

PIANO REGOLATORE PORTUALE DEL PORTO DI LIVORNO 2012

Titolo elaborato:

STUDIO PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO E AGITAZIONE INTERNA

Scala:			1 0	0	1 0	RR	0 1	1 -	0 M	AR
Commit	tente: JTORITA' PO DI LIVOF		JALE	MOI Prof TEC SCII	gettisti: DIMAR S.r.I. . Ing. Alberto :HNITAL S.p. RO BUREAU QUATECNO S	A. VERITAS S	.p.A.			
	marzo 2013	0	EMISSIONE					A. SANZONE	A. NOLI	M. TARTAGLINI
Rif. Dis.	Data	Rev.		DESC	CRIZIONE			Redatto:	Verificato:	Approvato:
Dimensi	oni foglio:		A4							
Visto de	el Committente	:								



Titolo Ela		udio della gitazione int	penetrazione erna	del moto	ondoso e		
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		

NUOVO PIANO REGOLATORE PORTUALE DEL PORTO DI LIVORNO 2012

STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO E AGITAZIONE INTERNA

INDICE

1	PREMESSE	1
2	STUDIO PRELIMINARE DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO CON IL MODELLO VEGA	3
3	PIATTAFORMA EUROPA – IMBOCCATURA NORD	4
3.1	Configurazioni esaminate ed ipotesi di calcolo	4
3.2	Simulazione degli eventi di moto ondoso	18
3.3	Analisi dei risultati	21
3.4	Conclusioni	27
4	PORTO ESISTENTE – IMBOCCATURA SUD	75
4.1	Configurazioni esaminate, ipotesi di calcolo e simulazione degli eventi di moto ondoso	75
4.2	Analisi dei risultati e conclusioni	76
5	CONFIGURAZIONE DI PIANO - STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO CON IL	
MOI	DELLO CG WAVE	77
5.1	Applicazione del sistema di modellazione SMS	78
5.2	Discretizzazione dello specchio liquido	78
5.3	Definizione delle condizioni al contorno	81
5.4	Risultati delle simulazioni	83
5.5	CONCLUSIONI	93
6	SPECCHIO ACQUEO IN LOCALITÀ BELLANA DESTINATO ALLA NAUTICA SOCIALE - STUDIO DEL	LLA
PEN	ETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO CON IL MODELLO CG WAVE	95
6.1	Studio della penetrazione del moto ondoso con il modello CGWAVE	97
6.3	Definizione delle condizioni al contorno	98
6.4	Risultati delle simulazioni e conclusioni	100



Titolo Elab	Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		

1 PREMESSE

La presente relazione, redatta nell'ambito del nuovo Piano Regolatore Portuale del porto di Livorno, descrive lo studio di penetrazione del moto ondoso all'interno dello specchio portuale con particolare riferimento al bacino della Piattaforma Europa e dell'area ridossata dall'attuale imboccatura portuale e del bacino posto a sud del porto dove è prevista l'installazione di infrastrutture di ormeggio a servizio della nautica sociale (c.d. località Bellana).

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

Il modello di calcolo VEGA è stato utilizzato considerando dieci distinte configurazioni delle opere foranee che delimitano il bacino della Piattaforma Europa, verificandone il grado di agitazione residua per distinte combinazioni delle direzioni e dei periodi significativi degli stati di mare caratteristici del paraggio in esame. Relativamente all'attuale imboccatura portuale il modello matematico è stato applicato nell'attuale configurazione delle opere foranee (diga Curvilinea e diga della Vegliaia) e con una configurazione che prevede una leggera modifica della diga della Vegliaia necessaria per migliorare la protezione del bacino ridossato dai moti ondosi provenienti dal settore di traversia principale.

I risultati di questo studio preliminare sono stati utilizzati per definire le alternative di configurazione delle opere esterne del porto di Livorno che sono state poi messe a confronto sulla base di una serie di criteri sia tecnici che economici (v. "Analisi delle alternative di assetto e definizione della configurazione di piano").

La verifica e l'ottimizzazione, in termini di protezione dei bacini portuali dall'ingresso del moto ondoso, del layout che a conclusione del processo di analisi delle diverse alternative è risultato



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10 010 RR 011 -0 MAR							

quello ottimale, è stata quindi eseguita applicando un modello di agitazione ondosa più sofisticato (CG WAVE), che rispetto al VEGA tiene conto anche dei fenomeni di rifrazione, frangimento e attrito sul fondo.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10	010	RR	011	-0	MAR	

2 STUDIO PRELIMINARE DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO CON IL MODELLO VEGA

Il modello Vega, come precedentemente accennato, è in grado di simulare la propagazione di onde armoniche lineari in presenza dei fenomeni combinati di diffrazione e riflessione. Questi fenomeni sono regolati dall'equazione di Helmholtz che viene risolta dal modello numerico VEGA con la tecnica degli elementi di contorno (boundary elements), la quale richiede che venga discretizzato il contorno del dominio di calcolo in segmenti contigui. Le opere a gettata poste a difesa dell'imboccatura portuale e le banchine all'interno degli specchi d'acqua interni sono stati quindi schematizzate per mezzo di una serie di segmenti, ai quali è associato un valore appropriato del coefficiente di riflessione.

Ciascun segmento è stato a sua volta suddiviso in elementi di lunghezza compresa tra 1/6 ed 1/7 della lunghezza d'onda, assicurandosi in tal modo che in tutte le simulazioni vengano introdotte almeno 5 elementi (sorgenti) per ogni segmento considerato. L'altezza d'onda è stata calcolata in corrispondenza di circa 18.400.000 punti posti all'interno dell'area simulata. Le caratteristiche delle onde incidenti (altezza, direzione e periodo) sono state imposte in corrispondenza di appositi generatori di moto ondoso rettilinei esterni al dominio di calcolo ed aventi orientamento ortogonale alle direzioni delle onde simulate

Tali generatori di moto ondoso vengono interpretati dal modello come contorni di radiazione (la perturbazione riflessa dalle strutture portuali è libera di transitare per tale contorno irradiandosi nel campo, supposto infinito, posto all'esterno del dominio schematizzato). I risultati delle simulazioni sono rappresentati a colori e con curve di eguale agitazione ondosa. Essendo il modello lineare, i risultati sono stati rappresentati utilizzando il coefficiente di diffrazione che esprime il rapporto tra l'altezza d'onda calcolata nel punto e l'altezza d'onda incidente. Per ottenere il valore dell'altezza d'onda in un punto è sufficiente moltiplicare il coefficiente di diffrazione per il valore dell'altezza d'onda incidente nel punto considerato.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10	010	RR	011	-0	MAR	

3 PIATTAFORMA EUROPA – IMBOCCATURA NORD

3.1 Configurazioni esaminate ed ipotesi di calcolo

Al fine di condurre una analisi preliminare del grado di protezione del bacino interno della Piattaforma Europa dall'ingresso del moto ondoso associato a diverse configurazioni delle nuove opere esterne e dell'avamporto, sono state prese in considerazione dieci distinte soluzioni alternative le quali vengono di seguito brevemente descritte:

- Configurazione di progetto A (fig. 3.1): l'imboccatura portuale Nord presenta una configurazione del tipo "a bacino". E' costituita da un molo di sopraflutto (lungo circa 1140 m) intestato sulla nuova darsena Nord-Ovest e che si sviluppa in direzione Sud-Ovest curvando verso mezzogiorno in corrispondenza della testata e da un molo di sottoflutto radicato sulla estremità Nord dell'attuale diga della Meloria e che termina verso ponente dopo un tratto rettilineo lungo circa 450 m. L' imboccatura portuale è inoltre protetta da una barriera distaccata lunga circa 210 m ed orientata lungo la direzione Est-SudEst ÷ Ovest-NordOvest.
- Configurazione di progetto A BIS (fig. 3.2): la configurazione portuale è identica alla configurazione di progetto A, ma non è presente la barriera distaccata a protezione dell'imboccatura.
- Configurazione di progetto A TER (fig. 3.3): l'imboccatura portuale Nord presenta una configurazione del tipo "a bacino". E' costituita da un molo di sopraflutto identico a quello della configurazione A e da un molo di sottoflutto intestato sulla estremità Nord dell'attuale diga della Meloria che curva verso Nord-Ovest rivolgendo la convessità lato mare.
- Configurazione di progetto B (fig. 3.4): l'imboccatura portuale Nord presenta una configurazione del tipo "a moli convergenti". E' costituita da un molo di ponente (lungo circa 1180 m) intestato sulla nuova darsena Nord-Ovest e da un molo di levante (lungo circa 890 m) che termina a circa 160 m dall'estremità Nord della diga della Meloria lasciando un varco per il ricambio delle acque. I moli foranei presentano una accentuata



Titolo Elab	Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	0-	MAR		

convessità lato mare per poter ottenere all'interno dello specchio d'acqua protetto un ampio cerchio di evoluzione per la manovra delle navi. Il molo di ponente si distacca dall'andamento rettilineo della banchina per ampliare il bacino protetto e schermare anche la zona di foce del Calambrone.

- Configurazione di progetto C (fig. 3.5): l'imboccatura portuale Nord presenta una configurazione del tipo "a moli convergenti". E' costituita da un molo di ponente (lungo circa 1140 m) identico a quello della configurazione A e da un molo di levante (lungo circa 670 m) che termina a circa 160 m dall'estremità Nord della diga della Meloria lasciando un varco per il ricambio delle acque. All'interno dell'imboccatura portuale sulla diga di levante si intesta un molo foraneo che si estende lungo la direzione Nord-Sud a protezione delle darsene interne.
- Configurazione di progetto D (fig. 3.6): è una variante della configurazione di progetto B che prevede la realizzazione di una barriera distaccata (lunga circa 310 m) con orientamento lungo la direzione 156°N a protezione dell'imboccatura portuale dalle mareggiate da libeccio, nonché il radicamento del molo di levante sulla estremità Nord della diga della Meloria. Anche in questa configurazione il molo di ponente si distacca dal filo banchina per ampliare il bacino protetto e schermare anche la zona di foce del Calambrone.
- Configurazione di progetto D BIS (fig. 3.7): è una variante della configurazione di progetto D che prevede la rotazione (fino a 160°N) ed il prolungamento di 50 m in asse della barriera distaccata a protezione dell'imboccatura portuale dalle mareggiate da libeccio e da ponente. Anche in questa configurazione il molo di ponente si distacca dal filo banchina per ampliare il bacino protetto e per schermare anche la zona di foce del Calambrone.
- Configurazione di progetto E (fig. 3.8): è una variante della configurazione di progetto A TER in cui il molo di sopraflutto presenta una convessità lato mare più accentuata per poter ottenere all'interno uno specchio d'acqua protetto più ampio. Infatti, il molo di ponente si distacca dal filo banchina per lo scopo anzidetto e per schermare la zona di foce del Calambrone.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10 010 RR 011 -0 MAR							

- Configurazione di progetto E BIS (fig. 3.9): è una variante della configurazione di progetto A BIS in cui il molo di sopraflutto presenta una convessità lato mare più accentuata per poter ottenere all'interno uno specchio d'acqua protetto più ampio. Infatti, il molo di ponente si distacca dal filo banchina per lo scopo anzidetto e schermare la zona di foce del Calambrone.
- Configurazione di progetto F (fig. 3.10): presenta una disposizione planimetrica analoga alla E BIS, ma al fine di massimizzare l'area interna del bacino protetto, è stata accentuata la convessità lato mare della diga sopraflutto ed è stato spostato verso sud il molo di sottoflutto

Nella Tab. 3.1 vengono riportate in sintesi le principali caratteristiche geometriche delle configurazioni progettuali sopra descritte.

	Α	A bis	A ter	В	С	D	D bis	Е	E bis	F
Lunghezza moli da realizzare (m)	2335	2125	2070	2080	2600	2435	2595	2160	2215	2495
Area avamporto (milioni di m²)	0.924	0.924	0.971	1.316	0.122	1.184	1.184	1.081	1.034	1.765
Diametro cerchio evoluzione (m)	700	700	700	900	700	800	800	800	800	900

Tab. 3.1 – Principali caratteristiche geometriche delle configurazioni progettuali esaminate

I coefficienti di riflessione R delle opere perimetrali sono stati scelti in funzione delle caratteristiche riflettenti delle stesse, variabili a seconda della tipologia adottata (figg. 3.1÷3.10), come riportato nel seguito ed indicato nelle suddette figure:

- opere a pareti verticali riflettenti R = 0.90;
- opere a scogliera R = 0.35;
- limite del dominio fluido di calcolo R = 0.01.

Operando a favore della sicurezza, tutte le simulazioni sono state condotte considerando le pareti delle banchine interne al porto completamente riflettenti ad eccezione del lato affacciato all'avamporto del terrapieno adiacente alla diga nord che è realizzato in massi naturali. A causa delle estese dimensioni del dominio di calcolo, l'applicazione del modello è stata effettuata semplificando la geometria all'interno del porto ed assumendo come limiti del dominio fluido

10_010_RR_0110_MAR_Agitazione interna	Pagina 6
---------------------------------------	----------



Titolo Elab	Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		

due pareti aventi il minimo coefficiente di riflessione (R=0.01). Inoltre è stata assegnata una profondità media del bacino portuale costante pari a -15 m rispetto al l.m.m.

Si vuole sottolineare che i coefficienti di riflessione sono stati mantenuti costanti approssimandoli prudenzialmente in eccesso, assumendo i valori di riflessione corrispondenti al periodo d'onda più alto utilizzato nelle simulazioni, anziché considerarli variabili in funzione del periodo d'onda incidente come in realtà accade, operando quindi a favore della sicurezza. I valori sopra riportati sono, inoltre, congruenti con quelli desunti dalla letteratura specializzata con riferimento a pubblicazioni relative alle numerose esperienze su modelli fisici effettuate nel passato. Infine è importante ricordare che il valore del coefficiente di riflessione R, per le pareti inclinate, si riduce al diminuire della pendenza. Per le scogliere scabre e porose, ad esempio, si può far riferimento alla formula di Allsop e Channel in funzione del parametro di surf relativo al periodo di picco ξ p:

$$R = 0.125 \xi p^{0.70}$$
 {1}

$$\xi p = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_S}{g\Gamma_p^2}}}$$
 {2}

dove:

- Hs = altezza dell'onda significativa incidente
- Tp = periodo di picco

 α = angolo di inclinazione della parete

mentre per pareti impermeabili e lisce si utilizza la formula proposta da Seelig (1983) ed aggiornata da Allsop e Channell (1989):

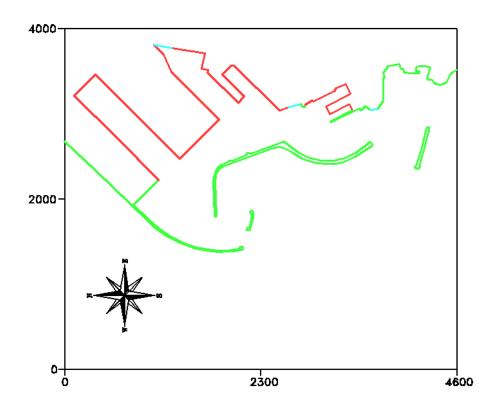
R =
$$a \xi p^2/(h + \xi p^2)$$
 {3} con a = 0.94 e h = 4.80

Assumendo che la ripidità di picco dell'onda (al denominatore della {2}) varia tipicamente tra 0.02 e 0.05 e che le scarpate hanno pendenze tra 1:1.3 e 1:3, il coefficiente risulta variabile tra 0.15 e 0.35.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10 010 RR 011 -0 MAR							

Porto di Livorno - Configurazione di progetto A Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con l'indicazione dei coefficienti di riflessione

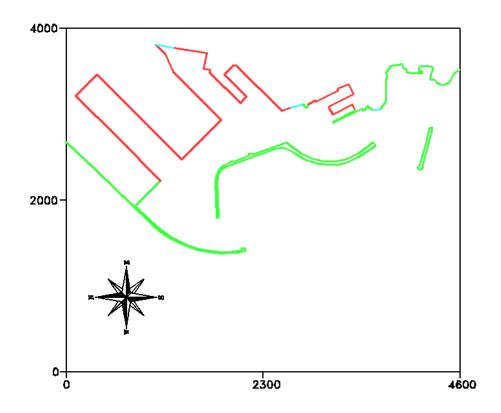
Coefficienti	di riflessione
	R=0.90
	R=0.35
	R=0.01

Fig. 3.1



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10 010 RR 011 -0 MAR							

Porto di Livorno - Configurazione di progetto A BIS Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con l'indicazione dei coefficienti di riflessione

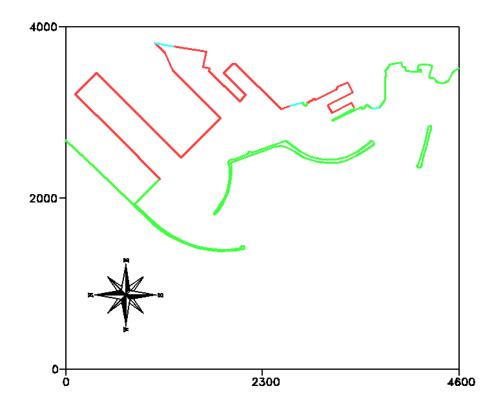
Coefficienti	di riflessione
	R=0.90 R=0.35
	R=0.01

Fig. 3.2



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		

Porto di Livorno - Configurazione di progetto A TER Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con l'indicazione dei coefficienti di riflessione

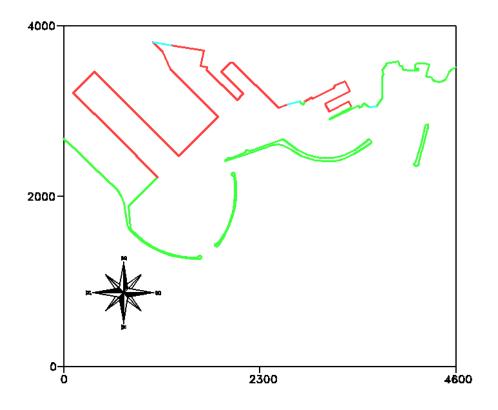
Coefficienti	di riflessione
	R=0.90
	R=0.35
	R=0.01

Fig. 3.3



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10 010 RR 011 -0 MAR							

Porto di Livorno - Configurazione di progetto B Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con l'indicazione dei coefficienti di riflessione

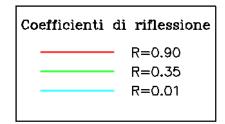
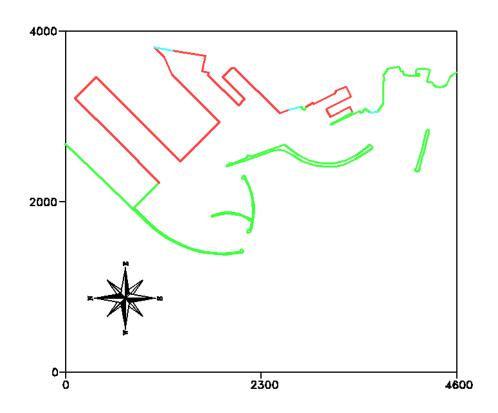


Fig. 3.4



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10 010 RR 011 -0 MAR							

Porto di Livorno - Configurazione di progetto C Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con l'indicazione dei coefficienti di riflessione

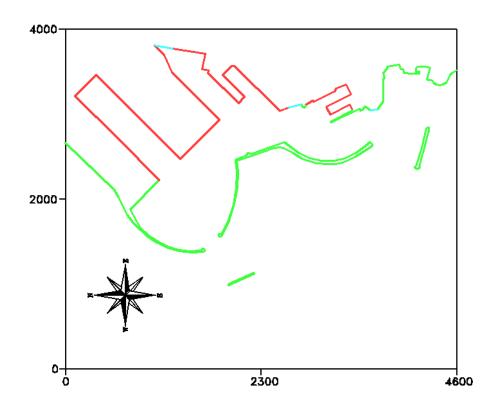
Coefficienti	di riflessione
	R=0.90
-	- R=0.35
	R=0.01

Fig. 3.5



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10 010 RR 011 -0 MAR							

Porto di Livorno - Configurazione di progetto D Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con l'indicazione dei coefficienti di riflessione

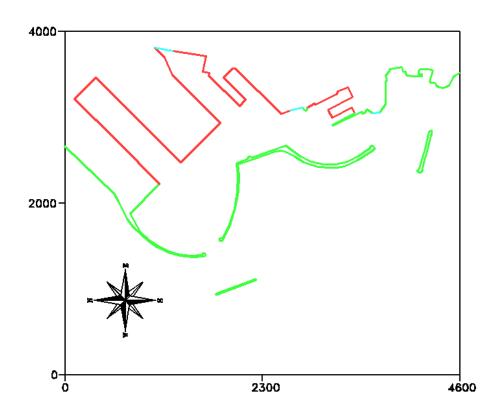
Coefficienti	di riflessione
	- R=0.90
	R=0.35
-	R=0.01

Fig. 3.6



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		

Porto di Livorno - Configurazione di progetto D BIS Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con l'indicazione dei coefficienti di riflessione

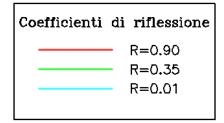
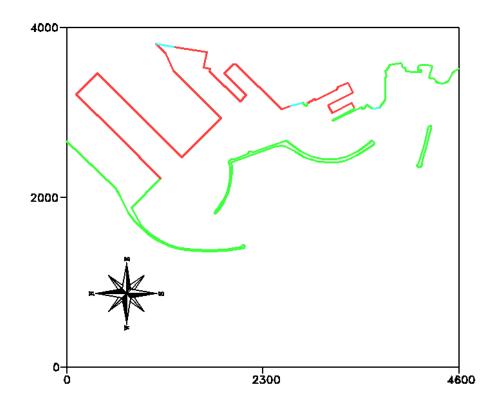


Fig. 3.7



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10 010 RR 011 -0 MAR						

Porto di Livorno - Configurazione di progetto E Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con l'indicazione dei coefficienti di riflessione

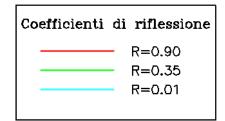
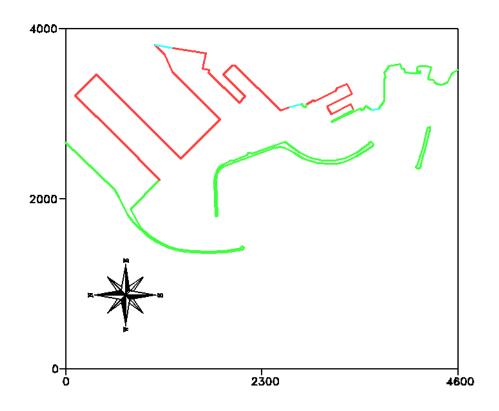


Fig. 3.8



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10 010 RR 011 -0 MAR						

Porto di Livorno - Configurazione di progetto E BIS Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con l'indicazione dei coefficienti di riflessione

Coefficienti	di riflessione
	R=0.90 R=0.35 R=0.01
	N-0.01

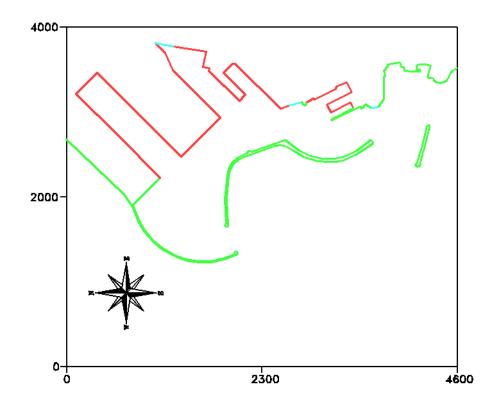
Fig. 3.9

10_010_RR_0110_MAR_Agitazione interna		Pagina 16
---------------------------------------	--	-----------



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10	010	RR	011	-0	MAR	

Porto di Livorno - Configurazione di progetto F Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con l'indicazione dei coefficienti di riflessione

Profondita' del bacino: 15 m

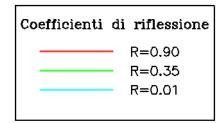


Fig. 3.10



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10	010	RR	011	-0	MAR	

3.2 Simulazione degli eventi di moto ondoso

I valori del periodo di picco e della direzione degli eventi simulati sono stati scelti in relazione agli stati di mare ritenuti rappresentativi ai fini dell'agitazione portuale interna, analizzando i risultati riportati nello studio meteomarino. Per quanto riguarda le direzioni di provenienza delle onde in corrispondenza dell'imboccatura portuale da utilizzare nelle simulazioni, si sono preventivamente individuati i settori di attacco degli stati di mare più gravosi ai fini del presente studio. Dall'elaborazione statistica delle mareggiate ricostruite al largo di Livorno si ricava che l'altezza d'onda associata al tempo di ritorno annuale (ovvero il valore dell'altezza d'onda che presenta una frequenza di accadimento ritenuta significativa ai fini dell'agitazione portuale) per il settore Sud-Ovest (210 ÷ 250°N) risulta pari a circa 4.50 m, mentre per il settore di mezzogiorno 170-210°N tale valore si riduce circa a 2.50 m.

