

Servizi di modellistica numerica per lo studio dell'idrodinamica,
del trasporto di sedimenti e della morfodinamica delle aree
costiere dei porti di La Spezia e di Marina di Carrara

CIG 7543732494

S5

STUDIO IDRODINAMICO STUDIO MODELLISTICO DELL'AGITAZIONE ONDOSA ALL'INTERNO DEL PORTO DI MARINA DI CARRARA

1 9 0 0 3 S R 5 0 1 2

Committente

AdSP
Mar Ligure Orientale
R.U.P.
ing. Davide VETRALA

Associazione Temporanea di Imprese (A.T.I.)

Capogruppo (Mandataria)
MODIMAR S.r.l.



Via Monte Zebio 40 - 00195 ROMA
06.3269461 - www.modimar.it

Mandante
TECHNITAL S.p.a.



Via Carlo Cattaneo, 20 - 37121 VERONA
www.technital.it

28.11.2022	2	Emissione Finale	Castellino	Del Bianco	Contini
05.10.2022	1	Integrazioni nell'ambito della procedura di VAS	Castellino	Del Bianco	Contini
01.02.2022	0	Emissione per commenti del Cliente	Castellino	Del Bianco	Contini
Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:



Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Orientale

ACCORDO QUADRO PER IL SERVIZIO DI MODELLISTICA NUMERICA PER LO STUDIO DEL CLIMA METEOMARINO, DELL'IDRODINAMICA, DEL TRASPORTO DEI SEDIMENTI E DELLA MORFODINAMICA NELLE AREE COSTIERE DEI PORTI DI LA SPEZIA E MARINA DI CARRARA

S5

Studio idrodinamico

STUDIO MODELLISTICO DELL'AGITAZIONE ONDOSA
ALL'INTERNO DEL PORTO DI MARINA DI CARRARA

A.T.I. MODIMAR s.r.l. Via Monte Zebio 40, Roma
TECHNITAL s.p.a. Via Carlo Cattaneo, 20 Verona

CODICE DOCUMENTO 19 003 SR 501 0

REVISIONI DATA
2 21/11/2022 Emissione finale

INDICE

Capitolo 1	Premesse.....	1
1.1	Introduzione.....	1
1.2	Obiettivi dello studio e contenuti minimi.....	1
1.3	Contenuti del presente rapporto.....	1
Capitolo 2	Metodologia di lavoro e sintesi dei risultati	3
Capitolo 3	Dati di base	8
3.1	Condizioni di moto ondoso al largo.....	8
3.2	Condizioni di moto ondoso estreme al largo	9
3.3	Condizioni di moto ondoso in prossimità del porto di Marina di Carrara.....	10
3.4	Dati batimetrici e topografici	12
Capitolo 4	Applicazione del modello VEGA	14
4.1	Descrizione del modello di calcolo	14
4.2	Selezione delle forzanti di moto ondoso simulate	15
4.3	Descrizione della configurazione attuale	16
4.4	Vincoli per le proposte di assetto delle opere foranee	17
4.5	Descrizione sintetica delle configurazioni portuali simulate con VEGA	17
4.6	Selezione della configurazione con prolungamento dell'attuale molo sopraflutto e la realizzazione di un nuovo molo sottoflutto	28
4.7	Sintesi delle simulazioni effettuate con il modello numerico VEGA	29
Capitolo 5	Applicazione del modello GEMMA.....	83
5.1	Condizioni al contorno	83
5.2	Modello di frangimento d'onda	85
5.3	Definizione del dominio di calcolo	86
5.4	Metodologia seguita per la selezione ed applicazione del modello GEMMA	87
Capitolo 6	Analisi del “downtime” delle banchine	89
6.1	Metodologia di analisi	89
6.2	Risultati sulla Configurazione Attuale e di PRP	91
Capitolo 7	Verifica delle condizioni di sicurezza portuale	96
7.1	Metodologia di analisi	96
7.2	Risultati.....	96
Capitolo 8	Studio di risonanza sulla Configurazione di PRP.....	98
8.1	Descrizione della metodologia di analisi e dei risultati ottenuti	98
8.2	Analisi della configurazione di PRP del porto di Marina di Carrara.....	101

Capitolo 1 Premesse

1.1 Introduzione

A seguito dell'espletamento di una gara con procedura aperta ed offerta economicamente più vantaggiosa, l'Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Orientale (AdSP-MLOr) ha stipulato con l'A.T.I. tra le Società Modimar S.r.l. e Technital S.p.A. il contratto avente per oggetto un Accordo Quadro quadriennale (nel seguito per brevità AQ) per il servizio di modellistica numerica articolato in 8 specifiche prestazioni, applicate agli studi del clima meteomarino, dell'idrodinamica, del trasporto dei sedimenti e della morfodinamica nelle aree costiere dei porti di La Spezia e Marina di Carrara.

Il presente documento è relativo alla prestazione S5 inerente lo *Studio Modellistico dell'agitazione ondosa finalizzato alla individuazione della configurazione plano-altimetrica ottimale delle opere previste nel nuovo PRP del porto di Marina di Carrara*.

Lo studio, avviato dal Responsabile Unico del Procedimento nell'ambito della Commessa d'Ordine n°2 (CdO del 29/11/2019), è stato redatto anche nel rispetto delle prescrizioni tecniche, disposte dall'art. 4 del Capitolato Speciale Descrittivo e Prestazionale (CSDP) allegato al Contratto di Accordo Quadro del 03/04/2019, n.32/2019 di Repertorio, e secondo le modalità operative e i contenuti di cui all'offerta tecnica presentata dall'A.T.I. in sede di gara che costituisce parte integrante del suddetto contratto.

1.2 Obiettivi dello studio e contenuti minimi

Con riferimento al CSDP la finalità prioritaria della prestazione S5 è quella di analizzare e confrontare con dati oggettivi, le possibili condizioni di agitazione ondosa residua (onde corte e di lungo periodo) nel porto di Marina di Carrara, assumendo come scenario di riferimento l'attuale assetto planimetrico delle opere foranee e delle banchine di ormeggio e confrontandolo con almeno cinque configurazioni alternative inerenti l'impostazione ed ottimizzazione del nuovo assetto infrastrutturale di Piano Regolatore Portuale (PRP) del porto di Marina di Carrara.

Come descritto nel seguito, le attività svolte nell'ambito del presente studio oltre a soddisfare pienamente agli obiettivi minimi previsti dal CSDP, avendo ad esempio analizzato più di dieci configurazioni alternative portuali a fronte delle cinque richieste, hanno ottemperato anche ai contenuti dell'offerta tecnica dell'A.T.I. avendo studiato in relazione alla soluzione di PRP selezionata:

- (i) l'operatività media annuale delle banchine portuali;
- (ii) le condizioni di sicurezza per l'ormeggio delle navi nel porto inclusa la frequenza di frangimento del moto ondoso sull'imboccatura portuale;
- (iii) i fenomeni di risonanza portuale confrontandoli con quelli che caratterizzano la situazione attuale.

1.3 Contenuti del presente rapporto

Nei capitoli seguenti sono riportati i risultati delle modellazioni numeriche condotte nel rispetto dei seguenti contenuti minimi disposti dal CSDP:

- impostazione metodologica dello studio di agitazione interna portuale per la selezione dei modelli di calcolo in funzione delle finalità applicative dei fenomeni da riprodurre;
- definizione dei dati di moto ondoso (in termini di direzione, periodo e frequenza di accadimento) rappresentativi delle condizioni estreme e di operatività ordinaria desunti dallo Studio Meteomarino (elaborato S1 redatto nell'ambito dello stesso AQ);
- studio della penetrazione del moto ondoso nel bacino portuale finalizzato all'analisi comparativa tra le soluzioni alternative di PRP;
- analisi dell'operatività delle banchine portuali in relazione alla Configurazione Definitiva di PRP;
- analisi delle condizioni di sicurezza portuale in relazione alla Configurazione Definitiva di PRP;
- studio dei fenomeni di risonanza portuale in relazione alla Configurazione Definitiva di PRP e confronto con la situazione attuale.

Capitolo 2 Metodologia di lavoro e sintesi dei risultati

Come descritto in precedenza l'obiettivo principale dello studio è stato quello di supportare l'AdSP nella scelta ed ottimizzazione della configurazione planimetrica delle opere foranee del nuovo PRP del Porto di Marina di Carrara.

Per conseguire questo obiettivo il lavoro è stato suddiviso in tre fasi.

Nell'ambito della prima fase, con riferimento allo Studio S1 (vedi documenti: S1 Studio Meteomarino volume 1 e volume 3) sono state definite le condizioni di moto ondoso da utilizzare per le analisi di penetrazione del moto ondoso nel porto.

Nella seconda fase, sulla base dell'Accordo promosso dalla Regione Toscana ⁽¹⁾ e dei relativi obiettivi di sviluppo individuati dal DPSS dell'AdSP ⁽²⁾, sono stati delineati i vincoli per le proposte di assetto delle opere foranee. Al riguardo sono state analizzate dal punto di vista della penetrazione del moto ondoso più di una decina di configurazioni planimetriche alternative per le opere portuali prendendo in esame diverse soluzioni tipologiche. L'analisi comparativa tra le diverse configurazioni esaminate ha portato a individuare con dati oggettivi una "Configurazione Definitiva" per le opere foranee da contemplare nel PRP.

Infine, nella terza fase la suddetta "Configurazione Definitiva" di assetto planimetrico delle opere portuali (interne ed esterne) cui fare riferimento nella impostazione del PRP è stata oggetto di ulteriori approfondimenti, oltre alla penetrazione del moto ondoso, riguardando l'analisi di:

- agitazione ondosa residua per la definizione dell'operatività media annuale delle banchine portuali;
- frequenza di frangimento delle onde nell'area prospiciente l'imboccatura portuale;
- fenomeni di risonanza portuale rapportati a quelli che interessano l'attuale bacino portuale.

Al fine di ottimizzare la seconda fase del lavoro, nell'ambito della quale come detto sono state analizzate, oltre alla situazione attuale, più di dieci configurazioni portuali alternative per un totale di 65 simulazioni numeriche, si è deciso di utilizzare per questa fase il modello numerico VEGA sviluppato dalla Modimar s.r.l. che risolve l'equazione ellittica di Helmholtz con il metodo degli elementi di contorno ("boundary elements"). Il modello numerico ipotizzando fondale costante tiene conto dei processi fisici combinati di diffrazione e riflessione, che generalmente dominano sulla penetrazione del moto ondoso, per i bacini portuali con fondali comunque abbastanza elevati e regolari, rispetto ai fenomeni di rifrazione, shoaling e frangimento che invece possono diventare significativi su fondali variabili e gradualmente decrescenti. L'assunzione di fondale costante, seppur introduce qualche approssimazione nei risultati, consente di modificare in modo relativamente semplice la geometria delle opere foranee rendendo il modello VEGA un valido ed efficiente strumento per l'analisi preliminare delle

¹Con delibera della Giunta Regionale Toscana n. 13 del 15/01/2018 è stato approvato lo schema di Accordo ex art. 15 della L. 241/1990 sottoscritto il 13/02/2018 tra Regione Toscana, Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Orientale e Comune di Carrara finalizzato allo sviluppo condiviso del Porto di Marina di Carrara.

²Il Documento di Pianificazione Strategica di Sistema (DPSS) del Mar Ligure Orientale è stato adottato con delibera del Comitato di Gestione n.7 del 24/07/2019. Recepite le intese del MIT in data 17/04/2020 e della Regione Toscana il 14/05/2020, il DPSS è stato approvato dalla Regione Liguria con Delibera di Giunta Regionale n.624 del 17/07/2020.

configurazioni alternative portuali. Si evidenzia a tal riguardo che generalmente le zone a fondale variabile, dove si verificano i fenomeni di rifrazione, shoaling e frangimento trascurati dal modello VEGA, riguardano principalmente la zona esterna ai bacini portuali, per cui i risultati del modello risultano piuttosto corretti all'interno degli stessi bacini.

Per ogni configurazione portuale esaminata con il modello VEGA è stata studiata la penetrazione del moto ondoso in relazione a cinque stati di mare incidenti che coprono l'intero settore di traversia del porto. Le simulazioni sono state condotte in campo lineare (assenza di fenomeni dissipativi) assumendo quindi una altezza d'onda incidente unitaria. Di conseguenza i risultati sono stati forniti sotto forma di coefficiente di agitazione all'interno del porto. I periodi e le direzioni delle condizioni di moto ondoso simulate sono stati scelti facendo riferimento agli stati di mare caratterizzati da una frequenza di accadimento annuale.

Nell'impostazione della terza fase del lavoro, inerente l'analisi di dettaglio dei fenomeni di agitazione ondosa per la Soluzione Definitiva, si è fatto riferimento ai codici numerici CGWAVE e GEMMA che consentono di simulare i principali fenomeni di propagazione del moto ondoso su fondali variabili risolvendo entrambi l'equazione di "mild-slope" (Berkhoff, 1972³, De Girolamo et al., 1988⁴, Beltrami et al. 2001⁵, Bellotti et al. 2003⁶) tramite la tecnica agli elementi finiti. In dettaglio: CGWAVE è stato sviluppato da USACE-CERC in collaborazione con il Prof. Panchang; GEMMA è stato sviluppato dalla MODIMAR S.r.l. con il supporto scientifico del Prof. Paolo De Girolamo. Entrambi i codici: risolvono la versione ellittica dell'equazione detta di "mild-slope", valida per fondali lentamente variabili; simulano numericamente la propagazione di onde armoniche con energia dispersa in frequenza e direzione tenendo conto dei fenomeni combinati di rifrazione, shoaling, riflessione, diffrazione indotta sia da strutture emergenti che da variazioni di fondale e dissipazione di energia dovute al frangimento e all'attrito sul fondo; la tecnica numerica per la soluzione dell'equazione è agli elementi finiti. A tal scopo il dominio di calcolo è discretizzato tramite elementi di forma triangolare, le cui dimensioni possono variare nello spazio, riuscendo così a discretizzare agevolmente anche contorni irregolari componendo così una maglia non strutturata. La principale differenza tra questi due codici di calcolo è rappresentata dal criterio di frangimento: CGWAVE utilizza il criterio di Dally, Dean e Dalrymple (1985) (Wave height variation across beaches of arbitrary profiles - Journal of Geophysical Research 90, 06:11, 917-11, 927); GEMMA utilizza il criterio di Battjes e Janssen (1978) (Battjes, J.A. & J.P.F.M. Janssen, Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, New York). Come dimostrato da De Girolamo et al. (1988), il criterio di frangimento implementato per GEMMA è molto più adatto rispetto a quello utilizzato per CGWAVE, soprattutto in presenza lungo il margine "lato terra" del dominio di calcolo, di fasce litoranee sabbiose con fondali a debole pendenza come nel caso in esame. A tal riguardo si

³Berkhoff, J.C.W., (1972), "Computation of combined refraction-diffraction", Proc., 13th Int. Conf. On Coast. Eng., ASCE, New York, 471-490.

⁴ De Girolamo, P., Kostense, J.K., Dingemans, M.W. (1988), "Inclusion of wave breaking in a mild slope model", Proc. Int. Con. Computer model in Ocean Eng., Schrefler&Zienkiewicz, Balkema, Rotterdam, the Netherlands.

⁵ Beltrami, G.M., Bellotti, G., De Girolamo, P. and Sammarco, P. (2001) "Treatment of Wave Breaking and Total Absorption in a Mild-slope Equation FEM model", Jour. Of Waterway, Port, Coastal and ocean Eng., ASCE, Sept.-Oct. 2001, pp. 263-271.

⁶ Bellotti, G., Beltrami, G.M., and De Girolamo, P. (2003), "Internal generation of waves in 2D fully elliptic mild-slope equation FEM models", Coastal Engineering, 49 (2003) pp. 71-81.

evidenza che il criterio di Dally et al. introduce delle riflessioni “spurie” nei modelli mild slope che tengono conto del campo riflesso.

Sulla base di una prima serie di simulazioni comparative, condotte per l'attuale configurazione portuale utilizzando entrambi i modelli e facendo anche riferimento alle misure di campo e relative analisi condotte negli anni 2000 per monitorare gli stati di moto ondoso residuo, ossia l'agitazione ondosa interna al bacino portuale, ed i fenomeni di risonanza nel porto di Marina di Carrara, si è verificato oggettivamente che il modello GEMMA è quello più adeguato, rispetto al modello CGWAVE, per il caso in esame.

Pertanto nella terza fase del lavoro si è utilizzato il modello GEMMA simulando la conformazione portuale della “Configurazione Definitiva”. Le prime applicazioni del modello GEMMA sono state condotte in assenza di fenomeni dissipativi ed i risultati forniti hanno sostanzialmente confermato quelli ottenuti nella fase precedente con il modello VEGA. Infine, il modello GEMMA è stato applicato anche tenendo conto dei fenomeni dissipativi constatando che il livello medio di agitazione ondosa nel porto tende a diminuire.

Le analisi relative all'operatività media annuale delle banchine portuali sono state eseguite con il modello GEMMA sia in relazione alla situazione attuale, sia rispetto alla “Configurazione Definitiva”. Per le due soluzioni l'operatività è stata eseguita calcolando il numero di ore l'anno durante le quali, mediamente, viene superata la soglia di altezza d'onda significativa massima ammissibile, per consentire le operazioni di carico e scarico. Il calcolo ovviamente ha riguardato le zone di ormeggio della nave, ovvero i fronti di accosto delle singole banchine. Il tempo durante il quale viene superata la soglia per ciascuna banchina, viene denominato “downtime” o, in italiano, tempo di non operatività della banchina. In accordo con la letteratura specializzata per il calcolo del “downtime” delle banchine si è assunto il valore di soglia $H_{s,lim} = 0.5$ m, per navi Contenitori e Ro-Ro, ampiamente cautelativo anche per i traffici commerciali tradizionali (bulk-carrier). Le analisi sono state condotte schematizzando il clima di moto ondoso medio annuale in 12 stati di mare. I risultati ottenuti mostrano che la configurazione di PRP, rispetto alla situazione attuale, dà luogo ad un aumento di operatività media attuale nel bacino interno a ragione dell'estensione della diga di sopraflutto del porto.

A titolo di esempio si cita che mentre attualmente lungo la banchina Fiorillo, localizzata lungo il lato interno del molo di sottoflutto, la frequenza di superamento della soglia di H_s di 0.5 m è pari a circa 450 ore/anno che corrispondono a poco meno di 20 giorni/anno, con la configurazione di PRP il “downtime” si riduce praticamente a zero. Un miglioramento si ottiene anche per gli specchi portuali più interni rispetto ai quali attualmente la frequenza di superamento della soglia di altezza d'onda limite è pari a circa 600 ore/anno e che, anche in questo caso, si riducono praticamente a zero per la configurazione di PRP.

Una ultima osservazione per la configurazione di PRP riguarda la possibilità di adibire a banchina la testata dell'attuale molo di sottoflutto. I risultati numerici ottenuti mostrano che, poiché il canale di accesso al porto rimane la zona maggiormente esposta alla penetrazione del moto ondoso, su questa banchina si ottiene una frequenza di superamento della soglia molto elevata, pari a circa 900 ore/anno.

Per quanto riguarda la nuova darsena che si viene a creare nella configurazione di PRP prolungando la diga foranea e spostando il sottoflutto in asse con la foce del Carrione, non si sono riscontrati problemi particolari di agitazione ondosa rispetto a condizioni medie annuali

essendo il “downtime” per la banchina maggiormente esposta non superiore a circa 200 ore/anno.

La sicurezza del bacino portuale è stata verificata prendendo in esame stati di mare estremi di moto ondoso che comunque presentano una possibilità di verificarsi più volte durante la vita economica dell'opera. Seguendo l'approccio tradizionale si è scelto per le condizioni di moto ondoso incidenti il tempo di ritorno $T_r = 10$ anni rispetto al quale sono state esaminate due direzioni di moto ondoso ($H_s = 4.30$ m da $180^\circ N$ al largo e $H_s = 6.30$ m da $210^\circ N$ al largo). I risultati ottenuti mostrano che all'interno del porto per la configurazione di PRP non si verificano condizioni tali da pregiudicare per la sola agitazione ondosa l'ormeggio delle navi.

Per quanto riguarda la probabilità di frangimento in corrispondenza della nuova imboccatura portuale per la configurazione di PRP, posta su fondali di -12.0 m sul l.m.m., i risultati ottenuti mostrano che in condizioni di moto ondoso estreme associate ad un tempo di ritorno 10 anni (con $H_s = 4.30$ m da $180^\circ N$ per il settore da 160 a $180^\circ N$ al largo e $H_s = 6.30$ m da $210^\circ N$ per quello da 210 a $240^\circ N$ al largo) la frequenza di frangimento è nell'ordine del 5% delle onde, valore sicuramente non compatibile con la sicurezza delle imbarcazioni in ingresso nel porto specialmente per quelle con minore dislocamento.

Per quanto riguarda gli aspetti connessi ai fenomeni di risonanza, come già accennato, negli anni 2000 l'Autorità Portuale del Porto di Marina di Carrara (poi confluita nella AdSP-MLOr) ha gestito una estesa campagna di misure di campo e relative attività di analisi delle oscillazioni di lungo periodo a cui il porto di Marina di Carrara è soggetto durante le mareggiate.

La campagna di misure, che hanno riguardato sia le caratteristiche delle onde incidenti in bassa e alta frequenza, sia le oscillazioni di breve e lungo periodo del bacino portuale, è stata condotta con la collaborazione dell'Università di Roma TRE, la quale ha curato l'analisi e l'interpretazione delle misure di campo. I risultati delle misure e delle analisi eseguite sono riportati nei contributi tecnico-scientifici di seguito elencati:

- Melito I., Cuomo G., Bellotti G., Franco, L., (2006) Field measurements of harbour resonance at Marina di Carrara. In: 30rd International Conference of Coastal Engineering-ASCE, San Diego, USA
- Melito I., Cuomo, G., Franco, L., Guza, R.T., (2007) Harbour resonance at Marina di Carrara: linear and non linear aspects. In: Proceedings of Coastal Structures, 2007, vol 2, pp 1647–1658
- Bellotti, G. and Franco, L., (2011) “Measurements of long waves at the harbour of Marina di Carrara, Italy”, Ocean Dynamics, Springer.
- Bellotti, G., Briganti, R., Beltrami, G.M., and Franco, L., (2012) “Modal Analysis of semi-enclosed basins”, Coastal Engineering, Elsevier.
- Guerrini, M., Bellotti, G., Fan, Y., and Franco, L. (2014), “Numerical modelling of long waves amplification at Marina di Carrara Harbour”, Applied Ocean Research, Elsevier.

In particolare, gli studi eseguiti hanno consentito di calibrare la modellistica numerica applicata nel presente studio identificando con estrema accuratezza i modi propri di oscillazione del bacino portuale attuale e quelli che vengono effettivamente eccitati dalle onde incidenti.

Nell'ambito del presente lavoro è stata eseguita per via numerica l'analisi dei fenomeni di risonanza del bacino portuale in relazione alla configurazione di PRP selezionata al fine di valutare

quali variazioni rispetto alla situazione attuale sono da attendersi con la nuova configurazione plano-altimetrica delle opere foranee.

L'approccio utilizzato per eseguire lo studio è del tutto simile a quello utilizzato negli studi sopra riportati e consiste nel calcolare ed analizzare la risposta in frequenza del bacino al variare del periodo delle onde incidenti.

In tal modo sono stati identificati i periodi propri di oscillazione del bacino (autovalori) e i corrispondenti modi di oscillazione (autovettori).

I risultati ottenuti consentono di affermare che la configurazione selezionata come Definitiva per il PRP può essere considerata migliorativa rispetto alla situazione attuale.

Sicuramente è da attendersi un leggero miglioramento per il bacino esistente, mentre una situazione particolare si verifica per la nuova darsena compresa tra l'attuale e il nuovo molo di sottoflutto.

Nella nuova darsena si possono eccitare il primo e il secondo modo di oscillazione longitudinale, che seppure possono dare luogo a coefficienti di amplificazione piuttosto elevati tali da causare movimenti orizzontali delle navi accentuati sono comunque associati ad una scarsa probabilità di accadimento e quindi non condizionerebbero l'operatività degli ormeggi. Si ritiene che l'ormeggio che potrebbe soffrire maggiormente dei fenomeni di risonanza sia quello relativo al lato corto della nuova darsena in corrispondenza del quale la nave ormeggiata potrebbe essere soggetta a rollio.

Si precisa che, in qualsiasi caso, i primi tre modi di oscillazione sono caratterizzati da un diagramma "stretto" e quindi hanno una scarsa probabilità di essere eccitati a differenza dei modi successivi, che però sono caratterizzati da un coefficiente di amplificazione comunque modesto.

Capitolo 3 Dati di base

Per l'impostazione del dominio di calcolo e delle "forzanti" meteo marine da simulare si è fatto riferimento alle attività già espletate nell'ambito dello stesso AQ di cui si riporta una sintesi nei paragrafi seguenti.

3.1 Condizioni di moto ondoso al largo

La definizione del clima di moto ondoso e la valutazione degli stati di mare più gravosi per il Porto di Marina di Carrara sono stati definiti nell'ambito dello Studio Meteomarino (elaborato S1) al quale si rimanda per il necessario dettaglio, riassumendo nel seguito i principali risultati ottenuti.

La valutazione del clima di moto ondoso è stata effettuata sulla base della serie storica oraria (1979 -2018) dei dati di vento e moto ondoso ricostruita in re-analisi (MeteOceanHindcast Re-Analysis 1979 - 2018 – DICCA). La serie storica utilizzata è quella relativa al punto di coordinate 43.95°N, 9.88°E posto al largo dei porti di La Spezia e Marina di Carrara.

In Figura 3-1 è riportato il clima ondometrico rappresentato in forma di diagramma polare della frequenza di accadimento per classi degli eventi di moto ondoso di altezza significativa superiore a 0.5 m al largo di Marina di Carrara.

Il clima di moto ondoso mostra chiaramente che le onde più frequenti e quelle di maggiore altezza provengono da un unico settore direzionale (clima unimodale), ovvero da quello di libeccio rispetto al quale il litorale di Marina di Carrara risulta direttamente esposto.

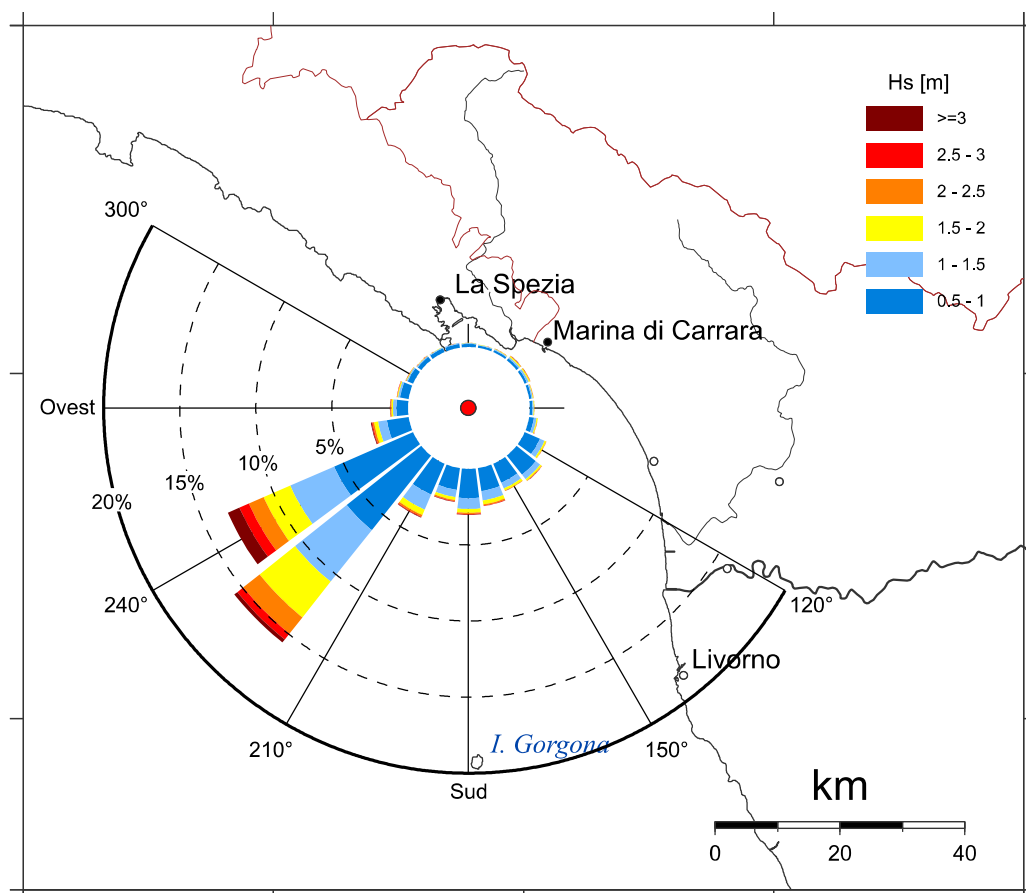


Figura 3-1. Clima di moto ondoso al largo di Marina di Carrara nel punto di coordinate 43.95°N, 9.88°E.

3.2 Condizioni di moto ondoso estreme al largo

L'analisi statistica del campione di valori estremi di moto ondoso estratti dalla suddetta serie storica, opportunamente calibrati sulla base del confronto con i dati misurati dalla boa RON di La Spezia, ed analizzati allo scopo di garantire l'omogeneità e l'indipendenza statistica del suddetto campione, ha permesso di valutare la correlazione H_s (altezza d'onda significativa) – T_r (tempo di ritorno) riportata nella seguente Tabella 3-1.

Tabella 3-1. Eventi estremi di moto ondoso al largo di Marina di Carrara in funzione del tempo di ritorno T_r .

Tempo di ritorno	A-Settore 150 - 210 °N		B-Settore 210 - 270 °N		C-Settore 270 - 330 °N	
	H_s	T_p	H_s	T_p	H_s	T_p
[anni]	[m]	[s]	[m]	[m]	[m]	[m]
2	3.6	9.6	5.4	11.6	2.9	10.0
10	4.6	10.4	6.4	12.0	3.6	10.7
50	5.6	11.0	7.3	12.3	4.3	11.3
100	5.9	11.2	7.7	12.5	4.6	11.5

L'analisi di omogeneità meteorologica dei dati ha portato a valutare la sussistenza di tre distinti settori di provenienza del moto ondoso i quali sono rappresentati nella Figura 3-2: il settore di traversia principale compreso tra 210 °N e 270 °N (B) e due settori secondari compresi tra 150 °N e 210 °N (A) e tra 270 e 330°N (C). Per ogni settore di traversia è stata ricavata la legge di correlazione tra altezza significativa (H_s) e periodo di picco spettrale (T_p) che ha permesso di associare alle altezze d'onda estreme il relativo periodo di picco da assumere.

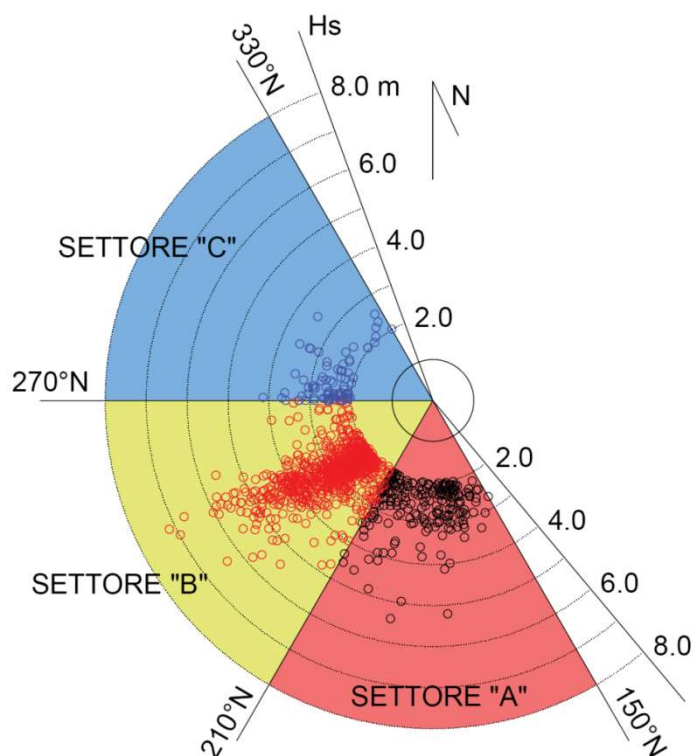


Figura 3-2 - Moto ondoso al largo - distribuzione direzionale dei valori estremi per settori di provenienza

A ragione della conformazione planimetrica del porto di Marina di Carrara, del tipo “a bacino” con imboccatura orientata verso Sud-Est, le condizioni di moto ondoso più sfavorevoli dal punto di vista della penetrazione del moto ondoso sono rappresentate dagli stati di mare provenienti da “mezzogiorno” (settore A 150 - 210 °N) e da “libeccio” (settore B 210 - 270 °N).

3.3 Condizioni di moto ondoso in prossimità del porto di Marina di Carrara

Nell'ambito dello Studio Meteomarinario S1 è stato applicato il modello numerico di propagazione del moto ondoso SWAN per trasferire il clima di moto ondoso al largo, definito sulla base di una successione di stati di mare e di vento aventi ciascuno una determinata frequenza di accadimento, in tre punti posti in prossimità della costa localizzati lungo il litorale di Marina di Carrara ad una profondità compresa tra 10 e 15 m (vedi Figura 3-3).

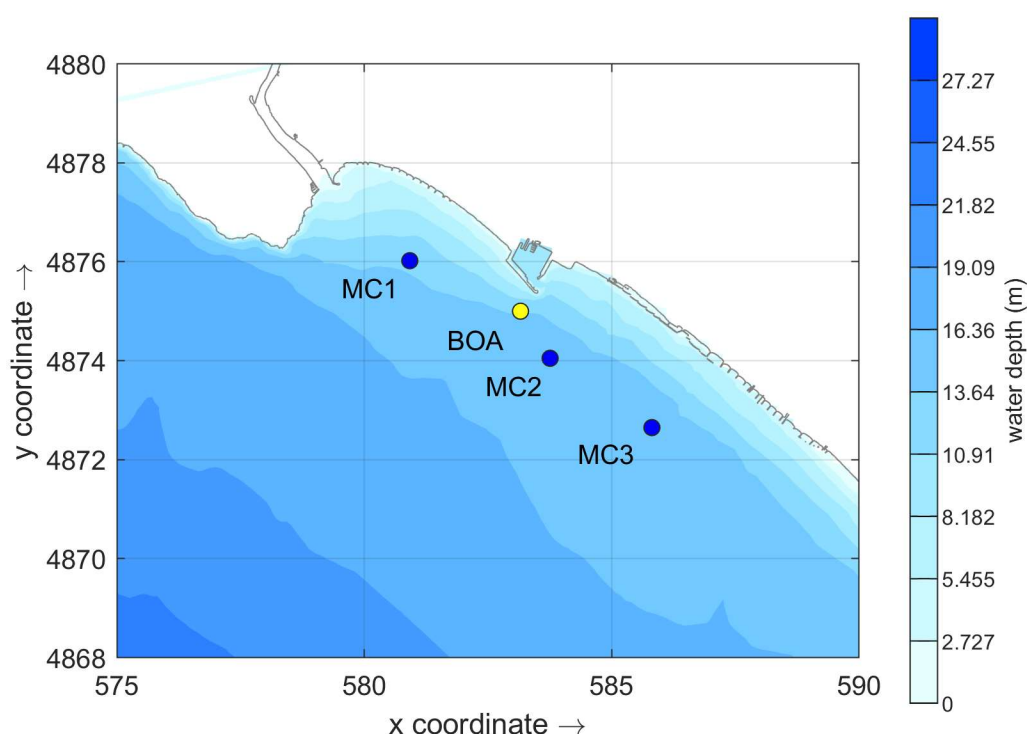


Figura 3-3. Ubicazione dei punti di calcolo utilizzati per le simulazioni con il modello SWAN per la definizione del clima di moto ondoso sottocosta. In figura è indicata la posizione della boa ondometrica.

Il regime di moto ondoso ottenuto nei punti MC1, MC2 ed MC3 a seguito dell'applicazione del modello numerico SWAN è mostrato nelle rose di distribuzione di H_s riportate nella seguente Figura 3-4. Nella Tabella 3-2 sono riportati gli stati di mare estremi associati ad un tempo di ritorno annuale al largo di Marina di Carrara.

Per ulteriori approfondimenti sulla metodologia seguita per la ricostruzione del moto ondoso in costa si rimanda allo studio S1 (volume 1 e 3).

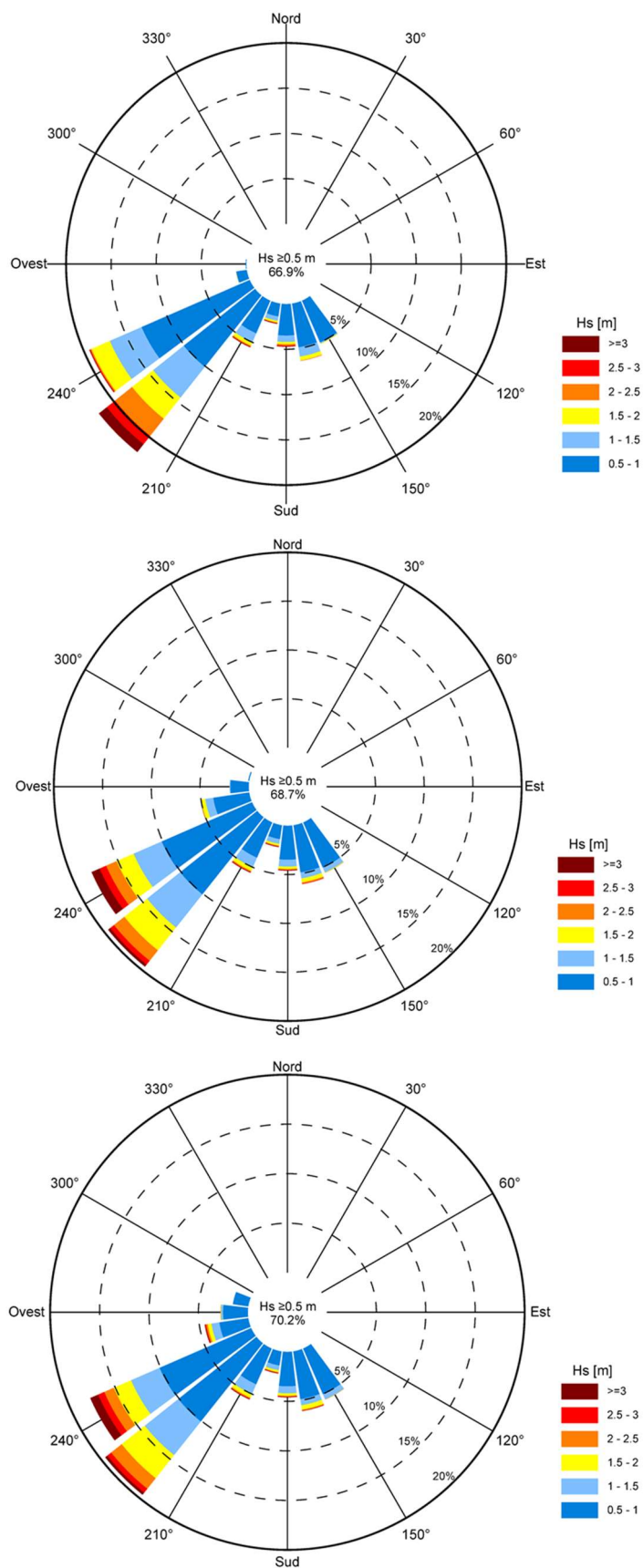


Figura 3-4. Clima di moto ondoso in prossimità del porto di Marina di Carrara ottenuto nei punti MC1(in alto), MC2 (al centro) e MC3 (in basso) a seguito dell'applicazione del modello numerico SWAN per la propagazione del clima di moto ondoso da largo verso riva.

Tabella 3-2. Stati di mare estremi con tempo di ritorno annuale al largo di Marina di Carrara.

	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Dir (°X)	Freq. accadimento%	ore/anno
Scirocco	1.75	7.2	150	120	0.1474%	13
	2.25	8.2	150	120	0.043%	4
Scirocco	1.75	7.6	165	105	0.263%	23
	2.25	8.3	165	105	0.082%	7
Mezzogiorno	1.75	7.7	180	90	0.248%	22
	2.25	8.4	180	90	0.078%	7
Mezzogiorno	1.75	8.3	195	75	0.191%	17
	2.25	8.7	195	75	0.076%	7
	2.75	9.5	195	75	0.035%	3
Libeccio	1.75	8.7	210	60	0.386%	34
	2.25	9.2	210	60	0.117%	10
	2.75	9.8	210	60	0.045%	4
Libeccio	3.75	10.7	240	30	0.232%	20
	4.50	10.9	240	30	0.166%	15

3.4 Dati batimetrici e topografici

L'applicazione dei modelli numerici di simulazione dei fenomeni di propagazione del moto ondoso richiede una fase di preparazione della geometria del dominio di calcolo condotta sulla base della conformazione topografica e batimetrica delle opere portuali (esterne ed interne), delle profondità interne allo specchio acqueo e delle batimetrie dei fondali prospicienti la fascia litoranea limitrofa al porto.

A tal scopo si è fatto riferimento ai dati batimetrici più recenti e più dettagliati in possesso dell'AdSP MLO provenienti da campagne di rilievo condotte tra il 2017 e il 2019 non solo internamente al porto ma anche lungo la fascia litoranea limitrofa al porto di Marina di Carrara.

Questi dati batimetrici sono stati integrati, all'esterno del porto, con le informazioni desunte dalle Carte Nautiche edite dall'Istituto Idrografico della Marina. In Figura 3-5 sono mostrate le diverse fonti dei dati batimetrici utilizzati per la definizione del dominio di calcolo, mentre in Figura 3-6 sono riportati tutti i dati batimetrici utilizzati.

Per la definizione della linea di costa (elemento di delimitazione "a terra" del dominio spaziale di calcolo) si è fatto riferimento ai dati vettoriali forniti dal portale cartografico della Regione Toscana opportunamente integrati con le informazioni desunte dalla CTR e dalle foto aeree messe a disposizione dal servizio Google Earth.

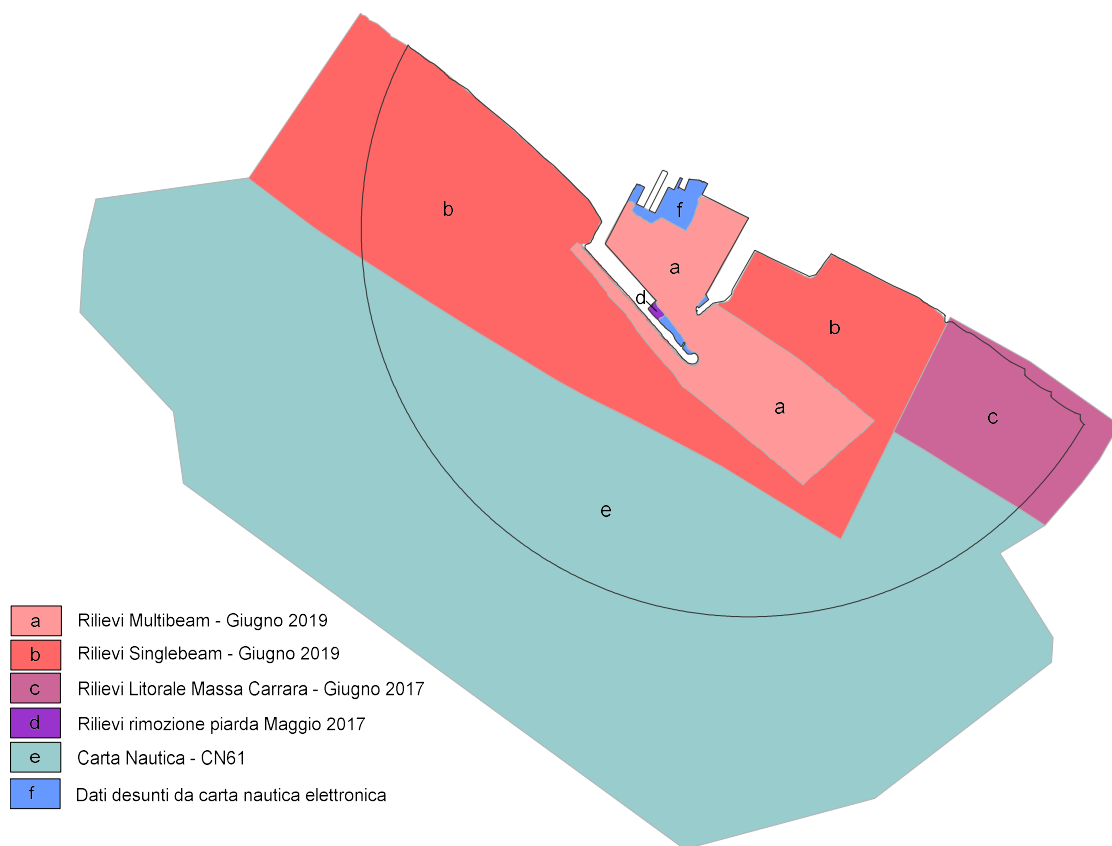


Figura 3-5. Origine dei dati batimetrici utilizzati per la generazione del dominio di calcolo

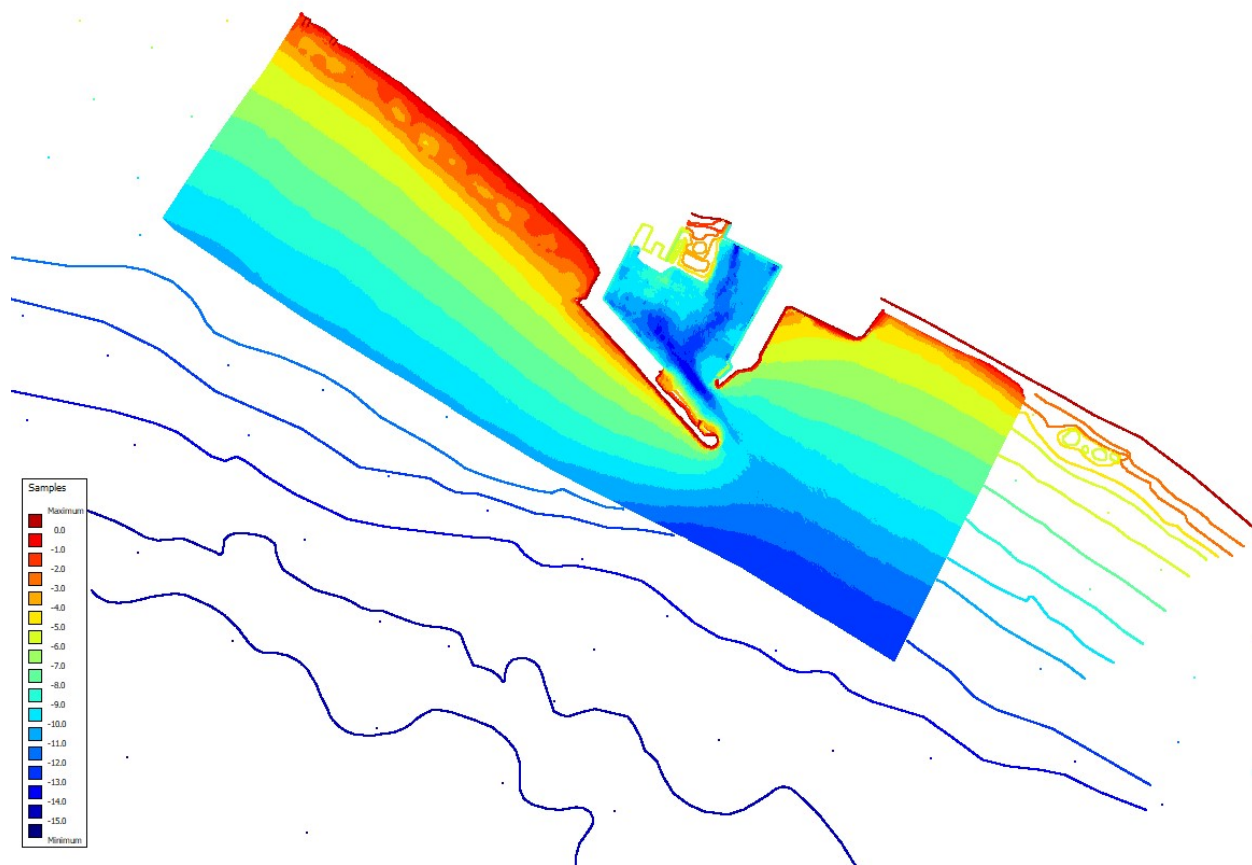


Figura 3-6. Dati batimetrici e contorno utilizzati per la generazione della griglia di calcolo.

