

0	FAC	PRIMA EMISSIONE	26/03/2015	IERINO'	CITTERIO
1	FUS	SECONDA EMISSIONE	20/04/2015	IERINO'	CITTERIO
2	FUS	TERZA EMISSIONE	09/10/2015	IERINO'	CITTERIO
REV.	ST.	DESCRIZIONE	DATA	VERIFICATO	APPROVATO



P920GFKC001

## STUDIO METEOMARINO PRELIMINARE

09/10/2015	TERZA EMISSIONE	MFI/EDI	BRG	EP	EP
20/04/2015	SECONDA EMISSIONE	MFI/EDI	BRG	EP	EP
26/03/2015	PRIMA EMISSIONE	MFI/EDI	BRG	EP	EP
DATA	DESCRIZIONE	ESEGUITO	CONTROLL.	APPROVATO	SOTT.


**D'APPOLONIA**

consulting, design, operation &amp; maintenance engineering

DATA	DOC. N.	REV.	FOGLIO
09/10/2015	14-1286 H5	2	1

**INDICE**

	<u>Pagina</u>
<b>1 SCOPO</b>	<b>3</b>
<b>2 AREA DI STUDIO</b>	<b>4</b>
2.1 SETTORE DI TRAVERSIA DEL PARAGGIO E FETCH ASSOCIATO	4
2.2 CARATTERISTICHE BATIMETRICHE	5
<b>3 DATI DI BASE</b>	<b>7</b>
3.1 DATI METEO-MARINI DISPONIBILI	7
3.1.1 Vento	7
3.1.2 Onde	9
3.1.3 Livello del Mare	9
3.1.4 Dati Batimetrici	10
3.2 ANALISI CRITICA DEI DATI DISPONIBILI	10
3.2.1 Validazione Dati di Vento	10
3.2.2 Validazione Dati di Onde	18
3.2.3 Validazione Dati di Livello	20
<b>4 CRITERI METODOLOGICI</b>	<b>22</b>
4.1 CRITERI GENERALI	22
4.2 STIMA DEI VALORI ESTREMI	22
4.3 VENTO	23
4.3.1 Profilo del Vento	23
4.3.2 Durata del Vento	24
4.3.3 Valori Estremi	26
4.4 MOTO ONDOSI	26
4.4.1 Relazioni fra le Grandezze Caratteristiche del Moto Ondoso	27
4.4.2 Valori Estremi	28
4.5 LIVELLO MARINO	29
<b>5 REGIME ANEMOLOGICO</b>	<b>30</b>
5.1 CONDIZIONI TIPICHE	30
5.2 CONDIZIONI ESTREME	34
<b>6 CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSI</b>	<b>38</b>
6.1 CLIMA AL LARGO NEL LUNGO TERMINE	38
6.2 VALORI ESTREMI DELLE ONDE AL LARGO	40
6.3 PROPAGAZIONE DELLE ONDE A COSTA	47
6.4 CLIMA ONDOSI A COSTA	49
6.5 VALORI ESTREMI DELLE ONDE A COSTA	61
6.6 VALORI ESTREMI DELLE ONDE ALL'INTERNO DEL PORTO DI ORISTANO	64
<b>7 VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO</b>	<b>67</b>
7.1 OSCILLAZIONE DOVUTA ALLA MAREA	67
7.2 SET UP DA VENTO	68
7.3 VALORI ESTREMI	70
<b>8 LE CORRENTI NELLA DARSENA</b>	<b>71</b>
8.1 CORRENTI SUPERFICIALI MASSIME	71
8.2 PROFILO VERTICALE DELLA CORRENTE	71
<b>9 CONCLUSIONI</b>	<b>72</b>

**1 SCOPO**

Il presente studio si inserisce nell'ambito dello studio di fattibilità di un deposito costiero di GNL da ubicarsi nel Porto di Santa Giusta di Oristano, e si pone l'obiettivo di fornire un inquadramento meteomarinario preliminare dell'area di studio.