Dall'analisi del clima ondametrico sotto costa ma a profondità abbastanza elevata (ottenuto mediante l'applicazione di specifici modelli matematici, vedi studio meteomarino) si osserva che nel sito in esame gli stati di mare più frequenti (prevalenti) provengono dai settori di libeccio e di ponente, dai quali risultano provenire anche le mareggiate più intense (dominanti). In generale si riscontra un buona frequenza di accadimento anche per gli eventi di mezzogiorno provenienti da 190°N, i quali pur essendo associati ad altezze d'onda ben inferiori rispetto a quelle provenienti dai precedenti settori, per alcune configurazioni portuali prese in esame possono dare origine a livelli di agitazione gravosi. Sempre sullo studio meteomarino è stato verificato che in prossimità della nuova imboccatura portuale, a causa della presenza dei fondali delle secche della Melodia, l'intensità degli eventi di moto ondoso si riduce considerevolmente. Nella tabella 3.2 sono riepilogate le caratteristiche del moto ondoso in prossimità dell'imboccatura portuale per diverse direzioni di provenienza quali risultano dall'applicazione del metodo della rifrazione inversa spettrale (che non tiene conto degli effetti dissipativi) e di quello, più attendibile, denominato SWAN, che tiene conto anche dei predetti effetti. Si osservi che tutto il settore compreso tra 195°N e 225°N è caratterizzato da stati di mare poco frequenti e di intensità relativamente modesta.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10	010	RR	011	-0	MAR	

ONDE ESTREME AL LARGO			ONDE ESTREME SOTTO COSTA (punto P)			
	T _R =1 anno	T _R =50 anni	MODELLO	T _R =1 anno	T _R =50 anni	
sw	H _{s0} =4.50m; T _P =9.6s	₀ =4.50m; T _P =9.6s H _{s0} =7.3m; T _P =12.0s		H _s =3.60m; T _P =9.6s; dir=226°N	H _s =5.70m; T _P =12.0s; dir=228°N	
230° N	230° N H _{s0} =4.50HI; T _P =9.6S	П _{S0} =7.3III, ТР=12.05	SWAN	H _s =3.16m; T _P =9.6s; dir=216°N	H _s =4.23m; T _P =12.4s; dir=209°N	
S	H _{s0} =2.50m; T _P =7.0s	H _{s0} =5.40m; T _P =10.5s	INV. SPETTRALE	H _s =2.22m; T _P =7.0s; dir=195°N	H _s =4.81m; T _P =10.5s; dir=195°N	
190° N	H _{s0} =5.40III; T _P =10.5S	SWAN	H _s =2.00m; T _P =7.36s; dir=195°N	H _s =3.78m; T _P =10.9s; dir=195°N		

Tab. 3.2 – Caratteristiche del moto ondoso al largo ed all'imboccatura nord del porto di Livorno in condizioni ordinarie ed estreme.

Considerando (in prima approssimazione) che la sicurezza all'attracco delle navi portacontainers è garantita se l'intensità dell'agitazione lungo le banchine d'ormeggio non supera 1 m di altezza, è possibile calcolare i valori del coefficiente k ammissibili lungo le banchine:

•
$$k_{amm} = \frac{H_{amm}}{H_{sotto-costa}^{Tr=1 anno}} = \frac{1}{3} = 0.33$$
 per gli eventi provenienti dal settore Sud-Ovest

•
$$k_{amm} = \frac{H_{amm}}{H_{sotto-costa}^{Tr=1\,anno}} = \frac{1}{2} = 0.5$$
 per gli eventi provenienti dal settore di mezzogiorno

Nel presente studio di penetrazione del moto ondoso all'interno del bacino portuale si è scelto di simulare le direzioni 190°N per il settore di mezzogiorno, 210°N e 250°N per i settori di libeccio e ponente ed infine la direzione 230°N (intermedia tra le ultime due). Alle direzioni di provenienza così determinate sono state associate le caratteristiche di attacco del moto ondoso (altezza significativa e periodo significativo) ritenute rappresentative delle condizioni di tempesta raggiungibili nel paraggio in esame. Essendo il codice in oggetto un modello matematico lineare, le simulazioni degli eventi di moto ondoso sono state condotte in forma parametrica imponendo un valore unitario dell'altezza d'onda incidente. Nella Tab. 3.3 sono riportate le condizioni di moto ondoso riprodotte numericamente con il modello VEGA per verificare l'agitazione residua interna per ciascuna configurazione portuale esaminata:



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10	010	RR	011	-0	MAR	

	Α	A bis	A ter	В	С	D	D bis	E	E bis	F
Dir=190°N T=8.0 s	Х			Х	Х	Х				
Dir=190°N T=10.0 s	Х	Х		Х	Х	Х		Х		Х
Dir=210°N T=8.0 s		Х				Х				Х
Dir=210°N T=10.0 s		Х	Х			Х		Х	х	Х
Dir=210°N T=12.0 s		Х				Х				
Dir=230°N T=8.0 s	Х			Х	Х	Х				
Dir=230°N T=10.0 s	Х	Х		Х	Х	Х	х			Х
Dir=250°N T=8.0 s	Х			Х	Х	Х				
Dir=250°N T=10.0 s	Х			Х	Х	Х	х			
Dir=250°N T=12.0 s	Х			Х	Х	Х				

Tab. 3.3 - Simulazioni effettuate con il modello VEGA

Dall'analisi delle simulazioni effettuate (e riportate in sintesi nella Tab. 3.2), è possibile accertare quali tra le configurazioni portuali esaminate offrono un adeguato grado di sicurezza alla darsena della Piattaforma Europa ed alla zona dell'avamporto dove sono stati collocati gli attracchi per le petroliere, verificando che lungo le banchine d'ormeggio, i valori del k_{medio} calcolati numericamente col modello VEGA si mantengano inferiori al k_{amm} .

\wedge
Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10	010	RR	011	-0	MAR	

3.3 Analisi dei risultati

I risultati delle elaborazioni, allegati in forma grafica, indicano la distribuzione planimetrica dei coefficienti di agitazione (moltiplicatori dell'altezza d'onda incidente) con una scala di intensità cromatica avente una risoluzione di 0.1. Per chiarezza sono evidenziate solo le curve di isoaltezza d'onda di $0.1 \div 0.3 \div 0.5$. Essendo il modello lineare, i risultati sono stati rappresentati utilizzando il coefficiente di diffrazione k (altezza d'onda relativa) che esprime il rapporto tra l'altezza d'onda calcolata nel punto e l'altezza d'onda incidente. Per ottenere il valore dell'altezza d'onda in un punto è sufficiente moltiplicare il coefficiente di diffrazione per l'effettiva altezza dell'onda incidente all'imboccatura esterna.

I valori di output sono stati elaborati per tutte le simulazioni effettuate con il programma di interpolazione "SURFER" che restituisce i dati come curve di uguale intensità dell'agitazione ondosa e/o scale cromatiche differenziate. I risultati delle simulazioni (da fig. 3.11 a 3.56) mostrano l'irradiazione al largo del campo d'onda riflesso e l'attenuazione di energia nella propagazione all'interno delle aree portuali. Nella configurazione di progetto il moto ondoso incidente viene progressivamente attenuato dalla diffrazione operata dall'imboccatura delimitata dalle opere esterne di difesa e dalla dissipazione di energia causata dalle opere a scogliera che nel modello sono state riprodotte utilizzando opportuni coefficienti di riflessione. Tra le configurazioni esaminate, solo quelle presentano valori del $k_{\rm medio} < k_{\rm amm}$ lungo le banchine offrono un adeguato grado di sicurezza all'attracco delle navi portacontainers. Di seguito viene riportata l'analisi dei risultati per ciascuna configurazione simulata:

• Configurazione A (figg. 3.11 ÷ 3.17): i livelli di agitazione più intensi all'interno dell'avamporto si verificano in occorrenza degli eventi di moto ondoso provenienti da mezzogiorno (che comunque presentano una frequenza di accadimento complessiva ben inferiore rispetto a quelli da libeccio e ponente), nonostante la presenza della barriera distaccata posta a protezione dell'imboccatura. Al verificarsi di tali mareggiate l'agitazione ondosa rimane comunque circoscritta in tale area e non penetra nell'area prospiciente le nuove banchine Sud-Est e Nord-Ovest della darsena della Piattaforma Europa, dove si riscontrano valori molto modesti dell'altezza d'onda relativa. Come è possibile osservare



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10 010 RR 011 -0 MAR						

dalle figg. 3.13 ÷ 3.17 nel complesso la configurazione di progetto A offre un efficace ridosso anche in corrispondenza delle mareggiate da libeccio e da ponente (230°N e 250°N). Nella Tab. 3.4 sono riportati i valori medi e quelli massimi del coefficiente di agitazione k, calcolati con il modello VEGA lungo le banchine d'ormeggio.

Configurazione A	Banch	ina SE	Banchina NO		
Configurazione A	k _{max}	\mathbf{k}_{medio}	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	
Dir=190°N T=8.0 s	0.043	0.023	0.072	0.033	
Dir=190°N T=10.0 s	0.139	0.067	0.199	0.115	
Dir=230°N T=8.0 s	0.228	0.143	0.200	0.161	
Dir=230°N T=10.0 s	0.239	0.126	0.234	0.139	
Dir=250°N T=8.0 s	0.097	0.047	0.099	0.060	
Dir=250°N T=10.0 s	0.110	0.053	0.082	0.052	
Dir=250°N T=12.0 s	0.183	0.083	0.147	0.070	

Tab. 3.4 – Configurazione A: valori del coefficiente k calcolati lungo le banchine NO e SE

• Configurazione A bis (figg. 3.18 ÷ 3.22): dall'analisi della simulazione dell'evento proveniente da mezzogiorno (fig. 3.18) si osserva che i livelli di agitazione rimangono pressocchè invariati rispetto a quelli ottenuti per la configurazione A con l'imboccatura protetta dalla barriera. Se ne deduce che la barriera distaccata apporta benefici (molto limitati) solamente nell'area dell'avamporto. Pertanto, per quanto concerne l'agitazione portuale interna, la configurazione di progetto A bis in quanto sicuramente più economica, risulta preferibile rispetto alla configurazione A. Per la configurazione in esame sono state effettuate anche le simulazioni degli stati di mare provenienti da 210°N (figg. 3.19 ÷ 3.21), i quali, pur essendo caratterizzati da minor intensità rispetto alle altre direzione esaminate per la soluzione A, in generale originano livelli di agitazione più intensi, anche se ovunque accettabili. Nella Tab. 3.5 sono riportati i valori medi e quelli massimi del coefficiente k, calcolati con il modello VEGA lungo le banchine d'ormeggio.

Configurazione A bis	Banch	ina SE	Banchina NO		
Configurazione A bis	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	
Dir=190°N T=10.0 s	0.182	0.083	0.225	0.103	
Dir=210°N T=8.0 s	0.351	0.211	0.441	0.336	
Dir=210°N T=10.0 s	0.371	0.206	0.409	0.280	
Dir=210°N T=12.0 s	0.484	0.296	0.382	0.239	
Dir=230°N T=10.0 s	0.196	0.104	0.196	0.126	

Tab. 3.5 – Configurazione A bis: valori del coefficiente k calcolati lungo le banchine NO e SE

10_010_RR_0110_MAR_Agitazione interna	Pagina 22
---------------------------------------	-----------



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10 010 RR 011 -0 MAR						

Per la sola configurazione A bis è stato esaminato anche il grado di agitazione nella darsena per navi porta-contenitori nell'ipotesi di adottare banchine di tipo antiriflettente con coefficiente di riflessione pari a 0.6 (fig. 3.23). Si è constatato che in tali condizione il grado di agitazione si abbatte drasticamente. Per le altre configurazioni tale verifica non è stata mai effettuata, ma il risultato va tenuto presente ai fini dell'ottimizzazione della configurazione da prescegliere.

• Configurazione A ter (fig. 3.24): la configurazione in esame è stata sottoposta ad un evento di moto ondoso proveniente dalla direzione 210°N, in quanto in relazione all'orientamento dell'imboccatura, le onde provenienti da tale direzione risultano in grado di penetrare più efficacemente all'interno del bacino portuale. Dal confronto della fig. 3.24 con la fig. 3.20 relativa alla configurazione A bis, si osserva che il molo di sottoflutto di forma convessa lato mare non contribuisce a ridurre i livelli di agitazione interna ma bensì può generare fenomeni di riflessione ondosa all'esterno dell'imboccatura che possono rendere leggermente più difficoltosa la manovra di ingresso\uscita delle navi. In contrapposizione a tale svantaggio sta peraltro la maggiore ampiezza degli specchi acquei dell'avamporto, che facilita le manovre all'interno di questo. Nella Tab. 3.6 sono riportati i valori medi e quelli massimi del coefficiente k, calcolati con il modello VEGA lungo le banchine d'ormeggio.

Configurations A tor	Banchina SE		Banchina NO	
Configurazione A ter	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	\mathbf{k}_{max}	k _{medio}
Dir=210°N T=10.0 s	0.371	0.202	0.427	0.297

Tab. 3.6 – Configurazione A ter: valori del coefficiente k calcolati lungo le banchine NO e SE

• Configurazione B (figg. 3.25 ÷ 3.31): Dall'esame dei risultati delle elaborazioni svolte si osserva che, all'interno del bacino portuale si verifica comunque una rilevante penetrazione del moto ondoso per tutte le direzioni investigate. In particolare anche gli eventi di moto ondoso provenienti dalle direzioni prevalenti (230° e 250°N) danno origine a livelli di agitazione non accettabili. Nella Tab. 3.7 sono riportati i valori medi e quelli massimi del coefficiente k, calcolati con il modello VEGA lungo le banchine d'ormeggio.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10 010 RR 011 -0 MAR						

Configurazione B	Banch	ina SE	Banchina NO		
Configurazione B	k _{max}	\mathbf{k}_{medio}	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	
Dir=190°N T=8.0 s	0.750	0.348	0.597	0.382	
Dir=190°N T=10.0 s	0.631	0.345	0.641	0.394	
Dir=230°N T=8.0 s	0.816	0.466	0.656	0.349	
Dir=230°N T=10.0 s	0.755	0.487	0.641	0.387	
Dir=250°N T=8.0 s	1.185	0.641	0.763	0.435	
Dir=250°N T=10.0 s	0.977	0.662	1.062	0.466	
Dir=250°N T=12.0 s	0.842	0.619	0.852	0.417	

Tab. 3.7 - Configurazione B: valori del coefficiente k calcolati lungo le banchine NO e SE

• Configurazione C (figg. 3.32 ÷ 3.38): i livelli di agitazione più intensi all'interno dell'avamporto sono originati dagli eventi di moto ondoso provenienti da mezzogiorno. In occorrenza di tali mareggiate si osservano elevati valori dell'altezza d'onda relativa anche a ridosso delle banchine a causa della penetrazione del moto ondoso attraverso il varco sul molo di ponente. Il molo foraneo interno all'avamporto contribuisce notevolmente a ridurre l'agitazione ondosa provocata dalle onde provenienti dalle direzioni prevalenti (230° e 250°N). Nella Tab. 3.8 sono riportati i valori medi e quelli massimi del coefficiente k, calcolati con il modello VEGA lungo le banchine d'ormeggio.

Configurazione C	Banch	ina SE	Banchina NO		
Configurazione C	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	
Dir=190°N T=8.0 s	0.469	0.217	0.441	0.244	
Dir=190°N T=10.0 s	0.396	0.225	0.609	0.268	
Dir=230°N T=8.0 s	0.245	0.140	0.238	0.152	
Dir=230°N T=10.0 s	0.228	0.114	0.236	0.134	
Dir=250°N T=8.0 s	0.134	0.064	0.133	0.073	
Dir=250°N T=10.0 s	0.116	0.064	0.130	0.069	
Dir=250°N T=12.0 s	0.141	0.076	0.178	0.094	

Tab. 3.8 - Configurazione C: valori del coefficiente k calcolati lungo le banchine NO e SE

• Configurazione D (figg. 3.39 ÷ 3.48): a causa dell'orientamento dell'imboccatura ed alla posizione della barriera distaccata, sia le onde di libeccio provenienti da 210°N che quelle di ponente provenienti da 250°N penetrano all'interno del bacino portuale dando origine a livelli di agitazione intensi. Valori meno elevati del coefficiente di agitazione k si riscontrano in occorrenza degli eventi provenienti da mezzogiorno. Dall'analisi delle simulazioni effettuate (fig. 3.39 ÷ 3.48) si osserva che la barriera distaccata nella configurazione in esame offre un efficace ridosso solamente nei confronti degli eventi provenienti da 230°N.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10 010 RR 011 -0 MAR						

Nella Tab. 3.9 sono riportati i valori medi e quelli massimi del coefficiente k, calcolati con il modello VEGA lungo le banchine d'ormeggio.

Configurations D	Banch	Banchina SE		ina NO
Configurazione D	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}
Dir=190°N T=8.0 s	0.237	0.145	0.178	0.100
Dir=190°N T=10.0 s	0.275	0.139	0.187	0.104
Dir=210°N T=8.0 s	0.441	0.259	0.281	0.192
Dir=210°N T=10.0 s	0.243	0.152	0.213	0.120
Dir=210°N T=12.0 s	0.345	0.221	0.391	0.215
Dir=230°N T=8.0 s	0.229	0.128	0.179	0.117
Dir=230°N T=10.0 s	0.307	0.172	0.266	0.125
Dir=250°N T=8.0 s	0.634	0.325	0.403	0.214
Dir=250°N T=10.0 s	0.552	0.378	0.496	0.241
Dir=250°N T=12.0 s	0.684	0.344	0.411	0.212

Tab. 3.9 - Configurazione D: valori del coefficiente k calcolati lungo le banchine NO e SE

• Configurazione D bis (figg. 3.49 ÷ 3.50): a seguito della variazioni apportate alla barriera posta a protezione dell'imboccatura (rispetto alla barriera della configurazione D), si osserva buona attenuazione del moto ondoso all'interno del bacino della Darsena Europa in occorrenza delle mareggiate provenienti dalle direzioni prevalenti di 230 e 250°N. Nella Tab. 3.10 sono riportati i valori medi e quelli massimi del coefficiente k, calcolati con il modello VEGA lungo le banchine d'ormeggio.

Configurazione D bis	Banchi	ina SE	Banchina NO		
Configurazione D bis	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	
Dir=230°N T=10.0 s	0.167	0.103	0.091	0.051	
Dir=250°N T=10.0 s	0.153	0.097	0.136	0.076	

Tab. 3.10 - Configurazione D bis: valori del coefficiente k calcolati lungo le banchine NO e SE

• Configurazione E (figg. 3.51 ÷ 3.52): i livelli di agitazione più intensi all'interno dell'avamporto della Darsena Europa sono originati dagli eventi di moto ondoso provenienti da mezzogiorno, mentre in corrispondenza delle banchine si riscontrano i valori più elevati del coefficiente di diffrazione in occorrenza delle mareggiate provenienti da 210°N, le quali in generale riescono a penetrare più in profondità attraverso lo specchio protetto. Nella Tab. 3.11 sono riportati i valori medi e quelli massimi del coefficiente k, calcolati con il modello VEGA lungo le banchine d'ormeggio della darsena della Piattaforma Europa.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10 010 RR 011 -0 MAR					

Configurazione D bis	Banch	ina SE	Banchina NO		
Configurazione D bis	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	
Dir=190°N T=10.0 s	0.185	0.087	0.200	0.102	
Dir=210°N T=10.0 s	0.505	0.277	0.407	0.296	

Tab. 3.11 - Configurazione E: valori del coefficiente k calcolati lungo le banchine NO e SE

Configurazione E bis (fig. 3.53): dall'analisi della simulazione effettuata si osserva che il molo di sottoflutto rettilineo orientato lungo la direzione Est-Ovest altera in maniera poco rilevante il campo d'onda all'interno del bacino della Piattaforma Europa osservato nella configurazione precedentemente esaminata (confr. fig. 3.52). Come è possibile osservare dai valori riportati nella Tab. 3.12, in corrispondenza delle banchine si osservano sostanzialmente gli stessi valori ricavati per la configurazione E precedentemente esaminata.

Configurazione D bis	Banch	ina SE	Banchina NO	
Configurazione D bis	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}
Dir=210°N T=10.0 s	0.512	0.287	0.376	0.275

Tab. 3.12 – Configurazione E bis: valori del coefficiente k calcolati lungo le banchine NO e SE

• Configurazione F (figg. 3.54 ÷ 3.57): i livelli di agitazione più intensi all'interno dell'avamporto della Piattaforma Europa si verificano in occorrenza degli eventi di moto ondoso provenienti da 190° e 210°N; quest'ultimi in particolare penetrano maggiormente all'interno dello specchio portuale e danno luogo ai valori più intensi del coefficiente di agitazione in corrispondenza delle banchine della darsena. Anche nel caso di attacco del moto ondoso dalla direzione di 230°N si riscontrano valori elevati dell'altezza d'onda relativa k_{max} lungo la banchina SudEst. Nella Tab. 3.13 sono riportati i valore medi e quelli massimi del coefficiente k, calcolati con il modello VEGA lungo le banchine d'ormeggio della darsena della Piattaforma Europa.