Capitolo 4 Applicazione del modello VEGA

4.1 Descrizione del modello di calcolo

In modello numerico **VEGA** sviluppato dalla MODIMAR S.r.l. con il supporto scientifico del Prof. Paolo De Girolamo, è classificabile come modello irrotazionale lineare bidimensionale per onde armoniche. Il modello è basato sulla risoluzione dell'equazione di Helmholtz che impone alcune ipotesi semplificative di calcolo:

- irrotazionalità del moto nel dominio di calcolo del sistema fluido in esame;
- 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

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kh)}$$

$\phi(x,y)$ = 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. Ciascun segmento è stato a sua volta suddiviso in elementi di lunghezza compresa tra $1/6$ ed $1/7$ della lunghezza d'onda propagata, assicurandosi in tal modo che in tutte le simulazioni fossero introdotti almeno 5 elementi (sorgenti) per ogni segmento considerato.

La condizione al contorno lato mare è rappresentata da un contorno generatore, in cui vengono assegnati i valori di direzione e periodo dell'onda monocromatica di altezza unitaria.

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;
- numero di sorgenti per l'impostazione dei passi di discretizzazione del contorno;
- coefficienti di riflessione delle banchine;
- coordinate dei punti dove devono essere calcolati i risultati.

Il modello fornisce come risultati l'altezza d'onda, il potenziale delle velocità e la fase nei punti richiesti. I risultati ottenuti possono essere restituiti sia sotto forma numerica che grafica.

4.2 Selezione delle forzanti di moto ondoso simulate

Gli stati di mare incidenti relativi allo studio di agitazione interna portuale sono riportati nella seguente Tabella 4-1 derivata sintetizzando gli stati di mare riportati in Tabella 3-2, cinque condizioni di moto ondoso, con l'obiettivo di coprire l'intero settore di traversia del moto ondoso incidente e di limitare l'analisi agli stati di mare relativi a ciascun sotto-settore caratterizzati dalla maggiore frequenza di accadimento.

Tabella 4-1. Stati di mare simulati con il modello V rappresentativi delle condizioni di moto ondoso estreme con frequenza di accadimento annuale

Settore	T_p (s)	Dir ($^{\circ}$ N)
Scirocco	8.0	160
Mezzogiorno	8.0	180
	10.0	195
Libeccio	10.0	210
	10.0	240

Poiché il modello è stato eseguito in campo lineare si è assunta una altezza d'onda incidente unitaria e quindi la Tabella 4-1 riporta solo il periodo di picco spettrale T_p e la relativa direzione di provenienza espressa in gradi Nord. Nella terza colonna è riportata la direzione di provenienza delle onde riferita agli stati di mare estremi che si verificano con maggior frequenza.

4.3 Descrizione della configurazione attuale

Nella Figura4-1 è riportata la planimetria della configurazione attuale del porto che è del tipo a bacino, ovvero è dotato di un molo di sopraflutto che protegge lo specchio d'acqua interno dalla traversia principale (libeccio-ponente) e di un molo di sottoflutto posto a protezione della traversia secondaria proveniente da scirocco. Le opere foranee che compongono il porto possono essere distinte come segue:

- Molo SOPRAFLUTTO esposto a LIBECCIO e PONENTE
 - tratto di radicamento a terra (lungo circa 420 m; asse a 206°N; sino a fondali di -3,0 m sul l.m.m.);
 - tratto longitudinale (lungo circa 910 m; asse a 138°N; che raggiunge fondali pari a circa -10 m sul l.m.);
- Molo SOTTOFLUTTO esposto a SCIROCCO lungo circa 500 m; asse a 206°N; che raggiunge fondali pari a circa -8,0 m sul l.m.m.);
- Difesa RADENTE posta a protezione del "piazzale Città di Massa" compreso tra il molo sottoflutto e la foce del Torrente Carrione.

La testata del molo sopraflutto sopravanza la testata del molo sottoflutto verso sud-est (levante) per circa 200 m delimitando un piccolo avamporto.

Con riferimento all'imboccatura e al canale di accesso, vi sono circa 175 m di distanza massima tra le scogliere dei moli sopraflutto e sottoflutto, 100 m di larghezza massima del fondale utile per la manovra delle navi dotate di massimo pescaggio (con dragaggio dei fondali sino alla isobata di -11 m s.l.m.). Il canale di accesso è orientato mediamente per 140-145 °N ed intercetta l'isobata naturale dei -11 m s.l.m. a circa 500 m dalla testata del molo sottoflutto.



Figura4-1 Schema planimetrico dell'attuale configurazione (a bacino) del porto di Marina di Carrara

4.4 Vincoli per le proposte di assetto delle opere foranee

Per l'analisi del nuovo assetto planimetrico delle opere foranee di PRP, si sono definiti alcuni vincoli che riguardano:

- la necessità di garantire l'officiosità idraulica del Torrente Carrione e l'interferenza tra i sedimenti provenienti dal trasporto solido dello stesso torrente con l'imboccatura portuale (limite di interferenza idraulica);
- la dinamica dei sedimenti costieri relativi alla costa posta a Sud-Est del porto (limite di interferenza morfodinamica).

Questi vincoli di natura geometrica, considerati nell'ambito del Documento di Pianificazione Strategica di Sistema che possono sintetizzarsi nei seguenti aspetti:

- il limite di interferenza idraulica che può essere assunto sulla base della posizione ed orientamento planimetrico dei seguenti elementi strutturali
 - sponda in destra idraulica della foce del Carrione;
 - margine di levante della scogliera radente del piazzale Città di Massa posta in destra idraulica del Carrione;
- il limite di interferenza morfodinamica, nei confronti del litorale posto a levante del porto, che è costituito dal "ridosso" esercitato dalla testata del molo di sopraflutto rispetto al moto ondoso incidente.

Per la corretta individuazione dell'assetto planimetrico delle nuove opere foranee del porto è indispensabile definire la nave di progetto sulla base della quale devono essere impostate:

- le quote fondali (interni e nel canale di accesso ed avamperto);
- la larghezza dell'imboccatura portuale e del canale di accesso al porto;
- i cerchi di evoluzione e i raggi di manovra (interni ed esterni al porto).

Nell'impostazione delle possibili nuove configurazioni planimetriche del porto, per la larghezza dell'imboccatura portuale si è assunta la dimensione minima di 160 m mentre per quanto riguarda i parametri geometrici riconducibili alle dimensioni delle navi si è assunto: Lunghezza "fuori tutto" LOA = 220 m; Larghezza B= 35 m; immersione $i = 10,0$ m.

4.5 Descrizione sintetica delle configurazioni portuali simulate con VEGA

Le configurazioni planimetriche illustrate nei seguenti paragrafi, sono state delineate assumendo come obiettivo primario quello di ridurre l'agitazione portuale e garantire al contempo spazi adeguati per le manovre delle navi cui è destinato l'utilizzo dell'infrastruttura portuale.

In via preliminare, tutte le configurazioni geometriche considerate sono state studiate mediante il modello numerico VEGA.

4.5.1 Tipologia a bacino con nuovo molo sottoflutto

Per la tipologia a bacino si sono simulate due configurazioni, di seguito indicate con la sigla A1 e A2. In Figura 4-2 e Figura 4-3 sono riportati gli schemi di tali planimetrie.

A1 Ipotesi di ampliamento minimo secondo la tipologia a bacino:

- prolungamento molo sopraflutto conforme all'asse longitudinale previsto dal PRP 2015 (più corto di circa 40 m comunque impostato a profondità di -10.0 m s.l.m.);

- nuovo molo sottoflutto orientato come l'attuale asse scogliera posta al margine del Carrione (sviluppo analogo a quello dell'attuale molo sottoflutto, sino a profondità di -8.0 ÷ -9.0 m s.l.m.).

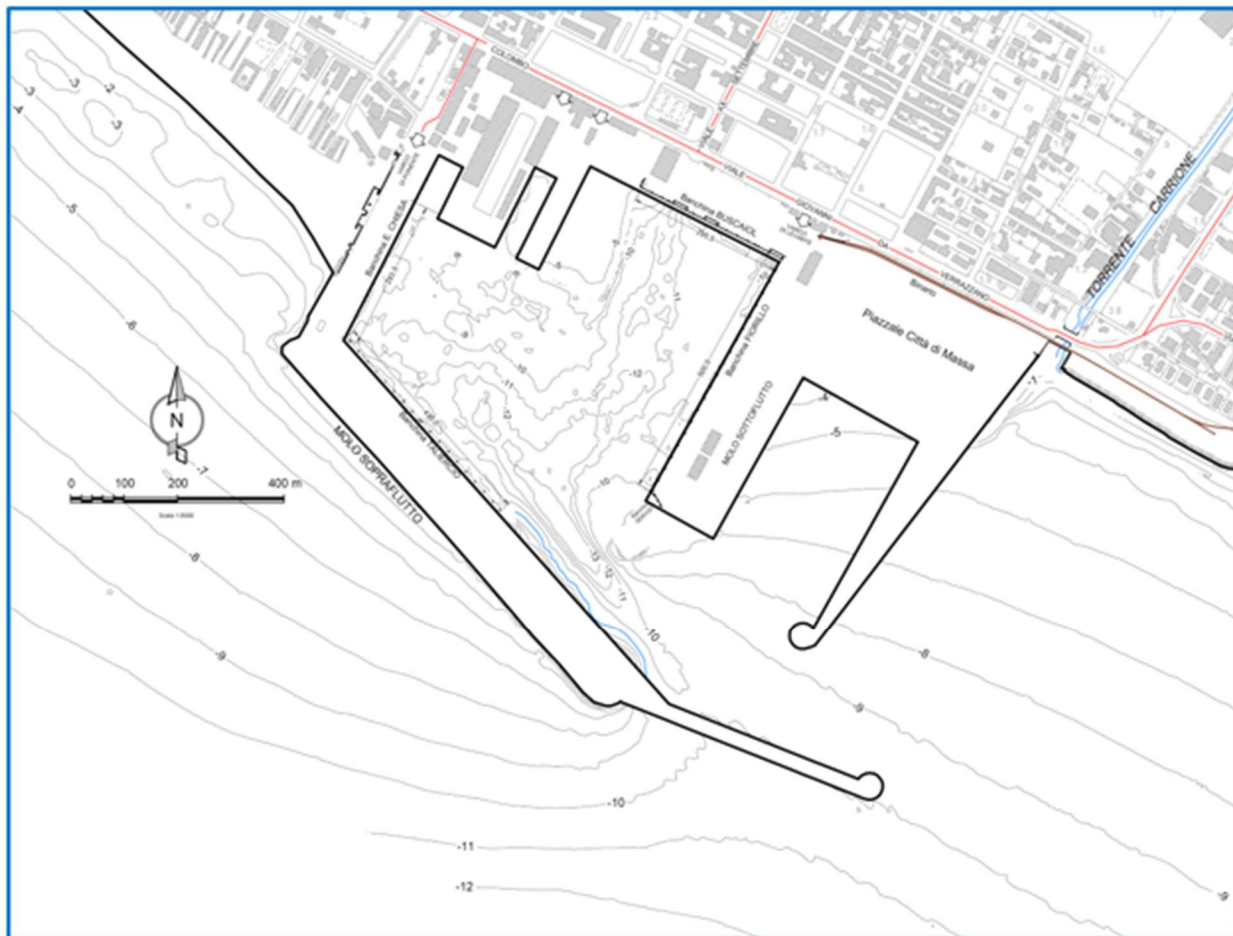


Figura 4-2 . Planimetria A1 a bacino ipotesi di ampliamento minimo

A2 Ipotesi di ampliamento massimo secondo la tipologia a bacino:

- nuovo molo sottoflutto orientato come la sponda in destra idraulica della foce del Carrione (sviluppo sino a profondità di $-9 \div -10$ m s.l.m.);
- prolungamento del molo sopraflutto secondo l'asse attuale sino a raggiungere il limite in destra idraulica del Carrione.



Figura 4-3 Planimetria A2 a bacino ipotesi di ampliamento massimo

4.5.2 Tipologia a moli convergenti con nuovo molo sottoflutto

Per la tipologia a moli convergenti si sono simulate due configurazioni, di seguito indicate con la sigla B1 e B2. In Figura 4-4 e Figura 4-5 sono riportate gli schemi di tali planimetrie.

B1 ipotesi di ampliamento minimo secondo la tipologia a moli convergenti:

- nuovo molo sottoflutto orientato come l'attuale asse scogliera posta al margine del Carrione sino ad allinearsi a 100°N con la testata del molo sopraflutto delimitando un'imboccatura con asse di ingresso/uscita orientato a 190°N (raggiungendo profondità di -10 m s.l.m.);
- l'attuale molo sopraflutto non viene modificato (salvo eventuale riqualificazione della testata con elemento monolitico a parete verticale).

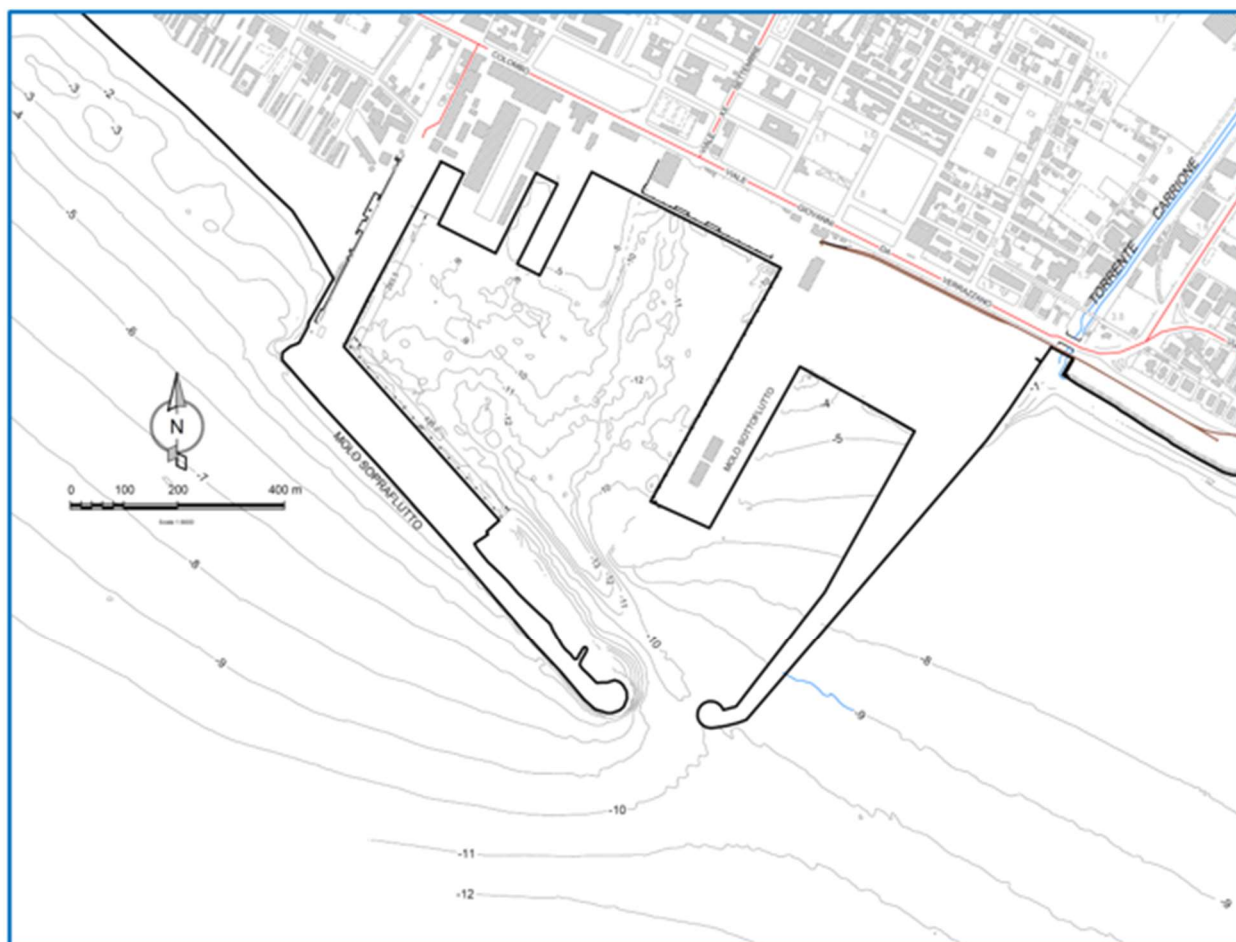


Figura 4-4 Planimetria B1 a moli convergenti ipotesi di ampliamento minimo

B2 Ipotesi di ampliamento massimo secondo la tipologia a moli convergenti:

- nuovo molo sottoflutto orientato come la sponda in destra idraulica della foce del Carrione sino ad allinearsi l'asse del molo sopraflutto attuale (sino a profondità di -10 ÷ -11 m s.l.m.);
- riqualificazione dell'attuale tratto terminale del molo sopraflutto secondo una conformazione arcuata per allinearsi a 100°N con la testata del nuovo molo sopraflutto su fondali di -10 m s.l.m. delimitando un'imboccatura con asse di ingresso/uscita orientato a 190°N.

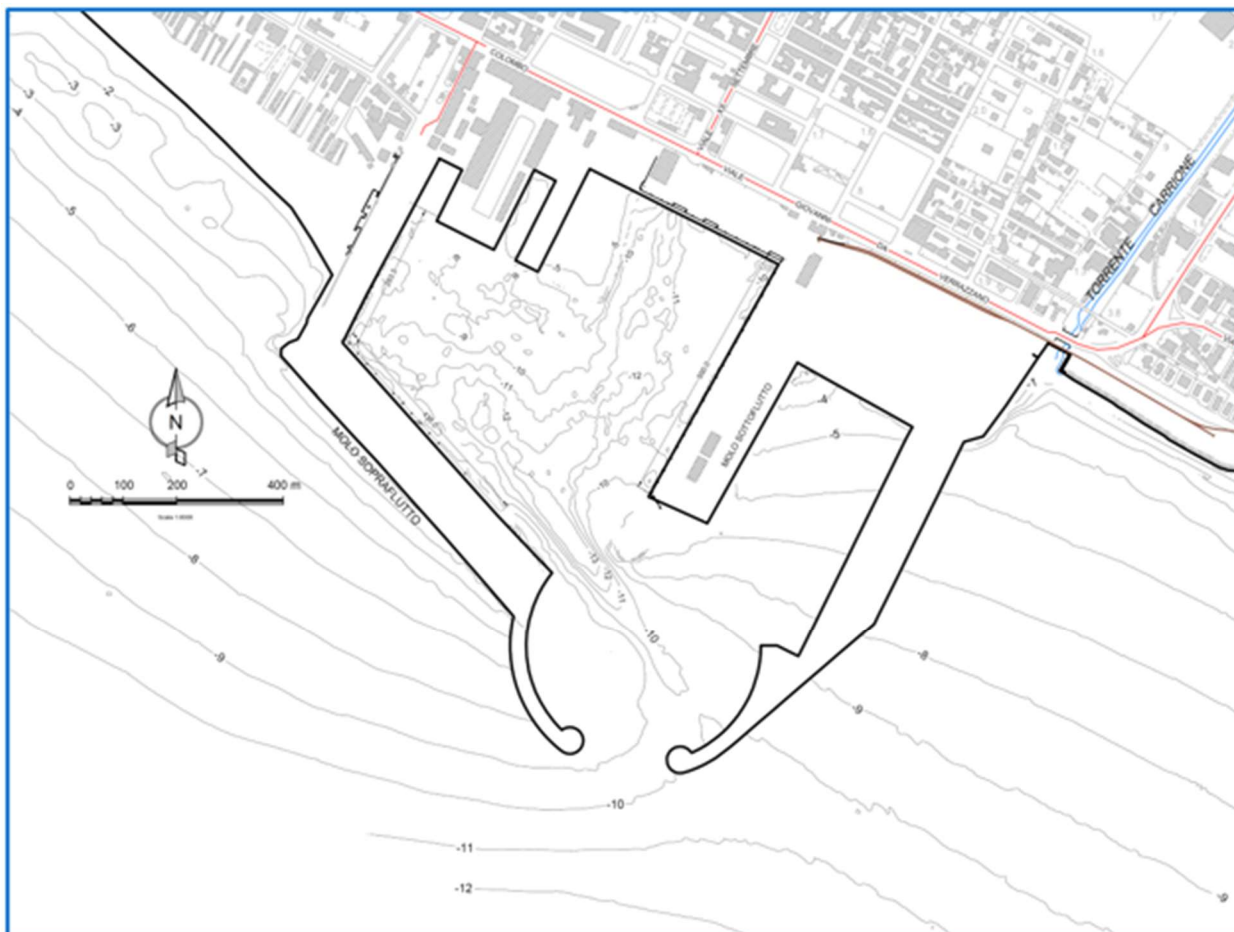


Figura 4-5 Planimetria B2 a moli convergenti ipotesi di ampliamento massimo

4.5.3 Tipologia a bacino con nuovo molo sottoflutto e antemurale

In Figura 4-6 si riporta lo schema planimetrico caratterizzato da un bacino a moli convergenti con antemurale a protezione dell'imboccatura portuale.

C1 Ipotesi di ampliamento minimo secondo la tipologia a bacino con antemurale:

- nuovo molo sottoflutto orientato come l'attuale asse scogliera posta al margine del Carrione (sviluppo analogo a quello dell'attuale molo sottoflutto, sino a profondità di -8.0 ÷ -9.0 m s.l.m.).

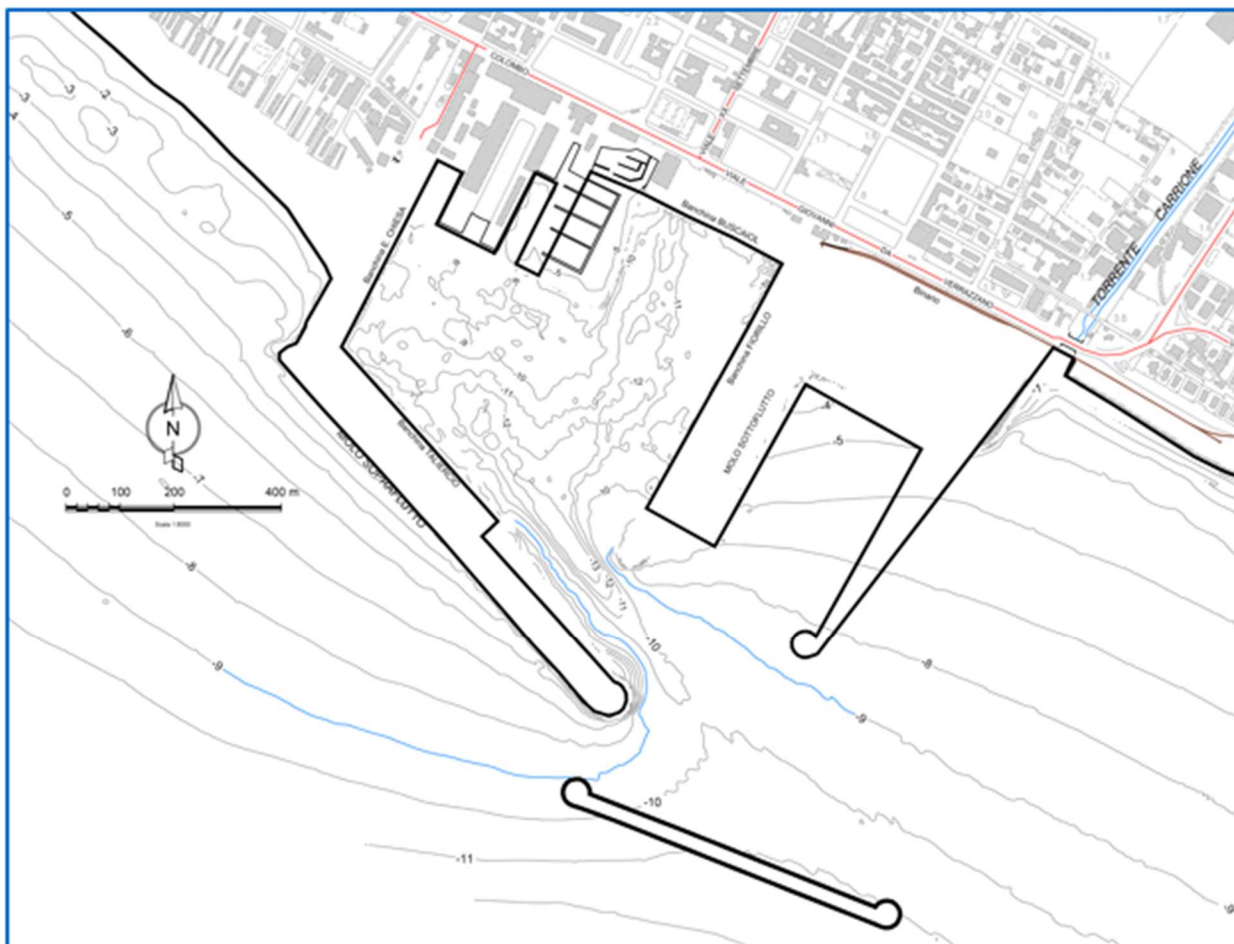


Figura 4-6 Planimetria C1 a bacino con nuovo molo sottoflutto e antemurale ipotesi di ampliamento minimo

4.5.4 Tipologia a bacino con solo prolungamento del molo sopraflutto

In Figura 4-7 e Figura 4-8 si riportano gli schemi di ampliamento definiti come “minimo” e “massimo”. Tali schemi rispecchiano la configurazione planimetrica dell'attuale porto con prolungamento del molo sopraflutto.

AA1 ipotesi di ampliamento minimo secondo la tipologia a bacino con prolungamento del molo sopraflutto:

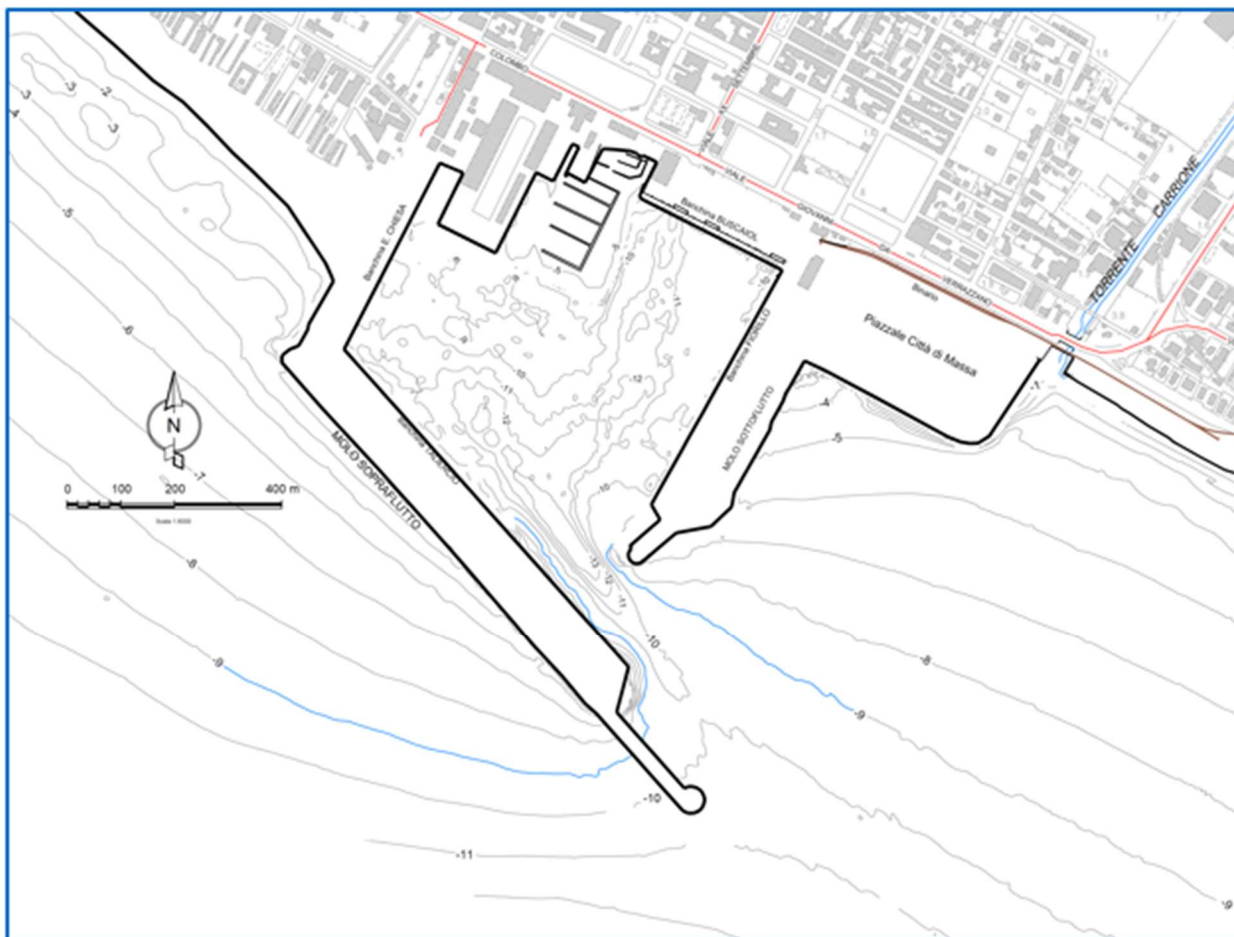


Figura 4-7 Planimetria AA1 a bacino con prolungamento del molo sopraflutto ampliamento minimo

AA2 ipotesi di ampliamento massimo secondo la tipologia a bacino con prolungamento del molo sopraflutto:

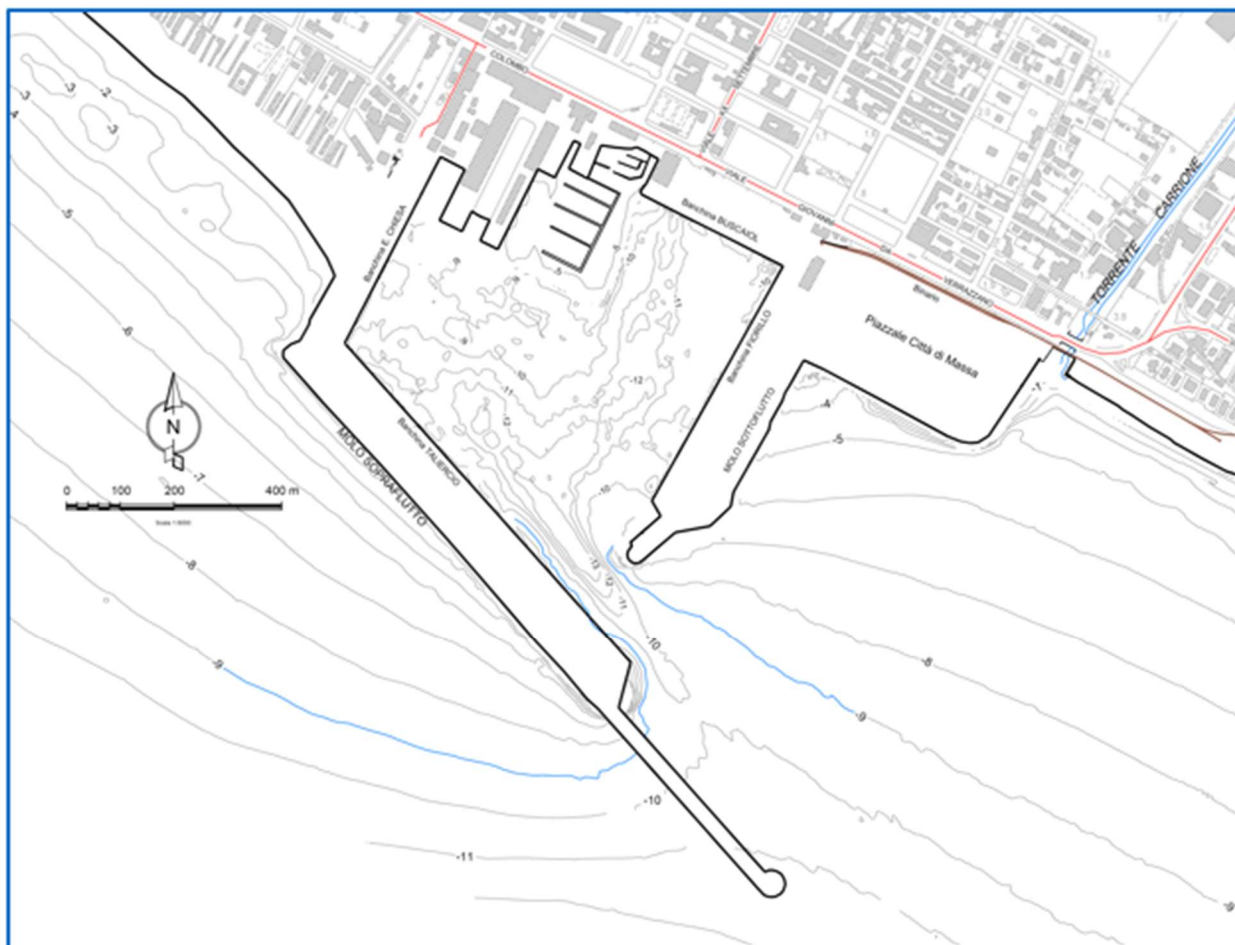


Figura 4-8 Planimetria AA2 a bacino con prolungamento del molo sopraflutto ampliamento massimo

4.5.5 Tipologia a bacino con prolungamento del molo sopraflutto con nuovo molo sottoflutto

Nella soluzione A3.1 (mostrata in Figura 4-9) con ipotesi di ampliamento massimo secondo la tipologia a bacino si è considerato un prolungamento del molo sopraflutto fino alla configurazione massima e una riseca della testata del molo sottoflutto attuale. Il nuovo molo sottoflutto si presenta traslato fino a raggiungere l'asse del fiume Carrione. La soluzione risulta caratterizzato da:

- nuovo molo sottoflutto orientato come la sponda in destra idraulica della foce del Carrione (sviluppo sino a profondità di $-9.0 \div -10.0$ m s.l.m.).

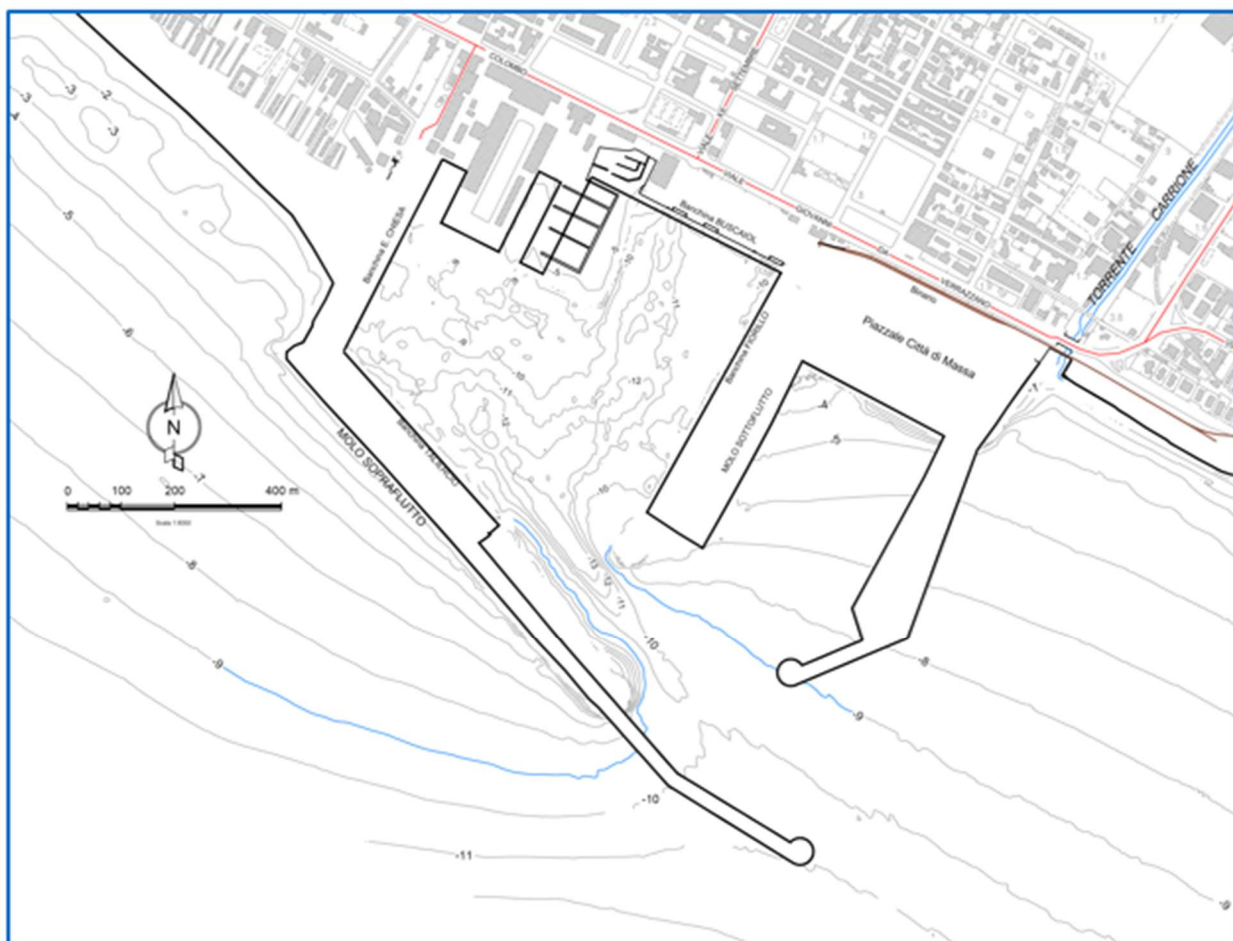


Figura 4-9 Planimetria A3.1 a bacino con prolungamento del molo sopraflutto con nuovo molo sottoflutto, reseca dell'attuale molo sottoflutto, ampliamento massimo

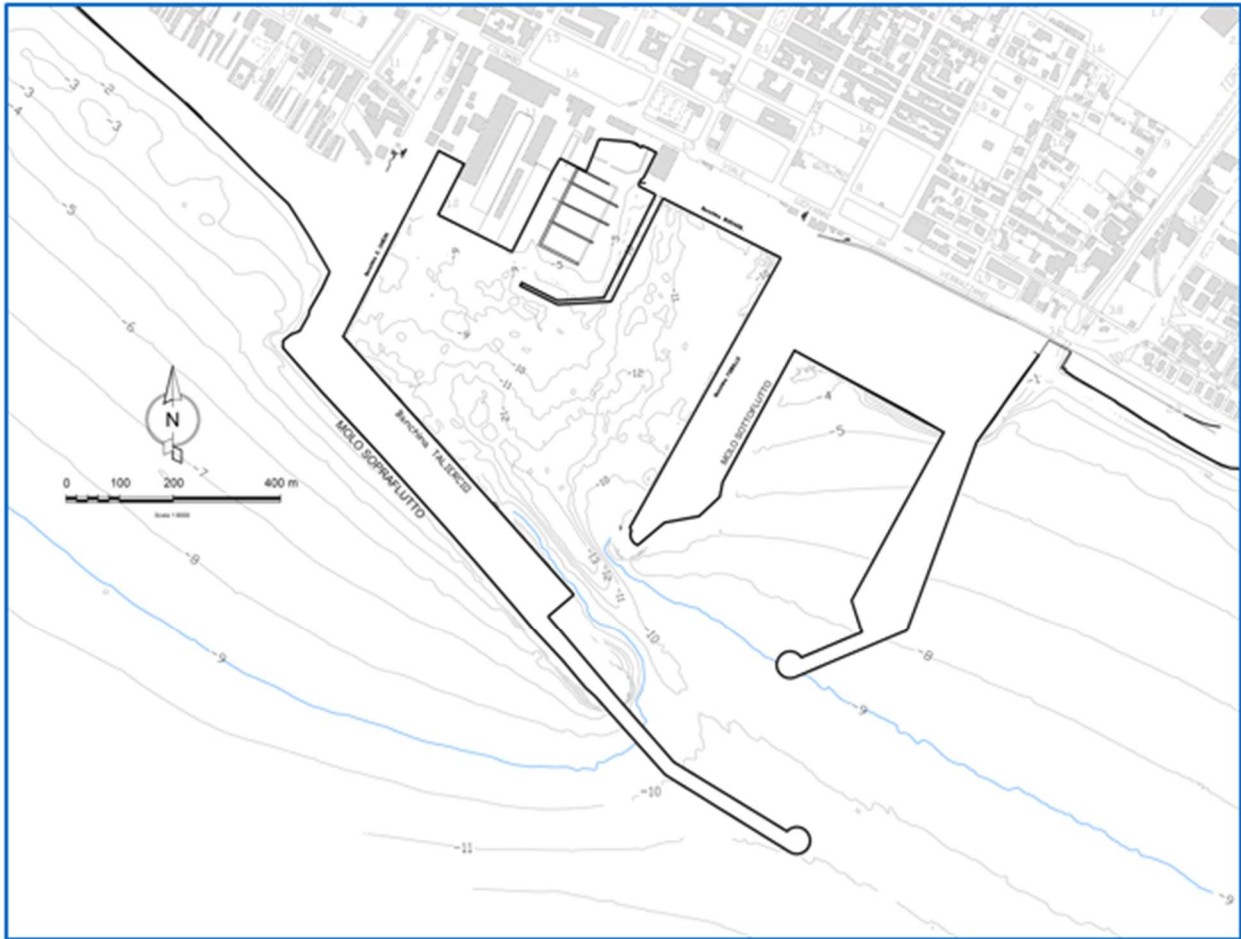


Figura 4-11 Planimetria A3.2 INT a bacino con prolungamento del molo sopraflutto con nuovo molo sottoflutto ampliato in testata, ampliamento massimo.

4.6 Selezione della configurazione con prolungamento dell'attuale molo sopraflutto e la realizzazione di un nuovo molo sottoflutto

Sulla base della comparazione dei risultati delle simulazioni condotte con il modello VEGA per le distinte tipologie considerate, descritte nel paragrafo precedente, si è delineata la conformazione planimetrica ritenuta più idonea per gli aspetti di agitazione ondosa portuale. Tale configurazione, schematizzata nella seguente Figura 4-12, prevede:

- una rettificazione della testata dell'attuale molo sottoflutto;
- un prolungamento rispetto alla configurazione attuale della banchina Taliercio sino ad inglobare l'attuale testata del molo sopraflutto;
- una larghezza "libera" di 160 m tra la nuova resecazione dell'attuale sottoflutto ed il prolungamento della banchina Taliercio (con una fascia di rispetto di 40 m per la possibile presenza di una nave all'ormeggio).

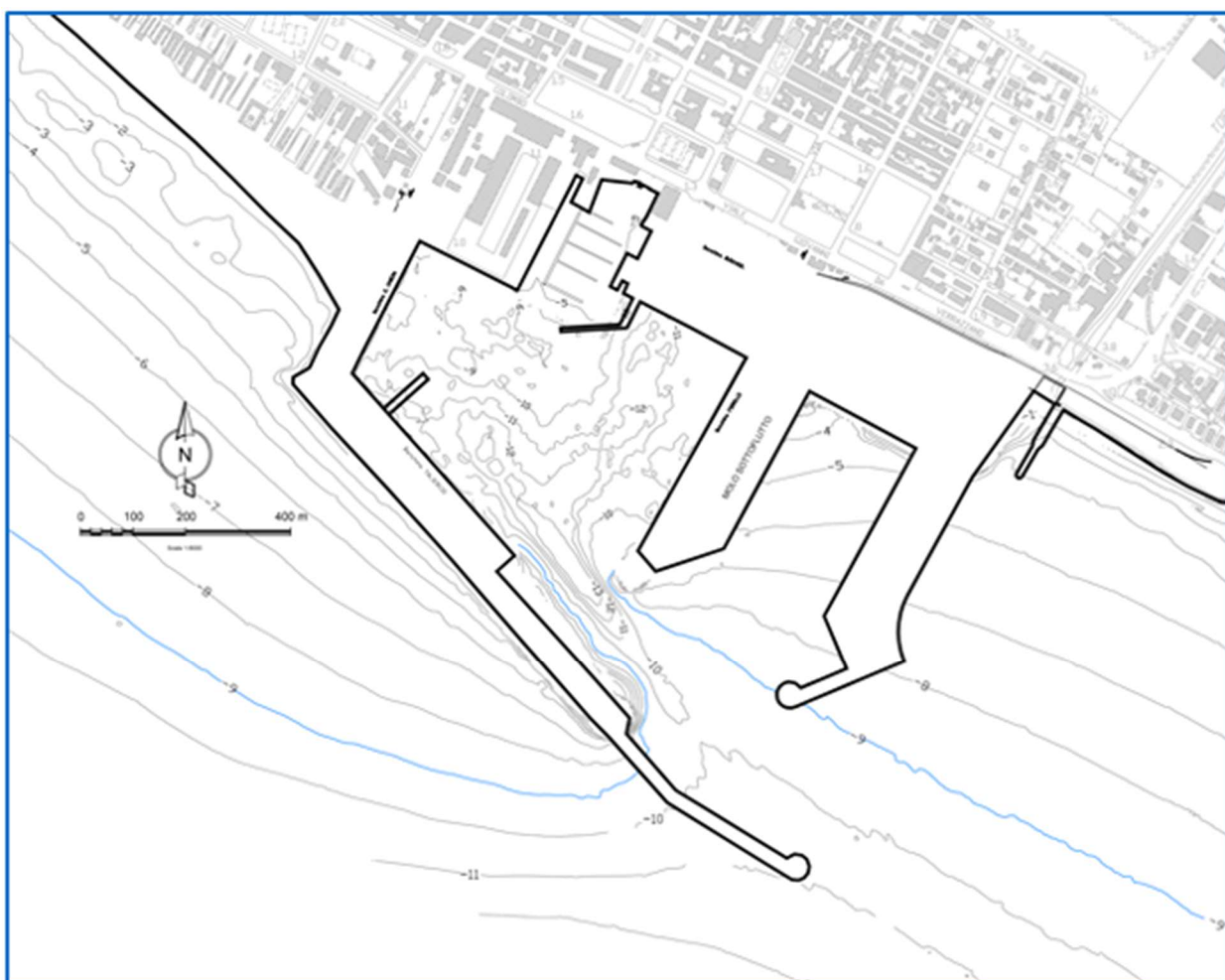


Figura 4-12 Planimetria della Configurazione Portuale Definitiva.

