



**AUTORITA' PORTUALE**

**Marina di Carrara**

Ente di diritto pubblico - legge 28 gennaio 1994 n. 84

# **LAVORI DI ADEGUAMENTO TECNICO-FUNZIONALE DEL MOLO DI LEVANTE**

***PROGETTO DEFINITIVO***

**RELAZIONE TECNICA SPECIALISTICA:**

**STUDIO METEOMARINO**

			Committente: Autorità Portuale di Marina di Carrara
rev.	data	Progettista	Responsabile del Procedimento
	Luglio 2003	Ing. Paolo CONTINI	Ing. Ivano MELITO
		Collaboratori	
		Ing. Alessandro NUNZIATI Ing. Davide SALTARI	

## **INDICE**

1.	PREMESSE	1
2.	ANALISI DELLE CARATTERISTICHE METEOMARINE SULLA BASE DI STUDI E DATI ESISTENTI	3
2.1	Ubicazione geografica e traversie principali	3
2.2	Variazioni del livello marino (maree, sovralti)	8
2.3	Correnti	10
2.4	Raccolta ed analisi preliminare dei dati di vento	11
2.5	Caratteristiche del moto ondoso al largo. Raccolta ed analisi preliminare dei dati disponibili.	15
3.	REGIME DEL MOTO ONDOSI	19
3.1	Analisi del clima d'onda al largo	20
3.2	Propagazione sotto costa della serie ondometrica	28
3.3	Analisi statistiche degli eventi estremi al largo	34
3.4	Caratteristiche dell'onda di progetto a ridosso del Molo di Levante	37

## 1. Premesse

I lavori di adeguamento tecnico-funzionale del Molo di Levante comporteranno la realizzazione di una nuova scogliera il cui asse longitudinale è disposto circa 40 m lato mare rispetto alla scogliera attuale. Per la progettazione della nuova scogliera e la corretta identificazione delle condizioni di esercizio del Molo di Levante è indispensabile valutare le possibili condizioni di esposizione al moto ondoso (<sup>1</sup>).

I risultati del presente studio specialistico (art. 28 D.P.R. 554/99) sono propedeutici alla definizione dei parametri progettuali cui si è fatto riferimento per le attività di progettazione della nuova opera di difesa del Molo di Levante contraddistinta da una scogliera in massi naturali e massiccio paraonde in massi prefabbricati di calcestruzzo.

Per la realizzazione di detto studio il progettista Ing. Paolo Contini si è avvalso della collaborazione degli Ingg. Davide Saltari e Alessandro Nunziati nonché della struttura e tecnici della Società di Servizi di Ingegneria MODIMAR s.r.l..

Il presente studio ricalca sostanzialmente quello redatto nel 2000 nell'ambito della redazione del Piano Regolatore Portuale opportunamente revisionato ed adeguato non solo per quanto riguarda la serie di dati ondametrici aggiornata con ulteriori tre anni di misure (da luglio 1989 a giugno 2002), ma soprattutto per quanto riguarda le caratteristiche di propagazione del moto ondoso dal largo verso l'opera in esame al fine di fornire un quadro esaustivo delle condizioni di esposizione meteomarina del Molo di Levante.

I temi d'indagine principali sono stati così articolati:

- caratteristiche geo-orografiche del paraggio (traversia del sito costiero al largo del porto di Carrara);
- esposizione ai venti; esposizione al moto ondoso;
- variazioni dei livelli marini;
- simulazione, con tecnica inversa-spettrale, della propagazione del moto ondoso dal largo sino a ridosso della nuova scogliera.

Nella figura 1 è illustrata la localizzazione geografica del porto di Marina di

---

<sup>1</sup> Istruzioni Tecniche per la Progettazione delle Dighe Marittime, Ministero dei Lavori Pubblici, Consiglio Superiore, Pubbl. GNCDI n. 1450, 1996

Carrara e delle stazioni di misura considerate.

Si è fatto riferimento ad un ampio “ventaglio” di fonti di informazioni che comprende osservazioni visuali degli stati di vento e di mare, misure dirette di tipo anemometrico ed ondametrico.

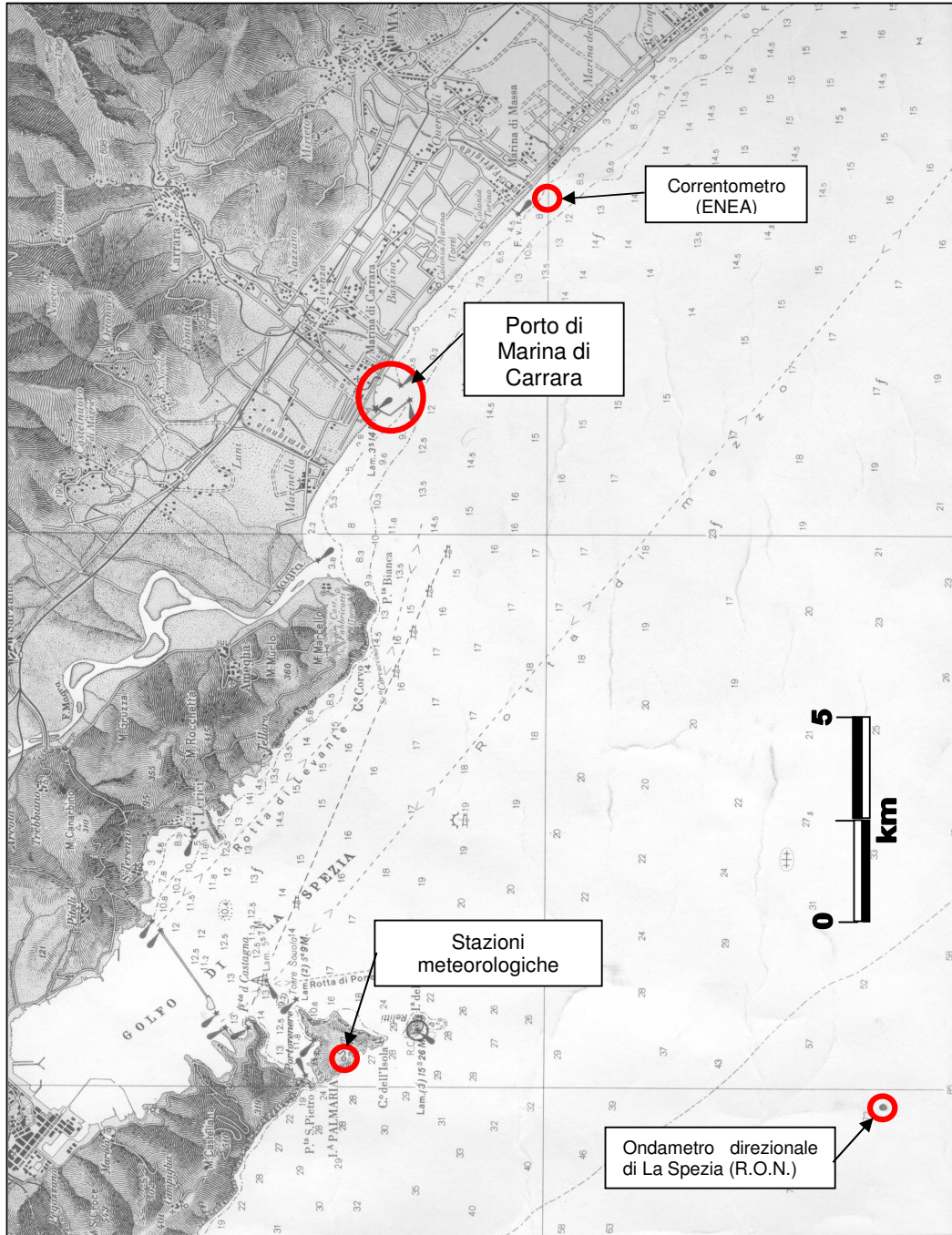


Fig. 1 – Inquadramento Geografico del porto di Marina di Carrara ed ubicazione delle stazioni meteo

## **2. Analisi delle caratteristiche meteomarine sulla base di studi e dati esistenti**

Per un primo inquadramento delle caratteristiche meteomarine si è fatto riferimento ai dati ed alle indicazioni derivate da studi precedenti nonché da atlanti tematici (Marina Militare, Aeronautica Militare e TCI/CNR). In particolare è stato esaminato ed utilizzato lo “Studio meteomarino di inquadramento del Porto di Marina di Carrara e del litorale di levante” commissionato dall’Autorità Portuale al Consorzio Pisa Ricerche.

Nei paragrafi successivi vengono illustrati i risultati conseguiti.

### ***2.1 Ubicazione geografica e traversie principali***

Il porto di Marina di Carrara ricade nell’unità fisiografica che si estende per circa 60 km dal promontorio di Punta Bianca (estrema propaggine dell’appennino ligure) a nord-ovest sino alle secche della Meloria (a ridosso delle quali è ubicato il porto di Livorno) a sud.

Ponendosi al largo di questi estremi geografici, in corrispondenza dell’ondametro direzionale di La Spezia (posto su fondali di circa 80 m distante circa 20 km dall’imboccatura del porto di Marina di Carrara), il sito è esposto principalmente a sud-ovest poichè la traversia geografica è confinata a sud dalle isole dell’arcipelago toscano. Più in dettaglio, la traversia geografica si affaccia (fig.2.a) sul mar Ligure centro-meridionale traguardando il mediterraneo occidentale (verso le isole Baleari) attraverso un settore di circa 40° limitato tra la costa meridionale della Francia (Isole di Hyeres a 250 °N) e quella settentrionale della Corsica (punta Revellata a 211 °N). Verso sud la traversia geografica raggiunge le coste orientali della Sardegna attraverso un limitato settore di 3°.

Per un’analisi più propriamente mirata alla valutazione delle condizioni di possibile esposizione agli stati di mare, è ormai prassi consolidata fare riferimento, in luogo dei settori di traversia geografica, al cosiddetto fetch efficace (porzione di mare che costituisce, sotto l’azione diretta dei venti, l’area di generazione delle onde e che quindi partecipa “efficacemente” alla

formazione dell'evento di moto ondoso). Detta "area di generazione" delle onde non può essere semplicemente assimilata alla distanza sopravvento della costa più vicina (fetch geografico). Infatti, già nel 1954 Saville ha messo in evidenza l'importanza, soprattutto per coste irregolari, della dimensione trasversale dell'area di generazione delle onde. Si è così introdotto il concetto di "fetch efficace", che è stato poi perfezionato sulla base delle conclusioni di campagne sperimentali (JONSWAP ed altre effettuate sui grandi laghi Nord Americani).

Da quanto premesso, con riferimento ai citati studi, nella definizione dei fetch efficaci si assume che:

- la potenziale distribuzione direzionale dello spettro di energia del moto ondoso abbraccia un settore di  $\pm 90^\circ$  rispetto alla direzione del vento;
- il vento trasmette energia nelle direzioni comprese nel suddetto settore con un contributo proporzionale al coseno dell'angolo  $\theta_m$  che queste formano con la direzione di propagazione, elevato ad una costante  $n$  dipendente dalla conformazione dell'area di generazione. Nel caso specifico si è assunto  $n = 2$  stante le caratteristiche particolari del fetch.

In definitiva si ha:

$$E(\theta_m) = \sum E(\theta) \cdot \cos^2(\theta - \theta_m) \quad \text{ove } |\theta - \theta_m| \leq \pi/2$$

Traducendo questa relazione energetica in termini di "fetch efficace", considerando che l'effettiva distanza va computata proiettando sulla direzione principale ( $\theta_m$ ) i fetch geografici delle direzioni contigue:

$$F_e(\theta) = F_g \cdot \cos(\theta - \theta_m)$$

per  $\theta = \theta_m \pm 90^\circ$

si ricava la seguente espressione:

$$F_e(\theta_m) = \frac{\int_{\theta_m - 90^\circ}^{\theta_m + 90^\circ} F_g(\theta) \cos^3(\theta - \theta_m)}{\int_{-90^\circ}^{90^\circ} \cos^2 \theta}$$

ove  $\theta_m = 10^\circ, \dots, 360^\circ N$

che fornisce la lunghezza del fetch efficace  $F_e(\theta_m)$  corrispondente alla direzione  $\theta_m$  in funzione dei fetch geografici  $F_g(\theta)$  e delle differenze angolari  $(\theta - \theta_m)$  per tutte le direzioni comprese nel settore di  $180^\circ$  centrato su  $\theta_m$ .

Nel contempo si definisce la legge di deviazione direzionale tra la direzione media del vento e la direzione del moto ondoso generato nell'ipotesi che:

- la direzione media del moto ondoso corrisponde alla direzione della componente spettrale associata al periodo di picco;
- il moto ondoso generato dal vento è ben definito e rappresentabile tramite le relazioni introdotte dalla campagna oceanografica JONSWAP (JOint North Sea WAve Project, Hasselmann 1976).

