



**LA SPEZIA
CONTAINER TERMINAL**



Autorità di Sistema Portuale
del Mar Ligure Orientale
Porti di La Spezia e
Marina di Carrara



**PORTO DI LA SPEZIA
AMPLIAMENTO TERMINAL RAVANO**

PROGETTO ESECUTIVO

TITOLO ELABORATO

STUDIO DELLE CONDIZIONI DEL MOTO ONDOSO

CODICE ELABORATO

21 08 PE R202 00

Rev.	Data	Causale
0	05/05/2023	Emissione finale per verificatore
1		
2		
3		

IL COMMITTENTE



LSCT S.p.a.
Viale San Bartolomeo, 20
19126 - La Spezia (SP)
C.F.00072960115 - P.IVA 00859620114

IL PROGETTISTA



Modimar Project S.r.l.
Via Asmara, 72 - 00199 Roma (RM)
P. IVA 16016151009



GES - Geotechnical Engineering Service S.r.l.
Via Sandro Totti, 7/A - 60131 Ancona (AN)
P. IVA 02528430420



GeoEquipe - Studio Tecnico Associato
Via Sandro Pertini, 55 - 62029 Tolentino (MC)
P. IVA 00817500432

Dimensioni foglio:

A4

Redatto:

Del Bianco

Controllato:

Sanzone

Approvato:

Tartaglino

Note:

INDICE

1	PREMESSA	2
2	METODOLOGIA DI STUDIO.....	4
2.1	PROCESSI CHE INFLUISCONO SULL'AGITAZIONE INTERNA DELLA RADA DI LA SPEZIA	4
2.2	MODELLISTICA NUMERICA APPLICATA	5
3	DATI DI BASE	8
3.1	CONDIZIONI DI MOTO ONDOSI AL LARGO	8
3.2	CONDIZIONI DI MOTO ONDOSI ESTREME AL LARGO	9
3.3	CONDIZIONI DI MOTO ONDOSI ALL'ESTERNO DELLA RADA DELLA SPEZIA .	10
4	RICOSTRUZIONE DEL MOTO ONDOSI ALL'INTERNO DELLA RADA DELLA SPEZIA	12
4.1	DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO	12
4.2	SET-UP DEL MODELLO E CONFIGURAZIONE DI CALCOLO.....	12
5	RICOSTRUZIONE DEL CLIMA DI MOTO ONDOSI	14
6	ANALISI DELLE CONDIZIONI ESTREME DI MOTO ONDOSI.....	22
7	STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSI NEL TERZO BACINO PORTUALE.....	30
7.1	DESCRIZIONE DEL MODELLO CGWAVE	30
7.2	IMPLEMENTAZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO.....	30
7.3	DEFINIZIONE DEI COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE LUNGO IL CONTORNO	31
7.4	CONDIZIONI DI MOTO ONDOSI AL CONTORNO	32
7.5	METODOLOGIA DI ANALISI.....	34
7.6	STUDIO DELLA CONFIGURAZIONE DI PROGETTO	36
7.7	ANALISI DEGLI STATI DI MARE ESTREMI.....	43
7.8	ANALISI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI	47

	<p style="text-align: center;">NUOVO TERMINAL RAVANO PORTO DI LA SPEZIA</p>	<p style="text-align: center;">Progetto Esecutivo</p>
--	---	---

1 PREMESSA

La Soc. LSCT (La Spezia Container Terminal), facente parte del gruppo Contship Italia, ha pianificato di realizzare nel porto commerciale di La Spezia un nuovo terminal contenitori in grado di ricevere navi portacontainer di grandi dimensioni tipo ULVC (di lunghezza 399 m) e unità di dimensione inferiore tipo New Panamax (Loa = 365m).

Ha pertanto incaricato l’RTP costituito dalle Società Modimar Project S.r.l., GES S.r.l. e GEOEQUIPE, di sviluppare il progetto esecutivo degli interventi necessari per la realizzazione del “Nuovo Terminal Ravano”.

La presente relazione riporta i risultati dello studio specialistico condotto per valutare le condizioni di moto ondoso in prossimità e all’interno del Terzo Bacino del porto di La Spezia.

L’obiettivo dello studio riguarda l’analisi del regime di moto ondoso su base annuale e la valutazione delle condizioni di moto ondoso che si verificano in occasione di eventi estremi, anche in relazione alle condizioni di agitazione ondosa in prossimità delle banchine che possono condizionare l’operatività e la sicurezza per le navi all’ormeggio.

Per lo svolgimento dello studio sono stati presi a riferimento i risultati dei seguenti studi specialistici:

- S1 – Studio Meteomarinario (Volumi 1 e 2);
- S4 – Studio Idrodinamico – Studio modellistico dell’agitazione ondosa all’interno del Porto di La Spezia;

redatti dall’ATI Modimar - Technital nell’ambito dell’accordo quadro quadriennale dal titolo: “Servizi di modellistica numerica per lo studio dell’idrodinamica, del trasporto di sedimenti e della morfodinamica delle aree costiere dei porti di La Spezia e di Marina di Carrara”.

I risultati dei suddetti studi specialistici sono stati integrati in questa sede con una serie di simulazioni aggiuntive che hanno riguardato:

- la generazione e la propagazione con il modello numerico SWAN degli eventi di moto ondoso rappresentativi del regime di moto ondoso al largo su base annuale



allo scopo di valutare le condizioni di moto ondoso in prossimità del terzo bacino portuale;

- la generazione e la propagazione, da largo all'interno della Rada di La Spezia, degli stati di mare estremi (moto ondoso, vento e livello marino) con tempo di ritorno 2, 10, 50 e 100 anni con il modello SWAN;

Per rendere più esaustiva la lettura del presente documento nei capitoli seguenti sono richiamati sinteticamente i dati di riferimento e i risultati di alcuni elementi di indagine e modellazione trattati ed esposti nei suddetti studi che hanno costituito la base di riferimento per l'implementazione delle nuove modellazioni numeriche.

L'insieme delle simulazioni condotte per il presente studio specialistico hanno portato alla definizione delle condizioni di moto ondoso frequenti che si verificano in prossimità del Terzo Bacino del Porto di La Spezia che risultano di estrema importanza per definire l'operatività delle banchine ricadenti nel bacino stesso.

I risultati ottenuti hanno consentito inoltre di determinare le condizioni di moto ondoso associate a determinati tempi di ritorno cui poter fare riferimento per il dimensionamento delle opere previste dal progetto di realizzazione del nuovo terminal Ravano.

	<p style="text-align: center;">NUOVO TERMINAL RAVANO PORTO DI LA SPEZIA</p>	<p style="text-align: center;">Progetto Esecutivo</p>
--	---	---

2 METODOLOGIA DI STUDIO

Il presente studio adotta la stessa metodologia di studio utilizzata nell'ambito dello Studio Idrodinamico S4 che ha riguardato la valutazione dell'agitazione ondosa nel porto di La Spezia.

In questa sede si è proceduto ad estendere i risultati del suddetto studio per definire le condizioni di moto ondoso che si possono presentare in corrispondenza del Terzo Bacino.

2.1 Processi che influiscono sull'agitazione interna della Rada di La Spezia

La rada della Spezia presenta una forma assimilabile a quella di un trapezio isoscele - ovvero utilizzando il termine francese a quella di un “*cul-de-sac*” - con l'asse principale, di lunghezza pari a circa 4,5 km, orientato lungo la direzione NW-SE e base maggiore, posta in corrispondenza della sua imboccatura naturale, di lunghezza pari a circa 3,0 km.

All'interno della rada e in corrispondenza della sua imboccatura naturale i fondali risultano dell'ordine dei 10÷12 m.

La rada è protetta da una diga foranea, di lunghezza poco superiore a 2,0 km, non collegata alla costa, che delimita due imboccature denominate “imboccatura o passo di ponente” e “imboccatura o passo di levante”. L'imboccatura di ponente risulta maggiormente schermata dal moto ondoso incidente da largo rispetto a quella di levante, a ragione della presenza delle Isole della Palmaria e del Tino.

A partire dalla zona foranea posta all'esterno dell'imboccatura di ponente, dedicata al traffico delle navi di maggiori dimensioni, parte un lungo canale artificiale (dragato), di lunghezza pari a circa 5,0 km, che attraversa la Rada lungo il suo asse principale e consente di accedere al Porto Commerciale localizzato in prossimità della zona più interna della Rada.

La notevole estensione dello specchio d'acqua della rada protetto dalla diga foranea consente che le onde possano essere generate dal vento all'interno della stessa rada. Gli stati di mare generati dal vento hanno caratteristiche in termini di altezza e periodo nettamente inferiori rispetto a quelle generate in mare aperto, ma tuttavia non trascurabili in relazione alle condizioni di ormeggio delle unità di minori dimensioni.

Allo stesso tempo la morfologia della rada a “*cul-de-sac*” orientata verso la traversia di scirocco unita ai suoi fondali relativamente modesti e alla estensione degli stessi bassi fondali (piattaforma continentale) posti all’esterno della rada lungo la stessa direzione, la rendono vulnerabile al verificarsi di sensibili fenomeni di sovrizzo di tempesta (“storm surge”) in occasione di violenti venti di scirocco, come quelli che si sono verificati durante l’evento meteo-marino del 28-30 ottobre 2018 che hanno determinato un rilevante innalzamento del livello medio del mare che in alcune zone ha raggiunto e superato la quota delle banchine specialmente nella parte più interna della rada dove si trova il Porto Commerciale.

I principali fenomeni fisici che intervengono sia nell’evoluzione delle onde generate in mare aperto che possono penetrare all’interno della rada della Spezia attraverso le imboccature portuali, sia nella generazione di onde ad opera del vento che può avvenire all’interno della stessa rada sono i seguenti:

1. la rifrazione e lo shoaling delle onde provenienti da largo che presentano energia dispersa in frequenza e direzione;
2. la penetrazione delle onde attraverso le imboccature portuali le quali nella loro propagazione all’interno della rada sono soggette a rifrazione e shoaling indotti in modo rilevante dal canale dragato che collega l’imboccatura di ponente con il Porto Commerciale. La diffrazione subita da queste onde risulta di interesse principalmente per la valutazione dell’agitazione ondosa nelle zone poste subito a ridosso della diga foranea, ma risulta di scarso interesse per quelle che penetrano nella zona più interna della rada;
3. la generazione di onde corte nella rada dovuta all’azione del vento;
4. il sovrizzo di tempesta indotto dall’azione del vento che può eccitare fenomeni di risonanza portuale.

2.2 Modellistica numerica applicata

Come descritto in precedenza le onde generate in mare aperto penetrano all’interno della Rada attraverso le due imboccature delimitate dalla diga foranea. Tuttavia l’energia associata a queste onde tende velocemente a ridursi all’interno della Rada sia a causa dei fenomeni sopra descritti sia a causa della loro dispersione areale particolarmente rilevante



nell'ampio specchio d'acqua protetto. In presenza di vento che agisce sulla rada avviene la rigenerazione di onde locali di ampiezza e periodo molto inferiori rispetto a quelle provenienti dal mare aperto.

Per tenere conto dei processi illustrati in precedenza è stato applicato il modello spettrale di generazione e propagazione del moto ondoso SWAN.

Per tenere conto dei processi illustrati in precedenza, come già effettuato nell'ambito dello studio S4, è stato applicato il modello spettrale di generazione e propagazione del moto ondoso SWAN.

Il modello numerico SWAN è in grado di riprodurre i fenomeni di propagazione e generazione delle onde di vento risolvendo l'equazione di bilancio di energia (wave action balance equation) tenendo conto del trasferimento di energia tra le componenti spettrali che si verifica sia in acqua profonda che su fondali limitati. Il modello è in grado di simulare anche i principali fenomeni dissipativi indotti dal frangimento in acqua profonda (white capping) e in acqua bassa.

Le simulazioni sono state condotte riproducendo i fenomeni di propagazione e generazione del moto ondoso per l'intera rada, includendo nelle simulazioni anche l'area posta all'esterno della stessa rada dove è stata imposta una condizione al contorno di moto ondoso variabile nello spazio, definita sulla base dei risultati ottenuti nei punti di propagazione LS1 e LS2 nell'ambito dello studio S1. Le simulazioni numeriche sono state condotte abbinando ad ogni stato di mare un vento ad esso correlato.

Per studiare l'ultima parte della propagazione del moto ondoso all'interno dello specchio acqueo del Terzo Bacino, dove gli effetti combinati di rifrazione, shoaling, diffrazione e riflessione devono essere simulati contemporaneamente, è stato utilizzato il codice numerico "phase resolving" CGWAVE che risolve l'equazione detta di "mild-slope", di tipo ellittico, mediante la tecnica numerica degli elementi finiti utilizzando, per discretizzare l'area di calcolo, elementi di forma triangolare con geometria comunque variabile nello spazio.

Si evidenzia che il codice CGWAVE, come tutti i modelli che risolvono la fase delle onde ("phase resolving"), non è in grado di simulare la generazione delle onde ad opera del vento.

In Figura 2-1 è mostrato lo schema della catena modellistica applicata per la valutazione delle condizioni di moto ondoso all'interno del primo bacino portuale del porto di La Spezia.

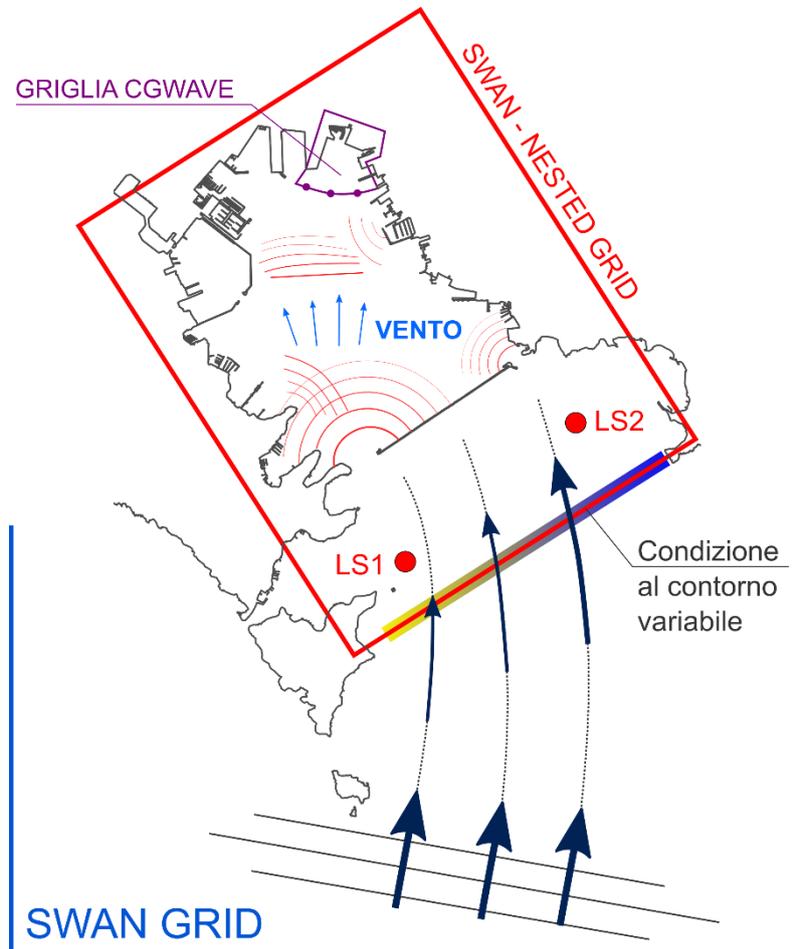


Figura 2-1. Schematizzazione della modellistica numerica applicata e della metodologia applicata.

3 DATI DI BASE

3.1 Condizioni di moto ondoso al largo

Il clima di moto ondoso e le condizioni di moto ondoso più gravose per il Porto di La Spezia sono state desunte dallo Studio Meteomarino (S1) al quale si rimanda per il necessario dettaglio riassumendo nel seguito i principali risultati.

La valutazione del clima di moto ondoso è stata effettuata partendo dalla serie storica oraria (1979-2018) dei dati di vento e moto ondoso ricostruita con un modello di generazione e propagazione del moto ondoso nel punto di coordinate 43.95°N, 9.88°E posto al largo di La Spezia, acquisita dal servizio di *hindcasting* del dipartimento DICCA dell'Università di Genova (Figura 3-1). Il clima ondometrico mostra chiaramente che le onde più frequenti e di maggiore altezza provengono dal settore di libeccio rispetto al quale la rada di La Spezia risulta ridossata.