4.7 Sintesi delle simulazioni effettuate con il modello numerico VEGA

Nelle seguenti tabelle e figure sono riportati i parametri di riferimento considerati ed i risultati delle simulazioni condotte con il modello VEGA.

Le opere esterne e le opere interne portuali sono state schematizzate rappresentando i loro contorni come intersezione tra il livello medio del mare e le stesse opere. Ad ogni contorno è stato attribuito un coefficiente di riflessione che dipende dalla natura dell'opera che viene simulata (opere a parete verticale, celle antiriflettenti, opere a gettata, spiagge, coste rocciose, ecc.).

I contorni sono stati a loro volta discretizzati mediante l'inserimento lungo di essi di un idoneo numero sorgenti che dipende sia dalla lunghezza delle onde simulate, la quale risulta essere funzione della profondità e del periodo delle onde, sia dalla lunghezza del contorno stesso.

Il modello numerico VEGA risolve un sistema di equazioni che consente di definire le caratteristiche di ogni sorgente utilizzata per descrivere il contorno del dominio di calcolo. Calcolate le caratteristiche delle sorgenti, il modello consente di calcolare per qualsiasi punto posto all'interno del dominio di calcolo le caratteristiche del moto ondoso (ampiezza e fase). Nel presente caso i risultati sono stati calcolati in corrispondenza dei nodi di una griglia regolare avente passo di 10 m per un totale di circa 150000 punti.

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 di input che nel presente caso è stata assunta unitaria. Per ottenere il valore dell'altezza d'onda in un punto è sufficiente moltiplicare il coefficiente di diffrazione per l'altezza dell'onda incidente.

In totale, oltre alla configurazione attuale, sono state esaminate 10 configurazioni alternative. Per due di queste configurazioni sono state esaminate due possibili varianti dei coefficienti di riflessione esaminando nel complesso 13 conformazioni planimetriche del porto di Marina di Carrara compreso l'attuale assetto portuale.

Nella Tabella 4-2 si riporta l'elenco dei 13 lay-out e delle condizioni di moto ondoso incidente prese in esame per ciascun lay-out. Per ogni lay-out sono state considerate 5 condizioni di moto ondoso ciascuna proveniente da una diversa direzione allo scopo di coprire tutti i settori di traversia del porto. Ad ogni direzione è stato associato un periodo delle onde incidenti che rappresenta il periodo delle onde con tempo di ritorno annuale. In totale sono state eseguite 65 simulazioni numeriche.

Tabella 4-2- Elenco delle configurazioni studiate e relative simulazioni numeriche effettuate.

ID	Configurazione	Direzioni di provenienza del moto ondoso
1	ATTUALE	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
2	A1	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
3	A2	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
4	B1	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
5	B2	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
6	C1	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
7	AA1	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
8	AA2	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
9	A3.1	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
10	A3.2	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
11	A32-INT	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
12	DEFINITIVA - C 0.60	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	
13	DEFINITIVA - C 0.90	Dir = 160° Dir = 180° Dir = 195° Dir = 210° Dir = 240°
	T = 8.0 s	
	T = 10.0 s	

I coefficienti di riflessione R (rapporto tra l'altezza d'onda incidente H_i e quella riflessa H_r) delle opere delimitanti le aree portuali (interne ed esterne) sono stati scelti in funzione delle caratteristiche riflettenti delle stesse opere secondo quanto di seguito elencato:

Tabella 4-3 - Impostazione dei coefficienti di riflessione considerati nelle simulazioni

Descrizione sintetica della tipologia degli "elemento di contorno"	Coefficiente di Riflessione $R = H_i/H_r$
banchine a pareti verticali riflettenti	0,85
pontile con cassoncini antiriflettenti	0,60
banchine a parete verticale su bassi fondali rocciosi	0,40
tratti rocciosi naturali ed opere a scogliera	0,35
pontili su pali o galleggianti (completamente permeabili)	0,00
Spagge e litorali a debole pendenza	0,10

Si riportano di seguito le planimetrie di ciascuna configurazione esaminata con i relativi coefficienti di riflessione assunti (da Figura 4-13 a Figura 4-25).



Figura 4-13 – Planimetria della configurazione attuale del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica.



Figura 4-14 - Planimetria della configurazione A1 del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica.



Figura 4-15 - Planimetria della configurazione A2 del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica.



Figura 4-16 - Planimetria della configurazione B1 del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica.



Figura 4-17 - Planimetria della configurazione B2 del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica.



Figura 4-18 - Planimetria della configurazione C1 del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica.

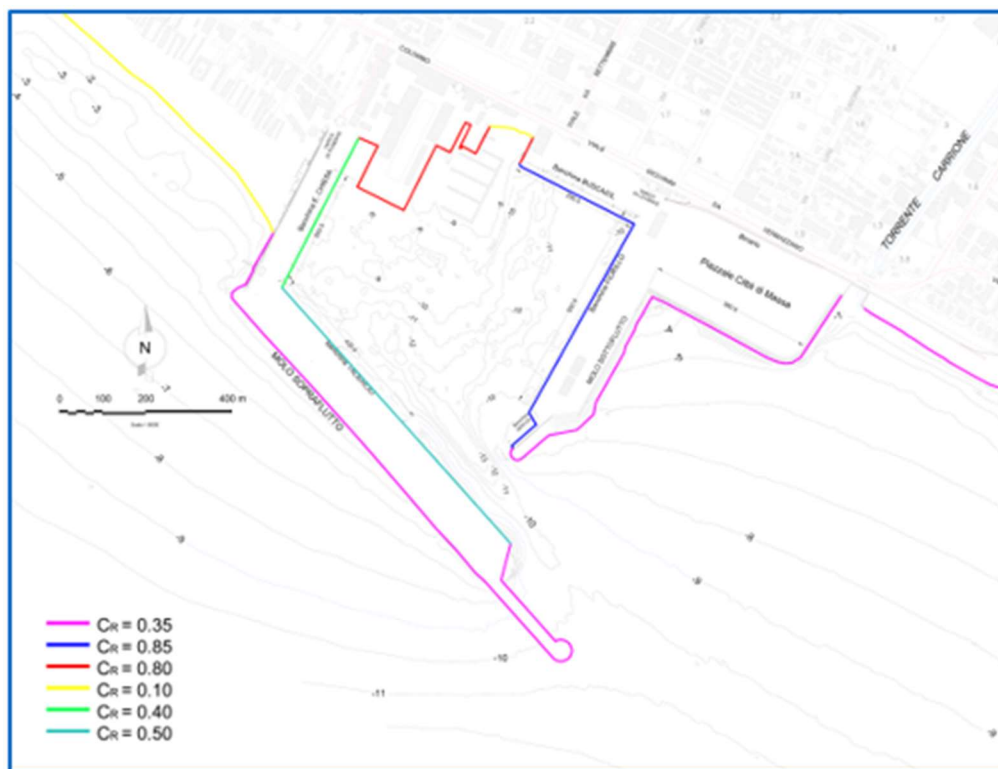


Figura 4-19 - Planimetria della configurazione AA1 del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica.

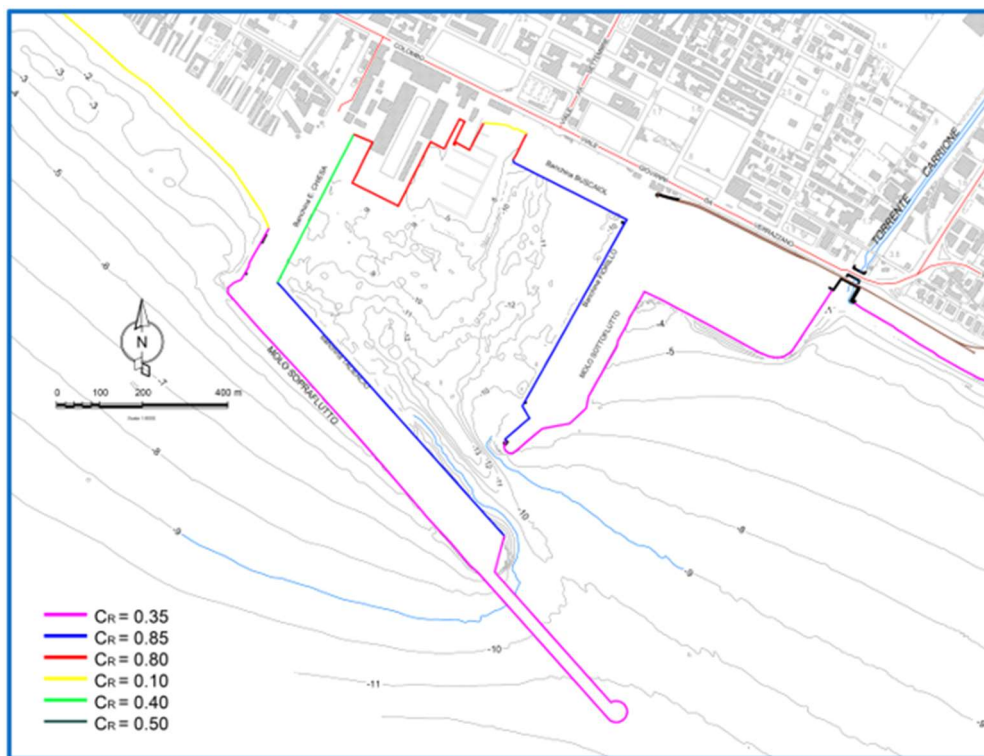


Figura 4-20 - Planimetria della configurazione AA2 del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica.



Figura 4-21 - Planimetria della configurazione A3.1 del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica.



Figura 4-22 – Planimetria della configurazione A3.2 del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica.

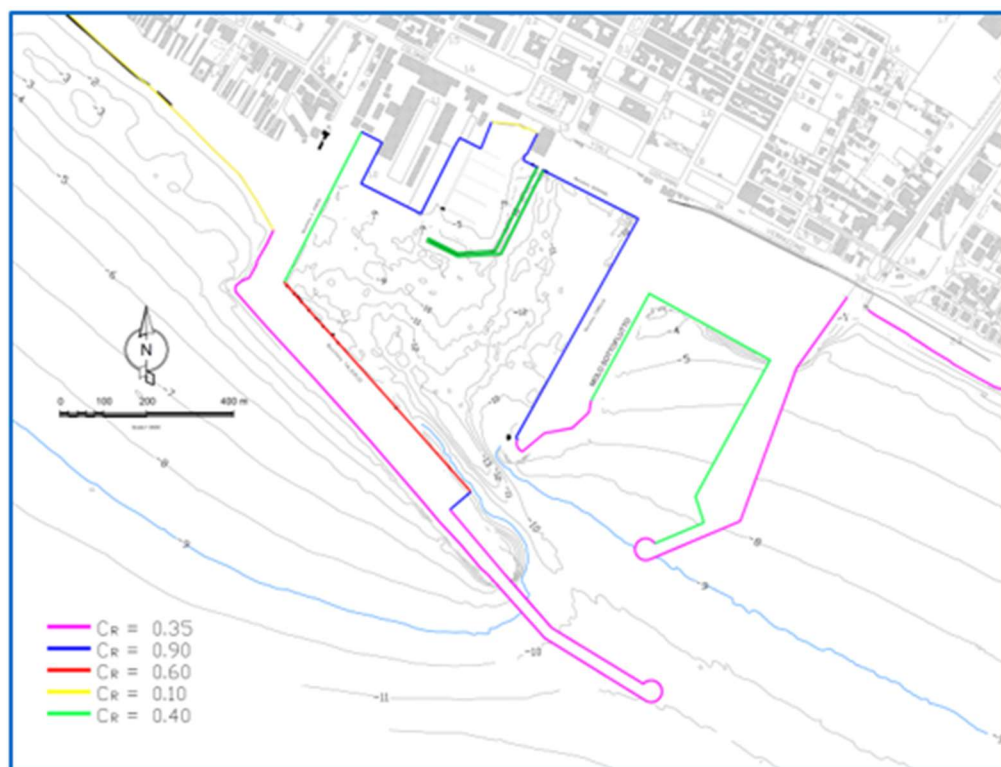


Figura 4-23 Configurazione A3.2 INT

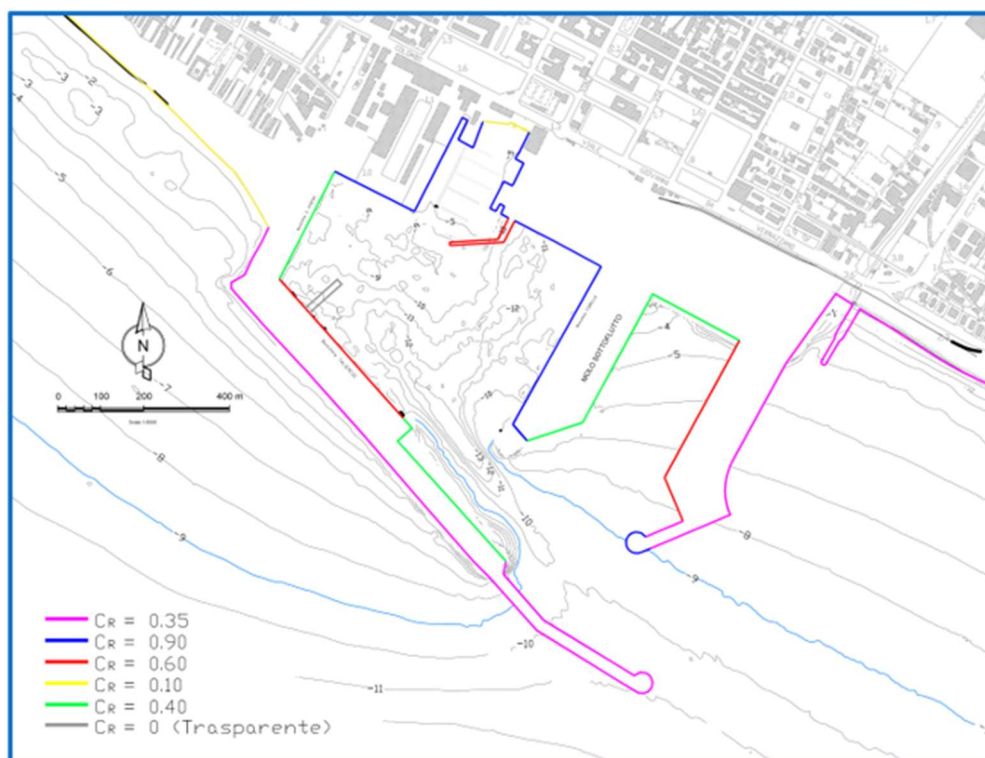


Figura 4-24 Planimetria della configurazione definitiva del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica (lato interno del molo sottoflutto caratterizzato da un coefficiente di riflessione pari a 0.6).

Nella configurazione definitiva, per il molo disposto verso il radicamento della Taliercio sulla Chiesa si è ipotizzata una tipologia strutturale su pali e quindi completamente trasparente (indicato in legenda con il colore grigio $C_r=0$).

Per le due banchine interne del nuovo molo sottoflutto (indicate con il colore rosso in legenda; $C_r=0,6$) si è ipotizzata una tipologia strutturale a parete verticale "forata". Infine si è modificato il coefficiente di riflessione per le pareti verticali, ponendolo pari a 0.90.

Infine il modello è stato applicato considerando come ultima configurazione definitiva quella caratterizzata dalla sola variazione del coefficiente di riflessione da attribuire alla parte interna del nuovo molo sottoflutto. In quest'ultima ottimizzazione della configurazione definitiva di PRP cui fare riferimento nella fase successiva dello studio specialistico si è attribuito un coefficiente di 0.90 al fine di simulare una parete verticale (non forata) dalle caratteristiche analoghe a quella attuale delle banchine Fiorillo e Buscaioli.

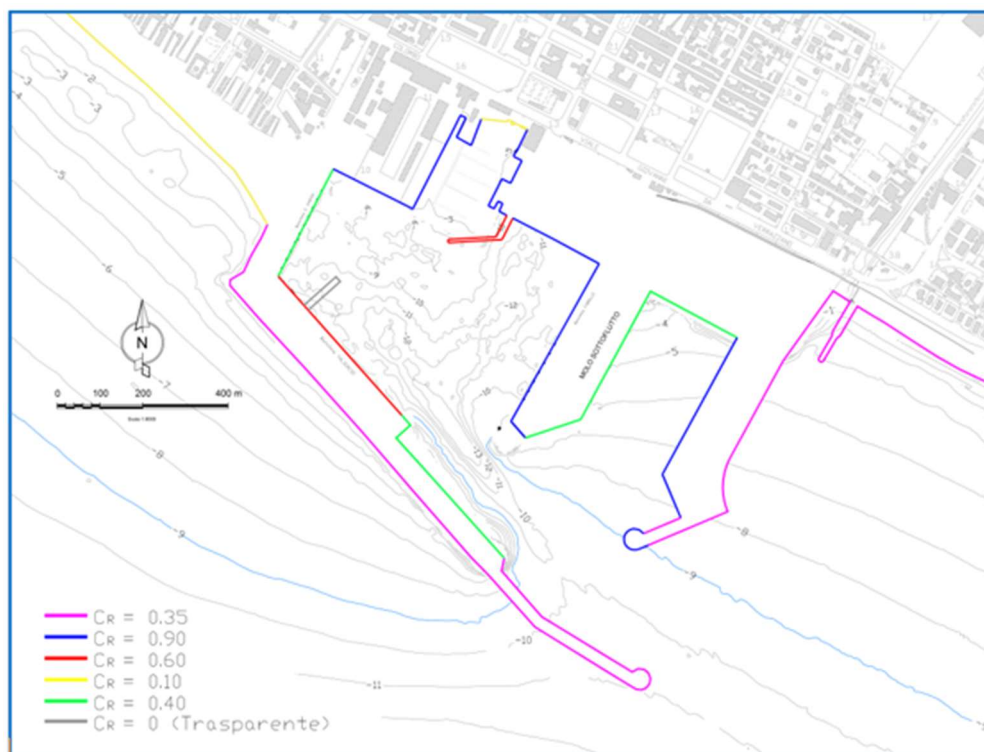


Figura 4-25 Planimetria della configurazione definitiva del Porto di Marina di Carrara con evidenziati i coefficienti di riflessione utilizzati nella modellazione numerica (lato interno del molo sottoflutto caratterizzato da un coefficiente di riflessione pari a 0.9).

Le condizioni in ingresso fornite al modello numerico in termini di altezza d'onda H, periodo T e direzione Dir sono riassunte nella Tabella 4-4

Tabella 4-4 – Condizioni al contorno fornite al modello numerico VEGA.

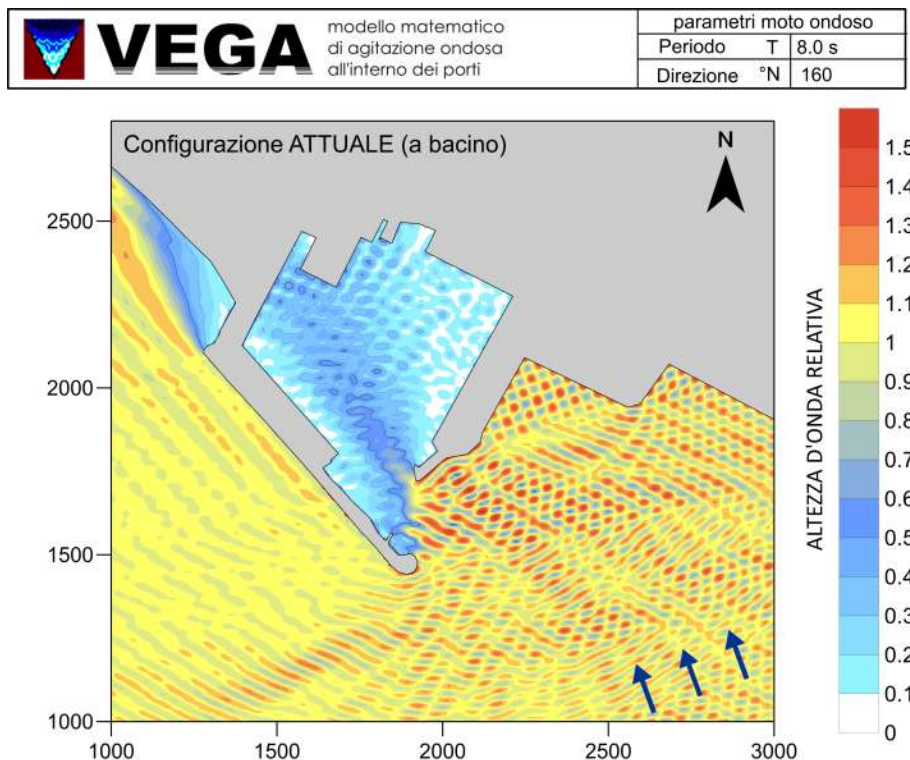
Condizioni	H (m)	T (s)	Dir (°N)	Frequenza di accadimento (FdA %)
1	1.0	8.0	160	0.54
2	1.0	8.0	180	0.33
3	1.0	10.0	195	0.30
4	1.0	10.0	210	0.55
5	1.0	10.0	240	0.40

I risultati delle simulazioni numeriche riportati nel seguito, sono espressi in termini di “coefficiente di diffrazione”, ovvero del rapporto tra l'altezza d'onda calcolata nel punto e l'altezza d'onda incidente assunta unitaria.

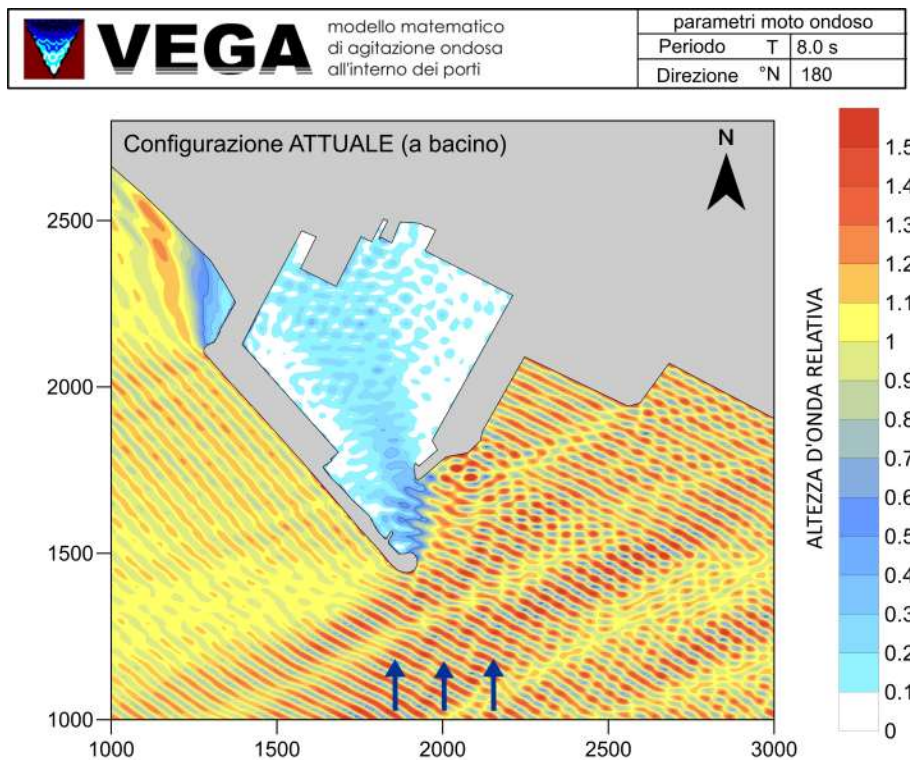
4.7.1 Configurazione attuale

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione attuale con le condizioni al contorno riportate in Tabella 4-4.

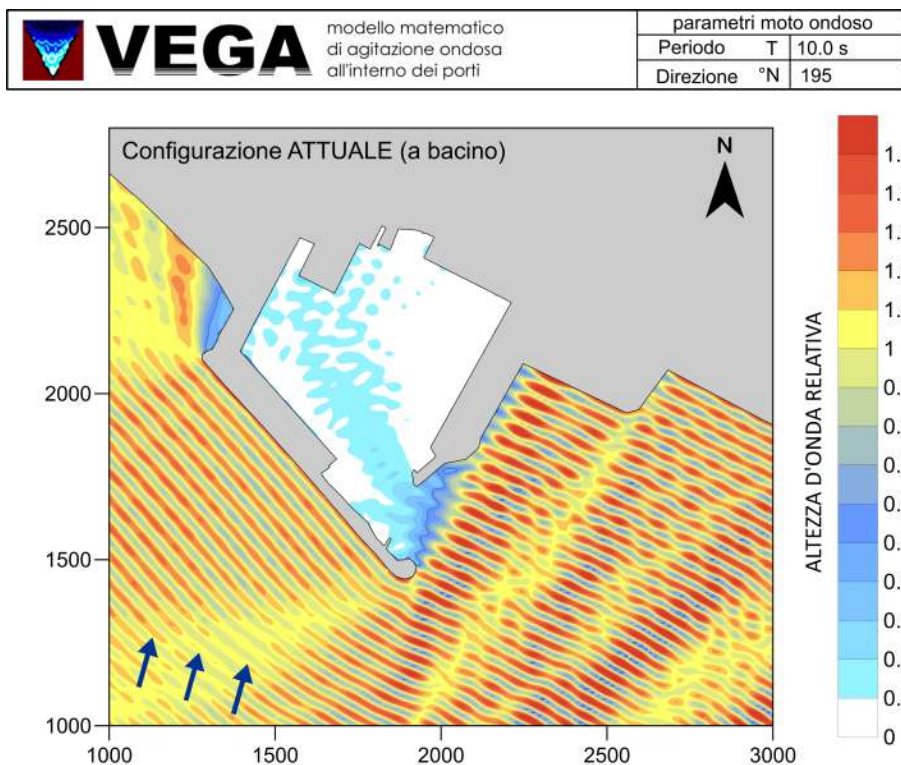
Condizione 1



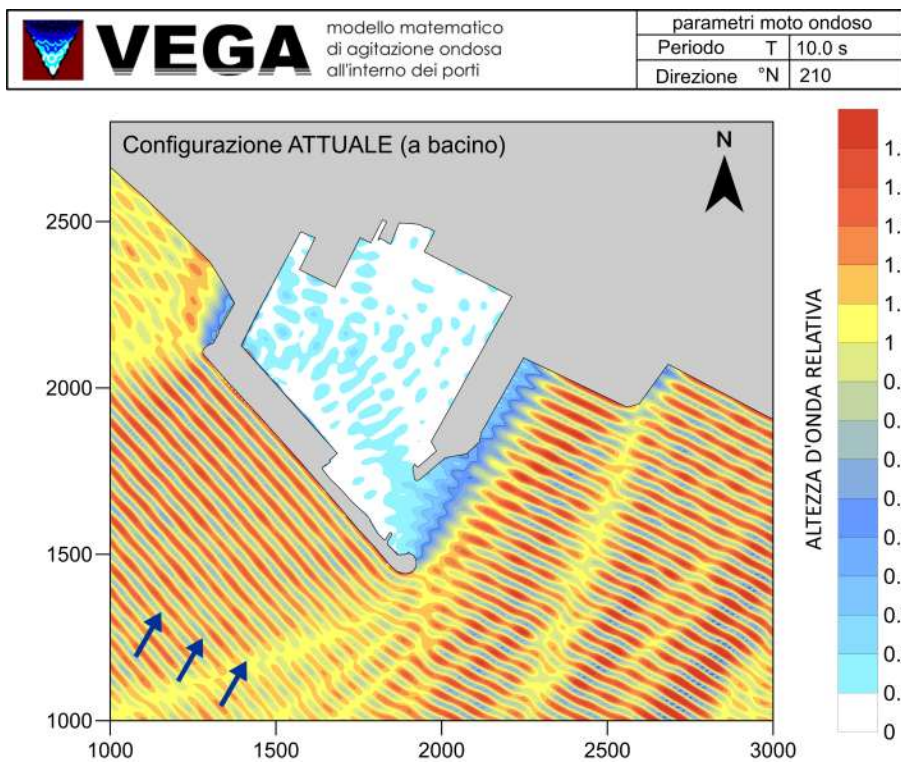
Condizione 2



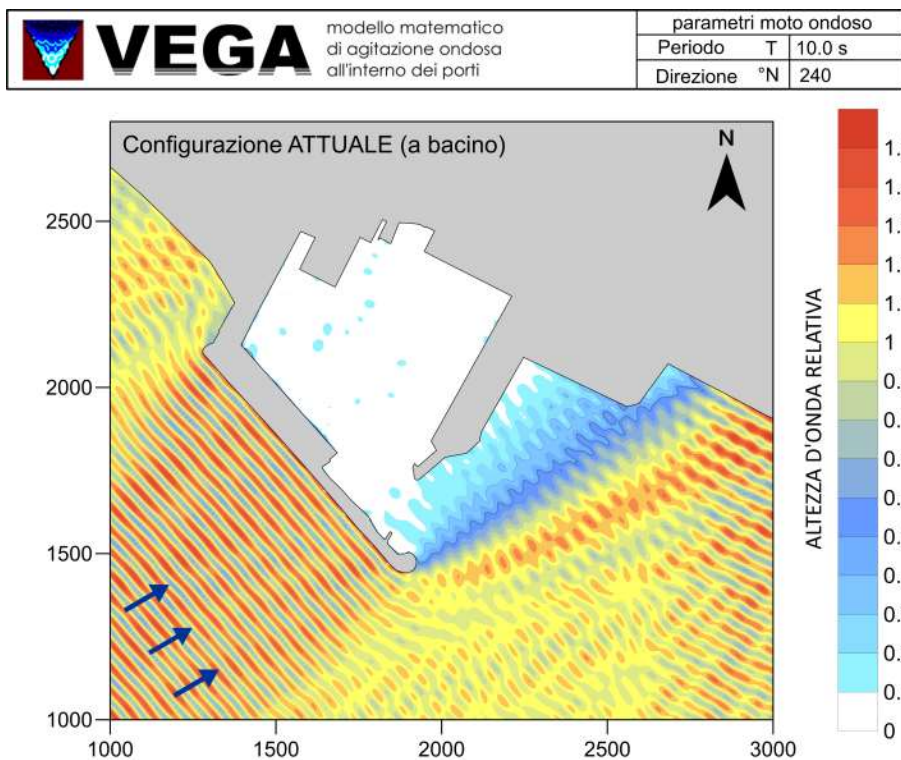
Condizione 3



Condizione 4



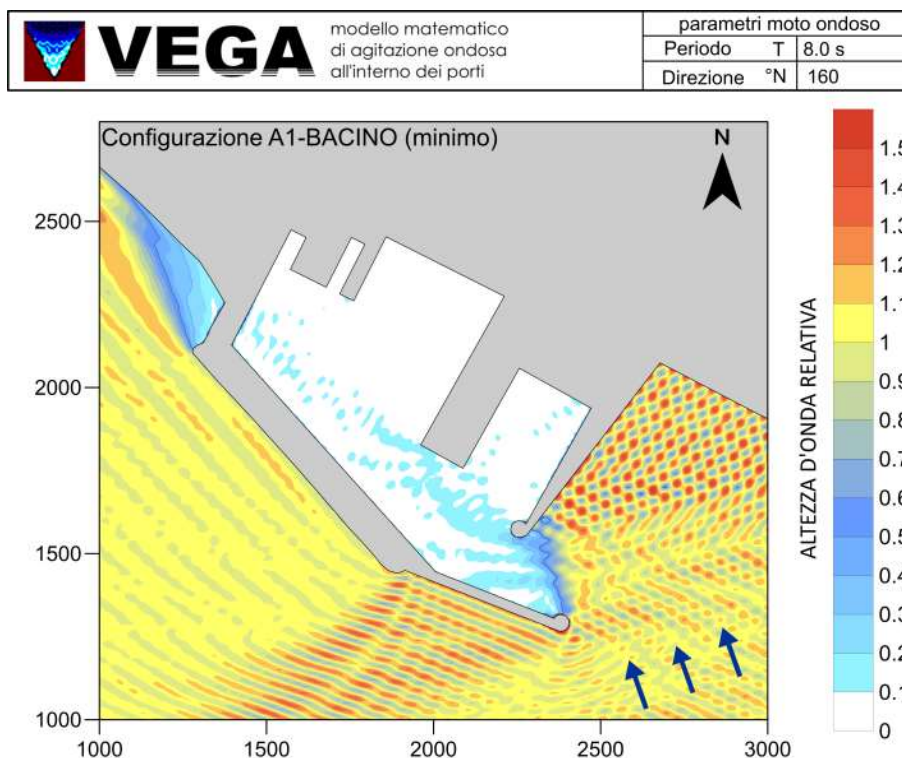
Condizione 5



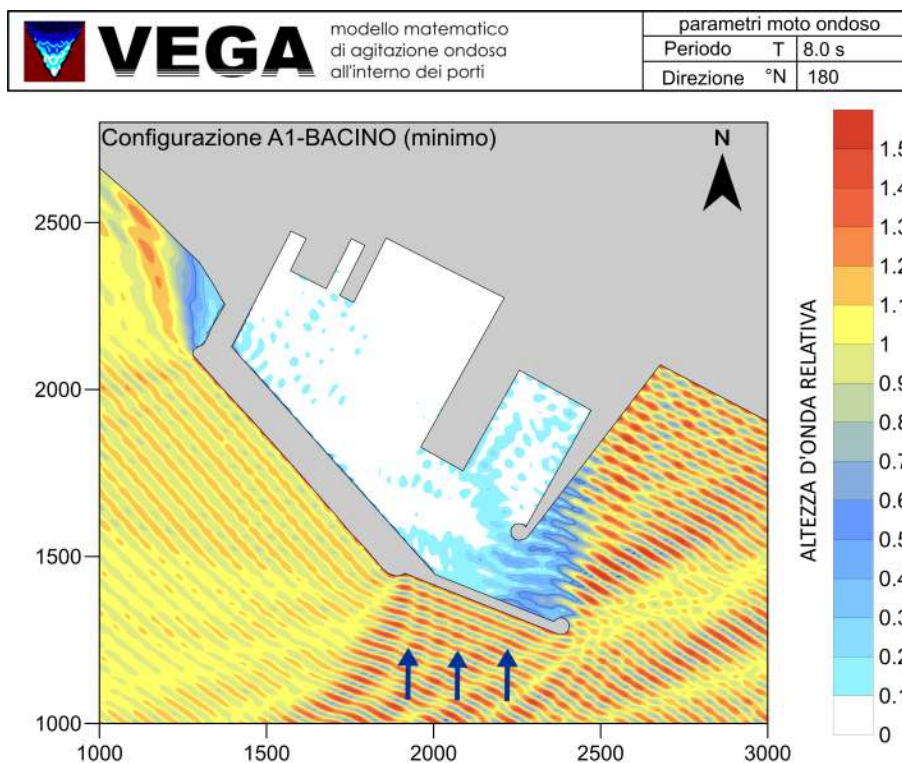
4.7.2 Configurazione A1

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione A1 rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4.

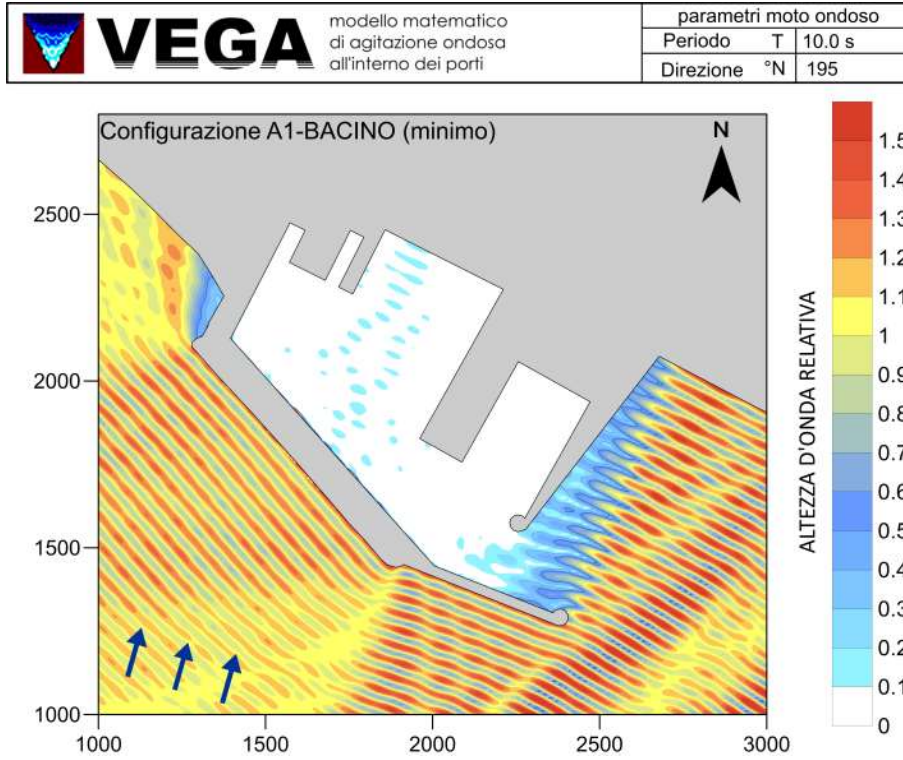
Condizione 1



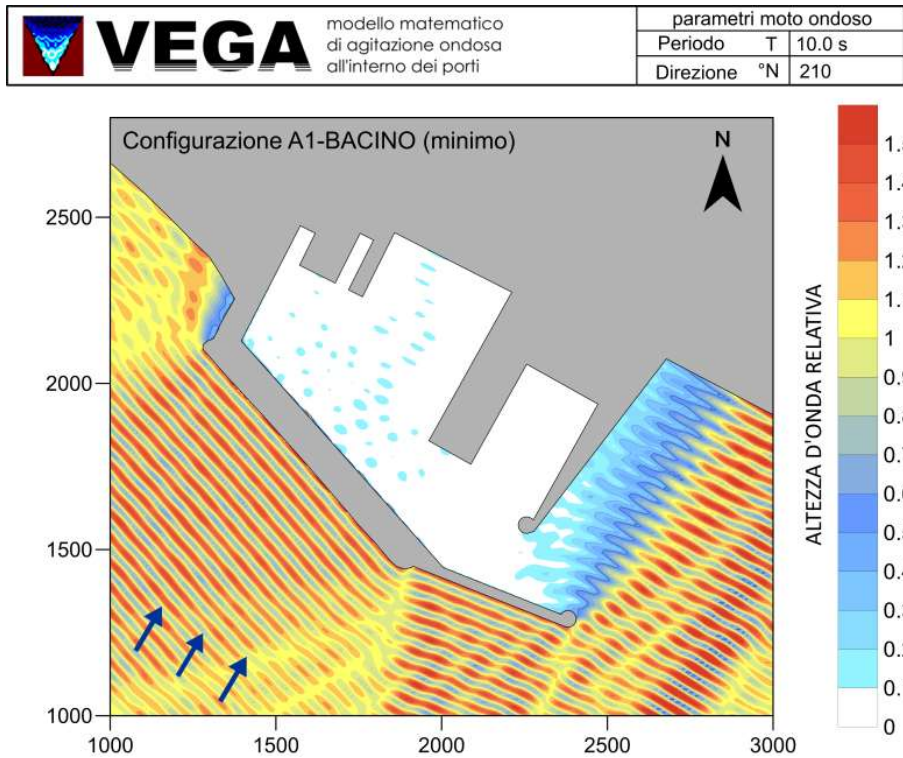
Condizione 2



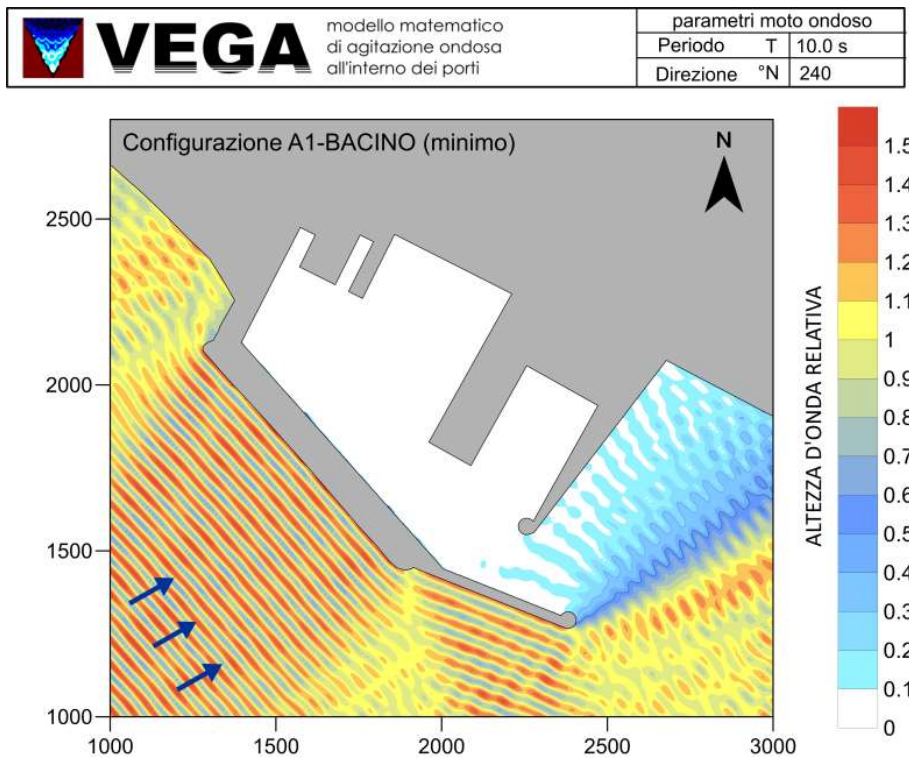
Condizione 3



Condizione 4



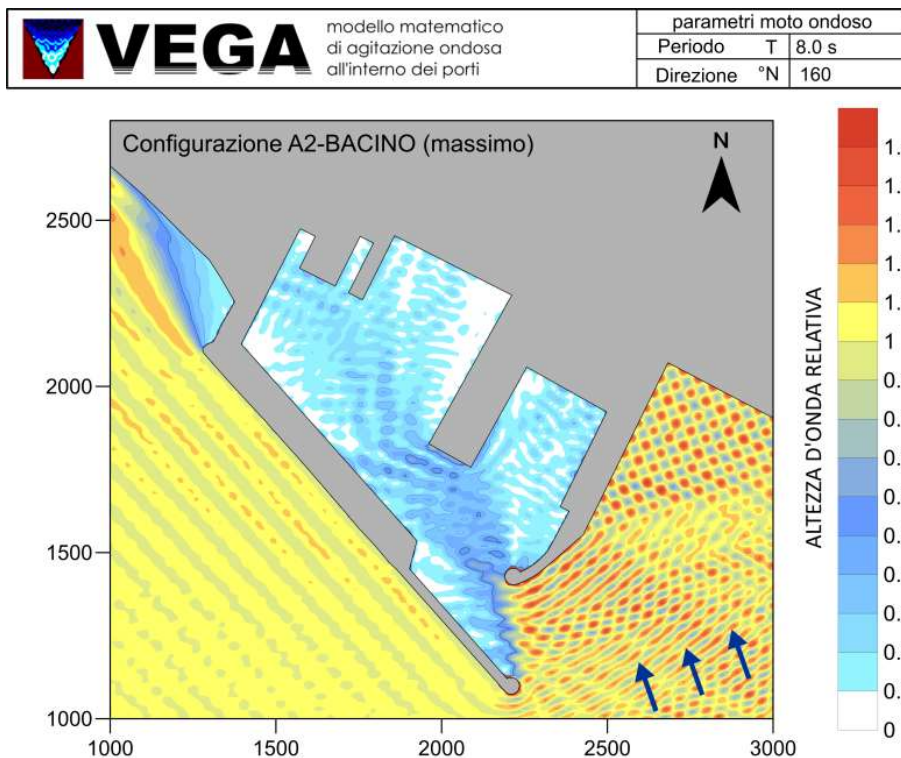
Condizione 5



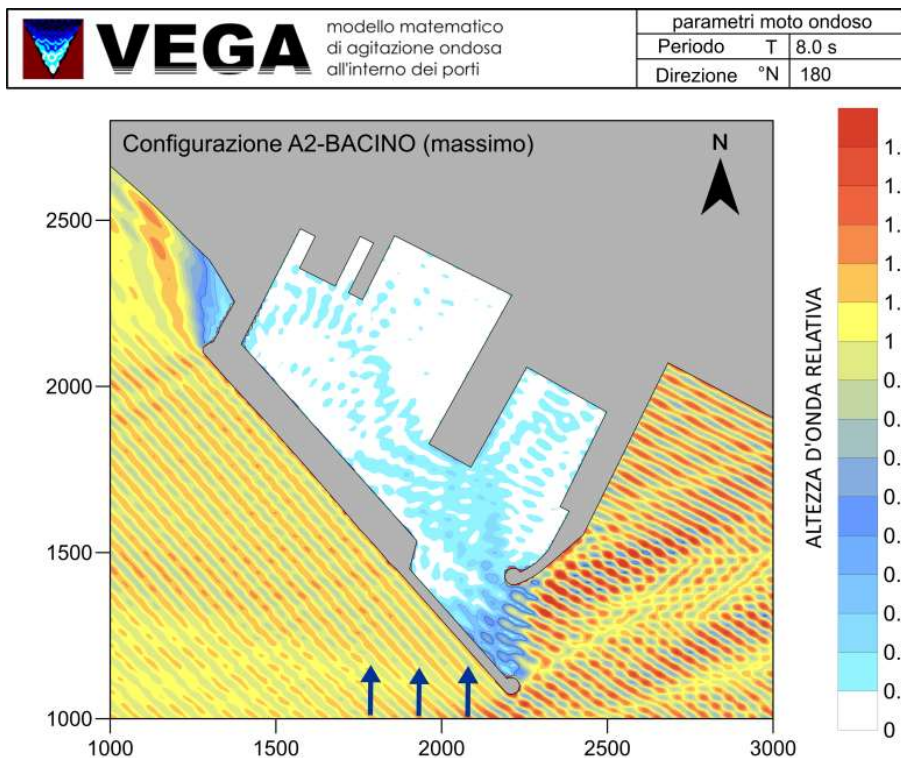
4.7.3 Configurazione A2

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione A2 rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4.

