

AUTORITA' PORTUALE



PORTO CANALE DI CAGLIARI AVAMPORTO EST DISTRETTO DELLA CANTIERISTICA

PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE

Titolo elaborato:

STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSONO E DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA

Scala:

1 0 0 1 5 D R 0 0 6 - 0 M A R

Committente:

AUTORITA' PORTUALE
DI CAGLIARI

R.U.P.:

Dott. Ing. Sergio MURGIA

Progetto Opere a Mare:

MODIMAR s.r.l.
Prof. Ing. Alberto NOLI
Dott. Ing. Marco TARTAGLINI

Progetto Opere a Terra:

DOLMEN s.r.l.
Dott. Ing. Serafino RUBIU
Dott. Ing. Luciano BIGGIO

Geologia

Dott. Geol. Marcello GHIGLIOTTI
Studio di Inserimento Ambientale
VDP s.r.l.

Dott. Ing. Francesco VENTURA
Dott. Arch. Silvia MARTORANA

P.E.F. e Piano di Gestione
Dott. Simone TEMPESTI

Rif. Dis.	Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:
	15/12/2011	0	EMISSIONE	E. CAMUSI	M. TARTAGLINI	A. NOLI

La MODIMAR s.r.l. si riserva la proprietà di questo disegno con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta.
This document is property of MODIMAR s.r.l. Reproduction and divulgation forbidden without written permission

Visto del Committente:

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: marzo 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-0	MAR

AUTORITA' PORTUALE DI CAGLIARI

PORTO CANALE DI CAGLIARI

AVAMPORTO EST

DISTRETTO DELLA CANTIERISTICA

PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE

STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSONO E DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA ALL'INTERNO DELLA DARSENA DEL DISTRETTO DELLA CANTIERISTICA

INDICE

1	Premesse, metodologia e risultati	3
2	Penetrazione del moto ondoso	5
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</i>	7
2.4	<i>Risultati delle simulazioni</i>	9
2.5	<i>CONCLUSIONI.....</i>	18
3	Circolazione idrica portuale	19
3.1	<i>Applicazione del sistema di modellazione SMS.....</i>	19
3.2	<i>Discretizzazione dello specchio liquido.....</i>	20
3.3	<i>Definizione delle condizioni al contorno.....</i>	21
3.4	<i>Risultati delle simulazioni idrodinamiche</i>	22
3.5	<i>Conclusioni.....</i>	41
4	Appendice: descrizione del modello matematico SMS	42
4.1	<i>Introduzione.....</i>	42
4.2	<i>Codice RMA-2</i>	43

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

4.3	<i>Applicazioni</i>	43
4.4	<i>Equazioni utilizzate</i>	43
4.5	<i>Processo di Simulazione</i>	44
4.5.1	Costruzione della griglia	44
4.5.2	Condizioni al contorno	45
4.5.3	GFGEN	45
4.5.4	RMA-2.....	45
4.5.5	Post-processing con il SMS	46
4.5.6	Validazione	46

5 Appendice: descrizione del modello matematico CGWAVE.....47

5.1	<i>Introduzione</i>	47
5.2	<i>Equazioni di base</i>	47
5.3	<i>Condizioni al contorno</i>	48

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

1 Premesse, metodologia e risultati

Il presente rapporto è stato redatto a supporto delle attività necessarie per la progettazione definitiva delle opere a mare del Distretto della cantieristica previste nel Porto Canale di Cagliari e riporta gli studi della penetrazione del moto ondoso e del campo idrodinamico ai fini, rispettivamente, dell'analisi dei livelli di agitazione ondosa residua e del ricambio idrico all'interno del nuovo bacino protetto.

Gli studi sono stati condotti (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).

In particolare attraverso l'applicazione di diversi modelli di calcolo è stato possibile simulare sia la propagazione del moto ondoso all'interno del nuovo bacino portuale in progetto, tenendo conto dei fenomeni combinati di diffrazione, rifrazione, riflessione e degli effetti dissipativi dovuti al frangimento ed all'attrito sul fondo, sia i fenomeni idrodinamici che si verificano per le oscillazioni di livello dovute alla sola marea astronomica.

Le simulazioni sono state condotte utilizzando, in entrambi i casi, come forzanti gli eventi di moto ondoso più gravosi, compatibilmente con le condizioni meteomarine raggiungibili nel paraggio in esame, ai fini degli studi da effettuare.

Tali studi sono stati condotti con l'obiettivo di fornire indicazioni oggettive sulla validità e funzionalità dello schema portuale proposto dal presente progetto definitivo in relazione alle condizioni di sicurezza delle imbarcazioni che dovranno stazionare nelle nuove aree di ormeggio e che si apprestano ad effettuare le manovre d'ingresso e d'uscita dal porto, ovvero alla capacità di ricambio idrico.

I risultati delle simulazioni effettuate, considerando il nuovo bacino in progetto, hanno evidenziato:

- una soddisfacente attenuazione del moto ondoso generato dagli stati di mare reputati più gravosi ai fini dell'agitazione ondosa interna, anche con eventi estremi associati a tempi di ritorno decennali e cinquantennali;
- che in corrispondenza della parte più interna del nuovo bacino portuale, con particolare riferimento alla darsena posta a Nord del bacino stesso, potrebbero crearsi delle zone di ristagno con possibile decadimento della concentrazione di ossigeno.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

Per ovviare al problema della scarsa circolazione all'interno del nuovo bacino portuale è stato opportunamente dimensionato e verificato un sistema in grado di forzare la circolazione naturale e quindi migliorare la capacità di ricambio idrico dell'intero sistema.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

2 Penetrazione del moto ondoso

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.

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. 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 lo schema portuale preso in esame per il porto di Cagliari.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

2.2 Discretizzazione dello specchio liquido

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

Per la batimetria dei fondali e lo schema portuale da simulare (Figura 2.1), si è fatto riferimento alle carte nautiche edite 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 alla configurazione planimetrica del nuovo Avamporto Est secondo la proposta del presente progetto definitivo.

Nel dettaglio, il campo fluido è stato schematizzato con una 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 2.2);

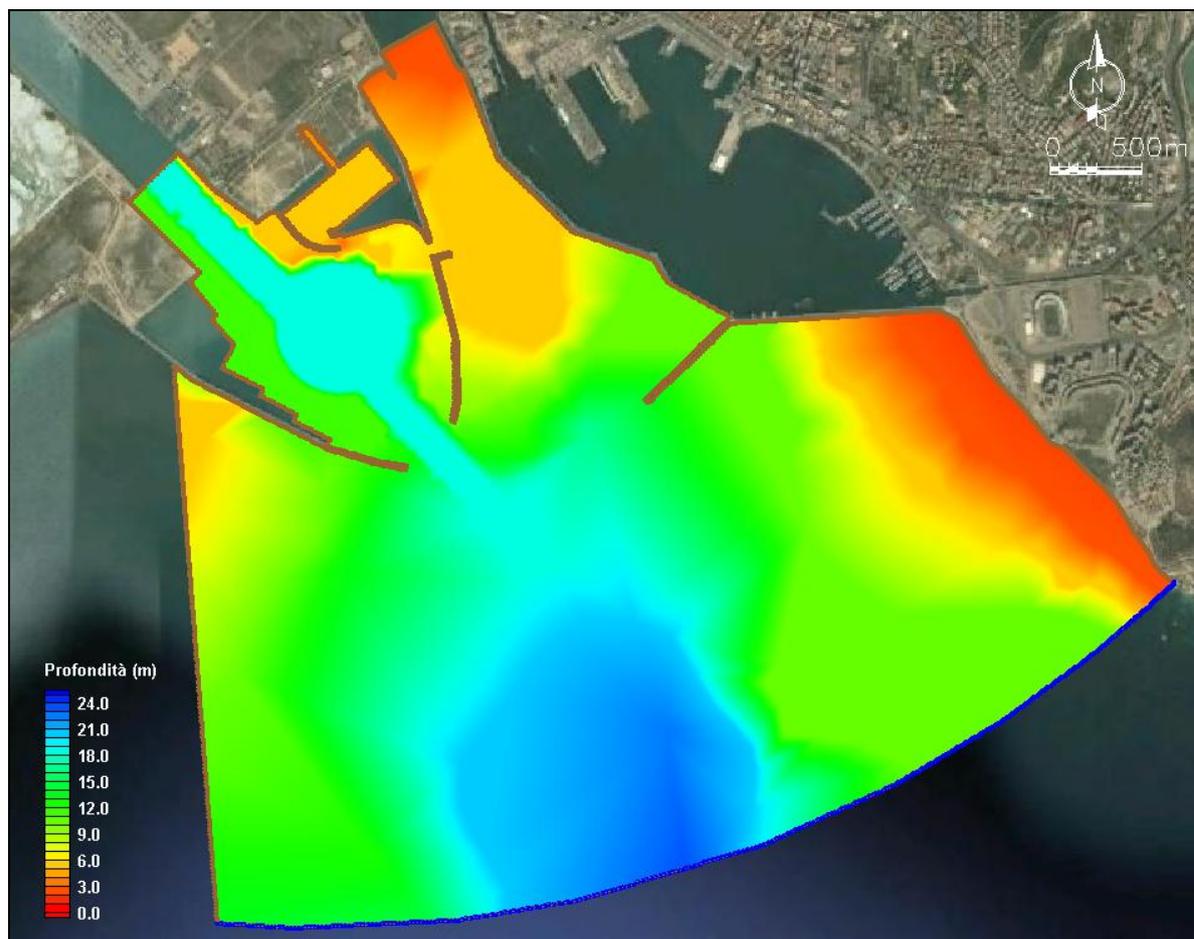


Figura 2.1 – Configurazione di progetto: batimetria di riferimento.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR



Figura 2.2 – Configurazione di progetto: discretizzazione dello specchio liquido

2.3 Definizione delle condizioni al contorno

Per la configurazione di progetto prevista 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 portuale che lo caratterizza, in seguito all'azione del moto ondoso incidente, è stato necessario definire ed impostare all'interno del modello matematico SMS le opportune condizioni al contorno.

Nel dettaglio, così come riportato nella Figura 2.3, 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;

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

– 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 dall'area interessata dal nuovo porto turistico previsto dal presente progetto, lungo la quale sono state imposte le forzanti di moto ondoso riportate in Tabella 2.1.

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.

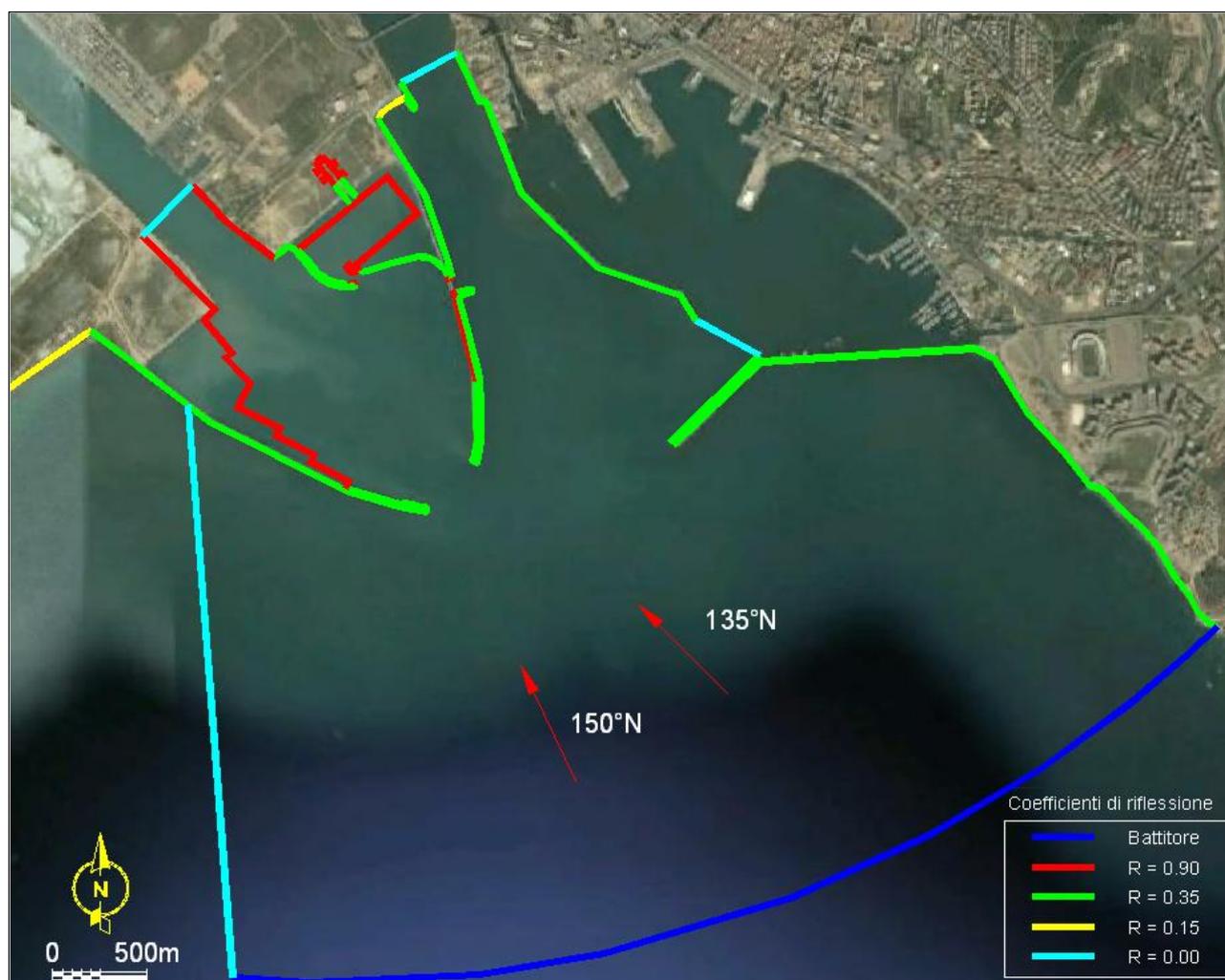


Figura 2.3 – Indicazione dei coefficienti di riflessione adottati per le simulazioni effettuate con il modello CGWAVE.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

2.4 Risultati delle simulazioni

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

Con quest'ultimo programma infatti sono state condotte diverse simulazioni con lo scopo di determinare l'agitazione ondosa all'interno del nuovo bacino protetto che caratterizza l'Avamposto Est e successivamente di verificare per lo stesso le condizioni di sicurezza necessarie alle imbarcazioni in fase di stazionamento e durante le manovre in fase di ingresso ed uscita dal porto.

