AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

PORTO DI VADO LIGURE

PROJECT FINANCING PER:

PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

SOCIETÀ DI PROGETTO: APM TERMINALS VADO LIGURE S.p.A.

MAERSK

GLF GRANDI LAVORI FINCOSIT

PROGETTAZIONE:

TECHNITAL S.p.A.

IL RESPONSABILE:

Dott. Ing. Guido Fiorini

PROGETTO ESECUTIVO - FASE 2
E CONTESTUALE PERIZIA DI VARIANTE DELLA FASE 1

ELABORATO N° :

TITOLO ELABORATO

RELAZIONE METEOMARINA

MI010P-PE-G-L-R-4120-C0

DATA			
Settembre 2014	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
SIGLA	A. MONARCHA	A. LIZZADRO	G. FIORINI
REVISIONE 1			
REVISIONE 2			
REVISIONE 3			

NOME FILE

MI010P-PE-G-L-R-4120-C0
Relazione meteomarina.doc

A TERMINE DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETA' DI QUESTO ELABORATO CON DIVIETO DI RIPRODURLO RENDENDOLO NOTO A TERZI ANCHE PARZIALMENTE SENZA NOSTRA AUTORIZZAZIONE

AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

PORTO DI VADO LIGURE

PROJECT FINANCING PER:

PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

PROGETTO ESECUTIVO - FASE 2
E CONTESTUALE PERIZIA DI VARIANTE DELLA FASE 1

RELAZIONE METEOMARINA

INDICE

1. PREMESSA 11
2. IL PARAGGIO D'INTERESSE 13
3. I LIVELLI DEL MARE 16
4. LE CONDIZIONI ANEMOMETRICHE 21
   4.1. Le condizioni frequenti di vento 21
   4.2. Le condizioni estreme di vento 26
5. IL MOTO ONDOSO AL LARGO 28
   5.1. I dati di moto ondoso disponibili 28
   5.2. Le condizioni frequenti di moto ondoso al largo 32
      5.2.1. Il clima di moto ondoso al largo 32
      5.2.2. Caratteristiche delle mareggiate del paraggio d'interesse 35
   5.3. Gli eventi estremi di moto ondoso al largo - Settore di traversia 50°N-190°N 44
      5.3.1. Metodologia utilizzata 44
      5.3.2. Definizione degli eventi estremi al largo 47
      5.3.3. Correlazione altezza d'onda-periodo 55
      5.3.4. Analisi degli eventi estremi - conclusioni 59
   5.4. Gli eventi estremi di moto ondoso - Settore di traversia secondario 0°N-50°N 62
6. PERIODO DI RITORNO DELL'ONDA DI PROGETTO 65
7. PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO IN CORRISPONDENZA DELLE OPERE 69
   7.1. Metodologia utilizzata 69
   7.2. Descrizione del modello matematico PHAROS 71
   7.3. Calibrazione del modello PHAROS sulla base dei risultati del modello fisico 71
      7.3.1. Il modello fisico 71
      7.3.2. Calibrazione delle batimetrie sul modello PHAROS 75
   7.4. Schematizzazione e batimetrie 79
   7.5. Simulazioni e risultati ottenuti con il modello PHAROS 89
      7.5.1. Simulazioni e risultati ottenuti per le onde estreme - Dimensionamento strutturale delle opere 91
      7.5.2. Simulazioni e risultati ottenuti per le onde frequenti - Agitazione ondosa durante la fase costruttiva dell'area a giorno della piattaforma 109
8. ONDE DI PROGETTO PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE 114
      8.1.1. Scogliera alla radice della piattaforma 116

8.1.2. Cassoni emersi reggispinta 116
8.1.3. Cassoni emersi - Banchina rinfuse 117
8.1.4. Cassoni sommersi 120
8.1.5. Protezione dei fondali - Fondali antistanti le banchine 121
8.1.6. Protezione dei fondali - Fondali sotto alla piattaforma 122
8.1.7. Impalcato su pali 125

9. APPENDICE 1: QUALITY STATEMENT: UK MET OFFICE WAVE MODEL ARCHIVE 127

10. APPENDICE 2: MODELLO MATEMATICO PHAROS 129

ELENCO FIGURE

Fig. 1.1 - Modifiche apportate al layout delle strutture del progetto definitivo: planimetria di progetto della nuova disposizione dei cassoni della piastra di Vado Ligure 12
Fig. 2.1 - Ubicazione del paraggio di Vado ligure 14
Fig. 2.2 - Le batimetrie nella zona di Vado Ligure 15
Fig. 3.1 - Genova: escursioni di marea nel periodo Agosto ’98-Novembre ’00 17
Fig. 3.2 - Imperia: escursioni di marea nel periodo Agosto ’98-Novembre ’00 17
Fig. 3.3 - Esempio di scomposizione della registrazione di marea nelle componenti meteorologica ed astronomica (stazione di Genova, anno 2006) 19
Fig. 4.1 - Vado Ligure, rosa dei venti - Dati orari, 1986-1997 22
Fig. 4.2 - Punto UKMO - rosa dei venti. Dati triorari, 1987-2008 24
Fig. 5.1 - Dati di moto ondoso KNMI - estensione delle aree di rilievo dei dati 31
Fig. 5.2 - Ubicazione dei punti di misura delle onde 31
Fig. 5.3 - Settore di traversia che interessa Vado Ligure 33
Fig. 5.4 - Rosa del moto ondoso al largo di Vado, nel punto di coordinate 44°N; 8,73°E, ottenuta con i dati UKMO 1987 - 2008 33
Fig. 5.5 - Distribuzione direzionale degli eventi (triorari) di moto ondoso con H_s maggiore di 2 m - dati UKMO 1987-2008 37
Fig. 5.6 - Distribuzione direzionale degli eventi (triorari) di moto ondoso (mare vivo) con H_s maggiore di 2 m - dati UKMO 1987-2008 38
Fig. 5.7 - Distribuzione direzionale degli eventi (triorari) di moto ondoso (swell) con H_s maggiore di 2 m - dati UKMO 1987-2008 39
Fig. 5.8 - Distribuzione direzionale delle mareggiate con $H_{s\ colmo}$ maggiore di 2 m relativamente al settore di maggiore interesse 45-150°N - dati UKMO 1987-2008 40
Fig. 5.9 - Mareggiata dell’1 marzo 1993 - $H_{s\ colmo}$= 4,1 m e Dir.=105°N 41
Fig. 5.10 - Mareggiata del 23 dicembre 1994 - $H_{s\ colmo}$= 2,7 m e Dir.=54°N 42
Fig. 5.11 - Mareggiata del 14 dicembre 2001 - $H_{s\ colmo}$= 3,6 m e Dir.=99-135°N 43
Fig. 5.12 - Statistica delle onde estreme al largo del paraggio di Vado Ligure, riferita al settore di traversia 50 - 100 °N - Soglia H_s=1 m 50
Fig. 5.13 - Statistica delle onde estreme al largo del paraggio di Vado Ligure, riferita al settore di traversia 100-150 °N - Soglia H_s=1 m 52
Fig. 5.14 - Statistica delle onde estreme al largo del paraggio di Vado Ligure, riferita al settore di traversia 150-190 °N - Soglia H_s=1 m 54
Fig. 5.15 - Relazione H_s-T_z , dati UKMO 87-08 - settore 50-100°N 56
Fig. 5.16 - Correlazione H_s-T_z , dati UKMO 87-08 - il settore 100-150°N 57

Fig. 5.17 - Correlazione H_s-T_z , dati UKMO 87-08 - settore 150-190°N 58
Fig. 7.1 - Planimetria dell'impalcato con l'ubicazione delle due sezioni longitudinali testate nel modello fisico 72
Fig. 7.2 - Sezioni longitudinali dell'impalcato 72
Fig. 7.3 - Sezione longitudinale della struttura e planimetria con indicazione della collocazione delle sonde 74
Fig. 7.4 - Trasformazione dell'onda sopra la struttura (senza impalcato) - Test A_0-04, $H_{s,opera}$ = 5.0 m 74
Fig. 7.5 - Batimetria modello PHAROS: quote di sommità dei cassoni sommersi e batimetrie naturali al di fuori della piattaforma 76
Fig. 7.6 - Onde significative in tutto il dominio e zoom in corrispondenza dei cassoni a giorno - risultati del modello PHAROS (Test A_0-04, $H_{s,opera}$ = 5.0 m) 77
Fig. 7.7 - Confronto tra Hs del modello fisico e Hs del modello PHAROS - test di riferimento (Test A_0-04, $H_{s,opera}$ = 5.0 m) 78
Fig. 7.8 - Schematizzazione della piattaforma in esercizio 80
Fig. 7.9 - Schematizzazione della piattaforma in costruzione 80
Fig. 7.10 - Coefficienti di riflessione considerati nel modello matematico di propagazione delle onde PHAROS per la configurazione 1A 82
Fig. 7.11 - Coefficienti di riflessione considerati nel modello matematico di propagazione delle onde PHAROS per la configurazione 1B 83
Fig. 7.12 - Coefficienti di riflessione considerati nel modello matematico di propagazione delle onde PHAROS per la configurazione 2 84
Fig. 7.13 - Batimetrie riprodotte sul modello - Piattaforma in esercizio 86
Fig. 7.14 - Batimetrie riprodotte sul modello - Piattaforma in costruzione 86
Fig. 7.15 - Dettaglio delle batimetrie in corrispondenza dell'impalcato della piattaforma 87
Fig. 7.16 - Dettaglio della griglia di calcolo usata dal modello PHAROS 87
Fig. 7.17 - Griglia di calcolo del modello (dettaglio in corrispondenza della diga foranea) 88
Fig. 7.18 - Propagazione dell'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 70°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1A 93
Fig. 7.19 - Distribuzione dei fronti d'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 70°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1A 94

Fig. 7.20 - Propagazione dell'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 80°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1A 95
Fig. 7.21 - Distribuzione dei fronti d'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 80°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1A 96
Fig. 7.22 - Propagazione dell'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 90°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1A 97
Fig. 7.23 - Distribuzione dei fronti d'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 90°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1A 98
Fig. 7.24 - Propagazione dell'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 105°N e Tr=250 anni: Hs=5,7 m , Tp=11,6 s. Configurazione 1A 99
Fig. 7.25 - Distribuzione dei fronti d'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 105°N e Tr=250 anni: Hs=5,7 m, Tp=11,6 s. Configurazione 1A 100
Fig. 7.26 - Propagazione dell'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 70°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1B 101
Fig. 7.27 - Distribuzione dei fronti d'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 70°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1B 102
Fig. 7.28 - Propagazione dell'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 80°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1B 103
Fig. 7.29 - Distribuzione dei fronti d'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 80°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1B 104

Fig. 7.30 - Propagazione dell'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 90°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1B 105
Fig. 7.31 - Distribuzione dei fronti d'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 90°N e Tr=250 anni: Hs=4,1 m , Tp=9,8 s. Configurazione 1B 106
Fig. 7.32 - Propagazione dell'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 105°N e Tr=250 anni: Hs=5,7 m , Tp=11,6 s. Configurazione 1B 107
Fig. 7.33 - Distribuzione dei fronti d'onda in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo con provenienza 105°N e Tr=250 anni: Hs=5,7 m, Tp=11,6 s. Configurazione 1B 108
Fig. 7.34 - Agitazione ondosa in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea esistente - Caratteristiche dell'onda incidente con provenienza 70°N: Hs=2.3 m , Tp=7.3 s. Configurazione 2 110
Fig. 7.35 - Agitazione ondosa in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea esistente - Caratteristiche dell'onda incidente con provenienza 80°N: Hs=2.3 m , Tp=7.3 s. Configurazione 2 111
Fig. 7.36 - Agitazione ondosa in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea esistente - Caratteristiche dell'onda incidente con provenienza 90°N: Hs=2.3 m , Tp=7.3 s. Configurazione 2 112
Fig. 7.37 - Agitazione ondosa in corrispondenza della nuova piattaforma con la diga foranea esistente - Caratteristiche dell'onda incidente con provenienza 105°N: Hs=3.1 m , Tp=8.6 s. Configurazione 2 113
Fig. 8.1 - Schema delle strutture della piattaforma 115
Fig. 8.2 - Cassoni emersi banchina rinfuse - Schematizzazione e nomenclatura 118
Fig. 8.3 - Distribuzione delle altezze d'onda sotto la piattaforma in funzione delle quote d'imbasamento dei cassoni 123
Fig. 8.4 - Schematizzazione impalcato 126

ELENCO TABELLE

Tab. 3.1 - Valori massimi annuali della marea meteorologica 18
Tab. 3.2 - Risultati dell'analisi statistica dei livelli estremi 20
Tab. 4.1 - Frequenze di occorrenza delle velocità e direzione del vento a Vado Ligure (1986-1997) 23
Tab. 4.2 - Frequenze di occorrenza delle velocità e direzione del vento al largo - dati UKMO (1987-2008) 25
Tab. 4.3 - Valori della velocità del vento (m/s) in funzione del tempo di ritorno - dati dell'anemometro di Vado Ligure alla quota di 220 m sul l.m.m. 26
Tab. 4.4 - Valori della velocità del vento (m/s) in funzione del tempo di ritorno - dati dell'anemometro di Vado Ligure riportati alla quota di 10 m sul l.m.m. 26
Tab. 4.5 - Valori della velocità del vento (m/s) in funzione del tempo di ritorno - dati dell'anemometro di Vado Ligure riportati alla quota di 10 m sul l.m.m. - Settore 0°-50°N 27
Tab. 4.6 - Valori della velocità del vento (m/s) in funzione del tempo di ritorno - dati nel punto al largo UKMO 27
Tab. 5.1 - Clima d'onda ottenuto con i dati UKMO per il periodo 1987-2008 34
Tab. 5.2 - Statistica degli eventi estremi, settore 50°-100°N 60
Tab. 5.3 - Statistica degli eventi estremi, settore 100°-150°N 61
Tab. 5.4 - Statistica degli eventi estremi, settore 150°-190°N 62
Tab. 5.5 - Moto ondoso estremo per il settore 0°-50°N- Direzione di provenienza del vento 30°N 64
Tab. 6.1 - Durata minima di vita per opere o strutture di carattere definitivo T_v 65
Tab. 6.2 - Massima probabilità di danneggiamento ammissibile nel periodo di vita operativa dell'opera P_f 67
Tab. 6.3 - Periodi di ritorno dell'onda di progetto 68
Tab. 7.1 - Programma dei test eseguiti - Sez. A-A e Sez. B-B 73
Tab. 7.2 - Configurazioni simulate con il modello PHAROS 90
Tab. 7.3 - Caratteristiche del moto ondoso estremo al largo considerate per le simulazioni 91
Tab. 7.4 - Caratteristiche del moto ondoso estremo al largo considerate per le simulazioni 109
Tab. 8.1 - Caratteristiche del moto ondoso estremo al largo considerate per le simulazioni 114
Tab. 8.2 - Onde in corrispondenza della scogliera alla radice della piattaforma 116
Tab. 8.3 - Onde in corrispondenza dei cassoni emersi reggispinta 117

Tab. 8.4 - Onde in corrispondenza de i cassoni emersi della banchina rinfuse in condizione di esercizio 119
Tab. 8.5 - Onde retrostanti i cassoni emersi delle banchina rinfuse in condizione di esercizio 120
Tab. 8.6 - Onde di progetto per i cassoni sommersi in fase di costruzione - Tr 5 anni 121
Tab. 8.7 - Onde di progetto per i cassoni sommersi in condizioni di esercizio - Tr 250 anni 121
Tab. 8.8 - Risultati delle simulazioni per le onde di progetto incidenti la piattaforma 122
Tab. 8.9 - Onde di progetto per la protezione dei fondali nelle aree perimetrali sotto la piattaforma -Tr=250 anni 124
Tab. 8.10 - Onde di progetto per la protezione dei fondali nelle aree interne sotto la piattaforma - Tr=250 anni 124
Tab. 8.11 - Risultati delle simulazioni per le onde di progetto in corrispondenza dell'impalcato su pali - Tr 250 anni 125

1. PREMESSA

Nell'ambito del presente progetto esecutivo si è reso necessario/opportuno proporre delle varianti alla configurazione di progetto definitivo già approvata che consistono (vedi Fig. 1.1):

- nell'inserimento di una schiera di cassoni pieni all'estremità lato mare della piattaforma;
- nell'estensione verso mare dell'area in rilevato a terra della piattaforma e quindi nello spostamento verso mare dei cassoni reggispinta (dell'area in rilevato) per una lunghezza di circa 50 m, con conseguente riduzione dell'area a giorno su pali, fondati su cassoni.

Si evidenzia inoltre il parere espresso dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (nota n. 169/2011 reso nell'adunanza del 23 marzo 2011 che riporta il parere in merito al progetto definitivo) raccomandava di prevedere come onda di progetto per il dimensionamento delle strutture di banchina a parete verticale un tempo di ritorno di 250 anni invece di 100 anni.

Il presente rapporto rivede pertanto le analisi meteomarine di supporto alla progettazione delle nuove opere, svolte in fase di progetto definitivo, tenendo conto delle modifiche apportate alla configurazione delle opere e delle raccomandazioni espresse dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.



FIG. 1.1 - MODIFICHE APPORTATE AL LAYOUT DELLE STRUTTURE DEL PROGETTO DEFINITIVO: PLANIMETRIA DI PROGETTO DELLA NUOVA DISPOSIZIONE DEI CASSONI DELLA PIASTRA DI VADO LIGURE

2. IL PARAGGIO D'INTERESSE

Il paraggio di Vado è ubicato nella riviera di Ponente della costa ligure. La localizzazione del sito di indagine è rappresentata nella seguente Fig. 2.1.

L'esposizione della zona d'intervento è compresa tra 50° e 190°N con un settore di massimo fetch proveniente da sud e sud-est caratterizzato da valori di 150-200 km. Per le altre possibili direzioni di provenienza il fetch geografico si mantiene inferiore a 100 km.

Il sito risulta naturalmente protetto nei confronti degli eventi ondosi di maggiore intensità, provenienti da Libeccio, per effetto dell'azione schermante offerta da Capo Vado. Il sito risulta esposto direttamente solo agli eventi provenienti dal secondo quadrante, e, parzialmente dal primo che, come si è visto, non presenta fetch particolarmente estesi.

Il paraggio di Vado Ligure è caratterizzati da una batimetria, tipica delle coste liguri, per cui si raggiungono profondità superiori ai 50 e talora ai 100 m a ridotta distanza dalla costa (Fig. 2.2).

Già dalla semplice analisi di tale batimetria si può quindi intuire come le onde provenienti dal largo non subiscano rilevanti modificazioni delle loro grandezze fondamentali (altezza, periodo di picco e direzione di propagazione dell'onda) fintantoché non raggiungono zone molto prossime a riva.

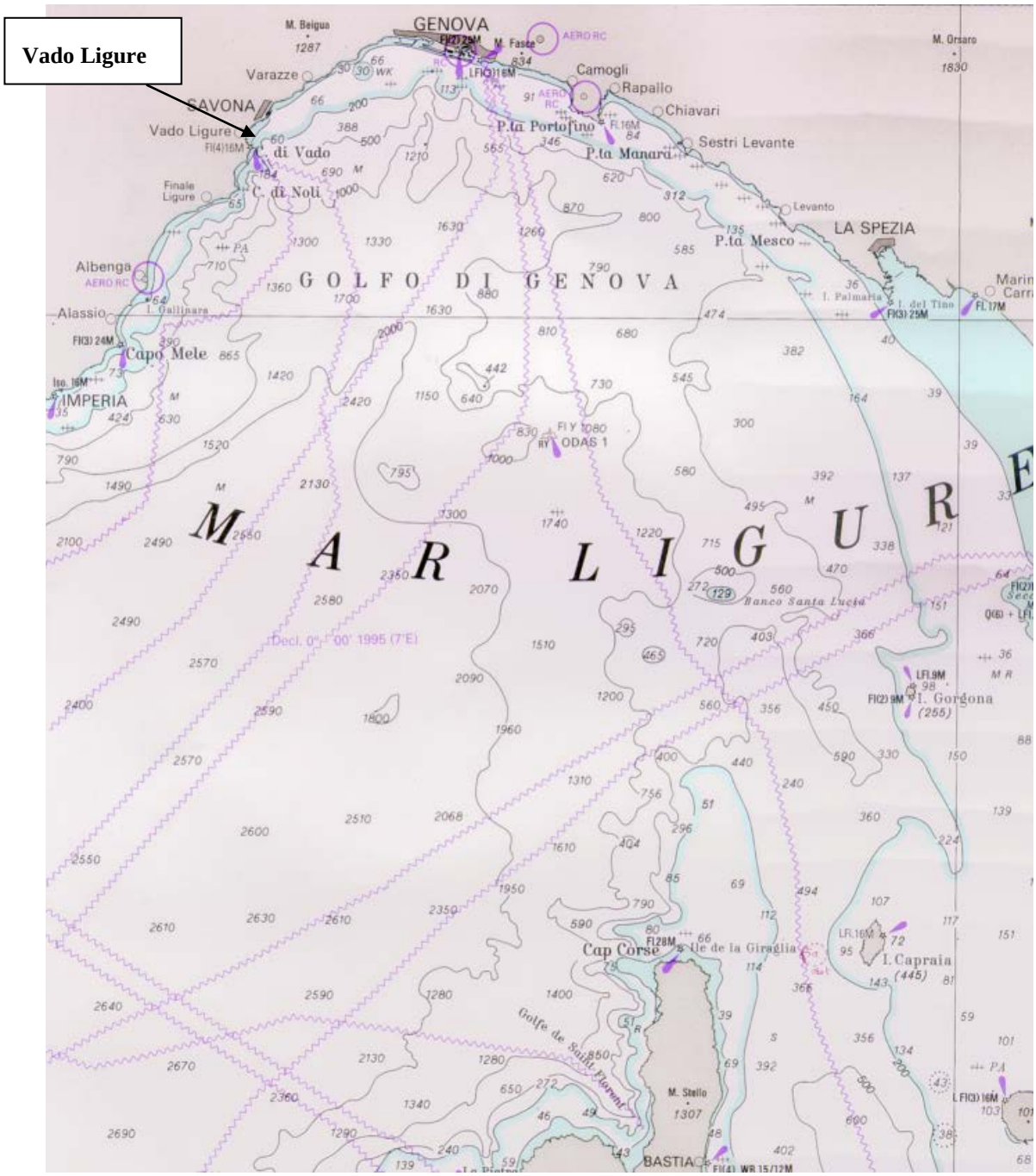


FIG. 2.1 - UBICAZIONE DEL PARAGGIO DI VADO LIGURE

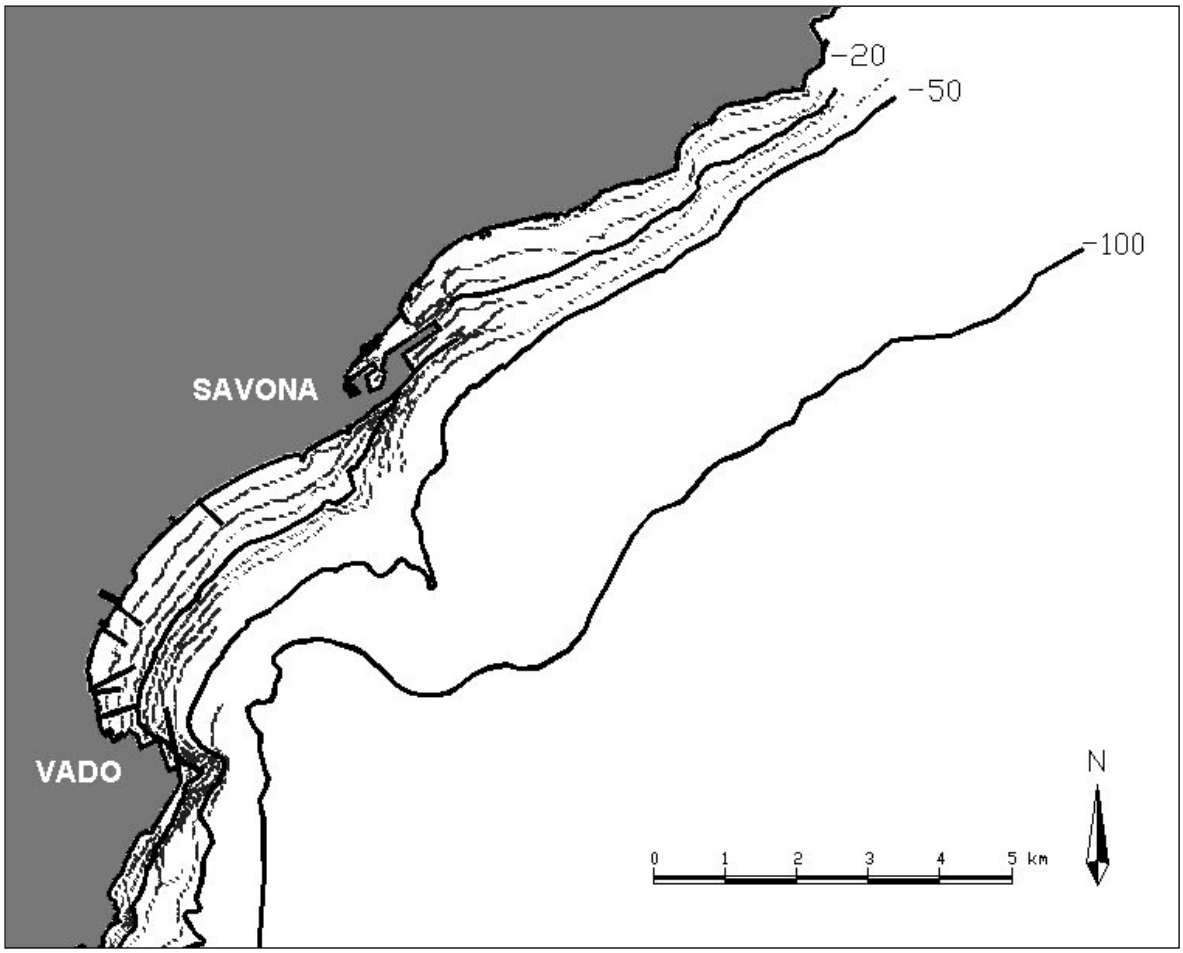


FIG. 2.2 - LE BATIMETRIE NELLA ZONA DI VADO LIGURE

3. I LIVELLI DEL MARE

Nel Golfo di Genova l'ampiezza di marea è modesta, come dimostrano i dati mareografici delle stazioni di Genova ed Imperia forniti dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale dei Servizi Tecnici Nazionali ora confluiti nell'APAT (Agenzia per l'Ambiente ed il Territorio) per il periodo 1998-2008. A titolo di esempio si riportano in Fig. 3.1 e Fig. 3.2 i livelli misurati ad Imperia e Genova nel periodo Agosto 98 - Novembre 2000.

I valori massimi di marea registrati nel periodo sono pari a +0,5 m per il sito di Genova e a +0,43 m per quello di Imperia. I valori minimi sono, rispettivamente, di -0,33 m e -0,36 m.

Le variazioni del livello marino definiscono un segnale complesso, che può considerarsi il risultato delle interazioni tra due componenti fondamentali: la marea astronomica, di natura periodica e causata dalle forze di attrazione combinate della luna e del sole, e la cosiddetta componente meteorologica, aleatoria e dovuta agli effetti indotti sulla superficie marina dalle variazioni delle condizioni atmosferiche. Con riferimento ai porti marittimi, i fenomeni meteorologici in grado di influenzare il livello del mare sono essenzialmente le variazioni di pressione atmosferica ed il vento, i cui effetti, in generale, non possono essere identificati separatamente.

Per poter eseguire un'analisi statistica della componente meteorologica del segnale di marea, e fare quindi previsioni di livello legate al tempo di ritorno, le registrazioni di marea sono state elaborate al fine di separare le due componenti astronomica e meteorologica. L'elaborazione è stata effettuata sulla serie storica delle registrazioni disponibili per il mareografo di Genova, relative al periodo 1998 - 2008. I dati hanno formato orario e sono riferiti allo 0 IGM.

La marea meteorologica, $\eta_m(t)$, può essere determinata eliminando dal segnale registrato, $\eta(t)$, le oscillazioni dovute alle componenti di frequenza tipiche della banda diurna della marea astronomica, $\eta_a(t)$. Gli effetti meteorologici, infatti, influenzano largamente

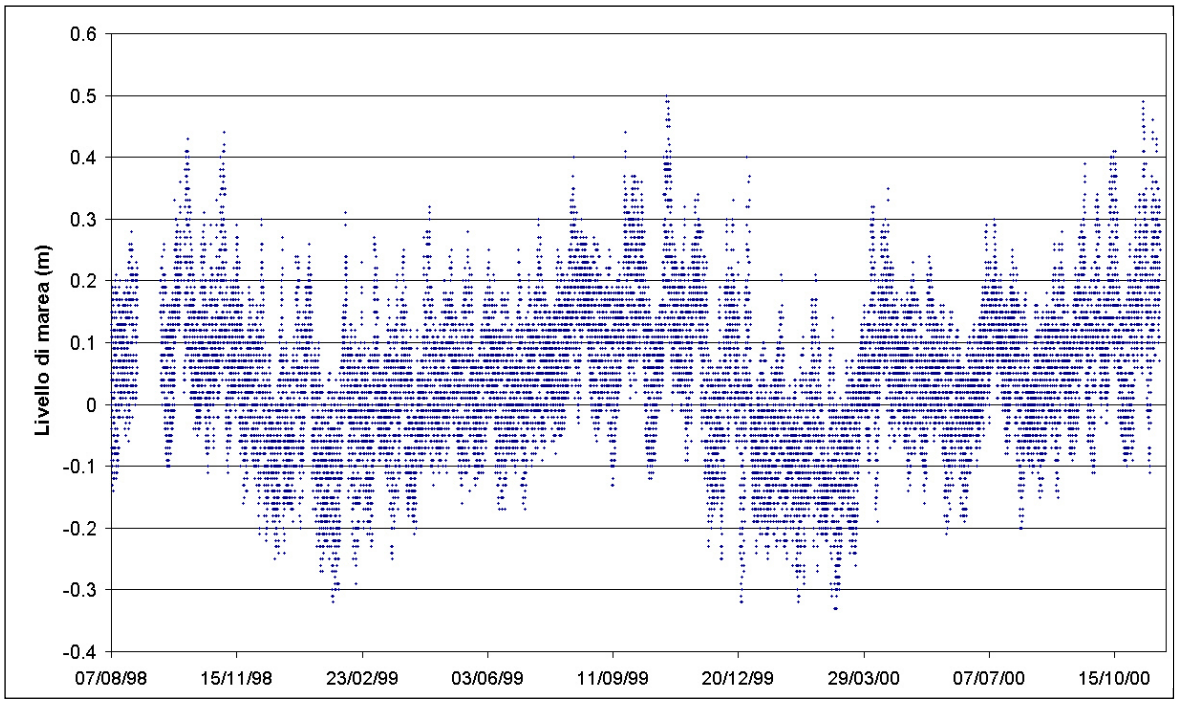


FIG. 3.1 - GENOVA: ESCURSIONI DI MAREA NEL PERIODO AGOSTO '98-NOVEMBRE '00

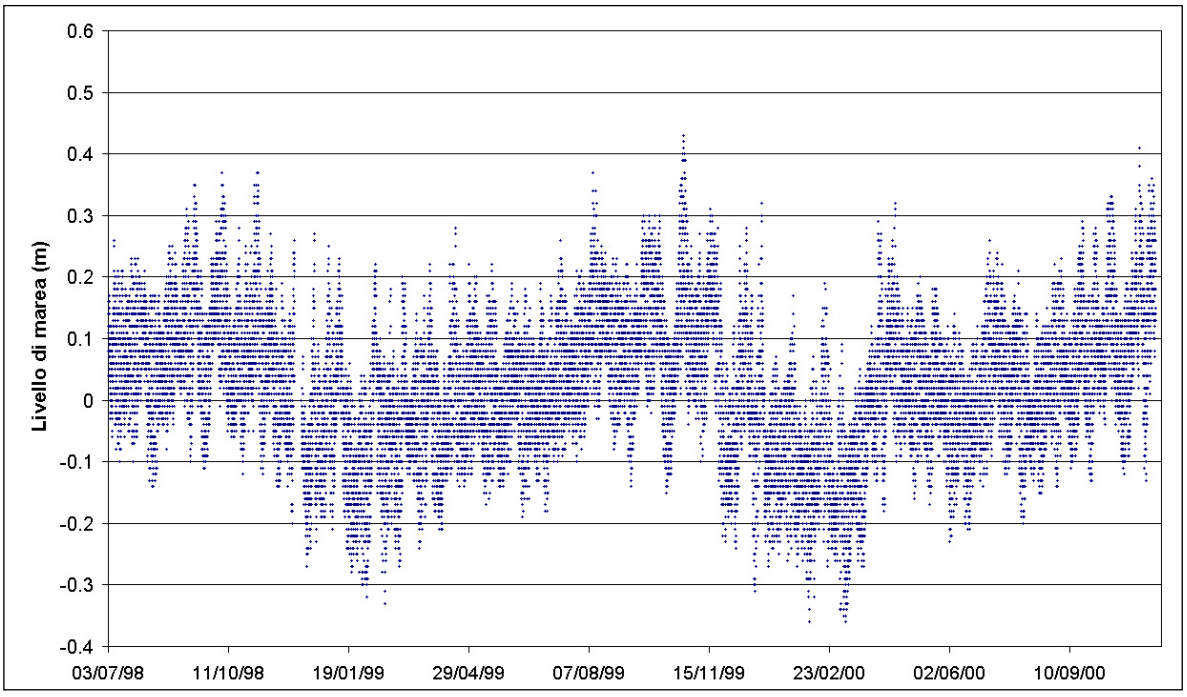


FIG. 3.2 - IMPERIA: ESCURSIONI DI MAREA NEL PERIODO AGOSTO '98-NOVEMBRE '00

le componenti armoniche sub-mareali dello spettro di frequenza del livello marino comprese nella banda limitata dalle componenti mareali diurna e mensile. Pertanto la componente meteorologica $\eta_m(t)$ è stata determinata applicando al mareogramma rilevato $\eta(t)$ un opportuno filtro orario passa-basso, in grado di trattenere le componenti semidiurna e diurna della marea lasciando passare i contributi associabili a frequenze più basse. La marea astronomica è costituita dalla differenza tra il mareogramma registrato e quello residuo ottenuto applicando il filtro passa-basso, ovvero il mareogramma meteorologico. Nella Fig. 3.3 si riporta a titolo di esempio il risultato dell'elaborazione per l'anno 2006.

Nella Tab. 3.1 sono riportati, per i diversi anni di registrazione considerati, i valori massimi della componente meteorologica della marea.

TAB. 3.1 - VALORI MASSIMI ANNUALI DELLA MAREA METEOROLOGICA

Anno	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
$\eta_{m,max}$ **(m)**	0,27	0,33	0,40	0,30	0,46	0,44	0,37	0,29	0,33	0,32	0,28

L'analisi statistica di tali valori estremi è stata effettuata adattando la distribuzione di probabilità di Gumbel e la distribuzione Tipo III di Pearson. I risultati dell'elaborazione sono riportati nella tabella Tab. 3.2, con riferimento a valori del tempo di ritorno pari a 1, 5, 10, 20, 50 e 100 anni.

Per determinare il livello estremo complessivo, occorre sommare al valore massimo stimato del contributo meteorologico un valore rappresentativo delle più elevate altezze di marea astronomica. A tale proposito sono stati individuati, per l'intero periodo 1998 - 2008 e relativamente a ciascun giorno mareale, i valori delle più elevate alte maree astronomiche. Facendo la media di tali dati si è stimata la marea astronomica di riferimento per il calcolo dei livelli estremi complessivi, che è risultata pari a +0,12 m. I valori estremi complessivi del livello marino sono indicati anch'essi in Tab. 3.2.

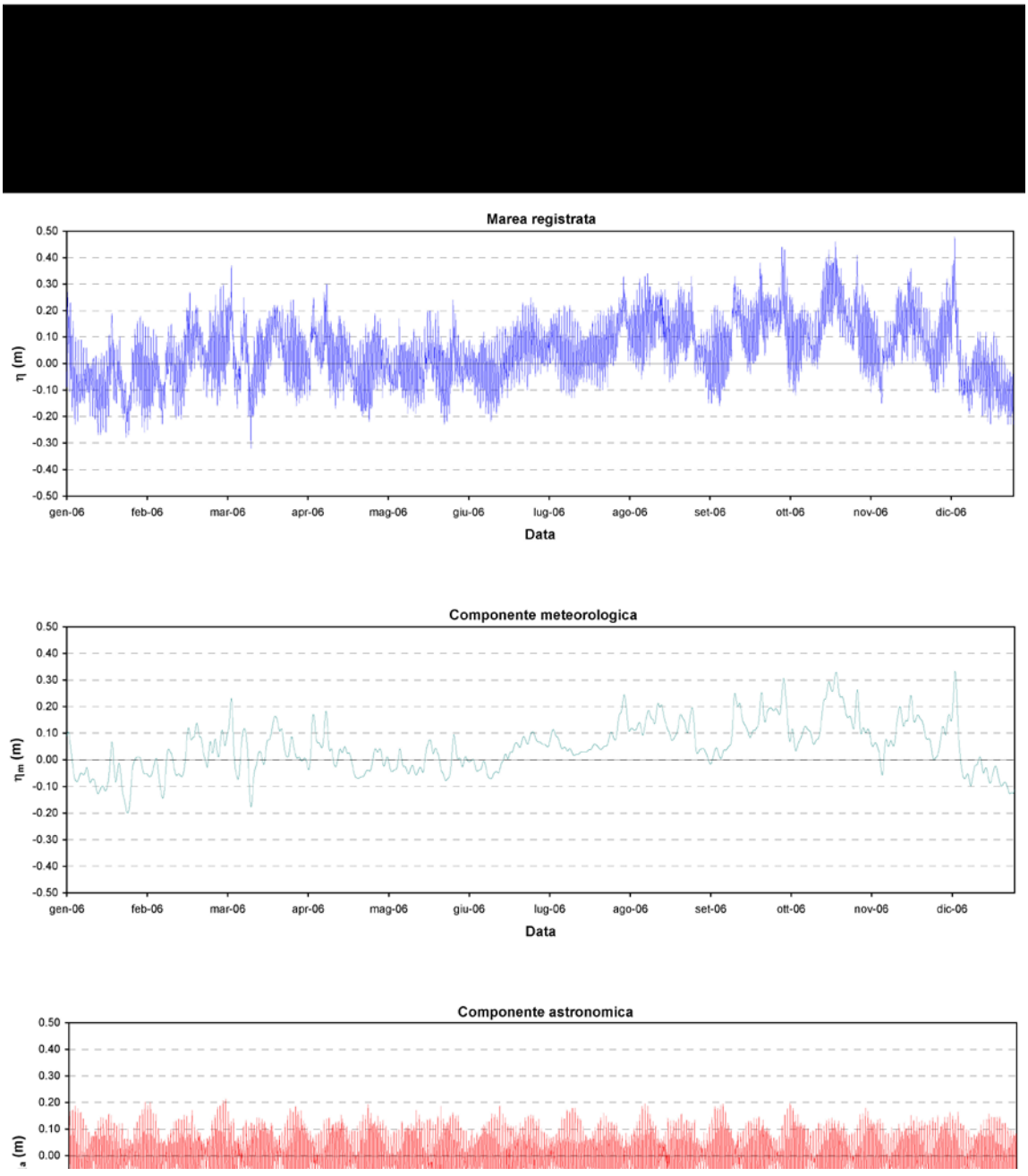


FIG. 3.3 - ESEMPIO DI SCOMPOSIZIONE DELLA REGISTRAZIONE DI MAREA NELLE COMPONENTI METEOROLOGICA ED ASTRONOMICA (STAZIONE DI GENOVA, ANNO 2006)

TAB. 3.2 - RISULTATI DELL'ANALISI STATISTICA DEI LIVELLI ESTREMI

T_r (anni)	M. Meteorologica (m)		M. Astronomica (m)	Livello marino (m)
	Pearson (tipo III)	Gumbel		
1	0,26	0,26	0,12	0,38 / 0,38
5	0,40	0,41	0,12	0,52 / 0,53
10	0,43	0,46	0,12	0,55 / 0,58
20	0,46	0,50	0,12	0,58 / 0,62
50	0,50	0,56	0,12	0,62 / 0,68
100	0,53	0,61	0,12	0,65 / 0,73

4. LE CONDIZIONI ANEMOMETRICHE

4.1. Le condizioni frequenti di vento

La disponibilità di serie storiche di dati di vento molto lunghe riguardano una stazione a terra in prossimità dell'intervento, proprio a Vado Ligure. I dati di Vado Ligure che si riferiscono al periodo 1986-1997, che come si può notare nel seguito sono stati selezionati per definire le condizioni di vento sottocosta, sono stati ottenuti dalla stazione ubicata in corrispondenza della postazione Capo Vado 1 sita in località Scoglio bianco (Lat. Nord 44°15'30", Long. Est 8°26'58") che si trova proprio vicino al porto di Vado, oggi gestita dall'ARPAL Liguria. L'anemometro è ubicato ad una quota piuttosto alta di 220 m sul l.m.m. (quota del terreno 200 m e l'anemometro posizionato a 20 m da terra) ed ha registrato i dati con cadenza semioraria. Si ritiene che questo anemometro sia in grado di fornire dati rappresentativi delle condizioni locali.