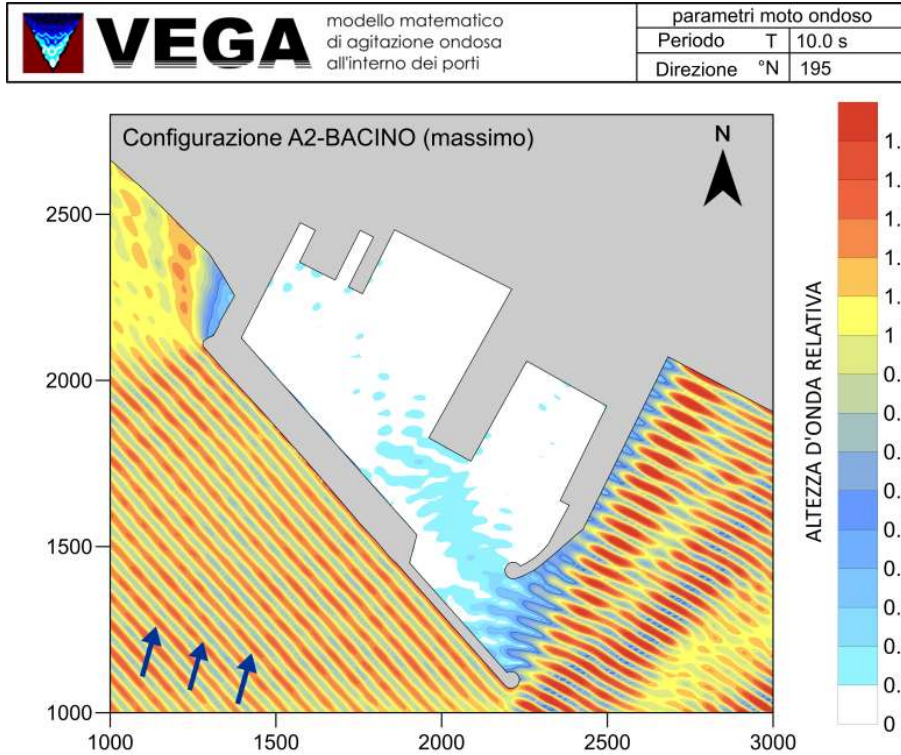
Condizione 1



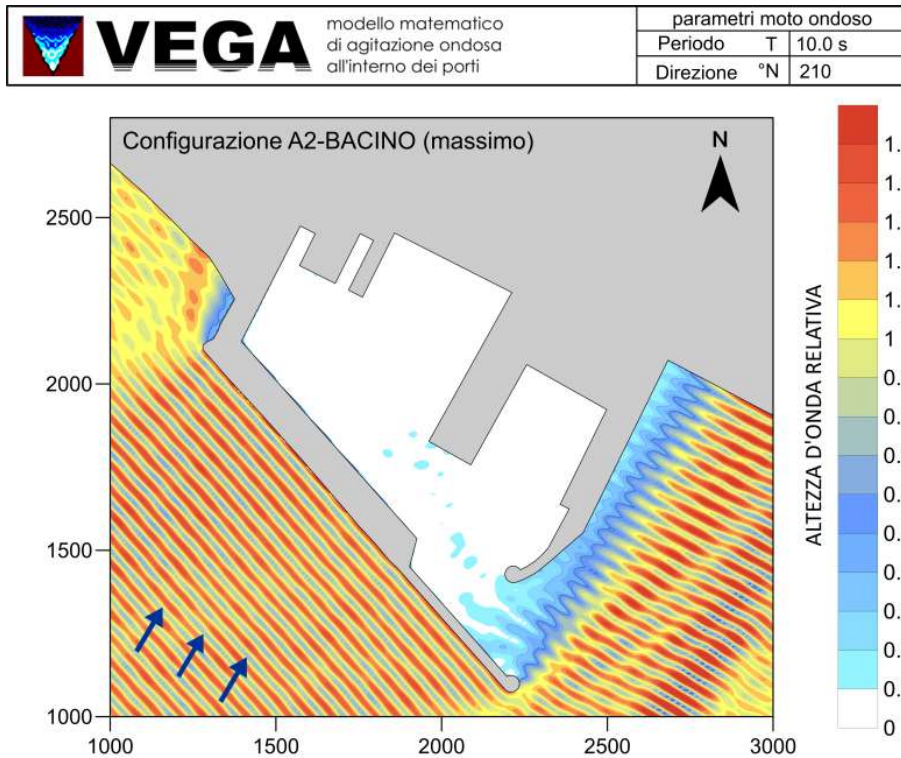
Condizione 2



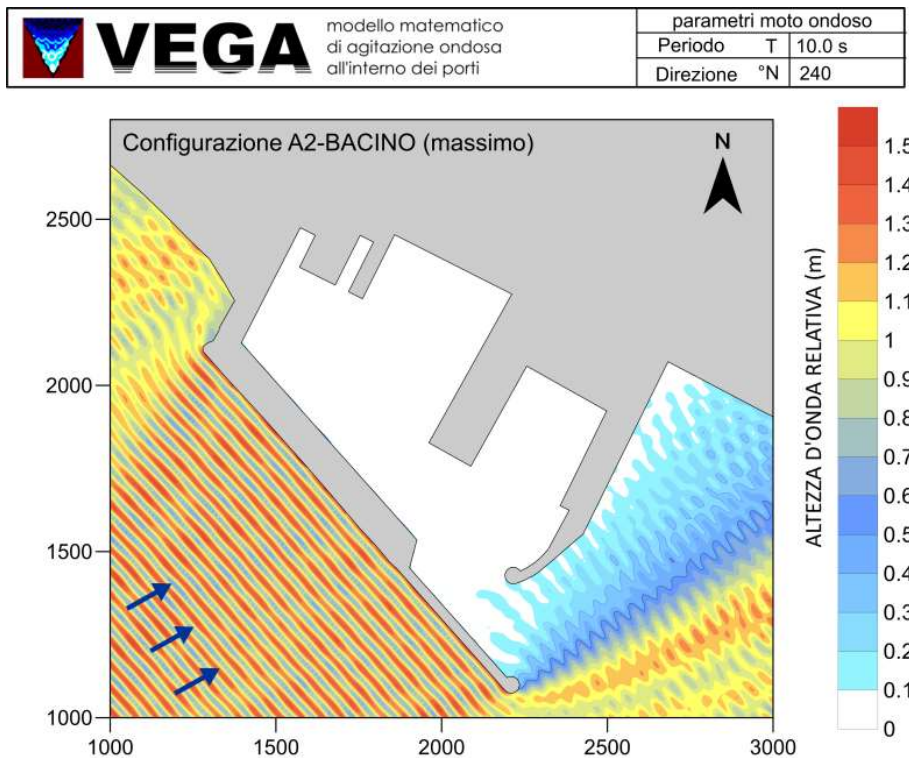
Condizione 3



Condizione 4



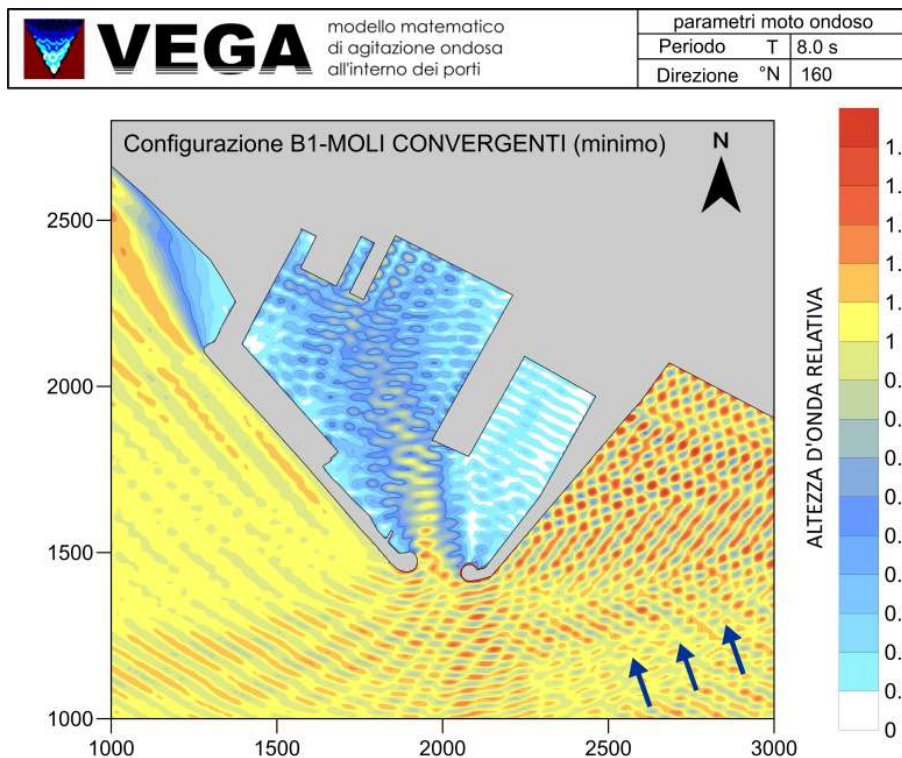
Condizione 5



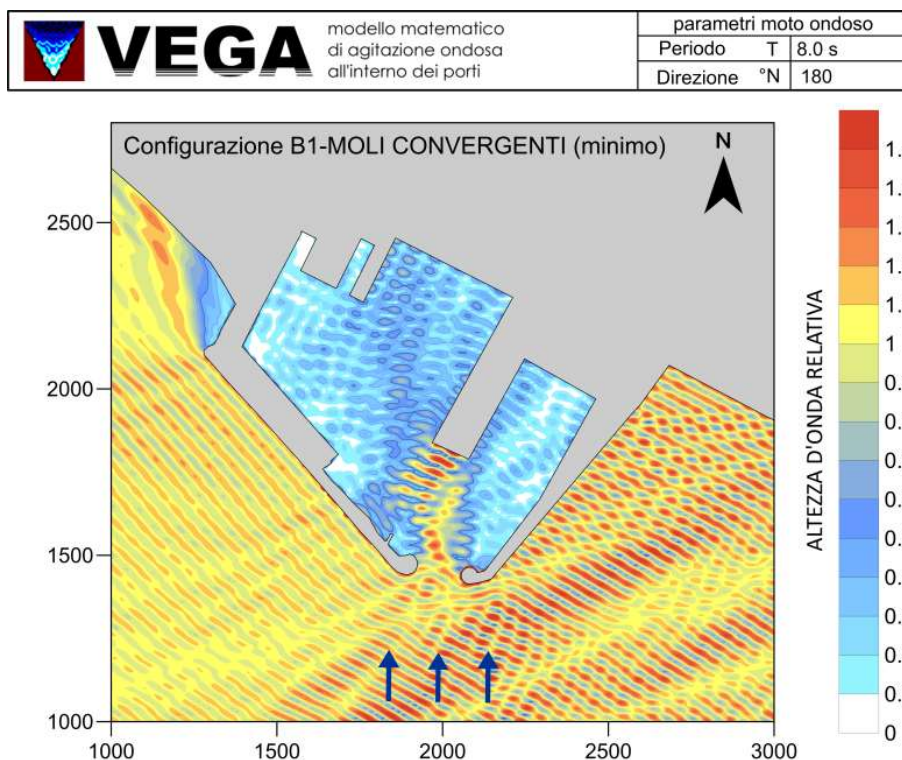
4.7.4 Configurazione B1

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione B1 rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4.

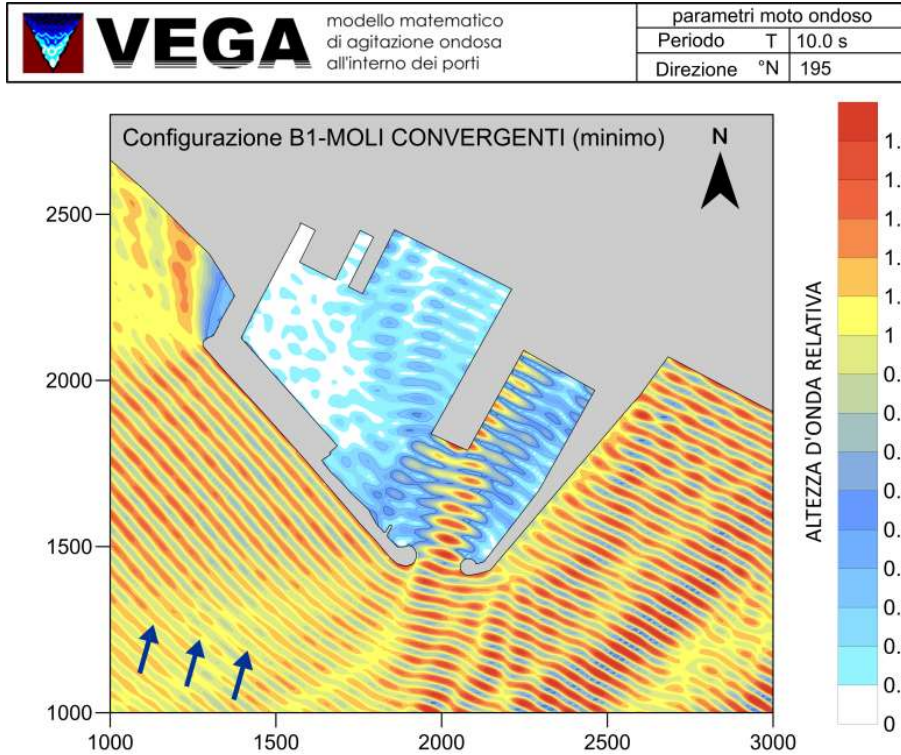
Condizione 1



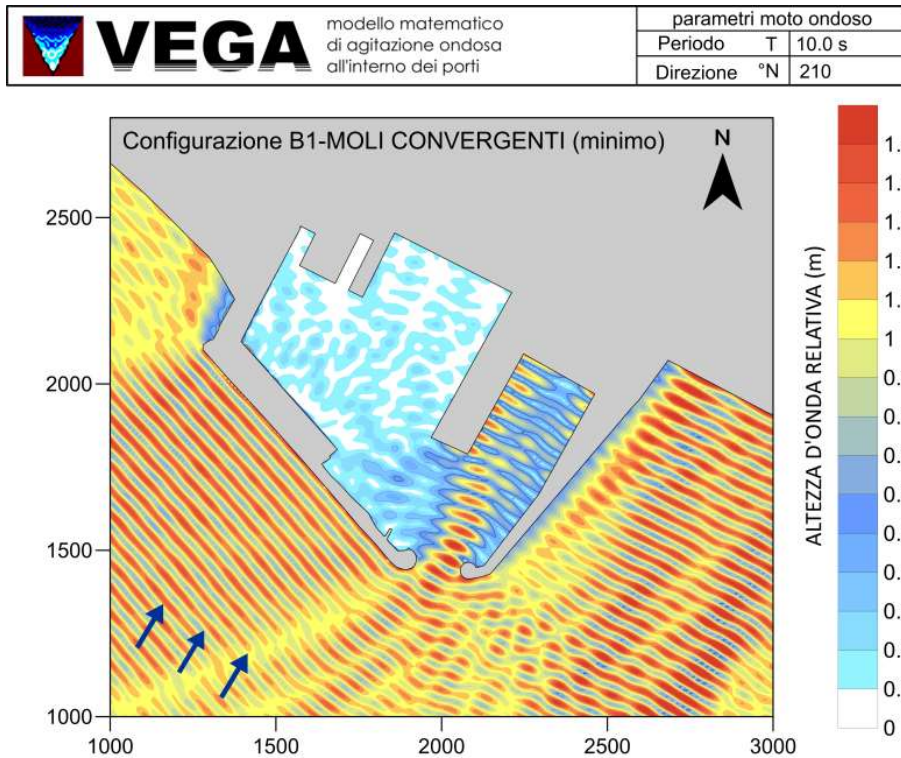
Condizione 2




Condizione 3

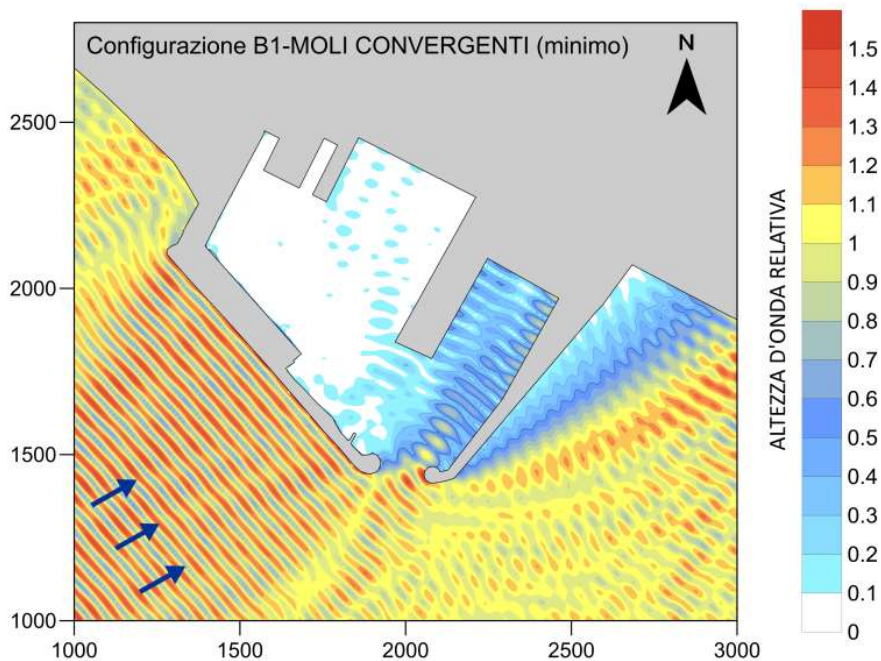


Condizione 4



Condizione 5

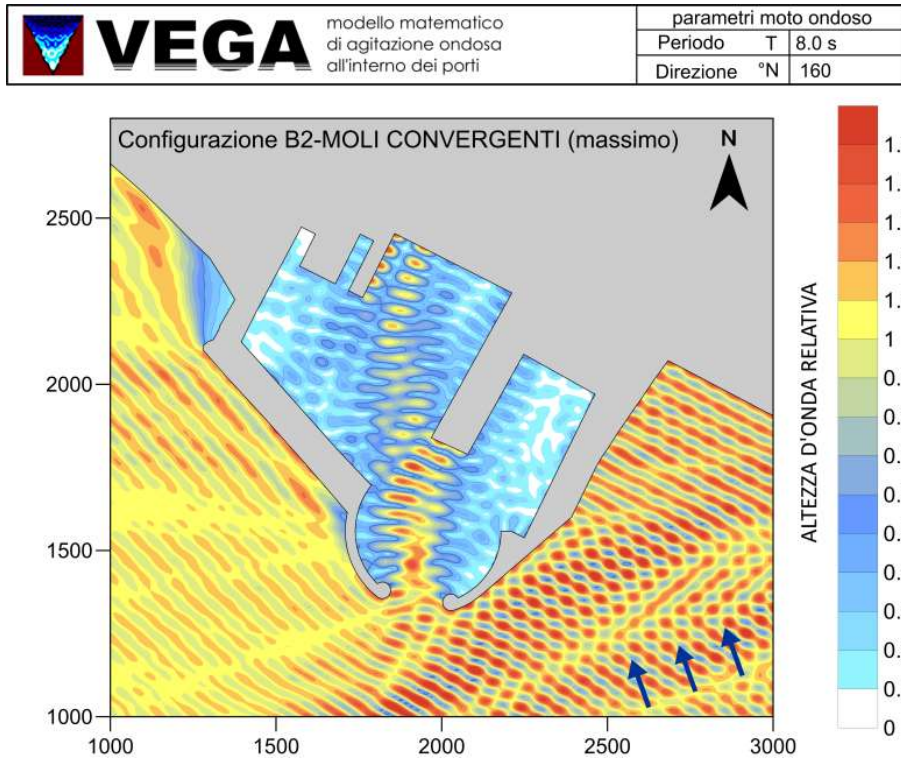
 VEGA modello matematico di agitazione ondosa all'interno dei porti	parametri moto ondoso	
	Periodo T	10.0 s
	Direzione °N	240



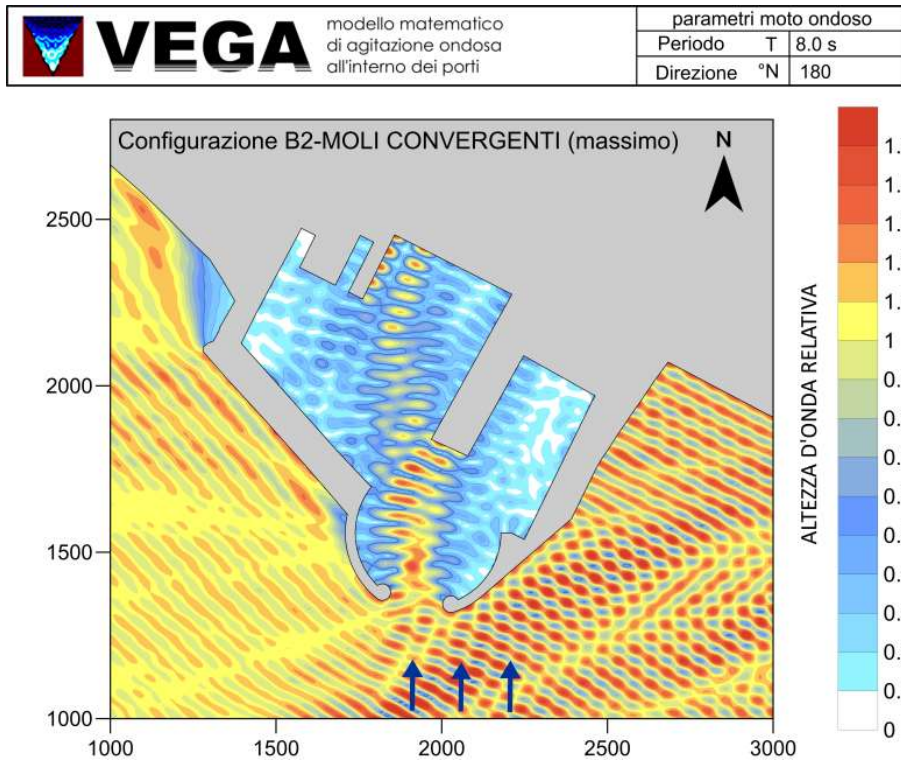
4.7.5 Configurazione B2

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione B2 rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4.

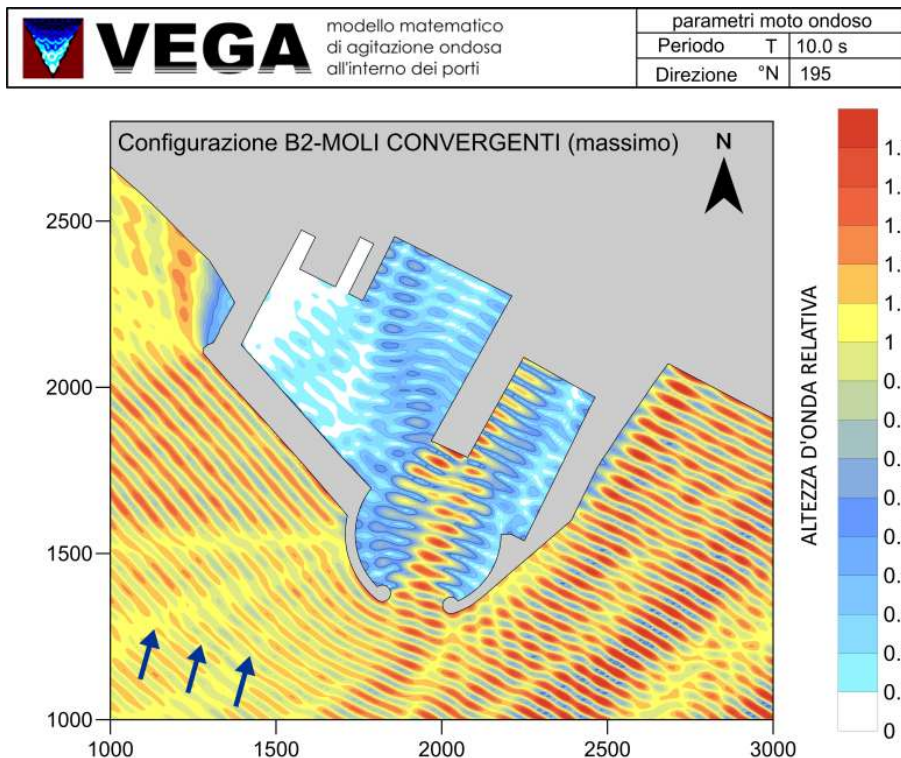
Condizione 1



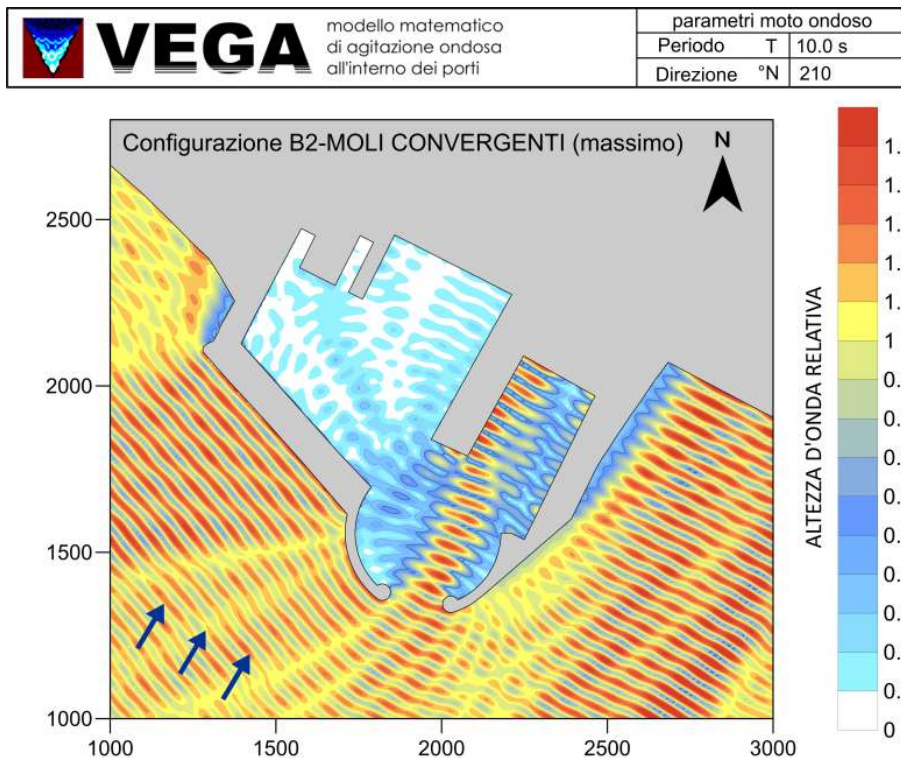
Condizione 2



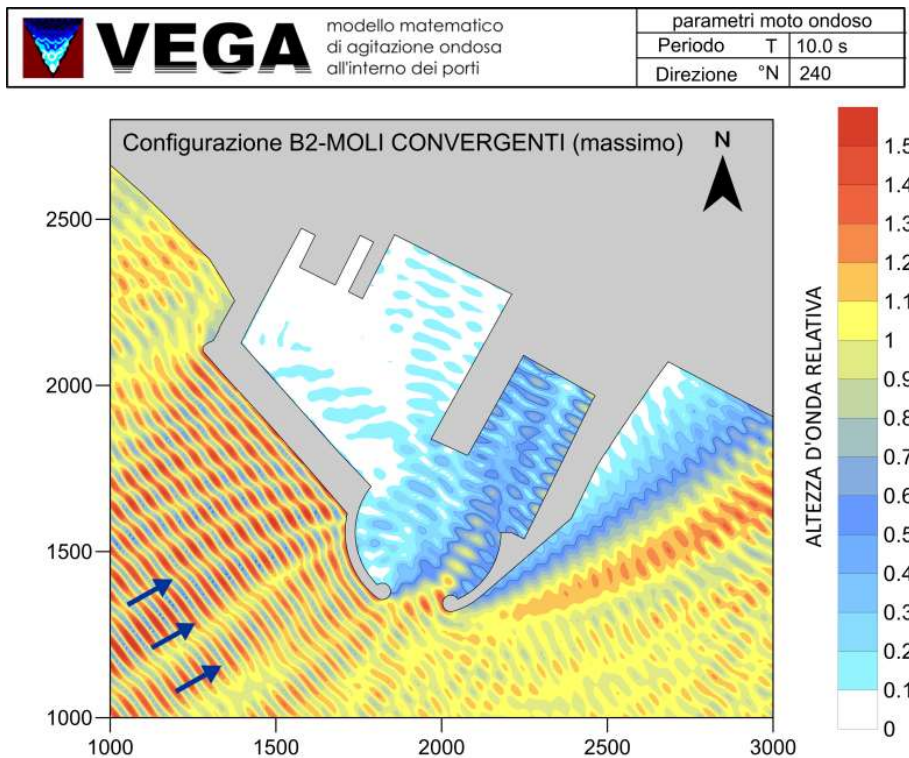
Condizione 3



Condizione 4



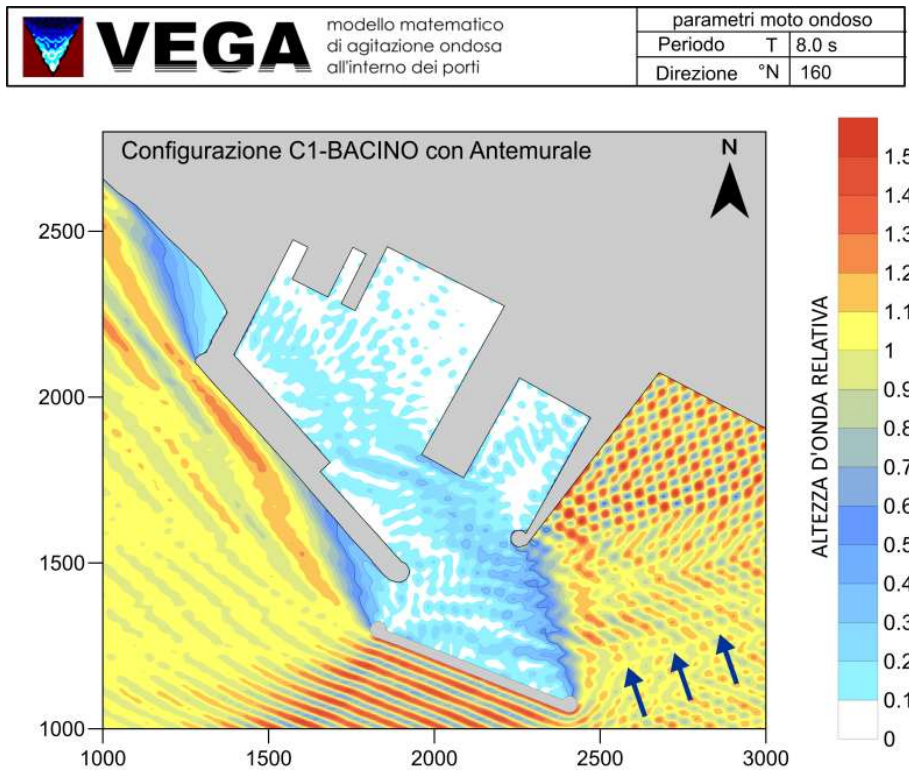
Condizione 5



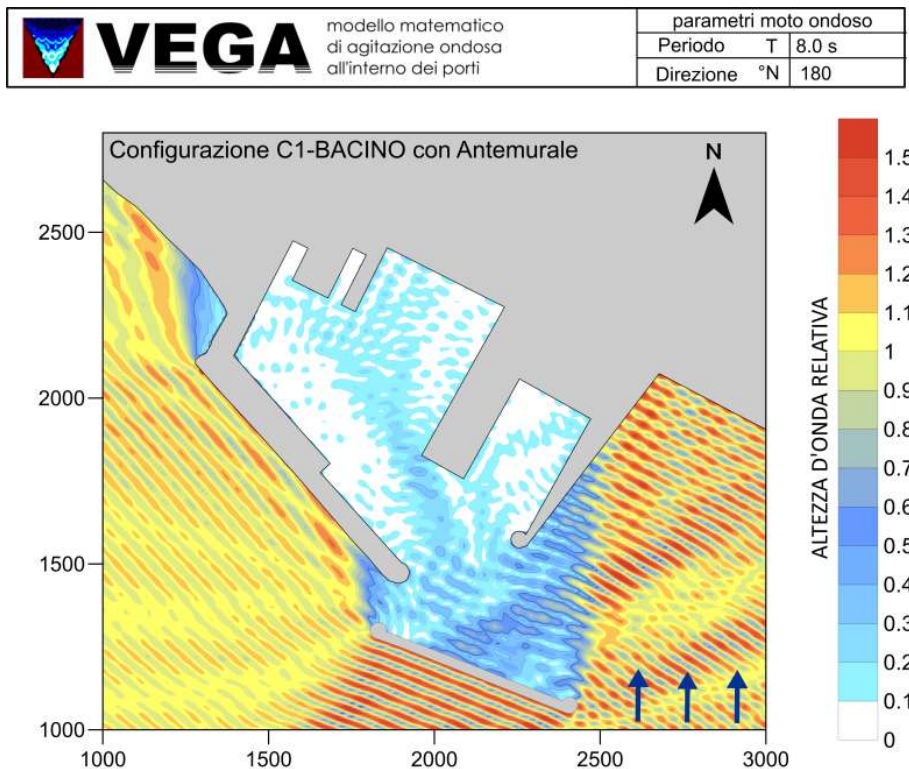
4.7.6 Risultati penetrazione moto ondosso per la configurazione C1

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione C1 rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4.

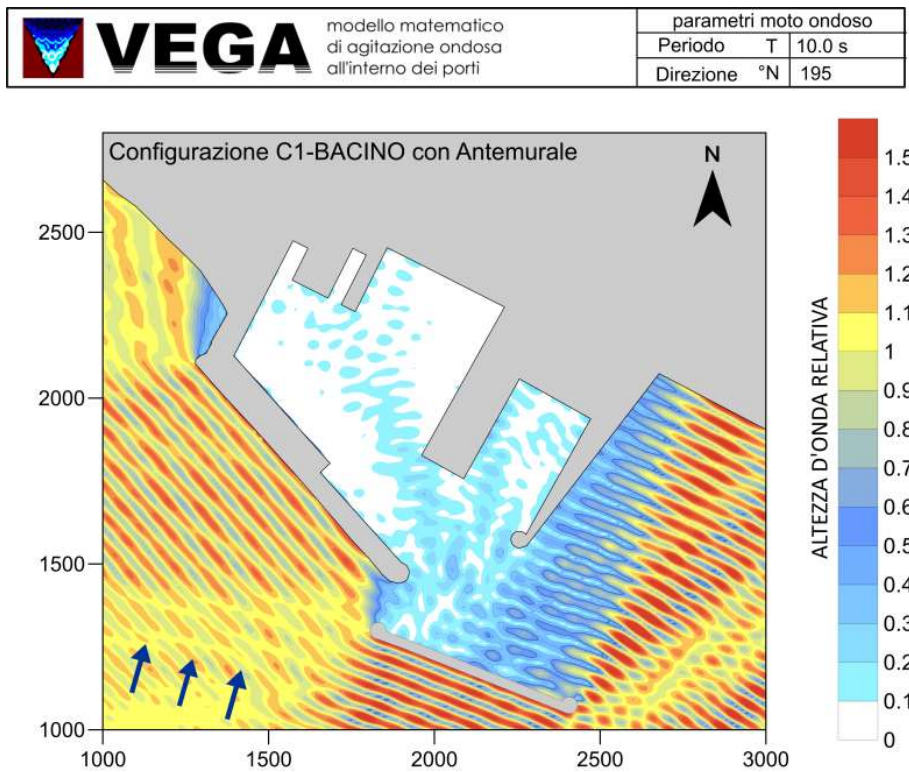
Condizione 1



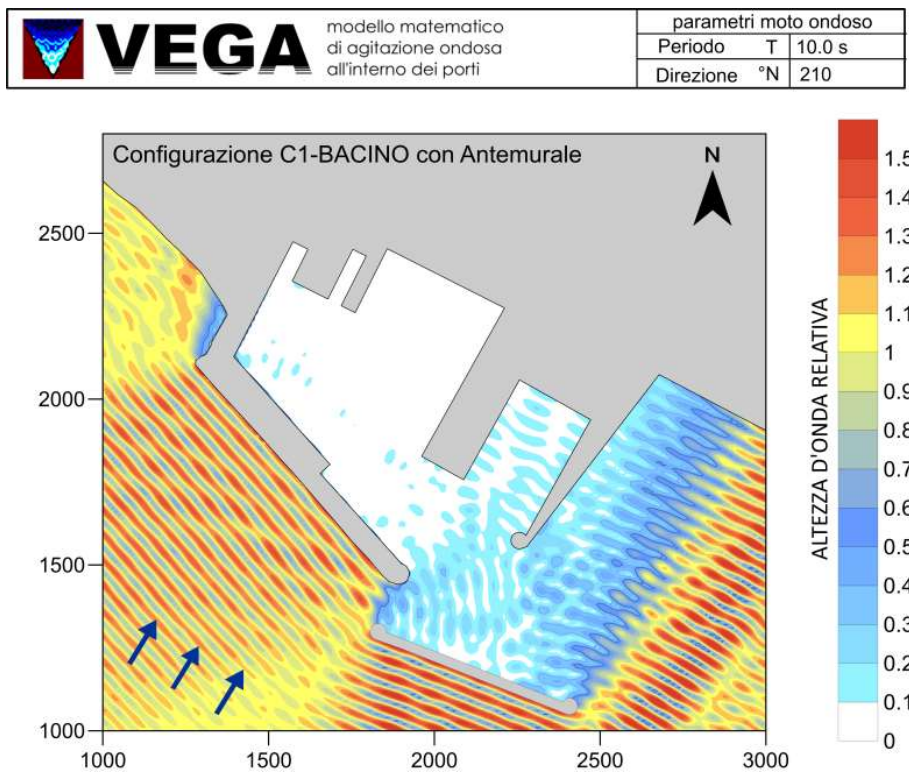
Condizione 2



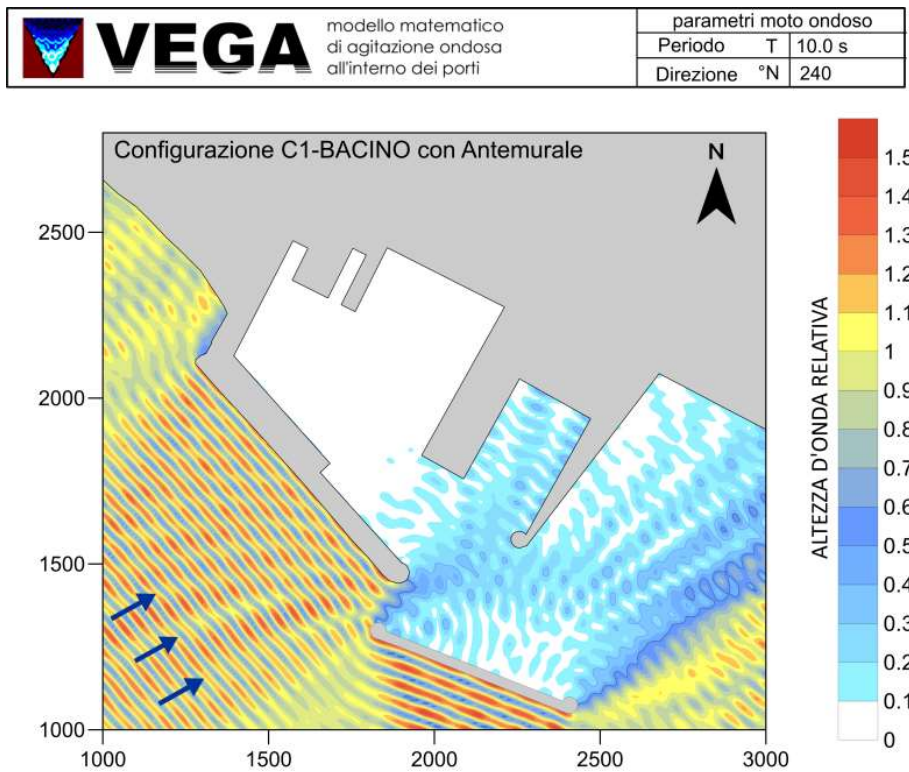
Condizione 3



Condizione 4



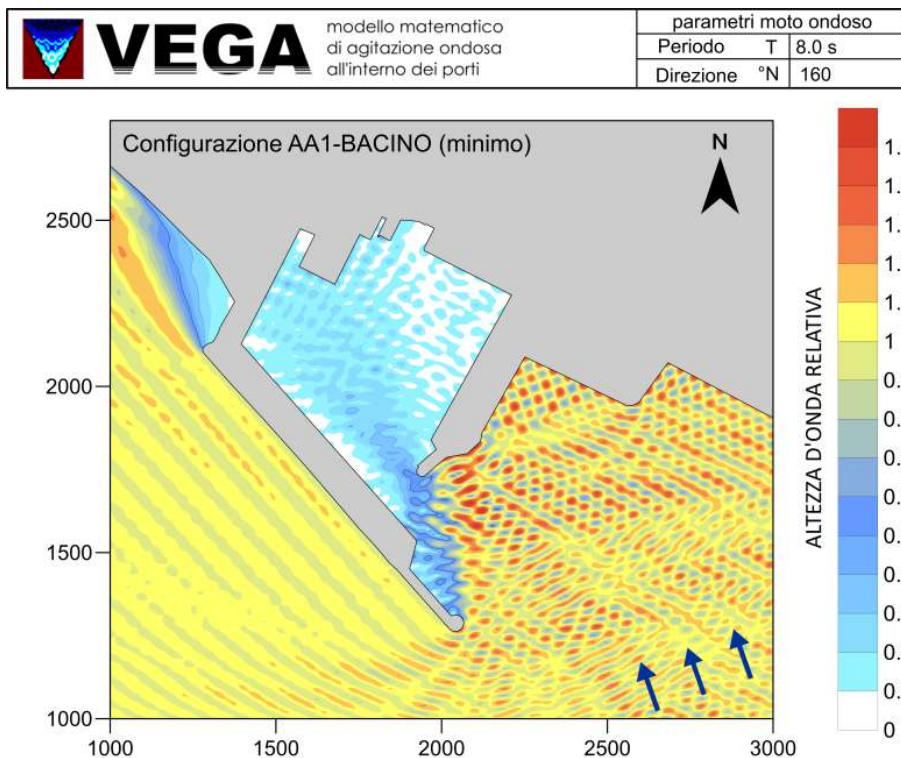
Condizione 5



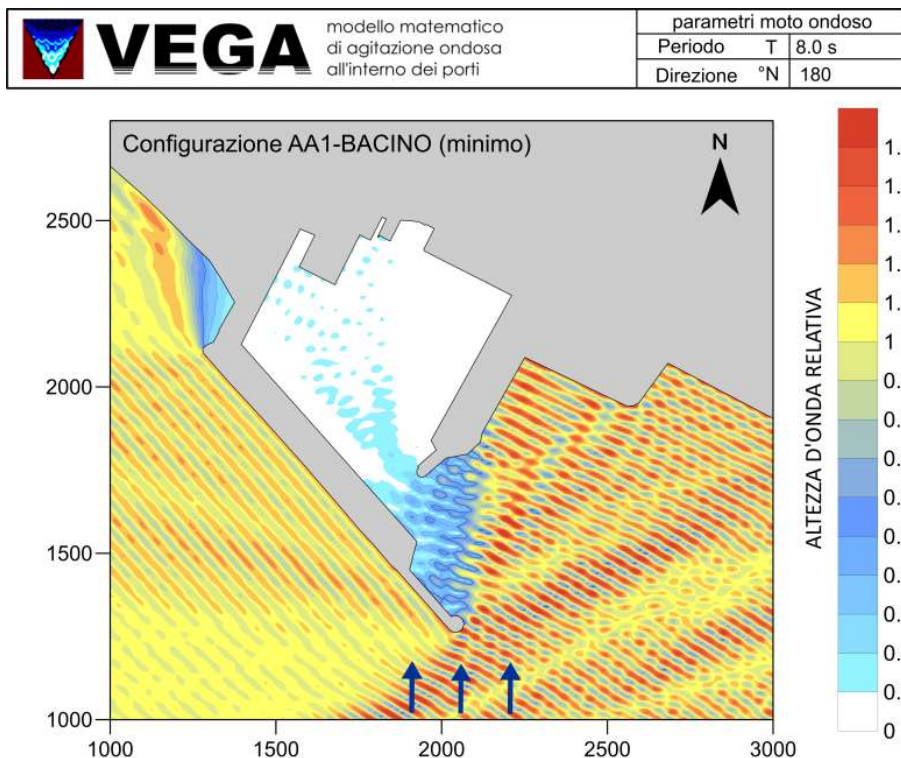
4.7.7 Configurazione AA1

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione AA1 rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4.