Dalla Figura 2.4 alla Figura 2.11, è possibile verificare il campo d'onda, all'interno del porto di Cagliari e del nuovo Avamposto Est, conseguente a diversi stati di mare scelti per effettuare le simulazioni. La scala di rappresentazione dei valori dell'altezza d'onda (m) mostra come all'interno del nuovo bacino portuale le opere in progetto garantiscono livelli di agitazione ondosa residua adeguate e conseguentemente le dovute condizioni di sicurezza alle imbarcazioni che vi dovranno ormeggiare.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

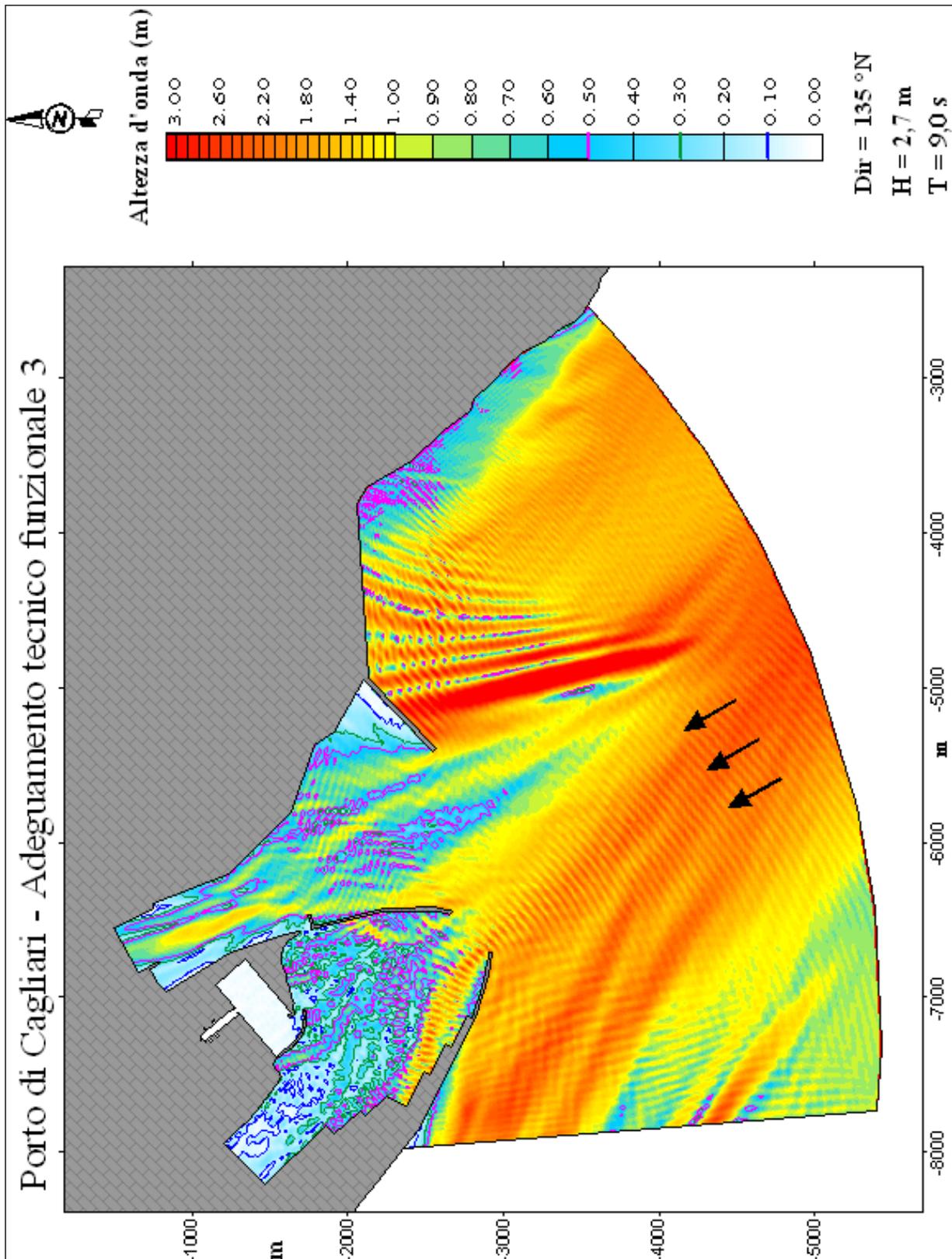


Figura 2.4 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=135°N; H =2.7 m; T=9 s).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

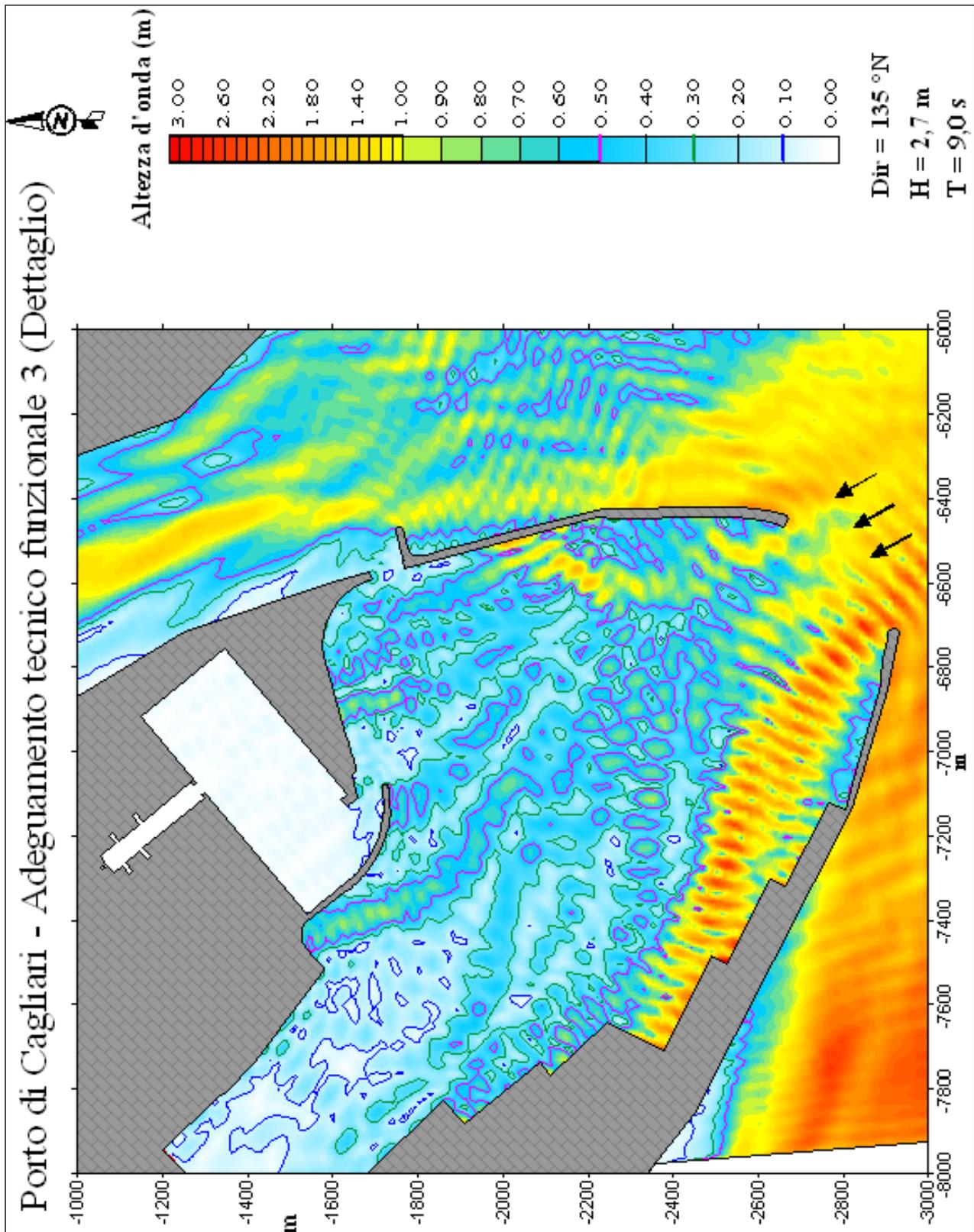


Figura 2.5 – Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=135°N;H=2.7 m; T=9 s).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

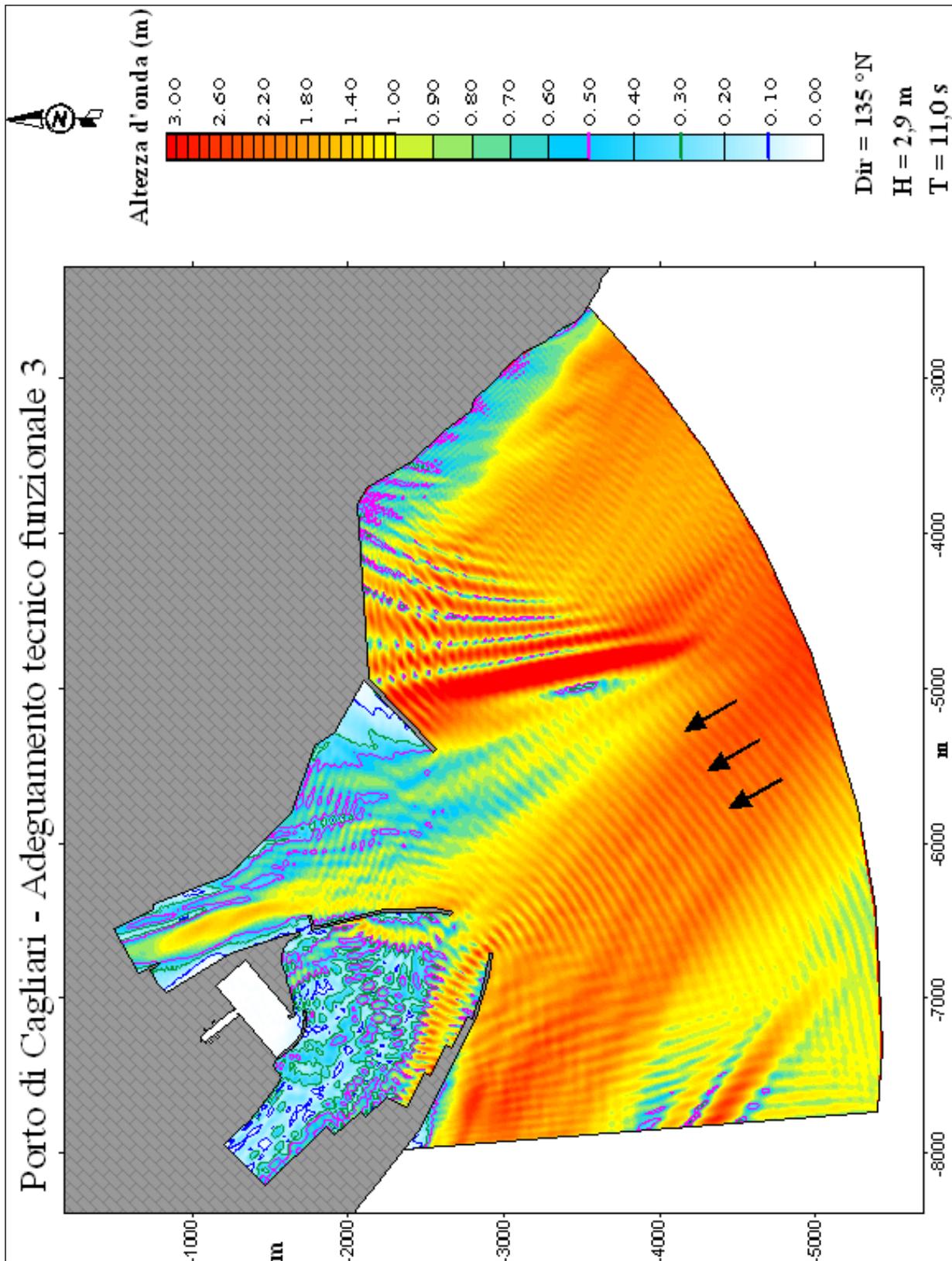


Figura 2.6 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=135°N; H=2.9 m; T=11 s).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

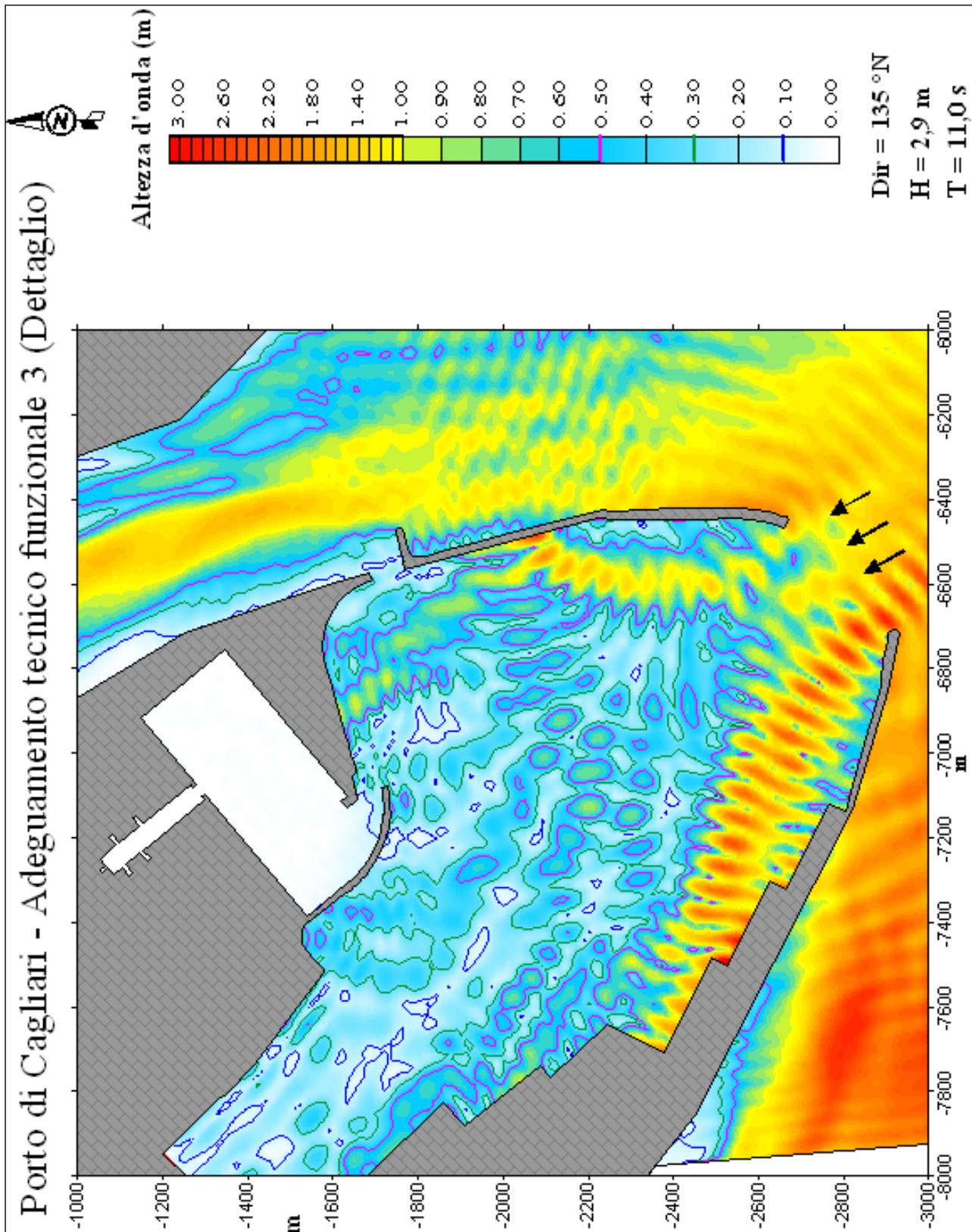


Figura 2.7 – Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=135°N; H=2.9 m; T=11 s).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