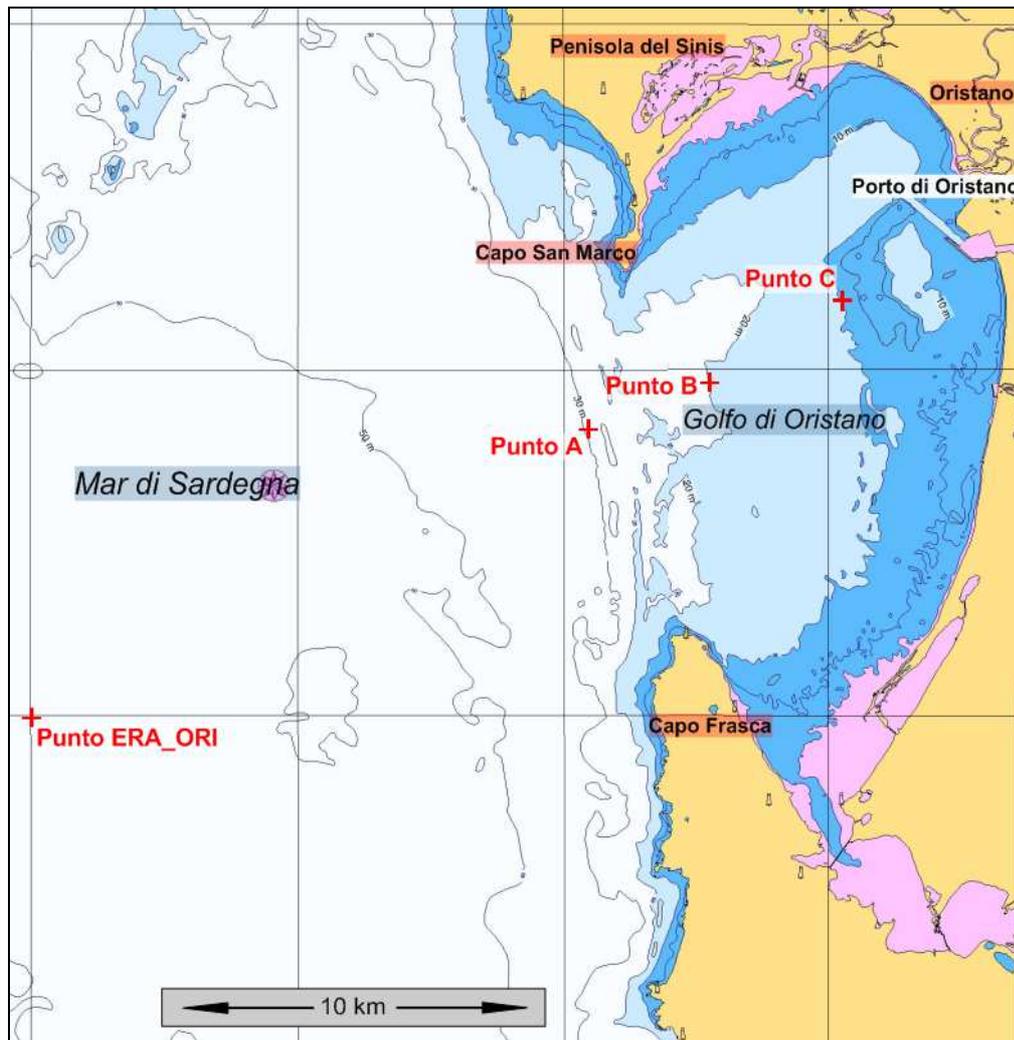
Sono stati pertanto reperiti, validati ed elaborati dati di vento, moto ondoso e livello del mare che, opportunamente interpretati, hanno costituito la base di dati per la definizione delle condizioni meteomarine tipiche ed estreme al largo del Golfo di Oristano, e nelle acque antistanti l'imboccatura del porto di Oristano.

In questa Rev.1 sono stati altresì reperiti dati misurati presso la stazione AMI di Capo Frasca, perché ritenuto il dataset più appropriato a descrivere la fenomenologia locale. Tali dati sono stati quindi analizzati e confrontati con i dati di vento ricostruiti da modello utilizzati nella precedente Rev. 0, al fine di verificare la validità dei parametri di progetto stimati.

Infine, è stata effettuata una stima preliminare delle condizioni meteo marine estreme all'interno della rada portuale mediante l'applicazione di metodi analitici a partire dai valori estremi del vento, allo scopo di fornire i dati necessari per la realizzazione degli studi di manovrabilità e ormeggio.

## 2 AREA DI STUDIO

Il sito di realizzazione del deposito GNL è ubicato all'interno del Porto di Oristano, in corrispondenza di margini di contenimento esistenti. Il Porto di Oristano è situato all'interno del Golfo di Oristano (Figura 2.1), lungo la costa ovest della Sardegna.



**Figura 2.1: Area di Studio, Caratteristiche Batimetriche e Ubicazione dei Dati di Base**

### 2.1 SETTORE DI TRAVERSIA DEL PARAGGIO E FETCH ASSOCIATO

L'analisi dell'esposizione geografica di un paraggio si basa sulla determinazione dei "fetches" geografici ed efficaci. Per "fetch", com'è noto, si intende la lunghezza del tratto di mare sul quale avviene la generazione del moto ondoso causata dal vento. L'individuazione dei fetches può essere eseguita facendo ricorso al concetto di "fetch geografico" che indica la distanza geografica tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione e di "fetch efficace", che consente di tener conto del fatto che le onde vengono generate non

solo lungo la direzione da cui spira il vento, ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore di  $\pm 90^\circ$  rispetto alla direzione media di azione del vento.

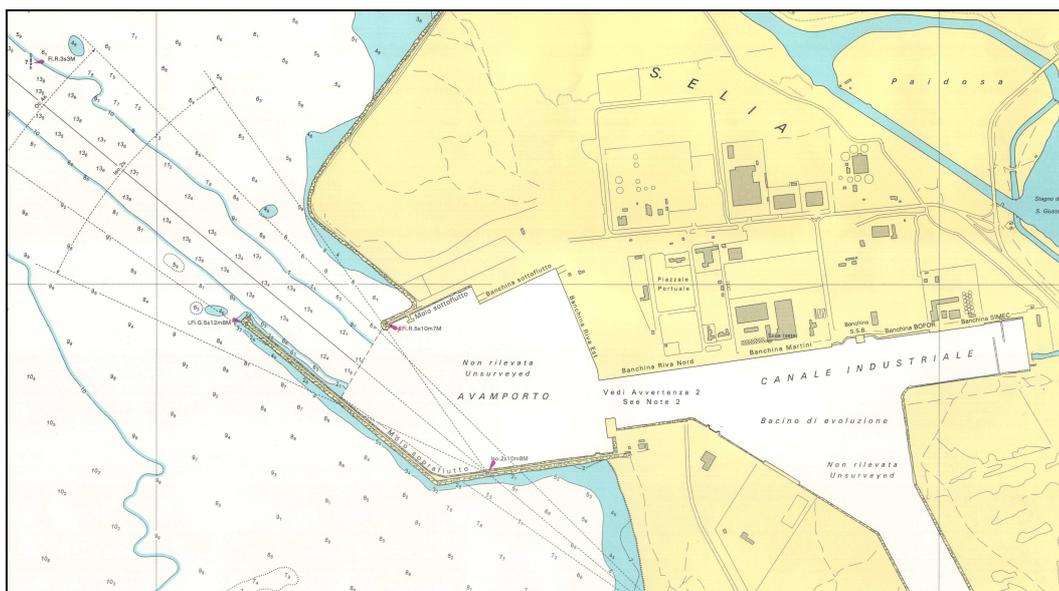
Considerando un punto posizionato al centro dell'imboccatura del Golfo di Oristano (Figura 2.3), distante circa 12 km dal porto di Oristano su una profondità di circa 30 metri, l'area di studio è esposta ad un settore di traversia primario che va da  $195^\circ$  a  $350^\circ$  N circa. I settori secondari, compresi tra circa  $350^\circ$  N e  $195^\circ$  N, presentano fetch molto ridotti.

