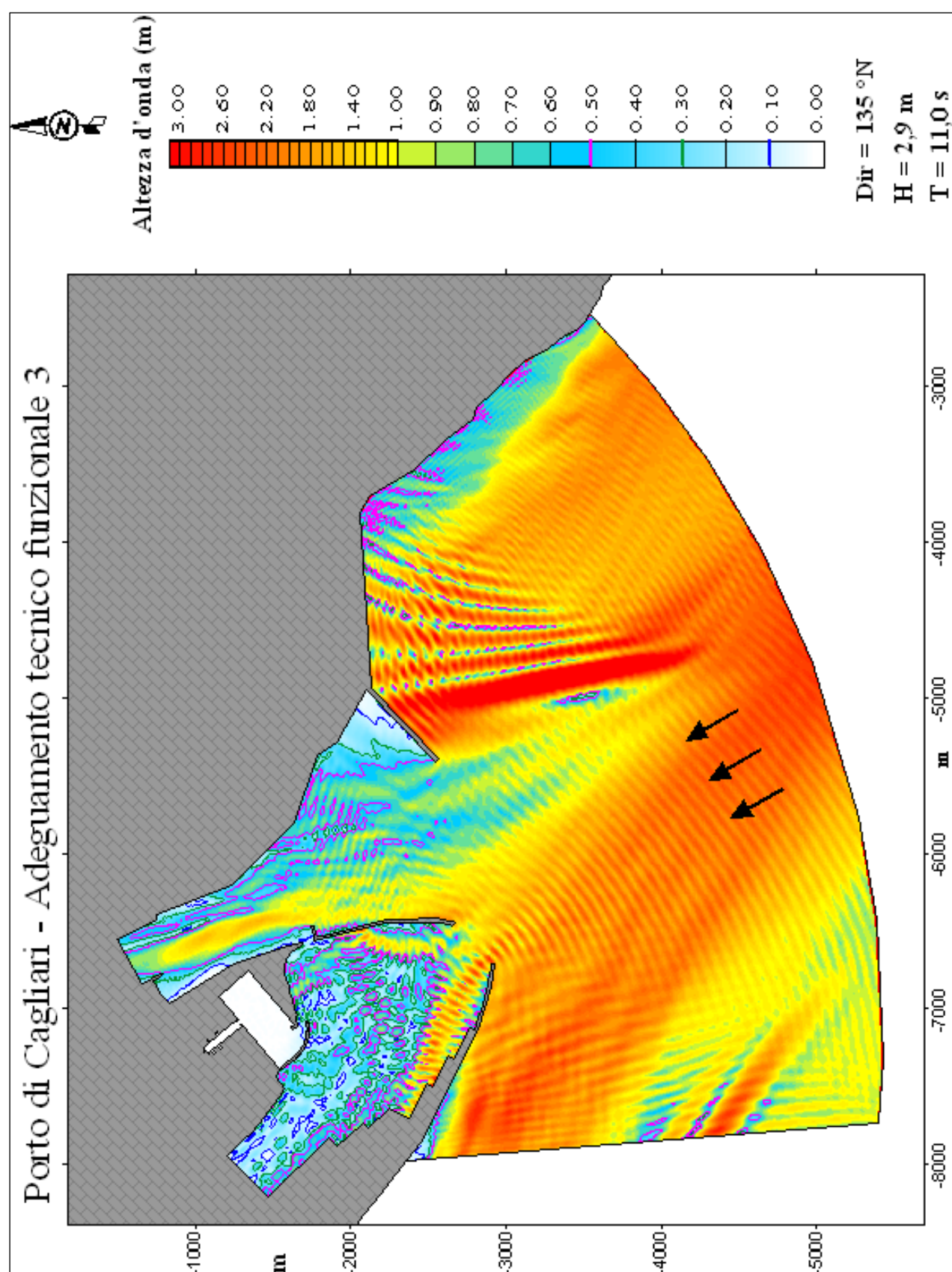


Figura 2.28 – Configurazione 3

Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H=2.9 m; T=11.0 s).