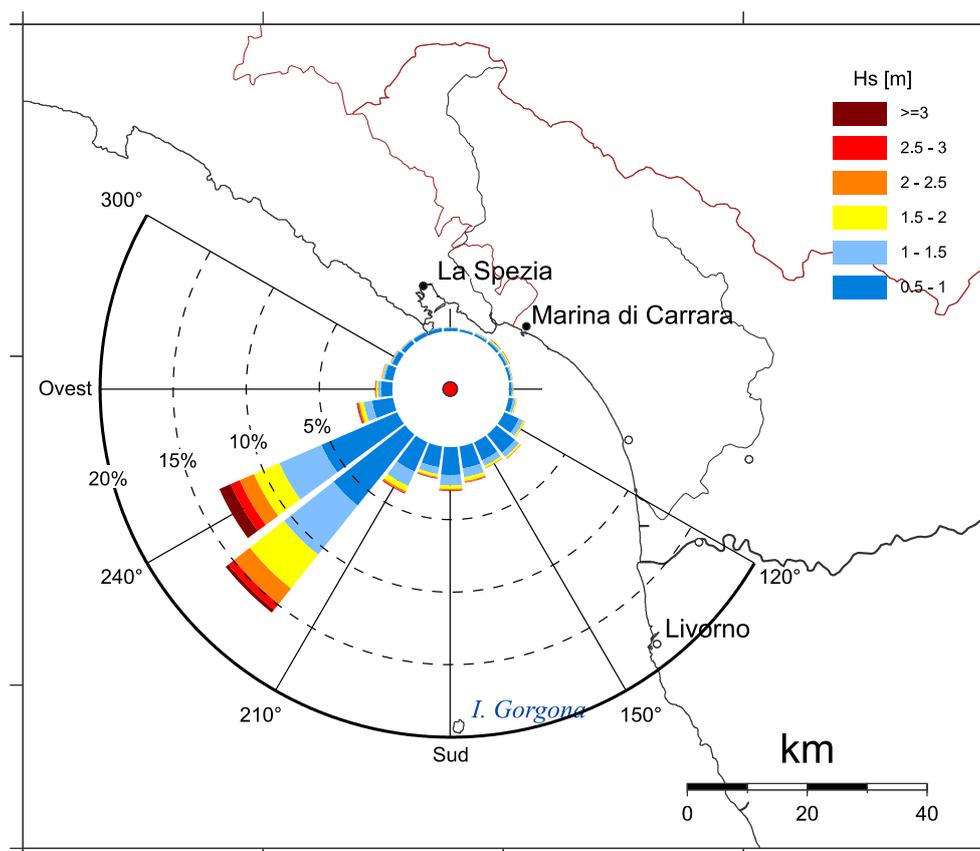


Figura 3-1. Frequenza di accadimento degli stati di moto ondoso con altezza d'onda superiore a 0.5 m ricostruiti dal DICCA al largo di La Spezia nel punto di coordinate 43.95°N, 9.88°E

3.2 Condizioni di moto ondoso estreme al largo

Sono stati individuati tre distinti settori di provenienza del moto ondoso: un settore di traversia principale compreso tra 210 °N e 270 °N, e due secondari compresi tra 150 °N e 210 °N e tra 270 e 330°N. Per ogni settore di traversia è stata trovata la legge di correlazione tra altezza significativa e periodo di picco che ha permesso di associare all'altezza d'onda estreme il periodo di picco proprio della mareggiata. Data l'esposizione della Rada di La Spezia le condizioni di moto ondoso più sfavorevoli per la penetrazione del moto ondoso all'interno della Rada dalle imboccature portuali, sono rappresentate dagli stati di mare provenienti dal settore 150 -210 °N.

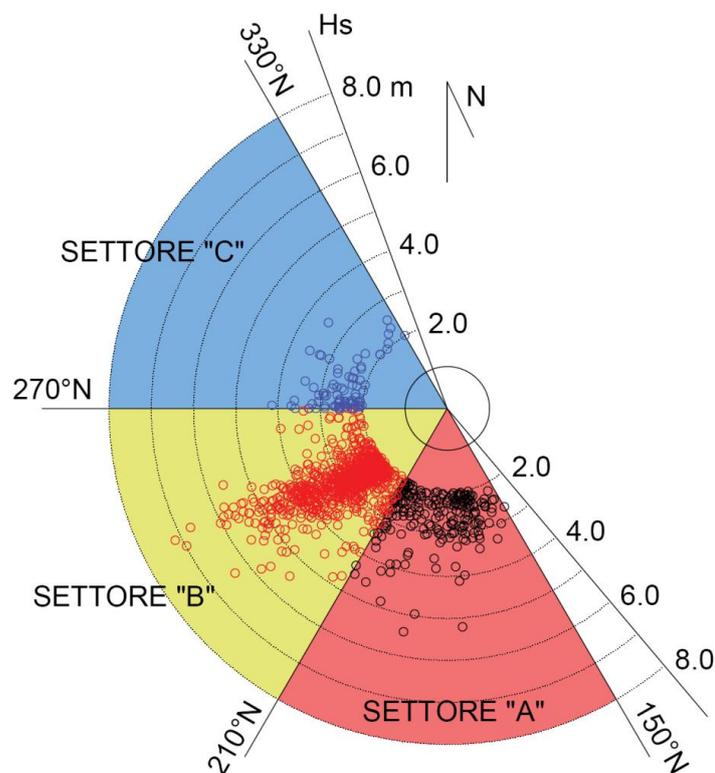


Figura 3-2 - La Spezia largo - distribuzione direzionale dei valori estremi per settori di provenienza

L'analisi statistica dei valori estremi di moto ondoso estratti dalla suddetta serie storica, opportunamente calibrati sulla base del confronto con i dati misurati dalla boa RON di La Spezia, ha permesso di valutare le condizioni di moto ondoso in funzione del tempo di ritorno riportate in Tabella 3-1.

Tabella 3-1. Eventi estremi di moto ondoso al largo di La Spezia in funzione del tempo di ritorno Tr.

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

3.3 Condizioni di moto ondoso all'esterno della Rada della Spezia

Nell'ambito dello Studio Meteomarino S1 è stato applicato il modello numerico di propagazione del moto ondoso SWAN per trasferire il clima di moto ondoso al largo, definito sulla base di una successione di stati di mare e di vento aventi ciascuno una determinata frequenza di accadimento, in due punti sottocosta localizzati all'esterno della diga foranea, in prossimità del "Passo di Levante" e del "Passo di Ponente" (vedi Figura 3-3).

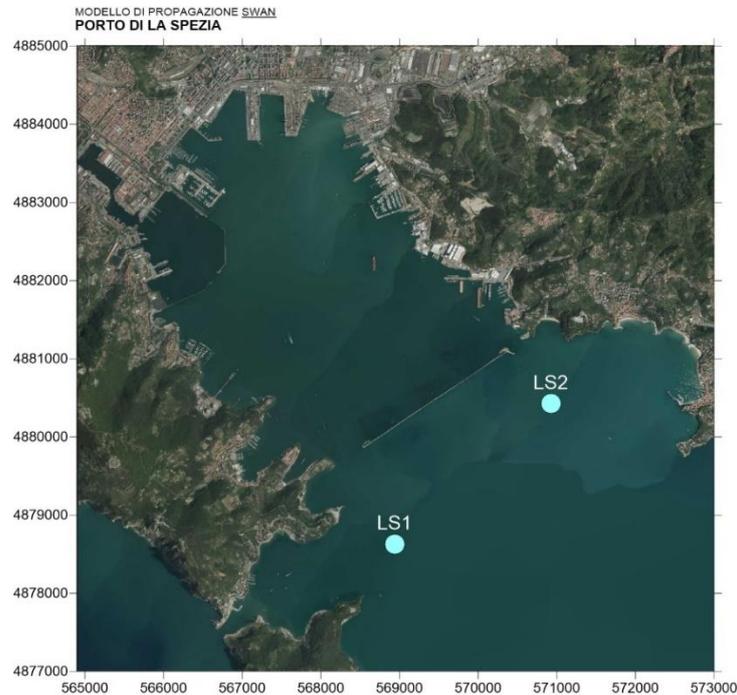


Figura 3-3. Ubicazione dei punti di calcolo utilizzati per le simulazioni con il modello SWAN.

Il regime di moto ondoso ottenuto nei punti LS1 ed LS2 è mostrato nelle rose di distribuzione di Hs riportate in Figura 3-4.

Il paragone tra i grafici polari di Figura 3-4 con quello di Figura 3-1, mostra chiaramente come le due imboccature portuali siano schermate dal moto ondoso incidente, in particolare nei confronti degli stati di mare di ponente (vedi punto LS1).

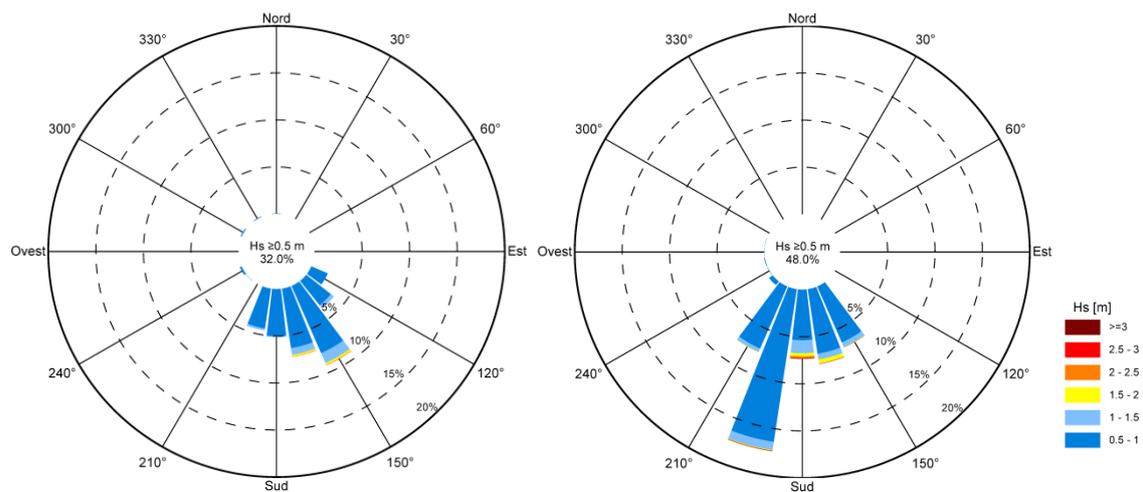


Figura 3-4. Clima di moto ondoso ricostruito all'esterno della Rada di La Spezia nei punti LS1 (sinistra) ed LS2 (destra)

4 RICOSTRUZIONE DEL MOTO ONDOSO ALL'INTERNO DELLA RADA DELLA SPEZIA

4.1 Descrizione del modello di calcolo

Per la propagazione e la generazione delle onde è stato utilizzato il modello numerico SWAN (Simulating WAVes Nearshore) sviluppato dall'università Tu-Delft.

Il modello numerico SWAN è in grado di riprodurre i processi di generazione e propagazione del moto ondoso tenendo conto dei fenomeni di rifrazione e shoaling, della dissipazione dovuta al frangimento in acqua profonda (white-capping), al frangimento in acqua bassa e all'attrito sul fondo. SWAN è in grado inoltre di riprodurre l'interazione non lineare tra le componenti spettrali durante la propagazione e la generazione ad opera del vento.

Il modello non è in grado di simulare pienamente degli effetti dovuti alla diffrazione del moto ondoso ma il suo schema di calcolo consente comunque di tenere in conto della distribuzione direzionale dell'energia che penetra attraverso le imboccature della rada. Un'ulteriore limitazione del modello è costituita dal fatto che non tiene conto dei fenomeni di riflessione all'interno del dominio di calcolo.

Il modello SWAN è in grado di riprodurre la rigenerazione dovuta al vento in presenza di condizioni di moto ondoso già formato, dovute alla penetrazione dell'energia attraverso le imboccature, consentendo di ricostruire il campo di moto ondoso all'interno della rada della Spezia.

4.2 Set-up del modello e configurazione di calcolo

Il set-up del modello per la propagazione del moto ondoso prevede la definizione dei seguenti dati di input:

- il dominio spaziale di calcolo necessario per la schematizzazione dello specchio acqueo in esame;
- la definizione dei parametri fisici e numerici per i fenomeni di dissipazione, discretizzazione del dominio delle frequenze, generazione del moto ondoso.
- la definizione delle forzanti al contorno in termini di onde e vento.

Per l'applicazione del modello di generazione e propagazione del moto ondoso SWAN è stata utilizzata una **griglia di dettaglio (nested grid)** che copre lo specchio acqueo della Rada di La Spezia. La griglia di calcolo è caratterizzata da maglie quadrate uniformi con risoluzione spaziale di 25 m.

Per la generazione della griglia sono stati utilizzati tutti i dati batimetrici più recenti messi a disposizione dall'AdSP o desunti dalle carte nautiche. In Figura 4-1 viene presentata l'estensione della griglia di calcolo (nested grid), e le batimetrie ricostruite all'interno del dominio di calcolo.

Le condizioni al contorno sono state definite applicando uno spettro di moto ondoso tipo JONSWAP caratterizzato da un'altezza d'onda significativa H_s , un periodo di picco T_p ed una direzione media di propagazione.

Nelle simulazioni sono stati considerati anche gli effetti dissipativi legati al frangimento, all'attrito dei fondali, la trasformazione dello spettro ondoso ed i fenomeni di generazione di moto ondoso dovuti alla presenza del vento. In via cautelativa ed in favore della sicurezza in tutte le simulazioni eseguite è stato applicato un vento costante ed uniforme su tutto il dominio di calcolo.

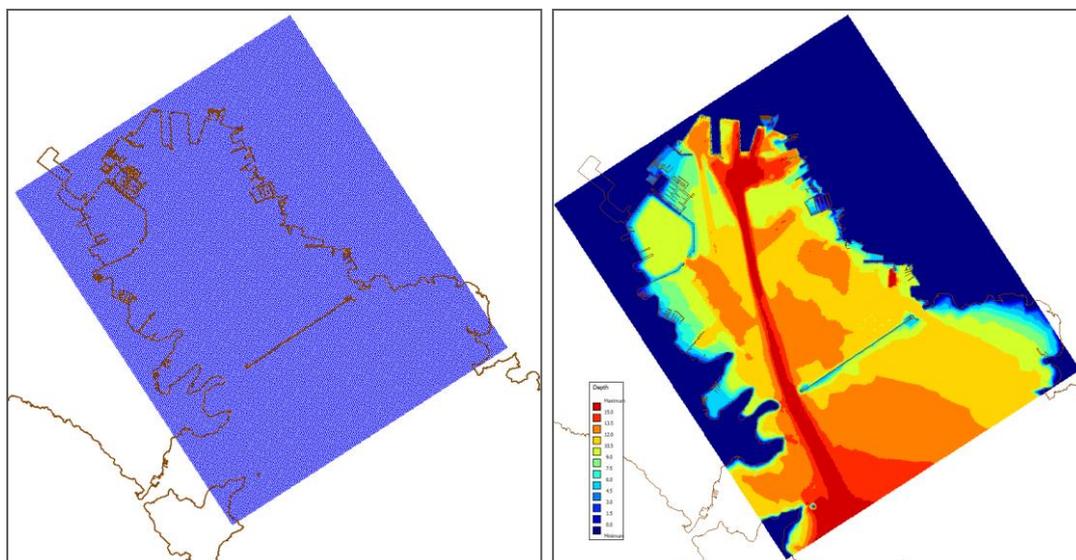


Figura 4-1. Griglia di calcolo di dettaglio (nested grid) utilizzata per le simulazioni della propagazione e generazione del moto ondoso all'interno della rada di La Spezia con il modello SWAN.

5 RICOSTRUZIONE DEL CLIMA DI MOTO ONDOSI

Sfruttando le condizioni di moto ondoso ottenute nei punti di calcolo LS1 ed LS2 grazie alla propagazione sottocosta con SWAN svolta nell'ambito dello studio S1 è stato possibile definire al contorno della griglia di calcolo una condizione variabile nello spazio. In questo modo è stato possibile tenere conto nelle simulazioni delle diverse condizioni di moto ondoso che si possono realizzare alle due imboccature della rada.

Seguendo la stessa procedura di calcolo adottata per il trasferimento del moto ondoso da largo sotto costa adottata nello studio S1, sono state effettuate numerose simulazioni per propagare i 105 stati di mare, rappresentativi del clima di moto ondoso al largo all'interno della rada, ricostruendo una serie sintetica costituita da 350635 stati di mare.

Le simulazioni sono state condotte abbinando ad ogni stato di mare un campo di vento uniforme del quale intensità e direzione di provenienza sono state definite sulla base dei dati di moto ondoso e vento in ricostruzione forniti dal DICCA e della corrispondenza direzione vento/mare ottenuta con il calcolo dei fetch efficaci.

I risultati delle simulazioni sono stati estratti in 3 punti di calcolo, M1, M2 e M3, posti all'esterno del Terzo Bacino Portuale (vedi Figura 5-1) che ricadono su fondali rispettivamente di -17.0 m, -15.4 m, -13.9 m.



Figura 5-1. Punti di ricostruzione del moto ondoso all'interno della Rada di La Spezia.

Nei grafici riportati in seguito sono riportati i risultati ottenuti nel punto di ricostruzione M2 che per la sua posizione baricentrica rispetto al Terzo Bacino può essere preso come riferimento per la definizione del regime di moto ondoso.