Da	A	Fetch geografico	Fetch efficace
$350^\circ$ N	$170^\circ$ N	$\approx 10$ Km	$\approx 10$ Km
$170^\circ$ N	$195^\circ$ N	$\approx 45$ Km	$\approx 35$ Km
$195^\circ$ N	$350^\circ$ N	$> 500$ Km	$> 500$ Km

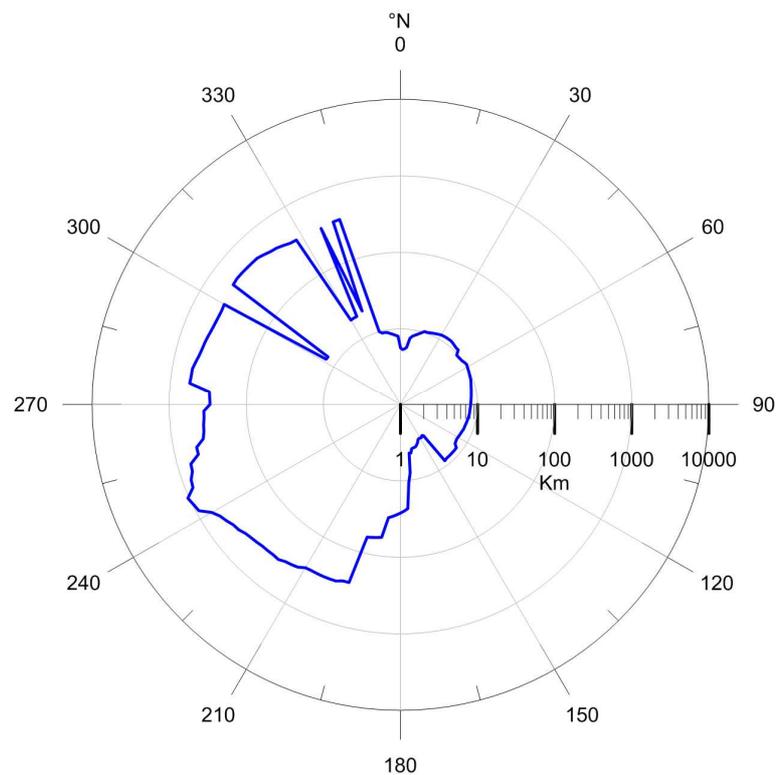
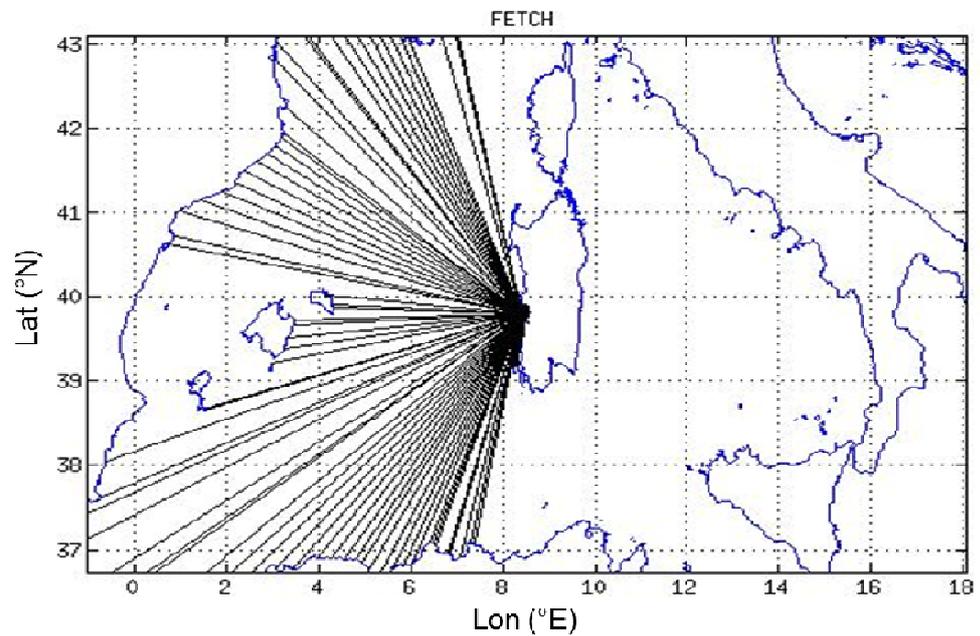
Il settore  $195$ - $350^\circ$ N ha quindi fetches tali da permettere la formazione di mare completamente sviluppato, ed è interessato dalla presenza di forti mareggiate.