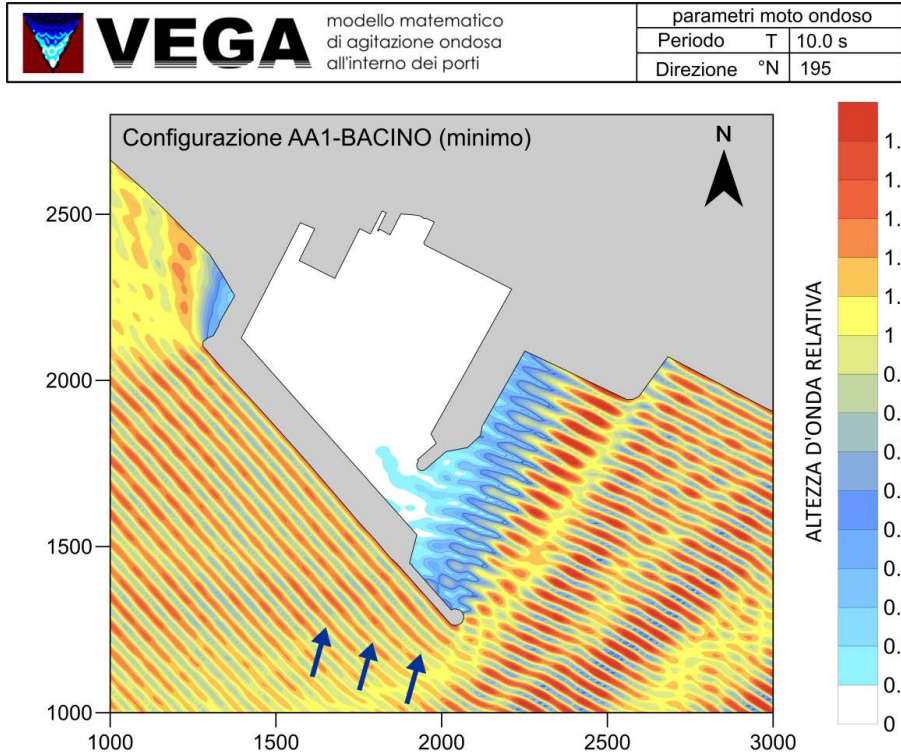
Condizione 1



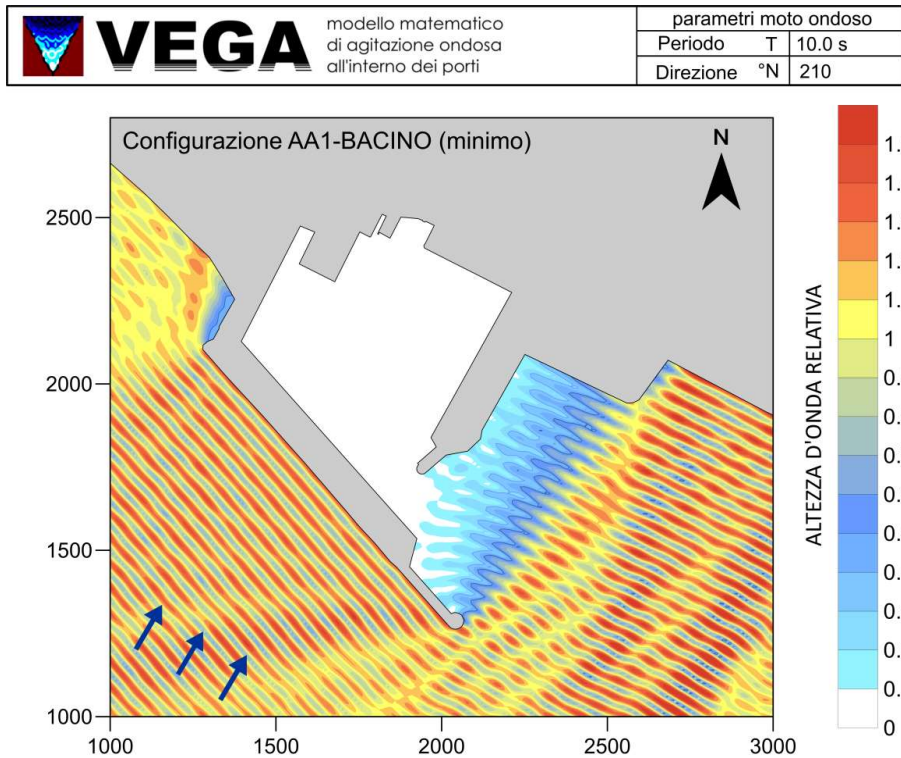
Condizione 2



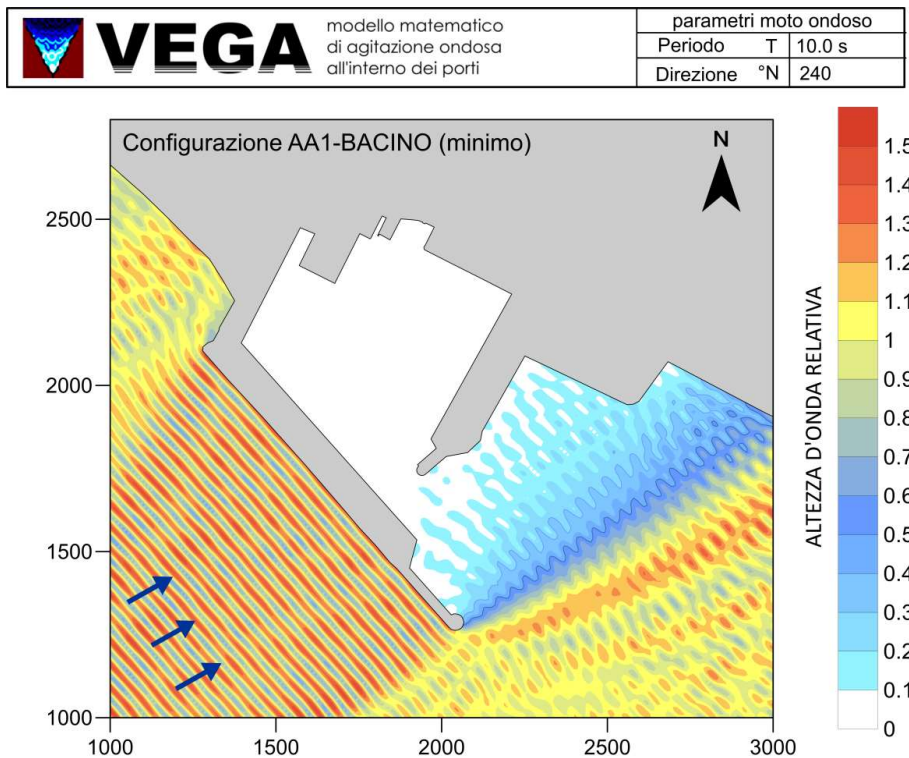
Condizione 3



Condizione 4



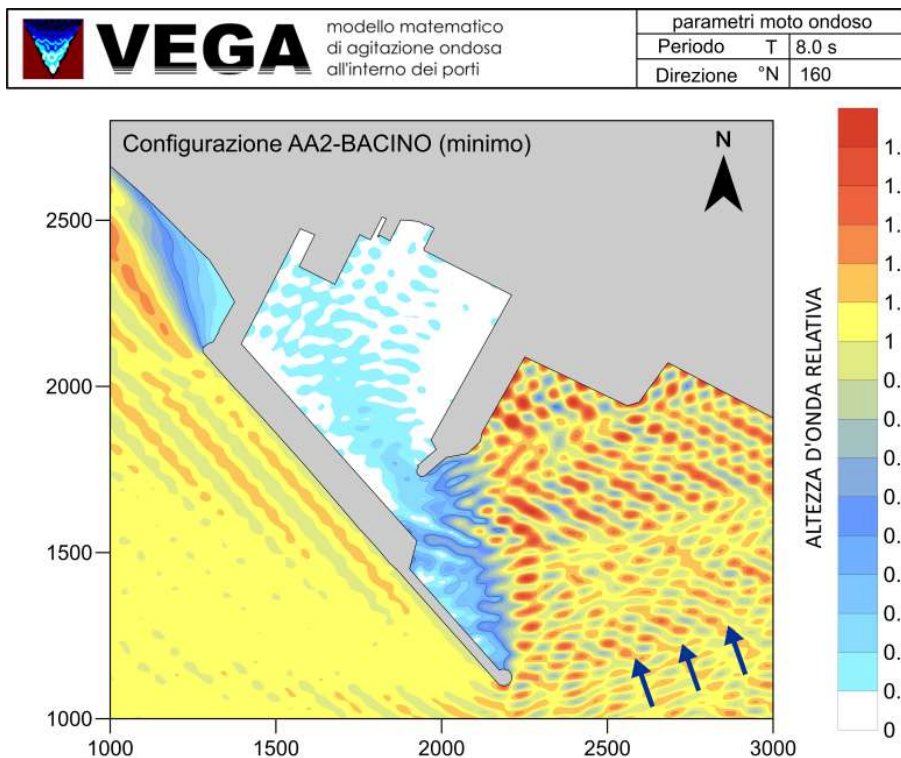
Condizione 5



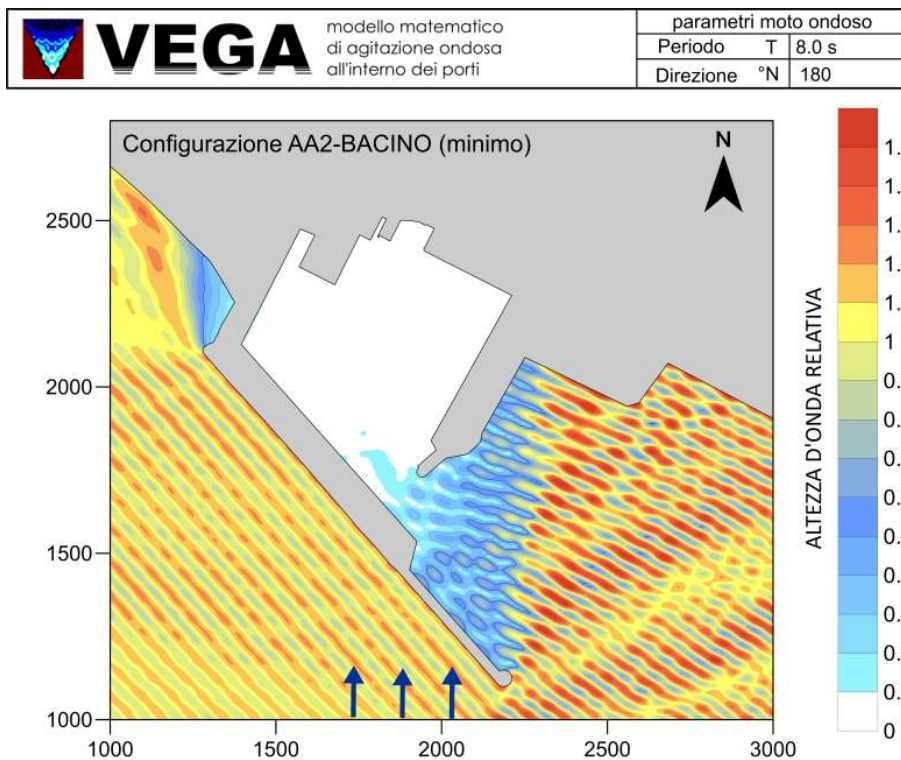
4.7.8 Configurazione AA2

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione AA2 rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4.

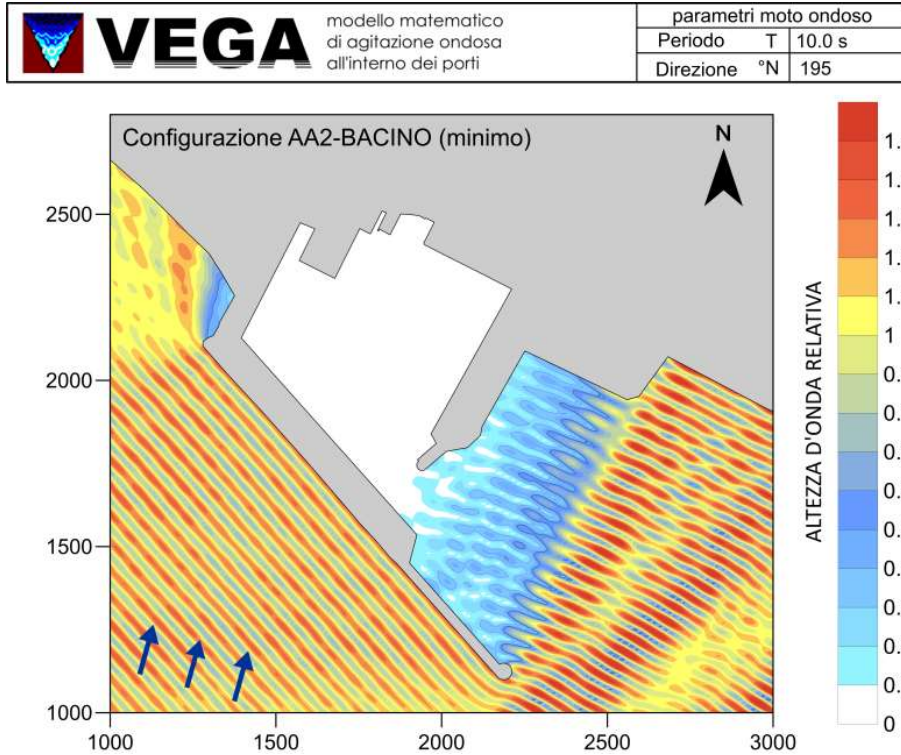
Condizione 1



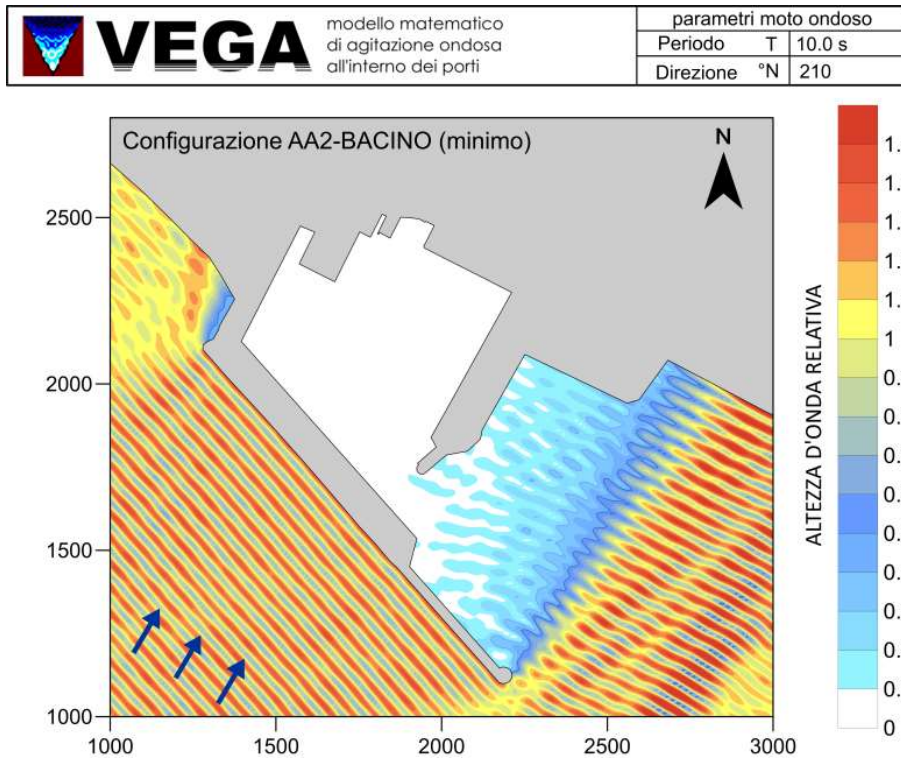
Condizione 2



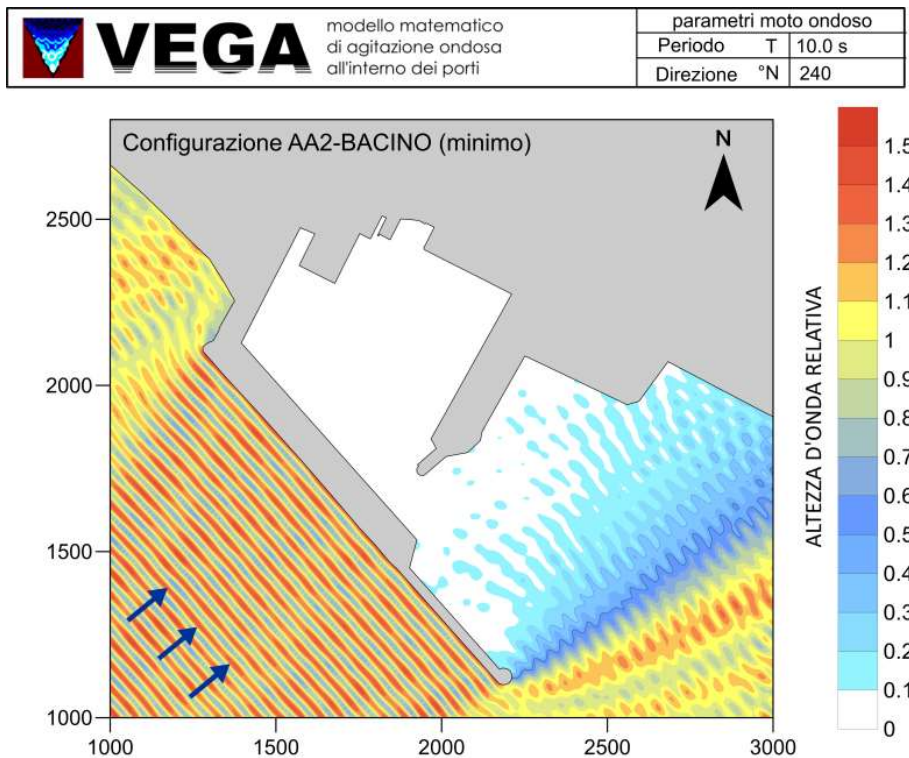
Condizione 3



Condizione 4



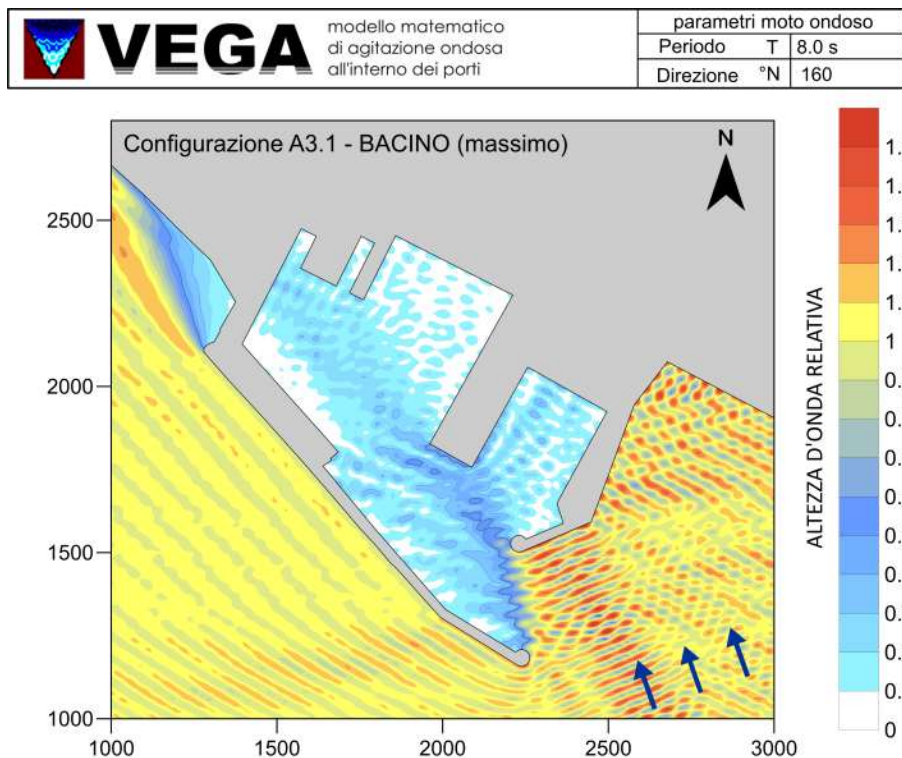
Condizione 5



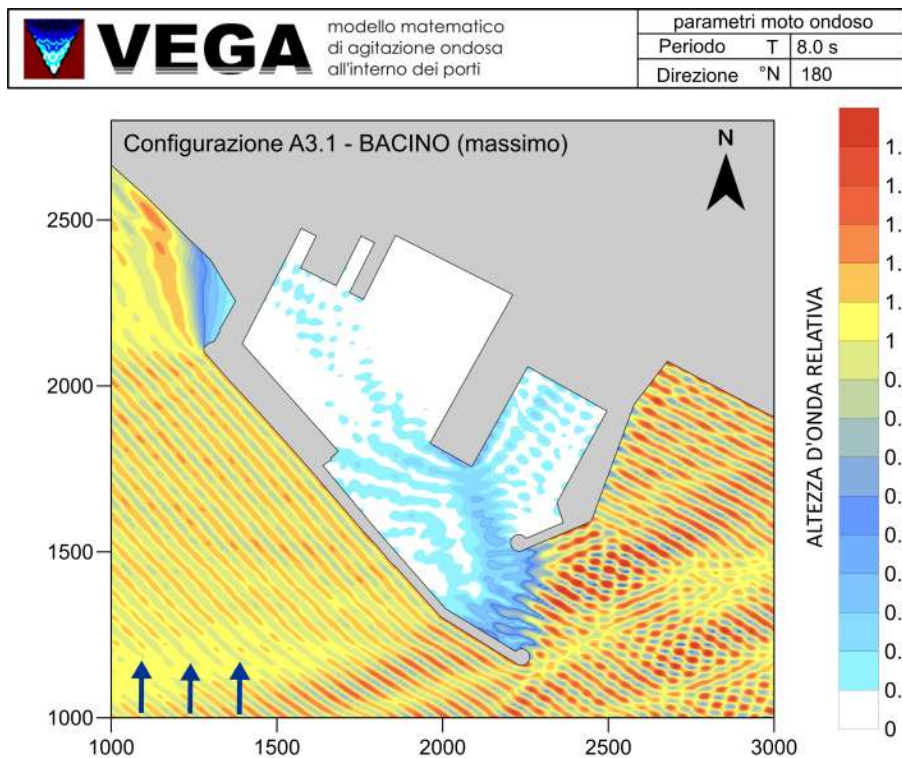
4.7.9 Configurazione A3.1

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione A3.1 rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4.

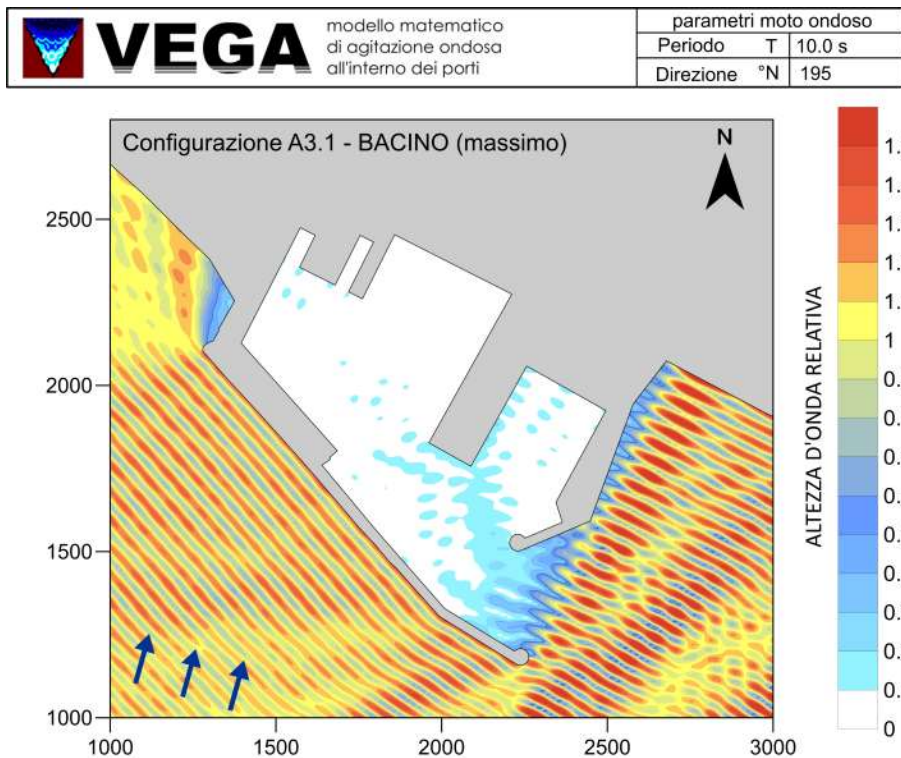
Condizione 1



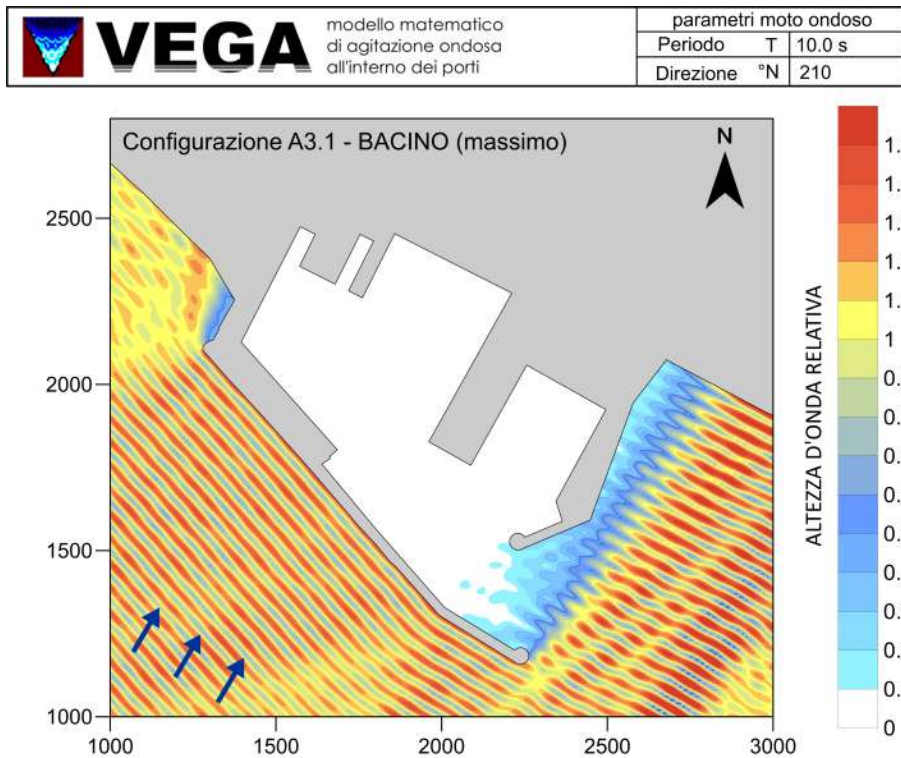
Condizione 2



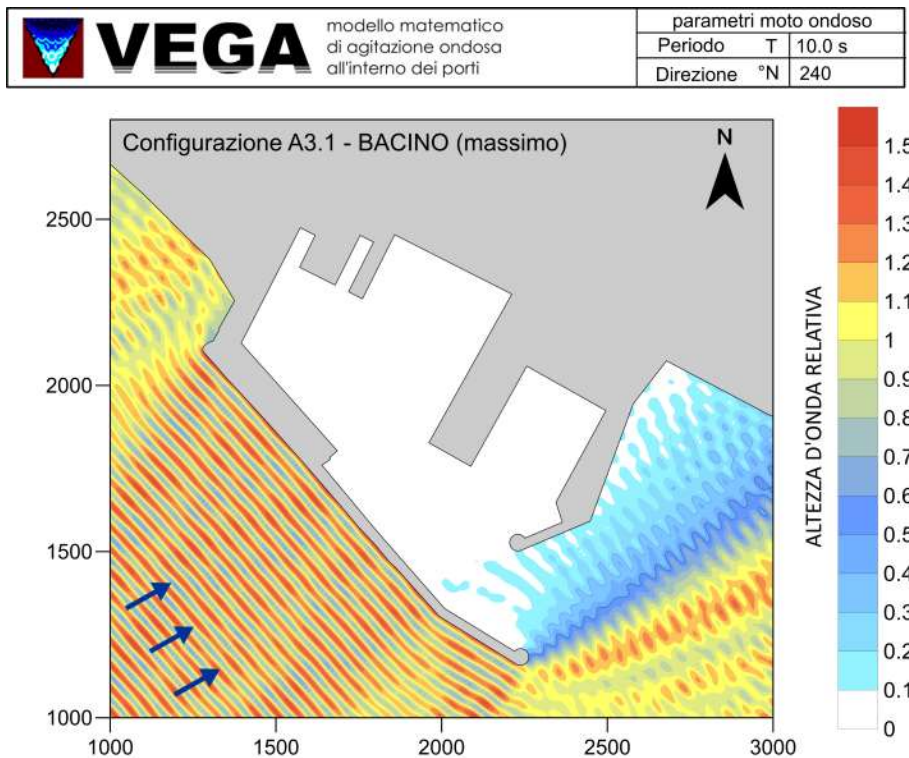
Condizione 3



Condizione 4



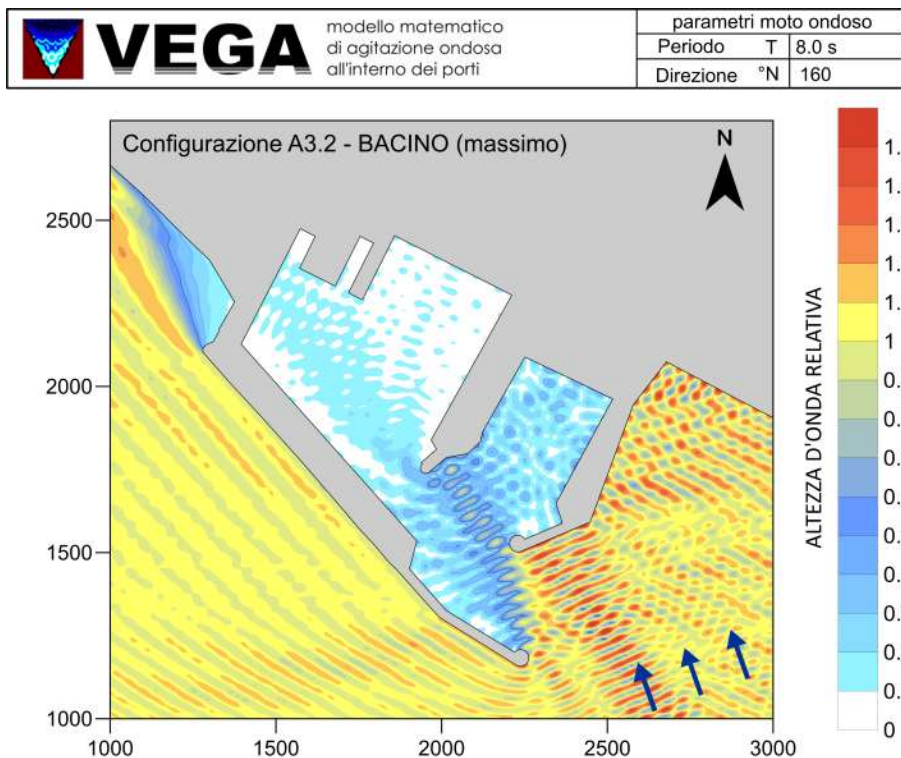
Condizione 5



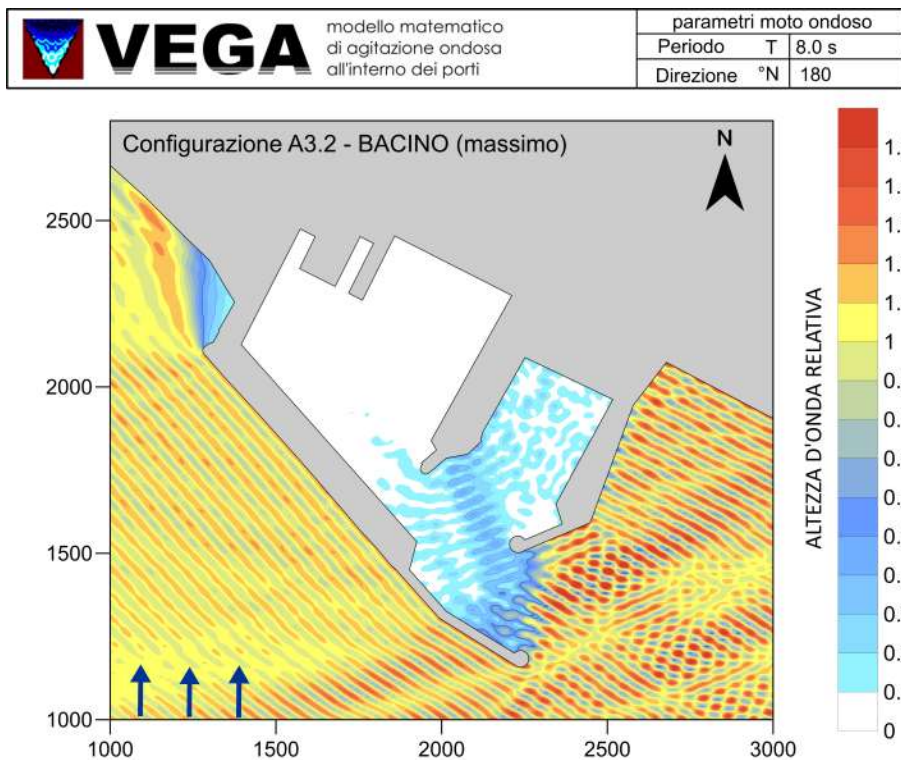
4.7.10 Configurazione A3.2

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione A3.2 rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4.

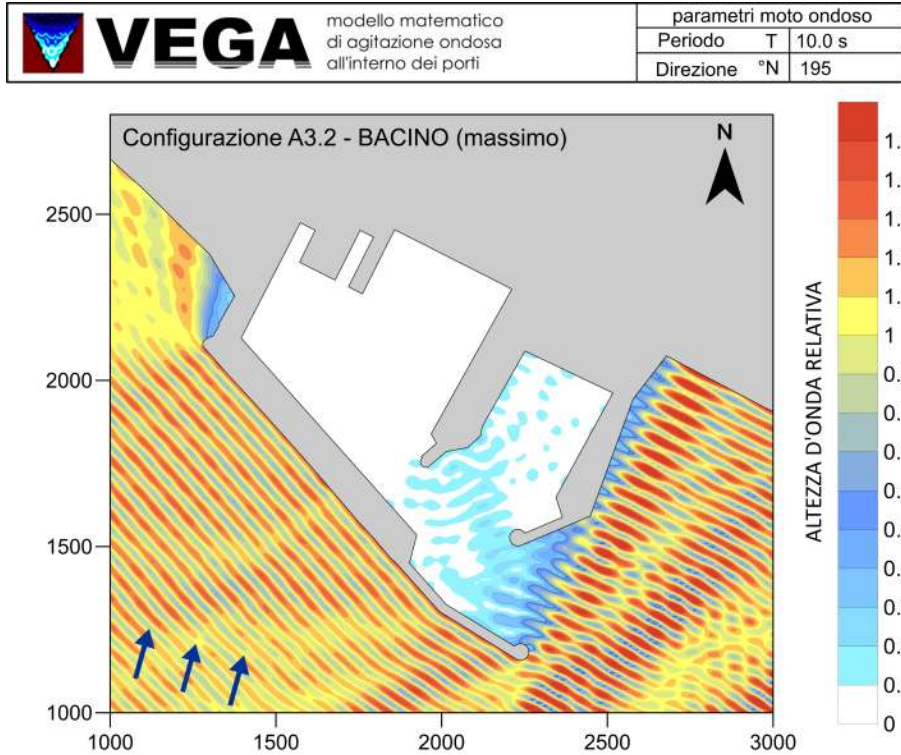
Condizione 1



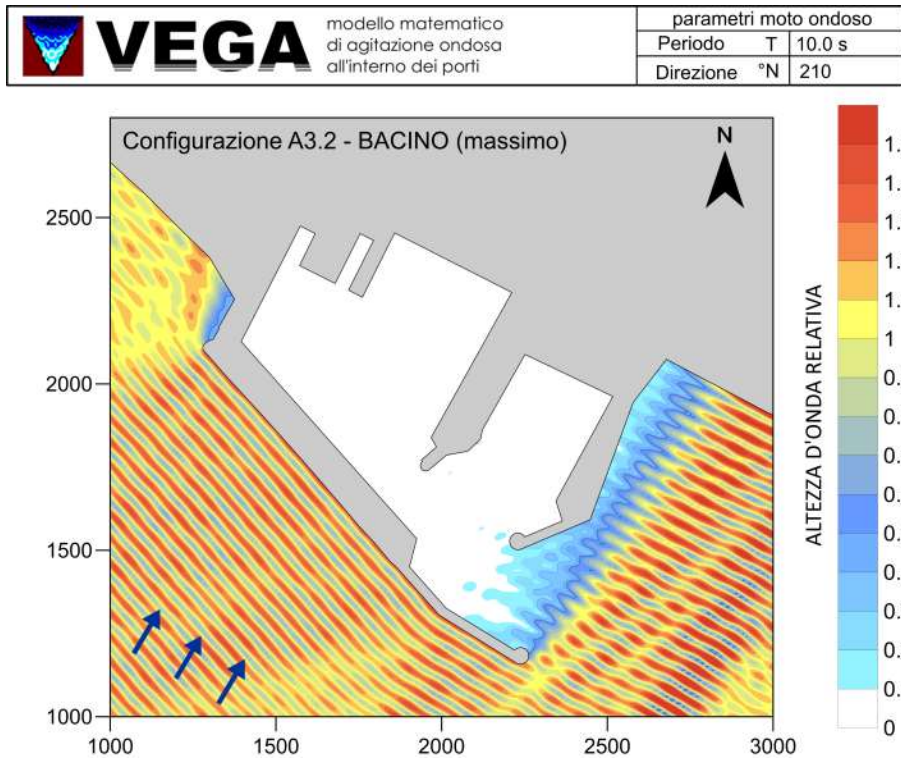
Condizione 2



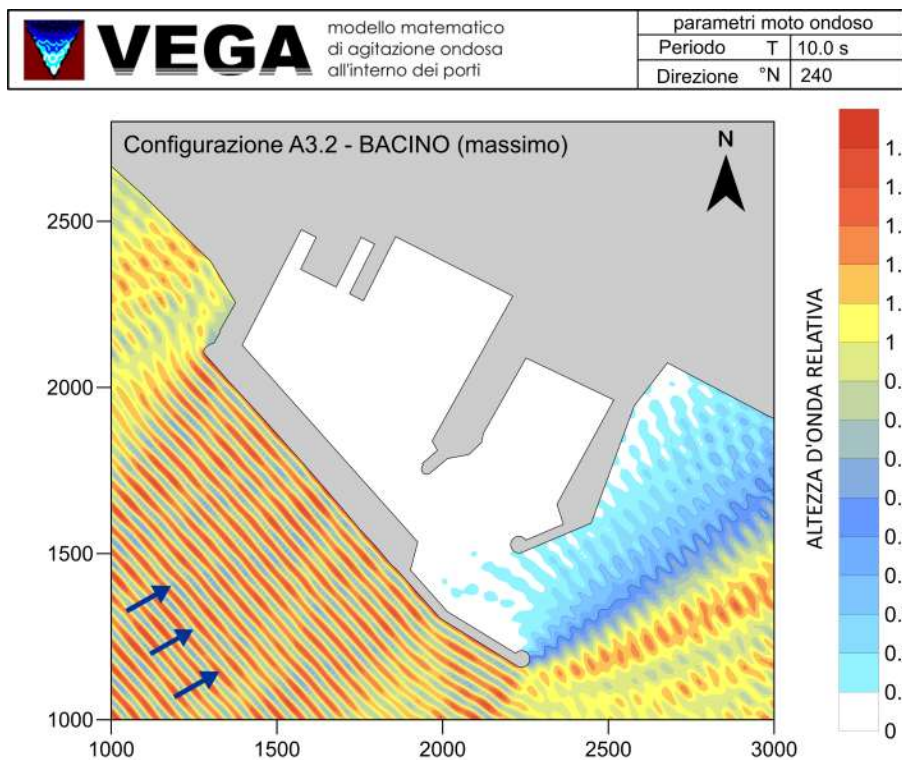
Condizione 3



Condizione 4



Condizione 5

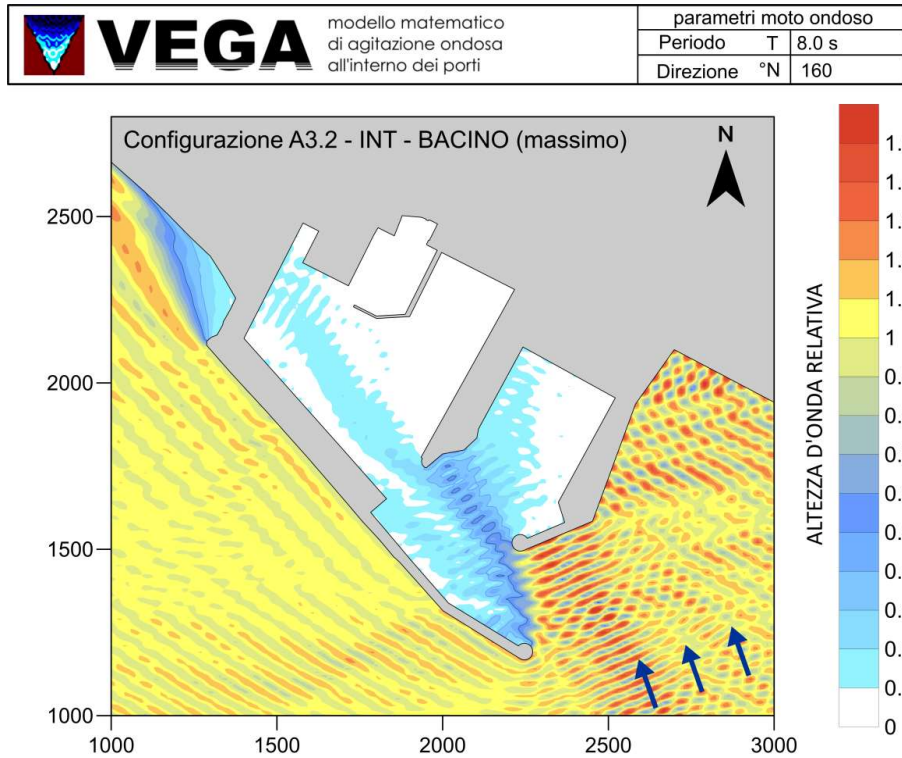


Si può concludere che dall'analisi comparativa delle soluzioni A3.1 e A3.2, quest'ultima fornisce un miglior risultato dal punto di vista di penetrazione portuale, riducendosi l'energia in ingresso grazie alla presenza dell'elemento di testata dell'attuale molo sottoflutto per la direzione di moto ondoso pari a 160°N.

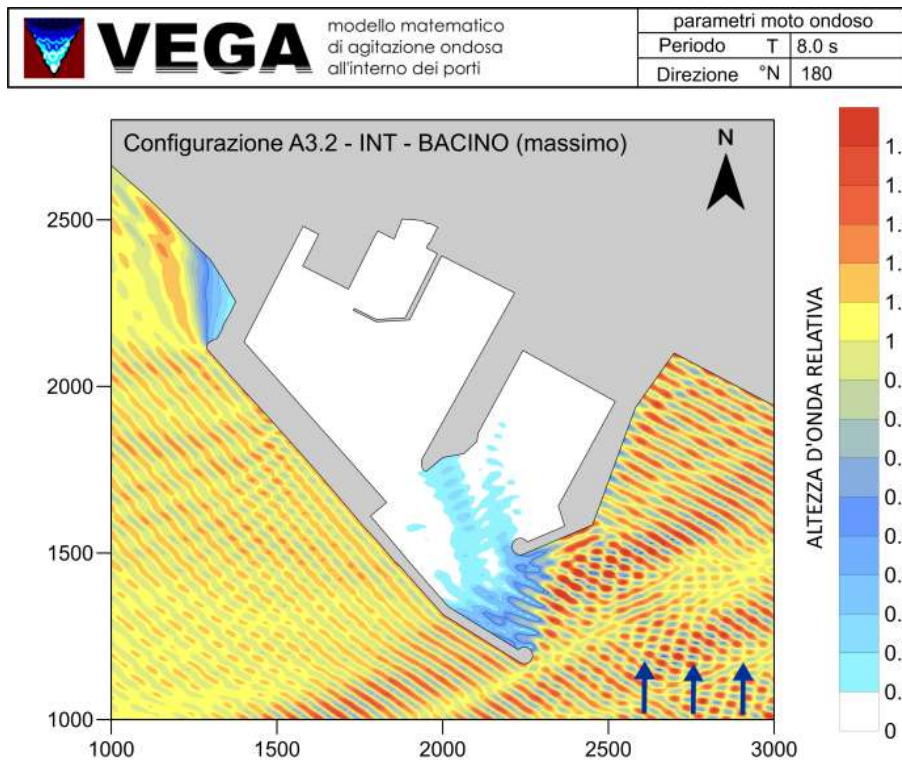
4.7.11 Configurazione A3.2 – INT

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione A3.2 - INT rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4.