Come atteso, data la configurazione estremamente ridossata della rada della Spezia, il regime di moto ondoso nel punto M2 risulta piuttosto mite. In prevalenza si verificano stati di mare di breve periodo $1.0 < T_p < 3.0$ s riconducibili ad “onde di vento” generate all’interno della rada (Figura 5-2). Stati di mare con $T_p > 5$ s, dovuti ad eventi provenienti da largo che si propagano nella rada, si verificano in misura minore ma comunque non trascurabile (circa il 10%). Gli stati di moto ondoso nel punto M2 sono contraddistinti da valori di altezza d’onda significativa H_s compresi tra $0.1 < H_s < 0.3$ m, solo occasionalmente si hanno valori di $H_s > 0.5$ m. Mediamente la soglia di $H_s = 0.5$ m viene superata 72 ore anno (Figura 5-3).

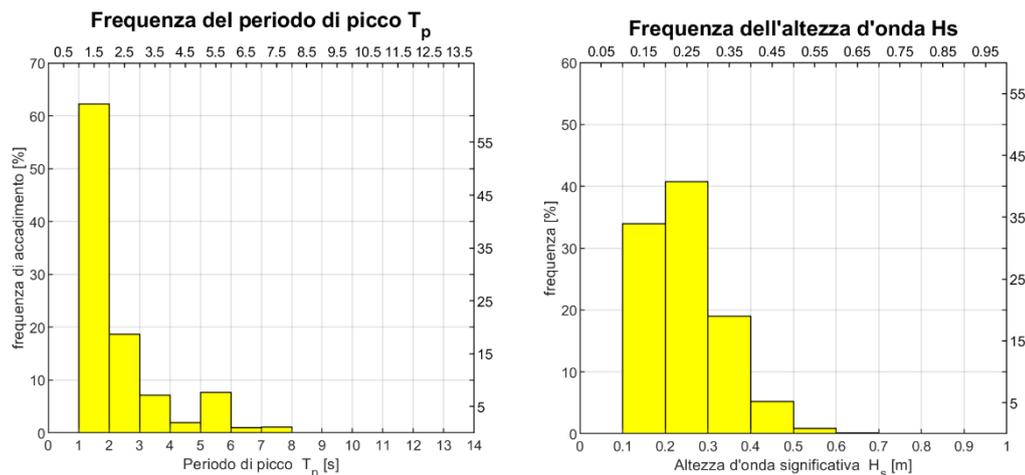


Figura 5-2 Frequenza di accadimento del periodo di picco T_p e dell'altezza d'onda significativa H_s nel punto M2

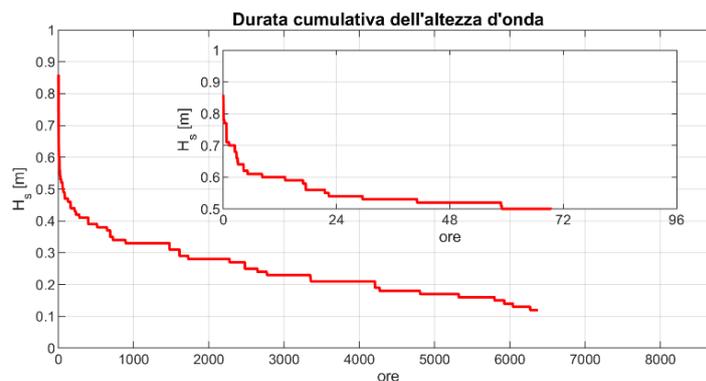


Figura 5-3. Curva di durata cumulativa dell'altezza d'onda significativa H_s ottenuta nel punto M2.

I risultati, in termini di frequenza di accadimento di H_s e T_p , ottenuti nei punti M1 e M3 sono riportati per confronto nei grafici di Figura 5-4 e Figura 5-5.

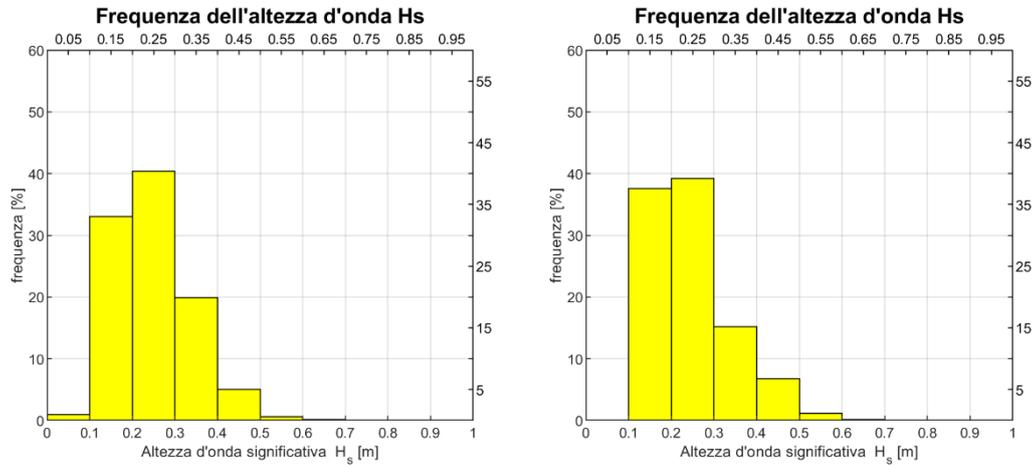


Figura 5-4. Frequenza di accadimento di H_s nei punti M1 (sinistra) e M3 (destra).

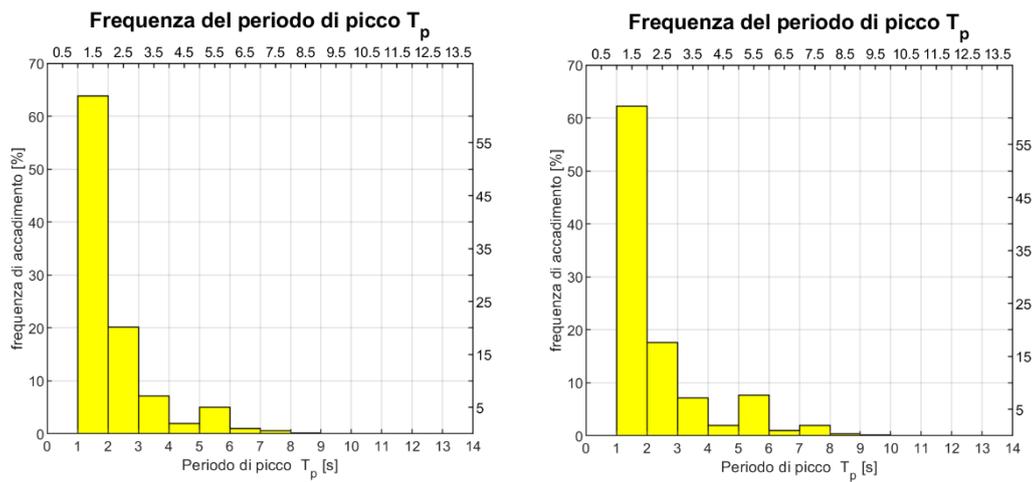


Figura 5-5. Frequenza di accadimento del periodo di picco T_p nei punti M1 (sinistra) e M3 (destra).

**Tabella 5-1. Numero di eventi di moto ondoso ricostruiti con il modello SWAN nel punto di propagazione M2 suddivisi per classi di altezza d'onda e direzione di provenienza.**

Dir ° Nord	Punto M2 - Altezza d'onda significativa [m]										Tot
	calme	0.125 0.250	0.250 0.375	0.375 0.500	0.500 0.625	0.625 0.750	0.750 0.875	0.875 1.000	1.000 1.500	1.500 2.000	
0		1832	0	0	0	0	0	0	0	0	1832
30		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150		23226	24892	8940	1011	78	8	0	0	0	58155
180		11554	18272	2434	653	36	20	0	0	0	32969
210		35424	25680	7105	278	15	0	0	0	0	68502
240		46477	10378	4629	661	15	0	0	0	0	62160
270		16858	668	68	7	0	0	0	0	0	17601
300		6467	96	0	0	0	0	0	0	0	6563
330		3243	12	0	0	0	0	0	0	0	3255
calme	99598										99598
Tot	99598	145081	79998	23176	2610	144	28	0	0	0	350635

Tabella 5-2. Frequenza di accadimento degli stati di moto ondoso nel punto di ricostruzione M2.

Dir ° Nord	Punto M2 - Altezza d'onda significativa [m]										Tot
	calme	0.125 0.250	0.250 0.375	0.375 0.500	0.500 0.625	0.625 0.750	0.750 0.875	0.875 1.000	1.000 1.500	1.500 2.000	
0		0.5									0.52
30											0.00
60											0.00
90											0.00
120											0.00
150		6.6	7.1	2.5	0.3	0.02	0.00				16.59
180		3.3	5.2	0.7	0.2	0.01	0.01				9.40
210		10.1	7.3	2.0	0.08	0.00					19.54
240		13.3	3.0	1.3	0.2	0.00					17.73
270		4.8	0.2	0.02	0.00						5.02
300		1.8	0.03								1.87
330		0.9	0.00								0.93
calme	28.4										28.41
Tot	28.4	41.38	22.82	6.61	0.74	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	100.0
Tot. Cumulato		69.78	92.60	99.21	99.95	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

Gli eventi ricostruiti nel punto M2 si presentano in prevalenza dal settore compreso tra 150 °N e 240 °N (Tabella 5-1 e Tabella 5-2). Gli stati di mare con H_s si presentano in maggior misura dal Libeccio (37%) mentre dal settore Scirocco-Mezzogiorno si verificano in media con una frequenza del 26%. Le calme ($H_s < 0.125$ m) rappresentano circa il 28% del totale degli eventi ricostruiti.

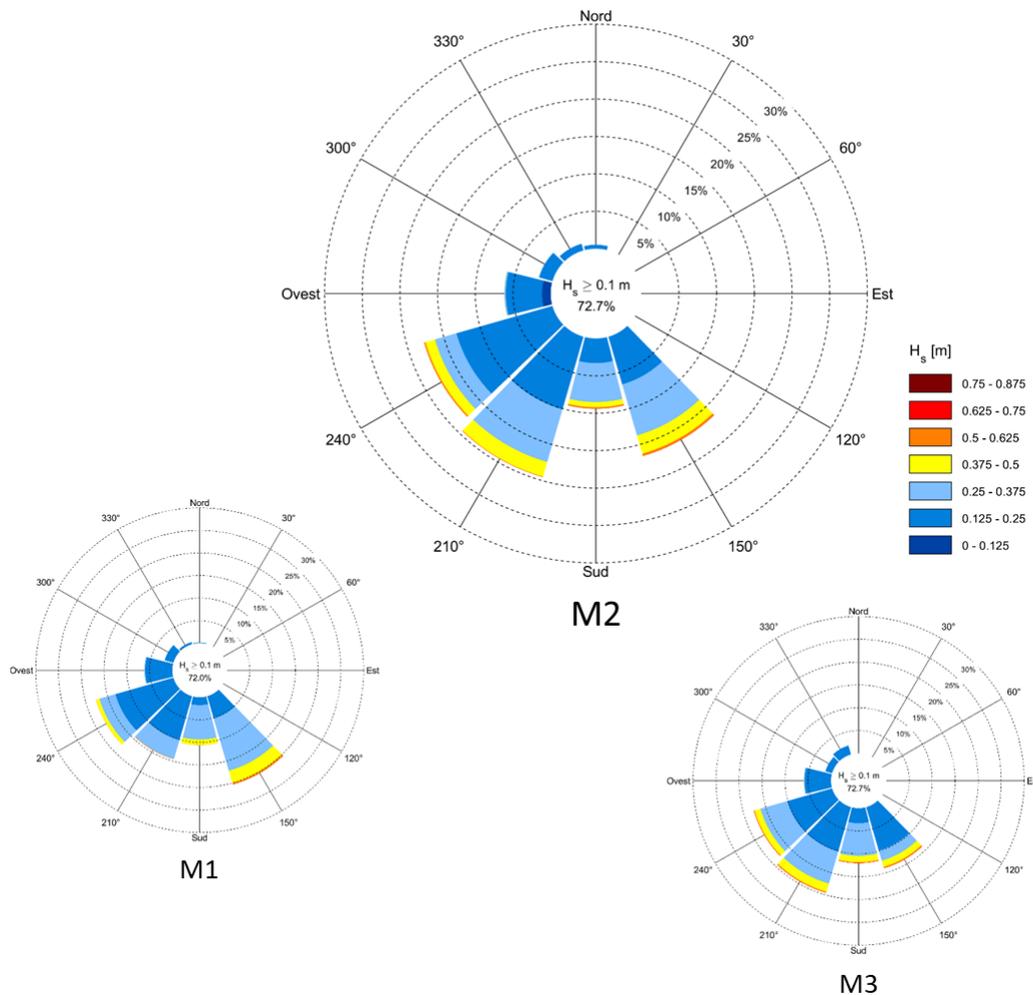


Figura 5-6. Distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso ricostruiti con il modello SWAN nei punti M1, M2 e M3 in prossimità del Terzo Bacino del Porto di La Spezia.

La distribuzione direzionale degli stati di mare ricostruiti all'interno della rada di La Spezia nei punti M1, M2 e M3, mostrata nei diagrammi di Figura 5-6, è subordinata ai processi di propagazione del moto ondoso (penetrazione attraverso le imboccature portuali, rifrazione dovuta ai fondali interni alla rada) e generazione dovuta al vento all'interno della rada.

Il punto M1, rispetto ai punti M2 e M3, presenta una minore presenza di eventi di libeccio. L'area di generazione verso SudOvest per il punto M1 è infatti limitata dalla diga foranea dell'arsenale militare, di conseguenza si riscontra una minor presenza di stati di mare provenienti da 210-240 °N.

Viceversa il punto M3 risulta più ridossato nei confronti degli stati di mare provenienti da scirocco rispetto ai punti M1 e M2 per i quali si osserva una maggiore frequenza di accadimento per gli stati di mare provenienti da 150°N.

I risultati delle simulazioni hanno consentito inoltre di separare il contributo energetico dovuto alle onde di lungo periodo (swell) che si propagano da largo all'interno della rada. Il modello di calcolo, per ogni stato di mare propagato, fornisce il valore dell'altezza d'onda di swell (H_{swell}) rappresentativa del contenuto energetico associato alle frequenze inferiori dello spettro di energia (onde lunghe), inferiori ad una prefissata frequenza di soglia f_{swell} .

La limitata estensione dell'area di generazione all'interno della rada (3-4 km) assicura che tutti gli eventi con periodo di picco superiore a 8 secondi ($f_{swell} < 0.125$ Hz) siano riconducibili a stati di mare provenienti da largo.

Il diagramma di correlazione tra l'altezza d'onda di swell e l'altezza d'onda H_s ottenuta nel punto M2 (Figura 5-7) mostra che in maggior misura gli stati mare presentano una componente di onda lunga trascurabile (per il 93% degli eventi ricostruiti $H_s < 0.4$ m e $H_{swell} < 0.05$ m). Viceversa stati di mare con $H_s > 0.4$ m sono sempre associati ad un'onda di lungo periodo, che in genere presenta valori di H_{swell} compresi tra il 20% e il 40% di H_s con valori massimi su base annuale di $H_{swell} = 0.30-0.35$ m.

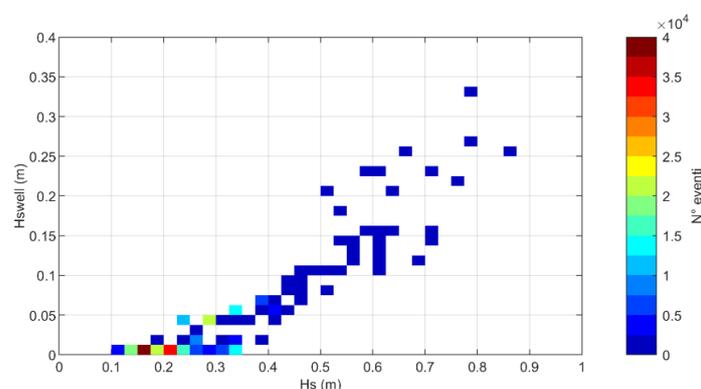


Figura 5-7. Correlazione tra H_s e la componente H_{swell} di “onda lunga” nel punto M2.

Tabella 5-3. Frequenza di accadimento degli stati di mare ricostruiti nel punto M2 per classi di altezza d'onda H_s e periodo di picco T_p .

Periodo di picco T_p (s)	Classi di altezza d'onda significativa H_s (m)								%
	calme	0.125 0.250	0.250 0.375	0.375 0.500	0.500 0.625	0.625 0.750	0.750 0.875	0.875 1.000	
0÷1	27.3								27.3
1÷2	1.1	34.8	9.4						45.3
2÷3			8.2	4.8	0.6	0.019	0.005		13.6
3÷4		5.2					0.000		5.2
4÷5		1.4							1.4
5÷6			5.2	0.4					5.6
6÷7				0.7					0.7
7÷8				0.7	0.1	0.001			0.8
8÷10					0.031	0.022			0.1
10÷12							0.002		0.0
12÷14							0.000		0.0
	28.4	41.4	22.8	6.6	0.7	0.04	0.008	0.000	100.0

Con riferimento alla correlazione tra l'altezza d'onda e periodo, in Tabella 5-3 è riportata la frequenza di accadimento degli stati di mare ricostruiti nel punto M2 all'esterno del Terzo Bacino per classi di H_s e T_p .