Configurazione F	Banchi	nina SE Banchina N		
Configurazione F	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}	\mathbf{k}_{max}	\mathbf{k}_{medio}
Dir=190°N T=10.0 s	0.252	0.123	0.185	0.080
Dir=210°N T=8.0 s	0.379	0.241	0.455	0.399
Dir=210°N T=10.0 s	0.486	0.289	0.467	0.337
Dir=230°N T=10.0 s	0.429	0.26	0.314	0.232

Tab. 3.13 – Configurazione F: valori del coefficiente k calcolati lungo le banchine NO e SE

10_010_RR_0110_MAR_Agitazione interna		Pagina 26
---------------------------------------	--	-----------

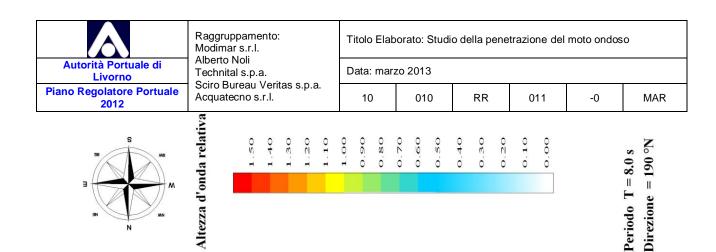
\wedge
Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

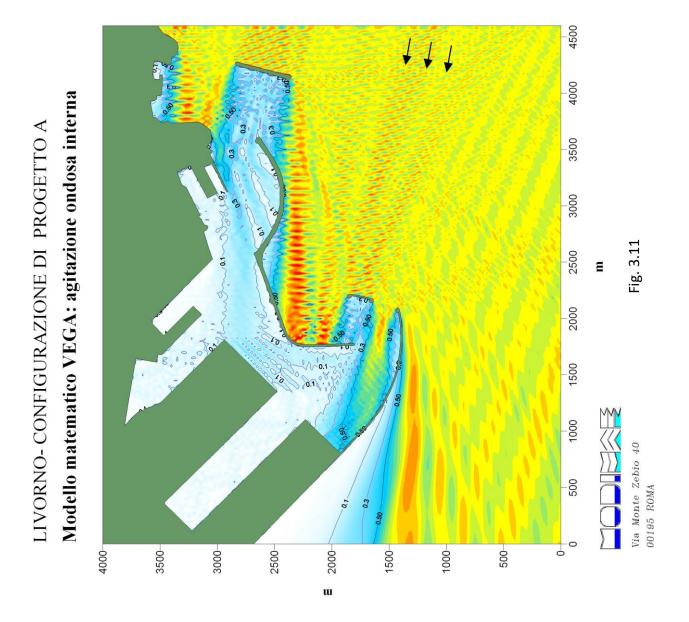
Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10 010 RR 011 -0 MAR					

3.4 Conclusioni

A conclusione delle simulazioni effettuate può affermarsi che relativamente alla configurazione delle opere di difesa e dell'avamporto della Darsena Europa le configurazioni che forniscono i risultati più soddisfacenti, in riferimento a tutti i parametri in gioco (navigabilità presso l'imboccatura e nell'avamporto, agitazione ondosa presso gli attracchi petroliferi e nella darsena della Piattaforma Europa), sono la A bis (o A ter), la D bis e la E.

Tenendo presente l'opportunità di mantenere buone condizioni anche in corrispondenza degli attracchi petroliferi, dai risultati di questa analisi preliminare, la configurazione delle opere di difesa esterne e dell'avamporto della Piattaforma Europa che meglio soddisfa le esigenze di un moderno ed efficiente terminal marittimo sono quelle corrispondenti alla soluzione E.







Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

1.50

1.40

1.10

1.10

0.80

0.80

0.60

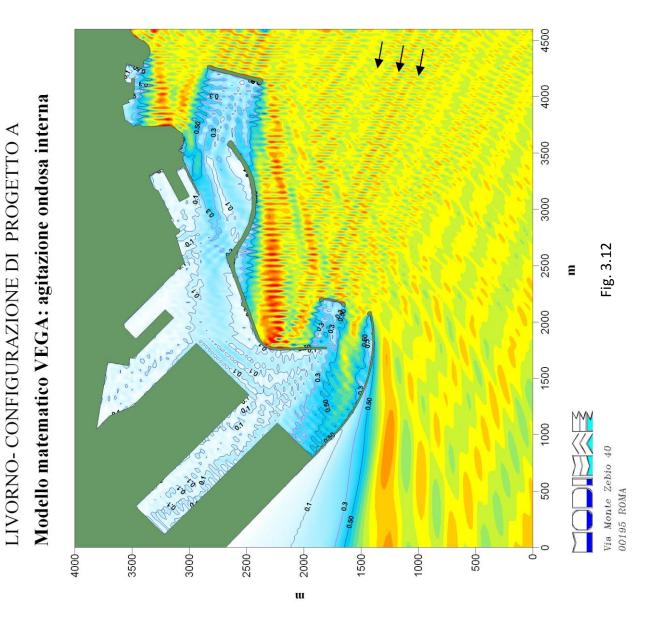
0.60

0.60

0.20

0.20

Periodo T = 10.0 sDirezione = 190 °N





Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10 010 RR 011 -0 M					MAR



Altezza d'onda relativa

1.50

1.40

1.20

1.10

0.50

0.50

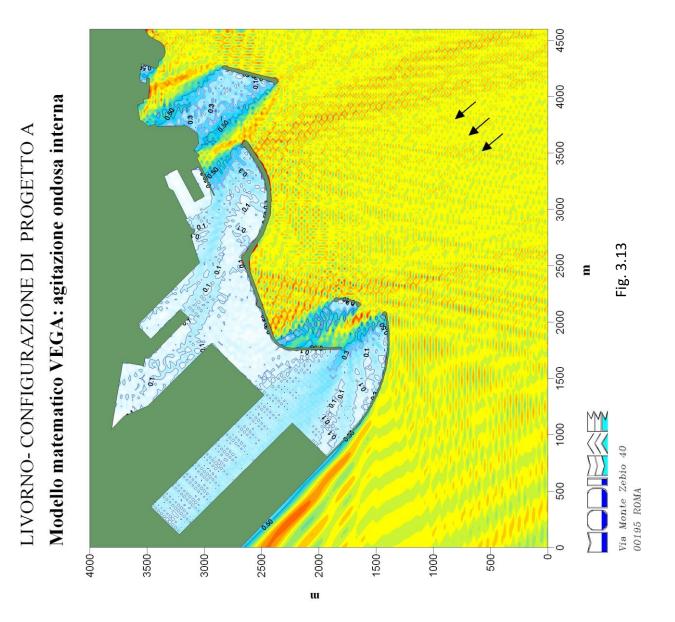
0.50

0.50

0.50

0.50

Periodo T = 8.0 sDirezione = 230 °N





Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

1.50

1.40

1.10

1.10

0.80

0.80

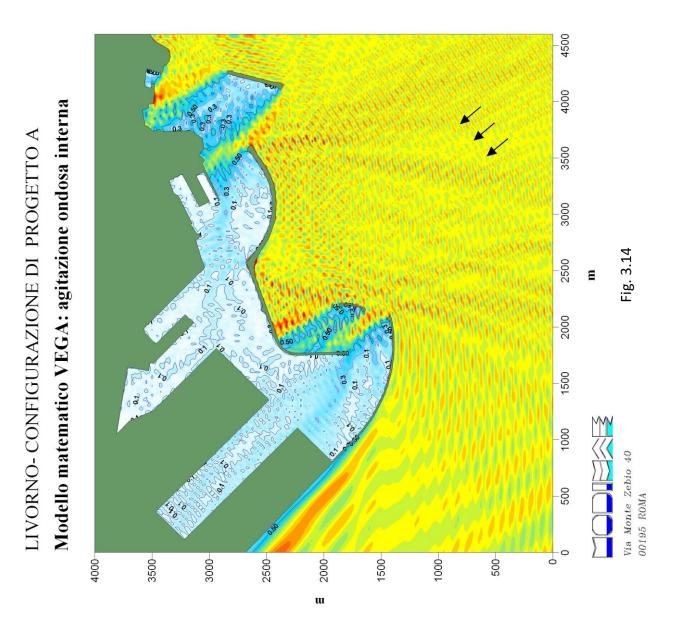
0.50

0.50

0.30

0.30

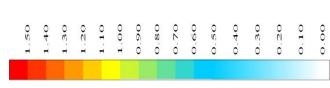
Periodo T = 10.0 sDirezione = 230 °N



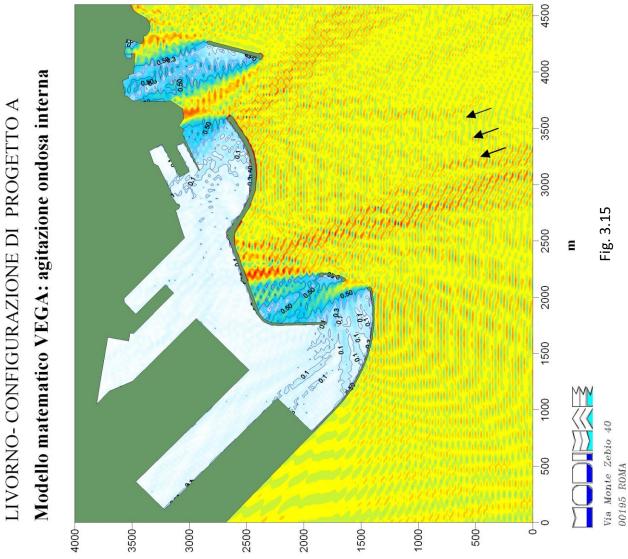


Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10 010 RR 011 -0 MAR					





Altezza d'onda relativa



w

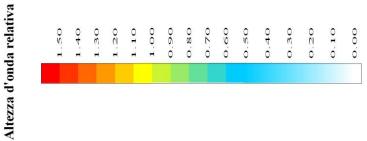
Direzione = 250 °N

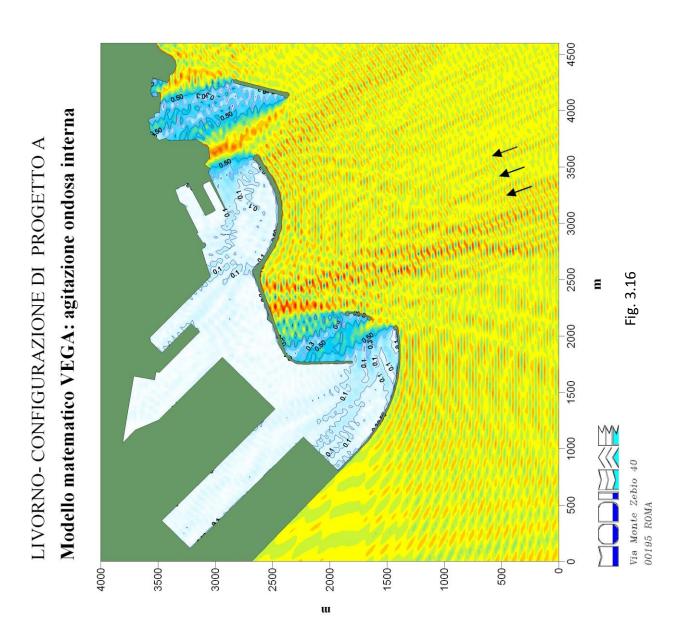
Periodo T = 8.0 s



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso								
Data: marzo 2013								
10	010	RR	011	-0	MAR			







Periodo T = 10.0 sDirezione = 250 °N



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso								
Data: marzo 2013								
10	010	RR	011	-0	MAR			



Altezza d'onda relativa

1.50

1.40

1.10

1.10

0.80

0.80

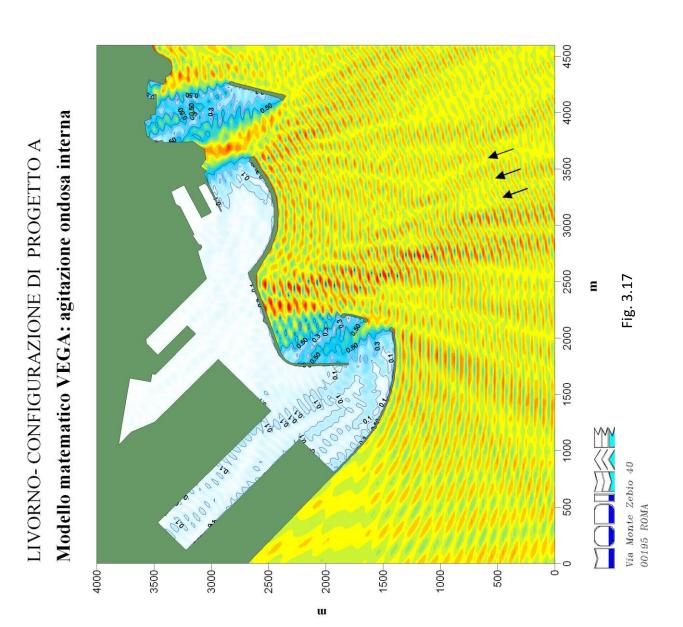
0.50

0.50

0.50

0.20

Periodo T = 12.0 sDirezione = 250 °N

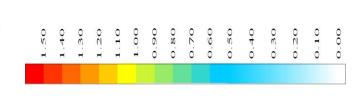




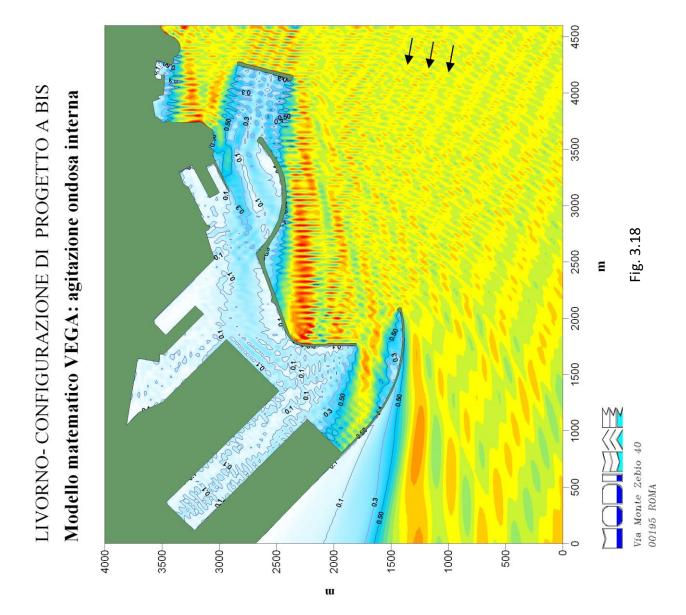
Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



Altezza d'onda relativa

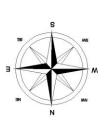


Periodo T = 10.0 s Direzione = 190 $^{\circ}$ N



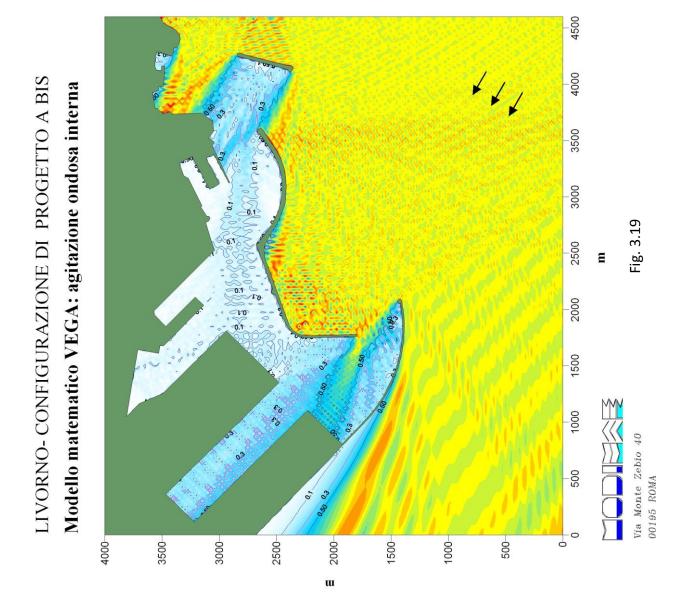


Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



0.90 0.70 0.60 0.50 1.10 0.40 0.30 0.20 1.00 08.0 0.10

Altezza d'onda relativa 0.00



Direzione = 210 °N

Periodo T = 8.0 s

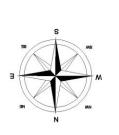


Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		

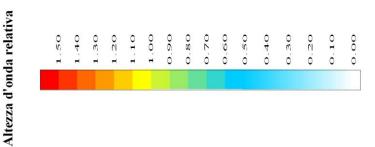
Direzione = 210 °N

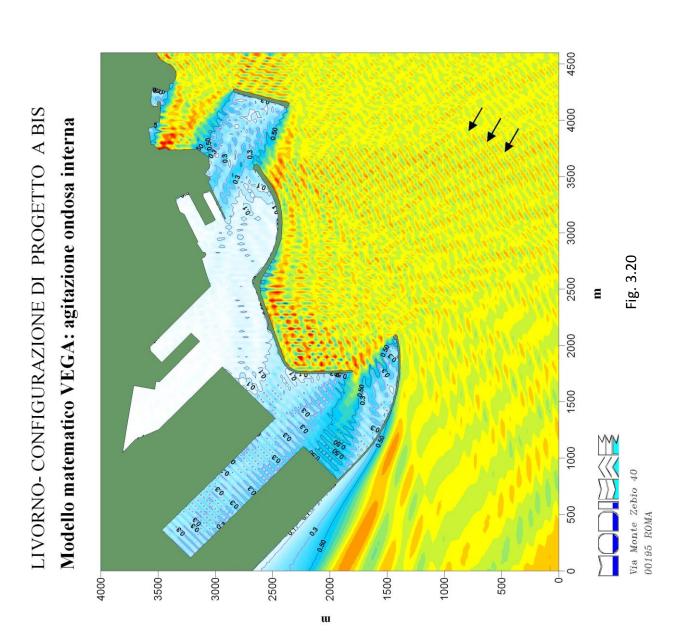
Pagina 37

Periodo T = 10.0 s



10_010_RR_011_-0_MAR_Agitazione interna







Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



Altezza d'onda relativa

1.50

1.40

1.10

1.10

0.80

0.80

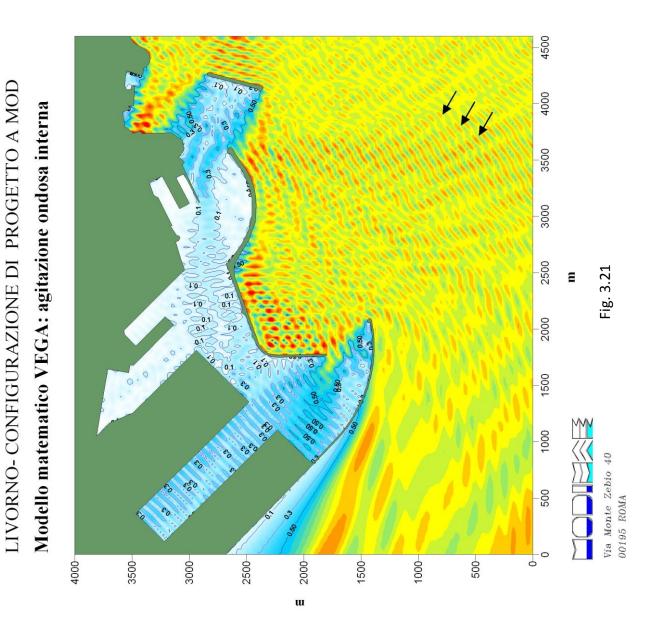
0.50

0.50

0.30

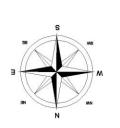
0.30

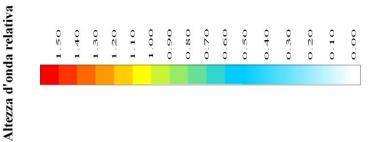
Periodo T = 12.0 sDirezione = 210 °N

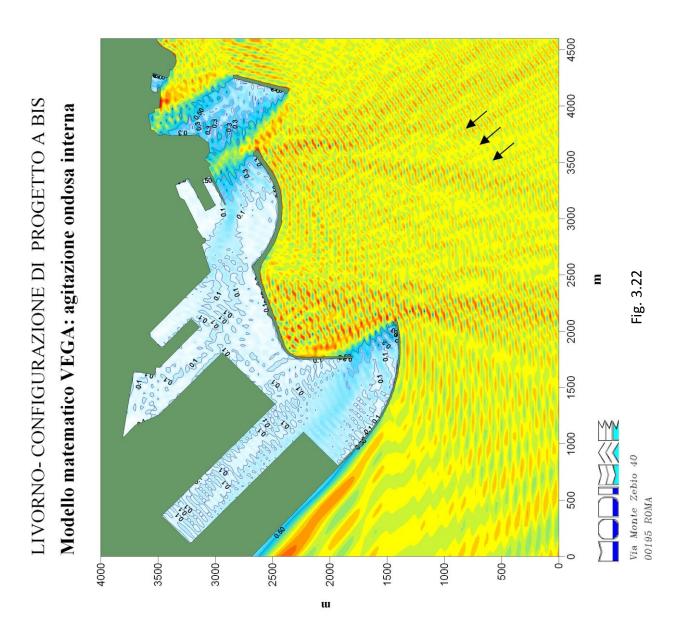




Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		







Direzione = 230 °N

Periodo T = 10.0 s



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		

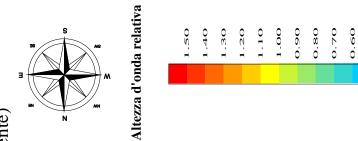
0.50

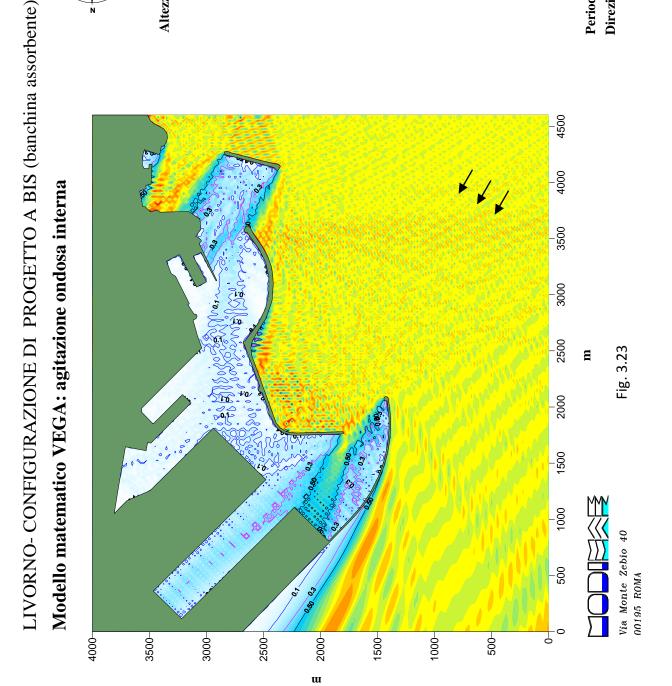
0.30

0.20

Periodo T = 8.0 sDirezione = 210 °N

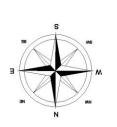
0.40

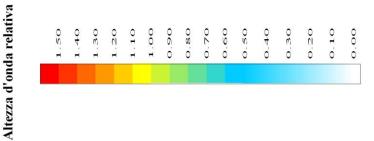




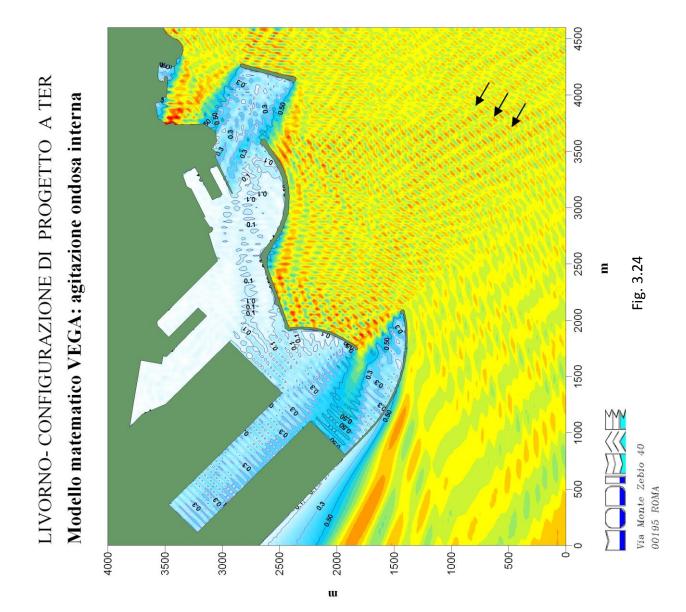


Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		





Periodo T = 10.0 sDirezione = 210 °N





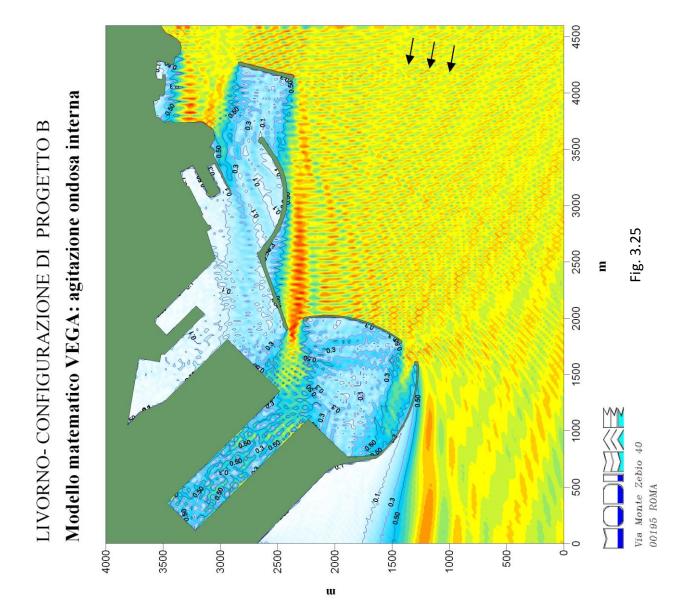
Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



