

Autorità di Sistema Portuale
del Mar Tirreno Centro Settentrionale

PORTI DI ROMA E DEL LAZIO - CIVITAVECCHIA - FIUMICINO - GAETA

OPERE STRATEGICHE PER IL PORTO DI CIVITAVECCHIA - 2° STRALCIO -

NUOVO ACCESSO AL BACINO STORICO - COLLEGAMENTO TRA IL MOLO VESPUCCI E L'ANTEMURALE COLOMBO

PROGETTO DEFINITIVO

Titolo elaborato

RELAZIONE TECNICA STUDIO AGITAZIONE ONDOSA

P R 2 D R 0 0 3 0 0 M A R

Committente:

Autorità Portuale di Civitavecchia, Fiumicino e Gaeta

IL PRESIDENTE:

Dr. Pino Musolino

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Maurizio Marini

IL COORDINATORE GENERALE

Dott. Ing. Giuseppe Solinas

Progetto A.T.I. :

MODIMAR S.r.l. (Capogruppo)

V.A.M.S. Ingegneria S.r.l.

SEACON S.r.l.

Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:
12/12/2022	0	PRIMA EMISSIONE	G.BALDUCCI	F. MONDINI	P.CONTINI

PORTO DI CIVITAVECCHIA

STUDIO AGITAZIONE ONDOSA

INDICE

1	Premesse	3
2	Configurazioni esaminate: ipotesi di calcolo e condizioni di input.....	4
3	Studio della penetrazione del moto ondoso	12
4	Analisi dei risultati	22
5	Conclusioni e scelta del layout progettuale	23
	APPENDICE: Descrizione sintetica del modello VEGA.....	24

1 Premesse

La presente relazione illustra i risultati dello studio di penetrazione del moto ondoso, necessario per una corretta definizione della migliore configurazione progettuale della nuova apertura a Sud del porto di Civitavecchia.

L'agitazione ondosa interna al bacino portuale è stata studiata utilizzando un modello numerico che integra in modo esatto l'equazione di Helmholtz. Tale equazione, come è noto, consente di ricavare i valori dell'agitazione in uno "specchio liquido" tenendo conto dei fenomeni combinati di diffrazione e riflessione, che nel caso specifico risultano i più importanti dal punto di vista della penetrazione delle onde nel bacino portuale. Il modello numerico utilizzato, denominato VEGA (vedi APPENDICE della presente relazione), è stato sviluppato dalla MODIMAR per ambienti operativi Windows ed è corredato di interfaccia grafica per l'input della geometria di specchi portuali e di output dei risultati numerici interpolabili in grafici di sintesi rappresentativi delle iso-altezze d'onda lungo tutto il dominio di calcolo.

2 Configurazioni esaminate: ipotesi di calcolo e condizioni di input

Al fine di condurre una analisi del grado di protezione offerto dalla nuova apertura a Sud del porto di Civitavecchia dall'ingresso del moto ondoso, sono state prese in considerazione tre configurazioni progettuali (vedi Figura 2.3-Figura 2.5) che vengono di seguito brevemente descritte:

- **Soluzione 1** (Figura 2.3): il nuovo accesso al bacino storico del porto di Civitavecchia è costituito da una diga foranea di protezione (da realizzarsi in parte a gettata, nella zona di radicamento, e in parte a parete verticale in cassoni) e dalla nuova imboccatura portuale ricavata dalla parziale demolizione dell'antemurale. La nuova imboccatura è delimitata ad Ovest da un'opera a parete verticale una un molo di sopraflutto costituito nella zona di radicamento con la diga esistente da una scogliera in massi naturali e che si sviluppa in direzione SSE con cassoni cellulari dotati di celle assorbenti lungo il paramento interno della diga stessa. La delimitazione lato terra dell'imboccatura il varco è costituita da una scogliera in massi naturali che raccorda la Marina esistente con l'apertura del varco. Le porzioni di banchine esistenti del porto si collegano alle nuove opere che delimitano il varco di accesso attraverso delle paratie a parete verticale.
- **Soluzione 2** (Figura 2.4): la Soluzione 2 ha un layout concettualmente simile a quello di Soluzione 1. Per quanto riguarda la diga si sopraflutto, la soluzione 2 prevede un tratto a gettata di maggior lunghezza a scapito di quello a cassoni mantenendo inalterate la lunghezza e la disposizione planimetrica. Per il lato Est dell'imboccatura portuale è stata prevista un'opera a gettata fatta eccezione per un modesto tratto di raccordo con la banchina esistente. Per quanto riguarda il terrapieno è stata mantenuta la con terminazione a gettata con una diversa configurazione planimetrica che consiste nell'arretramento verso terra del lato parallelo alla diga di sopraflutto.
- **Soluzione 3** (Figura 2.5): la Soluzione 3 è stata introdotta nel corso dell'esecuzione delle simulazioni di manovra. Rispetto al secondo layout, questa soluzione prevede l'allargamento dell'imboccatura di circa 20 m

Nelle figure seguenti (Figura 2.3÷Figura 2.5) sono rappresentate le configurazioni di apertura del varco a Sud prese in considerazione con l'indicazione dei coefficienti di riflessione utilizzati. Nelle elaborazioni per il bacino portuale è stata assunta una profondità media costante del bacino portuale pari a 10 m.

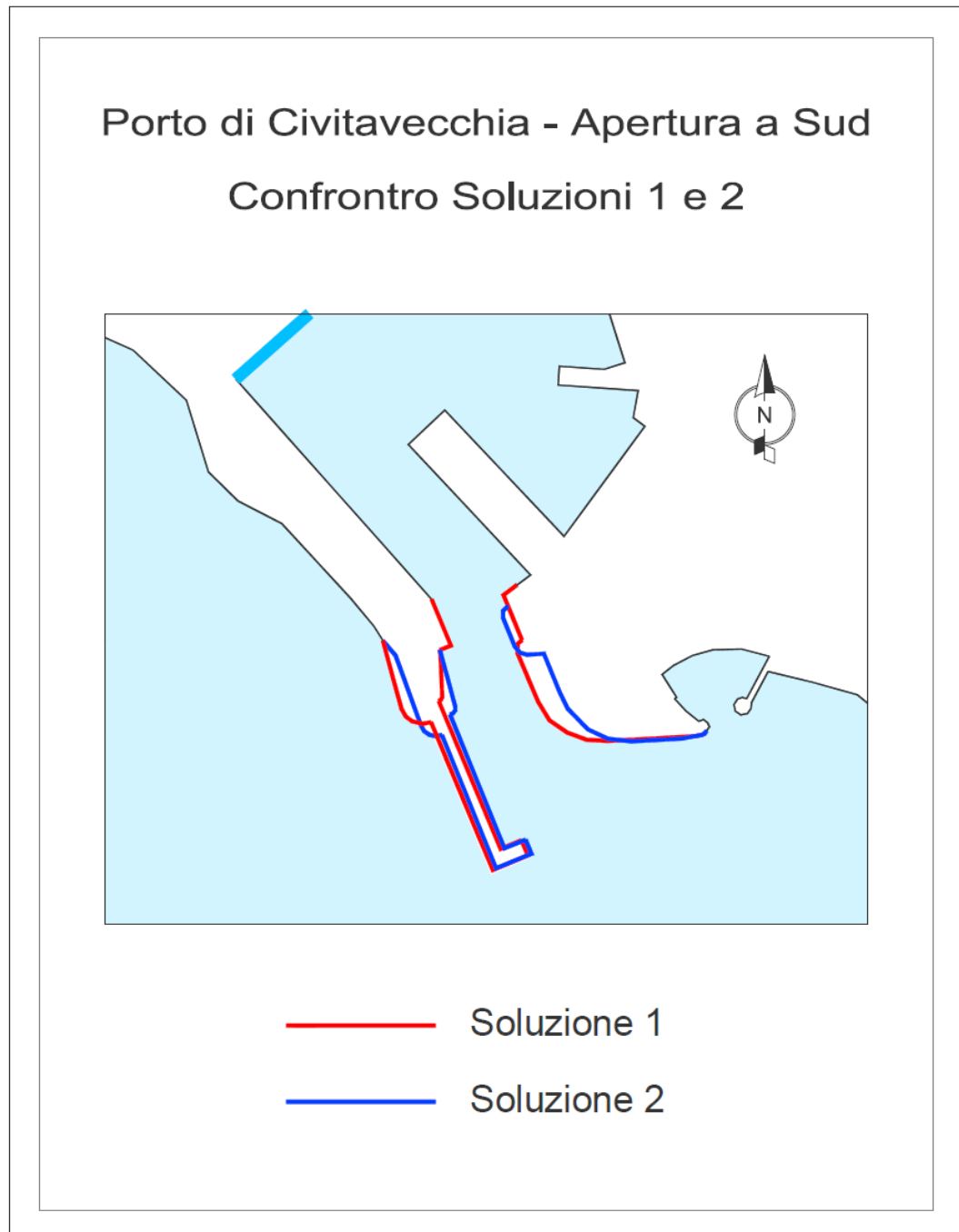


Figura 2.1 – Soluzioni n.1 e n.2 di progetto.

