



COMUNE DI MONTE ARGENTARIO

SP\_o2

STUDIO METEOMARINO

Regione  
Toscana



PIANO REGOLATORE PORTUALE



COMUNE DI MONTE ARGENTARIO  
PORTO S.STEFANO  
PORTO DEL VALLE

P  
R  
P  
2  
0  
0  
3



PIANO REGOLATORE PORTUALE 2003  
( CON VARIANTE 2005 )

Progettista e coordinatore: prof. ing. Leopoldo Franco

Opere marittime e studi idraulico-marittimi: Modimar S.r.l.

Aspetti urbanistici ed architettonici: Studio 3c+t Capolei Cavalli Architetti Associati

Aspetti pianificatori ed ambientali: VDP srl, Progettazione Integrata Ambiente

TITOLO DOCUMENTO :	DATA :	NUMERO DOCUMENTO :
STUDIO METEOMARINO	LUGLIO 2003	3

INDICE

<b>1</b>	<b>Premesse .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Ubicazione ed esposizione del paraggio al moto ondoso .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Regime dei venti.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Correnti .....</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Variazioni del livello marino .....</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Regime del moto ondoso .....</b>	<b>15</b>
6.1	<i>Caratteristiche del moto ondoso al largo .....</i>	<i>16</i>
6.2	<i>Propagazione sotto costa della serie di misure ondametriche .....</i>	<i>23</i>
<b>7</b>	<b>Analisi statistiche degli eventi estremi.....</b>	<b>41</b>
<b>8</b>	<b>Determinazione dell'onda di progetto.....</b>	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>Appendice:.....</b>	<b>48</b>
9.1	<i>Descrizione del modello di ricostruzione di moto ondoso (hindcasting) ALTAIR.....</i>	<i>48</i>
9.2	<i>Descrizione del modello di propagazione inversa spettrale MEROPE.....</i>	<i>52</i>

## **1 Premesse**

Per una corretta pianificazione e progettazione delle nuove opere marittime del Porto di Valle sono state sviluppate alcune indagini conoscitive, volte al reperimento ed all'analisi (anche con modelli matematici) dei dati esistenti relativi alle caratteristiche meteomarine, soprattutto riguardanti il regime di moto ondoso.

I temi d'indagine principali sono stati così articolati: caratteristiche geografiche del paraggio; esposizione ai venti (stazioni meteorologiche di Monte Argentario, Isola di Pianosa, Isola d'Elba e Isola del Giglio); esposizione al moto ondoso (ricostruzione indiretta da dati di vento); variazioni dei livelli marini; correnti.

Il presente studio descrive il lavoro svolto dall'ing. Giancarlo Milana con il coordinamento del prof. ing. Leopoldo Franco.

## 2 Ubicazione ed esposizione del paraggio al moto ondoso

Il porto di Porto S.Stefano è ubicato in prossimità dell'estremità nord-occidentale del promontorio dell'Argentario, in una posizione abbastanza favorevole dal punto di vista marittimo e portuale.

La Punta Lividonia crea infatti un ottimo ridosso da tutti i mari occidentali, lasciando così il porto direttamente esposto ai soli moti ondosi provenienti dal settore settentrionale compreso tra le direzioni 300°N e 90°N. La vicinanza della falcatura del Tombolo della Giannella che si estende a nord fino a Talamone costituisce un brusco limite per le possibili aree di generazione delle onde generate dai venti a volte violenti da N e NE.

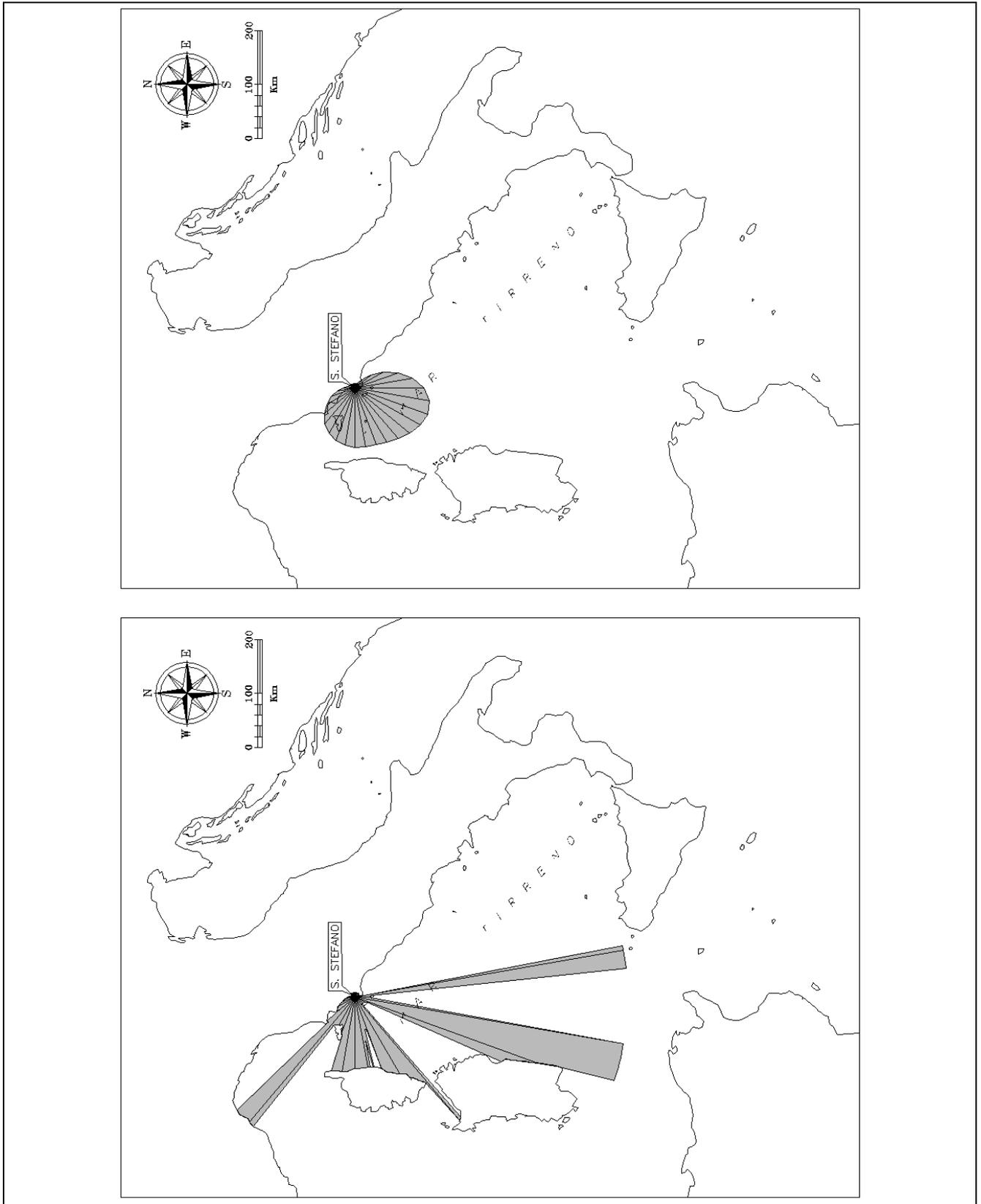
Le mareggiate provenienti da Ovest (fino alla direzione 290°N), risultano invece fortemente diffratte dalla Punta, anche perché il porto si trova relativamente distante da questa (circa 2 Km) rispetto alle possibili lunghezze delle onde incidenti, che vi giungono alquanto smorzate.

Ponendosi al largo su fondali di circa -100 m, per ridurre l'effetto schermo del promontorio del Monte Argentario, ad una distanza di circa 10 km dal porto, il paraggio è esposto al mare aperto per un ampio settore di traversia, delimitato a Nord dall'Isola d'Elba (300 °N) e a Sud dal promontorio dell'Argentario. Si affaccia sul mar Tirreno ed è limitato dalla costa della Sardegna (distante circa 250 Km), dalla costa della Corsica (distante circa 150 Km) – Figura Figura 2-1.

Per un'analisi del settore di traversia, più propriamente mirata alla valutazione delle condizioni di possibile esposizione agli stati di mare è ormai prassi consolidata fare riferimento al cosiddetto fetch efficace, porzione di mare che costituisce, sotto l'azione diretta dei venti costanti, l'area di generazione del moto ondoso.

A tal proposito si è proceduto, considerando i limiti geografici del settore di traversia valutando le porzioni di mare effettivamente coinvolte dal fenomeno di generazione del moto ondoso. Introdotti i valori dei fetches geografici, relativi alle diverse direzioni contenute entro il settore di traversia del paraggio in esame, si determina il settore "efficace" ( Figura 2-1 e tab.2.1) secondo il metodo descritto nel capitolo 6.1. I fetches geografici son limitati ad una estensione geografica massima di 500 km. Tale limitazione è dovuta al fatto che nel Mar Mediterraneo le perturbazioni cicloniche hanno estensioni massime dell'ordine dei 500 km.

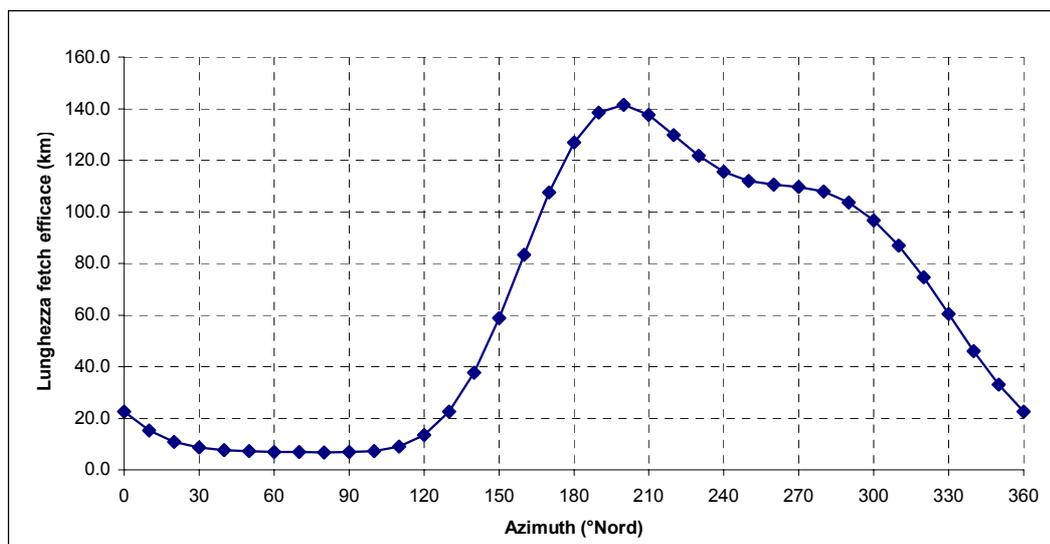
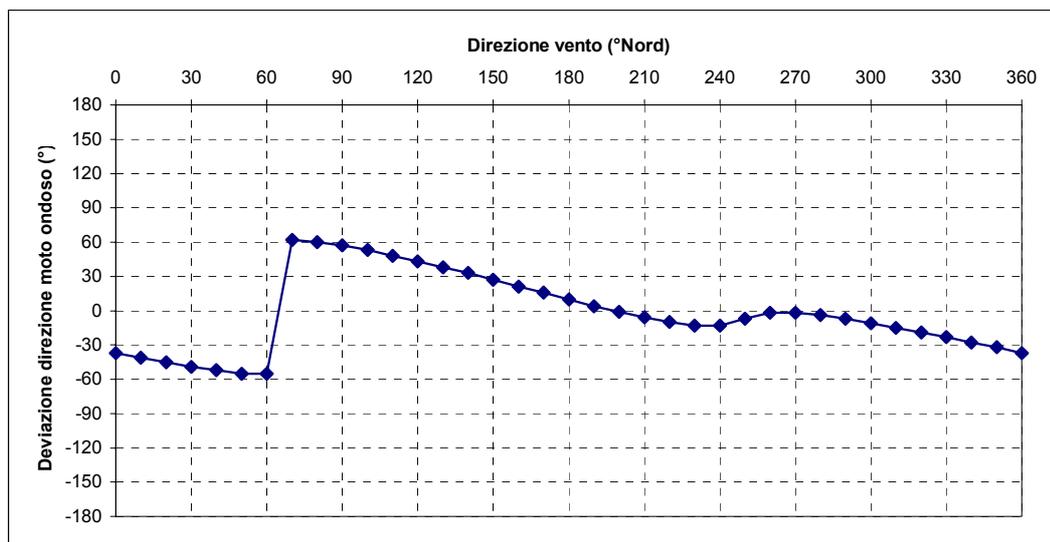
Nel contempo si definisce la legge di deviazione direzionale tra la direzione media del vento e la direzione del moto ondoso generato (tab.2.1). Il fetch efficace massimo che ne deriva è pari a circa 140 km ed è riferibile al settore sud-sudovest (190°-210°N mezzogiorno-libeccio).



**Figura 2-1 – Fetch geografici ed efficaci al largo di Santo Stefano**

**Tabella 2-1 - Fetch geografici ed efficaci al largo di S.Stefano**

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	13.53	22.55	-37.0	180	27.78	126.88	10.0
10	8.72	15.27	-41.0	190	500.00	138.48	4.0
20	7.18	10.93	-45.0	200	357.86	141.51	-1.0
30	8.78	8.74	-49.0	210	20.05	137.57	-6.0
40	8.38	7.72	-52.0	220	17.90	129.87	-10.0
50	7.85	7.21	-55.0	230	298.00	121.75	-13.0
60	7.51	6.97	-55.0	240	164.24	115.52	-13.0
70	7.41	6.87	62.0	250	141.13	112.00	-7.0
80	7.54	6.84	60.0	260	132.18	110.57	-2.0
90	7.73	6.88	57.0	270	133.26	109.73	-2.0
100	7.63	7.32	53.0	280	140.24	107.84	-4.0
110	7.77	9.08	48.0	290	73.42	103.68	-7.0
120	8.16	13.55	43.0	300	60.06	96.77	-11.0
130	8.55	22.60	38.0	310	302.37	87.02	-15.0
140	8.21	37.76	33.0	320	46.48	74.64	-19.0
150	7.97	58.83	27.0	330	37.11	60.49	-23.0
160	7.54	83.42	21.0	340	25.20	46.06	-28.0
170	500.00	107.52	16.0	350	17.99	33.00	-32.0



### 3 Regime dei venti

La conoscenza del "clima anemologico" locale, cioè della distribuzione di frequenza della velocità e direzione del vento, è importante per la scelta della ubicazione e configurazione planimetrica del porto, con particolare riguardo all'orientamento delle dighe frangiflutti, dell'imboccatura e dei pontili di ormeggio.

E' noto infatti che le imbarcazioni rispondono molto meglio alle azioni di venti longitudinali (paralleli all'asse longitudinale della barca) piuttosto che trasversali, in particolar modo durante le delicate manovre negli spazi ristretti del bacino portuale ed in fase di stazionamento.

Inoltre la conoscenza della forza del vento è necessaria per il dimensionamento dei pontili di accosto ed altre strutture emergenti e per il calcolo degli effetti sulle variazioni del livello marino sottocosta.

In mancanza di misure dirette del moto ondoso, occorre ricostruire il moto ondoso attraverso dei modelli matematici, basati sui dati di vento (ad es. SMB): a tal fine è necessaria la conoscenza in dettaglio del "clima anemologico" dell'area di generazione del moto ondoso. La stazione anemometrica deve essere ubicata il più possibile centrale rispetto all'area di generazione ed inoltre le misure anemometriche non devono essere condizionate dall'orografia del sito. La stazione che più si avvicina a tali condizioni è quella di Pianosa, ubicata su un'isola pianeggiante a metà del feto tra l'Argentario e la Corsica.

Per una attenta analisi del regime dei venti sono stati analizzati i dati delle stazioni anemometriche di Pianosa (Aeronautica Militare – A.M.: periodo dal 1951 al 1978 – quota +15 m s.l.m.), Monte Argentario (A.M.: periodo da gennaio 1961 a dicembre 1977 – quota +631 m s.l.m.), Elba (A.M.: periodo da gennaio 1961 a dicembre 1977 – quota +396 m s.l.m.), Isola del Giglio (Marina Militare - M.M.: periodo da 1930 a 1942 e da 1946 a 1952) e Elba (M.M.: periodo 1930-42 e 1947-60).

La distribuzione delle frequenze annuali, per settori di provenienza (8 con ampiezza di 45° o 16 da 22.5°) e 5 classi di intensità del vento (più le calme), è stata sintetizzata in forma tabellare e grafica nelle figure 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. Si nota una certa variabilità dei regimi di vento nelle diverse stazioni (in termini sia di direzione che di intensità) a causa delle diverse esposizioni anemometriche.

Appare chiaro che i venti locali (stazione sul Monte Argentario – quota 631 m s.l.m.) prevalenti (più frequenti e più intensi) sono diretti lungo l'asse Sud-Ovest (libeccio) e Nord-Est (grecale). Si nota inoltre che i venti più intensi (con la velocità del vento maggiore di 25 nodi) hanno una frequenza

inferiore all'10% (circa 30 giorni l'anno). Nella zona del porto tale frequenza è comunque ben minore per la quota più bassa ed il ridosso orografico dei venti meridionali.

I venti prevalenti che generano il moto ondoso nel Tirreno centro-settentrionale provengono essenzialmente da nord-ovest (maestrale) e da sud-ovest (libeccio), essendo schermati da ponente dai rilievi montuosi della Corsica.

Si ricorda inoltre che le velocità aumentano in modo logaritmico con l'altitudine. I dati del Monte Argentario e dell'Isola d'Elba devono essere ridotti di circa il 30% per riportarli al livello del mare.