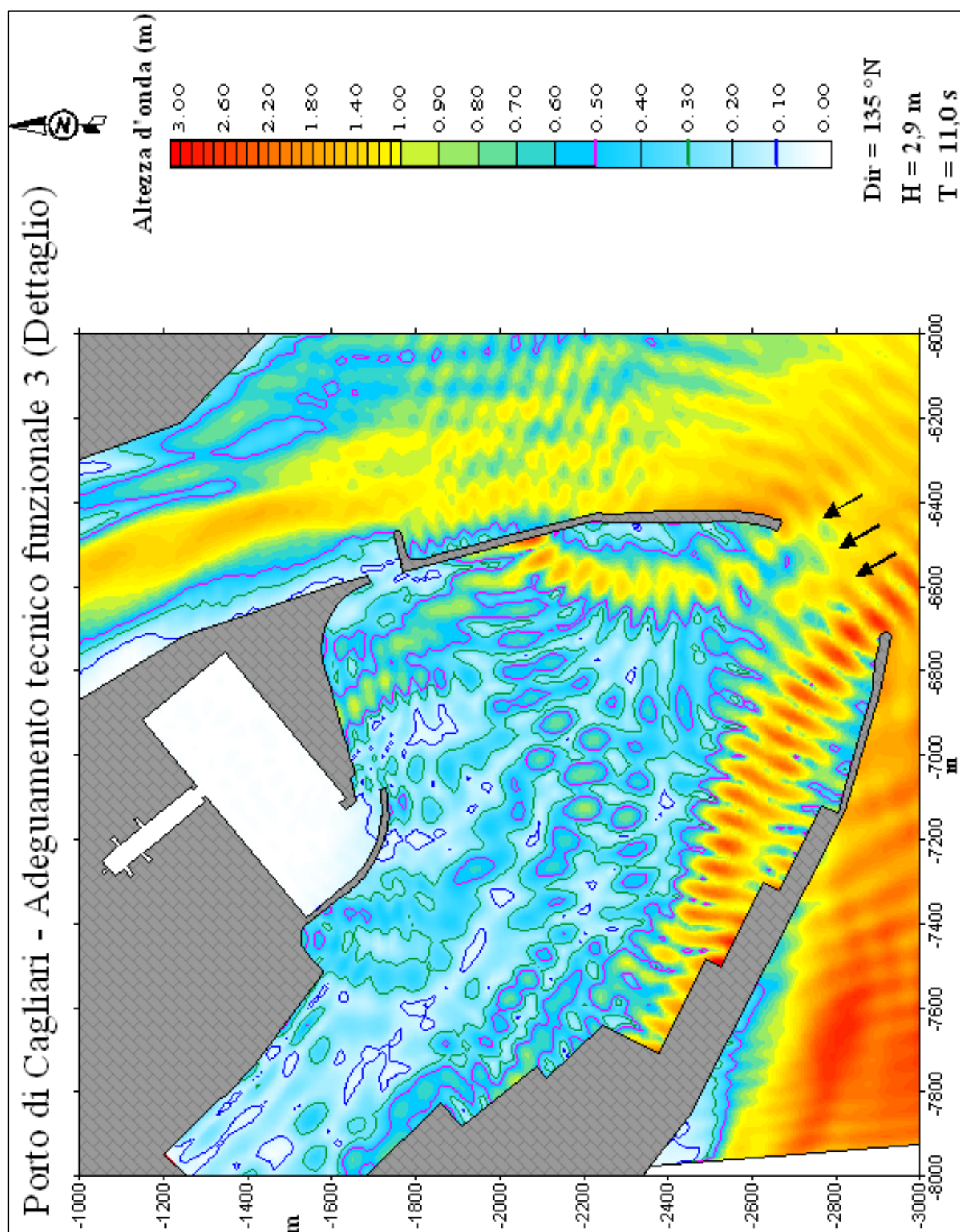


Figura 2.29 – Configurazione 3

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=130°N; H=2.9 m; T=11.0 s).