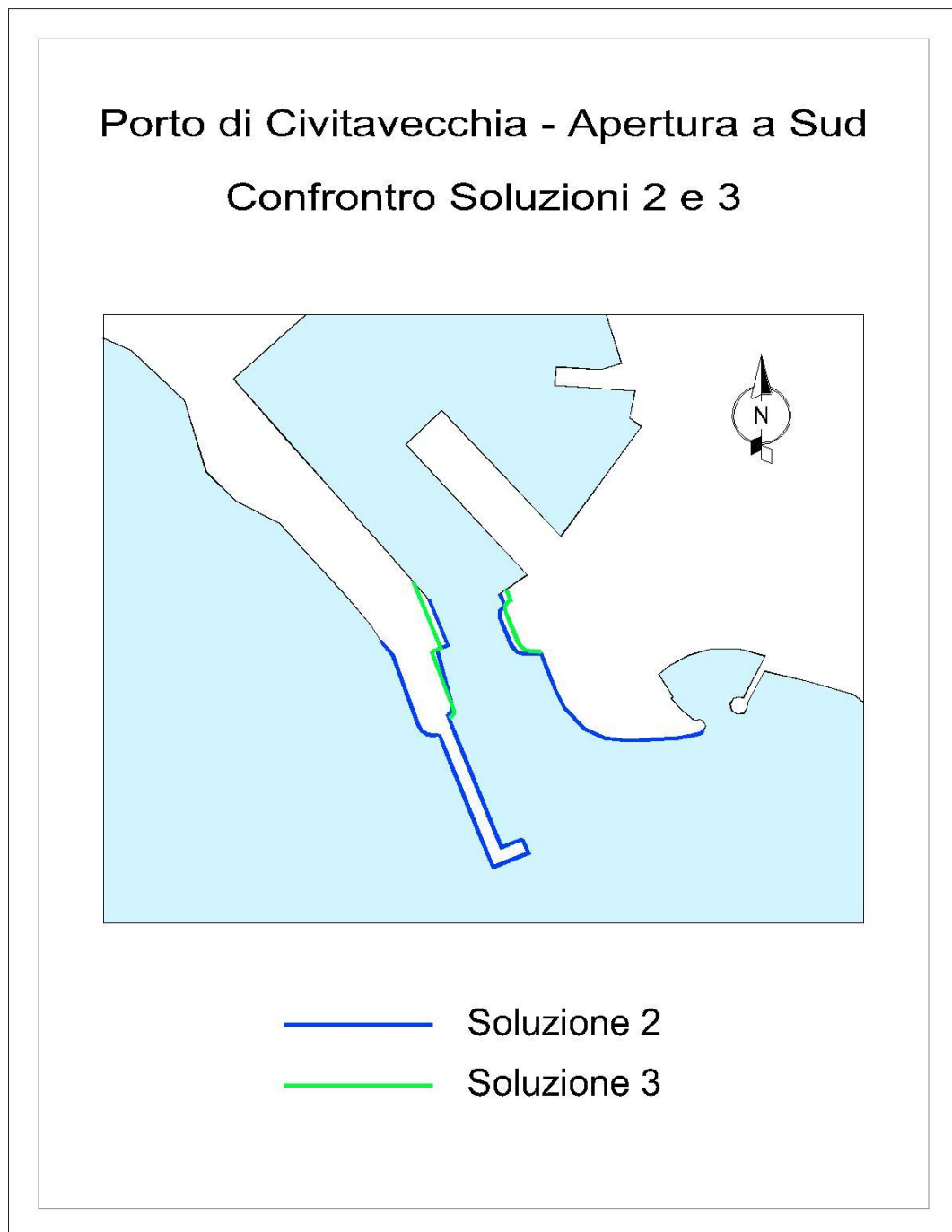


Figura 2.2 – Soluzioni n.2 e n.3 di progetto.

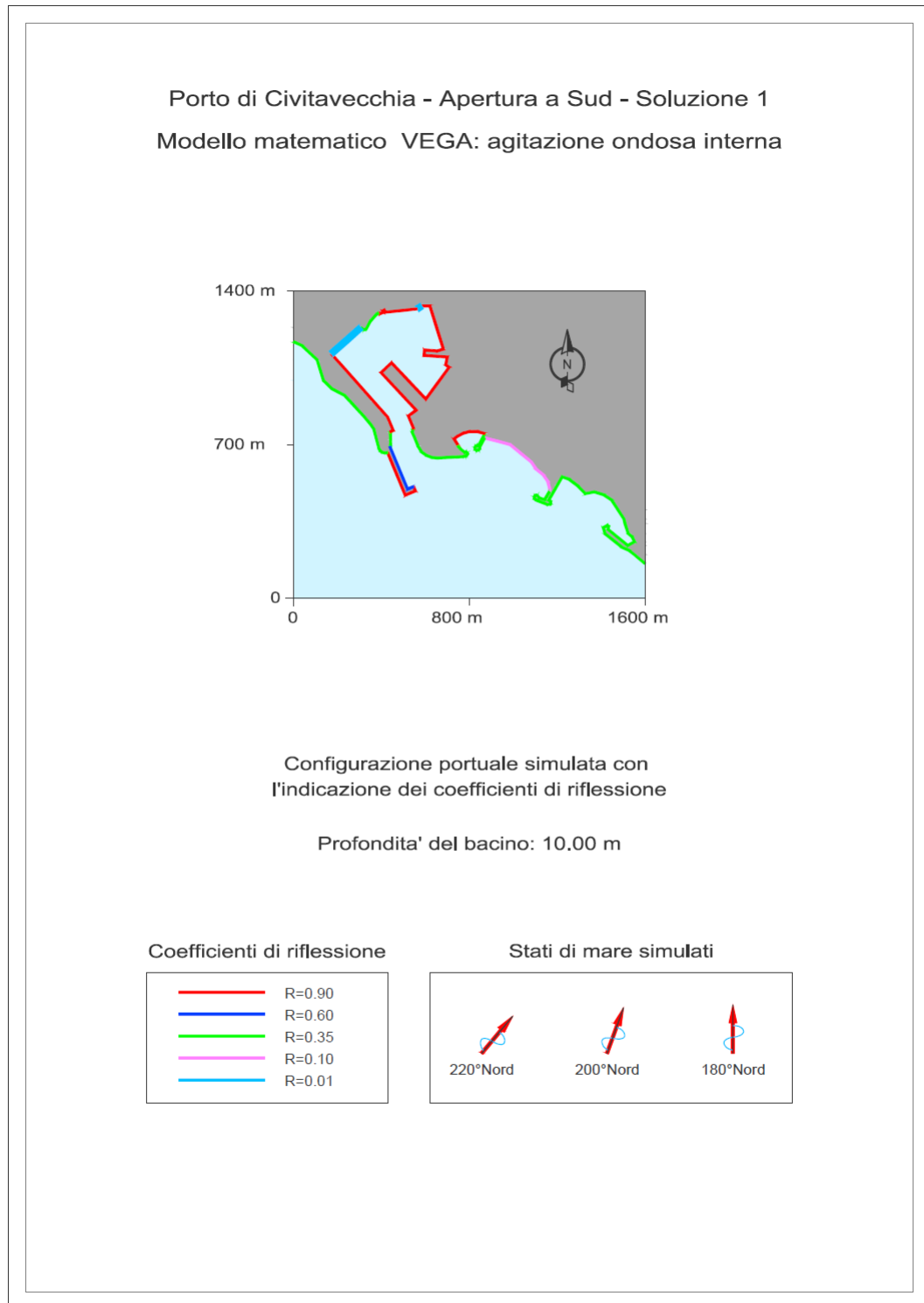


Figura 2.3 – Soluzione 1.