Sono stati poi raccolti i dati di vento (con cadenza trioraria) ricostruiti presso il Centro Meteorologico di Bracknell con riferimento al periodo 1987-2008, che vengono utilizzati per definire le condizioni di vento al largo e sulla base delle quali il Centro Meteorologico di Bracknell ha ricostruito le condizioni d'onda al largo. I dati raccolti sono stati elaborati al fine di ottenere le condizioni di vento nel paraggio d'interesse, con riferimento sia alle condizioni frequenti che a quelle estreme (vedi paragrafo seguente).
Nelle Fig. 4.1 e Fig. 4.2 sono mostrate la rose dei venti dedotte dalle due serie anemometriche e nelle Tab. 4.1, Tab. 4.2 le percentuali di occorrenza per classi di velocità e direzioni del vento. Si fa notare che i dati registrati all'anemometro di Vado Ligure sono stati riportati alla quota di 10 m sul l.m.m., utilizzando la nota formula di letteratura $u_{10}=u_z\,(10/z)^{1/7}$.

Le velocità del vento dell'UKMO risultano un po' più basse rispetto a quelle registrate all'anemometro di Vado Ligure. Anche le direzioni di provenienza del vento risentono per l'anemometro di Vado Ligure dei fenomeni legati alla particolare orografia del sito d'interesse.

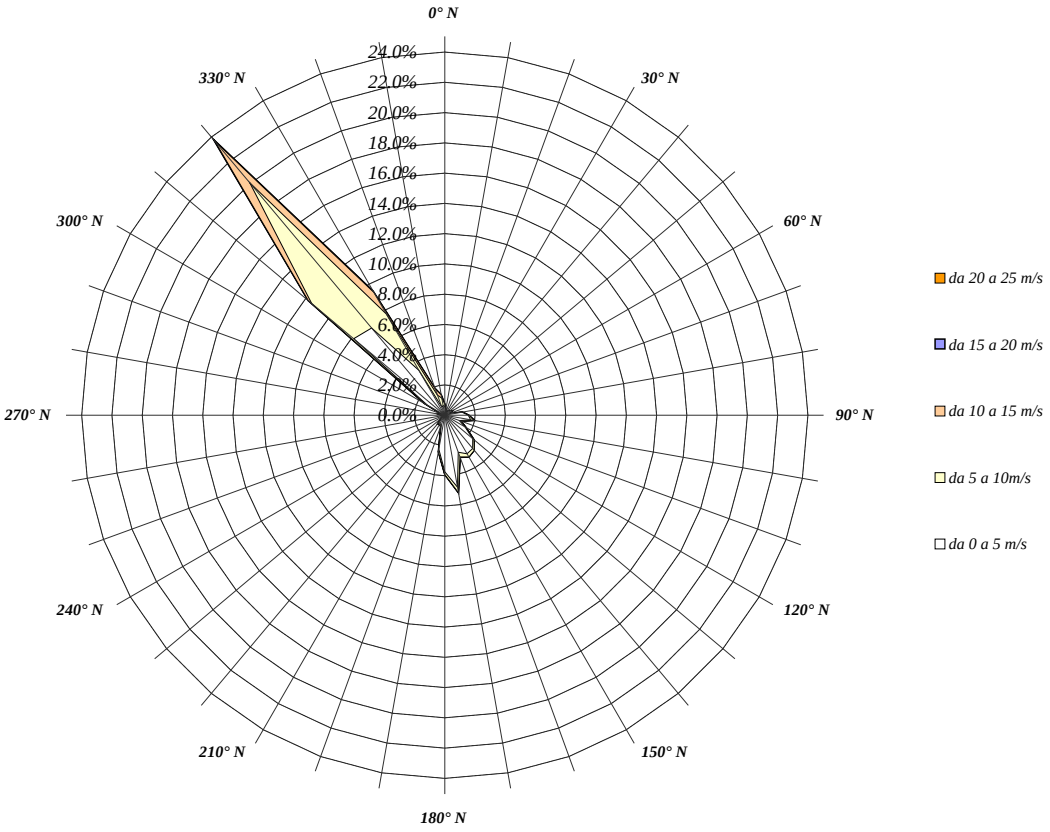


FIG. 4.1 - VADO LIGURE, ROSA DEI VENTI - DATI ORARI, 1986-1997

TAB. 4.1 - FREQUENZE DI OCCORRENZA DELLE VELOCITÀ E DIREZIONE DEL VENTO A VADO LIGURE (1986-1997)

VV (m/s)	≥ 0	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20	≥ 25	≥ 30	≥ 35	Tot.
DIREZIONE °N	< 5	< 10	< 15	< 20	< 25	< 30	< 35	< 40	
5	**0.583**	**0.149**	**0.014**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.751**
15	**0.378**	**0.030**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.409**
25	**0.197**	**0.011**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.209**
35	**0.246**	**0.011**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.258**
45	**0.392**	**0.010**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.404**
55	**0.436**	**0.009**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.445**
65	**0.598**	**0.007**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.607**
75	**0.368**	**0.014**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.382**
85	**1.156**	**0.031**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.189**
95	**1.552**	**0.044**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.598**
105	**1.736**	**0.218**	**0.050**	**0.007**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.011**
115	**1.027**	**0.114**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.145**
125	**1.548**	**0.085**	*0.000*	**0.003**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.636**
135	**2.417**	**0.095**	**0.003**	*0.000*	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.516**
145	**2.871**	**0.158**	**0.003**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.033**
155	**2.941**	**0.246**	**0.003**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.190**
165	**2.604**	**0.328**	**0.025**	**0.007**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.965**
175	**4.827**	**0.376**	**0.013**	**0.002**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**5.219**
185	**3.737**	**0.181**	**0.007**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.926**
195	**2.270**	**0.189**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.460**
205	**0.671**	**0.121**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.791**
215	**0.650**	**0.061**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.711**
225	**0.526**	**0.174**	**0.059**	**0.003**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.761**
235	**0.299**	**0.023**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.324**
245	**0.113**	**0.006**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.121**
255	**0.055**	**0.005**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.061**
265	**0.102**	**0.008**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.112**
275	**0.209**	**0.008**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.219**
285	**0.383**	**0.046**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.432**
295	**0.246**	**0.025**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.273**
305	**1.322**	**0.224**	**0.033**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.578**
315	**7.862**	**3.623**	**0.291**	**0.012**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**11.788**
325	**7.519**	**12.529**	**3.588**	**0.166**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**23.802**
335	**3.429**	**4.289**	**1.658**	**0.101**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**9.478**
345	**0.561**	**0.849**	**0.449**	**0.029**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.888**
355	**0.648**	**0.504**	**0.217**	**0.012**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.381**
Tot.	**56.480**	**24.799**	**6.442**	**0.351**	**0.002**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**88.074**

4.580% **eventi di calme**

7.346% **eventi di direzione indeterminata**

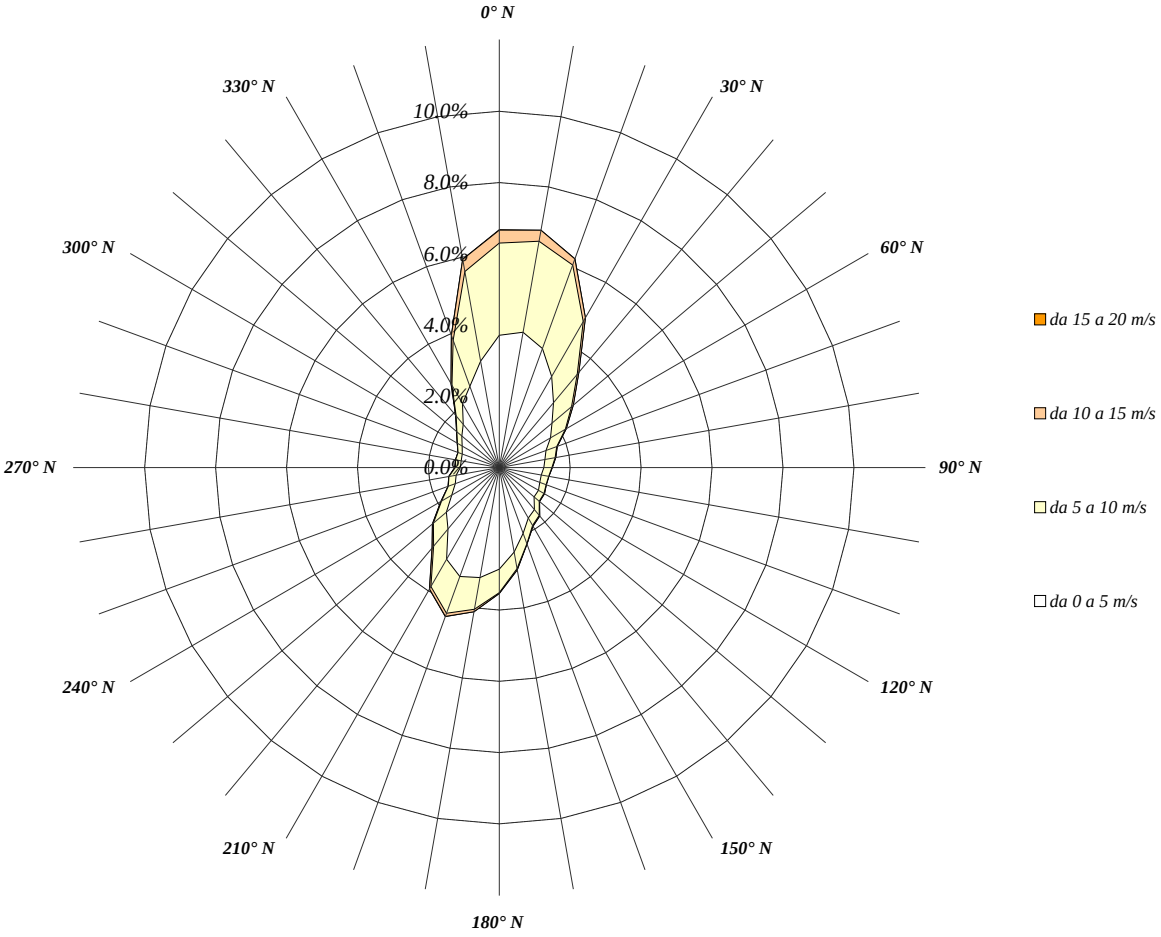


FIG. 4.2 - PUNTO UKMO - ROSA DEI VENTI. DATI TRIORARI, 1987-2008

TAB. 4.2 - FREQUENZE DI OCCORRENZA DELLE VELOCITÀ E DIREZIONE DEL VENTO AL LARGO - DATI UKMO (1987-2008)

VV (m/s)	≥ 0	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20	≥ 25	≥ 30	≥ 35	Tot.
DIREZIONE °N	< 5	< 10	< 15	< 20	< 25	< 30	< 35	< 40	
5	**3.714**	**2.586**	**0.364**	**0.012**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**6.677**
15	**3.856**	**2.593**	**0.314**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**6.765**
25	**3.555**	**2.495**	**0.180**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**6.234**
35	**2.951**	**1.784**	**0.119**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**4.853**
45	**2.379**	**1.039**	**0.070**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.488**
55	**1.941**	**0.718**	**0.061**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.721**
65	**1.668**	**0.482**	**0.032**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.183**
75	**1.402**	**0.321**	**0.016**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.743**
85	**1.307**	**0.291**	**0.018**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.617**
95	**1.255**	**0.230**	**0.012**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.496**
105	**1.200**	**0.212**	**0.007**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.419**
115	**1.214**	**0.191**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.410**
125	**1.274**	**0.179**	**0.018**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.470**
135	**1.279**	**0.193**	**0.012**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.484**
145	**1.542**	**0.209**	**0.021**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.773**
155	**1.633**	**0.244**	**0.021**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.899**
165	**1.964**	**0.308**	**0.011**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.285**
175	**2.409**	**0.471**	**0.037**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.917**
185	**2.851**	**0.661**	**0.021**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.536**
195	**3.135**	**0.902**	**0.072**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**4.110**
205	**3.254**	**1.099**	**0.095**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**4.452**
215	**2.970**	**0.887**	**0.077**	**0.007**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.940**
225	**2.253**	**0.627**	**0.063**	**0.011**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.954**
235	**1.947**	**0.478**	**0.035**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.460**
245	**1.545**	**0.333**	**0.021**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.901**
255	**1.319**	**0.212**	**0.007**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.538**
265	**1.235**	**0.207**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.447**
275	**1.099**	**0.142**	**0.014**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.255**
285	**1.088**	**0.163**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.253**
295	**1.111**	**0.126**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.240**
305	**1.207**	**0.154**	**0.011**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.372**
315	**1.377**	**0.180**	**0.018**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.575**
325	**1.584**	**0.310**	**0.019**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.915**
335	**2.076**	**0.590**	**0.051**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.721**
345	**2.428**	**1.374**	**0.147**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.955**
355	**3.033**	**2.553**	**0.349**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**5.938**
Tot.	**72.056**	**25.542**	**2.327**	**0.075**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**100.000**

4.2. Le condizioni estreme di vento

Per la definizione dei valori estremi della velocità del vento sottocosta è stato elaborato il set di dati registrati all'anemometro di Vado Ligure presentato nel paragrafo precedente, mediante la distribuzione di probabilità di Gumbel con riferimento all'elaborazione dei massimi annuali.

Nelle tabelle riportate di seguito sono presentati i risultati delle elaborazioni svolte. I valori della velocità del vento di Vado Ligure indicati in Tab. 4.3 fanno riferimento alla quota di 220 m sul l.m.m., mentre quelli indicati in Tab. 4.4 sono riferiti alla quota di 10 m sul l.m.m..

In Tab. 4.5 sono inoltre riportati i risultati dell'analisi statistica per il solo settore 0°N-50°N, utilizzata in seguito per lo studio della generazione locale dell'onda.

TAB. 4.3 - VALORI DELLA VELOCITÀ DEL VENTO (M/S) IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO - DATI DELL'ANEMOMETRO DI VADO LIGURE ALLA QUOTA DI 220 M SUL L.M.M.

Tempo di ritorno (anni)			
2	**10**	**50**	**100**
28	32	36	37

TAB. 4.4 - VALORI DELLA VELOCITÀ DEL VENTO (M/S) IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO - DATI DELL'ANEMOMETRO DI VADO LIGURE RIPORTATI ALLA QUOTA DI 10 M SUL L.M.M.

Tempo di ritorno (anni)			
2	**10**	**50**	**100**
18	21	23	24

TAB. 4.5 - VALORI DELLA VELOCITÀ DEL VENTO (M/S) IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO - DATI DELL'ANEMOMETRO DI VADO LIGURE RIPORTATI ALLA QUOTA DI 10 M SUL L.M.M. - SETTORE 0°-50°N

Tempo di ritorno (anni)				
2	**10**	**50**	**100**	**250**
9	19	28	31	36

Per la definizione dei valori estremi della velocità del vento al largo è stato elaborato il set di dati dell'UKMO presentato nel paragrafo precedente, mediante la distribuzione di probabilità di Gumbel con riferimento all'elaborazione dei massimi annuali.

Nella tabella riportata di seguito sono presentati i risultati delle elaborazioni svolte.

TAB. 4.6 - VALORI DELLA VELOCITÀ DEL VENTO (M/S) IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO - DATI NEL PUNTO AL LARGO UKMO

Tempo di ritorno (anni)			
2	**10**	**50**	**100**
17	19	22	23

5. IL MOTO ONDOSO AL LARGO

5.1. I dati di moto ondoso disponibili

I dati che più si prestano ad una definizione delle caratteristiche meteomarine di un paraggio d'interesse sono riportati di seguito, insieme ad un commento inerente la relativa affidabilità ed una giustificazione circa il loro eventuale utilizzo nell'ambito del presente studio:

– Misurazioni di moto ondoso: rappresentano l'informazione migliore che possa essere utilizzata per la definizione delle condizioni marine esistenti al largo del sito in esame. La loro effettiva utilità e validità è legata al tipo di dati disponibili, alla durata del periodo di misurazione e, naturalmente, all'ubicazione dell'ondametro. Tali dati possono essere di tipo direzionale (all'altezza d'onda è associata la direzione di propagazione) o non direzionale.

  I dati disponibili relativamente alla costa ligure sono quelli:

– misurati dall'ENEL e dall'Università di Genova, al largo di Nervi, nel periodo 1978-1982;
– quelli dell'ondametro di Vado Ligure, installato da poco (2007) e per cui sono disponibili i dati relativi al periodo 08/07 - 04/08;
– quelli dell'ondametro di Nizza relativi al periodo 2002-2007;
– quelli della Rete Ondametrica Nazionale di La Spezia, misurati dal 1989 ad oggi.

I primi due set di dati sono misurati in punti abbastanza vicini all'area in esame (quello di Vado in particolare) ma, oltre ad essere del tipo "non direzionale", coprono un periodo di tempo piuttosto breve ed hanno frequenti interruzioni. Ciononostante sono state comunque reperite le registrazioni dell'ondametro di Vado, allo scopo di confrontarle con gli altri set di dati.

L'ondametro di Nizza si trova su fondali di 190 m, nel punto di coordinate (43° 38,30' N; 7° 13,70' E) ed è direzionale. Il campione limitato di dati registrato è piuttosto esiguo e non sufficiente per un analisi degli estremi.

I dati della R.O.N., pur essendo direzionali, affidabili e con quasi 20 anni di registrazioni, risultano poco utili per ricavarne informazioni relative al paraggio di Vado Ligure data la notevole distanza e, soprattutto, la sostanziale differenza nell'esposizione geografica.

- Ricostruzione del moto ondoso dai dati di vento e di moto ondoso del Meteorological Office: i dati del MET OFFICE, ricostruiti a partire dalle carte sinottiche del tempo secondo il metodo di Bracknell, adottato dall'European Wave Model, forniscono, in corrispondenza dei nodi di una griglia, i dati triorari di vento e di moto ondoso dedotti attraverso l'applicazione del già citato metodo.

I valori di altezza significativa dell'onda vengono desunti dallo spettro dell'energia, quindi calcolati nel "dominio della frequenza". L'altezza significativa fornita è dunque quella che viene indicata come Hm_0 e che viene calcolata dal momento spettrale di ordine 0, che in pratica rappresenta l'energia dello spettro. Essa è in generale diversa da quella che viene indicata come Hs e che viene calcolata nel "dominio del tempo" attraverso l'analisi zero crossing; ai fini pratici però in acque profonde le differenze tra le due non sono sostanziali, quindi i valori forniti vengono assunti come Hs.

Tali informazioni sono considerate in generale dagli addetti ai lavori nell'ambito internazionale abbastanza affidabili (soprattutto per quanto riguarda il clima di moto ondoso). A questo va aggiunto la notevole mole di dati disponibili normalmente che consente di ricavare delle estrapolazioni affidabili. Si allega (vedi Appendice 2) a riguardo il 'Quality statement' del Met Office che presenta le caratteristiche degli strumenti che vengono utilizzati per la ricostruzione delle onde e le modalità di analisi.

Il nodo della griglia più vicino al sito in esame ha le coordinate 44° N e 8.74° E, ed è quello che è stato considerato negli studi dell'Università di Padova, in quanto ubicato in una posizione adeguata per lo studio delle onde al largo del sito d'interesse. L'Università di Padova aveva acquisito i dati in questo punto per il periodo 1987-1998. Nello stesso punto della griglia sono stati acquisiti da Technital anche i dati relativi

all'ultimo decennio 1998-2007, in modo da disporre di un ampio campione di dati (20 anni di dati complessivamente).

- Dati di moto ondoso del K.N.M.I. (Istituto Reale Meteorologico dei Paesi Bassi): tali dati, pur presentando il pregio di essere ampiamente diffusi, a basso costo e spesso riferiti a punti in alto mare, hanno il grosso inconveniente di essere stimati e non misurati, cosa che ne penalizza notevolmente l'affidabilità sia in termini di altezza d'onda sia di direzione di provenienza.
  La notevole estensione dell'area di provenienza dei dati è un altro aspetto che ne mina notevolmente l'affidabilità, potendo appartenere alcune stime a punti anche molto distanti da quello in studio, con il rischio che il moto ondoso attribuito alla zona d'interesse risulti, in realtà, rappresentativo di altre zone, sottoposte a condizioni marine ed anemometriche ben diverse, per intensità e settore di provenienza, da quelle effettivamente esistenti in prossimità del sito in esame.
  Nel nostro caso si è fatto riferimento ai dati KNMI disponibili, relativi al periodo 1961 - 1980, nell'ambito del territorio di mare delimitato a sud dai punti di coordinate (43°N; 8°E) e (43°N; 10°E) e delimitato a Nord dalla costa ligure (vedi AREA 1 in Fig. 5.1).
  Sono state elaborate circa 17.000 osservazioni, ridotte a circa 15.000 dopo aver eliminato i dati non completi e non affidabili. Sono state inoltre apportate le "correzioni" secondo le indicazioni di Soares, Jardine e Hogben per rendere congruente il dato visivo (Hv) con l'altezza d'onda significativa (Hs).

In sintesi sono stati analizzati di seguito i seguenti dati:

– dati dell'UKMO, ricostruiti con il modello European Wave Model nel punto di coordinate 44° N e 8,74° E, relativi al ventennio 1987-2008 acquisiti dal Centro Meteorologico di Bracknell;
– i dati dell'ondametro direzionale di Nizza, ubicato nel punto di coordinate (43° 38,30' N; 7° 13,70' E), relativi al periodo 2002 - 2007;
– i dati KNMI relativi al periodo 1961-1980 osservati nell'ambito del territorio di mare delimitato dalle coordinate (43°N; 8°E) e (43°N; 10°E).

In Fig. 5.2 sono ubicati i punti di misura del moto ondoso, con riferimento ai dati precedentemente elencati.

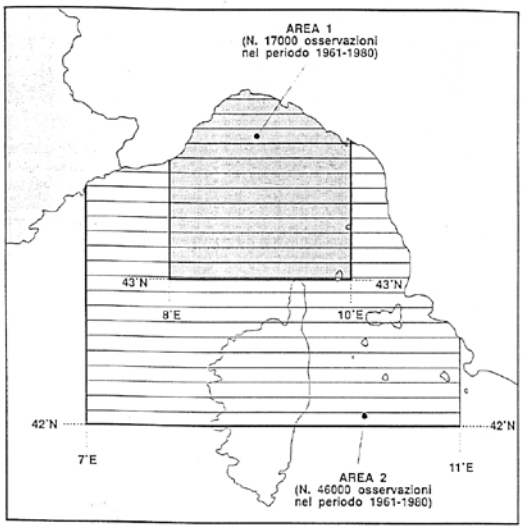


FIG. 5.1 - DATI DI MOTO ONDOSO KNMI - ESTENSIONE DELLE AREE DI RILIEVO DEI DATI

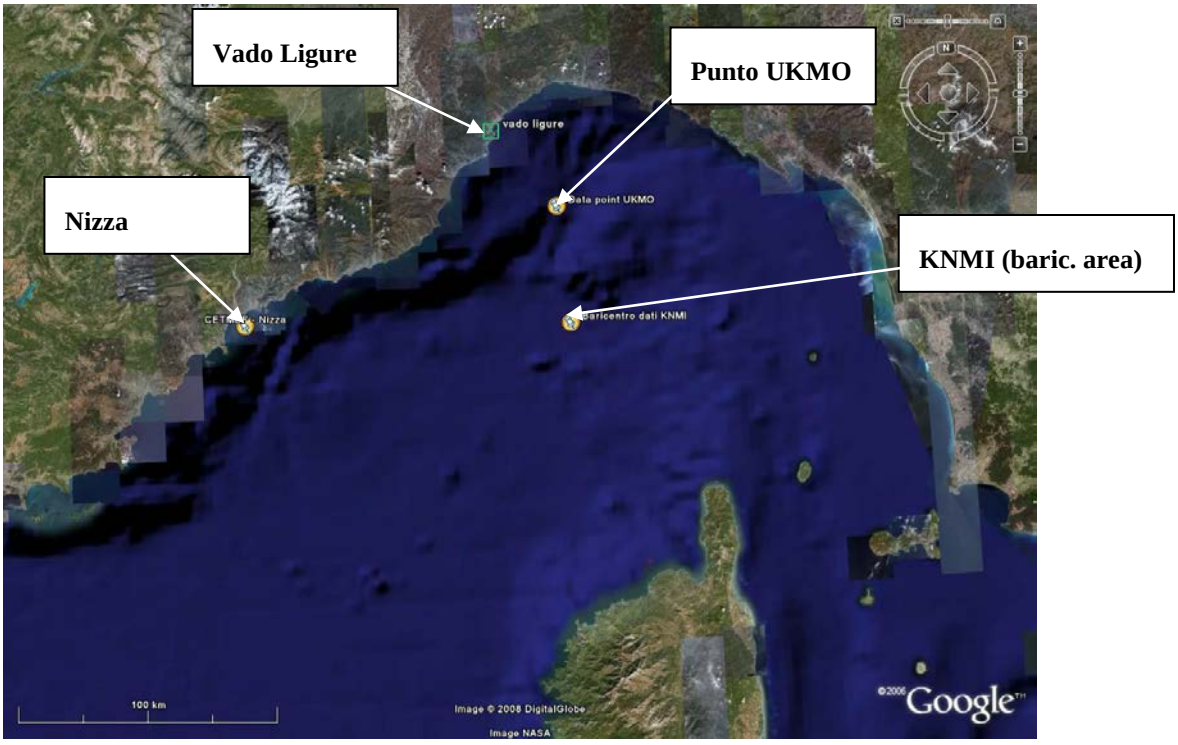


FIG. 5.2 - UBICAZIONE DEI PUNTI DI MISURA DELLE ONDE

5.2. Le condizioni frequenti di moto ondoso al largo

5.2.1. Il clima di moto ondoso al largo

Il porto di Vado Ligure ed il litorale compreso tra il Porto di Vado e il Porto di Savona sono interessati dalle onde provenienti dal settore 50-190°N, come è possibile dedurre dalla ubicazione e conformazione del paraggio d'interesse riportato in Fig. 5.3.

Nella relazione meteo marina del progetto definitivo sono stati analizzati i set di dati d'onda individuati nel capitolo precedente e per i dettagli a riguardo si rimanda ala relazione suddetta. Come detto in precedenza i dati del Centro Meteorologico di Bracknell sono considerati in generale dagli addetti ai lavori nell'ambito internazionale abbastanza affidabili (soprattutto per quanto riguarda il clima di moto ondoso). A questo va aggiunto la notevole mole di dati disponibili normalmente che consente di ricavare delle estrapolazioni affidabili. Si allega (vedi Appendice 2) a riguardo il 'Quality statement' del Met Office che presenta le caratteristiche degli strumenti che vengono utilizzati per la ricostruzione delle onde e le modalità di analisi.

Pertanto a questi dati dell'UKMO, anche in relazione alla estensione della serie storica (circa 20 anni), si è fatto riferimento per la definizione del clima di moto ondoso al largo. I dati dell'UKMO relativi al periodo 1987-2008, sono costituiti da registrazioni triorarie che sono stati elaborati in modo da ottenere il clima delle onde in forma di tabelle delle frequenze, organizzate secondo classi di direzione intervallate di 10° e di altezza d'onda con ampiezza 0,5 m.

In Fig. 5.4 è riportato il clima di moto ondoso ricostruito elaborando il ventennio di dati disponibile. Nel grafico è stato riportato anche il settore di traversia di interesse (50 °N-190°N), in modo da evidenziare con più facilità le direzioni di provenienza delle onde di interesse per Vado Ligure.

In Tab. 5.1 sono presentati i valori delle frequenze di occorrenza per determinate altezze d'onda significative e direzioni di provenienza.

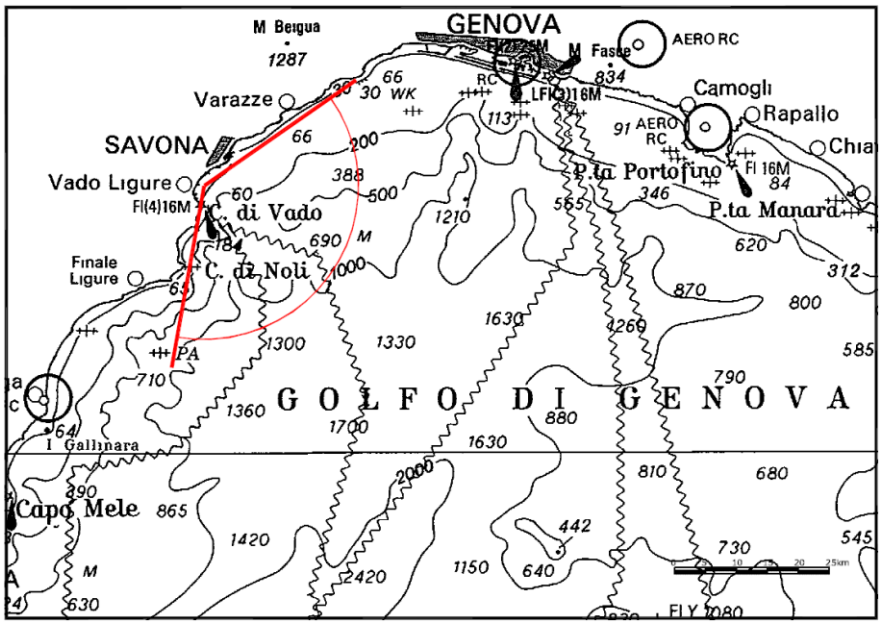


FIG. 5.3 - SETTORE DI TRAVERSIA CHE INTERESSA VADO LIGURE

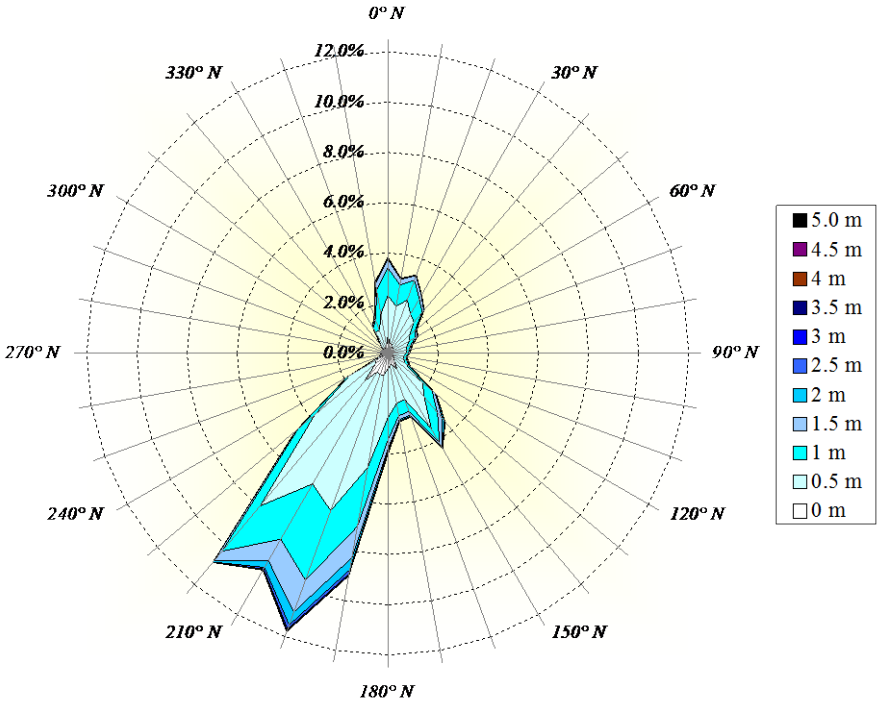


FIG. 5.4 - ROSA DEL MOTO ONDOSO AL LARGO DI VADO, NEL PUNTO DI COORDINATE 44°N; 8,73°E, OTTENUTA CON I DATI UKMO 1987 - 2008

TAB. 5.1 - CLIMA D'ONDA OTTENUTO CON I DATI UKMO PER IL PERIODO 1987-2008

Hs (m)	≥ 0	≥ 0.25	≥ 0.75	≥ 1.25	≥ 1.75	≥ 2.25	≥ 2.75	≥ 3.25	≥ 3.75	≥ 4.25	≥ 4.75	Tot.
DIREZIONE °N	< 0.25	< 0.75	< 1.25	< 1.75	< 2.25	< 2.75	< 3.25	< 3.75	< 4.25	< 4.75	< 5.25	
5	**0.694**	**1.614**	**1.092**	**0.345**	**0.065**	**0.023**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.832**
15	**0.415**	**1.495**	**0.860**	**0.223**	**0.039**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.036**
25	**0.424**	**1.843**	**0.836**	**0.193**	**0.033**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.331**
35	**0.328**	**1.479**	**0.704**	**0.154**	**0.019**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.686**
45	**0.303**	**1.319**	**0.506**	**0.100**	**0.042**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.271**
55	**0.252**	**0.866**	**0.289**	**0.068**	**0.019**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.500**
65	**0.251**	**0.729**	**0.282**	**0.098**	**0.037**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.398**
75	**0.228**	**0.568**	**0.163**	**0.084**	**0.018**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.065**
85	**0.226**	**0.522**	**0.121**	**0.046**	**0.019**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.939**
95	**0.235**	**0.482**	**0.109**	**0.042**	**0.019**	**0.011**	*0.000*	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.899**
105	**0.196**	**0.417**	**0.112**	**0.033**	**0.007**	**0.002**	**0.002**	**0.002**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	**0.774**
115	**0.224**	**0.445**	**0.131**	**0.039**	**0.028**	**0.004**	**0.002**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.876**
125	**0.240**	**0.559**	**0.159**	**0.056**	**0.026**	**0.002**	*0.000*	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.044**
135	**0.336**	**1.463**	**0.505**	**0.161**	**0.046**	**0.016**	*0.000*	**0.002**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	**2.530**
145	**0.401**	**1.861**	**0.818**	**0.289**	**0.138**	**0.030**	**0.016**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.557**
155	**0.776**	**2.681**	**0.661**	**0.168**	**0.058**	**0.014**	**0.009**	**0.007**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**4.373**
165	**0.440**	**1.510**	**0.501**	**0.166**	**0.040**	**0.019**	**0.019**	**0.002**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	**2.700**
175	**0.489**	**1.526**	**0.503**	**0.154**	**0.044**	**0.030**	**0.007**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.754**
185	**0.606**	**1.959**	**0.887**	**0.370**	**0.105**	**0.063**	**0.018**	**0.011**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	**4.019**
195	**0.878**	**3.736**	**2.376**	**1.263**	**0.494**	**0.159**	**0.054**	**0.012**	**0.011**	**0.007**	**0.002**	**8.992**
205	**0.890**	**5.770**	**2.945**	**1.344**	**0.552**	**0.175**	**0.067**	**0.025**	**0.011**	**0.005**	*0.000*	**11.783**
215	**0.836**	**5.158**	**2.541**	**0.986**	**0.310**	**0.077**	**0.035**	**0.014**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	**9.959**
225	**1.458**	**6.464**	**2.358**	**0.499**	**0.063**	**0.014**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**10.858**
235	**0.647**	**3.163**	**0.866**	**0.112**	**0.026**	**0.002**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**4.817**
245	**0.566**	**1.207**	**0.098**	**0.012**	**0.007**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.894**
255	**0.217**	**0.119**	**0.014**	**0.009**	**0.002**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.364**
265	**0.170**	**0.100**	**0.016**	**0.007**	*0.000*	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.294**
275	**0.165**	**0.077**	**0.016**	**0.005**	**0.002**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.266**
285	**0.144**	**0.070**	**0.011**	**0.002**	**0.004**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.231**
295	**0.156**	**0.065**	**0.012**	**0.012**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.249**
305	**0.126**	**0.063**	**0.026**	**0.004**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.224**
315	**0.121**	**0.109**	**0.023**	**0.014**	**0.005**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.273**
325	**0.186**	**0.233**	**0.060**	**0.011**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.491**
335	**0.223**	**0.760**	**0.189**	**0.047**	**0.018**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.240**
345	**0.258**	**0.711**	**0.454**	**0.109**	**0.044**	**0.007**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.582**
355	**0.315**	**1.276**	**0.957**	**0.272**	**0.061**	**0.016**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.896**
Tot.	**14.418**	**52.416**	**22.199**	**7.497**	**2.400**	**0.706**	**0.231**	**0.086**	**0.032**	**0.012**	**0.002**	**100.00**

5.2.2. Caratteristiche delle mareggiate del paraggio d'interesse

Le mareggiate più frequenti provengono dalle direzioni 210°N e 0 - 30°N, che sono al di fuori del settore di interesse.

Per evidenziare le caratteristiche degli eventi di moto ondoso più significativi occorsi nel ventennio sono presentati in Fig. 5.5÷Fig. 5.7 i diagrammi polari degli eventi di moto ondoso triorari con Hs superiore a 2 m rispettivamente per l'onda risultante, di mare vivo e di swell. Nella Fig. 5.8 è presentato il diagramma polare delle mareggiate con H_s al colmo superiore a 2 m.

Si fa notare che nel settore d'interesse ed in particolare quello delimitato da 50-150°N (essendo le direzioni d'onda da 150 a 190°N schermate dalla diga foranea esistente) si possono individuare 3 mareggiate più significative con H_s al colmo superiore a 2,5 m:

1. MAREGGIATA DELL'1 MARZO 1993 - $H_{S\ COLMO}$= 4.1 M E DIR.=105°N
2. MAREGGIATA DEL 23 DICEMBRE 1994 - $H_{S\ COLMO}$= 2.7 M E DIR.=54°N
3. MAREGGIATA DEL 14 DICEMBRE 2001 - $H_{S\ COLMO}$= 3.6 M E DIR.=135°N

Nel settore 100-150°N si sono verificate altre mareggiate con Hs al colmo superiore a 2,5 m ma con direzioni prossime a 150°N e pertanto di minore interesse in quanto vengono schermate dalla diga foranea esistente con riferimento alla possibilità che interessino il porto di Vado Ligure in fase di esercizio della nuova piattaforma.

Le registrazioni delle suddette 3 mareggiate (altezza d'onda e direzione), distinguendo la componente di mare vivo e di swell, sono riportate in Fig. 5.9÷Fig. 5.11.

La mareggiata 1. è quella di intensità maggiore (Hs superiore a 4 m) ed è caratterizzata da una direzione di 105°N con una predominante componente da mare vivo. La mareggiata 2. rappresenta l'unico evento relativo al primo quadrante di una certa intensità ed è caratterizzata da una componente significativa di mare vivo. Queste sono le uniche 2

mareggiate d'interesse che si sono verificate nel ventennio 1987-2008 che interessano il nostro paraggio.

La mareggiata 3. invece, occorsa nel dicembre 2001, è caratterizzata da una predominante componente da swell con direzione estremamente variabile tra 50 e 150°N. L'onda risultante in effetti presenta un valore al colmo (Hs=3,6 m) che nelle sei ore passa da 99° a 135°N. Rimangono a riguardo alcune perplessità in merito alle caratteristiche di queste mareggiata a cui non si riesce ad assegnare in modo preciso una direzione di provenienza.