Si può affermare che la direzione media  $\beta$  del moto ondoso relativa alla direzione media di provenienza del vento  $\phi_w$  è individuata come il valore che rende massima la funzione:

$$f(\phi_w) = F_{e,\phi_w}^{0.28} \cdot (\cos \phi_w)^{0.44} \quad (2)$$

quindi per  $f'(\beta) = 0$  e  $f''(\beta) < 0$

Nei calcoli condotti <sup>(2)</sup> si è comunque considerata una lunghezza massima dei fetch geografici di 500 km, proporzionale alla massima estensione delle perturbazioni cicloniche che possono interessare il bacino del Mediterraneo. I risultati delle elaborazioni condotte (figg. 2.b, 3.a e 3.b e tab.1) mostrano che l'area di generazione del moto ondoso che può interessare il sito di Carrara ha un andamento abbastanza regolare e presenta un'estensione massima di circa 240 km secondo la direzione di  $230^\circ$  N (libeccio).

---

<sup>2</sup> Per il calcolo dei fetch efficaci è stato utilizzato il programma ENIF, sviluppato dalla MODIMAR S.r.l

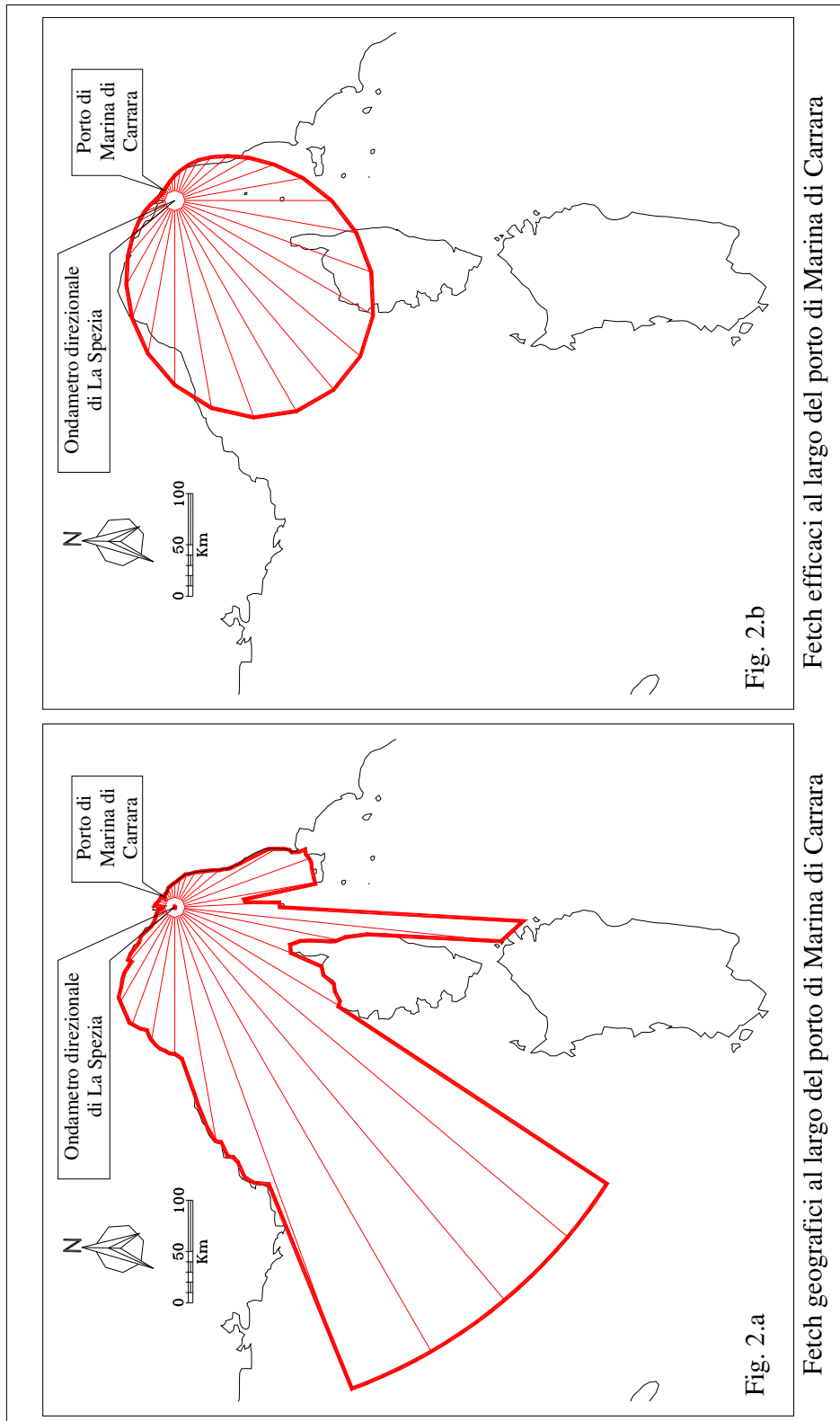


Fig. 2 - Caratterizzazione della traversia al largo del Porto di Marina di Carrara (in corrispondenza dell'ondametro di La Spezia)



**Tab. 1 - Settori di traversia al largo del Porto di Marina di Carrara**

Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)	Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)
0	11.46	19.63	-46.0	180	102.27	152.90	21.0
10	18.76	16.40	-46.0	190	168.52	179.47	17.0
20	16.87	14.60	-43.0	200	120.37	203.73	13.0
30	16.60	13.95	-41.0	210	185.09	223.24	9.0
40	15.61	14.13	17.0	220	500.00	236.04	5.0
50	15.32	14.87	30.0	230	500.00	240.85	0.0
60	16.49	16.08	35.0	240	500.00	237.09	-4.0
70	19.52	17.87	38.0	250	500.00	224.94	-8.0
80	21.63	20.59	37.0	260	231.23	205.32	-13.0
90	23.97	24.50	36.0	270	143.11	180.00	-17.0
100	28.19	29.74	36.0	280	131.54	151.42	-21.0
110	34.25	36.72	37.0	290	121.36	121.98	-25.0
120	39.40	45.30	38.0	300	106.30	94.54	-29.0
130	45.70	55.34	37.0	310	68.20	71.52	-33.0
140	56.50	67.65	35.0	320	35.40	53.65	-37.0
150	113.64	83.30	32.0	330	22.40	40.55	-41.0
160	139.18	102.96	29.0	340	19.01	31.25	-44.0
170	138.64	126.62	25.0	350	16.85	24.50	-45.0

Fig. 3.a

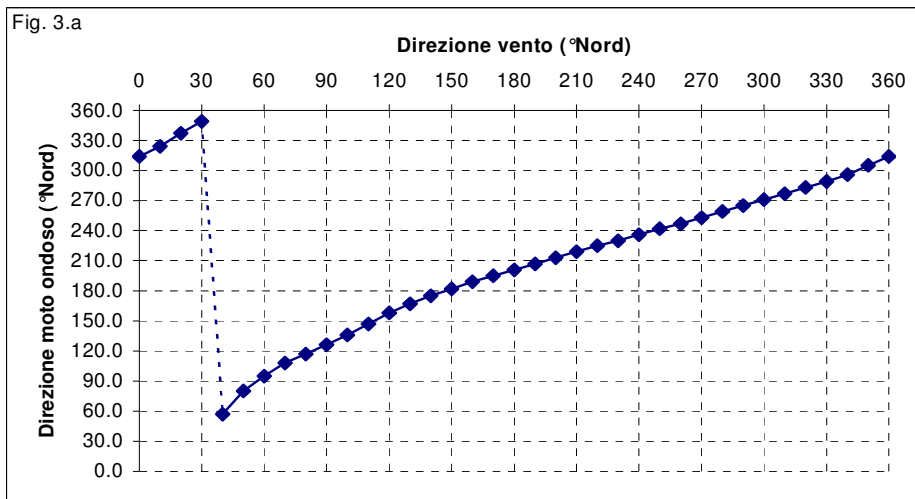
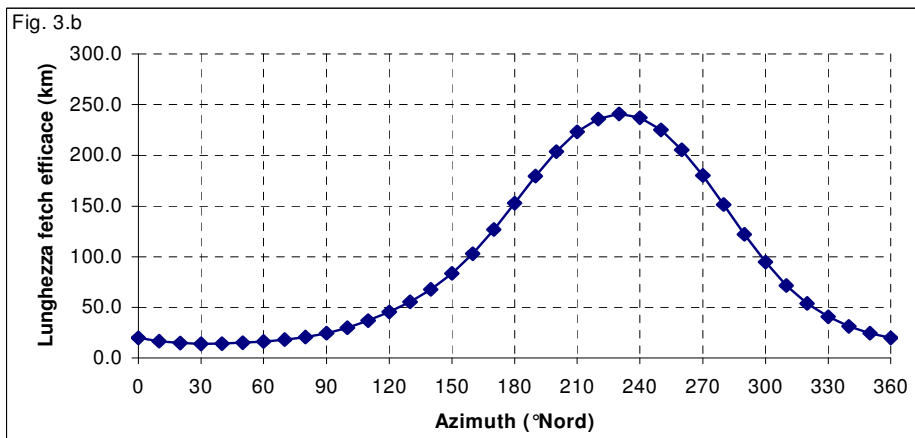


Fig. 3.b



## **2.2 Variazioni del livello marino (maree, sovralti)**

La conoscenza delle massime variazioni quasi-statiche del livello marino, dovute a cause diverse (principalmente marea astronomica e "meteorologica"), è necessaria per molteplici scopi quali: la corretta progettazione delle quote da assegnare ad eventuali opere di difesa; la determinazione dell'altezza limite di swash (quota della spiaggia emersa raggiunta dal mare). In generale per quanto riguarda le variazioni a breve termine, periodiche e non, occorre distinguere gli effetti della marea astronomica da quelli della marea "meteorologica" (indotta essenzialmente dall'azione del vento e dalle variazioni di pressione atmosferica). Nella zona del Mar Ligure ove ricade il paraggio costiero in esame le escursioni del livello del mare sono di fatto modeste.

Per la stima della componente oscillatoria della marea astronomica le ampiezze ed i tempi di marea sono prevedibili per alcuni porti principali italiani in funzione delle "Tavole di Marea" pubblicate annualmente dall'Ufficio Idrografico della Marina Militare. Per il caso in esame si possono utilizzare i dati forniti per i porti di La Spezia e Livorno tra i quali ricade il porto in esame. L'andamento temporale risultante è di tipo semidiurno (periodo 12 ore e 30 minuti) con due alte maree e due basse maree al giorno di ampiezza diversa (marea di tipo sinodico-declinazionale). Le escursioni di marea astronomica sono contraddistinte da una periodicità bimensile distinta nelle fasi di sizigie (luna piena e nuova) e di quadratura. Nei periodi sizigiali si verificano i massimi dislivelli positivi e negativi che raggiungono valori di circa 0.18 m rispetto al livello medio marino (massimo dislivello assoluto pari a circa 0,36 m). Nelle fasi di quadratura l'escursione è al massimo limitata a  $\pm 0.15$  m s.l.m.. Mediamente l'oscillazione di marea da assumere (dislivello tra il minimo ed il massimo livello diurno) è di 0.30 m.

Per la definizione della marea meteorologica si distinguono:

- sovralto barico: considerata una condizione di minimo barico (legata al passaggio dei centri di bassa pressione caratterizzanti i cicloni) pari a 975 mb rispetto ad una condizione media di 1013 mb ne consegue (da un punto di vista prettamente statico) un effetto di sovralto marino massimo pari a 0.38 m;

- sovrizzo di vento: l'effetto di innalzamento dei livelli sottocosta indotto dall'azione di venti foranei spiranti verso la costa è definito in funzione dell'estensione della piattaforma continentale (il cui limite è individuato per la penisola italiana dall'isobata -100 m).

Nel caso in esame la costa si trova ad una distanza massima di circa 30 km dalla piattaforma continentale assumendone come limite l'isobata -200. Il calcolo del sovrizzo di vento può essere effettuato con la nota relazione implicita:

$$S = \frac{K_p \cdot L_p \cdot U^2}{g(D - d - S)} \ln\left(\frac{D}{d + S}\right)$$

ponendo:

D=200 m la profondità limite assunta per la piattaforma continentale;

L<sub>p</sub>=30000 m l'estensione della piattaforma continentale;

d=10.0 m la profondità ove si calcola il sovrizzo (posta in corrispondenza dell'imboccatura portuale);

g=9.81 m/s<sup>2</sup>;

k<sub>p</sub>=3x10<sup>-6</sup>;

U=50 m/s la velocità del vento in condizioni estreme

La relazione implicita fornisce un valore di 0.36 m sotto costa (alla profondità di 10 m).

Eseguendo il calcolo anche per profondità inferiori si osserva che il sovrizzo segue una legge esponenziale con un massimo su bassi fondali (d=0.50) pari a s=0.69 m.

In definitiva è possibile calcolare il massimo sovrizzo in prossimità del porto di Marina di Carrara sommando tutti i diversi contributi di oscillazione del livello marino ma considerando che in generale non si verifica la piena concomitanza per i sovrizzi di carattere meteorologico ed astronomico. Si può cautelativamente assumere una riduzione del 75% per il sovrizzo massimo legato alla concomitanza dei fattori meteorologici ed astronomici. Negli studi di dettaglio successivi questi termini verranno approfonditi, applicando le formulazioni e metodologie sopra esposte, allorquando servirà definire in dettaglio le escursioni del livello marino (ad es. per valutare la massima "risalita" o effetto di run-up del moto ondoso per il dimensionamento del muro paraonde).