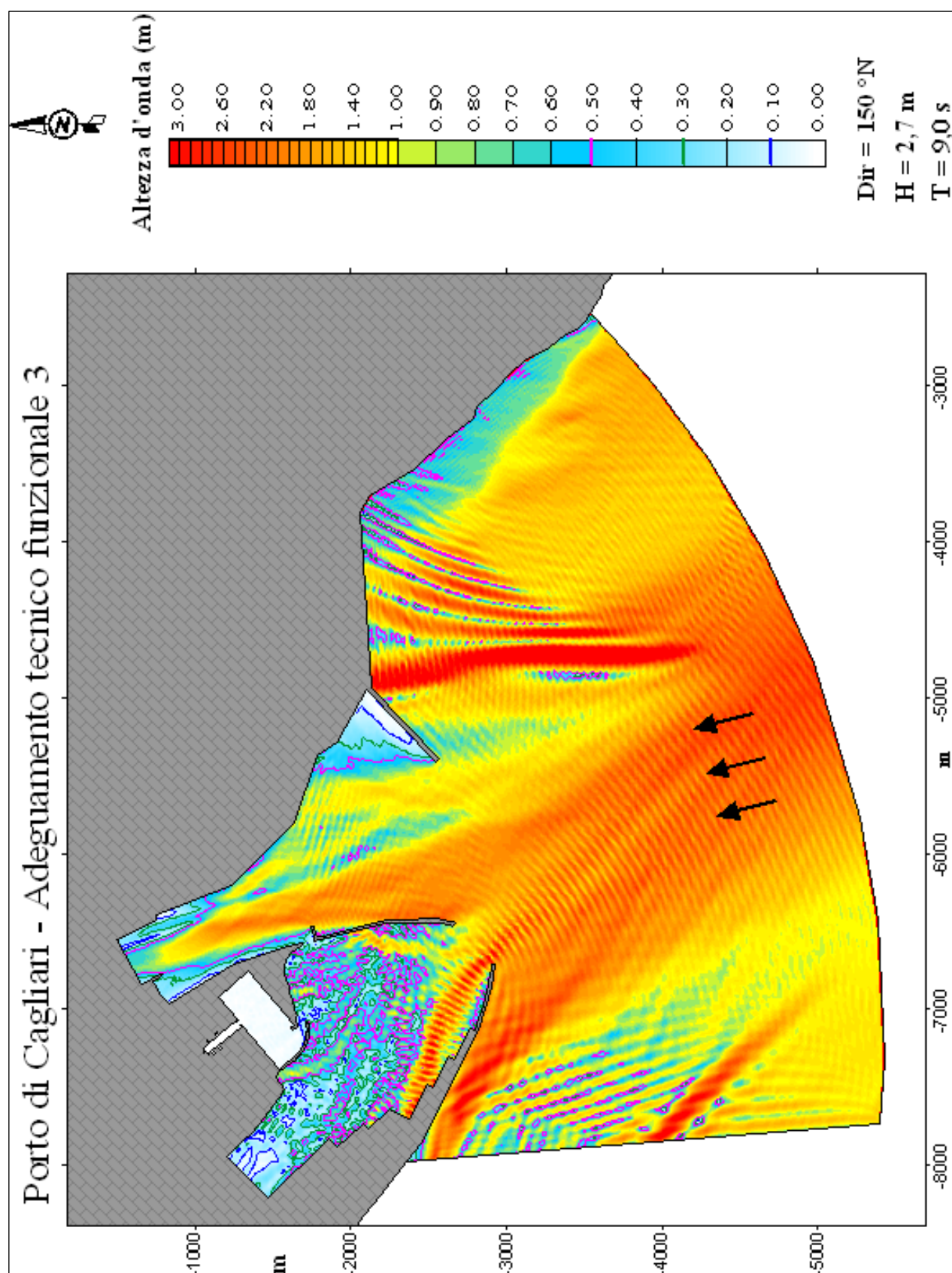


Figura 2.30 – Configurazione 3

Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=2.7 m; T=9.0 s).