## 2.2 CARATTERISTICHE BATIMETRICHE

Il Golfo di Oristano è delimitato a nord da Capo San Marco, nella Penisola del Sinis, e a sud da Capo Frasca. I fondali antistanti l'imboccatura del golfo sono caratterizzati da profondità di circa 30 m e da un piano batimetrico orientato NNO-SSE. All'interno del Golfo i fondali presentano le caratteristiche tipiche delle insenature, con le isobate che, a costa, seguono l'andamento della linea di riva, mentre man mano che aumentano le profondità tendono ad allinearsi con le isobate presenti all'esterno del Golfo. Procedendo da sud verso nord, questo caratteristico andamento dei fondali si interrompe nei pressi del Porto di Oristano (Figura 2.2): in questa zona si ha la presenza di un grande canale orientato NE-SO, caratterizzato da fondali che passano gradualmente da 20 a 10 m di profondità circa, realizzato al fine di facilitare l'accesso delle navi al Porto.



**Figura 2.2: Caratteristiche dei Fondali all'Imboccatura del Porto di Oristano**



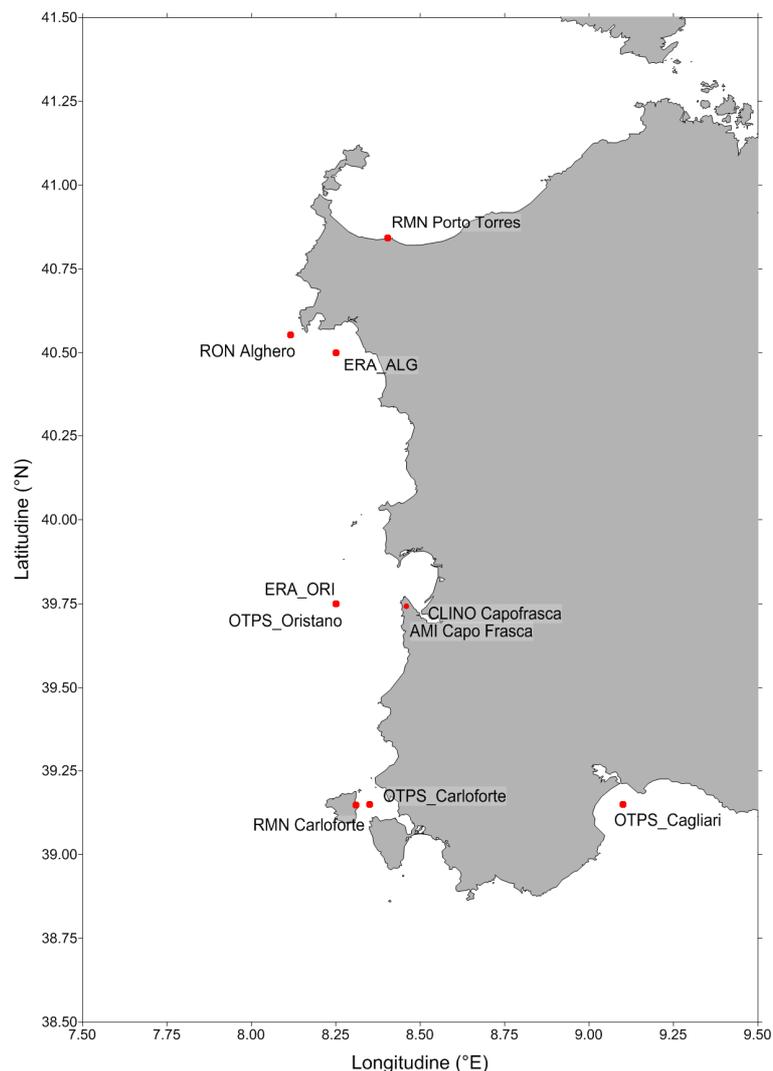
**Figura 2.3: Fetch Associati all' Area di Studio**

### 3 DATI DI BASE

Nel seguito vengono presentati i dati reperiti e descritta la procedura che è stata utilizzata per la loro validazione e analisi.

#### 3.1 DATI METEO-MARINI DISPONIBILI

Nell'area di studio sono stati reperiti i dati descritti nel seguito. In Figura 3.1 vengono mostrate le ubicazioni dei punti in cui sono disponibili i dati rispetto all'area di studio.



**Figura 3.1: Ubicazione dei Dati Meteomarini reperiti**

##### 3.1.1 Vento

Esistono misure di vento della Rete Mareografica Nazionale (RMN) rilevate dalle stazioni di Porto Torres (alle coordinate 40° 50' 31" N, 8° 24' 13" E) e Carloforte (alle coordinate 39° 08' 52" N, 8° 18' 34" E). I dati misurati in queste stazioni sono stati analizzati, ma mostrano caratteristiche tipiche delle stazioni di misura :

Carloforte e Porto Torres sono distanti rispettivamente circa 70 e 110 km dal Golfo di Oristano e hanno esposizioni completamente differenti, con le direzioni di provenienza dei venti da Nord-Ovest schermate da terra. Per questo motivo queste misure non possono essere utilizzate per l'area in esame.

Sono stati reperiti, inoltre, i dati ricostruiti dal noto istituto ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasting) di Reading, Inghilterra. Il database mondiale ECMWF ERA-Interim (nel seguito "ECMWF") consiste in serie temporali di vento ricostruite e validate dal 01/01/1979 al 31/12/2014 con una cadenza temporale di 6 ore. I dati di vento sono simulati dal modello meteorologico ECMWF.

