

**AUTORITA' PORTUALE DI OLBIA E GOLFO ARANCI**

**Stazione Marittima**

**Olbia**

**PORTO DI GOLFO ARANCI:**

**LAVORI DI PROLUNGAMENTO DEL PONTILE EST  
PROGETTO ESECUTIVO**

revisione	data	descrizione della modifica
001	giugno 2007	ADEGUAMENTO PLANIMETRICO
002	sett. 2007	NUOVO ADEGUAMENTO PLANIMETRICO
003	magg. 2008	NUOVO ADEGUAMENTO PLANIMETRICO

**ALL. B 1**

**RELAZIONI SPECIALISTICHE**

**STUDIO METEO MARINO**

Data :  
05/03/07

Prot :  
2299

Perizia n° :  
278

Progetto :



MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI  
Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche per il Lazio, Abruzzo e Sardegna  
Ufficio Tecnico Opere Marittime  
Sede coordinata di Cagliari

I Progettisti

Coordinatore Tecnico  
Dott. Ing. Walter QUARTO

Il Consulente

Martech S.r.l.  
Dott. Ing. Andrea RITOSSA

Il Responsabile del procedimento

Coordinatore Tecnico  
Dott. Ing. Andrea BOTTI

Il Presidente dell'Autorità Portuale di Olbia e Golfo Aranci  
Dott. Paolo PIRO

# INDICE

<b>1</b>	<b>STUDIO METEO-MARINO PER IL PORTO DI GOLFO ARANCI.....</b>	<b>3</b>
1.1	INTRODUZIONE .....	3
1.2	CARATTERISTICHE DI MOTO ONDOSI E DETERMINAZIONE DELLE ONDE ESTREME .....	4
1.2.1	Premessa .....	4
1.2.1.1	Dati Anemometrici e ricostruzione del moto ondoso generato dal vento .....	5
1.2.1.2	Individuazione settori di traversia e calcolo dei fetch efficaci.....	8
1.2.1.3	Preparazione dei dati di vento: determinazione di $U_a$ .....	10
1.2.1.4	Ricostruzione del clima ondoso nel paraggio esterno.....	12
1.2.1.5	Ricostruzione del clima ondoso nel paraggio interno .....	14
1.2.1.6	Determinazione degli eventi estremi .....	18
1.2.1.7	Determinazione dell'onda di progetto.....	19
	BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI .....	21
	ELENCO ALLEGATI.....	22
	<b>Allegati .....</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>STUDIO IDRODINAMICO, TRASFORMAZIONE DELL'ONDA DA LARGO VERSO RIVA PER IL PORTO DI GOLFO ARANCI.....</b>	<b>32</b>
2.1	INTRODUZIONE .....	32
2.2	STUDIO DELL'AREA D'INTERVENTO.....	32
2.2.1	Batimetria.....	34
2.2.2	Maree .....	35
2.2.3	Vento .....	35
2.2.4	Onde.....	36
2.3	IL SISTEMA DI MODELLI NUMERICI .....	38
2.3.1	Modello per la trasformazione delle onde (Wave Model SWAN).....	38
2.3.2	Modello di penetrazione di moto ondoso .....	38
2.4	SIMULAZIONE DI TRASFORMAZIONE D'ONDA .....	39
2.4.1	Impostazioni .....	39
2.4.1.1	Parametri fisici e numerici modello SWAN.....	39
2.4.2	Scelta dei dati delle forzanti d'onda modello SWAN.....	39
2.4.3	Simulazioni e risultati SWAN.....	40
2.4.3.1	Coefficienti di riflessione del moto ondoso e frangimento PHAROS.....	42

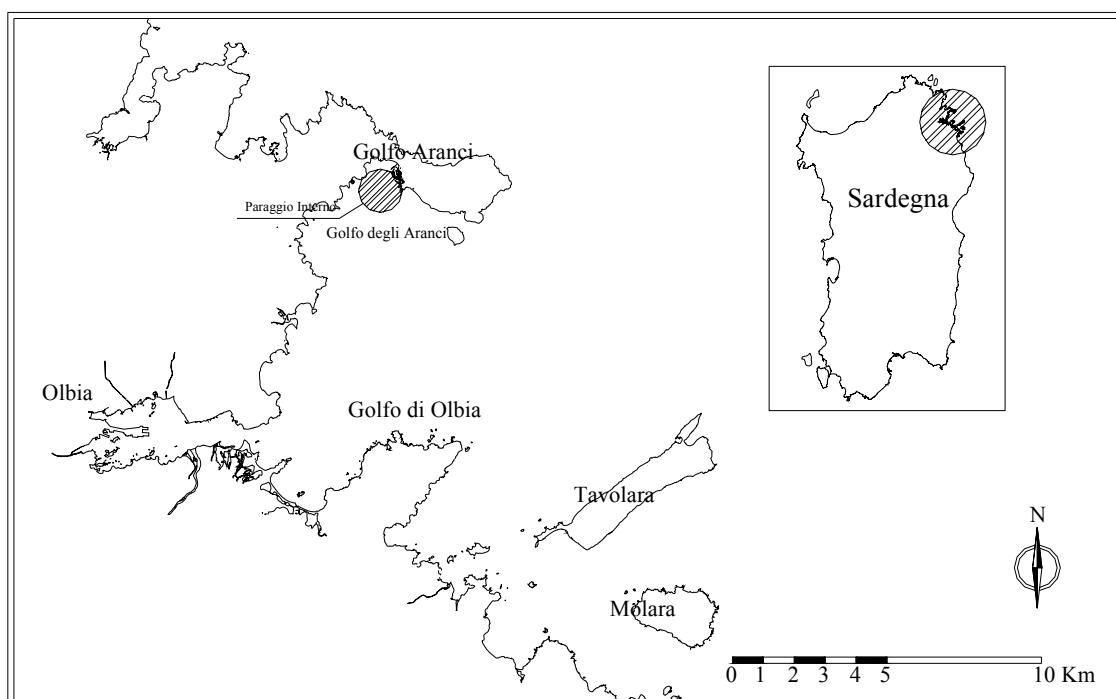
2.4.4	<i>Condizioni al contorno</i> .....	43
2.5	<i>RISULTATI DEL MODELLO PHAROS</i> .....	43
2.6	<i>CONSIDERAZIONI</i> .....	45

# **1 STUDIO METEO-MARINO PER IL PORTO DI GOLFO ARANCI**

## **1.1 Introduzione**

Lo studio meteo-marino effettuato, inquadrato nei lavori di prolungamento del pontile est del porto di Golfo Aranci, è finalizzato alla determinazione delle caratteristiche del moto ondoso per verificare eventuali azioni di sottospinta sulle campate del pontile stesso

L'ubicazione favorevole del porto (vedi Figura 1-1), offre buone caratteristiche di riparo dal moto ondoso generato al largo che, in seguito a propagazione sotto effetto di shoaling, diffrazione e rifrazione, investe i Golfi d'Olbia e degli Aranci.



**Figura 1-1: Inquadramento geografico e planimetria generale con ubicazione del paraggio interno**

Questa particolare circostanza, non permette di stabilire a priori quale sia il tipo di moto ondoso prevalente: se quello generato al largo e propagantesi all'interno del golfo fino al paraggio d'interesse, o quello generato all'interno del Golfo in seguito a regimi di vento intenso.

Alla luce di queste riflessioni, (confermate poi da riscontri oggettivi), si sono studiati entrambi i tipi di moto ondoso rinvenibili.

Per fare ciò si è ricostruito sia il moto ondoso che si genera al largo che quello che si genera all'interno del Golfo.

Nella prima parte dello studio meteo-marino si è proceduto alla determinazione del clima ondoso del paraggio in esame procedendo poi ad un'analisi statistica al fine di stabilire le caratteristiche dell'onda più probante.

## 1.2 Caratteristiche di moto ondoso e determinazione delle onde estreme

### 1.2.1 Premessa

La totale assenza di dati direttamente rilevati nel paraggio in esame, ha imposto la ricostruzione indiretta del moto ondoso avvenuta tramite modello matematico a partire dai dati di vento disponibili.

Per quanto riguarda la rilevazione delle caratteristiche del moto ondoso riscontrabile al largo, ovvero all'ingresso del Golfo di Olbia, sono disponibili tre tipi di dati osservati:

- ✓ dati forniti dall'U.K.M.O. (United Kingdom Meteorological Office-Bracknell), relativi al settore 40.5-41.5°N; 9.5-10.5°E (vedi allegato 2 pag. 28);
- ✓ dati osservati della stazione M.M di Capo Figari (vedi allegati 5,6,7 pagg. 31-33);
- ✓ dati registrati dalla boa ondometrica del R.O.N. di Capo Comino<sup>1</sup>.

Tuttavia, essendo i primi due dati osservati e non rilevati strumentalmente, i terzi mancanti di una estesa serie storica, sono stati utilizzati, nella fase iniziale per avere un quadro qualitativo sufficientemente preciso, in fase finale per verificare la bontà del lavoro di ricostruzione effettuato.

Tali osservazioni, in particolare le prime due serie, possono dar luogo a serie statistiche non omogenee e possono fornire dati sottostimati: i traffici marittimi, infatti, si concentrano più in alcune stagioni piuttosto che in altre ed inoltre, le navi preferiscono trovare riparo nei giorni di forte burrasca<sup>2</sup>.

In fase preliminare si è proceduto ad un'analisi degli studi svolti per paraggi vicini al nostro e che quindi potevano fornire utili indicazioni e importanti verifiche in fase finale.

In particolare, si fa riferimento allo studio effettuato da Modimar, commissionato da Edilnord Progetti per il paraggio di Costa Turchese; Studio Meteo-marino effettuato dal Prof. Andrea Atzeni nell'ambito della progettazione dell'approdo turistico "Marina di Olbiamare"; Studio meteo-marino effettuato nell'ambito del progetto per l'utilizzazione dello stagno di "Salina bamba" nel Comune di S. Teodoro e Studio STONE, effettuato dal C.N.R.

---

<sup>1</sup> (2002-2005)

<sup>2</sup> Tomasicchio, Manuale di ingegneria portuale e costiera (vedi bibliografia e riferimenti)

### 1.2.1.1 Dati Anemometrici e ricostruzione del moto ondoso generato dal vento

I metodi che consentono di ricostruire l'agitazione ondosa da una data tempesta di vento sono diversi. Nel presente studio si è fatto utilizzo del cosiddetto metodo S.M.B<sup>3</sup> rielaborato alla luce di nuovi rilievi del moto ondoso e delle relative stime spettrali (oggi comunemente noto con nome SPM84<sup>4</sup>), ulteriormente rivisitato da Hurdle e Stive nel 1989.

Il metodo fornisce, assegnati il fetch<sup>5</sup>, la durata dell'evento e la velocità del vento, il periodo di picco e l'altezza significativa d'onda (la direzione media del moto ondoso è assunta coincidente alla direzione del vento che l'ha generato).

Per la ricostruzione delle serie storiche delle altezze d'onda generate al largo ed all'interno del Golfo di Olbia si è fatto uso delle registrazioni effettuate dalla stazione dell'Aeronautica Militare di La Maddalena in località "Guardia vecchia" essendo questi dati stati utilizzati e testati in numerosi studi idrodinamici per paraggi vicini a quello in esame.

La scelta dei dati di La Maddalena per la ricostruzione del clima ondoso proveniente da largo è immediata e facilmente comprensibile poiché il clima ondoso che proviene da largo è generato da eventi anemometrici che insistono sulle distese di mare ad occidente della costa sarda e, quindi, la stazione di Guardia vecchia meglio le rappresenta, anche per la mancanza di formazioni orografiche che falserebbero i dati (la stazione è posta ad un'altezza di 168 m. s.l.m.).

La scelta della stazione di rilevamento per la raccolta dei dati per la determinazione del clima ondoso all'interno del Golfo degli Aranci è stata più complessa.

L'orografia della zona dà luogo a fenomeni locali di canalizzazione e cambi di direzione del vento che non permettono di individuare a priori e con sicurezza la stazione anemometrica che meglio rappresenta il regime di vento della zona in esame. Il criterio di scelta dettato dalla vicinanza dei siti in esame può non essere del tutto propria a causa di detti fenomeni.

Nel presente caso si è preferito utilizzare i dati della stazione di La Maddalena a quelli dell'aeroporto di Olbia per due ordini di ragioni: una qualitativa ed una quantitativa.

La ragione qualitativa è la seguente: procedendo ad un confronto tra il diagramma polare della distribuzione degli eventi per le due stazioni (vedi **Figura 1-2**), si nota la quasi sovrapponibilità delle rose, indice di un pressoché identico regime statistico del vento. I due diagrammi risultano leggermente disassati e ruotati ma questo dipende, presumibilmente, dal maggior dettaglio della

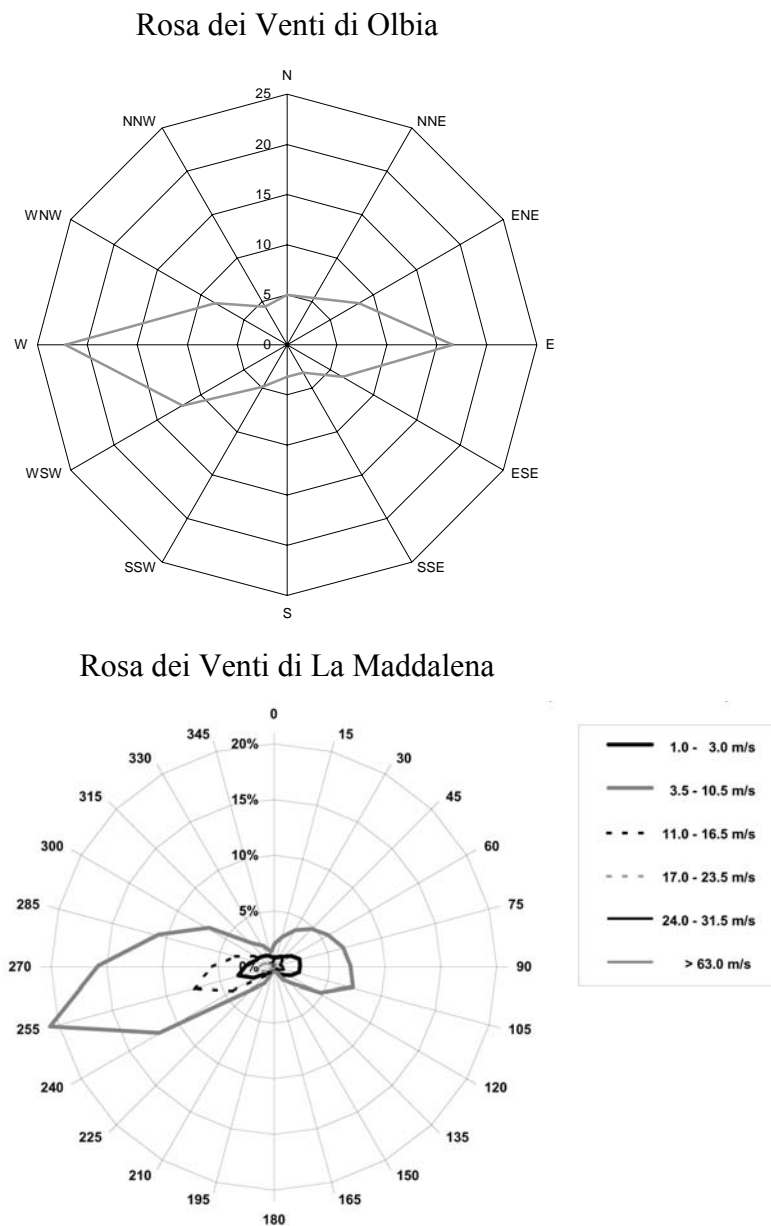
---

<sup>3</sup> acronimo di Sverdrup, Munk, nomi degli ideatori del metodo proposto per la prima volta nel 1947 e Bretschneider, revisore del metodo.