Altezza d'onda relativa

1.50 1.40 1.130 1.100 1.100 0.800 0.700 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500

Periodo T = 8.0 sDirezione = 190 °N





Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



Altezza d'onda relativa

1.50

1.40

1.10

1.10

0.80

0.80

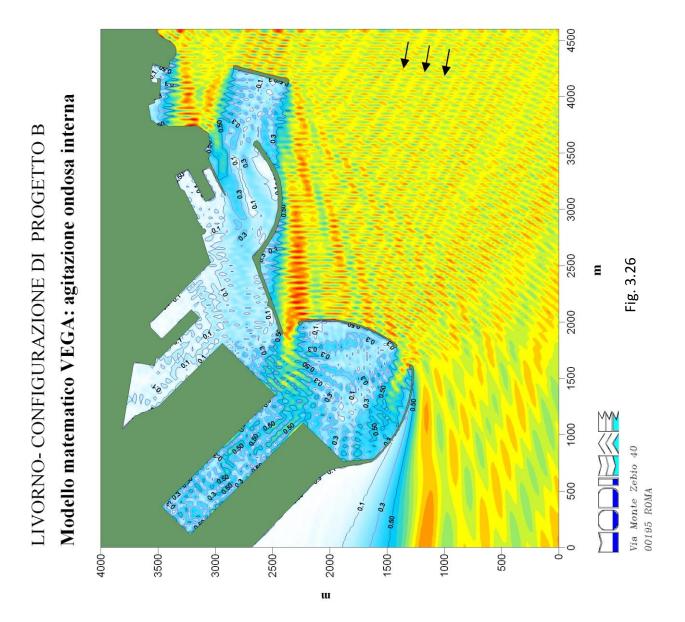
0.50

0.50

0.50

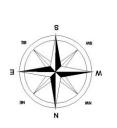
0.20

Periodo T = 10.0 sDirezione = 190 °N





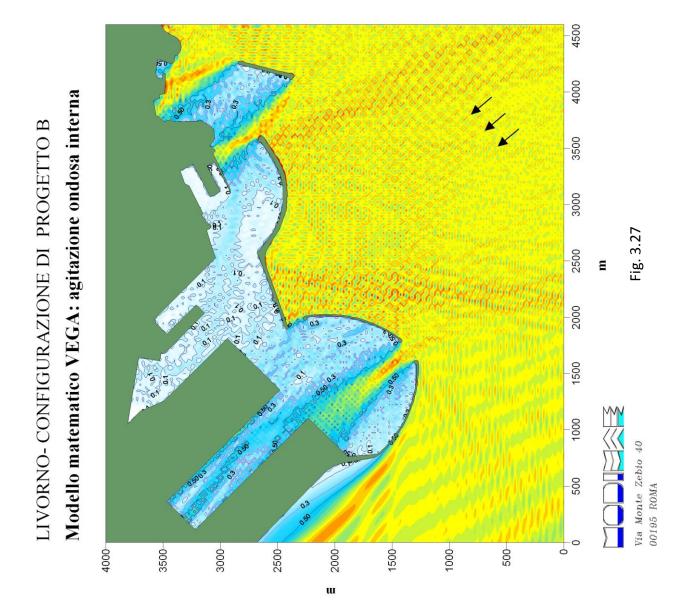
Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



Altezza d'onda relativa

1.50 1.30 1.130 1.100 0.90 0.70 0.50 0.50 0.30 0.30 0.30 0.30

Periodo T = 8.0 sDirezione = 230 °N





Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



Altezza d'onda relativa

1.50

1.40

1.10

1.10

0.80

0.80

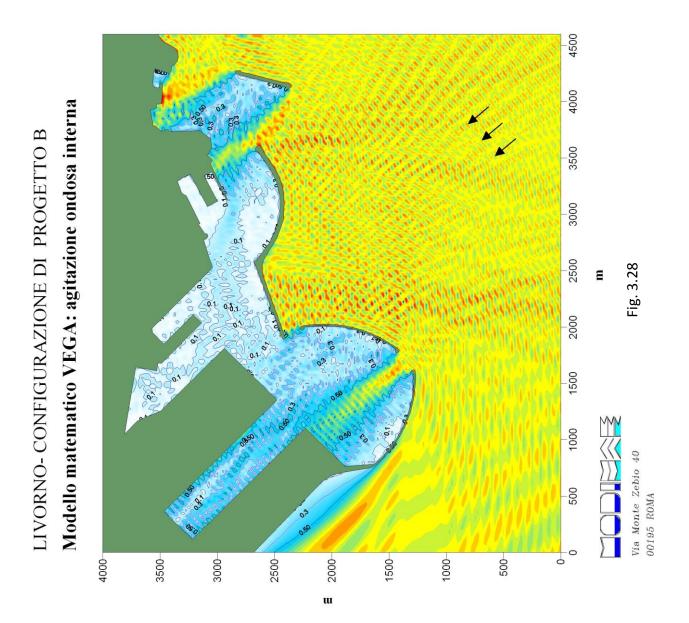
0.50

0.50

0.30

0.30

Periodo T = 10.0 sDirezione = $230 \text{ }^{\circ}\text{N}$





Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



Altezza d'onda relativa

1.50

1.40

1.20

1.10

0.50

0.50

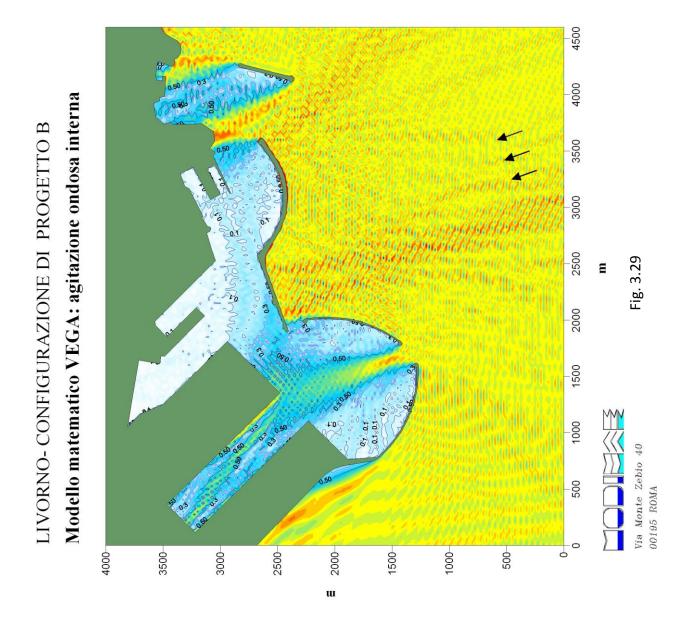
0.50

0.50

0.50

0.50

Periodo T = 8.0 sDirezione = 250 °N





Titolo Elab	orato: Studi	o della pene	trazione del	moto ondos	0
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

1.50

1.40

1.20

1.10

0.50

0.50

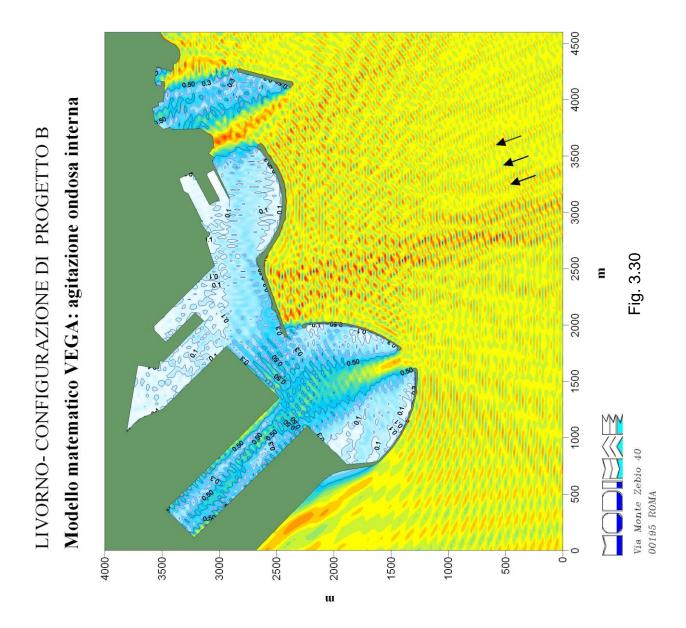
0.50

0.50

0.50

0.50

Periodo T = 10.0 sDirezione = $250 \text{ }^{\circ}\text{N}$





Titolo Elab	orato: Studi	o della pene	trazione del	moto ondos	0
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

1.50

1.40

1.20

1.10

0.50

0.50

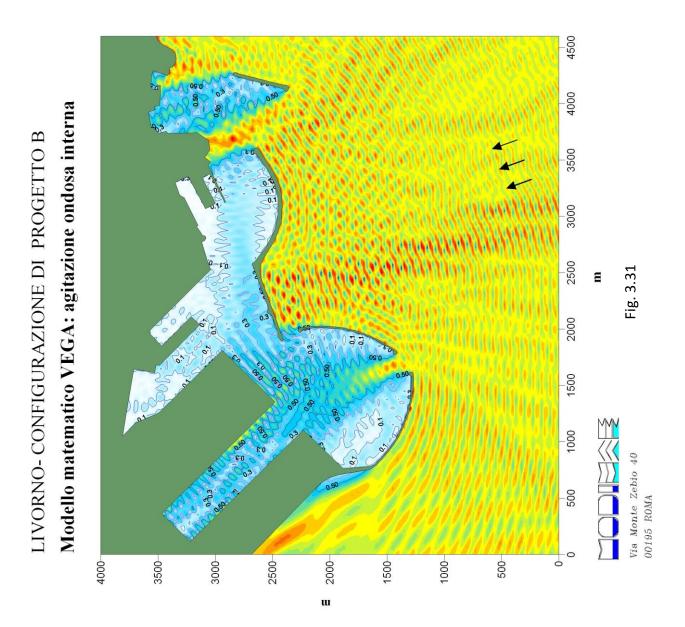
0.50

0.50

0.50

0.50

Periodo T = 12.0 sDirezione = 250 °N



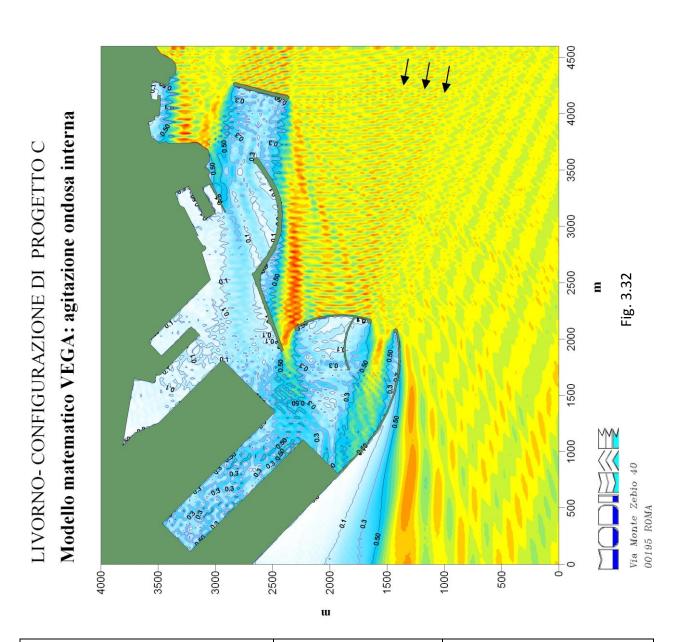


Titolo Elab	orato: Studi	o della pene	trazione del	moto ondos	0
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

1.50 1.40 1.30 1.30 0.80 0.70 0.50 0.50 0.30 0.30



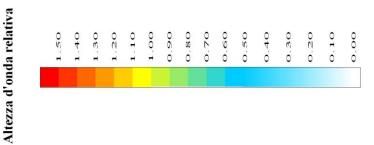
Direzione = 190 °N

Periodo T = 8.0 s



Titolo Elab	orato: Studi	o della pene	trazione del	moto ondos	0
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR





4500 4000 Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna 3500 3000 2500 Ε Fig. 3.33 2000 1500 1000 Via Monte Zebio 40 500 00195 ROMA 0

1500-

1000

500

3500

4000

3000

2500

2000

w

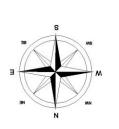
LIVORNO- CONFIGURAZIONE DI PROGETTO C

Direzione = 190 °N

Periodo T = 10.0 s



Titolo Elab	orato: Studi	o della pene	trazione del	moto ondos	0
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

1.50 1.10 1.30 1.130 1.100 1.000 1.0

w

Via Monte Zebio 40

00195 ROMA

Direzione = 230 °N

Periodo T = 8.0 s

4500

4000

3500

3000

2500

2000

1500

1000

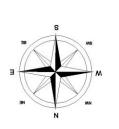
500

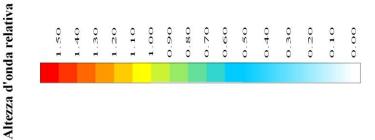
Ξ

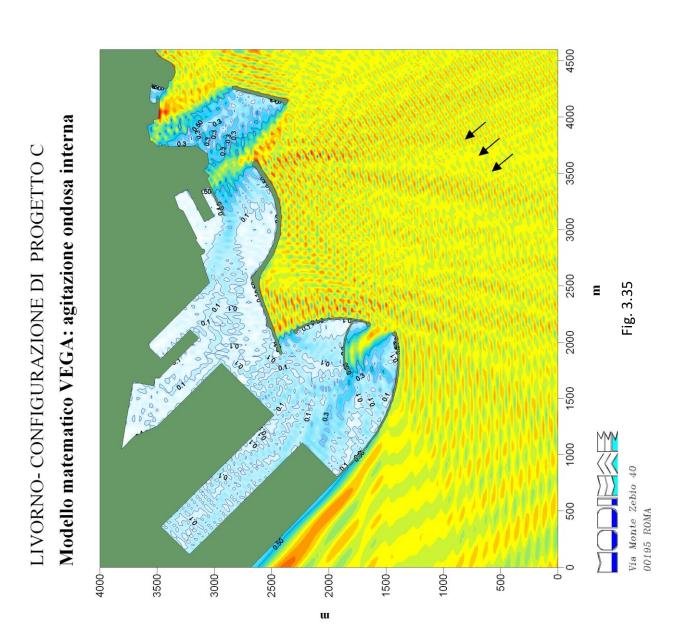
Fig. 3.34



Titolo Elab	orato: Studi	o della pene	trazione del	moto ondos	0
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR





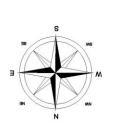


Direzione = 230 °N

Periodo T = 10.0 s



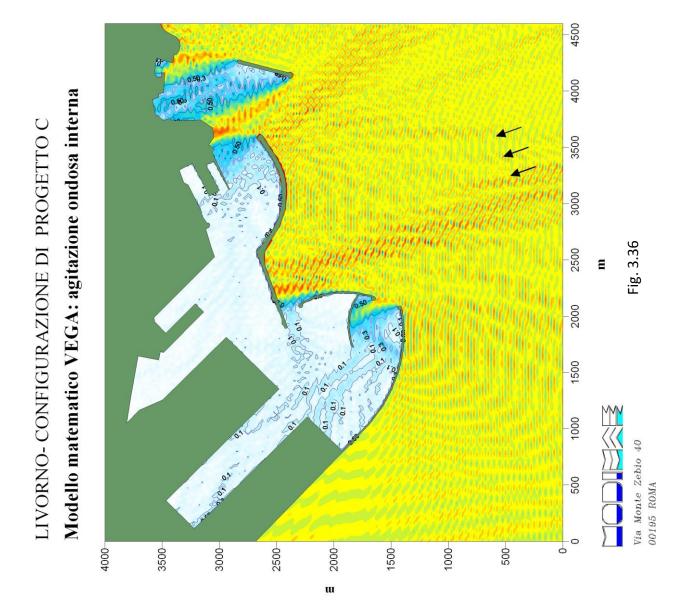
Titolo Elab	orato: Studi	o della pene	trazione del	moto ondos	0
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

1.50 1.30 1.30 1.10 0.90 0.80 0.50 0.50 0.50 0.30

Periodo T = 8.0 sDirezione = 250 °N

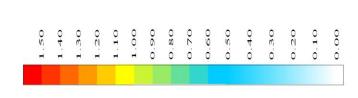




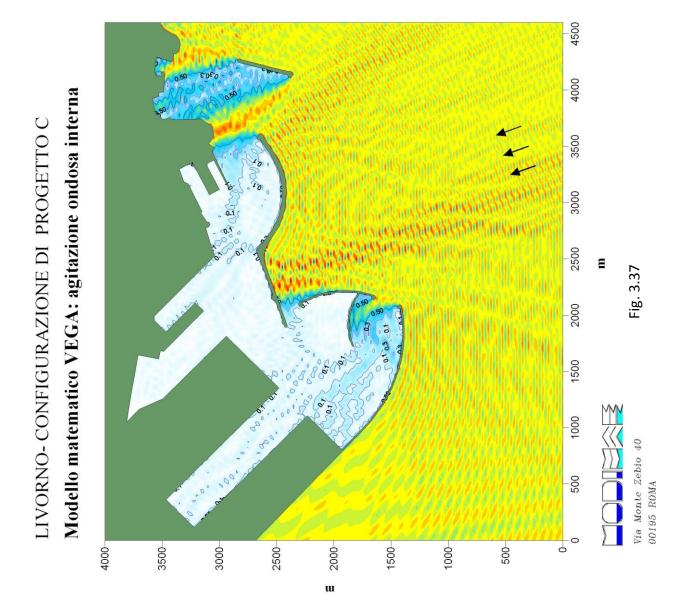
Titolo Elab	orato: Studi	o della pene	trazione del	moto ondos	0
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

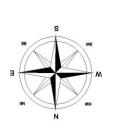


Periodo T = 10.0 sDirezione = 250 °N



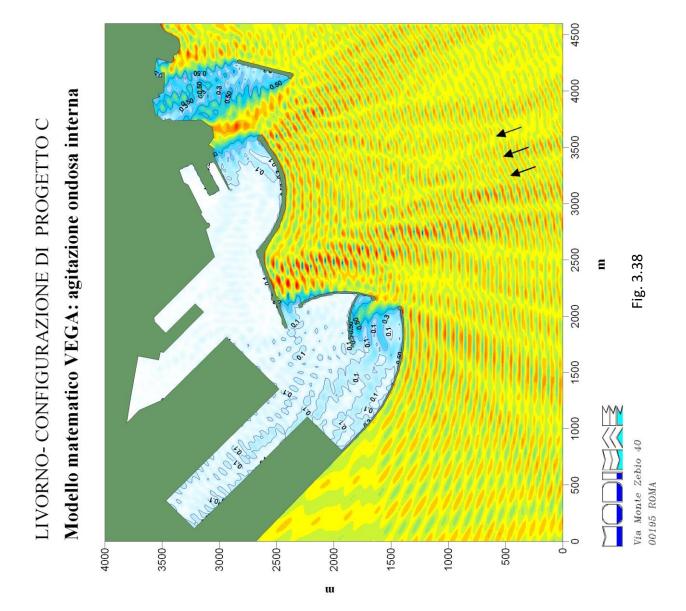


Titolo Elab	orato: Studi	o della pene	trazione del	moto ondos	0
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

Periodo T = 12.0 sDirezione = 250 °N





Titolo Elab	orato: Studi	o della pene	trazione del	moto ondos	0
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