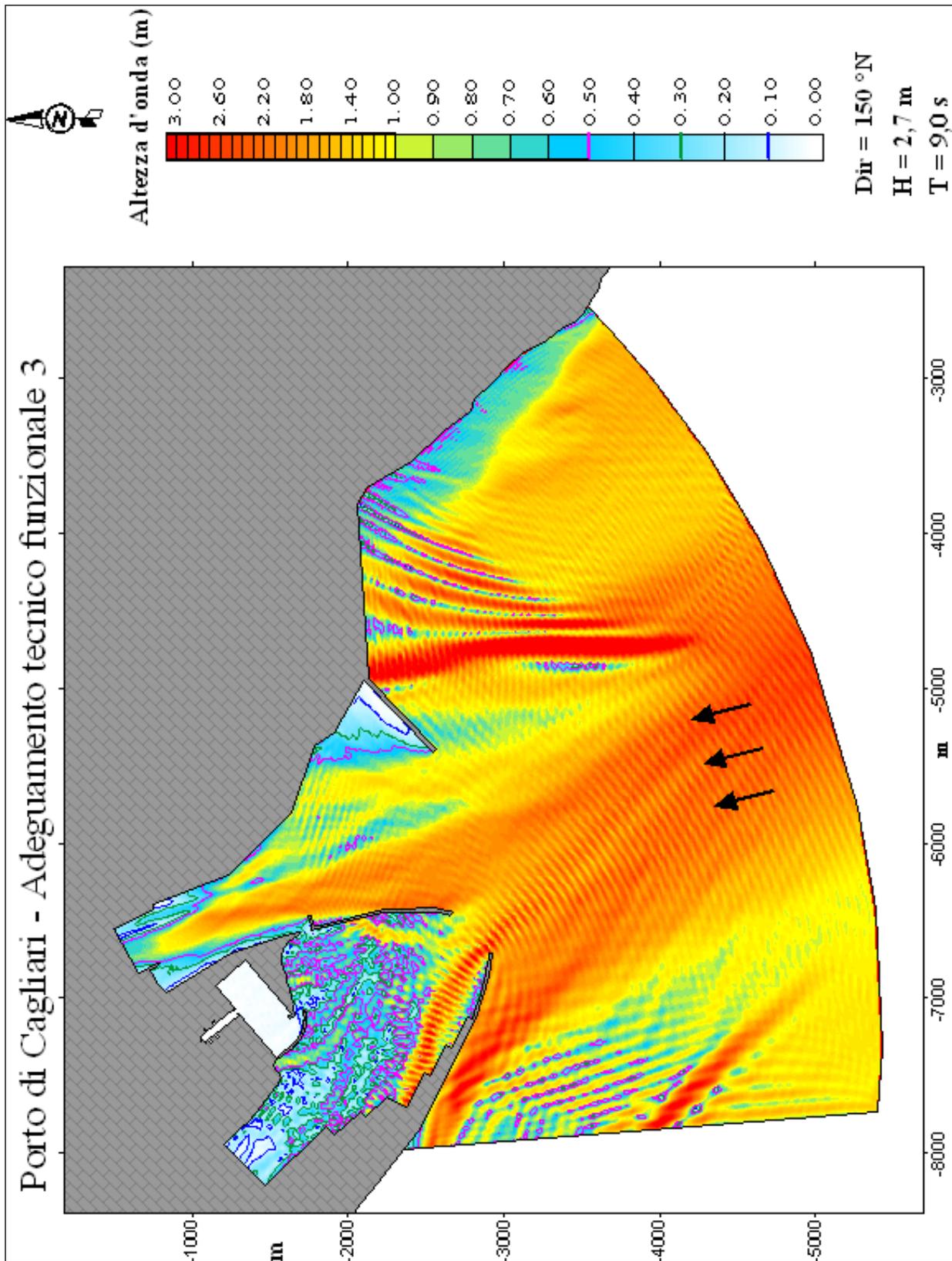


Figura 2.8 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H =2.7 m; T=9 s).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

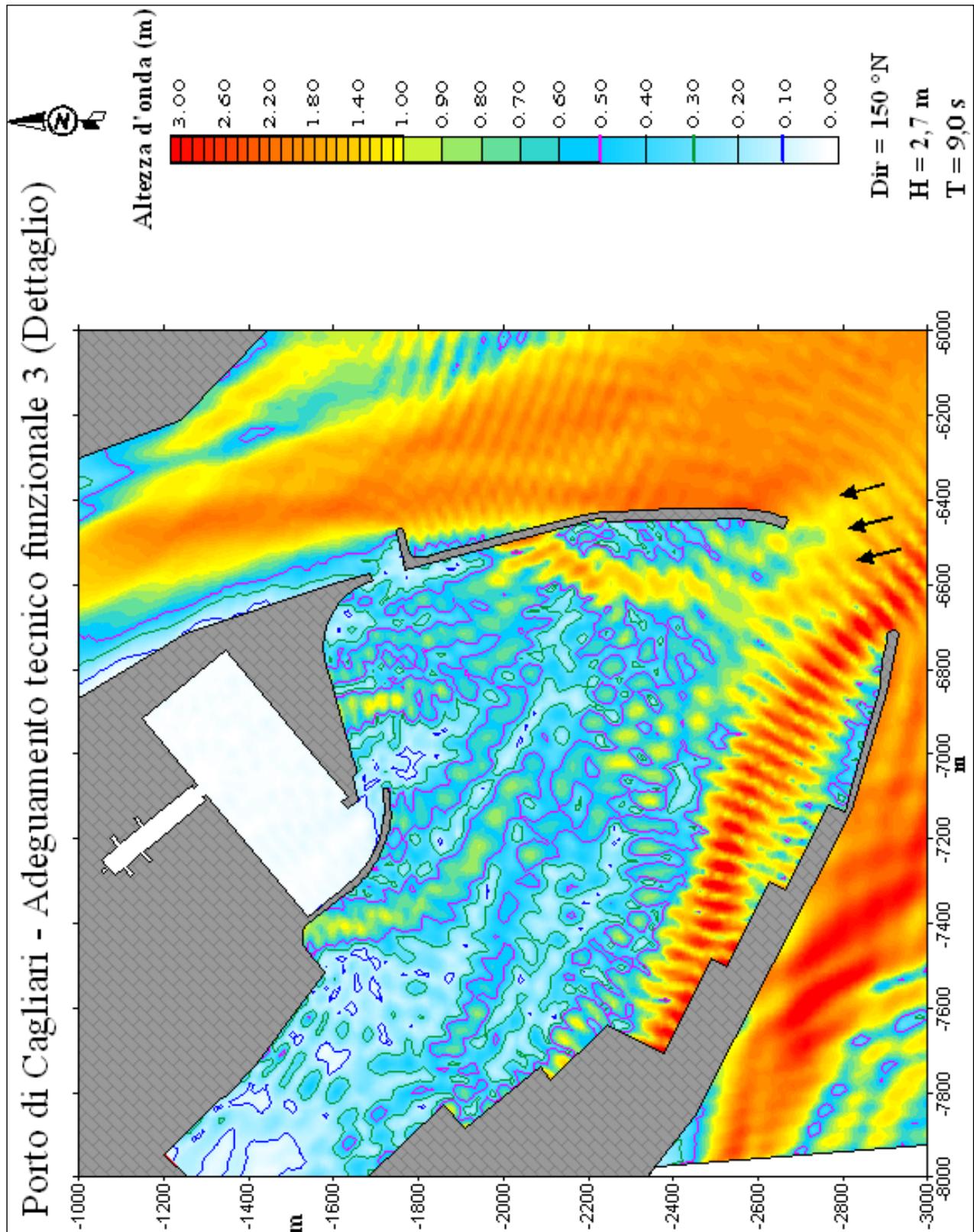


Figura 2.9 – Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N;H =2.7 m; T=9 s).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

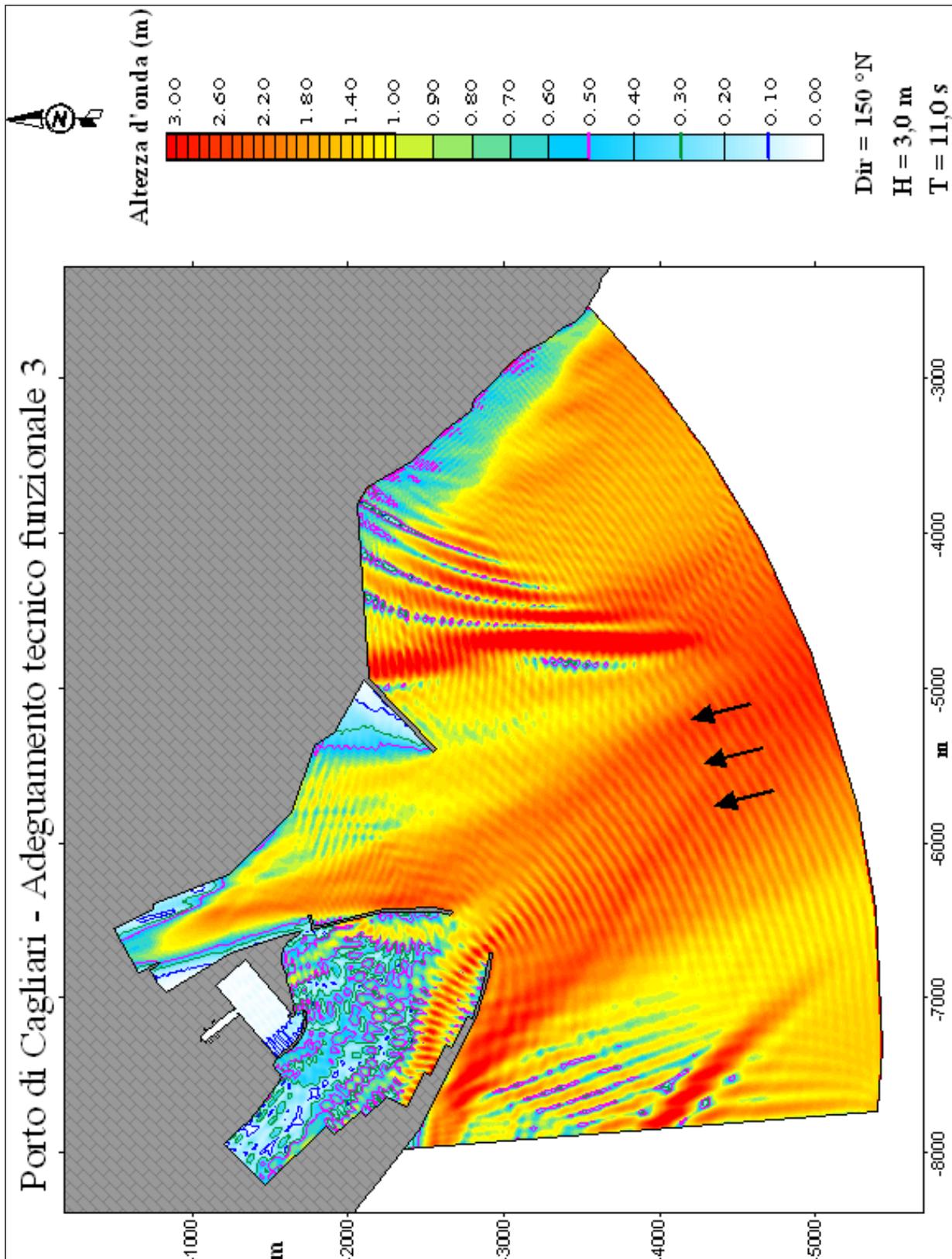


Figura 2.10 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H =3.0 m; T=11 s).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

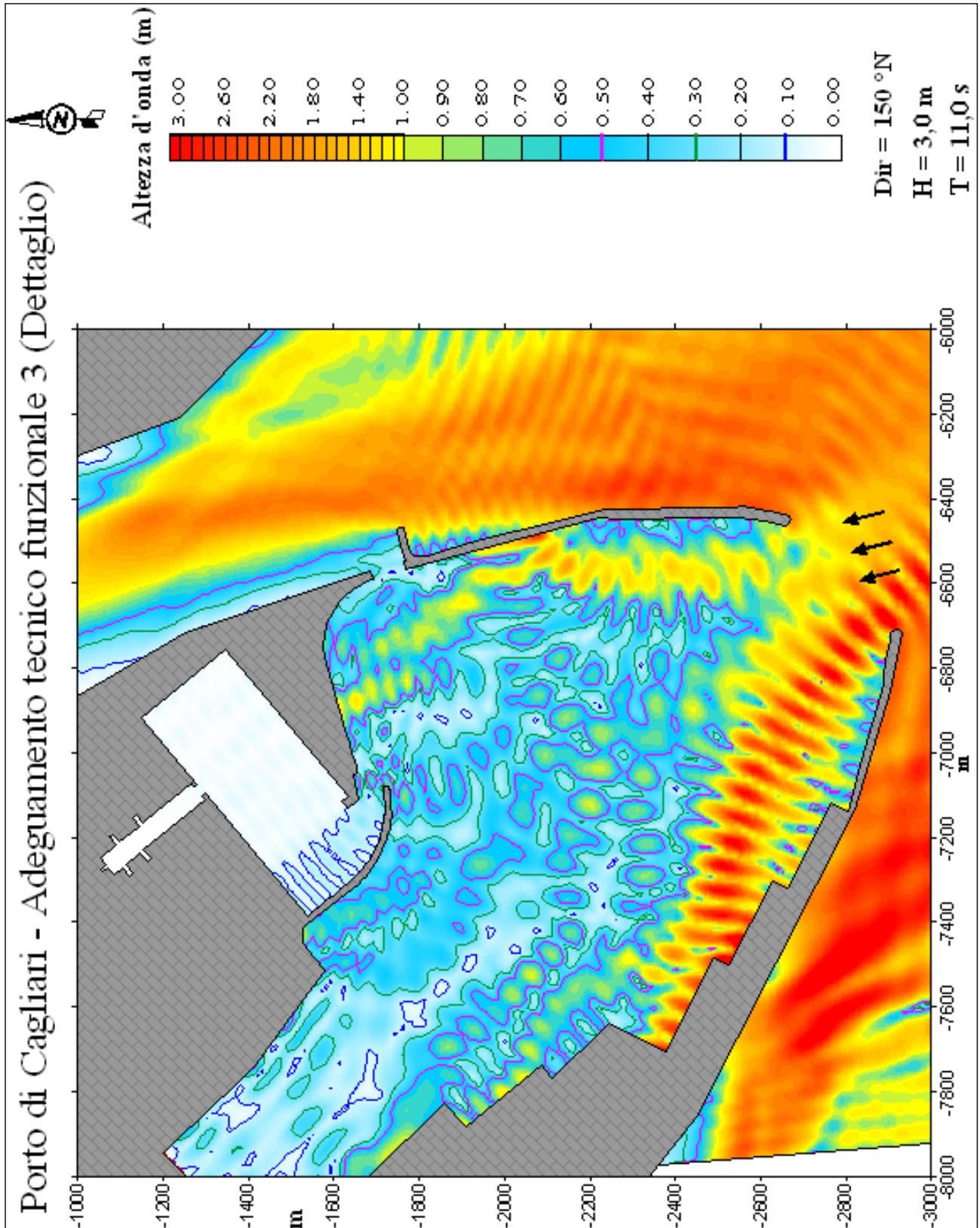


Figura 2.11 – Dettaglio agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=150°N; H=3.0 m; T=11 s).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

2.5 CONCLUSIONI

Dall'analisi dei risultati, ottenuti dall'applicazione del modello CGWAVE per la configurazione di progetto proposta per il nuovo bacino portuale in progetto, 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.

Nel modello numerico tutte le opere, che costituiscono il contorno bagnato della configurazione portuale in esame, sono state riprodotte utilizzando opportuni coefficienti di riflessione (Figura 2.3).

Esaminando in dettaglio i risultati ottenuti dalle diverse simulazioni si nota che la darsena di servizio del Distretto della cantieristica non risulta interessato da fenomeni di penetrazione del moto ondoso tali da comportare livelli di agitazione ondosa inadeguati per la sicurezza delle imbarcazioni che dovranno stazionarvi.

Infatti, in tutte le simulazioni effettuate, fatta eccezione per la zona che caratterizza l'imboccatura portuale, si ottengono, all'interno del nuovo bacino, valori dell'altezza d'onda residua non superiori a 0.10 m, ampiamente sufficienti per garantire le dovute condizioni di sicurezza all'interno della darsena.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

3 Circolazione idrica portuale

Per la verifica del campo idrodinamico che contraddistingue la darsena operativa del Distretto della cantieristica nel porto canale di Cagliari é stato esaminato lo scenario che prevede come forzanti idrodinamiche del sistema, in via cautelativa, le variazioni di livello dovute alla sola marea astronomica.

I risultati delle simulazioni condotte con il codice di calcolo numerico SMS hanno permesso di verificare le condizioni di circolazione idrodinamica nello specchio liquido preso in esame.

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

3.1 Applicazione del sistema di modellazione SMS

I modelli di calcolo impiegati per il presente studio della circolazione idrica portuale appartengono al sistema di modellazione SMS che consente di simulare i fenomeni idrodinamici che si verificano nel flusso di masse d'acqua superficiali tramite il codice di calcolo agli elementi finiti RMA-2, descritto in appendice.