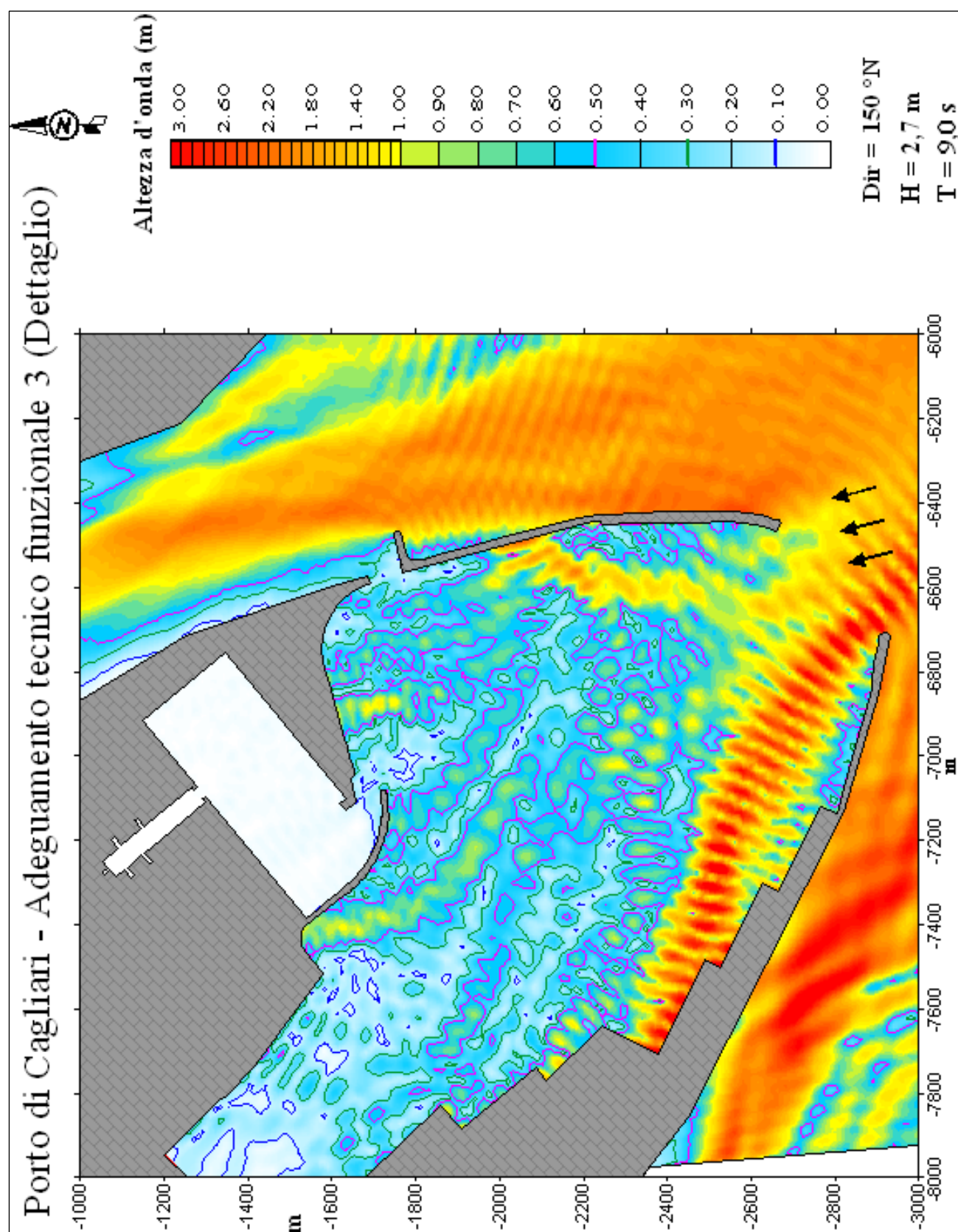


Figura 2.31 – Configurazione 3

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=2.7 m; T=9.0 s).