<sup>4</sup> Shore Protection Manual, edizione 1984; U.S. Army Coastal Engineering Research Center.

<sup>5</sup> Il Fetch (o area di generazione), è la lunghezza della regione dove il vento mantiene caratteristiche quasi costanti, ossia, convenzionalmente, con variazioni di velocità <5 nodi (~2.5 m/s) e di direzione <45° rispetto alla media.

rosa di La Maddalena e dalle inevitabili differenze legate alla collocazione del sito di rilevazione. I venti prevalenti sono quelli di ponente con una presenza rilevante di venti provenienti da levante.



**Figura 1-2: in alto, rosa dei venti della stazione di Olbia (fonte European Wind Atlas, 1989); anni di rilevamento:1959-1968; in basso, rosa dei venti di La Maddalena (fonte: Università di Cagliari).**

La rosa di La Maddalena mette in evidenza una maggior frequenza di venti di scirocco e libeccio che per la morfologia del golfo di Olbia risultano essere eventi più probanti a causa dei maggiori fetch a disposizione per la generazione delle onde. La ragione quantitativa è che la mole di dati a disposizione per la stazione di Guardia vecchia è nettamente superiore. È apparso opportuno,

quindi, utilizzare i dati di La Maddalena che, alla luce delle riflessioni suddette, forniscono dei risultati più attendibili e comunque a favore di sicurezza.

L'applicazione del modello richiede lo svolgimento d'alcune operazioni preliminari volte alla determinazione degli effettivi dati d'ingresso del modello. Una di queste è la trasformazione dei dati di vento a disposizione. Essi, infatti, sono riferiti a ristretti intervalli di tempo e registrati a quote differenti da quelle richieste in ingresso dal modello (~10 m s.l.m.), per questa ragione devono essere sottoposti ad una serie di trasformazioni di cui si dà conto nei paragrafi successivi.

Altra operazione preliminare necessaria è stata l'individuazione dei settori di traversia ed il calcolo dei fetch efficaci.



### 1.2.1.2 Individuazione settori di traversia e calcolo dei fetch efficaci

*Il paraggio esterno* è soggetto alle agitazioni del primo quadrante, ed in particolare alla direzione est, est-nord est (com'è chiaro dai dati rilevati dalla stazione M.M. di Capo Figari (vedi allegati 4,5,6), e Capo Comino essendo riparato dalle mareggiate del quarto quadrante da Capo Figari e da quelle del secondo dall'isola di Tavolara. All'interno del settore di traversia è stato calcolato il fetch efficace per le diverse direzioni di provenienza delle tempeste ventose.

Esso è stato calcolato secondo la nota procedura riportata ed adottata da diversi manuali tra cui lo Shore Protection Manual a cui si è fatto costantemente riferimento. Essa prevede la misura a partire da una direzione principale, di più fetch geografici distanziati l'un l'altro di 3°, con origine la base della direzione principale. Una volta note le lunghezze di fetch geografico e gli angoli che essi formano rispetto alla direzione di riferimento si procede alla determinazione di una media ponderale secondo la formula:

$$F_{eff} = \frac{\sum_{j=1}^n F_j \cdot \cos \alpha_j}{\sum_{j=1}^n \cos \alpha_j} \quad (1)$$

dove  $F_j$  sono i fetch geografici effettivamente misurati, all'angolo esistente tra direzione centrale e fetch misurato ed  $n$  il numero delle direzioni che hanno concorso a formare la media. Il risultato così ottenuto è il cosiddetto fetch efficace assegnato alla direzione centrale cui si è fatto riferimento. Nella Figura 1-3, si individua il settore di traversia principale per il paraggio preso in esame.

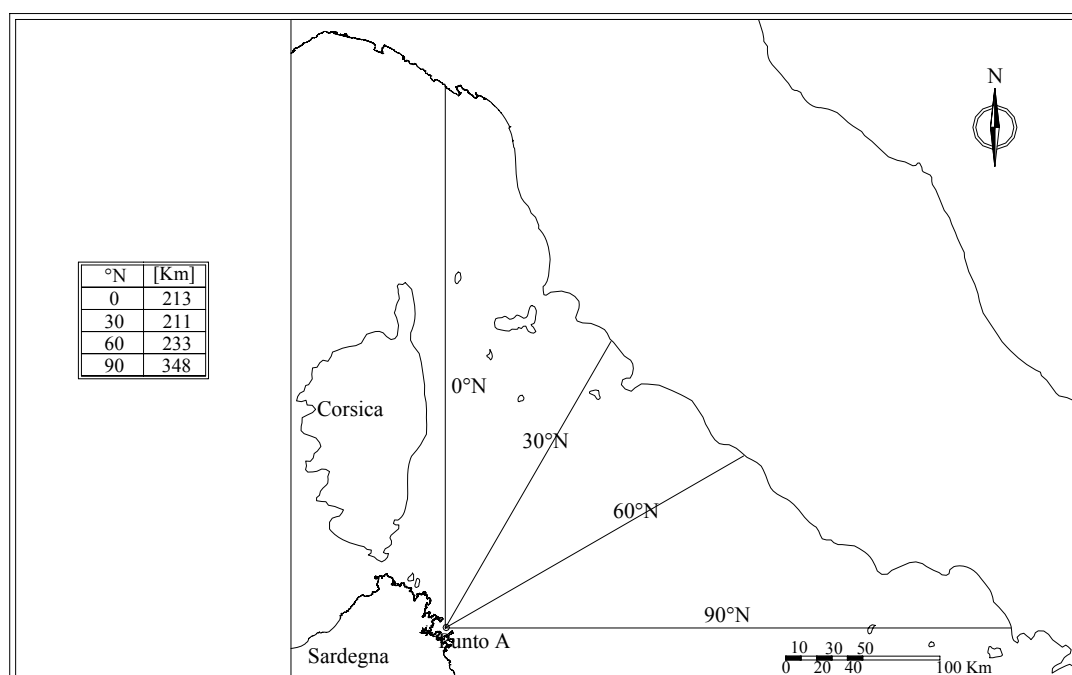


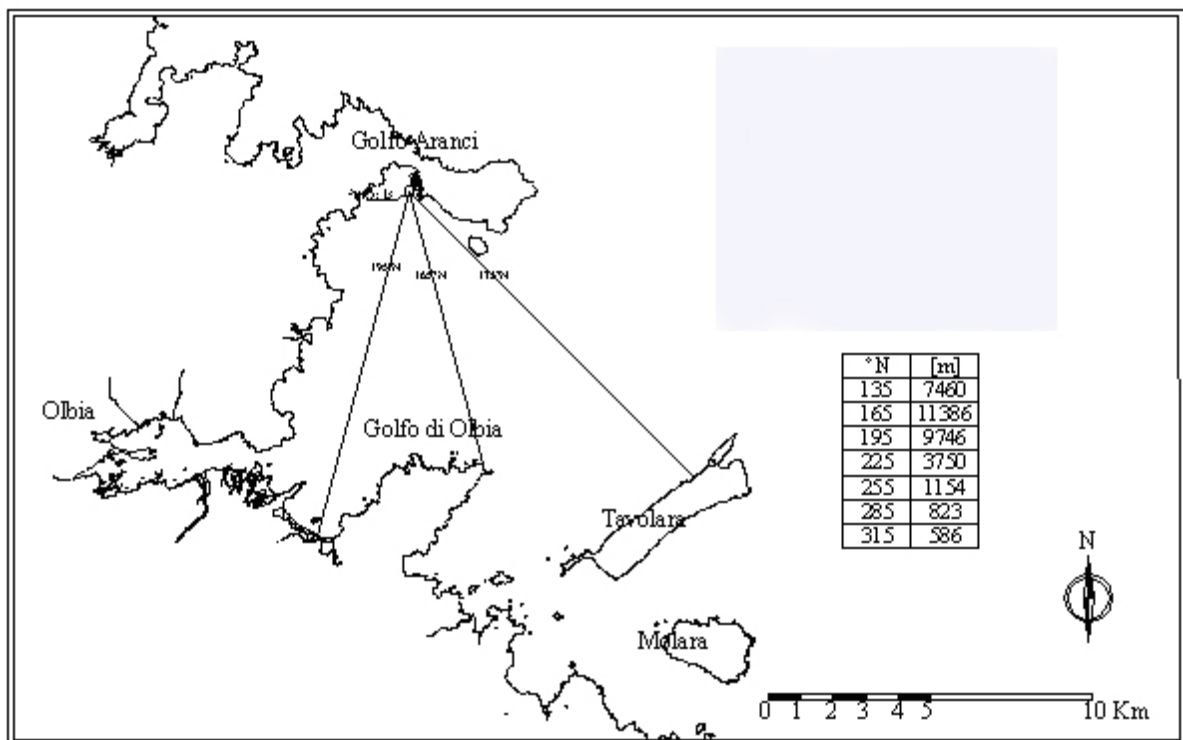
Figura 1-3: Fetch geografici ed efficaci per il settore di traversia esterno

Come si può notare, tale settore è compreso tra i  $0^{\circ}\text{N}$  ed i  $90^{\circ}\text{N}$ . Il fetch rilevato al suo interno varia tra i ~200 Km rilevati in direzione nord ed i ~350 Km rilevati in direzione est. La direzione media del settore di traversia concernente il paraggio è di  $45^{\circ}\text{N}$ .

Fetch Efficace (settore di traversia $0 \div 90^{\circ}\text{N}$ )				
0	30	60	90	$[\text{N}]$
213	211	233	348	$[\text{Km}]$

**Tabella 1-1: Valori efficaci dei fetch calcolati con la (1) per il paraggio esterno.**

***Il paraggio interno:***



**Figura 1-4: Fetch geografico e valori efficaci per il settore interno**

Fetch 135÷195			
135	165	195	$[\text{N}]$
7458	11386	9746	$[\text{m}]$
24470	37354	31976	$[\text{feet}]$

**Tabella 1-2: valori di fetch efficace ricavate per le direzioni 135÷195**

### 1.2.1.3 Preparazione dei dati di vento: determinazione di $U_a$

Una delle specifiche necessarie per l'utilizzo del modello è la velocità del vento. Tuttavia essa prima di poter essere effettivamente estratta dai dati forniti dalla stazione di La Maddalena, (dati riportati in allegato), ed immessa nel modello, necessita di alcune correzioni che tengono conto del luogo, altitudine e periodo di rilevamento.

La prima correzione che bisogna compiere sul dato di vento anemometrico è quella relativa alla quota di rilevamento: se la misura del vento è effettuata ad una quota diversa da 10 m (come nel caso in esame: la stazione "Guardia Vecchia" è posta a 168 m. s.l.m.), si riporta tutto all'altezza desiderata applicando la formula:

$$U(z) = 1 + \frac{C_{10}^{1/2}}{0.4} \cdot \ln\left(\frac{z}{10}\right) \quad (2)$$

dove  $U(z)$  è la velocità del vento alla quota  $z$  ed il coefficiente  $C_{10}$  è legato alla velocità, media dei dieci minuti, del vento rilevata alla quota di dieci m dalla relazione empirica, ricavata da rilievi sul lago Lemano da Graf e Prost (1979):

$$C_{10} = [0.05 \cdot U(10) + 0.56] \times 10^{-3} \quad (3)$$

Come si può vedere la formula è implicita rispetto alla variabile d'interesse: è occorso, quindi, un calcolo iterativo per la determinazione di  $U(10)$ .

La successiva correzione è dovuta al fatto che le rilevazioni effettuate sono riferite ad un certa durata. Esse, infatti, sono rilevazioni triorarie, che registrano dati di vento che non sono altro che la media delle velocità nei dieci minuti primi precedenti l'ora. È necessario, quindi, riportare questa media alla durata effettiva del tempo trascorso tra una rilevazione ed un'altra per mezzo delle formule di Simiu e Scalan (1978):

$$\frac{U_t}{U_{3600}} = 1.277 + 0.296 \cdot \tanh\left\{0.9 \log_{10} \frac{45}{t}\right\}; \quad 1 < t < 3600 \text{ s} \quad (4)$$

$$\frac{U_t}{U_{3600}} = -0.15 \log_{10} t + 1.5334; \quad 3600 < t < 36000 \text{ s} \quad (5)$$

Un'ulteriore correzione è la cosiddetta correzione di stabilità: se la differenza tra aria ed acqua è negativa, lo strato limite è instabile ed il vento è più efficace nel produrre la crescita dell'onda; ovviamente il discorso risulta opposto in caso contrario. Si tiene conto di questi fenomeni introducendo il fattore correttivo  $R_T$ . La velocità del vento deve essere corretta quindi con la formula:

$$U = R_T U(10) \quad (6)$$

Nel caso in cui non sia possibile accertare sempre questa differenza di temperatura, si usa adottare  $R_T = 1.1$ . L'ultima correzione cui sono stati sottoposti i dati anemometrici a disposizione, è dovuta al fatto che tutte le formule adottate nei modelli matematici di *hindcasting* (ricostruzione) sono espresse in funzione del coefficiente di trascinamento  $U_A$ . Si è quindi corretto tutti i dati ottenuti con la formula:

$$U_A = 0.71 U^{1.23} \quad (7)$$

### 1.2.1.4 Ricostruzione del clima ondoso nel paraggio esterno

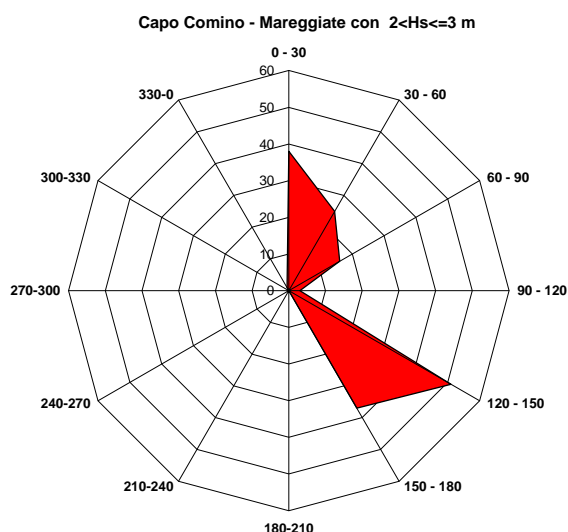
Per la ricostruzione del clima ondoso nel paraggio esterno si è fatto uso della serie storica disponibile relativa a 31 anni di osservazioni anemometriche della stazione A.M. di La Maddalena (1951-1981). Si è fatto riferimento a tale intervallo di osservazioni in quanto già ampiamente utilizzato in un notevole numero di studi effettuati nella zona in questione<sup>6</sup>.