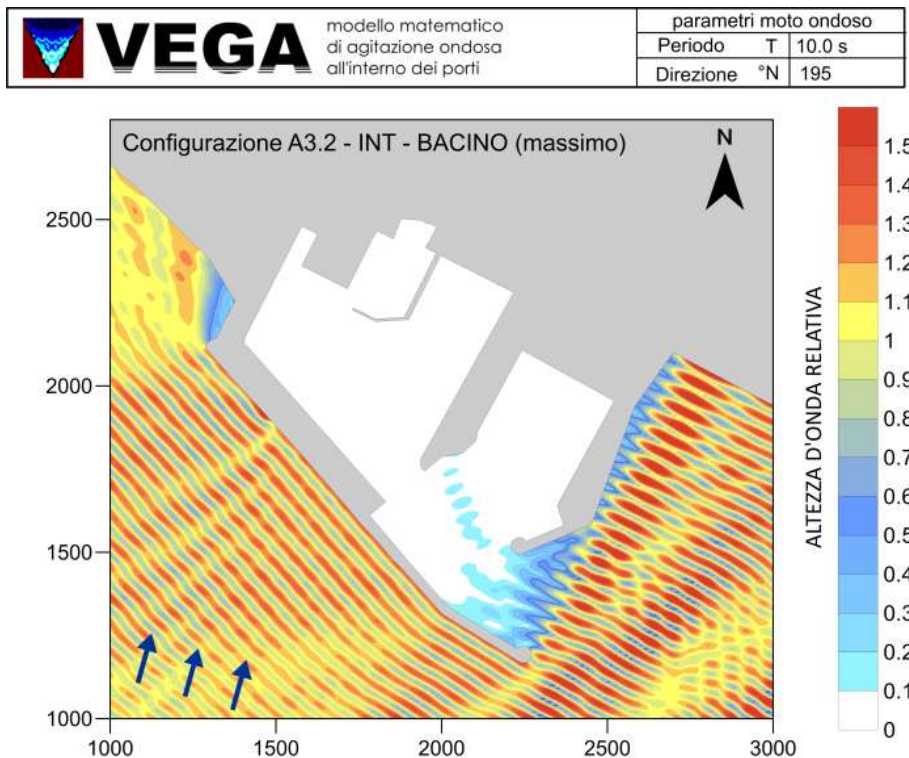
Condizione 1



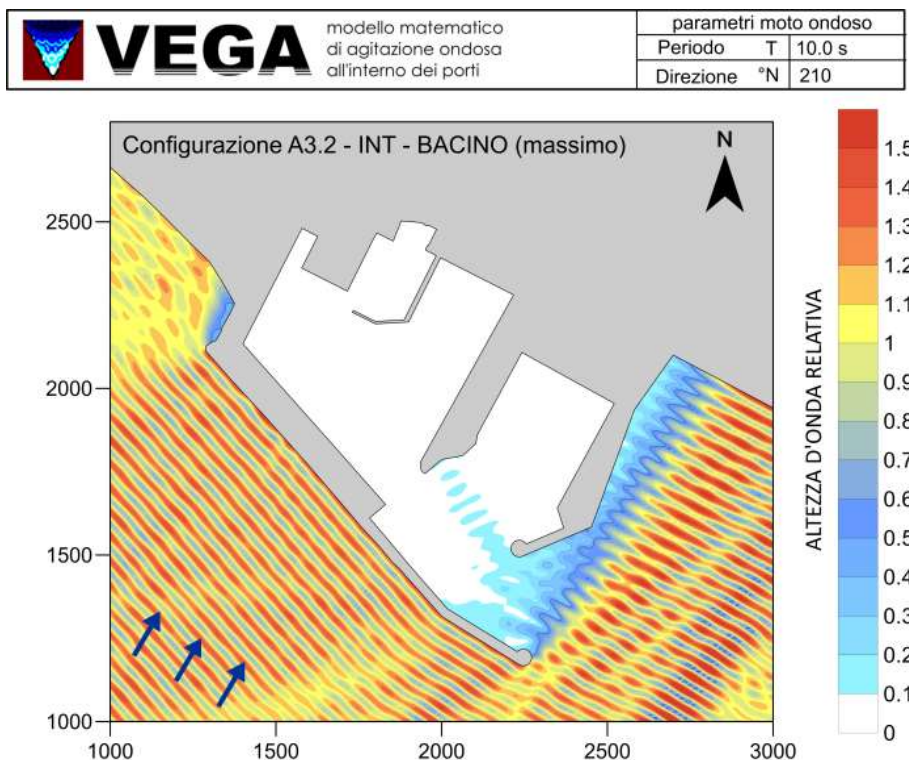
Condizione 2




Condizione 3

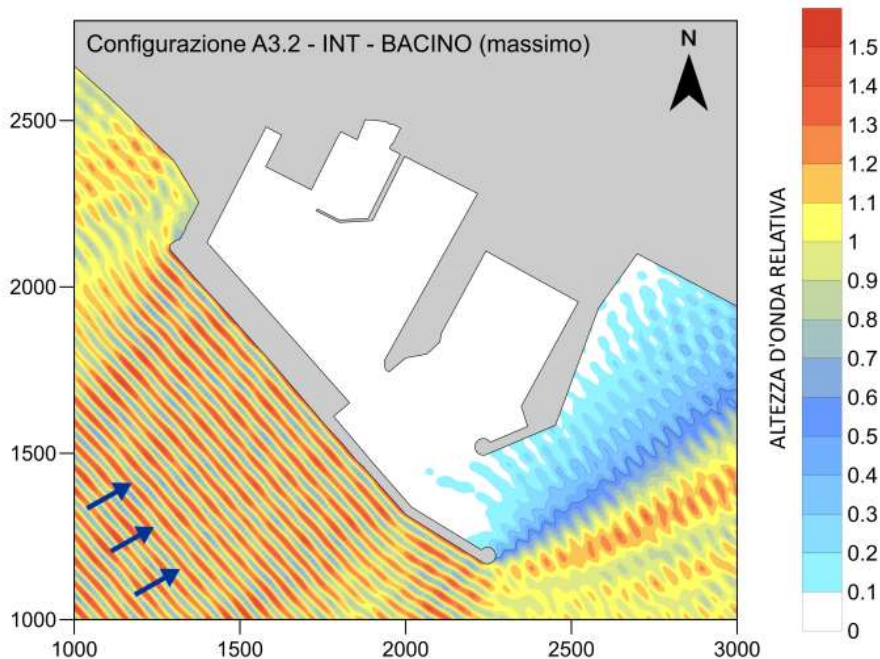


Condizione 4



Condizione 5

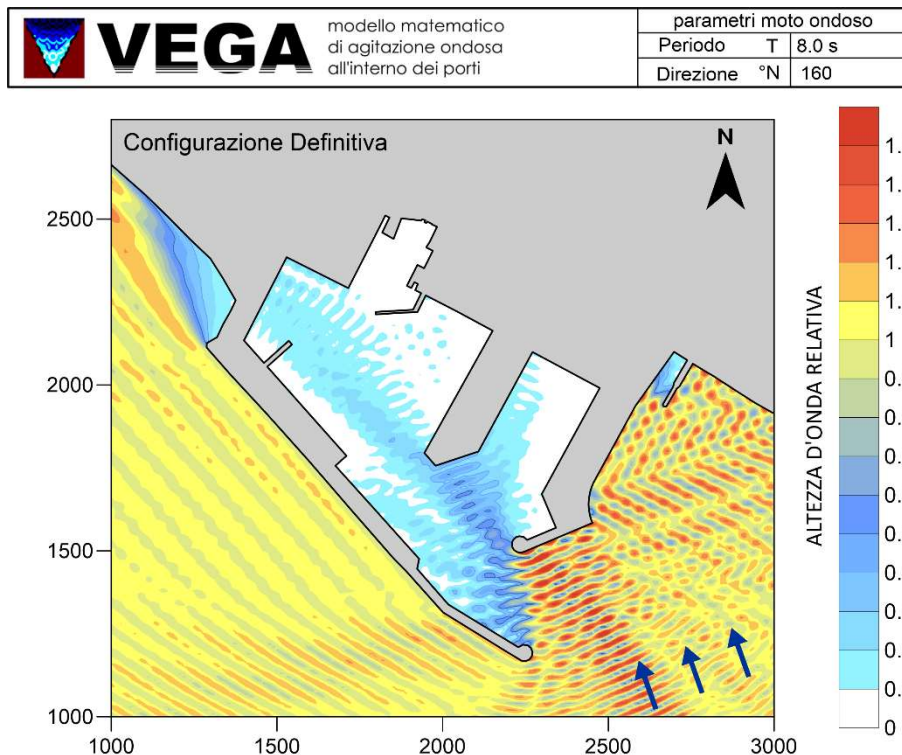
 VEGA modello matematico di agitazione ondosa all'interno dei porti	parametri moto ondoso	
	Periodo T	10.0 s
	Direzione °N	240



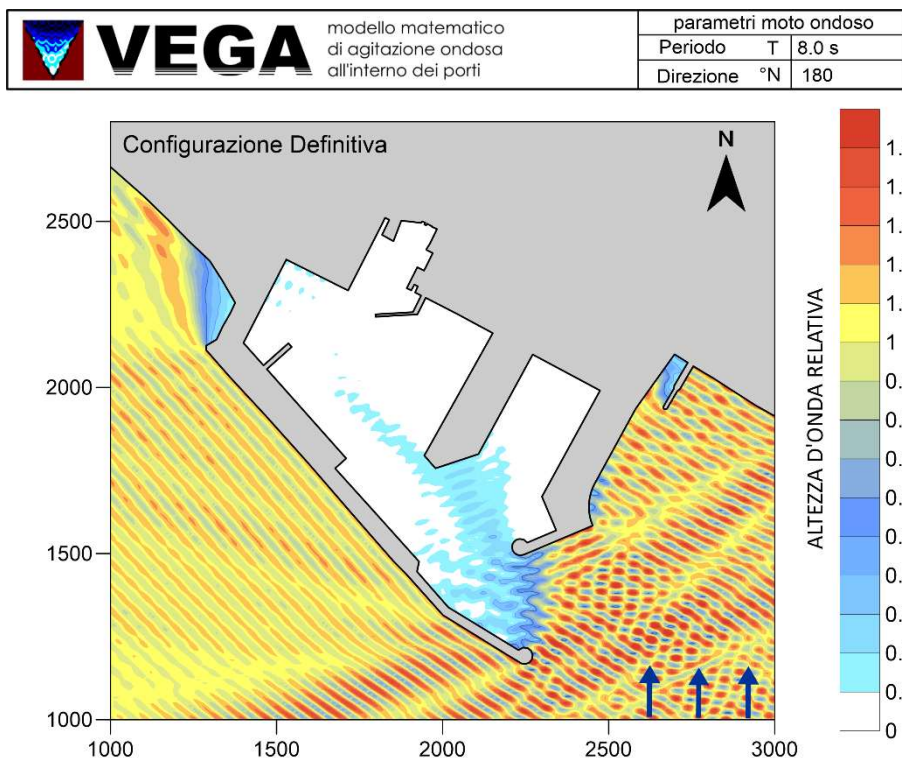
4.7.12 Configurazione Definitiva (C = 0.6 per la parte interna del nuovo molo sottoflutto)

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla configurazione definitiva rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4. Per queste prime simulazioni si è assunto un coefficiente di riflessione pari a 0.60 per la parte interna del nuovo molo di sottoflutto.

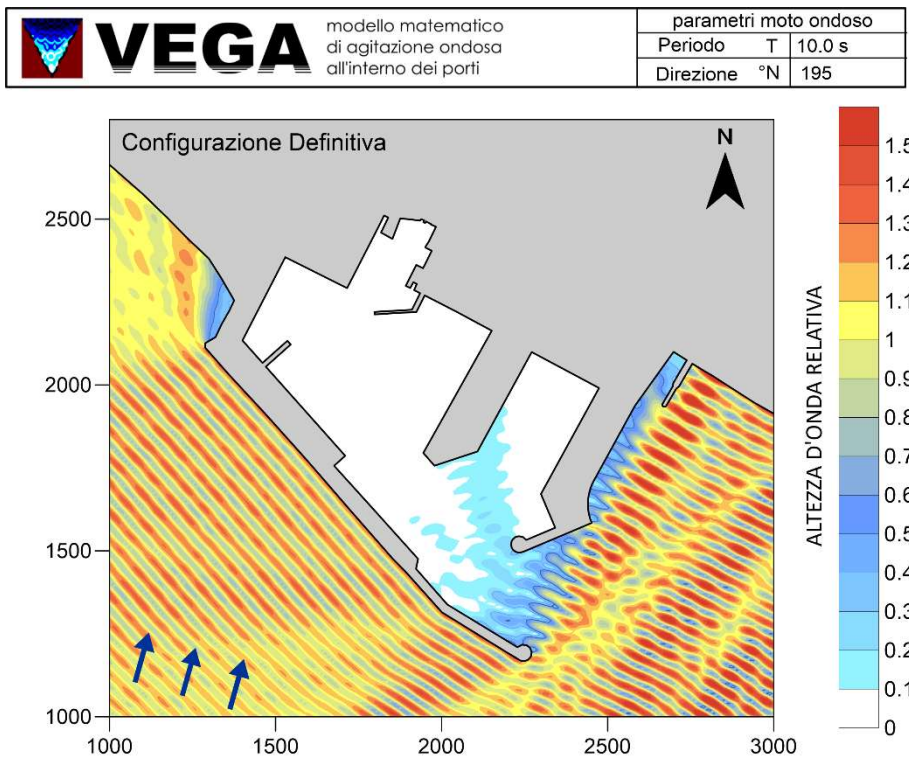
Condizione 1



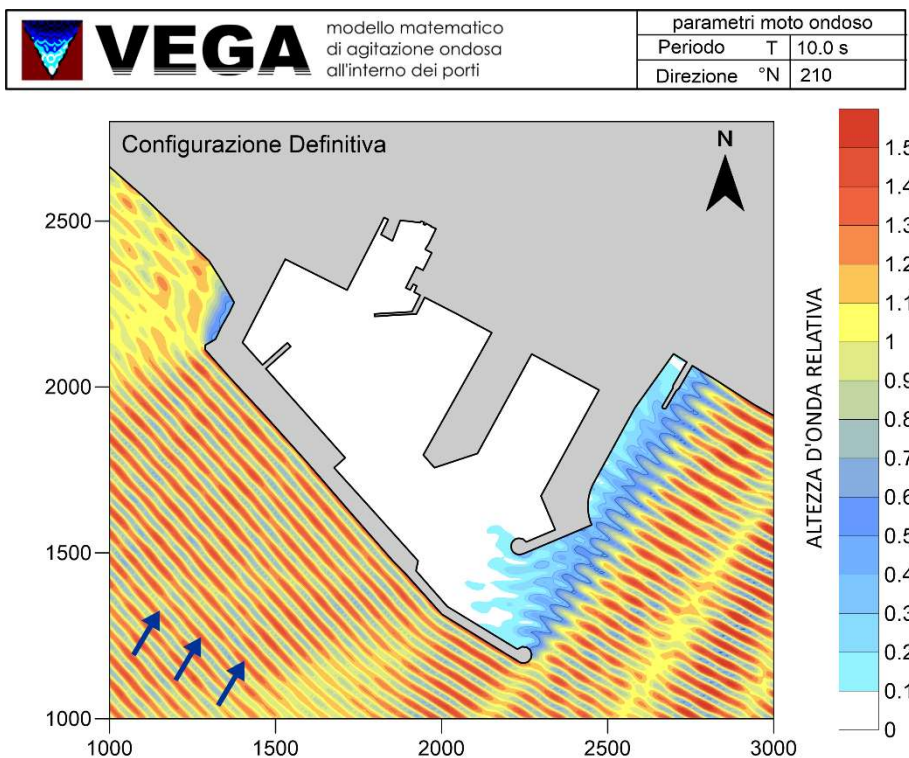
Condizione 2



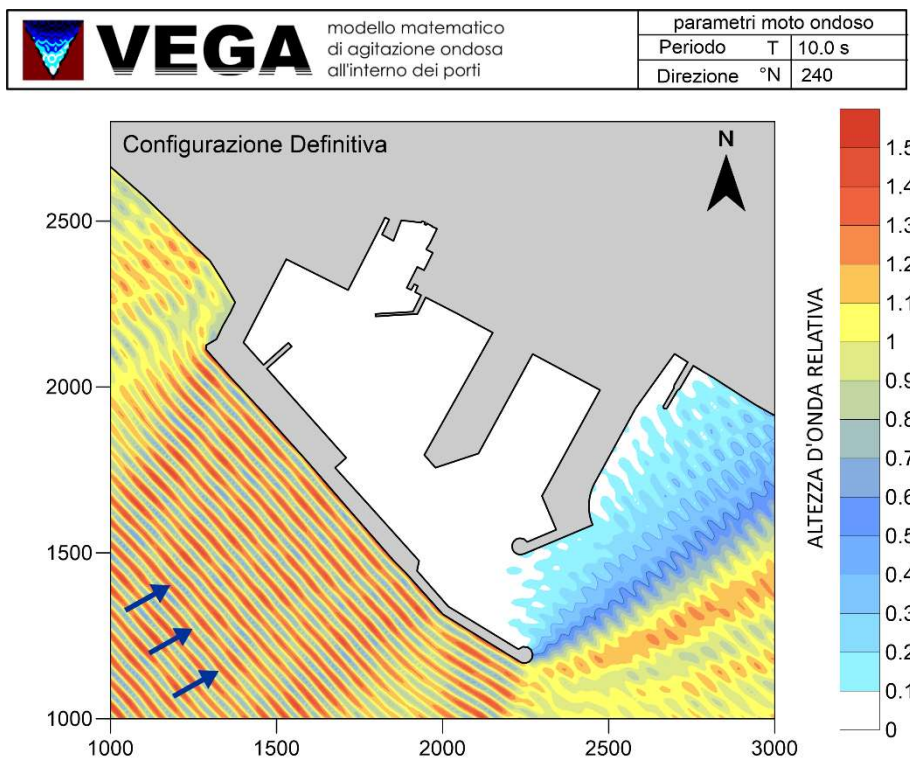
Condizione 3



Condizione 4



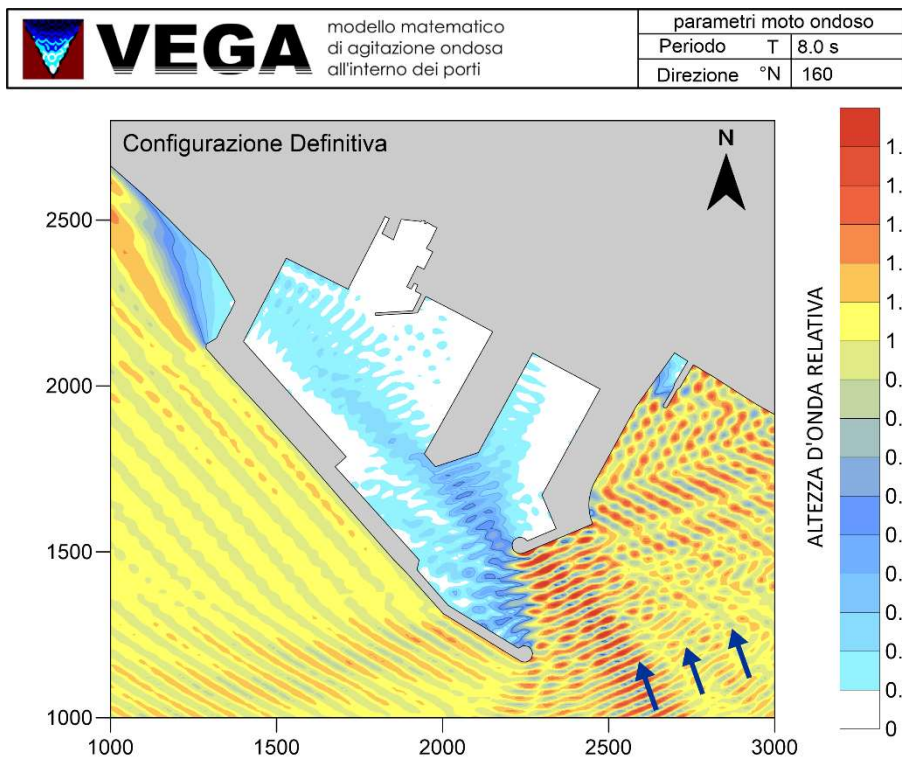
Condizione 5



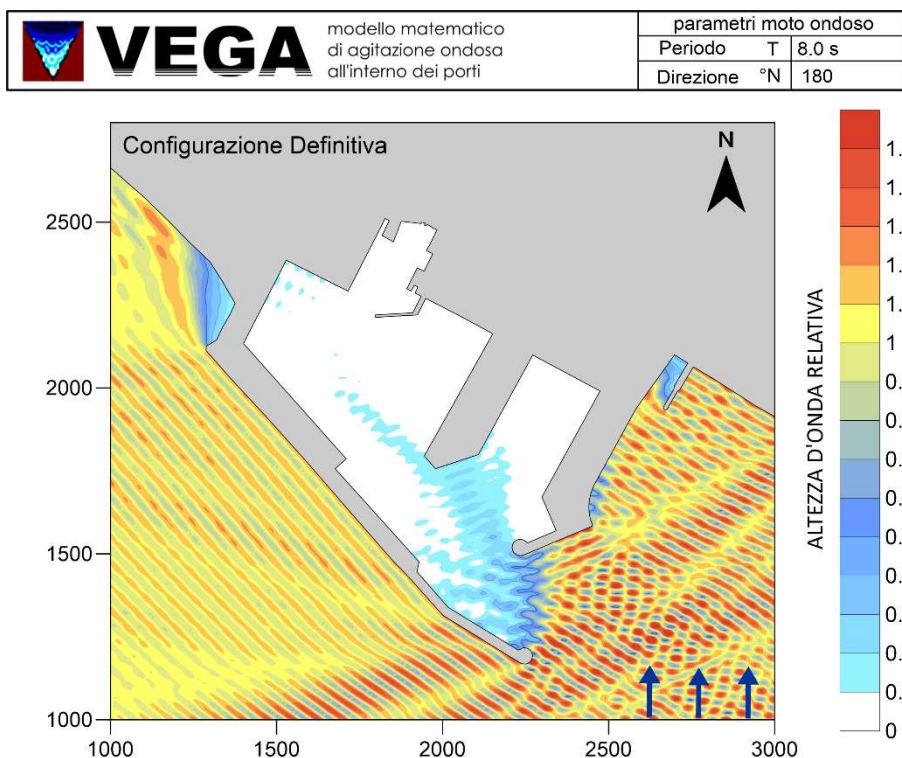
4.7.13 Configurazione Definitiva (C = 0.9 per la parte interna del nuovo molo sottoflutto)

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni relative alla Configurazione Definitiva rispetto alle condizioni al contorno di Tabella 4-4. Per queste prime simulazioni si è assunto un coefficiente di riflessione pari a 0.90 per la parte interna del nuovo molo di sottoflutto.

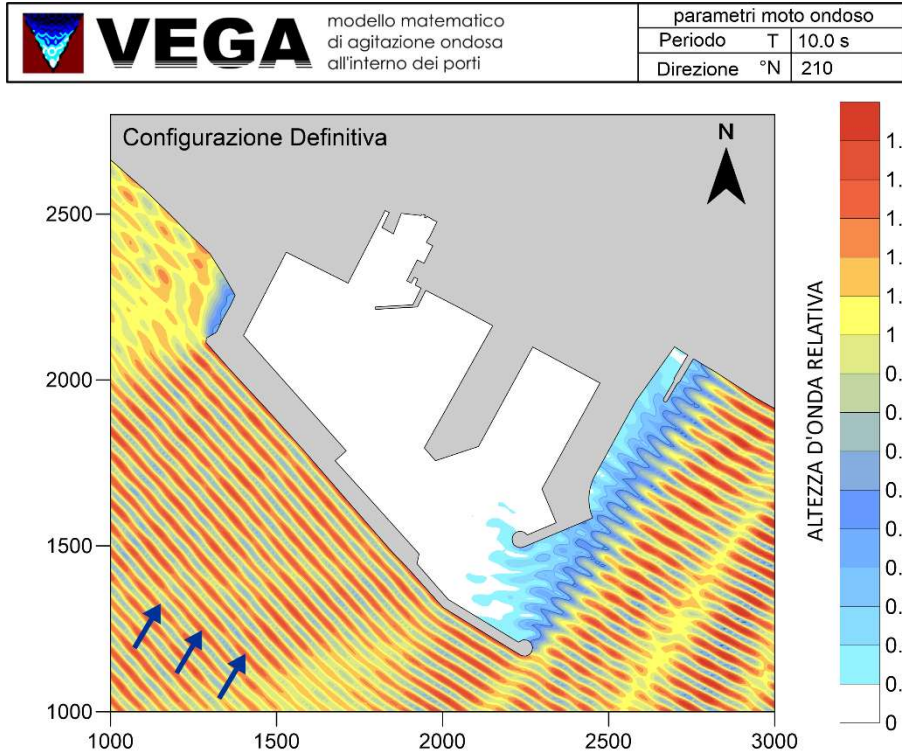
Condizione 1



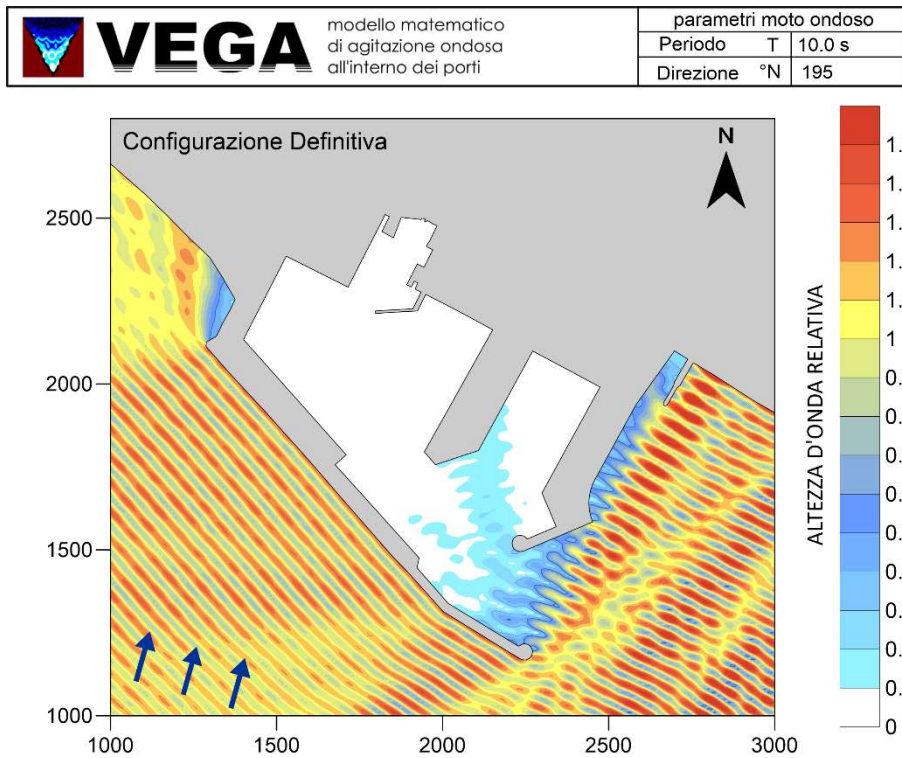
Condizione 2



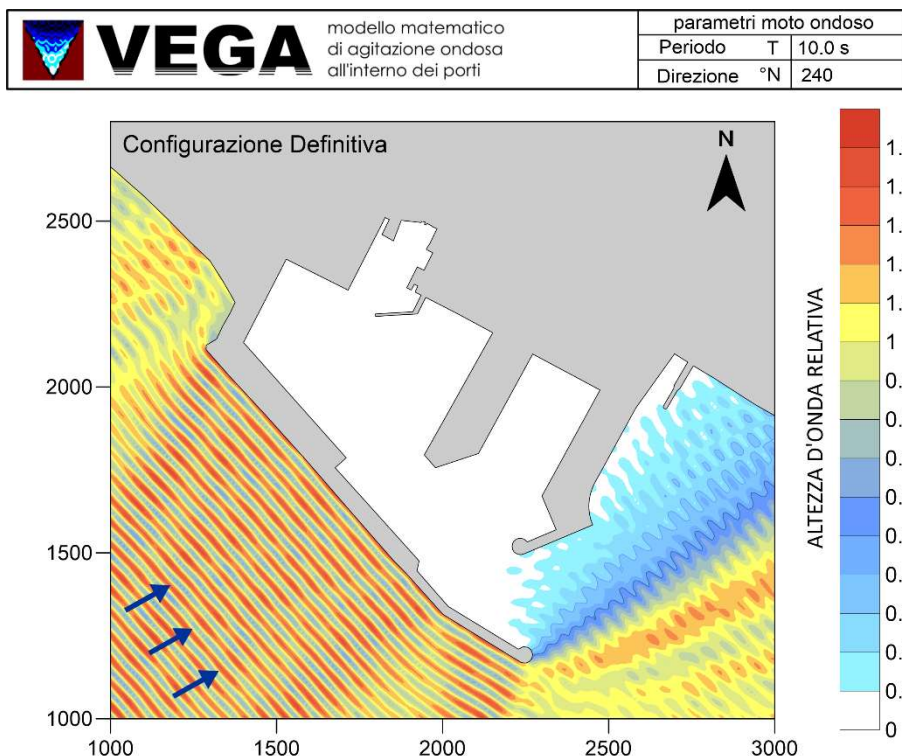
Condizione 3



Condizione 4



Condizione 5



Si può concludere che la variazione del coefficiente di riflessione lungo la parete interna del nuovo molo sottoflutto non influenza la soluzione del campo d'onda all'interno del bacino.

4.7.14 Analisi comparativa dei risultati

Per una comparazione oggettiva dei risultati ottenuti tra le distinte configurazioni considerate, sulla base dei risultati numerici delle simulazioni condotte, si è calcolato un primo parametro di riferimento, denominandolo "grado di agitazione del singolo stato di mare" (GdA_s), ottenuto moltiplicando la frequenza di accadimento (FdA_s , in termini percentuali), associata a ciascun stato di mare (s), sul totale degli stati di mare (m) simulati, per un valore caratteristico di altezza d'onda (HS_{media} , in metri), ottenuto come media ponderale dei valori di altezza d'onda (HS_i) calcolati per ciascun nodo i -esimo sul totale di n nodi che compongono il dominio di calcolo dello "specchio portuale" delimitato dalle opere foranee. Nel dettaglio:

- il valore di HS_{media} associato al generico stato di mare simulato è stato calcolato con la seguente equazione (media ponderata):

$$HS_{media} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * HS_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

dove A_i rappresenta l'area della i -esima cella, sulle n -celle che compongono lo "specchio portuale" per la quale si è calcolato il valore di HS_i .

- successivamente, per ciascuna configurazione (C) simulata, compresa quella attuale (A), si sono sommati i risultati ottenuti, in termini di " $GdA_s = FdA_s * HS_{media}$ ", per ognuna delle m condizioni di moto ondoso simulate, ottenendo il parametro GdA_p rappresentativo del "grado di agitazione ondosa media nel bacino portuale" per la generica configurazione portuale (C):

$$GdA_p = \sum_{s=1}^m GdA_s = \sum_{s=1}^m FdA_s * HS_{media}$$

I risultati di tutte le simulazioni condotte, sintetizzati tramite questo parametro GdA_p , sono riportati in forma di istogramma nella seguente Figura 4-26 dalla quale appare evidente che le tipologie di layout a “moli convergenti” (B1 e B2) sono quelle che presentano il maggiore grado di agitazione ondosa residua anche decisamente superiori rispetto alla configurazione attuale.

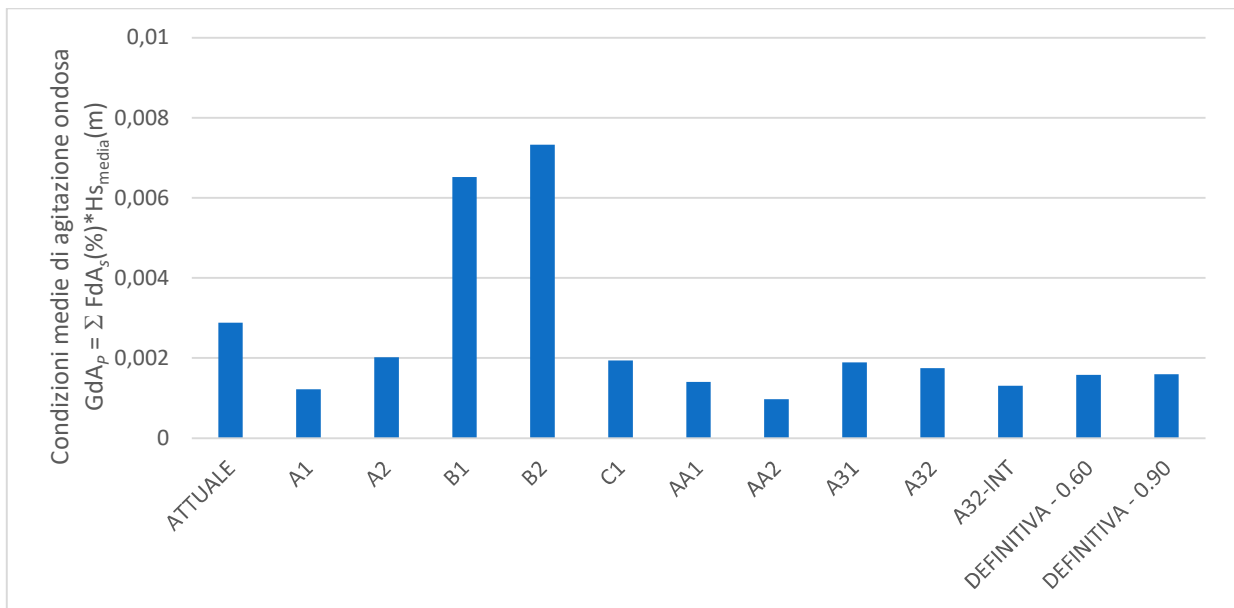


Figura 4-26 Frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa mediata su tutta l'area interna del bacino portuale per ogni configurazione proposta.

Sulla base di questi parametri, si è infine calcolato un termine adimensionale che esprime la variazione del grado di agitazione ondosa residua, associato a ciascuno layout alternativo simulato, rispetto alla configurazione portuale attuale: $VGA_p = 1 - GdA_C / GdA_A$ dove il pedice A è riferito all'Attuale configurazione portuale e C i diversi layout considerati.

La rappresentazione grafica di questo parametro, riportata nella seguente Figura 4-27, evidenzia che le configurazioni selezionate come “definitive”, per l'ottimizzazione della configurazione di PRP, introducono un sostanziale miglioramento in termini di agitazione ondosa portuale rispetto alla configurazione attuale del porto di Marina di Carrara.

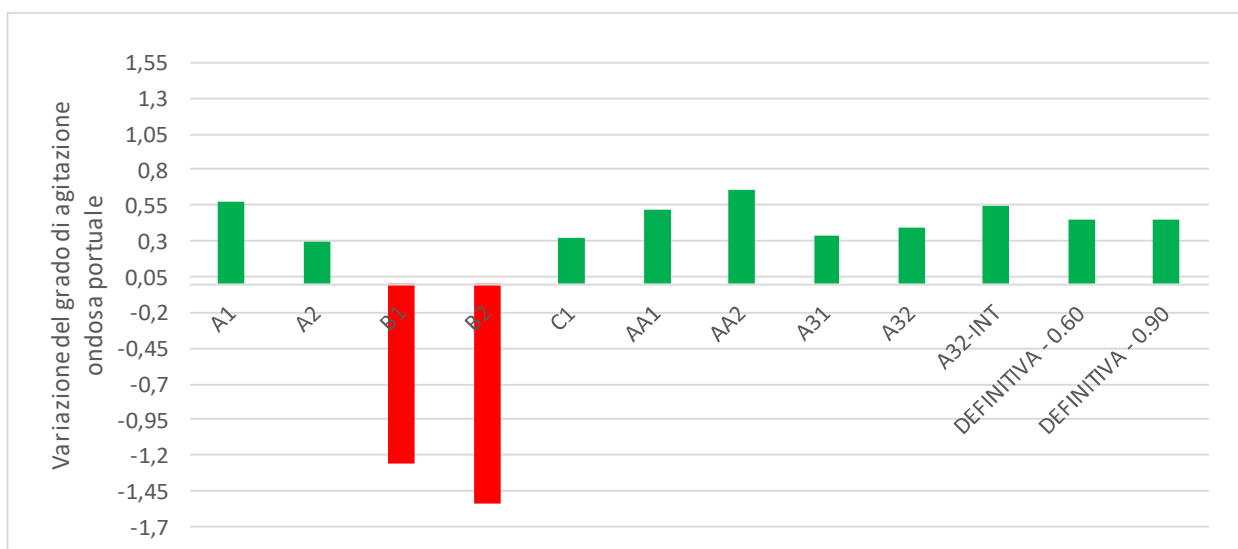


Figura 4-27 Confronto della frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa mediata su tutta l'area interna del bacino portuale per ogni configurazione proposta rispetto alla configurazione ATTUALE.

4.7.15 Configurazione di PRP

Nella configurazione riportata di seguito (Figura 4-28), si è considerato un ulteriore molo radicato sulla banchina Talierno, caratterizzato da un coefficiente di riflessione pari a 0.6. Si è inoltre considerata una rettificazione del molo delimitante l'area della nautica da diporto.

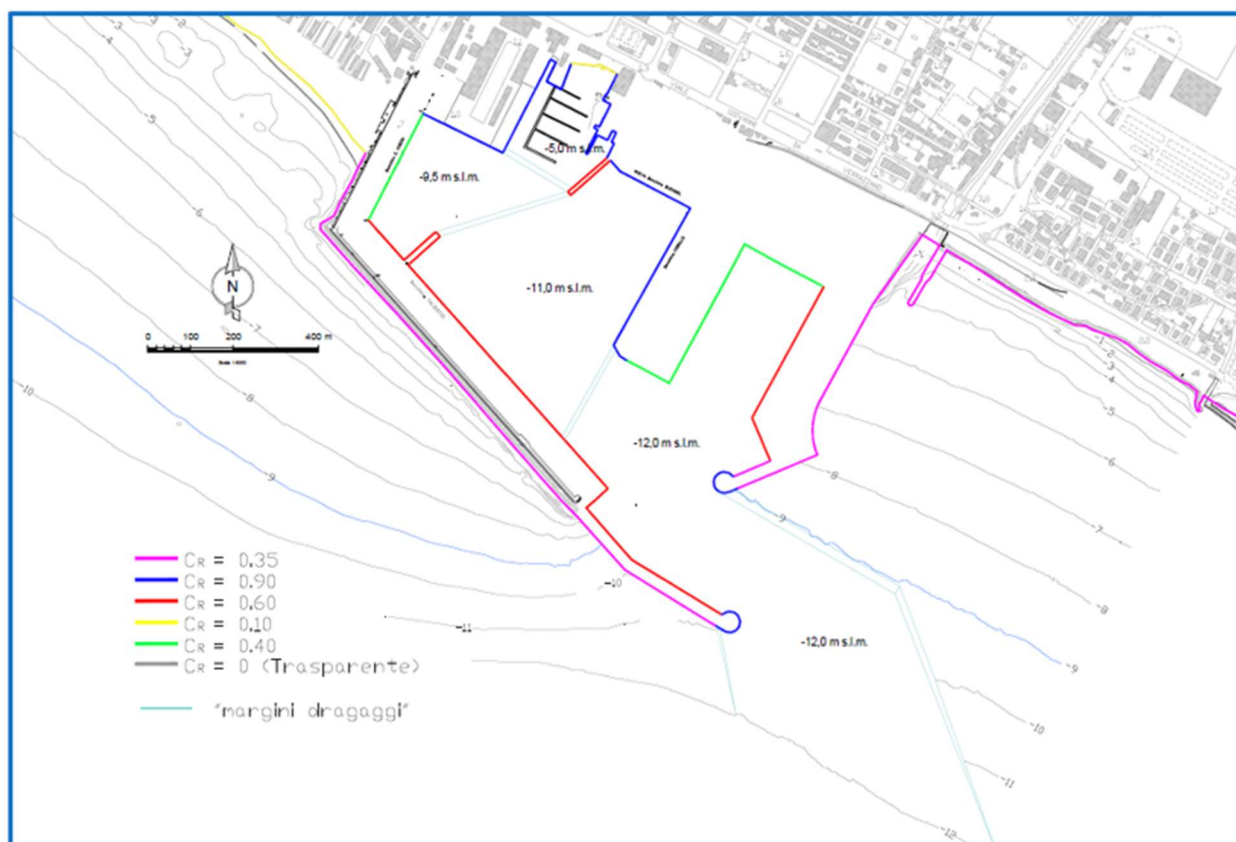



Figura 4-28 – Configurazione di PRP per il porto di Marina di Carrara con indicate le profondità di dragaggio sia dei bacini interni (da -9,5 a -12,0 m s.l.m.) che dell'avamposto e del canale di accesso (-12,0 m s.l.m.)

In una prima fase, si è applicato il modello numerico VEGA, con le condizioni al contorno riportate in Tabella 4-4. I risultati sono riportati da Figura 4-29 a Figura 4-33. La condizione che genera maggiore agitazione portuale è quella proveniente da 160°N, direzione in asse con il canale di accesso, che comunque “climaticamente” è associata ad una frequenza di accadimento annuale al largo inferiore al 4,5% (rif. elaborato S1 “Studio METEOMARINO – Volume 3”).

Come invece è possibile osservare da Figura 4-32, rappresentativa della condizione di maggior frequenza nell'area di interesse del Porto di Marina di Carrara (Libeccio), la configurazione di PRP offre un'ottima soluzione in termini di agitazione portuale.

 VEGA modello matematico di agitazione ondosa all'interno dei porti	parametri moto ondoso	
	Periodo T	8.0 s
	Direzione °N	160

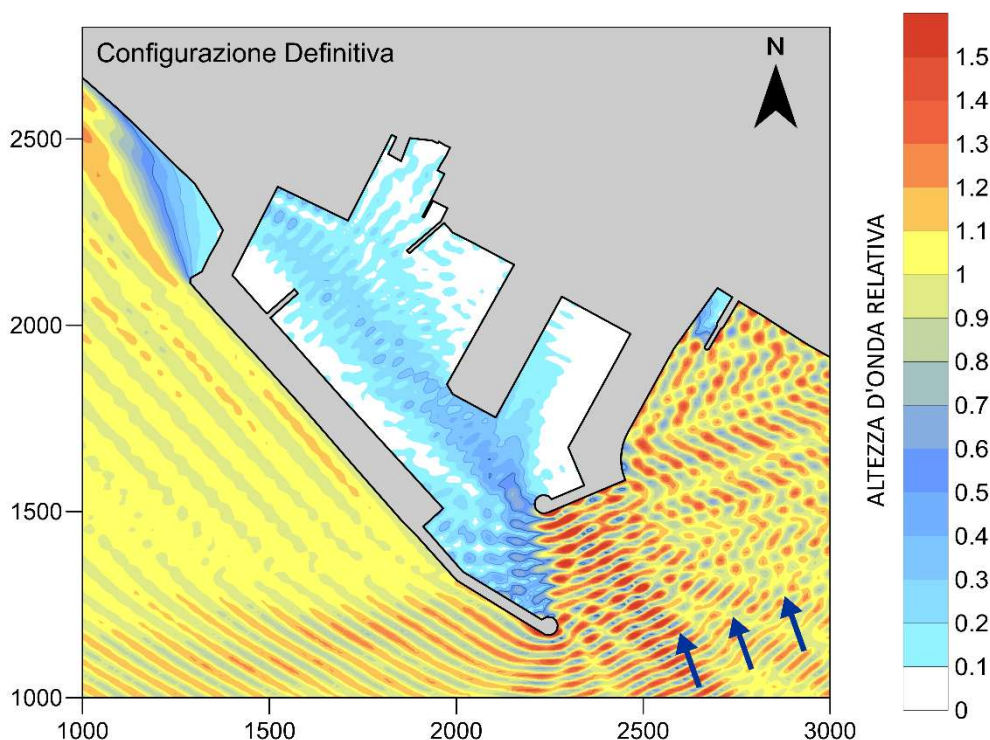



Figura 4-29 - Risultato dell'agitazione portuale per un'onda proveniente da 160°N caratterizzata da un'altezza d'onda incidente $H = 1.0\text{m}$ e da un periodo $T = 8.0\text{s}$.

 VEGA modello matematico di agitazione ondosa all'interno dei porti	parametri moto ondoso	
	Periodo T	8.0 s
	Direzione °N	180

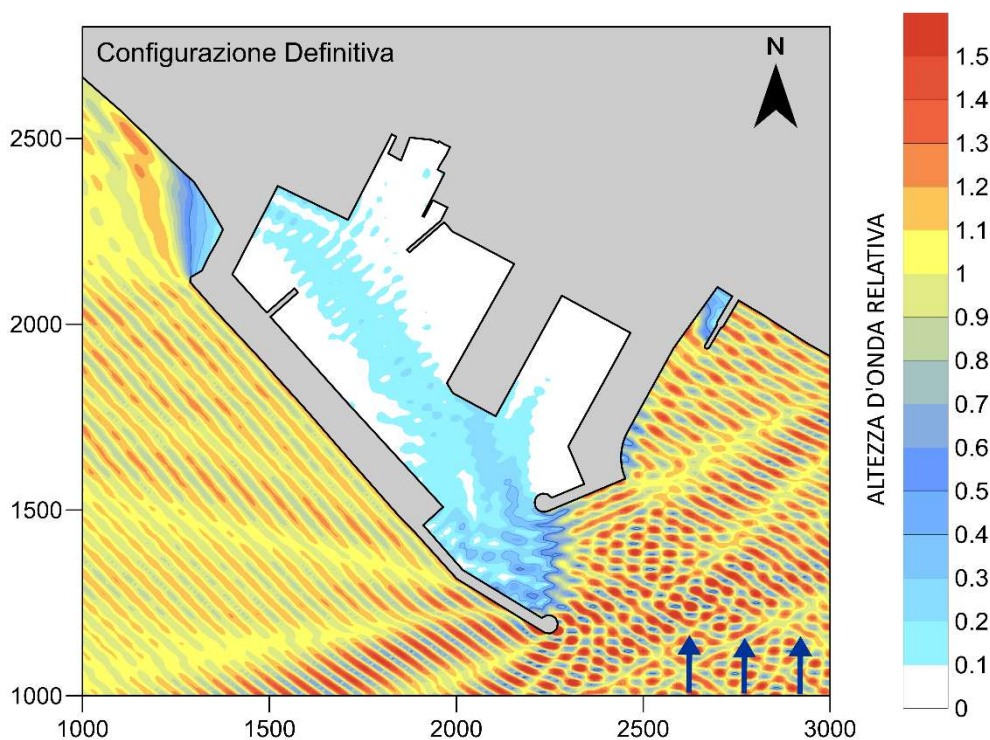


Figura 4-30 - Risultato dell'agitazione portuale per un'onda proveniente da 180°N caratterizzata da un'altezza d'onda incidente $H = 1.0\text{m}$ e da un periodo $T = 8.0\text{s}$.

 VEGA modello matematico di agitazione ondosa all'interno dei porti	parametri moto ondoso	
	Periodo T	10.0 s
	Direzione °N	195

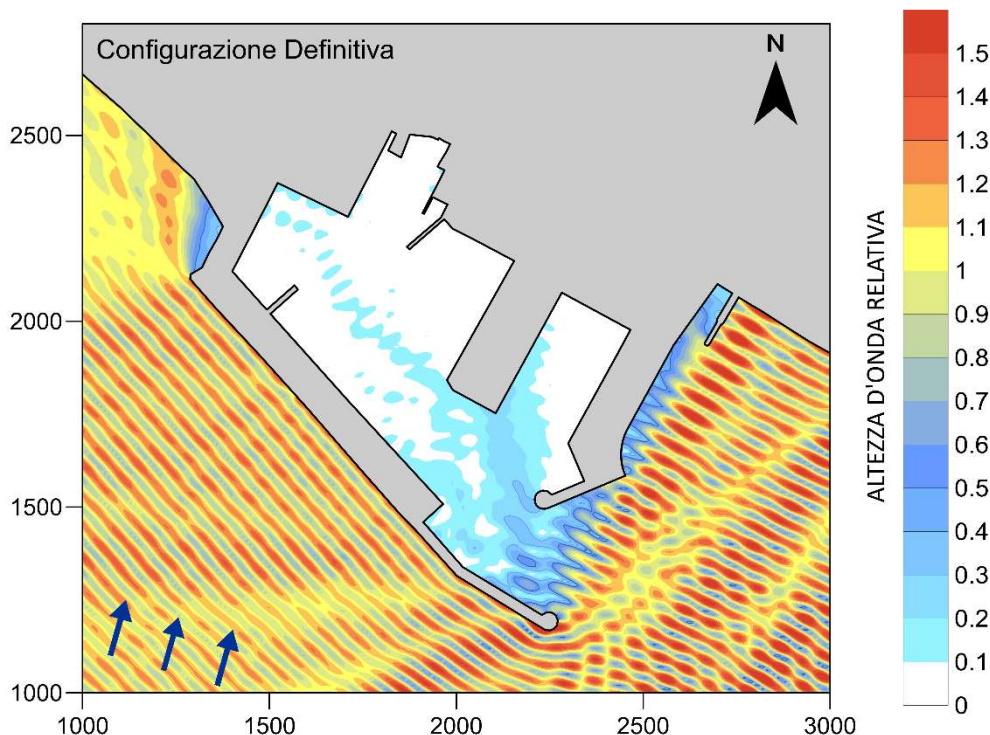



Figura 4-31 - Risultato dell'agitazione portuale per un'onda proveniente da 195°N caratterizzata da un'altezza d'onda incidente $H = 1.0\text{m}$ e da un periodo $T = 10.0\text{s}$.