Figura 3-1- STAZIONE A.M. DI PIANOSA

Direzione e velocità del vento  
 Distribuzione delle frequenze annuali (media sul periodo 1951 ÷ 1978)

DIR (°N)	Classi di velocità (nodi)						Totali
	0 ÷ 1	2 ÷ 4	5 ÷ 7	8 ÷ 12	13 ÷ 23	24 ÷ 99	
0.0 ÷ 22.5		8.17	12.33	18.75	16.49	5.02	60.76
22.5 ÷ 45.0		7.35	7.61	11.35	13.50	5.47	45.28
45.0 ÷ 67.5		11.02	14.19	19.31	20.92	6.14	71.58
67.5 ÷ 90.0		10.57	12.29	11.46	5.36	1.03	40.71
90.0 ÷ 112.5		11.70	16.51	15.95	7.52	1.61	53.29
112.5 ÷ 135.0		16.01	23.74	25.89	14.16	4.33	84.13
135.0 ÷ 157.5		13.99	15.09	17.06	12.21	5.08	63.43
157.5 ÷ 180.0		18.20	23.73	26.72	21.48	6.92	97.05
180.0 ÷ 202.5		11.12	13.62	15.86	11.86	3.98	56.44
202.5 ÷ 225.0		8.20	7.02	4.87	3.59	0.91	24.59
225.0 ÷ 247.5		5.33	5.24	4.57	2.54	0.41	18.09
247.5 ÷ 270.0		2.75	2.47	1.77	1.23	0.82	9.04
270.0 ÷ 292.5		3.05	2.79	1.86	2.12	1.61	11.43
292.5 ÷ 315.0		4.40	3.98	3.37	4.94	3.63	20.32
315.0 ÷ 337.5		8.16	13.71	20.00	16.10	5.69	63.66
337.5 ÷ 360.0		10.52	16.32	25.76	23.72	6.04	82.36
VARIABILI		0.00	0.11	1.07	2.13	2.23	5.54
0 ÷ .5 m/s	192.3						192.3
<b>Totali</b>	<b>192.3</b>	<b>150.54</b>	<b>190.75</b>	<b>225.62</b>	<b>179.87</b>	<b>60.92</b>	<b>1000.00</b>

Quota strumento (m s.l.m.) 15  
 Numero totale eventi: 72654  
 (\*) Valori per migliaia di unità

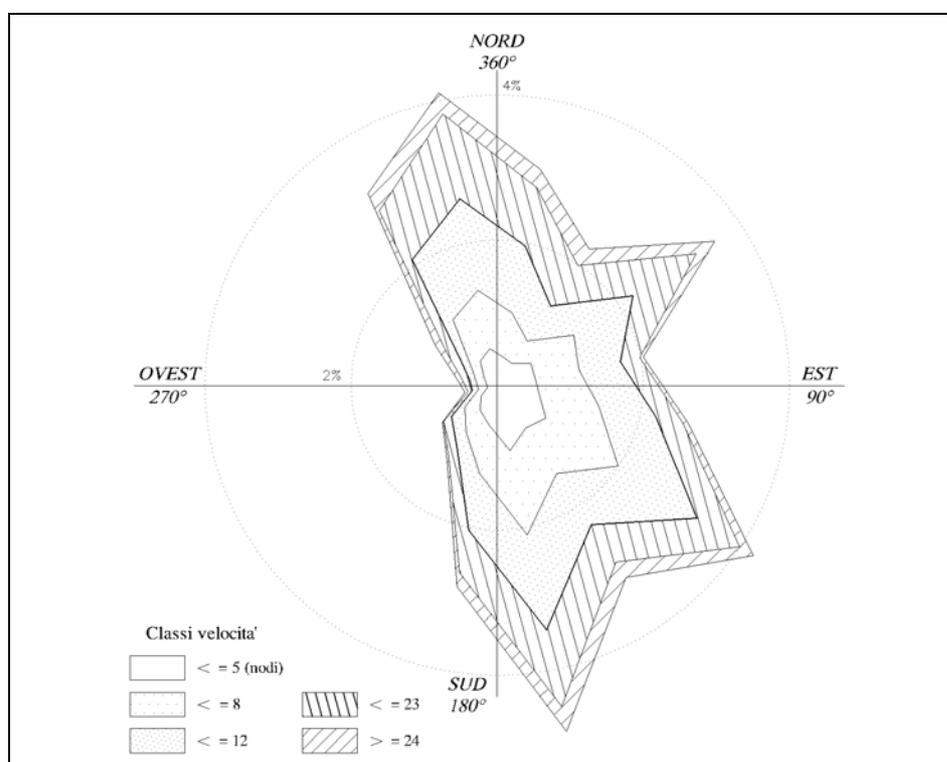


Figura 3-2 - STAZIONE A.M. DI MONTE ARGENTARIO

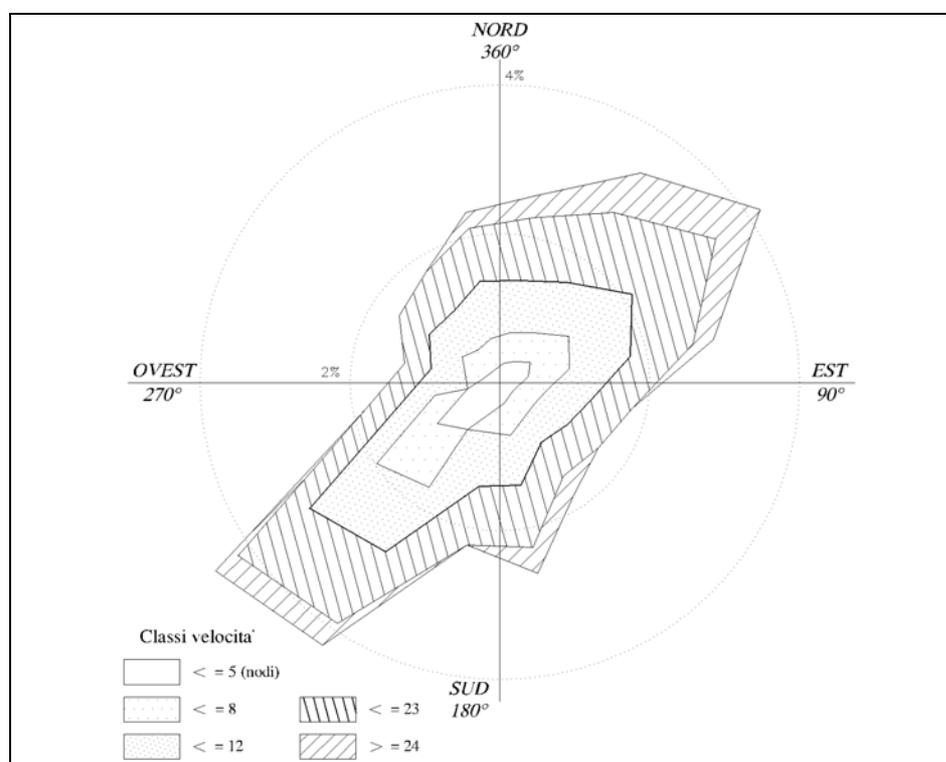
Direzione e velocità del vento  
Distribuzione delle frequenze annuali(\*) (media su periodo 1961 ÷ 77)

DIR (°N)	Classi di velocità (nodi)						Totali
	0 ÷ 1	2 ÷ 4	5 ÷ 7	8 ÷ 12	13 ÷ 23	24 ÷ 99	
0.0 ÷ 22.5		5.11	8.40	14.24	17.36	6.17	51.28
22.5 ÷ 45.0		6.73	9.35	16.14	22.67	12.80	67.69
45.0 ÷ 67.5		9.77	12.37	20.26	26.85	14.45	83.70
67.5 ÷ 90.0		7.77	11.20	16.48	17.12	5.50	58.07
90.0 ÷ 112.5		4.96	7.69	12.14	11.28	4.84	40.91
112.5 ÷ 135.0		4.25	6.59	10.37	10.41	4.55	36.17
135.0 ÷ 157.5		3.99	6.49	9.11	10.87	5.48	35.94
157.5 ÷ 180.0		5.77	8.83	13.76	17.00	7.08	52.44
180.0 ÷ 202.5		5.62	8.29	14.68	16.16	5.98	50.73
202.5 ÷ 225.0		15.37	18.67	20.86	23.16	7.12	85.18
225.0 ÷ 247.5		20.01	19.49	21.62	22.94	7.25	91.31
247.5 ÷ 270.0		8.73	8.97	8.90	9.85	4.10	40.55
270.0 ÷ 292.5		4.46	6.51	7.78	7.09	2.43	28.27
292.5 ÷ 315.0		5.08	7.04	10.66	9.44	2.58	34.80
315.0 ÷ 337.5		4.28	6.15	12.17	12.96	2.81	38.37
337.5 ÷ 360.0		5.03	6.97	15.68	14.46	4.36	46.50
VARIABILI		1.40	0.54	0.87	1.90	0.85	5.56
0 ÷ .5 m/s	152.53						152.53
<b>Totali</b>	<b>152.53</b>	<b>118.33</b>	<b>153.55</b>	<b>225.72</b>	<b>251.52</b>	<b>98.35</b>	<b>1000.00</b>

Quota strumento (m s.l.m.) 631

Numero totale eventi: 45873

(\*) Valori per migliaia di unità



## Figura 3-3 - STAZIONE A.M. DELL'ISOLA D'ELBA

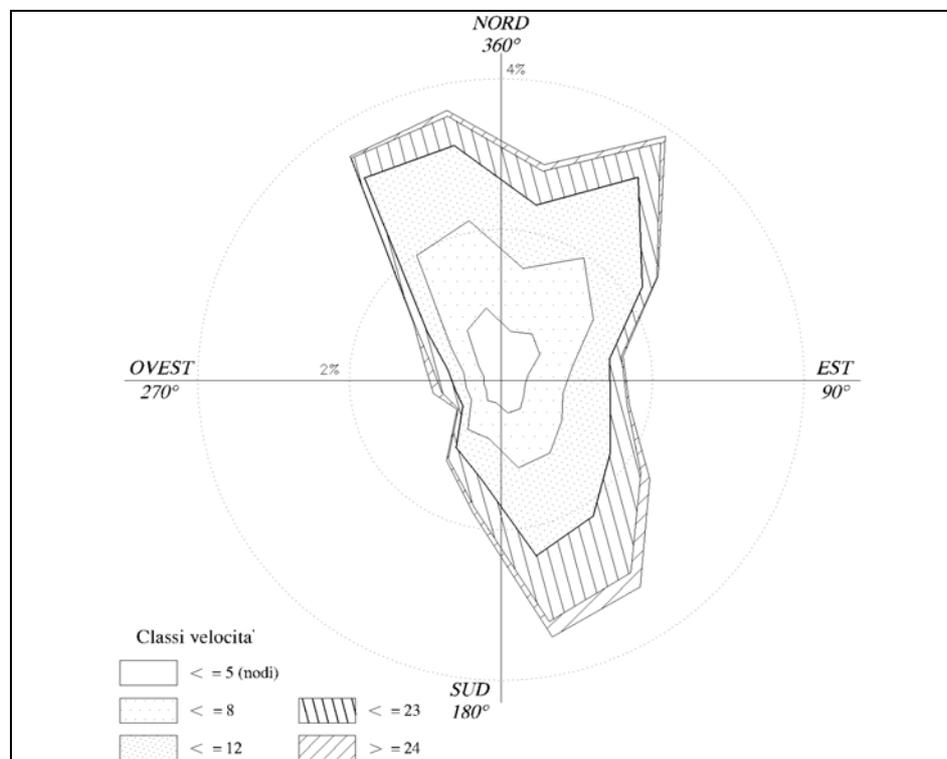
Direzione e velocità del vento  
Distribuzione delle frequenze annuali(\*) (media su periodo 1961 ÷ 77)

DIR (°N)	Classi di velocità (nodi)						Totali
	0 ÷ 1	2 ÷ 4	5 ÷ 7	8 ÷ 12	13 ÷ 23	24 ÷ 99	
0.0 ÷ 22.5		13.24	17.17	17.04	9.26	1.79	58.50
22.5 ÷ 45.0		14.86	24.41	25.61	11.00	2.08	77.96
45.0 ÷ 67.5		12.24	16.97	15.59	4.61	0.42	49.83
67.5 ÷ 90.0		7.19	12.05	9.99	3.20	0.33	32.76
90.0 ÷ 112.5		6.43	10.27	12.57	4.73	0.66	34.66
112.5 ÷ 135.0		7.29	11.93	15.43	9.65	2.87	47.17
135.0 ÷ 157.5		9.09	14.15	20.41	17.91	4.50	66.06
157.5 ÷ 180.0		8.78	14.88	24.00	17.70	4.12	69.48
180.0 ÷ 202.5		6.08	9.69	10.88	8.12	1.59	36.36
202.5 ÷ 225.0		6.51	9.14	5.80	3.60	0.69	25.74
225.0 ÷ 247.5		4.61	4.68	2.96	1.25	0.36	13.86
247.5 ÷ 270.0		4.63	4.72	3.10	3.50	2.22	18.17
270.0 ÷ 292.5		4.64	5.35	4.26	4.31	1.81	20.37
292.5 ÷ 315.0		7.12	8.74	7.55	4.03	0.40	27.84
315.0 ÷ 337.5		16.01	23.99	24.67	6.36	0.51	71.54
337.5 ÷ 360.0		19.70	23.61	20.24	8.09	1.47	73.11
VARIABILI		0.17	0.13	0.10	0.10	0.07	0.57
0 ÷ .5 m/s	276.02						276.02
<b>Totali</b>	<b>276.02</b>	<b>148.59</b>	<b>211.88</b>	<b>220.2</b>	<b>117.42</b>	<b>25.89</b>	<b>1000.00</b>

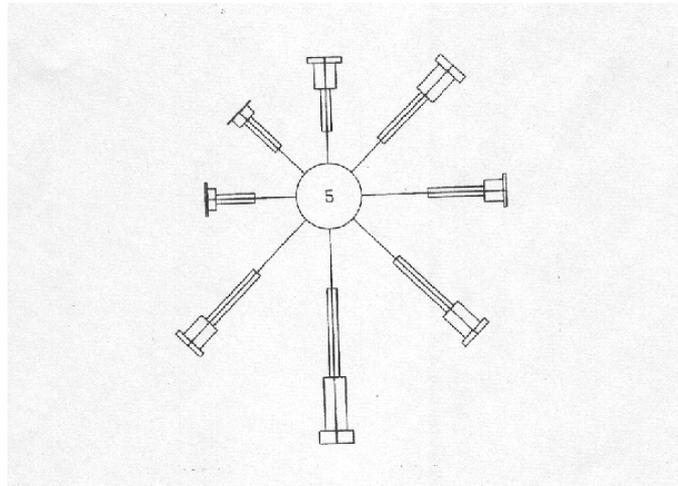
Quota strumento (m s.l.m.) 396

Numero totale eventi: 30106

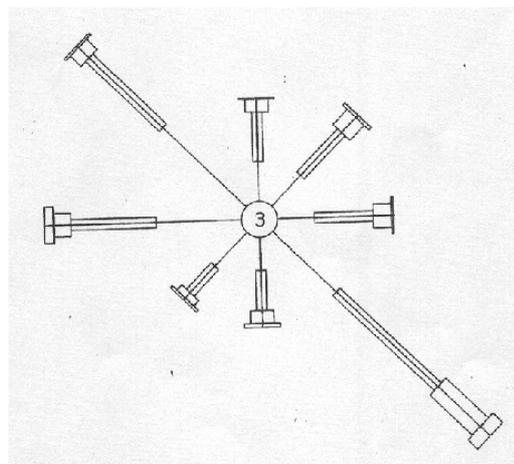
(\*) Valori per migliaia di unità



ISOLA DEL GIGLIO - STAZIONE METEOROLOGICA I.I.M.  
 DISTRIBUZIONE (%) POLARE DELLE MISURE DI VENTO  
 PERIODO DI OSSERVAZIONE 1930- 1952



ISOLA D'ELBA- STAZIONE METEOROLOGICA I.I.M.  
 DISTRIBUZIONE (%) POLARE DELLE MISURE DI VENTO  
 PERIODO DI OSSERVAZIONE 1930- 1960



LEGENDA - FORZA VENTO IN SCALA BEAUFORT

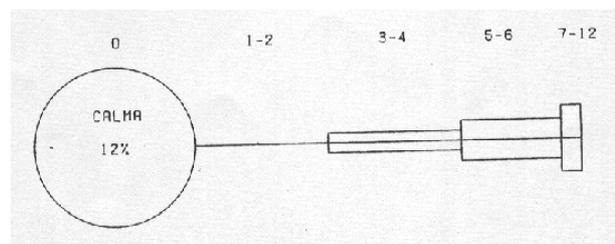


Figura 3-4 – DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEGLI STATI DI VENTO

## 4 Correnti

L'analisi d'insieme (riferita alla rappresentazione grafica estratta da "Atlante Tematico d'Italia" TCI, CNR – figura 4) mostra che, al largo della costa in esame, i flussi delle correnti di gradiente (o di densità) sono condizionati dal fenomeno di riflusso della circolazione d'insieme antioraria del Mar Tirreno e pertanto sono diretti da Sud verso Nord. In generale nel Tirreno centrale la 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. Anche le correnti associate ai venti ed alle onde hanno intensità modesta sui fondali di impianto dell'opera. In definitiva il regime delle correnti marine nel paraggio in esame ha effetti irrilevanti per la progettazione della nuova opera di difesa.

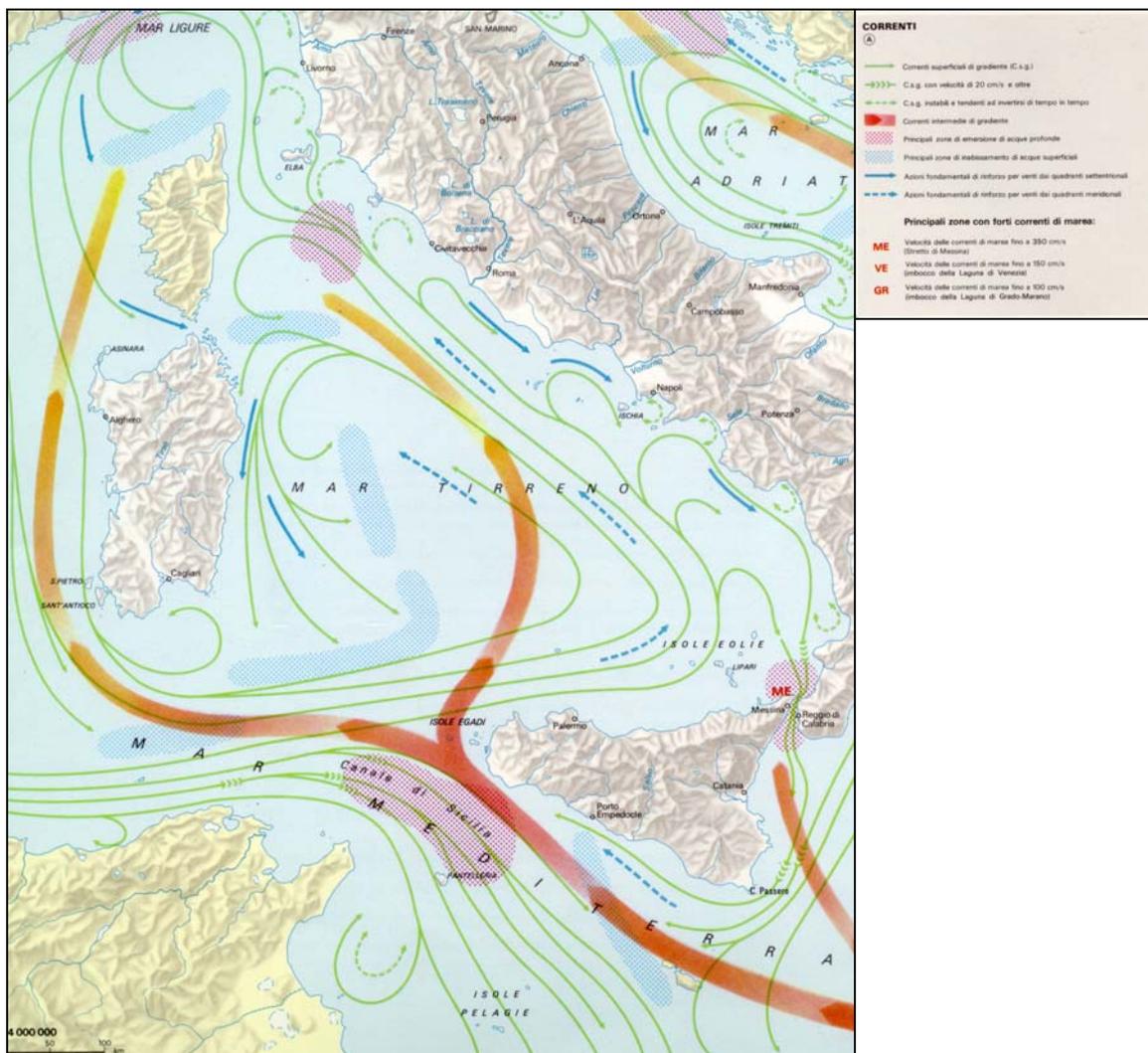


Figura 4-0– Analisi d’insieme delle correnti al largo di S.Stefano – TCI - CNR

## 5 Variazioni del livello marino

La conoscenza delle massime variazioni quasi-statiche del livello marino, dovute a cause diverse (principalmente marea astronomica e "meteorologica"), è necessaria per la corretta definizione delle quote di cresta da assegnare alle opere. 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).