anno	Classi di altezza [m]											TOT	%
	0÷1	1÷2	2÷3	3÷4	4÷5	5÷6	6÷7	0÷8	0÷9	0÷10	0÷11		
1951	156	173	61	20	5	9	7	5	1	2	2	441	2,28
1952	250	69	87	10	6	7	0	0	2	2	1	434	2,25
1953	354	108	26	24	14	4	0	3	0	0	1	534	2,77
1954	333	69	45	13	21	2	2	1	1	2	0	489	2,53
1955	313	103	129	57	8	2	4	0	2	1	1	620	3,21
1956	368	171	72	6	3	4	1	1	3	2	0	631	2,24
1957	211	88	50	25	38	11	4	1	3	2	0	433	3,27
1958	239	145	172	21	14	6	0	6	3	3	4	613	3,17
1959	238	193	132	64	23	12	3	1	1	0	2	669	3,46
1960	257	226	76	43	9	6	4	5	0	2	1	629	3,26
1961	332	79	62	14	2	1	1	0	0	1	1	493	2,55
1962	383	265	89	88	17	5	6	3	2	0	1	859	4,45
1963	202	113	107	77	104	17	4	3	4	0	1	632	3,27
1964	224	252	129	81	44	21	6	4	6	4	4	775	4,01
1965	212	120	67	73	39	14	9	16	5	3	0	558	2,89
1966	204	91	92	69	6	6	5	1	0	2	2	478	2,48
1967	311	137	158	102	44	10	6	3	4	1	3	779	4,03
1968	268	166	131	59	14	6	1	5	1	1	0	652	3,38
1969	316	187	93	74	34	13	6	3	2	3	2	733	3,80
1970	181	173	168	23	14	5	5	2	3	3	2	579	3,00
1971	316	349	167	40	8	4	10	8	1	1	0	904	4,68
1972	446	146	101	19	7	4	2	0	2	0	2	729	3,78
1973	340	192	190	39	6	4	6	3	3	1	2	786	4,07
1974	228	134	65	69	13	7	2	1	3	2	2	526	2,72
1975	364	170	130	24	11	7	5	3	0	1	1	716	3,71
1976	316	219	153	42	15	10	5	5	3	5	1	774	4,01
1977	281	123	74	30	10	5	9	9	1	3	2	547	2,83
1978	161	110	122	34	5	6	7	6	2	5	1	459	2,38
1979	217	162	27	10	10	6	5	6	2	1	1	447	2,32
1980	268	194	72	24	27	6	2	5	2	5	1	606	3,14
1981	384	174	127	44	28	5	5	4	3	4	2	783	4,06
TOT	8673	4901	3174	1318	599	228	132	113	65	62	43	19308	
%	44,91	25,38	16,44	6,83	3,1	1,19	0,68	0,59	0,34	0,32	0,22		100

**Tabella 1-3: dati ricostruiti attraverso modello SPM84 del paraggio esterno**

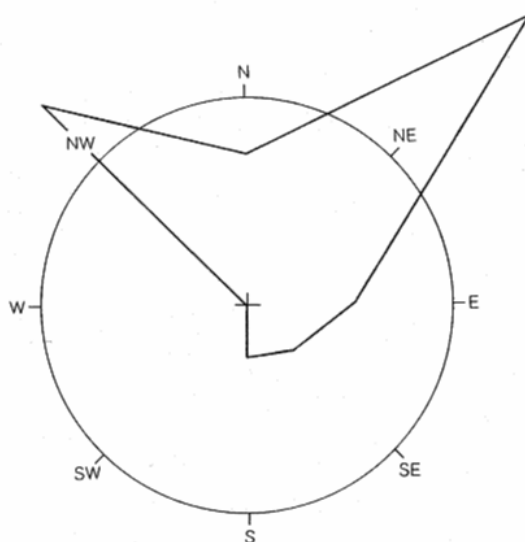
<sup>6</sup> In particolare, si veda lo Studio Meteomarinario effettuato dal Prof.Ing. A. Atzeni nell'ambito del progetto per la costruzione dell'approdo turistico di Olbiamare (rada interna del Golfo di Olbia).

Il campione di dati, composto da 19038 osservazioni triorarie, è da considerarsi rappresentativo del regime ondoso al largo del settore di traversia che investe il paraggio. Per la ricostruzione si è fatto uso, come già accennato, ad un modello matematico basato sulle formule<sup>7</sup> del SPM84, relative alle acque profonde.



Dai risultati riportati nella **Tabella 1-3**, si nota che circa il 45% degli eventi, è inferiore al metro d'altezza e che la massima onda ottenuta è inferiore agli 11m. Le onde appartenenti alle tempeste eccezionali (quelle superiori ai 4m), costituiscono poco più del 6% del campione ricostruito. La direzione media di "attacco d'onda" è stata individuata in 45°N, come del resto confermano i dati osservati dalla stazione M.M. di Capo Figari (vedi allegato 5 ). I dati di Capo Figari<sup>8</sup>, occorre ricordarlo, riguardano 26 anni di

osservazioni dirette del moto ondoso, effettuate nel periodo tra il 1930 ed il 1957.



**Figura 1-5: Direzione di provenienza delle mareggiate a Capo Figari (mare 6-8, scala Douglas)**

<sup>7</sup> cfr allegato 3

<sup>8</sup> *Tavole di marea e delle correnti di marea, Istituto Idrografico della Marina, Genova, 2001.*

### **1.2.1.5 Ricostruzione del clima ondoso nel paraggio interno**

Per la determinazione del regime di moto ondoso generato all'interno del Golfo di Olbia, nell'ambito ci si è basati sui dati anemometrici della stazione meteo dell'aeroporto di Olbia. Sono fatti salvi gli studi compiuti nella relazione generale già presentata per quanto riguarda il moto proveniente da largo per le ragioni già precedentemente argomentate e che vengono brevemente richiamate.

Il moto ondoso che investe il Golfo di Olbia da largo proviene, infatti, quasi esclusivamente dal primo quadrante. Il vento che genera tale clima è, in buona approssimazione, proveniente dallo stesso quadrante. Appare quindi logico, oltre che assodato da una lunga pratica progettuale per studi simili effettuati in paraggi prossimi a quello di interesse, prendere come fonte dei dati anemometrici la stazione che meglio riproduce le condizioni di vento che generano il moto ondoso. Tale stazione è quella di La Maddalena "Guardia Vecchia". Essa presenta, per la sua ubicazione, con un'altitudine di 168 m. s.l.m. ed una pressoché assenza di fenomeni di disturbo dovuti alla presenza di orografia "di contorno" e per la grande mole di dati a disposizione, la scelta più corretta.

Per quanto riguarda il moto ondoso che si genera localmente all'interno del Golfo di Olbia si prendono in considerazione anche i dati di vento della stazione di Olbia.

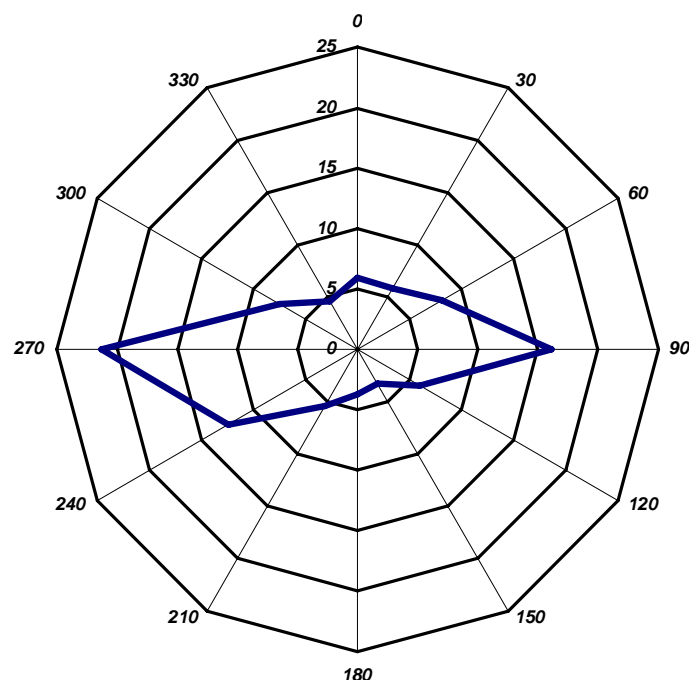
La stazione di rilevamento è ubicata presso l'aeroporto di Olbia (40°56'00''N 09°30'00''E-UTM 32, E 542095m N 4531556m), 6 chilometri a sud della città, nella costa nord est della Sardegna. La stazione è sita nella valle alla foce orientata del fiume Padrogiano. I massicci montani che coronano la valle raggiungono altezze che superano i mille metri. Il mare aperto si trova a nord est ad una distanza di 8 chilometri.

Il periodo di rilevamento a disposizione va dal 01/01/1959 ore 00:00 al 31/12/1968 ore 21:00. I dati di vento sono stati registrati con cadenza trioraria e rilevati alla ore sinottiche, (ovvero alle:0,3,6,9,12,15,18,21 UTC ossia alle 1,4,7,11,13,16,19,22 ora locale). L'altezza dell'anemometro è di 10 m s.l.m.

<b>Settore</b> <b>[°N]</b>	<b>Frequenza</b> <b>[%]</b>	<b>Intensità del vento [m/s]</b>													
		<b>&lt;1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	<b>&gt;17</b>
<b>0</b>	<b>5,9</b>	527	17	37	45	41	53	56	44	28	75	39	18	14	4
<b>30</b>	<b>5,8</b>	511	26	53	64	62	57	53	50	23	56	29	12	3	1
<b>60</b>	<b>8,1</b>	384	44	71	104	95	93	78	49	33	34	10	3	0	0
<b>90</b>	<b>16,1</b>	191	39	85	124	130	133	112	69	38	50	19	7	2	0
<b>120</b>	<b>5,9</b>	536	47	72	71	58	49	39	36	27	41	18	4	1	0
<b>150</b>	<b>3,3</b>	928	25	20	8	5	3	4	2	0	2	2	0	0	0
<b>180</b>	<b>3,7</b>	868	41	36	29	17	4	4	1	0	1	0	0	0	0
<b>210</b>	<b>5,4</b>	599	89	127	84	39	27	17	6	4	6	2	0	0	0
<b>240</b>	<b>12,4</b>	238	69	140	128	106	75	58	54	34	58	24	7	5	2
<b>270</b>	<b>21,3</b>	147	53	86	89	74	71	81	81	59	136	67	28	16	11
<b>300</b>	<b>7,5</b>	422	65	82	81	62	60	63	34	39	53	26	7	3	0
<b>330</b>	<b>4,6</b>	674	35	67	57	36	34	26	28	7	23	10	2	2	0
<b>totale</b>	<b>100%</b>	<b>373</b>	<b>49</b>	<b>83</b>	<b>88</b>	<b>76</b>	<b>71</b>	<b>65</b>	<b>51</b>	<b>34</b>	<b>63</b>	<b>29</b>	<b>11</b>	<b>6</b>	<b>3</b>

**Tabella 1-4. Dati di vento rilevati dalla stazione di Olbia dal 01/01/1958 ore 00:00 al 31/12/1968 ore 21:00. I dati riportati nell'area bianca della tabella sono in per mille ordinati per righe. (Fonte: European Wind Atlas, 1989).**





**Figura 1-6: Elaborazione della Rosa dei venti della stazione di Olbia.**

La tabella mette in evidenza un regime anemometrico caratterizzato dalla prevalenza dei venti di levante e di ponente. In particolare i venti più frequenti sono quelli provenienti da 90°N, 240°N e 270°N. Come si può notare unicamente le direzioni 240°N e 270°N presentano valori registrati superiori ai 17 m/s. Prima di procedere alle nuove simulazioni si è proceduto ad elaborare statisticamente i dati a disposizione per poter determinare gli evento critici con tempi di ritorno di 50 anni e 100 anni.

L'elaborazione è stata compiuta facendo riferimento alla distribuzione statistica di Weibul, curva adatta a rappresentare eventi estremi. Essa ha formula:

$$P(I_S) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{I_S - I_0}{I_C - I_0}\right)^\gamma\right)$$

dove  $P(I_S)$  è la probabilità cumulata rappresenta la probabilità di accadimento degli eventi di magnitudine non superiore ad  $I_S$ ;  $I_0$  rappresenta il limite inferiore delle grandezze da inserire nella distribuzione;  $I_C$  e  $\gamma$  sono i parametri di scala e forma dipendenti dalla frequenza cumulata (attraverso il coefficiente di asimmetria), delle massime intensità. . La stima dei parametri è avvenuta attraverso il metodo dei momenti. Una volta fatto ciò, si è proceduto alla determinazione delle  $I_S$  relative a diversi tempi di ritorno<sup>9</sup>.

Le serie sono state limitate inferiormente ai valori di 13 m/s ovvero si sono presi i valori che rappresentano la “coda” dei dati a disposizione così come impone il metodo. Si è scelto di limitare

<sup>9</sup> Per tempo di ritorno di un evento si intende il periodo di tempo che trascorre, **in media**, tra un evento di una prefissata grandezza ed un altro della medesima classe, senza che questi vengano maggiori ossia superati per entità.

la serie a tale valore facendo riferimento alla ben nota scala della forza di vento di Beaufort ed alle altezze probabili d'onda riscontrabili in mare aperto in caso di presenza del vento considerato da detta scala. Il valore di 13 m/s è indicato dalla Scala come “vento fresco” capace, (secondo le classiche tavole), di generare al largo onde che si avvicinano ai 4 m e quindi da considerarsi come eventi probanti e comunque significativi per un'analisi di questo tipo.

<b>Parametri della distribuzione di Weibul</b>	
<b>240°N</b>	<b>270°N</b>
$I_0 = 12,03 \text{ m/s}$	$I_0 = 11,99 \text{ m/s}$
$I_C = 14,35 \text{ m/s}$	$I_C = 14,74 \text{ m/s}$
$\gamma = 1.11$	$\gamma = 1.19$

**Tabella 1-5: parametri stimati ed utilizzati per le distribuzioni di Weibul**

Le grandezze prese in esame per le simulazioni sono quelle provenienti da 270°N e da 240°N. Questa scelta si giustifica dal fatto che queste sono le direzioni per le quali si hanno le maggiori frequenze ed intensità di vento. La direzione 90°N non è stata presa in considerazione poiché già compresa nello studio d'onda proveniente da largo. La direzione 0°N, pur presentando intensità superiori ai 17 m/s, non risulta essere significativa né per frequenza né per direzione utile allo sviluppo di moto ondoso per il sito in esame, in quanto esso risulta essere “vento di terra” per Golfo Aranci.

Di seguito vengono riportati i parametri della distribuzione stimati ed utilizzati per la determinazione dei valori d'intensità di vento, insieme ai valori ottenuti per i tempi di ritorno di 50 e 100 anni.

<b>Intensità del Vento</b>				
<b>direzioni di provenienza</b>	<b>240°N</b>		<b>270°N</b>	
<b>tempi di ritorno</b>	$Tr = 50 \text{ anni}$	$Tr = 100 \text{ anni}$	$Tr = 50 \text{ anni}$	$Tr = 100 \text{ anni}$
<b>intensità ottenuta dai calcoli</b>	19,9 m/s	21,2 m/s	20,7 m/s	21,9 m/s

**Tabella 1-6: intensità del vento ricavate dalle elaborazioni statistiche.**

I valori ottenuti sono stati maggiorati per tenere conto di possibili sottostime dovute al limitato periodo di rilevamento ed attribuite al settore di massimo fetch. I valori utilizzati per le nuove simulazioni sono stati di 27 m/s per la direzione. A supporto di tale scelta, si è fatto riferimento ad uno studio eseguito dalla società Modimar di Roma per Edilnord, nella valutazione del paraggio marittimo delle “Saline” nella parte sud del Golfo di Olbia, che adotta come intensità di vento 23 m/s per un  $Tr = 50$  anni.

### 1.2.1.6 Determinazione degli eventi estremi

Il calcolo e la determinazione statistica delle onde estreme è stato effettuato utilizzando laserie espost in Tabella 1-3, (limitata inferiormente dal valore  $H_S = 4.0 \text{ m}$ ), ed interpretata alla distribuzione di Weibul, nella forma adatta per il calcolo delle onde estreme:

$$P(H_S) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H_S - H_0}{H_C - H_0}\right)^\gamma\right) \quad (7)$$

dove  $P(H_S)$  è la probabilità cumulata rappresenta la probabilità di accadimento degli eventi di magnitudine non superiore ad  $H_S$ ;  $H_0$  rappresenta il limite inferiore delle altezze d'onda da inserire nella distribuzione;  $H_C$  e  $\gamma$  sono i parametri di scala e forma dipendenti dalla frequenza cumulata (attraverso il coefficiente di asimmetria), delle massime altezze d'onda relative alle diverse tempeste ricostruite. La stima dei parametri è avvenuta attraverso il metodo dei momenti. Una volta fatto ciò, si è proceduto alla determinazione delle  $H_S$  relative a diversi tempi di ritorno<sup>10</sup>. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per i paraggi presi in esame, riportando, oltre i valori di  $H_S$  anche i parametri della distribuzione stimati.