Inoltre in Tabella 5-4 è riportato il valore medio del periodo di picco T_p per classi di direzione e altezza d'onda H_s .

Gli stati di mare più frequenti, provenienti dal settore 210 – 240 °N, sono caratterizzati da valori di T_p generalmente compresi tra 1.5 e 3.0 secondi e sono riconducibili, come già evidenziato in precedenza, ad onde di vento di breve periodo generate all'interno della Rada.

Gli stati di mare provenienti da Scirocco (150°N) presentano valori di T_p più elevati, generalmente compresi tra 4 e 11 secondi al variare di H_s .



Tabella 5-4. Valore medio del periodo di picco T_p , in secondi, per gli stati di mare ricostruiti nel punto M2 all'esterno del Terzo Bacino portuale di La Spezia per classi di altezza d'onda significativa H_s e direzione di provenienza. Tra parentesi è riportata la deviazione standard di T_p (s)

Dir °N	VALORE MEDIO DEL PERIODO DI PICCO T_p (s) PER CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA E DIREZIONE									Moda
	Hs [m]									
	0.125 0.250	0.250 0.375	0.375 0.500	0.500 0.625	0.625 0.750	0.750 0.875	0.875 1.000	1.00 1.50	1.50 2.00	
0		1.3 (0.1)								1.3
30										
60										
90										
120										
150		3.8 (0.4)	4.4 (1.6)	5.4 (2)	5.8 (2.8)	9.4 (0.3)	10.6 (0.7)			4.4
180		1.8 (0.1)	2.1 (0.1)	2.3 (0.1)	2.5 (0.1)	2.9 (0)	3.0 (0.1)			2.0
210		1.7 (0.1)	1.9 (0.1)	2.3 (0.1)	2.5 (0.1)	2.7 (0)				1.8
240		1.6 (0.1)	1.8 (0.1)	2.1 (0)	2.3 (0.1)	2.5 (0)				1.6
270	1.4 (0)	1.5 (0.1)	1.9 (0.1)	2.1 (0.1)	2.3 (0)					1.5
300		1.4 (0.1)	1.8 (0.1)							1.5
330		1.3 (0.1)	1.6 (0.1)							1.3
Moda	1.4	1.9	2.7	3.4	3.7	6.4	5.1			
Tra parentesi è riportata la deviazione standard di T_p in s										

6 ANALISI DELLE CONDIZIONI ESTREME DI MOTO ONDOSO

Per la definizione delle condizioni di moto ondoso in prossimità del Terzo Bacino del porto di La Spezia associate ad eventi estremi con tempi di ritorno di 2, 10, 50 e 100 anni sono state effettuate delle simulazioni supplementari con il modello SWAN.

In questo caso le simulazioni sono state effettuate sfruttando la capacità del modello numerico di operare con griglie annidate: utilizzando prima una griglia di calcolo estesa (coarse grid) per propagare gli stati di mare estremi definiti al largo fino ad arrivare in prossimità della rada della Spezia e, successivamente, utilizzando la griglia di dettaglio (nested grid) per propagare gli stati di mare all'interno della rada (Figura 6-1).

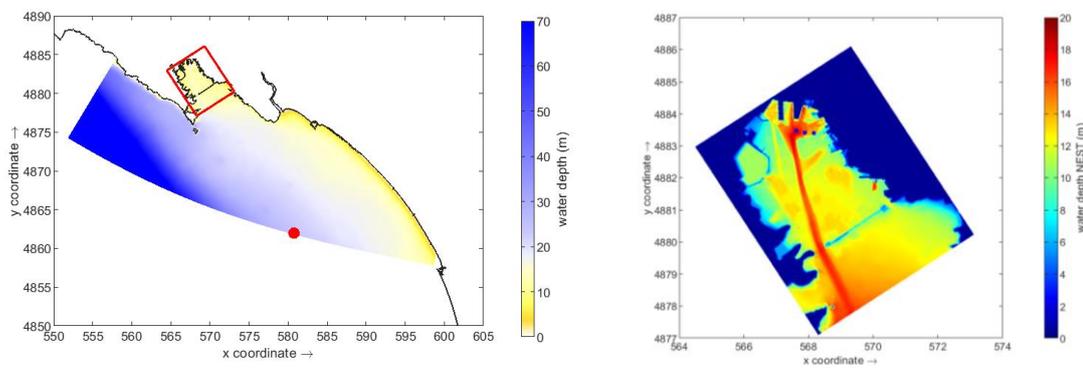


Figura 6-1. Griglie di calcolo utilizzate per la propagazione degli stati di mare estremi definiti al largo di La Spezia fino al margine del Terzo Bacino Portuale. Coarse Grid (sinistra) Nested Grid (destra).

Nelle simulazioni si è tenuto conto anche del sovrizzo e della generazione del moto ondoso dovuta al vento, che risulta dominante all'interno della rada di La Spezia.

In termini di propagazione degli stati di mare all'interno della rada di La Spezia, il settore 150-210 °N, pur essendo associato ad altezze d'onda al largo minori rispetto al settore 210-270°N, è quello che determina una maggiore agitazione residua all'interno della rada, pertanto è stato preso come riferimento per la definizione delle condizioni di moto ondoso all'interno del Terzo Bacino Portuale.

Le condizioni di moto ondoso, vento e sovrizzo del livello marino considerate nelle simulazioni condotte con il modello SWAN sono riportate in Tabella 6-1.

	NUOVO TERMINAL RAVANO PORTO DI LA SPEZIA	Progetto Esecutivo
--	---	-----------------------

Tabella 6-1. Parametri di moto ondoso al largo (altezza d'onda significativa e periodi di picco), vento (velocità e direzione) e sovrizzo del livello marino applicati nelle simulazioni con il modello SWAN.

TR (anni)	H _s (m)	T _p (s)	Dir °N	V _{wind} (m/s)	Dir _{wind} (°N)	s (m)
2	3.6	9.6	170	11.5	133	0.35
10	4.6	10.4	170	14.7	133	0.48
50	5.6	11.0	170	17.9	133	0.61
100	6.0	11.2	170	19.2	133	0.67

Nei grafici riportati in Figura 6-2 ed in Figura 6-3 sono riportati a titolo di esempio i risultati ottenuti per la simulazione dell'evento con tempo di ritorno 50 anni con direzione di provenienza al largo 170 °N.

La Figura 6-2 riporta il campo di altezza d'onda significativa, e la direzione di propagazione, ottenuto per il dominio di calcolo esteso (coarse grid). In Figura 6-3 è mostrato il dettaglio della propagazione e della rigenerazione all'interno della rada. In figura sono inoltre indicati i punti di controllo in cui sono stati estratti i risultati delle simulazioni.

La Tabella 6-2 riporta, per i diversi tempi di ritorno presi in esame (2, 10, 50 e 100 anni) i risultati delle simulazioni effettuate con il modello SWAN nei punti di controllo LS1 e LS2 localizzati all'esterno alla rada e nei punti di controllo M1, M2 e M3 in prossimità del Terzo Bacino portuale.

In ogni punto di controllo sono riportati: il valore di altezza d'onda significativa H_s, il periodo di picco T_p, il periodo medio T_m, il periodo medio spettrale T_{m-1,0}, la direzione media di propagazione, la dispersione direzionale DSPR (in gradi).

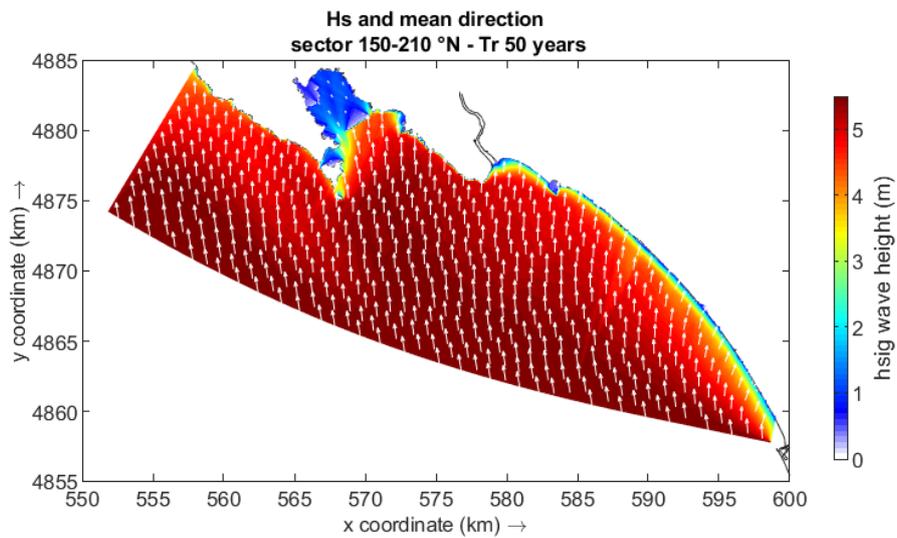


Figura 6-2. Risultato della propagazione da largo dell'evento con tempo di ritorno 50 anni proveniente da 170 °N all'esterno della Rada di La Spezia (coarse grid).

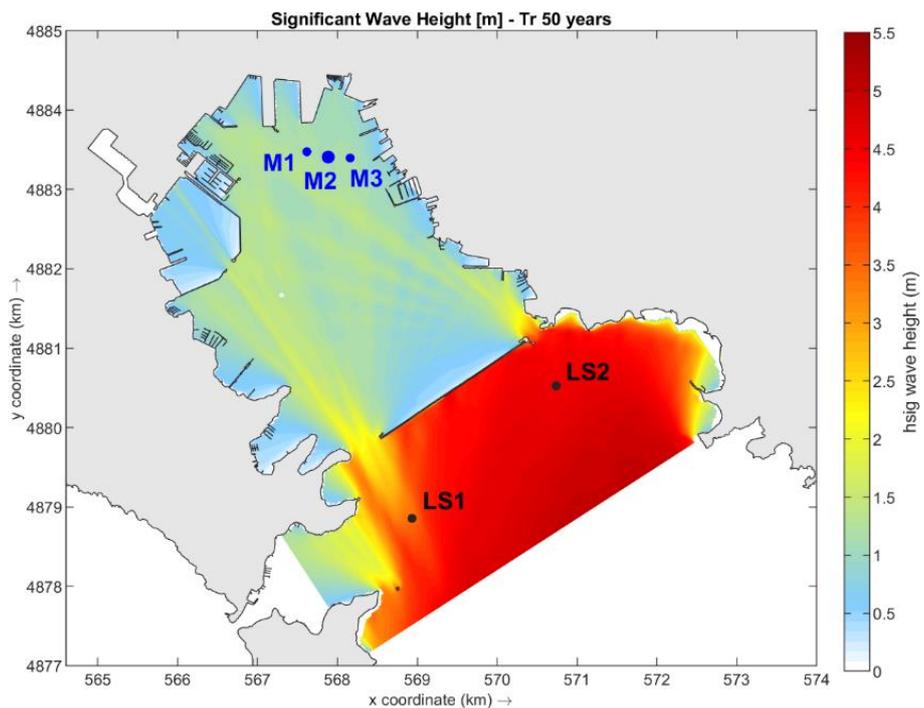


Figura 6-3. Risultato della propagazione dell'evento con tempo di ritorno 50 anni proveniente da 170 °N all'interno della Rada di La Spezia.

Tabella 6-2. Risultati delle simulazioni condotte con il modello SWAN nei punti di controllo

Tr = 2 anni	Depth [m]	H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	T _{m-1,0} [s]	Dir [°N]	DSPR [°]
AL LARGO	24.4	3.60	9.6	5.9	7.3	170	30
LS1	15.7	2.20	10.0	5.3	7.0	159	25
LS2	11.9	2.79	10.0	6.6	8.1	172	22
M1	17.0	0.82	10.0	2.5	3.6	155	31
M2	15.4	0.78	10.0	2.4	3.6	156	33
M3	13.9	0.78	10.0	2.5	3.8	167	29
Tr = 10 anni		H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	T _{m-1,0} [s]	Dir [°N]	DSPR [°]
AL LARGO	24.5	4.60	10.4	6.6	8.0	170	30
LS1	15.9	2.85	10.0	5.9	7.7	159	25
LS2	12.0	3.71	10.0	7.4	8.9	172	21
M1	17.1	1.04	3.3	2.8	3.9	155	30
M2	15.5	0.97	10.0	2.7	3.9	158	32
M3	14.0	0.99	10.0	2.8	4.2	167	28
Tr = 50 anni		H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	T _{m-1,0} [s]	Dir [°N]	DSPR [°]
AL LARGO	24.6	5.60	11.0	7.2	8.6	170	30
LS1	16.0	3.51	10.9	6.6	8.3	159	24
LS2	12.1	4.50	10.9	8.1	9.6	174	20
M1	17.3	1.24	3.6	3.0	4.1	155	29
M2	15.6	1.16	10.9	2.9	4.2	159	31
M3	14.1	1.18	10.9	3.1	4.5	167	27
Tr = 100 anni		H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	T _{m-1,0} [s]	Dir [°N]	DSPR [°]
AL LARGO	24.7	6.0	11.7	7.4	8.8	170	30
LS1	16.0	3.75	10.9	6.8	8.6	160	23
LS2	12.2	4.69	10.9	8.4	9.9	174	20
M1	17.3	1.29	3.6	3.0	4.2	155	29
M2	15.7	1.22	10.9	3.0	4.3	159	30
M3	14.2	1.24	10.9	3.1	4.6	167	27

La distribuzione dell'energia in frequenza per gli stati di mare ricostruiti in corrispondenza dei punti di controllo M1, M2 e M3, presentata nei grafici di Figura 6-4 e Figura 6-5, evidenzia la presenza di una componente principale di lungo periodo, che si propaga con periodo di 10-11 s, a cui corrisponde il picco dello spettro, alla quale si sovrappone una componente, generata localmente dal vento, che presenta un picco in corrispondenza del di 3-4 s di periodo.

Per eventi con tempo di ritorno più elevato l'azione del vento risulta sempre più importante e determina uno spostamento dell'energia verso periodi inferiori (si noti infatti che per il punto M1 il valore del periodo picco dello spettro di moto ondoso associato ad un evento con $T_r = 100$ anni risulta 3.6 s).

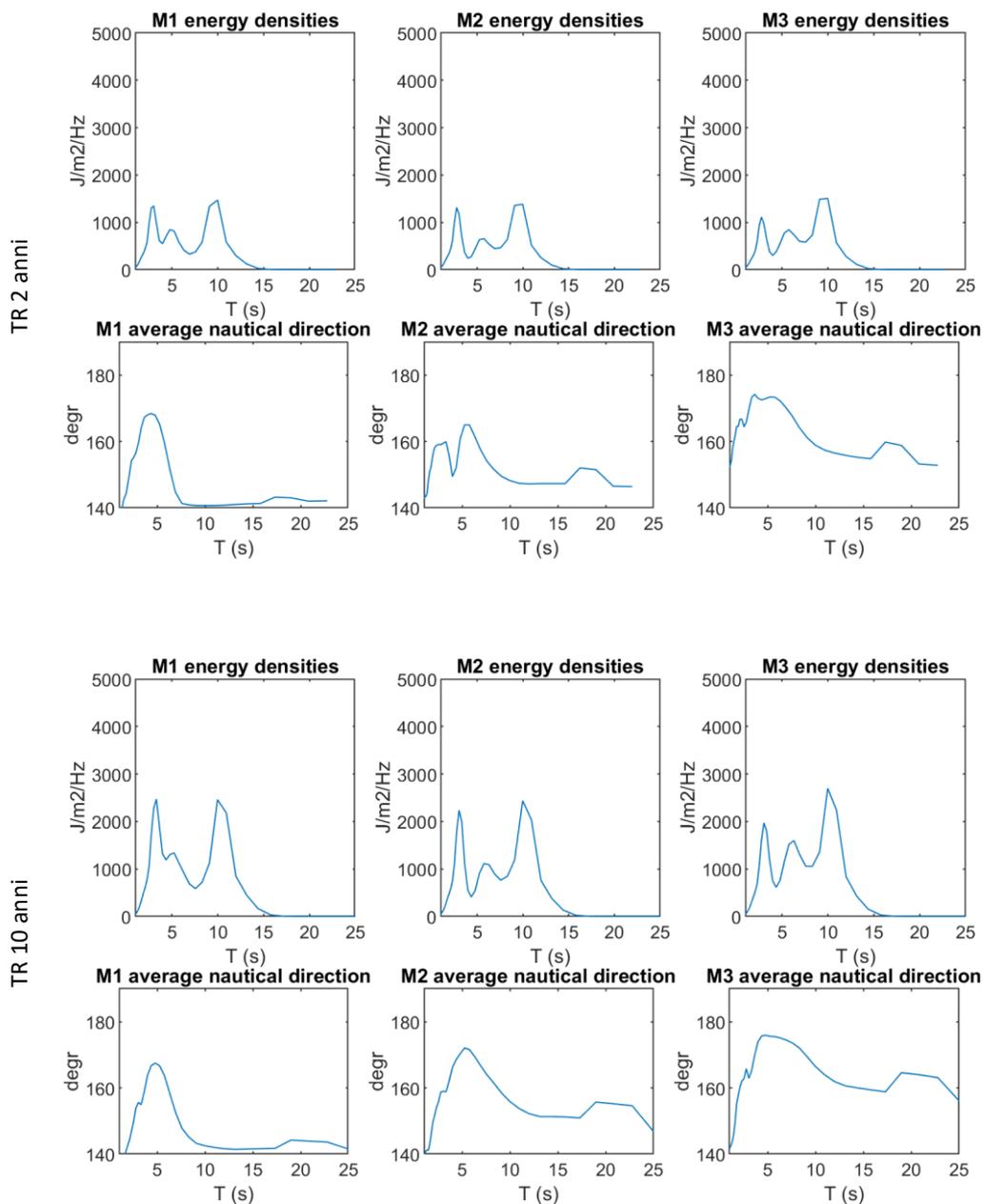


Figura 6-4. Distribuzione dell'energia e della direzione di propagazione media in funzione del periodo T nei punti di controllo M1, M2 e M3 per gli eventi con tempo di ritorno 2 e 50 anni.