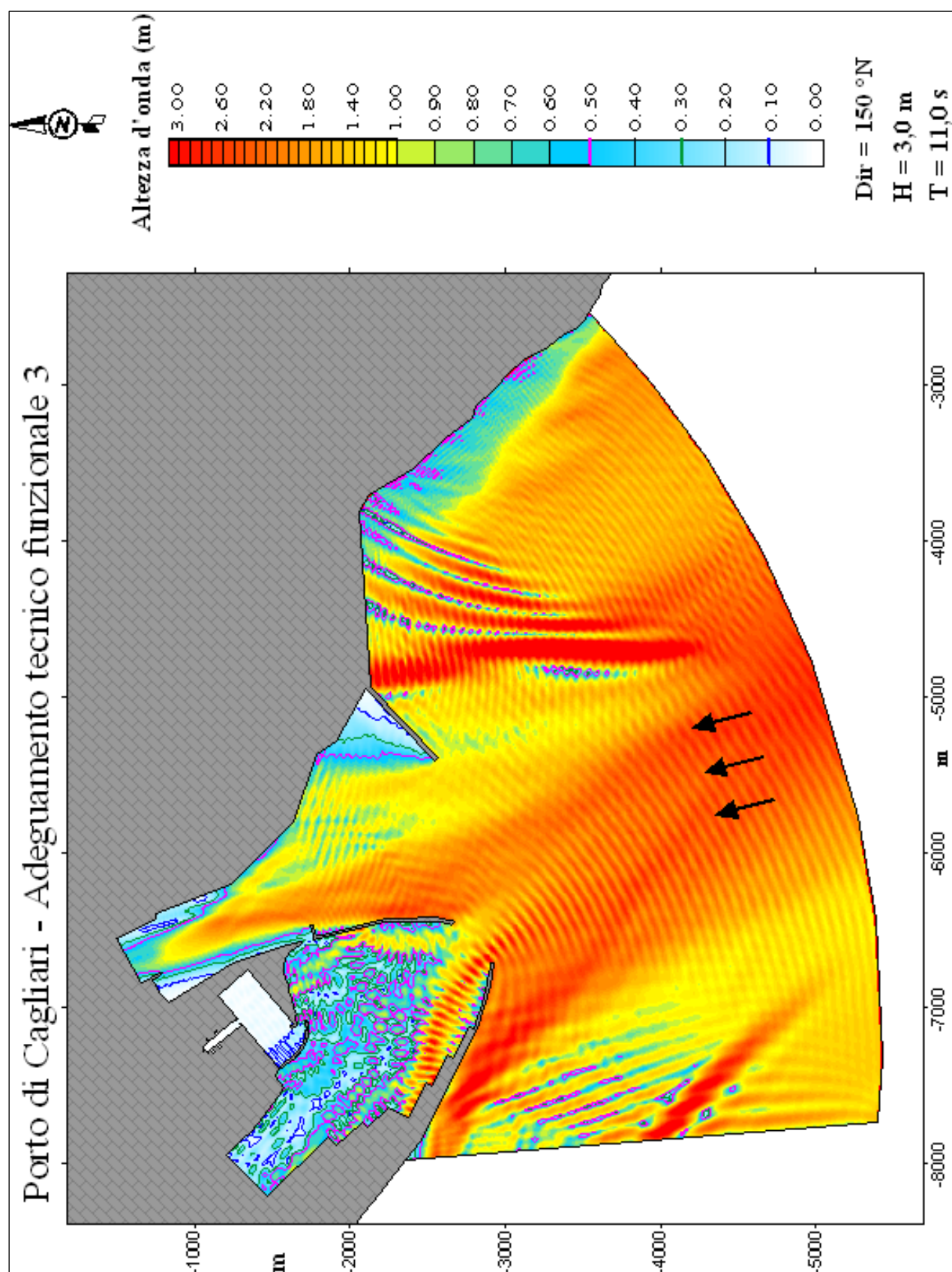


Figura 2.32 – Configurazione 3

Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=3.0 m; T=11.0 s).