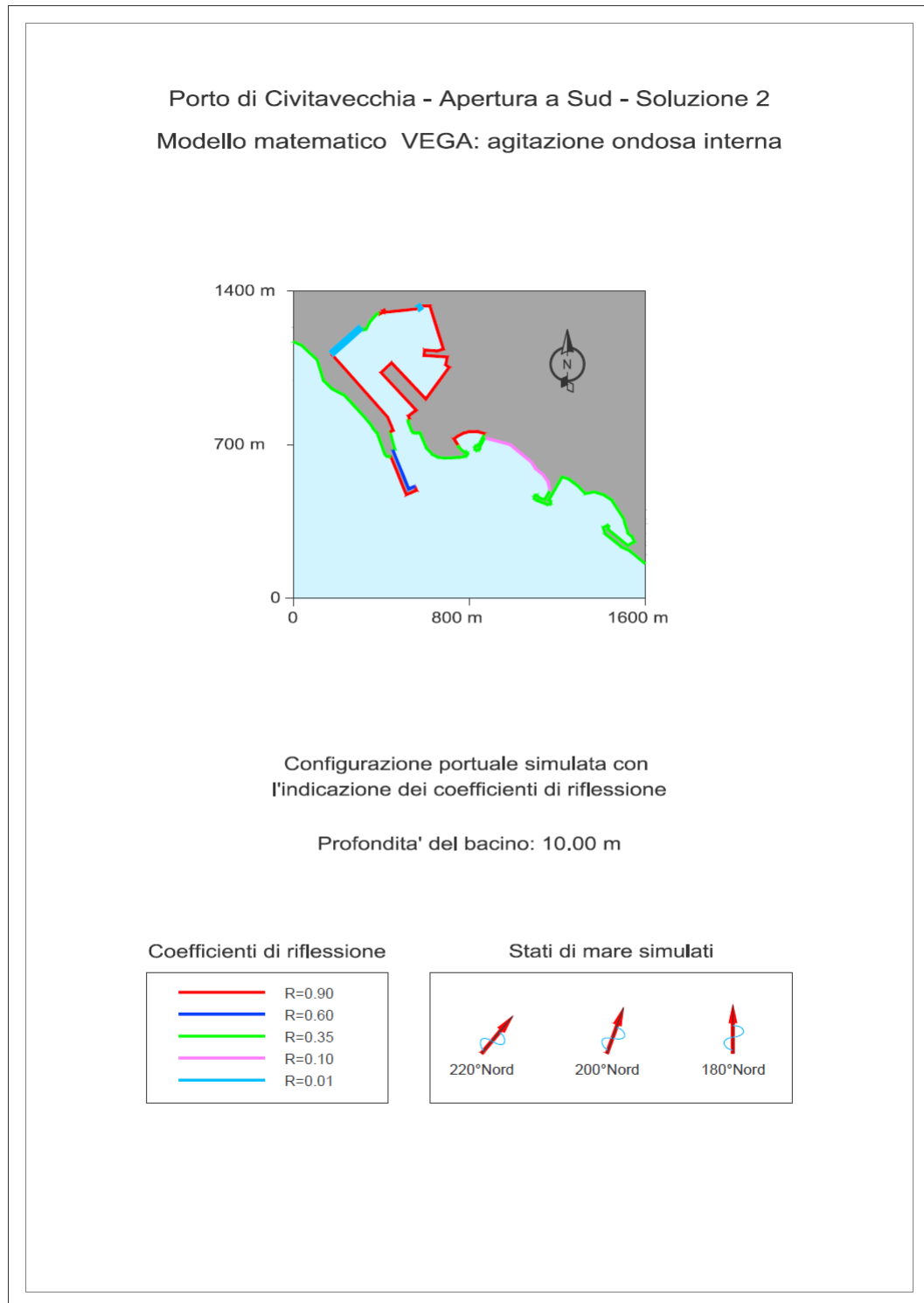


Figura 2.4 – Soluzione 2.

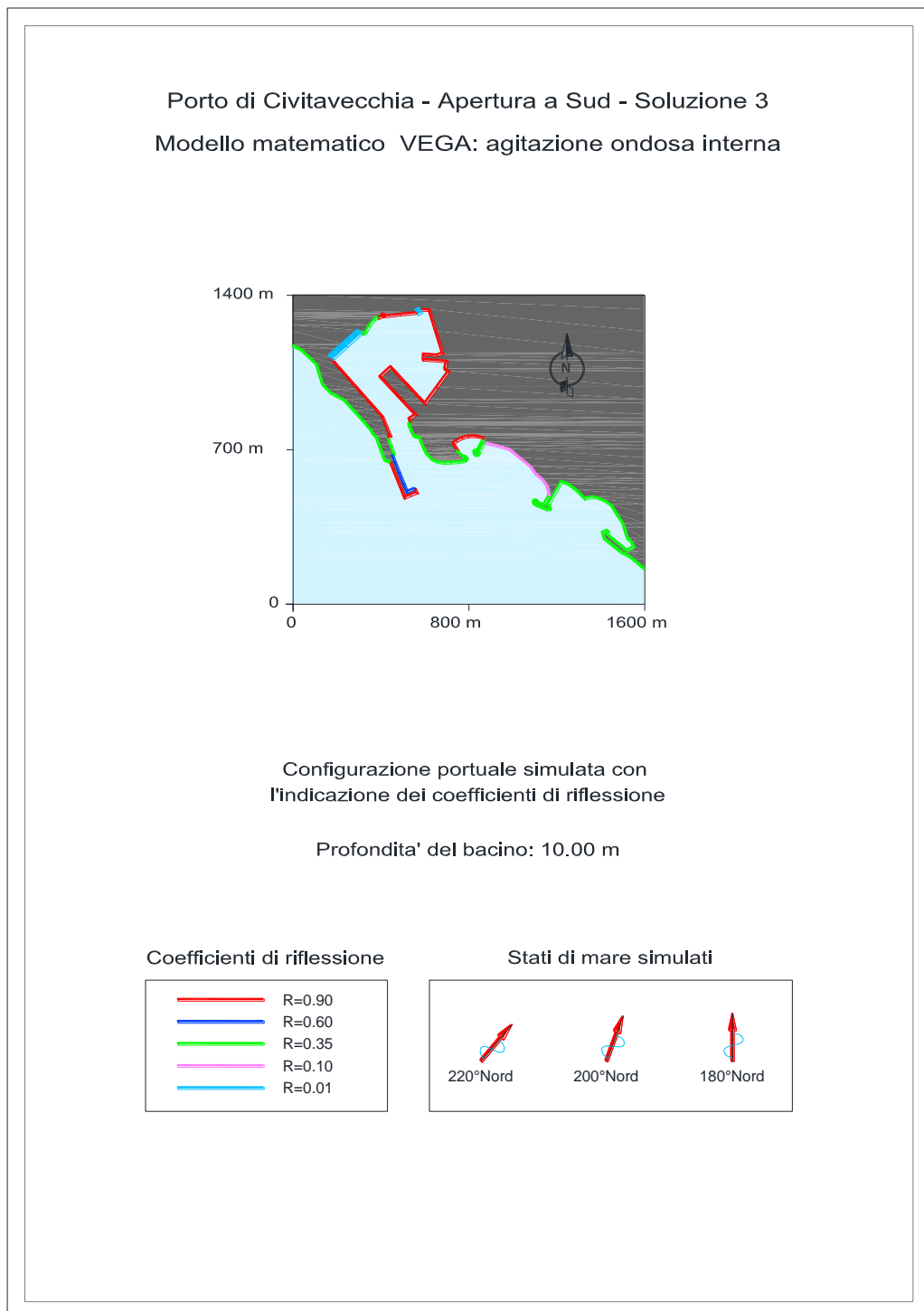


Figura 2.5 – Soluzione 3.

I coefficienti di riflessione R delle opere delimitanti le aree portuali interne ed esterne, riportati nelle Figura 2.3÷Figura 2.4, sono stati scelti in funzione delle caratteristiche riflettenti delle stesse e vengono qui di seguito nuovamente elencati:

- opere a pareti verticali riflettenti $R = 0.90$;
- opere a pareti verticali con celle assorbenti $R = 0.60$;
- opere a scogliera $R = 0.35$;
- spiagge assorbenti $R = 0.10$;
- limite del dominio fluido di calcolo $R = 0.01$;
- pontili su pali o galleggianti (completamente permeabili) $R = 0.00$.

A causa delle estese dimensioni del dominio di calcolo, l'applicazione del modello è stata effettuata semplificando la geometria all'interno del porto assumendo dei limiti del dominio fluido che simboleggiano l'accesso alle darsene più interne aventi il minimo coefficiente di riflessione ($R=0.01$).

Si vuole sottolineare che tali coefficienti di riflessione sono stati mantenuti costanti, lungo tutto il perimetro di una stessa opera, effettuando, a favore della sicurezza, un'approssimazione per eccesso. Essi sono desunti dalla letteratura in base ad esperienze su modelli fisici e sono funzione dei parametri dell'onda incidente, del tipo di struttura (opera a parete verticale, opera a scogliera, spiaggia, etc.) e dalla pendenza delle opere interessate dall'agitazione del moto ondoso.

Per quanto riguarda le direzioni di provenienza delle onde da simulare in corrispondenza del nuovo varco di accesso a Sud del porto di Civitavecchia, si sono preventivamente individuati, compatibilmente con l'esposizione del paraggio in esame, i settori di attacco degli stati di mare più gravosi ai fini dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale secondo gli schemi planimetrici riportati nelle Figura 2.3÷Figura 2.5.

L'aggiornamento allo studio meteomarinico allegato al presente progetto ha mostrato (vedi Figura 2.6) come gli eventi di moto ondoso provenienti dai settori di traversia principale (secondo e terzo quadrante), durante il processo di propagazione largo/riva, subiscano una rotazione concentrandosi prevalentemente nel settore $180-240^{\circ}N$ (terzo quadrante).

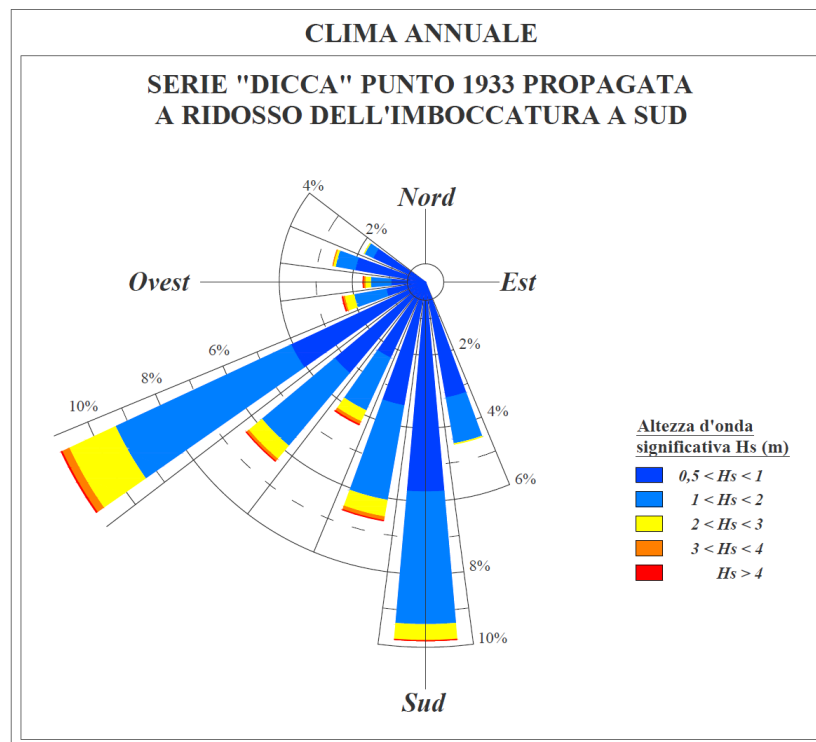


Figura 2.6 – Distribuzione degli eventi di moto ondoso propagati a ridosso del varco a Sud

Pertanto le simulazioni sono state effettuate imponendo, come condizioni di input per il modello di calcolo VEGA utilizzato, le forzanti di moto ondoso descritte in Tabella 2.1 che rappresentano sia le condizioni ordinarie che quelle più gravose di provenienza delle mareggiate.