I grafici mostrano inoltre la direzione media di propagazione delle diverse componenti dello spettro di energia da cui si può osservare che la componente di lungo periodo presenta una direzione di propagazione media compresa tra 140 (M1) e 160 °N (M3).

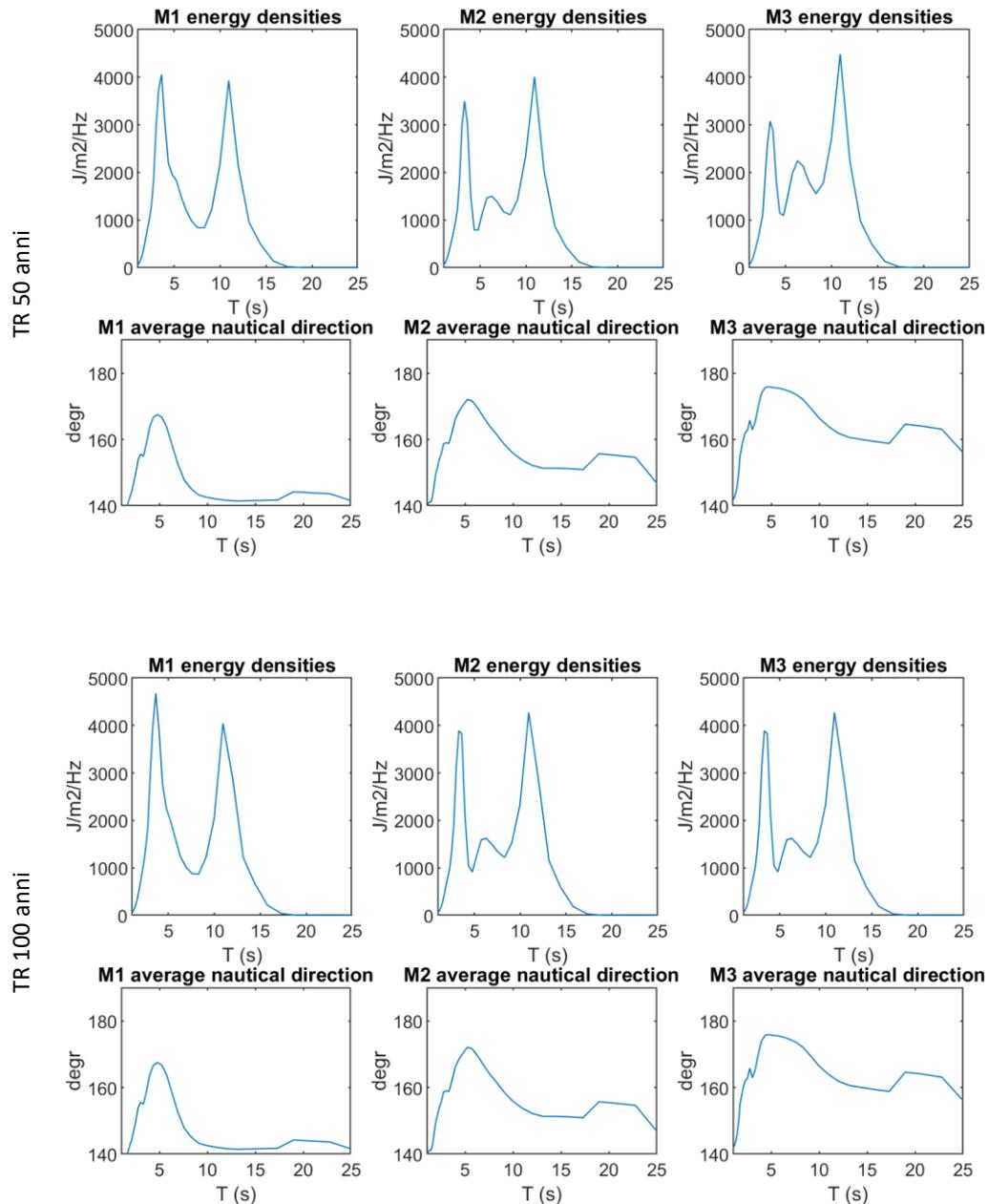


Figura 6-5. Distribuzione dell'energia e della direzione di propagazione media in funzione del periodo T nei punti di controllo M1, M2 e M3 per gli eventi con tempo di ritorno 50 e 100 anni.

Gli spettri ottenuti nei punti di controllo, come mostrato nel diagramma di Figura 6-6, sono rappresentativi di stati di mare irregolari e multimodali con più componenti direzionali e diversi picchi di energia al variare della frequenza.

Per rappresentare numericamente la particolare distribuzione in frequenza e direzione dell'energia del moto ondoso è possibile ricorrere ai parametri forniti dalla più recente versione del modello SWAN che, basandosi sull'algoritmo proposto da Hanson and Phillips (2001), fornisce la ripartizione dello spettro di moto ondoso.

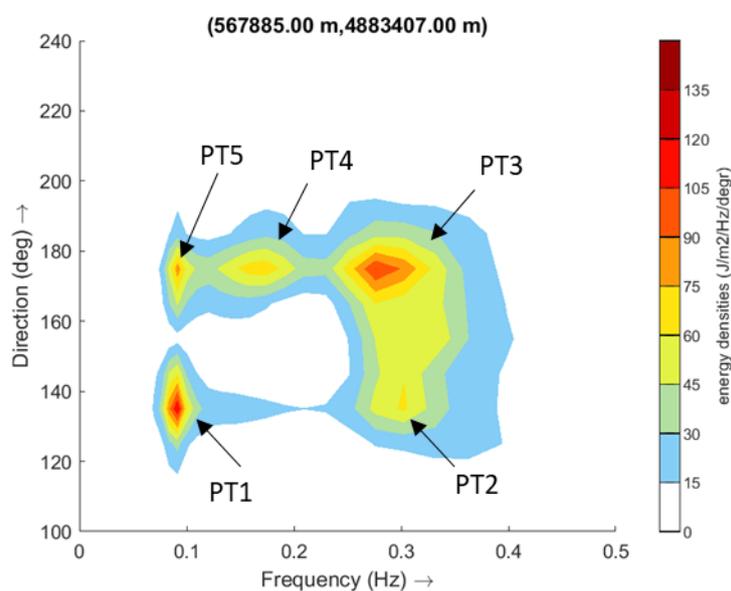


Figura 6-6. Spettro di moto ondoso nel punto di M2 per lo stato di mare con tempo di ritorno 100 anni con altezza d'onda al largo $H_s = 6.0$ m, periodo 11.2 s e direzione $170^\circ N$ abbinato ad un vento di scirocco di 20 m/s. Indicazione delle 5 partizioni dello spettro individuate da SWAN.

In Tabella 6-3 è riportata, solo per il punto M2, la suddivisione dello spettro di moto ondoso in 5 partizioni, ognuna delle quali è rappresentata da un valore di altezza d'onda equivalente, un periodo di picco T_p e una direzione di propagazione del picco di energia.

In termini di contributo energetico (%E) le onde corte (periodo 2-4 s) risultano dominanti (73% del totale) e presentano due distinte direzioni di provenienza (approssimativamente $130^\circ N$ e $180^\circ N$). Le onde di periodo più elevato rappresentano in media il 15-17% dell'energia del moto ondoso e anche queste componenti risultano provenire da due diverse direzioni ($135^\circ N$ e $180^\circ N$). Interessante osservare la presenza di un'ulteriore componente di periodo compreso tra 5 e 6 secondi con direzione di provenienza $180^\circ N$ che contiene una percentuale di energia compresa tra il 9 e il 12%.

Tabella 6-3. Ripartizione degli spettri di moto ondoso nel punto M2 per gli stati di mare con tempo di ritorno 2, 10, 50 e 100 anni propagati con il modello SWAN.

TR 2	PT01	PT02	PT03	PT04	PT05
Hs (m)	0.30	0.50	0.44	0.23	0.14
Tp (s)	9.69	2.86	2.84	5.66	9.39
Dirp (°N)	134	180	127	178	176
%E	14%	42%	32%	9%	3%
TR 10	PT01	PT02	PT03	PT04	PT05
Hs (m)	0.35	0.64	0.54	0.30	0.21
Tp (s)	10.3	3.2	3.1	6.0	10.2
Dirp (°N)	135	179	127	179	176
%E	13%	43%	31%	9%	5%
TR 50	PT01	PT02	PT03	PT04	PT05
Hs (m)	0.39	0.73	0.64	0.39	0.25
Tp (s)	10.9	3.3	3.5	6.3	10.8
Dirp (°N)	135	179	127	178	177
%E	12%	41%	31%	12%	5%
TR 100	PT01	PT02	PT03	PT04	PT05
Hs (m)	0.39	0.77	0.73	0.43	0.27
Tp (s)	11.1	3.3	3.6	6.3	11.0
Dirp (°N)	135	134	183	178	176
%E	10%	38%	35%	12%	5%



7 STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSA NEL TERZO BACINO PORTUALE

Per studiare la propagazione nel Terzo Bacino Portuale, dove gli effetti combinati di rifrazione, shoaling, diffrazione e riflessione, risultano prevalenti e devono essere simulati contemporaneamente, è stato applicato il modello numerico “phase resolving” CGWAVE per propagare gli stati di mare più rappresentativi precedentemente definiti con il modello SWAN all'esterno dello specchio acqueo del Terzo Bacino.

7.1 Descrizione del modello CGWAVE

Il modello numerico agli elementi finiti CGWAVE (Demirbilek e Panchang 1998), sviluppato dal Coastal and Hydraulic Laboratory del US Army Corps of Engineers, appartenente al sistema di modellazione SMS, è un modello di propagazione del moto ondoso bidimensionale di tipo ellittico mild slope.

CGWAVE consente di simulare fenomeni combinati di diffrazione, riflessione e rifrazione, tenendo conto degli effetti dissipativi dovuti al frangimento ed all'attrito sul fondo. In particolare i primi tre fenomeni sono di fondamentale importanza durante la propagazione del moto ondoso all'interno di un bacino portuale, mentre gli altri due assumono particolare importanza in casi ove sono presenti bassi fondali caratterizzati da una batimetria sensibilmente variabile.

7.2 Implementazione della griglia di calcolo

Nella fase preliminare dello studio (procedura di pre-processor) è stata generata la griglia di calcolo agli elementi finiti di forma triangolare, con cui sono stati discretizzati gli specchi liquidi da simulare. Successivamente 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 del dominio di calcolo.

Per rappresentare in modo adeguato le onde di breve periodo che si possono generare all'interno della rada di La Spezia è necessario ridurre la dimensione degli elementi triangolari che costituiscono la mesh (con un lato massimo di 1÷2 m) in modo da assicurare che anche per le onde di periodo $T = 2\div3$ s, che su un fondale di 10-20 m hanno una

lunghezza d'onda di circa 8-15 m, sia presente un sufficiente numero di nodi per simulare correttamente la propagazione del moto ondoso.

Ad ogni nodo di calcolo è stata quindi assegnato il valore di profondità desunto dai più recenti rilievi batimetrici forniti dall'ADSP e condotti per il presente progetto. Nel modello è stata riprodotta la batimetria di progetto, che prevede un dragaggio alla quota -15 m sul l.m.m. dello specchio acqueo interno al Terzo Bacino (vedi Figura 7-1).

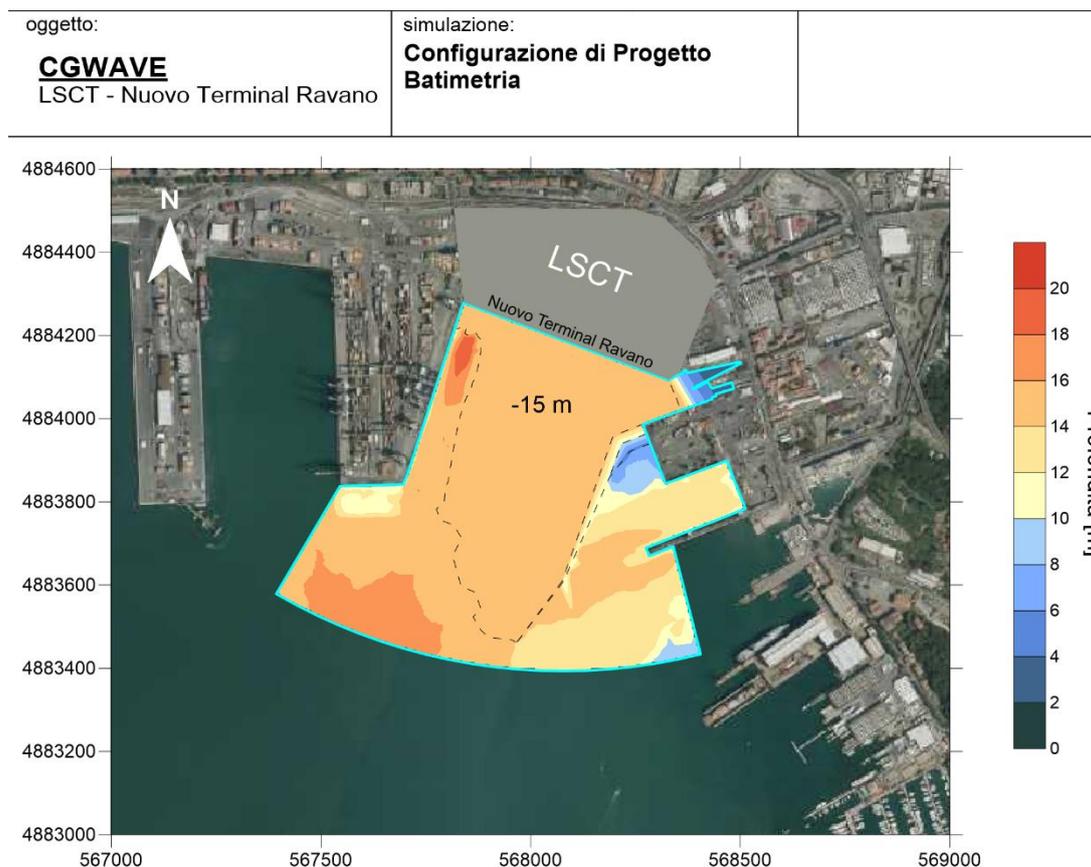


Figura 7-1. Profondità all'interno del dominio di calcolo del modello di agitazione ondosa CGWAVE

7.3 Definizione dei coefficienti di riflessione lungo il contorno

Lungo tutto il contorno del bacino portuale sono stati applicati dei *coefficienti di riflessione*, K_r , in funzione delle capacità delle opere di riflettere il moto ondoso incidente.

Per le simulazioni finalizzate a valutare la risposta del bacino portuale con *onde di breve periodo* ($T < 20$ s), i valori di K_r possono essere valutati sulla base delle più recenti formule presenti in letteratura, basate su esperienze di laboratorio, in funzione delle caratteristiche

	<p style="text-align: center;">NUOVO TERMINAL RAVANO PORTO DI LA SPEZIA</p>	<p style="text-align: center;">Progetto Esecutivo</p>
--	---	---

del moto ondoso incidente (periodo, ripidità) e delle caratteristiche delle opere (porosità, scabrezza, pendenza, etc..).

Lungo i contorni che rappresentano la linea di costa sono stati imposti i seguenti coefficienti di riflessione R:

Opere a parete verticale	R = 0.90
Tratti rocciosi naturali	R = 0.70
Opere a scogliera	R = 0.40
Spiagge assorbenti	R = 0.15
Confini aperti (completamente permeabili)	R = 0.00

Nel caso in esame a tutti i contorni, rappresentativi del margine di banchina, è stato applicato il coefficiente di riflessione $R=0.90$ mentre ai due contorni aperti al lato del dominio di calcolo è stato assegnato $R=0.00$. Lato mare il dominio di calcolo è stato delimitato da un arco di cerchio lungo il quale sono state imposte le forzanti di moto ondoso.