<b>Paraggio esterno:</b>	Direzione media di provenienza:	45°N
	$H_0$	3.90 m
	$H_C$	4.93 m
	$\gamma$	1.09

<b>Tempo di ritorno [anni]</b>	<b>HS [m]</b>
2	5.01
5	5.86
10	6.48
20	7.09
50	7.90
100	8.40

**Tabella 1-7: altezze d'onda significative in relazione ai rispettivi tempi di ritorno**

**Paraggio interno (135/195):** Direzione media di provenienza: 151°N

Per l'evento del paraggio interno si è fatto utilizzo della velocità di 27m/s. L'Hs è riportata nel paragrafo delle simulazioni numeriche.

<sup>10</sup> Per tempo di ritorno di un evento si intende il periodo di tempo che trascorre, **in media**, tra un evento di una prefissata grandezza ed un altro della medesima classe, senza che questi vengano maggiorati ossia superati per entità.

I risultati ricostruiti attraverso l'applicazione del modello forniscono dati in sintonia con le osservazioni disponibili per il paraggio esterno, ovvero per il clima ondoso registrato al largo, registrate da I.I.M<sup>11</sup>. per un periodo di 26 anni, sia per quanto riguarda la direzione media di attacco ondoso, sia per i valori massimi d'onda verificati. Per il paraggio interno non si è potuto fare un simile riscontro, tuttavia i dati ricostruiti ed i valori d'onda ottenuti attraverso l'utilizzo del modello matematico, sono simili a quelli ottenuti in studi effettuati<sup>12</sup> per paraggi interni al Golfo di Olbia e quindi, in qualche modo, paragonabili.

### 1.2.1.7 Determinazione dell'onda di progetto

Nel precedente paragrafo si è fornito la relazione tra grandezza dell'evento ondoso ed il suo periodo di ritorno. Tuttavia questo risultato non fornisce un criterio definitivo per il dimensionamento e verifica delle future strutture. È noto che al progettista sono necessari oltre che la conoscenza della vita di progetto dell'opera che si vuole costruire, anche la probabilità (ovvero il rischio) che l'evento critico ha di verificarsi durante lo stesso periodo d'esercizio.

La relazione esistente tra le grandezze in esame, ossia la vita utile di progetto, il periodo di ritorno ed il rischio che l'evento si verifichi si ricava grazie all'ipotesi di processo poissoniano. La teoria dei processi poissoniani si basa sull'assunto che gli eventi estremi possano essere considerati come istantanei ed indipendenti. Indicando con  $P(T_R, V_P)$  la probabilità che un evento con periodo di ritorno  $T_R$  si presenti durante la vita di progetto  $V_P$ , chiamando  $\Delta t$  l'intervallo temporale in cui è compreso tale episodio, il rapporto  $\Delta t / T_R$  rappresenta la frequenza con cui si presenta l'evento con periodo di ritorno  $T_R$ .

È immediato comprendere che la frequenza di assenza dell'evento è pari a  $1 - \Delta t / T_R$ <sup>13</sup>. se si vuole che l'evento non si verifichi mai durante la vita di progetto si deve avere:

$$1 - P(T_R, V_P) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( 1 - \frac{\Delta t}{T_R} \right)^{\frac{V_P T_R}{\Delta t}} \quad (8)$$

da cui discende il fatto che se si vuole che l'evento si verifichi almeno una volta durante  $V_P$  risulta essere:

$$P(T_R, V_P) = 1 - \exp - \frac{V_P}{T_R} \quad (9)$$

Da queste relazioni si calcola immediatamente il periodo di ritorno dell'evento estremo che genera per la struttura con vita utile  $V_P$  il rischio  $P(T_R, V_P)$  è:

<sup>11</sup> i dati sintetici a cui si fa riferimento sono riportati in allegato.

<sup>12</sup> cfr Bibliografia e Riferimenti.

<sup>13</sup> È noto, infatti, che in statistica si attribuisce all'evento certo il valore di 1.

$$T_R = \frac{V_P}{-\ln[1 - P(T_R, V_P)]} \quad (10)$$

La scelta di questi due parametri è stata effettuata facendo riferimento alle “Istruzioni Tecniche per la progettazione delle Dighe Frangiflutti” del Ministero dei LL.PP. (le tabelle che fanno riferimento a tali indicazioni sono riportate in allegato). In particolare si sono ottenuti i valori di 25 e 0.8 rispettivamente per la vita utile di progetto  $V_P$  e  $P(T_R, V_P)$ . Tali valori sono stati ottenuti per una infrastruttura ad uso specifico con livello di sicurezza 2, con livello di danneggiamento totale ed una bassa ripercussione economica ed un limitato rischio per la vita umana<sup>14</sup>.

L'immissione di questi dati nella (10) fornisce un valore del tempo di ritorno pari a  $T_R=112$  anni.

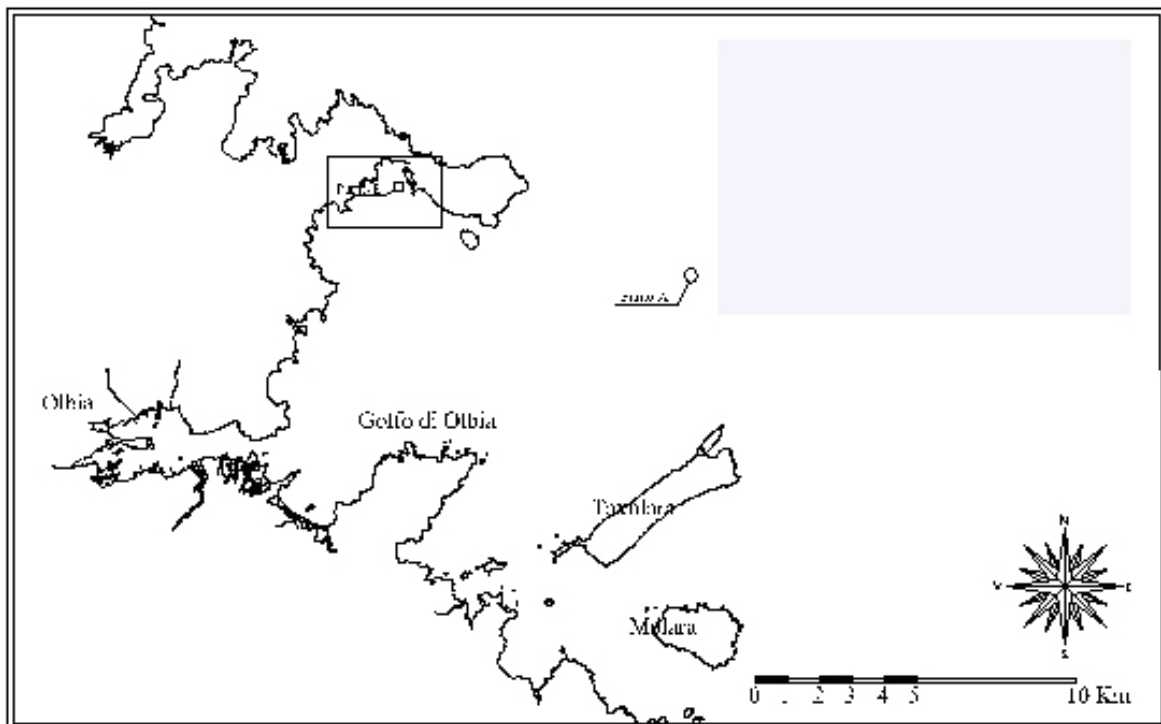


Figura 1-7: Ubicazione dei punti in cui si è calcolato i parametri d'onda

<b>Paraggio Esterno Punto A</b>	<b><math>H_S = 8,4 \text{ m}</math></b>	<b><math>T_S = 11,02 \text{ s}</math></b>
---------------------------------	---	---

Tabella 1-8: dati sintetici d'altezza d'onda e periodo significativo

<sup>14</sup> Cfr allegato

## **Bibliografia e Riferimenti**

[1] *Shore Protection Manual*, ed. 1977/1984, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Kingman Building, Fort Belvoir, Virginia, U.S.A.

[2] *Manuale di Ingegneria Portuale e Costiera*, Ugo Tomasicchio, Editoriale Bios, Cosenza.

[3] *Manuale dell'Ingegnere Civile "Nuovo Colombo"*, 83° edizione, ed. Hoepli, 1997.

[4] *Pressione Atmosferica e Vento al suolo di A.Serra*, Atlante della Sardegna

[5] *Il Vento e lo stato del mare*, vol. II, Istituto Idrografico della Marina, Genova, 1980.

[6] *Tavole di marea e delle correnti di marea*, Istituto Idrografico della Marina, Genova, 2001.

[7] *Studio Meteomarino effettuato da Modimar per Edilnord nell'ambito del progetto Costa Turchese (Golfo di Olbia)*

[8] *Studio Meteomarino effettuato dal Prof.Ing. A. Atzeni nell'ambito del progetto per la costruzione dell'approdo turistico di Olbiamare (rada interna del Golfo di Olbia).*

[9] *Studio Meteomarino effettuato da Noli et al. nell'ambito dell'utilizzazione dello stagno di Salina Bamba.*

[10] *Appunti di Costruzioni Marittime*, Prof. Ing. A. Atzeni, 2001.

## **Elenco Allegati**

<i>1) Dati di vento della stazione di La Maddalena “Guardia vecchia”</i>	<i>pag. 27</i>
<i>2) Dati moto ondoso UKMO</i>	<i>pag. 28</i>
<i>3) Formule CERC per acque profonde;</i>	<i>pag. 29</i>
<i>4) Formule CERC per acque basse;</i>	<i>pag. 30</i>
<i>5) Capo Figari: direzione di provenienza delle burrasche;</i>	<i>pag. 31</i>
<i>6) Capo Figari: durata massima delle tempeste;</i>	<i>pag. 32</i>
<i>7) Capo Figari: stato del mare;</i>	<i>pag. 33</i>
<i>8) Tabella del Ministero dei Lavori Pubblici.</i>	<i>pag. 34</i>

## *Allegati*



**STAZIONE DI LA MADDALENA (GUARDIA VECCHIA)**

## DISTRIBUZIONE DIREZIONALE ANEMOMETRICA

*Dati: 110680*

Periodo di rilevazione: 1/01/1951 al 27/12/1997

		Intensità del vento [nodi]						
		2 - 6	7 - 21	22 - 33	34 - 47	48 - 63	>63	TOTALI
direzione di provenienza [°N]	0 - 30°	749	2618	840	179	15		4401
	30 - 60°	1127	4585	1051	154	8		6925
	60 - 90°	2259	6222	590	47	2		9120
	90 - 120°	2230	7150	872	37	3		10292
	120 - 150°	1156	2210	237	9	3		3615
	150 - 180°	576	590	29	1			1196
	180 - 210°	388	514	44	12			958
	210 - 240°	926	3013	1096	176	11		5222
	240 - 270°	3321	20500	7300	1535	109	1	32766
	270 - 300°	1743	10589	3500	970	89	1	16892
300 - 330°	1236	2787	203	68	6		4300	
330 - 360°	780	1257	361	79	2		2479	
Variabile		46	19					65
TOTALI		16537	62054	16123	3267	248	2	
								98231
		CALME (0 - 1 nodi)						12449
		TOTALE						110680

Fonte: *Università di Cagliari*

## *Allegato 1*

## ***Metereological Office-Bracknell***

### ***Distribuzione direzionale del moto ondoso*** ***Dati relativi al settore: 40.5-41.5 °N ; 9.5-10.5 °E***

DIR (°N)	CLASSI D'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)							Totale
	0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	>6.0	
<b>345 - 15</b>	169	86	28	13	5			301
<b>15 - 45</b>	144	84	29	6	1	1	1	266
<b>45 - 75</b>	115	36	21	2	1			175
<b>75 - 105</b>	164	36	20	2	1	1		223
<b>105 - 135</b>	187	45	16	5	2			255
<b>135 - 165</b>	286	111	30	10				437
<b>165 - 195</b>	180	72	21	4	2			279
<b>Totale</b>	1246	470	165	42	11	2	1	<b>1936</b>
<b>Tot. cum.</b>	27,48	1800,71	1965,71	2007,41	2018,74	2020,56	2021,46	

Fonte: *Studio Meteomarino effettuato da Modimar per Edilnord nell'ambito del progetto Costa Turchese (Golfo di Olbia)*

*Allegato 2*

## **C.E.R.C.**

(U.S. Army Coastal Engineering Research Center)

### *Formule Shore Protection Manual per acque profonde (deep water) riviste e corrette da Hurdle e Stive*

$$\frac{gH_s}{U_A} = 0.25 \cdot \tanh \left[ 0.6 \cdot \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \cdot \tanh^{1/2} \left\{ \frac{4.3 \cdot 10^{-5} \cdot \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)}{\tanh^2 \left[ 0.76 \cdot \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right\}$$

$$\frac{gT_p}{U_A} = 8.3 \cdot \tanh \left[ 0.76 \cdot \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \cdot \tanh^{1/3} \left\{ \frac{4.1 \cdot 10^{-5} \cdot \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)}{\tanh^2 \left[ 0.76 \cdot \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right\}$$

$$\frac{t_{\lim} g}{U_A} = 65.9 \cdot \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{2/3}$$

$$\frac{F' g}{U_A^2} = \left( \frac{\left( \frac{tg}{U_A} \right)}{65.9} \right)^{3/2} ; \quad \text{se } \frac{tg}{U_A} < \frac{t_{\lim} g}{U_A}$$

Dove:

$U_A$  è il coefficiente di trascinamento del vento espresso in  $m/s$ ;

$H_s$  è l'altezza d'onda significativa espresso in  $m$ ;

$T_p$  è il periodo di picco  $s$ ;

$F$  è il *fetch* efficace espresso in  $m$ ;

$t$  è il tempo dell'evento anemologico che genera l'onda espresso in  $s$ ;

$t_{\lim}$  è il tempo minimo necessario affinché si abbia il pieno sviluppo del moto ondoso per un determinato fetch espresso in  $s$ .

E' importante notare che tutte le grandezze sono rese adimensionali attraverso il fattori  $g/ U_A$  per i tempi e ;  $g/ U_A^2$  per le lunghezze.