1.50

1.40

1.10

1.10

0.80

0.80

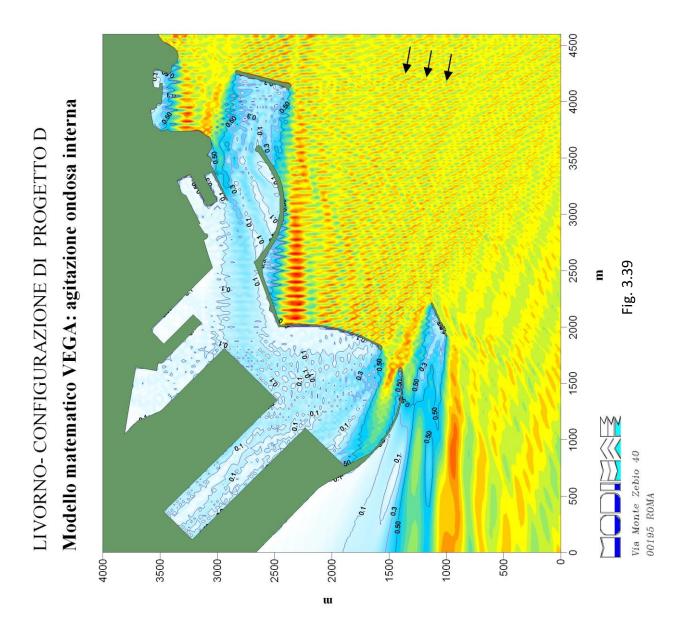
0.50

0.50

0.50

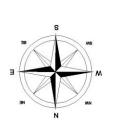
0.20

Periodo T = 8.0 sDirezione = 190 °N





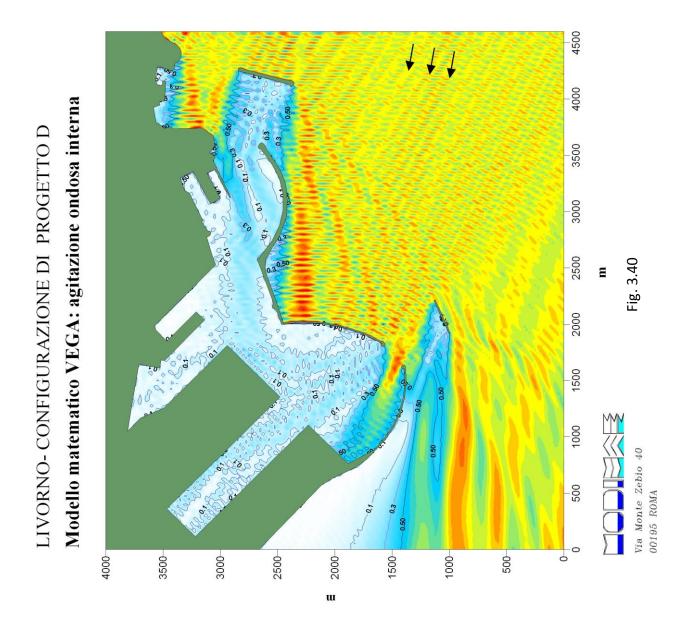
Titolo Elab	orato: Studi	o della pene	trazione del	moto ondos	0
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

20	0	30	20	10	00	06	80	70	9	50	4	30	20	10	
-	Η.	-	H	-	į.	O.	O.	0	0	Ö	Ö	0	Ö	Ö	

Periodo T = 10.0 sDirezione = 190 °N

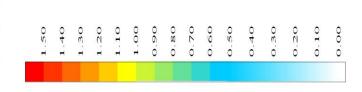




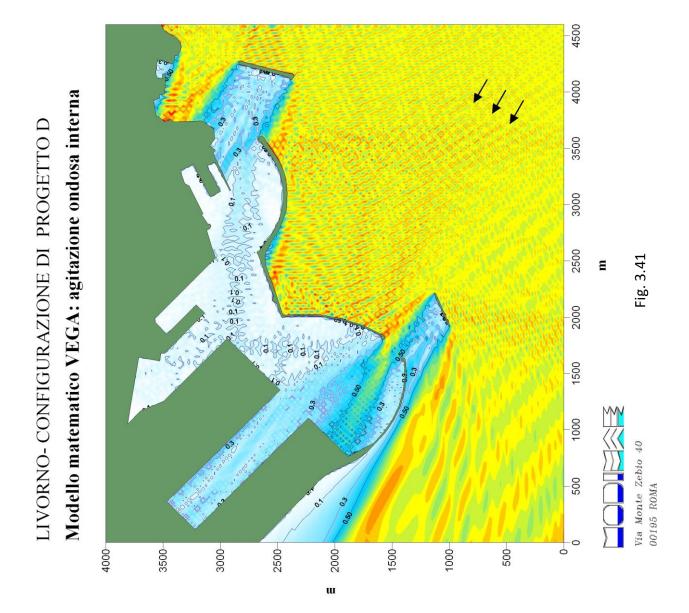
Titolo Elab	Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso								
Data: marzo 2013									
10	010	RR	011	-0	MAR				



Altezza d'onda relativa



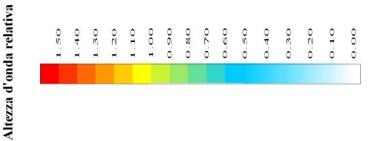
Periodo T = 8.0 sDirezione = 210 °N



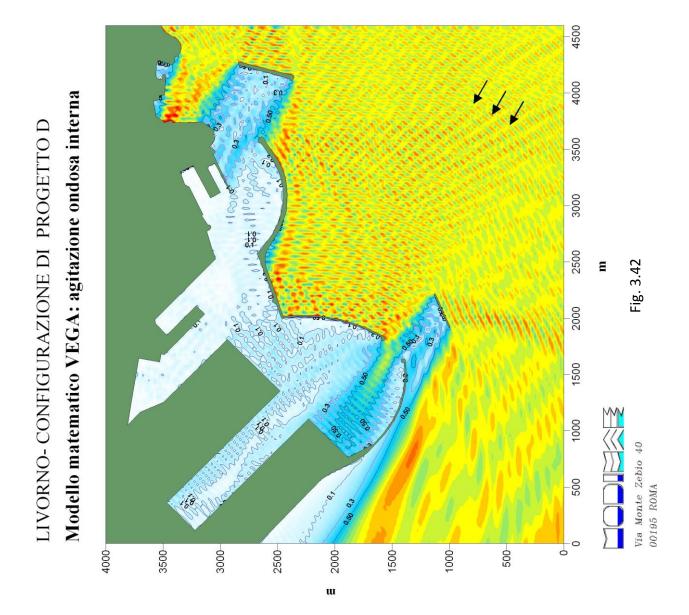


Titolo Elab	Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013								
10	010	RR	011	-0	MAR			





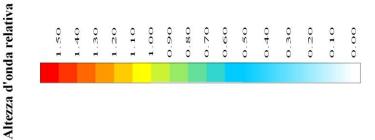
Periodo T = 10.0 sDirezione = 210 °N



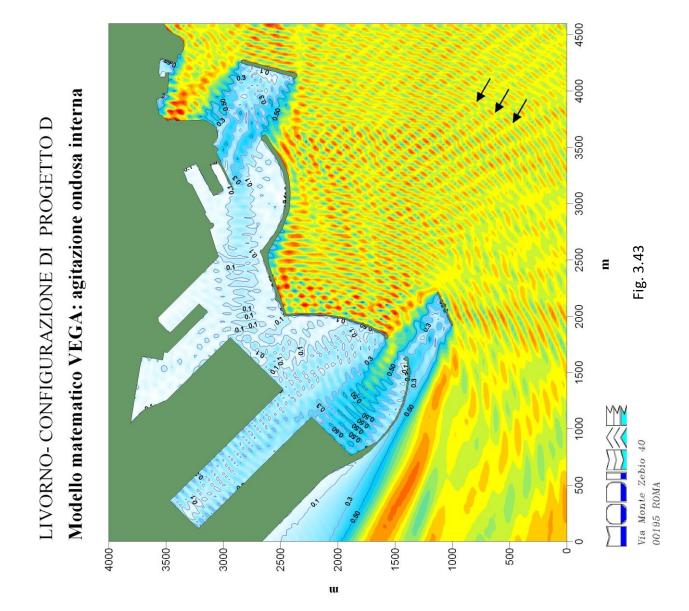


Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



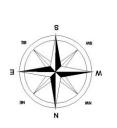


Periodo T = 12.0 sDirezione = 210 °N





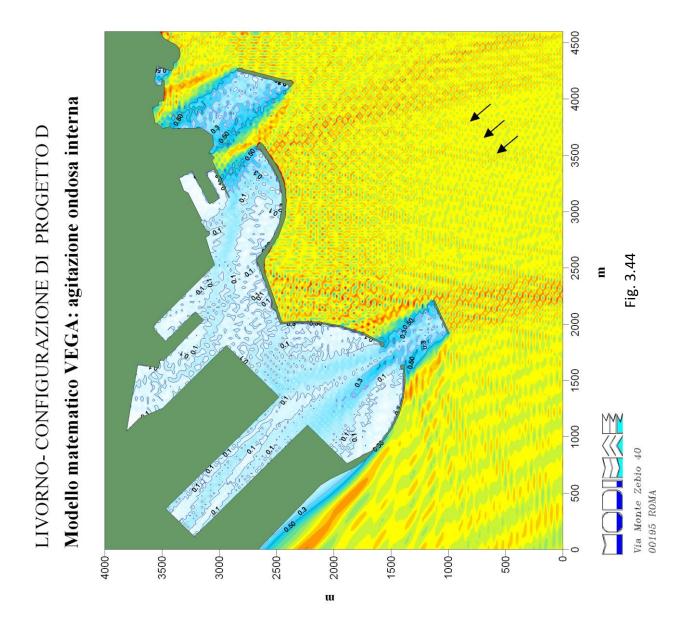
Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



Altezza d'onda relativa

1.50 1.40 1.130 1.100 0.80 0.80 0.70 0.50 0.50 0.50 0.30 0.100 0.00

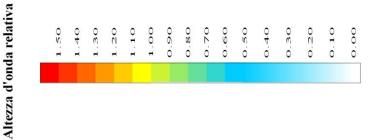
Periodo T = 8.0 sDirezione = 230 °N

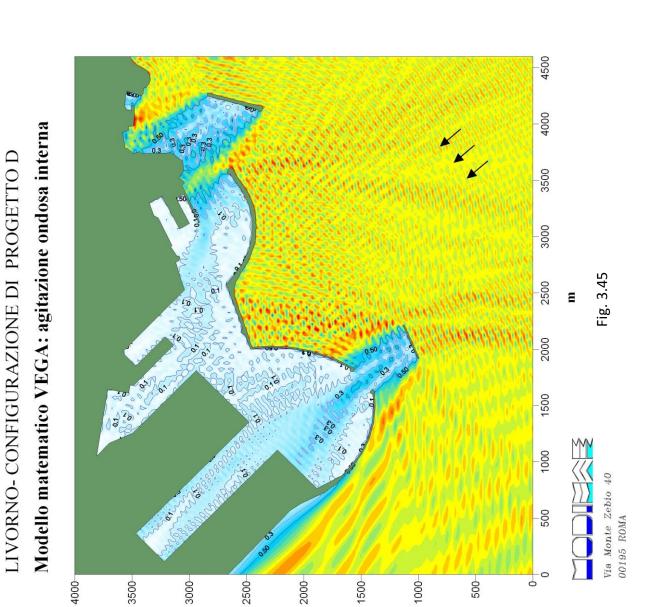




Titolo Elab	Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013								
10	010	RR	011	-0	MAR			







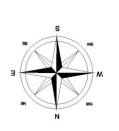
w

Directione = $230 \, ^{\circ}N$

Periodo T = 10.0 s



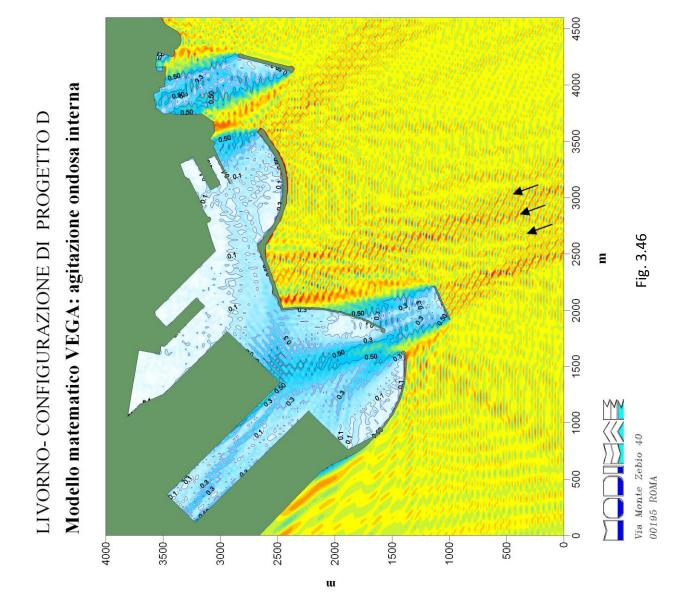
Titolo Elab	Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013								
10	010	RR	011	-0	MAR			



Altezza d'onda relativa

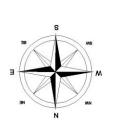
1.50 1.40 1.130 1.100 0.80 0.80 0.70 0.50 0.50 0.50 0.30 0.10

Periodo T = 8.0 sDirezione = 250 °N





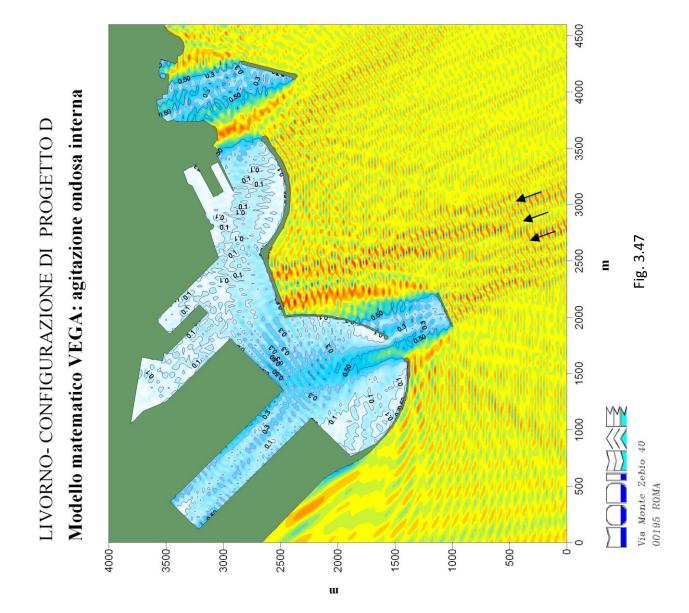
Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



Altezza d'onda relativa

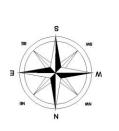
1.50 1.40 1.30 1.30 0.90 0.80 0.70 0.50 0.50 0.50

Periodo T = 10.0 sDirezione = 250 °N





Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso								
Data: marzo 2013								
10	010	RR	011	-0	MAR			



Altezza d'onda relativa

1.50 1.40 1.30 1.30 0.90 0.80 0.70 0.50 0.50 0.50

4500 4000 Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna LIVORNO- CONFIGURAZIONE DI PROGETTO D 3500 0.9 3000 1.0 Fig. 3.48 2500 Ξ 2000 1500 1000 Via Monte Zebio 40 500 00195 ROMA 3000 2500-200 3500 2000 1000 0 4000 1500 w

Directione = $250 \, \text{oN}$

Periodo T = 12.0 s

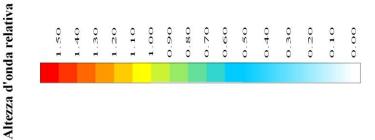


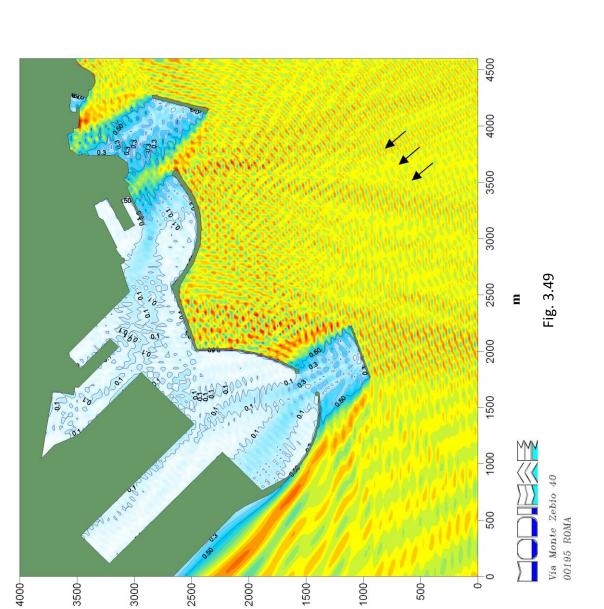
Titolo Elab	Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso								
Data: marzo 2013									
10	010	RR	011	-0	MAR				



LIVORNO- CONFIGURAZIONE DI PROGETTO D BIS

Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna





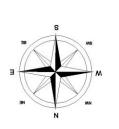
w

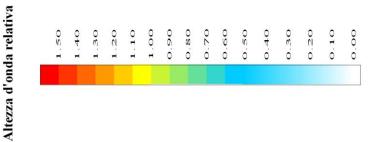
Direzione = 230 °N

Periodo T = 10.0 s



Titolo Elab	Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso								
Data: marzo 2013									
10	010	RR	011	-0	MAR				





4500 4000 LIVORNO- CONFIGURAZIONE DI PROGETTO D BIS Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna 3500 3000 Fig. 3.50 2500 Ξ 2000 0 1500 1000 Via Monte Zebio 40 500 00195 ROMA

2500

2000

w

1500

1000

4000-

3500

3000

200

0

Direzione = 250 °N

Periodo T = 10.0 s



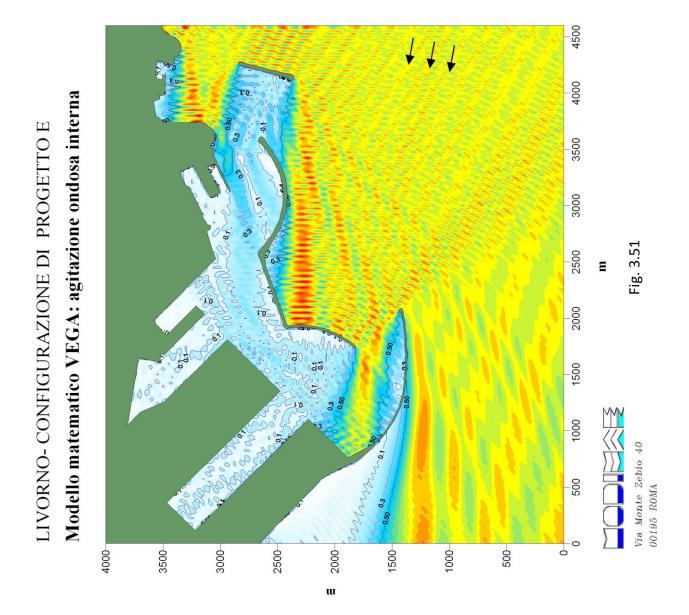
Titolo Elab	Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013								
10	010	RR	011	-0	MAR			



Altezza d'onda relativa

1.50 1.150 1.130 1.100 0.50 0.50 0.50 0.30

Periodo T = 10.0 sDirezione = 190 °N





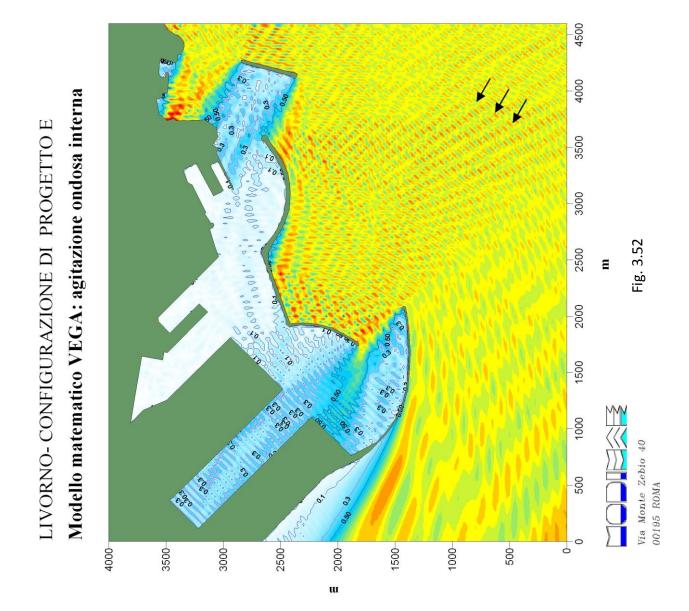
Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso							
Data: marzo 2013							
10	010	RR	011	-0	MAR		



Altezza d'onda relativa

1.50 1.40 1.130 1.100 0.80 0.80 0.70 0.50 0.50 0.50 0.30 0.10

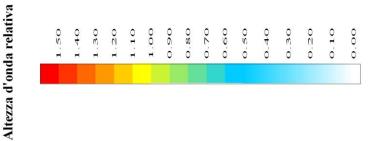
Periodo T = 10.0 sDirezione = 210 °N



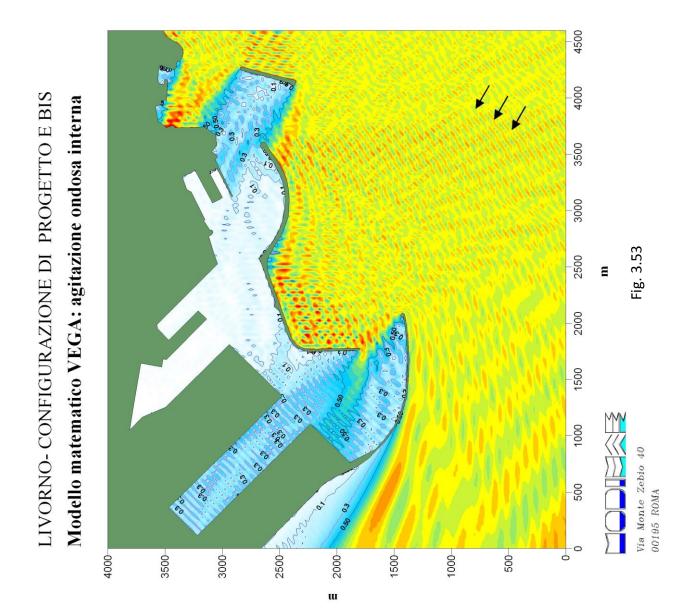


Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR





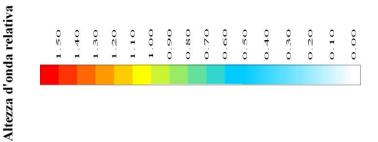
Periodo T = 10.0 sDirezione = $210 \, ^{\circ}N$