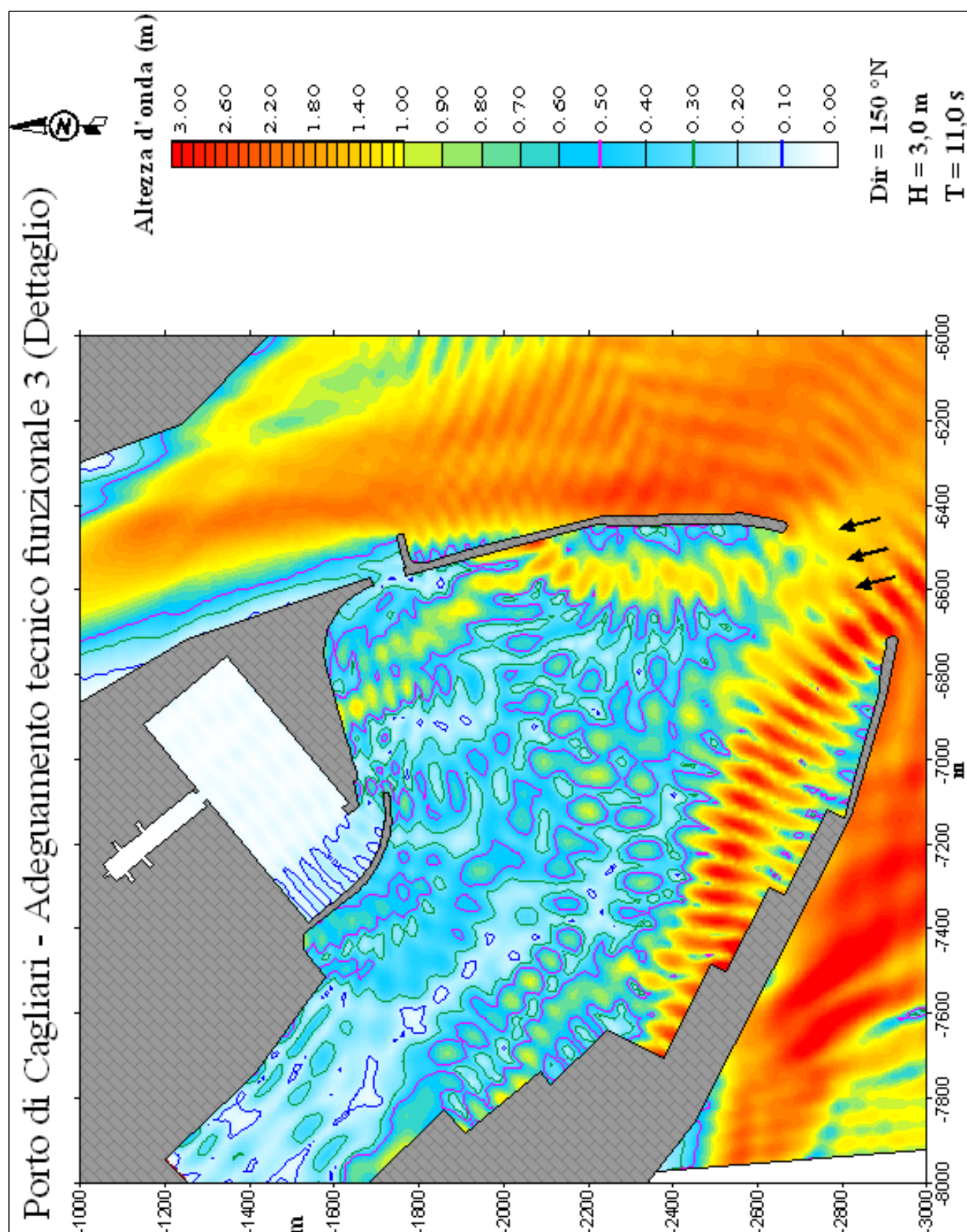


Figura 2.33 – Configurazione 3

Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=3.0 m; T=11.0 s).