Il programma SMS, operativo in ambiente Windows, è stato utilizzato anche per le procedure di post-processor relative alle analisi e realizzazioni dei grafici bidimensionali raffiguranti i risultati delle elaborazioni.

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 è stato discretizzato lo specchio liquido da simulare. Successivamente, all'interno del modello di calcolo sono state definite, lungo delle linee che delimitano le imboccature portuali e che rappresentano il mare aperto, le condizioni idrodinamiche al contorno in termini di variazioni di livello marino.

Per la configurazione presa in esame è stato quindi possibile, attraverso l'applicazione del modello SMS con un passo temporale di 30 minuti, studiare il campo idrodinamico, indotto dall'azione della sola marea astronomica, all'interno del nuovo bacino portuale previsto per l'Avamposto Est del porto canale di Cagliari.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

3.2 Discretizzazione dello specchio liquido

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

A tal proposito (Figura 3.1), si è fatto riferimento alle planimetrie di progetto sulle quali vengono riportate sia le variazioni planimetriche relative al nuovo schema portuale che le quote dei fondali.

Nel dettaglio, il campo fluido è stato suddiviso nel modo seguente: griglia di calcolo costituita da 2554 elementi (di cui 602 triangolari e 1952 quadrilateri), per un totale di 7497 nodi di calcolo (Figura 3.2);

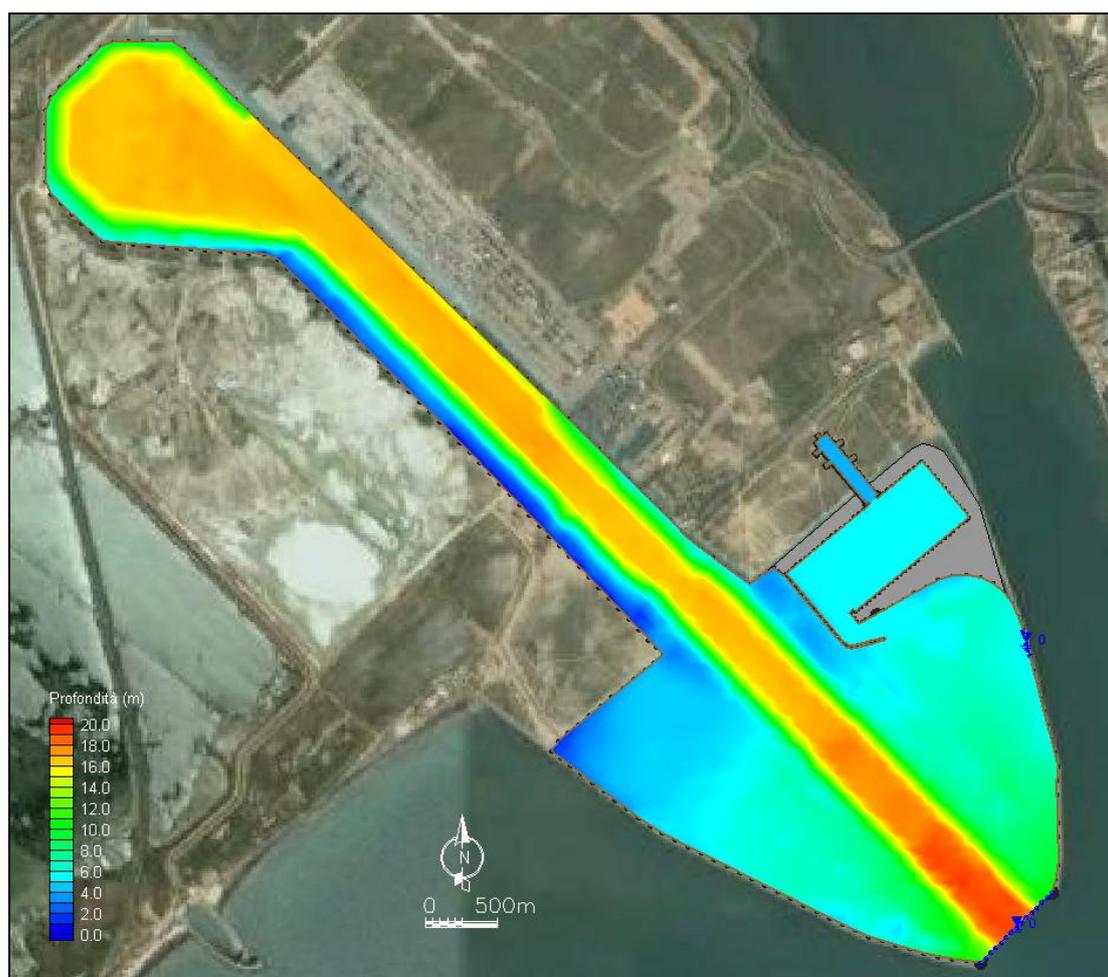


Figura 3.1 – Planimetria e batimetria di riferimento.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR



Figura 3.2 - Discretizzazione dello specchio liquido.

3.3 Definizione delle condizioni al contorno

Per la configurazione di progetto presa in esame nel presente studio, al fine di poter determinare il campo idrodinamico, indotto dalle oscillazioni di marea, all'interno del nuovo bacino portuale, è stato necessario definire ed impostare all'interno del modello matematico SMS le opportune condizioni al contorno.

Nel dettaglio, lungo due linee di contorno, delimitanti le imboccature portuali e che rappresenta le condizioni in mare aperto, sono state imposte le oscillazioni di marea in termini di variazioni del livello idrico.

Per quanto riguarda le oscillazioni del livello idrico, i dati imposti come condizioni al contorno, con un intervallo temporale tra i dati di mezz'ora, si riferiscono ad una marea di tipo semi-

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

diurno con altezza pari a 0.2 m, per un intervallo temporale di 120 ore e 10 cicli di marea (Figura 3.3).

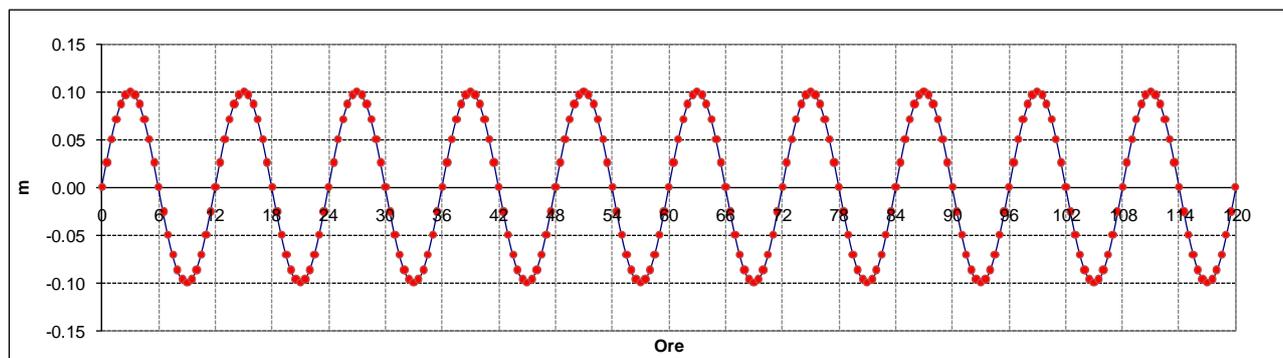


Figura 3.3 – Variazioni di livello considerate come condizioni al contorno per il modello SMS

3.4 Risultati delle simulazioni idrodinamiche

Completata la fase di discretizzazione del sistema liquido 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 programma di idrodinamica RMA-2 agli elementi finiti.

Con quest'ultimo programma è stata condotta una simulazione con lo scopo di determinare il campo idrodinamico dovuto alle sole variazioni della marea astronomica all'interno del nuovo bacino portuale preso in esame.

Dalla Figura 3.6 alla Figura 3.12, con riferimento ai soli cicli di marea imposti come condizioni al contorno (vedi Figura 3.3), è possibile verificare il campo di velocità all'interno dell'intero porto di Cagliari che si registra nelle varie fasi di marea; la scala di rappresentazione delle velocità (m/s) mostra che per le zone più interne alla darsena prevista dal presente progetto definitivo, con particolare riferimento al canale interno, la circolazione idrica dovuta alla sola marea astronomica ha una scarsa intensità (si determinano velocità inferiori a 0.001 m/s). Infatti, le condizioni idrodinamiche ottenute in queste simulazioni lasciano supporre livelli di qualità delle acque al limite dell'accettabilità, soprattutto nei periodi estivi, caratterizzati da temperature medie elevate e correnti litoranee basse, quando risultano esasperati i cicli biologici dei micro-organismi algali.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

Per ovviare a tale problema è stata condotta un'ulteriore simulazione considerando un appropriato sistema di miscelazione forzata in grado di favorire la circolazione nelle aree più interne del nuovo bacino portuale in esame.

Nel dettaglio, in seguito a diverse considerazioni di carattere tecnico effettuate sulla fattibilità di tale impianto ed alla luce dei risultati ottenuti dalle diverse simulazioni condotte considerando la sola forzante di marea astronomica, sono state opportunamente scelte le caratteristiche ed il posizionamento dei miscelatori, schematicamente riportate nella seguente Figura 3.4.



Figura 3.4 – Ubicazione e caratteristiche dei miscelatori da utilizzare all'interno del nuovo bacino portuale in progetto.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

Per tale impianto sono state quindi simulate opportune condizioni di circolazione forzata (Figura 3.13÷Figura 3.21), nelle fasi di marea calante (riflusso), così come illustrato nella Figura 3.5, al fine di verificare eventuali miglioramenti sul campo di velocità anche nelle aree marginali al bacino preso in esame.

Si precisa che per tutte le simulazioni effettuate non si è tenuto conto né della presenza di correnti litoranee dovute al moto ondoso, né dell'effetto del vento, forzanti che comunque contribuiscono alla movimentazione delle acque superficiali favorendo quindi la circolazione all'interno di un bacino portuale.

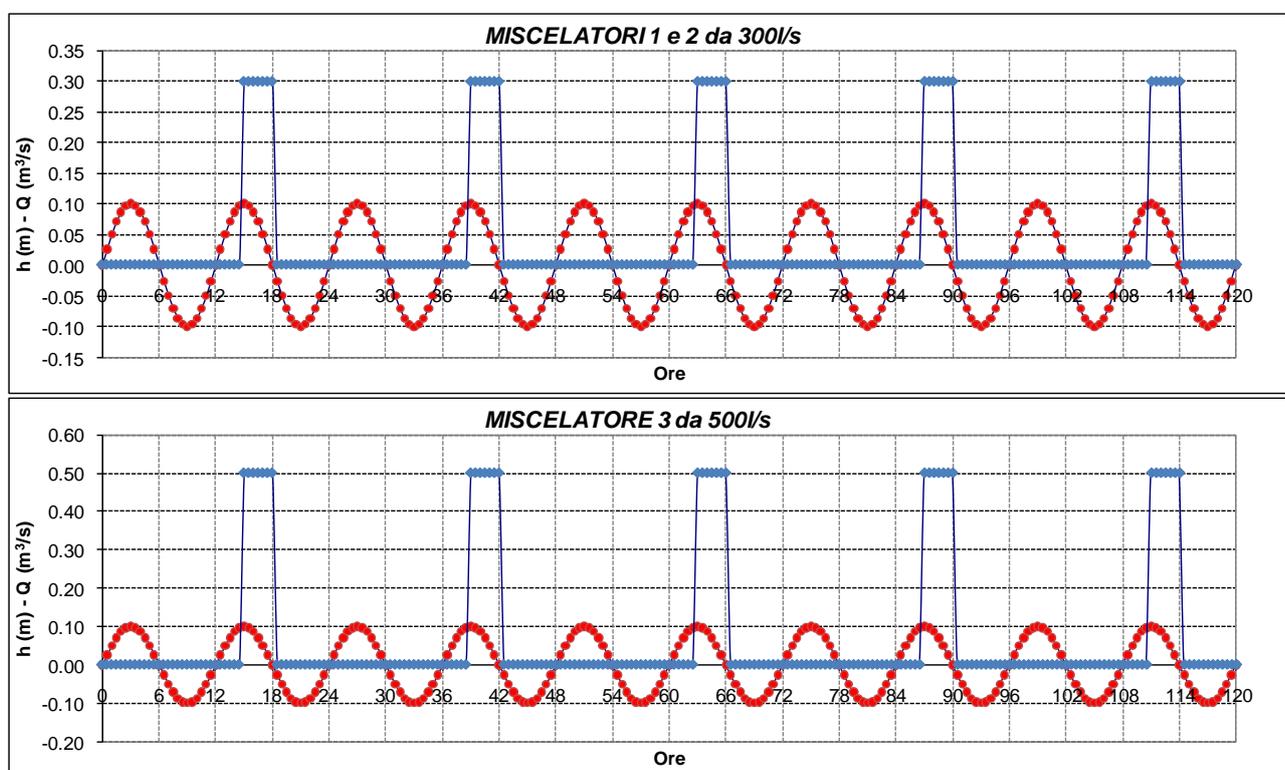


Figura 3.5 – andamento temporale dei livelli di marea e delle portate che caratterizzano i miscelatori impiegati nel nuovo bacino portuale simulato.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

CAMPO IDRODINAMICO INDOTTO DALLA SOLA MAREA ASTRONOMICA



Figura 3.6 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 3.00 (inversione del flusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

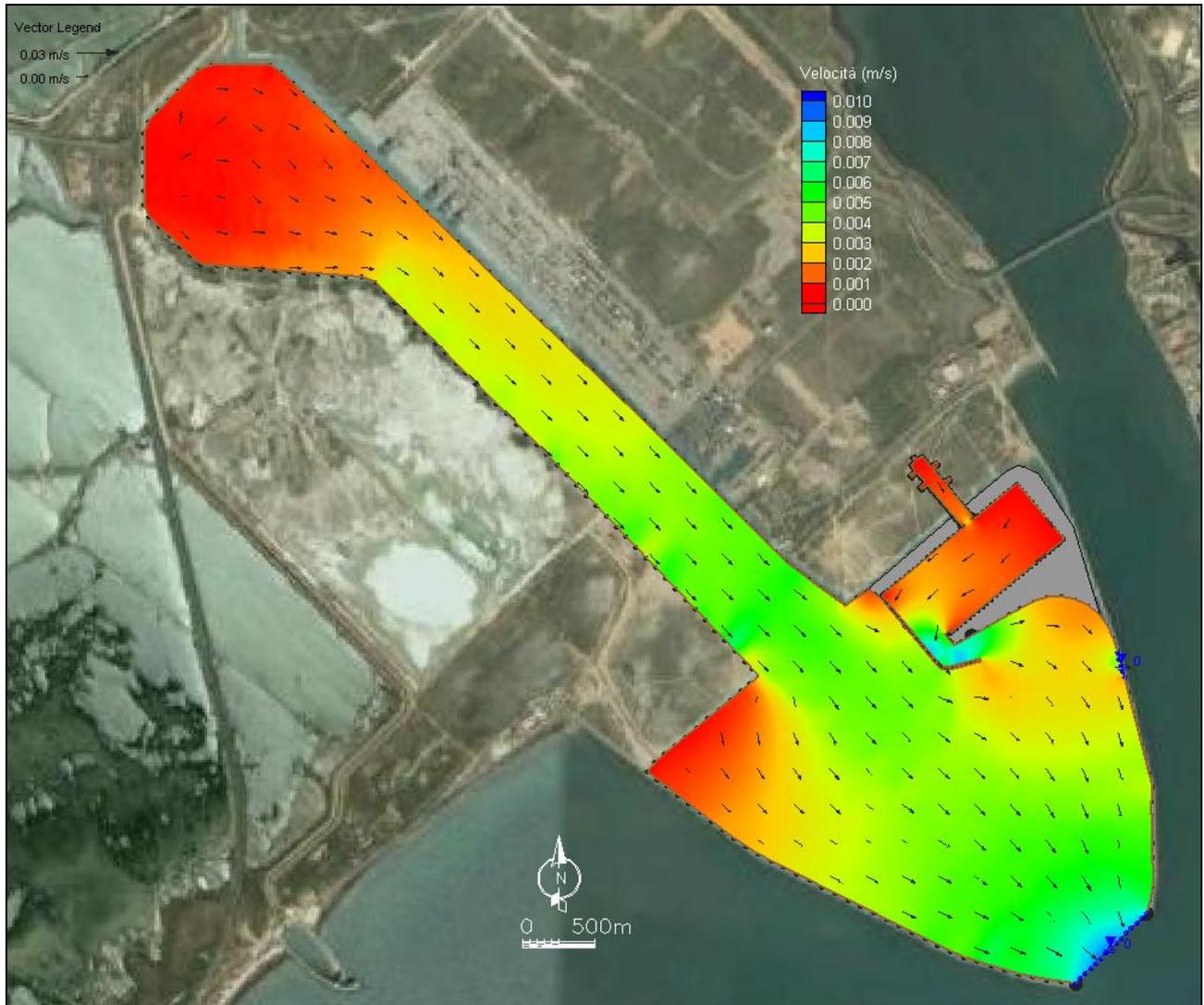


Figura 3.7 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 6.00 (fase di riflusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