Tabella 2.1 – Input delle forzanti di moto ondoso

Forzanti di moto ondoso	Dir = 180°N	T = 9 s
	Dir = 200°N	T = 11 s
	Dir = 220°N	T = 11 s

Essendo il modello lineare, le simulazioni sono state condotte in forma parametrica imponendo un valore unitario dell'altezza d'onda incidente.

Tali forzanti di moto ondoso sono state imposte, con riferimento all'origine della griglia di calcolo scelta per il modello Vega, in corrispondenza di un segmento opportunamente scelto, $A_1A_2 = \{(-2000, -300); (2500, -300)\}$, che rappresenta un generatore di moto ondoso interpretato dal modello come contorno di radiazione (la perturbazione riflessa dalle strutture portuali è libera di transitare per tale contorno irradiandosi nel campo, supposto infinito, posto all'esterno del dominio di calcolo schematizzato).

3 Studio della penetrazione del moto ondosso

Lo studio della penetrazione del moto ondosso all'interno dello specchio portuale è stato condotto con il modello di diffrazione – riflessione VEGA la cui descrizione sintetica viene allegata al presente documento (vedi APPENDICE).

Il modello è in grado di simulare la propagazione di onde armoniche lineari in presenza dei fenomeni combinati di diffrazione e riflessione che risultano dominanti nel caso in esame. Questi fenomeni sono regolati dall'equazione di Helmholtz che viene risolta dal modello numerico VEGA con la tecnica degli elementi di contorno (boundary elements). Tale tecnica richiede che venga discretizzato il contorno del dominio di calcolo.

Le opere foranee e le banchine all'interno degli specchi d'acqua portuali sono stati quindi schematizzati per mezzo di una serie di segmenti (vedi Figura 2.3÷Figura 2.5). Ciascun segmento è stato a sua volta suddiviso in elementi di lunghezza compresa tra $1/6$ ed $1/7$ della lunghezza d'onda, assicurandosi in tal modo che in tutte le simulazioni fossero introdotti almeno 5 elementi (sorgenti) per ogni segmento considerato. L'altezza d'onda relativa è stata calcolata in corrispondenza di circa 22400 nodi della griglia (1600m x 1400m; $\Delta x = \Delta y = 10$ m) computazionale posti all'interno del dominio che rappresenta l'area in esame.

I risultati delle simulazioni effettuate sono rappresentati a colori e con curve di eguale agitazione ondosso (v. Figura 3.1÷

Figura 3.6). Essendo il modello lineare, i risultati sono stati rappresentati utilizzando il coefficiente di diffrazione che esprime il rapporto tra l'altezza d'onda calcolata nel punto e l'altezza d'onda incidente.

Per ottenere il valore dell'altezza d'onda in un punto è sufficiente moltiplicare il coefficiente di diffrazione per l'altezza dell'onda incidente.

I valori di output sono stati elaborati per tutte le simulazioni effettuate con il programma di interpolazione "SURFER" che restituisce i dati come curve di uguale entità dell'agitazione ondosso e/o scale cromatiche differenziate. Per chiarezza sono evidenziate solo le curve di iso-altezza d'onda pari a 0.1, 0.3 e 0.5.

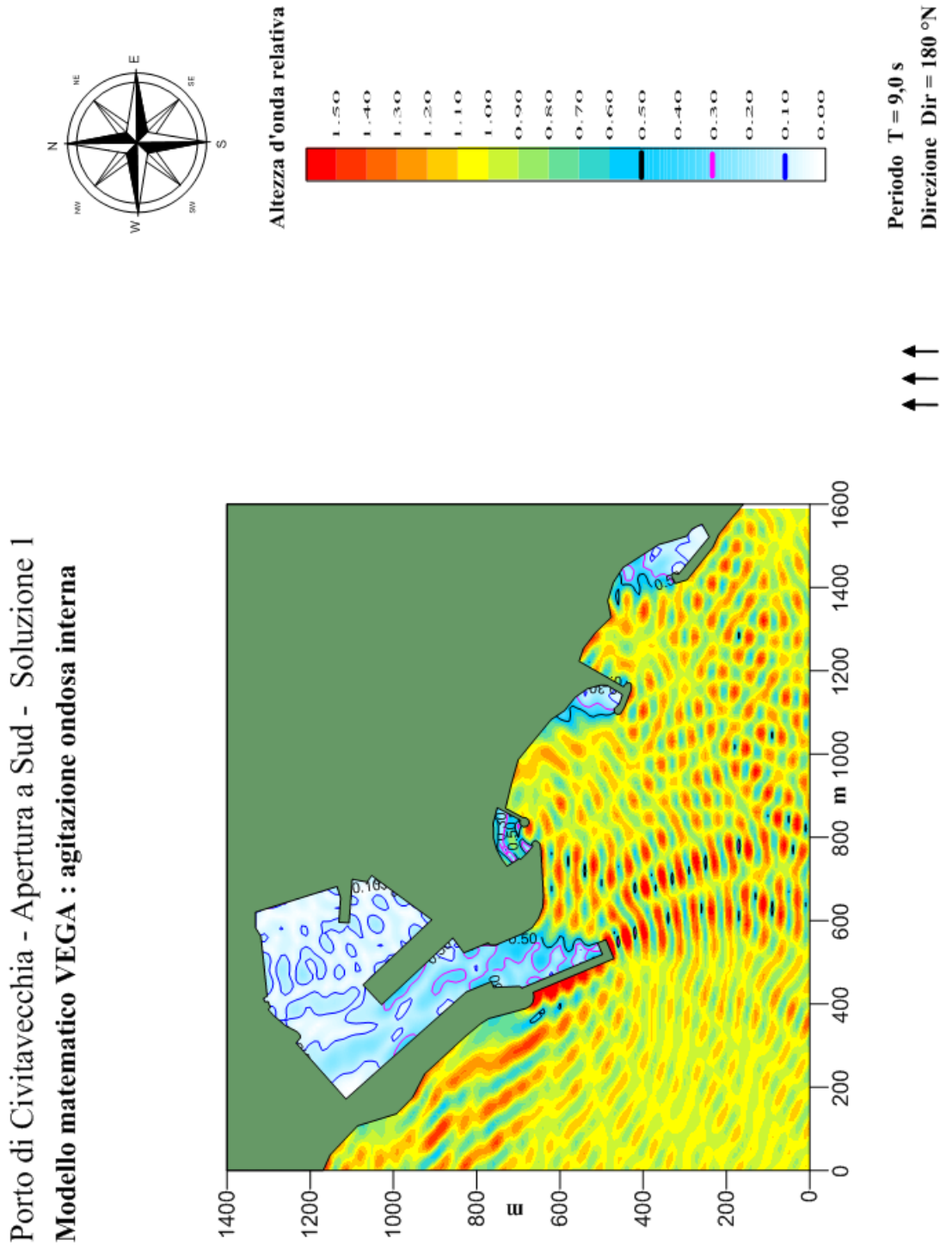


Figura 3.1 – Soluzione 1 – agitazione ondosa per eventi provenienti da $180^\circ N$ e periodo 9 s