I dati acquisiti contengono i seguenti parametri:

- W: Velocità media su 10' del vento alla quota standard di 10 m l.m.m.;
- DW: Direzione media su 10' di provenienza del vento alla quota di 10 m l.m.m..

I dati ECMWF sono disponibili su di una griglia di  $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ . Sono stati scaricati i dati del database nel punto:

- ERA\_ORI:  $39.75^{\circ}N$ ,  $8.25^{\circ}E$ , punto al largo di Oristano, Figura 3.1.

Misure più rappresentative dell'area di studio si possono reperire dalla stazione meteorologica di Capo Frasca. Questa stazione, che appartiene ad Aeronautica Militare, è ubicata alle coordinate  $39^{\circ} 44' 23.59'' N$ ,  $8^{\circ} 27' 34.15'' E$ , a 92 m sul livello del mare. Dal sito <http://clima.meteoam.it/> è possibile scaricare CLINO (acronimo di CLImate NORmals), un'elaborazione statistica su base trentennale (1961-1990) dei parametri meteorologici al suolo di questa stazione meteorologica. Si sottolinea che nell'elaborare la Rev. 0 sono stati utilizzati i dati disponibili esclusivamente sotto forma di elaborazioni statistiche (tabelle) dei dati triorari.

Successivamente all'emissione della Rev.0 del presente studio, è stato possibile reperire l'intera serie temporale del vento misurato presso la stazione meteorologica AMI di Capo Frasca (AMI Capo Frasca) relativa al periodo dal 01/01/1985 al 31/12/2014.

I dati acquisiti contengono i seguenti parametri:

- W: Velocità media su 10' del vento alla quota standard di 10 m l.m.m.;
- DW: Direzione media su 10' di provenienza del vento alla quota di 10 m l.m.m.; la direzione viene fornita come settore ogni  $22.5^{\circ}$ .

La serie ha una cadenza temporale oraria. Viene inoltre fornita la raffica, definita come la velocità media su 3" del vento alla quota standard di 10 m l.m.m. Il valore della raffica viene fornito quando questo supera di almeno 10 nodi il valore dell'intensità, ed è riferita allo stesso periodo di W.

È necessario soffermarsi sulla rappresentatività statistica dei dati misurati a Capo Frasca: sebbene la serie temporale sia composta da valori di intensità del vento

mediato su un intervallo di 10 minuti, essa fornisce un unico dato per ogni ora. Dato il carattere preliminare dello studio, si suggerisce comunque di considerare la serie come rappresentativa del vento orario.

### 3.1.2 Onde

Sono stati reperiti i dati di moto ondoso rilevati dall'ondametro direzionale di Alghero dal 1/7/1989 al 05/04/2008.

La boa ondometrica direzionale fa parte della Rete Ondometrica Nazionale (RON) ed è ubicata alle coordinate: 40° 33' 11.99" N, 08° 07' 0.01" E in acque di profondità 100 m, punto RON Alghero in Figura 3.1.

Il sistema RON dispone di dati rilevati in termini di altezza d'onda significativa spettrale, direzione media di provenienza dell'onda, periodo di picco e periodo medio. I dati sono disponibili sia sottoforma di serie temporali che di distribuzioni statistiche (Apat, 2004).

I dati sono triorari, e nei casi di mareggiate significative con valori di altezza d'onda maggiori di 5.0 m l'acquisizione dei dati avviene in continuo e i dati sono registrati ogni mezz'ora.

Data la distanza dall'area di studio (circa 90 km) e la durata limitata della serie temporale sono stati reperiti i dati ricostruiti da ECMWF ERA-Interim (nel seguito "ECMWF"). Come per i dati di vento (capitolo 3.1.1) sono disponibili serie temporali di onde ricostruite e validate dal 01/01/1979 al 31/12/2014 con una cadenza temporale di 6 ore. I dati di moto ondoso vengono simulati mediante il modello spettrale di terza generazione WAM, a cui vengono forniti in input i campi di vento simulati dall'ECMWF. Tali dati così ricostruiti vengono sottoposti ad un processo di validazione attraverso il confronto con i dati altimetrici rilevati dal satellite Topex.

I dati acquisiti contengono i seguenti parametri:

- $H_s$ : Altezza d'onda significativa;
- Dir: direzione media di provenienza dell'onda;
- $T_m$ : periodo medio.

I dati ECMWF sono disponibili su di una griglia di  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ . Sono stati scaricati i dati del database in due punti-griglia, vedi Figura 3.1:

- ERA\_ORI: 39.75°N, 8.25°E, punto al largo di Oristano;
- ERA\_ALG: 40.5°N, 8.25°E, punto al largo di Alghero.

### 3.1.3 Livello del Mare

Misure di livello sono state rilevate dalle stazioni di Porto Torres e Carloforte (RMN), ma data la distanza dall'area di studio e le particolari ubicazioni geografiche di queste località, è stato scelto di reperire i dati delle oscillazioni

legate all'effetto della marea calcolati dal modello OTPS (Oregon State University – OSU - Tidal Prediction Software) di fronte al Golfo di Oristano. Il modello permette sia di estrarre le componenti armoniche, sia di effettuare la previsione della marea.

Per caratterizzare l'area di studio sono stati scaricati i dati del modello OTPS nel punto:

- OTPS\_ORI: 39.75°N, 8.25°E, punto al largo di Oristano, Figura 3.1.