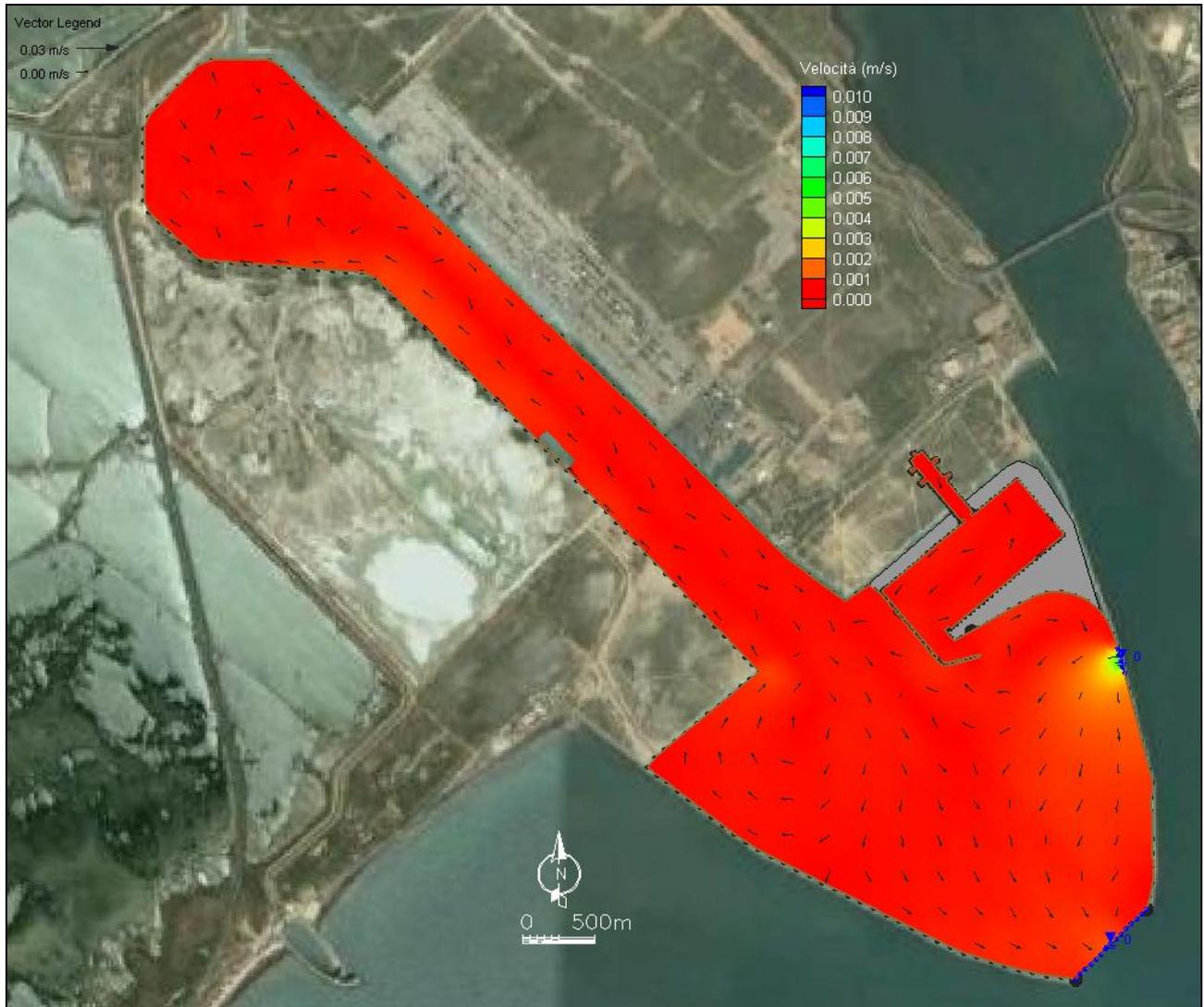


Figura 3.8 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 9.00 (inversione del flusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

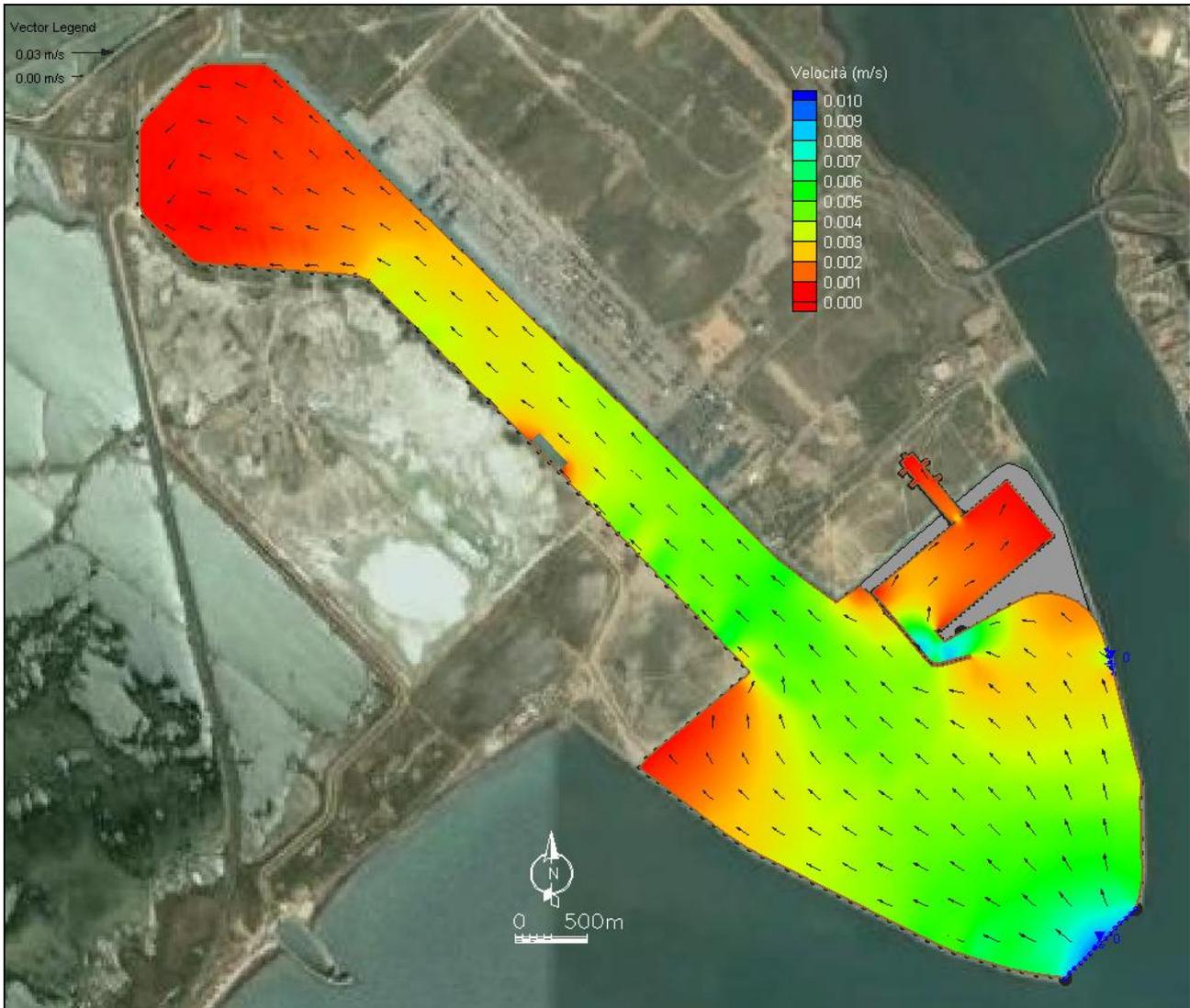


Figura 3.9 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 12.00 (fase di flusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

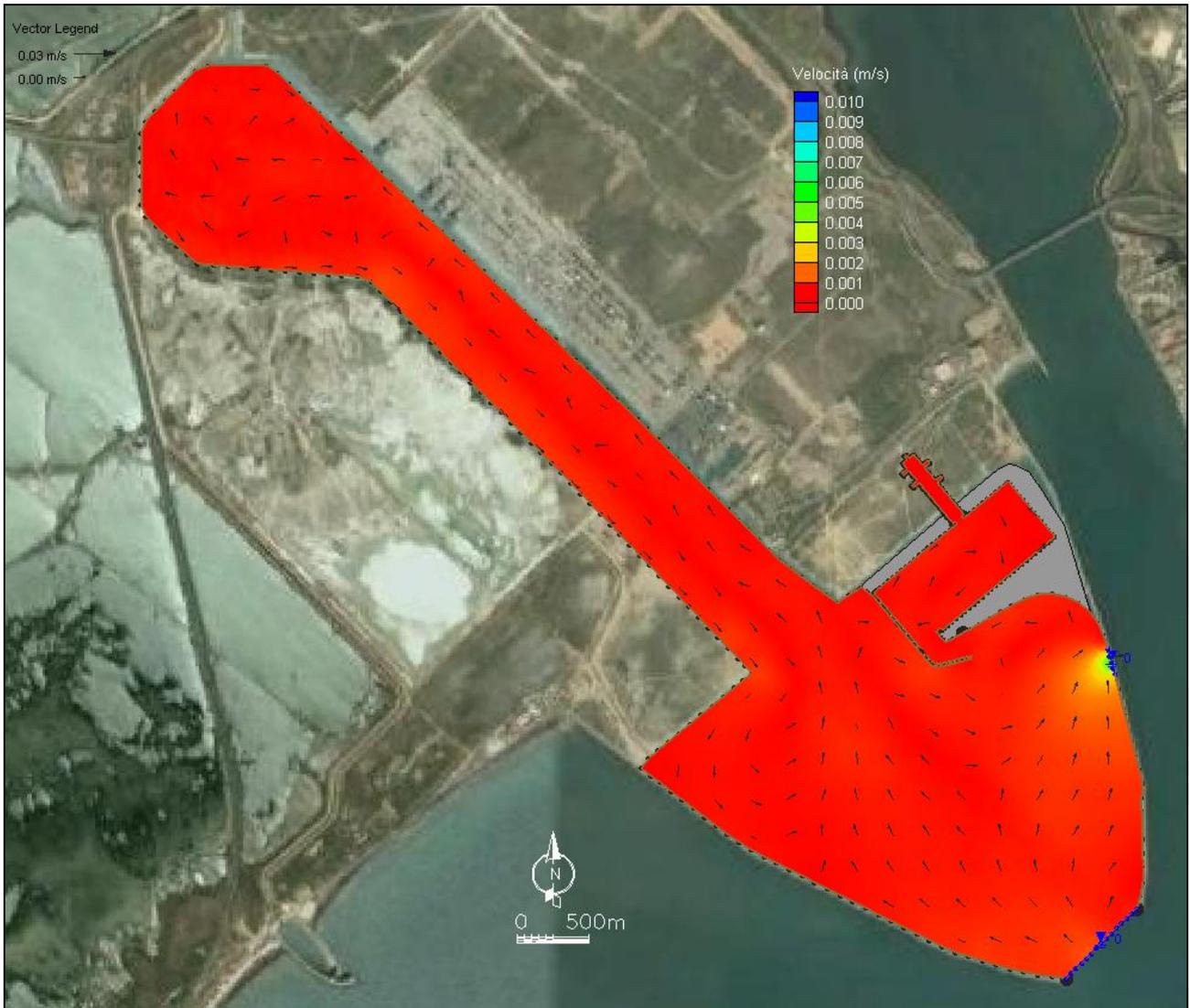


Figura 3.10 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 15.00 (inversione del flusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

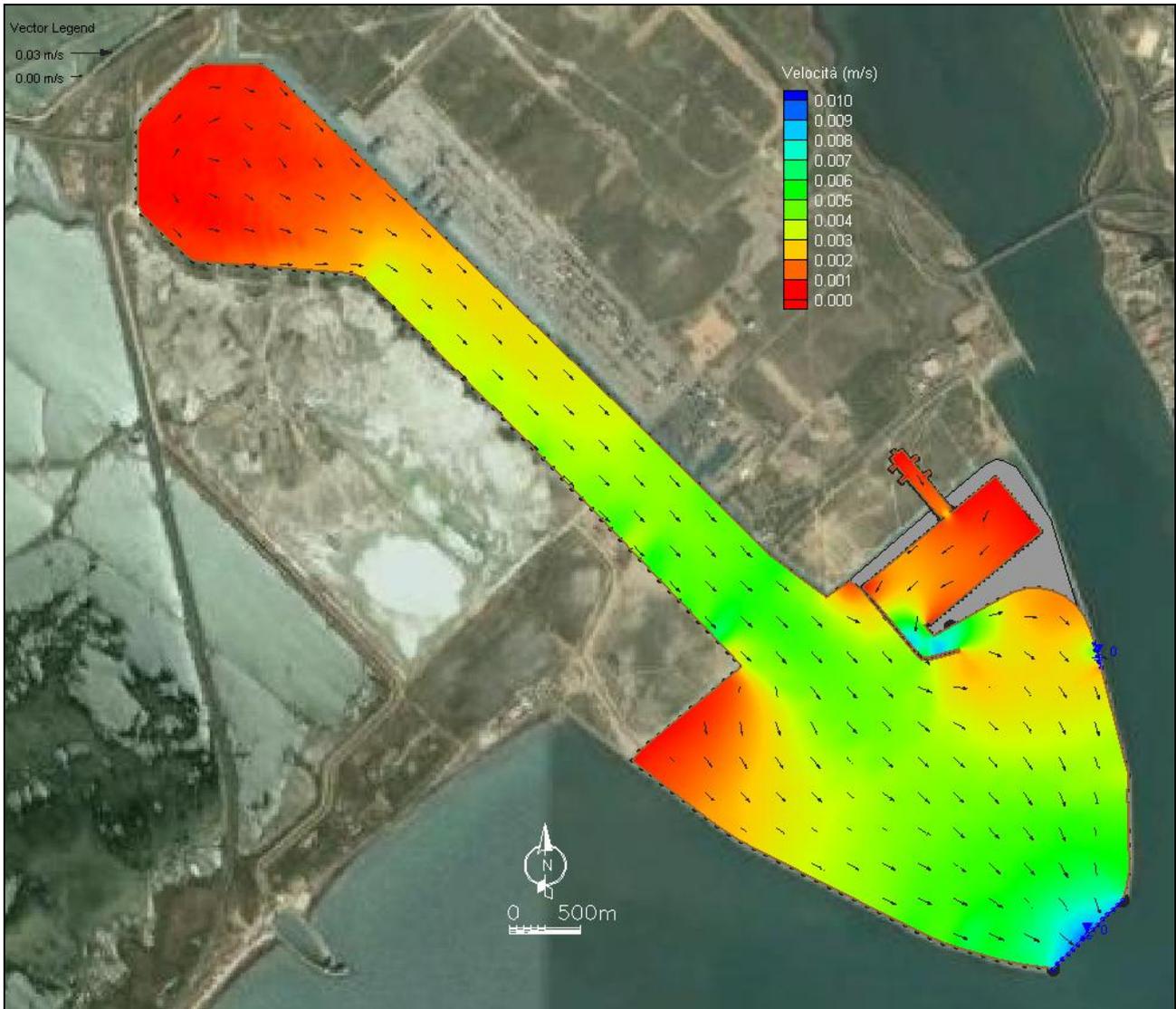


Figura 3.11 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 18.00 (fase di riflusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR



Figura 3.12 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 21.00 (inversione del flusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

CAMPO IDRODINAMICO INDOTTO DALLA MAREA ASTRONOMICA E DA UN IMPIANTO DI MISCELAZIONE OPPORTUNAMENTE DIMENSIONATO.