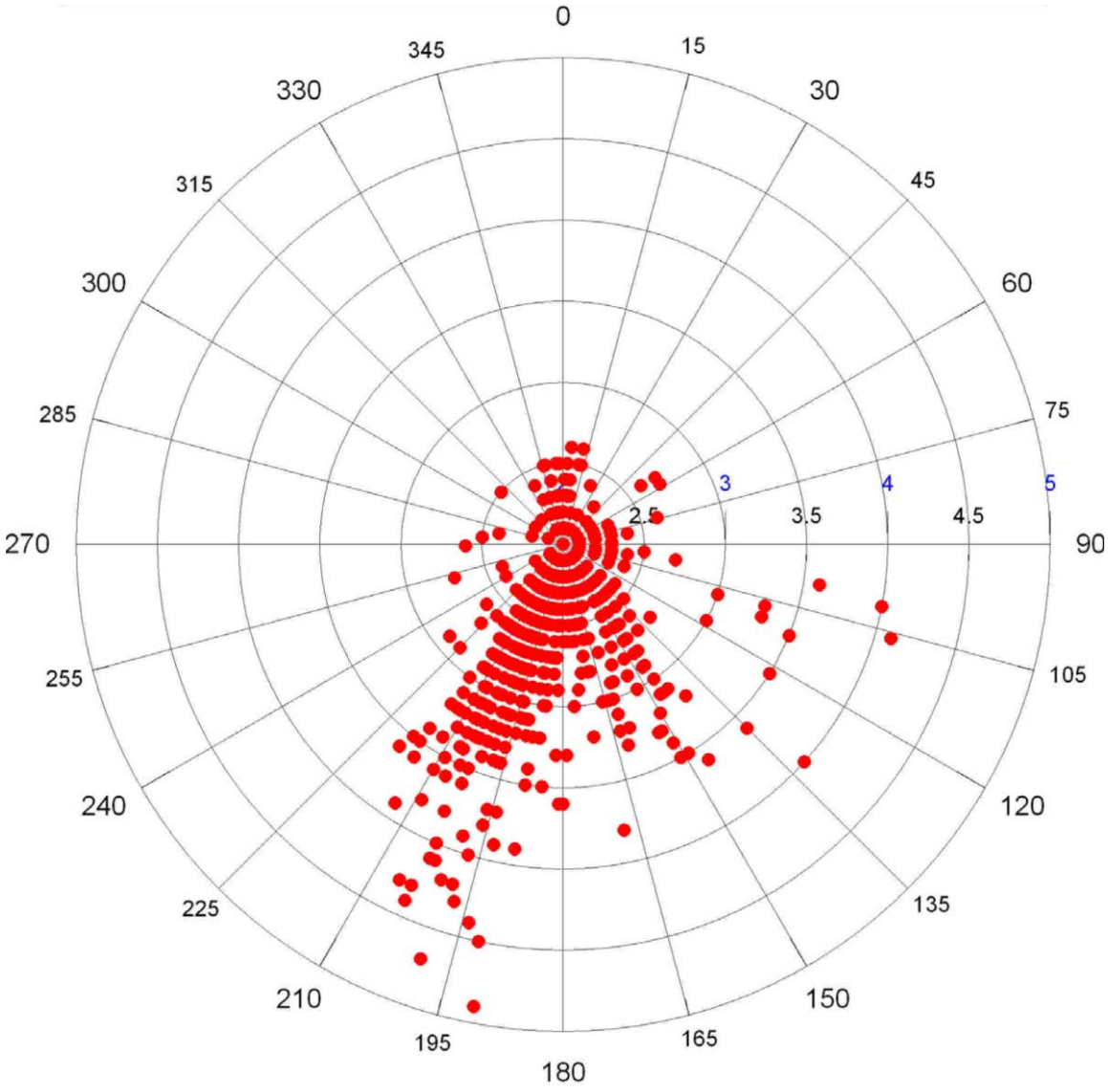


FIG. 5.5 - DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEGLI EVENTI (TRIORARI) DI MOTO ONDOSO CON H_S MAGGIORE DI 2 M - DATI UKMO 1987-2008

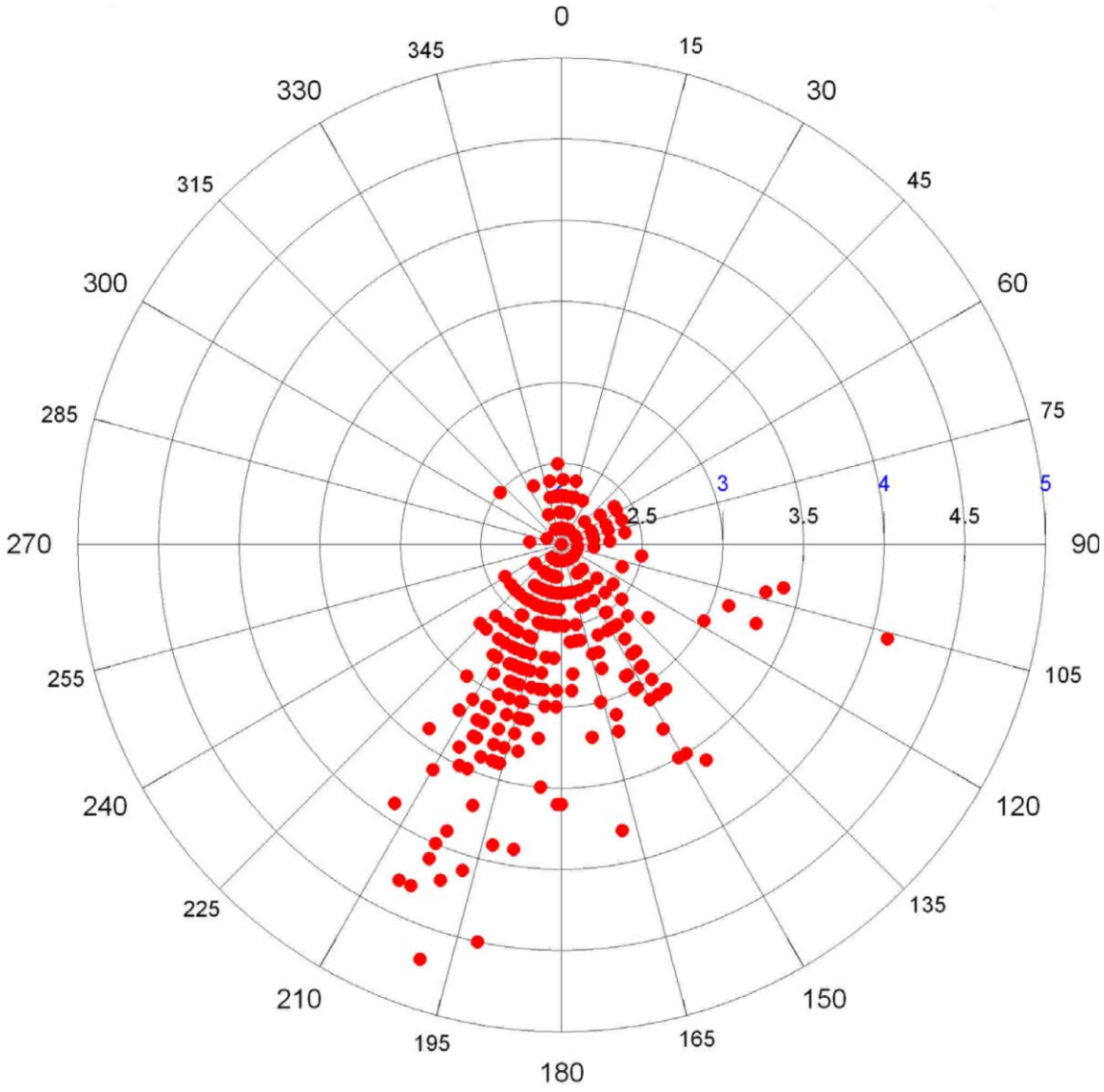


FIG. 5.6 - DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEGLI EVENTI (TRIORARI) DI MOTO ONDOSO (MARE VIVO) CON H_S MAGGIORE DI 2 M - DATI UKMO 1987-2008

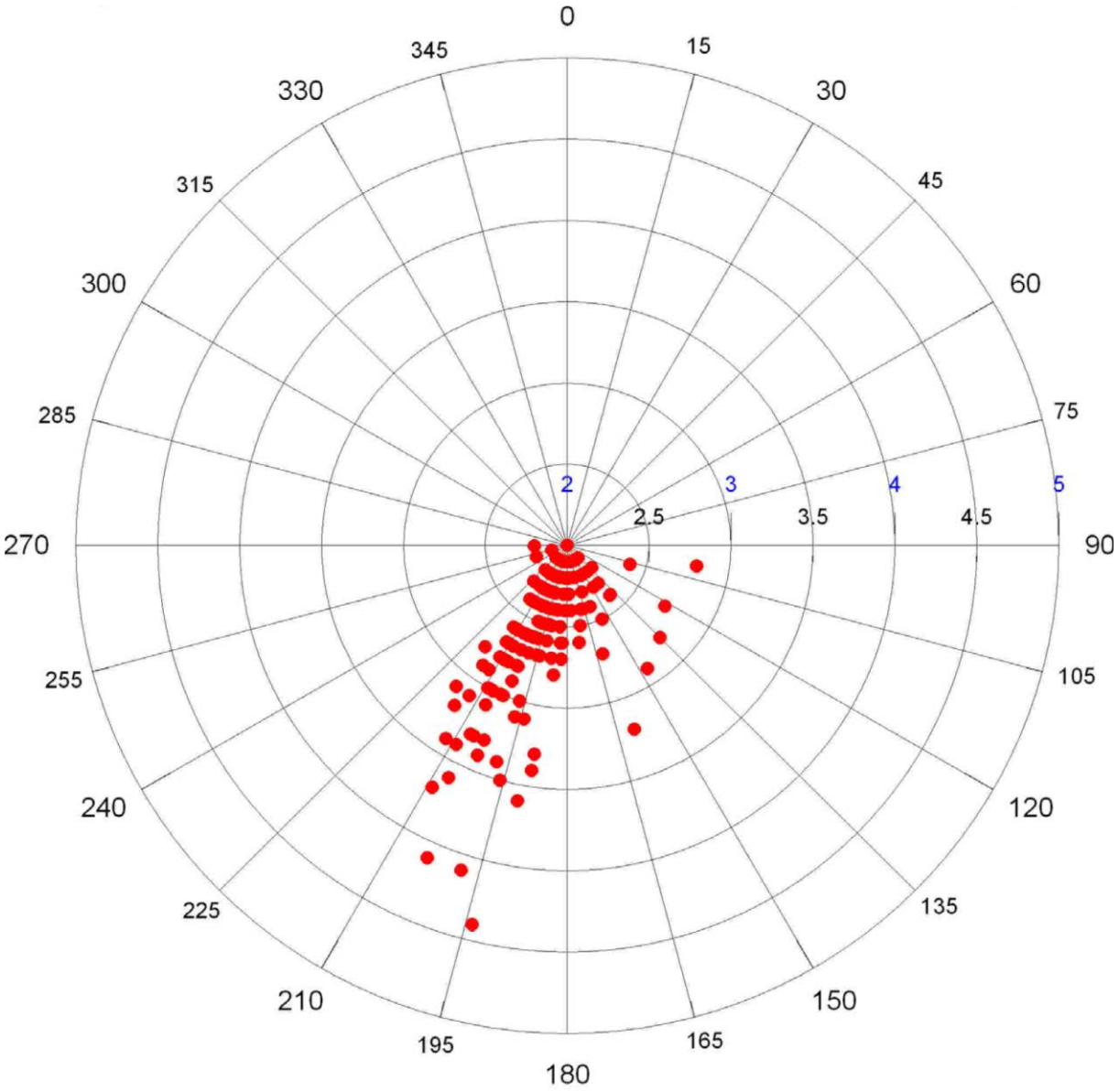


FIG. 5.7 - DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEGLI EVENTI (TRIORARI) DI MOTO ONDOSO (SWELL) CON H_S MAGGIORE DI 2 M - DATI UKMO 1987-2008

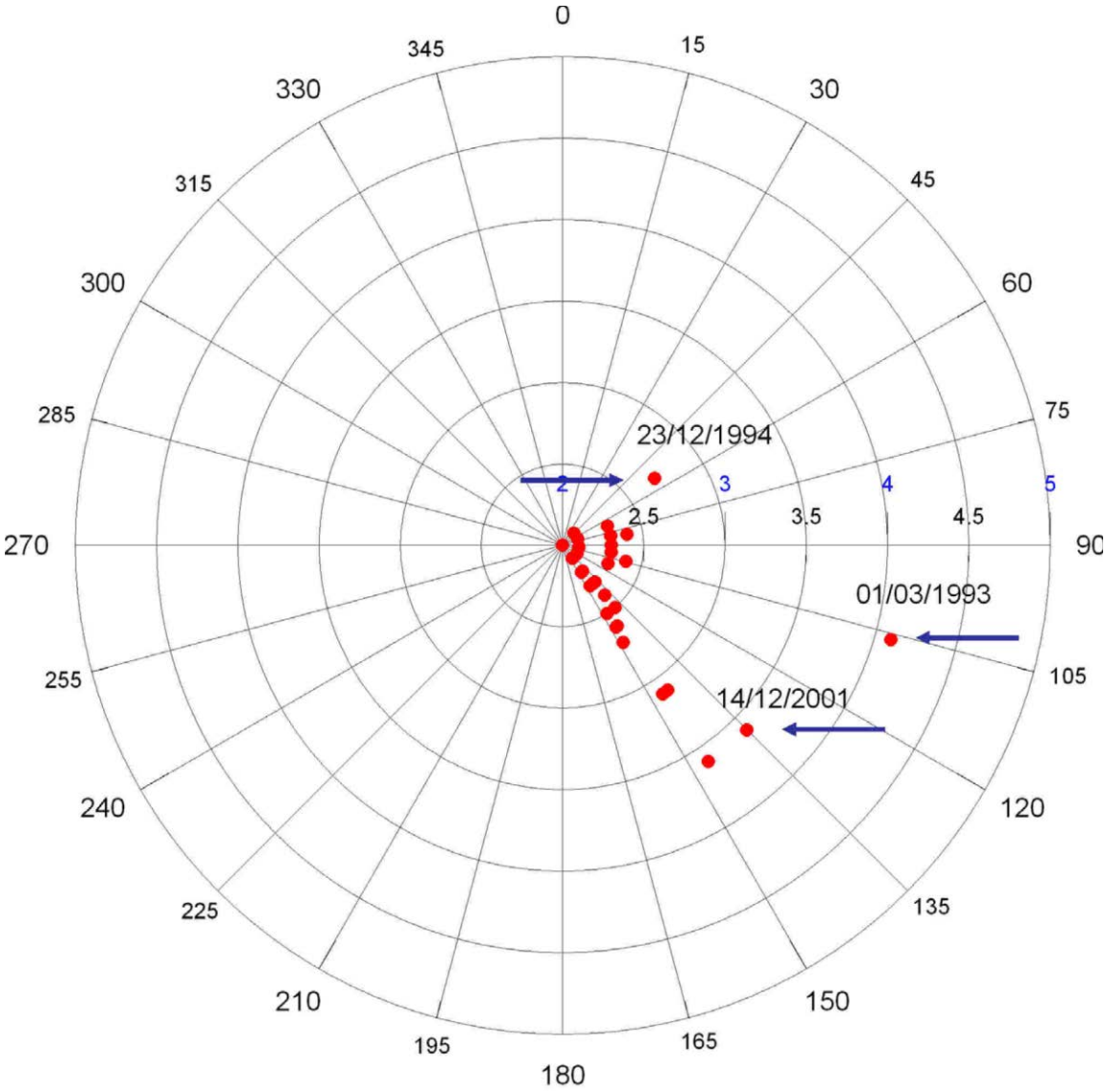
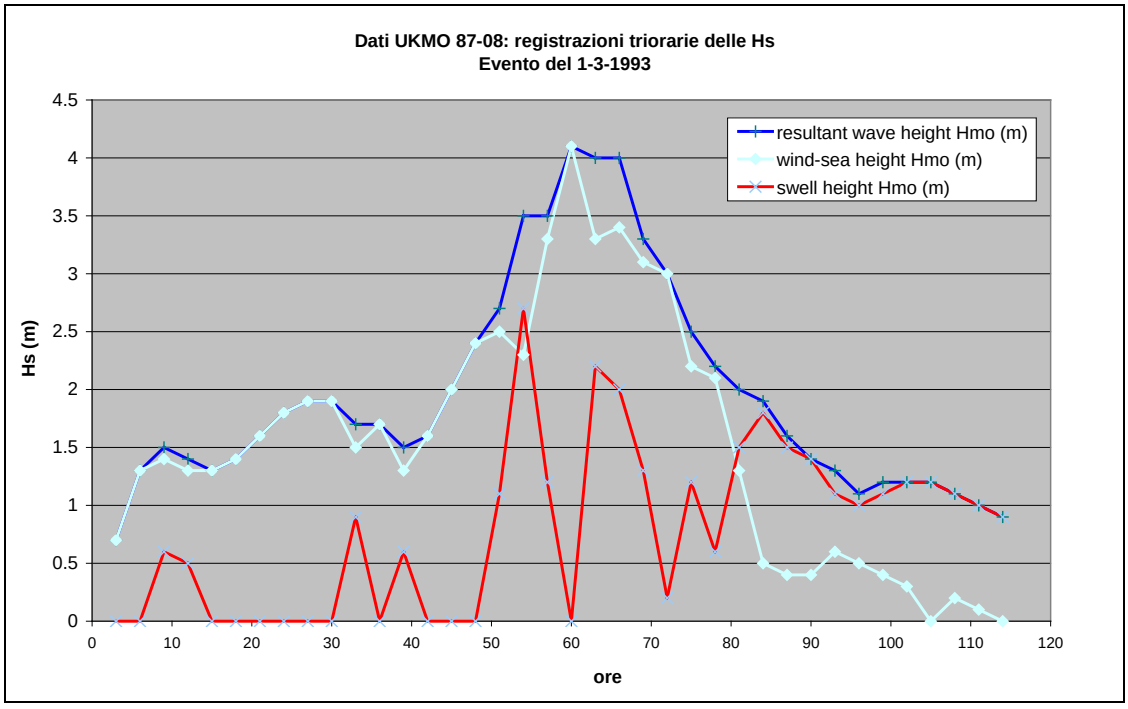


FIG. 5.8 - DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DELLE MAREGGIATE CON $H_{S\ COLMO}$ MAGGIORE DI 2 M RELATIVAMENTE AL SETTORE DI MAGGIORE INTERESSE 45-150°N - DATI UKMO 1987-2008



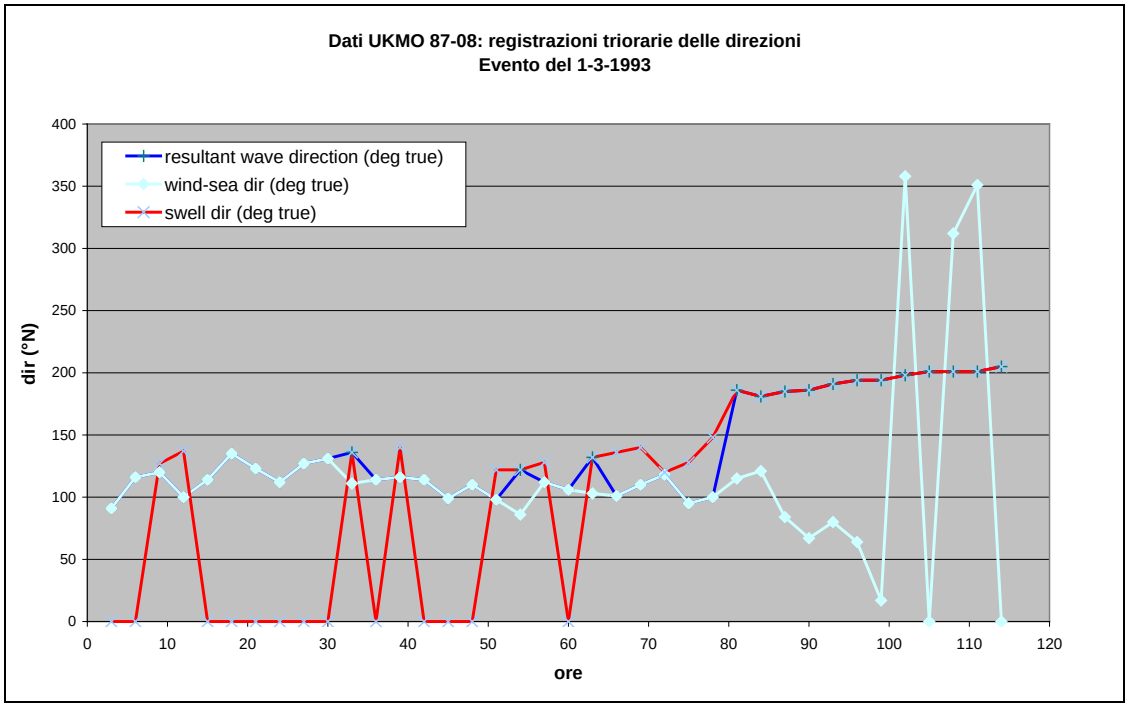
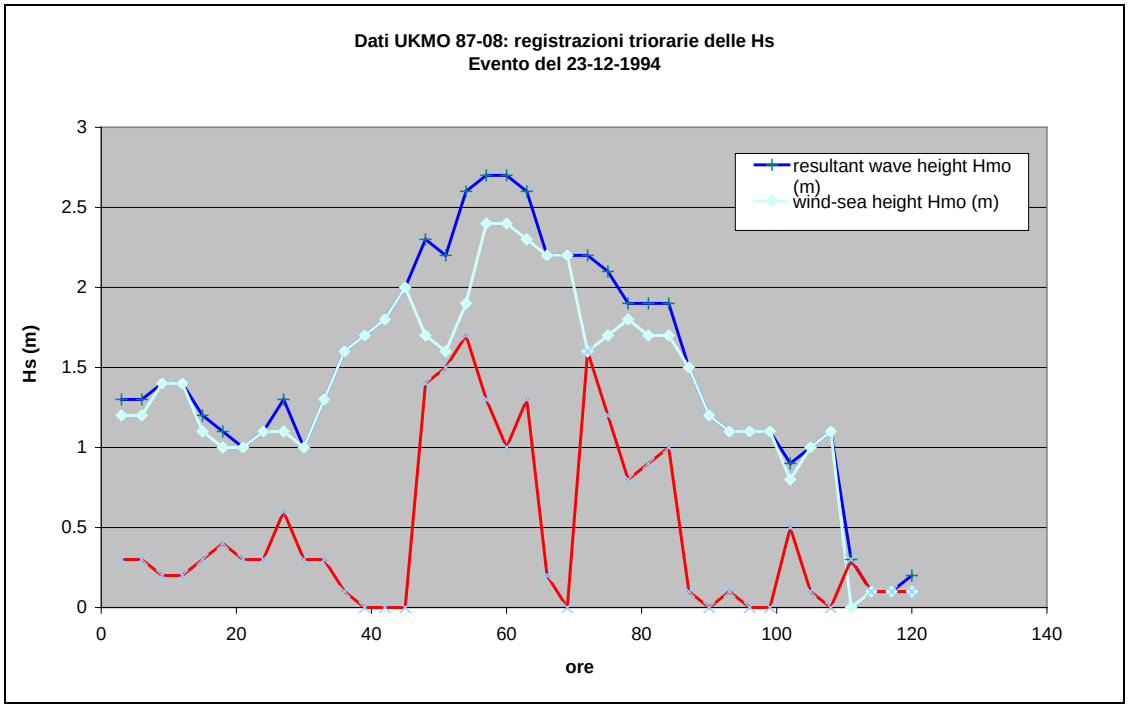


FIG. 5.9 - MAREGGIATA DELL'1 MARZO 1993 - $H_{S\ COLMO}$= 4,1 M E DIR.=105°N



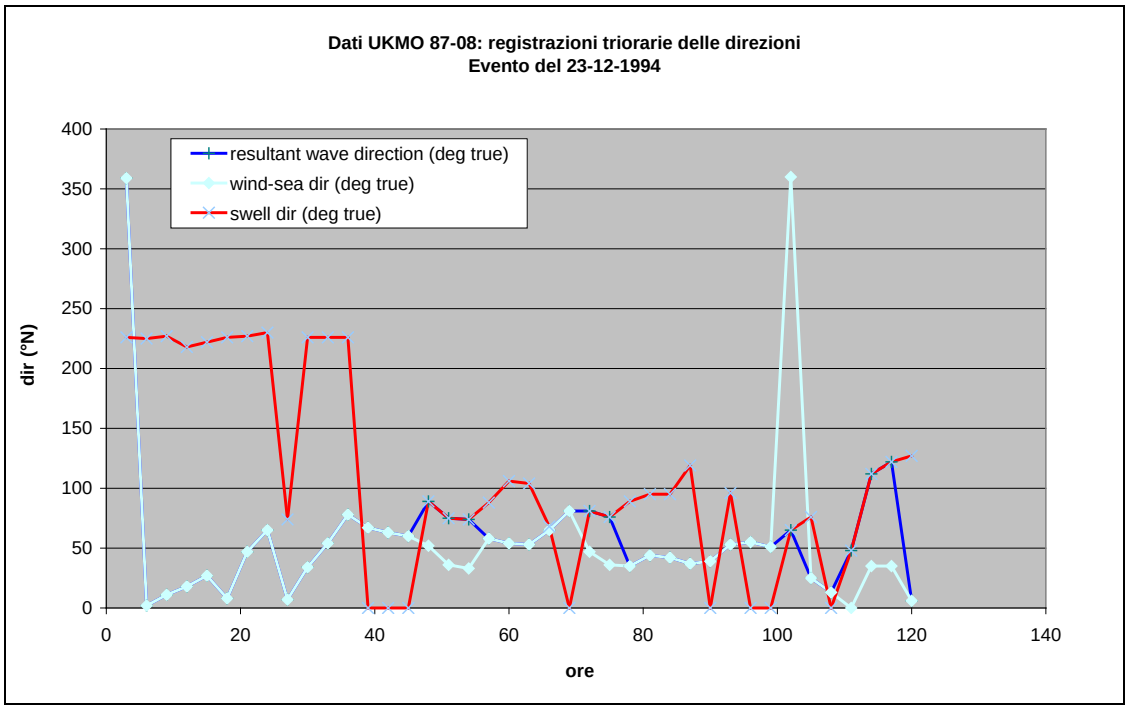
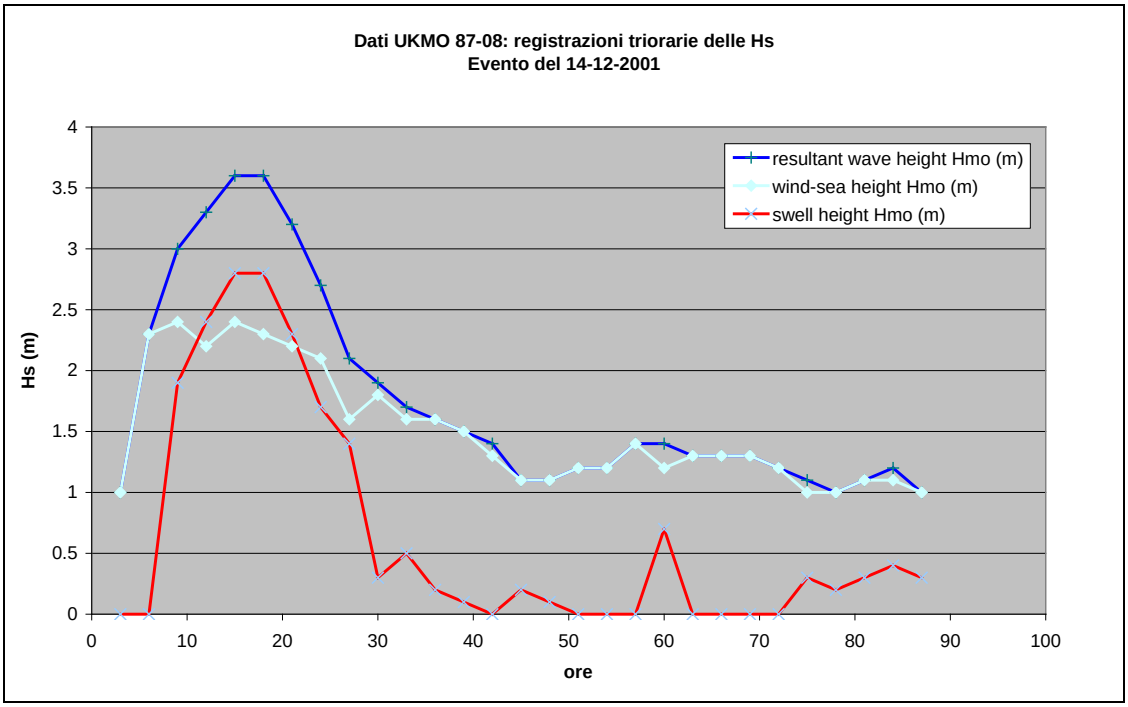


FIG. 5.10 - MAREGGIATA DEL 23 DICEMBRE 1994 - $H_{S\ COLMO}$= 2,7 M E DIR.=54°N



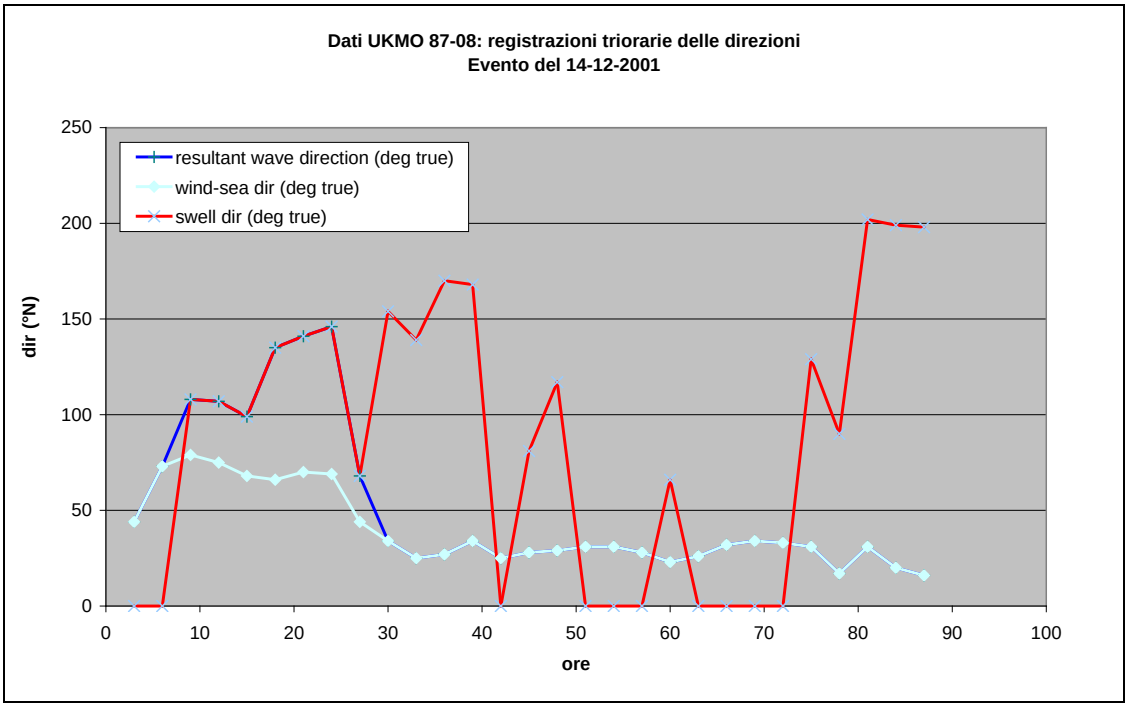


FIG. 5.11 - MAREGGIATA DEL 14 DICEMBRE 2001 - $H_{S\ COLMO}$= 3,6 M E DIR.=99-135°N

5.3. Gli eventi estremi di moto ondoso al largo - Settore di traversia 50°N-190°N

5.3.1. Metodologia utilizzata

La statistica degli eventi estremi è stata effettuata utilizzando un codice di calcolo che permette di elaborare la serie dei dati di moto ondoso al largo e di analizzare opportunamente gli eventi statisticamente più significativi, al fine di individuare le caratteristiche progettuali di maggiore importanza per il dimensionamento e la verifica delle strutture portuali.

La metodologia in uso, attualmente ritenuta lo schema di analisi più efficiente ed accurato a disposizione (proposta da Goda nel 1988), è quella detta della **serie di durata parziale sopra soglia** o, seguendo la terminologia anglosassone, del metodo **P.O.T.** (**P**eaks **O**ver **T**reshold).

Questo metodo consente di estrarre dalla serie temporale dei dati di moto ondoso quei valori che siano, contemporaneamente, descrittivi del fenomeno fisico e mutuamente indipendenti. L'individuazione di questi eventi indipendenti, definiti "mareggiate", eseguita in base a opportuni criteri di scelta, consente di poterli analizzare dal punto di vista statistico come un processo di variabili aleatorie equidistribuite ed indipendenti, la realizzazione delle quali è governata da un contatore casuale. Si può così ipotizzare che il numero atteso di eventi che rispondono ai criteri fissati sia rappresentabile statisticamente mediante una distribuzione di Poisson - esponenziale. Se risulta applicabile questo schema, si può dimostrare che la valutazione delle condizioni estreme equivale ad ipotizzare una distribuzione del primo tipo, più nota come distribuzione di Gumbel, o una distribuzione di Weibull a 3 parametri, cioè in altri termini è possibile per via analitica individuare la legge statistica che descrive la distribuzione degli estremi d'onda.

Il primo passo nella **P.O.T analysis** è dunque l'individuazione dell'evento indipendente "mareggiata", cioè di una successione temporale di stati di mare che:

– hanno altezza d'onda superiore ad un prefissato valore di soglia H0, che persiste al di sopra di tale valore per una durata prestabilita;

– hanno direzione contenuta all'interno di un determinato intervallo (di solito +/- 30° rispetto alla direzione media di provenienza).

Ognuno di questi eventi viene rappresentato dal suo valore al colmo, definito "picco di mareggiata".

Successivamente vengono individuati i parametri incogniti che permettono di adattare le distribuzioni teoriche prescelte ai dati sperimentali.

Sia Goda (1988) che Mathiesen (1994) consigliano di utilizzare come funzioni di distribuzione la funzione di Gumbel

$$F(x)= \exp\{-\exp[-(x-B)/A]\} \qquad (1)$$

o la distribuzione Weibull a tre parametri:

$$F(x)=1-\exp\{ -[(x-B)/A]^{k}\} \qquad (2)$$

con k = 0,75; 1.0; 1,4; e 2.0

e in cui A è il parametro di locazione, B il parametro di scala e k il parametro di forma.

Questi parametri vengono calcolati per mezzo di una parameter analysis, che viene condotta introducendo le seguenti variabili ridotte:

Gumbel:

$$y\,(m) = -\ln[-\ln F(x)] \qquad (3)$$

Weibull

$$y\,(m) = \{-\ln [1-F(x)] \}^{1/k} \qquad (4)$$

in modo che tra il valore della variabile x e quello della variabile ridotta y sussista una relazione lineare del tipo:

$$x = A\,y + B \qquad (5)$$

Risolvendo quest'ultima equazione con il metodo dei minimi quadrati si ottiene il valore dei parametri A e B, quindi si identifica la legge di distribuzione.

Il valore dell'altezza d'onda corrispondente ad un assegnato periodo di ritorno si ottiene dall'equazione (5), nella quale la variabile ridotta y viene calcolata a partire dalle equazioni (3) e (4), nelle quali la probabilità di non superamento F(x) viene riscritta in termini di tempo di ritorno Tr, secondo la relazione:

$$F(x)=1-[1/(\lambda Tr)] \qquad (6)$$

In cui λ è il numero medio di mareggiate sopra soglia osservate in 1 anno.

I valori delle altezze d'onda estreme corrispondenti ad assegnati periodi di ritorno secondo una delle 5 equazioni (Gumbel, Weibull (0,75), Weibull (1,0), Weibull (1,4) e Weibull (2,0)) soffrono ancora di incertezze legate alla scelta della distribuzione, nel senso che la scelta di una distribuzione piuttosto che un'altra, che è a discrezione del progettista, può introdurre un errore.

Il programma utilizzato per l'analisi degli estremi fornisce i valori dell'altezza d'onda corrispondente ad un assegnato periodo di ritorno, per ciascuna delle 5 distribuzioni, già depurati da questo errore. Il metodo seguito per effettuare questa correzione è quello proposto da Goda (2000), che fornisce una formulazione empirica per calcolare l'errore sulla stima della variabile x, dovuto al fatto che non se ne conosce la vera distribuzione:

$$x_{corr} = x - Zn\,\sigma_x \qquad (7)$$

in cui:

x_{corr} è il valore della variabile corretto;

x è il valore della variabile calcolato secondo la metodologia sinora illustrata;

σ_x è la deviazione standard del campione

Zn rappresenta l'errore tra il valore vero e quello calcolato, normalizzato rispetto alla deviazione standard

Le formule empiriche per il calcolo di Zn variano da distribuzione a distribuzione e sono piuttosto complesse, quindi per brevità si rimanda al testo originale per ulteriori approfondimenti (Goda Y., "On the methodology of selecting design wave height", Proc. 21st Coastal Engineering Conference, Malaga 1988).

Dopo aver calcolato il valore di H_s corrispondente ad un assegnato tempo di ritorno, occorre associare a tale onda un valore del periodo, espresso dal periodo di zero crossing T_z. In generale è consigliabile non effettuare un'analisi diretta sui periodi e quindi associare i valori H_s-T_z corrispondenti allo stesso T ma ricavare tramite i dati sperimentali il valore ottimale dei parametri a e b da inserire in una formula del tipo (Mathiesen et al., 1994):

$$Tz = a\, H_s^{\,b} \qquad (8)$$

5.3.2. Definizione degli eventi estremi al largo

Per estrapolare gli eventi estremi con periodi di ritorno elevati (50, 100 fino a 1000 anni) è stata presa in considerazione la serie storica dei dati dell'UKMO, costituita da una sequenza di registrazioni triorarie, riferite al punto di coordinate 44°N; 8,73°E e relative al periodo 1989 - 2008. I primi 2 anni del campione (1987 e 1988 con cadenza diversa esaoraria) presentano ampi periodi di dati mancanti e pertanto non sono stati considerati per l'analisi degli estremi.

Il settore di traversia di interesse è individuato dalle direzioni 50 °N- 190°N. Esso è stato suddiviso in 3 sotto-settori, caratterizzati da caratteristiche di esposizione, quindi da caratteristiche ondametriche simili:

– settore 50°N - 100°N

– settore 100°N - 150°N
– settore 150°N - 190°N

Per tutti i settori l'analisi statistica degli estremi è stata svolta assumendo, con la metodologia operativa precedentemente descritta, varie soglie : H_0 pari a: 1 , 1,5 e 1,75 m.

A riguardo si fa notare che la soglia di 1 m scelta per filtrare le altezze d'onda da inserire nell'analisi è suggerita da diversi autori per definire l'evento "mareggiata", quindi per creare un campione di dati che siano descrittivi del fenomeno e al tempo stesso indipendenti (V. "Atlante delle onde nei mari Italiani", APAT- Università degli Studi di Roma Tre). L'uso di una soglia più alta determina normalmente una sottostima dei valori estremi di altezza d'onda. Anche nel nostro caso la soglia di 1 m è risultata più cautelativa.

Una volta elaborate le serie parziali, elaborate secondo il metodo P.O.T. e con riferimento alla soglia individuata, sono stati calcolati per ogni settore i valori delle altezze d'onda associati a diversi periodi di ritorno, utilizzando le seguenti distribuzioni statistiche:
– Gumbell
– Weibull (k=0,75)
– Weibull (k=1,0)
– Weibull (k=1,4)
– Weibull (k=2,0)

I risultati ottenuti per i 3 settori sono illustrati nei paragrafi che seguono.

Si precisa che i valori estremi ottenuti si riferiscono ad uno stato di mare triorario.

<u>Settore 50°N-100°N</u>

La statistica degli eventi estremi è stata svolta con riferimento alla serie parziale elaborata secondo il metodo P.O.T. e assumendo una soglia H_0 pari a 1, 1,5 e 1,75. Per il det-

taglio di tutte le elaborazioni si rimanda alla relazione meteomarina del progetto definitivo. Nel presente rapporto vengono riportati in Fig. 5.12 i risultati dell'analisi per la soglia H_0 pari ad 1 m che ha fornito i valori più alti di altezza d'onda.

Nella tabella di Fig. 5.12 sono riportati Hs e Ic che rappresentano, rispettivamente, l'altezza d'onda significativa, in m, corrispondente al tempo di ritorno assegnato, e l'intervallo di confidenza della distribuzione.

Nella tabella in Fig. 5.12 sono riportati inoltre i parametri r, A e B. Il parametro r è il coefficiente di correlazione, che è un indicatore della bontà del fit dei dati alla distribuzione statistica; i parametri A e B invece sono rispettivamente il parametro di locazione e il parametro di scala, che identificano la legge di distribuzioni statistica degli estremi della variabile Hs secondo le equazioni (1) e (2).

La distribuzione statistica prescelta per rappresentare le onde estreme del settore in questione è quella di Weibull con parametro k = 1,0.

Sempre in Fig. 5.12 sono illustrate le curve di distribuzione dei valori estremi di Gumbel e di Weibull con riferimento alla soglia H_0 di 1 m..

T (anni)	Gumbel		Weibull k = 0,75		k = 1,00		k = 1,40		k = 2,00	
	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)
1	1.7	0.1	1.6	0.2	1.6	0.2	1.7	0.2	1.8	0.1
2	1.9	0.2	1.8	0.3	1.9	0.3	2.0	0.2	2.0	0.2
5	2.2	0.2	2.2	0.4	2.3	0.5	2.4	0.4	2.3	0.3
10	2.4	0.3	2.5	0.6	2.6	0.6	2.6	0.5	2.5	0.3
15	2.6	0.3	2.7	0.7	2.8	0.7	2.7	0.6	2.7	0.4
20	2.7	0.3	2.8	0.7	2.9	0.8	2.8	0.6	2.7	0.4
25	2.7	0.4	2.9	0.8	3.0	0.9	2.9	0.7	2.8	0.4
50	2.9	0.4	3.2	1.0	3.3	1.1	3.1	0.8	3.0	0.5
100	3.1	0.5	3.6	1.1	3.6	1.3	3.4	1.0	3.1	0.6
150	3.3	0.6	3.8	1.3	3.8	1.5	3.5	1.1	3.2	0.7
250	3.4	0.6	4.0	1.4	4.1	1.7	3.7	1.2	3.4	0.8
500	3.6	0.7	4.4	1.6	4.4	2.0	3.9	1.4	3.5	0.9
1000	3.8	0.8	4.8	1.9	4.7	2.3	4.1	1.6	3.7	1.0

coeff.corr.	0.98	0.91	0.96	0.98	0.99

A:	0.32	0.24	0.40	0.62	0.88
B:	1.39	1.29	1.17	1.01	0.79

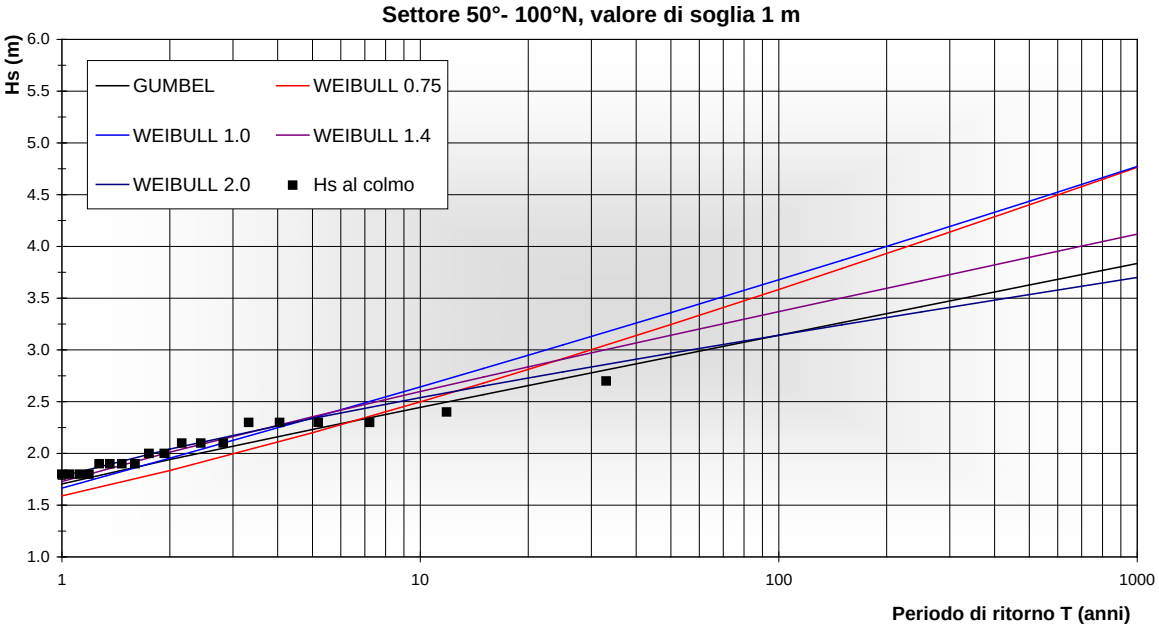


FIG. 5.12 - STATISTICA DELLE ONDE ESTREME AL LARGO DEL PARAGGIO DI VADO LIGURE, RIFERITA AL SETTORE DI TRAVERSIA 50 - 100 °N - SOGLIA H_S=1 M

Settore 100°N-150°N

La statistica degli eventi estremi è stata svolta con riferimento alla serie parziale elaborata secondo il metodo P.O.T. e assumendo una soglia H_0 pari a 1, 1,5 e 1,75. Per il dettaglio di tutte le elaborazioni si rimanda alla relazione meteomarina del progetto definitivo. Nel presente rapporto vengono riportati in Fig. 5.13 i risultati dell'analisi per la soglia H_0 pari ad 1 m che ha fornito i valori più alti di altezza d'onda.