### **2.3 Correnti**

L'analisi d'insieme (riferita alla rappresentazione grafica estratta da "Atlante Tematico d'Italia" TCI, CNR) mostra che, al largo della costa toscana, i flussi delle correnti di gradiente (o di densità) sono condizionati dal fenomeno di riflusso della circolazione d'insieme antioraria del Mar Mediterraneo centrale e pertanto anche per la costa in esame sono diretti da Sud verso Nord; in prossimità della costa lungo la zolla continentale l'effetto combinato della batigrafia e l'azione del vento prevalente determina un'inversione della direzione prevalente della corrente. In generale nella velocità media delle correnti in superficie è piuttosto modesta, circa 5 cm/s, con punte massime comunque inferiori a 50 cm/s. La conformazione batigrafica del sito in esame, associata alla limitata escursione dei livelli di marea astronomica, lascia prevedere valori trascurabili delle possibili correnti di marea. In definitiva il regime delle correnti di marea e di densità che contraddistingue il paraggio costiero in esame ha effetti irrilevanti sulla dinamica dei sedimenti costieri, dominata invece dalle correnti litoranee, comprese tra la linea dei frangenti e la riva, indotte dall'azione del moto ondosso frangente.

#### **2.4 Raccolta ed analisi preliminare dei dati di vento**

Per un'analisi esaustiva del regime dei venti sono stati analizzati e confrontati i dati della stazione ubicata sull'isola di Palmaria e pertanto prospiciente la costa ove ricade il porto di Marina di Carrara. Questa stazione è stata gestita inizialmente dalla Marina Militare (i dati, consistenti in osservazioni visive, sono stati archiviati dall'Istituto Idrografico della Marina Militare e pubblicati in "Il vento e lo stato del Mare", 1978) che dal 1930 effettuava 3 osservazioni giornaliere degli stati di vento e di mare; dal 1963 la stazione è stata rilevata dall'Aeronautica Militare (I.T.A.V.-C.N.M.C.A Ispettorato Trasmissioni e Assistenza al Volo – Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica) che ha predisposto idonea strumentazione per il rilievo automatico delle condizioni meteo (vento, pressione, temperatura) con cadenza trioraria.

Per la stazione semaforica della Marina Militare l'unica controindicazione è legata alle inevitabili approssimazioni ed errori commesse dagli esecutori delle misure a vista. Ovviamente la stazione di Palmaria, per la sua ubicazione geografica, può essere considerata pienamente significativa per la caratterizzazione del paraggio costiero di marina di Carrara anche in considerazione del fatto che al largo dell'isola di Palmaria opera ormai da più di dieci anni un'ondametro direzionale (gestito dalla Rete Ondametrica Nazionale del Servizio Idrografico e Mareografico Italiano) e sarebbe quindi possibile non solo una correlazione tra le osservazioni storiche (di vento e mare) e le nuove misure dirette ma anche la messa a punto di un sistema meteo per la definizione in tempo reale delle condizioni meteorologiche al largo del porto.

I valori delle frequenze di accadimento annuali ripartite per classi di velocità e direzione sono stati riassunti in tabelle (Tab.2.a-2.e). I dati così raccolti mostrano una netta prevalenza, anche per gli stati di vento più intensi, da nord-est; complessivamente oltre il 40% degli stati di vento provengono da un settore compreso tra 0° e 67.5° Nord; anche per intensità superiori a 12 m/s (oltre i 25 nodi) si ha un contributo percentuale dal quel settore pari al 20%. Questa prevalenza è molto elevata nei periodi invernali ed autunnali mentre tende ad equilibrarsi nel periodo estivo.

Limitando l'analisi al settore di traversia (compreso tra scirocco 135° N e maestrale 315 ° N) è evidente la prevalenza degli stati di vento da libeccio e ponente in termini sia di venti regnanti (associati a maggiori frequenze di accadimento) sia dominanti (più intensi con classi di velocità superiori a 12

m/s). L'analisi dei grafici relativi alla stazione semaforica (gestione della M.M. del punto di osservazione di Palmaria) conferma queste caratteristiche di esposizione dei venti.

**Tab. 2.a - STAZIONE A.M. n.129 - PALMARIA**

Direzione e velocità del vento

Distribuzione delle frequenze nel periodo invernale (media sul periodo 1951 ÷ 77)

DIR (°N)	Classi di velocità (m/s)						Totali
	0 ÷ 0.5	1 ÷ 2	2.5 ÷ 3.5	4 ÷ 6	6.5 ÷ 11.5	12 ÷ 44.5	
0.0 ÷ 22.5		5.66	17.90	62.67	79.34	9.82	175.39
22.5 ÷ 45.0		13.14	38.75	99.15	123.06	26.86	300.94
45.0 ÷ 67.5		4.12	14.94	37.32	33.84	5.06	95.28
67.5 ÷ 90.0		2.48	7.20	13.69	10.09	0.86	34.32
90.0 ÷ 112.5		2.70	5.94	13.46	12.61	1.83	36.53
112.5 ÷ 135.0		2.84	6.41	11.46	15.83	3.74	40.29
135.0 ÷ 157.5		4.43	4.87	10.36	13.85	5.13	38.64
157.5 ÷ 180.0		4.10	5.25	6.85	7.43	3.61	27.24
180.0 ÷ 202.5		2.20	3.68	4.81	4.69	2.87	18.25
202.5 ÷ 225.0		3.58	4.21	4.19	7.39	5.22	24.59
225.0 ÷ 247.5		2.83	4.97	5.95	9.40	10.72	33.87
247.5 ÷ 270.0		3.24	6.08	8.15	9.31	8.87	35.65
270.0 ÷ 292.5		4.76	8.44	10.01	9.10	4.33	36.64
292.5 ÷ 315.0		4.12	6.42	6.03	3.05	0.72	20.33
315.0 ÷ 337.5		1.48	2.84	2.57	0.66	0.18	7.73
337.5 ÷ 360.0		1.13	2.73	5.20	4.41	1.50	14.97
VARIABILI		0.06	0.00	0.00	0.12	0.53	0.70
0 ÷ .5 m/s	58.64						58.64
<b>Totali</b>	<b>58.64</b>	<b>62.86</b>	<b>140.62</b>	<b>301.88</b>	<b>344.16</b>	<b>91.83</b>	<b>1000.00</b>

Quota strumento (m s.l.m.) : 190

Numero totale eventi : 17053

Rendimento (%) : 84.35

**Tab. 2.b - STAZIONE A.M. n.129 - PALMARIA**

Direzione e velocità del vento

Distribuzione delle frequenze nel periodo primaverile (media sul periodo 1951 ÷ 77)

DIR (°N)	Classi di velocità (m/s)						Totali
	0 ÷ 0.5	1 ÷ 2	2.5 ÷ 3.5	4 ÷ 6	6.5 ÷ 11.5	12 ÷ 44.5	
0.0 ÷ 22.5		6.32	19.72	50.49	41.85	3.65	122.02
22.5 ÷ 45.0		10.49	36.45	68.73	61.35	8.76	185.78
45.0 ÷ 67.5		5.14	15.40	22.45	16.32	1.58	60.88
67.5 ÷ 90.0		1.90	7.75	10.36	5.98	0.73	26.73
90.0 ÷ 112.5		3.30	7.33	9.62	5.23	0.67	26.14
112.5 ÷ 135.0		4.44	8.76	9.82	7.97	1.69	32.68
135.0 ÷ 157.5		4.72	9.25	12.23	13.34	4.34	43.88
157.5 ÷ 180.0		6.03	11.12	11.38	10.57	5.04	44.14
180.0 ÷ 202.5		4.44	8.26	9.55	9.06	3.05	34.36
202.5 ÷ 225.0		5.02	10.36	11.21	8.71	2.53	37.83
225.0 ÷ 247.5		5.88	13.62	16.95	11.90	6.45	54.79
247.5 ÷ 270.0		7.25	19.81	26.29	16.48	5.87	75.69
270.0 ÷ 292.5		8.17	25.54	35.77	17.18	2.93	89.60
292.5 ÷ 315.0		6.36	16.00	19.72	7.98	0.57	50.63
315.0 ÷ 337.5		3.02	5.96	6.28	2.50	0.23	17.98
337.5 ÷ 360.0		2.29	3.74	5.75	3.55	0.20	15.53
VARIABILI		0.06	0.06	0.12	0.06	0.06	0.36
0 ÷ .5 m/s	80.98						80.98
<b>Totali</b>	<b>80.98</b>	<b>84.83</b>	<b>219.11</b>	<b>326.72</b>	<b>240.02</b>	<b>48.34</b>	<b>1000.00</b>

Quota strumento (m s.l.m.) : 190

Numero totale eventi : 17128

Rendimento (%) : 83.11

**Tab. 2.c - STAZIONE A.M. n.129 - PALMARIA**

Direzione e velocità del vento

Distribuzione delle frequenze nel periodo estivo (media sul periodo 1951 ÷ 77)

DIR (°N)	Classi di velocità (m/s)						Totali
	0 ÷ 0.5	1 ÷ 2	2.5 ÷ 3.5	4 ÷ 6	6.5 ÷ 11.5	12 ÷ 44.5	
0.0 ÷ 22.5		7.65	27.44	50.12	26.63	0.55	112.39
22.5 ÷ 45.0		15.22	36.81	60.11	31.98	0.66	144.78
45.0 ÷ 67.5		5.75	13.64	20.76	9.26	0.31	49.72
67.5 ÷ 90.0		2.11	5.51	7.55	2.70	0.13	18.01
90.0 ÷ 112.5		3.22	8.64	7.46	2.56	0.18	22.06
112.5 ÷ 135.0		4.34	8.50	9.38	5.16	0.33	27.71
135.0 ÷ 157.5		6.13	12.09	14.14	8.85	1.64	42.85
157.5 ÷ 180.0		5.01	10.17	15.20	7.08	1.26	38.71
180.0 ÷ 202.5		4.39	8.70	12.22	6.21	0.99	32.51
202.5 ÷ 225.0		7.28	16.39	15.65	8.60	2.62	50.53
225.0 ÷ 247.5		9.25	18.12	20.95	11.67	3.43	63.42
247.5 ÷ 270.0		9.46	26.33	32.66	14.24	2.13	84.82
270.0 ÷ 292.5		10.31	34.62	40.37	13.89	1.09	100.29
292.5 ÷ 315.0		7.92	20.17	25.59	8.60	0.21	62.49
315.0 ÷ 337.5		3.68	9.32	9.72	3.32	0.06	26.11
337.5 ÷ 360.0		2.94	7.70	8.95	3.03	0.15	22.77
VARIABILI		0.06	0.06	0.18	0.06	0.06	0.41
0 ÷ .5 m/s	100.42						100.42
<b>Totali</b>	<b>100.42</b>	<b>104.73</b>	<b>264.20</b>	<b>351.03</b>	<b>163.84</b>	<b>15.79</b>	<b>1000.00</b>

Quota strumento (m s.l.m.) : 190

Numero totale eventi : 16919

Rendimento (%) : 83.00

**Tab. 2.d - STAZIONE A.M. n.129 - PALMARIA**

Direzione e velocità del vento

Distribuzione delle frequenze nel periodo autunnale (media sul periodo 1951 ÷ 77)

DIR (°N)	Classi di velocità (m/s)						Totali
	0 ÷ 0.5	1 ÷ 2	2.5 ÷ 3.5	4 ÷ 6	6.5 ÷ 11.5	12 ÷ 44.5	
0.0 ÷ 22.5		9.59	25.18	63.39	65.48	6.69	170.33
22.5 ÷ 45.0		12.30	37.45	94.13	92.72	11.52	248.10
45.0 ÷ 67.5		4.96	14.56	29.34	22.96	2.24	74.05
67.5 ÷ 90.0		2.04	5.50	10.46	4.57	0.79	23.37
90.0 ÷ 112.5		2.41	5.31	9.53	6.22	1.82	25.30
112.5 ÷ 135.0		2.82	6.28	9.38	10.96	3.62	33.06
135.0 ÷ 157.5		4.04	8.27	10.44	17.44	4.85	45.05
157.5 ÷ 180.0		5.66	9.35	10.44	11.59	4.00	41.05
180.0 ÷ 202.5		3.78	6.63	6.81	6.90	2.68	26.80
202.5 ÷ 225.0		4.63	7.34	7.02	9.31	4.35	32.65
225.0 ÷ 247.5		5.65	8.87	8.27	11.07	9.18	43.03
247.5 ÷ 270.0		5.91	13.81	12.91	10.75	7.29	50.68
270.0 ÷ 292.5		6.41	18.38	17.15	9.49	4.06	55.49
292.5 ÷ 315.0		3.97	11.47	12.85	3.46	0.59	32.34
315.0 ÷ 337.5		2.49	5.78	4.18	1.49	0.16	14.09
337.5 ÷ 360.0		2.63	6.66	8.68	6.10	1.34	25.41
VARIABILI		0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.06
0 ÷ .5 m/s	59.12						59.12
<b>Totali</b>	<b>59.12</b>	<b>79.30</b>	<b>190.90</b>	<b>314.98</b>	<b>290.51</b>	<b>65.18</b>	<b>1000.00</b>

Quota strumento (m s.l.m.) : 190

Numero totale eventi : 16998

Rendimento (%) : 82.48

**Tab. 2.e - STAZIONE A.M. n.129 - PALMARIA**

Direzione e velocità del vento

Distribuzione delle frequenze annuali (media sul periodo 1951 ÷ 77)