Nel zona del Mar Tirreno ove ricade il paraggio costiero di Porto S.Stefano 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 base alle "Tavole di Marea", pubblicate annualmente dall'Ufficio Idrografico della Marina Militare; per il caso in esame si possono utilizzare i dati forniti per il porto di Civitavecchia e di Livorno. L'andamento temporale risultante è di tipo semidiurno (periodo 12 ore e 25 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 bisettimanale 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  $\pm 0.20$  m rispetto al livello medio marino (massimo dislivello pari a circa 0,40). Nelle fasi di quadratura l'escursione è limitata al massimo a  $\pm 0.15$  m s.l.m..

Per la definizione della marea meteorologica si distinguono:

- sovrizzo ed abbassamento barico (legati al passaggio dei cicloni ed anticicloni): considerata una condizione di minimo barico storico pari a 978 mb (28/12/1999) rispetto ad una condizione media di 1013 mb ne consegue un effetto di sovrizzo marino massimo pari a 0.35 m; considerando che il massimo barico pluriennale osservato è di 1040 mb, si ha un abbassamento locale del livello marino di circa 27 cm.
- sovrizzo di vento: l'effetto di innalzamento dei livelli sottocosta indotto dall'azione di venti foranei spiranti verso la costa campana è definito in funzione dell'estensione della piattaforma continentale (l'isobata -200 si trova a circa 30 km dalla imboccatura portuale). Il calcolo del sovrizzo di vento può essere effettuato con la nota relazione implicita:

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

essendo  $D=200$  m profondità limite assunta per la piattaforma continentale;  $L_p=30000$  m estensione della piattaforma continentale;  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup>;  $K_p = 3 \times 10^{-6}$ ;  $U = 25$  m/s velocità del

vento persistente. Ai fondali di posa dell'opera (tra -10 m e -15 m s.l.m.) risulta un sovrizzo di vento di pochi centimetri.

Infine si devono considerare le variazioni a lungo termine dovute a fenomeni di eustatismo: le attuali proiezioni prevedono un progressivo innalzamento del livello marino dovuto all'incremento della temperatura terrestre (effetto serra) stimabile in circa 30 cm nei prossimi 50 anni. Valutazioni meno pessimistiche considerano possibili incrementi di livello di poco superiori a quelli registrati nell'ultimo millennio. Si può assumere un innalzamento futuro di 15 cm.

In definitiva è possibile calcolare il massimo sovrizzo lungo riva 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 di carattere meteorologico ed astronomico; in definitiva, a fronte di un sovrizzo massimo assoluto pari a circa 0.75 m ( $0.20 + 0.35 + 0.05 + 0.15$ ), il massimo livello marino da assumere per la progettazione delle opere può essere posto pari a + 0.50 m sopra il medio mare.

Il minimo abbassamento del livello marino è pari alla somma dell'oscillazione di marea (20 cm) e dell'abbassamento barico (27 cm), ed è uguale a circa 47 cm; anche in questo caso si può ammettere un abbattimento del 25% dell'oscillazione massima, pertanto il minimo livello da assumere per la progettazione delle opere è pari a 0.36 m sotto il medio mare ( $0.47 \times 0.75 = 0.36$  m),

## 6 Regime del moto ondoso

Elemento indispensabile per una corretta valutazione dell'onda di progetto è la ricostruzione degli eventi estremi del moto ondoso (mareggiate) che contraddistingue il sito in esame.

Per la definizione delle grandezze principali, quali l'altezza d'onda significativa  $H_s$ , il periodo di picco  $T_p$  e la direzione media di provenienza  $\theta$ , è stata effettuata utilizzando la seguente metodologia:

- 1) acquisizione di misure ondametriche ed anemometriche in aree prossime al sito in esame (ondametri di Follonica e di Montalto di Castro ed anemometri di Pianosa e di Monte Argentario - ITAV);
- 2) ricostruzione del moto ondoso al largo con un modello matematico (ALTAIR), basato sulla note formulazioni SMB (CERC);
- 3) trasferimento a riva (in prossimità del molo di) in due punti (-10 m e -15 m s.l.m.) attraverso un modello di rifrazione inversa spettrale degli stati di mare al largo del porto di Porto S.Stefano.

## 6.1 *Caratteristiche del moto ondoso al largo*

Per la determinazione del moto ondoso al largo del porto di Porto S.Stefano si è potuto fare riferimento alle misure effettuate da:

- boa ondometrica di Follonica -Piombino, posta a sud-est dell'Isola d'Elba, in esercizio dal 1 luglio 1978 e gestita dall'ENEL (ricade solo parzialmente all'interno dell'area climatica di generazione degli stati di mare che interessano il sito in esame);
- boa ondometrica di Montalto di Castro, localizzata al largo della Centrale Elettrica dell'ENEL, alla batimetrica -50 m s.l.m. (coordinate: 42°17'30'' N; 11°28'36''E), in esercizio dal 1976 e gestita dal ENEL-SRI-PIS (ricade solo per gli eventi di libeccio all'interno dell'area climatica di generazione degli stati di mare per il sito in esame);
- Stazione anemometrica di Pianosa, già descritta nel capitolo precedente.

Le stazioni ondometriche pur trovandosi nelle vicinanze del sito in esame sono esposte in maniera sostanzialmente diversa rispetto al paraggio in esame e inoltre non forniscono l'informazione direzionale; quindi tali boe non possono essere utilizzate per determinare il regime del moto ondoso al largo.

Per la determinazione del “clima ondoso”, cioè della distribuzione statistica delle onde al largo, si è reso necessario ricorrere ad un modello di ricostruzione (hindcasting) di tutti gli eventi ondosi partendo dalle registrazioni di dati anemologici disponibili.

Per tale ricostruzione si è utilizzato un opportuno modello matematico (ALTAIR), basato sulle note relazioni semiempiriche del metodo SMB aggiornate dal CERC, che forniscono i valori dell'altezza e periodo dell'onda significativa generata da un vento avente velocità e direzione costante per un certo intervallo di tempo, in una porzione di mare che costituisce l'area di generazione del moto ondoso.

Per la caratterizzazione anemologica dell'area di generazione del moto ondoso è stata scelta per la sua felice ubicazione ed orografia (assenza di rilievi montuosi) la stazione di Pianosa. Da una analisi preliminare dei dati di vento, si è evidenziato una anomalia nel funzionamento della stazione, nel periodo di tempo compreso tra il 1964 e il 1967; infatti in tale periodo le frequenze di superamento (soglia di 30 nodi) delle velocità del vento sono sensibilmente maggiori a quelle medie relative agli altri periodi (fig.6.1.1); pertanto i dati relativi al periodo 1964-1967 sono stati eliminati dalla serie storica.

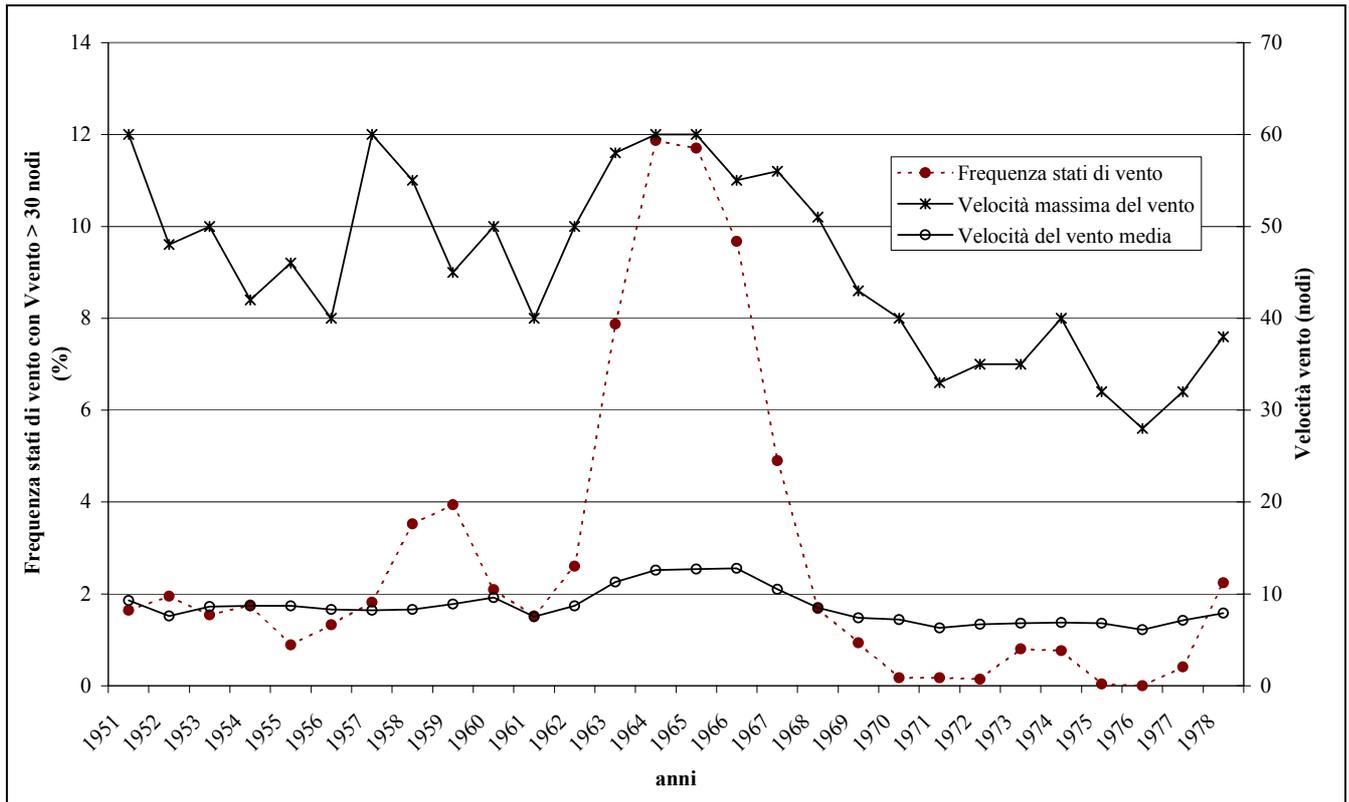


Figura 6-1 - Validazione della serie storica della stazione anemometrica di Pianosa

Le misure delle velocità del vento sono relative ad una quota di 15 m s.l.m.; tali misure devono essere riportate ad una quota di 10 m s.l.m. ove secondo il metodo di ricostruzione adottato (SMB), si considera che avvenga il trasferimento di energia dal vento alle onde. Noto che l'intensità del vento varia con legge logaritmica:

$$\frac{U_{10}}{U_y} = \frac{1}{1 + 0.1 \times \ln\left(\frac{y}{10}\right)}$$

dove:

$y$  – quota stazione strumento (m)

$U_{10}$  – velocità del vento a quota +10 m s.l.m.

$U_y$  – velocità del vento a quota + $y$  m s.l.m.

si ha che la velocità del vento a +10 m s.l.m. è pari a:  $U_{10} = 0.96 \times U_{15}$

Per il calcolo dei fetch efficaci si fa riferimento ad una relazione, derivata dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider,

1947) e successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, S.P.M. 1984, Smith 1991), di seguito riportata nella sua forma più generale:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)}$$

dove:

- $\phi_w$  direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;
- $\phi_i \leq \phi_w \pm \theta$  direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di  $2 \cdot \theta$  considerato nell'intorno della direzione  $\phi_w$ . Il metodo classico di Saville prevede un valore di  $\theta=45^\circ$  mentre la metodologia sviluppata da Seymour fa riferimento ad un valore di  $\theta=90^\circ$ .
- $F_{e,w}$  lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione  $\phi_w$
- $F_i$  lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima  $\phi_i$  (si fa riferimento alla lunghezza calcolata su base cartografica) eventualmente assunta come valore medio relativo ad un settore di  $15^\circ$  nell'intorno della direzione i-esima  $\phi_i$  (metodo proposto dal C.E.R.C. nel software package A.C.E.S.)
- $n$  termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume  $n=2$ )

Per il calcolo della relazione esistente tra la direzione del vento e quella del moto ondoso generato, si fa riferimento al criterio introdotto da Donelan. 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 1973).

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:

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

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

Nella figura 2.1 e nella tabella 2.1 sono rappresentati i fetch geografici ed efficaci di S.Stefano.

Le tabelle 6-1 e 6-2 riportano l'elenco degli stati di mare estremi trionari ricostruiti (valori al culmine di eventi ondosi indipendenti) nell'ambito del settore di traversia. In tale tabella vengono riportate le informazioni sintetiche relative a ciascuna mareggiata: data di colmo dell'evento con la

relativa Hs, Tp e direzione di provenienza del moto ondoso, data di inizio e fine mareggiata e durata della stessa.

Tabella 6-1 - Elenco degli stati di mare trionfari estremi

Altezza significativa al colmo > 2.0 m					Inizio evento		Fine evento		Durata
Tempo data	ora	Hs (m)	Tp (s)	Direz (°N)	Tempo data	ora	Tempo data	ora	ore
05/02/1951	15	3.38	7.6	203	04/02/1951	9	06/02/1951	3	45
20/02/1951	0	2.23	6.1	306	19/02/1951	21	20/02/1951	12	18
23/02/1951	0	2.20	6.2	306	22/02/1951	21	23/02/1951	9	15
08/11/1951	3	2.25	6.3	196	05/11/1951	21	09/11/1951	3	81
27/09/1952	21	2.76	6.8	306	27/09/1952	15	28/09/1952	6	18
08/11/1952	9	2.30	6.3	306	07/11/1952	21	08/11/1952	15	21
19/11/1952	3	2.19	6.2	196	19/11/1952	0	19/11/1952	12	15
23/11/1952	6	2.34	6.4	291	23/11/1952	0	23/11/1952	18	21
28/11/1954	21	2.28	6.0	187	28/11/1954	9	29/11/1954	0	18
09/12/1954	9	2.24	5.9	186	09/12/1954	3	10/12/1954	21	45
04/02/1955	15	2.48	6.3	297	04/02/1955	9	04/02/1955	21	15
20/02/1955	21	2.60	6.6	306	20/02/1955	15	21/02/1955	12	24
21/03/1955	6	2.10	6.1	194	20/03/1955	18	21/03/1955	15	24
19/02/1957	0	2.42	6.2	306	18/02/1957	21	19/02/1957	18	24
21/02/1957	9	2.00	5.8	306	21/02/1957	3	21/02/1957	15	15
13/12/1957	3	2.82	6.8	193	11/12/1957	9	13/12/1957	9	51
07/01/1958	21	3.76	7.8	268	07/01/1958	15	08/01/1958	21	33
11/02/1958	12	2.14	5.8	185	11/02/1958	9	12/02/1958	0	18
08/03/1958	6	2.39	6.5	268	08/03/1958	0	08/03/1958	18	21
10/03/1958	12	3.07	7.2	268	10/03/1958	0	10/03/1958	21	24
12/03/1958	3	2.76	6.8	272	11/03/1958	18	13/03/1958	3	36
04/04/1958	0	2.60	6.5	189	03/04/1958	18	04/04/1958	12	21
27/06/1958	21	3.58	7.7	268	27/06/1958	15	28/06/1958	9	21
17/10/1958	3	2.18	6.1	283	16/10/1958	21	17/10/1958	12	18
14/11/1958	0	2.13	6.1	193	13/11/1958	15	14/11/1958	15	27
20/12/1958	3	2.73	6.8	195	19/12/1958	12	21/12/1958	3	42
20/01/1959	21	2.07	6.0	192	20/01/1959	9	20/01/1959	21	15
10/04/1959	21	2.29	6.2	256	10/04/1959	9	11/04/1959	3	21
28/10/1959	6	2.64	6.7	194	27/10/1959	12	28/10/1959	15	30
01/12/1959	9	2.23	6.0	188	30/11/1959	15	01/12/1959	18	30
05/12/1959	3	2.53	6.6	288	04/12/1959	15	05/12/1959	9	21
25/12/1959	6	2.23	6.2	273	24/12/1959	15	25/12/1959	12	24
28/12/1959	15	2.74	6.9	268	28/12/1959	0	29/12/1959	9	36
25/01/1960	15	2.14	6.1	193	24/01/1960	21	26/01/1960	18	48
12/02/1960	0	2.25	6.2	192	11/02/1960	9	12/02/1960	9	27

Tabella 6-2 - Elenco degli stati di mare trionari estremi

Altezza significativa al colmo > 2.0 m				Inizio evento		Fine evento		Durata	
Tempo		Hs (m)	Tp (s)	Direz (°N)	Tempo		Tempo		ore
data	ora				data	ora	data	ora	
22/02/1960	12	2.19	6.2	193	22/02/1960	3	22/02/1960	15	15
19/11/1960	21	2.73	6.8	294	19/11/1960	18	20/11/1960	9	18
06/12/1960	15	2.19	6.1	192	05/12/1960	15	07/12/1960	3	39
02/02/1961	21	3.26	7.4	268	02/02/1961	18	03/02/1961	21	30
07/10/1961	21	2.11	6.1	282	07/10/1961	21	08/10/1961	9	15
12/01/1962	9	2.04	5.7	258	12/01/1962	6	12/01/1962	18	15
05/04/1962	21	3.35	7.5	278	05/04/1962	9	06/04/1962	18	36
06/11/1962	18	2.09	6.1	199	06/11/1962	9	06/11/1962	21	15
28/12/1962	21	2.05	5.9	191	28/12/1962	21	29/12/1962	9	15
07/01/1968	21	2.91	6.8	308	07/01/1968	15	08/01/1968	3	15
12/01/1968	15	2.33	6.0	320	12/01/1968	6	12/01/1968	21	18
18/01/1968	12	2.20	6.0	307	18/01/1968	6	18/01/1968	21	18
24/01/1968	21	2.53	6.3	316	24/01/1968	18	25/01/1968	12	21
21/02/1968	18	2.21	6.2	192	21/02/1968	6	23/02/1968	0	45
06/05/1968	6	2.22	5.9	191	06/05/1968	3	06/05/1968	15	15
17/11/1968	3	2.39	6.2	195	16/11/1968	21	17/11/1968	15	21
14/01/1969	12	2.64	6.6	194	14/01/1969	0	14/01/1969	15	18
16/12/1969	9	2.95	7.1	288	15/12/1969	15	16/12/1969	15	27
22/11/1970	12	2.17	6.2	290	21/11/1970	21	22/11/1970	21	27
09/11/1971	18	2.05	5.9	191	09/11/1971	6	09/11/1971	21	18
12/02/1972	21	2.07	6.1	294	12/02/1972	6	13/02/1972	12	33
19/02/1972	18	2.21	6.2	194	19/02/1972	6	20/02/1972	15	36
24/02/1973	9	2.06	6.0	301	23/02/1973	12	25/02/1973	0	39
09/04/1973	21	2.35	6.4	198	09/04/1973	9	10/04/1973	0	18
07/02/1974	6	2.42	6.5	287	06/02/1974	21	07/02/1974	21	27
26/09/1974	9	2.11	6.0	303	26/09/1974	6	27/09/1974	6	27
28/11/1974	18	2.31	6.1	301	28/11/1974	15	29/11/1974	3	15
19/01/1975	3	2.32	6.4	199	18/01/1975	15	19/01/1975	18	30
28/01/1975	12	2.10	6.1	298	28/01/1975	3	28/01/1975	18	18
12/02/1975	12	2.21	6.2	197	11/02/1975	9	12/02/1975	15	33
11/01/1977	15	2.34	6.4	195	10/01/1977	18	11/01/1977	18	27
16/11/1977	18	2.16	6.2	292	16/11/1977	9	17/11/1977	6	24
17/11/1977	18	2.24	6.3	293	17/11/1977	15	18/11/1977	18	30
12/01/1978	9	2.38	6.5	202	11/01/1978	18	14/01/1978	6	63
10/02/1978	12	2.05	5.9	191	09/02/1978	18	11/02/1978	12	45
14/02/1978	18	2.03	6.0	283	14/02/1978	18	15/02/1978	6	15