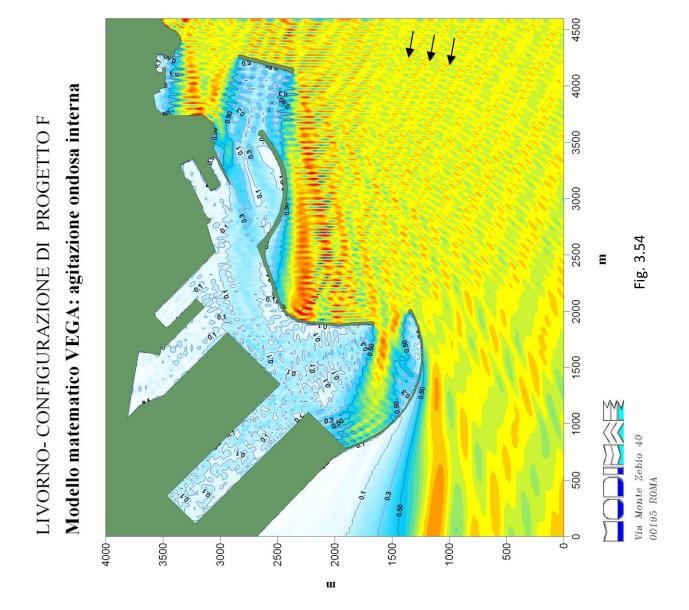


Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR





Periodo T = 10.0 sDirezione = 190 °N





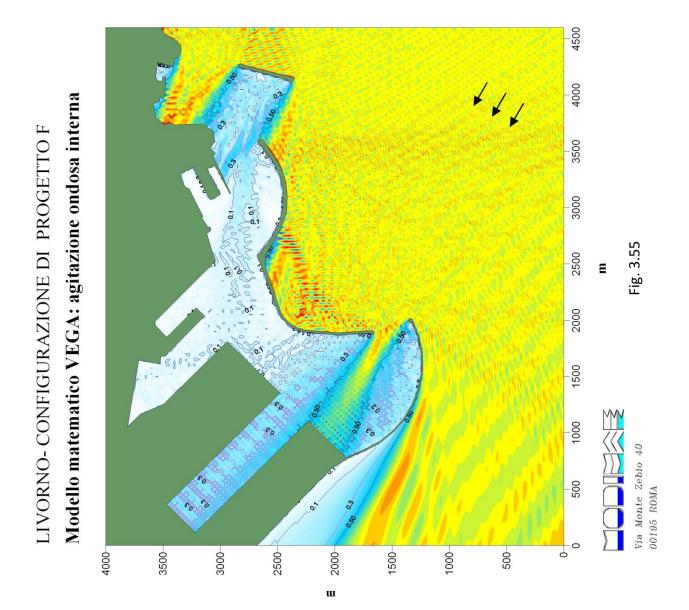
Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa

1.50 1.30 1.30 1.10 0.90 0.50 0.50 0.30 0.30

Periodo T = 8.0 sDirezione = 210 °N

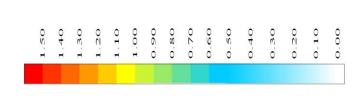




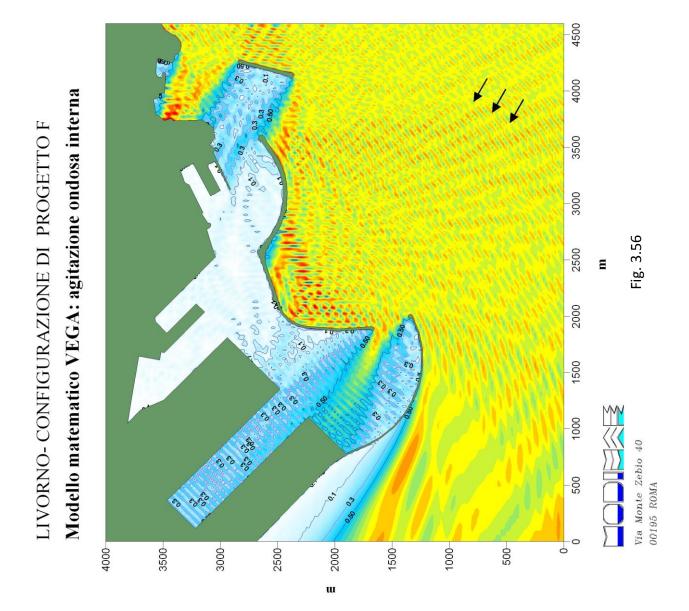
Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa



Periodo T = 10.0 sDirezione = 210 °N

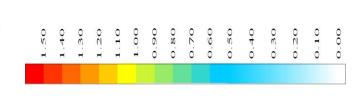


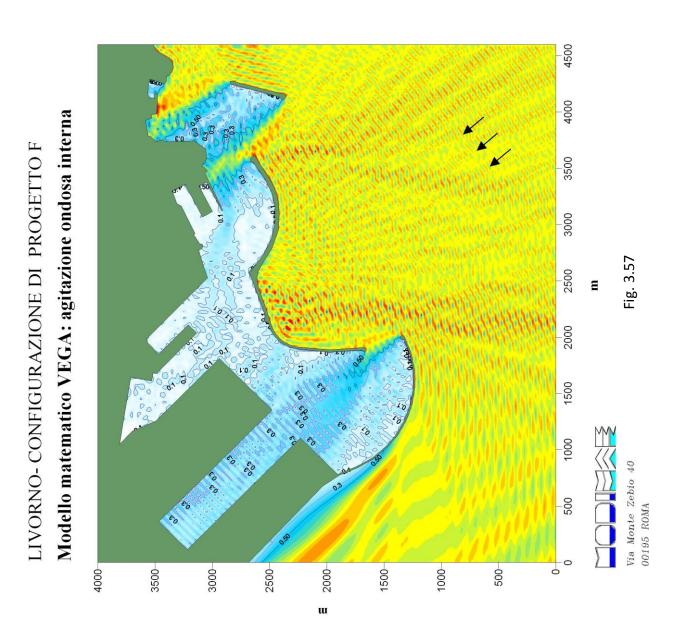


Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR



Altezza d'onda relativa





Directione = $230 \, ^{\circ}N$

Periodo T = 10.0 s



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

4 PORTO ESISTENTE – IMBOCCATURA SUD

4.1 Configurazioni esaminate, ipotesi di calcolo e simulazione degli eventi di moto ondoso

I risultati delle simulazioni relative alle diverse configurazioni delle opere di difesa della imboccatura Nord hanno messo in evidenza che in occasione delle mareggiate provenienti da 230°N all'interno dell'area di evoluzione posta in corrispondenza dell'imboccatura Sud, dove le navi devono eseguire una delicata deviazione di rotta, i livelli di agitazione ondosa sono particolarmente intensi.

Pertanto è stato eseguito uno studio di dettaglio delle condizioni di agitazioni ondosa residua in corrispondenza del bacino di evoluzione dell'imboccatura Sud prendendo in considerazione sia la configurazione attuale delle opere di difesa (Configurazione Attuale – fig. 4.1) che una configurazione nella quale, al fine di migliorarne il grado di protezione, sono state introdotte alcune modifiche alla diga della Vegliaia.

Infatti lo studio su larga scala eseguito per la verifica dell'imboccatura Nord aveva evidenziato che nell'attuale configurazione la diga della Vegliaia sia per i moti ondosi provenienti da 190°N che per quelli provenienti da 230°N non riesce a fornire la totale copertura dell'imboccatura portuale. Pertanto nella configurazione alternativa (fig. 4.2) ne è stato previsto il prolungamento su entrambi i lati (105 m verso riva e 260 m verso il mare aperto) così da raggiungere una lunghezza totale di circa 875 m.

Nelle due figure rappresentative delle due configurazioni studiate sono indicati anche i valori dei coefficienti di riflessioni attribuiti alle opere perimetrali che sono stati definiti in analogia con quanto già fatto per lo studio dell'imboccatura Nord.

Per quanto riguarda gli eventi di moto ondoso simulati, come evidenziato in precedenza, lo studio si vasta scala eseguito per l'imboccatura Nord, ha evidenziata una carenza di protezione solo per i moti ondosi provenienti da 190° N e 230° N che, in particolare per quelli caratterizzati da un periodo significativo T di 10 s, inducevano elevati valori dell'agitazione ondosa in corrispondenza dell'area di evoluzione prospiciente l'imboccatura portuale.

Pertanto l'analisi di dettaglio del'imboccatura Sud è stata eseguita solo riproducendo condizioni di moto ondoso generate dai seguenti eventi:



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

- Dir. 190° N T= 10 s
- Dir. 230° N T= 10 s

4.2 Analisi dei risultati e conclusioni

I risultati delle elaborazioni svolte, riportati in forma grafica nelle figure da 4.3 a 4.6, risulta evidente che le modifiche apportate alla diga della Vegliaia producono una sensibile riduzione dell'agitazione ondosa nell'avamporto del porto esistente (imboccatura Sud) per entrambe le condizioni esaminate. In particolare i coefficienti di agitazione media passano da 0.3 a 0.2 per moti ondosi provenienti da 190° N, e da 0.65 a 0.40 per moti ondosi provenienti da 230° N.

Peraltro occorre osservare che il prolungamento della diga della Vegliaia verso il mare aperto produce una rotazione della rotta di avvicinamento delle navi di circa 15° verso Nord.

Tale rotazione della rotta produce un analogo incremento all'angolo della deviazione di rotta che le navi devono eseguire in corrispondenza dell'area di evoluzione posta in corrispondenza dell'imboccatura portuale per entrare/uscire dal porto.

Ciò comporta un peggioramento delle condizioni di accessibilità dell'imboccatura sud che, anche nell'ipotesi che in futuro tutto il traffico commerciale, compresi i traghetti maggiori, utilizzi l'imboccatura Nord e che l'imboccatura Sud venga utilizzata esclusivamente dalle navi da crociera, dai traghetti per le piccole isole, dai pescherecci e dalle imbarcazioni da diporto, non è compensato dalla riduzione dell'agitazione ondosa nella zona di evoluzione.

Pertanto dall'analisi condotta risulta sconsigliabile apportare delle modifiche alle attuali opere di difesa del porto di Livorno.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

5 CONFIGURAZIONE DI PIANO - STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO CON IL MODELLO CG WAVE

Lo studio delle penetrazione del moto ondoso all'interno del porto di Livorno nello schema proposto dal Piano Regolatore Portuale definito a conclusione dello studio sulle possibili alternative di configurazione portuale (v. elaborato "Analisi delle alternative di assetto e definizione della configurazione di piano"), è stato condotto applicando il modello matematico agli elementi finiti denominato CG WAVE, facente parte del pacchetto di modelli matematici agli elementi finiti denominato SMS (Surfacewater Modeling System), che risolve le equazioni non lineari per le acque basse (non linear shallow water equations).

Tale modello consente di simulare la propagazione del moto ondoso all'interno di un bacino portuale tenendo conto dei fenomeni combinati di diffrazione, rifrazione e riflessione, nonché degli effetti dissipativi dovuti al frangimento ed all'attrito sul fondo.

Le simulazioni sono state condotte utilizzando come forzanti gli eventi di moto ondoso più gravosi ai fini dell'agitazione ondosa residua, compatibilmente con le condizioni meteomarine raggiungibili nel paraggio in esame.

Scopo del presente studio è quello di fornire indicazioni oggettive sulla validità e funzionalità del nuovo schema portuale, proposto nella redazione del Piano Regolatore Portuale 2012, in relazione alle condizioni di sicurezza delle imbarcazioni sia in fase di stazionamento che durante le manovre di ingresso ed uscita dal porto.

In particolare, sono stati determinati ed analizzati i valori del campo d'onda riflesso ed i livelli di agitazione ondosa residua all'interno dei bacini portuali in progetto conseguenti a stati di mare opportunamente scelti e rappresentativi sia delle condizioni ordinarie (associate ad un tempo di ritorno annuale) che estreme (associate a tempi di ritorno decennali e cinquantennali).

I risultati delle simulazioni effettuate hanno evidenziato come le nuove opere portuali previste dal presente studio di Piano siano in grado di attenuare in maniera significativa l'azione del moto ondoso incidente, garantendo all'interno dei bacini portuali dei livelli di agitazione ondosa residua pienamente accettabili in relazione alle finalità e funzionalità previste per i bacini stessi.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

5.1 Applicazione del sistema di modellazione SMS

Il codice di calcolo impiegato nel presente studio, come già accennato, appartiene al sistema di modellazione SMS e consente di simulare i fenomeni combinati di diffrazione, riflessione e rifrazione, tenendo conto degli effetti dissipativi dovuti al frangimento ad all'attrito sul fondo. Particolarmente i primi tre fenomeni sono di fondamentale importanza durante la propagazione del moto ondoso all'interno di un bacino portuale, mentre gli altri due assumono importanza nel caso di fondali caratterizzati da profondità con lo stesso ordine di grandezza dei valori delle altezze d'onda incidenti e fortemente variabili.

Nella fase preliminare dello studio (procedura di pre-processor), è stato utilizzato il codice GFGEN per la costruzione del reticolo geometrico, agli elementi finiti, con cui sono stati discretizzati gli specchi liquidi da simulare. Successivamente, all'interno del modello di calcolo sono state definite le condizioni al contorno sia in termini di forzanti di moto ondoso (altezza, periodo e direzione dell'altezza d'onda incidente) sia come valori del coefficiente di riflessione da associare ai diversi contorni che caratterizzano gli schemi portuali presi in esame per il porto di Livorno.

5.2 Discretizzazione dello specchio liquido

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

Per la batimetria dei fondali e lo schema portuale da prendere in esame (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.), si è fatto riferimento alle carte nautiche edite dall'Istituto Idrografico della Marina Militare ("CN. 4 – Da San Rossore al Canale di Piombino – Scala 1:100.000" e "CN. 120 – Litorale di Livorno – Scala 1:30.000"), alla batimetria di dettaglio presente nella zona portuale ed alla configurazione planimetrica di Piano Regolatore Portuale 2012 proposta per il porto di Livorno.

Nel dettaglio, il campo fluido é stato schematizzato con tre griglie di calcolo, dipendenti dai periodi d'onda utilizzati, con le seguenti caratteristiche.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

PERIODO D'ONDA T=8s

Griglia di calcolo costituita da 221334 elementi, 112746 nodi di calcolo, profondità minima e massima pari rispettivamente a circa 2.5 m e circa 26 m;

PERIODO D'ONDA T=10s

Griglia di calcolo costituita da 127584 elementi, 65386 nodi di calcolo, profondità minima e massima pari rispettivamente a circa 2.5 m e circa 26 m (Figura 5.2);

PERIODO D'ONDA T=12s

Griglia di calcolo costituita da 83966 elementi, 43281 nodi di calcolo, profondità minima e massima pari rispettivamente a circa 2.5 m e circa 26 m;

Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

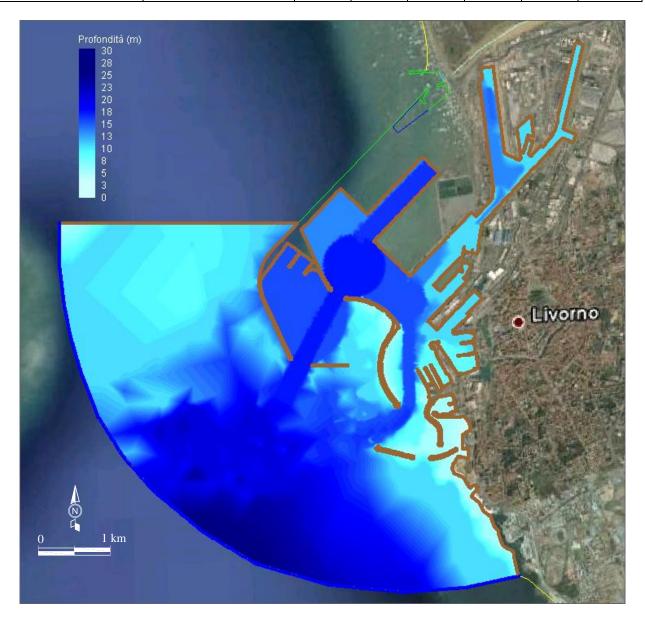


Figura 5.1 – Configurazione di Piano Regolatore Portuale 2012: batimetria di riferimento.

Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR



Figura 5.2 – Configurazione di Piano Regolatore Portuale 2012 discretizzazione dello specchio liquido per T=10s

5.3 Definizione delle condizioni al contorno

Per la configurazione di Piano 2012 ipotizzata per il porto di Livorno, al fine di poter determinare i livelli di agitazione ondosa residua all'interno dei bacini portuali che lo

10 010 RR 011 -0 MAR Agitazione interna



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

caratterizzano in seguito all'azione del moto ondoso incidente, è stato necessario definire ed impostare all'interno del modello matematico SMS le opportune condizioni al contorno.

Nel dettaglio, così come riportato nella Figura 5.3, lungo i contorni che rappresentano la linea di costa, sono stati imposti opportuni coefficienti di riflessione.

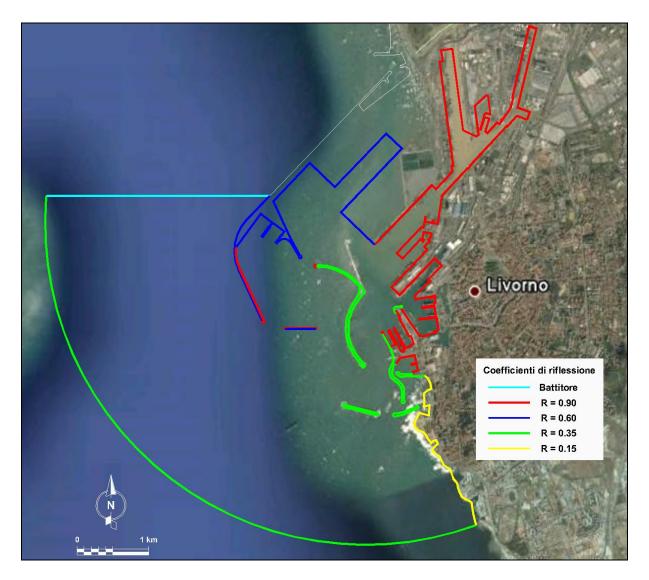


Figura 5.3 – Schema portuale ed indicazione dei coefficienti di riflessioni adottati per le simulazioni effettuate con il modello CGWAVE.

Inoltre, il dominio di calcolo è stato limitato da una linea semicircolare che rappresenta le condizioni in mare aperto, sufficientemente distante dall'area interessata dalle nuove opere



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

previste dal presente progetto, lungo la quale sono state imposte le seguenti forzanti di moto ondoso:

Altezza d'onda	Periodo	Direzione
$H_i=2m$	T=8s	190°N - 210°N - 230°N
H _i =3m	T= 10s	190°N - 210°N - 230°N
H _i =4m	T= 12s	210°N - 230°N
$H_i=4.5m$	T= 12s	190°N

Inoltre, per tenere conto degli effetti dissipativi dovuti al frangimento del moto ondoso ed all'attrito sul fondo, all'interno del modello SMS si è assunto un valore del coefficiente di frangimento pari a 0.64 ed un coefficiente di attrito sul fondo pari a 0.12.

5.4 Risultati delle simulazioni

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

Con quest'ultimo programma infatti sono state condotte diverse simulazioni con lo scopo di determinare l'agitazione ondosa all'interno del porto di Livorno, con particolare riferimento ai nuovi bacini previsti dal presente studio di Piano, e successivamente di verificare per gli stessi le condizioni di sicurezza necessarie alle imbarcazioni in fase di stazionamento e durante le manovre in fase di ingresso ed uscita dal porto.

Nelle figure che vanno dalla Figura 5.4 alla Figura 5.12, è possibile verificare il campo d'onda all'interno del porto di Livorno conseguente a diversi stati di mare rappresentativi sia delle condizioni ordinarie che estreme.



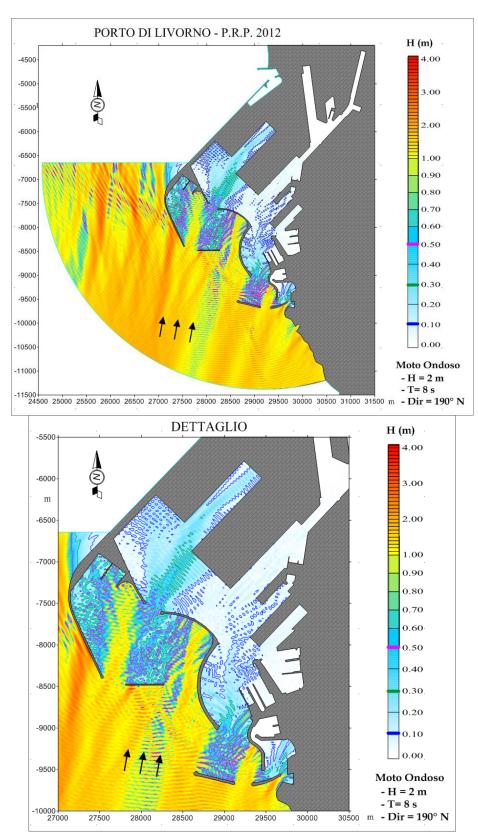


Figura 5.4 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=190°N; H=2m; T=8s).



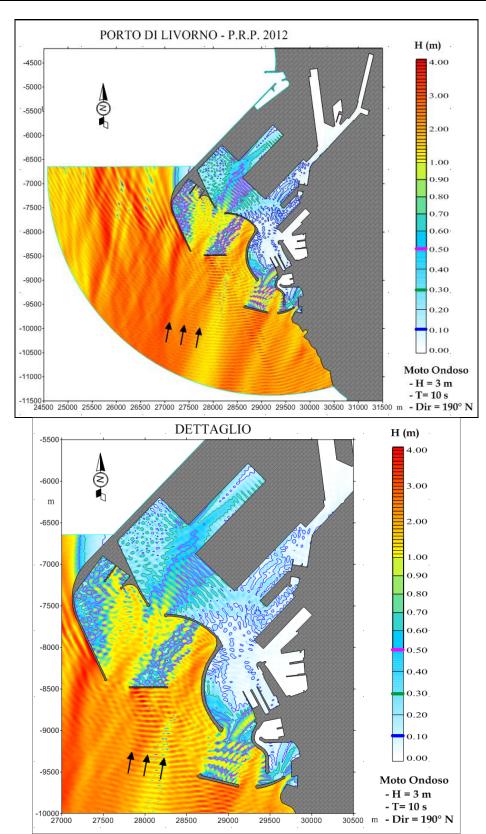


Figura 5.5 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=190°N; H=3m; T=10s).



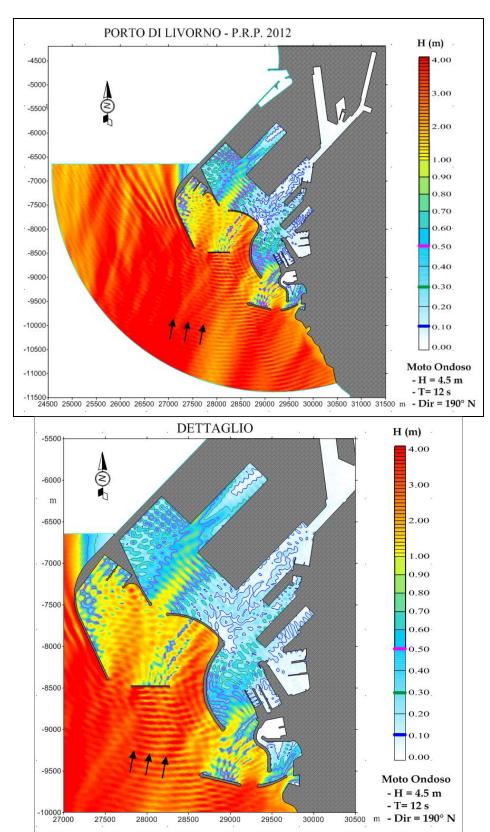


Figura 5.6 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=190°N; H=4.5m; T=12s).