DIR (°N)	Classi di velocità (m/s)						Totali
	0 ÷ 0.5	1 ÷ 2	2.5 ÷ 3.5	4 ÷ 6	6.5 ÷ 11.5	12 ÷ 44.5	
0.0 ÷ 22.5		7.30	22.54	56.67	53.35	5.18	145.05
22.5 ÷ 45.0		12.78	37.36	80.55	77.33	11.97	219.99
45.0 ÷ 67.5		4.99	14.64	27.48	20.61	2.30	70.01
67.5 ÷ 90.0		2.13	6.49	10.52	5.84	0.63	25.62
90.0 ÷ 112.5		2.91	6.80	10.02	6.66	1.13	27.52
112.5 ÷ 135.0		3.61	7.49	10.01	9.99	2.35	33.44
135.0 ÷ 157.5		4.83	8.61	11.79	13.38	3.99	42.60
157.5 ÷ 180.0		5.20	8.97	10.96	9.17	3.48	37.79
180.0 ÷ 202.5		3.70	6.82	8.34	6.72	2.40	27.98
202.5 ÷ 225.0		5.12	9.56	9.51	8.50	3.68	36.38
225.0 ÷ 247.5		5.90	11.38	13.02	11.01	7.45	48.76
247.5 ÷ 270.0		6.46	16.49	19.99	12.70	6.05	61.69
270.0 ÷ 292.5		7.41	21.73	25.82	12.42	3.11	70.48
292.5 ÷ 315.0		5.59	13.51	16.04	5.77	0.52	41.43
315.0 ÷ 337.5		2.67	5.97	5.68	1.99	0.16	16.46
337.5 ÷ 360.0		2.25	5.20	7.14	4.27	0.80	19.66
VARIABILI		0.04	0.04	0.07	0.06	0.16	0.38
0 ÷ .5 m/s	74.76						74.76
<b>Totali</b>	<b>74.76</b>	<b>82.90</b>	<b>203.62</b>	<b>323.61</b>	<b>259.77</b>	<b>55.35</b>	<b>1000.00</b>

Quota strumento (m s.l.m.) : 190

Numero totale eventi : 68098

Rendimento (%) : 83.23



### **2.5 Caratteristiche del moto ondoso al largo. Raccolta ed analisi preliminare dei dati disponibili.**

Lo studio delle caratteristiche ondometriche al largo è finalizzato alla definizione di un "clima" d'onda significativo per il sito in esame cui fare riferimento nelle successive modellazioni numeriche e nelle attività di progettazione.

In una preliminare fase conoscitiva si è fatto riferimento alle frequenze medie dello stato del mare osservato dalla stazione semaforica della Marina Militare di Palmaria (tabella 3.a e figura 4.a); nelle tabelle 3.b e 3.c sono invece elencate le massime mareggiate con relativa direzione e durata delle stesse; infine nella tabella 3.d e relativa figura è riportata la direzione e relativa frequenza delle mareggiate (osservate a Palmaria) caratterizzate da uno stato del mare superiore o uguale a 6 ( $H_s > 4.0$  m). Nell'insieme si evidenzia una prevalenza degli stati di mare da maestrale e ponente rispetto ai quali però l'attuale configurazione portuale risulta validamente ridossata dal molo di sopraflutto; al contrario risulta stranamente esposta agli stati di mare da scirocco pur essendo contenuti per questo settore sia la traversia che gli stati di vento.

In qualsiasi caso la tipologia dei dati (osservazioni a vista del moto ondoso con cadenza di tre al giorno) esistenti per la caratterizzazione del moto ondoso al largo del porto di Marina di Carrara non consente valide estrapolazioni numeriche per le finalità del presente studio.

In una preliminare fase conoscitiva sono stati esaminati i dati ed i risultati dello studio meteomarino effettuato dal Consorzio Pisa Ricerche. Per la caratterizzazione del moto ondoso al largo in detto studio si è fatto riferimento, oltre che alle registrazioni ondometriche di La Spezia, anche alle osservazioni visive degli stati di mare trasmesse dalle navi in transito al largo della costa e collazionate in database dall'Ufficio Meteorologico olandese (K.N.M.I.).

La raccolta di dati relativa al periodo dal 1961 al 1990 si riferisce ad una porzione di mare dell'Alto Tirreno delimitata dai seguenti paralleli e meridiani:  $42,8 \div 45,0$  °N e  $8,0 \div 11,0$  °E.

Le serie di dati a disposizione evidenzia (tab. 4) che le osservazioni giornaliere sono abbastanza limitate (meno di 3 al giorno) e quindi non direttamente utilizzabili per una corretta analisi statistica, pur se i dati hanno il pregio di riferirsi anche ad onde di mare morto (swell) comunque rilevate con una frequenza inferiore al 1%. Va inoltre ricordato che, al di là di alcuni errori macroscopici di valutazione dell'evento e di collocazione dello stesso in

coordinate geografiche irrealistiche (dalla distribuzione spaziale si evidenzia che alcuni eventi ricadono in settori di terra), comunque la frequenza delle osservazioni è molto variabile nel tempo in quanto legata al passaggio, spesso caratterizzato da diverse frequenze stagionali, delle navi; lo stesso evento ondoso può inoltre essere "conteggiato" più volte da navi diverse. Restano poi le inevitabili approssimazioni legate alla soggettività ed imprecisione delle stime visuali. Peraltro, nonostante i succitati limiti di attendibilità, si è ritenuto interessante riportare la distribuzione percentuale delle frequenze di osservazione nel settore di traversia.

Si evidenzia un'elevata frequenza sia dei mari con onde significative comprese tra 0,25 e 1,25 m (43÷55%) che di quelli con onde che vanno da 1.25 a 2,25 m (12.55%). Anche le percentuali relative agli eventi ondosi di maggiore intensità, con onda massima compresa tra 2.25 m e 3.75 m, non sono trascurabili (4%), mentre si riducono notevolmente per i mari con onde massime maggiori di 3.75 m (0.4%).

Per quanto riguarda la direzione di provenienza in tutto il settore di 360° a cui si riferiscono le osservazioni delle navi in transito si può notare la netta prevalenza dei mari da libeccio (SW) e ponente (W) ai quali è più esposta anche geograficamente la costa del litorale in esame.

Stazione semaforica di Palmaria (Marina Militare)

Frequenze medie percentuali dedotte da tre osservazioni giornaliere relative a 30 anni (dal 1930 al 1963)

Mese	Stato del mare			
	0-1 (H<0,1 m)	2-3 (0,1<H<1,25 m)	4-5 (1,25<H<4,0 m)	6-8 (H>4,0 m)
Gennaio	17.1	62.3	19.2	1.4
Febbraio	17.6	61.7	17.5	3.2
Marzo	25.9	58.4	14.9	0.8
Aprile	29.4	58.6	11.1	0.9
Maggio	32.8	59.9	7.1	0.2
Giugno	40.3	54.2	5.2	0.3
Luglio	45.0	48.9	6.0	0.1
Agosto	47.3	46.9	5.7	0.1
Settembre	38.2	53.9	7.6	0.3
Ottobre	28.2	55.9	15.4	0.5
Novembre	18.7	63.2	17.1	1.0
Dicembre	17.5	61.4	19.1	2.0
ANNO	30.9	56.7	11.6	0.8

Tab. 3.a - Osservazioni degli stati di mare al largo della stazione semaforica

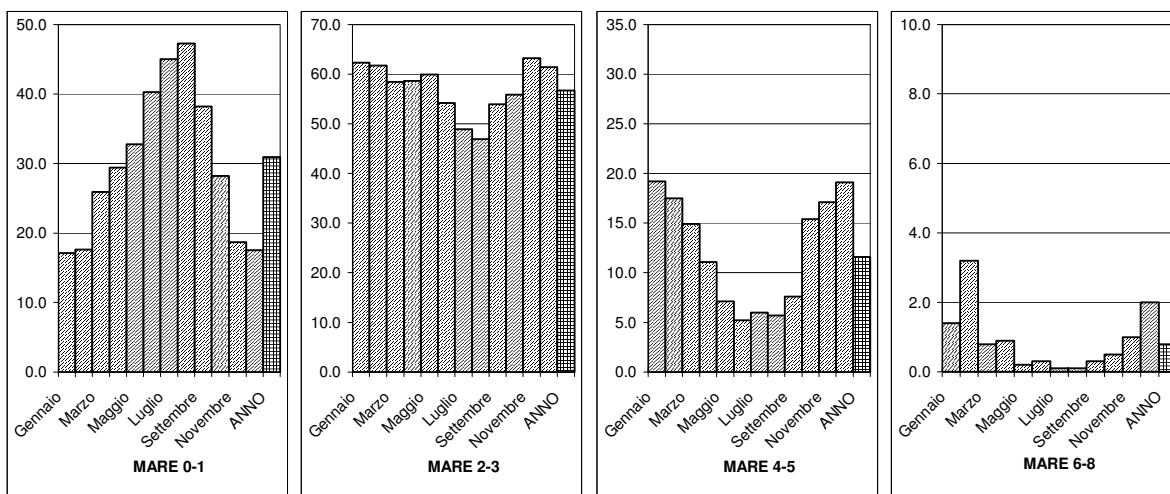


Fig. 4.a - Frequenze medie percentuali degli stati di mare al largo della stazione semaforica di Palmaria

Stazione semaforica di Palmaria (Marina Militare)  
Periodo di osservazione 1930-1963

Durata massima delle mareggiate con altezza media delle onde superiore a 4 m (forza del mare 6-8)

Mese	Forza del mare	Durata (ore)	Direzione di provenienza (° Nord)
Gennaio	6-8	52	315° (NW)
Dicembre	6	50	315° (NW)
Aprile	6-8	36	135° (SE)
Ottobre	6	32	270° (W)
Febbraio	6	30	270° (W)
Aprile	6	28	315° (NW)
Dicembre	6	28	270° (W)
Febbraio	6-7	26	315° (NW)
Febbraio	6	26	0° (N)

Tab. 3.b - Durata massima delle mareggiate osservate al largo della stazione semaforica

Stazione semaforica dell'Isola di Palmaria (Marina Militare)  
Periodo di osservazione pari a 30 anni (dal 1930 al 1963)

Mese	Forza del mare	Frequenza in giorni	Massimo mare verificatosi nei singoli mesi e relative frequenze															
			Direzione di provenienza (° Nord)															
			0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5
Gennaio	8	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Febbraio	8	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Marzo	7	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-
Aprile	8	2	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-
Maggio	6	4	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-	-
Giugno	7	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-
Luglio	6	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Agosto	6	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-
Settembre	7	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Ottobre	7	3	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	2	-	-	-
Novembre	6	15	2	-	2	-	-	-	1	2	3	-	1	-	4	-	-	-
Dicembre	7	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
		Totale	2	0	2	-	1	-	3	3	4	-	1	1	14	2	4	0

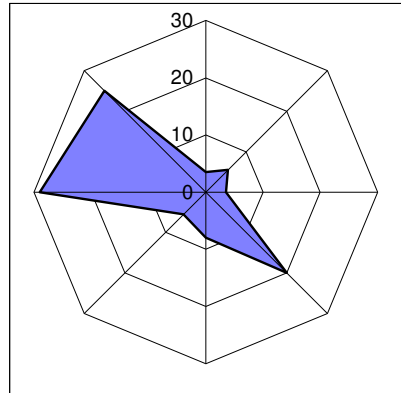
Tab. 3.c - Stati estremi di moto ondoso osservati al largo della stazione semaforica

Stazione semaforica dell'Isola di Palmaria (Marina Militare)  
 Periodo di osservazione pari a 30 anni (dal 1930 al 1963)  
 Direzione di provenienza delle mareggiate con altezza media delle onde  
 superiore a 4 m (forza del mare 6-8)

Tab. 3.d

Direzione di provenienza	Frequenza percentuale
Nord	3.5
Nord - Est	5.5
Est	3.5
Sud - Est	20.0
Sud	8.0
Sud - Ovest	5.5
Ovest	29.0
Nord - Ovest	25.0

Fig. 4.b



Caratteristiche dei dati	Primavera	Estate	Autunno	Inverno	Totali
Numero totale	7610	9975	6363	6692	30640
valori confusi	121	160	125	86	492
valori utili	7489	9815	6238	6606	30148
stati di calme	3130	4350	2112	2333	11925
stati di mare vivo (sea)	4309	5396	4090	4238	18033
stati di mare morto (swell)	50	69	36	35	190
significatività (ore/dato)	8.55	6.48	9.92	9.69	8.58
media giornaliera (N/giorno)	2.81	3.68	2.36	2.49	2.80

Tab. 4 - Caratteristiche dei dati KNMI elaborati nel settore 8.0° ÷ 11.0° E e 42.8° ÷ 45.0° N

### 3. Regime del moto ondoso

Il regime del moto ondoso che contraddistingue il sito in esame è un elemento indispensabile per la definizione delle condizioni di esercizio della nuova scogliera di protezione del Molo di Levante e dell'area retrostante. Queste devono essere descritte sia in termini di eventi estremi (mareggiate intense con frequenza più che decennale) associati a determinati tempi di ritorno cui fare riferimento per il dimensionamento delle opere (scogliera e muro paraonde), sia in termini di eventi ordinari (aventi tempo di ritorno dell'ordine di un anno) per la definizione delle condizioni di esposizione al moto ondoso nelle fasi di esecuzione.