Nella tabella 6-3. e nella figura 6-2 vengono rappresentati in forma tabellare e grafica in forma percentuale gli stati di mare trionari suddivisi per classi di direzione (ogni 10°) e di altezza significativa. Da queste emerge che la maggiore frequenza si ha per il settore di libeccio e di maestrale.

tabella 6-3

Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza (SMB)

Località: S.Stefano largo - periodo:1 gennaio 1951 - 31 dicembre 1978

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	0.66	0.18	0.04	0.00												0.88
20	0.68	0.06	0.01													0.75
30	0.10	0.03	0.01													0.14
40	0.20	0.13	0.06	0.01												0.39
50	0.24	0.05	0.02													0.31
60																
70	0.12	0.04	0.01													0.16
80	0.22	0.13	0.07	0.00	0.00											0.42
90	0.18	0.05	0.01													0.24
100	0.13	0.03	0.00													0.16
110	0.07	0.12	0.05		0.00											0.24
120	0.20	0.06	0.01													0.27
130	0.11	0.03	0.00													0.14
140	0.95	0.12	0.02													1.09
150	3.79	0.87	0.15	0.01												4.82
160	4.28	0.68	0.09	0.00												5.05
170	6.09	1.75	0.60	0.02	0.00											8.47
180	3.76	2.36	1.42	0.34	0.05	0.01										7.93
190	3.90	3.16	2.78	1.12	0.39	0.11	0.03									11.49
200	3.48	2.11	1.60	0.65	0.22	0.08	0.01	0.01								8.16
210	2.03	0.40	0.35	0.12	0.01	0.01	0.00									2.93
220	1.32	0.43	0.31	0.06	0.02	0.00										2.14
230	0.43	0.11	0.09	0.01												0.64
240	0.26	0.05	0.04	0.01												0.35
250	0.21	0.03	0.03	0.01	0.00											0.29
260	0.21	0.15	0.08	0.03	0.01	0.01	0.00									0.49
270	0.58	0.13	0.13	0.09	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01							1.08
280	0.22	0.04	0.10	0.05	0.07	0.04	0.00	0.00								0.53
290	0.45	0.13	0.26	0.14	0.08	0.03	0.01									1.10
300	0.76	0.48	0.54	0.24	0.10	0.02										2.15
310	2.43	2.01	1.88	0.49	0.12	0.04	0.01									6.99
320	2.65	2.72	1.83	0.22	0.04	0.01	0.00									7.49
330	2.56	2.23	1.17	0.11	0.01	0.00										6.09
340	1.75	1.35	0.72	0.07		0.00										3.90
350	2.60	1.54	0.43	0.00												4.58
360	4.34	2.84	0.94	0.02												8.14
TOT.	51.95	26.62	15.85	3.84	1.19	0.41	0.10	0.03	0.01							100.00
Tot. cumul.		78.58	94.43	98.27	99.46	99.87	99.97	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

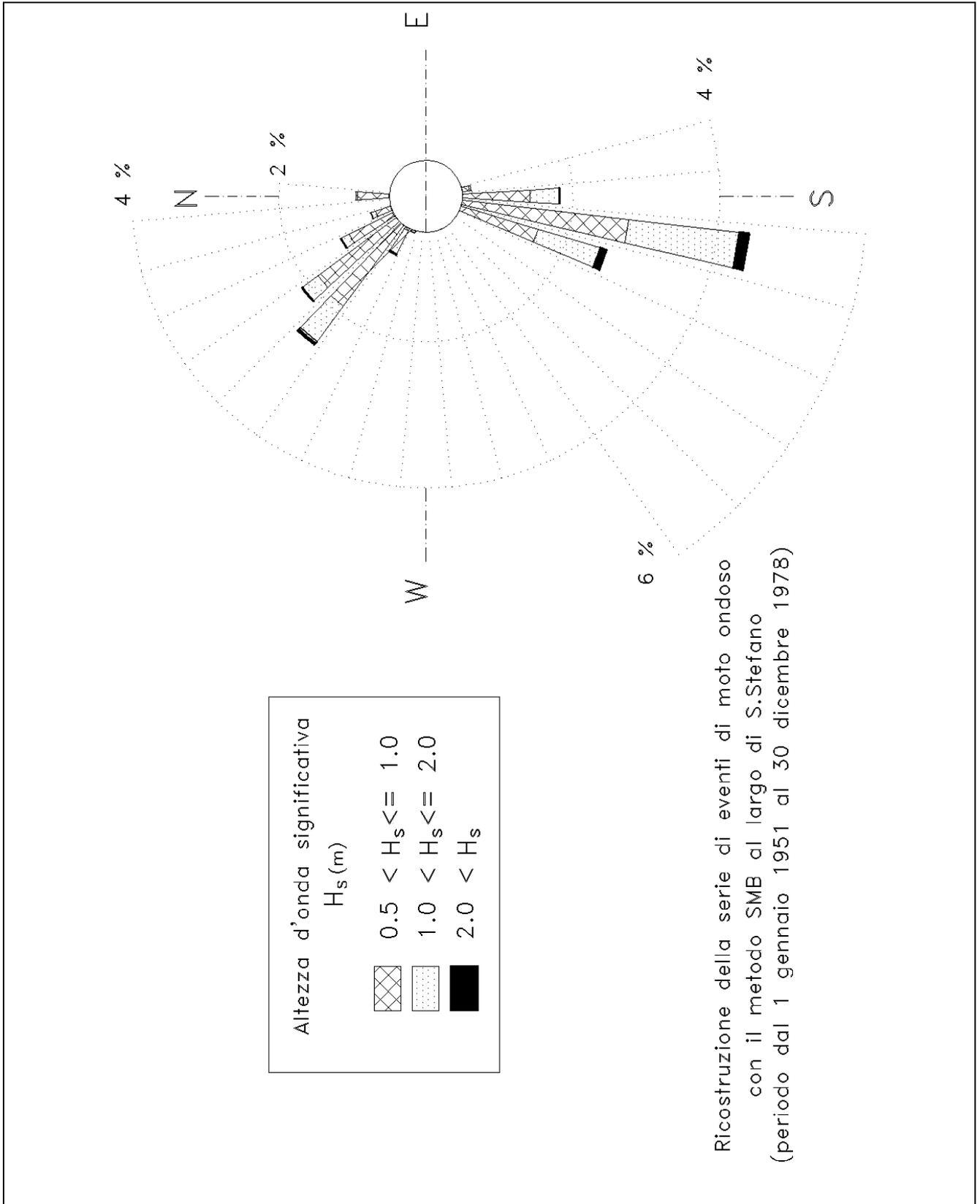


figura 6-2

## **6.2 Propagazione sotto costa della serie di misure ondometriche**

Per definire le condizioni di moto ondoso a ridosso dell'opera è stato eseguito uno studio di propagazione del moto ondoso da largo a riva.

A tal fine è stato necessario in primo luogo scegliere il modello numerico più appropriato per lo studio in questione. La scelta del modello numerico viene normalmente effettuata a valle di una analisi dei principali fenomeni fisici che condizionano l'evoluzione delle onde durante la propagazione. Tale analisi si basa fundamentalmente su una attenta lettura della conformazione batimetrica dei fondali e delle relative condizioni al contorno che per il porto di Porto San Stefano risultano funzione anche delle direzioni di provenienza del moto ondoso al largo.

La serie di dati ondometrici ricostruita al largo del porto in esame è stata riportata sotto costa utilizzando il modello numerico di propagazione di inversa spettrale MEROPE.

La prima fase dello studio della rifrazione richiede la digitalizzazione dei valori di profondità ricavati da carte 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 100m). Nel presente caso i valori di profondità sono stati ricavati dalla carta nautica n° 122 « Dalla foce dell'Ombrone al promontorio Argentario» (scala 1:100.000), edita dall'Istituto Idrografico della Marina.

Al fine di ottenere un utile confronto con le condizioni ondose "sopportate" dall'opera frangiflutti esistente (già da molti anni), è stata condotta l'applicazione del modello per due punti di rifrazione posti in corrispondenza dell'estremità dell'esistente molo di sopraflutto (Punto P1 – profondità 10 m) e in corrispondenza del previsto prolungamento (Punto P2 – profondità 15 m).

Nella figura 6-3 e nella figura 6-4 è rappresentata la griglia di calcolo ed i punti di rifrazione considerati .

Per i due punti posti sottocosta ed individuati in precedenza sono stati calcolati 24 piani d'onda d'inversa per altrettanti periodi d'onda 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. Si riportano a titolo d'esempio 2 piani d'onda inversi relativi al periodo di 9 s per i due punti (Figura 6-5, Figura 6-6).

Si può osservare come per le direzioni lateralmente più esterne al settore di traversia vi siano maggiori attenuazioni del moto ondoso (distanza che aumenta tra raggi adiacenti) all'avvicinarsi sottocosta. (specie per il punto 1 più vicino a riva).

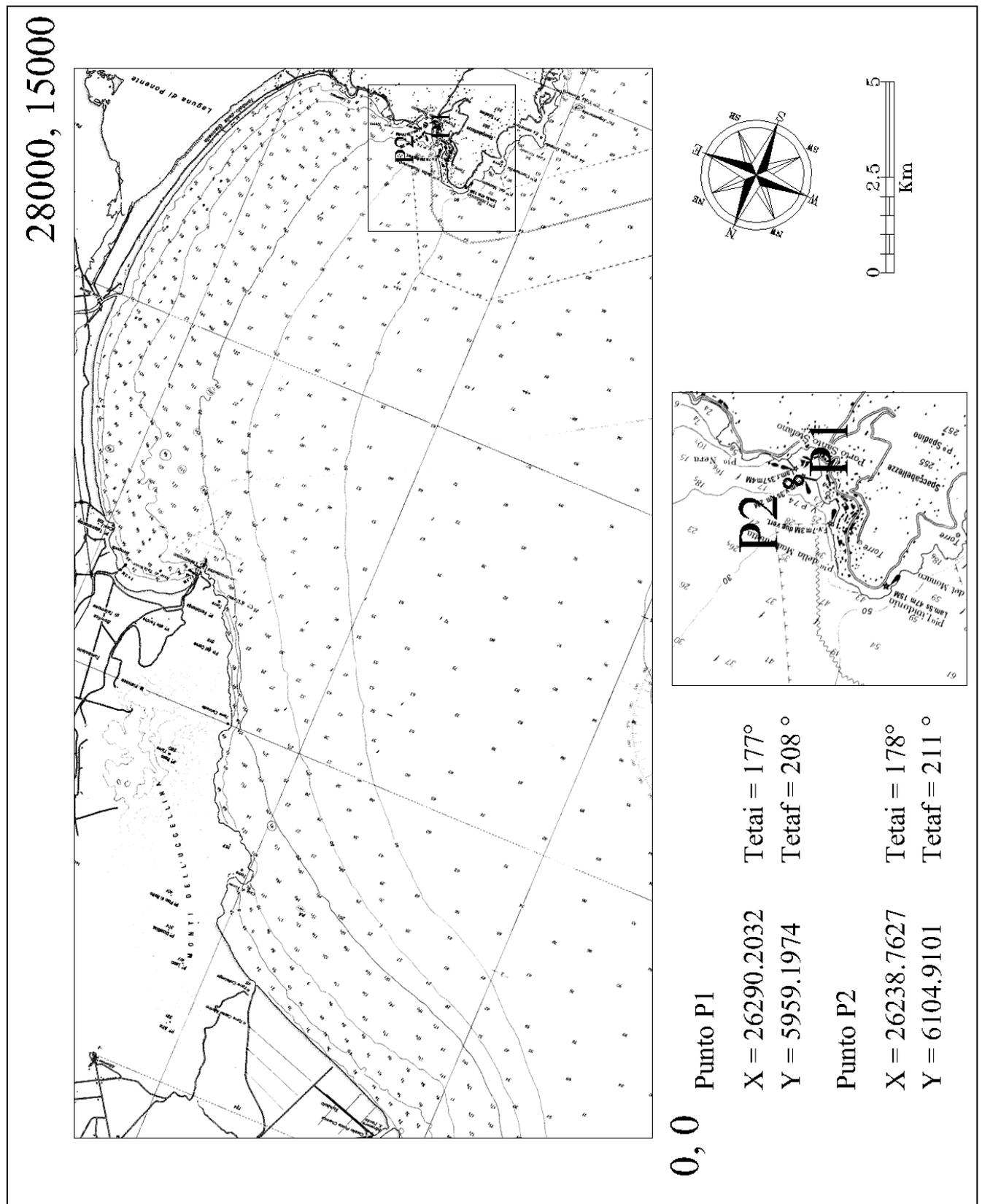


figura 6-3 - Griglia di Calcolo per il modello MEROPE (Inversa spettrale)