Nella tabella in Fig. 5.13 sono riportati inoltre i parametri r, A e B. Il parametro r è il coefficiente di correlazione, che è un indicatore della bontà del fit dei dati alla distribuzione statistica; i parametri A e B invece sono rispettivamente il parametro di locazione e il parametro di scala, che identificano la legge di distribuzioni statistica degli estremi della variabile Hs secondo le equazioni (1) e (2).

La distribuzione statistica prescelta per rappresentare le onde estreme del settore in questione è quella di Weibull con parametro k = 1,0.

Sempre in Fig. 5.13 sono illustrate le curve di distribuzione dei valori estremi di Gumbel e di Weibull con riferimento alla soglia H_0 di 1 m..

T (anni)	Gumbel		Weibull k = 0,75		k = 1,00		k = 1,40		k = 2,00	
	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)
1	2.2	0.2	2.0	0.3	2.1	0.3	2.2	0.2	2.2	0.2
2	2.5	0.2	2.4	0.4	2.5	0.4	2.6	0.3	2.5	0.3
5	2.9	0.3	3.0	0.6	3.1	0.7	3.0	0.5	2.9	0.3
10	3.2	0.4	3.5	0.8	3.5	0.9	3.3	0.6	3.2	0.4
15	3.4	0.4	3.8	0.9	3.8	1.0	3.5	0.7	3.3	0.5
20	3.5	0.4	4.0	1.0	4.0	1.1	3.7	0.7	3.4	0.5
25	3.6	0.5	4.2	1.1	4.1	1.2	3.8	0.8	3.5	0.5
50	3.9	0.5	4.7	1.3	4.6	1.5	4.1	0.9	3.7	0.6
100	4.2	0.6	5.3	1.5	5.0	1.8	4.4	1.1	3.9	0.8
150	4.4	0.7	5.6	1.7	5.3	2.0	4.5	1.2	4.0	0.8
250	4.7	0.8	6.1	1.9	5.7	2.2	4.8	1.4	4.2	0.9
500	5.0	0.9	6.6	2.1	6.1	2.6	5.0	1.6	4.4	1.0
1000	5.3	1.0	7.2	2.4	6.6	2.9	5.3	1.8	4.6	1.2

coeff.corr.	0.98	0.98	1.00	0.99	0.96

A:	0.45	0.36	0.59	0.88	1.22
B:	1.39	1.21	1.06	0.84	0.56

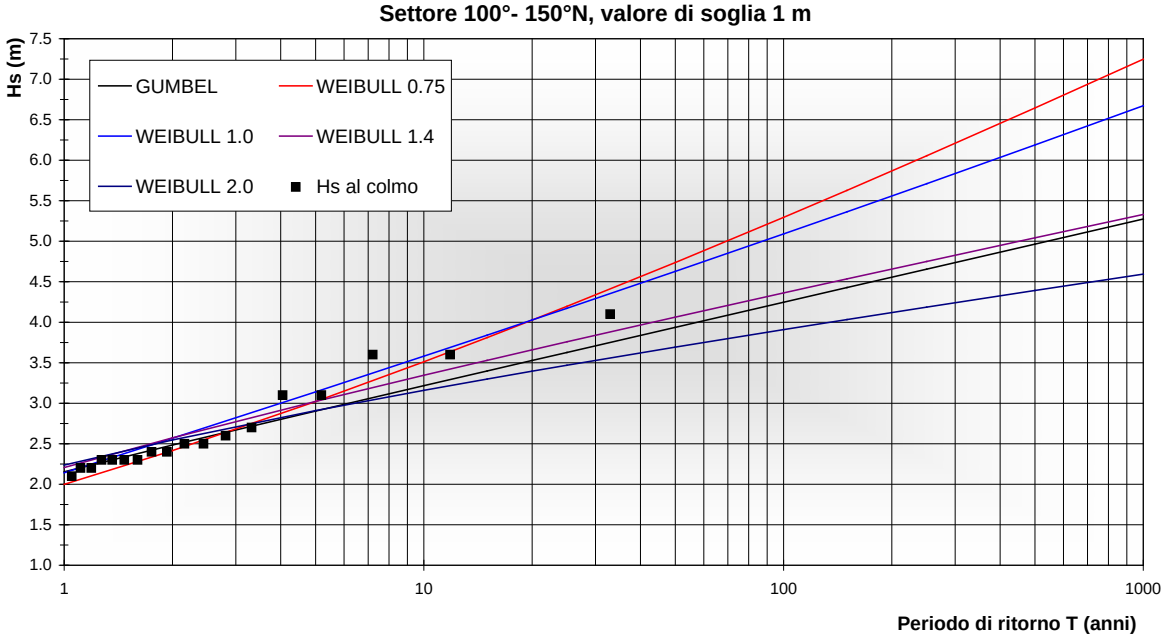


FIG. 5.13 - STATISTICA DELLE ONDE ESTREME AL LARGO DEL PARAGGIO DI VADO LIGURE, RIFERITA AL SETTORE DI TRAVERSIA 100-150 °N - SOGLIA H_S=1 M

Settore 150°N-190°N

La statistica degli eventi estremi è stata svolta con riferimento alla serie parziale elaborata secondo il metodo P.O.T. e assumendo una soglia H_0 pari a 1, 1,5 e 1,75. Per il dettaglio di tutte le elaborazioni si rimanda alla relazione meteomarina del progetto definitivo. Nel presente rapporto vengono riportati in Fig. 5.14 i risultati dell'analisi per la soglia H_0 pari ad 1 m che ha fornito i valori più alti di altezza d'onda.

Nella tabella di Fig. 5.14 sono riportati Hs e Ic che rappresentano, rispettivamente, l'altezza d'onda significativa, in m, corrispondente al tempo di ritorno assegnato, e l'intervallo di confidenza della distribuzione.

Nella tabella in Fig. 5.14 sono riportati inoltre i parametri r, A e B. Il parametro r è il coefficiente di correlazione, che è un indicatore della bontà del fit dei dati alla distribuzione statistica; i parametri A e B invece sono rispettivamente il parametro di locazione e il parametro di scala, che identificano la legge di distribuzioni statistica degli estremi della variabile Hs secondo le equazioni (1) e (2).

La distribuzione statistica prescelta per rappresentare le onde estreme del settore in questione è quella di Weibull con parametro k = 1,0.

Sempre in Fig. 5.14 sono illustrate le curve di distribuzione dei valori estremi di Gumbel e di Weibull con riferimento alla soglia H_0 di 1 m..

T (anni)	Gumbel		Weibull							
			k =	0.75	k =	1.00	k =	1.40	k =	2.00
	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)
1	2.2	0.2	2.0	0.3	2.2	0.3	2.2	0.2	2.3	0.2
2	2.5	0.2	2.4	0.4	2.6	0.5	2.6	0.3	2.6	0.3
5	3.0	0.3	3.0	0.6	3.2	0.7	3.1	0.5	3.0	0.4
10	3.3	0.4	3.5	0.8	3.7	0.9	3.5	0.6	3.3	0.4
15	3.5	0.4	3.8	1.0	3.9	1.1	3.6	0.7	3.4	0.5
20	3.6	0.5	4.0	1.0	4.1	1.2	3.8	0.8	3.5	0.5
25	3.7	0.5	4.2	1.1	4.3	1.3	3.9	0.8	3.6	0.6
50	4.1	0.6	4.8	1.3	4.7	1.6	4.2	1.0	3.9	0.7
100	4.4	0.7	5.3	1.6	5.2	1.9	4.5	1.2	4.1	0.8
150	4.6	0.7	5.6	1.8	5.5	2.1	4.7	1.3	4.2	0.9
250	4.8	0.8	6.1	2.0	5.9	2.3	4.9	1.5	4.4	1.0
500	5.1	0.9	6.7	2.2	6.4	2.7	5.2	1.7	4.6	1.1
1000	5.5	1.0	7.3	2.5	6.9	3.1	5.6	1.9	4.8	1.2

coeff.corr.	0.99	0.95	0.99	0.99	0.98

A:	0.47	0.37	0.61	0.93	1.30
B:	1.43	1.26	1.09	0.86	0.55

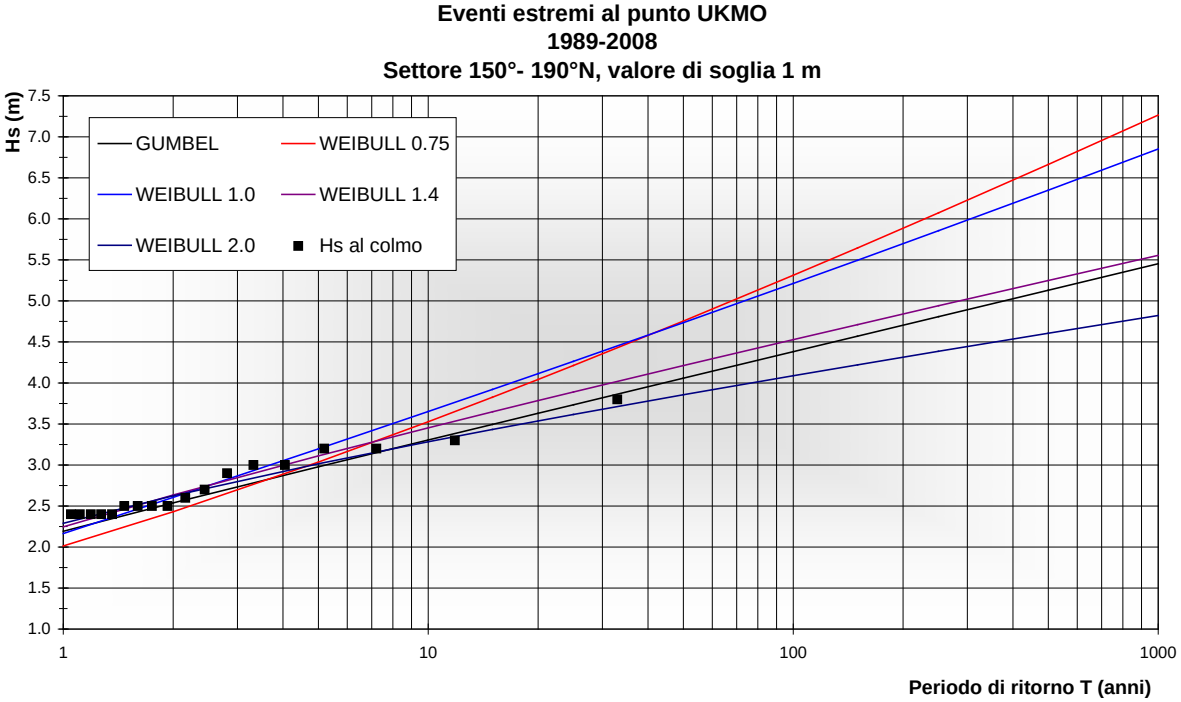


FIG. 5.14 - STATISTICA DELLE ONDE ESTREME AL LARGO DEL PARAGGIO DI VADO LIGURE, RIFERITA AL SETTORE DI TRAVERSIA 150-190 °N - SOGLIA H_S=1 M

5.3.3. Correlazione altezza d'onda-periodo

La correlazione tra altezza d'onda significativa e periodo è stata determinata utilizzando la nota relazione:
$Tz = a\ H_s^b$

I coefficienti a e b sono stati determinati attraverso il metodo dei minimi quadrati, utilizzando le coppie di valori di Tz ed Hs acquisiti dall'UKMO.

Sono così stati individuati i seguenti valori dei suddetti coefficienti:

- a=3,8
- b=0,5

Questi valori sono in linea con i valori normalmente validi per il Mediterraneo e con quelli ottenuti nell'ambito di studi precedenti.

Se si applicano poi le note relazioni tra Tz, Ts e Tp: Tz=0,78*Tp (Carter et al.),Tz=0,83*Ts (Sapkaya), e quindi Tp= 1,28*Tz
si ottiene Tp=4,8*Hs ^0,5.

Nelle figure seguenti sono presentate le correlazioni altezza d'onda (Hs) periodo (Tz) relativamente a tutte le direzioni ed a ai 3 settori d'interesse. Nei grafici sono anche distinti i valori d'altezza d'onda di mare vivo, da swell ed i valori risultanti. Le relazioni ottenute fanno riferimento ai valori di altezza d'onda-periodo risultanti.

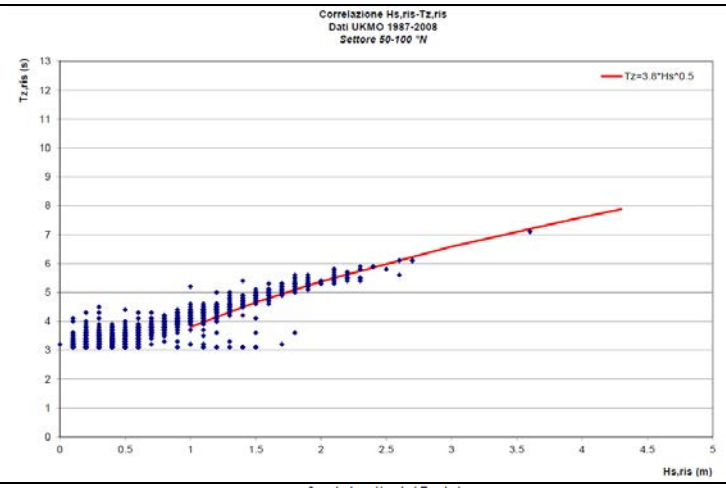
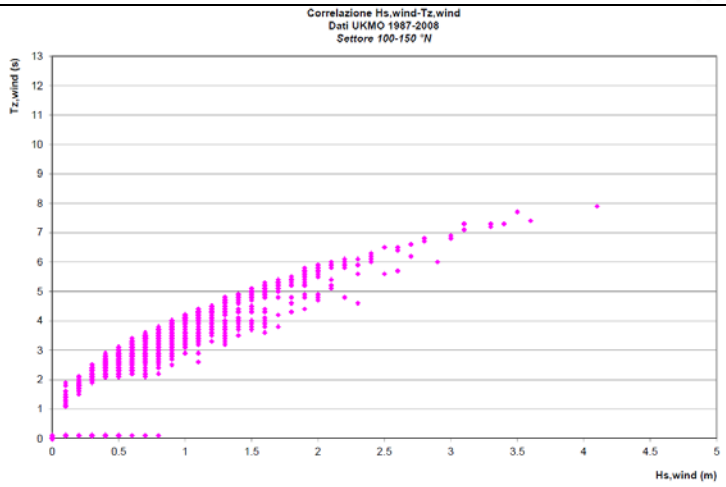
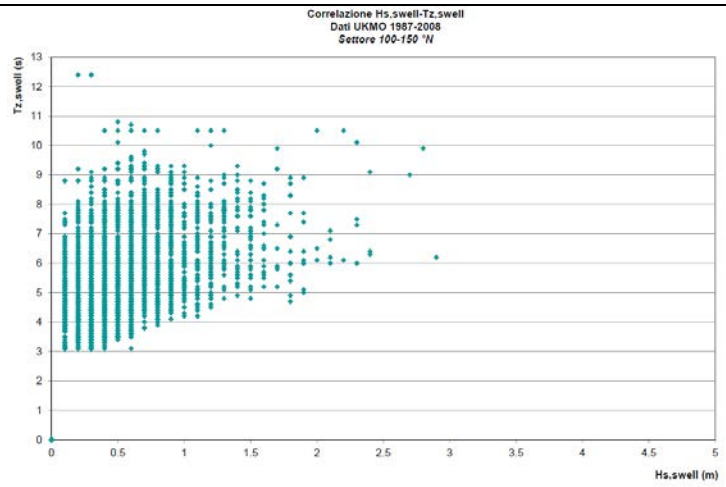
	Onda risultante
	Componente di mare vivo dell'onda risultante
	Componente di swell dell'onda risultante

FIG. 5.15 - RELAZIONE H_S-T_Z , DATI UKMO 87-08 - SETTORE 50-100°N

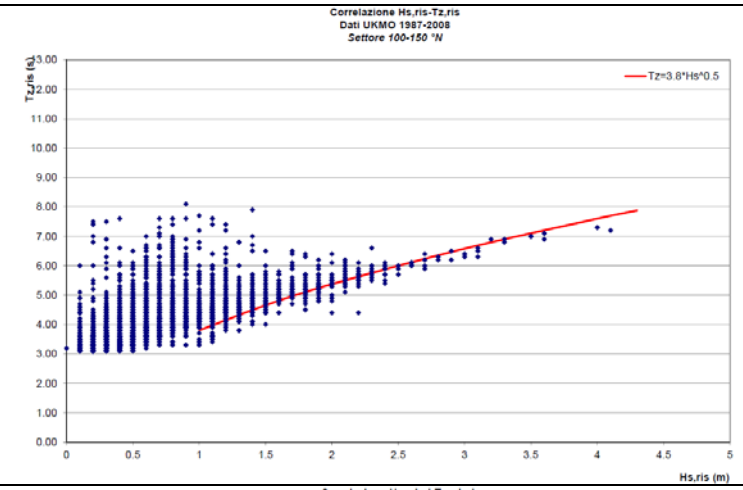
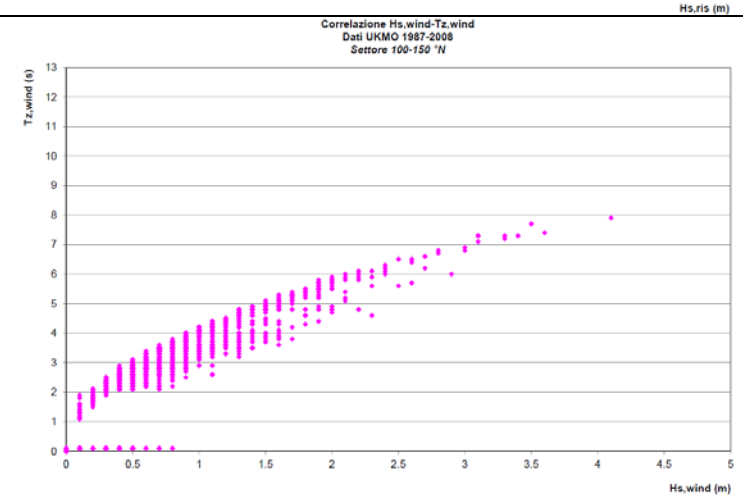
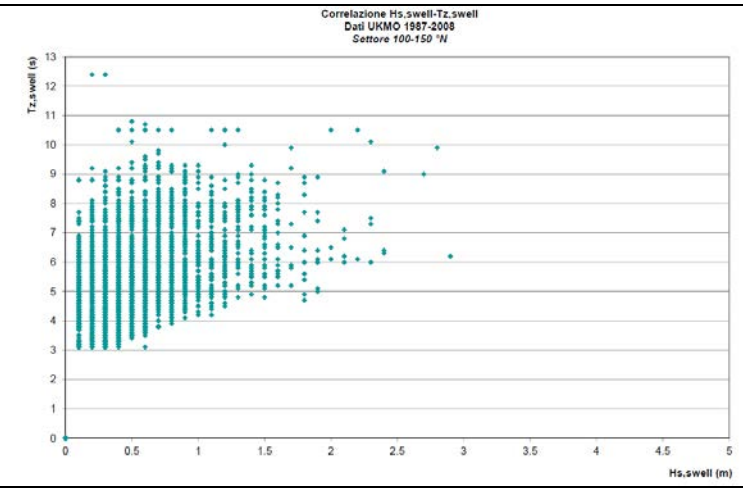
	Onda risultante
	Componente di mare vivo dell'onda risultante
	Componente di swell dell'onda risultante

FIG. 5.16 - CORRELAZIONE H_S-T_Z , DATI UKMO 87-08 - IL SETTORE 100-150°N

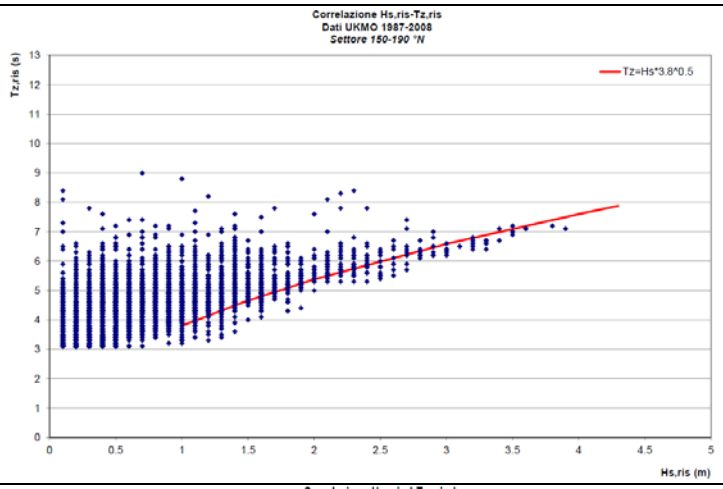
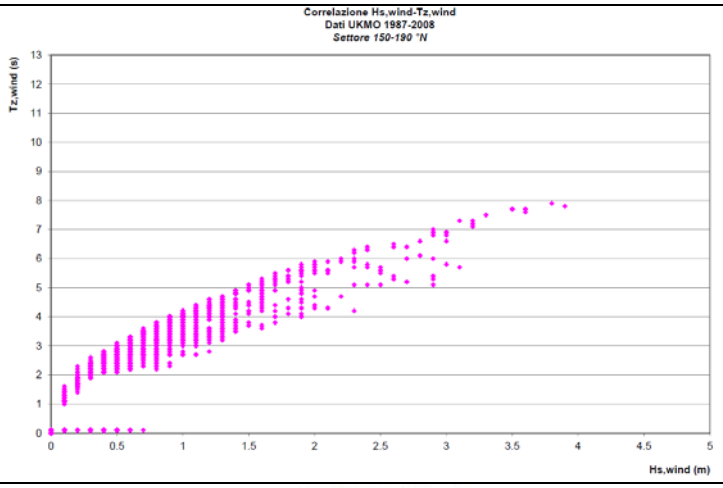
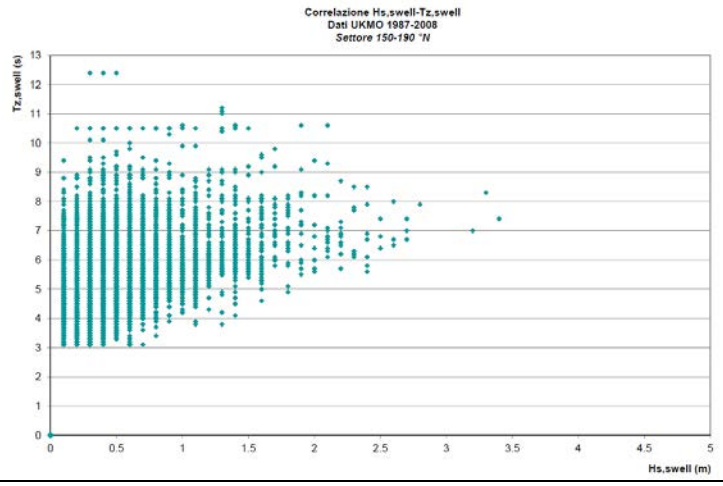
	Onda risultante
	Componente di mare vivo dell'onda risultante
	Componente di swell dell'onda risultante

FIG. 5.17 - CORRELAZIONE H_S-T_Z , DATI UKMO 87-08 - SETTORE 150-190°N

5.3.4. Analisi degli eventi estremi - conclusioni

Lo studio condotto ha permesso di definire le caratteristiche del moto ondoso al largo del sito in esame per i 3 settori di provenienza in cui esso è stato suddiviso. Sulla base della serie di dati dell'UKMO relativi al periodo 1989-2008, sono stati calcolati gli eventi estremi, per tempi di ritorno compresi tra 1 e 1000 anni, e per i settori 50°N - 100°N, e 100°N -150°N e 150°N -190°N.

La scelta tra le cinque curve probabilistiche adottate per interpolare le serie parziali degli eventi estremi è stata effettuata assumendo di volta in volta quella caratterizzata dal coefficiente di correlazione più elevato, e, a parità di coefficiente di correlazione, scegliendo i valori considerati maggiormente cautelativi. I risultati, settore per settore, sono descritti nel seguito.

Le mareggiate più gravose sono quelle provenienti dai settori da 100-150°N e da 150-190°N . Queste mareggiate, tuttavia, data la loro inclinazione rispetto al molo foraneo previsto nel Piano Regolatore, riescono a penetrare all'interno dello specchio acqueo portuale per effetto dei fenomeni di diffrazione intorno al molo e risultano di entità più bassa in corrispondenza delle nuove opere (vedi a riguardo i capitoli seguenti).

Le onde dal settore 50-100°N, sebbene di entità più modesta, interessano le nuove opere direttamente con pochi effetti di schermatura della diga foranea.

<u>Settore 50°N-100°N</u>

Gli eventi estremi, calcolati per i vari tempi di ritorno, sono riassunti nella Tab. 5.2, nella quale è riportato, per completezza, oltre al valore del periodo Tz associato al moto ondoso, anche il valore del periodo di picco T_p calcolato per mezzo della relazione Tp=1,28 Tz, comunemente utilizzata in letteratura.

Il periodo zero crossing è espresso dalla relazione $T_z = 3{,}8*(H_s)^{0.5}$ che, si è visto, bene interpreta la serie ondametrica ricostruita.

L'altezza dell'onda estrema, per i diversi periodi di ritorno, è stata valutata assumendo, tra le diverse curve probabilistiche, quella di Weibull a parametro 1,0.

TAB. 5.2 - STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI, SETTORE 50°-100°N

Tr (anni)	Hs (m)	Tz (s)	Tp (s)
1	1,6	4,8	6,2
2	1,9	5,2	6,7
5	2,3	5,8	7,3
10	2,6	6,1	7,8
15	2,8	6,4	8,1
20	2,9	6,5	8,3
25	3,0	6,6	8,4
50	3,3	6,9	8,8
100	3,6	7,2	9,2
150	3,8	7,4	9,5
250	4,1	7,7	9,8
500	4,4	8,0	10,2
1000	4,7	8,2	10,5

Settore 100°N-150°N

I risultati dell'indagine statistica svolta per gli eventi estremi con riferimento al settore 100°N - 150°N sono riportati nella seguente Tab. 5.3.

Anche in questo caso la relazione H_s-T_z è espressa da $T_z = 3{,}8*(H_s)^{0.5}$.
La curva che rappresenta la distribuzione probabilistica degli eventi estremi del settore prescelta è quella di Weibull con k=1,0, che, a parità di coefficiente di correlazione r, fornisce i valori più cautelativi.

TAB. 5.3 - STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI, SETTORE 100°-150°N

Tr (anni)	Hs (m)	Tz (s)	Tp (s)
1	2,1	5,5	7,0
2	2,5	6,0	7,7
5	3,1	6,7	8,6
10	3,5	7,1	9,1
15	3,8	7,4	9,5
20	4,0	7,6	9,7
25	4,1	7,7	9,9
50	4,6	8,2	10,4
100	5,0	8,5	10,9
150	5,3	8,7	11,2
250	5,7	9,1	11,6
500	6,1	9,4	12,0
1000	6,6	9,8	12,5

Settore 150°N-190°N:

Per rappresentare la distribuzione probabilistica delle onde estreme di questo settore è stata scelta la distribuzione di Weibull a parametro 1,0, che presentava i valori più cautelativi.

Le altezza d'onda ottenute con tale curva in corrispondenza dei vari tempi di ritorno sono riportate in Tab. 5.4.

La relazione $T_z = 3,8*(H_s)^{0.5}$ risulta valida anche per tale settore.

TAB. 5.4 - STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI, SETTORE 150°-190°N

Tr (anni)	Hs (m)	Tz (s)	Tp (s)
1	2,2	5,6	7,2
2	2,6	6,1	7,9
5	3,2	6,8	8,7
10	3,7	7,3	9,3
15	3,9	7,5	9,6
20	4,1	7,7	9,9
25	4,3	7,8	10,0
50	4,7	8,3	10,6
100	5,2	8,7	11,1
150	5,5	8,9	11,4
250	5,9	9,2	11,8
500	6,4	9,6	12,3
1000	6,9	9,9	12,7

5.4. Gli eventi estremi di moto ondoso - Settore di traversia secondario 0°N-50°N

Per la definizione del moto ondoso relativo al settore di traversia secondario, si è preferito fare riferimento ad una valutazione basata sulla ricostruzione del moto ondoso a partire dai dati di vento misurati localmente nella stazione anemometrica di vado Ligure. I dati dell'UKMO in effetti sono relativi ad un punto al largo non rappresentativo delle condizioni locali di questo settore secondario.

Per la ricostruzione del moto ondoso per il settore 0°-50°N si è utilizzata la teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso, nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretschneider, 1947), successivamente aggiornate (Saville 1954, Seymour 1977, S.P.M. 1984, Smith 1991).
Le equazioni impiegate, nella forma più generale, sono le seguenti:

$$\frac{gH_{mo}}{u^2{}_A} = 1.6 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{gF}{u^2{}_A} \right)^{1/2}$$

$$\frac{gT_m}{u_A} = 2.857 \cdot 10^{-1} \cdot \left(\frac{gF}{u^2{}_A} \right)^{1/3}$$

$$\frac{gt}{u_A} = 6.88 \cdot 10 \cdot \left(\frac{gF}{u^2{}_A} \right)^{2/3}$$

dove:

- H_{m0} altezza significativa spettrale dell'onda
- T_m periodo di picco spettrale dell'onda
- U_a velocità (m/s) del vento "regolarizzata" con un termine (coefficient drag) dovuto alla non linearità del legame esistente tra la velocità del vento e l'azione tangenziale di questo sulla superficie marina
- F estensione della superficie d'acqua lungo la quale si esplica l'azione del vento (fetch)
- g accelerazione di gravità pari a 9.81 m/s^2
- t durata della perturbazione

Per la definizione del termine U_a si fa riferimento alla relazione (SPM, 1984):

$$u_A = 0.71 \cdot u^{1.23}$$

ove u esprime la velocità del vento in m/s.

I dati di progetto a partire dai quali è stata effettuata una previsione del moto ondoso sono le velocità del vento determinate in precedenza tramite l'analisi statistica dei dati di vento dell'anemometro di Vado Ligure, il fetch relativo al settore analizzato e la durata della perturbazione. I valori di altezza d'onda di interesse per la progettazione sono quelli relativi a Tr = 250 anni.

Il moto ondoso generato dal vento con una direzione media di provenienza 30° N, ovvero quella per la quale si ha il massimo fetch, riesce a svilupparsi completamente per t=1 ora;

la ricostruzione del moto ondoso è stata quindi effettuata considerando una durata della perturbazione pari ad 1 ora.

I risultati ottenuti per il tempo di ritorno 250 anni sono riportati sinteticamente in Tab. 5.5.

TAB. 5.5 - MOTO ONDOSO ESTREMO PER IL SETTORE 0°-50°N- DIREZIONE DI PROVENIENZA DEL VENTO 30°N

Ricorrenza statistica	F (km)	u_A (m/s)	t (ore)	Hs (m)	Tp (s)
Tr = 250 anni	3,0	58,9	1,0	1,65	3,5

6. PERIODO DI RITORNO DELL'ONDA DI PROGETTO

Il periodo di ritorno dell'onda di progetto è stato definito in conformità alle Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe frangiflutti edite dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (1996). Il periodo di ritorno dipende dalla vita tecnica dell'opera e dalla massima probabilità di danneggiamento ammissibile nel periodo di vita operativa dell'opera.

La durata minima di vita per le opere è definita nella Tab. 6.1.

TAB. 6.1 - DURATA MINIMA DI VITA PER OPERE O STRUTTURE DI CARATTERE DEFINITIVO T_V

Tipo dell'opera	Livello di sicurezza richiesto		
	1	2	3
	Vita di progetto (anni)		
Infrastrutture di uso generale	25	50	100
Infrastrutture ad uso specifico	15	25	50

Per infrastrutture di uso generale si intendono opere di difesa di complessi civili o industriali, che non siano destinati ad uno specifico scopo e per i quali non è chiaramente identificabile il termine della vita funzionale dell'opera. Per infrastrutture ad uso specifico si intendono le opere di difesa di singole installazioni industriali, di porti industriali, di depositi o piattaforme di carico e scarico, di piattaforme petrolifere, ecc..

Il livello di sicurezza 1 si riferisce ad opere o installazioni di interesse locale ed ausiliario, comportanti un rischio minimo di perdita di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso della stessa (difese costiere, opere in porti minori o marina, scarichi a mare, strade litoranee ecc.).

Il livello di sicurezza 2 si riferisce ad opere e installazioni di interesse generale, comportanti un moderato rischio di perdita di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso dell'opera (opere di grandi porti, scarichi a mare di grandi città, ecc.).

Il livello di sicurezza 3 si riferisce ad opere o installazioni per la protezione dall'inondazione o di interesse sopranazionale, comportanti un elevato rischio di perdita di vite umane o di danno ambientale in caso di collasso della stessa (difese di centri urbani o industriali, ecc.).

Per quanto riguarda la probabilità di occorrenza dell'onda di progetto, si assumeranno le probabilità corrispondenti al danneggiamento incipiente od alla distruzione totale in relazione alle deformazioni-modificazioni subite dall'opera in caso di danneggiamento ed alla difficoltà di riparare il danno subito (vedi Tab. 6.2).

Per strutture rigide (dighe a parete verticale e pertanto cassoni emersi e sommersi, impalcato su pali), per le quali è estremamente difficile riparare il danno, si assume la probabilità di distruzione totale. Si è fatta la stessa assunzione per la protezione dei fondali vicino alle strutture a parete verticale, al fine di fornire la stessa probabilità di danneggiamento attribuita alle strutture stesse.

Per strutture flessibili o comunque per opere riparabili (ad es. dighe a scogliera), si assume la probabilità corrispondente al danneggiamento incipiente inteso come il livello di danneggiamento predefinito in relazione al tipo di struttura, al di sopra del quale il danno è apprezzabile e risulta necessario intervenire con lavori di manutenzione. Per le scogliere si può assumere un rischio per la vita umana limitato e una ripercussione economica media o medio-bassa.

TAB. 6.2 - MASSIMA PROBABILITÀ DI DANNEGGIAMENTO AMMISSIBILE NEL PERIODO DI VITA OPERATIVA DELL'OPERA P_F

Danneggiamento incipiente		
Ripercussione economica	Rischio per la vita umana	
	Limitato	Elevato
Bassa	0,50	0,30
Media	0,30	0,20
Alta	0,25	0,15
Distruzione totale		
Ripercussione economica	Rischio per la vita umana	
	Limitato	Elevato
Bassa	0,20	0,15
Media	0,15	0,10
Alta	0,10	0,05

Per rischio limitato per la vita umana si intendono i casi in cui a seguito del danneggiamento non è prevista alcuna perdita di vite umane. Quando queste perdite sono preventivabili, il rischio è elevato. Per ripercussione economica bassa, media ed alta s'intendono casi in cui il rapporto fra i costi diretti del danneggiamento, sommati a quelli indiretti dovuti alla perdita di funzionalità delle opere protette ed, il costo totale per la realizzazione dell'opera è minore di 5, è compreso fra 5 e 20 o è maggiore di 20.

La combinazione del tempo di vita dell'opera T_v e della probabilità di danneggiamento P_f, determina il tempo di ritorno dell'evento di progetto T_{rp}:

$$\mathbf{T_{rp} = T_v/[-\ln (1-P_f)]}$$

Alle opere presentate in questo progetto per la loro importanza si può associare un livello di sicurezza pari a 2. Tutte le opere definitive possono essere considerate come infrastrutture civili di uso generale, cui corrisponde quindi un tempo di vita di 50 anni.

Per quanto riguarda la massima probabilità di danneggiamento ammissibile nel periodo operativo dell'opera, riguardo alle opere in scogliera, si assume la probabilità corrispondente al danno incipiente. Inoltre si può assumere un rischio per la vita umana limitato e una ripercussione economica media o medio-bassa, a seconda dei casi.

Riguardo alle opere a parete verticale (i cassoni cellulari reggispinta emersi, sommersi, impalcato su pali e protezione dei fondali vicino alle strutture a parete verticale) si assume la probabilità corrispondente alla distruzione totale.

In definitiva nel dimensionamento delle opere in progetto si sono adottati i valori dell'altezza d'onda significativa corrispondenti ai periodi di ritorno indicati in Tab. 6.3 .

TAB. 6.3 - PERIODI DI RITORNO DELL'ONDA DI PROGETTO

Tipo opera	Tv (anni)	Pf	Tro teorico (anni)	Tro adottato (anni)
Scogliere	50	0,4	98	**100**
Impalcato su pali	50	0,2	224	**250**
Opere a parete verticale	50	0,2	224	**250**
Protezione dei fondali vicino alle strutture	50	0,2	224	**250**
Opere in fase di costruzione	2	0,4	4	**5**

7. PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO IN CORRISPONDENZA DELLE OPERE

7.1. Metodologia utilizzata

Nel capitolo precedente sono state definite le altezze d'onda al largo in termini di valori estremi da utilizzare ai fini della progettazione delle opere.

Nel presente capitolo vengono presentate le condizioni ondose in corrispondenza delle opere in base alle quali poi calcolare i carichi indotti sulle varie tipologie di opere: scogliera alla radice della piattaforma, cassoni emersi, cassoni sommersi e il sovrastante impalcato su pali e protezione del fondale.

Per la definizione delle opere della piattaforma, si fa riferimento al criterio di progetto che essa opererà quando l'estensione della diga foranea esistente sarà completata. Riguardo alla situazione relativa alle fasi di costruzione si è considerata la configurazione che prevede solo la diga esistente.

La nuova diga foranea a protezione della piattaforma portuale si trova su fondali elevati (in testata dell'ordine dei 40 m) e si è considerato in via cautelativa di trascurare la trasformazione dell'onda, comunque modesta in relazione ai fenomeni di rifrazione e shoaling su alti fondali, dal largo alla -45 m. Inoltre, considerato che le opere della piattaforma si sviluppano su fondali piuttosto elevati (da -10 m a -25 m), l'effetto dell'incremento del livello del mare ad opera della marea (comunque limitato a poche decine di cm) sulla propagazione delle onde è stato ritenuto trascurabile. Conseguentemente è stato assunto come livello di riferimento il l.m.m..

Analogamente, anche per le correnti si è ritenuto di non introdurle nello studio della propagazione delle onde verso le nuove opere, data la loro modesta entità.

Per la propagazione delle onde dalla diga foranea fino alla piattaforma si è utilizzato il modello matematico PHAROS, messo a punto dal laboratorio idraulico di Delft, in gra-

do di simulare principalmente il fenomeno di diffrazione intorno alla testata della diga, i fenomeni di rifrazione e shoaling per effetto dei fondali che variano rapidamente in prossimità dell'opera.
Il modello tiene conto anche del frangimento, attraverso la formulazione teorica di Battjes and Jansen (1978) verificata poi da Battjes and Steve (1985), cui si rimanda per ulteriori approfondimenti.

Sono state prese in considerazione le condizioni ondose relative ai 3 settori individuati nel capitolo precedente per l'analisi delle condizioni estreme:
– 50-100°N
– 100°-150°N
– 150-190°N.

Le condizioni ondose d'interesse ai fini della ricorrenza statistica, come detto nel capitolo precedente (Tab. 6.3), sono per la piattaforma quelle con periodo di ritorno di 5 anni (rappresentative della fase di costruzione), di 100 anni (condizioni da utilizzare per le verifiche in fase di esercizio della scogliera alla radice della piattaforma) e di 250 anni (condizioni da utilizzare per le verifiche in fase di esercizio per l'opera a parete verticale e per l'impalcato su pali).