A tal riguardo è stata pianificata un'attività specifica per la definizione dettagliata del moto ondoso al largo e a ridosso della nuova scogliera a partire dalle registrazioni ondametriche della stazione R.O.N. di La Spezia. Questa è contraddistinta da un ondometro direzionale ubicato praticamente al largo dello stesso porto di Marina di Carrara (coordinate 43°55' N; 9°49' E); la stazione è in esercizio da oltre 13 anni (sono stati acquisiti ed analizzati i dati relativi al periodo da luglio 1989 a giugno 2002) ed è caratterizzata da un elevato rendimento medio pari al 92.6 % (tabella 5).

Vista la disponibilità di misure ondametriche di tipo direzionale si è volutamente evitato il ricorso a metodologie di ricostruzione indiretta (hindcasting) del moto ondoso tipo S.M.B. per le inevitabili approssimazioni legate all'effettiva rappresentatività dei dati anemometrici di base per all'area di generazione del moto ondoso ed alle problematiche di calibrazione che comporta la corretta applicazione dei modelli tipo S.M.B.; inoltre, l'informazione derivata dai modelli di hindcasting è rappresentativa degli stati di mare "vivi" (sea wave) direttamente generati dalla forzante (vento) assunta dal modello e quindi non consentono di valutare gli stati di mare "morto" (swell) generati in aree non "coperte" dall'anemometro di riferimento; questi ultimi sono spesso fondamentali per la caratterizzazione della dinamica evolutiva dei litorali.

La conoscenza "climatica" del moto ondoso, ovvero la definizione in termini di frequenze annuali delle grandezze che ne definiscono il regime, quali l'altezza d'onda significativa  $H_s$ , il periodo d'onda  $T$  e la direzione media di provenienza  $\theta$ , è stata effettuata utilizzando la seguente metodologia:

- 1) acquisizione ed analisi delle misure ondametriche dell'ondametro direzionale posto al largo di Marina di Carrara (ondametro RON di La Spezia);
- 2) trasferimento dell'intera serie ondametrica sino a ridosso del Molo di Levante tramite l'impiego di un modello di rifrazione inversa spettrale;
- 3) analisi statistica delle due serie ondametriche direzionali con calcolo di tabelle e grafici di sintesi ed analisi probabilistica degli eventi estremi.

### **3.1 Analisi del clima d'onda al largo**

Le misure relative alla stazione ondametrica di La Spezia sono state preventivamente digitalizzate per poter effettuare una serie di analisi numeriche con l'ausilio dell'elaboratore (<sup>3</sup>). E' stato possibile ricavare così utili indicazioni di carattere qualitativo e quantitativo, cui fare riferimento nelle successive fasi dello studio:

- l'elevato rendimento dell'ondametro (35168 stati di mare registrati, pari al 92.6 % del periodo compreso dal luglio del 1989 sino al giugno del 2002) convalida la stazione come rappresentativa del moto ondoso (sea e swell) che nel periodo ha interessato l'alto Tirreno (mar ligure orientale);
- le tabb.6.a e 6.e e la fig. 5, rappresentative della distribuzione su base annuale e stagionale degli eventi di moto ondoso (caratterizzati in funzione della direzione di provenienza e dell'altezza significativa  $H_s$ ), indicano che i maggiori contributi si hanno dal settore sud-ovest (215÷245 °N libeccio) con una percentuale di stati di mare pari a circa il 40% e valori massimi di altezza significativa superiori anche a 6 m;
- si riconoscono anche contributi dai settori ovest (ponente), e sud-sud-est (mezzogiorno e libeccio) comunque con massimi valori delle altezze significative inferiori a 4.0 m.
- in qualche misura vengono confermati i valori desunti dalle osservazioni condotte dalle navi in transito anche se queste forniscono maggiori contributi da ponente.

---

<sup>3</sup> Per l'analisi dei dati ondametrici di La Spezia è stato utilizzato il modello PEGASO

## Ondametro di La Spezia

Periodo di riferimento 1 luglio 1989 - 30 giugno 2002

Numero totale eventi registrati:

35168

Rendimento complessivo ondametro:

92.6%

Anno	Mese	Numero	Rendimento	Anno	Mese	Numero	Rendimento	Anno	Mese	Numero	Rendimento
1989	LUG	218	87.90								
	AGO	219	88.31								
	SET	235	97.92								
	OTT	247	99.60								
	NOV	240	100.00								
	DIC	247	99.60								
1990	GEN	242	97.58	1994	GEN	165	66.53	1998	GEN	248	100.00
	FEB	176	78.57		FEB	219	97.77		FEB	223	99.55
	MAR	201	81.05		MAR	248	100.00		MAR	248	100.00
	APR	224	93.33		APR	164	68.33		APR	238	99.17
	MAG	248	100.00		MAG	229	92.34		MAG	248	100.00
	GIU	230	95.83		GIU	240	100.00		GIU	240	100.00
	LUG	229	92.34		LUG	237	95.57		LUG	247	99.60
	AGO	248	100.00		AGO	207	83.47		AGO	197	79.44
	SET	235	97.92		SET	189	78.75		SET	236	98.33
	OTT	243	97.98		OTT	188	75.81		OTT	245	98.79
	NOV	196	81.67		NOV	234	97.50		NOV	240	100.00
	DIC	248	100.00		DIC	244	98.39		DIC	248	100.00
1991	GEN	248	100.00	1995	GEN	247	99.60	1999	GEN	246	99.19
	FEB	203	90.63		FEB	224	100.00		FEB	213	95.09
	MAR	248	100.00		MAR	240	96.77		MAR	242	97.58
	APR	210	87.50		APR	238	99.17		APR	235	97.92
	MAG	240	96.77		MAG	248	100.00		MAG	241	97.18
	GIU	236	98.33		GIU	239	99.58		GIU	219	91.25
	LUG	240	96.77		LUG	248	100.00		LUG	190	76.61
	AGO	223	89.92		AGO	235	94.76		AGO	158	63.71
	SET	239	99.58		SET	232	96.67		SET	214	89.17
	OTT	217	87.50		OTT	247	99.60		OTT	203	81.86
	NOV	237	98.75		NOV	211	87.92		NOV	234	97.50
	DIC	248	100.00		DIC	200	80.65		DIC	184	74.19
1992	GEN	206	83.07	1996	GEN	194	78.23	2000	GEN	172	69.36
	FEB	209	90.09		FEB	207	89.22		FEB	227	97.85
	MAR	248	100.00		MAR	211	85.08		MAR	248	100.00
	APR	240	100.00		APR	240	100.00		APR	173	72.08
	MAG	206	83.07		MAG	240	96.77		MAG	127	51.21
	GIU	210	87.50		GIU	215	89.58		GIU	195	81.25
	LUG	233	93.95		LUG	238	95.97		LUG	247	99.60
	AGO	246	99.19		AGO	242	97.58		AGO	225	90.73
	SET	236	98.33		SET	228	95.00		SET	239	99.58
	OTT	165	66.53		OTT	248	100.00		OTT	245	98.79
	NOV	237	98.75		NOV	226	94.17		NOV	239	99.58
	DIC	229	92.34		DIC	206	83.07		DIC	228	91.94
1993	GEN	221	89.11	1997	GEN	209	84.27	2001	GEN	247	99.60
	FEB	224	100.00		FEB	224	100.00		FEB	223	99.55
	MAR	248	100.00		MAR	248	100.00		MAR	245	98.79
	APR	202	84.17		APR	238	99.17		APR	206	85.83
	MAG	222	89.52		MAG	246	99.19		MAG	225	90.73
	GIU	228	95.00		GIU	240	100.00		GIU	240	100.00
	LUG	225	90.73		LUG	228	91.94		LUG	248	100.00
	AGO	242	97.58		AGO	248	100.00		AGO	69	27.82
	SET	240	100.00		SET	240	100.00		SET	158	65.83
	OTT	205	82.66		OTT	247	99.60		OTT	251	100.00
	NOV	234	97.50		NOV	240	100.00		NOV	249	100.00
	DIC	177	71.37		DIC	248	100.00		DIC	248	100.00
								2002	GEN	228	91.94
									FEB	250	100.00
									MAR	243	97.98
									APR	240	100.00
									MAG	248	100.00
									GIU	176	73.33

Tab. 5 - Rendimento della stazione ondametrica di La Spezia - R.O.N. - S.I.M.N.

Tabella 6.a

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza. INVERNO

Ondametro di La Spezia

Periodo di riferimento 1 luglio 1989 - 30 giugno 2002

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)															TOT.
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	>=6.5	
10	0.12	0.85	0.66	0.26												1.89
20	0.17	0.84	0.84	0.20												2.05
30	0.09	0.47	0.41	0.07												1.03
40	0.08	0.26	0.17	0.01												0.52
50	0.02	0.19	0.14	0.03	0.01											0.40
60	0.03	0.15	0.09	0.01												0.28
70	0.03	0.17	0.05	0.02												0.27
80	0.01	0.08	0.09	0.02	0.05											0.25
90	0.08	0.14	0.07	0.03	0.01											0.33
100	0.05	0.12	0.10	0.03												0.31
110	0.05	0.16	0.09	0.05												0.34
120	0.07	0.23	0.20	0.12	0.02											0.65
130	0.03	0.30	0.54	0.14	0.05	0.01										1.07
140	0.07	0.64	0.57	0.25	0.03											1.55
150	0.15	1.00	0.60	0.37	0.10											2.22
160	0.19	1.13	0.71	0.56	0.19	0.02										2.81
170	0.36	1.41	1.02	0.71	0.27	0.06	0.01									3.85
180	0.35	1.46	0.89	0.65	0.27	0.03	0.03	0.01	0.01							3.71
190	0.53	1.76	0.77	0.25	0.09	0.08	0.01	0.01								3.51
200	0.31	1.36	0.74	0.37	0.11	0.03		0.01								2.94
210	0.51	1.82	1.00	0.71	0.23	0.14	0.02									4.43
220	0.50	1.67	1.80	1.48	1.30	0.59	0.20	0.05	0.03							7.63
230	0.73	3.15	3.55	3.03	2.28	1.68	0.96	0.51	0.33	0.14	0.01		0.01			16.38
240	0.78	4.08	4.13	2.78	1.34	0.92	0.65	0.32	0.37	0.24	0.14	0.01	0.01	0.01	0.01	15.79
250	0.99	2.81	1.61	0.81	0.50	0.16	0.06	0.06	0.02	0.01						7.02
260	0.68	1.65	0.92	0.54	0.16	0.09	0.02	0.01								4.07
270	0.51	1.50	0.65	0.24	0.15	0.05	0.01									3.10
280	0.34	1.02	0.79	0.22	0.05	0.01										2.43
290	0.22	0.60	0.36	0.26	0.02											1.46
300	0.09	0.39	0.48	0.14	0.03	0.01										1.13
310	0.14	0.49	0.47	0.11	0.01	0.01										1.23
320	0.12	0.36	0.35	0.07												0.91
330	0.10	0.33	0.42	0.15		0.01										1.01
340	0.05	0.49	0.33	0.06												0.92
350	0.09	0.48	0.39	0.09												1.04
360	0.06	0.61	0.65	0.14												1.45
TOT.	8.70	34.15	26.64	14.99	7.28	3.90	1.99	0.96	0.78	0.39	0.15	0.01	0.02	0.01	0.01	100.00
Tot. cumul.		42.86	69.50	84.49	91.77	95.68	97.66	98.63	99.41	99.80	99.94	99.95	99.98	99.99	100.00	

Numero di eventi validi : 8813



Tabella 6.b

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza. PRIMAVERA

Ondametro di La Spezia

Periodo di riferimento 1 luglio 1989 - 30 giugno 2002

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5		>=6.5
10	0.15	0.40	0.32	0.01												0.88
20	0.33	0.42	0.25	0.06												1.07
30	0.25	0.16	0.09													0.50
40	0.06	0.08	0.02	0.01												0.17
50	0.03	0.03	0.06													0.13
60	0.01	0.06	0.02	0.01												0.10
70	0.09	0.06	0.01													0.16
80	0.05	0.06	0.03	0.02												0.16
90	0.03	0.07	0.03	0.02												0.16
100	0.10	0.05	0.05	0.02	0.01											0.23
110	0.06	0.06	0.07	0.01	0.01											0.21
120	0.07	0.05	0.14	0.16	0.01	0.01										0.44
130	0.10	0.14	0.36	0.21	0.10											0.91
140	0.13	0.44	0.44	0.11	0.03	0.02										1.17
150	0.16	0.48	0.44	0.14	0.05											1.26
160	0.24	0.89	0.65	0.72	0.05	0.01										2.57
170	0.31	1.56	1.34	0.70	0.18	0.03										4.13
180	0.49	2.40	1.58	0.34	0.10	0.05										4.96
190	0.62	1.82	1.03	0.23	0.08											3.78
200	0.85	1.36	0.93	0.40	0.05	0.05										3.63
210	0.95	1.31	0.92	0.49	0.22	0.09	0.01									3.99
220	0.89	2.06	1.96	1.91	0.84	0.46	0.14	0.08	0.01							8.36
230	1.28	4.45	4.53	2.90	2.14	1.25	0.63	0.19	0.10	0.03	0.01					17.53
240	1.48	5.77	4.79	2.45	1.24	0.53	0.29	0.28	0.14	0.08	0.02					17.06
250	1.46	3.79	2.01	0.72	0.24	0.10	0.06	0.05								8.43
260	1.02	2.56	0.80	0.32			0.01									4.71
270	0.84	1.65	0.61	0.18	0.02	0.01	0.02									3.34
280	0.80	1.24	0.46	0.18	0.08		0.02									2.79
290	0.60	1.03	0.23		0.01											1.87
300	0.42	0.60	0.09	0.03												1.15
310	0.33	0.34	0.09	0.05												0.81
320	0.25	0.26	0.08	0.03												0.63
330	0.22	0.36	0.10	0.02												0.70
340	0.15	0.26	0.13	0.02												0.56
350	0.22	0.29	0.10	0.01												0.62
360	0.16	0.37	0.31	0.02												0.86
TOT.	15.21	36.91	25.07	12.55	5.47	2.61	1.18	0.60	0.25	0.11	0.03					100.00
Tot. cumul.	52.12	77.19	89.74	95.21	97.82	99.00	99.60	99.85	99.97	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Numero di eventi validi : 8724