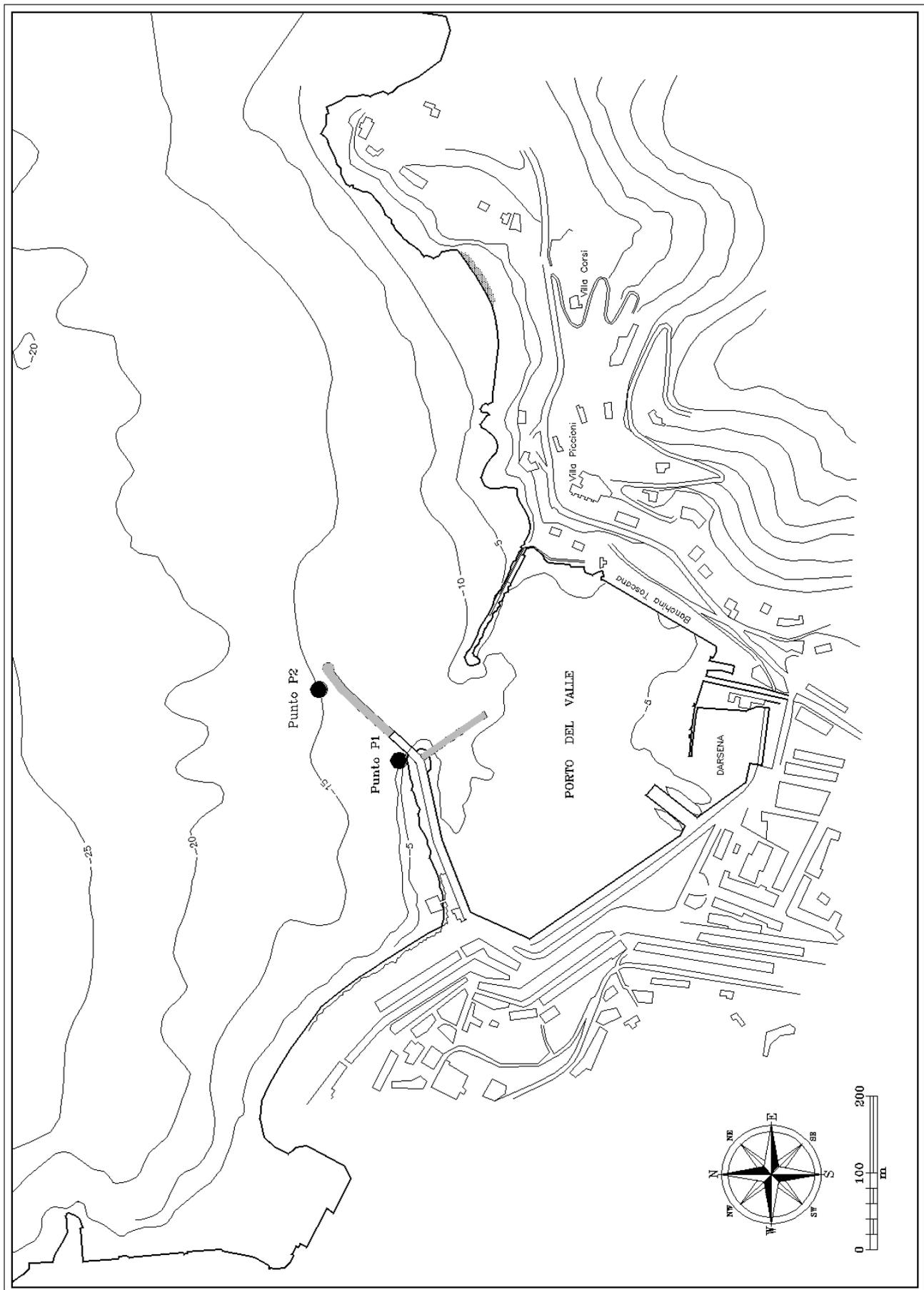


figura 6-4

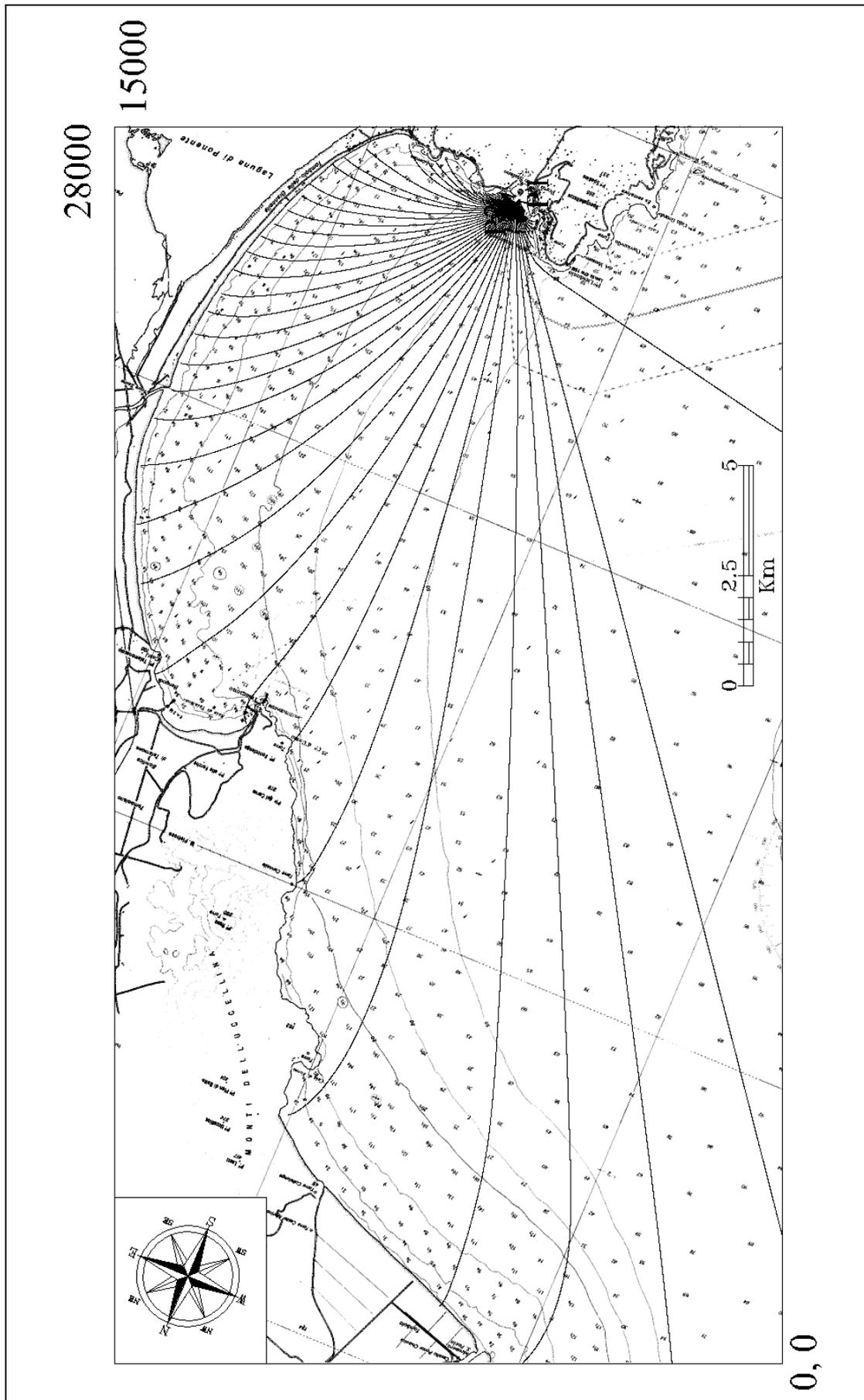


Figura 6-5 – Piano d'onda relativa al punto P1 con T = 9s

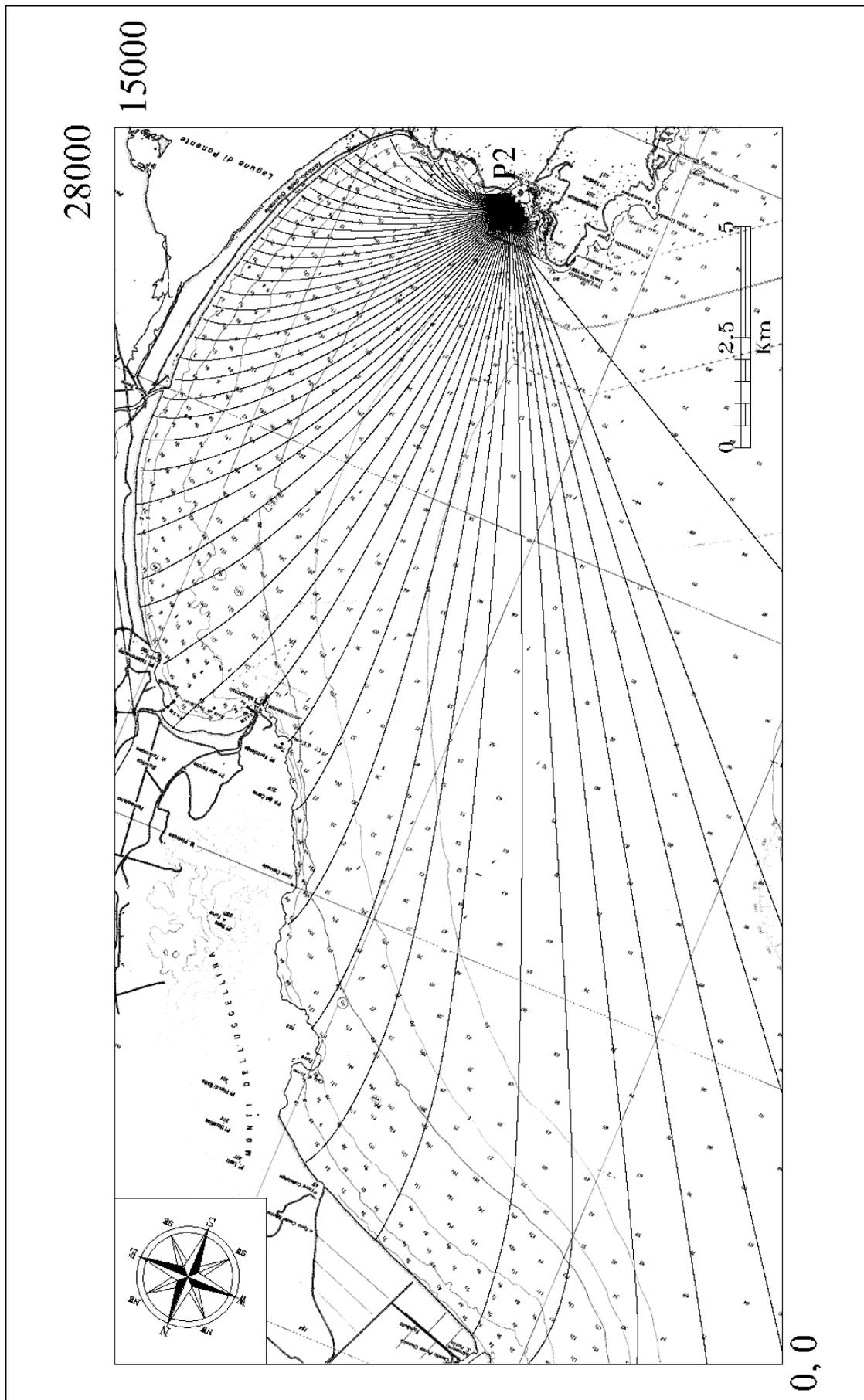


Figura 6-6 – Piano d'onda relativa al punto P2 con  $T = 9s$

I risultati della rifrazione inversa-spettrale sono sintetizzati in forma tabellare e grafica (da tabella 6-4 a Tabella 6-9 e Figura 6-7 e Figura 6-8) per i numerosi spettri ondosi simulati (tipo JONSWAP), rappresentativi del regime del sito.

Nelle tabelle, dove sono riportati i 9 spettri più rappresentativi del clima d'onda, sono utilizzati i seguenti simboli:

$A_{zmo}$  = direzione di provenienza al largo ( $^{\circ}$ N);

$H_{so}$  = altezza d'onda significativa al largo (m);

$T_p$  = periodo di picco dell'onda al largo (s);

$A_{zm}$  = direzione di provenienza a riva ( $^{\circ}$ N);

$H_s$  = altezza d'onda significativa a riva (m);

$T/To$  = rapporto tra il periodo d'onda al largo e a riva.

Nelle Figura 6-7 e Figura 6-8 sono rappresentate in forma grafica le corrispondenze tra le direzioni del moto ondoso incidente dal largo e i corrispondenti valori di direzione calcolati a riva per i 9 spettri riportati nelle tabelle e la corrispondenza dell'altezza d'onda significativa sotto costa rispetto alla direzione di incidenza al largo.

In generale si evidenzia una discreta attenuazione delle altezze d'onda significative associate ad eventi provenienti da maestrale mentre per gli eventi da ponente e libeccio si ha una notevole riduzione dell'altezza d'onda dovuta all'effetto di «schermo» esercitato dal promontorio dell'Argentario. Più in particolare per i due punti di inversa si hanno i maggiori valori del coefficiente  $k$  ( $k = k_r \cdot k_s$  con  $k_r$  coefficiente di rifrazione e  $k_s$  coefficiente di shoaling) nei seguenti casi:

1. punto P1: eventi da maestrale (Nord-Ovest) con  $k = 0.85$

2. punto P2: eventi da maestrale (Nord-Ovest) con  $k = 0.82$

Nel seguente prospetto vengono confrontati i valori medi del coefficiente  $k$  per i due punti d'inversa per tre settori di direzione:

Coefficiente k		
Direzioni ( $^{\circ}$ N)	Punto P1	Punto P2
247.5 – 292.5	0.40	0.45
292.5 – 337.5	0.84	0,80
337.5- 360.0	0,70	0,70

	Hso	Tso	Azmo	Hsr	Tsr	Azmr	K	T/To
	m	s	°N	m	s	°N		
Spettro 1	1.00	4.51	230	0.05	2.82	330	0.050	0.63
	1.00	4.51	240	0.09	2.56	330	0.085	0.57
	1.00	4.51	250	0.12	2.65	332	0.124	0.59
	1.00	4.51	260	0.17	2.90	333	0.165	0.64
	1.00	4.51	270	0.22	3.14	333	0.220	0.70
	1.00	4.51	280	0.29	3.34	334	0.290	0.74
	1.00	4.51	290	0.38	3.52	335	0.377	0.78
	1.00	4.51	300	0.48	3.67	336	0.478	0.81
	1.00	4.51	310	0.58	3.78	337	0.582	0.84
	1.00	4.51	320	0.67	3.86	338	0.674	0.85
	1.00	4.51	330	0.74	3.90	339	0.739	0.87
	1.00	4.51	340	0.76	3.93	340	0.763	0.87
	1.00	4.51	350	0.74	3.94	340	0.742	0.87
	1.00	4.51	360	0.68	3.92	341	0.681	0.87
	1.00	4.51	370	0.59	3.89	341	0.590	0.86
	1.00	4.51	380	0.49	3.84	342	0.485	0.85
	1.00	4.51	390	0.38	3.75	342	0.380	0.83
	1.00	4.51	400	0.28	3.62	342	0.285	0.80
1.00	4.51	410	0.21	3.43	342	0.207	0.76	
1.00	4.51	420	0.14	3.41	342	0.141	0.76	
Spettro 2	1.50	5.52	230	0.07	2.93	329	0.045	0.53
	1.50	5.52	240	0.12	2.93	331	0.083	0.53
	1.50	5.52	250	0.19	3.21	334	0.127	0.58
	1.50	5.52	260	0.27	3.65	335	0.179	0.66
	1.50	5.52	270	0.37	4.03	337	0.245	0.73
	1.50	5.52	280	0.49	4.31	337	0.326	0.78
	1.50	5.52	290	0.63	4.51	338	0.420	0.82
	1.50	5.52	300	0.78	4.64	339	0.519	0.84
	1.50	5.52	310	0.92	4.72	340	0.614	0.85
	1.50	5.52	320	1.04	4.77	341	0.696	0.86
	1.50	5.52	330	1.13	4.80	342	0.753	0.87
	1.50	5.52	340	1.17	4.82	343	0.778	0.87
	1.50	5.52	350	1.15	4.82	344	0.766	0.87
	1.50	5.52	360	1.07	4.81	344	0.715	0.87
	1.50	5.52	370	0.95	4.76	344	0.632	0.86
	1.50	5.52	380	0.79	4.68	344	0.529	0.85
	1.50	5.52	390	0.63	4.55	344	0.419	0.82
	1.50	5.52	400	0.47	4.35	344	0.317	0.79
1.50	5.52	410	0.35	4.07	344	0.230	0.74	
1.50	5.52	420	0.24	3.94	344	0.159	0.71	
Spettro 3	2.00	6.38	230	0.09	3.20	329	0.044	0.50
	2.00	6.38	240	0.16	3.24	332	0.080	0.51
	2.00	6.38	250	0.25	3.57	335	0.123	0.56
	2.00	6.38	260	0.36	4.09	337	0.179	0.64
	2.00	6.38	270	0.50	4.57	339	0.251	0.72
	2.00	6.38	280	0.68	4.94	340	0.340	0.77
	2.00	6.38	290	0.88	5.19	340	0.441	0.81
	2.00	6.38	300	1.09	5.35	341	0.543	0.84
	2.00	6.38	310	1.28	5.45	342	0.638	0.85
	2.00	6.38	320	1.43	5.51	343	0.716	0.86
	2.00	6.38	330	1.54	5.55	344	0.772	0.87
	2.00	6.38	340	1.59	5.57	345	0.797	0.87
	2.00	6.38	350	1.57	5.57	346	0.786	0.87
	2.00	6.38	360	1.47	5.55	346	0.737	0.87
	2.00	6.38	370	1.31	5.49	346	0.654	0.86
	2.00	6.38	380	1.10	5.38	346	0.550	0.84
	2.00	6.38	390	0.88	5.22	346	0.439	0.82
	2.00	6.38	400	0.67	4.99	346	0.335	0.78
2.00	6.38	410	0.50	4.70	345	0.248	0.74	
2.00	6.38	420	0.35	4.55	346	0.176	0.71	

tabella 6-4 – Risultati della rifrazione inversa spettrale nel punto P1

	Hso	Tso	Azmo	Hsr	Tsr	Azmr	K	T/To
	m	s	°N	m	s	°N		
Spettro 4	2.50	7.13	230	0.11	3.71	331	0.046	0.52
	2.50	7.13	240	0.21	3.74	334	0.083	0.52
	2.50	7.13	250	0.32	4.08	337	0.128	0.57
	2.50	7.13	260	0.46	4.58	339	0.185	0.64
	2.50	7.13	270	0.64	5.04	340	0.257	0.71
	2.50	7.13	280	0.86	5.41	341	0.343	0.76
	2.50	7.13	290	1.10	5.69	342	0.442	0.80
	2.50	7.13	300	1.36	5.90	343	0.545	0.83
	2.50	7.13	310	1.61	6.04	344	0.644	0.85
	2.50	7.13	320	1.82	6.13	345	0.728	0.86
	2.50	7.13	330	1.97	6.20	346	0.787	0.87
	2.50	7.13	340	2.04	6.23	347	0.815	0.87
	2.50	7.13	350	2.01	6.23	347	0.804	0.87
	2.50	7.13	360	1.89	6.20	348	0.754	0.87
	2.50	7.13	370	1.68	6.13	348	0.671	0.86
	2.50	7.13	380	1.42	6.02	348	0.566	0.84
	2.50	7.13	390	1.14	5.85	348	0.456	0.82
	2.50	7.13	400	0.88	5.63	347	0.354	0.79
2.50	7.13	410	0.67	5.36	347	0.267	0.75	
2.50	7.13	420	0.49	5.23	347	0.195	0.73	
Spettro 5	3.00	7.81	230	0.14	4.17	333	0.048	0.53
	3.00	7.81	240	0.26	4.19	335	0.086	0.54
	3.00	7.81	250	0.40	4.51	338	0.132	0.58
	3.00	7.81	260	0.57	4.98	340	0.189	0.64
	3.00	7.81	270	0.78	5.43	341	0.259	0.70
	3.00	7.81	280	1.03	5.83	342	0.343	0.75
	3.00	7.81	290	1.32	6.14	343	0.440	0.79
	3.00	7.81	300	1.63	6.39	344	0.545	0.82
	3.00	7.81	310	1.94	6.56	345	0.647	0.84
	3.00	7.81	320	2.20	6.69	346	0.735	0.86
	3.00	7.81	330	2.39	6.77	347	0.798	0.87
	3.00	7.81	340	2.48	6.81	348	0.827	0.87
	3.00	7.81	350	2.45	6.82	348	0.816	0.87
	3.00	7.81	360	2.30	6.79	349	0.767	0.87
	3.00	7.81	370	2.06	6.73	349	0.687	0.86
	3.00	7.81	380	1.76	6.63	349	0.586	0.85
	3.00	7.81	390	1.44	6.49	349	0.479	0.83
	3.00	7.81	400	1.13	6.28	348	0.377	0.80
3.00	7.81	410	0.86	5.99	348	0.286	0.77	
3.00	7.81	420	0.63	5.82	348	0.209	0.74	
Spettro 6	3.50	8.44	230	0.18	4.60	334	0.051	0.54
	3.50	8.44	240	0.31	4.56	336	0.089	0.54
	3.50	8.44	250	0.47	4.87	339	0.134	0.58
	3.50	8.44	260	0.67	5.32	340	0.191	0.63
	3.50	8.44	270	0.91	5.79	342	0.259	0.69
	3.50	8.44	280	1.20	6.22	343	0.342	0.74
	3.50	8.44	290	1.54	6.58	344	0.439	0.78
	3.50	8.44	300	1.90	6.85	345	0.544	0.81
	3.50	8.44	310	2.27	7.05	346	0.648	0.84
	3.50	8.44	320	2.58	7.19	347	0.738	0.85
	3.50	8.44	330	2.81	7.28	348	0.803	0.86
	3.50	8.44	340	2.92	7.33	348	0.834	0.87
	3.50	8.44	350	2.89	7.35	349	0.826	0.87
	3.50	8.44	360	2.73	7.33	349	0.779	0.87
	3.50	8.44	370	2.46	7.28	350	0.702	0.86
	3.50	8.44	380	2.12	7.20	350	0.605	0.85
	3.50	8.44	390	1.75	7.06	349	0.499	0.84
	3.50	8.44	400	1.39	6.86	349	0.396	0.81
3.50	8.44	410	1.06	6.56	349	0.302	0.78	
3.50	8.44	420	0.77	6.34	349	0.221	0.75	

Tabella 6-5 – Risultati della rifrazione inversa spettrale nel punto P1

	Hso	Tso	Azmo	Hsr	Tsr	Azmr	K	T/To
	m	s	°N	m	s	°N		
Spettro 7	4.00	9.02	230	0.21	4.98	335	0.053	0.55
	4.00	9.02	240	0.36	4.88	337	0.091	0.54
	4.00	9.02	250	0.54	5.17	339	0.135	0.57
	4.00	9.02	260	0.76	5.62	341	0.191	0.62
	4.00	9.02	270	1.03	6.11	343	0.258	0.68
	4.00	9.02	280	1.36	6.58	344	0.340	0.73
	4.00	9.02	290	1.75	6.97	345	0.437	0.77
	4.00	9.02	300	2.17	7.27	346	0.543	0.81
	4.00	9.02	310	2.59	7.49	347	0.647	0.83
	4.00	9.02	320	2.95	7.65	348	0.739	0.85
	4.00	9.02	330	3.22	7.75	348	0.806	0.86
	4.00	9.02	340	3.36	7.81	349	0.839	0.87
	4.00	9.02	350	3.33	7.84	349	0.834	0.87
	4.00	9.02	360	3.16	7.83	350	0.790	0.87
	4.00	9.02	370	2.86	7.78	350	0.715	0.86
	4.00	9.02	380	2.48	7.69	350	0.619	0.85
	4.00	9.02	390	2.05	7.55	350	0.514	0.84
4.00	9.02	400	1.63	7.32	350	0.409	0.81	
4.00	9.02	410	1.25	6.99	349	0.312	0.78	
4.00	9.02	420	0.91	6.71	349	0.228	0.74	
Spettro 8	4.50	9.57	230	0.25	5.28	336	0.055	0.55
	4.50	9.57	240	0.41	5.15	338	0.092	0.54
	4.50	9.57	250	0.61	5.45	340	0.135	0.57
	4.50	9.57	260	0.86	5.90	342	0.190	0.62
	4.50	9.57	270	1.16	6.43	343	0.257	0.67
	4.50	9.57	280	1.53	6.93	344	0.339	0.72
	4.50	9.57	290	1.96	7.36	345	0.436	0.77
	4.50	9.57	300	2.44	7.68	346	0.541	0.80
	4.50	9.57	310	2.91	7.91	347	0.646	0.83
	4.50	9.57	320	3.32	8.08	348	0.738	0.84
	4.50	9.57	330	3.63	8.19	349	0.806	0.86
	4.50	9.57	340	3.79	8.25	349	0.842	0.86
	4.50	9.57	350	3.77	8.28	350	0.839	0.87
	4.50	9.57	360	3.59	8.27	350	0.797	0.86
	4.50	9.57	370	3.26	8.22	350	0.724	0.86
	4.50	9.57	380	2.83	8.12	350	0.628	0.85
	4.50	9.57	390	2.35	7.96	350	0.522	0.83
4.50	9.57	400	1.87	7.71	350	0.416	0.81	
4.50	9.57	410	1.43	7.34	350	0.317	0.77	
4.50	9.57	420	1.04	7.00	349	0.231	0.73	
Spettro 9	5.00	10.08	230	0.28	5.49	337	0.057	0.54
	5.00	10.08	240	0.46	5.36	338	0.092	0.53
	5.00	10.08	250	0.67	5.66	341	0.135	0.56
	5.00	10.08	260	0.95	6.15	342	0.190	0.61
	5.00	10.08	270	1.29	6.73	344	0.257	0.67
	5.00	10.08	280	1.70	7.28	345	0.340	0.72
	5.00	10.08	290	2.18	7.73	346	0.436	0.77
	5.00	10.08	300	2.71	8.06	347	0.541	0.80
	5.00	10.08	310	3.23	8.30	347	0.645	0.82
	5.00	10.08	320	3.68	8.47	348	0.736	0.84
	5.00	10.08	330	4.02	8.58	349	0.805	0.85
	5.00	10.08	340	4.20	8.65	349	0.841	0.86
	5.00	10.08	350	4.19	8.68	350	0.839	0.86
	5.00	10.08	360	3.99	8.66	350	0.799	0.86
	5.00	10.08	370	3.63	8.60	350	0.727	0.85
	5.00	10.08	380	3.16	8.48	350	0.632	0.84
	5.00	10.08	390	2.63	8.30	350	0.527	0.82
5.00	10.08	400	2.10	8.03	350	0.420	0.80	
5.00	10.08	410	1.61	7.64	350	0.322	0.76	
5.00	10.08	420	1.17	7.25	350	0.234	0.72	