### *Allegato 3*

## **C.E.R.C.**

(U.S. Army Coastal Engineering Research Center)

### *Formule Shore Protection Manual per acque basse (shallow water)*

$$\frac{gH}{U_A^2} = 0.283 \cdot \tanh \left[ 0.530 \cdot \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{0.00565 \cdot \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[ 0.530 \cdot \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right\}$$

$$\frac{gT_S}{U_A} = 7.54 \cdot \tanh \left[ 0.833 \cdot \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{0.0379 \cdot \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[ 0.833 \cdot \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right\}$$

Dove:

$U_A$  è il coefficiente di trascinamento del vento espresso in  $m/s$ ;

$H_S$  è l'altezza d'onda significativa espresso in  $m$ ;

$T_P$  è il periodo di picco  $s$ ;

$F$  è il *fetch* efficace espresso in  $m$ ;

$t$  è il tempo dell'evento anemologico che genera l'onda espresso in  $s$ ;

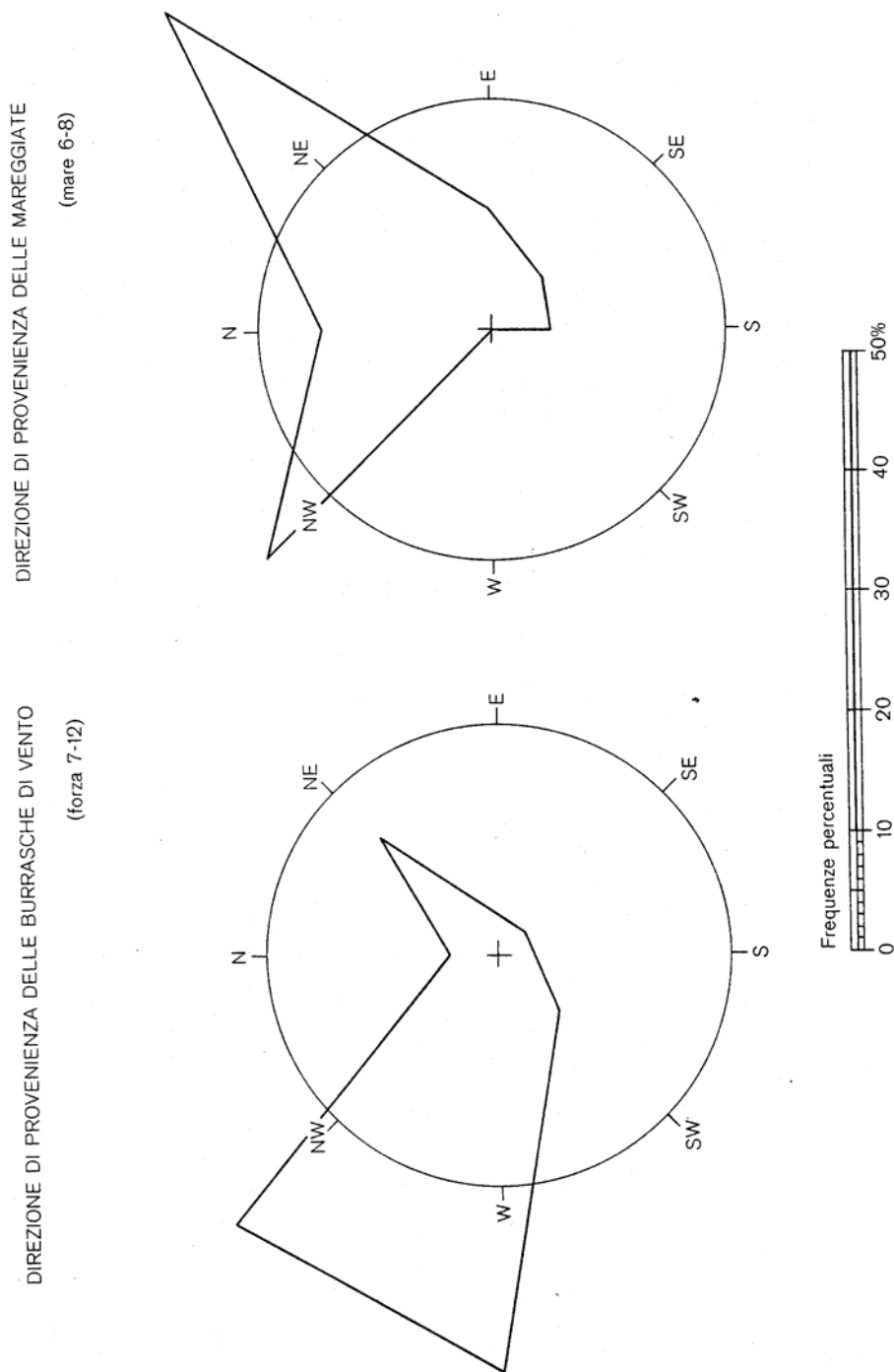
$t_{lim}$  è il tempo minimo necessario affinché si abbia il pieno sviluppo del moto ondoso per un determinato *fetch* espresso in  $s$ .

E' importante notare che tutte le grandezze sono rese adimensionali attraverso il fattori  $g/ U_A$  per i tempi e ;  $g/ U_A^2$  per le lunghezze.

Fonte: *Shore Protection Manual*, ed. 1977/1984, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Kingman Building, Fort Belvoir, Virginia, U.S.A.

*Dati sintetici dello stato di mare e vento rilevato a Capo Figura da I.I.M.*

*(scala di rilevazione vento: scala rilevazione mare: Douglas)*



I dati sono ottenuti da osservazioni effettuate dalla stazione di Capo Figari per un periodo di ventisei anni compreso tra ~ 1930-1957. Fonte dati [5] : *Tavole di Marea e delle correnti di marea* , Istituto Idrografico della Marina.

*Allegato 5*

## Dati sintetici dello stato di mare rilevato a Capo Figari da I.I.M

DURATA MASSIMA DELLE MAREGGIATE  
(mare 6 ÷ 8)

Mese	Durata (ore)	Stato del mare	Direzione di provenienza
Dic.	62	6-7	NE
Nov.-Dic.	56	6-7	N
Ott.	54	6-7	N
Ott.	54	6-7	NE
Apr.	52	6-7	NE
Dic.	50	6-7	NE
Feb.	48	6-7	S
Mar.	48	6-7	E
Feb.	40	6-8	E
Nov.	40	6-8	NE
Gen.	38	6-8	N
Gen.	38	6-7	NE
Feb.	38	6-7	E
Nov.	38	6-8	N
Nov.-Dic.	38	6-7	NE
Dic.	38	6-8	E
Gen.	36	6-7	NE
Feb.	36	6-7	NE
Dic.	36	6-7	NE
Dic.	36	6	NW
Gen.	34	6	NE
Mar.	32	6-7	SE
Mar.	32	6	S
Nov.	32	6-8	NE
Dic.	32	6	E

MASSIMO MARE VERIFICATOSI NEI SINGOLI  
MESI E RELATIVE FREQUENZE

Mese	Stato del mare	Frequenza in giorni	Direzione di provenienza
Gen.	8	3	3 N
Feb.	8	1	E
Mar.	8	1	NW
Apr.	8	1	NE
Mag.	7	1	NE
Giu.	6	3	3 NW
Lug.	7	1	NW
Ago.	7	1	SE
Set.	7	3	1 N - 1 NE - 1 NW
Ott.	7	2	2 N
Nov.	8	4	1 N - 3 NE
Dic.	8	2	2 E

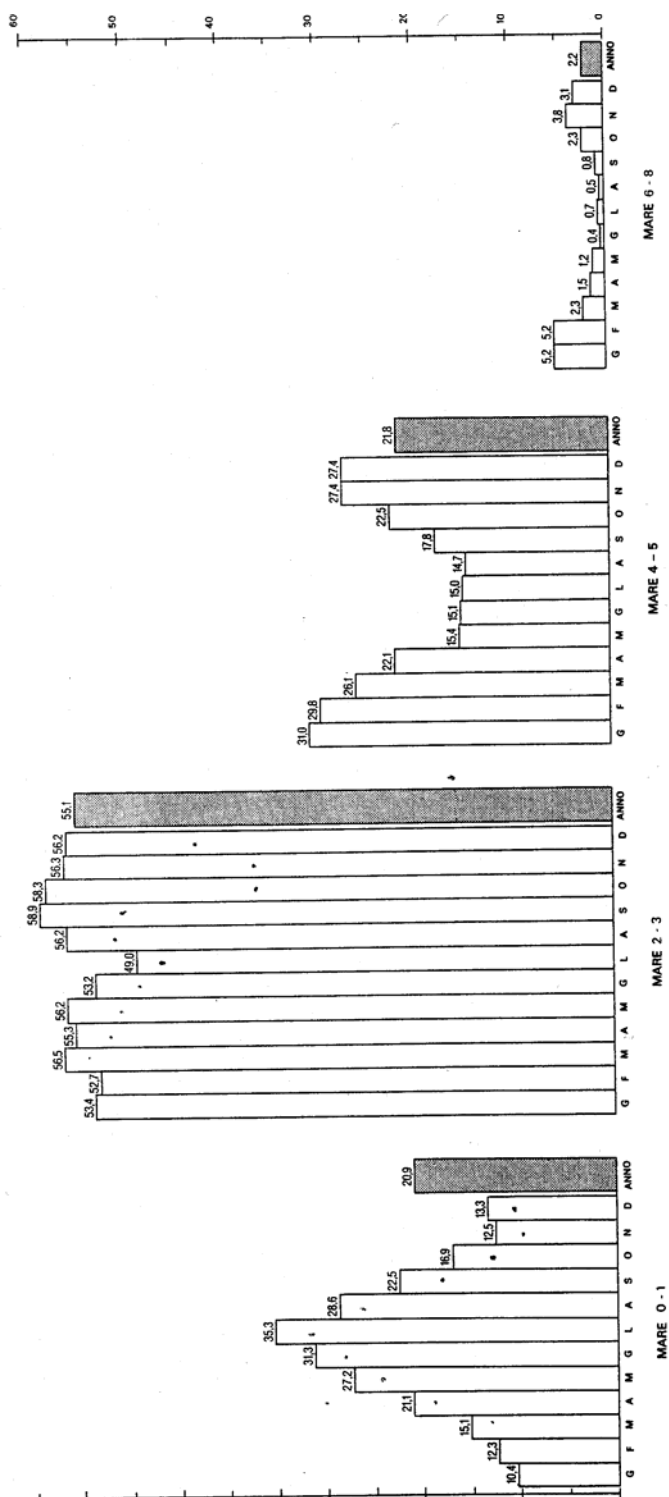
I dati sono ottenuti da osservazioni effettuate dalla stazione di Capo Figari per un periodo di ventisei anni compreso tra ~ 1930-1957. Fonte dati [5] : *Tavole di Marea e delle correnti di marea* , Istituto Idrografico della Marina.

### Allegato 6

## Dati sintetici dello stato di mare rilevato a Capo Figari da I.I.M

### STATO DEL MARE

Frequenze medie in percento dedotte da tre osservazioni giornaliere relative a 26 anni



I dati sono ottenuti da osservazioni effettuate dalla stazione di Capo Figari per un periodo di ventisei anni compreso tra ~ 1930-1957. Fonte dati [5] : *Tavole di Marea e delle correnti di marea* , Istituto Idrografico della Marina.

Allegato 7

**“Istruzioni Tecniche per progettazione di Dighe Frangiflutti”**  
**Ministero dei Lavori Pubblici**

***Vita minima di progetto (in anni) per opere o strutture di carattere definitivo***

Tipo di Infrastruttura	Livello di Sicurezza		
	1	2	3
Uso Generale	25	50	100
Uso Specifico	15	25	50

“Per infrastrutture di uso generale si intendono opere di difesa di complessi civili o industriali...[omissis]...per infrastrutture ad uso specifico si intendono le opere di difesa delle singole installazioni industriali, di porti industriali, di depositi o 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.

*Il livello di sicurezza 2* si riferisce ad opere o installazioni di interesse generale comportanti un moderato rischio di perdite di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso della stessa.

*Il livello di sicurezza 3* si riferisce ad opere o installazioni per la protezione dall'inondazione o di interesse sopranazionale, comportanti un elevato rischio per la vita umana o di danno ambientale in caso di collasso della stessa.

***Massima probabilità di danneggiamento ammissibile  $P(T_R, V_P)$***   
***nel periodo di vita utile di progetto***

Tipo di danneggiamento	Ripercussione economica	Rischi per la Vita Umana	
		Limitato	Elevato
Danneggiamento Incipiente	Bassa	0.50	0.30
	Media	0.30	0.20
	Alta	0.25	0.15
Distruzione totale	Bassa	0.20	0.15
	Media	0.15	0.10
	Alta	0.10	0.05

*Il danneggiamento incipiente* è contemplato in caso di opere di protezione a scogliera che, pur subendo danni durante la tempesta, conservano la loro protezione protettiva e possono essere riparate in un tempo breve dal danno.

*La distruzione totale* è da considerarsi quando la struttura non può più assolvere la sua funzione in caso di danneggiamento (caso di dighe a parete verticale).



## ***2 STUDIO IDRODINAMICO, TRASFORMAZIONE DELL'ONDA DA LARGO VERSO RIVA PER IL PORTO DI GOLFO ARANCI***

### **2.1 Introduzione**

Questo capitolo riassume ed espone i risultati ottenuti nello studio di modellizzazione numerica effettuato al fine di rappresentare la trasformazione del moto ondoso dal largo verso riva e le condizioni d'onda in prossimità delle erigende nuove strutture portuali in corrispondenza del porto industriale/passeggeri di Golfo Aranci. Lo studio si sviluppa attraverso due fasi di simulazione, che comprendono:

1. trasformazione/determinazione dell'altezza d'onda in corrispondenza del paraggio in esame con il modello SWAN;
2. determinazione delle condizioni d'onda in corrispondenza delle strutture con il modello PHAROS.

Le simulazioni sono state eseguite utilizzando i modelli matematici SWAN, sviluppato dalla Technical University di Delft, ed il modello PHAROS della W | L Delft Hydraulics.

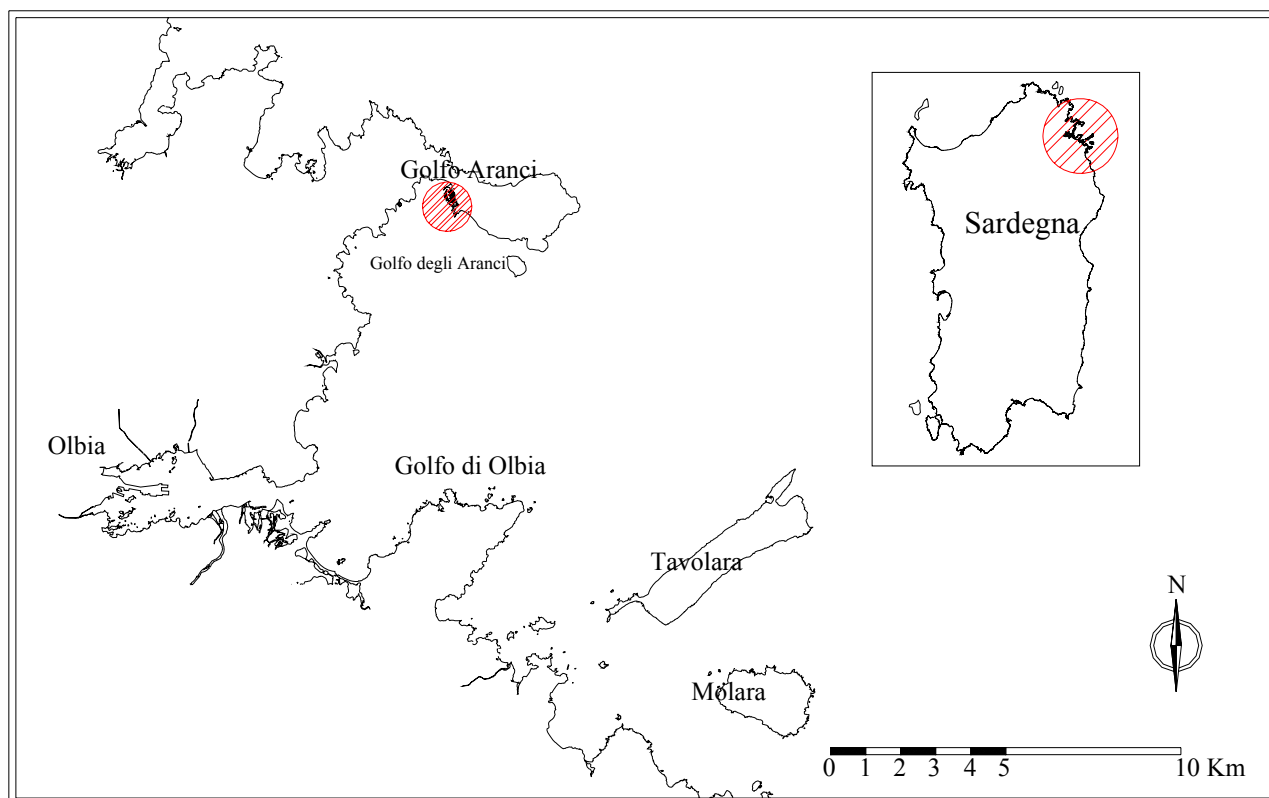
La relazione riporta i parametri principali utilizzati per l'impostazione ed il settaggio dei modelli nonché i risultati ottenuti dalle simulazioni compiute partendo da differenti condizioni iniziali, ovvero prendendo in considerazione varie situazioni che si possono venire a creare nella zona d'interesse.