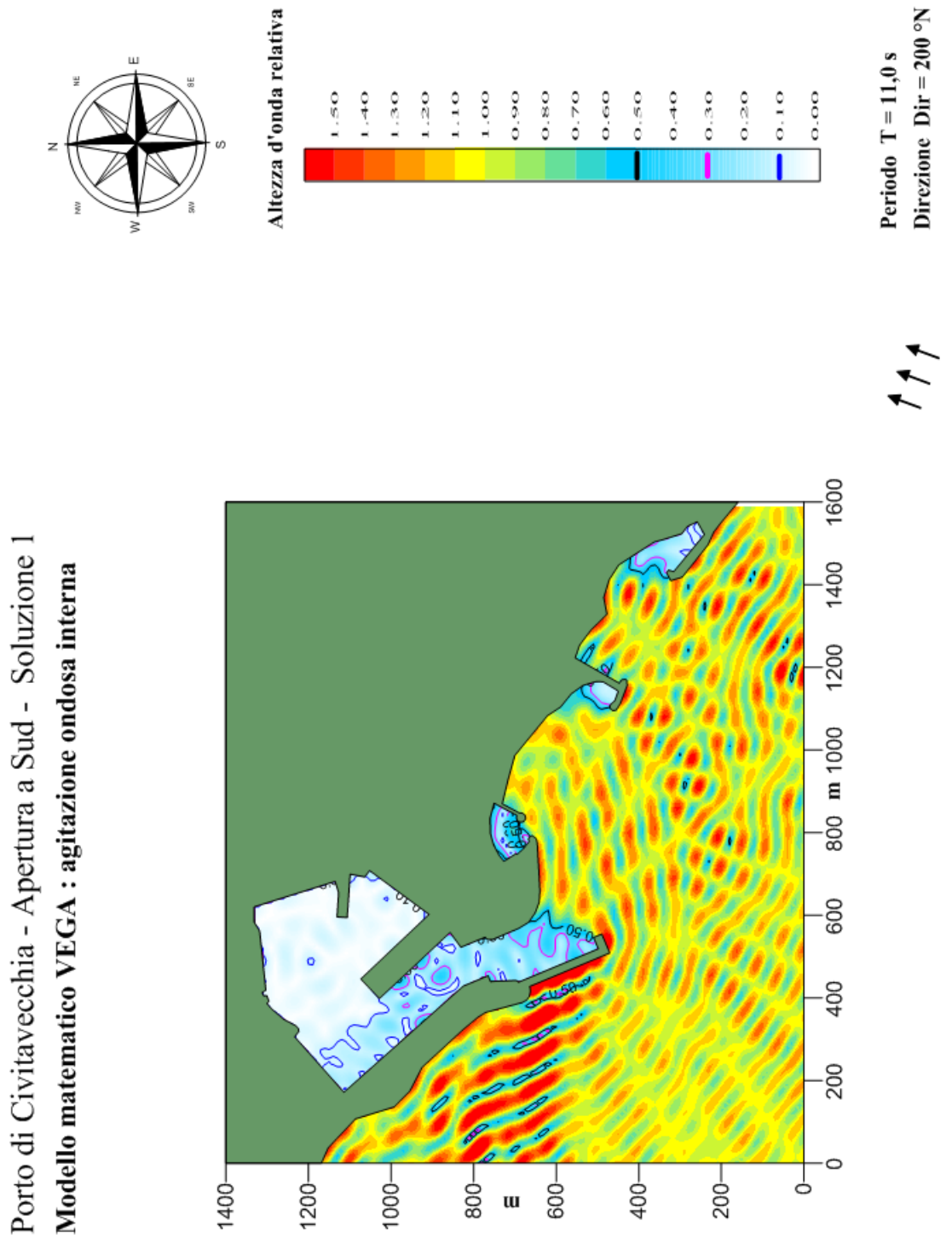


Figura 3.2 – Soluzione 1 – agitazione ondosa per eventi provenienti da 200°N e periodo 11 s

Porto di Civitavecchia - Apertura a Sud - Soluzione 1
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

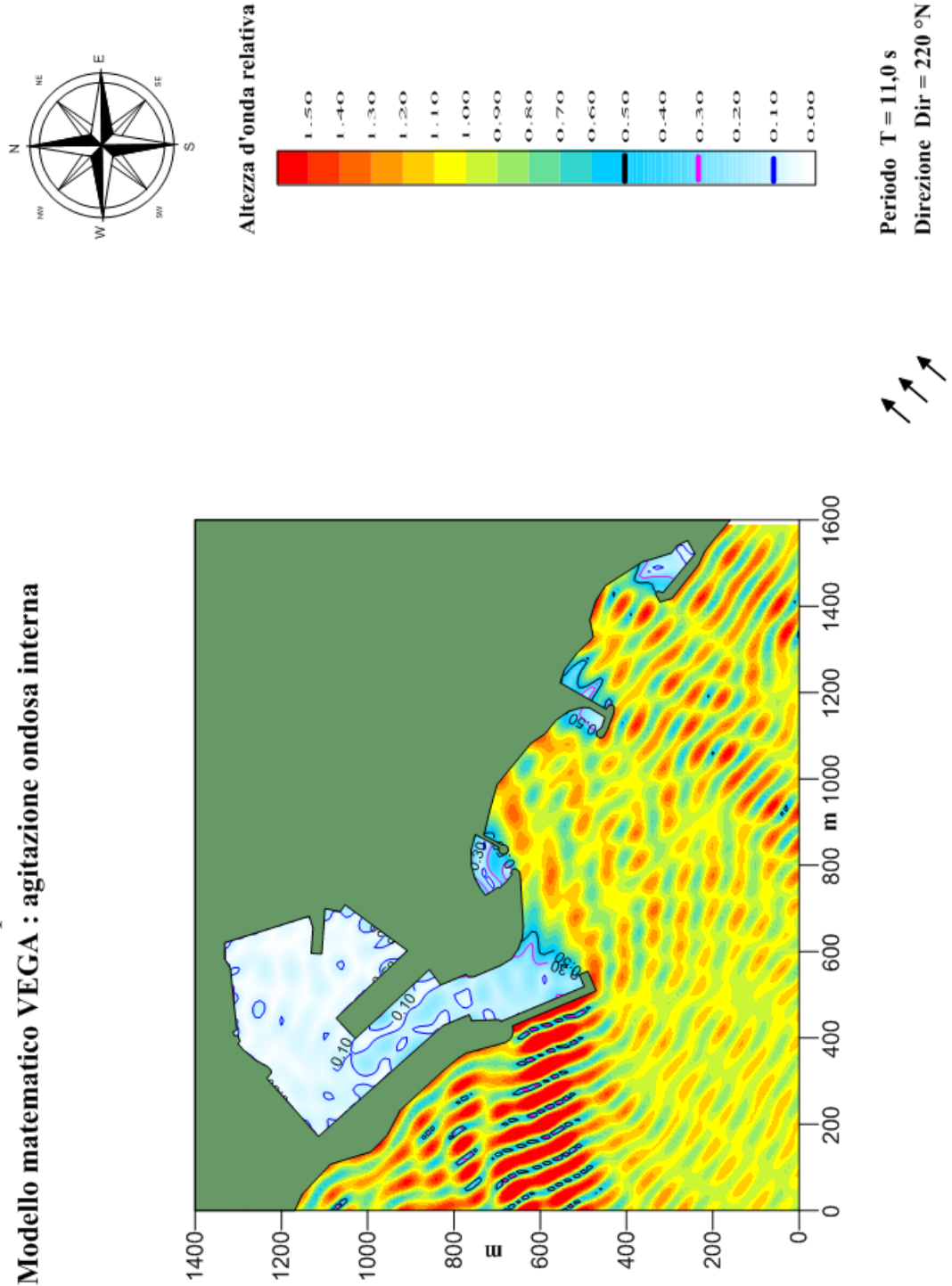


Figura 3.3 – Soluzione 1 – agitazione ondosa per eventi provenienti da 220°N e periodo 11 s

Porto di Civitavecchia - Apertura a Sud - Soluzione 2
Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

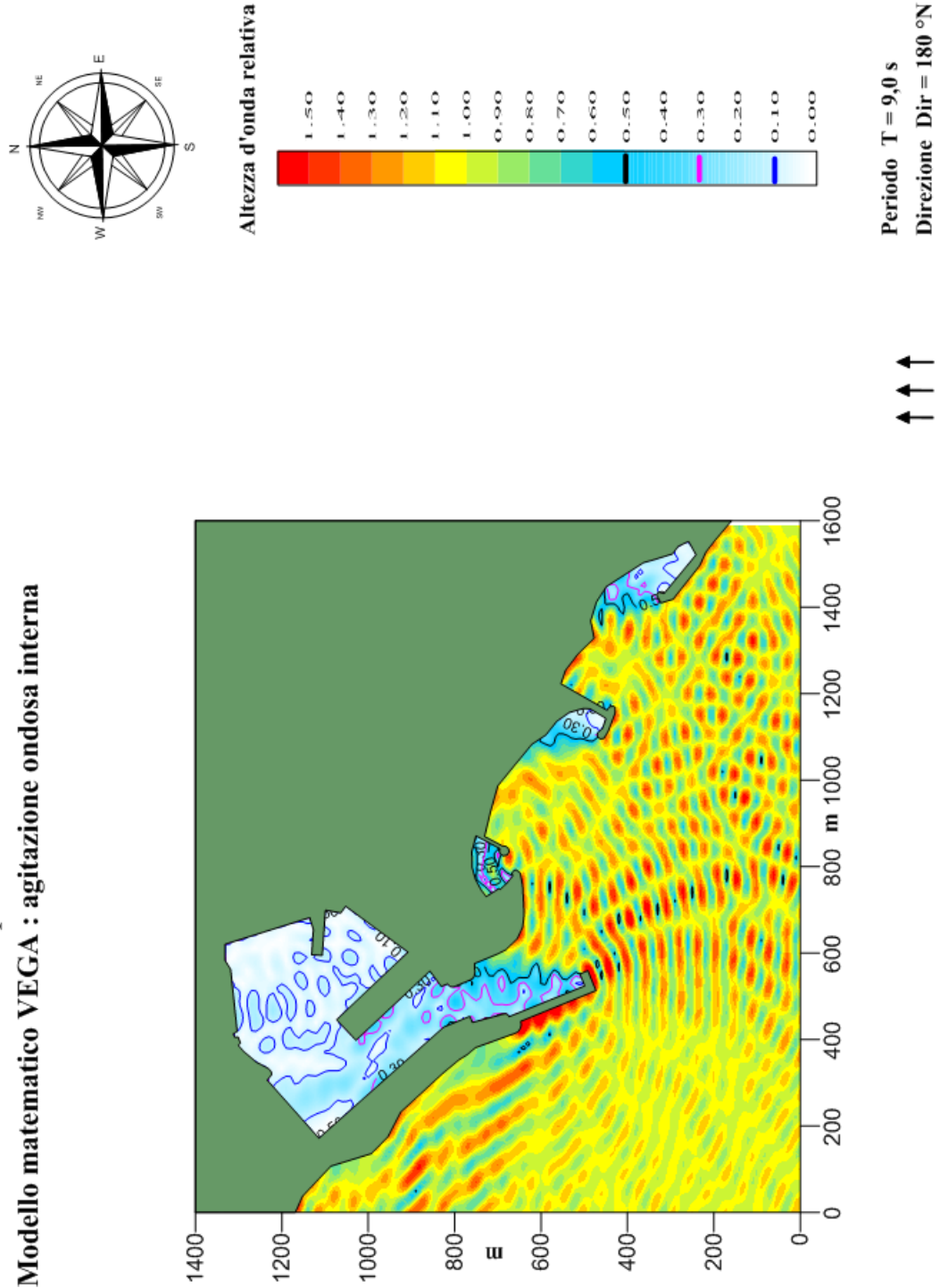


Figura 3.4 – Soluzione 2 – agitazione ondosa per eventi provenienti da 180°N e periodo 9 s