Le attività svolte pertanto per valutare le condizioni ondose alle opere sono le seguenti:
– messa a punto della schematizzazione dello stato di fatto, delle nuove opere (piattaforma portuale e diga foranea) e riproduzione dei fondali per un'area sufficientemente ampia ad inglobare queste opere evitando gli effetti di bordo;
– inserimento delle condizioni di input al modello relative alle caratteristiche delle onde in corrispondenza della diga foranea;
– estrazione delle distribuzioni di moto ondoso nell'area investigata;
– definizione delle condizioni ondose in corrispondenza delle nuove strutture portuali.

Di seguito vengono illustrate in dettaglio le attività svolte con il modello matematico ed i risultati ottenuti, di riferimento per la valutazione dei carichi sulle strutture portuali previste nella fase 2.

7.2. Descrizione del modello matematico PHAROS

Il modello matematico PHAROS consente di valutare la trasformazione dell'onda in bacini chiusi portuali riproducendo i seguenti fenomeni fisici:

– diffrazione;
– rifrazione e shoaling per effetto di correnti e variazione dei fondali;
– riflessione parziale e trasmissione dell'onda;
– effetti dissipativi per effetto del frangimento e dell'attrito sul fondo;
– spreading direzionale.

Il codice di calcolo è stato messo a punto dal laboratorio idraulico di Delft ed è stato utilizzato con successo in numerosi casi dalla Technital. In appendice 2 è riportata una descrizione di dettaglio del modello PHAROS.

7.3. Calibrazione del modello PHAROS sulla base dei risultati del modello fisico

La valutazione della trasformazione delle onde in corrispondenza della parte a giorno della piattaforma di Vado Ligure richiede uno studio articolato, in quanto la complessità della struttura non permette di ricondurre quest'opera a tipologie standard già analizzate in letteratura.

Al fine di conoscere le altezze dell'onda in corrispondenza dei vari cassoni e quindi le pressioni pulsanti e impulsive sulle strutture, sono stati quindi fatti dei test in canaletta su modello fisico.

7.3.1. Il modello fisico

Il modello, in scala 1:60 riproduceva due sezioni longitudinali tipo dell'opera, in corrispondenza delle quali il fondale naturale al piede del primo cassone presenta rispettivamente le profondità di -16 m (sez. A-A) e -23 m (sez. B-B). In canaletta sono stati poi

riprodotti 2500 m circa di mare aperto con batimetrie naturali, per permettere la propagazione dell'onda dal largo verso le opere.
La planimetria dell'impalcato e le sezioni longitudinali testate nel modello sono riportate rispettivamente in Fig. 7.1 e Fig. 7.2.

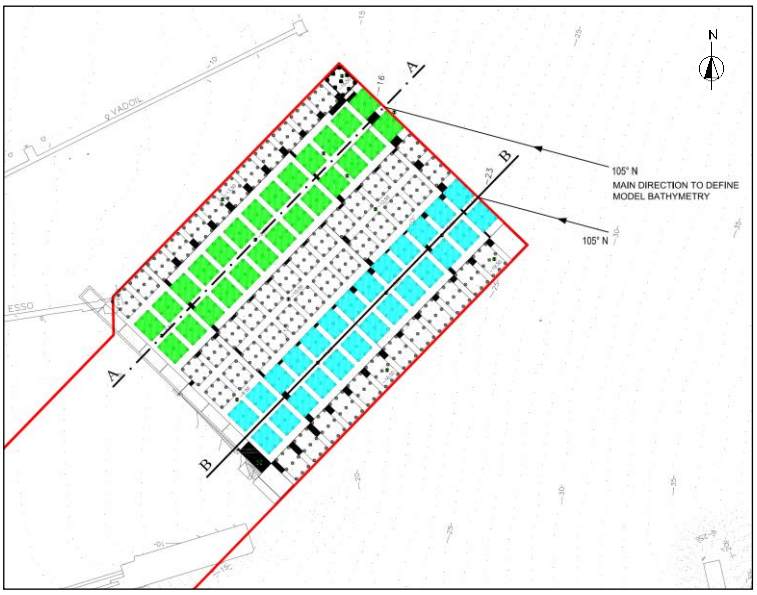


FIG. 7.1 - PLANIMETRIA DELL'IMPALCATO CON L'UBICAZIONE DELLE DUE SEZIONI LONGITUDINALI TESTATE NEL MODELLO FISICO

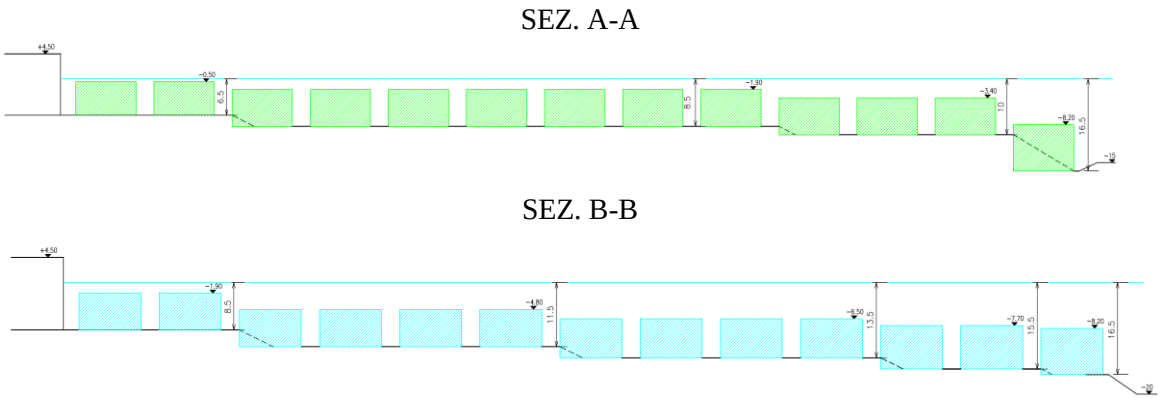


FIG. 7.2 - SEZIONI LONGITUDINALI DELL'IMPALCATO

Il programma completo dei test eseguiti, in riferimento alle due sezioni analizzate, è riportato in Tab. 7.1; ciascun test è stato caratterizzato da una durata di 1000 onde.

TAB. 7.1 - PROGRAMMA DEI TEST ESEGUITI - SEZ. A-A E SEZ. B-B

Test Series	Test number	H_s (m)	Measurements
A_0	01	2.5	W
	02	3.3	W
	03	4.0	W
	04	5.0	W
A_1	05	2.5	F/S/O/W
	06	3.3	F/S/O/W
	07	4.0	F/S/O/W
	08	5.0	F/S/O/W

Test Series	Test number	H_s (m)	Measurements
B_0	09	2.5	W
	10	3.3	W
	11	4.0	W
	12	5.0	W
B_1	13	2.5	F/S/O/W
	14	3.3	F/S/O/W
	15	4.0	F/S/O/W
	16	5.0	F/S/O/W

F = misura forze
S = verifica stabilità fondale
O = misura tracimazione

I Test A_0 e B_0, eseguiti dopo la calibrazione delle condizioni ondose e con la struttura costituita solo dai cassoni sommersi e dai pali (senza la soletta dell'impalcato), hanno permesso di valutare l'altezza e l'elevazione d'onda lungo lo sviluppo longitudinale dell'opera. Le altezze d'onda sono state misurate tramite 32 sonde, disposte una in corrispondenza della zona di calibrazione delle onde (sonda n.1) e le altre lungo lo sviluppo dell'opera, nelle posizioni ritenute maggiormente significative ai fini dell'analisi delle trasformazioni dell'onda dovute all'interazione con la struttura (pali e cassoni sommersi).

La collocazione delle sonde lungo l'opera è presentata nella planimetria di Fig. 7.3.

La variazione dell'onda lungo lo sviluppo della struttura è risultata pressoché analoga per tutte le condizioni ondose testate e in riferimento ad entrambe le sezioni analizzate.

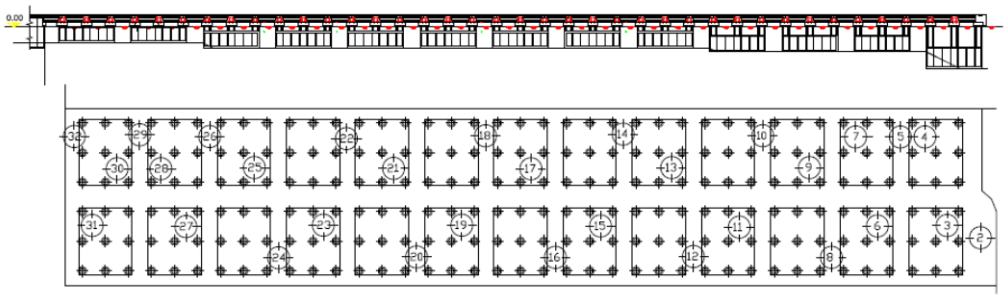


FIG. 7.3 - SEZIONE LONGITUDINALE DELLA STRUTTURA E PLANIMETRIA CON INDICAZIONE DELLA COLLOCAZIONE DELLE SONDE

Dai test eseguiti si evince chiaramente che l'altezza d'onda si riduce drasticamente dopo i primi due cassoni di fondazione, principalmente per il frangimento determinato dalla riduzione di profondità, e in parte anche per l'interferenza con la sommità dei cassoni di fondazione.

A titolo esemplificativo, nella Fig. 7.4, si riportano l'andamento dell'altezza e dell'elevazione d'onda lungo lo sviluppo della struttura, relativamente alla sez. A-A, per la condizione ondosa avente un tempo di ritorno di 250 anni (Hs = 5 m).

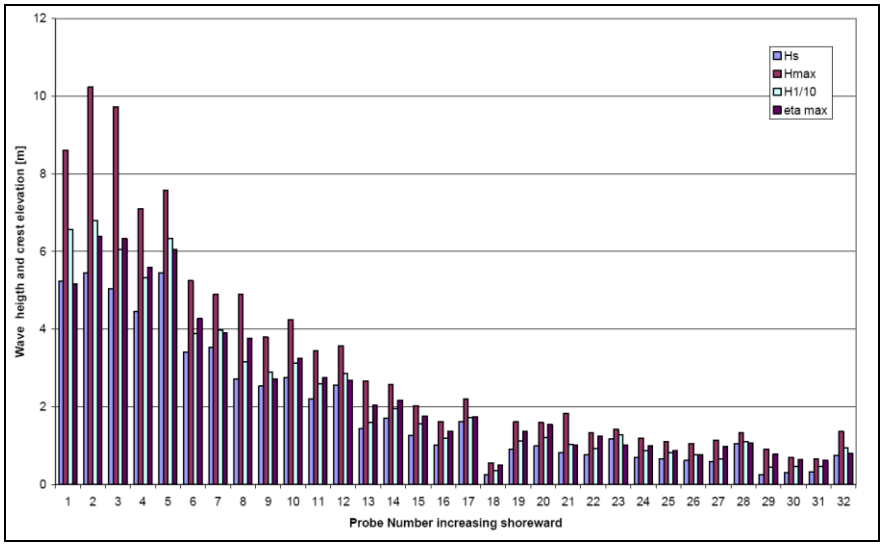


FIG. 7.4 - TRASFORMAZIONE DELL'ONDA SOPRA LA STRUTTURA (SENZA IMPALCATO) - TEST A_0-04, $H_{S,OPERA}$ = 5.0 M

7.3.2. Calibrazione delle batimetrie sul modello PHAROS

A partire dai risultati delle prove su modello fisico, si è cercato di valutare quale batimetria riproducesse più fedelmente la dissipazione e la trasformazione dell'onda in corrispondenza dei cassoni a giorno evidenziata dai risultati del modello fisico.
Per questo scopo si è costruito un dominio di calcolo con il modello matematico[1] equivalente al modello fisico riprodotto in laboratorio, associando quindi alla griglia di calcolo la batimetria naturale ricostruita nel modello fisico. Si sono poi variate le quote del fondale in corrispondenza dei cassoni a giorno al fine di acquisire sensibilità sugli effetti delle stesse sulla propagazione dell'onda nell'area a giorno dell'opera.

Come sezione tipo per questo studio si è scelta la sezione A-A e nello specifico il Test A_0-04, $H_{s,opera}$ = 5.0 m (vedi Fig. 7.2).

Si è osservato come, montando sul modello matematico le quote di sommità dei cassoni sommersi, e simulando le condizioni d'onda riprodotte nelle prove in canaletta, i risultati dei due modelli (matematico e fisico) sono significativamente comparabili. Da questo si evince che buona parte della dissipazione dell'onda in corrispondenza dei cassoni a giorno è dovuta alla riduzione della profondità del fondale provocata, appunto, dalla presenza dei cassoni sommersi.

In Fig. 7.5 e Fig. 7.6 sono presentate le batimetrie e i valori delle altezze d'onda significativa (Hs) ottenute con il modello matematico per un'onda di Hs=5m e Tp=10.2s, corrispondente ad un tempo di ritorno di 250 anni (test A0-04).

[1] Il modello schematizza un'area sufficientemente ampia da non risentire degli effetti di bordo

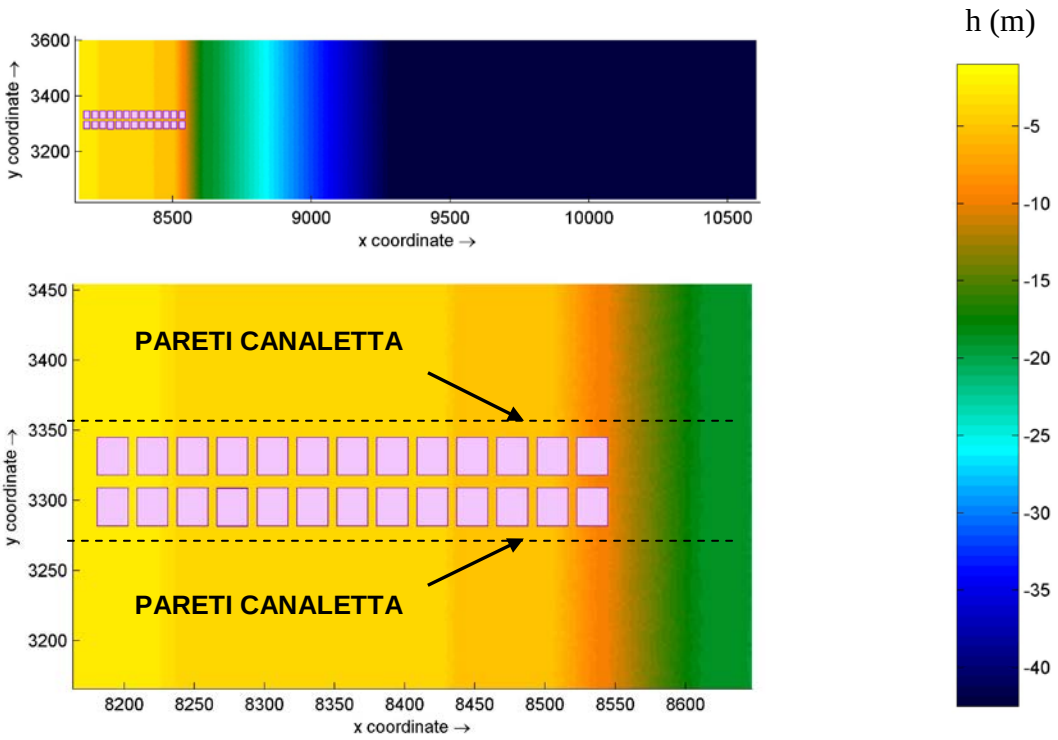


FIG. 7.5 - BATIMETRIA MODELLO PHAROS: QUOTE DI SOMMITÀ DEI CASSONI SOMMERSI E BATIMETRIE NATURALI AL DI FUORI DELLA PIATTAFORMA

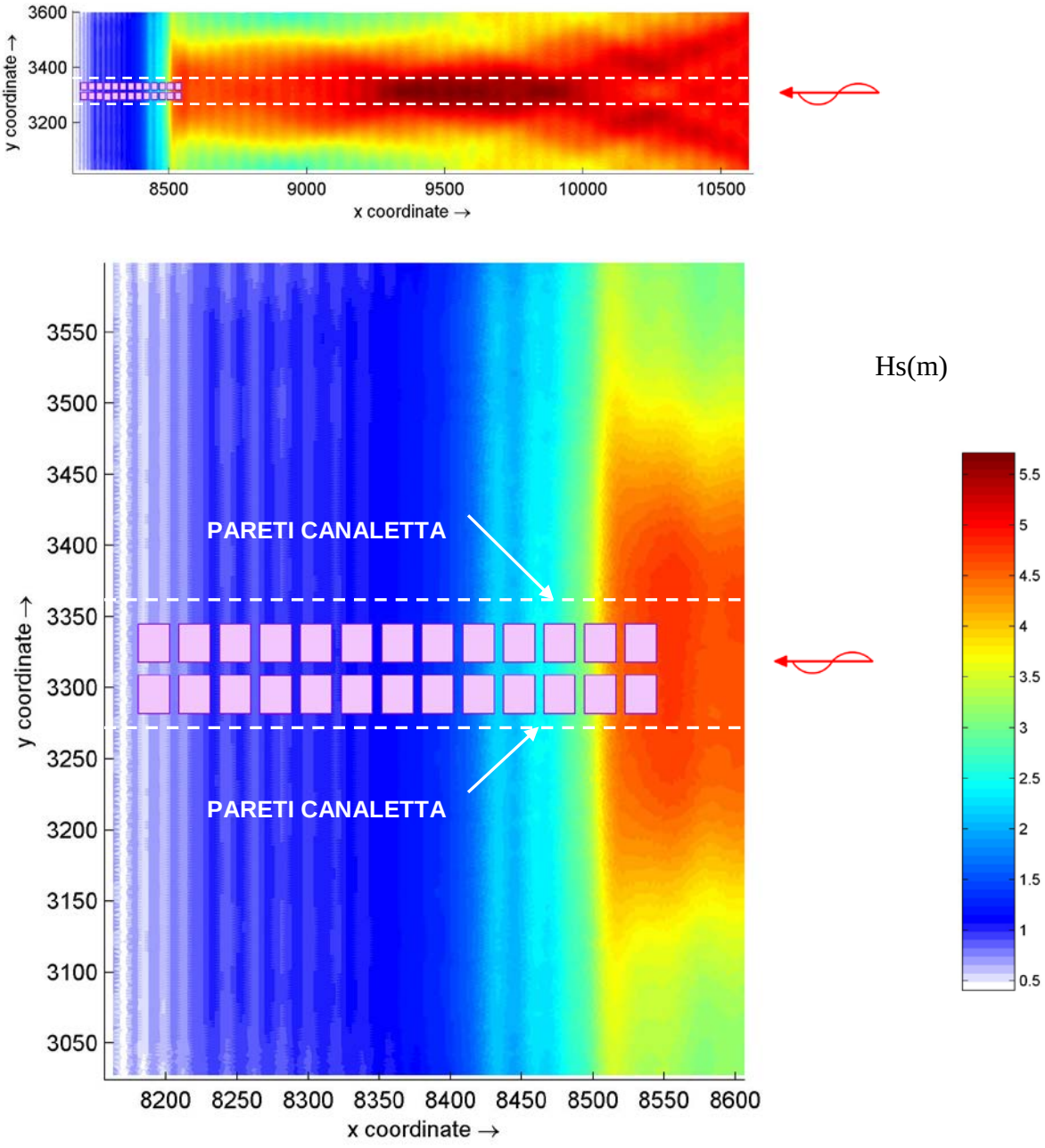


FIG. 7.6 - ONDE SIGNIFICATIVE IN TUTTO IL DOMINIO E ZOOM IN CORRISPONDENZA DEI CASSONI A GIORNO - RISULTATI DEL MODELLO PHAROS (TEST A_0-04, $H_{S,OPERA}$ = 5.0 M)

In Fig. 7.7 sono presentati i risultati del modello PHAROS comparati con quelli del modello fisico.

Come si può osservare la corrispondenza è quasi perfetta, permettendo quindi di concludere che riproducendo sul modello PHAROS le quote di sommità dei cassoni sommersi, è possibile avere una stima affidabile dei valori di Hs in ogni punto della piattaforma.

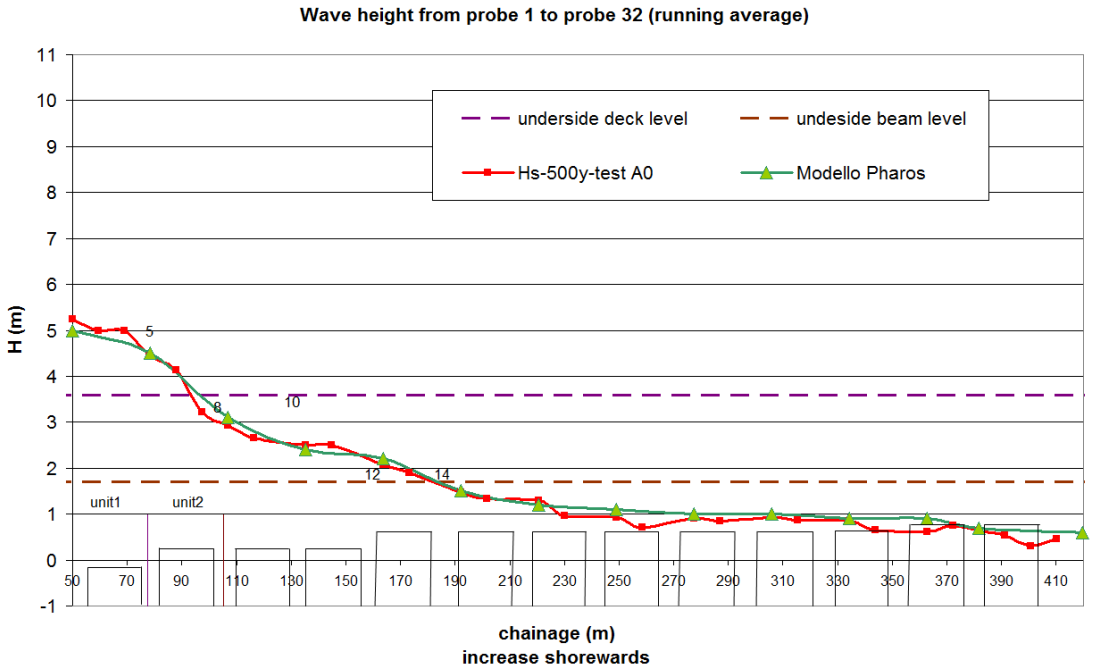


FIG. 7.7 - CONFRONTO TRA HS DEL MODELLO FISICO E HS DEL MODELLO PHAROS - TEST DI RIFERIMENTO (TEST A_0-04, $H_{S,OPERA}$ = 5.0 M)

Questa trattazione non tiene conto degli effetti di trasformazione sull'onda dovuti alla presenza dell'impalcato (travi e deck).

7.4. Schematizzazione e batimetrie

Per procedere ad un'analisi modellistica del moto ondoso è stata individuato il cosiddetto "Dominio di Calcolo", cioè l'area in cui si intende studiare la propagazione del moto ondoso, e di definire le schematizzazioni delle opere.

Per il presente studio sono state considerate due diverse schematizzazioni del dominio di calcolo in funzione dello scopo progettuale., come viene più ampiamente presentato nei successivi sottocapitoli.

Una prima schematizzazione riproduce la configurazione che avranno la piattaforma e la diga foranea una volta in esercizio (Fig. 7.8) e che prevede:
- diga foranea estesa come da P.R.P.
- cassoni emersi della Banchina Rinfuse in opera
- cassoni sommersi e impalcato su pali in opera
- cassoni reggispinta in opera.

La seconda schematizzazione riproduce la configurazione che avranno le opere durante la fase di messa in opera dei cassoni sommersi e dell'impalcato su pali costituenti l'area a giorno (Fig. 7.9), che prevede:
- diga foranea esistente
- cassoni emersi della Banchina Rinfuse in opera
- rilevato in opera secondo la configurazione prevista alla fine del primo stralcio della Fase 1
- cassoni reggispinta posizionati temporaneamente in opera in corrispondenza della Banchina Portacontenitori 2, a protezione dell'area a giorno della piattaforma.

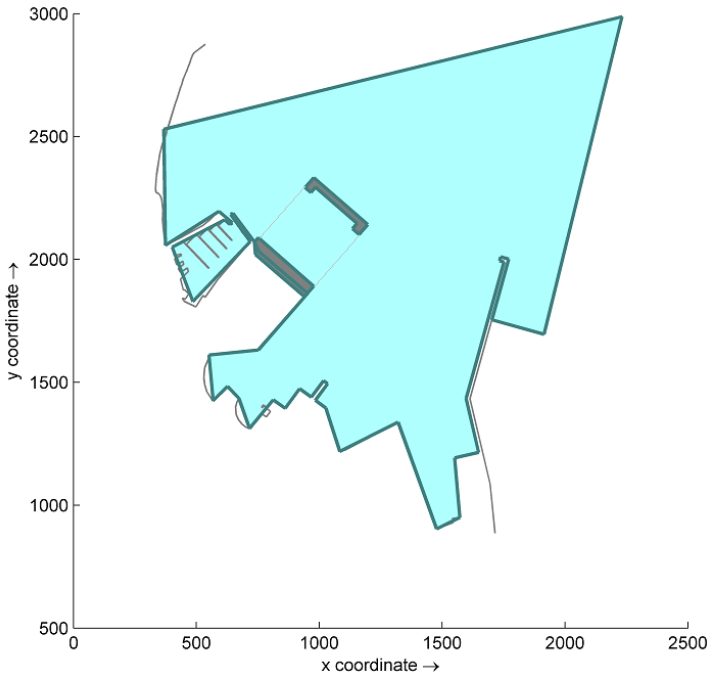


FIG. 7.8 - SCHEMATIZZAZIONE DELLA PIATTAFORMA IN ESERCIZIO

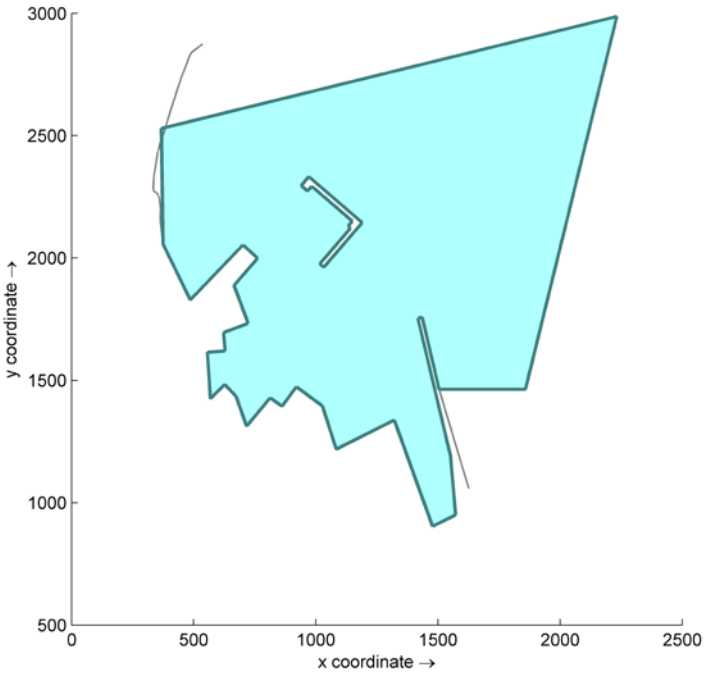


FIG. 7.9 - SCHEMATIZZAZIONE DELLA PIATTAFORMA IN COSTRUZIONE

In entrambe le schematizzazioni il dominio di calcolo del modello ha compreso tutta l'area del bacino portuale di Vado Ligure ed ha incluso una fascia costiera sufficientemente ampia rispetto alle nuove opere al fine di evitare possibili effetti di bordo nelle simulazioni.

Il contorno del dominio di calcolo è stato definito attraverso una successione di elementi rettilinei adiacenti, che vengono caratterizzati ciascuno in fase di input del modello da un proprio coefficiente di riflessione e da un angolo di attacco stimato (entrambi vengono poi aggiustati dal modello in fase di simulazione, qualora l'angolo di attacco imposto come input dovesse differire da quello effettivo calcolato dal modello).

Le diverse configurazioni del boundary del modello, con l'indicazione dei coefficienti di riflessione adottati, sono mostrate nelle Fig. 7.10, Fig. 7.11 e Fig. 7.12.

Nel presente studio sono stati addottati diversi coefficienti di riflessione per le opere a seconda dello scopo progettuale.

In particolare la configurazione 1A, che prevede di applicare su tutti i contorni del dominio un coefficiente di riflessione pari a zero, ha lo scopo di valutare l'onda incidente sulle opere di conterminazione della piattaforma.

La configurazione 1B è stata invece utilizzata per definire le condizioni di moto ondoso per il dimensionamento della protezione, dei cassoni e dell'impalcato nell'area interna a giorno della piattaforma. In questa configurazione si è scelto quindi di associare ad ogni elemento del contorno della schematizzazione sul modello matematico il proprio coefficiente di riflessione al fine di ottenere un campo di moto il quanto più possibile realistico e, allo stesso tempo cautelativo.

In fine si evidenzia come in corrispondenza dei bordi dell'area a giorno non sono stati definiti elementi a cui associare una riflessione, in quanto come descritto nel par. 7.3, l'effetto dell'impalcato su pali sulla propagazione e trasformazione dell'onda è simulato

imponendo come quota del fondale in quest'area, quella della sommità dei cassoni sommersi.

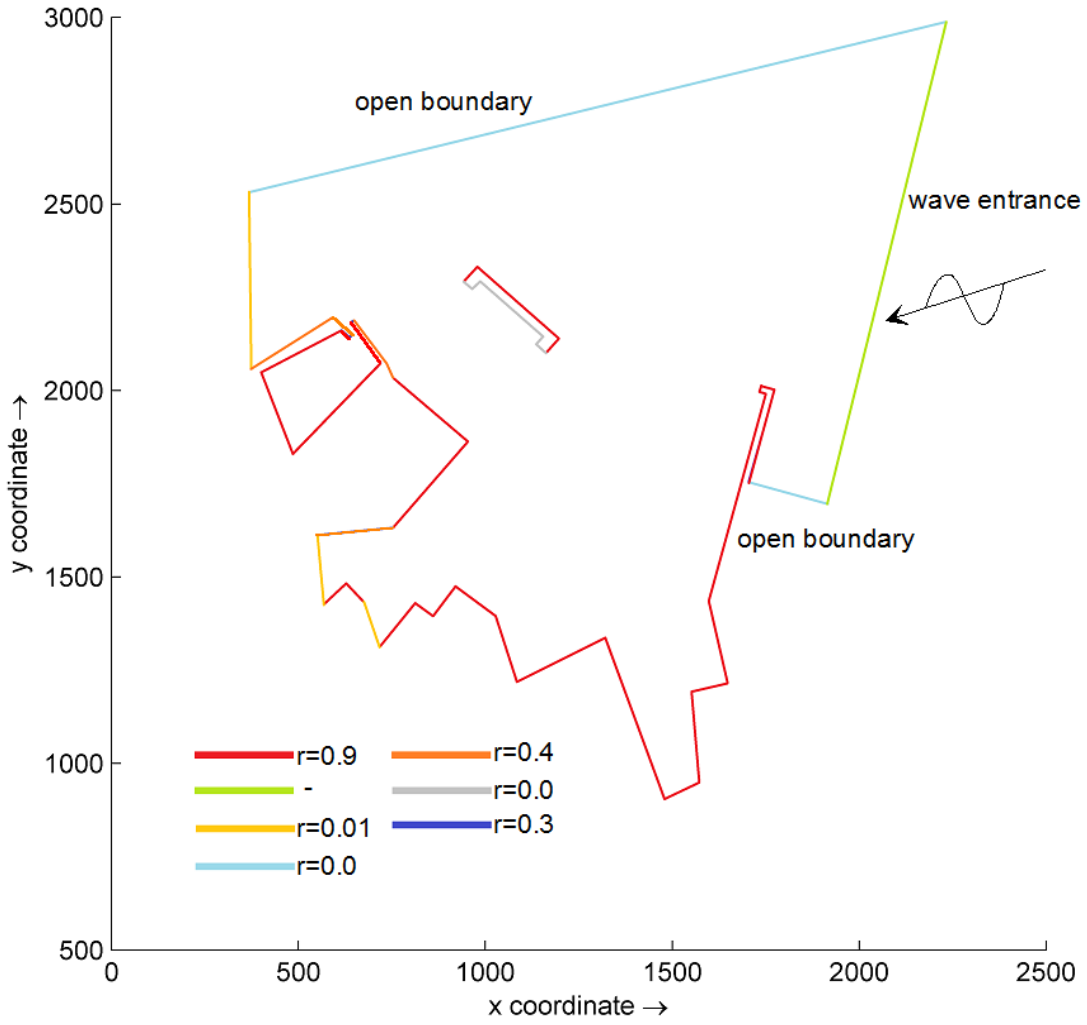


FIG. 7.10 - COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE CONSIDERATI NEL MODELLO MATEMATICO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE PHAROS PER LA CONFIGURAZIONE 1A

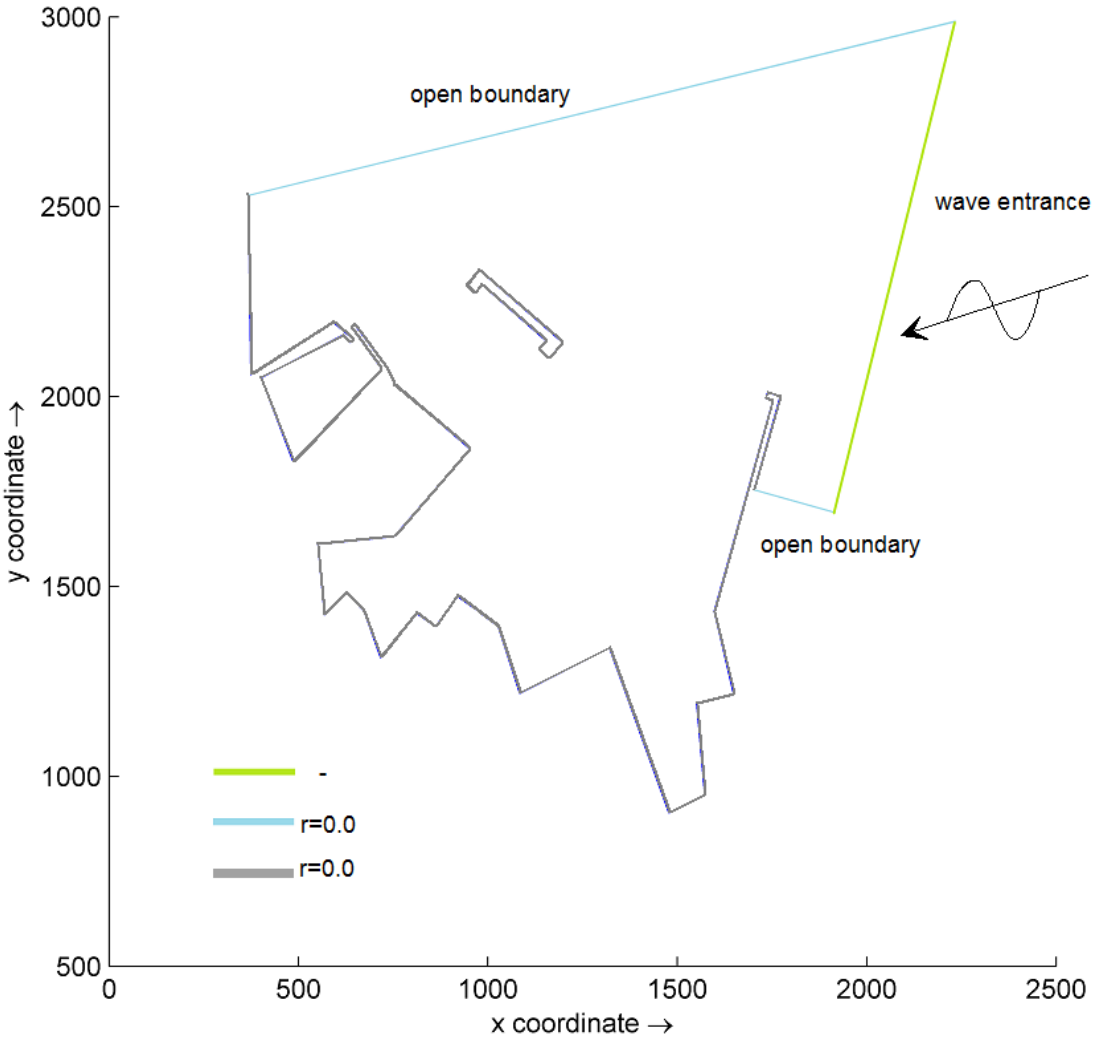


FIG. 7.11 - COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE CONSIDERATI NEL MODELLO MATEMATICO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE PHAROS PER LA CONFIGURAZIONE 1B

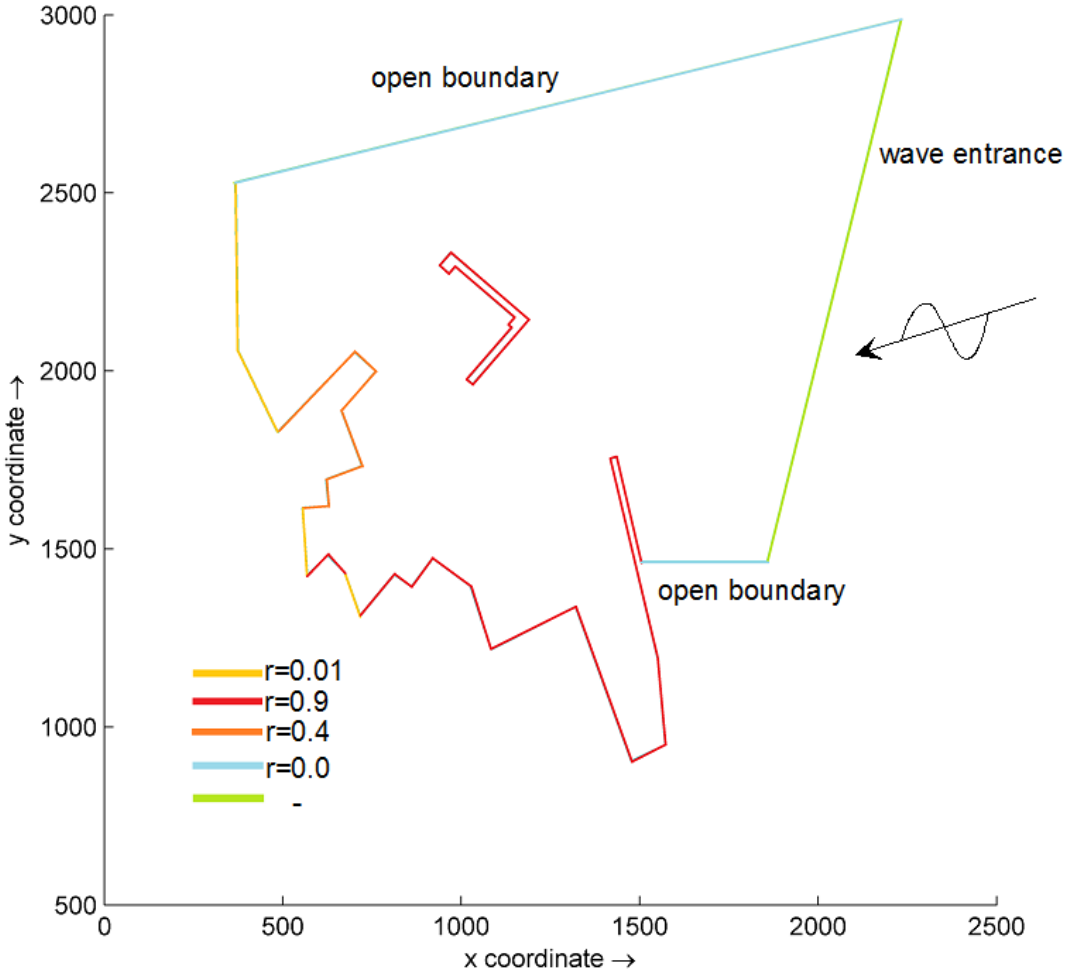


FIG. 7.12 - COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE CONSIDERATI NEL MODELLO MATEMATICO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE PHAROS PER LA CONFIGURAZIONE 2

L'applicazione del modello PHAROS ha comportato la creazione di una serie di griglie di calcolo a maglie triangolari non uniformi le cui dimensioni sono funzione del periodo di riferimento dell'onda incidente oggetto di analisi e della profondità. In questo modello, infatti, le dimensioni delle celle di calcolo sono state definite in modo tale da avere una risoluzione spaziale in tutta l'area del modello idonea a rappresentare il campo di moto ondoso e quindi in grado di garantire almeno 8 punti di controllo per lunghezza d'onda. Poiché la lunghezza di un'onda varia sia in funzione del periodo dell'onda inci-

dente che della batimetria locale dei fondali, sono state generate diverse griglie di calcolo in funzione del caso considerato.

Per la definizione delle batimetrie nelle aree non interessate dalla piattaforma è stato fatto riferimento a:

– i rilievi batimetrici più recenti delle aree della piattaforma e delle aree prospicienti la diga foranea
– le batimetrie d'insieme desunte dalla carta Nautica 1:30.000 del Litorale di Savona.

In corrispondenza dei cassoni a giorno si sono riprodotte come batimetria le quote di sommità dei cassoni sommersi, secondo la planimetria di progetto. A questa scelta modellistica si è giunti in seguito a valutazioni sulla propagazione delle onde in corrispondenza della parte a giorno della piattaforma, presentate nel par.7.3.2.