 VEGA modello matematico di agitazione ondosa all'interno dei porti	parametri moto ondoso	
	Periodo T	10.0 s
	Direzione °N	210

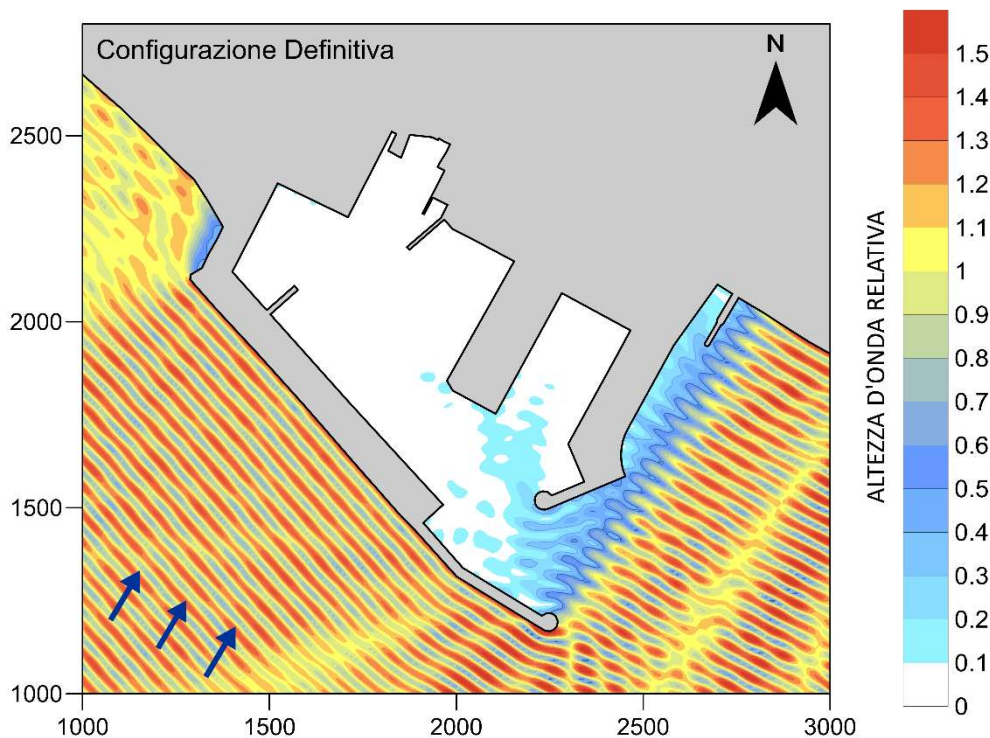



Figura 4-32 - Risultato dell'agitazione portuale per un'onda proveniente da 210°N caratterizzata da un'altezza d'onda incidente $H = 1.0\text{m}$ e da un periodo $T = 10.0\text{s}$.

 VEGA modello matematico di agitazione ondosa all'interno dei porti	parametri moto ondoso	
	Periodo T	10.0 s
	Direzione °N	240

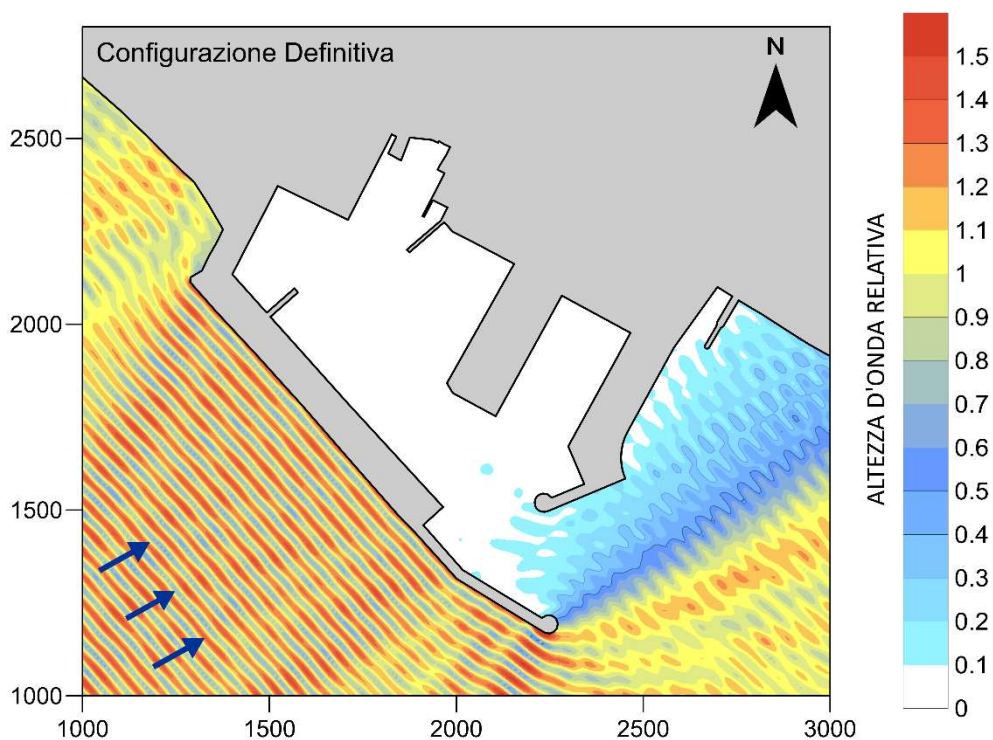


Figura 4-33 - Risultato dell'agitazione portuale per un'onda proveniente da 240°N caratterizzata da un'altezza d'onda incidente $H = 1.0\text{m}$ e da un periodo $T = 10.0\text{s}$.

Capitolo 5 Applicazione del modello GEMMA

Si riporta di seguito la descrizione sintetica del codice GEMMA Sviluppato dall'Università di Roma La Sapienza rimandando ai seguenti articoli scientifici per una più dettagliata trattazione tecnica:

- Berkhoff, J.C.W., (1972), "Computation of combined refraction-diffraction", Proc., 13th Int. Conf. On Coast. Eng., ASCE, New York, 471-490.
- De Girolamo, P., Kostense, J.K., Dingemans, M.W. (1988), "Inclusion of wave breaking in a mild slope model", Proc. Int. Con. Computer model in Ocean Eng., Schrefler&Zienkiewicz, Balkema, Rotterdam, theNetherlands.
- Beltrami, G.M., Bellotti, G., De Girolamo, P. and Sammarco, P. (2001) "Treatment of Wave Breaking and Total Absorption in a Mild-slope Equation FEM model", Jour. Of Waterway, Port, Coastal and ocean Eng., ASCE, Sept.-Oct. 2001, pp. 263-271.
- Bellotti, G., Beltrami, G.M., and De Girolamo, P. (2003), "Internal generation of waves in 2D fully elliptic mild-slope equation FEM models", Coastal Engineering, 49 (2003) pp. 71-81.

Il codice agli elementi finiti utilizzato nel presente studio di agitazione portuale, si basa sull'equazione di mild-slope, grazie alla quale si possono simulare fondali variabili e la presenza contemporanea dei fenomeni di diffrazione, rifrazione, shoaling e di dissipazione di energia per frangimento e attrito sul fondo.

La seguente equazione di mild-slope (5.1) nel modello di calcolo GEMMA viene risolta tramite l'utilizzo dello schema numerico agli elementi finiti.

$$\nabla \cdot (cc_g \nabla \eta) + \omega^2 \frac{c_g}{c} \eta = 0 \quad 5.1$$

dove:

- 1) c, c_g rappresentano rispettivamente celerità di fase e celerità di gruppo
- 2) φ rappresenta il potenziale complesso della velocità
- 3) ω rappresenta la frequenza angolare

Tale equazione è di tipo ellittico indipendente dal tempo. Per risolvere tale equazione bisogna porre delle condizioni al contorno su tutta la frontiera del dominio. La loro soluzione fornisce direttamente la soluzione stazionaria del campo d'onda.

5.1 Condizioni al contorno

Come esposto in precedenza, il codice di calcolo GEMMA si basa sul metodo agli elementi finiti. Il codice lavora su un reticolo non strutturato, questo è costituito da elementi di forma triangolare. Al dominio d'integrazione si applicano condizioni al contorno di tipo riflessione-assorbimento, le quali sono utilizzate per la simulazione di coste o opere marittime, caratterizzate da diversi coefficienti di riflessione R^7 . Al confine tra regione di mare interna al

⁷ R è un coefficiente che è assunto variabile nell'intervallo chiuso $[0, 1]$, si assegnerà valore zero qualora il contorno sia di totale assorbimento altrimenti, assegnando il valore 1, si considererà un contorno di totale riflessione.

dominio e regione che si estende verso l'infinito, deve essere garantita la continuità della soluzione, ovvero deve essere garantita l'uguaglianza tra elevazione della superficie libera internamente ed esternamente al dominio, stesso dicasi per le componenti della velocità dirette normalmente al confine. A tal fine è dato il potenziale d'onda come un'espressione matematica nota a priori.

Nel codice utilizzato, si assume che i contorni del dominio siano caratterizzati dall'essere di riflessione-assorbimento, per cui, il confine tra regione di mare interna e regione esterna sarà caratterizzato da un coefficiente di riflessione pari a 0. Si considera inoltre un termine sorgente per la generazione del moto ondoso, il quale genera un'onda di dato periodo ed altezza. Inoltre, per la generazione, questa sarà considerata internamente al dominio. Ovvero le condizioni di generazione sono imposte lungo una linea interna alla regione di mare in esame, in prossimità di un contorno. La prima formulazione di generazione interna del moto ondoso fu proposta da Larsen e Dancy.

Le condizioni al contorno nel codice sono espresse tramite l'imposizione di coefficienti di riflessione R variabili all'interno dell'intervallo chiuso $[0, 1]$.

La condizione di riflessione-assorbimento è esprimibile tramite la seguente espressione:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} + \alpha \varphi = 0$$

Dove φ rappresenta il potenziale complesso della velocità, composto dalla componente incidente e riflessa.

Nota come condizione di Neumann per $\alpha = 0$ o di Dirichlet per $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$, è utilizzata quando non si può assumere a prescindere nulla la componente della velocità normale al contorno considerato (F), ovvero in presenza di contorni permeabili. Nel caso in cui α risulti nullo si è in presenza di una condizione di totale riflessione.

α rappresenta il coefficiente di riflessione complesso ed è dato da:

$$\alpha = \alpha_1 + i\alpha_2$$

α dipende dal comportamento fisico del contorno permeabile e a sua volta è funzione delle caratteristiche del moto lungo il contorno introducendo una non linearità nel problema.

Le relazioni per α_1 e α_2 saranno:

$$\alpha_1 = -\frac{2kR \cos(\delta) \sin(\varepsilon)}{1+R^2+2R \cos(\varepsilon)}, \quad \alpha_2 = -\frac{k(R^2-1) \cos(\delta)}{1+R^2+2R \cos(\varepsilon)}$$

e sotto l'ulteriore ipotesi che non si verifichi sfasamento tra onda incidente e onda riflessa si ottengono le seguenti relazioni per i termini del coefficiente di riflessione complesso:

$$\alpha_1 = 0, \quad \alpha_2 = -k \cos(\vartheta) \frac{1-R}{1+R}$$

ϑ rappresenta l'angolo tra la normale alla cresta dell'onda e la normale al contorno (Figura 5-1).

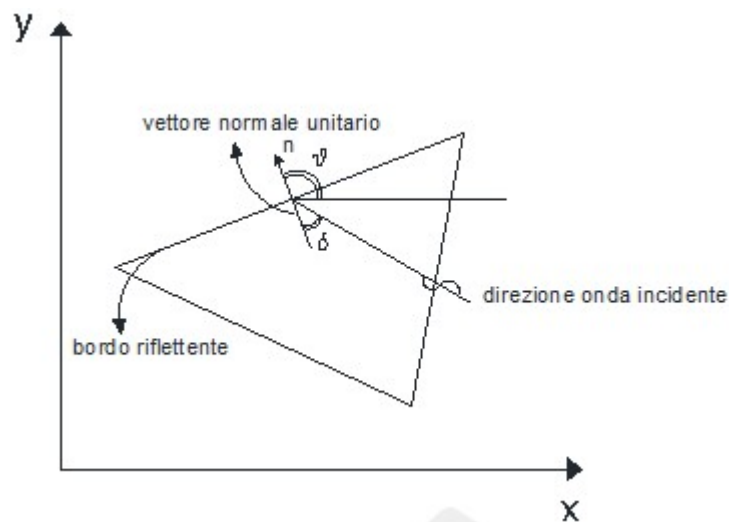


Figura 5-1 Rappresentazione dell'i-esimo elemento di maglia

La condizione di riflessione parziale è anch'essa una funzione di θ , la sua accuratezza dipende dalla precisione con cui è fornito il valore dell'angolo di incidenza. In una batimetria irregolare, θ non è noto a priori, per cui è una funzione incognita introducendo una non linearità nel problema.

5.2 Modello di frangimento d'onda

L'equazione di mild-slope sviluppata da Berkhoff è strettamente lineare e non dissipativa. Ciò ne impedisce l'uso in regioni caratterizzate da spiagge, in quanto, in prossimità di queste, restituirebbe un'altezza d'onda infinita che nella realtà è limitata dall'insorgere del frangimento delle onde. Nel modello GEMMA si considera quindi un termine aggiuntivo utile per caratterizzare il frangimento delle onde lungo tutto il dominio di calcolo.

Il modello sviluppato da Battjes e Janssen, adattato per l'equazione di mild-slope in forma ellittica, assume che l'altezza d'onda è una variabile random con una distribuzione di Rayleigh (per caratterizzare da un punto di vista statistico le altezze d'onda). Assumendo una distribuzione di Rayleigh si determinano diverse relazioni per le altezze d'onda, tra le quali vi è lo scarto quadratico medio. Si considera che l'altezza d'onda caratteristica del campo sia esprimibile attraverso il valore quadratico medio H_{rms} . Per esprimere H_{rms} come funzione dell'altezza d'onda locale H (assunta essere pari all'altezza d'onda significativa H_s ⁸), la relazione utilizzata è:

$$H_{rms} = \frac{H}{\sqrt{2}}$$

Il fattore di dissipazione dell'onda frangente risulta dunque funzione di:

$$f_{br} = \frac{\alpha}{\pi c_g} \omega Q_b \frac{1}{b^2}$$

dove α è una costante di calibrazione, mentre per Q_b si assume la seguente relazione:

$$Q_b = \exp[-(1 - Q_b)/b^2]$$

⁸ Il parametro statistico principale che viene dedotto da una registrazione con il metodo dello zero-crossing è H_s o $H_{1/3}$, ovvero vengono considerate in ordine decrescente le altezze d'onda note dalle registrazioni, si considera dunque il terzo superiore e se ne valuta il valore medio.

la quale rappresenta la probabilità che in uno specifico punto del campo, l'altezza dell'onda raggiunga il suo valore massimo H_m .

b rappresenta il rapporto tra H_{rms} e l'altezza d'onda massima H_m . In accordo con il criterio di Miche, l'altezza d'onda massima si può esprimere come:

$$H_m = \frac{2\pi\gamma_d}{k} \tanh\left(\frac{\gamma_s}{2\pi\gamma_d} kh\right)$$

dove γ_d e γ_s rappresentano rispettivamente i coefficienti d'onda frangente in acqua alta e in acqua bassa.

Il fattore di dissipazione è una funzione crescente con l'altezza d'onda e dunque introduce una non linearità nell'equazione di campo. Per far fronte a tale non linearità bisogna adottare delle procedure iterative. Inoltre, tale fattore, per come è stato definito, tende a zero al tendere a zero della funzione di probabilità Q_b .

5.3 Definizione del dominio di calcolo

L'applicazione del modello GEMMA richiede la discretizzazione del dominio di calcolo, rappresentativo della configurazione portuale da simulare, utilizzando una maglia costituita da elementi finiti di forma triangolare (mesh). Nel caso in esame gli elementi e i nodi generati sono rispettivamente 90,000 e 46,000 (Figura 5-2).

Per la definizione della batimetria all'interno del dominio di calcolo si è fatto riferimento ai dati batimetrici desunti dalle carte nautiche integrati, in prossimità delle opere foranee del porto con i dati batimetrici acquisiti durante la recente campagna di rilievi condotta per conto dell'AdSP, ed alle quote di dragaggio previste dalla proposta di PRP in esame (Figura 4-28 e Figura 5-3).

La dimensione degli elementi triangolari è stata scelta al fine di garantire che per tutti i periodi simulati sia assicurato un minimo di 7 nodi per lunghezza d'onda.

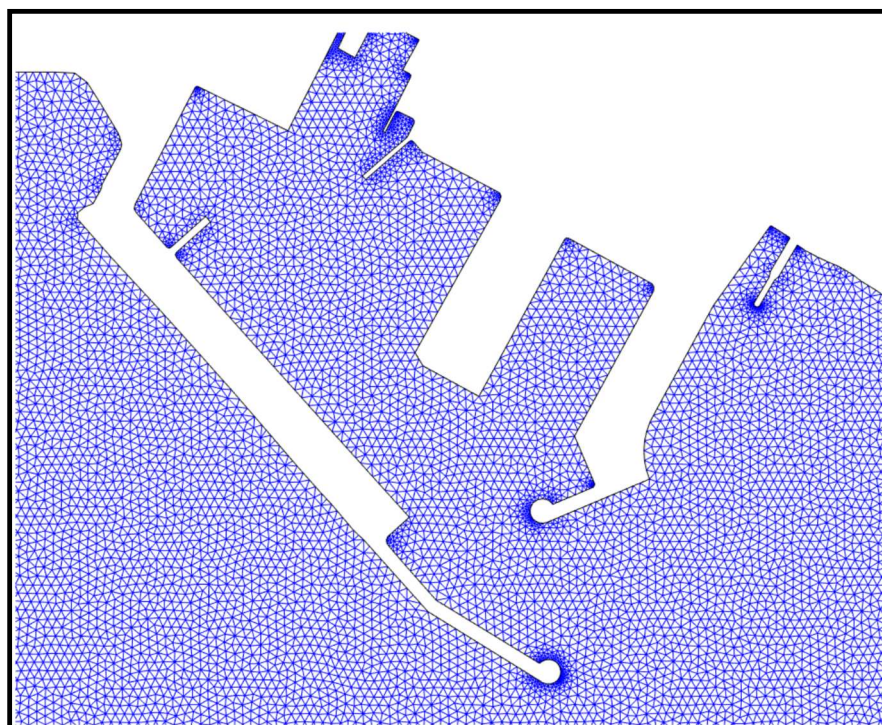


Figura 5-2 – Particolare della discretizzazione del dominio di calcolo

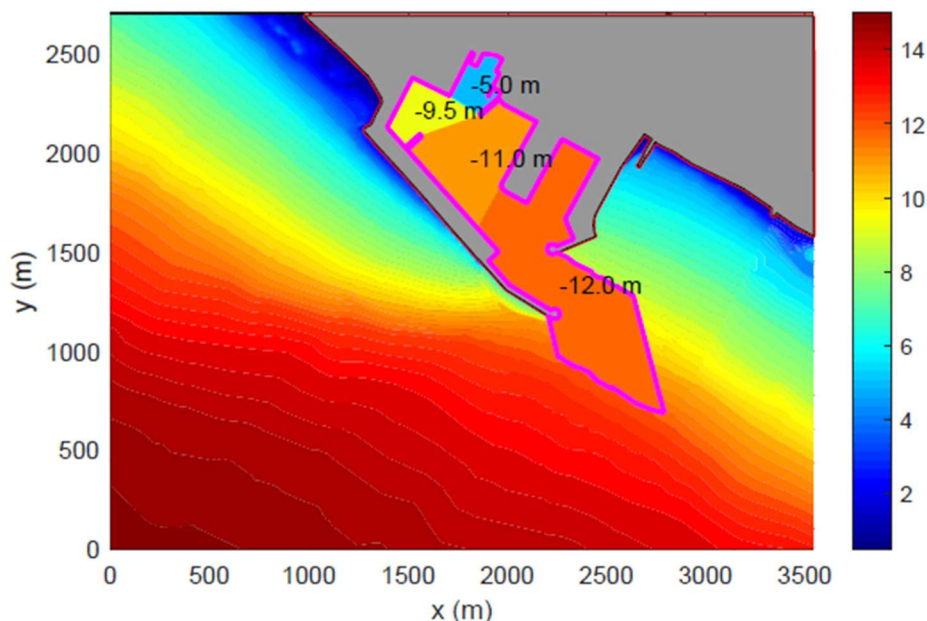


Figura 5-3 – Batimetria all'interno del dominio di calcolo ottenuta sulla base dei dati batimetrici desunti dalla carta nautica integrati con i dati single-beam e multi-beam relativi alla recente campagna di rilievi condotta per conto dell'AdSP. Sono inoltre riportate le quote di dragaggio previste dalla proposta di PRP in esame

5.4 Metodologia seguita per la selezione ed applicazione del modello GEMMA

Le simulazioni effettuate con il modello GEMMA, sia sulla configurazione attuale che sulla configurazione di PRP (Figura 4-28) analizzata e selezionata in precedenza con il modello VEGA, hanno riguardato come “condizioni al contorno” del moto ondoso oltre a quelle già esposte in Tabella 4-4, assunte come rappresentative per l'analisi dell'agitazione ondosa residua in funzione della frequenza media climatica di accadimento degli stati di mare al largo del porto di Marina di Carrara, anche quelle specifiche per l'analisi dell'operatività portuale e della sicurezza portuale.

Nella fase di impostazione di queste modellazioni inerenti l'analisi di dettaglio dei fenomeni di agitazione residua si è applicato anche il modello CGWAVE che si differenzia dal modello GEMMA sostanzialmente per il diverso criterio di frangimento utilizzato. Come evidenziato nella seguente Figura 5-4, i risultati del modello GEMMA presentano “condizioni di frangimento” più corrette soprattutto per il contorno a ponente contraddistinto da spiagge con fondali gradualmente degradanti e quindi associati ad una maggiore dissipazione ed assorbimento del moto ondoso per la presenza dei frangenti nella zona di surf. Con il modello CGWAVE invece si ha un improprio incremento del moto ondoso proprio lungo il margine della spiaggia.

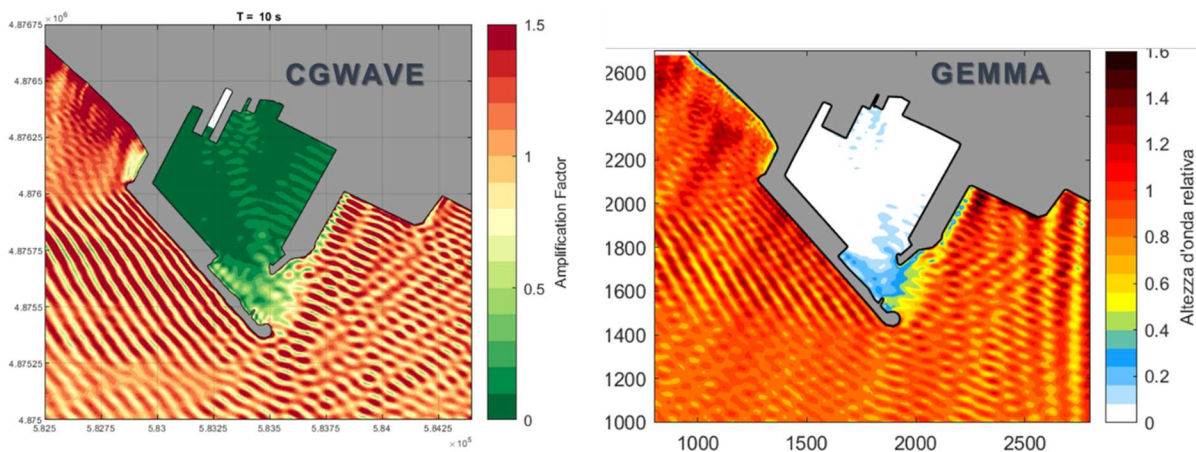


Figura 5-4. Confronto delle simulazioni condotte con i modelli CGWAVE e GEMMA

Per quello che concerne le condizioni di operatività portuale, si è fatto comunque riferimento alla tabella climatica annuale, riassunta rispetto alle direzioni di moto ondoso che si presentano con maggiore frequenza annuale. Inoltre, tali direzioni sono state raggruppate secondo tre direzioni di provenienza, 180°N – 210°N – 240°N rappresentative dei relativi settori di esposizione. Le classi di altezza d'onda sono state anch'esse raggruppate, come mostrato in Tabella 5-1.

Tabella 5-1 – Frequenze di accadimento percentuale delle condizioni di moto ondoso medio climatico desunte dallo studio specialistico dell'accordo quadro "S1 – STUDIO METEOMARINO"

Direzioni di provenienza	Classi di altezza d'onda H_s (m)			
	1.0 ÷ 2.0	2.0 ÷ 3.0	3.0 ÷ 4.0	> 4.0
180° N(settore 150 - 180)	2.559	0.280	0.022	0.002
210° N(settore 195 - 225)	9.465	2.135	0.254	0.040
240° N(settore 240 - 270)	6.390	1.931	0.684	0.200

Per le condizioni di sicurezza portuale, si sono considerate le due direzioni di provenienza principali, 180°N e 210°N, associate a valori dell'altezza d'onda significativa rappresentativi di uno stato di mare con tempo di ritorno $T_r = 10$ anni. Per la definizione del periodo d'onda da associare ai suddetti valori di altezza significativa si è fatto riferimento alle correlazioni H_s - T_p riportate nello studio meteomarino S1.

Nella seguente tabella sono sintetizzati i parametri di riferimento degli stati di mare simulati.

Tabella 5-2 – Condizioni estreme di moto ondoso associate ad un tempo di ritorno $T_r = 10$ anni desunte dallo studio specialistico dell'accordo quadro "S1 – STUDIO METEOMARINO"

Evento	Direzione – Dir (°N)	Altezza - H_s (m)	Periodo T_p (s)
1	180 (settore 160 – 180°N al largo)	4.3	10.5
2	210 (settore 210 – 240°N al largo)	6.3	12.0

Capitolo 6 **Analisi del “downtime” delle banchine**

L'analisi del “downtime” delle banchine, ovvero delle condizioni di limitazione dell'operatività portuale associata all'agitazione ondosa residua, è stata condotta sulla base del clima ondoso medio annuale ottenuto nell'ambito dello Studio Meteomarino “S1 – STUDIO METEOMARINO”.

A tal scopo si sono considerati solo gli stati di mare incidenti caratterizzati da $H_s > 0.5 \text{ m}$, ovvero quelli dotati di maggiore energia che risultano di interesse ai fini dell'agitazione interna portuale.

Nella Tabella 5-1 è riportato il clima medio annuale derivato dallo Studio Meteomarino. I valori riportati esprimono, in percentuale, le frequenze medie annuali di accadimento degli stati di mare ricadenti nelle classi di direzione di provenienza ed altezza d'onda significativa indicate nella stessa tabella. Per eseguire il calcolo del “downtime”, ciascuna classe della tabella è stata rappresentata da uno stato di mare avente: (i) direzione di provenienza della classe; (ii) altezza H_s pari all'altezza d'onda media della classe; (iii) frequenza media annuale di accadimento della classe. In totale quindi si sono presi in esame 12 stati di mare.

La verifica è stata effettuata prendendo in esame stati di mare caratterizzati da un'altezza minima di 1.0 m fino a considerare le massime altezze d'onda, che nel caso di Marina di Carrara, superano i 4.0 m. Le direzioni principali considerate, riassuntive del clima medio annuale, sono di 180 °N, 210 °N e di 240 °N.

Nei paragrafi seguenti si riporta la metodologia adottata per il confronto tra la configurazione attuale e la configurazione di PRP ed i relativi risultati e considerazioni cui si è pervenuti.

6.1 **Metodologia di analisi**

L'analisi di operatività di una banchina portuale viene eseguita calcolando il numero di ore l'anno durante le quali, mediamente, viene superata la soglia di altezza d'onda significativa massima ammissibile, per consentire le operazioni di carico e scarico nel rispetto di adeguate condizioni di sicurezza.

Il calcolo ovviamente riguarda le zone di ormeggio della nave, ovvero i fronti di accosto delle singole banchine. Il tempo durante il quale viene superata la soglia per ciascuna banchina, viene denominato “downtime” o, in italiano, tempo di non operatività della banchina.

In accordo con la letteratura specializzata per il calcolo del “downtime” delle banchine si è assunto il valore di soglia $H_{s,lim} = 0.5 \text{ m}$, valido per navi Contenitori e Ro-Ro, comunque ampiamente cautelativo anche per i traffici commerciali tradizionali (bulk-carrier), oltre la quale non è possibile effettuare in sicurezza le operazioni di carico/scarico.

Il calcolo è stato effettuato lungo le singole banchine, evidenziate in Figura 6-1 per la configurazione attuale e Figura 6-2 per la configurazione di PRP, considerando le relative fasce di ormeggio delle imbarcazioni.

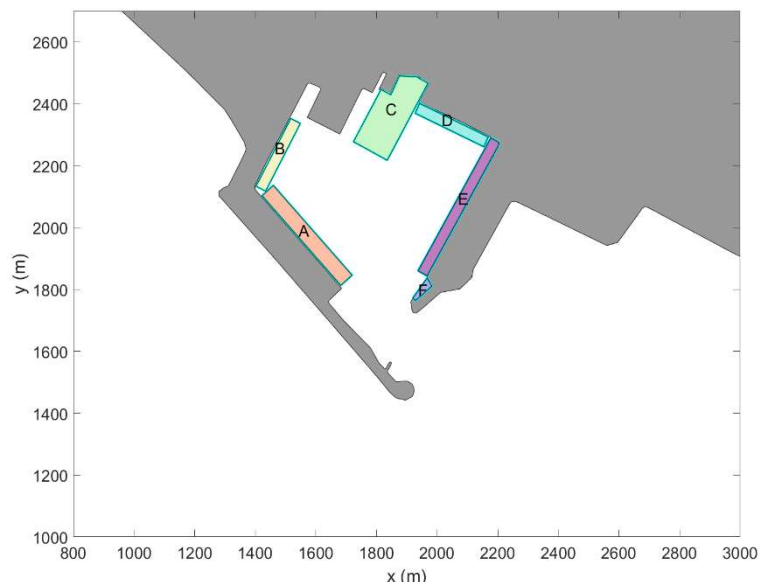


Figura 6-1 - Definizione delle aree di influenza relative alle banchine del Porto di Marina di Carrara per la Configurazione Attuale per il calcolo dell'operatività portuale

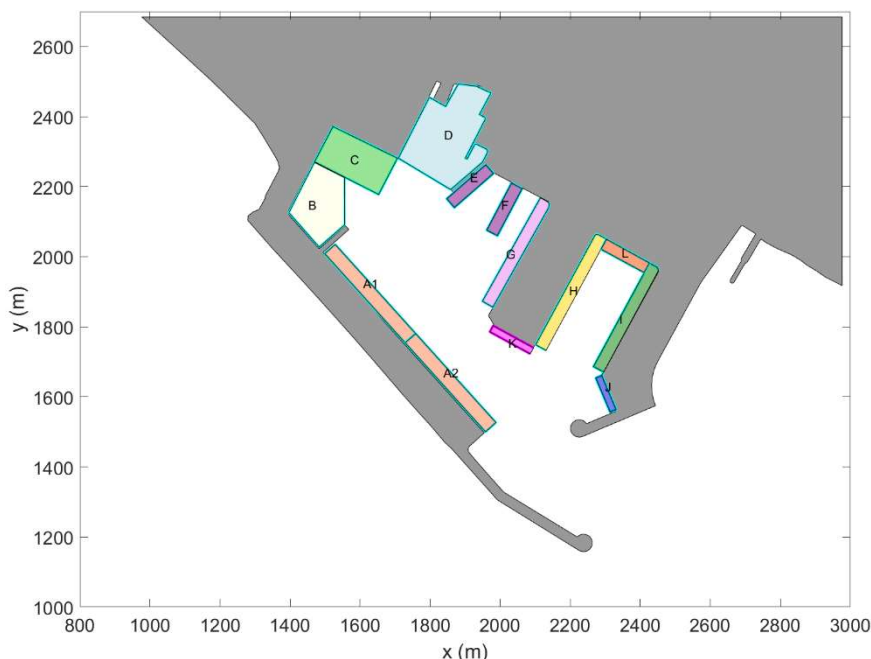


Figura 6-2 – Definizione delle aree di influenza relative alle banchine del Porto di Marina di Carrara per la Configurazione di PRP per il calcolo dell'operatività portuale

Per ciascuna delle aree di riferimento è stato eseguito il calcolo del “downtime” medio annuale. Per eseguire il calcolo del “downtime” di ciascuna area di riferimento, si è presa in esame un'altezza d'onda significativa rappresentativa dell'area, che è stata denominata HQ_s la quale è stata confrontata con il valore $H_{s,lim}$ sopra introdotto. Tale altezza d'onda è stata definita:

$$HQ_s = \overline{H_s} + \alpha \cdot \sigma(H_s)$$

dove:

- $\overline{H_s}$ è l'altezza d'onda significativa media calcolata sull'area di riferimento;
- $\sigma(H_s)$ è la deviazione standard dei valori di H_s calcolati sull'area di riferimento;
- α è una costante calcolata per ogni area, tale che HQ_s venga superato solo dal 5% dei valori maggiori di H_s calcolati sull'area di riferimento.

Sostanzialmente HQ_s , essendo superata da un numero limitato di altezze d'onda, rappresenta la popolazione dei valori più elevati delle H_s che si verificano sull'area di riferimento. Si osserva che se l'area di riferimento fosse caratterizzata in tutti i nodi di calcolo del modello di propagazione del moto ondoso utilizzato, da un valore costante di H_s (onde progressive), si otterrebbe: $\sigma(H_s) = 0$ e quindi:

$$HQ_s = \overline{H_s} = H_s$$

Tuttavia, nelle aree di riferimento l'altezza d'onda significativa risulta generalmente variabile, sia a causa della variabilità nello spazio delle altezze d'onda che penetrano nel porto, sia a causa della riflessione indotta dalle banchine portuali che generano un moto ondoso parzialmente stazionario. La discretizzazione spaziale utilizzata per applicare il modello numerico di propagazione del moto ondoso è stata operata in modo tale da ottenere, per ciascuna area di riferimento, un numero di nodi di calcolo superiore ad alcune centinaia.

6.2 Risultati sulla Configurazione Attuale e di PRP

Nelle pagine a seguire sono riportati i diagrammi che presentano i risultati delle simulazioni, relative ai diversi stati di mare presi in esame, sia per la configurazione attuale che per quella di PRP.

I diagrammi mostrano i risultati espressi in termini di altezza d'onda all'interno e in prossimità del bacino portuale per le diverse direzioni di provenienza in esame (180 °N, 210 °N e 240 °N).

In Figura 6-3 e Figura 6-4 sono riportate le condizioni relative alla direzione di provenienza di 180°N. La prima condizione rappresentata nel diagramma in alto a sinistra è caratterizzata da un'onda incidente $H_s = 1.5$ m ed un periodo $T_p = 7.5$ s (il calcolo del periodo è stato effettuato attraverso la correlazione altezza d'onda periodo mostrata nella relazione "S1 – Studio Meteomarino"). Tale condizione mostra un moto ondoso residuo all'interno del bacino del tutto trascurabile. Il diagramma in alto a destra mostra i risultati relativi ad un'onda incidente caratterizzata da un'altezza $H_s = 2.5$ m ed un periodo $T_p = 8.7$ s. In basso a sinistra sono rappresentate le condizioni caratterizzate da un'altezza d'onda $H_s = 3.5$ m con periodo $T_p = 9.6$ s mentre in basso a destra è rappresentato uno stato di mare di altezza $H_s = 5.0$ m e periodo $T_p = 10.7$ s.

In Figura 6-5 e Figura 6-6 sono mostrati i risultati relativi alle direzioni 210°N. Per questa direzione, la più frequente che si realizza a ridosso del porto di Marina di Carrara, è possibile osservare come la nuova configurazione planimetrica proposta riesca comunque a garantire un'agitazione interna residua caratterizzata da valori di altezza d'onda compresi tra 0.0 m e 1.0 m.

In Figura 6-7 e Figura 6-8 sono infine mostrati i risultati ottenuti per la direzione d'onda incidente pari a 240°N relativi alla configurazione attuale e di PRP che mostrano un'agitazione interna residua praticamente trascurabile per entrambe le configurazioni.

DIREZIONE 180 °N

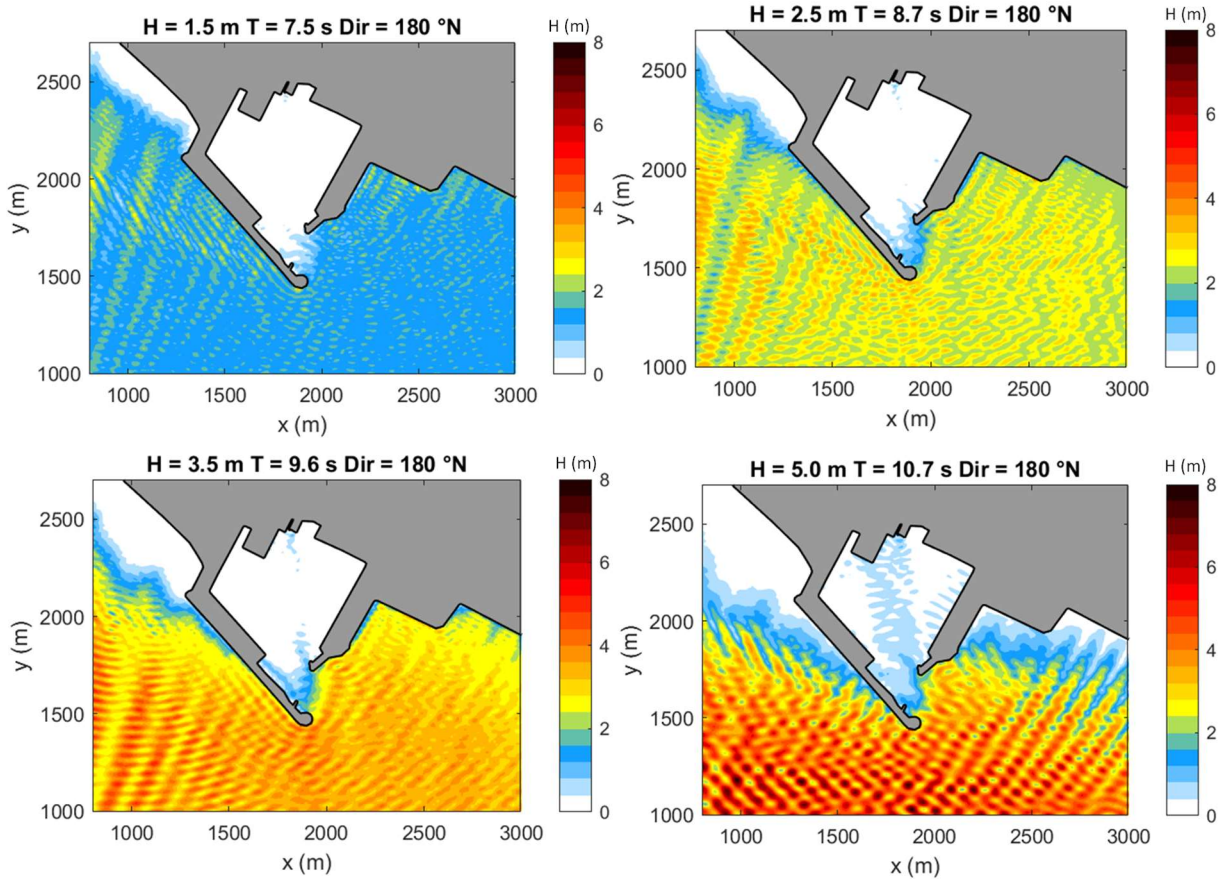


Figura 6-3 - Risultati relativi alla penetrazione del moto ondoso nella configurazione attuale per la direzione 180 °N

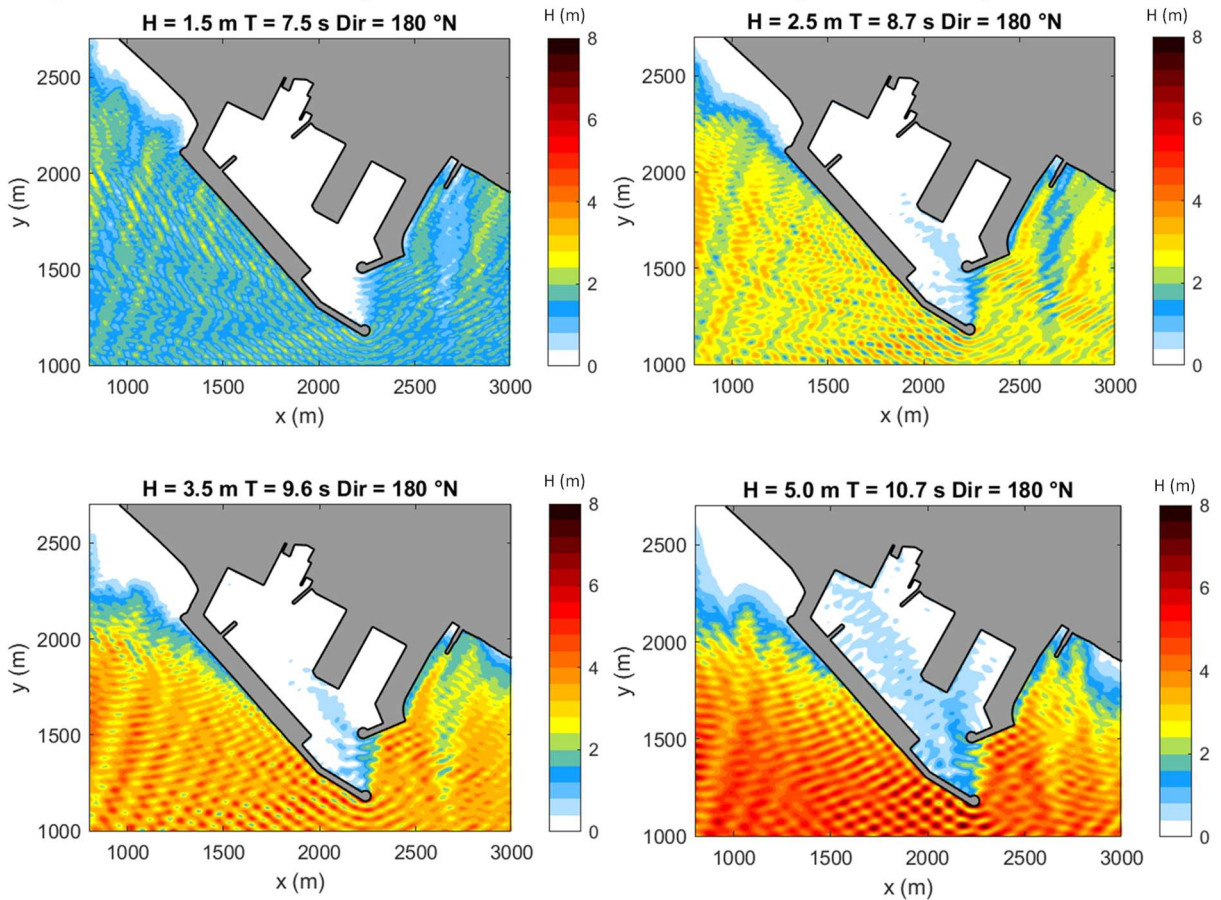


Figura 6-4 - Risultati relativi alla penetrazione del moto ondoso nella configurazione di PRP per la direzione 180 °N

DIREZIONE 210 °N

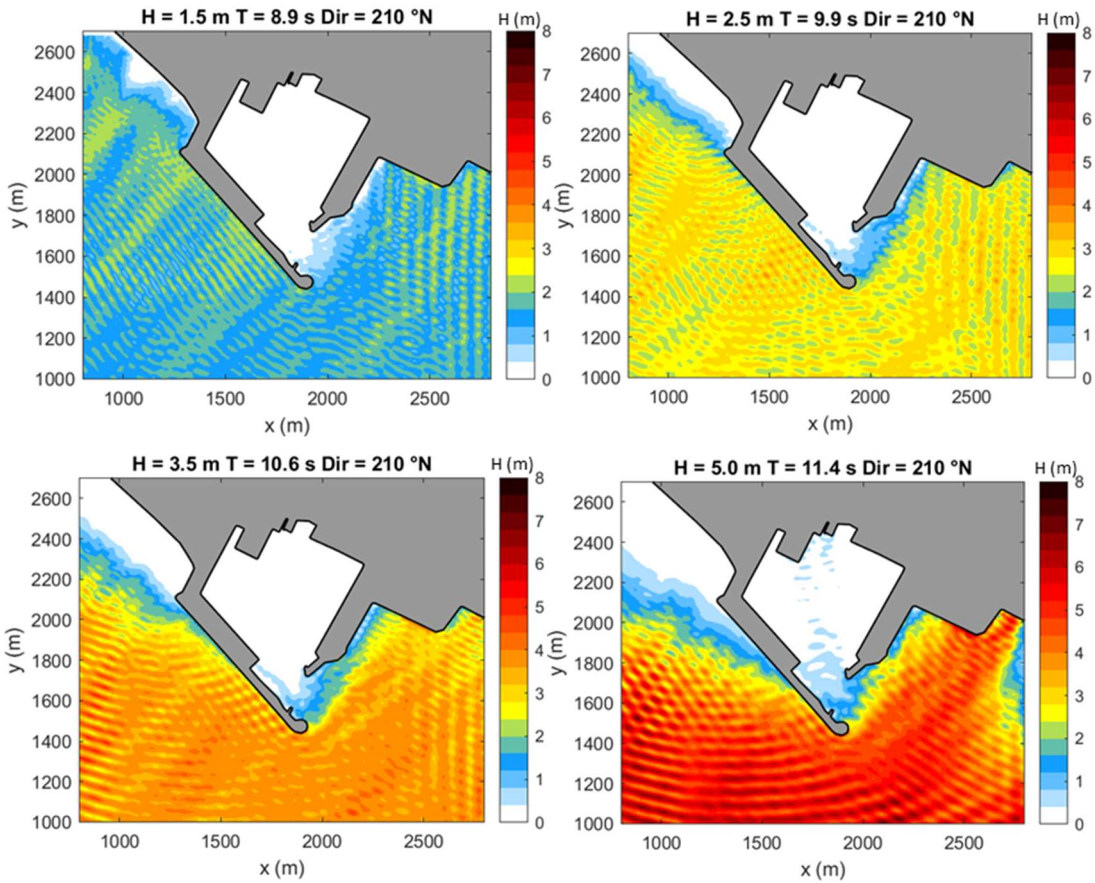


Figura 6-5 - Risultati relativi alla penetrazione di moto ondoso nella configurazione attuale per la direzione 210 °N

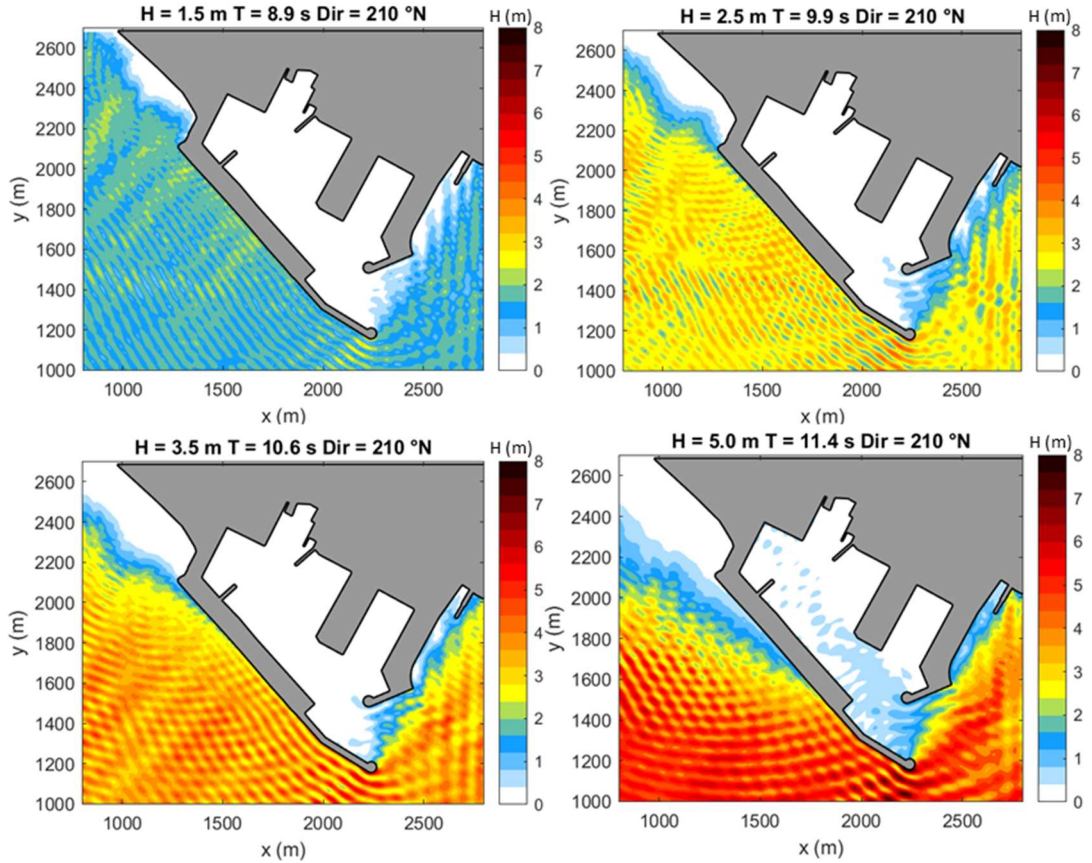


Figura 6-6 - Risultati relativi alla penetrazione di moto ondoso nella configurazione di PRP per la direzione 210 °N