Tale capitolo è stato per maggior chiarezza espositiva suddiviso in 6 paragrafi:

1. Introduzione;
2. Studio dell'area d'intervento e fonti dei dati;
3. I modelli matematici;
4. Simulazioni delle trasformazioni d'onda (determinazione dei parametri d'onda in seguito ai fenomeni di rifrazione, diffrazione e di shoaling);
5. Simulazione per la determinazione delle condizioni d'onda in prossimità delle strutture (rifrazione, diffrazione e di shoaling, e riflessione)

### **2.2 Studio dell'area d'intervento**

L'area di studio (come già premesso e descritto nella relazione dello studio meteo-marino), è il Golfo degli Aranci situato nella Costa di nord-est della Sardegna. La Figura 2-1 mostra l'ubicazione della zona.



**Figura 2-1: ubicazione dell'area di studio**

L'area di studio ricopre una superficie di circa 70 Km<sup>2</sup>. La profondità varia da un massimo di circa 70 m all'estremo esterno della stessa, fino ad un minimo di 2 m nell'immediata vicinanza del porto. È ovvio che nell'attuale studio sono state di particolare importanza le condizioni riscontrate nell'area immediatamente vicine il porto.

Le correnti idrodinamiche nell'area sono influenzate da marea, onde e vento. I dati utilizzati per le impostazioni e i successivi calcoli compiuti sono stati quelli determinati nello studio meteo-marino riportato nella prima parte della relazione generale. Tuttavia per una visione sintetica e facilmente consultabile di seguito vengono riportati brevi descrizioni dei "dati sorgente".

### 2.2.1 Batimetria

La batimetria dell'area di studio è stata ottenuta sulla base della carta nautica 322 dell'Istituto Idrografico della Marina. In prossimità della zona di ubicazione del nuovo porto è stata utilizzata una carta dettagliata ottenuta in seguito ad una campagna di rilievi effettuata dalla MartTech medesima grazie all'impiego di un sistema di rilevamento idrografico con tecnologia multibeam nel mese di marzo 2003.

La Figura 2-2 mostra la batimetria nell'area compresa dalla griglia di calcolo utilizzata dal modello numerico. La profondità in questa zona varia dai circa 50 m nei limiti esterni del dominio considerato, fino a valori intorno ai 2 m vicino alla costa.

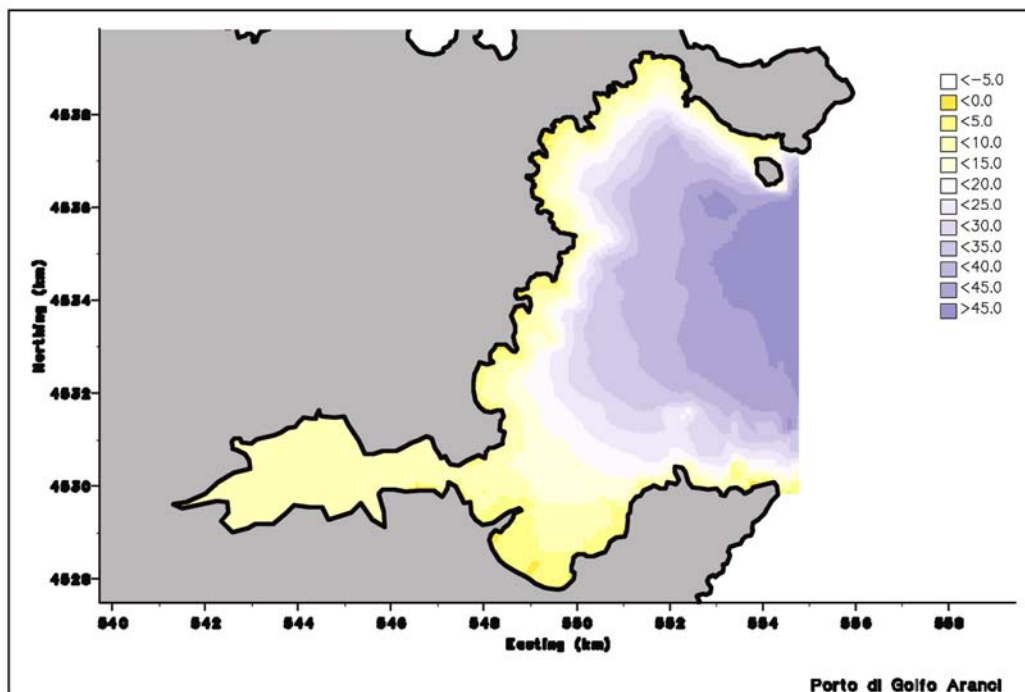
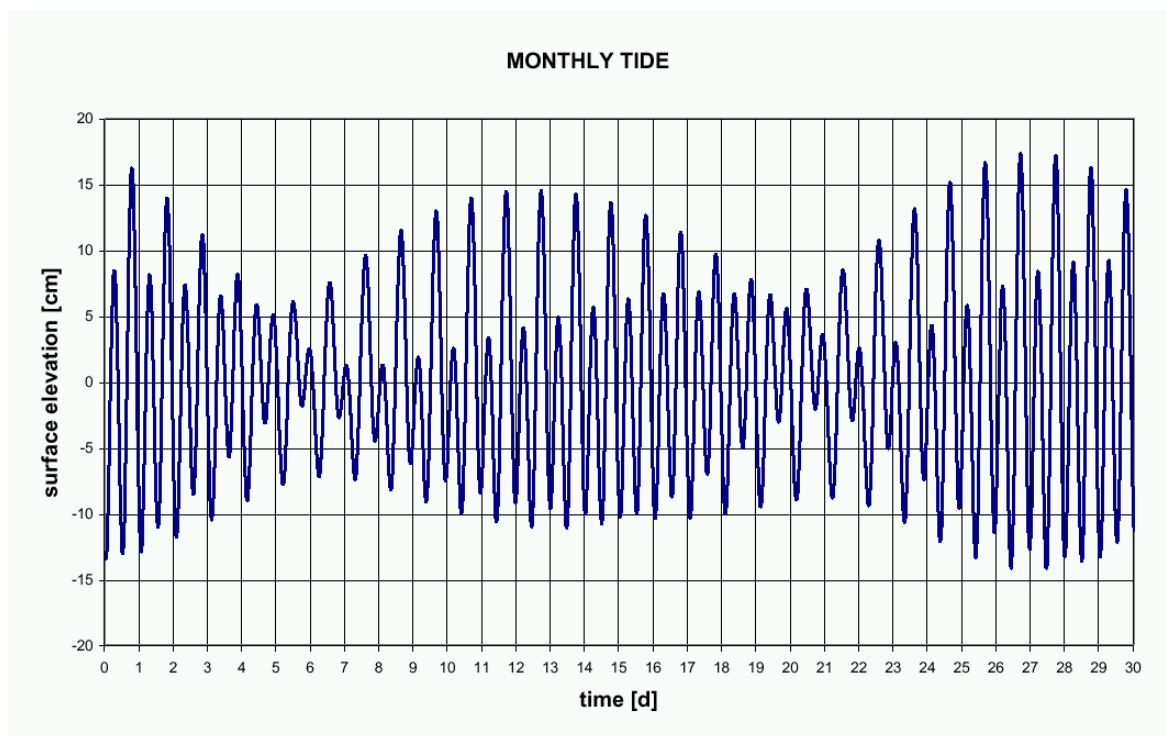


Figura 2-2: batimetria dell'area di studio

### 2.2.2 Maree

La variazione dei livelli d'acqua in seguito al fenomeno di marea<sup>15</sup>, è compresa tra i 10 ed i 30 cm. La Figura 2-3 mostra le variazioni di livelli d'acqua ottenuti da stime di marea ottenuti dall'Istituto Idrografico della Marina.



**Figura 2-3: livelli di marea ottenuti da analisi armonica con metodo di Lord Kelvin**

### 2.2.3 Vento

Le caratteristiche del vento utilizzate nello studio di modellizzazione si rifanno allo studio effettuato nella parte di relazione relativo allo studio meteo-marino. La Tabella 2-1 mostra le statistiche di vento dell'area di studio<sup>16</sup>. I dati in tabella riportano velocità registrate superiori ai 30 m/s. La Figura 2-4 mostra la rosa dei venti in cui si evidenzia il vento ovest sud ovest come predominante.

---

<sup>15</sup> Si fa riferimento allo studio di marea effettuato e riportato nella relazione relativa allo studio meteo-marino.

<sup>16</sup> ibidem

Degree (degree)	Wind Velocity (m/s)					
	1,0 - 3,0	3,5 - 10,5	11,0 - 16,5	17,0 - 23,5	24,0 - 31,5	> 63,0
	2,01	7,02	13,79	20,31	27,83	31,59
0	0,78%	1,97%	0,61%	0,13%	0,01%	0,00%
15	0,76%	2,67%	0,86%	0,18%	0,02%	0,00%
30	0,96%	3,67%	0,96%	0,17%	0,01%	0,00%
45	1,15%	4,67%	1,07%	0,16%	0,01%	0,00%
60	1,72%	5,50%	0,84%	0,10%	0,01%	0,00%
75	2,30%	6,34%	0,60%	0,05%	0,00%	0,00%
90	2,29%	6,81%	0,74%	0,04%	0,00%	0,00%
105	2,27%	7,28%	0,89%	0,04%	0,00%	0,00%
120	1,72%	4,77%	0,56%	0,02%	0,00%	0,00%
135	1,18%	2,25%	0,24%	0,01%	0,00%	0,00%
150	0,88%	1,43%	0,14%	0,01%	0,00%	0,00%
165	0,59%	0,60%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%
180	0,49%	0,56%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%
195	0,40%	0,52%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%
210	0,67%	1,80%	0,58%	0,10%	0,01%	0,00%
225	0,94%	3,07%	1,12%	0,18%	0,01%	0,00%
240	2,16%	11,98%	4,28%	0,87%	0,06%	0,00%
255	3,38%	20,88%	7,44%	1,56%	0,11%	0,00%
270	2,58%	15,83%	5,50%	1,28%	0,10%	0,00%
285	1,78%	10,79%	3,57%	0,99%	0,09%	0,00%
300	1,52%	6,81%	1,89%	0,53%	0,05%	0,00%
315	1,26%	2,84%	0,21%	0,07%	0,01%	0,00%
330	1,03%	2,06%	0,29%	0,07%	0,00%	0,00%
345	0,79%	1,28%	0,37%	0,08%	0,00%	0,00%

Tabella 2-1: statistiche di vento

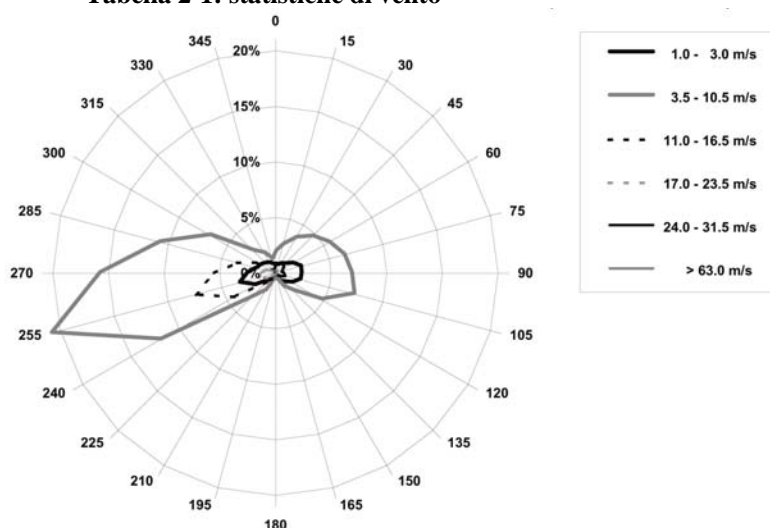


Figura 2-4: rosa dei venti

## 2.2.4 Onde

Le caratteristiche di moto ondoso proveniente dal largo considerato, scaturiscono dallo studio meteo-marino effettuato, per la direzione da nord-est (45°N), caratterizzata dal maggior fetch geografico. Per maggior completezza si sono considerate anche la direzione est. Questo per valutare più approfonditamente i possibili effetti di mareggiate da Levante in prossimità del porto.

	Hs (m)	Tp (s)	Dir. (° N)
Extreme 1	8.4	11.2	45
Extreme 2	8.4	11.2	90

Tabella 2-2: parametri di moto ondoso assunti nel modello

Per considerare i fenomeni ondosi generati dai venti all'interno del Golfo di Olbia, sono stati considerati due valori estremi di vento scaturiti dall'analisi statistica. Tali valori sono risultati rispettivamente:

1. 27 m/s provenienza 242°N;
2. 29 m/s provenienza 151°N

ovvero direzioni dalle quali si generano, all'interno del Golfo di Olbia, le onde più critiche. A tale riguardo giova ricordare che a parità d'intensità di vento, l'onda maggiore si genera laddove vi è maggior fetch.

## 2.3 Il sistema di modelli numerici

Le simulazioni sono state eseguite con il Wave Model SWAN sviluppato alla Technical University di Delft (Olanda) e con il modello PHAROS.

In questo capitolo si dà una breve descrizione dei moduli utilizzati per la realizzazione dello studio di cui questa relazione riporta i risultati.

### 2.3.1 Modello per la trasformazione delle onde (Wave Model SWAN)

Sono state applicate le simulazioni eseguite con lo SWAN Model<sup>17</sup>. Il modello è stato sviluppato dalla Technical University di Delft. Sono state eseguite, fino ad oggi, molte simulazioni con questo modello con ottimi risultati. SWAN è un modello di trasformazione del moto ondoso che computa le onde irregolari, “short-crested” generate dal vento nelle zone costiere e nelle acque interne. I fattori fisici di cui si tiene conto nei calcoli includono la propagazione delle onde nel tempo e nello spazio, shoaling, rifrazione, diffrazione, generazione delle onde da parte del vento, effetti di resistenza del fondo, frangimento dell’onda ed interazione onda-onda.

### 2.3.2 Modello di penetrazione di moto ondoso

Il modello di penetrazione del moto ondoso utilizzato nel presente studio è PHAROS, acronimo per “Program for HARbour Oscillations”. Si tratta di un modello del tipo ad elementi finiti che è in grado di computare gli effetti combinati di rifrazione e diffrazione in funzione dei layout di progettazione delle strutture portuali e delle variabilità dei fondali in termini batimetrici.

Il programma risolve in modo completo l’equazione temporale armonica per lievi pendenze, localmente estesa con termini per rifrazione e dissipazione indotti dal frangimento del moto ondoso. Le condizioni al contorno tengono conto di molteplici fattori, come la parziale riflessione e gli effetti combinati di riflessione e diffrazione.