Porto di Civitavecchia - Apertura a Sud - Soluzione 2
Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

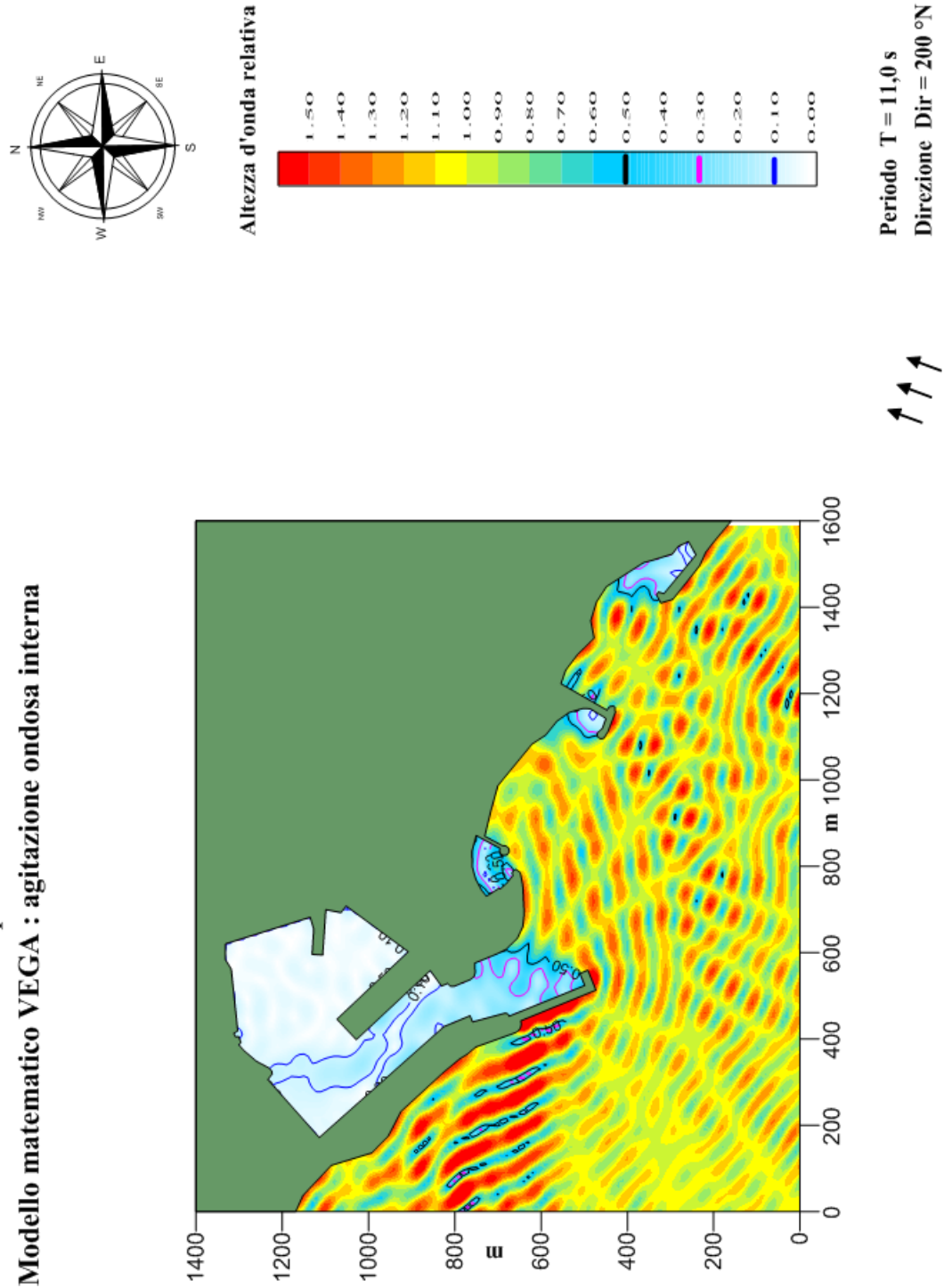


Figura 3.5 – Soluzione 2 – agitazione ondosa per eventi provenienti da 200°N e periodo 11 s

Porto di Civitavecchia - Apertura a Sud - Soluzione 2
Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

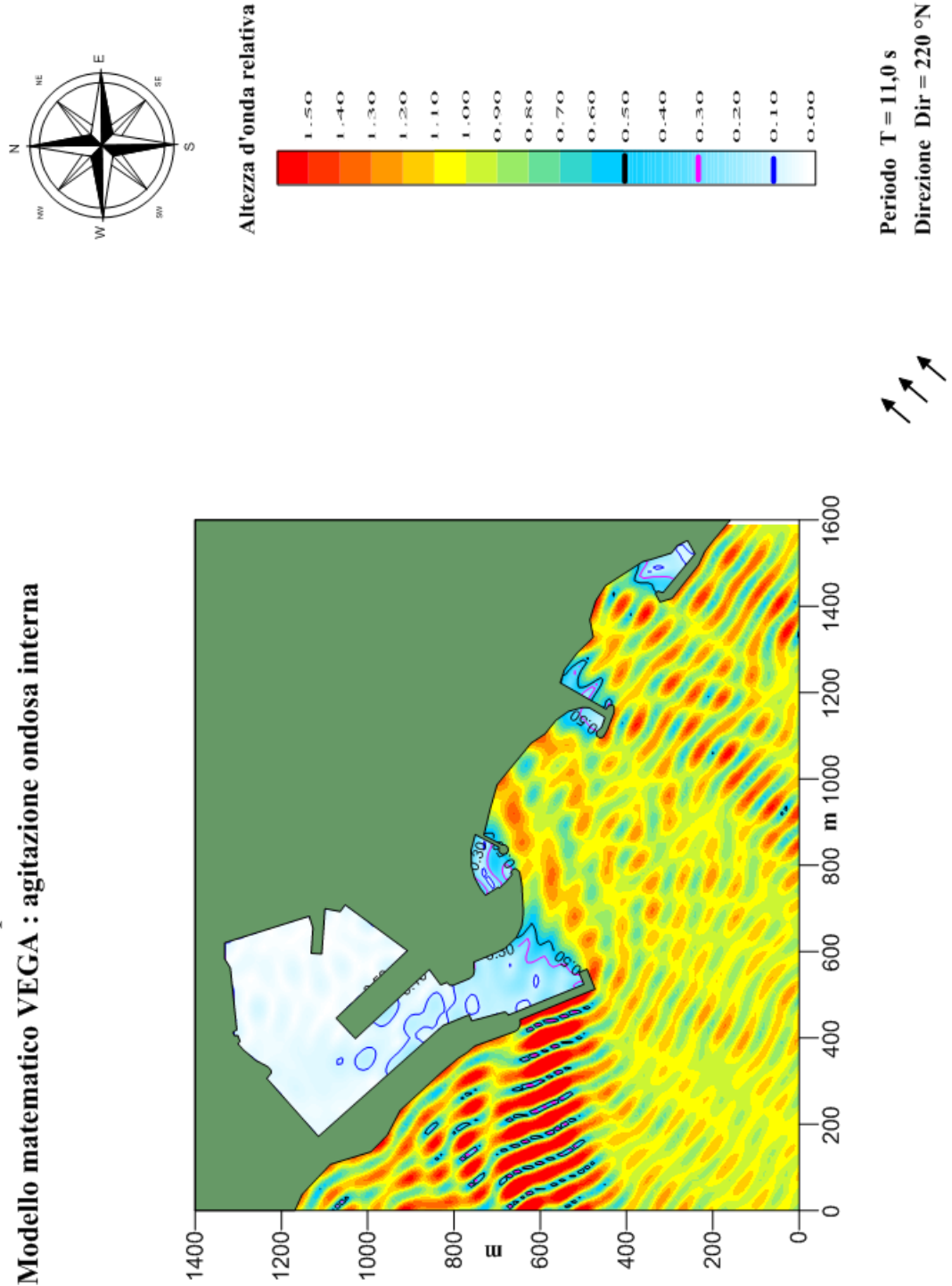


Figura 3.6 – Soluzione 2 – agitazione ondosa per eventi provenienti da 220°N e periodo 11 s

Porto di Civitavecchia - Apertura a Sud - Soluzione 3
Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