7.4 Condizioni di moto ondoso al contorno

L'analisi delle condizioni di moto ondoso è stata eseguita sulla base dei dati di moto ondoso ricostruiti all'esterno del primo bacino portuale.

Nella seguente Tabella 7-1 è riportato il clima di moto ondoso sintetico, definito all'esterno del terzo bacino, sulla base del quale sono state selezionati le condizioni al contorno per le simulazioni con il modello CGWAVE.

Sono stati presi in esame solo gli stati di mare incidenti caratterizzati da $H_s > 0,125$ m provenienti dal settore di traversia $150 - 240$ °N che, in relazione alla valutazione dell'agitazione ondoso all'interno del terzo bacino risultano le condizioni di moto ondoso più sfavorevoli.

Complessivamente questi stati di mare sono rappresentativi del 63% del totale degli eventi di moto ondoso che mediamente si presentano all'esterno del terzo bacino portuale.

Tabella 7-1. Stati di mare più significativi per la valutazione dell'agitazione ondosa all'interno del terzo bacino portuale. In alto frequenza di accadimento degli stati di mare provenienti dal settore di traversia 150 – 240 °N suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza. In basso valore medio del periodo di picco T_p associato ad ogni classe di H_s .

FREQUENZA DI ACCADIMENTO ANNUALE							
Dir ° Nord	ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA H_s [m]						
	0.125 0.250	0.250 0.375	0.375 0.500	0.500 0.625	0.625 0.750	0.750 0.875	$H_s > 0.125$
150	6.6	7.1	2.5	0.288	0.022	0.002	16.59
180	3.3	5.2	0.7	0.186	0.010	0.006	9.40
210	10.1	7.3	2.0	0.079	0.004		19.54
240	13.3	3.0	1.3	0.189	0.004		17.73
	33.3	22.6	6.6	0.7	0.0	0.0	63.3

VALORE DI T_p (s) ASSOCIATO ALLE CLASSI DI H_s						
Dir °N	Altezza d'onda significativa H_s (m)					
	0.125 0.250	0.250 0.375	0.375 0.500	0.500 0.625	0.625 0.750	0.750 0.875
150	4	4	5	6	9	11
180	2	2	2	3	3	3
210	2	2	2	3	3	
240	2	2	2	2	2	

La tabella riporta in alto la frequenza di accadimento degli stati di moto ondoso suddivisi per classi di altezza significativa H_s e classi di direzione. I valori riportati esprimono le frequenze medie annuali di accadimento “assolute” tenendo conto anche della frequenza di accadimento delle calme e degli eventi provenienti da altri settori di traversia che non possono condizionare lo specchio acqueo in esame.

Ciascuna classe della tabella è rappresentativa di uno stato di mare avente: (i) direzione di provenienza della classe; (ii) altezza H_s pari all'altezza superiore della classe; (iii) frequenza media annuale di accadimento della classe.

Nel pannello in basso della Tabella 7-1 sono indicati i periodi di picco T_p , espressi in secondi, che sono stati associati a ciascuno stato di mare ottenuti mediando i valori di T_p degli eventi appartenenti alla classe di altezza e direzione, arrotondati al più prossimo numero intero. Anche in ragione di questa assunzione i risultati ottenuti in seguito risultano a favore di sicurezza.

Con questa suddivisione sono stati individuati gli stati di mare riportati nella Tabella 7-2.

Tabella 7-2. Stati di mare più significativi per la valutazione dell'agitazione ondosa all'interno del terzo bacino portuale propagati con il modello numerico CGWAVE con indicazione del numero di occorrenze relative alla serie ricostruita all'interno della rada della Spezia costituita da un totale di 350635 eventi.

id	stato di mare	Dir (°N)	T (s)	Hs (m)	N° occorrenze
1	D150-T04-H250	150	4	0.25	23226
2	D150-T04-H375	150	4	0.375	24892
3	D150-T05-H500	150	5	0.50	8940
4	D150-T06-H625	150	6	0.625	1011
5	D150-T09-H750	150	9	0.75	78
6	D150-T11-H875	150	11	0.875	8
7	D180-T02-H250	180	2	0.25	11554
8	D180-T02-H375	180	2	0.375	18272
9	D180-T02-H500	180	2	0.50	2434
10	D180-T03-H625	180	3	0.625	653
11	D180-T03-H750	180	3	0.75	36
12	D180-T03-H875	180	3	0.875	20
13	D210-T02-H250	210	2	0.25	35424
14	D210-T02-H375	210	2	0.375	25680
15	D210-T02-H500	210	2	0.50	7105
16	D210-T03-H625	210	3	0.625	278
17	D210-T03-H750	210	3	0.75	15
18	D240-T02-H250	240	2	0.25	46477
19	D240-T02-H375	240	2	0.375	10378
20	D240-T02-H500	240	2	0.50	4629
21	D240-T02-H625	240	2	0.625	661
22	D240-T02-H750	240	2	0.75	15
Totale					221786
Totale eventi					350635

7.5 Metodologia di analisi

Con riferimento alla Figura 7-2, dove è rappresentata la configurazione di progetto del Nuovo Terminal Ravano, sono state individuate 3 aree di riferimento, poste in corrispondenza della nuova banchina, di larghezza 80 m e lunghezza 173 m, per il calcolo dell'altezza d'onda.

La discretizzazione spaziale del dominio di calcolo assicura che all'interno delle aree di riferimento siano presenti diverse centinaia di nodi.

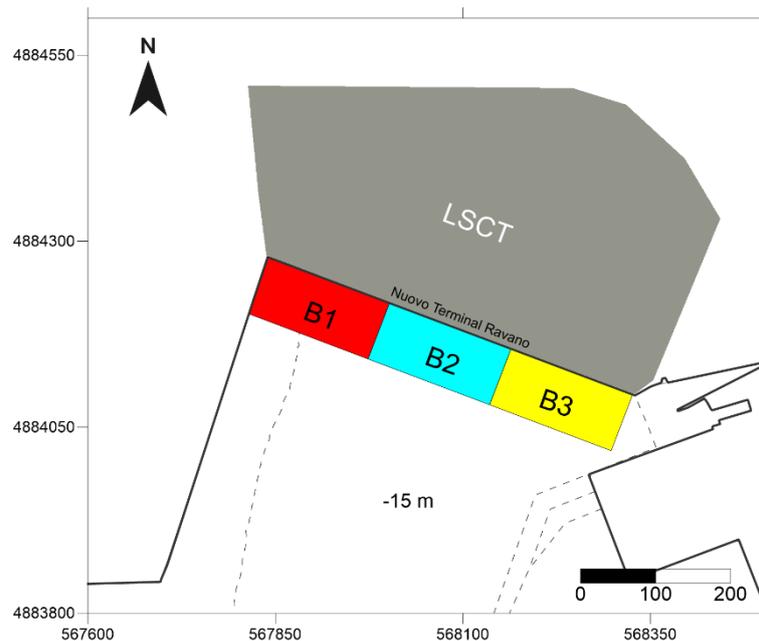


Figura 7-2 –Aree di riferimento per il calcolo dell’agitazione ondosa

Le simulazioni sono state effettuate imponendo lungo il contorno generatore un’onda monocromatica, con periodo e direzione assegnati, di altezza H unitaria, non essendo presenti fenomeni dissipativi di rilievo (soluzione lineare).

I risultati forniti da queste simulazioni con onda unitaria consentono di calcolare il coefficiente di amplificazione/riduzione dell’altezza d’onda incidente. Data la linearità del modello il coefficiente di amplificazione può essere applicato ad ogni valore di altezza d’onda per determinare i valori di altezza d’onda all’interno del dominio di calcolo.

Per ciascuna area di riferimento è stato eseguito il calcolo del coefficiente di amplificazione definito dalla seguente relazione:

$$A_f = H_r / H_i$$

dato dal rapporto tra il valore di riferimento dell’altezza d’onda H_r nell’area di riferimento e il valore dell’altezza d’onda incidente H_i , che nel caso in esame è sempre unitaria.

Per tenere in conto della variazione spaziale dell’altezza d’onda dovuta alla riflessione del moto ondoso è stata presa in considerazione un’altezza d’onda H_r di riferimento definita come:

$$H_r = \bar{H} + \alpha \cdot \sigma(H)$$

	<p style="text-align: center;">NUOVO TERMINAL RAVANO PORTO DI LA SPEZIA</p>	<p style="text-align: center;">Progetto Esecutivo</p>
--	---	---

in cui:

\bar{H} è il valore medio dell'altezza d'onda calcolata all'interno dell'area di riferimento;

$\sigma(H)$ è la deviazione standard dei valori di H calcolati nell'area di riferimento;

α è una costante definita affinché il valore di H_r venga superato solo dal 15% dei valori più elevati di H calcolati nell'area di riferimento.

Sostanzialmente H_r , essendo superata da un numero limitato di altezze d'onda, rappresenta la popolazione dei valori più elevati delle altezze d'onda che si verificano nell'area di riferimento. In ragione di tale assunzione il calcolo effettuato è certamente a favore di sicurezza.

7.6 Studio della configurazione di progetto

I diagrammi riportati in Figura 7-3, Figura 7-4 e Figura 7-5 mostrano i risultati ottenuti a seguito delle simulazioni effettuate con il modello CGWAVE per le diverse condizioni di moto ondoso prese in esame. I risultati sono espressi in termini di fattore di amplificazione A_f dato dal rapporto tra l'altezza d'onda risultante e l'altezza d'onda unitaria.

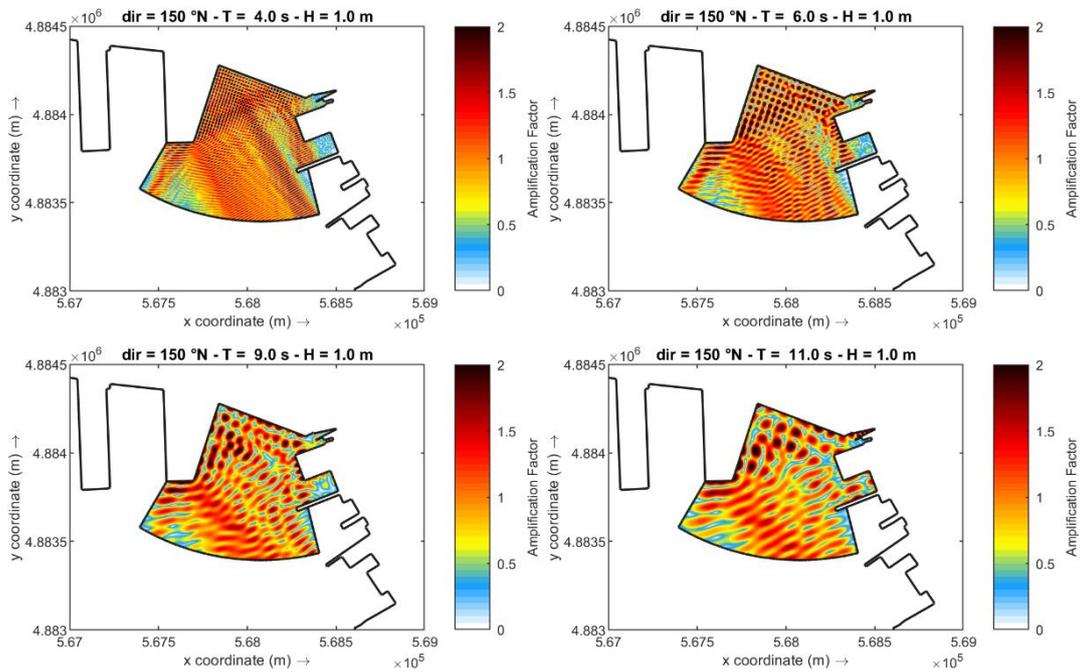


Figura 7-3. Coefficiente di amplificazione H/Hi ottenuto per la configurazione di progetto per onde di periodo $T = 4, 6, 9, 11$ s e direzione di provenienza 150°N .

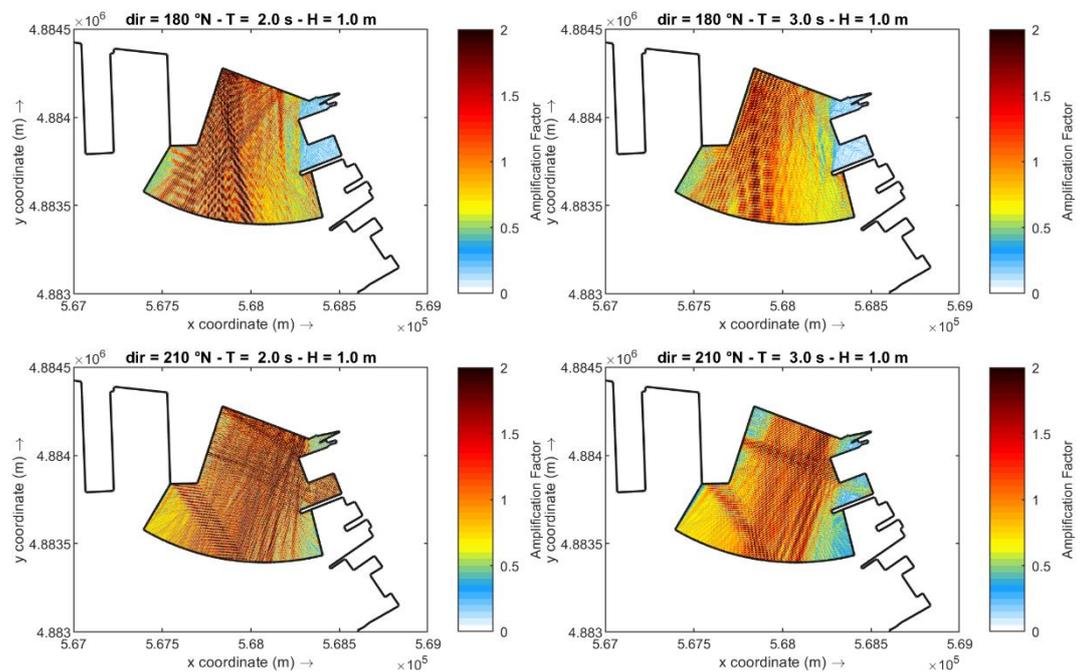


Figura 7-4. Coefficiente di amplificazione H/Hi ottenuto per la configurazione di progetto con frangiflutti galleggiante per onde di periodo $T = 2$ e 3 s e direzione di provenienza 180°N e 210°N .

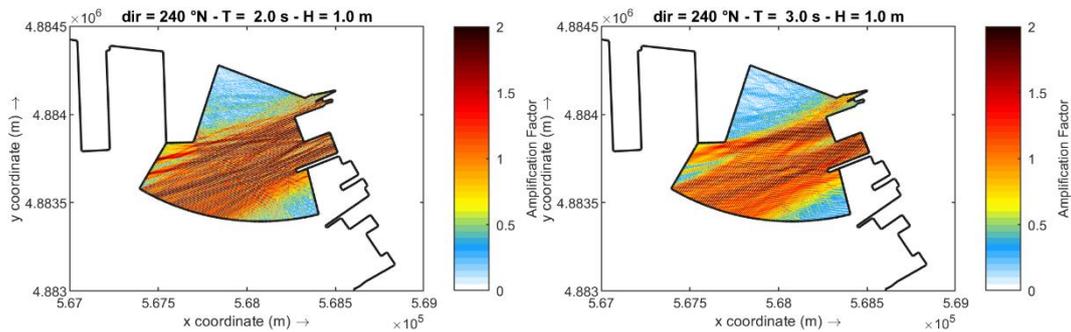


Figura 7-5. Coefficiente di amplificazione H/H_i ottenuto per la configurazione di progetto con frangiflutti galleggianti per onde di periodo $T = 2$ e 3 s e direzione di provenienza 240°N .

La Tabella 7-3 riporta i risultati delle elaborazioni condotte sui valori di altezza d'onda estratti all'interno delle aree di interesse B1, B2 e B3 individuate in prossimità del Nuovo Terminal Ravano.

Per ogni stato di mare di altezza unitaria ($H_i = 1$ m), la tabella riporta il valore dell'altezza d'onda media H_{mean} , la sua deviazione standard e il valore massimo ottenuti all'interno delle aree di riferimento.

La tabella fornisce inoltre il valore del coefficiente di amplificazione A_f ottenuto.

Come atteso la riflessione del moto ondoso all'interno del Terzo Bacino determina un'amplificazione dell'altezza d'onda in prossimità delle banchine. Tale effetto risulta più importante per gli stati di mare di breve periodo 2-3 s provenienti da 180°N e 210°N con valori del coefficiente di amplificazione superiori a 2.0.

Per le onde corte provenienti da 150°N il coefficiente di amplificazione si attesta su valori compresi tra 1.60 e 1.70 e si riduce all'aumentare del periodo.

Gli stati di mare provenienti da 135 e 240°N vengono attenuati con valori di A_f compresi tra 0.3 e 1.0.

Una volta calcolato il coefficiente di amplificazione A_f , è possibile determinare all'interno di ciascuna area, il valore atteso dell'altezza d'onda $H^* = A_f \times H_s$.