Le batimetrie riprodotte per entrambe le configurazioni della diga foranea e un dettaglio della griglia di calcolo in corrispondenza della piattaforma sono presentati nelle Fig. 7.13, Fig. 7.14, Fig. 7.15, Fig. 7.16 e Fig. 7.17.

I fondali considerati fanno riferimento al l.m.m.. Considerato che l'entità dell'escursione del livello del mare e delle correnti indotte sono modesti si è ritenuto per la propagazione delle onde verso le nuove opere (ai fini del loro dimensionamento) di considerare come livello di riferimento il l.m.m. e di non considerare l'interazione onde-correnti.

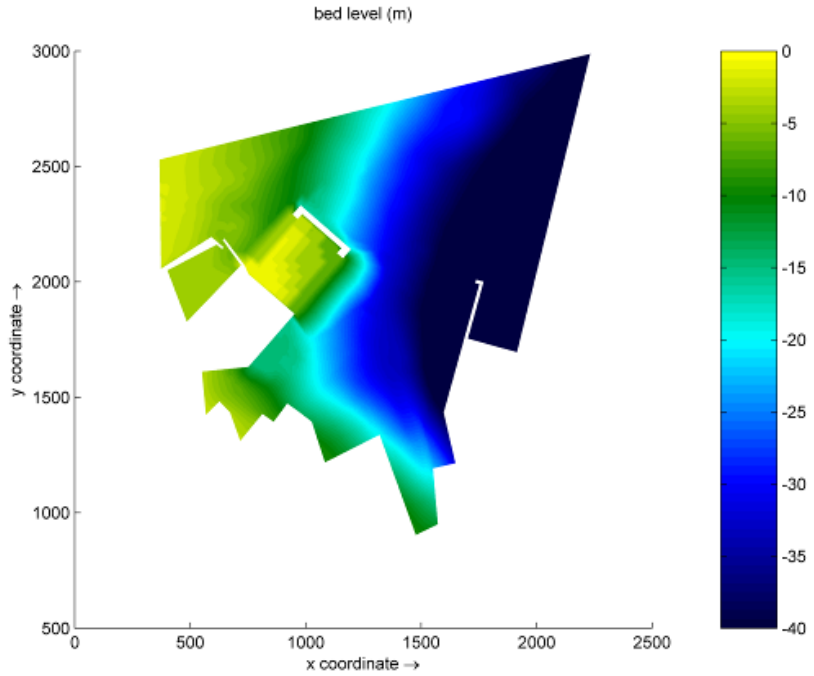


FIG. 7.13 - BATIMETRIE RIPRODOTTE SUL MODELLO - PIATTAFORMA IN ESERCIZIO

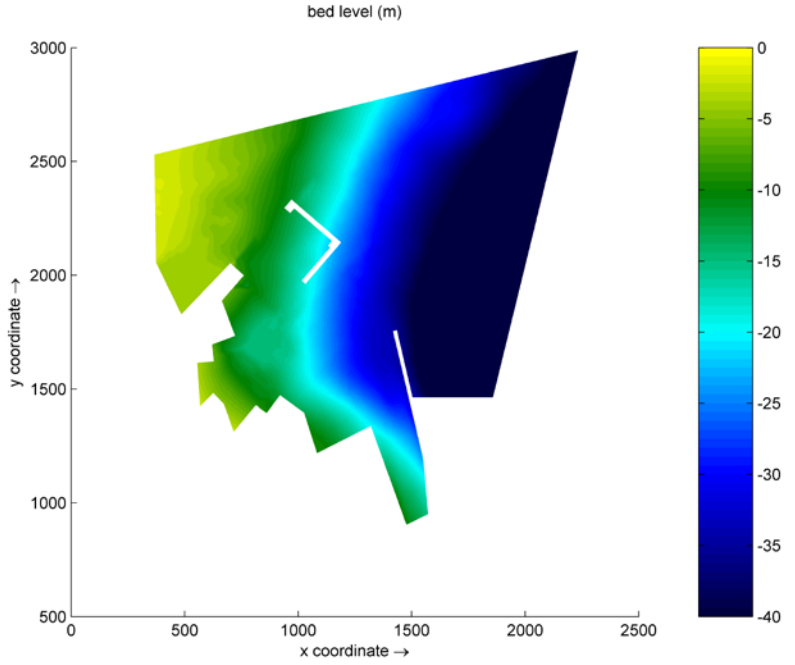


FIG. 7.14 - BATIMETRIE RIPRODOTTE SUL MODELLO - PIATTAFORMA IN COSTRUZIONE

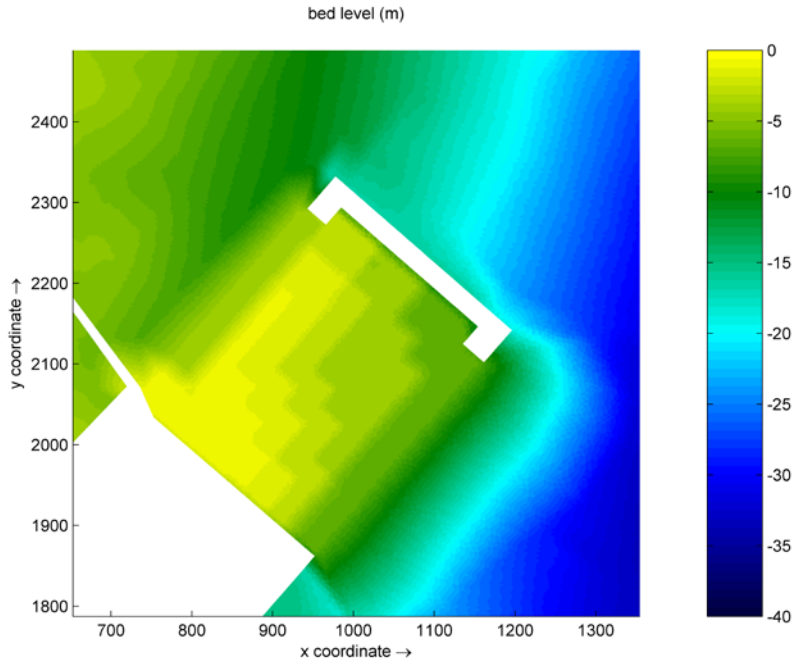


FIG. 7.15 - DETTAGLIO DELLE BATIMETRIE IN CORRISPONDENZA DELL'IMPALCATO DELLA PIATTAFORMA

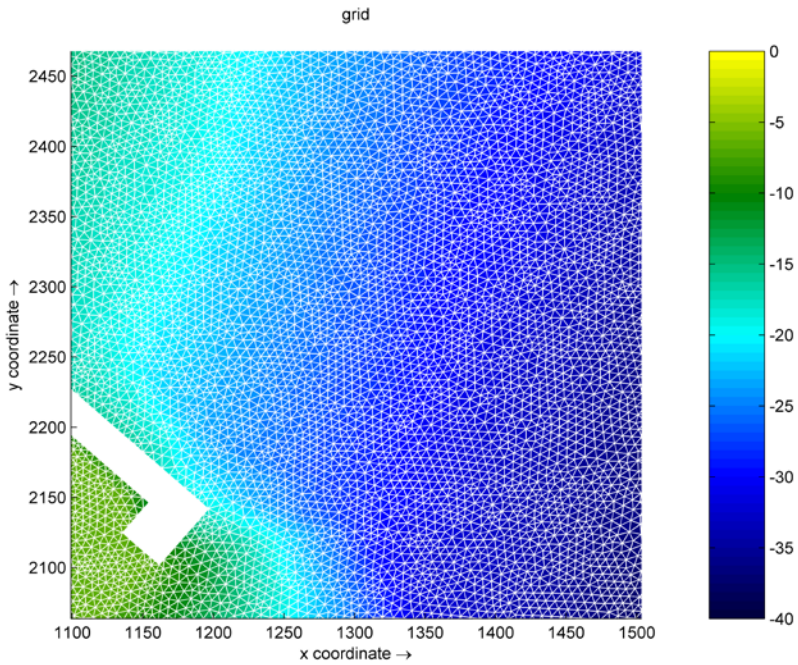


FIG. 7.16 - DETTAGLIO DELLA GRIGLIA DI CALCOLO USATA DAL MODELLO PHAROS

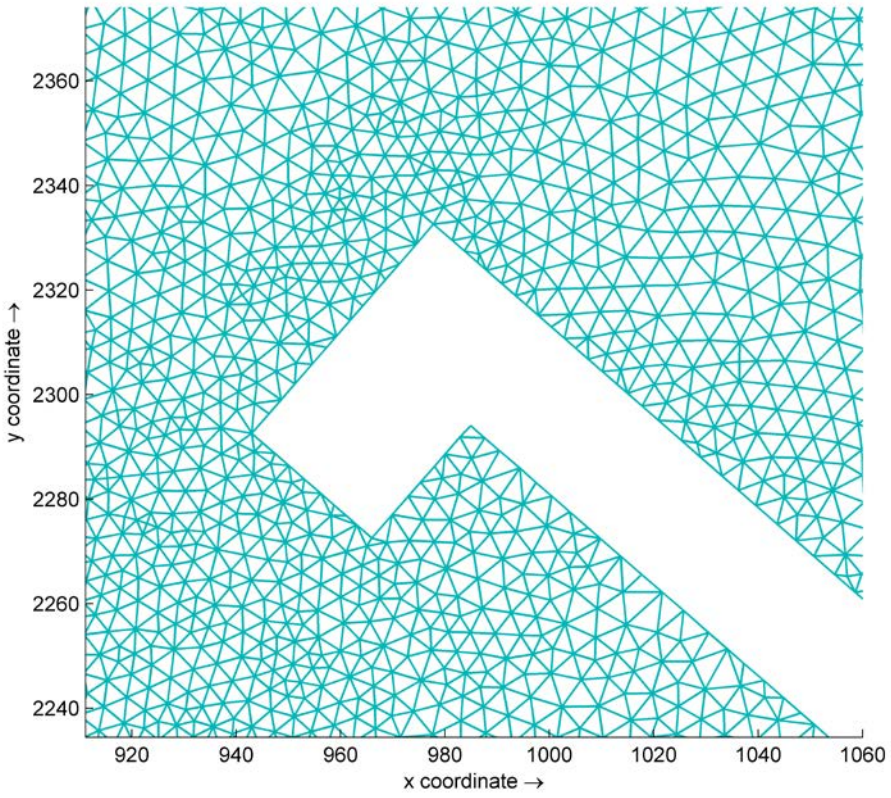


FIG. 7.17 - GRIGLIA DI CALCOLO DEL MODELLO (DETTAGLIO IN CORRISPONDENZA DELLA DIGA FORANEA)

7.5. Simulazioni e risultati ottenuti con il modello PHAROS

Le simulazioni effettuate con il modello matematico hanno riguardato eventi di moto ondoso provenienti dal 1° e 2° quadrante ed in particolare si è fatto riferimento alle direzioni d'onda di 70°, 80°, 90° e 105°N.

Le caratteristiche degli eventi di moto ondoso da simulare sono state definite a seconda dello scopo progettuale e dell'opera da dimensionare. Infatti al fine del dimensionamento strutturale delle opere a parete verticale si sono considerati eventi con tempo di ritorno 250, mentre per il dimensionamento della scogliera alla radice della piattaforma eventi con tempo di ritorno 100 anni. Per l'analisi dell'agitazione ondosa nell'area di cantiere a mare ci si è riferiti a eventi con tempo di ritorno 5 anni.

Nell'ambito delle simulazioni effettuate, al fine del dimensionamento strutturale, si è fatta un'ulteriore distinzione tra quelle funzionali alla definizione dei carichi sulle opere perimetrali alla piattaforma (cassoni emersi reggispinta banchina container, cassoni emersi banchina rinfuse, i cassoni sommersi e impalcato fronte mare e la protezione dei fondali antistanti le banchine) e quelle destinate alla valutazione dei carichi sui cassoni sommersi, sull'impalcato e sui fondali nella zona interna dell'area a giorno della piattaforma.

La tabella qui in seguito riassume le diverse configurazioni studiate e le condizioni di moto ondoso associate ad ogni serie di simulazioni. Nei seguenti capitoli vengono presentate le caratteristiche del moto ondoso associate agli eventi estremi e a quelli frequenti e i risultati delle simulazioni in termini di distribuzione del moto ondoso in corrispondenza delle opere.

Infine per quanto riguardano i valori caratteristici delle onde di progetto associati ad ogni opera si rimanda al capitolo successivo.

TAB. 7.2 - CONFIGURAZIONI SIMULATE CON IL MODELLO PHAROS

Config.	Scopo progettuale	Opera	Schematizzazione	T_R	Coeff. riflessione
1A	**Dimensionamento strutturale** definizione dei carichi sulle opere in scogliera	- Scogliera alla radice della piattaforma	- diga foranea estesa come da P.R.P - piattaforma ultimata	100 anni	a = 0%
1A	**Dimensionamento strutturale** definizione dei carichi sulle opere	- Cassoni emersi reggispinta - banchina container - Cassoni emersi - Banchina rinfuse - Cassoni sommersi e Impalcato su pali di contermi-nazione della piattaforma - Banchina container - Protezione dei fondali lungo tutto il perimetro della piattaforma	- diga foranea estesa come da P.R.P - piattaforma ultimata	250 anni	a = 0%
1B	**Dimensionamento strutturale** definizione dei carichi sulle opere	Cassoni sommersi, impalcato su pali e protezione dei fondali area interna piattaforma	- diga foranea estesa come da P.R.P - piattaforma ultimata	250 anni	$a = a_{reali}$
2	**Valutazione dell'operatività dell'area di cantiere a mare** Valutazione dell'agitazione ondosa nell'area dell'impalcato su pali in fase costruttiva.	-	- diga foranea esistente - piattaforma in costruzione	5 anni	$a = a_{reali}$

7.5.1. Simulazioni e risultati ottenuti per le onde estreme - Dimensionamento strutturale delle opere

Le simulazioni effettuate con il modello matematico hanno riguardato eventi estremi di moto ondoso (d'interesse per il dimensionamento) caratterizzati da altezze d'onda significative relative al tempo di ritorno di 100 anni e 250 anni, provenienti dal 1° e 2° quadrante. Si è fatto riferimento in particolare alle direzioni d'onda di 70°, 80°, 90° e 105°N. Le caratteristiche delle condizioni ondose utilizzate come input nel modello sono riassunte nella seguente tabella.

TAB. 7.3 - CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO ESTREMO AL LARGO CONSIDERATE PER LE SIMULAZIONI

TR=100 anni			**TR=250 anni**		
Dir (°N)	*Hs (m)*	*Tp (s)*	*Dir (°N)*	*Hs (m)*	*Tp (s)*
70	3.6	9.2	70	4.1	9.8
80	3.6	9.2	80	4.1	9.8
90	3.6	9.2	90	4.1	9.8
105	5.0	10.9	105	5.7	11.6

Come già anticipato nel par. 7.4 sono stati fatti due distinte serie di ' run ' del modello per ogni direzione ed altezza d'onda, caratterizzate da diversi valori dei coefficienti di riflessione associati al contorno del dominio di calcolo:

- Serie 1 →**Configurazione 1A**

  coefficienti di riflessione per tutte le opere nulli (Fig. 7.11), per valutare l'altezza d'onda incidente sulle opere perimetrali ovvero sulla scogliera alla radice della piattaforma (Tr=100 anni), sui cassoni sommersi e il soprastante impalcato su pali in corrispondenza della banchina container, sui cassoni emersi della banchina container e rinfuse (Tr=250 anni) e sulla protezione dei fondali antistante le banchine. Per non appesantire troppo la presentazione dei risultati delle simulazioni,

sono stati presentate di seguito quelli relativi al tempo di ritorno di 250 anni che riguarda buona parte delle opere: da Fig. 7.18 a Fig. 7.25 sono appunto presentate per le 4 direzioni considerate e i valori di altezza d'onda con tempo di ritorno 250 anni la distribuzione delle altezze d'onda significativa e dei fronti d'onda nell'area portuale.

- Serie 2 → **Configurazione 1B**

coefficienti di riflessione come da Fig. 7.10, per la valutazione delle onde in corrispondenza dell'area a giorno della piattaforma (distribuzione delle altezze d'onda significativa e dei fronti d'onda nelle figure da Fig. 7.26 a Fig. 7.33)

I risultati ottenuti in termini di distribuzione dell'altezza d'onda sono presentati di seguito nelle figure da Fig. 7.18 a Fig. 7.33 rispettivamente per le direzioni di 70°, 80°, 90° e 105°N e per le due configurazioni.

Le simulazioni hanno mostrato che le onde provenienti dalla direzione 105°N, nonostante siano d'intensità maggiore in corrispondenza della diga foranea, si attenuano grazie al maggiore effetto schermante della diga e si propagano nel bacino prevalentemente per diffrazione; le onde provenienti da 70°N, invece, si presentano in corrispondenza della piattaforma con l'intensità maggiore, pertanto queste verranno prese in considerazione per il dimensionamento delle strutture.

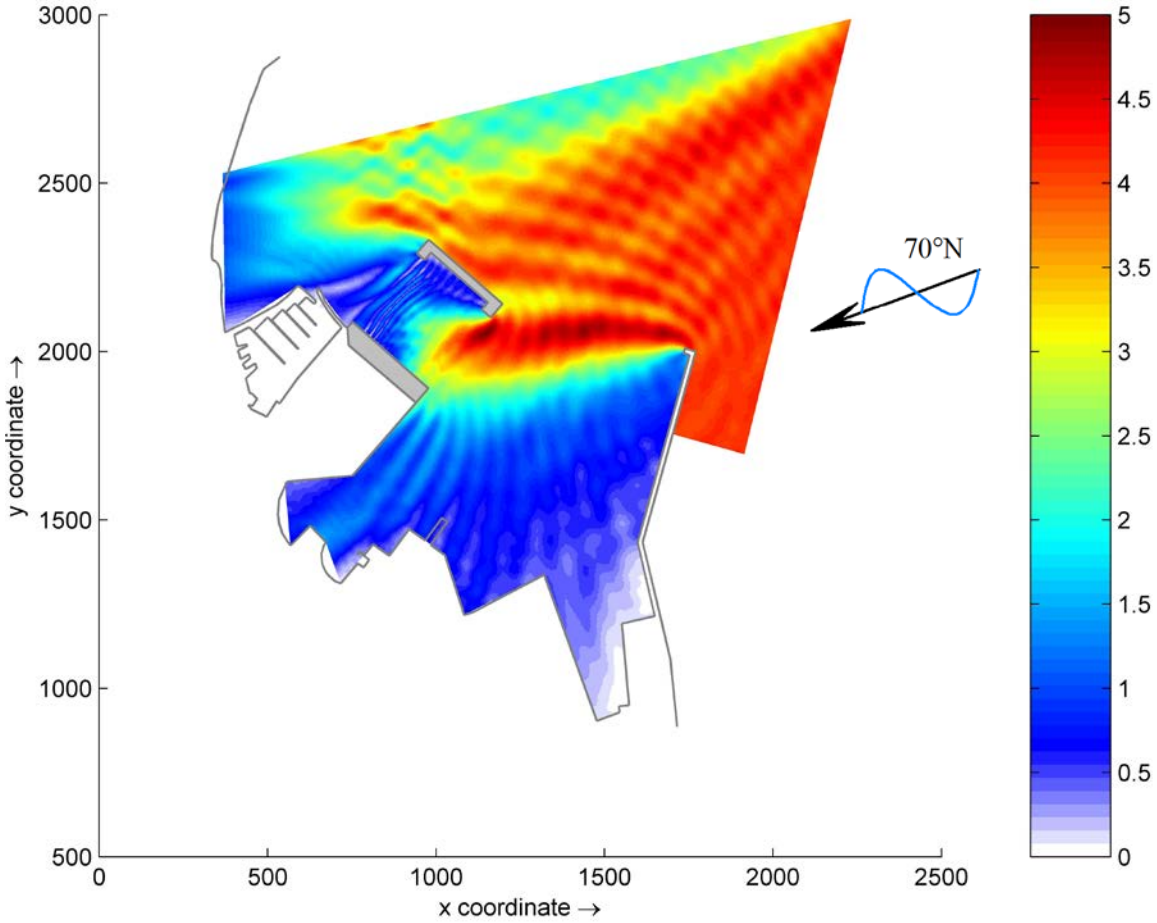


FIG. 7.18 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 70°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1A

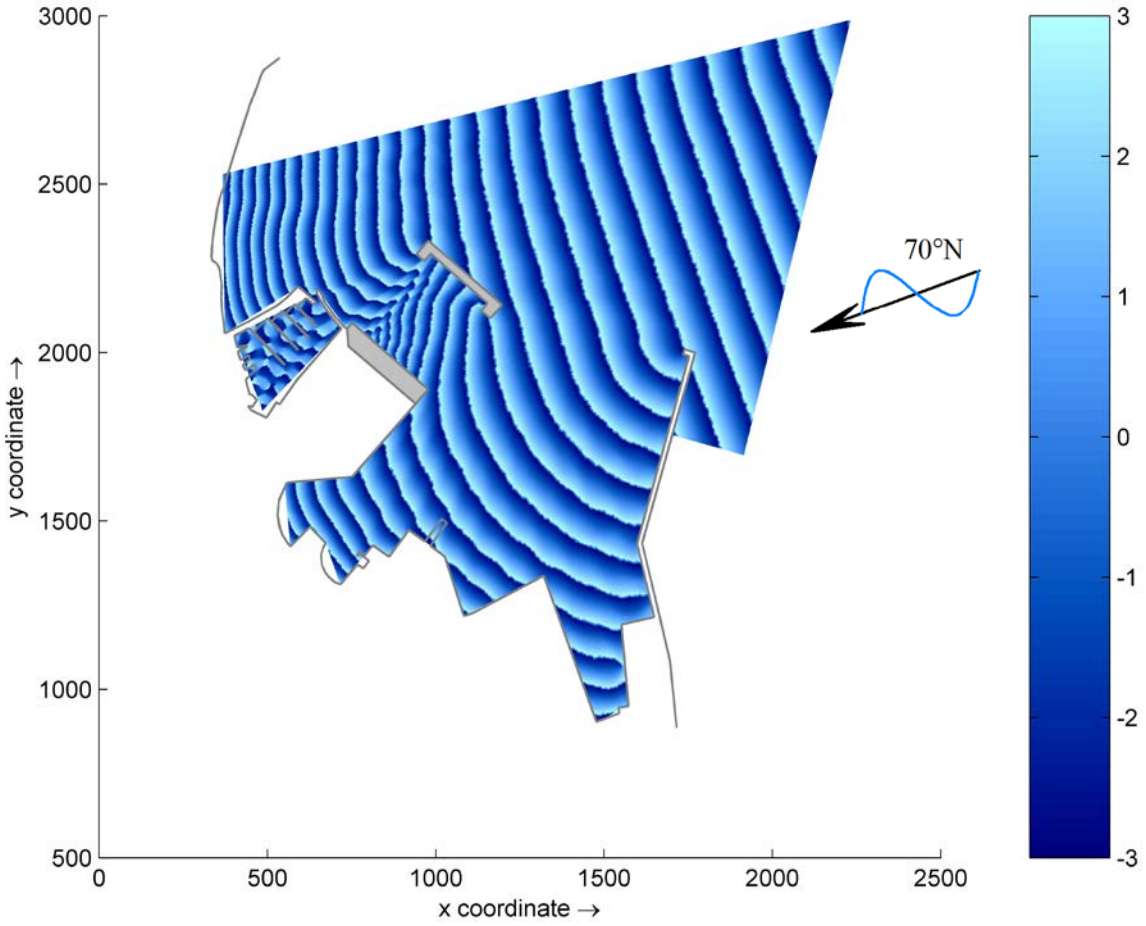


FIG. 7.19 - DISTRIBUZIONE DEI FRONTI D'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 70°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1A

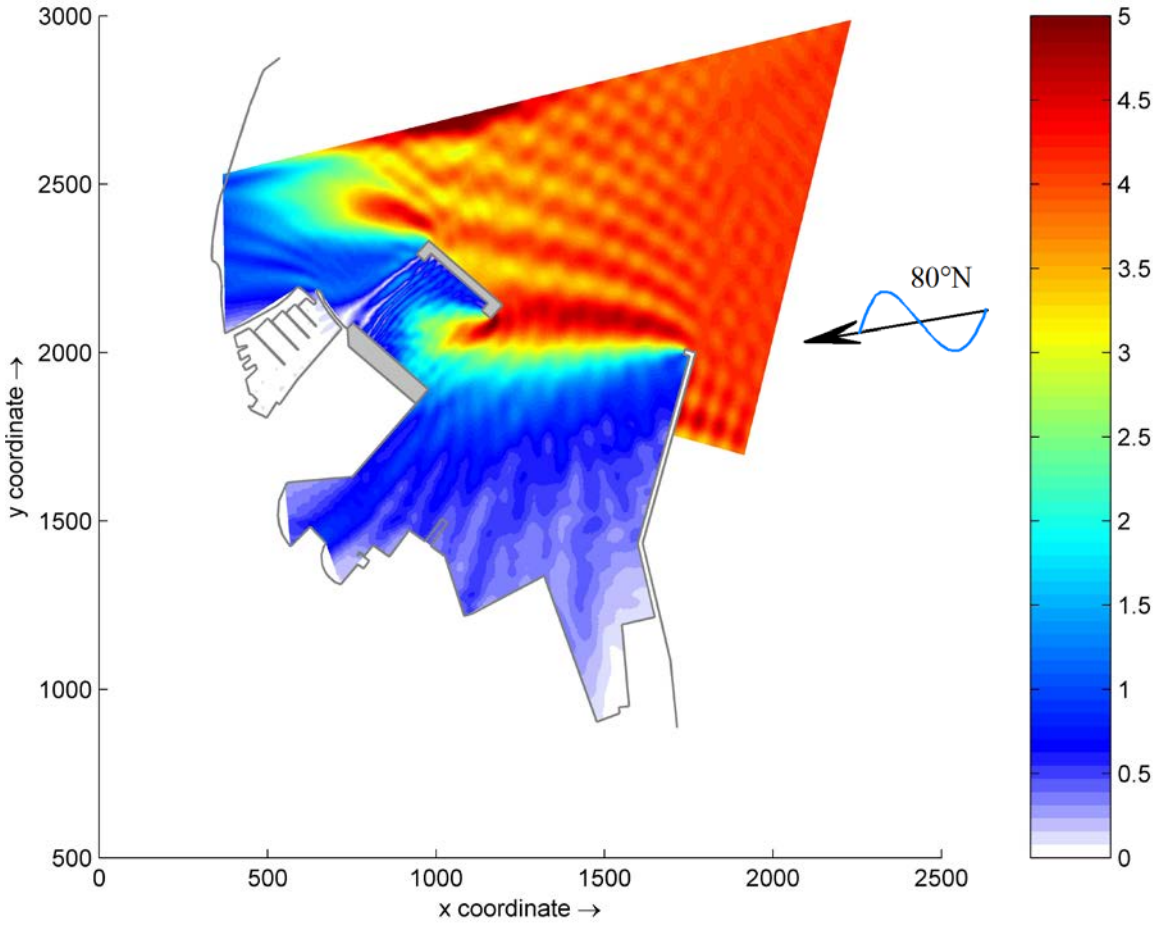


FIG. 7.20 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 80°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1A

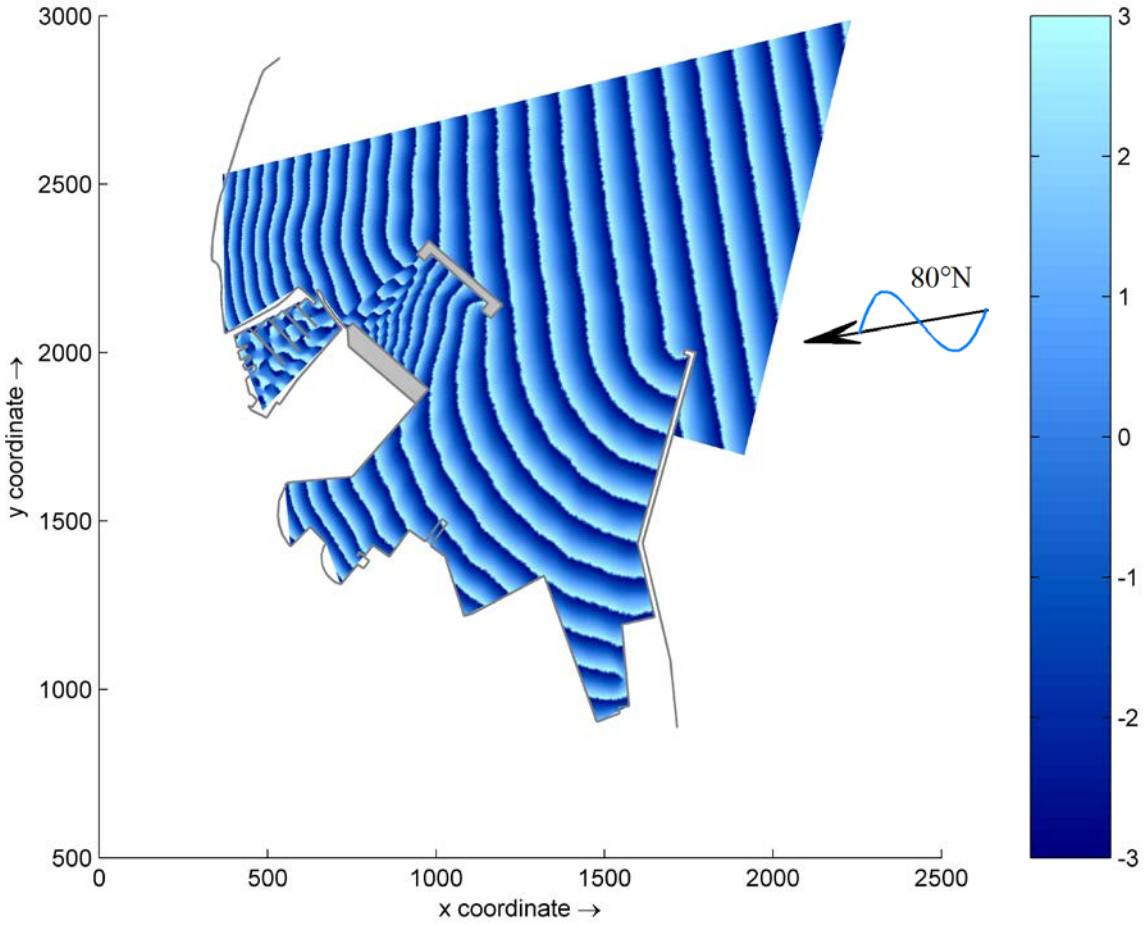


FIG. 7.21 - DISTRIBUZIONE DEI FRONTI D'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 80°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1A

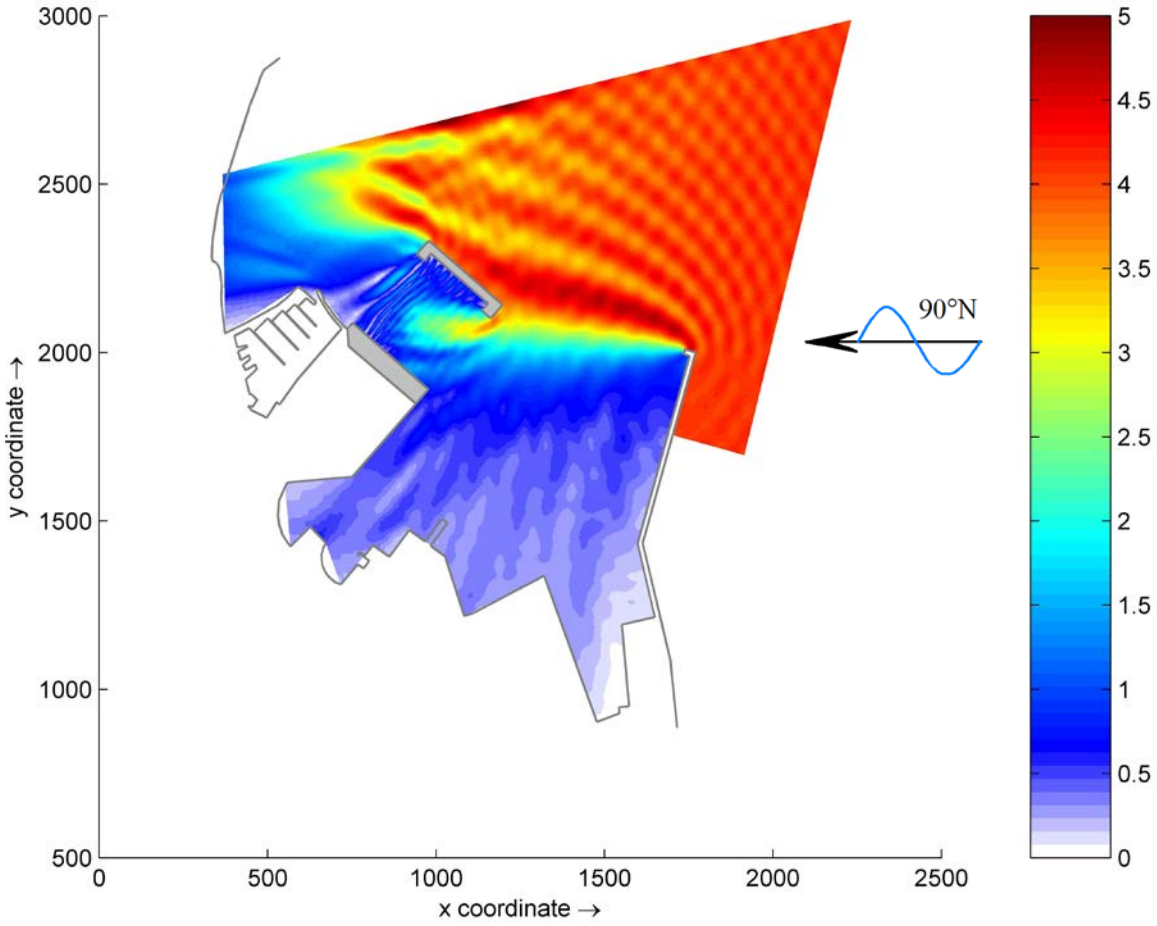


FIG. 7.22 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 90°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1A

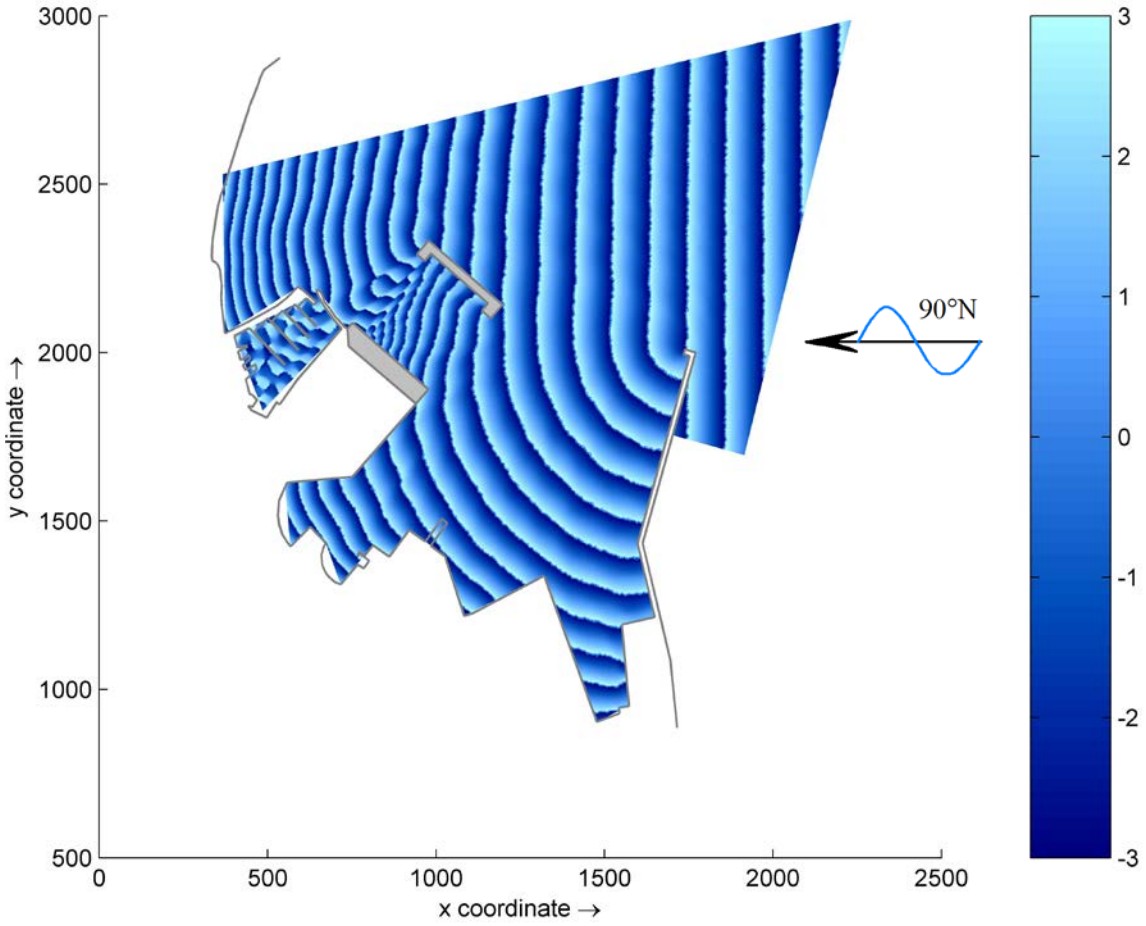


FIG. 7.23 - DISTRIBUZIONE DEI FRONTI D'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 90°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1A

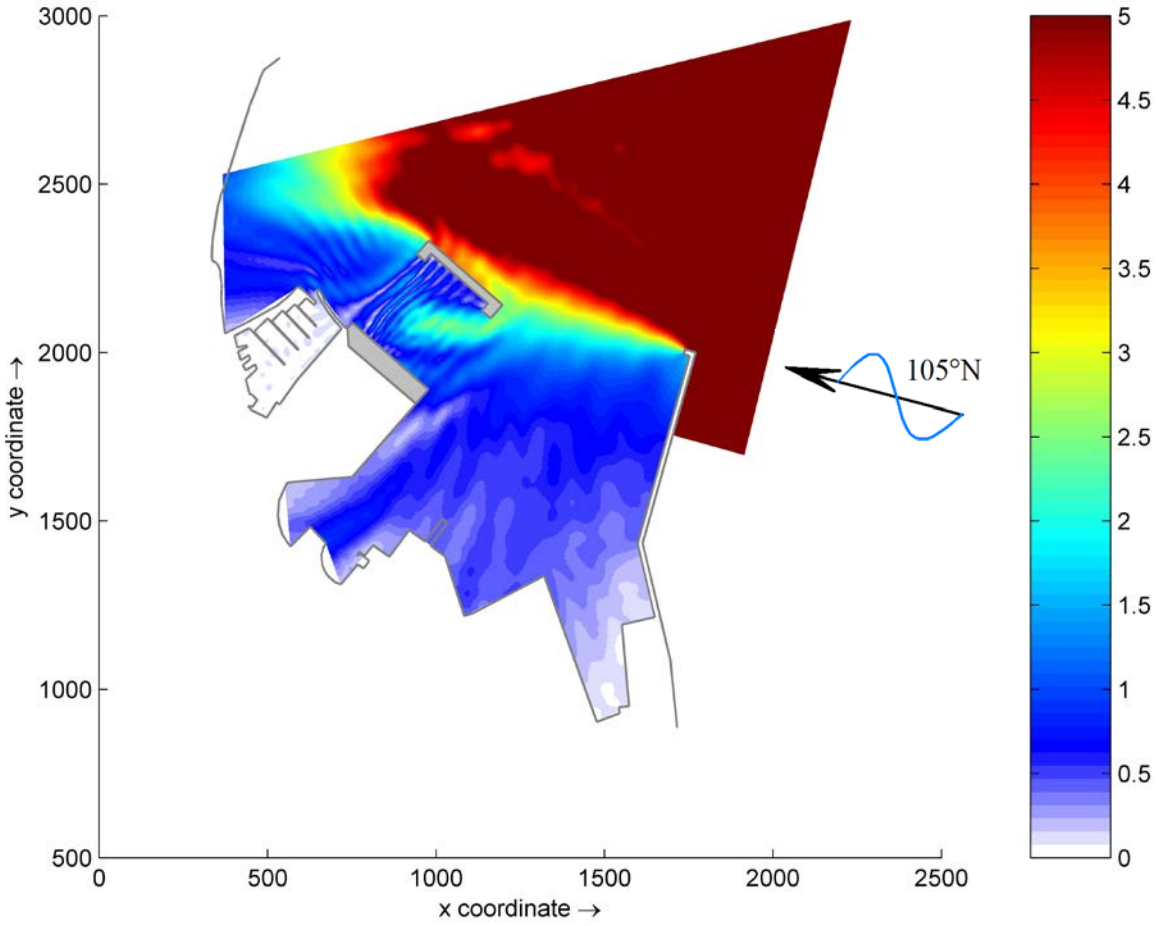


FIG. 7.24 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 105°N E TR=250 ANNI: HS=5,7 M , TP=11,6 S. CONFIGURAZIONE 1A