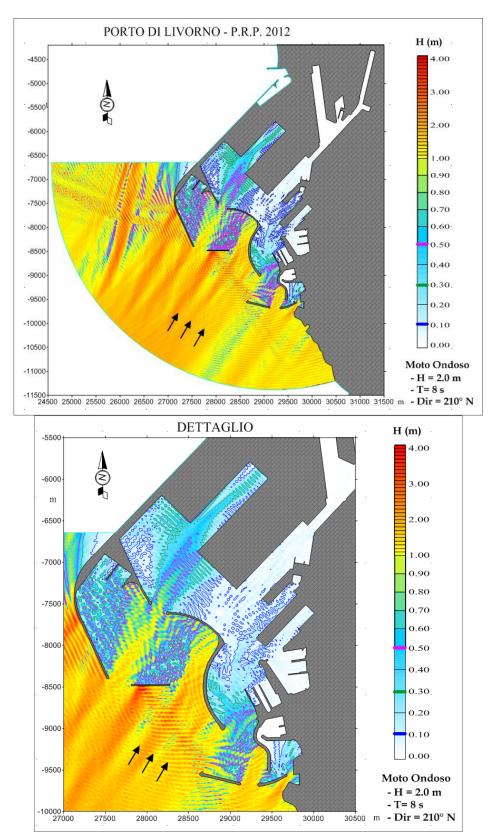
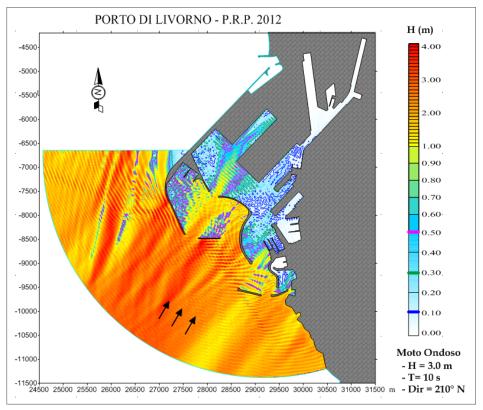


Figura 5.7 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=210°N; H=2m; T=8s).





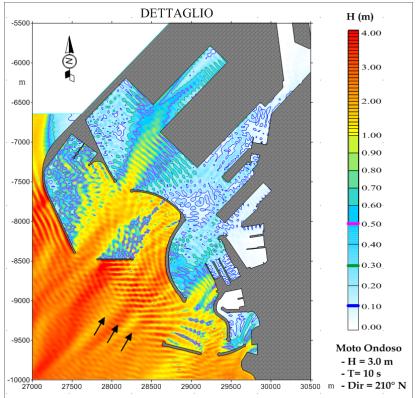


Figura 5.8 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=210°N; H=3m; T=10s).



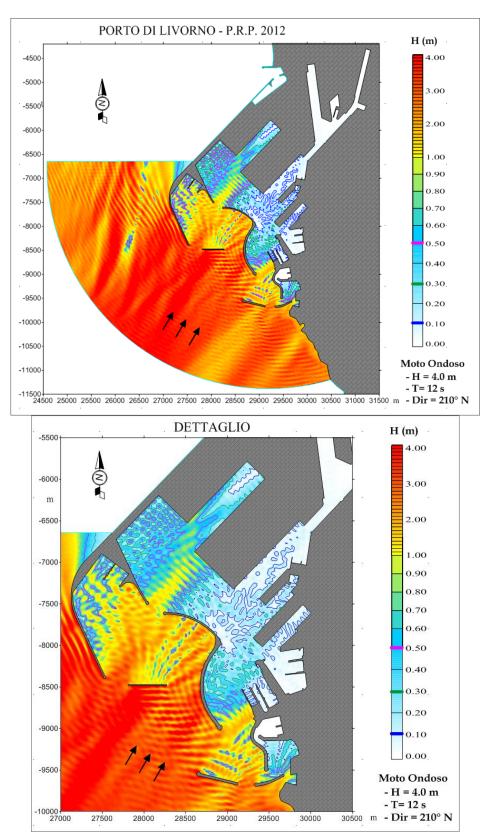


Figura 5.9 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=210°N; H=4m; T=12s).



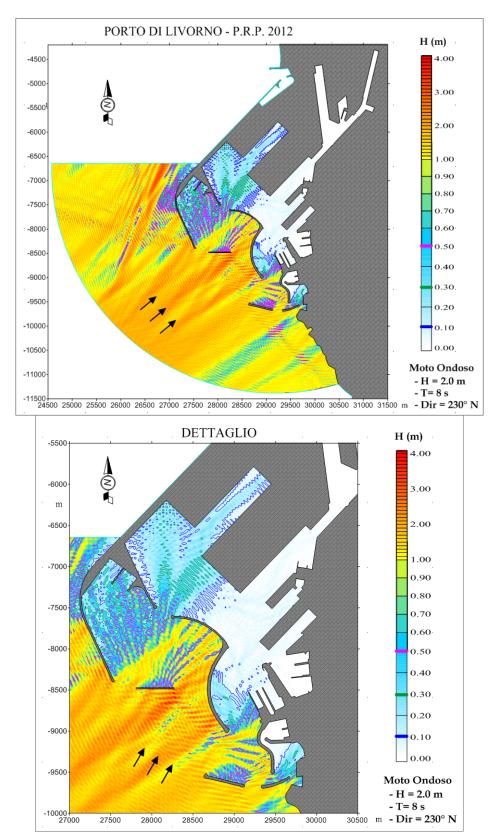


Figura 5.10 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=230°N; H=2m; T=8s).



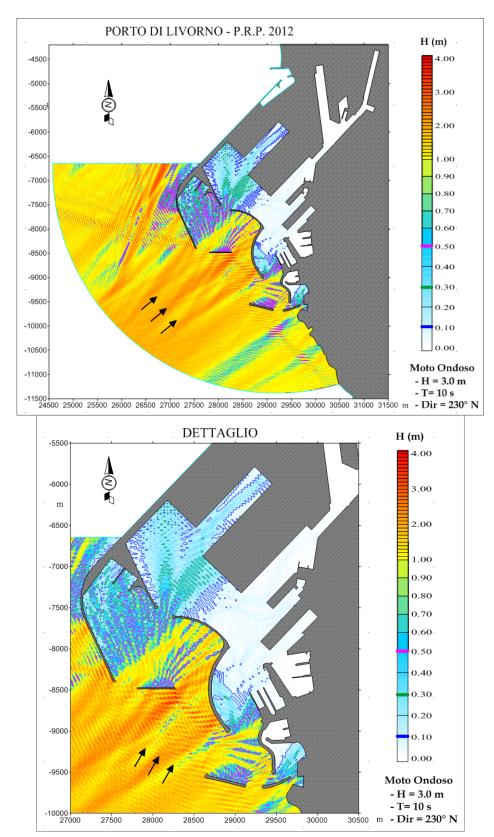


Figura 5.11 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=230°N; H=3m; T=10s).



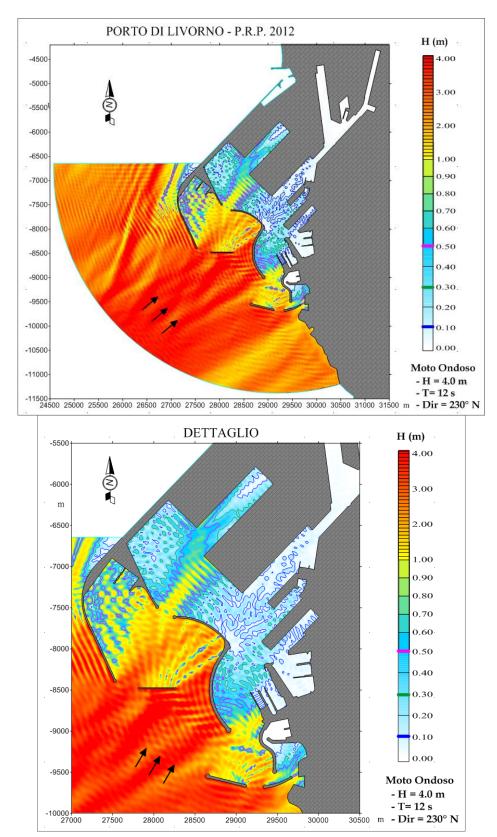


Figura 5.12 – Agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=230°N; H=4m; T=12s).



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

5.5 CONCLUSIONI

Dall'analisi dei risultati, ottenuti dall'applicazione del modello CGWAVE per la configurazione proposta nel presente studio di Piano Regolatore Portuale per il porto di Livorno, si evidenzia come in generale il moto ondoso incidente propagandosi all'intero dello specchio portuale viene progressivamente attenuato per effetti di diffrazione e rifrazione causata dalle opere che delimitano il bacino stesso.

Nel modello numerico tutte le opere, che costituiscono il contorno bagnato della configurazione portuale simulata, sono state riprodotte utilizzando opportuni coefficienti di riflessione (Figura 5.3).

Esaminando in dettaglio i risultati ottenuti dalle diverse simulazioni si nota che, fatta eccezione per le condizioni più gravose che si verificano solo qualche ora durante l'anno, l'intero specchio acqueo destinato ai nuovi ormeggi non risulta interessato da fenomeni di ingressione del moto ondoso tali da comportare livelli di agitazione ondosa inadeguati per la sicurezza delle navi che dovranno stazionarvi.

Per quanto riguarda gli eventi associati alle condizioni estreme, sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazione con il modello CGWAVE e facendo riferimento allo studio meteomarino, cui si rimanda per ulteriori dettagli, è stato effettuato uno studio sull'operatività ("Down Time") delle nuove banchine della Piattaforma Europa prevista nel nuovo P.R.P. del porto di Livorno.

Più nel dettaglio, per le altezze d'onda simulate, rappresentative delle condizioni estreme, sono stati analizzati i valori dell'altezza d'onda residua nel bacino protetto al fine di poter fornire indicazioni oggettive sul grado di operatività delle nuove banchine in progetto.

Come evidenziato in precedenza gli eventi meteo marini presi in esame sono stati quelli provenienti dalle direzioni di 190°N, 210°N e 230°N, più gravose ai fini della penetrazione del moto ondoso all'interno del bacino portuale ed in particolare della Piattaforma Europa.

Per queste direzioni le massime altezze d'onda significative raggiungibili (vedi studio meteomarino) risultano essere rispettivamente pari a 4.5 m (190° N) e 4.0 m (210°N ÷ 230°N).

Al fine di poter fornire indicazioni sui tempi di inoperatività delle banchine dei nuovi terminals portuali (terminal Ro-Ro, terminal Containers e darsena merci pericolose), considerate le



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

dimensioni delle navi che li frequenteranno, è stato definito come limite di accettabilità un valore dell'altezza d'onda residua pari ad un metro.

Sulla base dei valori medi delle altezze d'onda all'interno del bacino portuale ottenuti per le direzioni prese in considerazione, in funzione del limite appena sopra definito, ed in seguito all'analisi dei risultati ottenuti per il clima d'onda annuale, ricostruito in prossimità del porto di Livorno in termini di frequenze di accadimento (vedi studio meteomarino), è stato possibile determinare le ore/anno di inoperatività ("Down Time") delle banchine dovute al moto ondoso incidente le opere.

In particolare, considerando la frequenza di accadimento degli eventi estremi caratterizzati da valori dell'altezza d'onda non inferiori a 3 m e provenienti dal settore che va da Mezzogiorno a Libeccio, è possibile concludere che per le nuove banchine della Piattaforma Europa si potranno verificare tempi di inoperatività marginali (circa 7 ore l' anno) e comunque accettabili vista la destinazione d'uso e la tipologia di navi che vi attraccheranno.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

6 SPECCHIO ACQUEO IN LOCALITÀ BELLANA DESTINATO ALLA NAUTICA SOCIALE - STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO CON IL MODELLO CG WAVE

In questa parte del documento vengono riportati i risultati dello uno studio di dettaglio dell'agitazione ondosa che riguarda lo specchio acqueo da destinare alla nautica da diporto prevalentemente di tipo sociale a Sud del porto di Livorno in località Bellana.

Lo studio è stato condotto, anche in questo caso, applicando il modello matematico agli elementi finiti denominato SMS.

Le simulazioni sono state condotte utilizzando come forzanti gli eventi di moto ondoso più gravosi ai fini dell'agitazione ondosa residua per l'area in esame, compatibilmente con le condizioni meteomarine raggiungibili nel paraggio in esame.

Le simulazioni sono state effettuate con lo scopo di verificare ed ottimizzare le nuove opere di difesa previste per la realizzazione dello specchio acqueo protetto da destinare alla nautica da diporto ovvero di fornire indicazioni oggettive, sia sulla validità dello schema planimetrico proposto che sulla tipologia delle opere scelte, in relazione alle condizioni di sicurezza delle imbarcazioni in fase di stazionamento e durante le manovre di ingresso ed uscita dal bacino in progetto.

Inoltre lo studio ha l'obbiettivo di analizzare gli effetti prodotti dalle stesse opere in corrispondenza dell'area di evoluzione e del tratto terminale del canale di accesso utilizzato dalle navi durante le fasi di ingresso ed uscita dall'imboccatura sud del porto e di valutare eventuali incrementi del moto ondoso causati dalla riflessione delle onde incidenti le opere stesse lungo il tratto di costa posto a sud dell'area di intervento.

In particolare, per le configurazioni attuale e di progetto, verranno confrontati ed analizzati i valori del campo d'onda riflesso ed i livelli di agitazione ondosa residua conseguenti a stati di mare opportunamente scelti e rappresentativi sia delle condizioni ordinarie (associate ad un tempo di ritorno annuale) che estreme (associate a tempi di ritorno decennali e cinquantennali).

I risultati delle simulazioni effettuate hanno evidenziato come le opere a gettata previste garantiscano all'interno dello specchio acqueo protetto, anche con eventi estremi associati a tempi di ritorno decennali e cinquantennali, una sufficiente attenuazione del moto ondoso



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

incidente ovvero dei livelli di agitazione ondosa residua pienamente accettabili per lo stazionamento e le manovre, di ingresso ed uscita dal bacino portuale, delle imbarcazioni nelle dovute condizioni di sicurezza. Inoltre lungo il canale di accesso, nell'area di evoluzione in corrispondenza dell'imboccatura sud del porto commerciale, e lungo il tratto di costa posta a sud dell'area di intervento non si riscontrano variazioni significative delle attuali condizioni di agitazione ondosa.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

6.1 Studio della penetrazione del moto ondoso con il modello CGWAVE

Per lo studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del nuovo punto di ormeggio in progetto per la Bellana, sono stati esaminati, come già anticipato, gli scenari che prevedono come forzanti di moto ondoso gli eventi rappresentativi sia delle condizioni di operatività ordinaria, raggiungibili qualche volta nel corso dell'anno (H=2m, T=8.0s), sia delle condizioni più rare e gravose associate a tempeste con tempo di ritorno decennale e cinquantennale (H=4.0m, T=10.0s; H=4.5m, T=12.0s).

Per la scelta delle forzanti di moto ondoso, in considerazione delle finalità e della destinazione d'uso dell'area portuale oggetto di studio, si è tenuto conto dei risultati riportati nello studio meteomarino e a cui si rimanda per maggiori dettagli.

Le simulazioni, condotte attraverso il modulo CGWAVE del codice di calcolo numerico SMS, hanno permesso di determinare e verificare la penetrazione del moto ondoso all'interno del nuovo punto di ormeggio della Bellana ed i conseguenti livelli di agitazione ondosa residua.

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

6.2 Discretizzazione dello specchio liquido

Per la corretta applicazione della routine di calcolo CGWAVE agli elementi finiti, appartenente al modello SMS, è stato necessario effettuare un'attenta e dettagliata discretizzazione del sistema liquido delle configurazioni portuali prese come riferimento.

Per la batimetria dei fondali e gli schemi planimetrici da simulare (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. e Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.), si è fatto riferimento alle carte nautiche edite dall'Istituto Idrografico della Marina Militare ("CN. 4 – Da San Rossore al Canale di Piombino – Scala 1:100.000" e "CN. 120 – Litorale di Livorno – Scala 1:30.000"), alla batimetria di dettaglio presente nella zona portuale ed alla configurazione planimetrica di progetto proposta per il nuovo punto di ormeggio della Bellana.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

6.3 Definizione delle condizioni al contorno

Per la configurazione di progetto ipotizzata per le nuove opere di difesa a sud del porto di Livorno, al fine di poter determinare i livelli di agitazione ondosa residua all'interno degli specchi acquei protetti che lo caratterizzano, in seguito all'azione del moto ondoso incidente, è stato necessario definire ed impostare all'interno del modello matematico SMS le opportune condizioni al contorno.

Nel dettaglio, così come riportato nella Figura 6.1 e nella Figura 6.1 Figura 6.2, lungo i contorni che rappresentano la linea di costa, sono stati imposti opportuni coefficienti di riflessione.

Inoltre, il dominio di calcolo è stato limitato da una linea semicircolare che rappresenta le condizioni in mare aperto, sufficientemente distante dall'area interessata dalle nuove opere previste dal presente progetto, lungo la quale sono state imposte le seguenti forzanti di moto ondoso.

Altezza d'onda	Periodo	Direzione
$H_i=2m$	T=8s	190°N - 210°N - 230°N - 270°N
H _i =3m	T= 10s	190°N - 210°N - 230°N - 270°N
$H_i=4m$	T= 12s	210°N - 230°N - 270°N
$H_i=4.5m$	T= 12s	190°N

Inoltre, per tenere conto degli effetti dissipativi dovuti al frangimento del moto ondoso ed all'attrito sul fondo, all'interno del modello SMS si è assunto un valore del coefficiente di frangimento pari a 0.64 ed un coefficiente di attrito sul fondo pari a 0.12.

Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

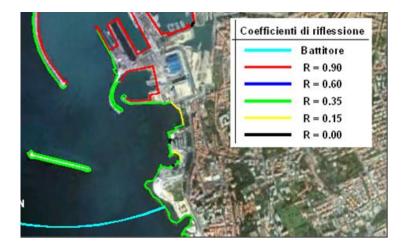


Figura 6.1 – Nuovo P.R.P. con configurazione attuale delle opere di difesa a sud del porto: indicazione dei coefficienti di riflessioni adottati per le simulazioni effettuate con il modello CGWAVE.

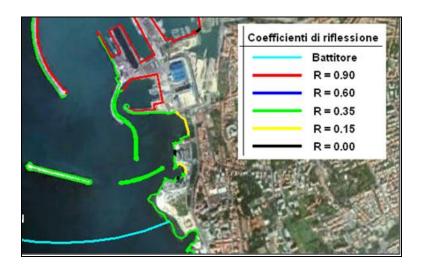


Figura 6.2 – Nuovo P.R.P. con configurazione di progetto delle nuove opere di difesa a sud del porto: indicazione dei coefficienti di riflessioni adottati per le simulazioni effettuate con il modello CGWAVE.



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

6.4 Risultati delle simulazioni e conclusioni

Nelle figure che vanno dalla Figura 6.3 alla Figura 6.26, è possibile verificare il campo d'onda nell'area di interesse conseguente a diversi stati di mare rappresentativi sia delle condizioni ordinarie che estreme.

I risultati dello studio eseguito mostrano l'irradiazione al largo del campo d'onda riflesso e l'attenuazione di energia nella propagazione all'interno delle aree protette del nuovo approdo turistico e del porto commerciale.

Nella configurazione di progetto il moto ondoso incidente, per tutte le situazioni analizzate, viene progressivamente attenuato dalla diffrazione operata dalle aperture delimitate dalle opere esterne di difesa e dalla dissipazione di energia causata dalle opere a scogliera che nel modello sono state riprodotte utilizzando opportuni coefficienti di riflessione.

In corrispondenza delle nuove aree destinate alla nautica da diporto, i livelli di agitazione ondosa residua sono del tutto accettabili per le finalità e gli scopi previsti per le aree stesse o meglio garantiscono adeguate condizioni di sicurezza a tutte le imbarcazioni che dovranno manovrare e stazionare nelle nuove aree di ormeggio. Inoltre la presenza delle nuove opere di difesa garantisce che le manovre di ingresso e di uscita dal canale navigabile che collegherà la darsena nuova con il mare aperto, anche in condizioni meteomarine estreme, si svolgeranno in condizioni di sicurezza.

Per quanto riguarda l'area di evoluzione in corrispondenza dell'imboccatura sud del porto commerciale risulta che la costruzione delle nuove opere a scogliera previste per la protezione dello specchio acqueo dell'approdo turistico praticamente non ha alcun effetto sulle condizioni di agitazione ondosa nell'area di evoluzione

Anche relativamente alle condizioni di agitazione ondosa lungo il tratto di costa posta a sud delle nuove opere foranee i risultati delle elaborazioni svolte dimostrano chiaramente che la realizzazione della nuova diga posta in prosecuzione della diga della Vegliaia, anche per la direzione estrema 190°N, non produce alcuna modifica alle attuali condizioni di attacco del moto ondoso.

Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

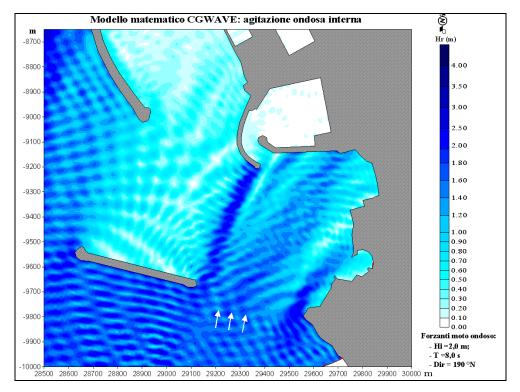


Figura 6.3 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=190°N; H=2m; T=8s).

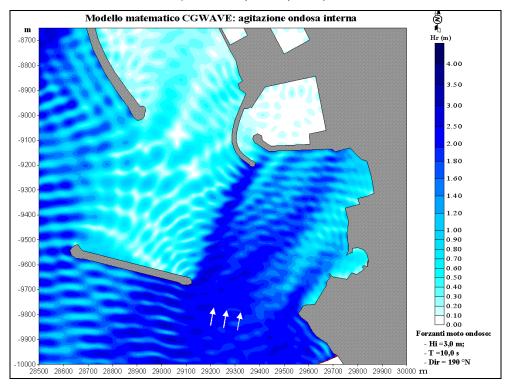


Figura 6.4 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=190°N; H=3m; T=10s).