In Tabella 7-4 sono riportati, per ogni stato di mare, i valori di altezza d'onda H^* attesi all'interno della area B1 e la loro frequenza di accadimento.

Tabella 7-3. Valori del coefficiente di amplificazione ottenuti per la configurazione di progetto con il modello CGWAVE all'interno delle aree di interesse per i diversi stati di mare analizzati.

Componente			Area B1				Area B2				Area B3			
Dir	Tp	Hi	Hmean	Hstd	Hmax	Af	Hmean	Hstd	Hmax	Af	Hmean	Hstd	Hmax	Af
°N	s	m	m	m	m		m	m	m		m	m	m	
135	3	1.0	0.19	0.10	0.62	0.29	0.32	0.17	0.98	0.49	0.73	0.32	1.95	1.05
135	9	1.0	0.45	0.26	1.11	0.71	0.45	0.20	0.97	0.65	0.64	0.34	1.82	0.98
150	4	1.0	1.14	0.62	2.89	1.76	1.13	0.57	3.40	1.71	1.05	0.58	3.24	1.63
150	5	1.0	1.09	0.65	2.93	1.74	1.07	0.55	2.60	1.61	1.18	0.61	3.27	1.78
150	6	1.0	1.07	0.56	2.53	1.62	1.12	0.56	2.56	1.68	1.09	0.57	2.54	1.65
150	9	1.0	0.90	0.54	2.25	1.44	1.08	0.45	2.23	1.53	1.02	0.53	2.27	1.55
150	11	1.0	0.82	0.45	2.53	1.27	0.97	0.48	2.13	1.45	0.89	0.58	2.71	1.47
180	2	1.0	1.62	0.83	4.43	2.44	1.12	0.53	2.99	1.65	0.62	0.40	2.30	1.02
180	3	1.0	1.32	0.71	3.41	2.03	0.98	0.46	2.14	1.44	0.56	0.34	1.66	0.90
210	2	1.0	1.08	0.62	4.28	1.70	1.48	0.75	4.91	2.23	1.56	0.78	4.52	2.34
210	3	1.0	0.62	0.41	2.08	1.03	1.02	0.49	2.24	1.51	1.13	0.61	2.76	1.75
240	2	1.0	0.12	0.06	0.39	0.19	0.19	0.10	0.70	0.29	0.51	0.29	1.73	0.80
240	3	1.0	0.13	0.07	0.39	0.20	0.16	0.09	0.57	0.25	0.45	0.29	1.68	0.74

Occorre evidenziare che questa elaborazione prende in esame onde monocromatiche, in realtà ogni stato di mare presenta una distribuzione in frequenza dell'energia che per le finalità della presente analisi non è stata presa in considerazione. In virtù di tale semplificazione i valori di altezza d'onda amplificati, con particolare riguardo alle onde di breve periodo, risultano certamente a favore di sicurezza.

Ordinando i valori di altezza d'onda H^* in senso decrescente, sulla base del numero di occorrenze, è stata calcolata la frequenza di superamento cumulata, espressa in numero di ore/anno.

Allo stesso modo in Tabella 7-5 e Tabella 7-6 sono riportati i risultati ottenuti per le aree B2 e B3.

Il grafico di Figura 7-6 riporta la durata cumulata dell'altezza d'onda all'interno delle tre aree prese in esame.

**Tabella 7-4. Valori di altezza d'onda H* ottenuti nell'area B1 e relativa frequenza di superamento cumulata su base annuale.**

AREA B1								
id	Dir °N	T (s)	Hs (m)	No. Eventi totali	Freq. (ore anno)	Freq. Sup Cum. (ore/anno)	Af	H* (m)
12	180	03	0.875	20	0.5	0.5	2.03	1.78
11	180	03	0.75	36	0.9	1.4	2.03	1.52
10	180	03	0.625	653	16	18	2.03	1.27
9	180	02	0.5	2434	61	79	2.44	1.22
6	150	11	0.875	8	0.2	79	1.27	1.11
5	150	09	0.75	78	2	81	1.44	1.08
4	150	06	0.625	1011	25	106	1.62	1.01
8	180	02	0.375	18272	456	562	2.44	0.92
3	150	05	0.5	8940	223	786	1.74	0.87
15	210	02	0.5	7105	178	963	1.7	0.85
17	210	03	0.75	15	0	964	1.03	0.77
2	150	04	0.375	24892	622	1586	1.76	0.66
16	210	03	0.625	278	7	1592	1.03	0.64
14	210	02	0.375	25680	642	2234	1.7	0.64
7	180	02	0.25	11554	289	2523	2.44	0.61
1	150	04	0.25	23226	580	3103	1.76	0.44
13	210	02	0.25	35424	885	3988	1.7	0.43
22	240	02	0.75	15	0.4	3988	0.19	0.14
21	240	02	0.625	661	17	4005	0.19	0.12
20	240	02	0.5	4629	116	4121	0.19	0.10
19	240	02	0.375	10378	259	4380	0.19	0.07
18	240	02	0.25	46477	1161	5541	0.19	0.05
			Totale	221786	5541			
			Totale eventi	350635				

**Tabella 7-5. Valori di altezza d'onda H* ottenuti nell'area B2 e relativa frequenza di superamento cumulata su base annuale.**

AREA B2								
id	Dir °N	T (s)	Hs (m)	No. Eventi totali	Freq. (ore anno)	Freq. Sup Cum. (ore/anno)	Af	H* (m)
6	150	11	0.875	8	0.20	0.2	1.45	1.27
12	180	03	0.875	20	0.50	0.7	1.44	1.26
5	150	09	0.75	78	1.95	2.6	1.53	1.15
17	210	03	0.75	15	0.37	3.0	1.51	1.13
15	210	02	0.5	7105	177.51	180.5	2.23	1.12
11	180	03	0.75	36	0.90	181.4	1.44	1.08
4	150	06	0.625	1011	25.26	206.7	1.68	1.05
16	210	03	0.625	278	6.95	213.6	1.51	0.94
10	180	03	0.625	653	16.31	229.9	1.44	0.90
14	210	02	0.375	25680	641.57	871.5	2.23	0.84
9	180	02	0.5	2434	60.81	932.3	1.65	0.83
3	150	05	0.5	8940	223.35	1155.7	1.61	0.81
2	150	04	0.375	24892	621.88	1777.6	1.71	0.64
8	180	02	0.375	18272	456.49	2234.1	1.65	0.62
13	210	02	0.25	35424	885.01	3119.1	2.23	0.56
1	150	04	0.25	23226	580.26	3699.3	1.71	0.43
7	180	02	0.25	11554	288.66	3988.0	1.65	0.41
22	240	02	0.75	15	0.37	3988.4	0.29	0.22
21	240	02	0.625	661	16.51	4004.9	0.29	0.18
20	240	02	0.5	4629	115.65	4120.5	0.29	0.15
19	240	02	0.375	10378	259.28	4379.8	0.29	0.11
18	240	02	0.25	46477	1161.15	5540.9	0.29	0.07
			Totale	221786	5541			
			Totale eventi	350635				

**Tabella 7-6. Valori di altezza d'onda H* ottenuti nell'area B1 e relativa frequenza di superamento cumulata su base annuale.**

AREA B3								
id	Dir °N	T (s)	Hs (m)	No. Eventi totali	Freq. (ore anno)	Freq. Sup Cum. (ore/anno)	Af	H* (m)
17	210	03	0.75	15	0.4	0.4	1.75	1.31
6	150	11	0.875	8	0.2	0.6	1.47	1.29
15	210	02	0.5	7105	177.5	178.1	2.34	1.17
5	150	09	0.75	78	1.9	180.0	1.55	1.16
16	210	03	0.625	278	6.9	187.0	1.75	1.09
4	150	06	0.625	1011	25.3	212.2	1.65	1.03
3	150	05	0.5	8940	223.4	435.6	1.78	0.89
14	210	02	0.375	25680	641.6	1077.2	2.34	0.88
12	180	03	0.875	20	0.5	1077.7	0.9	0.79
11	180	03	0.75	36	0.9	1078.6	0.9	0.68
2	150	04	0.375	24892	621.9	1700.4	1.63	0.61
22	240	02	0.75	15	0.4	1700.8	0.8	0.60
13	210	02	0.25	35424	885.0	2585.8	2.34	0.59
10	180	03	0.625	653	16.3	2602.1	0.9	0.56
9	180	02	0.5	2434	60.8	2662.9	1.02	0.51
21	240	02	0.625	661	16.5	2679.5	0.8	0.50
1	150	04	0.25	23226	580.3	3259.7	1.63	0.41
20	240	02	0.5	4629	115.6	3375.4	0.8	0.40
8	180	02	0.375	18272	456.5	3831.9	1.02	0.38
19	240	02	0.375	10378	259.3	4091.1	0.8	0.30
7	180	02	0.25	11554	288.7	4379.8	1.02	0.26
18	240	02	0.25	46477	1161.1	5540.9	0.8	0.20
			Totale	221786	5541			
			Totale eventi	350635				

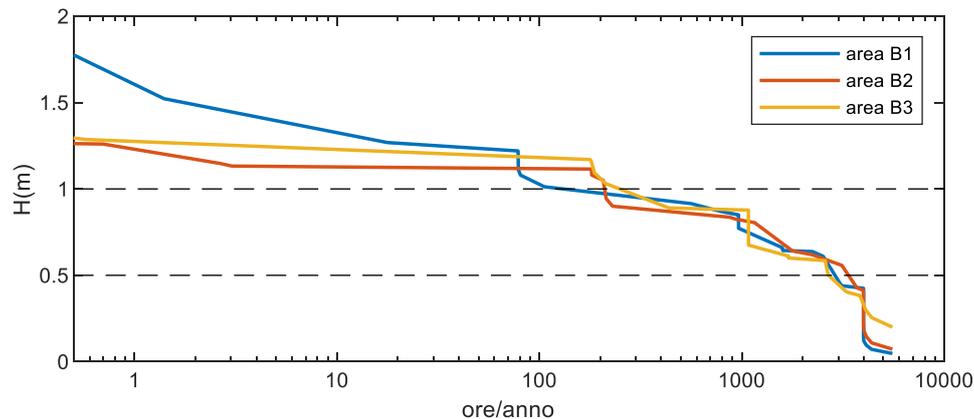


Figura 7-6. Durata cumulata dell'altezza d'onda ottenuta all'interno delle tre aree B1, B2 e B3 prospicienti al Nuovo Terminal Ravano.

7.7 Analisi degli stati di mare estremi

L'applicazione del modello di propagazione CGWAVE ha consentito inoltre di definire le condizioni di moto ondoso in prossimità della banchina del Nuovo Terminal Ravano in occasione di stati di mare estremi, generati generalmente da perturbazioni di scirocco/mezzogiorno.

L'applicazione del modello SWAN ha consentito di ricostruire lo spettro di moto ondoso associato a stati di mare con tempo di ritorno 2, 10, 50 e 100 anni nel punto M2 all'esterno del terzo bacino.

Le componenti degli spettri sintetici di moto ondoso, riportate in Tabella 6-3, sono state quindi propagate con il modello CGWAVE. Ogni componente, contraddistinta da una direzione un periodo proprio, è stata propagata imponendo, come effettuato in precedenza, un'onda di altezza unitaria.

In tal modo, seguendo la metodologia precedentemente illustrata, è stato determinato il coefficiente di amplificazione per ciascuna componente in prossimità della banchina.

Nelle seguenti figure sono riportati i risultati delle simulazioni. Alcune componenti risultano già presenti tra le simulazioni condotte in precedenza.

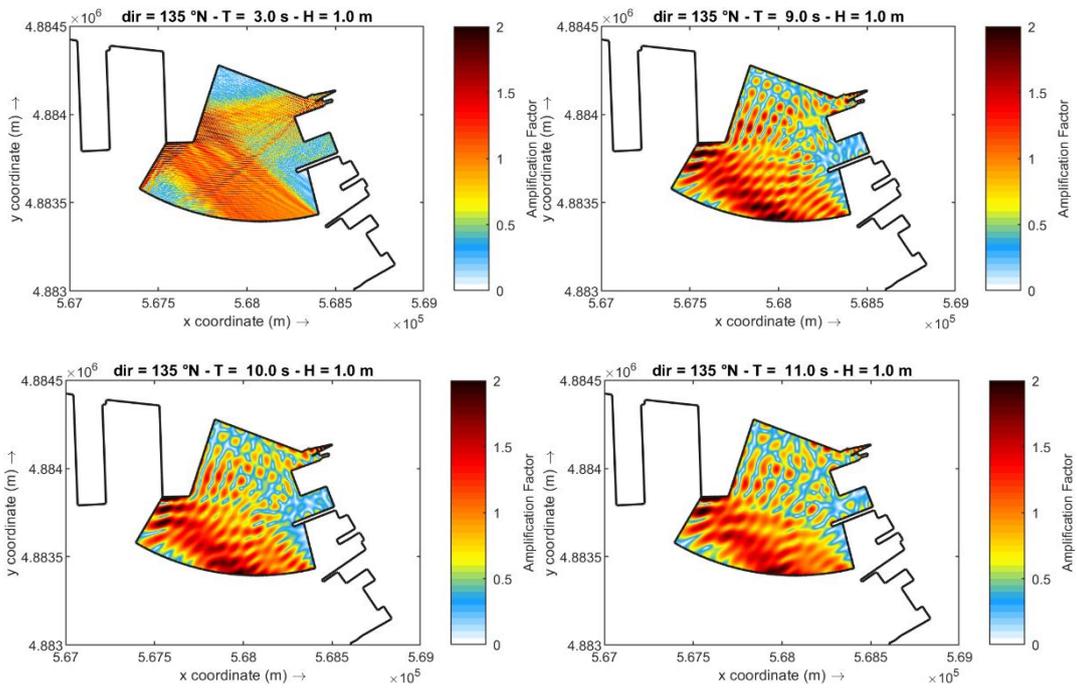


Figura 7-7. Coefficiente di amplificazione H/Hi ottenuto per la configurazione di progetto per le onde componenti degli stati di mare estremi di periodo $T = 3, 9, 10$ e 11 s e direzione di provenienza 135°N .

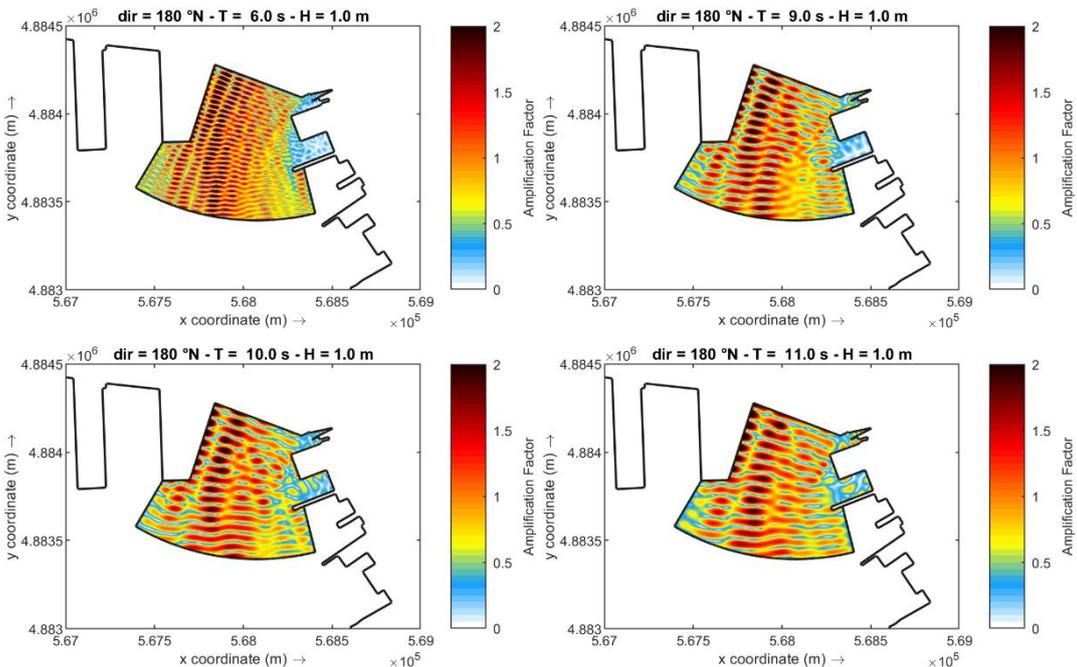


Figura 7-8. Coefficiente di amplificazione H/Hi ottenuto per la configurazione di progetto per le onde componenti degli stati di mare estremi di periodo $T = 6, 9, 10$ e 11 s e direzione di provenienza 180°N .

	NUOVO TERMINAL RAVANO PORTO DI LA SPEZIA	Progetto Esecutivo
--	---	-----------------------

Tabella 7-7. Valori del coefficiente di amplificazione ottenuti per la configurazione di progetto per le onde componenti degli stati di mare estremi.