#### 3.1.4 Dati Batimetrici

La batimetria per l'area di studio, mostrata in Figura 2.1, è stata reperita da carte nautiche digitali.

### 3.2 ANALISI CRITICA DEI DATI DISPONIBILI

I dati sono stati sottoposti ad un adeguato processo di validazione (controllo del calendario, trattamento dei dati ripetuti, dei picchi anomali, controllo delle direzioni di provenienza), fino ad ottenere serie temporali omogenee. Nel seguito si descrive brevemente l'attività di validazione svolta sui dati di vento, onde e livello del mare rispettivamente.

#### 3.2.1 Validazione Dati di Vento

La metodologia applicata nel presente studio ha previsto l'utilizzo delle serie temporali ECMWF, di durata 36 anni, per la caratterizzazione delle condizioni anemologiche al largo del Golfo di Oristano. E' noto che i dati ricostruiti da modelli meteorologici tendono a sottostimare l'intensità del vento, specie per gli eventi dominanti, e si pone quindi la necessità di validare tali dati sulla base di misure il più possibile sito-specifiche.

Nella Rev.0 di questo studio, per la validazione si è fatto riferimento alle elaborazioni statistiche denominate "CLINO" relative alla stazione meteorologica AMI di Capo Frasca, realizzate e distribuite da AMI su base trentennale (1961-1990). Era stata individuata una metodologia di confronto tra i due set di dati (ECMWF e CLINO) che permettesse di ottenere opportuni coefficienti di correzione delle serie temporali ECMWF. Indicheremo questa fase come STEP 1.

Successivamente all'emissione della Rev.0, è stato possibile reperire la serie temporale del vento misurato presso la stessa stazione (AMI di Capo Frasca) nel periodo dal 01/01/1985 al 31/12/2014, ritenuti essere i più aggiornati nonché appropriati alla descrizione della fenomenologia locale. Dopo aver validato la serie, essa è stata utilizzata per verificare che il risultato della validazione della serie ECMWF effettuata allo STEP 1 fosse adeguatamente confrontabile con queste ulteriori misure reperite. Indicheremo questa fase come STEP 2.

Nel seguito, si descrivono brevemente le metodologie applicate nei due step di validazione.

### 3.2.1.1 Validazione Dati di Vento: STEP 1

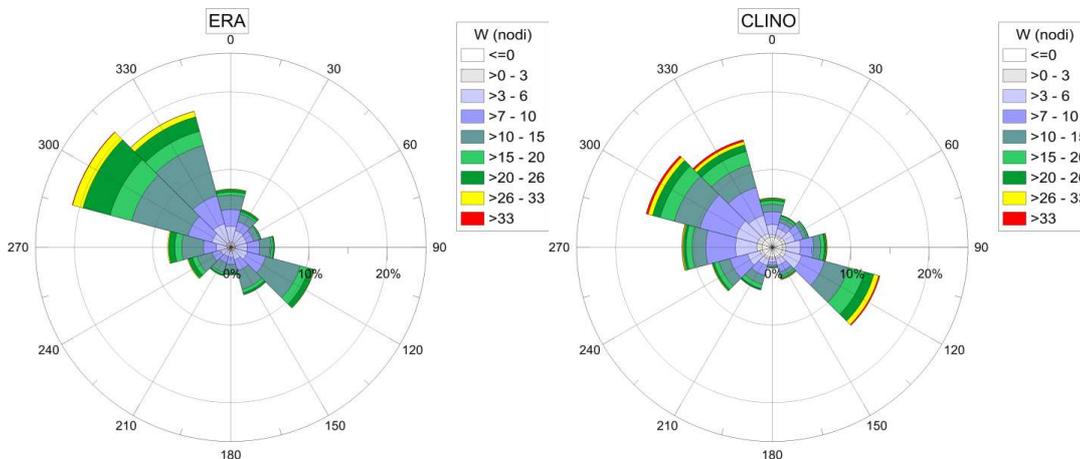
Il confronto è stato effettuato tra il punto ERA\_ORI e le elaborazioni statistiche CLINO di Capo Frasca (1961-1990). Tali statistiche sono fornite per classi di vento da 3 a 33 nodi. Non sono specificati i valori superiori a 33 nodi. La metodologia applicata nella Rev.0 è stata la seguente:

1. Confronto delle distribuzioni statistiche direzionali della serie temporale ECMWF ERA\_ORI (pannello a sinistra in Figura 3.2) e dei dati misurati CLINO (pannello a destra in Figura 3.2);
2. Confronto delle distribuzioni omnidirezionali (Tabella 3.1, Figura 3.3), finalizzato all'individuazione del coefficiente di correzione da applicare alla serie ERA\_ORI. Non avendo informazioni sul massimo vento misurato, abbiamo attuato due ipotesi plausibili: 45 e 50 nodi;
3. Applicazione del coefficiente correttivo ai valori di velocità del vento di tutta la serie ERA\_ORI;
4. Elaborazione statistica della serie ERA\_ORI.