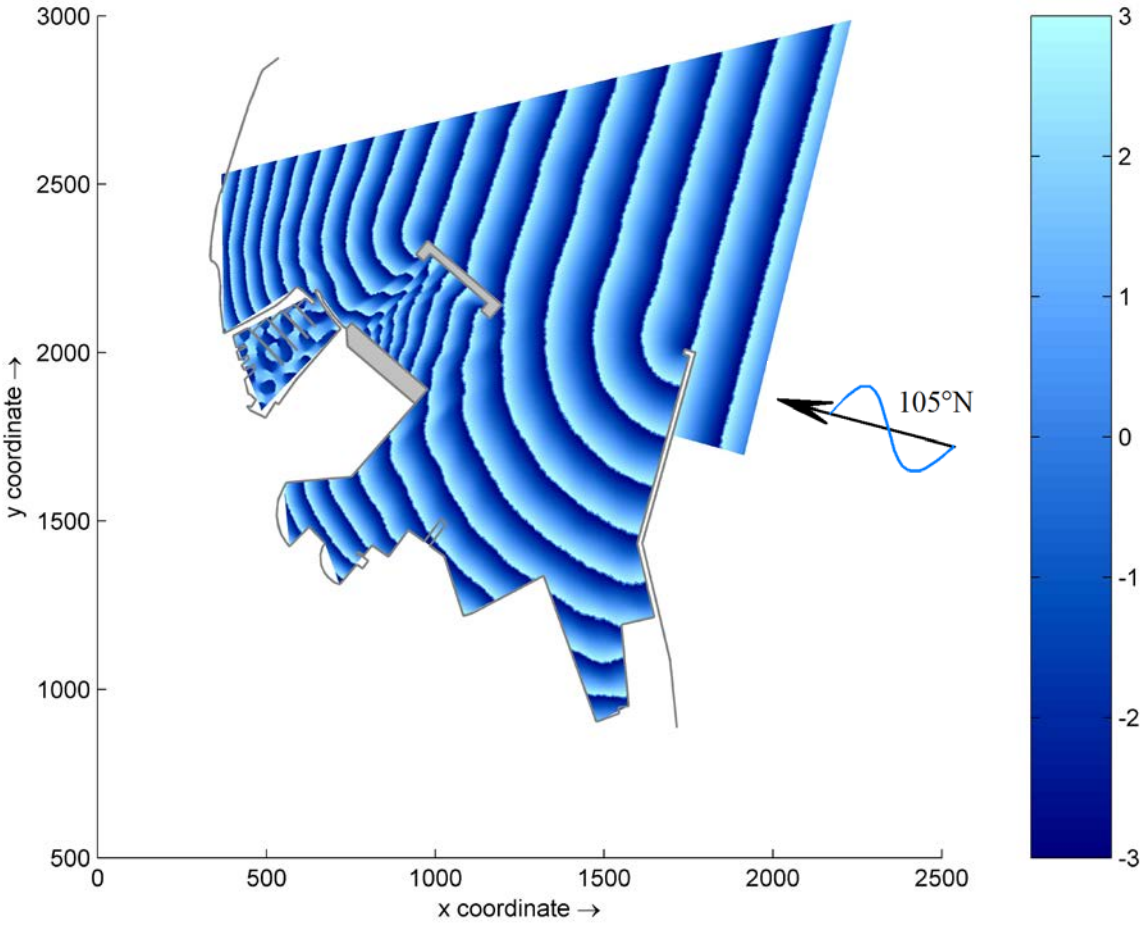


FIG. 7.25 - DISTRIBUZIONE DEI FRONTI D'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 105°N E TR=250 ANNI: HS=5,7 M, TP=11,6 S. CONFIGURAZIONE 1A

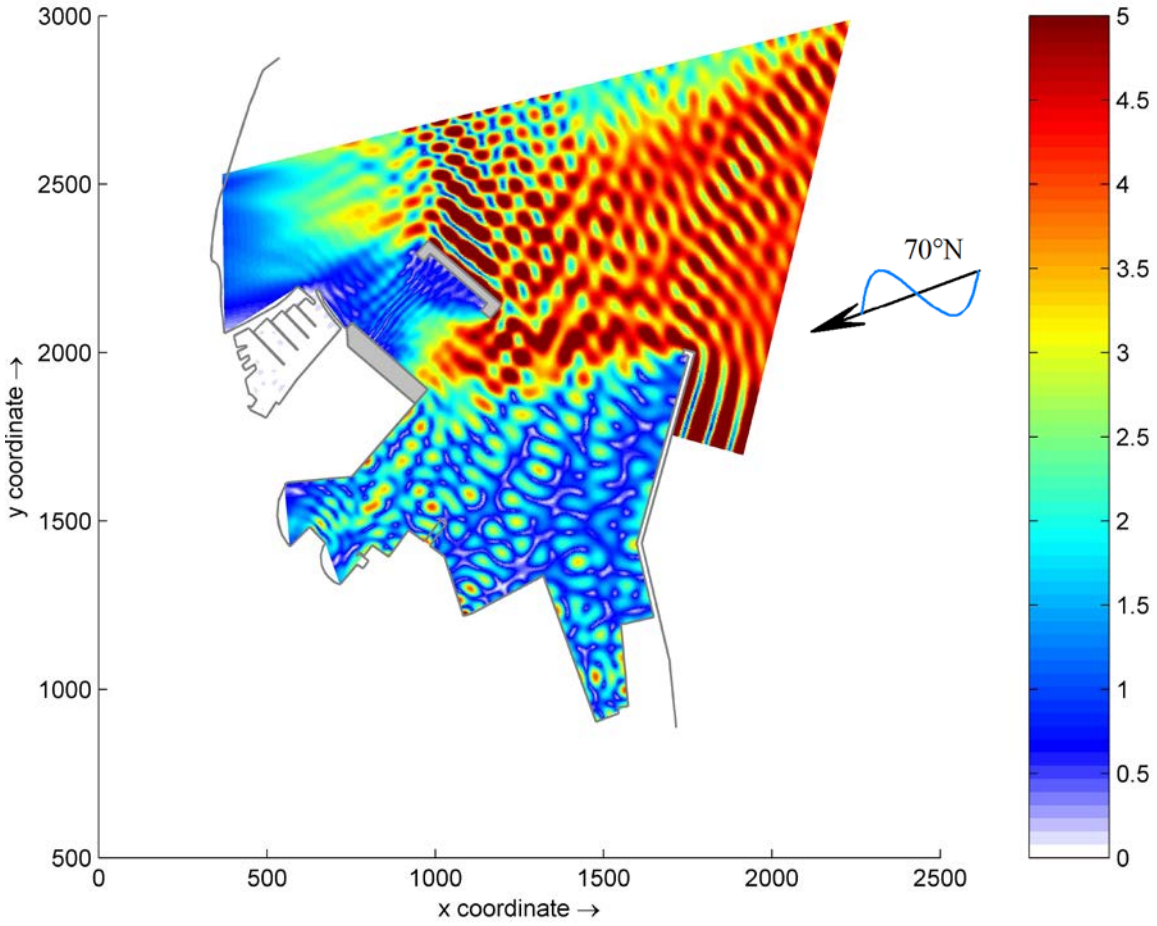


FIG. 7.26 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 70°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1B

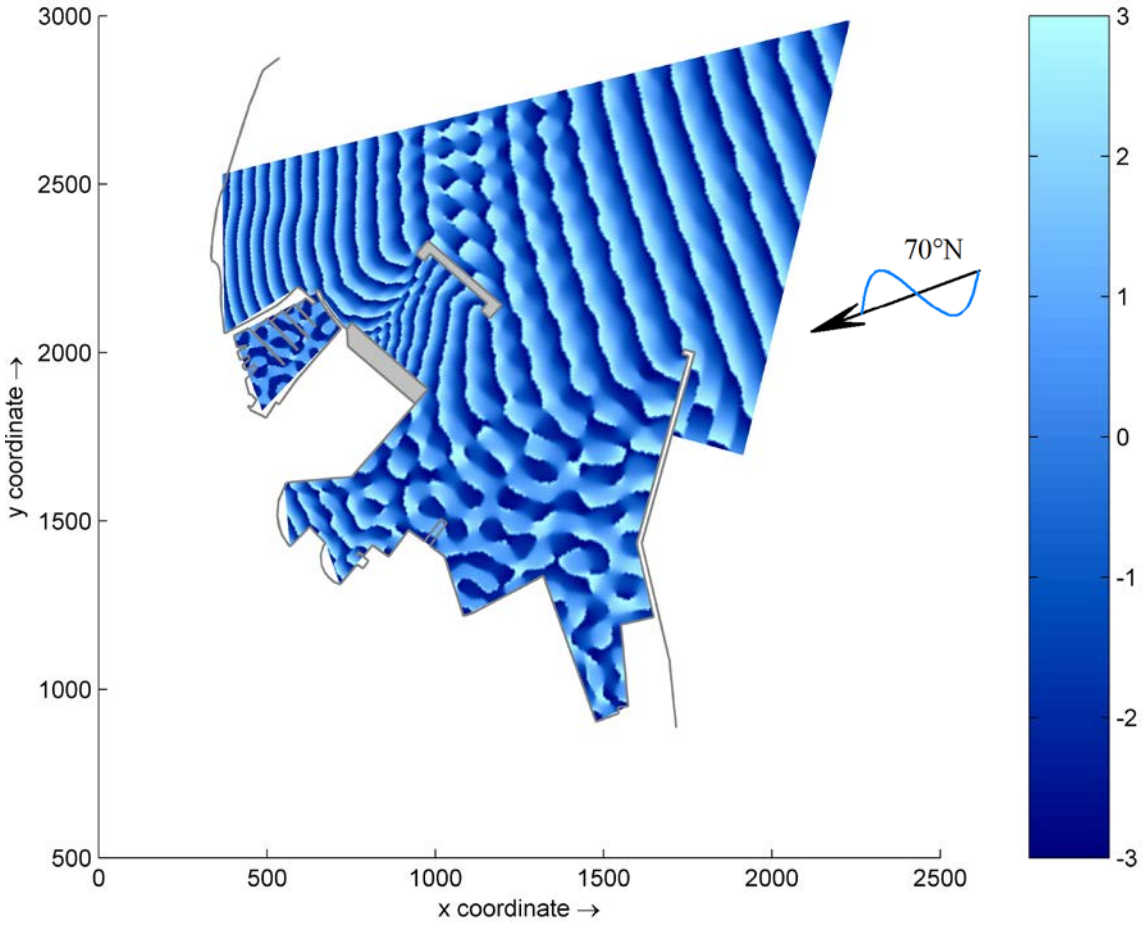


FIG. 7.27 - DISTRIBUZIONE DEI FRONTI D'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 70°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1B

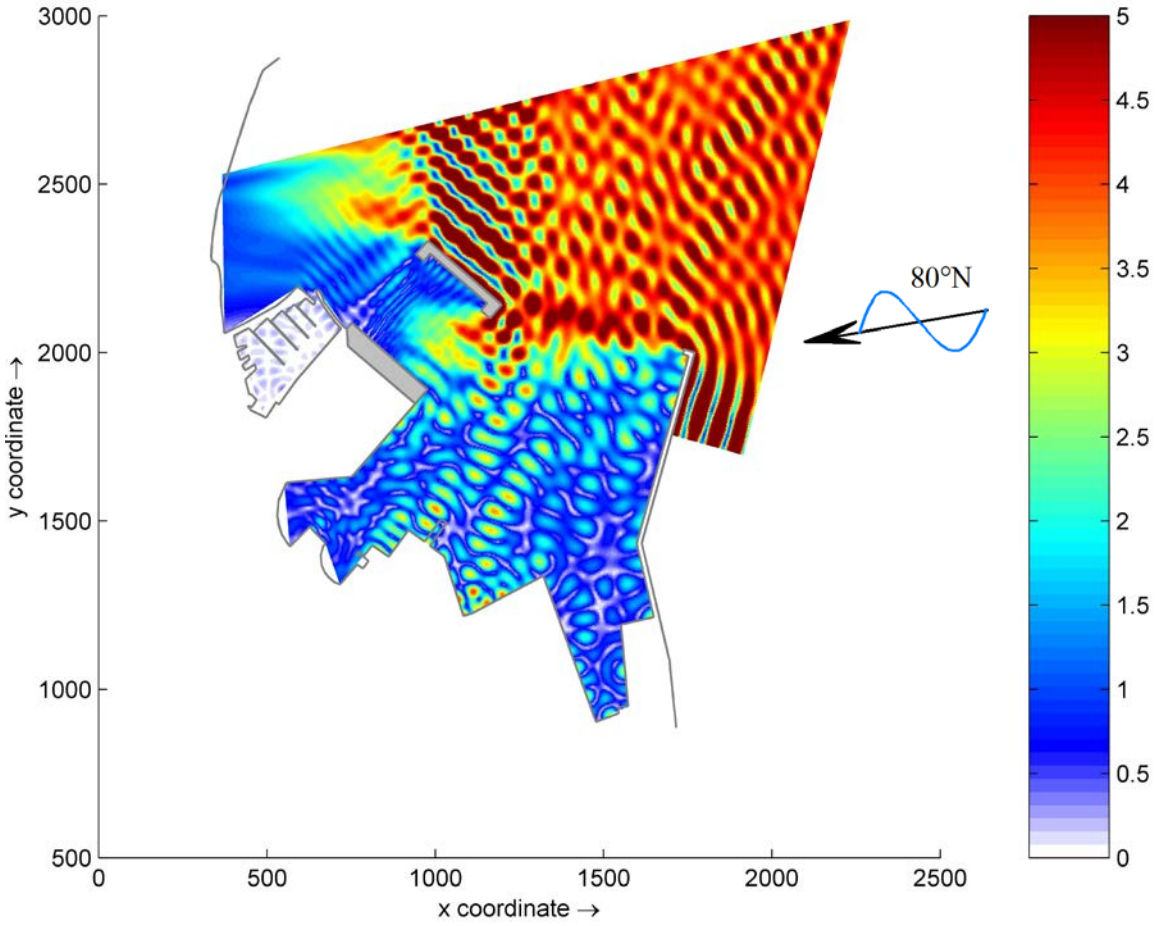


FIG. 7.28 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 80°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1B

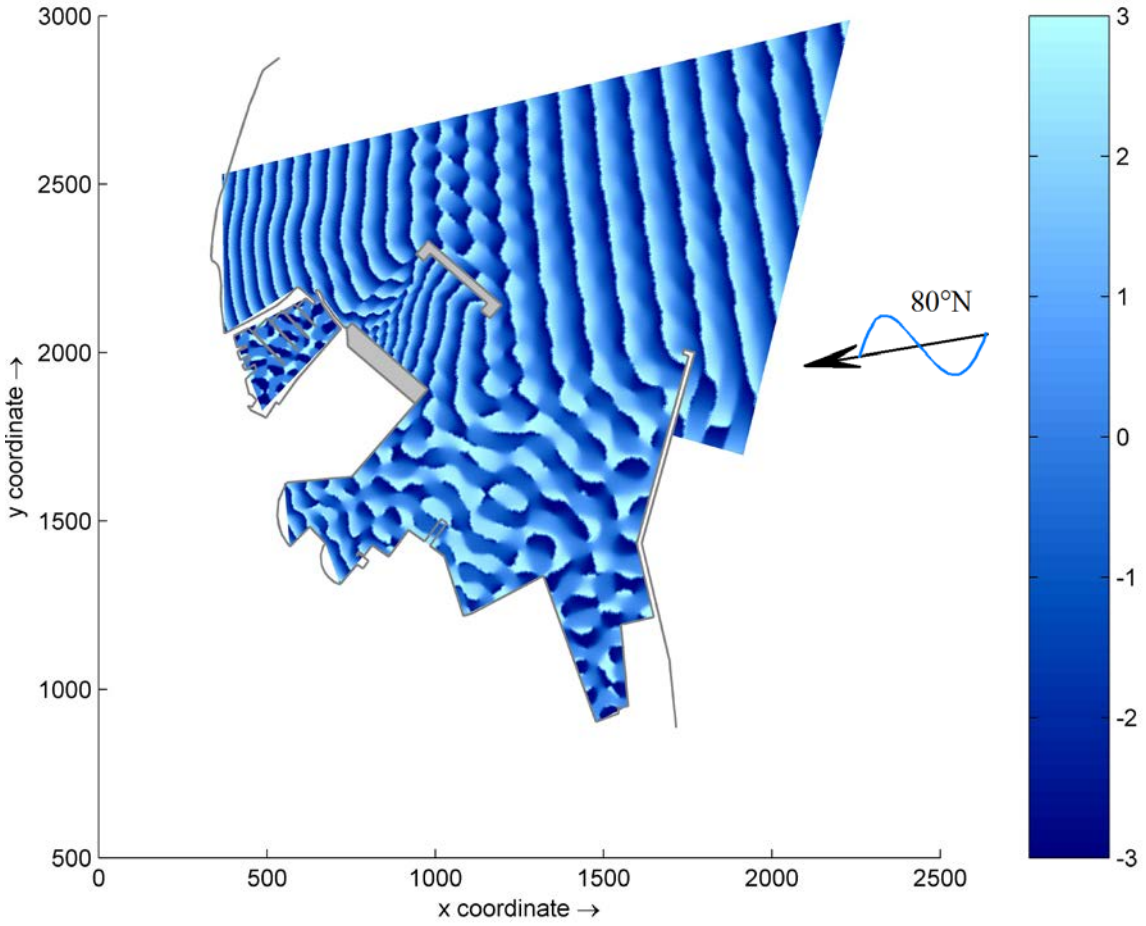


FIG. 7.29 - DISTRIBUZIONE DEI FRONTI D'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 80°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1B

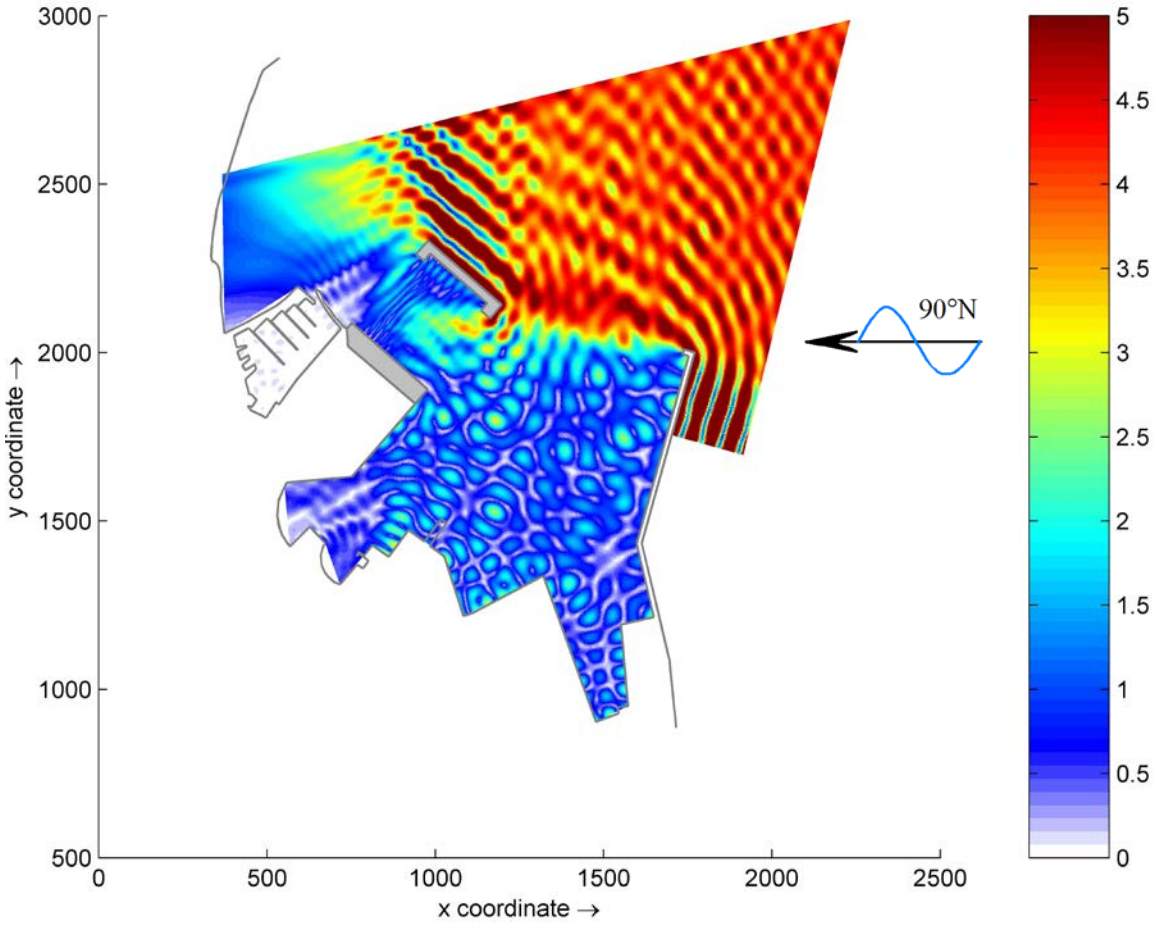


FIG. 7.30 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 90°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1B

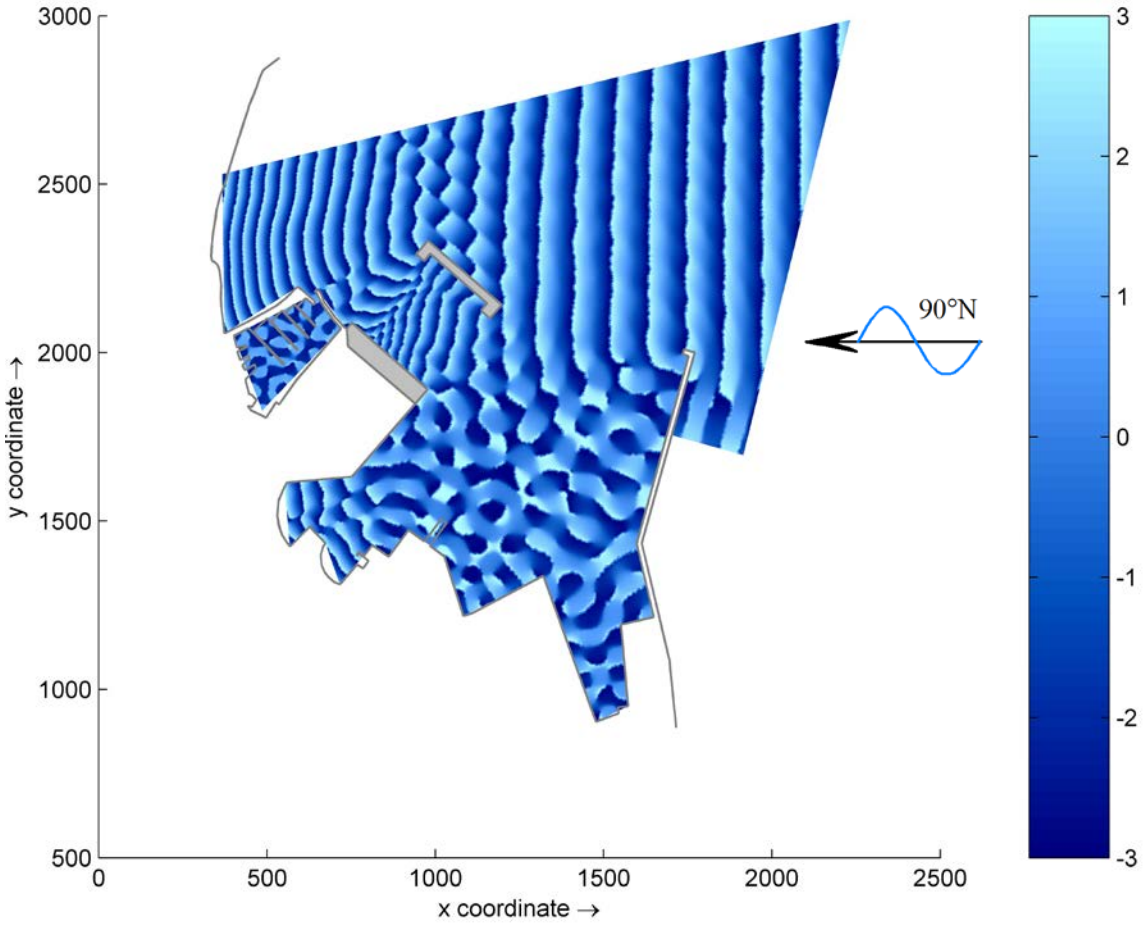


FIG. 7.31 - DISTRIBUZIONE DEI FRONTI D'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 90°N E TR=250 ANNI: HS=4,1 M , TP=9,8 S. CONFIGURAZIONE 1B

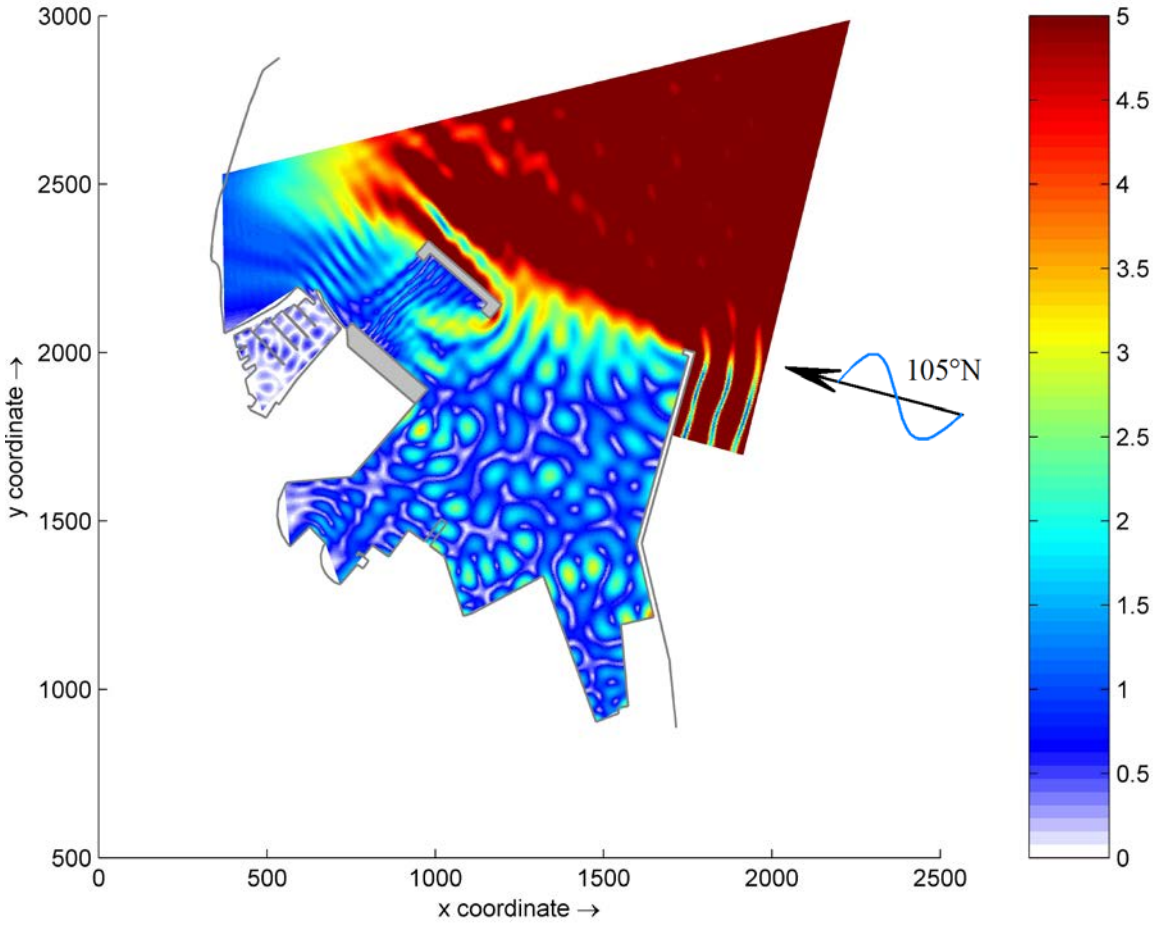


FIG. 7.32 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 105°N E TR=250 ANNI: HS=5,7 M , TP=11,6 S. CONFIGURAZIONE 1B

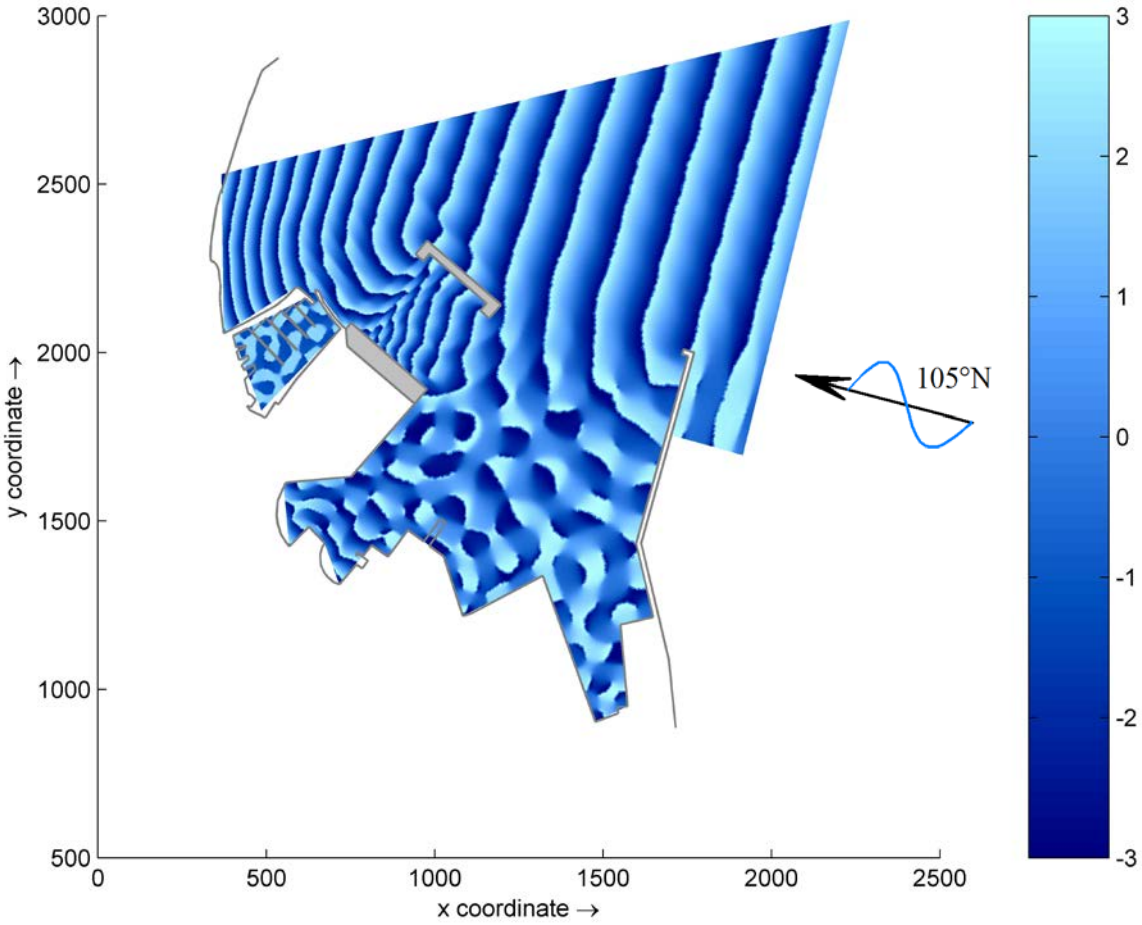


FIG. 7.33 - DISTRIBUZIONE DEI FRONTI D'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO CON PROVENIENZA 105°N E TR=250 ANNI: HS=5,7 M, TP=11,6 S. CONFIGURAZIONE 1B

7.5.2. Simulazioni e risultati ottenuti per le onde frequenti - Agitazione ondosa durante la fase costruttiva dell'area a giorno della piattaforma

Le simulazioni effettuate con il modello matematico per l'analisi dell'agitazione ondosa all'interno del bacino che verrà creato provvisoriamente per facilitare la posa in opera dei cassoni sommersi hanno riguardato eventi di moto ondoso caratterizzati da altezze d'onda significative relative al tempo di ritorno di 5 anni, provenienti dal 1° e 2° quadrante. Si è fatto riferimento in particolare alle direzioni d'onda di 70°, 80°, 90 e 105°N. Le caratteristiche delle condizioni ondose utilizzate come input nel modello sono riassunte nella seguente tabella.

TAB. 7.4 - CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO ESTREMO AL LARGO CONSIDERATE PER LE SIMULAZIONI

TR=5 anni		
Dir (°N)	*Hs (m)*	*Tp (s)*
70	2.3	7.3
80	2.3	7.3
90	2.3	7.3
105	3.1	8.6

Si presentano i risultati delle simulazioni condotte per un'altezza d'onda significativa avente tempo di ritorno 5 anni e con riferimento alla configurazione prevista per la fase di messa in opera dei cassoni sommersi la quale prevede:

- diga foranea esistente
- cassoni della Banchina Rinfuse in opera
- cassoni posizionati temporaneamente in opera in corrispondenza della Banchina Portacontenitori 2, a protezione dell'area a giorno della piattaforma

Il risultato di ciascuna simulazione è riportato nelle Fig. 7.34÷Fig. 7.37 che illustrano la distribuzione delle onde nella zona racchiusa tra la diga foranea e la nuova piattaforma.

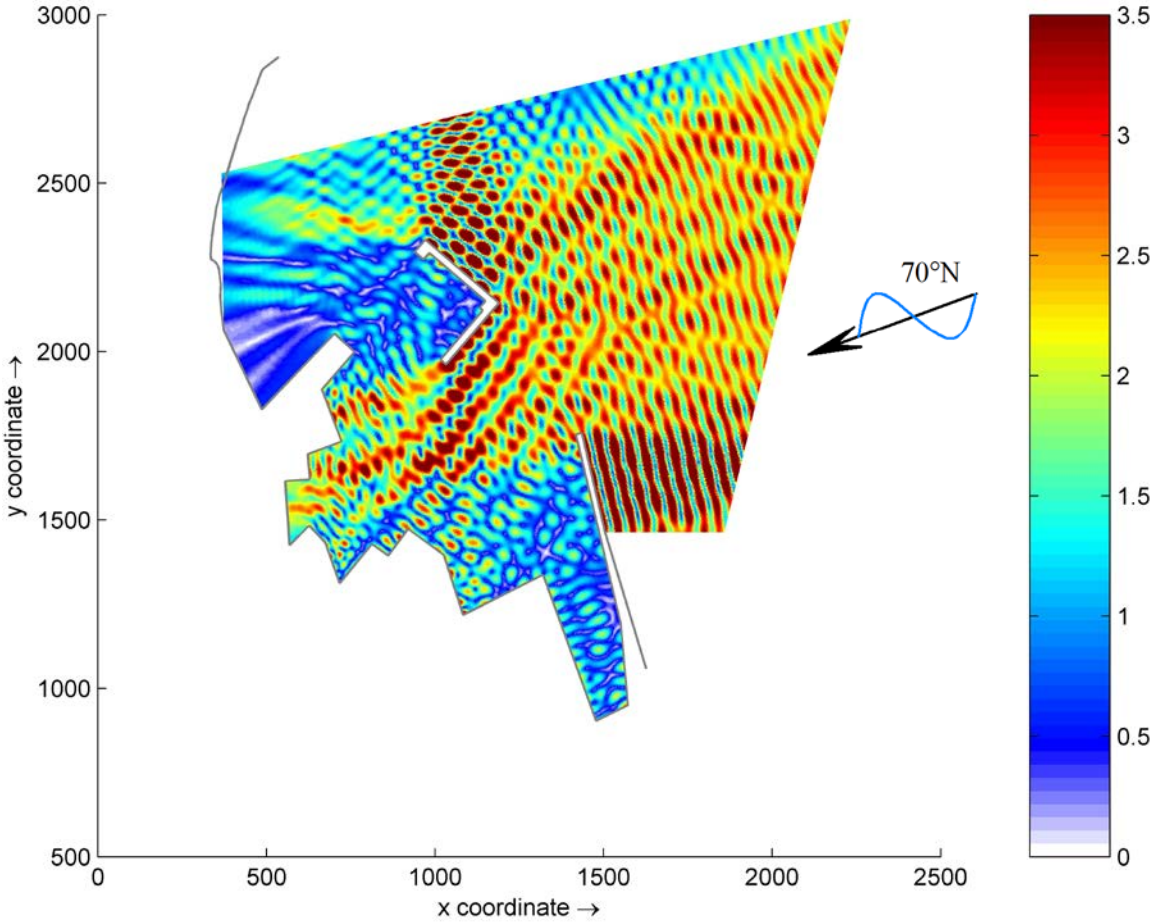


FIG. 7.34 - AGITAZIONE ONDOSA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESISTENTE - CARATTERISTICHE DELL'ONDA INCIDENTE CON PROVENIENZA 70°N: HS=2.3 M , TP=7.3 S. CONFIGURAZIONE 2

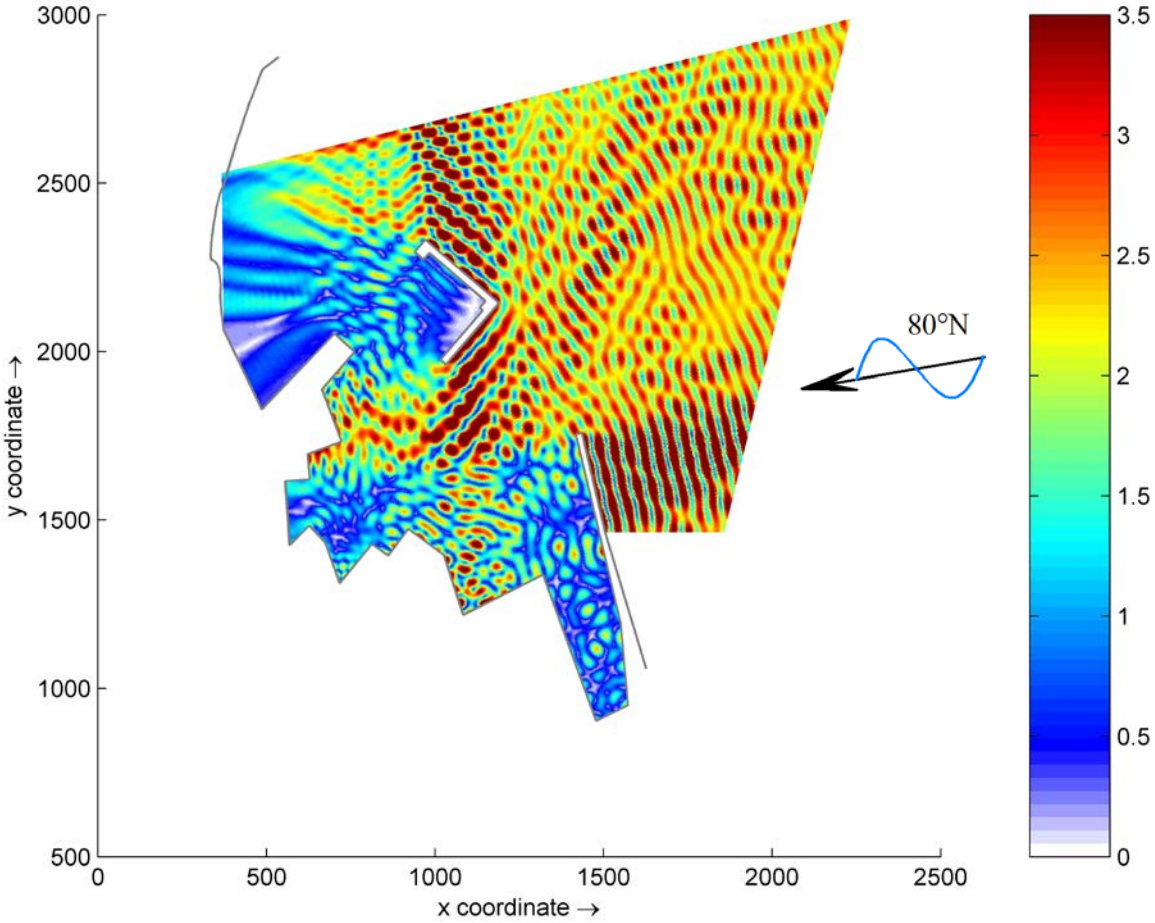


FIG. 7.35 - AGITAZIONE ONDOSA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESISTENTE - CARATTERISTICHE DELL'ONDA INCIDENTE CON PROVENIENZA 80°N: HS=2.3 M , TP=7.3 S. CONFIGURAZIONE 2