Componente			Area B1				Area B2				Area B3			
Dir	Tp	Hi	Hmean	Hstd	Hmax	Af	Hmean	Hstd	Hmax	Af	Hmean	Hstd	Hmax	Af
°N	s	m	m	m	m		m	m	m		m	m	m	
135	3	1.0	0.19	0.10	0.62	0.29	0.32	0.17	0.98	0.49	0.73	0.32	1.95	1.05
135	4	1.0	0.37	0.19	0.94	0.56	0.50	0.24	1.34	0.74	0.80	0.36	2.19	1.16
135	9	1.0	0.45	0.26	1.11	0.71	0.45	0.20	0.97	0.65	0.64	0.34	1.82	0.98
135	10	1.0	0.44	0.23	0.92	0.67	0.43	0.20	0.94	0.63	0.59	0.26	1.35	0.84
135	11	1.0	0.45	0.24	1.09	0.69	0.45	0.20	1.01	0.66	0.64	0.34	1.74	0.99
180	3	1.0	1.32	0.71	3.41	2.03	0.98	0.46	2.14	1.44	0.56	0.34	1.66	0.90
180	6	1.0	1.21	0.74	3.09	1.95	0.91	0.46	1.99	1.37	0.65	0.32	1.34	0.97
180	9	1.0	1.08	0.72	3.07	1.81	0.77	0.39	1.75	1.16	0.58	0.30	1.33	0.88
180	10	1.0	1.18	0.66	3.30	1.84	0.89	0.42	2.10	1.31	0.57	0.25	1.19	0.82
180	11	1.0	1.20	0.64	3.28	1.84	0.90	0.46	2.19	1.37	0.70	0.30	1.35	1.00

A seguito delle simulazioni, ciascuna componente degli spettri di moto ondoso è stata opportunamente amplificata o ridotta applicando i coefficienti di amplificazione Af riportati in Tabella 7-7 ottenuti, come effettuato in precedenza, analizzando i valori di H all'interno delle aree di interesse.

I risultati di tale procedura sono mostrati, per ciascuna componente dello spettro di moto ondoso (PT1, PT2, etc...), e per ciascuna area di interesse, nella seguente Tabella 7-8.

I risultati mostrano che le componenti da sud di breve periodo sono amplificate maggiormente. Il picco dell'energia risulta associato alle onde di breve periodo, $T_p = 3.0$ s, con direzione prevalente 180° N. L'area B1, all'estremità occidentale della nuova banchina, a causa della riflessione, presenta i valori più elevati mentre l'area B3, più ridossata, presenta valori inferiori.



Tabella 7-8. Spettri sintetici per gli stati di mare con tempo di ritorno 2, 10, 50 e 100 anni definiti applicando i coefficienti di amplificazione ottenuti con il modello di propagazione CGWAVE nelle aree di interesse a ridosso della banchina del Nuovo Terminal Ravano.

	AREA B1					AREA B2					AREA B3				
	PT01	PT02	PT03	PT04	PT05	PT01	PT02	PT03	PT04	PT05	PT01	PT02	PT03	PT04	PT05
TR 2															
Hs (m)	0.3	0.5	0.44	0.23	0.14	0.3	0.5	0.44	0.23	0.14	0.3	0.5	0.44	0.23	0.14
Tp (s)	10	3	3	6	9	10	3	3	6	9	10	3	3	6	9
Dirp (°N)	135	180	135	180	180	135	180	135	180	180	135	180	135	180	180
AF	0.67	2.03	0.29	1.95	1.81	0.63	1.44	0.49	1.37	1.31	0.84	0.9	1.05	0.97	0.88
H* (m)	0.201	1.02	0.13	0.45	0.25	0.189	0.72	0.22	0.32	0.18	0.25	0.45	0.46	0.22	0.12
%E	3%	76%	1%	15%	5%	5%	71%	6%	14%	5%	12%	37%	39%	9%	3%
TR 10															
Hs (m)	0.35	0.64	0.54	0.3	0.21	0.35	0.64	0.54	0.3	0.21	0.35	0.64	0.54	0.3	0.21
Tp (s)	10	3	3	6	10	10	3	3	6	10	10	3	3	6	10
Dirp (°N)	135	180	135	180	180	135	180	135	180	180	135	180	135	180	180
AF	0.67	2.03	0.29	1.95	1.84	0.36	1.44	0.49	1.37	1.31	0.84	0.9	1.05	0.97	1
H* (m)	0.23	1.30	0.16	0.59	0.39	0.13	0.92	0.26	0.41	0.28	0.29	0.58	0.57	0.29	0.21
%E	2%	75%	1%	15%	7%	1%	72%	6%	14%	6%	10%	38%	37%	10%	5%
TR 50															
Hs (m)	0.39	0.73	0.64	0.39	0.25	0.39	0.73	0.64	0.39	0.25	0.39	0.73	0.64	0.39	0.25
Tp (s)	11	3	4	6	11	11	3	4	6	11	11	3	4	6	11
Dirp (°N)	135	180	135	180	180	135	180	135	180	180	135	180	135	180	180
AF	0.69	2.03	0.56	1.95	1.84	0.66	1.44	0.74	1.37	1.37	0.99	0.9	1.16	0.97	1
H* (m)	0.27	1.48	0.36	0.76	0.46	0.26	1.05	0.47	0.53	0.34	0.39	0.66	0.74	0.38	0.25
%E	2%	69%	4%	18%	7%	4%	61%	12%	16%	7%	11%	32%	41%	11%	5%
TR 100															
Hs (m)	0.39	0.77	0.75	0.43	0.27	0.39	0.77	0.75	0.43	0.27	0.39	0.77	0.75	0.43	0.27
Tp (s)	11	3	3	6	11	11	3	3	6	11	11	3	3	6	11
Dirp (°N)	135	135	180	180	180	135	135	180	180	180	135	135	180	180	180
AF	0.69	0.29	2.03	1.95	1.84	0.66	0.49	1.44	1.37	1.37	0.99	1.05	0.9	0.97	1
H* (m)	0.27	0.22	1.52	0.84	0.50	0.26	0.38	1.08	0.59	0.37	0.39	0.81	0.68	0.42	0.27
%E	2%	2%	73%	22%	8%	4%	8%	65%	19%	8%	11%	49%	34%	13%	5%

	<p style="text-align: center;">NUOVO TERMINAL RAVANO PORTO DI LA SPEZIA</p>	<p style="text-align: center;">Progetto Esecutivo</p>
--	---	---

7.8 Analisi dei risultati e conclusioni

Il presente studio si è posto l'obiettivo di valutare le problematiche relative all'agitazione ondosa nel Terzo Bacino Portuale indotta da onde di gravità, generate dal vento, in relazione alla nuova configurazione prevista per la realizzazione del Nuovo Terminal Ravano.

I risultati delle simulazioni condotte con il modello di agitazione ondosa CGWAVE hanno permesso di determinare i valori di altezza d'onda attesi in prossimità della nuova banchina per stati di mare frequenti e per condizioni di estreme.

In generale le simulazioni mostrano che, a causa della riflessione, l'altezza d'onda in prossimità della banchina subisce un incremento, che risulta maggiore per le onde corte di breve periodo (2-3 s).

La penetrazione del moto ondoso all'interno di un porto determina i movimenti delle navi all'ormeggio, i quali, a loro volta, influenzano le operazioni di carico e scarico delle merci. In generale le operazioni di carico/scarico vengono rallentate al crescere dei movimenti della nave e quindi all'aumentare delle condizioni di esposizione al moto ondoso lungo le banchine di ormeggio.

Quando i movimenti della nave superano determinate soglie le attività di carico/scarico devono essere sospese, anche se le navi possono rimanere ormeggiate alle stesse banchine.

Al crescere ulteriormente del moto ondoso, i movimenti della nave possono aumentare fino a raggiungere valori tali da produrre, ad esempio, la rottura dei dispositivi di ormeggio e quindi determinare condizioni di rischio per la sicurezza delle navi e degli operatori portuali.

La valutazione dell'operatività della banchina è stata effettuata calcolando il numero di ore l'anno durante le quali, mediamente, viene superata la soglia di altezza d'onda significativa massima ammissibile, $H_{s,lim}$, per consentire le operazioni di carico e scarico.

Il tempo durante il quale viene superata la soglia $H_{s,lim}$, viene denominato "downtime" o, in italiano, tempo di non operatività della banchina.

Basandosi sulle raccomandazioni internazionali (ROM 3.1-99 (2007), PIANC n. 121-2014), per il calcolo del “downtime” delle banchine si è assunto il valore di soglia $H_{s,lim} = 0.5 \text{ m}$, valido per navi Contenitori e Ro-Ro. Per attacco del moto ondoso laterale tale valore viene ridotto a $H_{s,lim} = 0.3 \text{ m}$.

Occorre però porre l’attenzione ai soli stati di mare che possono effettivamente provocare movimenti significativi per le navi all’ormeggio.

Con riferimento allo schema di Figura 7-9, i tre movimenti di rotazione della nave sono: il beccheggio (pitch), il rollio (roll), l’alambardata (yaw), i tre movimenti di traslazione sono: il sussulto (heave), l’abbrivio (surge) e la deriva (sway).

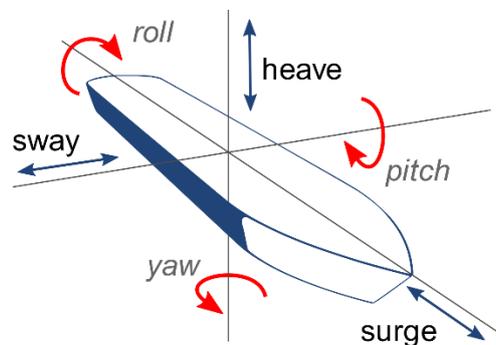


Figura 7-9. Definizione dei movimenti della nave.

Per navi di grossa stazza le onde che determinano spostamenti significativi sono esclusivamente quelle di lungo periodo, che possono essere distinte in: i) onde di lungo periodo (swell), ii) oscillazioni di lungo periodo, chiamate "surf beat", associate alla propagazione su bassi fondali del moto ondoso.

Deriva, rollio e beccheggio della nave sono principalmente causati dalle onde di swell perché il periodo naturale di questi movimenti è quasi identico al periodo di queste onde, che generalmente è compreso tra 8 ai 30 secondi.

Viceversa il surf beat, con un periodo compreso tra 30-300 secondi, può provocare movimenti traslatori della nave lungo il suo asse longitudinale (surge).

Nel caso della Rada di La Spezia, le onde di lungo periodo (swell) associate ad eventi di mareggiata rappresentano potenzialmente la causa principale del movimento delle navi all’ormeggio.



Le onde prevalenti, generate localmente dal vento, caratterizzate da periodi di 2-3 secondi, non possono condizionare le navi portacontainer all'ormeggio anche se l'altezza d'onda supera il valore $H_{s,lim}$ indicato in precedenza.

A conferma di ciò, si evidenzia che il periodo naturale di rollio (T_{roll}) per la nave di progetto risulta compreso tra un minimo di 17 s e un massimo di 24 s¹.

I risultati ottenuti mostrano che mediamente la soglia $H_s = 1.0$ m viene superata in banchina all'incirca 100-200 ore anno nelle tre aree di riferimento B1, B2 e B3, la soglia $H_s = 0.5$ m viene superata 2500 ÷ 3000 ore/anno, mentre la soglia di $H_s=0.3$ m viene superata circa 4000 ore/anno.

Restringendo però l'analisi alle sole onde di lungo periodo si ottengono i risultati molto differenti. I dati riportati nella seguente Tabella 7-9 mostrano infatti che, per l'area B1, la durata cumulata degli stati di mare con altezza d'onda superiore a 0.3 m e periodo uguale o superiore a 6.0 s (assunto cautelativamente come limite inferiore per il rollio della nave), risulta complessivamente pari a sole 47 ore/anno.

Il calcolo effettuato tiene conto anche della componente di lungo periodo (H_{swell}) associata agli stati di mare prevalenti, caratterizzati da periodi di 2-3 s. Con riferimento alla legge di correlazione tra H_s e H_{swell} riportata in Figura 5-7, ad ogni stato di mare con $H_s > 0.4$ m è stata associata un'onda di lungo periodo di altezza $H_{swell} = 0.3 \cdot H_s$ e periodo di 9 secondi alla quale è stato successivamente applicato il corrispondente fattore di amplificazione ottenuto con le simulazioni. In Tabella 7-9 i suddetti stati di mare sono evidenziati in azzurro. Operando nello stesso modo per l'area B2 e B3 si è ricavata una durata sopra soglia rispettivamente pari a 28 e 27 ore/anno.

A fronte di tali risultati, adottando un ulteriore margine di cautela, è possibile stimare che mediamente il terminale potrà risultare non operativo per circa 60 ore anno.

¹ Per determinare il periodo naturale di rollio si è fatto riferimento alla seguente relazione (IMO, 2009):

$$\tau = \frac{2cB}{\sqrt{GM}} \quad c = 0.373 + 0.023 \frac{B}{T} - 0.043 \frac{L}{100}$$

Nella quale $L = 383$ m è la lunghezza della nave di progetto, $B=61$ m la sua larghezza, $T=14$ m il pescaggio massimo imposto dal fondale di progetto. Il calcolo è stato condotto ipotizzando un'altezza metacentrica GM (in prima approssimazione stimata come $0.04B = 2.4$ m) variabile tra 2.0 e 5.0 m (condizione più sfavorevole).

Tabella 7-9. Durata cumulata degli stati di mare con periodo superiore a 6 s nell'area B1 in corrispondenza dell'estremità occidentale della banchina del Nuovo Terminal Ravano.

Nuovo Terminal Ravano Area B1							
id	DirN	Ts	Hs	No. eventi	freq. cum	Hs*	T*
evento	(°N)	(s)	(m)	sul totale di 350635	(ore/anno)	(m)	(s)
6	150	11	0.875	8	0.2	1.11	11
5	150	9	0.750	78	2.1	1.08	9
4	150	6	0.625	1011	27.4	1.01	6
12	180	03	0.875	20	27.9	0.47	9
11	180	03	0.75	36	28.8	0.41	9
10	180	03	0.625	653	45.1	0.34	9
17	210	03	0.75	15	45.5	0.32	9
22	240	02	0.75	15	45.9	0.32	9

Tabella 7-10. Durata cumulata degli stati di mare con periodo superiore a 6 s nell'area B2 in corrispondenza dell'estremità occidentale della banchina del Nuovo Terminal Ravano.

Nuovo Terminal Ravano Area B2							
id	DirN	Ts	Hs	No. eventi	freq. cum	Hs*	T*
evento	(°N)	(s)	(m)	sul totale di 350635	(ore/anno)	(m)	(s)
6	150	11	0.875	8	0.2	1.27	11
5	150	09	0.75	78	2.1	1.15	9
4	150	06	0.625	1011	27.4	1.05	6
12	180	03	0.875	20	27.9	0.30	9

Tabella 7-11. Durata cumulata degli stati di mare con periodo superiore a 6 s nell'area B3 in corrispondenza dell'estremità occidentale della banchina del Nuovo Terminal Ravano.

Nuovo Terminal Ravano Area B3							
id	DirN	Ts	Hs	No. eventi	freq. cum	Hs*	T*
evento	(°N)	(s)	(m)	sul totale di 350635	(ore/anno)	(m)	(s)
6	150	11	0.875	8	0.2	1.29	11
5	150	09	0.75	78	2.1	1.16	9
4	150	06	0.625	1011	27.4	1.03	6

In relazione agli stati di mare estremi, la ricostruzione dello spettro sintetico di moto ondoso con il modello CGWAVE, ottenuta per sovrapposizione degli effetti, ha permesso di valutare con accuratezza le condizioni di moto ondoso attese in banchina per eventi con tempo di ritorno pari a 2, 10, 50 e 100 anni.

A tal riguardo nella seguente tabella riepilogativa, per le diverse aree di interesse B1, B2 e B3, sono riportati i valori di altezza d'onda significativa ottenuti dalla sovrapposizione delle 5 onde componenti con cui è stato suddiviso lo spettro sintetico di moto ondoso.

Gli stati di mare estremi ricostruiti all'interno della rada risultano dispersi in frequenza e direzione e rappresentano pertanto una condizione di mare irregolare di tipo "incrociato", con onde corte e onde di lungo periodo che si sovrappongono.

In prossimità delle banchine, a causa dell'amplificazione delle onde di breve periodo dovuta alla riflessione, il picco di energia risulta associato in maggior misura al periodo di 3 secondi (circa il 60-75% dell'energia), le componenti di periodo 6 secondi contengono circa il 15-20% dell'energia, mentre le onde di periodo superiore (9-11 s) costituiscono circa il 5-15% del totale. La direzione di provenienza prevalente risulta 180°, a cui si sovrappongono onde provenienti da 135°N.

Tabella 7-12. Valori dell'altezza d'onda significativa risultante nelle aree di interesse B1, B2 e B3 per tempi di ritorno 2, 10, 50 e 100 anni.

	Punto M2 all'esterno del terzo bacino	AREA B1	AREA B2	AREA B3
	Hs (m)	Hs (m)	Hs (m)	Hs (m)
TR 2	0.78	1.16	0.86	0.74
TR10	0.98	1.50	1.09	0.93
TR50	1.14	1.79	1.34	1.16
TR100	1.25	1.84	1.36	1.23