Tabella 6.c

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza. ESTATE

Ondametro di La Spezia

Periodo di riferimento 1 luglio 1989 - 30 giugno 2002

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5		>=6.5
10	0.48	0.67	0.13	0.01												1.29
20	0.40	0.94	0.14	0.01												1.49
30	0.36	0.44	0.06	0.01												0.86
40	0.36	0.32	0.02													0.70
50	0.16	0.23														0.39
60	0.13	0.24	0.03	0.01												0.41
70	0.10	0.16	0.01													0.28
80	0.14	0.10	0.01													0.25
90	0.05	0.13	0.01													0.18
100	0.09	0.16	0.03													0.29
110	0.07	0.22	0.02	0.01												0.32
120	0.20	0.25	0.06	0.02												0.53
130	0.10	0.44	0.21	0.05	0.01	0.01										0.82
140	0.28	0.59	0.23	0.11	0.03	0.01										1.25
150	0.34	0.80	0.30	0.20	0.06											1.70
160	0.46	0.83	0.77	0.28	0.13	0.02										2.48
170	0.49	1.19	0.92	0.37	0.10	0.02	0.01									3.11
180	1.32	4.66	2.31	0.77	0.49	0.18										9.74
190	0.59	1.49	0.65	0.20	0.03	0.01										2.97
200	1.02	1.44	0.48	0.18	0.01	0.03										3.17
210	0.93	1.46	0.64	0.44	0.11	0.06	0.02									3.66
220	1.03	2.45	1.72	1.37	0.83	0.38	0.14	0.01								7.92
230	1.47	4.26	3.38	2.64	2.11	1.26	0.41	0.23	0.14	0.01						15.92
240	1.48	4.87	3.11	1.96	0.75	0.55	0.31	0.17	0.14	0.03	0.01					13.39
250	1.70	3.59	1.65	0.31	0.10	0.05	0.03									7.44
260	1.26	2.80	0.42	0.08	0.02											4.59
270	1.10	1.83	0.23	0.08		0.02										3.26
280	0.86	1.25	0.18	0.05	0.01	0.01										2.37
290	0.94	0.95	0.06	0.02	0.01											1.99
300	0.79	0.93	0.05	0.01												1.78
310	0.55	0.56	0.06													1.17
320	0.47	0.39	0.06													0.92
330	0.29	0.40	0.06													0.75
340	0.28	0.25	0.08	0.01	0.01											0.63
350	0.40	0.38	0.07	0.03												0.88
360	0.34	0.67	0.07	0.01												1.09
TOT.	21.04	42.34	18.24	9.24	4.83	2.63	0.93	0.41	0.28	0.05	0.01					100.00
Tot. cumul.	63.38	81.61	90.86	95.69	98.32	99.25	99.67	99.94	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00		

Numero di eventi validi : 8708

## Tabella 6.d

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza. AUTUNNO

Ondametro di La Spezia

Periodo di riferimento 1 luglio 1989 - 30 giugno 2002

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	<25	25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5		>=6.5
10	0.09	0.85	0.99	0.36												2.29
20	0.19	1.04	0.83	0.27								0.01				2.34
30	0.11	0.76	0.40	0.11												1.39
40	0.07	0.28	0.13													0.48
50	0.06	0.18	0.12	0.01												0.37
60	0.07	0.16	0.11	0.02												0.36
70		0.16	0.07	0.02												0.25
80	0.06	0.16	0.07	0.04												0.33
90	0.03	0.13	0.08													0.25
100	0.04	0.20	0.06	0.02	0.01											0.34
110	0.01	0.17	0.17													0.35
120	0.02	0.36	0.20	0.10												0.68
130	0.02	0.39	0.73	0.19	0.03											1.37
140	0.06	0.62	0.92	0.34	0.04											1.97
150	0.09	1.09	0.98	0.55	0.06	0.01										2.77
160	0.09	1.28	1.24	0.68	0.20	0.03	0.02									3.55
170	0.13	1.13	1.01	0.80	0.28	0.11	0.04	0.01								3.52
180	0.62	3.16	3.27	1.79	0.76	0.38	0.24	0.10	0.09	0.01	0.03	0.03	0.01			10.50
190	0.16	1.18	1.26	0.54	0.22	0.09	0.04			0.03	0.01	0.01	0.01	0.01		3.56
200	0.26	1.02	1.01	0.55	0.20	0.11	0.03	0.03								3.22
210	0.31	1.04	1.14	0.89	0.39	0.19	0.10	0.24	0.02			0.01				4.34
220	0.37	1.47	1.70	1.80	1.21	0.80	0.33	0.10	0.06	0.01						7.84
230	0.58	2.08	2.80	2.98	2.05	1.15	1.00	0.66	0.39	0.13	0.03	0.03	0.01			13.92
240	0.55	2.36	3.09	1.89	1.17	0.55	0.64	0.27	0.25	0.21	0.17	0.07	0.01			11.23
250	0.33	2.03	1.69	0.66	0.39	0.15	0.11	0.06	0.03	0.01	0.02					5.48
260	0.21	1.24	0.75	0.50	0.13	0.07	0.02	0.02								2.96
270	0.29	0.92	0.71	0.29	0.04	0.04	0.04									2.34
280	0.15	0.90	0.72	0.20	0.08	0.03										2.07
290	0.19	0.48	0.48	0.20	0.02											1.38
300	0.10	0.36	0.52	0.11	0.02											1.11
310	0.08	0.22	0.58	0.16	0.04	0.02										1.11
320	0.07	0.34	0.50	0.11	0.03											1.05
330	0.09	0.38	0.46	0.08												1.01
340	0.12	0.43	0.34	0.20												1.09
350	0.09	0.61	0.74	0.06												1.49
360	0.18	0.54	0.71	0.28												1.70
TOT.	5.88	29.71	30.57	16.82	7.41	3.74	2.62	1.49	0.84	0.41	0.27	0.17	0.04	0.01		100.00
Tot. cumul.	35.59	66.17	82.99	90.40	94.14	96.76	98.25	99.09	99.51	99.78	99.94	99.99	100.00	100.00		

Numero di eventi validi : 8923

Tabella 6.e

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza. ANNUALE

Ondametro di La Spezia

Periodo di riferimento 1 luglio 1989 - 30 giugno 2002

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)															TOT.
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	>=6.5	
10	0.210	0.694	0.526	0.162												1.592
20	0.273	0.813	0.518	0.136								0.003				1.743
30	0.202	0.458	0.242	0.048												0.950
40	0.139	0.236	0.088	0.006												0.469
50	0.068	0.159	0.080	0.011	0.003											0.321
60	0.060	0.151	0.065	0.014												0.290
70	0.057	0.136	0.034	0.011												0.239
80	0.063	0.100	0.051	0.023	0.011											0.247
90	0.048	0.117	0.048	0.014	0.003											0.230
100	0.071	0.134	0.060	0.020	0.006											0.290
110	0.045	0.151	0.088	0.017	0.003											0.304
120	0.088	0.222	0.151	0.102	0.009	0.003										0.574
130	0.065	0.316	0.461	0.145	0.048	0.006										1.041
140	0.131	0.569	0.540	0.205	0.037	0.009										1.490
150	0.185	0.845	0.580	0.316	0.065	0.003										1.993
160	0.245	1.035	0.847	0.560	0.142	0.023	0.006									2.858
170	0.324	1.322	1.072	0.645	0.210	0.057	0.017	0.003								3.651
180	0.694	2.917	2.016	0.893	0.409	0.162	0.068	0.028	0.026	0.003	0.009	0.009	0.003			7.237
190	0.472	1.561	0.930	0.304	0.108	0.045	0.014	0.003		0.009	0.003	0.003	0.003	0.003		3.458
200	0.606	1.294	0.790	0.378	0.094	0.057	0.009	0.009	0.003							3.239
210	0.674	1.405	0.927	0.634	0.239	0.119	0.040	0.060	0.006			0.003				4.106
220	0.697	1.908	1.797	1.641	1.046	0.557	0.202	0.060	0.026	0.003						7.936
230	1.012	3.478	3.560	2.889	2.147	1.336	0.754	0.401	0.242	0.080	0.014	0.009	0.006			15.926
240	1.069	4.260	3.779	2.272	1.123	0.637	0.472	0.259	0.225	0.142	0.085	0.020	0.006	0.003	0.003	14.354
250	1.112	3.051	1.740	0.626	0.310	0.114	0.065	0.040	0.014	0.006	0.006					7.083
260	0.790	2.056	0.725	0.364	0.080	0.040	0.014	0.009								4.078
270	0.682	1.470	0.549	0.199	0.054	0.031	0.020									3.006
280	0.535	1.100	0.540	0.162	0.054	0.014	0.006									2.411
290	0.483	0.765	0.284	0.122	0.017											1.672
300	0.350	0.566	0.284	0.074	0.014	0.003										1.291
310	0.273	0.404	0.301	0.080	0.014	0.009										1.081
320	0.227	0.338	0.250	0.054	0.009											0.879
330	0.173	0.367	0.262	0.063		0.003										0.867
340	0.148	0.358	0.219	0.074	0.003											0.802
350	0.199	0.438	0.327	0.048												1.012
360	0.185	0.546	0.435	0.114												1.280
TOT.	12.66	35.74	25.17	13.43	6.26	3.23	1.69	0.87	0.54	0.24	0.12	0.05	0.02	0.01	0.00	100.00
Tot. cumul.		48.39	73.56	86.99	93.25	96.47	98.16	99.03	99.57	99.81	99.93	99.97	99.99	100.00	100.00	

Numero di eventi validi : 35168

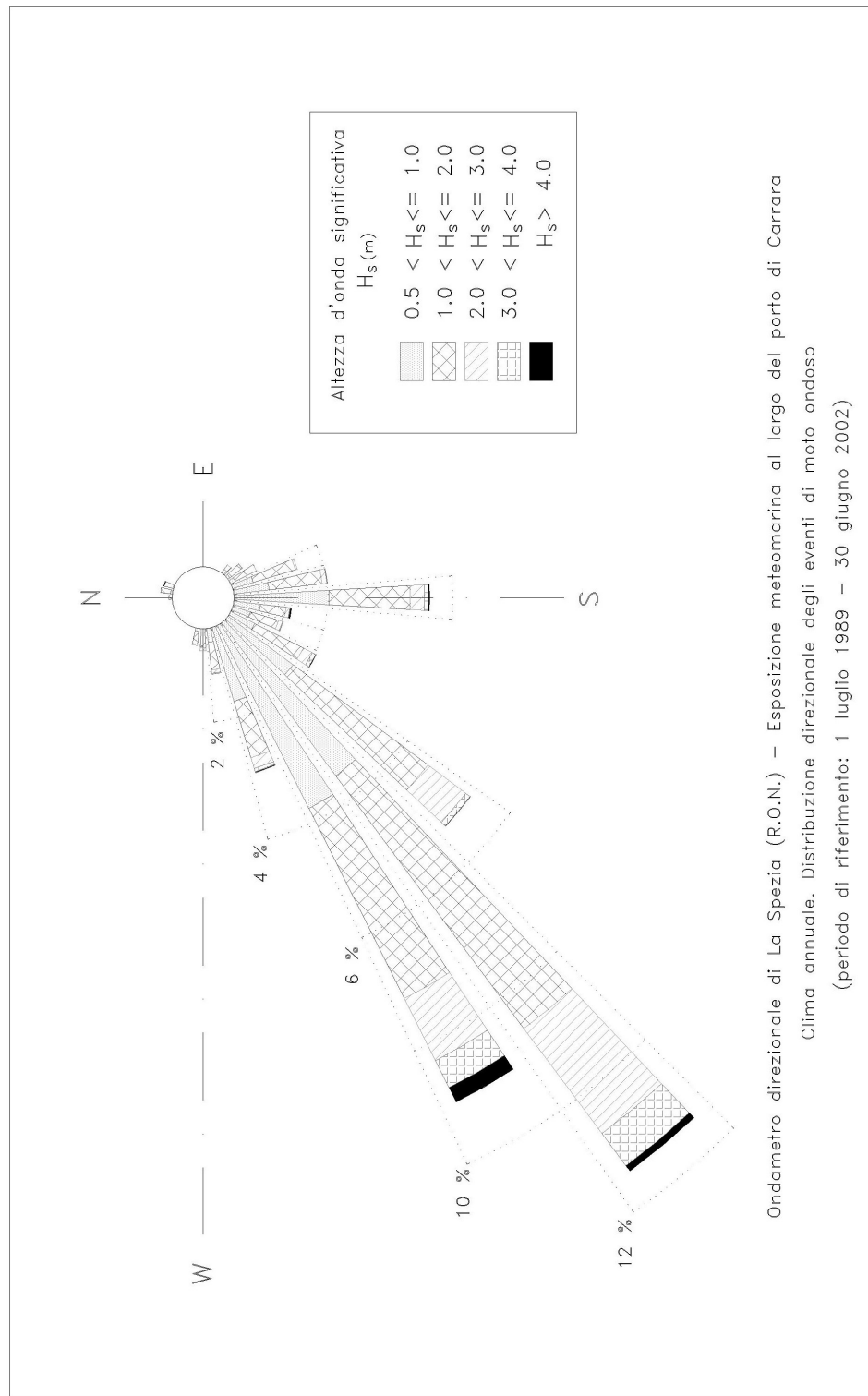


Fig. 5 – Clima annuale del moto ondoso al largo del Porto di Carrara

### **3.2 Propagazione sotto costa della serie ondometrica**

Per definire le condizioni di moto ondoso in prossimità della nuova scogliera di protezione del Molo di Levante è stato eseguito un apposito studio di simulazione dei fenomeni di propagazione del moto ondoso dal largo (ondametro di La Spezia) sino a ridosso della nuova scogliera del Molo di Levante.