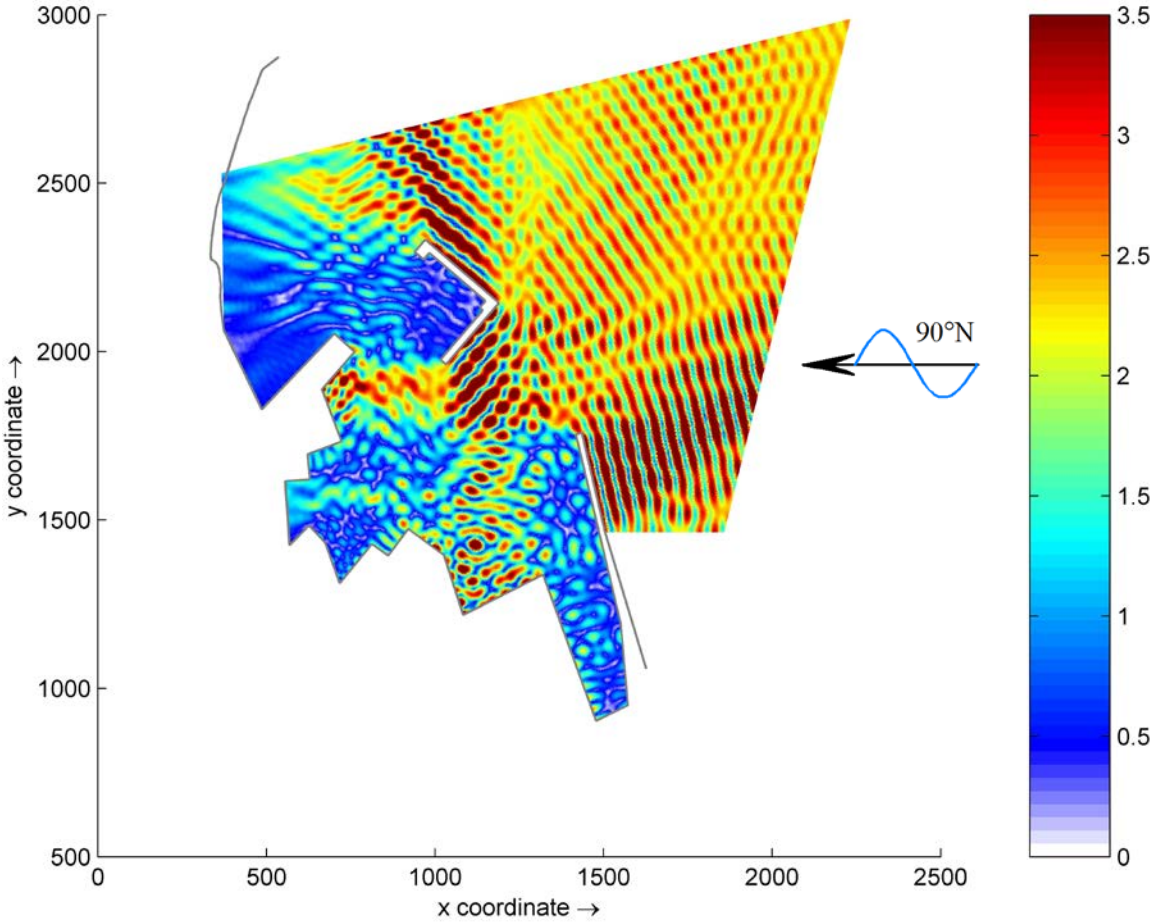


FIG. 7.36 - AGITAZIONE ONDOSA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESISTENTE - CARATTERISTICHE DELL'ONDA INCIDENTE CON PROVENIENZA 90°N: HS=2.3 M , TP=7.3 S. CONFIGURAZIONE 2

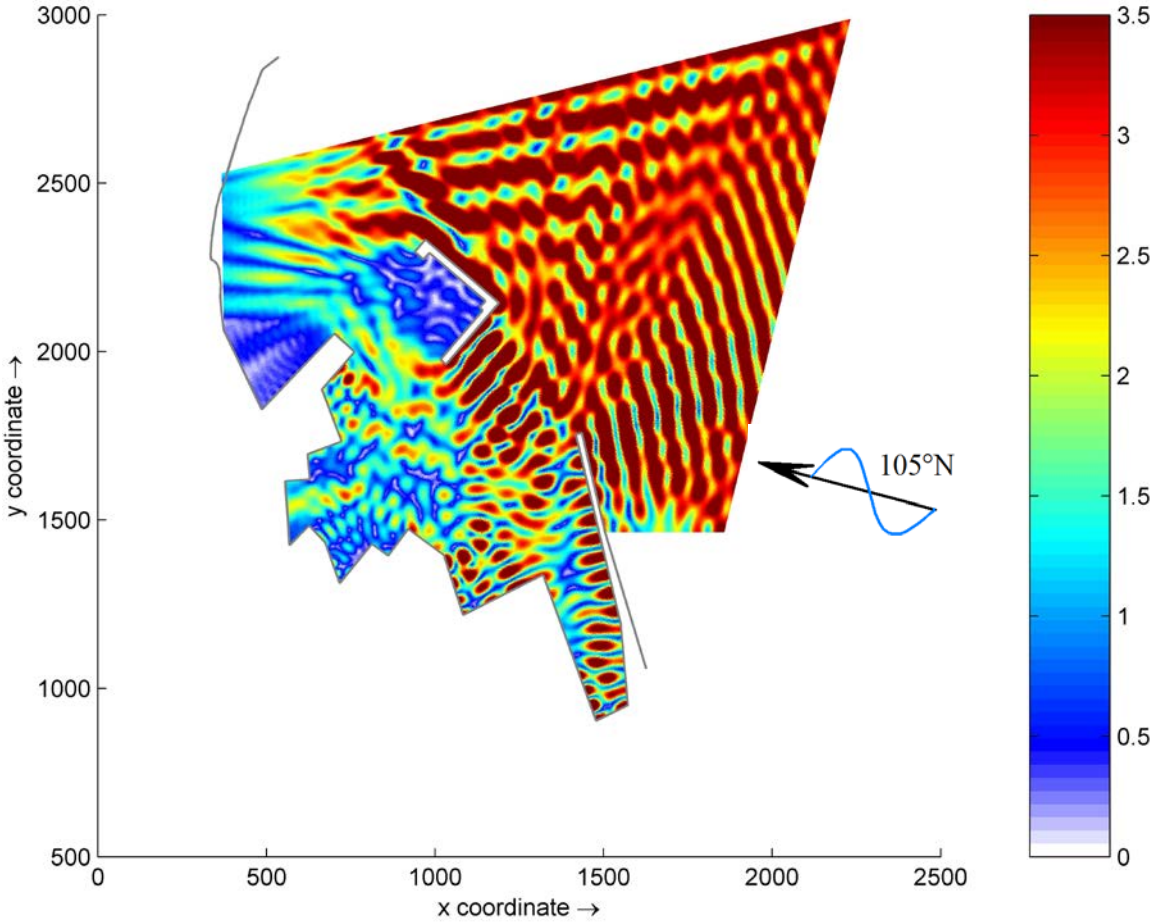


FIG. 7.37 - AGITAZIONE ONDOSA IN CORRISPONDENZA DELLA NUOVA PIATTAFORMA CON LA DIGA FORANEA ESISTENTE - CARATTERISTICHE DELL'ONDA INCIDENTE CON PROVENIENZA 105°N: HS=3.1 M , TP=8.6 S. CONFIGURAZIONE 2

8. ONDE DI PROGETTO PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE

Le caratteristiche delle onde di progetto in corrispondenza delle nuove opere sono state raggruppate per tipologia di struttura (vedi Fig. 8.1):

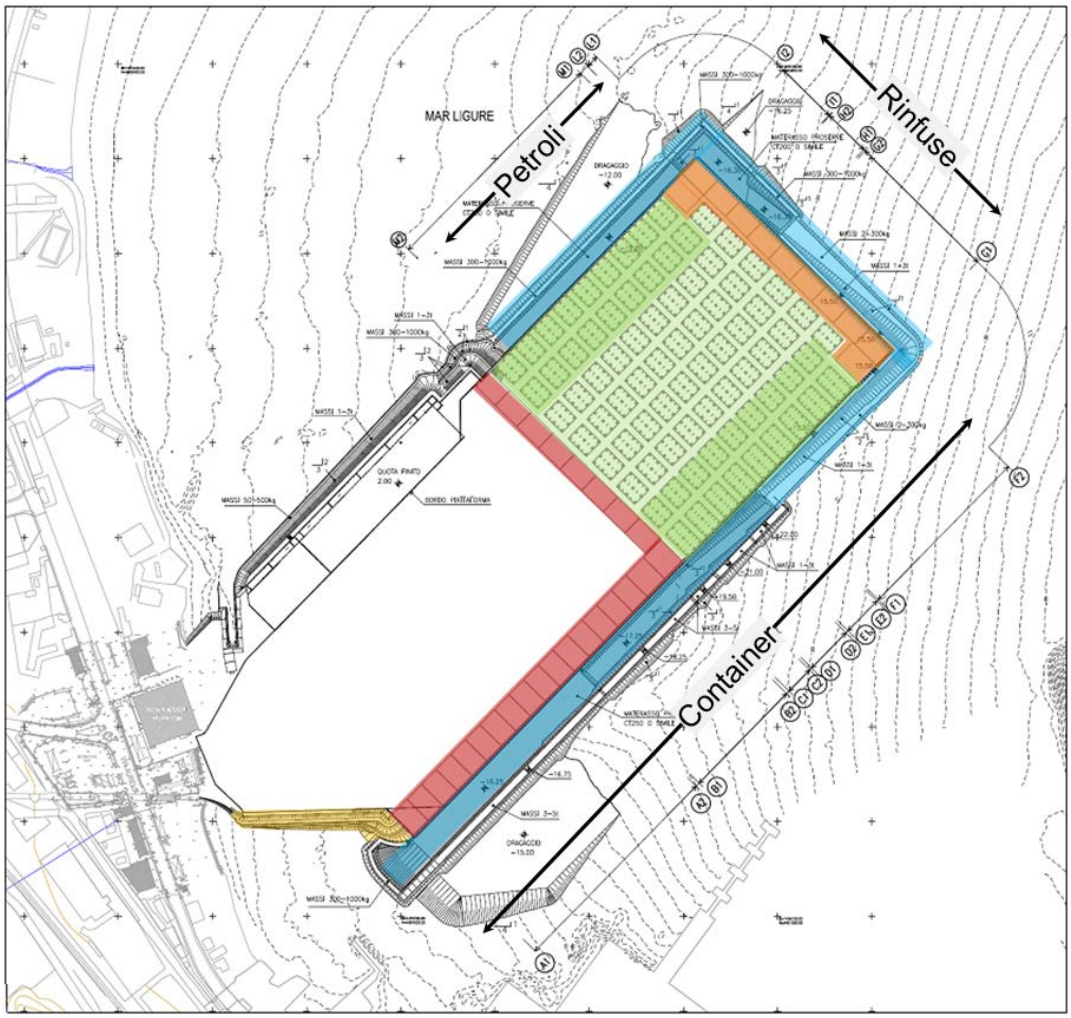
- Scogliera alla radice della piattaforma
- Cassoni emersi reggispinta
- Cassoni emersi costituenti la banchina rinfuse
- Cassoni sommersi
- Impalcato su pali
- Protezione dei fondali antistanti le banchine
- Protezione dei fondali all'interno della zona a giorno della piattaforma.

Come già definito nei paragrafi precedenti, per il dimensionamento strutturale delle suddette opere si è fatto riferimento a eventi di moto ondoso con tempo di ritorno di 5 anni, 100 anni e 250 anni, le cui caratteristiche al largo vengono riportate nella seguente tabella:

TAB. 8.1 - CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO ESTREMO AL LARGO CONSIDERATE PER LE SIMULAZIONI

TR=5 anni			**TR=100 anni**			**TR=250 anni**		
Dir (°N)	*Hs (m)*	*Tp (s)*	*Dir (°N)*	*Hs (m)*	*Tp (s)*	*Dir (°N)*	*Hs (m)*	*Tp (s)*
70	2.3	7.3	70	3.6	9.2	70	4.1	9.8
80	2.3	7.3	80	3.6	9.2	80	4.1	9.8
90	2.3	7.3	90	3.6	9.2	90	4.1	9.8
105	3.1	8.6	105	5.0	10.9	105	5.7	11.6

I valori delle altezze d'onda significative riportati nei seguenti sotto capitoli rappresentano, per ogni direzione di propagazione, i valori più alti calcolati per tipologia d'opera.



Protezione dei fondali antistante le banchine

Zona a giorno: impalcato su pali, cassoni sommersi, protezione dei fondali

Cassoni reggispinta

Cassoni emersi banchina rinfuse

Scogliera in radice piattaforma

FIG. 8.1 - SCHEMA DELLE STRUTTURE DELLA PIATTAFORMA

Le verifiche per il dimensionamento di ogni opera sono state effettuate con riferimento alle condizioni più gravose per ognuna delle tipologie strutturali, in funzione dell'altezza significativa e del periodo dell'onda incidente oltre che dell'angolo di attacco della stessa.

8.1.1. Scogliera alla radice della piattaforma

La scogliera alla radice della piattaforma, che protegge il terrapieno di raccordo tra la piattaforma e la terraferma, rientra tra le opere della fase 1 ed è stata dimensionata con riferimento ad un evento meteomarino caratterizzato da un tempo di ritorno di 100 anni.

I valori delle altezze d'onda significative riportati nelle tabella seguente rappresentano i valori più alti calcolati lungo lo sviluppo longitudinale dell'opera. Con riferimento a questi valori di moto ondoso sono state effettuate le verifiche per il dimensionamento della scogliera.

TAB. 8.2 - ONDE IN CORRISPONDENZA DELLA SCOGLIERA ALLA RADICE DELLA PIATTAFORMA

	Onda incidente				**Onda all'opera**
	Tr *anni*	*dir* *°N*	*Tp* *s*	*Hs* *m*	*Hs* *m*
Scogliera	100	70 105	9,2 10,9	3,6 5,0	0,8 0,5

8.1.2. Cassoni emersi reggispinta

La parte di piattaforma radicata a terra costituita da cassoni cellulari in c.a. reggispinta, rientra tra le opere della fase 1 ed è stata dimensionata con riferimento ad un evento meteomarino caratterizzato da un tempo di ritorno di 250 anni.

I valori delle altezze d'onda significative riportati nelle tabella seguente rappresentano i valori più alti calcolati lungo lo sviluppo longitudinale dell'opera. Con riferimento a questi valori di moto ondoso sono state effettuate le verifiche per il dimensionamento delle opere previste nella fase 1.

TAB. 8.3 - ONDE IN CORRISPONDENZA DEI CASSONI EMERSI REGGISPINTA

	Onda incidente				**Onda all'opera**
	Tr *anni*	*dir* *°N*	*Tp* *s*	*Hs* *m*	*Hs* *m*
Cassoni reggispinta	250	70 105	9,8 11,6	4,1 5,7	3,8 1,5

8.1.3. Cassoni emersi - Banchina rinfuse

In Tab. 8.4 sono riportati i valori delle onde incidenti sui cassoni emersi corrispondenti alle condizioni di moto ondoso al largo relative ad un tempo di ritorno di 250 anni.
Le condizioni più gravose al fine del dimensionamento delle suddette strutture, sono evidenziate in grigio. Si presenta inoltre, per ogni tipologia di cassone e per ogni condizione ondosa, l'angolo di incidenza β dell'onda rispetto alla normale all'opera.

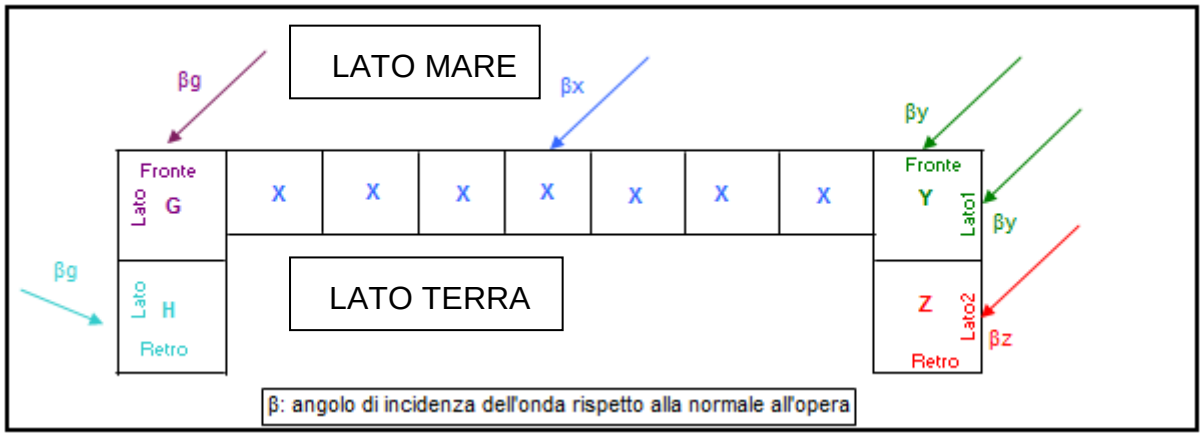


FIG. 8.2 - CASSONI EMERSI BANCHINA RINFUSE - SCHEMATIZZAZIONE E NOMENCLATURA

Nella Fig. 8.2 si riporta la schematizzazione delle 3 tipologie caratteristiche di cassoni previste per la realizzazione della banchina rinfuse.

TAB. 8.4 - ONDE IN CORRISPONDENZA DE I CASSONI EMERSI DELLA BANCHINA RINFUSE IN CONDIZIONE DI ESERCIZIO

	Onde di progetto							
	Onda al largo		**Onda incidente cassone tipo X**		**Onda incidente cassone Y**		**Onda incidente cassone Z**	
	Dir (°N)	*Tp* (s)	*β* (°)	*Hs* (m)	*β* (°)	*Hs* (m)	*β* (°)	*Hs* (m)
Cassoni emersi Banchina rinfuse	70	9.8	36	3.7	36 (54)*	3.10	54	3.7
	80	9.8	44	4.0	**44 (46)***	**5.0**	**46**	**5.0**
	90	9.8	**52**	**4.4**	52 (38)*	3.7	38	3.7
	105	9.8	64	4.4	64 (26)*	3.4	26	3.4

	Onde di progetto					
	Onda al largo		**Onda incidente cassone G**		**Onda incidente cassone H**	
	Dir (°N)	*Tp* (s)	*β* (°)	*Hs* (m)	*β* (°)	*Hs* (m)
Cassoni emersi Banchina rinfuse	30	5.0	(65)*	1.65	(65)*	1.65
	70	9.8	36	3.7	-	-
	80	9.8	44	4.0	-	-
	90	9.8	**52**	**4.4**	-	-
	105	9.8	64	4.4	-	-

* Il valore riportato tra parentesi fa riferimento al "lato" del cassone.

Dalla tabella precedente si evince come l'onda di progetto per i cassoni tipo X e G sia quella proveniente da 90°N mentre per il dimensionamento dei cassoni tipo Y e Z

l'onda di progetto risulta quella proveniente da 80°N. Per queste due direzioni si è quindi andata a valutare l'onda retrostante i cassoni della banchina rinfuse al fine di definire i carichi anche sul lato posteriore dei cassoni. Sul retro del cassone di tipo H si è invece considerato a favore della sicurezza che l'onda sia la stessa che incide il cassone.
Nella tabella seguente si riportano i risultati della suddetta analisi.

TAB. 8.5 - ONDE RETROSTANTI I CASSONI EMERSI DELLE BANCHINA RINFUSE IN CONDIZIONE DI ESERCIZIO

	Onda retrostante cassone tipo X, G	**Onda retrostante cassone Z**	**Onda retrostante cassone H**
	Hs *(m)*	*Hs* *(m)*	*Hs* *(m)*
Cassoni emersi Banchina rinfuse	1.5	0.75	1.65

8.1.4. Cassoni sommersi

I valori delle onde relative ad un tempo di ritorno di 5 e 250 anni incidenti sui cassoni sommersi sono riportate rispettivamente in Tab. 8.6 e Tab. 8.7.
Le condizioni ondose riportate sono le più gravose per il dimensionamento di ciascuna tipologia di cassone e sono differenziate per le due pareti del cassone su cui incide l'onda. Si presenta inoltre, per ogni condizione ondosa, l'angolo d'attacco β dell'onda rispetto alla normale a ciascuna delle due facce del cassone su cui incide l'onda.

TAB. 8.6 - ONDE DI PROGETTO PER I CASSONI SOMMERSI IN FASE DI COSTRUZIONE - TR 5 ANNI

	Quota imbasamento	**Onda al largo**	**Onda incidente**					
			Lato // banch. container			*Lato ⊥ banch. container*		
	(m)	*Dir (°N)*	*Hs (m)*	*Tp (s)*	*b (°)*	*Hs (m)*	*Tp (s)*	*b (°)*
Cassoni sommersi	-9,50	105	2,0	8,6	45	2,0	8,6	45
	-11,0	105	2,0	8,6	45	2,0	8,6	45
	-13,0	105	1,0	8,6	45	1,0	8,6	45
	-16,5	105	3,1	8,6	55	3,1	8,6	35

TAB. 8.7 - ONDE DI PROGETTO PER I CASSONI SOMMERSI IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO - TR 250 ANNI

	Quota imbasamento	**Onda al largo**	**Onda incidente**					
			Lato // banch. container			*Lato ⊥ banch. container*		
	(m)	*Dir (°N)*	*Hs (m)*	*Tp (s)*	*b (°)*	*Hs (m)*	*Tp (s)*	*b (°)*
Cassoni sommersi	-9,50	70	2,8	9,8	45	2,3	9,8	45
	-11,0 (2°fila)	80	3,5	9,8	45	3,0	9,8	45
	-11,0 (4°fila)	80	2,8	9,8	45	2,5	9,8	45
	-13,0	70	4,3	9,8	45	3,5	9,8	45
	-16,5	70	5,0	9,8	55	4,3	9,8	35

8.1.5. Protezione dei fondali - Fondali antistanti le banchine

I valori delle onde relative ad un tempo di ritorno di 250 anni incidenti sulle varie banchine lungo le quali è prevista la protezione del fondale sono riportate in Tab. 8.8. Le condizioni più gravose per il dimensionamento della protezione al piede delle opere sono evidenziate in grigio.

TAB. 8.8 - RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PER LE ONDE DI PROGETTO INCIDENTI LA PIATTAFORMA

			Onda incidente banchine							
	Onda al largo		**Container** tratto in cassoni reggispinta		**Container** tratto in cassoni sommersi		**Rinfuse**		**Petroli**	
	Dir *(°N)*	*Tp* *(s)*	*β* *(°)*	*Hs* *(m)*	*β* *(°)*	*Hs* *(m)*	*β* *(°)*	*Hs* *(m)*	*β* *(°)*	*Hs* *(m)*
Protezione del fondale	30	5.0	-	-	-	-	-	-	**65**	**1.65**
	70	9.8	**50**	**2.5**	**53**	**5,0**	36	4.0	-	-
	80	9.8	46	1.5	**45**	**4,6**	44	4.0	-	-
	90	9.8	45	1.0	36	3,7	**52**	**4,4**	-	-
	105	11.6	40	1.0	35	3,0	64	4,4	-	-

Come periodo per le onde di progetto incidenti le banchine si assumono gli stessi periodi dell'onda al largo.

8.1.6. Protezione dei fondali - Fondali sotto alla piattaforma

Per quanto riguarda l'area sotto la piattaforma, anche in questo caso si considera l'onda di progetto avente tempo di ritorno di 250 anni. Dall'analisi dei risultati delle simulazioni di agitazione ondosa condotte con il modello matematico PHAROS, e calibrate con riferimento alle simulazioni eseguite su modello fisico è emerso che l'onda avente direzione la largo 80°N, a cui corrisponde un Hs=4.1 m e Tp=8.9 s, è quella che propagandosi sotto la piattaforma crea il campo d'onda più gravoso ai fini del dimensionamento della protezione del fondale.

In Fig. 8.3 si illustra in modo schematico la distribuzione dell'altezza dell'onda sotto la piattaforma in relazione alle diverse quote d'imbasamento dei cassoni e ai materiali che lo costituiscono.

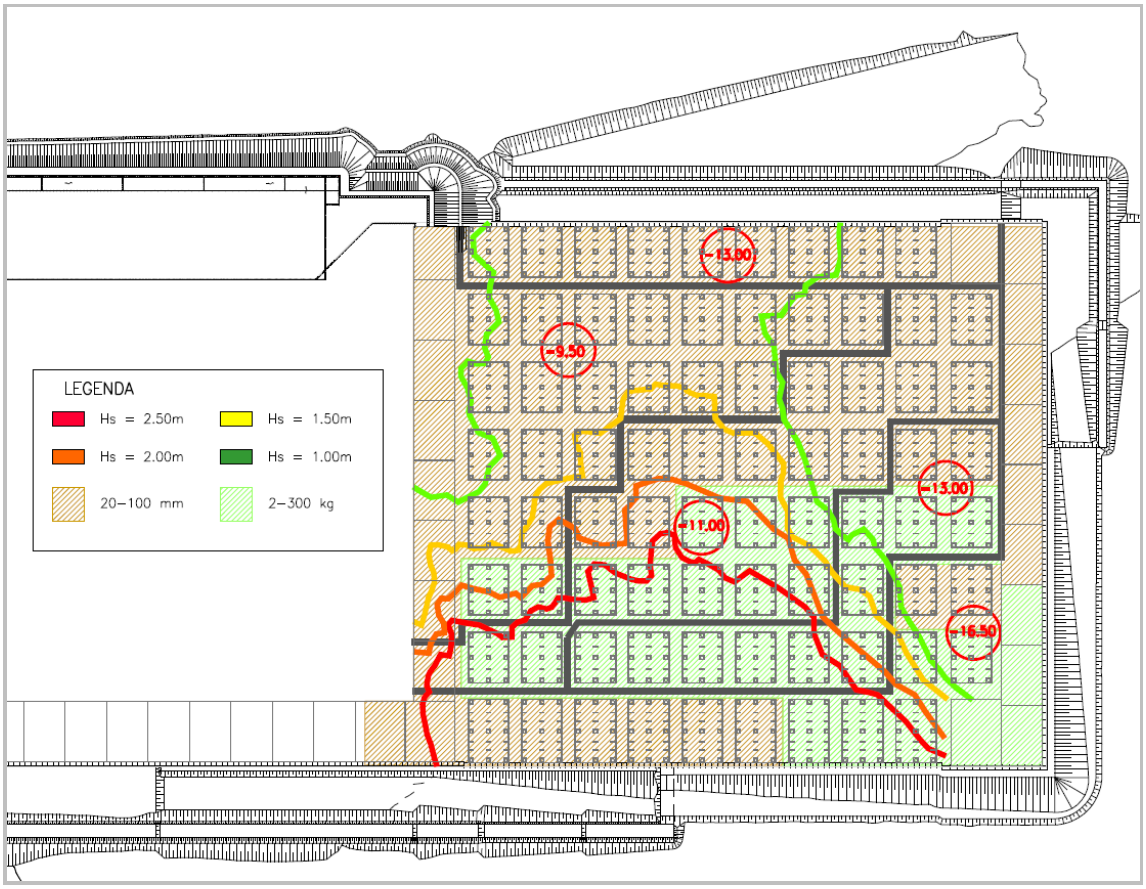


FIG. 8.3 - DISTRIBUZIONE DELLE ALTEZZE D'ONDA SOTTO LA PIATTAFORMA IN FUNZIONE DELLE QUOTE D'IMBASAMENTO DEI CASSONI

Dall'analisi dei campi d'onda è possibile andare a definire le onde di progetto in corrispondenza cassoni in funzione della loro quota e materiale di imbasamento, che serviranno per andare a verificare la stabilità del materiale di fondazione.

Di seguito si riportano due tabelle riassuntive delle condizione d'onda di progetto. La prima, Tab. 8.9, presenta le onde di progetto in corrispondenza delle prima due file di cassoni (quelle perimetrali) sia per la banchina container che per la banchina petroli, mentre in Tab. 8.10 si riportano le onde di progetto nell'area interna della piattaforma.

TAB. 8.9 - ONDE DI PROGETTO PER LA PROTEZIONE DEI FONDALI NELLE AREE PERIMETRALI SOTTO LA PIATTAFORMA -TR=250 ANNI

					Onde di progetto		
	Banchina	**Imbasamento cassone**	**Fila**	**Onda al largo**		**Imbasamento in 20-100 mm D_{n50}=65mm**	**Imbasamento in 2-300 kg D_{n50}=300 mm**
				Dir	*Tp*	H_s	H_s
		(m.s.l.m.m)		*(°N)*	*(s)*	*(m)*	*(m)*
Protezione fondali aree perimetrali sotto la piattaforma	Container	-16,5	1°	80	9,8	3,5	5,0
		-13,0	2°	80	9,8	-	4,3
		-11,0	2°	80	9,8	-	3,5
	Petroli	-13,0	1°	80	9,8	1,5	-
		-13,0		30	5,0	1,65	-
		-9,5	2°	80	5,0	1,5	-

TAB. 8.10 - ONDE DI PROGETTO PER LA PROTEZIONE DEI FONDALI NELLE AREE INTERNE SOTTO LA PIATTAFORMA - TR=250 ANNI

			Onde di progetto		
	Imbasamento cassone	**Onda al largo**		**Imbasamento in 20-100 mm D_{n50}=65mm**	**Imbasamento in 2-300 kg D_{n50}=300 mm**
			Tp	H_s	H_s
	(m.s.l.m.m)	*Dir*	*(s)*	*(m)*	*(m)*
Protezione fondali aree interne sotto la piattaforma	-16,5	80	9,8	1,0	-
	-11.0	80	9,8	2,4	2,5
	-13.0	80	9,8	1,0	1,5
	-9.5	80	9,8	2,0	2,3

8.1.7. Impalcato su pali

I valori delle onde in corrispondenza dell'impalcato su pali, relativamente ad un tempo di ritorno di 250 anni, sono riportate in Tab. 8.11.
Nella tabella sono differenziate le condizioni ondose che incidono l'impalcato fronte mare da quelle che si verificano in corrispondenza delle porzioni più interne di impalcato. Come si può notare dalla schematizzazione riportata in Fig. 8.4, le diverse porzioni di impalcato risultato delimitate tra due giunti consecutivi della soletta (rappresentati dalle linee bianche in Fig. 8.4), in direzione parallela e trasversale alla banchina container.
Le condizioni ondose più gravose in corrispondenza delle diverse porzioni di impalcato sono evidenziate in grigio in Tab. 8.11.

TAB. 8.11 - RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PER LE ONDE DI PROGETTO IN CORRISPONDENZA DELL'IMPALCATO SU PALI - TR 250 ANNI

	Onda al largo	**Onda incidente**					
		Impalcato fronte mare		*Impalcato interno 1*		*Impalcato interno 2*	
	Dir (°N)	*Hs (m)*	*Tp (s)*	*Hs (m)*	*Tp (s)*	*Hs (m)*	*Tp (s)*
Impalcato su pali	70	**5,0**	**9,8**	**4,3**	**9,8**	**2,8**	**9,8**
	80	**4,6**	**9,8**	**4,3**	**9,8**	**2,8**	**9,8**
	90	3,7	9,8	3,5	9,8	2,5	9,8
	105	3,0	11,6	2,8	11,6	2,4	11,6



FIG. 8.4 - SCHEMATIZZAZIONE IMPALCATO

9. APPENDICE 1: QUALITY STATEMENT: UK MET OFFICE WAVE MODEL ARCHIVE

The Met Office Wave Model Archive consists of the hindcast fields of winds and waves produced during the operation of the atmospheric and wave model forecast suite. To produce the best possible analysis of surface wind, all available reports of surface pressure, wind speed and direction (from ships, buoys, platforms and land stations) are subjected to a range of consistency checks before being assimilated into the model's analysis. The resulting wind field is then used to modify the wave field derived from earlier timesteps. For each of the 16 directional and 13 frequency bands, the changes in wave energy are computed at each gridpoint, using the local wind as energy input, and allowing for propagation, dissipation and transfer between spectral bands. The model is a so-called 'Second Generation' model, where the spectral shape is empirically defined and then allowed to evolve over time. For further details see Golding (1983) and Francis (1985). There are two versions of the wave model, both in operation since 1986 - one covers the Global oceans and the other European waters.

The **Global Wave Model** initially operated with an assumed fixed depth (200m) on a lat/long grid. The analysed fields of wind and 1-dimensional spectra (ie energy within each spectral band, plus a mean direction for that band) have been archived, initially at 12-hour intervals and subsequently (since June 1988) at 6-hour intervals. The spatial resolution was initially approx 150km (13.8k gridpoints). This was improved in June 1991, to approx 90km (37.3k gridpoints), and yet again in May 1999 to a resolution of around 55km, with depth-dependency. The enhanced resolution now allows sheltered seas (eg Persian Gulf, Caspian Sea) to be covered by the model and narrow waterways (eg Straits of Taiwan) are now handled more realistically.

Nested within the Global Wave Model, and taking boundary conditions from it, is a **European Waters Wave Model**. This is a depth-dependent second-generation model operating on a lat/long grid with spacing approx 25km (8.5k gridpoints). The model covers West European waters to 14degW between 30.5N and 66.7N and also covers the Mediterranean and Baltic Seas; the Black Sea was added in 1993. Wind and wave

hindcast values were archived initially at 6-hour intervals and since June 1988 at 3-hour intervals.

Output at each timestep consists of wind speed and direction, plus **either**:
1-dimensional spectrum (energy and mean direction in each of the 13 spectral bands) **or** the conventional integrated variables derived from the spectrum (ie significant wave height, period and direction for both windsea and swell, together with resultant height and period).

The archived timeseries can be supplied at specified gridpoints. A range of analysis software has been developed to meet the needs of users who require data to be summarised in a convenient manner.

Since the winds are taken from the lowest level of the Atmospheric Model, they represent conditions approx 20m above mean sea level.

As with any operational model, there have been many small-scale improvements incorporated over the years. Most of these are introduced for computational reasons, to improve the efficiency of the calculations, but some are more fundamental, particularly the incorporation of wave height data from the ERS-1 satellite into the Global Wave model analysis with effect from June 1993 (see Foreman et al, 1994). Further detail (and dates) of the more significant changes to the model's operation are available on request. Over the years there have been occasional interruptions to the operational routine due to mainframe malfunction. Consequently, there are some periods of missing data in the archive, most of them of 12 hours duration or less.

10. APPENDICE 2: MODELLO MATEMATICO PHAROS

computer program

PHAROS

wave agitation and harbour resonance

introduction

One of the most important aspects of harbour design is the extent to which both long and short waves penetrate to the berthing facilities. Moored ships may respond to these waves leading to downtime in the loading/unloading operations or even to damage of mooring lines or fenders. Resonant harbour response to long waves can be particularly onerous, since moored large ships may have a corresponding resonant response. PHAROS accurately predicts the short wave penetration around coastal structures (e.g. breakwaters) and the resonant behaviour of enclosed areas to incident long waves.

applications

The PHAROS package is a powerful program for the analysis of wave penetration and long-wave harbour resonance (seiching). Its application can be very useful to predict the expected wave conditions at the berths in a new harbour. It can also be used to analyse the source for wave or seiching problems in existing harbours and evaluate possible remedies. PHAROS models the following physical effects:

- diffraction
- refraction and shoaling due to water depth variation and over ambient currents
- partial reflection and transmission
- dissipation by wave breaking and bottom friction
- directional spreading

PHAROS has been successfully verified using the results of both experimental model tests and analytical solutions.

example



WL | delft hydraulics

computer program

theoretical background

PHAROS is based on the complete time-harmonic mild slope equation, which describes combined refraction / diffraction over an uneven bathymetry (Berkhoff, 1972). Optionally this can be extended with terms for current refraction and dissipation induced by wave breaking and bottom friction, which leads to the following basic ation:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[cc_g\frac{\partial\phi}{\partial x_j}\right]+2i\omega U_j\frac{\partial\phi}{\partial x_j}+$$
$$\left(k^2cc_g+\omega^2-\omega_r^2+i\omega\nabla\bullet\vec{U}\right)\phi=-i\omega_r W\phi$$

in which W is the source term for dissipation due to friction or breaking. Dissipation by wave breaking is calculated using the formulation of Battjes and Jansen (1978). Dissipation by bottom shear stress is modelled based on the formulation by Putnam and Johnson (1949).

Several types of boundary conditions have been implemented, such as partial reflection and combined reflection and transmission. Furthermore, the effects of directional spreading (short-crested waves) can optionally be accounted for. Special procedures are available to carry out computations for a large number of long wave periods to study long-wave resonance and seiching of harbours.

The basic equation is solved using a finite element method on a finite element grid consisting of triangles that covers the entire model area. This results in a system of equations relating the potential in each grid point to that at each of its neighbours. Two methods are available to solve the resulting matrix equation: direct Gauss elimination and an iterative procedure using Conjugent Gradients. The latter is more efficient for large problems.

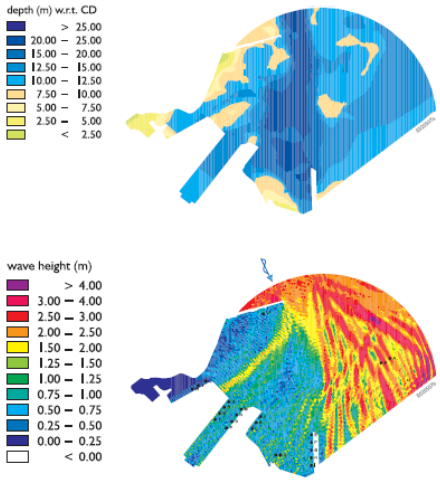
short waves

PHAROS is mostly used to assess wave agitation in harbours. Once the basic grid has been prepared, changes in the geometry (e.g extension of the breakwater), bathymetry or reflection properties are easily implemented. By repeating simulations for the modified layout, the effects of these changes on the wave heights in the harbour can be rapidly evaluated. In this way the design of the harbour can be optimised, e.g. by estimating the consequences for the downtime at the berths.

Many ports have been - and still are - designed using programs modelling only diffraction. Often this is an appropriate approach, but if the variations in the depth within the port, especially near the harbour entrance (dredged channel) are large refraction can be an essential factor. The example on this page shows waves coming from northwest (340°N) curving southwest towards the harbour basin due to refraction on the shoal near the head of the breakwater.

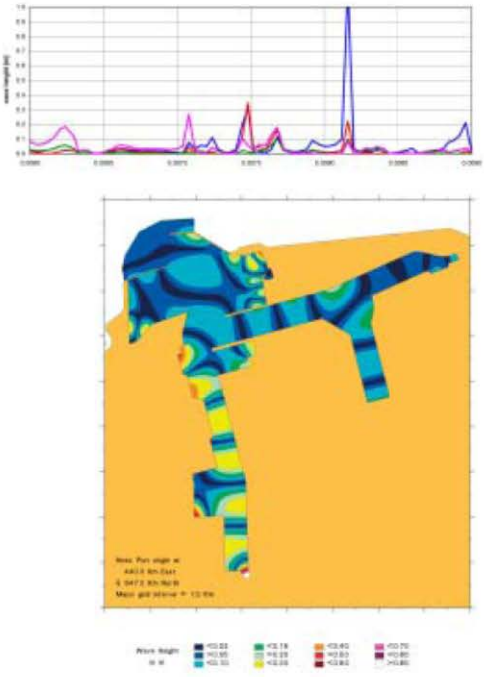
harbour resonance

Another important application of PHAROS is harbour resonance (seiching) studies. In several harbours around the world long waves are known to be a cause for problems either in the form of excessive motions of moored ships in apparently calm wave conditions, occasionally leading to breaking of mooring lines, or strong oscillating flows in the harbour entrance. Long wave energy outside the harbour e.g. due to wave grouping, can be amplified for certain frequencies by the geometry of the harbour basin.



Example where refraction on the shoal near the harbour entrance showed to be crucial for wave agitation in the SW-basin (incident wave coming from 340°N)

WL | Delft Hydraulics



Example of harbour resonance simulation:amplification at selected points as a function of the frequency (top) and wave height pattern for the highest peak (0.00816 Hz, T=122.5s)

The seiching module of PHAROS allows to determine possible resonance of long waves in the harbour for a range of frequencies. Physical processes that have a damping effect such as bottom friction and contraction losses (e.g. at the harbour entrance) can be included. By evaluating the amplification of the wave height or the water velocity at critical positions in the port, possible risks for moored ships can be determined and possible mitigating measures evaluated.

model organisation

The PHAROS program consists of a number of different modules:

- a user interface for input preparation and general control,
- a graphical grid editor to prepare the finite element grid,
- computational modules for long-crested, short-crested (directional spreading) and seiching computations, and
- WL | Delft Hydraulics' visualisation package GPP for presentation of results.

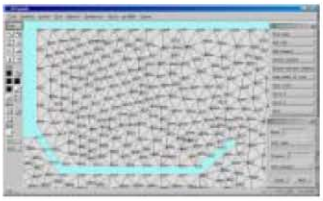
The user-interface integrates all the required functions to prepare, execute and analyse a simulation. It opens windows to prepare input, start the other modules as appropriate and provides support for case management.

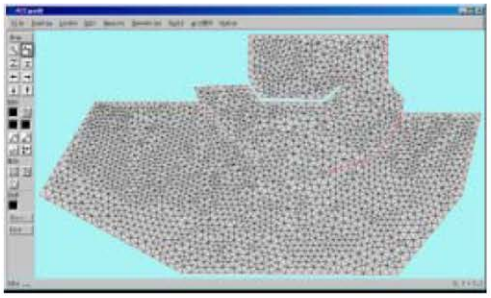
Starting from the contour of the area to be modelled and a file containing depth values in that area, the graphical grid generator can automatically generate the finite element grid. The dimensions of the cells will vary in size according to the local depth to obtain an optimal resolution of the grid. All sorts of options are available to check the quality and consistency of the grid and to modify the grid manually.

PHAROS has three modules to carry out the actual computations: one for a single run, one for simulations including directional spreading and one for harbour resonance computations. The three computational modules can be started directly from the user-interface, but they can also be run using script files (batch processing). This allows preparation of the required input for a number of simulations and execute the runs when convenient (e.g. overnight or in the weekend when the computer is not used for other purposes).

Delft-GPP is linked to the user interface for presentation of output results. With this tool, various type of plots can be made to analyse the simulations and present the results.

Overall view (bottom) and detail (top) of a grid in the graphical grid editor





WL | Delft Hydraulics