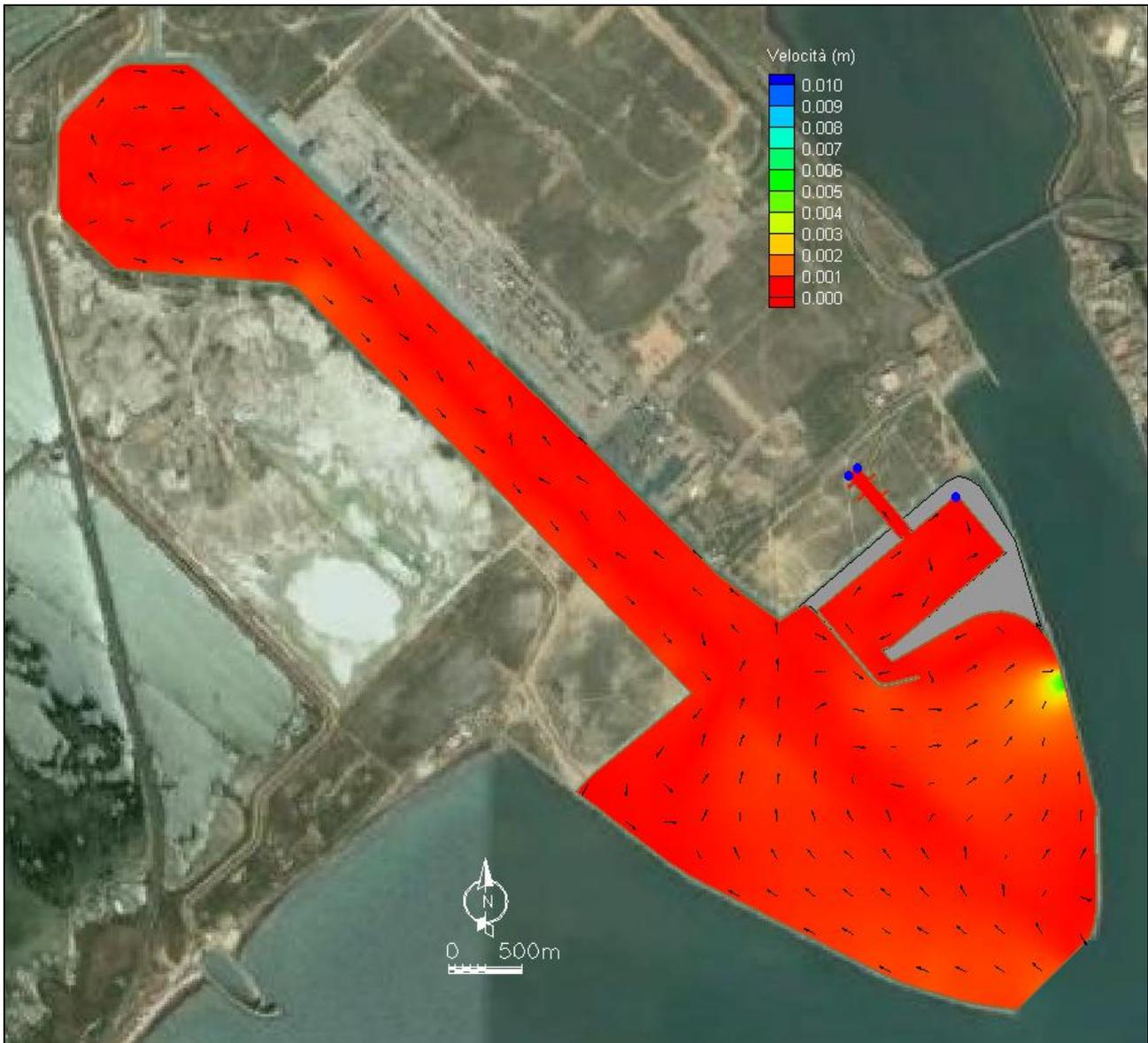


Figura 3.13 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 3.00 (inversione del flusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

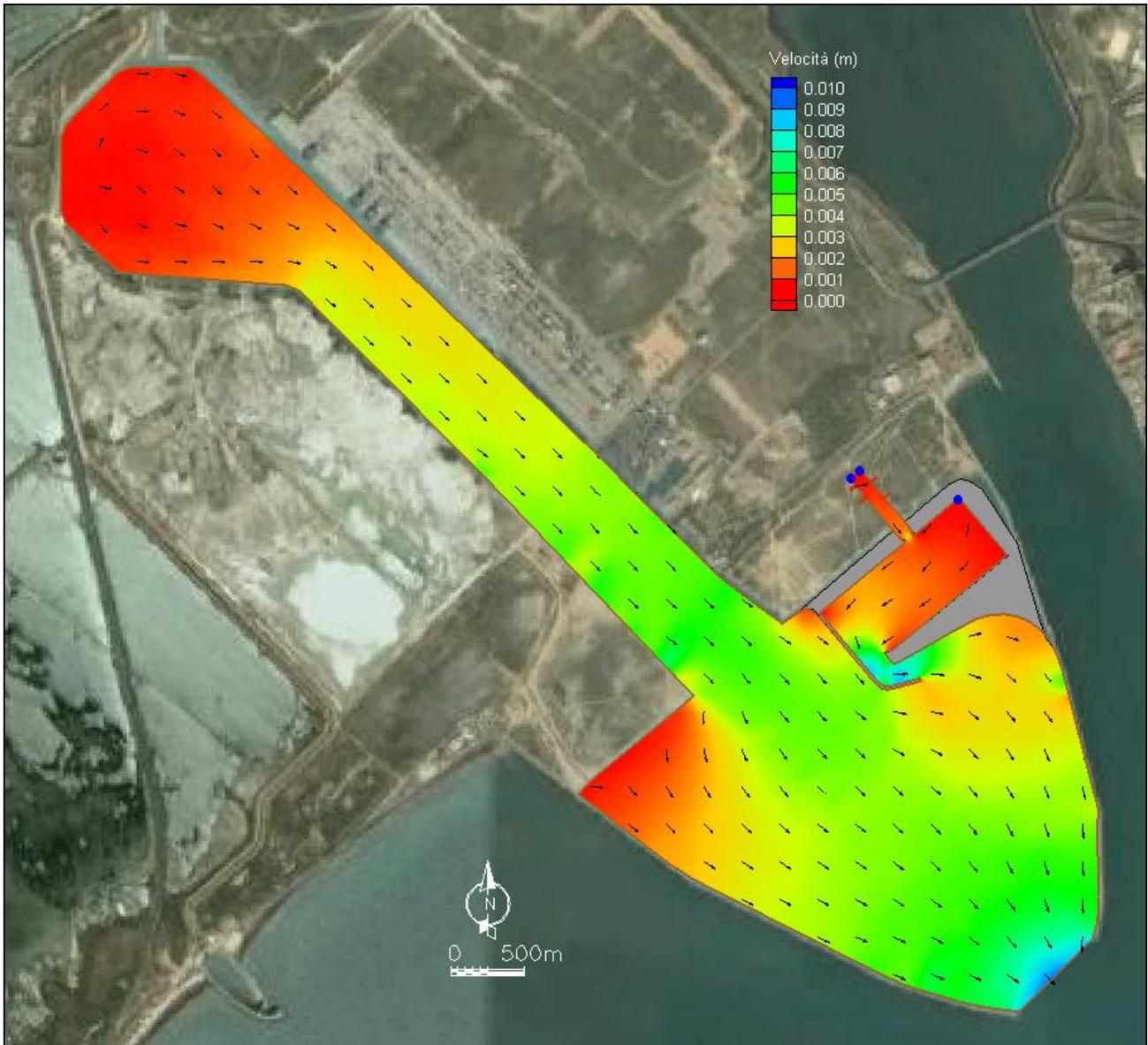


Figura 3.14 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 6.00 (fase di riflusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

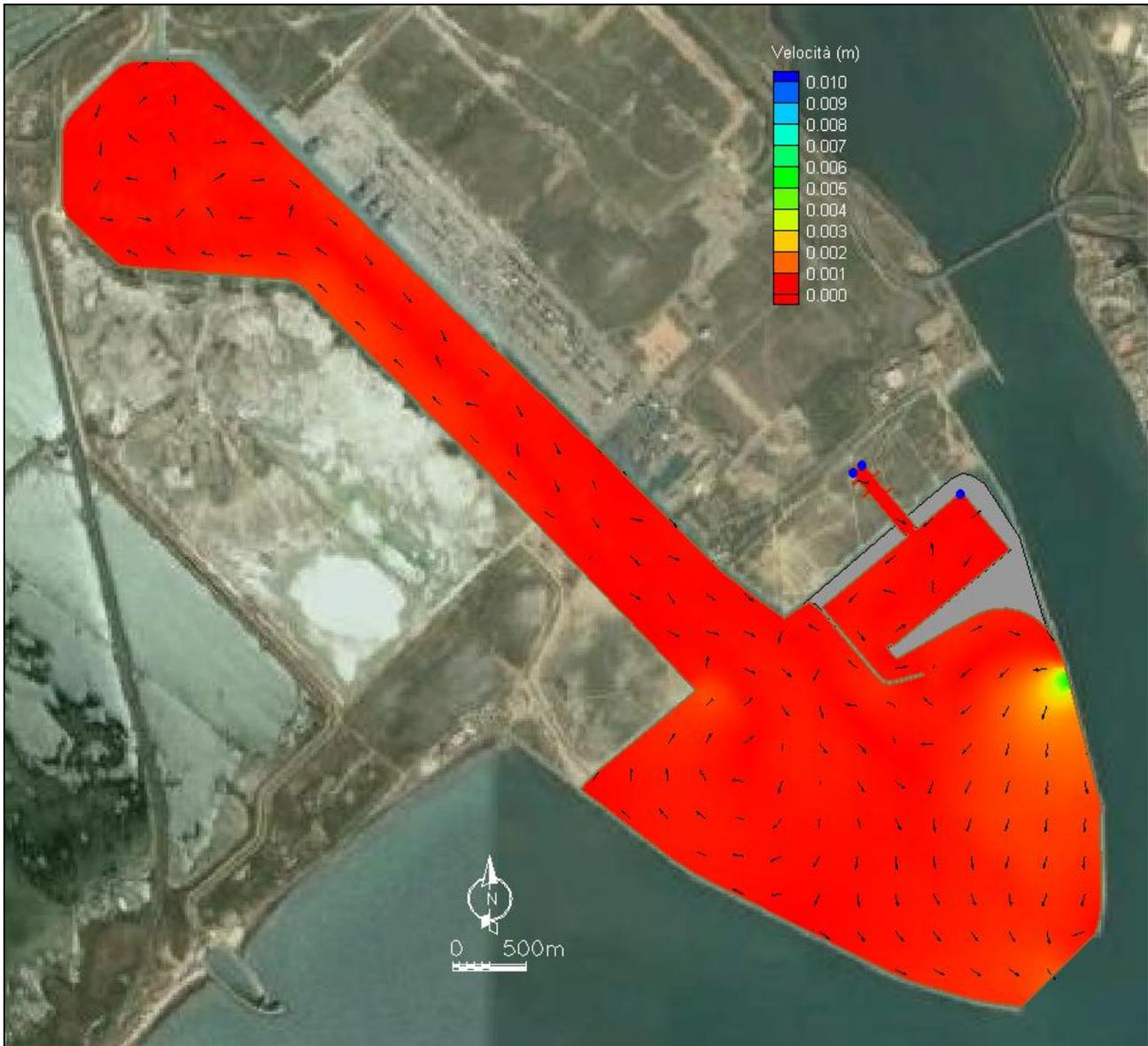


Figura 3.15 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 9.00 (inversione del flusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

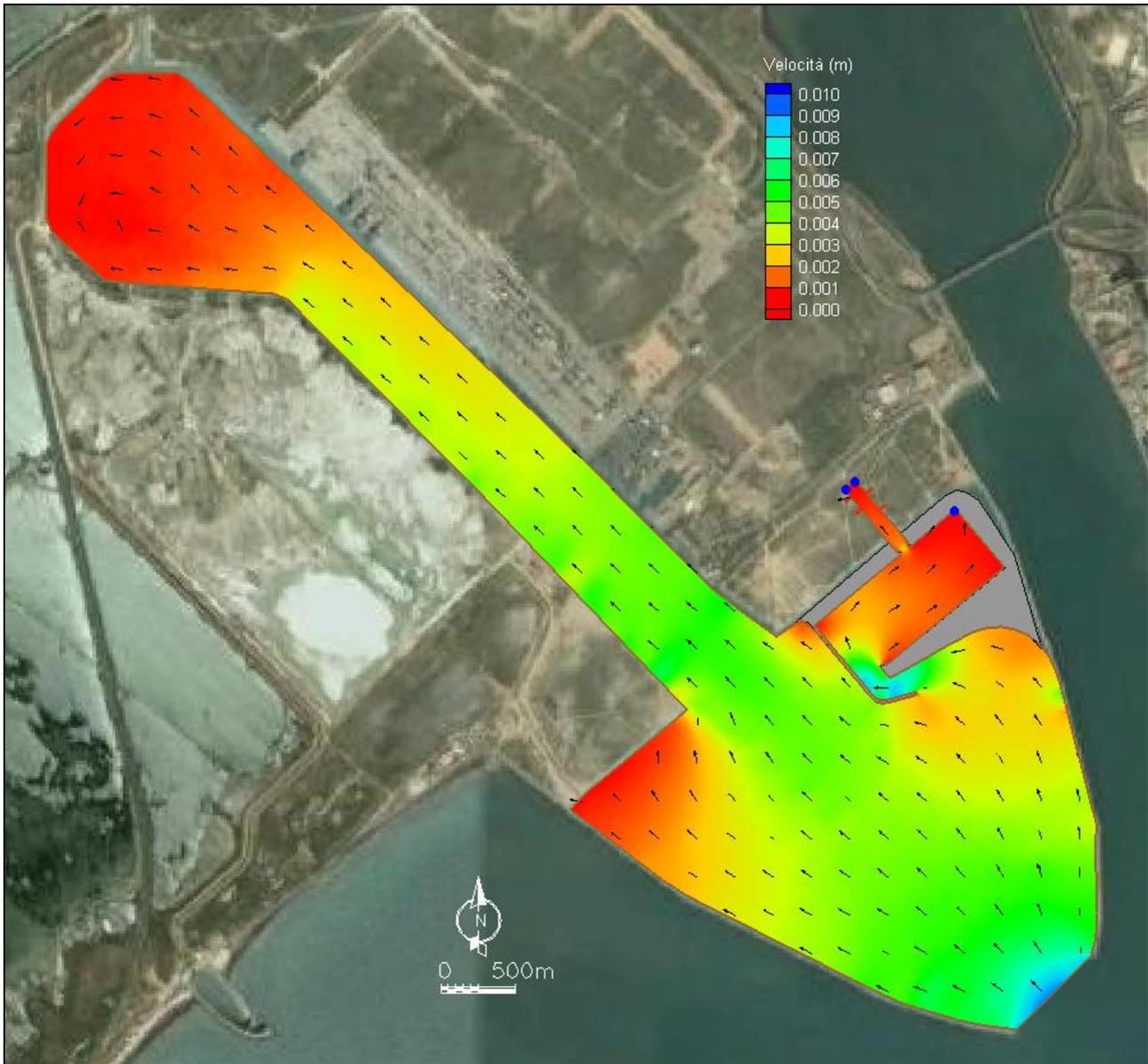


Figura 3.16 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 12.00 (fase di flusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