---

<sup>17</sup> si fa riferimento per gli approfondimenti a RIS, R.C., N. BOOIJ AND L.H. HOLTHUIJSEN, 1999. A third generation wave model for coastal regions, Part II, Verification. Journal of Geophysical Research, Vol. 104, No. C4, pp. 7667-7682.

## 2.4 Simulazione di trasformazione d'onda

### 2.4.1 Impostazioni

Per l'applicazione del modello di trasformazione d'onda è stata utilizzata una griglia computazionale del modello a grande scala, che comprende l'intero Golfo, e due successive più piccole, innestate l'una dentro l'altra, in modo da poter avere una precisione maggiore nell'estrazione dei valori da immettere successivamente nel modello di riflessione PHAROS. Successivamente all'estrazione dei valori riportati in Tabella 2-5 si è applicato il modello di dettaglio PHAROS basato su una nuova griglia ad elementi finiti. Le condizioni al contorno sono state specificate in termini di altezza e periodo dell'onda.

#### 2.4.1.1 Parametri fisici e numerici modello SWAN

La Tabella 2-3 riassume i parametri fisici e numerici scelti ed assegnati in input al modello.

Parametri	Valori
Generation of formulations	Third generation
Bottom friction	Jonswap formulation, coefficient 0.067
Depth-induced breaking	B&J model, $\alpha=1$ , $\gamma=0.73$
Non-linear triad interactions	LTA, $\alpha=0.1$ , $\beta=2.2$
Wind growth	Activated
White-capping	Activated
Quadruplets	Activated
Refraction	Activated
Difraction	Activated
Frequency shift	Activated
Directional resolution	$10^\circ$
Frequency resolution	$0.1s^{-1}$

Tabella 2-3: parametri considerati nelle simulazioni col modello SWAN

### 2.4.2 Scelta dei dati delle forzanti d'onda modello SWAN

Al fine di ottenere informazioni del campo d'onda nelle vicinanze del porto sono state considerate numerose condizioni in termini d'altezze, periodi e direzioni d'onda. Il comportamento del porto è stato testato per diverse condizioni di onda, per un totale di 4 simulazioni i cui risultati sono riportati di seguito



Run	Hs(m)	Tp(s)	Dir.(°N)	Wind speed (m/s)	Wind dir.(°N)
1	8.4	11.2	45	25	45
2	8.4	12.2	90	25	45
3	No swell			29.0	151
4	No swell			27.0	242

**Tabella 2-4: lista delle caratteristiche d'onda e di vento per le sette simulazioni effettuate**

I fattori dominanti nella determinazione delle caratteristiche d'onda nelle vicinanze del porto sono le condizioni di vento e di moto ondoso imposte al limite esterno del dominio. Pertanto l'analisi dei risultati può ritenersi indipendente dalla variazione temporale dei livelli idrici dovuti al ciclo di marea.

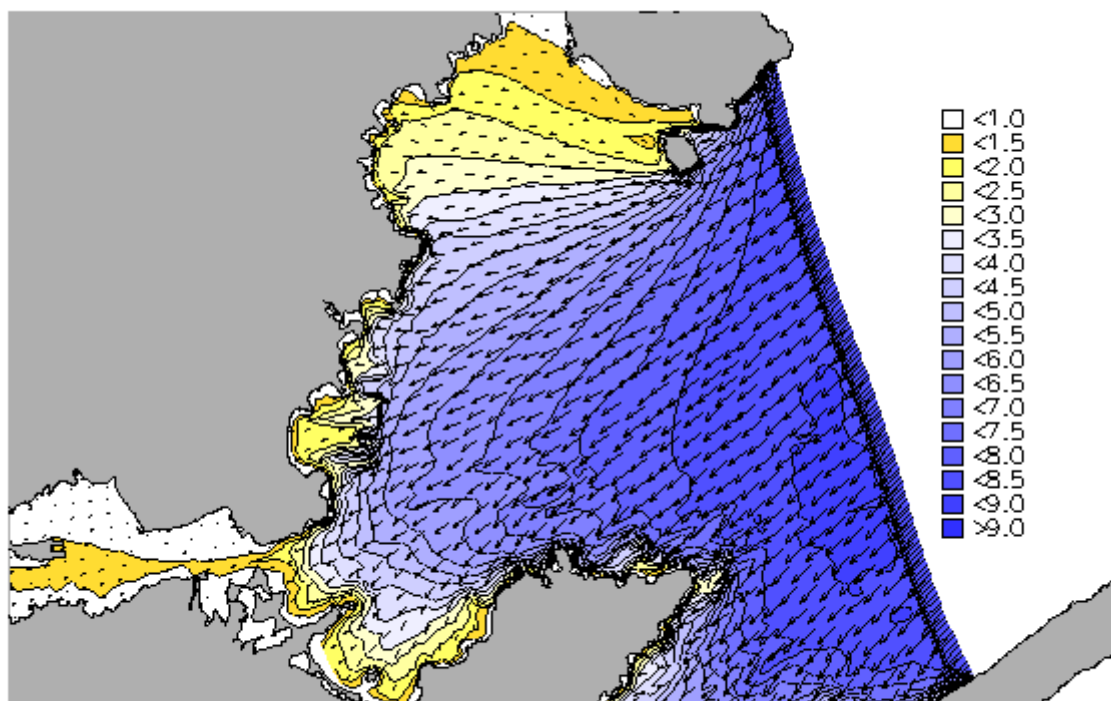
### **2.4.3 Simulazioni e risultati SWAN**

I risultati delle simulazioni in prossimità del porto sono stati registrati in un punto di monitoraggio, dalle coordinate UTM 32 : E 552311.44, N 4538066 posto in prossimità del nuovo pontile.

La localizzazione del punto di controllo è scaturita dalla necessità di avere i valori al contorno del moto ondoso nella griglia di dettaglio ad elementi finiti del modello PHAROS.

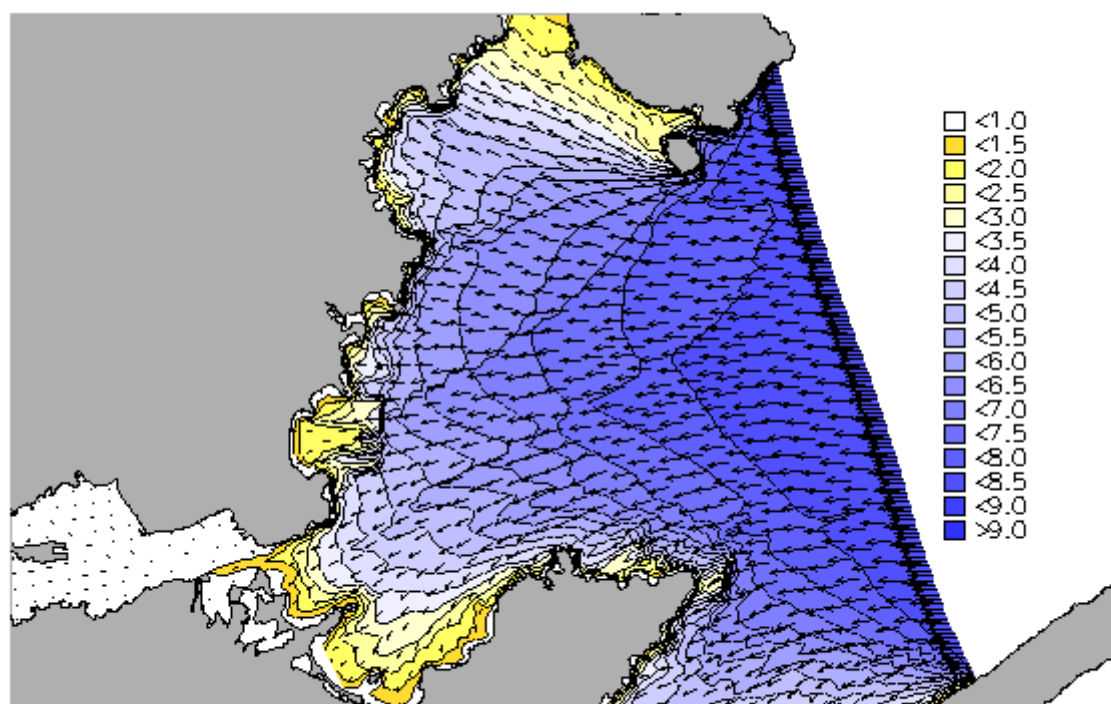
	Onda			Vento		Punto A			
Simulazione	Hs (m)	Tp(s)	Dir. (naut. °N)	Intensità (m/s)	Dir. (naut. °N)	Hs (m)	Tm (s)	Dir. (naut. °N)	Dispersione (°)
<b>1</b>	8.4	11.2	45	25	45	1.10	2.83	124	54
<b>2</b>	8.4	11.2	90	25	90	2.27	5,59	154	19
<b>4</b>	No swell			29	151	2.0	1.99	168	26
<b>5</b>	No swell			27	242	1.5	1.39	215	32

**Tabella 2-5: risultati delle simulazioni estratte nel punto A di coordinate UTM 32 : E 552311.44, N 4538066 posto in prossimità del nuovo pontile.**



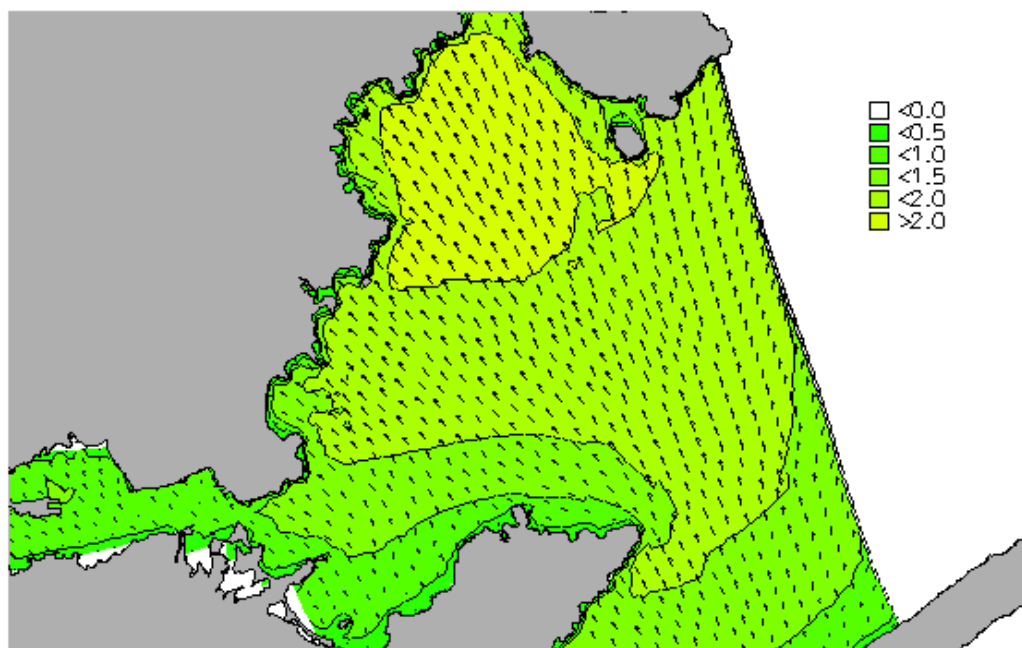
MarTech Srl – Italy

**Figura 2-5: Campo d'onda risultante dalla prima simulazione-  $H_s = 8.4$  m;  $T_p = 11.2$  s; direzione=45; velocità del vento 25 m/s.  $H$  espresso in m.**



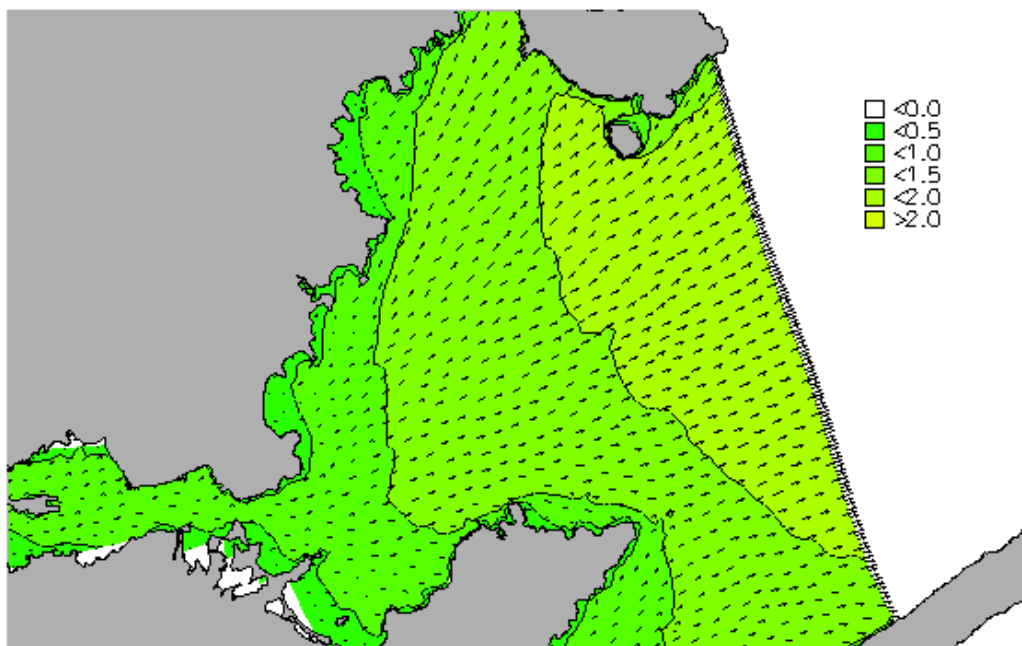
MarTech Srl – Italy

**Figura 2-6: Campo d'onda risultante dalla seconda simulazione-  $H_s = 8.4$  m;  $T_p = 11.2$  s; direzione=90; velocità del vento 25 m/s.  $H$  espresso in m.**



MarTech Srl – Italy

Figura 2-7: Campo d'onda risultante dalla terza simulazione. Velocità del vento: 29 m/s Dir: 242°N



MarTech Srl – Italy

Figura 2-8: Campo d'onda risultante dalla quarta simulazione-intensità vento = 27 m/s; direzione=151°

#### 2.4.3.1 Coefficienti di riflessione del moto ondoso e frangimento PHAROS

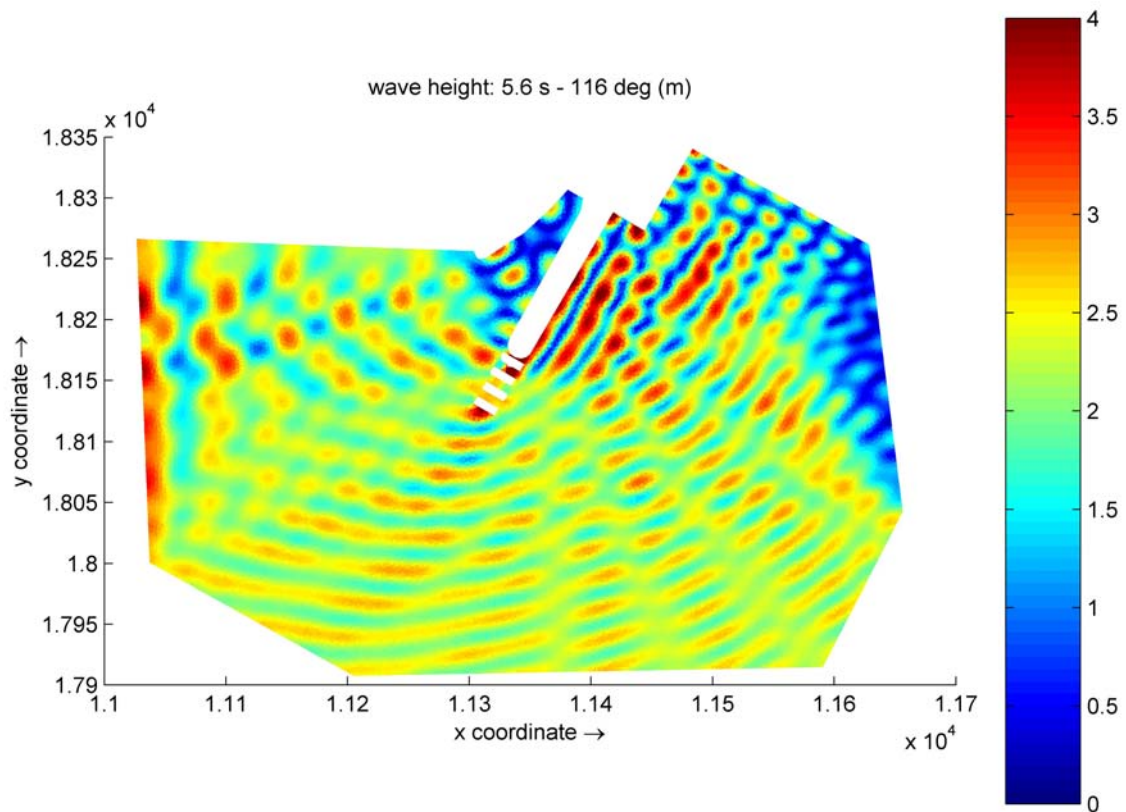
La riflessione del moto ondoso è determinata dalle caratteristiche delle onde e delle strutture portuali. Nella letteratura sono disponibili molte formule di tipo empirico che possono essere

utilizzate per assegnare i coefficienti di riflessione per le opere di frangiflutti e per le zone portuali e costiere. Il fenomeno di frangimento del moto ondoso in funzione della diminuzione di profondità avvicinandosi alla costa è stato considerato nel modello PHAROS in accordo con la formula di Battjes-Jansen.