\wedge
Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

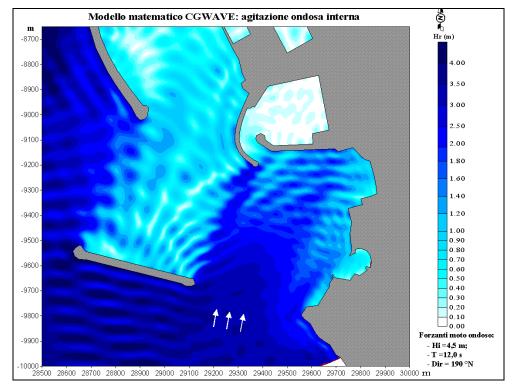


Figura 6.5 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=190°N; H=4.5m; T=12s).

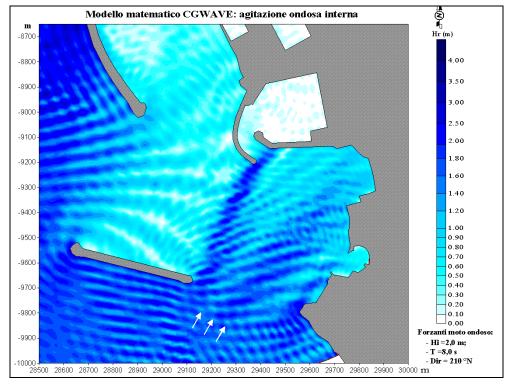


Figura 6.6 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=210°N; H=2m; T=8s).

\wedge	
Autorità Portuale di	
Livorno	
Piano Regolatore Portuale	
2012	

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

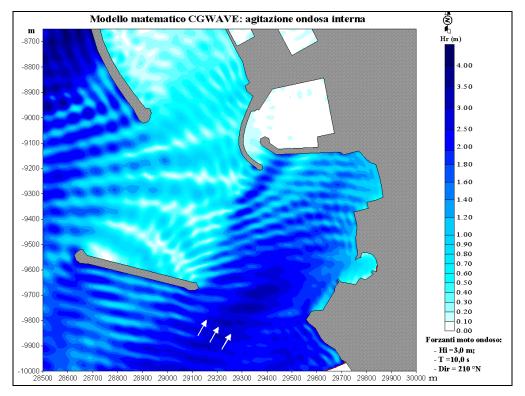


Figura 6.7 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=210°N; H=3m; T=10s).

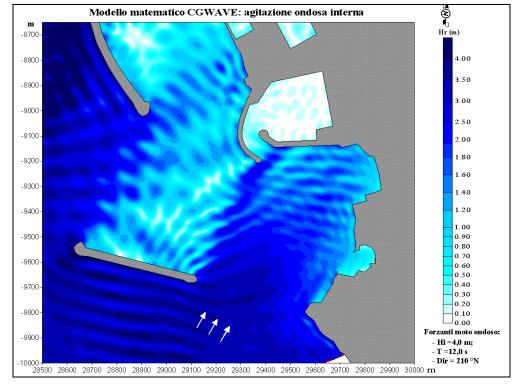


Figura 6.8 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=210°N; H=4m; T=12s).

\wedge
Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marz	zo 2013				
10	010	RR	011	-0	MAR

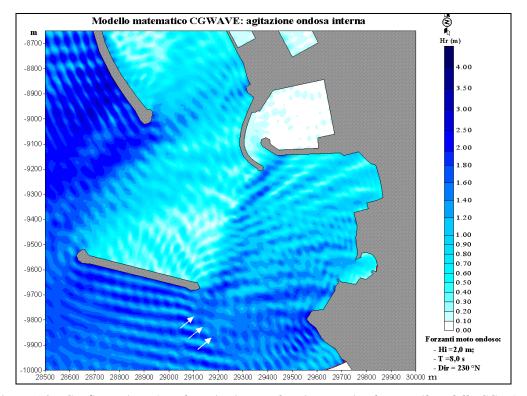


Figura 6.9 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=230°N; H=2m; T=8s).

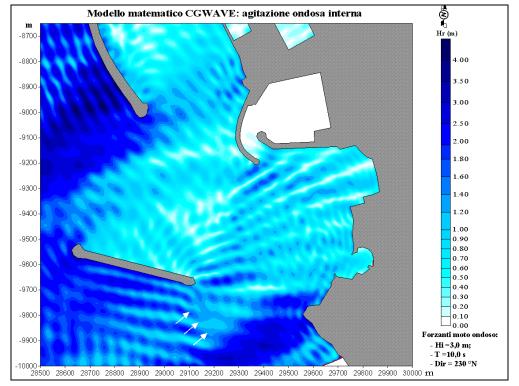


Figura 6.10 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=230°N; H=3m; T=10s).

\wedge
Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso									
Data: marzo 2013									
10	010	RR	011	-0	MAR				

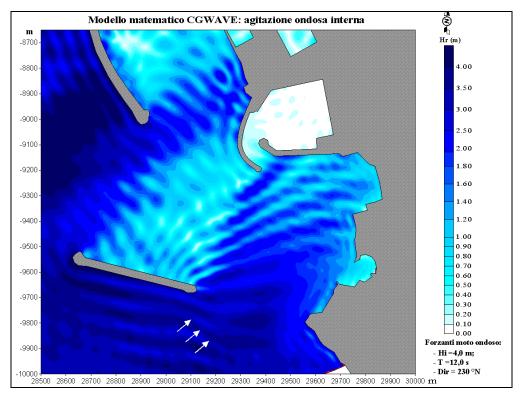


Figura 6.11 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=230°N; H=4m; T=12s).

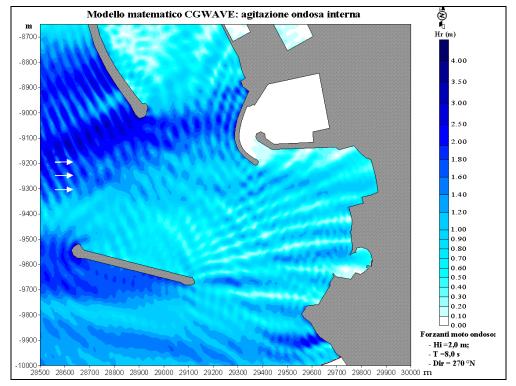


Figura 6.12 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=270°N; H=2m; T=8s).

\wedge			
Autorità Portuale di			
Livorno			
Piano Regolatore Portuale			
2012			

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso								
Data: marzo 2013								
10	010	RR	011	-0	MAR			

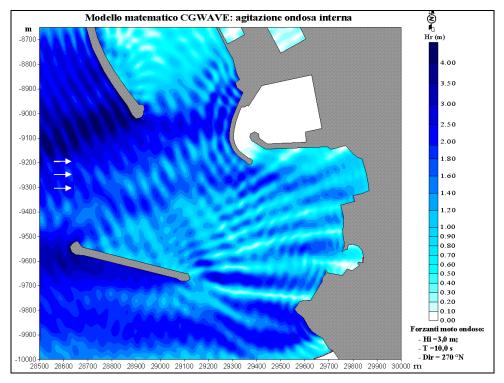


Figura 6.13 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=270°N; H=3m; T=10s).

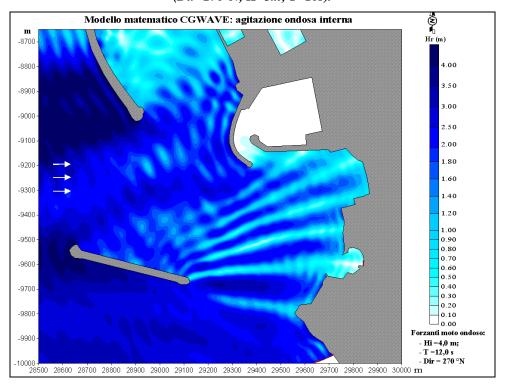


Figura 6.14 – Configurazione Attuale: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=270°N; H=4m; T=12s).

\wedge
Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

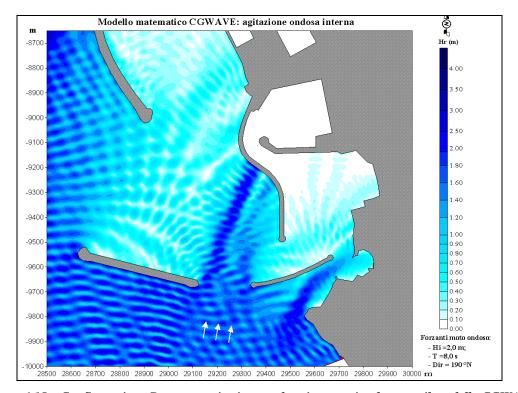


Figura 6.15 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=190°N; H=2m; T=8s).

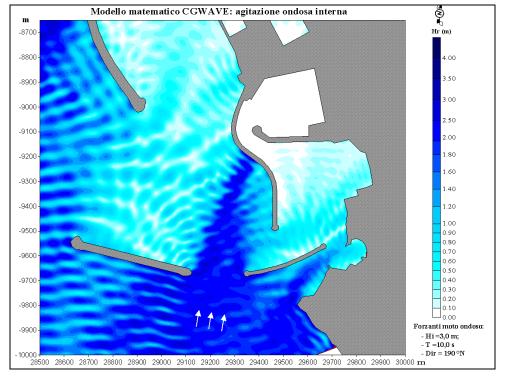


Figura 6.16 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=190°N; H=3m; T=10s).

\wedge	
Autorità Portuale di	
Livorno	
Piano Regolatore Portuale	
2012	

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10 010 RR 011 -0 MAR						

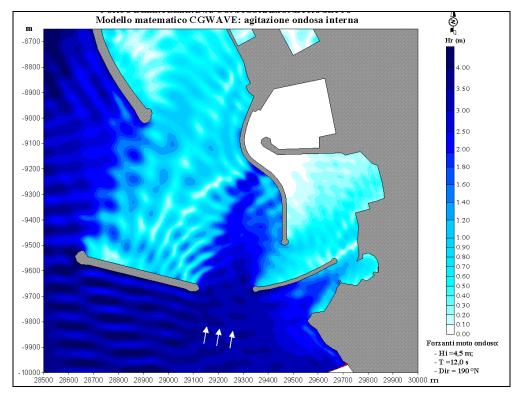


Figura 6.17 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=190°N; H=4.5m; T=12s).

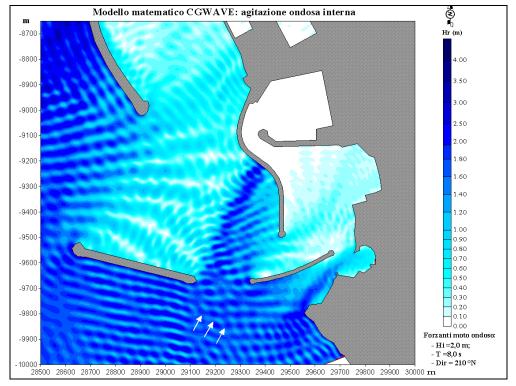


Figura 6.18 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=210°N; H=2m; T=8s).

\wedge	
Autorità Portuale di	
Livorno	
Piano Regolatore Portuale	
2012	

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10 010 RR 011 -0 MAR						

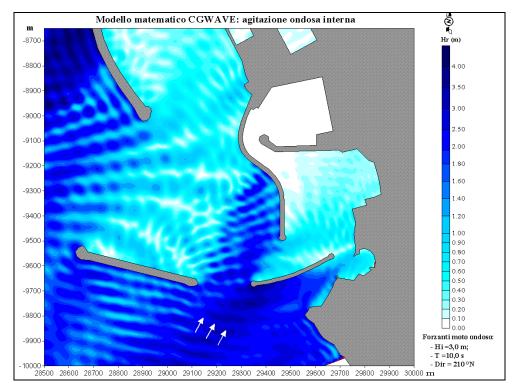


Figura 6.19 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=210°N; H=3m; T=10s).

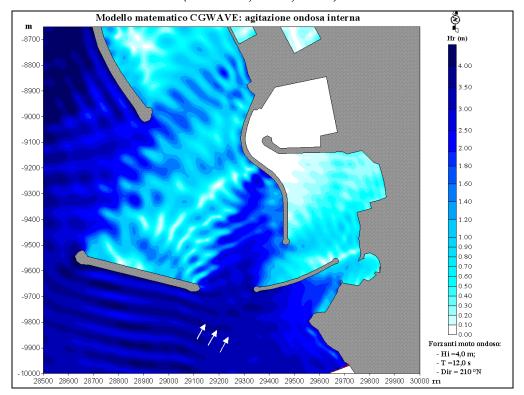


Figura 6.20 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE ($Dir=210^{\circ}N; H=4m; T=12s$).

Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10 010 RR 011 -0 MAR						

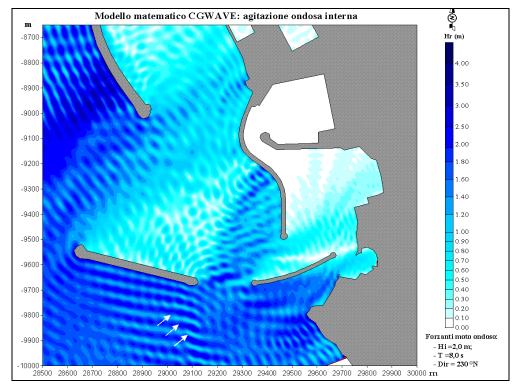


Figura 6.21 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=230°N; H=2m; T=8s).

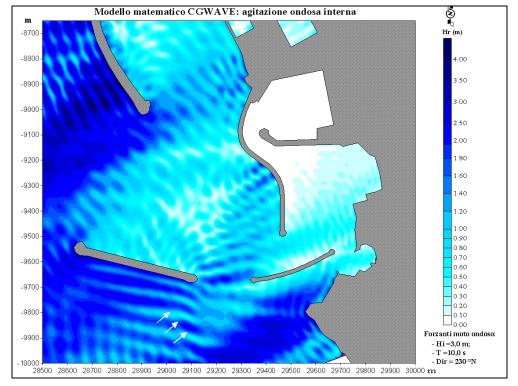


Figura 6.22 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=230°N; H=3m; T=10s).

\wedge
Autorità Portuale di
Livorno
Piano Regolatore Portuale
2012

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10 010 RR 011 -0 MAR						

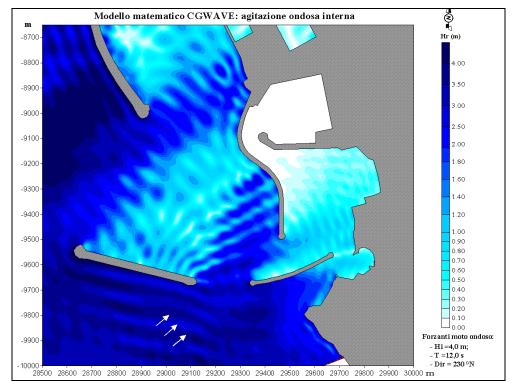


Figura 6.23 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=230°N; H=4m; T=12s).

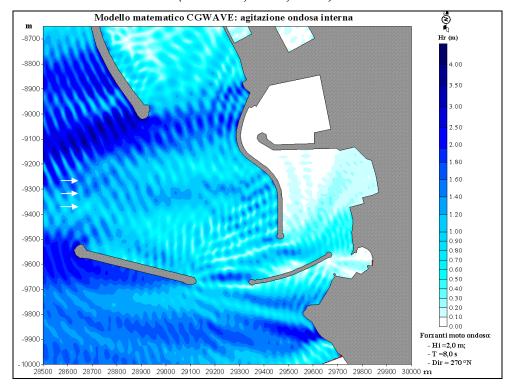


Figura 6.24 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=270°N; H=2m; T=8s).

\wedge	
Autorità Portuale di	
Livorno	
Piano Regolatore Portuale	
2012	

Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10 010 RR 011 -0 MAR						

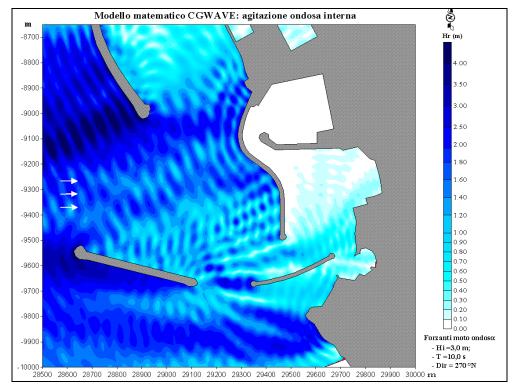


Figura 6.25 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=270°N; H=3m; T=10s).

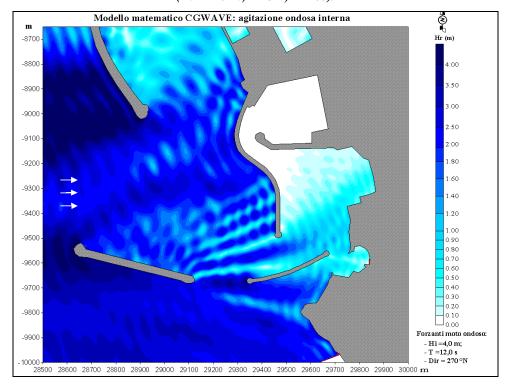


Figura 6.26 – Configurazione Progetto: agitazione ondosa interna simulata con il modello CGWAVE (Dir=270°N; H=4m; T=12s).



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

APPENDICE 1: DESCRIZIONE SINTETICA DEL MODELLO MATEMATICO VEGA

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

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

L'equazione ellittica di Helmholtz risulta: $\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0$

dove:

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

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

 $abla^2$ = 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).



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10	010	RR	011	-0	MAR	

Il modello numerico VEGA risolve l'equazione di Helmholtz tramite la tecnica numerica degli elementi di contorno. In breve la tecnica consiste nel ridurre l'equazione ellittica di Helmholtz definita sul campo bidimensionale di calcolo ad un'equazione integrale definita sulla sola frontiera del campo. La discretizzazione della frontiera permette quindi di ridurre l'equazione integrale ad un sistema di equazioni lineari definite nel campo complesso dove le incognite sono costituite da un sistema di sorgenti distribuite sulla frontiera discretizzata. La risoluzione del sistema di equazioni, che costituisce la parte più onerosa dal punto di vista computazionale del modello numerico, è ottenuta utilizzando il metodo delle eliminazioni successive di Gauss. La dimensione del sistema di equazioni dipende dal numero di sorgenti incognite introdotte sulla frontiera che risulta essere a sua volta funzione della lunghezza d'onda (sono necessarie almeno 5 sorgenti per lunghezza d'onda) e della dimensione dell'elemento (banchina, canale) più corto presente nell'area da simulare (sono necessarie almeno 6 sorgenti per ogni elemento). Risolto il sistema di equazioni è quindi possibile calcolare in ogni punto del campo di potenziale delle velocità orbitali delle particelle idriche in superficie, l'altezza d'onda e la sua fase.

Il modello numerico richiede i seguenti dati in ingresso:

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

Il modello fornisce come risultati:

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

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



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

APPENDICE 2: DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO CGWAVE

Introduzione

Il sistema CGWAVE è stato sviluppato dalla University of Maine per conto della United States Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station per stimare il campo d'onda all'interno dei porti, in prossimità della costa, nelle insenature costiere ed in prossimità delle strutture fisse e mobili.

Infatti tale modello è in grado di simulare la propagazione del moto ondoso tenendo conto degli effetti combinati della rifrazione, diffrazione e riflessione, e dei fenomeni dissipativi dovuti al frangimento del moto ondoso ed all'attrito sul fondo, di fondamentale importanza per la determinazione dell'agitazione ondosa residua all'interno dei bacini portuali.

Il modello SMS è provvisto di pre-post processore grafico per programmi che richiedono griglie 2D agli elementi finiti sviluppato dall'Engineering Computer Graphics Laboratory a Brigham.

Equazioni di base

La soluzione della forma ellittica bidimensionale dell'equazione delle onde che si propagano su fondali lentamente variabili (mild-slope wave equation) è un criterio generalmente adottato per lo studio delle onde di gravità nelle aree costiere.

Questa equazione, che simula la diffrazione, la rifrazione e la riflessione delle onde in una regione costiera caratterizzata da fondali aventi pendenza variabile, può essere scritta nel modo seguente:

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

dove:

- $\hat{\eta}(x,y)$: funzione complessa dell'elevazione della superficie libera dalla quale può essere stimato il valore dell'altezza d'onda;
- σ = frequenza angolare;
- C(x, y): celerità di fase (σ/k);



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10	010	RR	011	-0	MAR	

- $C_g(x,y)$: celerità di gruppo ($\partial \sigma/\partial k = nC$) con $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}\right)$;
- k(x,y): numero d'onda $(=2\pi/L)$ correlato alla profondità locale d(x,y) attraverso la relazione di dispersione lineare $\sigma^2 = gk \tanh(kd)$.

Per tenere conto degli effetti dissipativi dovuti all'attrito sul fondo ad al frangimento del moto ondoso l'equazione 1 può essere modificata nel modo seguente:

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

dove w è un fattore d'attrito e γ il parametro di frangimento dell'onda.

Seguendo la formulazione di Dalrymple et al. (1984), CGWAVE utilizza la seguente espressione per il fattore di dissipazione w:

$$w = \left(\frac{2n\sigma}{k}\right) \left[\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd)\sinh kd}\right]$$

dove a = H/2, ampiezza d'onda, e f_r , coefficiente d'attrito, sono parametri scelti come condizioni di input per il modello e definiti dall'utente.

Per il parametro che tiene conto del frangimento viene utilizzata la seguente espressione:

$$\gamma = \frac{\chi}{d} \left(1 - \frac{\Gamma^2 d^2}{4a^2} \right)$$

Dove χ è una costante assunta nel modello pari a 0.15 e Γ è una costante empirica assunta nel modello pari a 0.4.

Condizioni al contorno

L'equazione 2 utilizzata dal modello CGWAVE per la stima del campo d'onda richiede l'imposizione di opportune condizioni al contorno da introdurre lungo tutto il perimetro del dominio di calcolo. In generale lungo il contorno che rappresenta la costa o le strutture viene applicata la seguente condizione di riflessione:

$$\frac{\partial \hat{\eta}}{\partial n} = \alpha \hat{\eta} \tag{3}$$



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso						
Data: marzo 2013						
10	010	RR	011	-0	MAR	

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

Per semplicità α è generalmente rappresentato come:

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

dove K_r è il coefficiente di riflessione.

Lungo il contorno che rappresenta le condizioni di mare aperto, dove le onde direzionate verso il largo devono propagarsi verso l'infinito viene applicata la condizioni di radiazione Sommerfeld:

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial \hat{\eta}_s}{\partial r} + p \hat{\eta}_s + q \frac{\partial \hat{\eta}_s^2}{\partial \mathcal{G}^2} = 0 \tag{6}$$

dove

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



Titolo Elaborato: Studio della penetrazione del moto ondoso					
Data: marzo 2013					
10	010	RR	011	-0	MAR

Nell'equazione sopra riportata k_0 può essere assunto pari al numero d'onda corrispondente alla profondità media che si ha lungo il contorno aperto del dominio di calcolo schematizzato. L'equazione 6 viene utilizzata dal modello CGWAVE solo lungo la linea di contorno semicircolare che delimita, lato mare, il dominio di calcolo; al'interno del dominio stesso viene applicata l'equazione di "mild-slope".