Considerato che la distanza che separa il punto di misura (ondametro di La Spezia) ed il punto di interesse sottocosta è dell'ordine dei 20 km, si può ragionevolmente ritenere che l'influenza in termini percentuali dei meccanismi generativi del moto ondoso, ad opera del vento e che intervengono nella propagazione largo-riva, possano essere trascurati. Per quanto riguarda i meccanismi che possono alterare la propagazione delle onde sui fondali via via decrescenti che "collegano" il mare aperto alla zona di interesse, la buona regolarità dell'andamento delle linee batimetriche (mancanza di secche ed isolotti e/o scogli) che caratterizzano il litorale in esame permette di ritenere che essi siano costituiti in modo dominante dalla rifrazione e dallo shoaling e che possano essere ritenuti trascurabili sia i processi diffrattivi (diffrazione esterna ed interna) che dissipativi (attrito sul fondo e frangimento).

In definitiva è stato utilizzato il modello numerico denominato MEROPE <sup>(4)</sup> che effettua la rifrazione inversa spettrale, di intere serie storiche di dati ondometrici, sino a punti posti all'esterno della linea dei frangenti. Questo modello era stato già utilizzato nell'ambito della redazione del nuovo PRP ed in quell'occasione era stato confrontato con il modello denominato SWAN <sup>(5)</sup> che consente di simulare la rifrazione diretta spettrale dimostrandone la piena affidabilità per il sito in esame.

La prima fase delle modellazioni numeriche dei fenomeni di propagazione del moto ondoso richiede la digitalizzazione dei valori di profondità ricavati da carte

---

<sup>4</sup> Modello numerico implementato dalla MODIMAR s.r.l.

<sup>5</sup> Modello numerico implementato dai laboratori DELFT e distribuito in versione shareware

nautiche con la costruzione di un adeguato reticolo batimetrico che tenga conto della topografia sottomarina sui "bassi" fondali (profondità inferiori alla semi-lunghezza d'onda, cioè dell'ordine dei 100 m). Nel presente caso i valori di profondità sono stati definiti sulla base della carta nautica n.3 "Da Portofino al Gombo" (scala 1:100.000) redatta dall'Istituto Idrografico e Mareografico della Marina Militare Italiana.

Nella figura 6 è rappresentata la griglia di calcolo ed il punto di rifrazione considerato.

In una prima fase sono stati calcolati 24 piani d'onda d'inversa per altrettanti periodi compresi tra 0.8 e 24 secondi, tracciando una serie di raggi (ortogonali ai fronti d'onda), spazati di  $0.5^\circ$ , sino a coprire l'intero settore (geografico) di traversia. In definitiva per ciascun punto sono stati calcolati 400 raggi di propagazione riva-largo, relativi ad un settore compreso tra  $200^\circ$  e  $40^\circ\text{N}$ .

Il tracciamento (con tecnica inversa) dei piani d'onda è stato effettuato tenendo conto del settore geografico di traversia (spingendo i raggi oltre l'isobata -100 m).

Nelle figure 7.a e 7.b sono rappresentate in forma grafica, in funzione delle direzioni del moto ondoso dal largo, i corrispondenti valori del coefficiente di rifrazione (rapporto tra l'altezza d'onda sottocosta ed al largo) e della direzione calcolati a riva per alcuni spettri di moto ondoso rappresentativi della possibile esposizione meteomarina del sito in esame.

In una seconda fase tutta la serie di dati ondametrici della stazione di La Spezia è stata propagata con il modello Merope sino al punto di inversa prospiciente il Molo di Levante (tab. 7 e fig. 8).

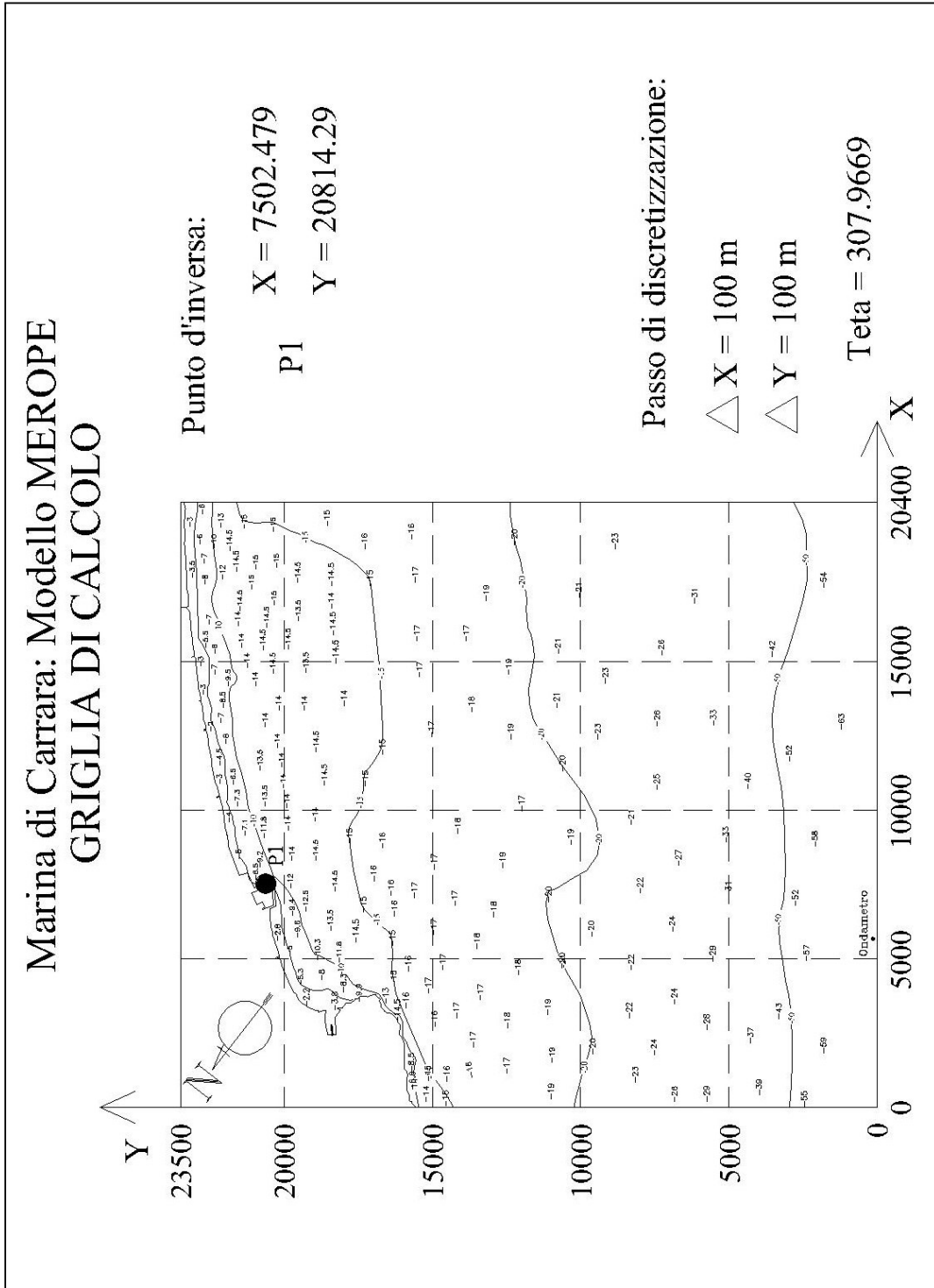


Fig. 6 – Applicazione del modello di propagazione inversa spettrale per l'analisi



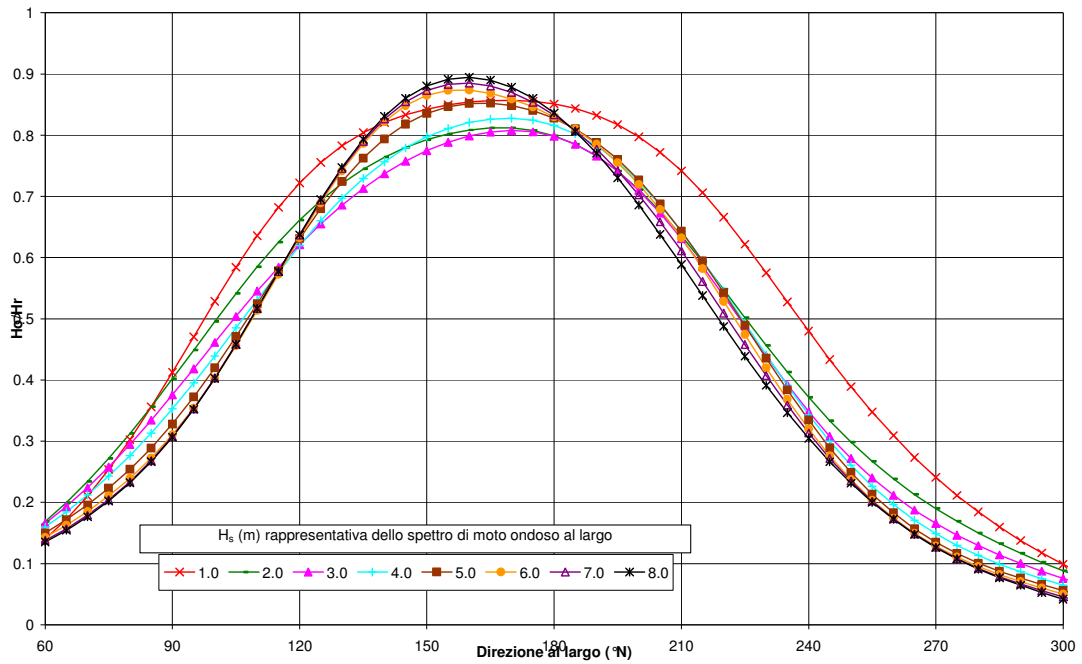


Fig. 7.a Coefficiente di rifrazione delle onde in funzione della direzione di provenienza al largo

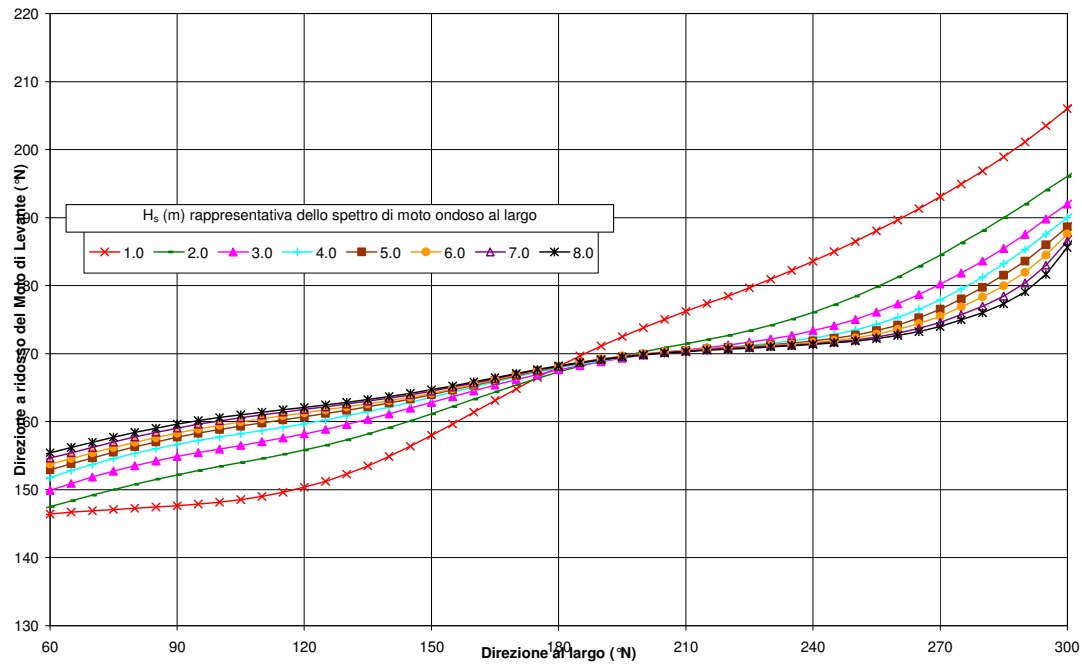


Fig. 7.b Direzione dell'onda rifratta sottocosta in funzione della direzione di provenienza al largo