#### **2.4.4 Condizioni al contorno**

Le condizioni al contorno del modello sono state definite in funzione dei layout del porto e delle caratteristiche del moto ondoso specificate attraverso il modello SWAN. In particolare si è presa in considerazione la condizione più gravosa, ovvero quella corrispondente all'evento centenario proveniente da est. Partendo quindi dalle condizioni di moto ondoso al contorno sono state considerate 2 diverse simulazioni una condizione di riflessione totale delle pareti interne ai cassoni costituenti il prolungamento del pontile esistente, la seconda in presenza di celle antirisacca nei lati interni dei cassoni ad eccezione del cassone estremo meridionale.

### **2.5 Risultati del modello PHAROS**



**Figura 2-9: Simulazione 1.  $T_m=5.6$  s,  $H_s=2.27$  m,  $Dir=116^\circ$   $xy=154^\circ N$  – cassoni pieni. Altezza d'onda (m)**

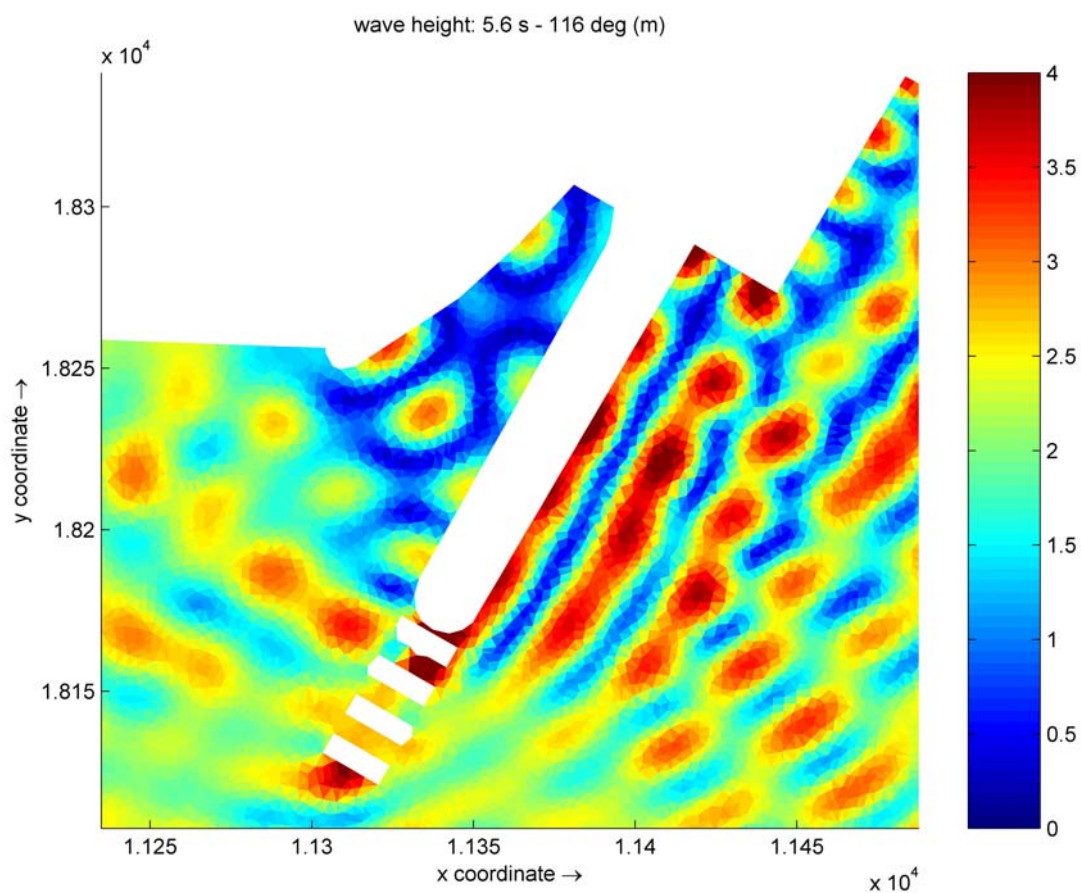


Figura 2-10: dettaglio simulazione 1.  $T_m=5.6$  s,  $H_s=2.27$  m,  $Dir=116^\circ$   $xy=154^\circ$  N – cassoni pieni

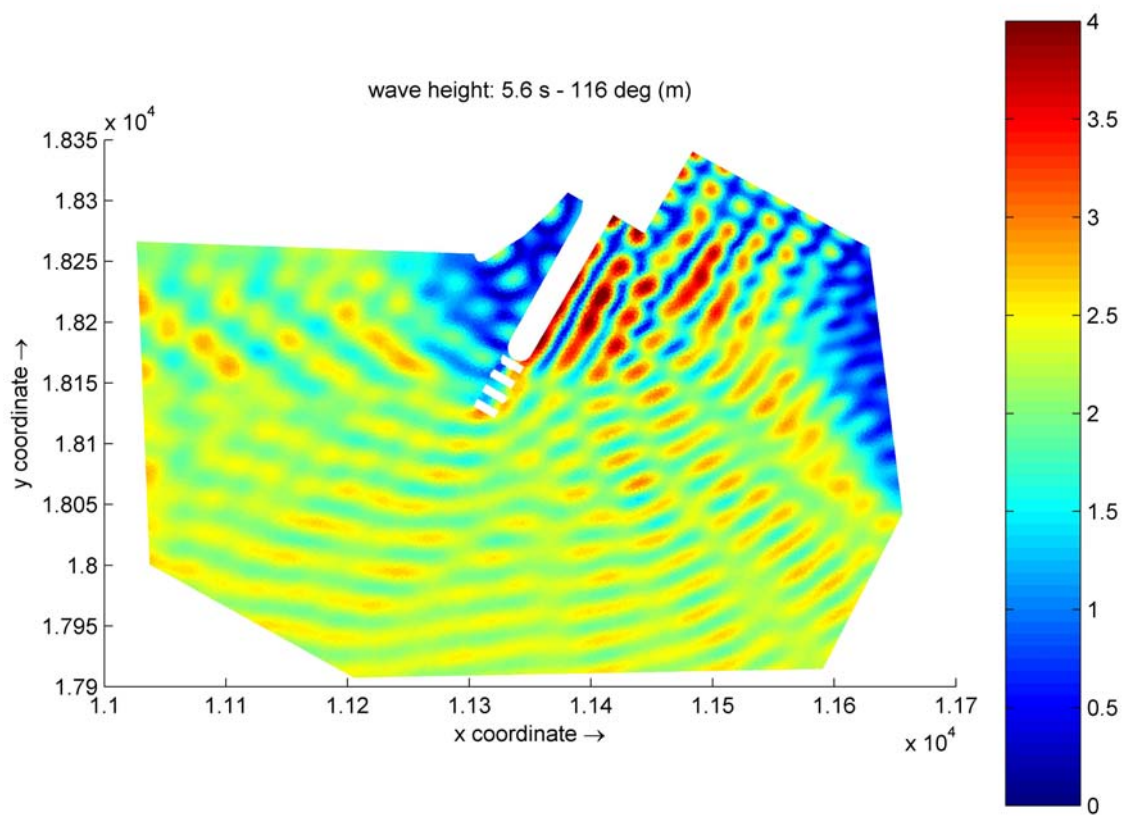
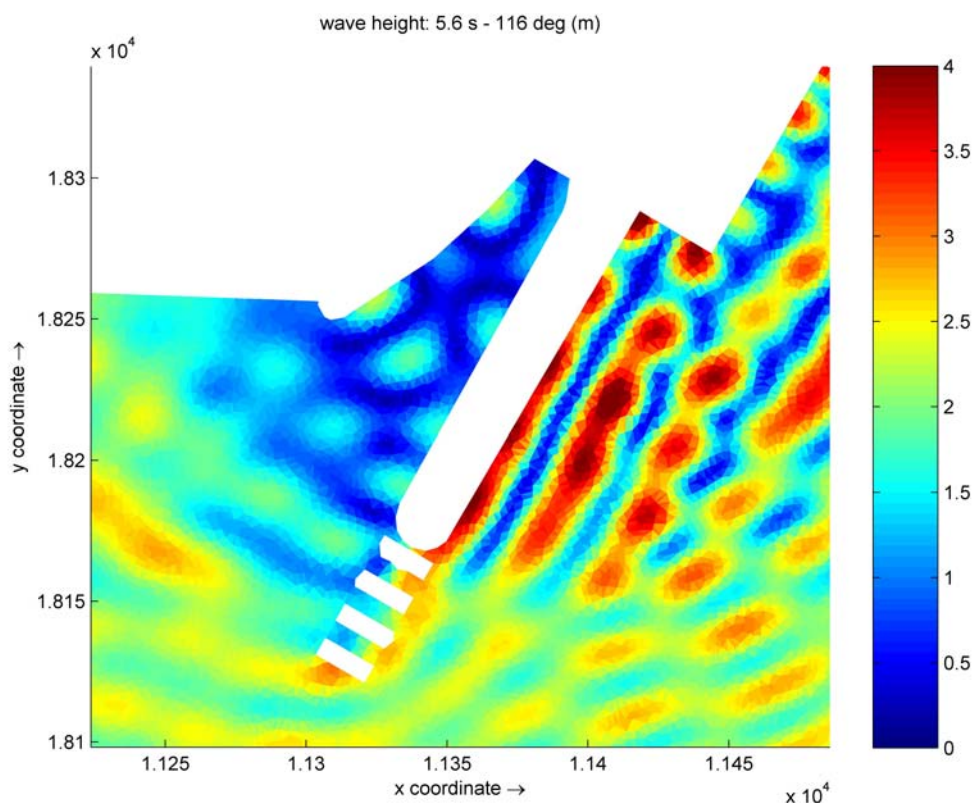


Figura 2-11: simulazione 2.  $T_m=5.6$  s,  $H_s=2.27$  m,  $Dir=116^\circ$   $xy=154^\circ$  N – cassoni con celle antirisacca. Altezza d'onda (m)





**Figura 2-12: dettaglio simulazione 2:  $T_m=5.6$  s,  $H_s=2.27$  m,  $Dir=116^\circ$   $xy=154^\circ N$  – cassoni con celle antirisacca. Altezza d'onda (m)**

## 2.6 Considerazioni

Le simulazioni effettuate con il modello SWAN, pone in chiara evidenza l'effetto scudo offerto, per gli eventi provenienti da largo, da Capo Figari. Essi, anche in caso di eventi intensi e con  $T_r$  molto alti, risultano notevolmente attenuati. In corrispondenze del porto Commerciale, tali onde, nel caso più sfavorevole possibile considerato, raggiungono una  $H_s$  pari a 2.27 m con  $T_m=5.56$  s.

In presenza di vento teso proveniente da sud, l' $H_s$  massima riscontrabile è comunque inferiore ai 2 m. La simulazione effettuata con il modello PHAROS, ha messo in evidenza un negativo effetto di riflessione interna sui cassoni del prolungamento (vedi fig. simulazione 1) che fa esaltare l'onda innalzandola, in corrispondenza della media lunghezza dei cassoni, fino ai 4m, con un prevedibile e pericoloso effetto di sottospinte sulle campate della struttura.

Per ridurre al minimo tale evenienza, si è minimizzato l'effetto riflettente dei cassoni, posizionando, in corrispondenza delle facce interne degli stessi, delle celle antirisacca.

Il risultato è un notevole miglioramento delle condizioni d'onda. Le immagini raffiguranti la simulazione 2, mostrano un abbassamento dell'onda a meno di 2.65 m in corrispondenza della mezzeria dei cassoni e un'altezza massima in corrispondenza del cassone meridionale e dell'estremità vecchia del pontile.

Le altezze massime in quest'ultimo caso raggiungono i 2.8 m di  $H_s$  e solo in corrispondenza delle criticità appena elencate. In questi casi l'altezza di cresta d'onda (comprensiva anche di effetto set-up già tenuta in conto nei modelli) raggiunge i 1.4 m. Tale misura è assai inferiore agli 1.9 m di quota intradossale dei pannelli alveolari con un franco di 50 cm. È da notare che in condizioni di bassa pressione e di vento sfavorevole, il l.m.m. è suscettibile di importanti sovralzi quantificabili, nelle condizioni peggiori in 0.50 m. Anche in questo caso, tuttavia, ***la quota intradossale non viene raggiunta dall' $H_s$  di calcolo.***

È importante notare che le condizioni imposte ai modelli di moto ondoso sono le più conservative possibili: onda centenaria proveniente da  $90^\circ N$  e riflessioni considerate al 100% (ove non presenti celle antirisacca), vento di 29 m/s spirante da sud-est. Nella realtà tali valori, seppur dedotti da analisi statistiche reali, sarebbero da attribuire a direzioni più favorevoli, in particolare l'onda a largo andrebbe attribuita ai  $45^\circ N$  del grecale, la velocità del vento per fetch interni a  $90-270^\circ N$  ed i coefficienti di riflessione dovrebbero essere inferiori. In quest'ottica i risultati ottenuti sono, di per se, già comprensivi di coefficienti di sicurezza che inglobino casi particolari ed onde superiori alle  $H_s$  considerate,

## Bibliografia

- [1] CERC, 1984. *Shore Protection Manual. Fourth Edition. Coastal Engineering Research Centre, Dept. of the Army. Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.*
- [2] Van der Meer, J.W., 1988. *Rock slopes and gravel beaches under random wave attack. Doctoral thesis, Delft University of Technology.*
- [3] Postma, G.M., 1989. *Wave reflection from rock slopes under random wave attack; MSc thesis, Delft University of Technology.*
- [4] Battjes J.A. and Jansen J.P.F.M., 1979. *Energy loss and set-up due to breaking of random waves; Proc. 16th Int. Coastal Engineering Conference, 1978, Hamburg, ASCE, New York, pp. 569-587.*