Tabella 6-6 – Risultati della rifrazione inversa spettrale nel punto P1

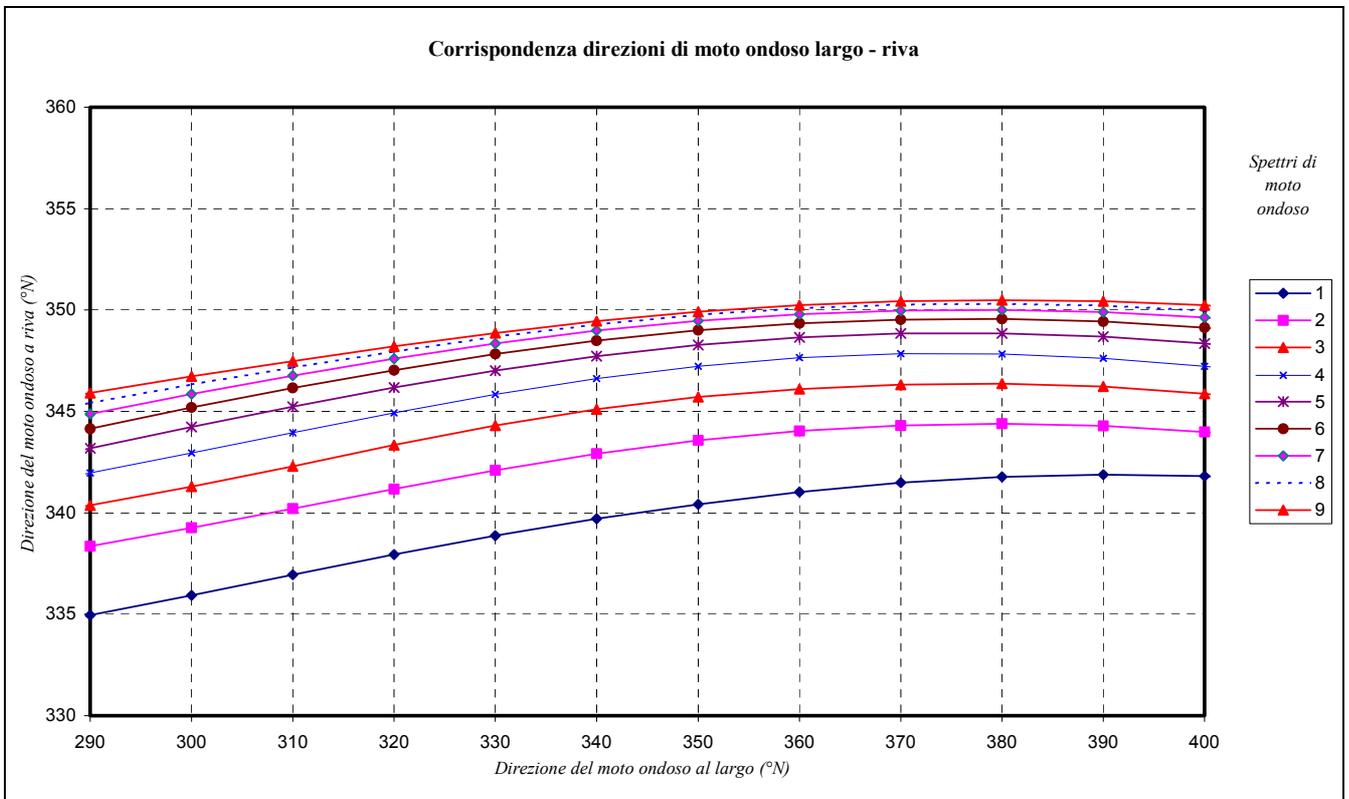
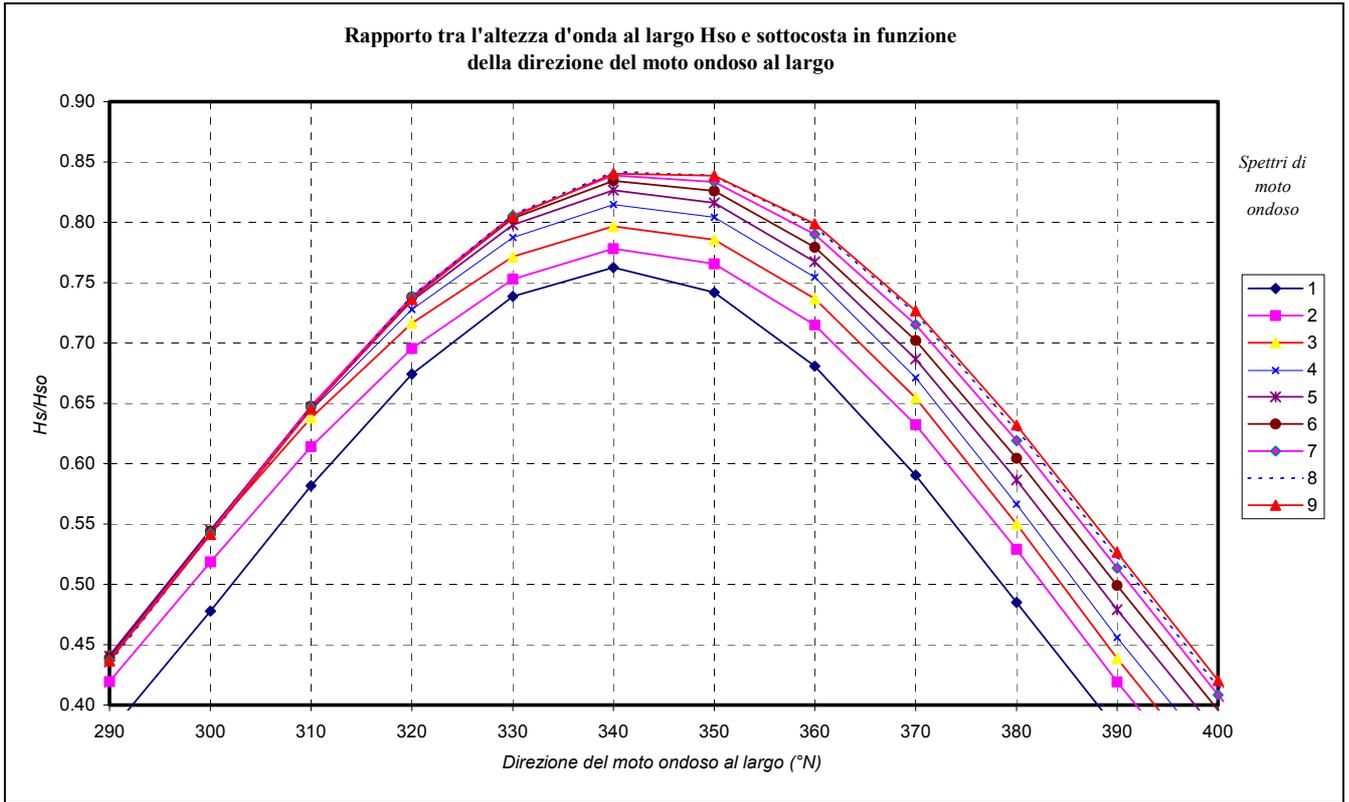


Figura 6-7 – Risultati della rifrazione inversa spettrale nel punto P1

	Hso	Tso	Azmo	Hsr	Tsr	Azmr	K	T/To
	m	s	°N	m	s	°N		
Spettro 1	1.00	4.51	230	0.06	2.18	320	0.057	0.48
	1.00	4.51	240	0.09	2.29	323	0.093	0.51
	1.00	4.51	250	0.13	2.46	326	0.134	0.54
	1.00	4.51	260	0.18	2.75	326	0.183	0.61
	1.00	4.51	270	0.25	3.04	326	0.245	0.67
	1.00	4.51	280	0.33	3.29	326	0.327	0.73
	1.00	4.51	290	0.43	3.51	327	0.426	0.78
	1.00	4.51	300	0.53	3.67	328	0.535	0.81
	1.00	4.51	310	0.64	3.79	329	0.641	0.84
	1.00	4.51	320	0.73	3.88	330	0.728	0.86
	1.00	4.51	330	0.78	3.94	331	0.782	0.87
	1.00	4.51	340	0.79	3.98	333	0.794	0.88
	1.00	4.51	350	0.76	4.00	334	0.764	0.89
	1.00	4.51	360	0.69	4.00	335	0.694	0.89
	1.00	4.51	370	0.59	3.98	335	0.595	0.88
	1.00	4.51	380	0.48	3.92	336	0.482	0.87
	1.00	4.51	390	0.37	3.80	336	0.371	0.84
	1.00	4.51	400	0.27	3.60	336	0.274	0.80
1.00	4.51	410	0.19	3.39	336	0.195	0.75	
1.00	4.51	420	0.13	3.26	337	0.133	0.72	
Spettro 2	1.50	5.52	230	0.09	2.95	321	0.063	0.53
	1.50	5.52	240	0.15	3.02	324	0.100	0.55
	1.50	5.52	250	0.22	3.20	326	0.144	0.58
	1.50	5.52	260	0.29	3.51	326	0.196	0.64
	1.50	5.52	270	0.39	3.85	327	0.261	0.70
	1.50	5.52	280	0.51	4.13	327	0.343	0.75
	1.50	5.52	290	0.66	4.36	327	0.440	0.79
	1.50	5.52	300	0.82	4.53	328	0.545	0.82
	1.50	5.52	310	0.97	4.64	329	0.646	0.84
	1.50	5.52	320	1.10	4.72	330	0.730	0.86
	1.50	5.52	330	1.18	4.78	332	0.788	0.87
	1.50	5.52	340	1.21	4.81	333	0.809	0.87
	1.50	5.52	350	1.19	4.82	334	0.792	0.87
	1.50	5.52	360	1.10	4.81	335	0.735	0.87
	1.50	5.52	370	0.97	4.77	335	0.645	0.86
	1.50	5.52	380	0.80	4.69	336	0.534	0.85
	1.50	5.52	390	0.63	4.54	336	0.417	0.82
	1.50	5.52	400	0.46	4.32	336	0.308	0.78
1.50	5.52	410	0.33	4.05	336	0.217	0.73	
1.50	5.52	420	0.22	3.83	337	0.145	0.69	
Spettro 3	2.00	6.38	230	0.13	3.49	322	0.065	0.55
	2.00	6.38	240	0.21	3.58	324	0.103	0.56
	2.00	6.38	250	0.30	3.82	326	0.149	0.60
	2.00	6.38	260	0.41	4.18	327	0.206	0.65
	2.00	6.38	270	0.55	4.59	327	0.275	0.72
	2.00	6.38	280	0.72	4.91	327	0.362	0.77
	2.00	6.38	290	0.92	5.15	327	0.462	0.81
	2.00	6.38	300	1.13	5.31	328	0.567	0.83
	2.00	6.38	310	1.33	5.42	329	0.666	0.85
	2.00	6.38	320	1.49	5.48	331	0.747	0.86
	2.00	6.38	330	1.60	5.51	332	0.801	0.86
	2.00	6.38	340	1.64	5.52	333	0.819	0.86
	2.00	6.38	350	1.59	5.50	334	0.797	0.86
	2.00	6.38	360	1.48	5.45	335	0.738	0.85
	2.00	6.38	370	1.30	5.38	336	0.648	0.84
	2.00	6.38	380	1.08	5.26	336	0.540	0.82
	2.00	6.38	390	0.86	5.09	336	0.428	0.80
	2.00	6.38	400	0.65	4.86	336	0.325	0.76
2.00	6.38	410	0.47	4.62	336	0.237	0.72	
2.00	6.38	420	0.33	4.46	337	0.165	0.70	

Tabella 6-7 – Risultati della rifrazione inversa spettrale nel punto P2

	Hso	Tso	Azmo	Hsr	Tsr	Azmr	K	T/To
	m	s	°N	m	s	°N		
Spettro 4	2.50	7.13	230	0.17	3.96	322	0.066	0.55
	2.50	7.13	240	0.26	4.05	324	0.104	0.57
	2.50	7.13	250	0.38	4.32	326	0.152	0.61
	2.50	7.13	260	0.53	4.72	327	0.211	0.66
	2.50	7.13	270	0.71	5.19	327	0.285	0.73
	2.50	7.13	280	0.94	5.56	327	0.377	0.78
	2.50	7.13	290	1.20	5.81	327	0.481	0.81
	2.50	7.13	300	1.47	5.96	328	0.586	0.84
	2.50	7.13	310	1.70	6.05	330	0.682	0.85
	2.50	7.13	320	1.89	6.10	331	0.757	0.85
	2.50	7.13	330	2.01	6.11	332	0.805	0.86
	2.50	7.13	340	2.05	6.11	334	0.818	0.86
	2.50	7.13	350	1.99	6.08	334	0.795	0.85
	2.50	7.13	360	1.84	6.02	335	0.734	0.84
	2.50	7.13	370	1.61	5.92	336	0.644	0.83
	2.50	7.13	380	1.35	5.78	336	0.539	0.81
2.50	7.13	390	1.08	5.58	336	0.431	0.78	
2.50	7.13	400	0.83	5.32	336	0.332	0.75	
2.50	7.13	410	0.62	5.05	336	0.247	0.71	
2.50	7.13	420	0.44	4.85	337	0.175	0.68	
Spettro 5	3.00	7.81	230	0.20	4.40	322	0.067	0.56
	3.00	7.81	240	0.32	4.50	325	0.106	0.58
	3.00	7.81	250	0.47	4.81	326	0.156	0.62
	3.00	7.81	260	0.66	5.26	327	0.219	0.67
	3.00	7.81	270	0.89	5.75	327	0.297	0.74
	3.00	7.81	280	1.17	6.12	327	0.391	0.78
	3.00	7.81	290	1.48	6.36	328	0.495	0.81
	3.00	7.81	300	1.79	6.51	329	0.598	0.83
	3.00	7.81	310	2.07	6.59	330	0.689	0.84
	3.00	7.81	320	2.27	6.62	331	0.758	0.85
	3.00	7.81	330	2.40	6.63	332	0.799	0.85
	3.00	7.81	340	2.42	6.61	333	0.807	0.85
	3.00	7.81	350	2.34	6.57	334	0.781	0.84
	3.00	7.81	360	2.17	6.51	335	0.725	0.83
	3.00	7.81	370	1.93	6.42	336	0.642	0.82
	3.00	7.81	380	1.62	6.27	336	0.541	0.80
3.00	7.81	390	1.30	6.04	336	0.435	0.77	
3.00	7.81	400	1.00	5.71	336	0.334	0.73	
3.00	7.81	410	0.74	5.35	336	0.247	0.69	
3.00	7.81	420	0.53	5.06	337	0.175	0.65	
Spettro 6	3.50	8.44	230	0.24	4.92	323	0.070	0.58
	3.50	8.44	240	0.39	5.00	325	0.110	0.59
	3.50	8.44	250	0.56	5.31	326	0.161	0.63
	3.50	8.44	260	0.80	5.77	327	0.227	0.68
	3.50	8.44	270	1.07	6.26	327	0.307	0.74
	3.50	8.44	280	1.41	6.62	327	0.402	0.78
	3.50	8.44	290	1.76	6.85	328	0.504	0.81
	3.50	8.44	300	2.11	6.99	329	0.604	0.83
	3.50	8.44	310	2.42	7.06	330	0.690	0.84
	3.50	8.44	320	2.64	7.09	331	0.754	0.84
	3.50	8.44	330	2.76	7.08	332	0.788	0.84
	3.50	8.44	340	2.77	7.05	333	0.792	0.84
	3.50	8.44	350	2.68	7.01	334	0.766	0.83
	3.50	8.44	360	2.49	6.95	335	0.711	0.82
	3.50	8.44	370	2.22	6.85	335	0.633	0.81
	3.50	8.44	380	1.88	6.69	336	0.537	0.79
3.50	8.44	390	1.52	6.44	336	0.434	0.76	
3.50	8.44	400	1.17	6.09	336	0.335	0.72	
3.50	8.44	410	0.87	5.70	336	0.249	0.68	
3.50	8.44	420	0.62	5.37	336	0.178	0.64	

Tabella 6-8 – Risultati della rifrazione inversa spettrale nel punto P2

	Hso	Tso	Azmo	Hsr	Tsr	Azmr	K	T/To
	m	s	°N	m	s	°N		
Spettro 7	4.00	9.02	230	0.29	5.38	323	0.072	0.60
	4.00	9.02	240	0.46	5.48	325	0.114	0.61
	4.00	9.02	250	0.67	5.78	326	0.167	0.64
	4.00	9.02	260	0.94	6.23	327	0.234	0.69
	4.00	9.02	270	1.26	6.72	327	0.315	0.74
	4.00	9.02	280	1.64	7.07	328	0.410	0.78
	4.00	9.02	290	2.04	7.30	328	0.511	0.81
	4.00	9.02	300	2.43	7.44	329	0.608	0.82
	4.00	9.02	310	2.76	7.50	330	0.690	0.83
	4.00	9.02	320	2.99	7.52	331	0.748	0.83
	4.00	9.02	330	3.11	7.50	332	0.777	0.83
	4.00	9.02	340	3.11	7.46	333	0.777	0.83
	4.00	9.02	350	3.00	7.41	334	0.750	0.82
	4.00	9.02	360	2.79	7.34	335	0.697	0.81
	4.00	9.02	370	2.49	7.23	335	0.622	0.80
	4.00	9.02	380	2.12	7.06	335	0.530	0.78
	4.00	9.02	390	1.72	6.81	336	0.431	0.75
4.00	9.02	400	1.34	6.45	335	0.336	0.72	
4.00	9.02	410	1.01	6.06	336	0.252	0.67	
4.00	9.02	420	0.73	5.71	336	0.182	0.63	
Spettro 8	4.50	9.57	230	0.33	5.77	323	0.074	0.60
	4.50	9.57	240	0.53	5.89	325	0.118	0.61
	4.50	9.57	250	0.77	6.22	326	0.171	0.65
	4.50	9.57	260	1.08	6.67	327	0.240	0.70
	4.50	9.57	270	1.45	7.16	327	0.322	0.75
	4.50	9.57	280	1.88	7.51	328	0.417	0.78
	4.50	9.57	290	2.33	7.74	328	0.518	0.81
	4.50	9.57	300	2.75	7.87	329	0.612	0.82
	4.50	9.57	310	3.10	7.93	330	0.689	0.83
	4.50	9.57	320	3.34	7.93	331	0.741	0.83
	4.50	9.57	330	3.44	7.89	332	0.765	0.82
	4.50	9.57	340	3.43	7.85	333	0.762	0.82
	4.50	9.57	350	3.31	7.79	334	0.735	0.81
	4.50	9.57	360	3.08	7.72	334	0.684	0.81
	4.50	9.57	370	2.75	7.60	335	0.612	0.79
	4.50	9.57	380	2.35	7.43	335	0.523	0.78
	4.50	9.57	390	1.93	7.17	335	0.428	0.75
4.50	9.57	400	1.51	6.80	335	0.336	0.71	
4.50	9.57	410	1.14	6.39	335	0.254	0.67	
4.50	9.57	420	0.83	6.01	336	0.185	0.63	
Spettro 9	5.00	10.08	230	0.38	6.14	323	0.076	0.61
	5.00	10.08	240	0.60	6.24	325	0.120	0.62
	5.00	10.08	250	0.88	6.62	326	0.176	0.66
	5.00	10.08	260	1.23	7.08	327	0.247	0.70
	5.00	10.08	270	1.65	7.59	328	0.331	0.75
	5.00	10.08	280	2.13	7.94	328	0.427	0.79
	5.00	10.08	290	2.63	8.17	328	0.525	0.81
	5.00	10.08	300	3.08	8.29	329	0.616	0.82
	5.00	10.08	310	3.44	8.33	330	0.688	0.83
	5.00	10.08	320	3.67	8.32	331	0.735	0.83
	5.00	10.08	330	3.77	8.28	332	0.754	0.82
	5.00	10.08	340	3.74	8.22	333	0.749	0.82
	5.00	10.08	350	3.61	8.16	333	0.721	0.81
	5.00	10.08	360	3.36	8.08	334	0.672	0.80
	5.00	10.08	370	3.02	7.97	335	0.604	0.79
	5.00	10.08	380	2.60	7.80	335	0.520	0.77
	5.00	10.08	390	2.14	7.53	335	0.428	0.75
5.00	10.08	400	1.69	7.14	335	0.338	0.71	
5.00	10.08	410	1.28	6.70	335	0.256	0.66	
5.00	10.08	420	0.93	6.28	336	0.186	0.62	