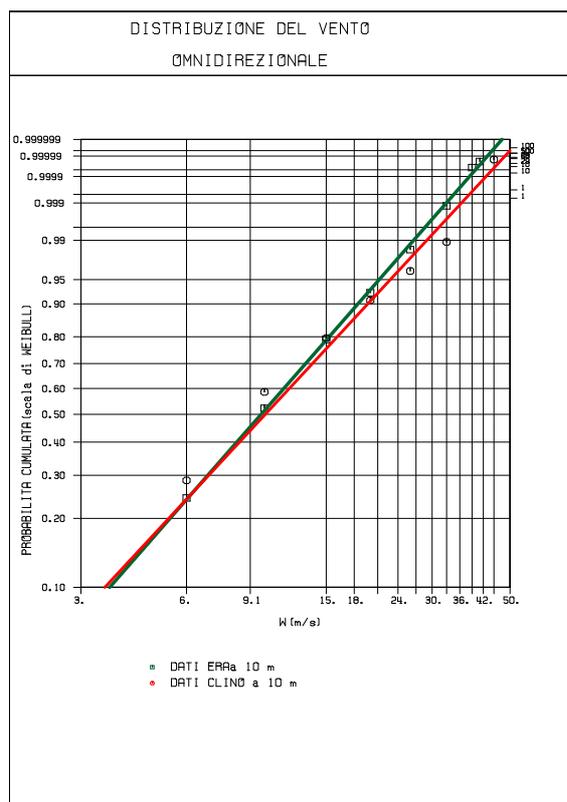
Come si nota da Figura 3.2, le due distribuzioni direzionali sono in buon accordo. Figura 3.3 mostra come anche le distribuzioni omnidirezionali, riportate su diagramma di Weibull, siano del tutto confrontabili. Questo indica che le due popolazioni di dati rappresentano mediamente lo stesso clima anemologico. Come atteso, il vento ricostruito dai dati ECMWF sembra sottostimare gli eventi più alti: tale discrepanza si riduce mediante l'applicazione di un fattore correttivo debitamente stimato.

**Tabella 3.1: Validazione STEP 1 - Valori Estremi Omnidirezionali ottenuti dai Dati "CLINO" (Misurati) e Dati "ECMWF"(Hindcast)**

	Function	$\alpha$	$\beta$	R	Periodo di Ritorno				
					1	10	30	50	100
<b>OMNI "CLINO" MISURE AMI 1962-1990 (Velocità massima: 45 nodi)</b>	Weib. 2	12.226	1.825	0.9912	38.2	43.8	46.3	47.5	49.0
<b>OMNI "CLINO" MISURE AMI 1962-1990 (Velocità massima: 50 nodi)</b>	Weib. 2	12.464	1.752	0.9926	40.7	47.1	50.0	51.2	52.9
<b>OMNI "ECMWF" HINDCAST 1979-2013 (Velocità massima: 41 nodi)</b>	Weib. 2	11.868	1.895	0.9995	33.8	39.1	41.3	42.4	43.8
Coefficiente Correttivo Omnidirezionale					1.12-1.21				



**Figura 3.2: Validazione STEP 1 - Rosa dei Venti ECMWF Offshore Oristano 1979-2014 e CLINO AMI Capo Frasca 1962-1990**



**Figura 3.3: Validazione STEP 1 - Confronto tra le Distribuzioni Omnidirezionali del Vento (in Nodi) Ottenute dai Dati “ECMWF” (Hindcast, linea verde) e “CLINO” (Misurati, linea rossa)**

### 3.2.1.2 Validazione Dati di Vento: STEP 2

In questo secondo step, il confronto è stato effettuato tra i dati ECMWF corretti risultato dello STEP 1 e la serie temporale AMI Capo Frasca (1985-2014). La metodologia applicata è stata la seguente:

1. Validazione della serie temporale AMI;
2. Confronto tra la serie AMI e la serie ECMWF corretta con i coefficienti individuati allo STEP 1;
3. Confronto tra le distribuzioni omnidirezionali, finalizzato all'accettazione dei valori estremi stimati nella Rev.0 sulla base delle nuove misure disponibili, o in caso contrario alla definizione di nuovi valori estremi;
4. Individuazione della relazione tra il vento orario e la raffica nei dati misurati da AMI e confronto con la relazione utilizzata nella Rev. 0 (par. 4.3.2).

La validazione della serie temporale AMI ha messo in luce la presenza di molti valori mancanti (Tabella 3.2) che rendono, purtroppo, la serie temporale poco affidabile per l'estrapolazione dei valori estremi. L'elevato numero di dati "buco" deriva per lo più dalla mancata misurazione dei dati di vento nelle ore notturne, in cui la stazione risulta "spenta" (dalle 19 alle 6), come mostrato in Tabella 3.3. Sono stati individuati, inoltre, alcuni anni di malfunzionamento dello strumento di misura: negli anni 2011, 2012 e 2013 la percentuale dei dati di vento variabile raggiungevano rispettivamente il 26, 47 e 54%. Questi dati sono stati pertanto rimossi dalla serie.

Il confronto tra i dati misurati e ricostruiti è stato effettuato sia per quanto riguarda i valori di intensità che le direzioni di provenienza.

Il confronto tra le distribuzioni omnidirezionali di intensità del vento AMI misurato e ECMWF (questi ultimi corretti con i coefficienti individuati allo STEP 1) è stato effettuato mediante l'uso del QQ-plot, una tecnica grafica che confronta i quantili dei due set di dati per verificare se provengono da popolazioni con distribuzioni statistiche analoghe oppure no. I QQ-plot delle distribuzioni omnidirezionali dei dati contemporanei (stessa data/ora) (Figura 3.4) mostrano una sovrastima da parte dei dati ECMWF per intensità del vento inferiori a 20 m/s e una sottostima dei valori più intensi. Tuttavia, il valore massimo delle due serie temporali è confrontabile. Dal confronto emerge che un'ulteriore correzione dei dati ECMWF non sarebbe consigliata: la scarsa bontà del fitting tra le due popolazioni di dati è da imputare allo scarso numero di valori validi nella serie misurata (oltre il 40% dei dati misurati nel periodo considerato era mancante).