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza. ANNUALE

Propagazione della serie ondometrica di La Spezia (molo di levante del porto di Carrara)

Periodo di riferimento 1 luglio 1989 - 30 giugno 2002

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5		>=6.5
10																
20																
30																
40																
50	0.015															0.015
60																
70																
80																
90																
100																
110																
120																
130																
140	1.78	0.024														1.80
150	2.81	1.332	1.137	0.079	0.006											5.37
160	1.05	2.768	3.106	0.936	0.104	0.009										7.97
170	11.56	14.864	15.519	4.810	1.070	0.131	0.012	0.006	0.006	0.003						47.98
180	13.90	6.133	1.006	0.006												21.05
190	7.58	0.424	0.006													8.01
200	4.25	0.012														4.26
210	2.61															2.61
220	0.80															0.80
230	0.14															0.14
240																
250																
260																
270																
280																
290																
300																
310																
320																
330																
340																
350																
360																
TOT.	46.49	25.56	20.77	5.83	1.18	0.14	0.01	0.01	0.01	0.00						100.00
Tot. cumul.		72.05	92.82	98.65	99.83	99.97	99.98	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Numero di eventi validi : 32805

Tab. 7 - Clima annuale del moto ondoso a ridosso del Molo di Levante

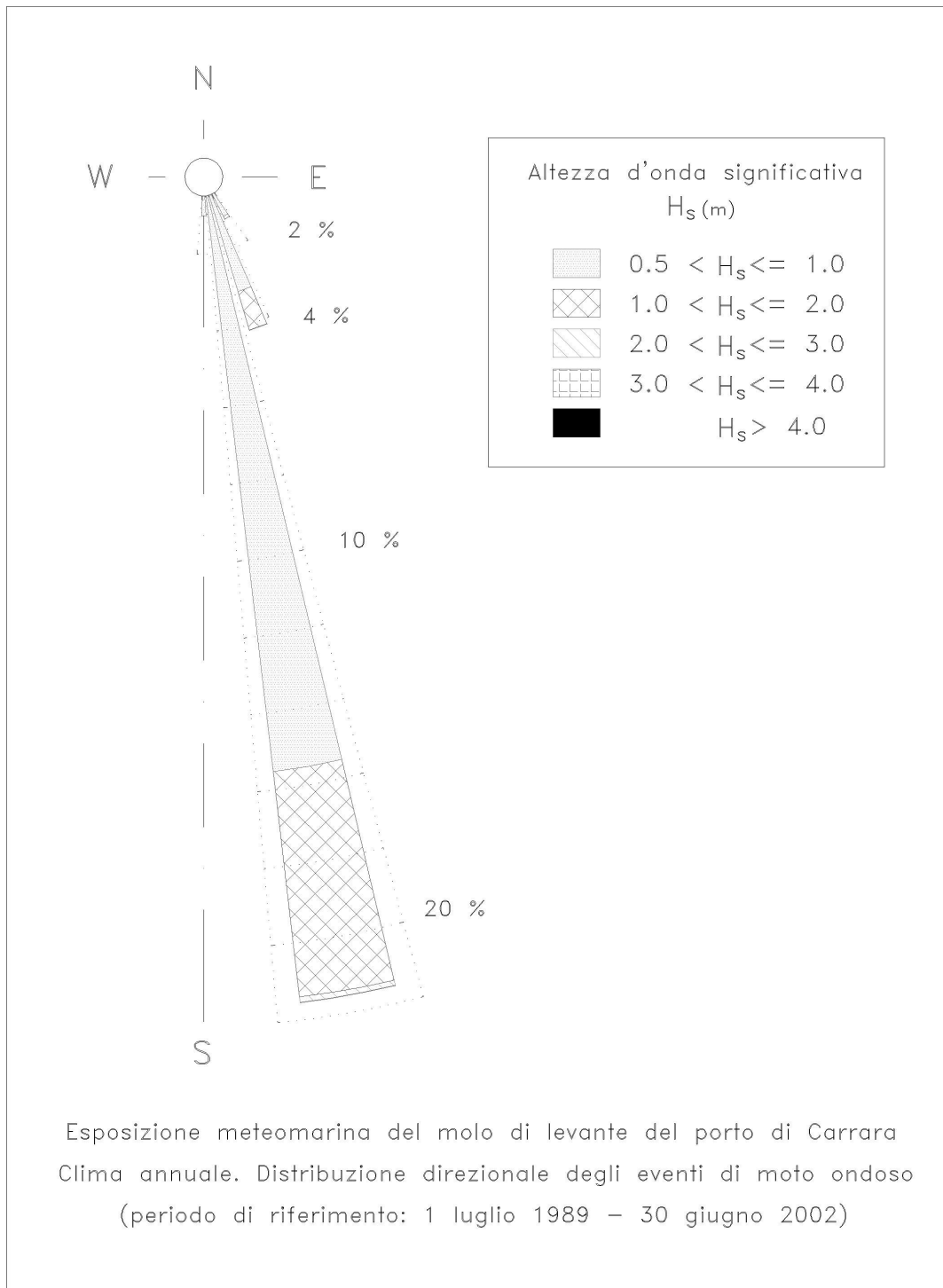


Fig. 8 - Clima annuale del moto ondoso a ridosso del Molo di Levante

Dall'esame degli abachi rappresentativi delle condizioni di propagazione del moto ondoso dal largo sino a ridosso del Molo di Levante comparati con la serie di dati ondametrici, "virtualmente" rappresentativi degli stati di mare che negli ultimi 13 anni hanno interessato il Molo di Levante, si può notare che l'azione di ridosso della diga di sopraflutto è ovviamente molto marcata e protegge validamente dagli stati di mare di ponente e libeccio schermando anche parte delle componenti da mezzogiorno.

In particolare

- il settore di traversia si stringe sensibilmente ed è compreso tra 140 e 210°N;
- oltre il 70 % degli eventi (corrispondente ad una durata di 8.4 mesi) ha una altezza significativa inferiore ai 0.5 m (valore di soglia degli stati di mare trascurabili anche ai fini della modellazione dei litorali);
- gli eventi con  $H_s > 2.0$  (eventi estremi) provengono essenzialmente dal settore di libeccio con una frequenza inferiore allo 0.2%.
- le massime altezze d'onda sono comunque inferiori a 4,5 m e limitate al settore compreso tra 165 e 175 °N.

### **3.3 *Analisi statistiche degli eventi estremi al largo***

Per la determinazione della cosiddetta "onda di progetto" in acqua profonda è necessario eseguire un'elaborazione statistica delle altezze d'onda maggiori relative alla serie storica di riferimento desunta dalle registrazioni ondametriche. Mediante regolarizzazione della serie di eventi estremi, secondo note funzioni probabilistiche, è possibile ricavare le caratteristiche del moto ondoso (definite in termini di altezza significativa e periodo) da associare ad assegnati tempi di ritorno (o probabilità di occorrenza).

Nel caso di serie di dati relativi a misure di altezza d'onda è più affidabile l'analisi statistica di serie tronche, ottenute selezionando per i diversi settori direzionali di caratteristiche omogenee tutte le altezze d'onda significative, registrate al picco di mareggiate indipendenti superiori ad una soglia prefissata. Infatti, il metodo delle serie tronche è da preferire sia al metodo dei massimi

annuali (dati in numero limitato e per alcune “annate” ben poco estremi) sia a quello dell’analisi di tutta la serie di eventi di moto ondoso (sicuramente non indipendenti e poco omogenei). La scelta della soglia di troncamento deve essere effettuata al fine di garantire comunque una selezione di un numero di eventi estremi comparabile con il numero di anni di osservazione.

Per la definizione del settore di provenienza del moto ondoso si è fatto riferimento alla figura 9 in cui gli eventi estremi caratterizzanti il paraggio sono rappresentati in un diagramma scatter-polare (Hs-Dir); tale figura evidenzia che gli eventi estremi sono concentrati essenzialmente in un settore compreso tra le direzioni 150°N e 250°N. Per poter eseguire una elaborazione statistica su campioni costituiti da dati omogenei, tale settore è stato dunque suddiviso in due sottosezioni di uguale ampiezza, il settore 1 compreso tra le direzioni 150° e 200°N ed il settore 2 compreso tra le direzioni 200° e 250°N.

Per entrambe i settori si sono ricavati 19 eventi sopra soglia utilizzando il metodo POT e considerando per il settore 1 una soglia di troncamento pari a 2,0 m e per il settore 2, caratterizzato da eventi di maggiore intensità, una soglia di 4,5 m.

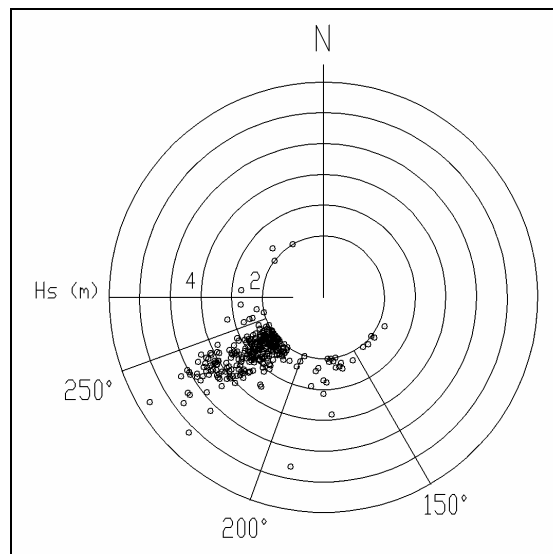


Fig.9 : Rappresentazione in forma di diagramma scatter-plot degli eventi estremi

Le serie tronche selezionate sono state elaborate effettuando dapprima una regolarizzazione di tipo statistico delle serie di valori riferita al periodo di misure (12,04 anni).

Successivamente le serie "tronche" di dati sono state riferite alle usuali leggi di distribuzione probabilistica, al fine di determinare il valore "di progetto" con un prefissato tempo di ritorno, o la probabilità di non superamento durante la vita delle opere.

Le leggi adottate di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento (funzione di ripartizione) sono quella di Weibull:

$$P(X \leq x) = 1 - e^{-\left[\frac{(x-B)}{A}\right]^\alpha}$$

e la legge di Gumbel (1988):

$$P(X \leq x) = \exp[-\exp[-(x-b)/a]]$$

dove X è la variabile aleatoria, x il valore di non superamento e  $\alpha$ , A, B, a, b sono i parametri delle distribuzioni.

Tenendo conto che la probabilità cumulata di non superamento è legata al tempo di ritorno dell'evento dalla relazione:

$$Tr(X \leq x) = \frac{1}{(1 - P(X \leq x))}$$

Considerando, in via cautelativa, i risultati forniti in funzione della legge di Gumbel, le altezze d'onda significative, associate ai tempi di ritorno (Tr) di 3, 6 e 50 anni, sono quelle riportate nella seguente tabella:

Tempo di ritorno (anni)	Settore di provenienza (°Nord)	
	150÷200	200÷250
3	3.2	5.5
6	3.7	6.0
50	5.1	7.4

Tab.8 – Eventi estremi. Altezza significativa  $H_s$  (m) al largo per settori di provenienza

Per la definizione del periodo associato all'altezza d'onda di progetto è uso corrente determinarlo per mezzo di formule del tipo  $T = c H^{1/m}$  (vedi le espressioni Bretschneider, Grancini ed altri); nel nostro caso si è utilizzato  $T_p = 4.51 \cdot \sqrt{H_s}$ .

### 3.4 Caratteristiche dell'onda di progetto a ridosso del Molo di Levante

A conclusione dello studio meteomarinò l'analisi dei fenomeni di propagazione dal largo sino a ridosso del Molo di Levante (par 3.2) combinato con l'analisi degli eventi estremi al largo (par 3.3) ha portato alla redazione della seguente tabella di sintesi:

Tr	LARGO		RIVA	
	Hs	Dir	Hs	Dir
3	3.2	150÷200	2.2-2.6	162-170
	5.5	200÷250	1.5-3.8	170-175
6	3.7	150÷200	2.6-2.9	165-170
	6.0	200÷250	1.5-4.2	170-172
50	5.1	150÷200	3.6-4.3	165-170
	7.4	200÷250	2.1-5.2	170-172

Tab.9 : Altezze d'onda a largo e a riva per vari tempi di ritorno e settori di provenienza.

Ne risulta che le onde di progetto per le fasi di esercizio ed esecuzione della nuova scogliera posta a difesa del Molo di Levante sono comunque contraddistinte da un settore di provenienza molto limitato, compreso tra i 165° e 170°N con valori dell'altezza d'onda massimi pari rispettivamente a 4.3 m e 5.2 per eventi con tempi di ritorno cinquantennali provenienti dai settori 150°-200°N e 200°-250°N.