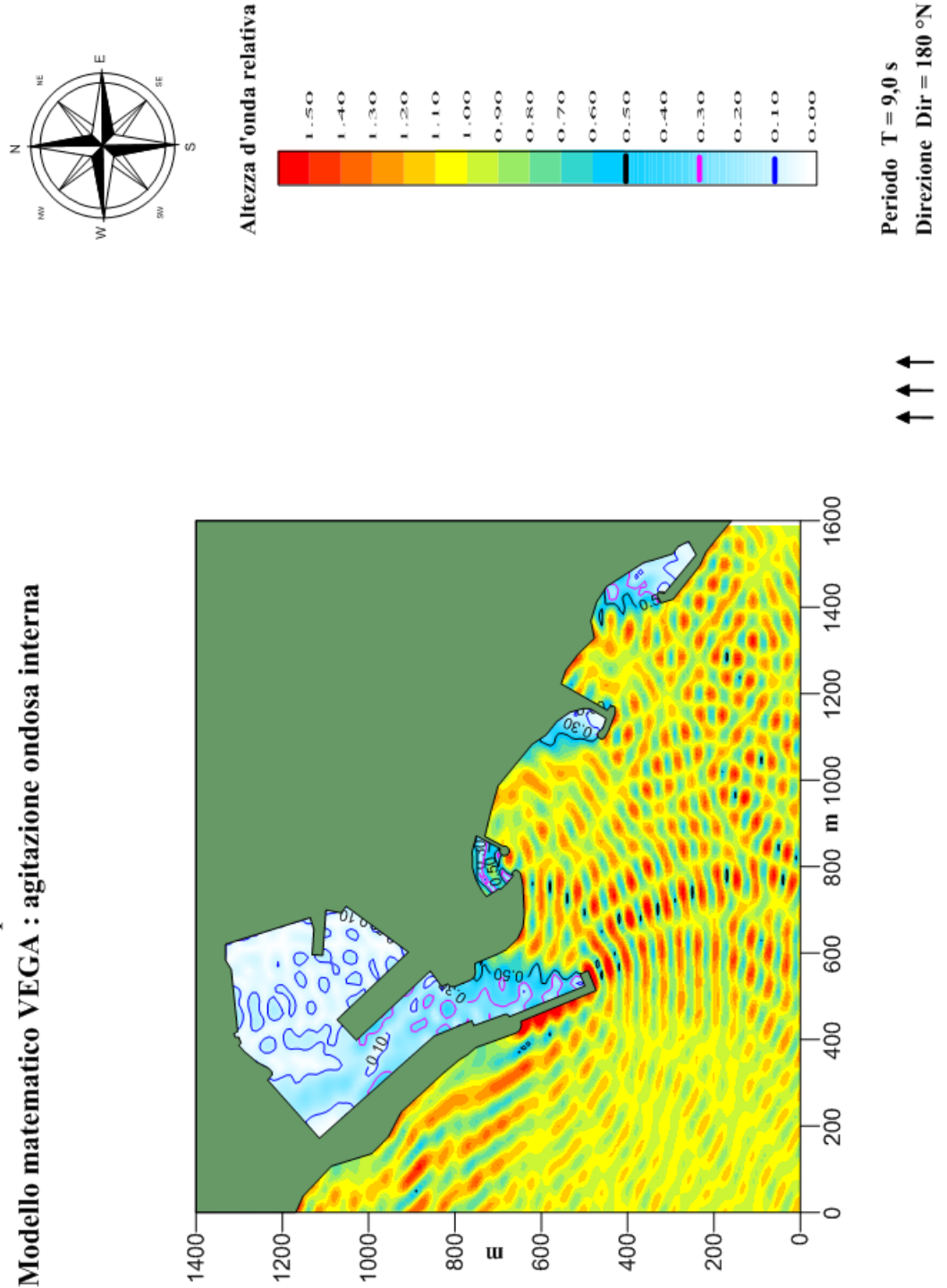


Figura 3.7 – Soluzione 3 – agitazione ondosa per eventi provenienti da $180^\circ N$ e periodo 9 s

Porto di Civitavecchia - Apertura a Sud - Soluzione 3
Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

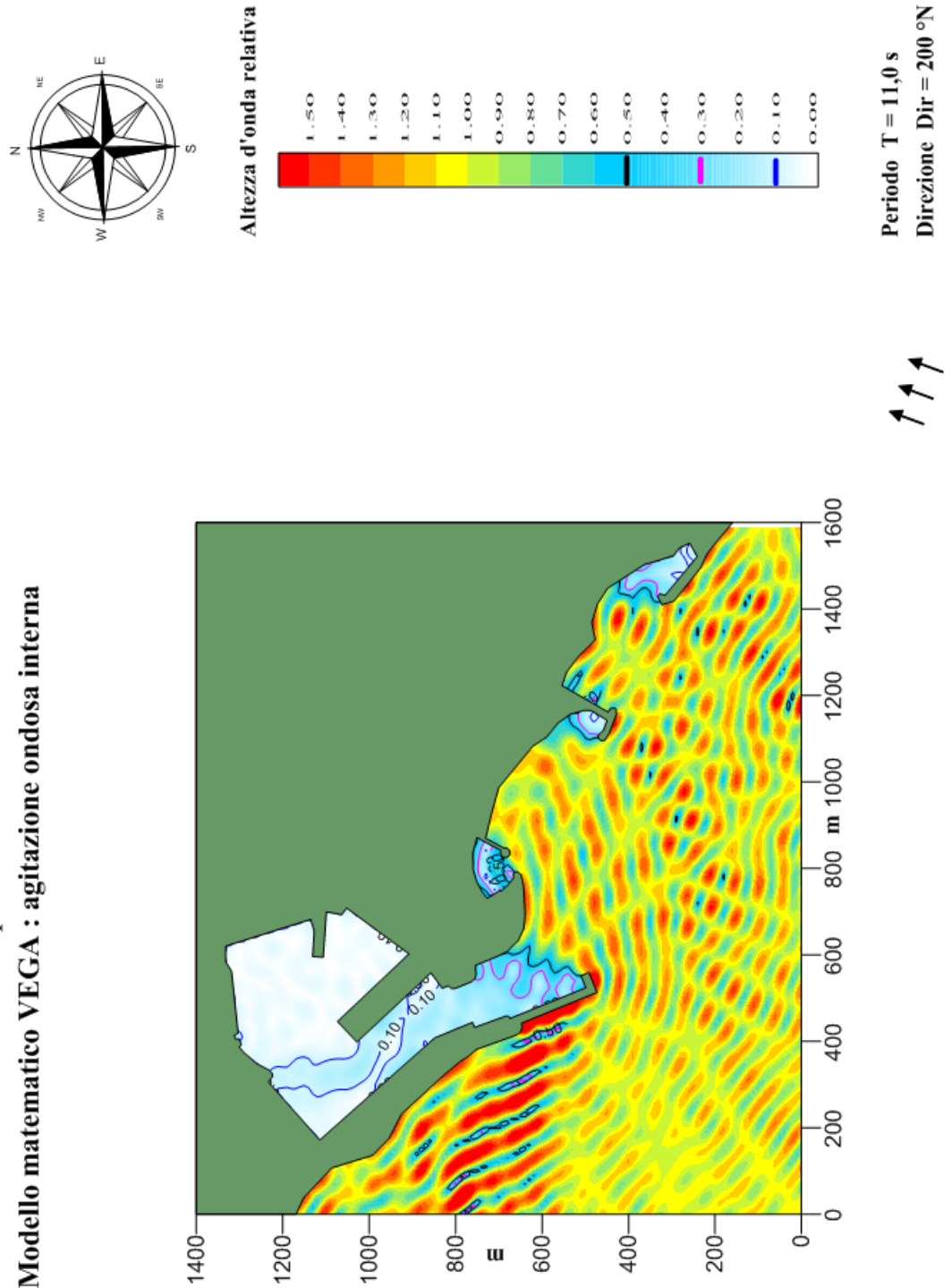


Figura 3.8 – Soluzione 3 – agitazione ondosa per eventi provenienti da 200°N e periodo 11 s

Porto di Civitavecchia - Apertura a Sud - Soluzione 3
Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