Tabella 6-9 – Risultati della rifrazione inversa spettrale nel punto P2

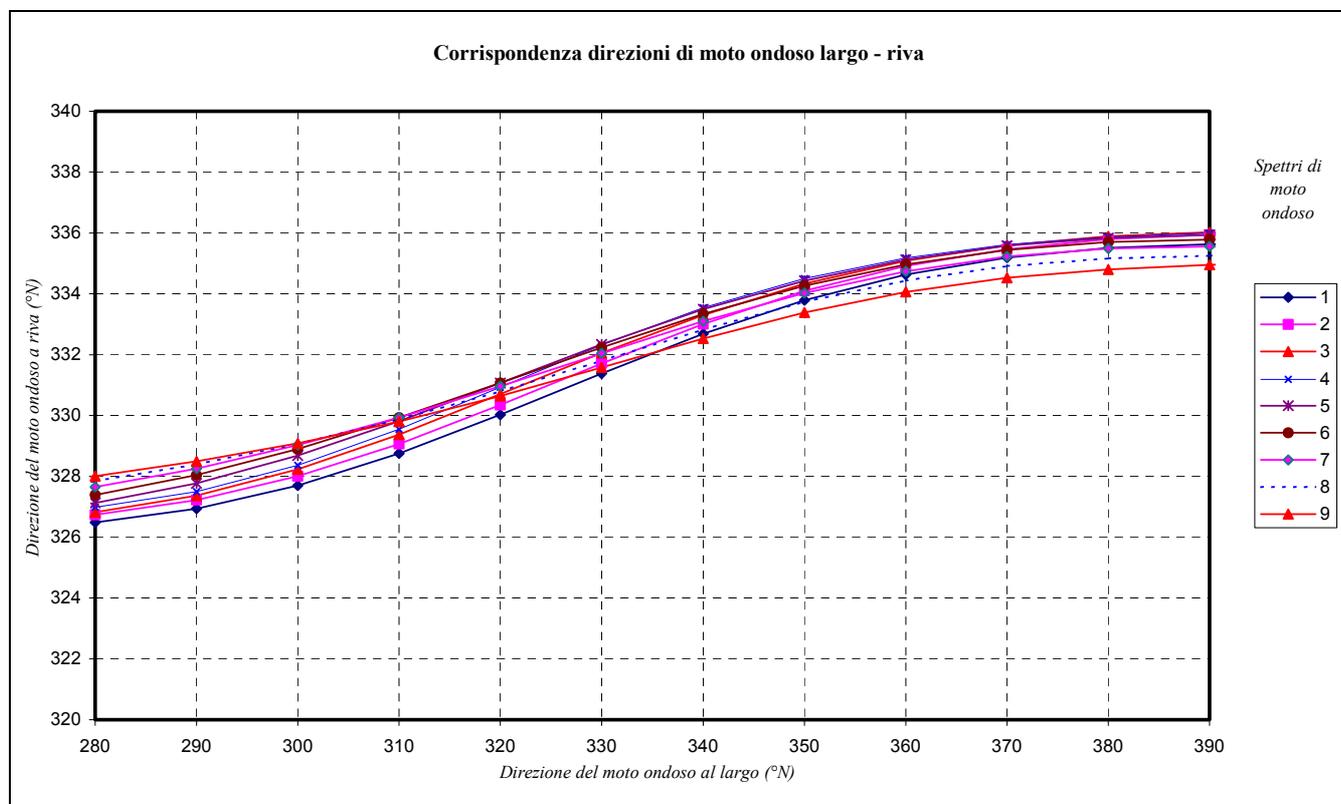
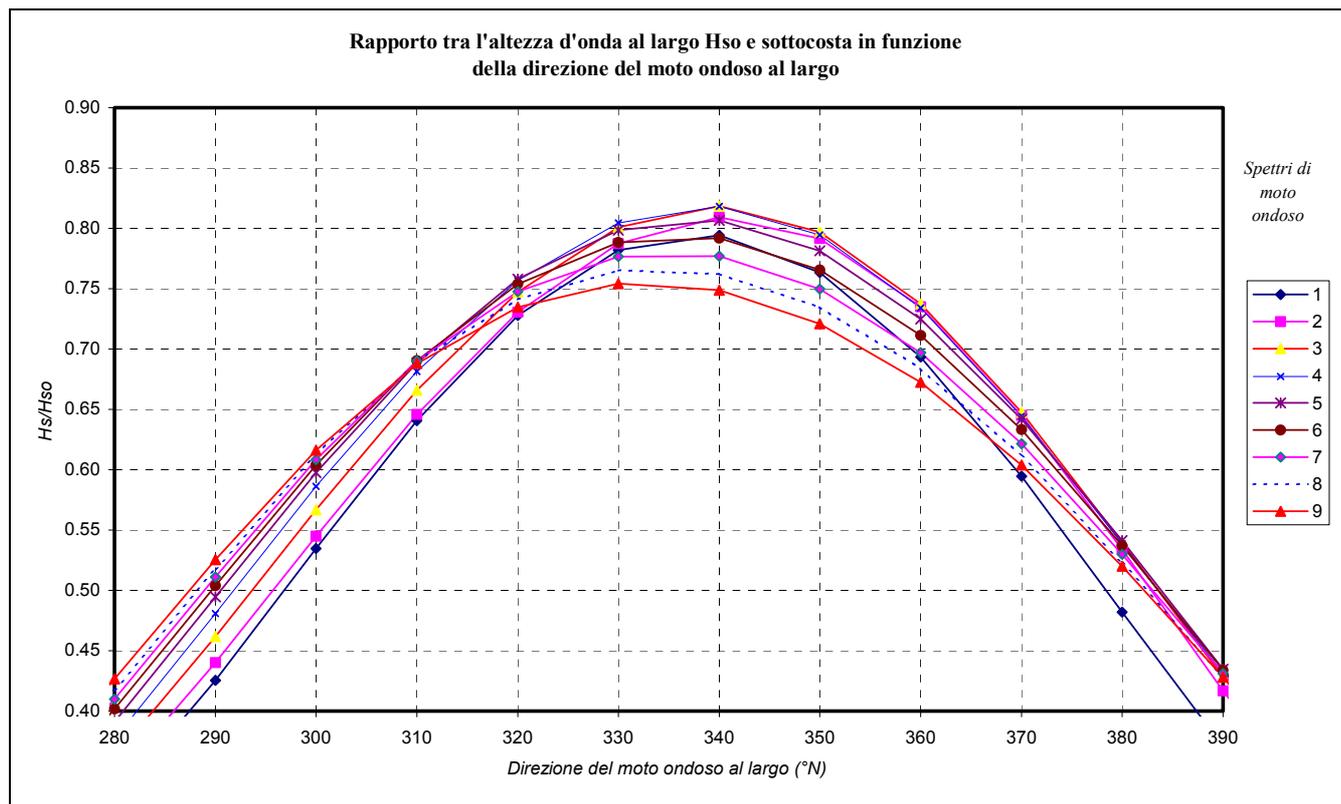


Figura 6-8 – Risultati della rifrazione inversa spettrale nel punto P2

Risulta evidente dalla tabella che il massimo valore medio del coefficiente  $k$  si ha nel punto P1 in corrispondenza della direzione di Maestrale.

In definitiva il settore di traversia presso la diga si stringe all'angolo compreso tra  $320^{\circ}\text{N}$  e  $360^{\circ}\text{N}$ .

Tutta la serie ondometrica, ricostruita al largo di Porto S.Stefano, è stata propagata sino al punto P1 e il punto P2 per meglio caratterizzare l'esposizione al moto ondoso in corrispondenza del molo di sopraflutto. I risultati sono sintetizzati nella Tabella 6-10 e Tabella 6-11 e nella Figura 6-9.

Da tali tabelle e figure si evidenzia che:

- per il punto P1 il settore di traversia si stringe all'angolo  $335 - 345^{\circ}\text{N}$ , mentre per il punto P2 all'angolo  $325 - 335^{\circ}\text{N}$ . – settore maestrale tramontana
- gli eventi con  $H_s > 2.0$  (eventi estremi) provengono unicamente dal settore di maestrale tramontana.

Si nota che la differenza di “ondosità” tra i due punti (distanti circa 200 m) è molto modesta; tutta la nuova opera è quindi soggetta a condizioni di moto ondoso equivalenti.

Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza

Località: S.Stefano riva (Punto P1) - periodo:1 gennaio 1951 - 31 dicembre 1978

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																
60																
70																
80																
90																
100																
110																
120																
130																
140																
150																
160																
170																
180																
190																
200																
210																
220																
230																
240																
250																
260																
270																
280																
290																
300																
310																
320	1.09															1.09
330	63.23	17.00	0.23													80.45
340	4.65	6.21	6.99	0.37	0.08											18.29
350	0.17															0.17
360																
TOT.	69.13	23.21	7.21	0.37	0.08											100.00
Tot. cumul.	92.34	99.55	99.92	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Tabella 6-10

Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza

Località: S.Stefano riva (Punto P1) - periodo:1 gennaio 1951 - 31 dicembre 1978

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																
60																
70																
80																
90																
100																
110																
120																
130																
140																
150																
160																
170																
180																
190																
200																
210																
220																
230																
240																
250																
260																
270																
280																
290																
300																
310	0.99															0.99
320	7.16	0.76	0.04													7.96
330	51.50	24.53	11.58	1.12	0.11	0.01										88.86
340	2.14	0.03	0.01													2.18
350																
360																
TOT.	61.80	25.32	11.64	1.12	0.11	0.01										100.00
Tot. cumul.	87.11	98.75	99.88	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Tabella 6-11

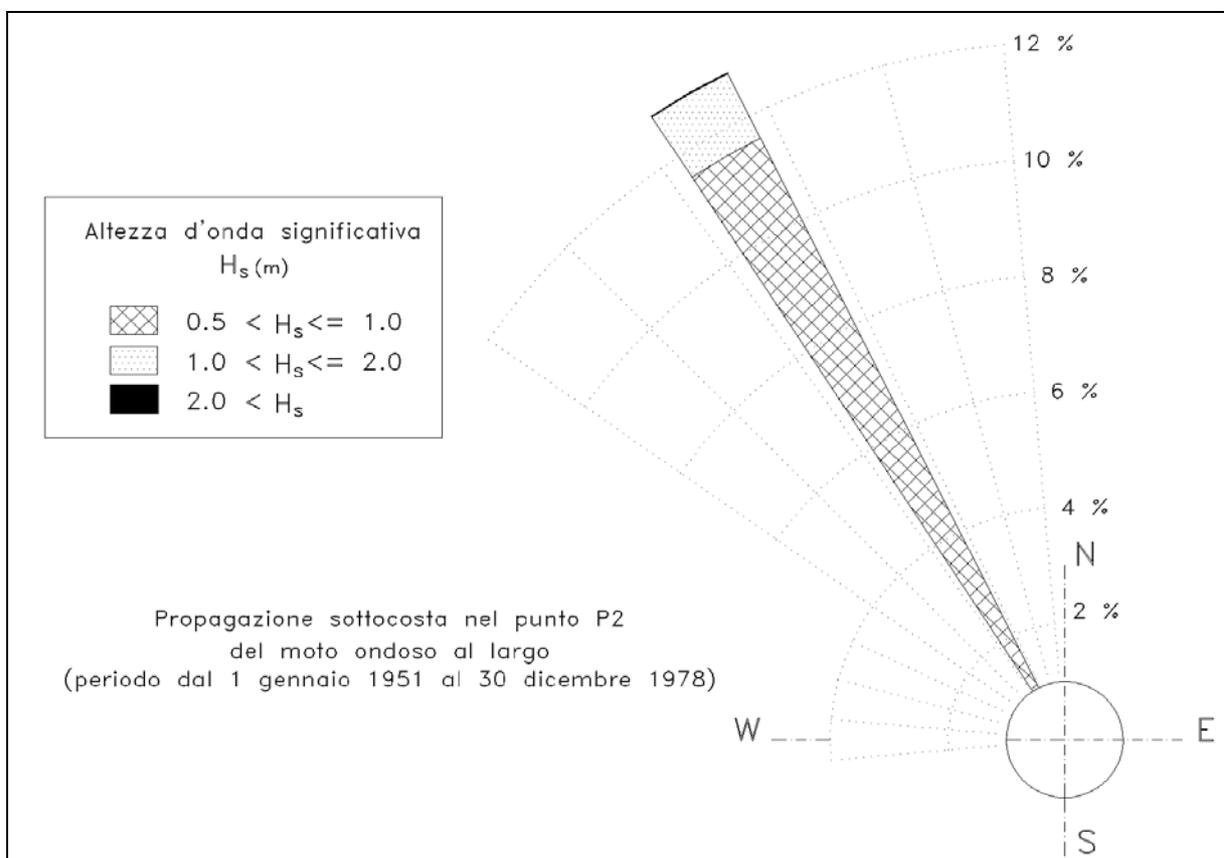
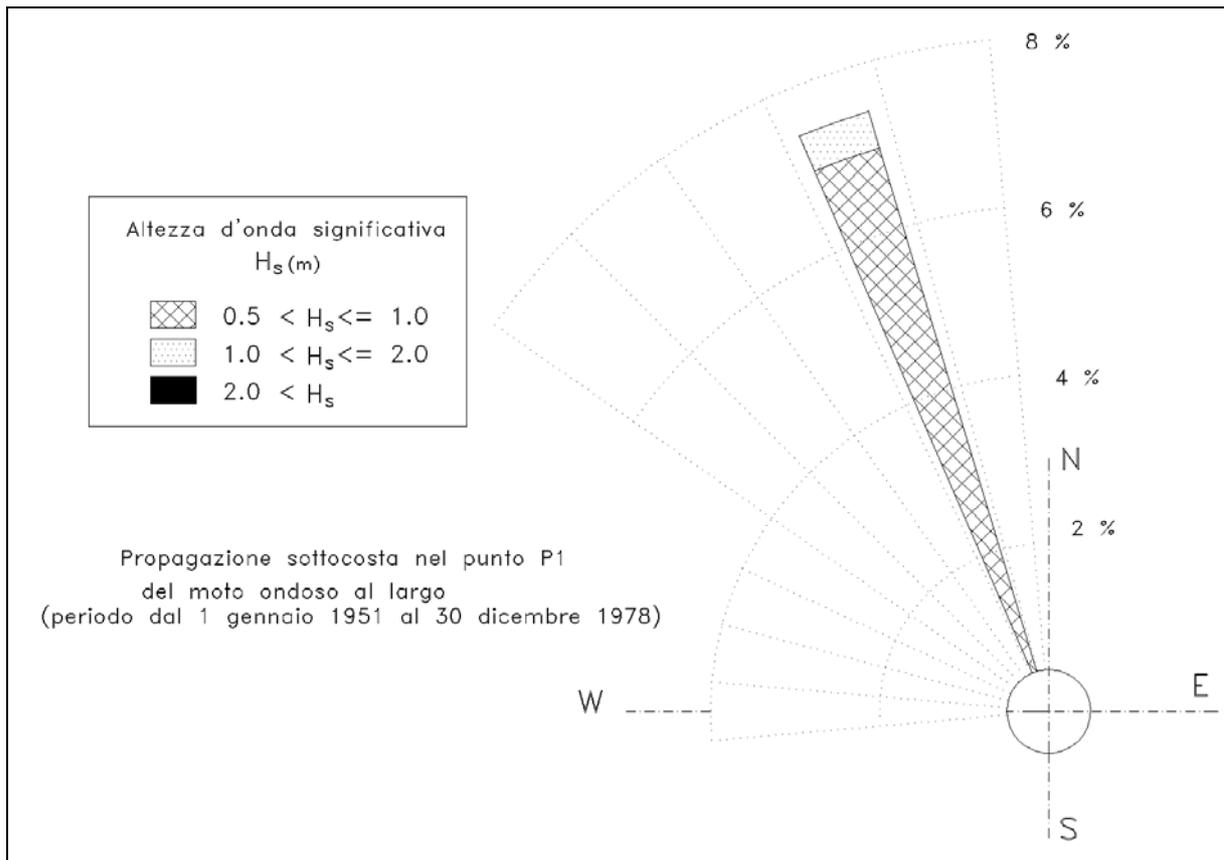


Figura 6-9

## 7 Analisi statistiche degli eventi estremi

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.

Si sono ricavato (Tabella 7-1 e Figura 7-1): 26 eventi (superiori a 2.1 m – metodo POT) per il settore principale 290°÷360° Nord.

Le serie tronche sono state elaborate effettuando dapprima una regolarizzazione di tipo statistico delle serie di valori riferita al periodo di misure (15.4 anni effettivi).

Successivamente le serie "tronche" di dati sono state riferite alle usuali leggi di distribuzione probabilistica al fine di determinare il valore con prefissati tempi di ritorno.

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. La stima dei parametri delle distribuzioni è stata eseguita sui valori dell'altezza d'onda significativa riportati nella Tabella 7-1 e nella Figura 7-1.

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

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

Per il settore compreso tra 270° - 360 °N, le altezze d'onda significative, associate al tempo di ritorno (Tr) di 10, 50 e 100 anni, assumendo i valori più alti ottenuti con le diverse distribuzioni, sono rispettivamente di 3.1 m, di 3.6 m e di 3.9 m. Per il quadrante (0°-90°N) è stato effettuato il calcolo della massima agitazione risultante con il vento estremo di 50 m/s per un tempo di 1.30 h su un fetch molto limitato di 15 km, ricavando un valore di  $H_s = 2.5$  m, comunque inferiore ai valori suddetti.

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  $T_m = 4.15\sqrt{H_s}$ .