DIREZIONE 240°N

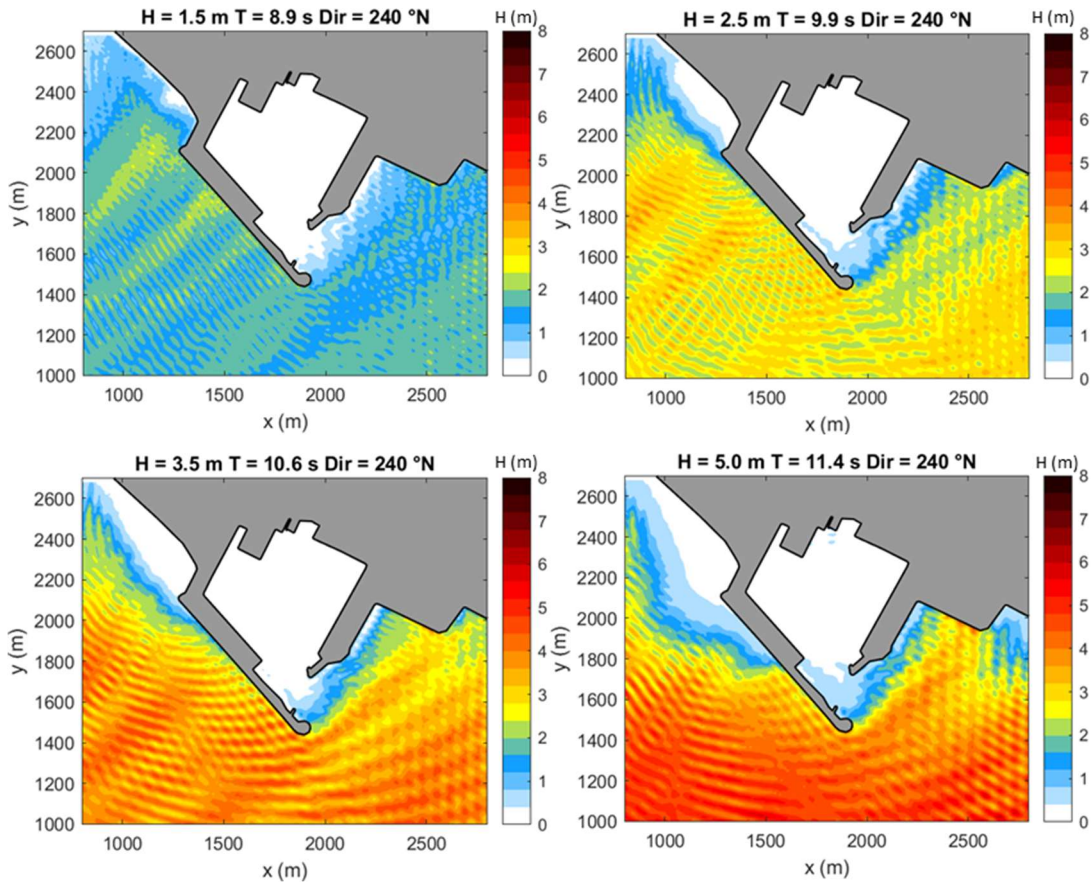


Figura 6-7 - Risultati relativi alla penetrazione di moto ondoso nella configurazione attuale per la direzione 240°N

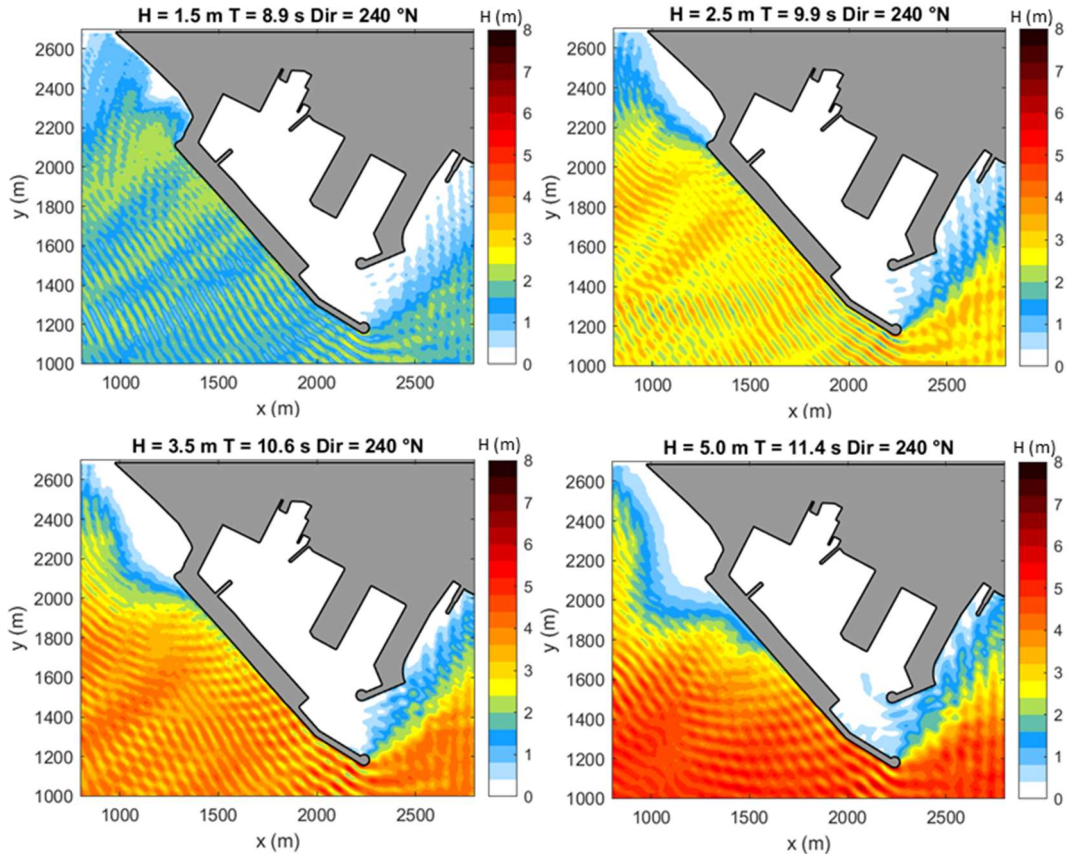


Figura 6-8 - Risultati relativi alla penetrazione di moto ondoso nella configurazione di PRP per la direzione 240°N

In Figura 6-9 e Figura 6-10 sono mostrati i risultati del “downtime” per le banchine portuali nel caso di configurazione attuale e configurazione di PRP. Per ogni area di riferimento (ascissa) si riportano in ordinata i risultati ottenuti espressi in numero di ore medio annuo di superamento della soglia.

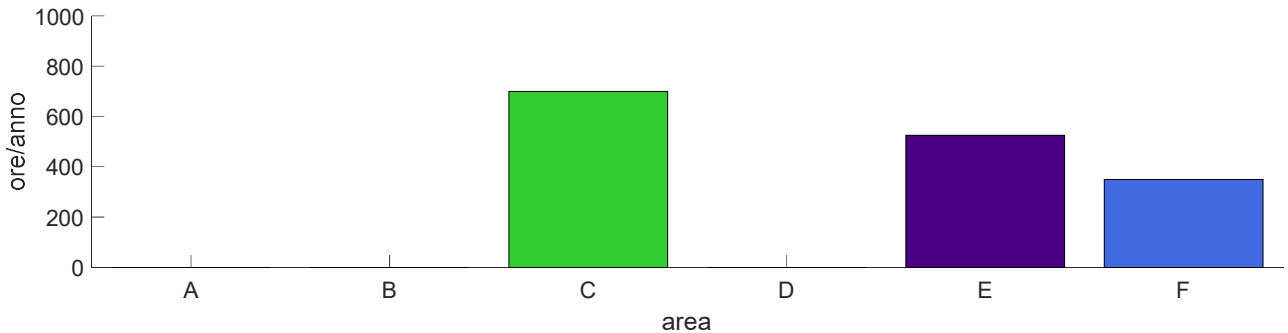


Figura 6-9 - Durata cumulata degli stati di mare con $H_{qs} > 0.5$ m per la configurazione attuale

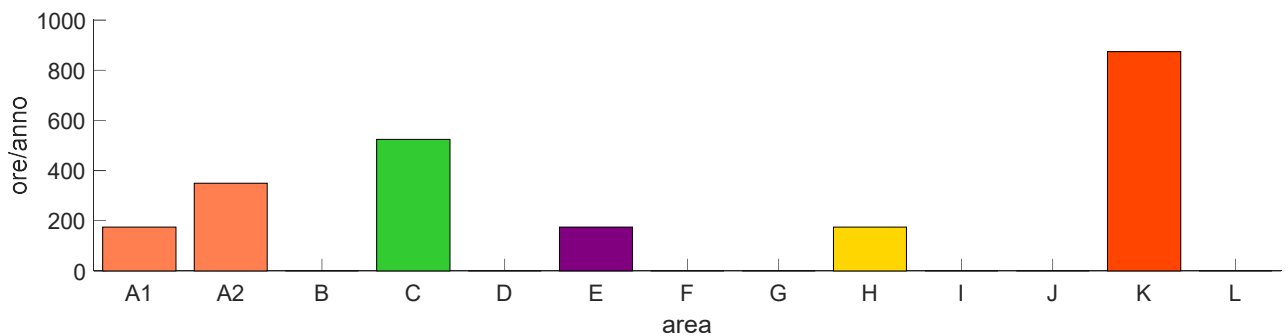


Figura 6-10 – Durata cumulata degli stati di mare con $H_{qs} > 0.5$ m per la configurazione di PRP

Si osserva che, mentre attualmente lungo la banchina Fiorillo, posta lungo il lato interno del molo di sottoflutto, la frequenza di superamento su base annua della soglia di H_s di 0.5 m, assunta come limite operativo (downtime), è pari a circa 450 ore/anno, che corrispondono a poco meno di 20 giorni/anno, con la configurazione di PRP il “downtime” si riduce praticamente a zero.

Un miglioramento per gli aspetti di operatività (downtime) si ottiene anche per gli specchi portuali più interni per i quali, nella configurazione attuale la frequenza di superamento della soglia di altezza d’onda limite è pari a circa 600 ore/anno, mentre si riduce praticamente a zero per la configurazione di PRP.

Una ultima osservazione per la configurazione di PRP riguarda la possibilità di adibire ed impiegare come banchina anche la testata dell’attuale molo di sottoflutto. I risultati numerici ottenuti mostrano che, poiché il canale di accesso al porto rimane la zona maggiormente esposta alla penetrazione del moto ondoso, su questa banchina si ottiene una frequenza di superamento della soglia molto elevata, pari a circa 900 ore/anno.

Capitolo 7 Verifica delle condizioni di sicurezza portuale

7.1 Metodologia di analisi

Per la verifica delle condizioni di sicurezza portuale si sono analizzati i risultati in termini di altezza d'onda e frangimento all'interno del bacino portuale e nella limitrofa fascia litoranea in occasione di stati mare associati ad un tempo di ritorno di 10 anni.

Il frangimento viene rappresentato attraverso l'utilizzo della funzione Q_b . Tale funzione, come mostrato nei paragrafi precedenti, rappresenta la probabilità che in uno specifico punto del campo, l'altezza dell'onda raggiunga il suo valore massimo H_m .

7.2 Risultati

In Figura 7-1 sono riportati i risultati ottenuti per gli stati di mare estremi con tempo di ritorno 10 anni indicati in

Tabella 5-2 di altezza d'onda $H_s = 4.30$ m e $H_s = 6.30$ m rispettivamente.

I diagrammi riportati a sinistra mostrano il campo d'onda relativo alle condizioni estreme selezionate. I diagrammi di destra riportano il valore puntuale della funzione di probabilità Q_b calcolata dal modello nel baricentro di ogni elemento costituente il dominio di calcolo. Si sono scelte sette classi di suddivisione della funzione di probabilità.

La classe più bassa è quella per la quale Q_b risulta pari allo 0%, corrispondente alla condizione per la quale si ha una probabilità di frangimento nulla in un dato punto della griglia di calcolo.

Come è quindi possibile osservare dai diagrammi riportati in Figura 7-1, nell'area interna al porto e a ridosso della nuova diga foranea, la probabilità che il moto ondoso sia frangente in occasione di stati di mare con $Tr = 10$ anni risulta pari allo 0% per entrambe le direzioni di $180^\circ N$ e $210^\circ N$.

Per quanto riguarda la probabilità di frangimento all'esterno del porto e sull'imboccatura portuale, posta su fondali di -12.0 m sul l.m.m., i risultati ottenuti mostrano che in condizioni di moto ondoso estreme, associate ad un Tr 10 anni, la frequenza di frangimento è nell'ordine del 5% delle onde, valore sicuramente non compatibile con la sicurezza delle imbarcazioni in ingresso nel porto specialmente per quelle con minore dislocamento.

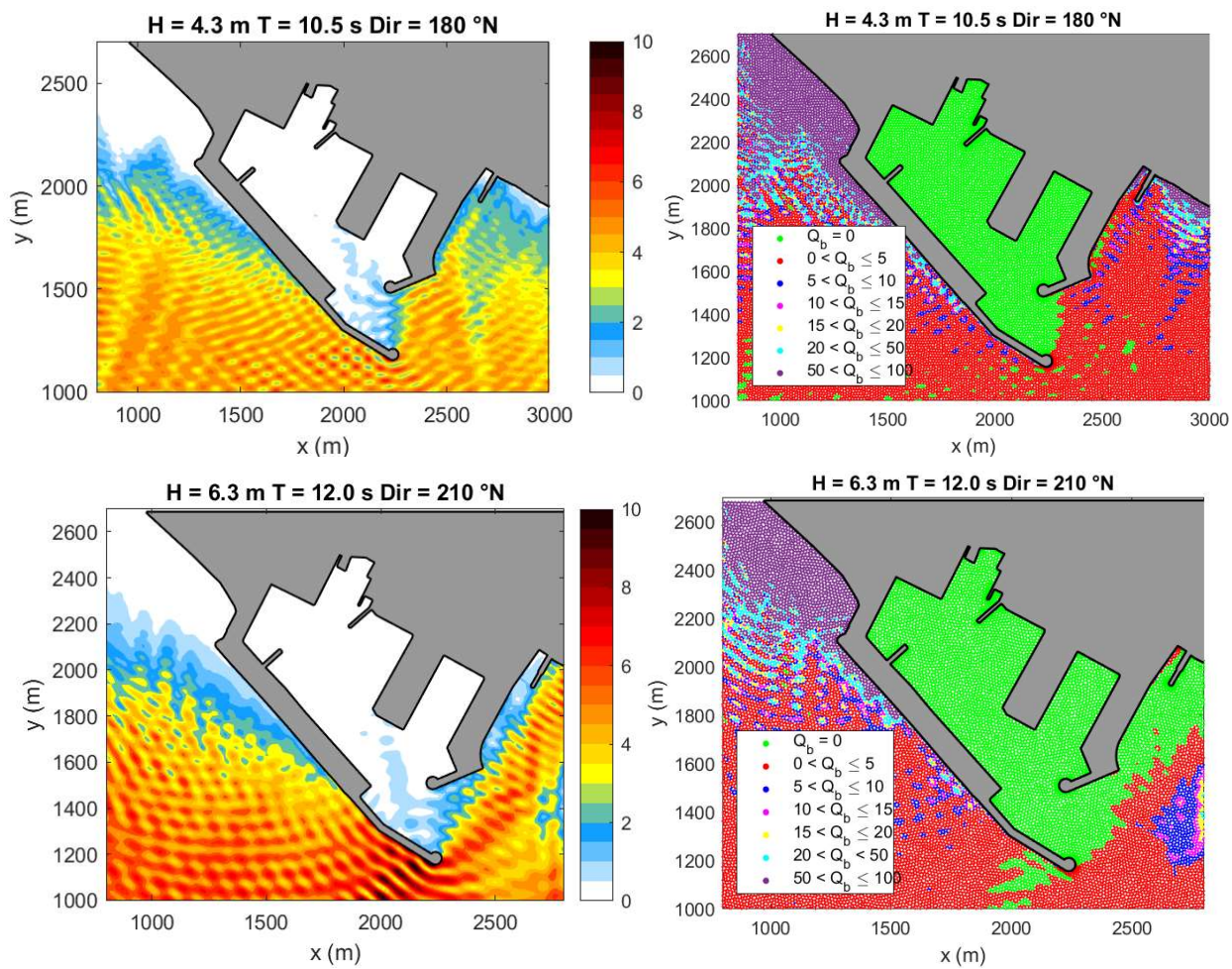


Figura 7-1 – Rappresentazione del campo delle altezze d’onda (diagrammi di sinistra) e del parametro Q_b rappresentativo della probabilità di frangimento (diagrammi di destra) per le forzanti di moto ondoso sintetizzate nella Tabella 5-2 cui si rimanda per i dettagli.

Capitolo 8

Studio di risonanza sulla Configurazione di PRP

Per studiare i possibili fenomeni di risonanza portuale è stato applicato il codice di calcolo agli elementi finiti GEMMA, che consente di simulare i fenomeni combinati di diffrazione, riflessione e rifrazione. Il modello, che risolve l'equazione ellittica di Berkhoff detta di "mild-slope", ha la capacità di tenere in conto anche degli effetti dissipativi dovuti al frangimento ed all'attrito sul fondo oltre che alla dispersione in frequenza e direzione dell'energia.

Nel caso in esame la lunghezza d'onda associata alle onde di lungo periodo $30 \leq T \leq 1000$ s su fondali variabili tra -5 e -15 m sul l.m.m. risulta compresa tra un minimo di 209 m ed un massimo di circa 14000 m (vedi valori riportati in Tabella 8-1).

Tabella 8-1 – Definizione della lunghezza d'onda in funzione delle profondità caratterizzanti il sito in esame e dei periodi simulati.

Lunghezza d'onda (m)		Periodo (s)												
		30	60	90	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000
Profondità (m)	5	209	420	630	840	1050	1400	1750	2100	2800	3500	4200	5600	7001
	10	295	593	890	1187	1485	1980	2475	2970	3960	4950	5940	7920	9900
	15	360	725	1090	1454	1818	2424	3031	3637	4850	6062	7275	9700	12125
	20	414	837	1258	1679	2099	2799	3500	4200	5600	7000	8400	11201	14001

8.1 Descrizione della metodologia di analisi e dei risultati ottenuti

Il modello di calcolo GEMMA fornisce come risultato in uscita i valori di altezza (H) e fase (ϕ) dell'onda, ottenuti in ogni nodo all'interno del dominio di calcolo. Assegnando lungo il contorno di generazione un'altezza d'onda $H = 1.0$ m, data la linearità del modello, è possibile determinare il fattore di amplificazione dell'altezza d'onda (*Coefficiente di amplificazione C_a*) definito in ogni nodo di calcolo dal rapporto tra l'altezza dell'onda ottenuta nel punto e quella dell'onda incidente $C_a = H/H_i$.

La simulazione degli effetti indotti dalle onde di lungo periodo, all'interno delle aree portuali, è stata svolta adottando un coefficiente di riflessione pari a 1.0 (contorno completamente riflettente), e non considerando a scopo cautelativo gli effetti dissipativi indotti dall'attrito sul fondo e dal frangimento. All'esterno dell'ambito portuale sono stati assegnati coefficienti di riflessione pari a 0.1 per i tratti di litorale sabbiosi a costa bassa e pari a 0.3 per i tratti di litorale rocciosi a costa.

Le condizioni dell'onda incidente sono impostate lungo il contorno di largo con una direzione di provenienza di 225°N (Libeccio).

I punti di estrazioni dei dati di interesse sono riportati in Figura 8-1 ($P_1 - P_{17}$).

Per analizzare la risposta in frequenza del bacino portuale nei confronti delle onde di lungo periodo sono state effettuate 106 simulazioni facendo variare la frequenza dell'onda incidente da un massimo di 0.03 Hz (pari ad un periodo di 33.33 s) ad un minimo di 0.001 Hz (corrispondente a 1000 s) come indicato in Figura 8-2 e in Tabella 8-2.

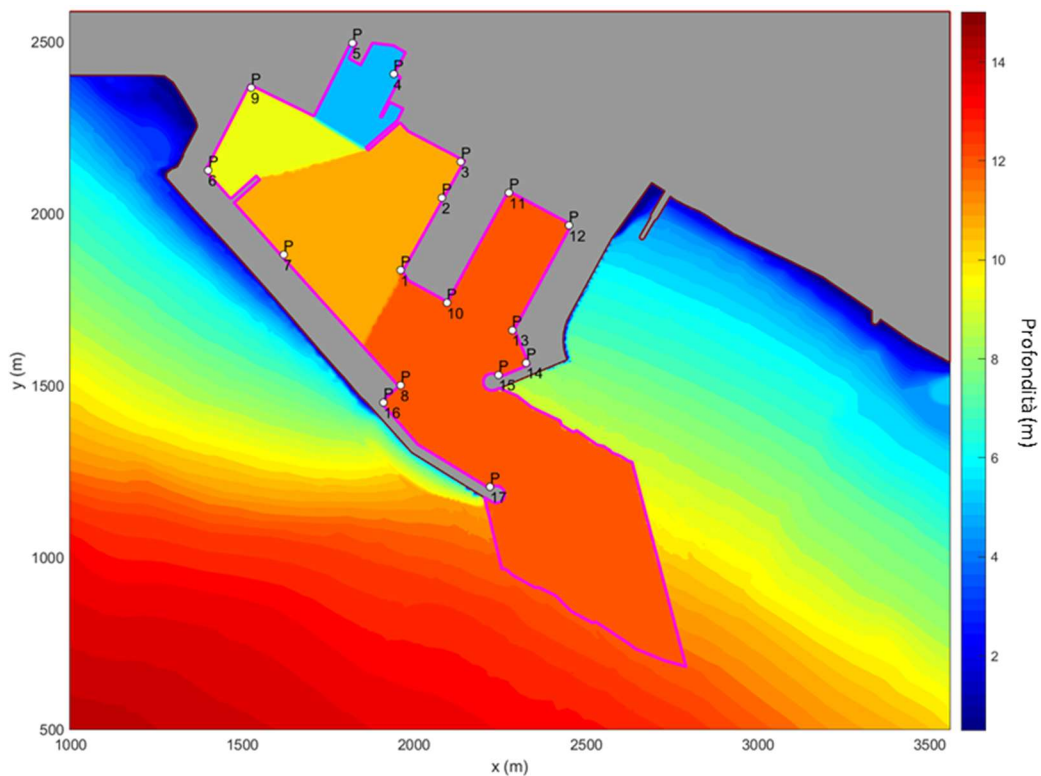


Figura 8-1 - Rappresentazione della batimetria all'interno del dominio di calcolo con indicazione dei punti di estrazione per l'analisi dei risultati.

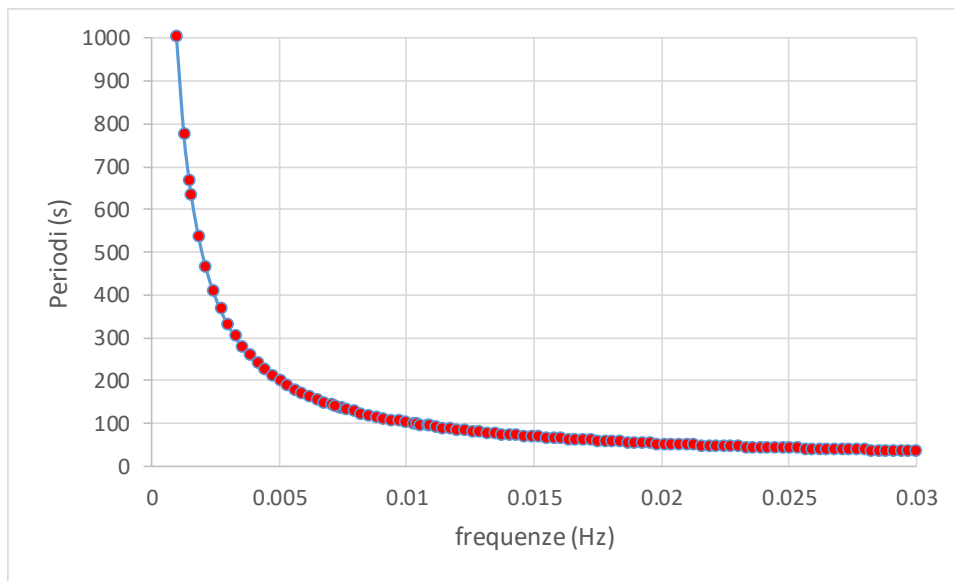


Figura 8-2 – Corrispondenza periodo-frequenza per gli stati di mare utilizzati nell'analisi della propagazione delle onde di lungo periodo.

Tabella 8-2 – Periodi e frequenze utilizzate per l'analisi della propagazione delle onde di altezza unitaria e lungo periodo

N°	f (Hz)	T (s)	Dir (°N)	Dir (°X)
1	0.0010	1000.00	225	45
2	0.0013	775.19	225	45
3	0.0015	666.67	225	45
4	0.0016	632.91	225	45
5	0.0019	534.76	225	45
6	0.0022	462.96	225	45
7	0.0025	408.16	225	45
8	0.0027	364.96	225	45
9	0.0030	330.03	225	45
10	0.0033	301.20	225	45
11	0.0036	277.01	225	45
12	0.0039	256.41	225	45
13	0.0042	238.66	225	45
14	0.0045	223.21	225	45
15	0.0048	209.64	225	45
16	0.0051	197.63	225	45
17	0.0054	186.92	225	45
18	0.0056	177.30	225	45
19	0.0059	168.63	225	45
20	0.0062	160.77	225	45
21	0.0065	153.61	225	45
22	0.0068	147.06	225	45
23	0.0071	141.04	225	45
24	0.0074	135.50	225	45
25	0.0075	132.89	225	45
26	0.0077	130.38	225	45
27	0.0072	138.89	225	45
28	0.0080	125.63	225	45
29	0.0083	121.21	225	45
30	0.0085	117.10	225	45
31	0.0088	113.25	225	45
32	0.0091	109.65	225	45
33	0.0094	106.27	225	45
34	0.0097	103.09	225	45
35	0.0100	100.10	225	45
36	0.0103	97.28	225	45
37	0.0104	96.15	225	45
38	0.0106	94.61	225	45
39	0.0109	92.08	225	45
40	0.0109	91.74	225	45
41	0.0112	89.69	225	45
42	0.0114	87.41	225	45
43	0.0117	85.25	225	45
44	0.0120	83.19	225	45
45	0.0123	81.23	225	45
46	0.0126	79.37	225	45
47	0.0129	77.58	225	45
48	0.0132	75.87	225	45
49	0.0135	74.24	225	45
50	0.0138	72.67	225	45
51	0.0141	71.17	225	45
52	0.0143	69.74	225	45
53	0.0146	68.35	225	45

N°	f (Hz)	T (s)	Dir (°N)	Dir (°X)
54	0.0149	67.02	225	45
55	0.0152	65.75	225	45
56	0.0155	64.52	225	45
57	0.0158	63.33	225	45
58	0.0161	62.19	225	45
59	0.0164	61.09	225	45
60	0.0167	60.02	225	45
61	0.0170	59.00	225	45
62	0.0172	58.00	225	45
63	0.0175	57.05	225	45
64	0.0178	56.12	225	45
65	0.0181	55.22	225	45
66	0.0184	54.35	225	45
67	0.0187	53.50	225	45
68	0.0190	52.69	225	45
69	0.0193	51.89	225	45
70	0.0196	51.12	225	45
71	0.0199	50.38	225	45
72	0.0201	49.65	225	45
73	0.0204	48.95	225	45
74	0.0207	48.26	225	45
75	0.0210	47.60	225	45
76	0.0213	46.95	225	45
77	0.0216	46.32	225	45
78	0.0219	45.70	225	45
79	0.0222	45.11	225	45
80	0.0225	44.52	225	45
81	0.0228	43.96	225	45
82	0.0230	43.40	225	45
83	0.0233	42.86	225	45
84	0.0236	42.34	225	45
85	0.0239	41.82	225	45
86	0.0242	41.32	225	45
87	0.0245	40.83	225	45
88	0.0248	40.36	225	45
89	0.0251	39.89	225	45
90	0.0254	39.43	225	45
91	0.0257	38.99	225	45
92	0.0259	38.55	225	45
93	0.0262	38.12	225	45
94	0.0265	37.71	225	45
95	0.0268	37.30	225	45
96	0.0271	36.90	225	45
97	0.0274	36.51	225	45
98	0.0277	36.13	225	45
99	0.0280	35.75	225	45
100	0.0283	35.39	225	45
101	0.0286	35.03	225	45
102	0.0288	34.67	225	45
103	0.0291	34.33	225	45
104	0.0294	33.99	225	45
105	0.0297	33.66	225	45
106	0.0300	33.33	225	45

8.2 Analisi della configurazione di PRP del porto di Marina di Carrara

Il dominio di calcolo utilizzato per le simulazioni di onde di lungo periodo risulta uguale a quello implementato per lo studio dell'agitazione portuale. Tale assunzione risulta idonea per alti periodi, essendo caratterizzata da molti più nodi per lunghezza d'onda rispetto alle onde di breve periodo.

I coefficienti di amplificazione ottenuti in funzione della frequenza d'onda nei punti di indagine situati all'interno del porto (riportati in Figura 8-1), sono mostrati in Figura 8-3, Figura 8-4 e Figura 8-5. I risultati ottenuti permettono di individuare le frequenze proprie del bacino e i relativi modi propri.

In Figura 8-3 viene effettuato il confronto dei coefficienti di amplificazione calcolati per la configurazione attuale del porto (Bellotti & Franco, 2011 "*Measurements of long waves at the harbour of Marina di Carrara, Italy*", Ocean Dynamics, Springer) sulla base dei risultati di specifiche campagne di misure espletate dall'Autorità Portuale di Marina di Carrara negli anni 2000, con quelli ottenuti per la configurazione di PRP. Ovviamente la comparazione dei dati è limitata al bacino esistente che sostanzialmente non viene modificato nella configurazione di PRP.

Come è possibile notare, il primo modo viene eccitato in corrispondenza dello stesso periodo. L'andamento generale dei coefficienti di amplificazione subisce complessivamente un miglioramento nella configurazione di PRP.

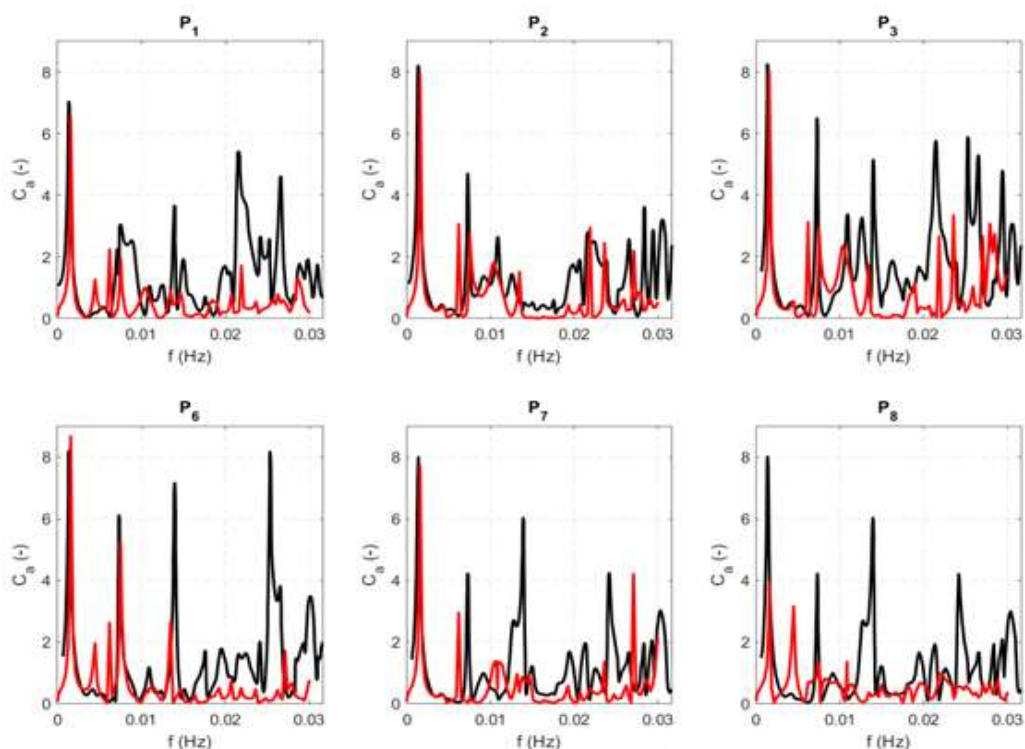


Figura 8-3 - Confronto del coefficiente di amplificazione calcolato da Bellotti & Franco (2011). In rosso è rappresentato l'andamento del coefficiente di amplificazione ottenuto per la configurazione di PRP. In nero sono indicate le curve ottenute da Bellotti & Franco (2011) per la configurazione attuale.

Il primo modo di oscillazione viene eccitato per il periodo $T = 632.91$ s (evidenziato in rosso in Tabella 8-2) equivalente ad una frequenza di 0.0016 Hz, con coefficiente di amplificazione dell'ordine di $Ca = 8$. Il fattore di amplificazione risulta massimo nei nodi $P_1, P_2, P_3, P_5, P_7, P_8, P_9$ nel bacino attuale e nei nodi P_{10} e P_{16} nella configurazione di PRP.

Il periodo proprio del secondo modo di oscillazione è pari a $T = 223.21$ s (0.0045 Hz) e il fattore di amplificazione risulta massimo nei nodi P₄, P₅ nel bacino attuale e nei nodi P₁₃, P₁₄, P₁₅ della configurazione di PRP.

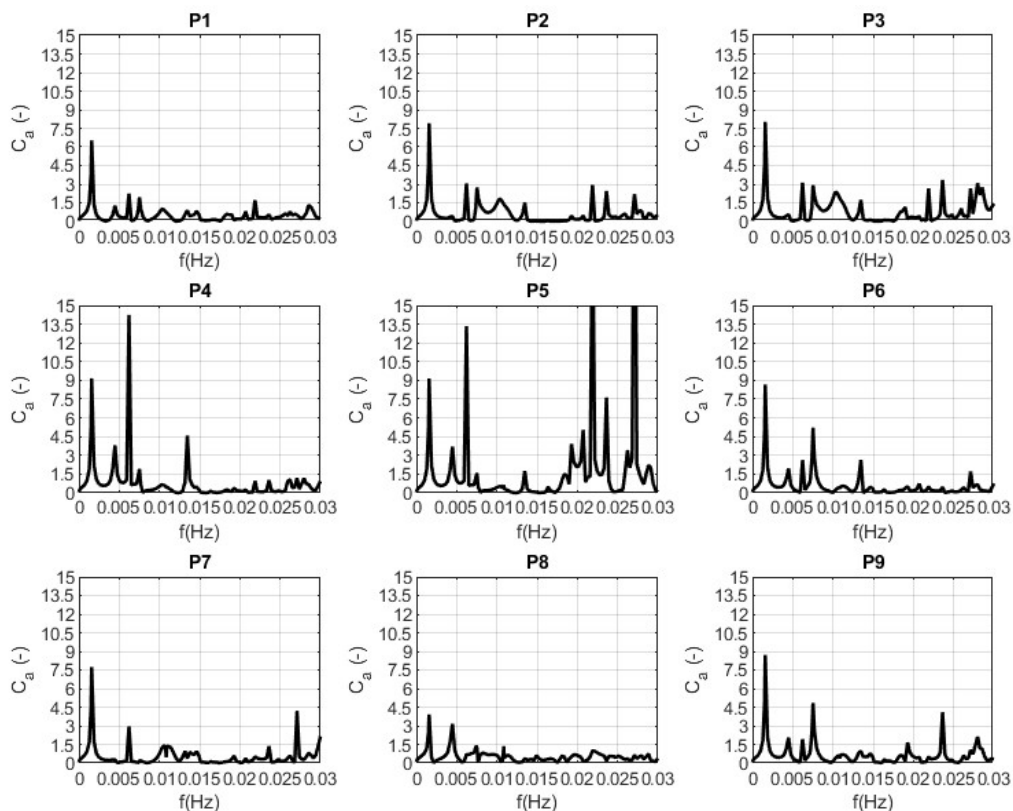


Figura 8-4 – Rappresentazione del coefficiente di amplificazione in funzione delle frequenze d'onda simulate per i punti all'interno della configurazione attuale del Porto di Marina di Carrara

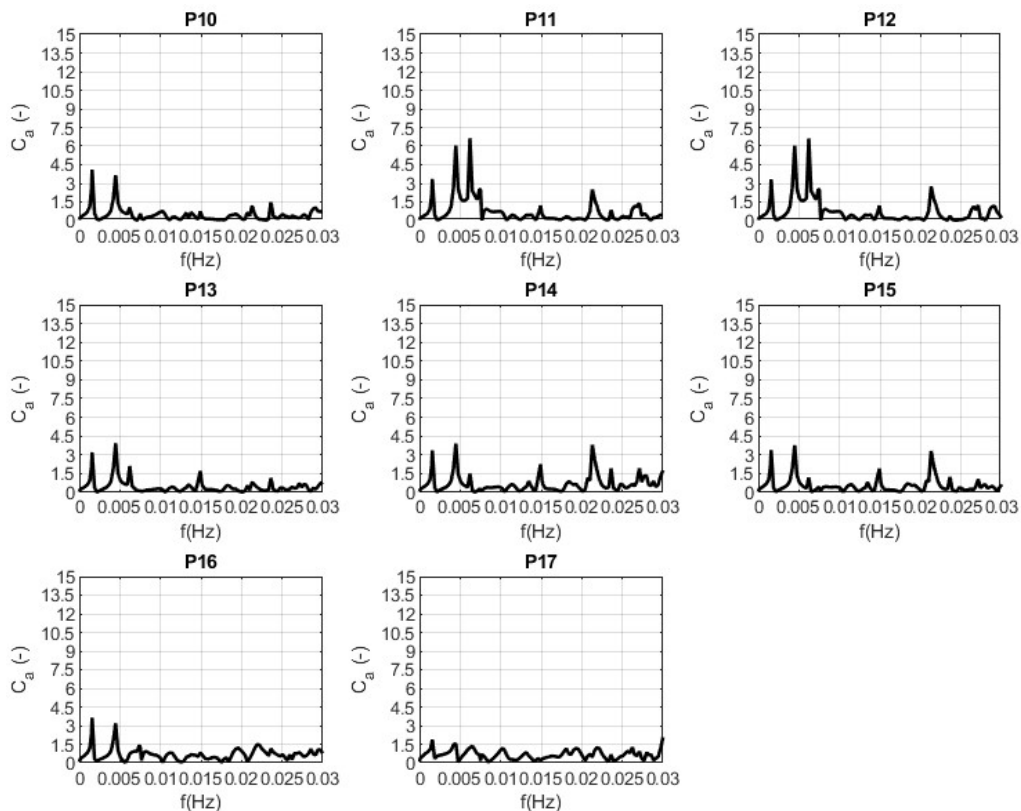


Figura 8-5 – Rappresentazione del coefficiente di amplificazione in funzione delle frequenze d'onda simulate per i punti all'interno della configurazione di PRP del Porto di Marina di Carrara

Nei diagrammi di Figura 8-6 sono mostrati i risultati ottenuti con il modello GEMMA per i periodi 632.91 s, 223.21 s, 160.67 s, 132.89 s, 95.92 s, 74.24 s e 45.70 s.

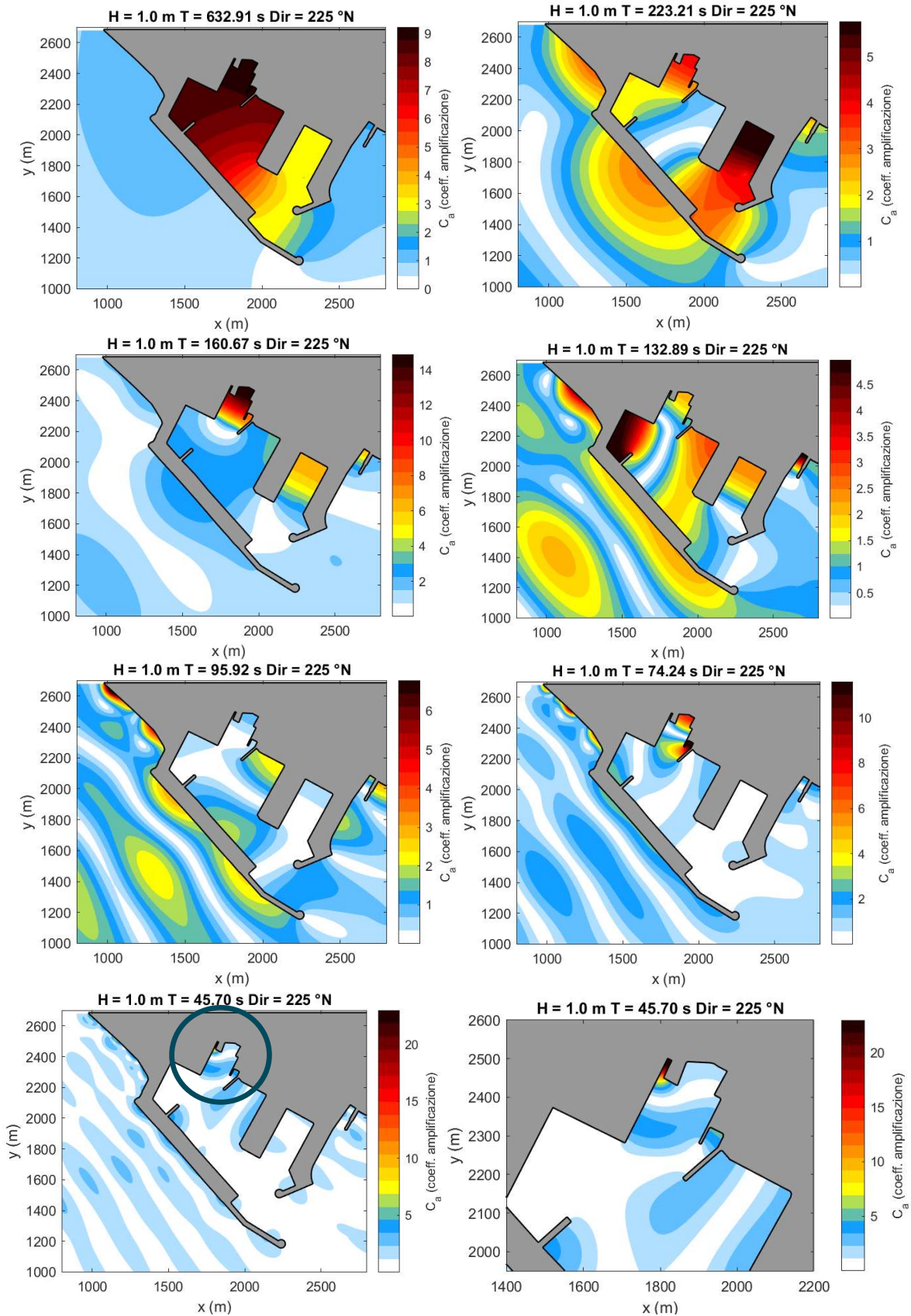


Figura 8-6 – Modi di oscillazione del bacino. Risultati espressi in termini di coefficiente di amplificazione per i periodi evidenziati in rosso di Tabella 8-2.

I diagrammi mostrano i coefficienti di amplificazione $C_a = H/H_i$ ottenuto all'interno del dominio di calcolo e in dettaglio, per l'ultimo periodo, sulla darsena soggetta ad un alto coefficiente di amplificazione.

L'analisi dei diagrammi di amplificazione ottenuti in condizioni stazionarie consente di determinare se il porto può essere soggetto a fenomeni di risonanza e quali periodi proprio hanno una maggiore probabilità di essere effettivamente eccitati dalle onde incidenti e quindi di risultare più efficaci al fine di dar luogo a fenomeni di risonanza.

In generale, con riferimento ad un periodo proprio, il numero di onde necessarie, ovvero il tempo necessario, per portare in condizioni di risonanza stazionaria il bacino, tende ad aumentare al diminuire della larghezza del diagramma di amplificazione. Per cui i periodi in corrispondenza dei quali si rilevano picchi di amplificazione elevati ma caratterizzati da diagrammi "stretti" presentano nella pratica una piccola probabilità di verificarsi. Al contrario risulta più probabile che si verifichino fenomeni di risonanza in corrispondenza di periodi caratterizzati da diagrammi di amplificazione "larghi" perché per essi è sufficiente un numero di onde limitato, ovvero un periodo di tempo relativamente breve, per ottenere i massimi valori del coefficiente di amplificazione che si sviluppano in condizioni stazionarie.

In particolare, con riferimento alla Figura 8-4 e Figura 8-5, i primi tre modi di oscillazione che danno luogo ai valori più elevati del coefficiente di amplificazione C_a , si ottengono in corrispondenza dei seguenti periodi: (i) modo fondamentale: $T = 632.91$ s (corrispondente ad una frequenza di 0.0015 Hz); (ii) secondo modo: $T = 223.21$ s (corrispondente ad una frequenza di 0.0044 Hz); (iii) terzo modo: 160.67 s (corrispondente ad una frequenza di 0.0062 Hz).

I primi tre modi sono caratterizzati da un diagramma "stretto" e quindi si può affermare che hanno una scarsa probabilità di essere indotti a differenza dei modi successivi, che possono essere innescati dalle onde incidenti ordinarie ma comunque sono caratterizzati da un coefficiente di amplificazione modesto con effetti trascurabili per gli effetti sullo stazionamento all'ormeggio dei mercantili e soprattutto per gli aspetti di sicurezza e funzionalità delle operazioni di carico e scarico di queste navi.