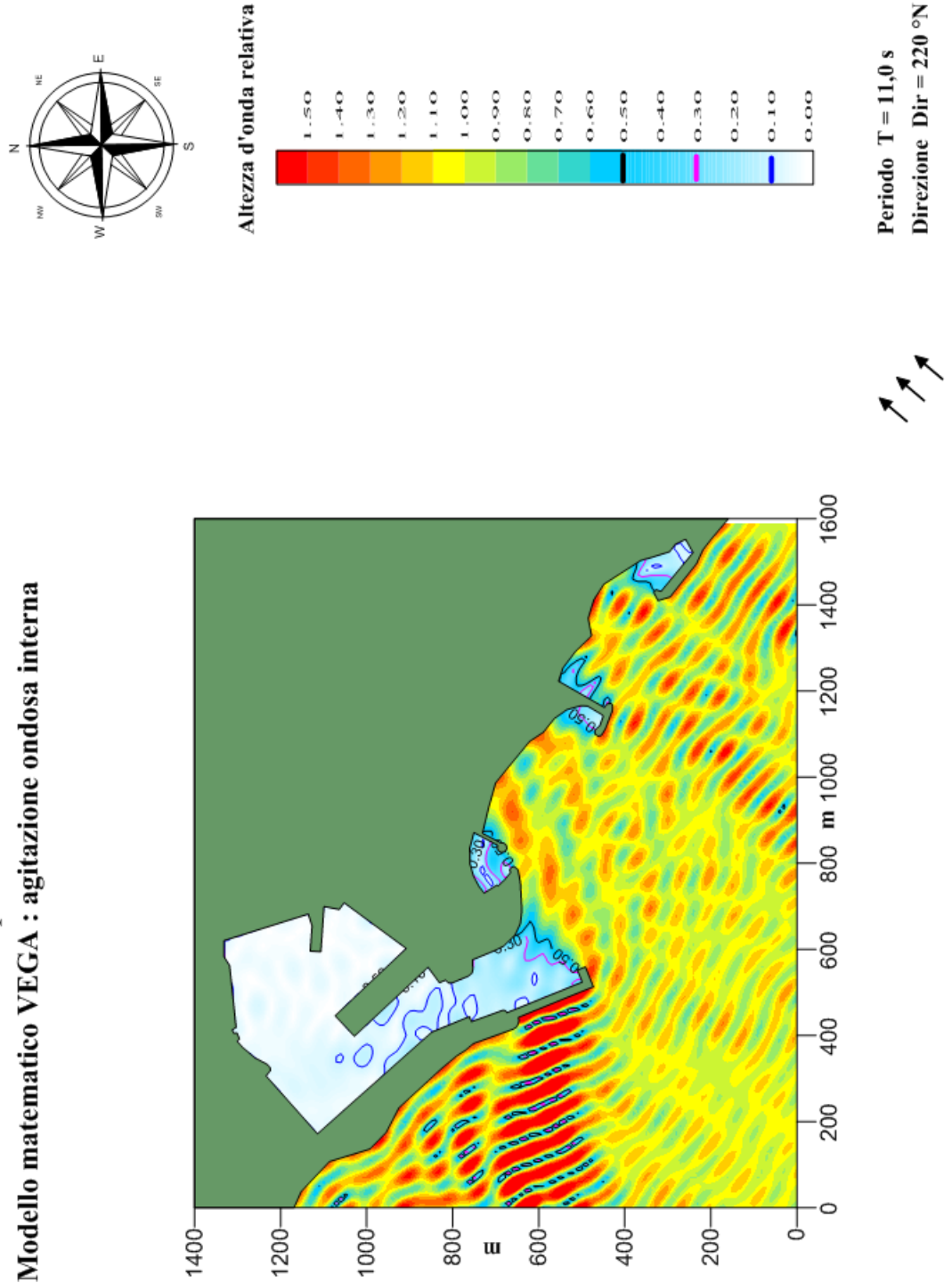


Figura 3.9 – Soluzione 3 – agitazione ondosa per eventi provenienti da $220^\circ N$ e periodo 11 s

4 Analisi dei risultati

Dall'analisi dei risultati ottenuti dall'applicazione del modello VEGA, emerge come entrambe le configurazioni ipotizzate del nuovo varco di accesso a Sud del porto di Civitavecchia producano una adeguata protezione delle banchine interne del porto dall'ingresso del moto ondoso.

Per la direzione di 180° N di provenienza del moto ondoso, le soluzioni considerate evidenziano valori di altezza d'onda residua del tutto simili, con valori massimi di altezza d'onda residua pari a circa il 30% dell'altezza d'onda incidente concentrati all'interno della zona di avamporto del nuovo ingresso e puntualmente lungo le banchine limitrofe al varco; nelle restanti porzioni di banchine e all'interno del porto i valori di altezza d'onda residua si attestano a valori massimi del 10% dell'onda incidente.

Per le direzioni di 200° N e 220° N di provenienza del moto ondoso, le Soluzioni 2 e 3 risultano restituire un grado di protezione maggiore rispetto alla Soluzione 1. In particolare, per la direzione 200° N di provenienza del moto ondoso, la Soluzione 1 evidenzia valori massimi di altezza d'onda residua pari al 30% dell'altezza d'onda incidente in corrispondenza dell'avamporto e puntualmente lungo le banchine prossime al varco mentre per le Soluzioni 2 e 3 i valori massimi di circa il 30% dell'altezza d'onda incidente si concentrano nella sola zona di avamporto mentre lungo le banchine i valori massimi di altezza d'onda residua si attestano a circa il 10% dell'onda incidente. Nelle restanti porzioni interne del porto, sia la Soluzione 1 che le Soluzioni 2 e 3 mostrano valori massimi di altezza d'onda residua pari a circa il 10% dell'altezza d'onda incidente. Per la direzione di 220° N di incidenza del moto ondoso, sia la Soluzione 1 che le Soluzioni 2 e 3 mostrano valori ottimali di attenuazione del moto ondoso con valori massimi di altezza d'onda residua pari al 10% dell'altezza d'onda incidente; le Soluzioni 2 e 3 mostrano comunque una maggiore attenuazione del moto ondoso residuo in corrispondenza delle banchine interne del porto, con una sostanziale riduzione delle zone contraddistinte dai valori massimi di onda residua rispetto alla Soluzione 1.

Per quanto riguarda l'operatività degli ormeggi va evidenziato che la banchina Cialdi non sarà utilizzata per l'ormeggio delle imbarcazioni al fine di garantire un'adeguata larghezza per il transito in sicurezza delle navi o delle imbarcazioni da diporto.

Riguardo agli ormeggi lungo la banchina Umberto I, destinata alle navi da crociera di modeste dimensioni o agli yacht, i livelli di agitazione residua sono tali da consentire

l'ormeggio in sicurezza. Per le rimanenti aree di ormeggio all'interno del bacino storico i livelli di agitazione ondosa risultano trascurabili.

5 Conclusioni e scelta del layout progettuale

I risultati ottenuti dallo studio di penetrazione del moto ondoso hanno evidenziato come il layout del nuovo accesso a Sud del porto di Civitavecchia risulti in grado di garantire un'adeguata protezione nei confronti della penetrazione del moto ondoso in occasione delle mareggiate significative.

L'ottimizzazione del layout ha riguardato dapprima lo sviluppo planimetrico delle opere a scogliera, caratterizzate da un minor grado di riflessione di moto ondoso a vantaggio di una riduzione delle opere a parete verticale caratterizzate da valori maggiori di riflessione del moto ondoso, ottenendo in questo modo una maggiore attenuazione del moto ondoso residuo.

Successivamente il processo di ottimizzazione ha coniugato la necessità di contenere l'agitazione ondosa con quelle connesse alla navigabilità. La soluzione progettuale prescelta permette di conseguire tale obiettivo.

APPENDICE: Descrizione sintetica del modello VEGA

Il modello numerico VEGA utilizzato è classificabile come modello irrotazionale lineare bidimensionale per onde armoniche. Il modello è basato sull'equazione di Helmholtz valida sotto le seguenti ipotesi:

- irrotazionalità del moto;
- rapporto $H/L \ll 1$ dove H ed L sono rispettivamente l'altezza e la lunghezza d'onda;
- assenza di dissipazioni;
- assenza di forze legate alla rotazione terrestre (forze di Coriolis);
- profondità del fondale costante;
- fondo impermeabile;
- variazione verticale del potenziale delle velocità coincidente con la soluzione per onde progressive lineari su fondale costante;
- onde armoniche nel tempo (monocromatiche).

L'equazione ellittica di Helmholtz risulta:

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0$$

dove:

k = numero d'onda calcolato tramite la relazione di dispersione della teoria lineare
 $(\omega^2 = gk \tanh(kd))$

$\phi(x,y)$ = potenziale bidimensionale delle velocità orbitali delle particelle

∇^2 = operatore di Laplace definito nel piano x,y coincidente con il livello medio marino

Con le ipotesi poste tale equazione è in grado di simulare correttamente il fenomeno combinato di diffrazione-riflessione di onde armoniche lineari. Per risolvere l'equazione di Helmholtz, di tipo ellittico, è necessario imporre condizioni al contorno note su tutta la frontiera del dominio di integrazione. Nel caso di bacini portuali si impone lungo l'imboccatura portuale (o comunque lungo i contorni di continuità con il semispazio infinito escluso dal dominio di integrazione) che venga soddisfatta una opportuna condizione di radiazione. Contemporaneamente lungo il resto della frontiera vengono imposte condizioni sulla derivata direzionale del potenziale delle velocità (totale o parziale riflessione).

Il modello numerico VEGA risolve l'equazione di Helmholtz tramite la tecnica numerica degli elementi di contorno. In breve la tecnica consiste nel ridurre l'equazione ellittica di Helmholtz definita sul campo bidimensionale di calcolo ad un'equazione integrale definita sulla sola frontiera del campo. La discretizzazione della frontiera permette quindi di ridurre l'equazione integrale ad un sistema di equazioni lineari definite nel campo complesso dove

Le incognite sono costituite da un sistema di sorgenti distribuite sulla frontiera discretizzata. La risoluzione del sistema di equazioni, che costituisce la parte più onerosa dal punto di vista computazionale del modello numerico, è ottenuta utilizzando il metodo delle eliminazioni successive di Gauss. La dimensione del sistema di equazioni dipende dal numero di sorgenti incognite introdotte sulla frontiera che risulta essere a sua volta funzione della lunghezza d'onda (sono necessarie almeno 5 sorgenti per lunghezza d'onda) e della dimensione dell'elemento (banchina, canale) più corto presente nell'area da simulare (sono necessarie almeno 6 sorgenti per ogni elemento). Risolto il sistema di equazioni è quindi possibile calcolare in ogni punto del campo di potenziale delle velocità orbitali delle particelle idriche in superficie, l'altezza d'onda e la sua fase.

Il modello numerico richiede i seguenti dati in ingresso:

- coordinate dei vertici del contorno dell'area portuale;
- posizione dell'imboccatura/e portuale;
- direzione e periodo del moto ondoso sull'imboccatura portuale;
- profondità del fondale all'interno del porto;
- profondità del fondale all'esterno dell'imboccatura portuale;
- passo di discretizzazione del contorno;
- coefficienti di riflessione delle banchine;
- coordinate dei punti dove devono essere calcolati i risultati.

Il modello fornisce come risultati:

- altezza d'onda, potenziale delle velocità e fase nei punti richiesti.

I risultati ottenuti possono essere restituiti sia sotto forma numerica che grafica.