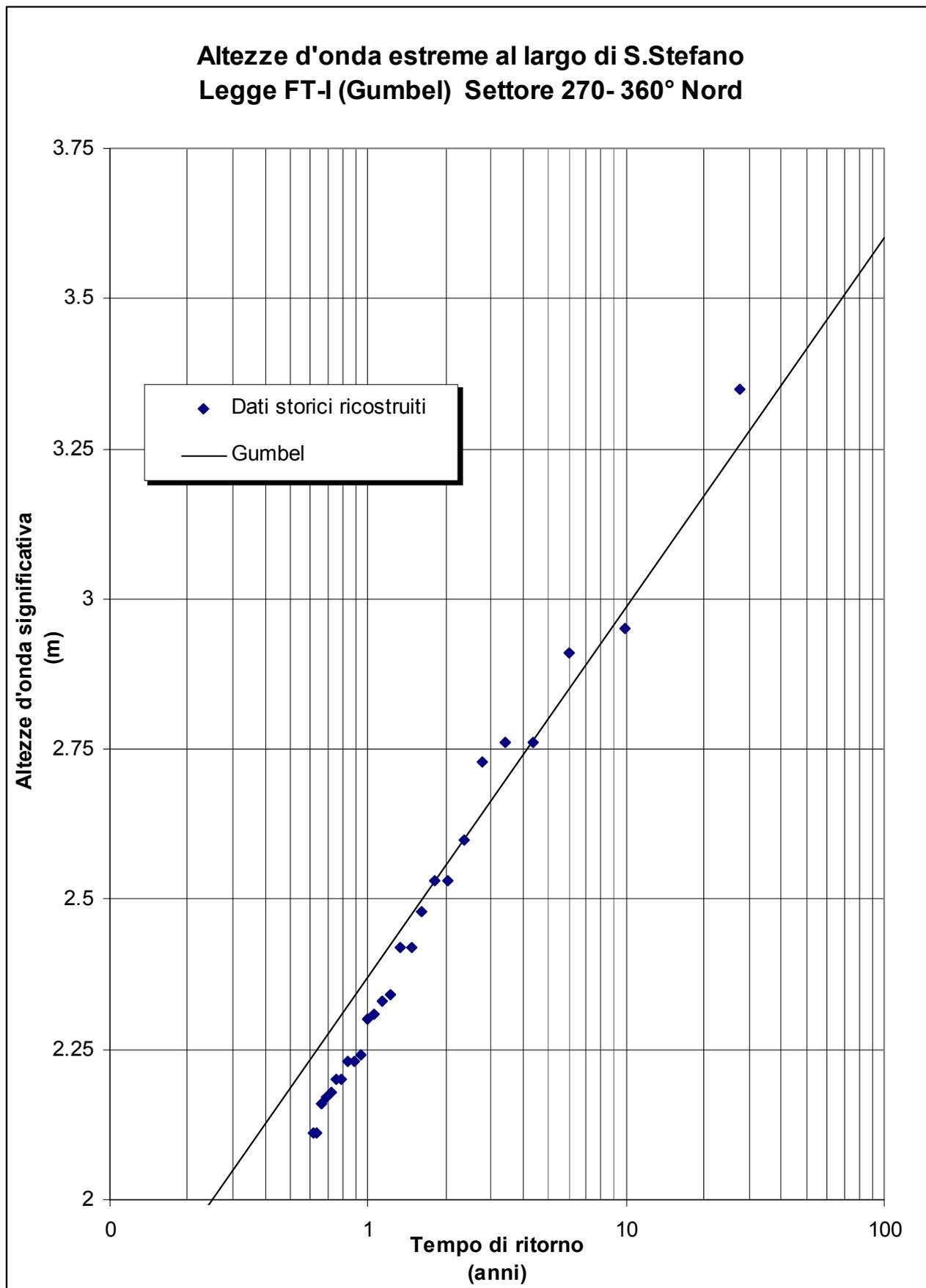
Assumendo la persistenza trioraria dello stato di mare estremo si può valutare un numero di onde  $N = 3 \times 3600 / T_m = 1500$  e quindi una probabile  $H_{max} = H_s \cdot \sqrt{\frac{\ln N}{2}} = 1.9 \times H_s$ , da cui si ha che per un tempo di ritorno di 10, 50 e 100 anni il valore dell' $H_{max}$  sarà uguale a 5.9 m, 6.8 m e 7.4 m (in acqua profonda).

Detti valori sono riferiti al largo del porto di Porto San Stefano; in prossimità del molo di sopraflutto le altezze d'onda significativa sono ottenute moltiplicando detti valori per il corrispondente coefficiente k (coefficiente di rifrazione  $\times$  coefficiente di shoaling), prescindendo dalle trascurabili differenze tra i due punti (in assenza di frangimento, viste le profondità al piede relativamente elevate):

Tempo di ritorno (anni)	Altezza significativa al largo (m)	Altezza significativa sulla diga (m)
10	3.1 (0.3)	2.50 (0.25)
50	3.6 (0.5)	2.87 (0.33)
100	3.9 (0.6)	3.00 (0.44)



Figura 7-1



## 8 Determinazione dell'onda di progetto

Come ogni opera marittima si deve valutare la durata di vita presunta, in relazione al progetto in cui è inserita, tenuto conto delle sue caratteristiche funzionali.

Si valuta inoltre, il livello di rischio o probabilità di superamento dell'onda di progetto, tenuto conto dei danni che tali onde possono arrecare all'opera e della possibilità di ripristinare la normale funzionalità con operazioni di manutenzione.

Nelle Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe frangiflutti edite dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (1996) si consigliano i valori riportati nelle seguenti tabelle 8.1 e 8.2.

Tabella 8-1 - 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.).

Il caso della diga di Porto S. Stefano va considerato come infrastruttura civile di uso generale con un livello di sicurezza compreso tra 1 e 2 (tenuto conto della destinazione d'uso quale banchina di

attracco del lato interno del molo). Cautelativamente si può dunque assumere un tempo di vita dell'opera pari a 50 anni.

Tabella 8-2 - 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 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.

Per strutture rigide (dighe a parete verticale), per le quali è estremamente difficile riparare il danno, si assume la probabilità di distruzione totale.

Per strutture flessibili o comunque per opere riparabili (ad es. scogliere), 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 queste opere si deve comunque verificare anche lo scenario di rovina totale, cioè del superamento di un livello di danneggiamento predefinito in relazione al tipo di struttura, al di sopra del quale l'opera cessa di svolgere un'apprezzabile funzione protettiva.

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 si 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 dei tempo di vita dell'opera  $T_v$  e della probabilità di danneggiamento  $P_f$ , determina il tempo di ritorno dell'evento di progetto  $T_{rp}$ :

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

Nel caso in esame si può considerare un rischio limitato di perdita di vita umana ed una ripercussione economica medio-bassa. Assumendo il criterio del danno incipiente si impone  $P_f = 0,4$  e quindi  $T_{rp} = 50 / [-\ln (0.6)] = 100$  anni.

In relazione a questo tempo di ritorno, dalla statistica degli eventi estremi, si può desumere l'altezza d'onda significativa di progetto pari a 3,9 m al largo e quindi 3.3 m al piede dell'intera estensione dell'opera. Ad essa si può associare un periodo di picco pari a  $4.51 \times \sqrt{H_s} = 9$  s secondo le consuete relazioni empiriche per fetch limitati.

L'onda significativa così valutata ha approssimativamente la probabilità  $P_f$  (detta anche probabilità di incontro) di essere superata nell'arco di vita dell'opera.

Nelle verifiche di stabilità saranno comunque assunti gli opportuni margini di sicurezza per tenere conto della incertezza:

- delle caratteristiche stimate dell'onda di progetto;
- della intensità della sollecitazione effettiva per data onda sollecitante, cioè del modello dell'azione ondosa utilizzato nei calcoli,
- del comportamento dell'opera e della fondazione, cioè dei modelli di verifica strutturale e geotecnica utilizzati.

Se si seguirà un modello di calcolo probabilistico si terrà conto del valore fornito dallo scarto quadratico medio. Con approccio deterministico appare consigliabile tener conto cautelativamente delle suddette incertezze legate soprattutto al limitato periodo di osservazioni per assumere un valore di  $H_s$  centennale pari al valore atteso più l'intervallo di confidenza ( $=0.6$ ); risulta quindi che per  $H_{so} = (3.9 + 0.6) = 4.5$  m al largo, si ottiene al piede della diga un'altezza d'onda significativa di  $4.5 \times 0.76 = 3.4$  m (si veda spettro 8 in tab 6.2.2.). La direzione critica attesa di provenienza è di 330-340°N ed il periodo significativo è pari a 9 s ( $T_s$ ).

Queste sono le caratteristiche principali dell'onda di progetto da assumere prudenzialmente alla base di verifiche di stabilità delle nuove opere foranee.

## 9 Appendice:

### 9.1 *Descrizione del modello di ricostruzione di moto ondoso (hindcasting)* **ALTAIR**

Il modello Altair ricostruisce gli stati di moto ondoso conseguenti all'azione diretta del vento sulla superficie marina.

Per il calcolo degli stati di mare generati dall'azione diretta del vento sulla superficie marina si fa riferimento alle relazioni, derivate dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, S.P.M. 1984, Smith 1991). E' necessario definire preliminarmente l'estensione e la conformazione dell'area di generazione nonché la profondità dei fondali di detta porzione di mare. Per quanto riguarda l'estensione e la conformazione si deve fare riferimento alla seguente classificazione:

- Restricted Fetches per traversie geografiche delimitate dalla presenza della costa o comunque contraddistinte da distanze inferiori a quelle proprie dell'estensione delle perturbazioni atmosferiche (1) responsabili del processo di generazione del moto ondoso;
- Open-Water Fetches per traversie geografiche non limitate da emergenze orografiche e comunque con estensioni superiori a quelle delle perturbazioni atmosferiche.

Per quanto riguarda la profondità dei fondali si deve fare la seguente distinzione:

- Shallow-Water per generazione del moto ondoso in acque basse ove cioè i fenomeni dissipativi per attrito e/o percolazione sul fondale non sono trascurabili (Bretchneider e Reid, 1954);
- Deep-Water per generazione del moto ondoso in aree contraddistinte da profondità superiori a 90 m (300 ft, SPM 1984).

Le equazioni impiegate, nella forma più generale, sono le seguenti:

$$t_{fetch,min} = D \cdot \frac{F^{1-C}}{g^C \cdot U_a^{(1-2C)}} \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> Per il Mediterraneo si è soliti considerare comunque un limite superiore dell'estensione delle perturbazioni atmosferiche pari a 500 km

$$H_{m0} = \frac{U_a^2}{g} \cdot 0.283 \cdot \tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{\frac{A}{0.283} \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right]} \right\} \quad (2)$$

$$T_p = \frac{U_a}{g} \cdot 7.540 \cdot \tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{\frac{B}{7.54} \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^C}{\tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right]} \right\} \quad (3)$$

ove:

- $d$  profondità (m) del fondale (assunto costante) relativo all'area di generazione;
- $U_a$  velocità (m/s) del vento "regolarizzata" (adjusted) in funzione delle caratteristiche della stazione di registrazione (quota e posizione geografica) e di 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 marina lungo la quale si esplica l'azione del vento (fetch);
- $g$  accelerazione di gravità pari a  $9.81 \text{ m/s}^2$ ;
- $A$  costante pari a 0.0016 in condizioni di Open-Water e 0.0015 per Restricted Fetch
- $B$  costante pari a 0.2857 in condizioni di Open-Water e 0.3704 per Restricted Fetch
- $C$  costante pari a 0.3333 in condizioni di Open-Water e 0.28 per Restricted Fetch
- $D$  costante pari a 68.80 in condizioni di Open-Water e 51.09 per Restricted Fetch

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

$$U_a = 0.71 \cdot U_{10}^{1.23} \quad (4)$$

ove  $U_{10}$  esprime la velocità del vento relativa alla quota standard di misura pari a 10 m s.l.m.m.

Il valore della velocità del vento misurato dallo strumento posto alla generica quota  $z$   $U_z$  deve essere quindi preliminarmente riferito alla quota standard di riferimento pari a 10 m s.l.m.m.; a tal riguardo si definisce un coefficiente correttivo tramite la relazione:

$$\frac{U_{10}}{U_z} = \frac{1}{\left[ 1 + 0.1 \ln \left( \frac{z}{10} \right) \right]} \quad (5)$$

Il termine  $F$  rappresenta il fetch efficace che viene calcolato preliminarmente, in funzione della conformazione geografica dell'area di generazione, tramite relazioni come quelle classiche di Saville o Seymour.

Nota una sequenza temporale di stati di vento, il programma è in grado di calcolare gli stati di mare generati operando una prima selezione, nella sequenza di registrazioni anemometriche, in gruppi di misure appartenenti allo stesso evento. Questa selezione viene effettuata considerando la direzione di provenienza del vento e controllando quando questa si discosta dalla direzione media relativa al periodo temporale per uno scarto superiore a  $\pm 45^\circ$  in esame. Nell'ambito di ciascun gruppo di sequenze reali di stati di vento, il programma calcola i valori di altezza significativa ( $H_{m0}$ ) periodo di picco ( $T_p$ ) e direzione media di provenienza ( $\theta_m$ ) del moto ondoso, tenendo conto dell'energia comunque trasferita dagli stati di vento precedenti. Nell'ambito della selezione dei "gruppi di stati di vento" il programma fa riferimento ai seguenti criteri per considerare chiuso un "gruppo":

1. due valori consecutivi di direzione del vento sono contraddistinti da estensione nulla del fetch efficace (vento proveniente da un'area esterna a quella di generazione, ad es. vento da terra);
2. due valori consecutivi di velocità del vento sono inferiori alla soglia delle calme (1 nodo);
3. si verificano in successione una condizione tipo a) ed una tipo b) o viceversa;
4. si presentano due valori consecutivi di vento interno alla traversia efficace ma tra loro sfasate di oltre  $45^\circ$  rispetto al valore medio ponderale di tutte le direzioni registrate in precedenza ed appartenenti allo stesso "gruppo".

Per simulare l'effetto di smorzamento del moto ondoso al fine di tenere conto dell'effettiva dissipazione energetica in atto nelle fasi calanti delle velocità del vento si è fatto riferimento all'espressione proposta da Lacombe (1965) calcolando l'altezza d'onda  $H_{sm}$  "di smorzamento", esplicitata in funzione dell'altezza  $H_i$  e del periodo  $T_i$  relativi al precedente intervallo di calcolo, e nell'ipotesi che nell'intervallo di tempo  $i+1$  la velocità del vento sia nulla:

$$H_{sm} = \sqrt{H_i^2 - \frac{H_i^4}{T_i^4} - 122.866} \quad (7)$$

In definitiva quando, per l'intervallo di tempo  $(i+1)$ -esimo, lo stato di vento è tale da non determinare un'incremento dell'agitazione ondosa (perché il vento ha una velocità inferiore a quella relativa al precedente intervallo di calcolo), viene automaticamente calcolata anche l'altezza smorzata in funzione del moto ondoso noto per l'intervallo  $i$ -esimo; nella fase successiva del calcolo, se l'altezza d'onda  $H_{i+1}$  ricavata con la relazione (2) è inferiore a quella di smorzamento  $H_{sm}$  definita dalla (7), si

assume questo valore come rappresentativo dell'intervallo (i+1)-esimo (infatti è improbabile che una riduzione di velocità del vento faccia calare l'altezza d'onda in misura superiore a quella che si registrerebbe nell'ipotesi di totale assenza di vento). Nel caso in cui l'altezza  $H_{i+1}$  risulti maggiore di  $H_{sm}$  si assume come valore dell'altezza d'onda la media aritmetica tra  $H_{i+1}$  e  $H_i$  (si tiene così conto del "ritardato" adeguamento del mare alle nuove ridotte condizioni di vento).

## 9.2 **Descrizione del modello di propagazione inversa spettrale MEROPE**

Propagandosi verso "riva" su fondali via via decrescenti, le onde subiscono una serie di trasformazioni geometriche e perdite di energia che alla fine conducono al loro frangimento (ciò avviene quando l'onda, deformata, diviene molto alta rispetto alla sua lunghezza e perciò "instabile" o comunque intercetta fondali bassi «incompatibili» con la sua altezza).

Prescindendo, perché comunque trascurabili, dalle perdite di energia che (fuori dalla zona dei frangenti) sono dovute all'attrito del fondo e, per fondi permeabili, alla percolazione; nonché dagli effetti indotti dalle correnti, dal vento e dalle riflessioni del fondo, le modifiche delle caratteristiche ondose durante la propagazione verso riva sono indotte essenzialmente dai fenomeni di rifrazione e di shoaling.

Il primo fenomeno (rifrazione) consiste in una trasformazione tridimensionale dovuta a variazioni di fondale lungo i fronti d'onda che comportano variazioni planimetriche di questi e, conseguentemente, a variazioni delle altezze d'onda per effetto della conservazione del flusso di energia fra "ortogonali" vicine.

Il secondo fenomeno (shoaling) è una trasformazione bidimensionale delle onde dovuta al solo effetto del fondale nella direzione di propagazione. L'effetto "fondale" modifica la celerità di gruppo e di conseguenza provoca dapprima una riduzione e poi un sostanziale aumento di altezza delle onde allorché queste avanzano su profondità di fondali decrescenti.

La simulazione di detti fenomeni può essere eseguita in modo efficace con il metodo della "rifrazione inversa spettrale". Tale metodo fornisce risultati quantitativi esattamente nel punto di interesse, al contrario del metodo classico della rifrazione diretta. Il relativo modello matematico è stato sviluppato seguendo le indicazioni di Abernety e Gilbert (1978).

La differenza più appariscente rispetto al metodo tradizionale dei piani d'onda (rifrazione diretta) è rappresentata dalla costruzione dei raggi con un verso contrario a quello della propagazione delle onde. Tale impostazione fu introdotta da Dorrestein nel 1960: si costruisce un ventaglio di raggi relativi ad un dato periodo d'onda, che hanno tutti origine nel luogo della costa (o in prossimità) dove si desidera conoscere i risultati, partendo ognuno con una diversa direzione  $\phi$ . Si ricava quindi la direzione  $\Theta$  che i raggi possiedono quando raggiungono la regione di acque profonde.

Riportate in diagramma le molteplici coppie di valori  $\Theta-\phi$  trovate, si ricava per ogni  $\Theta$  il

gradiente  $\frac{\delta\phi}{\delta\Theta}$  da introdurre nella formula che conduce poi alle altezze sotto costa:

$$K_r = \sqrt{\frac{C_0}{C} \cdot \frac{\delta\phi}{\delta\Theta}}$$

Rispetto al metodo convenzionale, si ha il vantaggio che i risultati sono ottenuti direttamente per il luogo che interessa, sulla costa, senza il problema di dover interpolare tra raggi calcolati da una parte o dall'altra del punto. Inoltre, un unico diagramma di rifrazione (per ciascun periodo) rappresenta i raggi relativi a tutte le direzioni di provenienza del moto ondoso al largo.

Dal punto di vista pratico, la costruzione inversa dei raggi non presenta problemi e si applica la stessa equazione della traiettoria del raggio del metodo convenzionale, con lievi modifiche di segni. Con la tecnica della proiezione inversa, non sarebbe necessario neppure conoscere il percorso dei singoli raggi poiché basta avere il diagramma di rifrazione  $\phi-\Theta$  definito con incrementi di frequenza e  $\Theta$  sufficientemente piccoli per riassumere tutti gli effetti della topografia sull'altezza e direzione delle onde nella loro propagazione verso un punto della costa. Si nota in genere che le curve  $\phi-\Theta$ , dolci per valori alti delle frequenze, presentano discontinuità notevoli per le frequenze minori con conseguenti singolarità nel valore di  $K_r$ .

Ciò significa che questa tecnica (così come quella convenzionale) ha il difetto che la funzione altezza d'onda diventa indeterminata proprio in un campo di frequenze e direzioni di interesse non trascurabile. In pratica questo comporta che nel percorso dei raggi compaiono singolarità (caustiche) non giustificabili fisicamente, come per i piani d'onda tradizionali. Il fatto che usando spaziature sufficientemente grandi dei raggi questi difetti non siano evidenziati, non esclude l'insufficienza del metodo.

E' stato mostrato che a queste difficoltà si può ovviare abbandonando l'ipotesi che al largo il fronte d'onda si presenti con direzione d'onda e frequenza ben precise ed uniformi (onde monocromatiche), e considerando funzioni spettrali sia per la direzione che per la frequenza. Va mantenuta invece l'ipotesi di uniformità di fase.

L'importanza fondamentale dell'introduzione dello spettro d'energia bidimensionale associata a quello di proiezione inversa dei raggi, è che, a differenza del metodo tradizionale e di quello di Dorrestein, dà luogo a risultati univoci ed ovunque finiti, eliminando le singolarità già evidenziate.