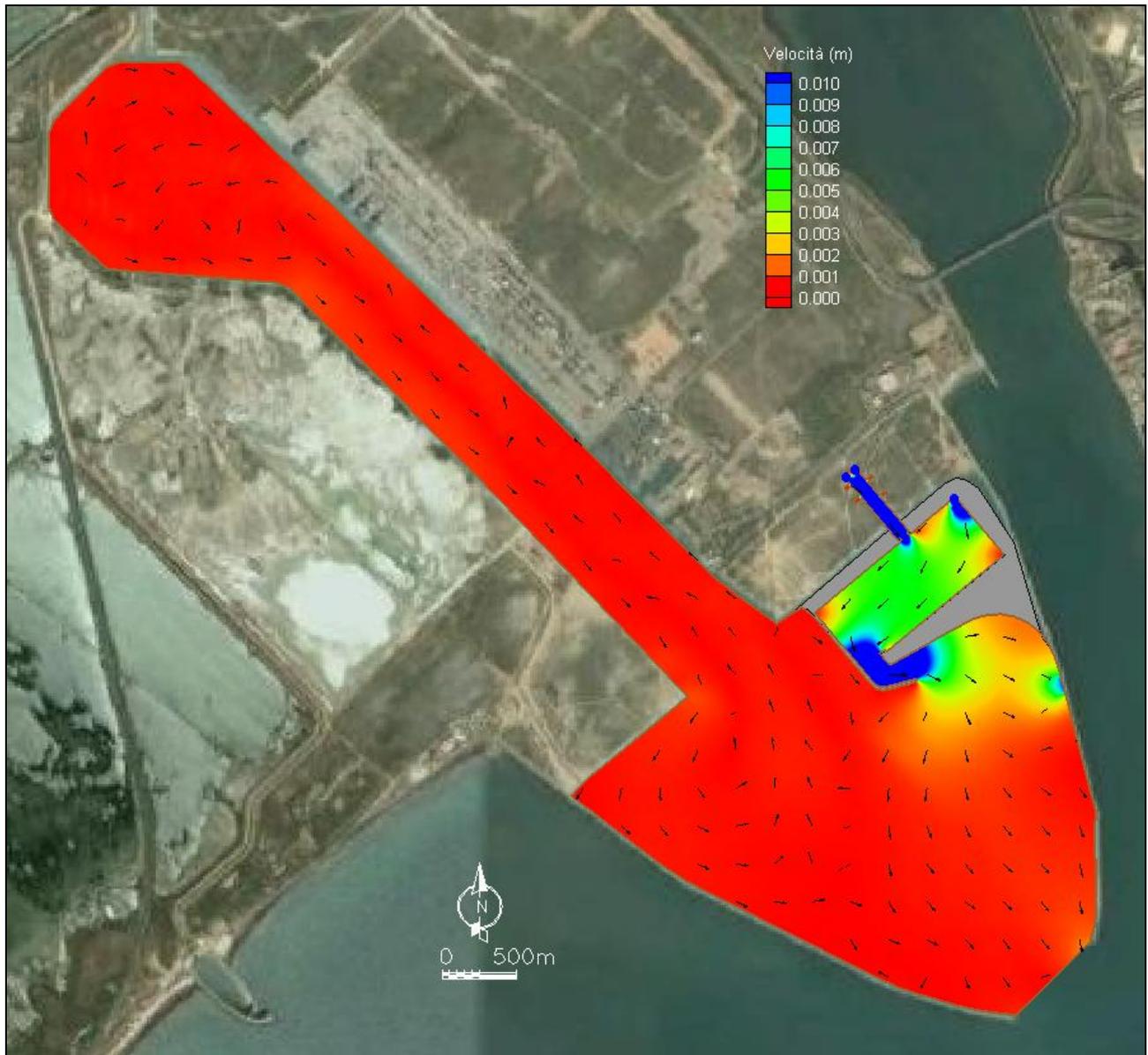


Figura 3.17 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla marea astronomica e dall’impianto di circolazione forzata alle ore 15.00 (attivazione delle pompe in fase di riflusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

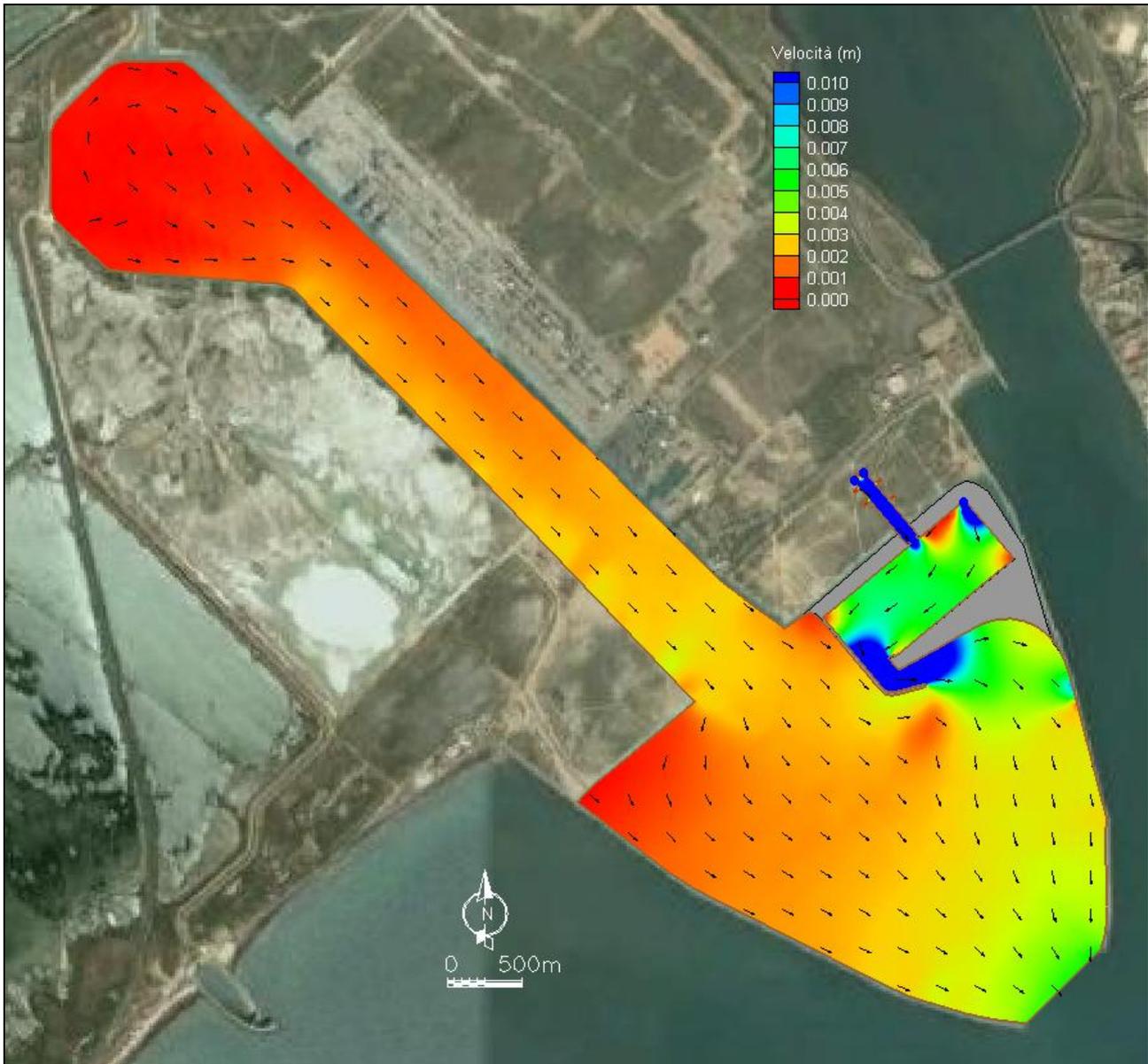


Figura 3.18 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla marea astronomica e dall’impianto di pompaggio alle ore 16.00 (pompe attive da un’ora in fase di riflusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

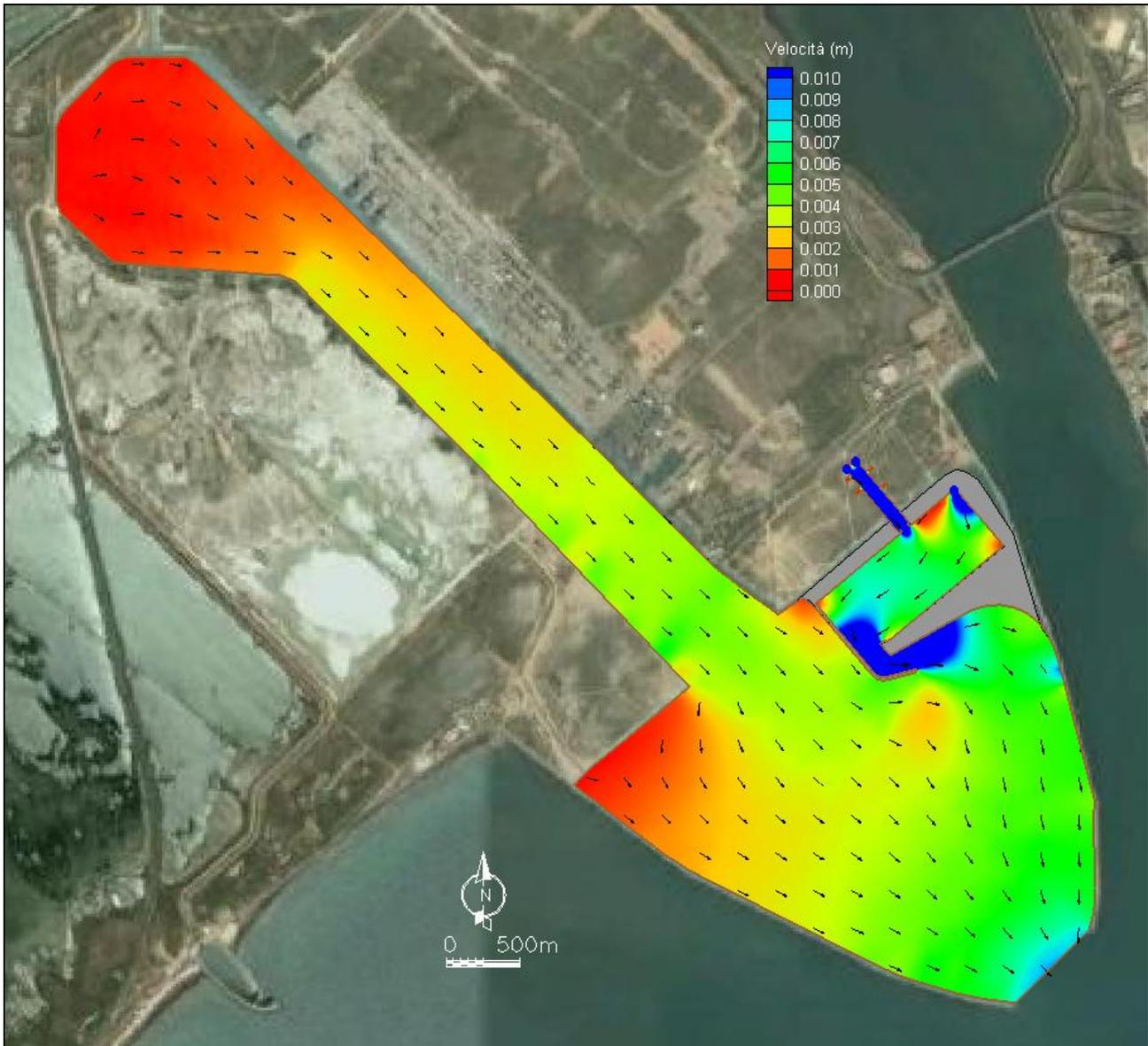


Figura 3.19 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla marea astronomica e dall’impianto di pompaggio alle ore 17.00 (pompe attive da due ore in fase di riflusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

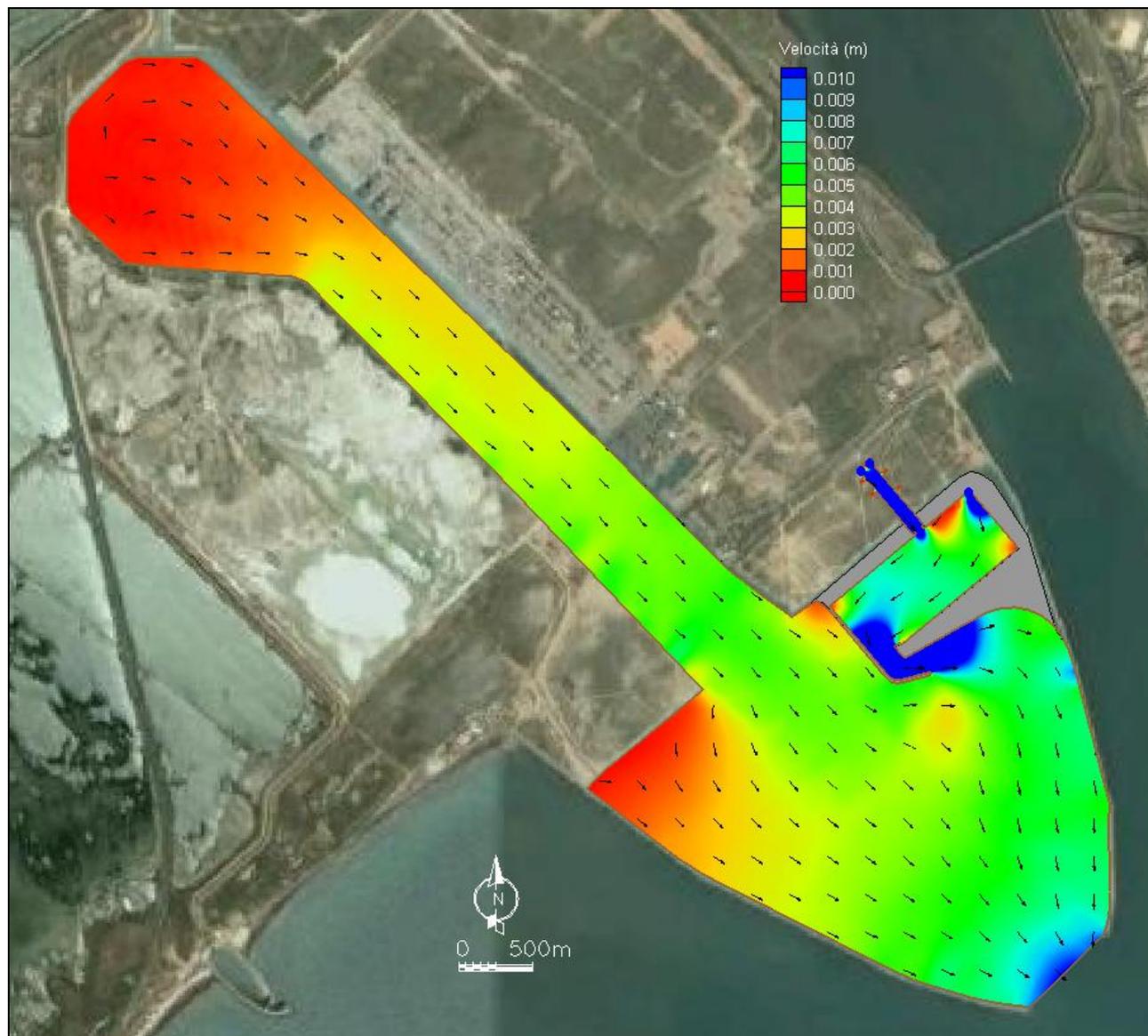


Figura 3.20 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla marea astronomica e dall’impianto di pompaggio alle ore 18.00 (pompe attive da due ore in fase di riflusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE	Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	10	015	DRM	006	-1	MAR