3 ANALISI DEI RISULTATI

Dall'analisi dei risultati ottenuti dall'applicazione del modello CGWAVE (Figura 2.11÷**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), per le tre configurazioni analizzate di progetto proposte per le opere da realizzare nell'Avamporto Est del porto canale di Cagliari, si evidenzia come in generale il moto ondoso incidente propagandosi all'intero dell'ampio bacino che caratterizza l'attuale porto canale di Cagliari viene rapidamente attenuato per effetti di diffrazione e riflessione parziale causata sia dalle opere che delimitano il bacino stesso che dalle rilevanti variazioni della batimetria dei fondali.

Nello specchio acqueo che costituisce il bacino operativo del distretto della cantieristica e delle banchine destinate ad ospitare i servizi ancillari del porto la presenza delle opere di difesa previste nelle tre configurazioni analizzate produce un ulteriore riduzione del livello di agitazione ondosa che migliora progressivamente passando dalla configurazione di Piano Regolatore (configurazione 1) alla configurazione di Adeguamento Tecnico Funzionale (configurazione 3).

Nella tabella di seguito riportata sono indicate le caratteristiche del moto ondoso residuo all'interno del bacino protetto e lungo le banchine operative del distretto della cantieristica per le tre configurazioni analizzate e per le condizioni di moto ondoso prese in considerazione.

Dai risultati delle elaborazioni svolte emerge che aumentando la lunghezza del molo sud il grado di agitazione ondosa all'interno dello specchio acqueo ridossato e lungo le banchine operative del distretto della cantieristica e di quelle destinate ai mezzi dei servizi ancillari del porto diminuisce sensibilmente ma non in maniera sufficiente a garantire la piena operatività delle infrastrutture a servizio dei cantieri navali (travel lift, sincro lift e banchine di allestimento).

In particolare prevedendo solo il prolungamento del molo sud (configurazione 2) i valori medi dell'agitazione ondosa all'interno del bacino protetto, rispetto alla configurazione di P.R.P., si riducono sensibilmente ma lungo le banchine operative del distretto della cantieristica, specie nella porzione a ponente del canale di navigazione interna, si registrano ancora altezze d'onda significative superiori ai 50 cm.

Inserendo il molo di sottoflutto (molo ovest) l'agitazione ondosa all'interno del bacino protetto, per tutte le condizioni di moto ondoso simulate, risulta notevolmente attenuato



con valori di altezza d'onda residua sempre inferiori ai 10 cm. In questa configurazione anche il grado di agitazione in corrispondenza dell'imboccatura risulta sufficientemente attenuato e, anche in condizioni meteomarine estreme, non ne condiziona l'operatività.

Conf.	Dir. (°N)	Hs (m)	T (s)	Zona	Altezza d'onda
1	135	2.70	9	Bacino (altezza media)	> 0.50 m
				Banchine (altezza max)	1.00 m
	135	2.9	11	Bacino (altezza media)	0.50 m
				Banchine (altezza max)	1.00 m
	150	2.7	9	Bacino (altezza media)	> 0.50 m
				Banchine (altezza max)	1.50 m
	150	2.9	11	Bacino (altezza media)	0.50 m
				Banchine (altezza max)	1.00 m
2	135	2.70	9	Bacino (altezza media)	0.30 m
				Banchine (altezza max)	0.50 m
	135	2.9	11	Bacino (altezza media)	0.30 m
				Banchine (altezza max)	0.50 m
	150	2.7	9	Bacino (altezza media)	0.40 m
				Banchine (altezza max)	0.50 m
	150	2.9	11	Bacino (altezza media)	0.40 m
				Banchine (altezza max)	0.50 m
3	135	2.70	9	Bacino (altezza media)	< 0.10 m
				Banchine (altezza max)	< 0.10 m
	135	2.9	11	Bacino (altezza media)	< 0.10 m
				Banchine (altezza max)	< 0.10 m
	150	2.7	9	Bacino (altezza media)	< 0.10 m
				Banchine (altezza max)	< 0.10 m
	150	2.9	11	Bacino (altezza media)	< 0.10 m
				Banchine (altezza max)	0.20 m

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;

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:

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

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.

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 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:

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

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".