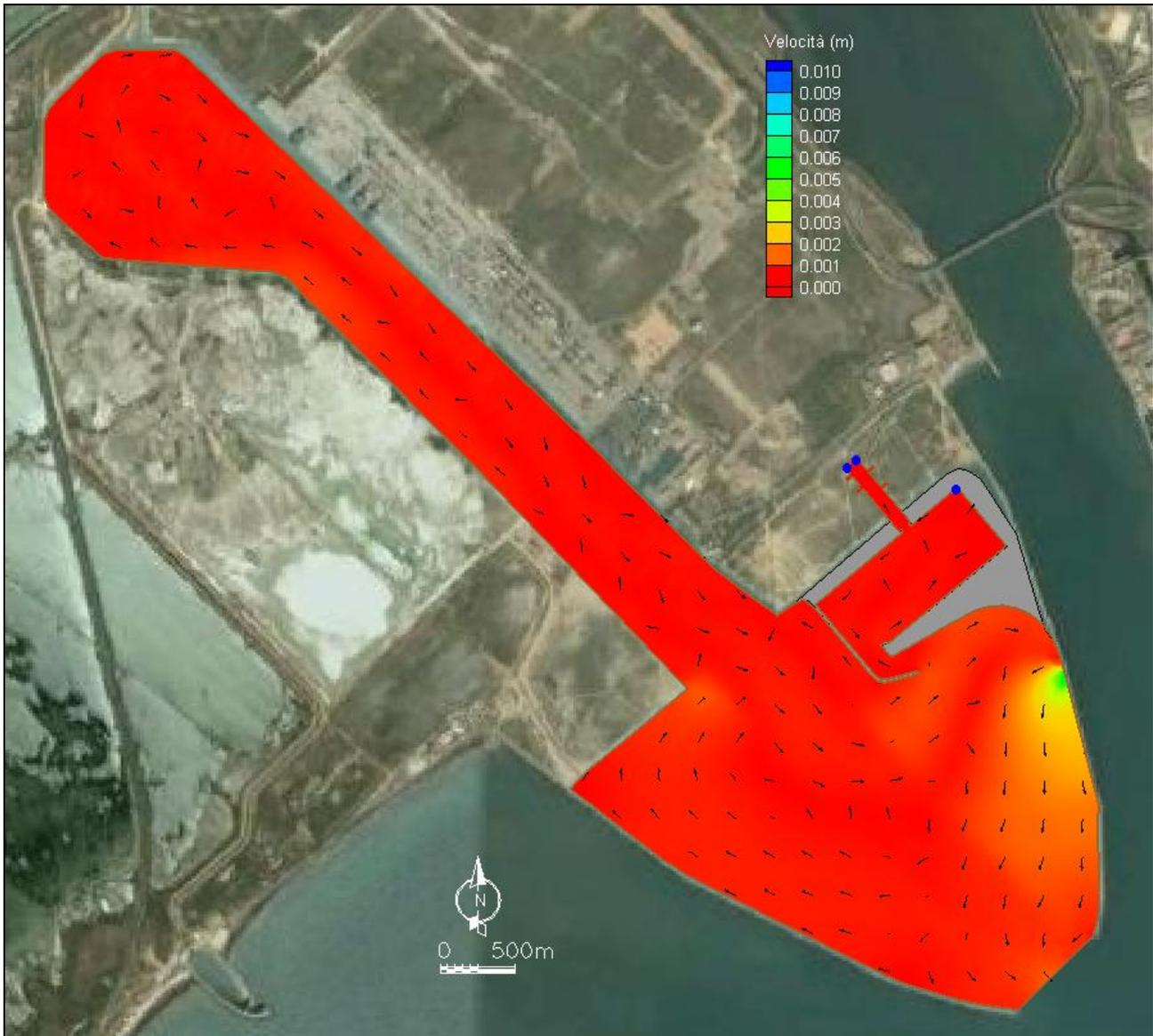


Figura 3.21 – Particolare del campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica alle ore 21.00 (inversione del flusso).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

3.5 Conclusioni

I risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate considerando, per lo schema previsto per la darsena operativa del Distretto della cantieristica, le variazioni di livello dovute alla sola marea astronomica, hanno mostrato che nelle aree più interne, ossia maggiormente distanti dall'imboccatura, è possibile che si creino delle zone il cui campo di velocità risulta modesto (Figura 3.6÷Figura 3.12) e che quindi potrebbero determinare un sensibile decadimento della concentrazione di ossigeno.

Per ovviare a tale problema è stato inserito un sistema di miscelazione, opportunamente dimensionato e verificato, in grado di forzare la circolazione naturale e quindi migliorare la capacità di ricambio idrico all'interno dell'intero sistema.

Le simulazioni sono state condotte considerando l'azionamento contemporaneo dei tre miscelatori, per tre ore al giorno, preferibilmente in una fase di riflusso (in fase con la marea - vedi dalla Figura 3.13 alla Figura 3.21).

I risultati ottenuti mostrano come il sistema di miscelazione ipotizzato, soprattutto durante i periodi di scarso ricambio idrico naturale (assenza di vento e moto ondoso), tipici delle situazioni di alta pressione estiva, sia in grado di migliorare sensibilmente la circolazione idrica dell'intero bacino in esame con conseguenti benefici sulla qualità delle acque.

Peraltro, al fine di ottenere maggiori benefici sulla capacità di ricambio idrico, l'impianto di miscelazione dovrà essere attivato per non meno di tre ore al giorno durante una fase di riflusso della marea (vedi Figura 3.17÷Figura 3.20).

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

4 Appendice: descrizione del modello matematico SMS

4.1 Introduzione

Il sistema TABS è stato sviluppato dalla United States Army Engineering Waterways Experiment Station per simulare numerosi problemi idrodinamici in acque basse.

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.

I programmi contenuti nel pacchetto TABS possono essere usati per analizzare le variazioni di livello ed il campo di velocità per problemi idrodinamici in acque basse. Il TABS fornisce sia soluzioni in moto permanente che in moto vario, in altre parole la soluzione può trovarsi sia per istanti di tempo che per una serie di passi temporali.

I programmi del pacchetto TABS contengono, inoltre, un codice per la simulazione della diffusione di inquinanti, dell'erosione e del trasporto solido.

In una tipica applicazione, SMS viene utilizzato per costruire un reticolo agli elementi finiti della regione simulata e per applicare condizioni al contorno. Le informazioni che descrivono le griglie vengono quindi salvate in un file geometrico ed in uno o più file in cui sono contenute le condizioni al contorno.

Il software TABS è quindi utilizzato per eseguire analisi idrodinamiche attraverso simulazioni numeriche. Le soluzioni creano uno o più file contenenti, tra le altre cose, i livelli di superficie idrica e il campo di velocità in ciascun nodo della griglia presa in esame. Questi file soluzione possono essere introdotti nel modello SMS che consente una loro visualizzazione sotto forma di grafici vettoriali a colori, corredati se necessario dell'andamento temporale delle differenti grandezze di interesse.

Il modello SMS può essere utilizzato, anche, come un pre e post processore per altri programmi agli elementi finiti, purché questi programmi siano compatibili con i formati utilizzati. Il modello SMS è idoneo per la costruzione di griglie grandi e complesse (potendo raggiungere anche centinaia di elementi) di forma arbitraria.

L'intero pacchetto software è disponibile a livello commerciale ed è provvisto del manuale per l'utente.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

I due componenti principali del sistema TABS, il codice RMA-2 per la determinazione del campo idrodinamico ed il codice RMA-4 per l'individuazione della concentrazione dell'ossigeno disciolto, vengono descritte di seguito.

4.2 Codice RMA-2

Il cuore del sistema TABS è rappresentato dal programma RMA-2 per la simulazione di moti a superficie libera. L'RMA-2 è un programma bidimensionale agli elementi finiti per la soluzione di problemi idrodinamici, che fornisce risultati mediati sulla verticale.

Originariamente, l'RMA-2 è stato sviluppato da Norton ed altri (1973) della Resource Management Associates, Inc. di Davis, in California. Diverse modifiche al codice originale sono state fatte da alcuni ricercatori della Waterway Experiment Station (Thomas e McAnally, 1991).

4.3 Applicazioni

L'RMA-2 può essere utilizzato per calcolare i livelli di superficie idrica e il campo di velocità nei punti nodali di una griglia agli elementi finiti che rappresenta un corpo d'acqua come ad esempio un fiume, un porto o un estuario.

L'RMA-2 può fornire soluzioni sia in moto permanente che in moto vario. In altre parole, le condizioni al contorno (portata entrante, livelli di superficie idrica) variano nel tempo e la soluzione si può trovare per un determinato numero di passi temporali. Ciò rende possibile la simulazione di condizioni dinamiche per le correnti causate da portate variabili o cicli mareali. L'RMA-2 non è applicabile a problemi con correnti supercritiche.

L'output dell'RMA-2 viene registrato in un file soluzione binario. Il file può contenere la soluzione di uno o più passi temporali, in funzione del fatto che sia stata eseguita un'analisi stazionaria o transitoria. Il file soluzione può essere introdotto nel processore grafico SMS per una rappresentazione grafica dei risultati.

4.4 Equazioni utilizzate

Le equazioni che governano il moto delle acque poco profonde, risolte dall'RMA-2, sono le seguenti:

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_0}{\partial x} \right) - \frac{\varepsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_0}{\partial y} \right) - \frac{\varepsilon_{yx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{gv}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

dove

x = distanza nella direzione x (longitudinale alla direzione della corrente) [L]

u = velocità orizzontale della corrente nella direzione x [LT⁻¹]

y = distanza nella direzione y (laterale alla direzione della corrente) [L]

v = velocità orizzontale della corrente nella direzione y [LT⁻¹]

t = tempo [T]

g = accelerazione dovuta alla gravità [LT⁻²]

h = profondità dell'acqua [L]

a₀ = quota del fondo [L]

ρ = densità del fluido [ML⁻³]

ε_{xx} = coefficiente di scambio turbolento normale nella direzione x [MT⁻¹L⁻¹]

ε_{xy} = coefficiente di scambio turbolento tangenziale nella direzione x [MT⁻¹L⁻¹]

ε_{yx} = coefficiente di scambio turbolento tangenziale nella direzione y [MT⁻¹L⁻¹]

ε_{yy} = coefficiente di scambio turbolento normale nella direzione y [MT⁻¹L⁻¹]

C = coefficiente di scabrezza di Chezy (derivato dal coefficiente di Manning n) [L^{2/3}T⁻¹]

4.5 Processo di Simulazione

In un tipico problema di simulazione con il software TABS, la sequenza di operazioni per effettuare le simulazioni vengono eseguite secondo una specifica sequenza. Ciascuno di questi passi viene brevemente descritto di seguito.

4.5.1 Costruzione della griglia

Anzitutto deve essere costruita una griglia agli elementi finiti che descriva la batimetria (geometria della superficie del fondo) del corpo d'acqua che deve essere simulato. I dati

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

geometrici nella forma di coordinate xyz vengono inseriti nel SMS ed usati come base per la costruzione di una griglia agli elementi finiti.

Nei casi in cui è disponibile una carta delle isobate, i punti possono essere digitalizzati dalle linee isobate e introdotti nel SMS per la costruzione della griglia. Se non si dispone di una batimetria possono essere utilizzati rilievi o misure di indagini dirette.

Il software SMS è provvisto di numerosi strumenti per la generazione di una griglia e per l'editing interattivo. Questi strumenti sono descritti più dettagliatamente nel tutorial e nel manuale di riferimento. La geometria della griglia viene salvata dal SMS in un file di testo di tipo ASCII.

4.5.2 Condizioni al contorno

Una volta costruita la griglia l'utente assegna le condizioni al contorno alla griglia. Le condizioni al contorno vengono usualmente introdotte come una portata entrante ad una estremità della griglia e come una prevalenza o un livello di superficie idrica all'estremità opposta della griglia. L'utente deve anche introdurre il coefficiente di Manning n ed i coefficienti di scambio turbolento per differenti regioni della griglia. Tutti questi parametri possono essere introdotti interattivamente utilizzando il software SMS. Le condizioni al contorno vengono salvate dal SMS in un file di testo ASCII distinto dal file geometrico, ma comprendente le indicazioni in esso contenute.

4.5.3 GFGEN

Una volta costruita la griglia, viene eseguito il programma GFGEN prima di effettuare le simulazioni con l'RMA-2. Il GFGEN è un pre processore geometrico propedeutico per l'RMA-2. Il GFGEN legge il file di testo ASCII che descrive la geometria e lo valida e quindi lo trasforma in un equivalente file binario.

4.5.4 RMA-2

Il passo successivo nel processo di simulazione è quello di effettuare le simulazioni con il programma RMA-2. L'RMA-2 legge il file di testo ASCII con l'indicazione delle condizioni al contorno e il file geometrico binario preparato precedentemente dal programma GFGEN. A questo punto il programma RMA-2 calcola la soluzione idrodinamica nei differenti punti della

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

griglia considerata e genera un file soluzione binario da introdurre nel processore grafico del SMS.

4.5.5 Post-processing con il SMS

Dopo aver effettuato le simulazioni con il programma RMA-2, i risultati devono essere osservati con il processore grafico SMS. Il software SMS consente di visualizzare i diagrammi vettoriali della velocità e grafici a colori sia della velocità che del livello idrico superficiale. Per le soluzioni transitorie si può generare l'andamento temporale per i nodi selezionati e le sequenze di animazione. Prima di visualizzare la soluzione idrodinamica, l'utente deve verificare che i risultati siano congruenti con la realtà fisica. Se necessario deve essere ridefinita in dettaglio la griglia oppure devono essere modificati i coefficienti di input e successivamente deve essere effettuata una nuova soluzione.

4.5.6 Validazione

In molti casi, l'RMA-2 viene utilizzato per simulare l'effetto di una nuova struttura sull'idrodinamica di un corpo d'acqua. In genere in tali casi si segue l'intero processo sopra descritto con una griglia che rappresenta il corpo d'acqua nello stato attuale. Una volta che il modello è stato tarato (confrontandolo con misure o indagini disponibili), il SMS può essere utilizzato per modificare la griglia in modo tale che essa rappresenti le condizioni successive alla realizzazione della struttura presa in esame. L'RMA-2 viene quindi utilizzato ancora una volta per simulare l'effetto della nuova struttura sull'idrodinamica, in modo da verificare le modifiche indotte sul campo idrodinamico.

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

5 Appendice: descrizione del modello matematico CGWAVE

5.1 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.

5.2 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);

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

$C_g(x, y)$: 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.

5.3 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:

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazioni del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

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

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 condizione di radiazione Sommerfeld:

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

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

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

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

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

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

dove

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

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

Autorità Portuale di Cagliari	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Dolmen s.r.l. V.D.P. s.r.l. Dott. Geol. Marcello Ghigliotti Dott. Simone Tempesti	Titolo Elaborato: Studio delle penetrazione del moto ondoso					
Porto Canale di Cagliari Distretto della Cantieristica		Data: dicembre 2011					
PROGETTO DEFINITIVO OPERE A MARE		10	015	DRM	006	-1	MAR

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".