Il confronto delle distribuzioni estreme omnidirezionali (AMI e ECMWF, corretti con i coefficienti individuati allo STEP 1) mostra un buon accordo. La Figura 3.5 mostra le distribuzioni omnidirezionali riportate su diagramma di Weibull. Il grafico suggerisce che le due popolazioni di dati rappresentano mediamente lo stesso clima anemologico e che la correzione dei dati ECMWF effettuata allo STEP 1 può essere considerata accettabile sulla base delle misure più recenti.

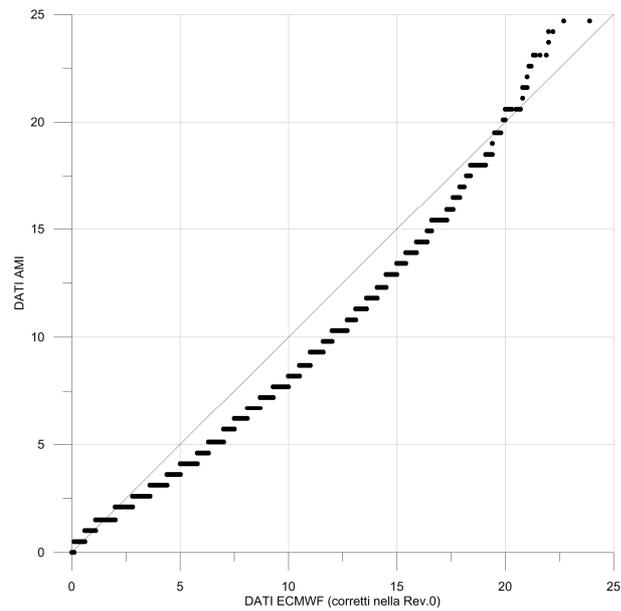
Il confronto delle distribuzioni direzionali ha messo in evidenza alcune differenze nelle direzioni di provenienza dei venti. In Figura 3.6 sono riportate le rose dei venti misurati (AMI) e ricostruiti (ECMWF, corretti con i coefficienti individuati allo STEP 1). Per facilitare il confronto le rose sono riferite a settori di 22.5°. Risulta evidente che i dati misurati presentano un numero maggiore di eventi da SE, O e NO rispetto ai dati ricostruiti.

**Tabella 3.2: Validazione STEP 2 - Numero e Percentuale di Dati Validi della Serie AMI Capo Frasca (1985-2014) per ogni Anno di Misura**

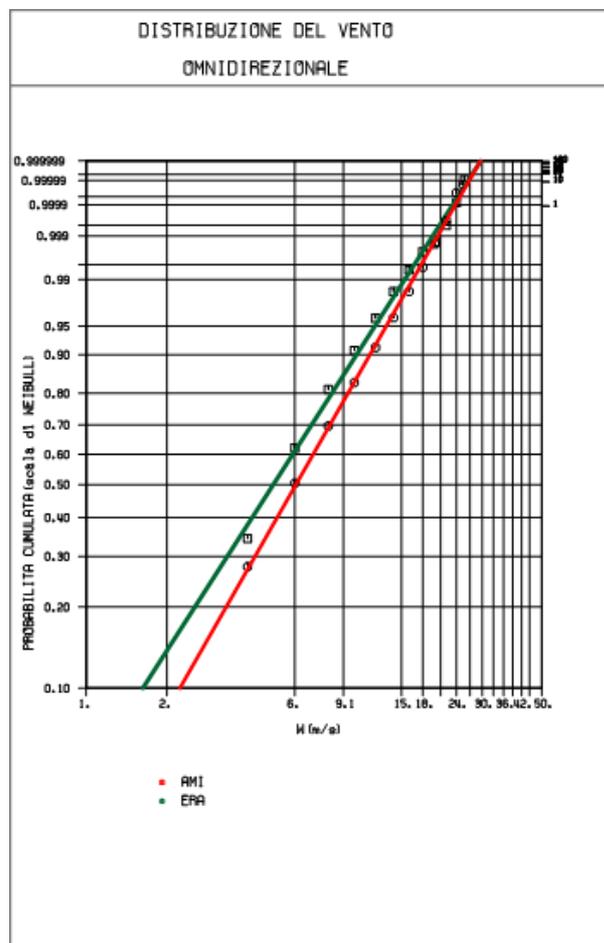
Anno	N. Dati Validi Vento	%	N. Dati Validi Raffica
1985	2902	33.2	39
1986	2052	23.4	50
1987	2294	26.2	12
1988	3039	34.6	29
1989	3471	39.6	19
1990	1940	22.1	1
1991	859	9.8	28
1992	4125	47.0	56
1993	4177	47.7	105
1994	4207	48.0	79
1995	4256	48.6	88
1996	4703	53.5	116
1997	4342	49.6	69
1998	4645	53.0	83
1999	3472	39.6	83
2000	5319	60.6	106
2001	5011	57.2	81
2002	5038	57.5	54
2003	5451	62.2	217
2004	5738	65.3	146
2005	4783	54.6	156
2006	2699	30.8	45
2007	2957	33.8	169
2008	2521	28.7	152
2009	3126	35.7	153
2010	3194	36.5	153
2011	968	11.1	66
2012	1816	20.7	29
2013	1245	14.2	33
2014	5388	63.6	94

**Tabella 3.3: Validazione STEP 2 - Percentuale di Dati Validi della Serie AMI Capo Frasca (1985-2014) per ogni Anno e Ora di Misura**

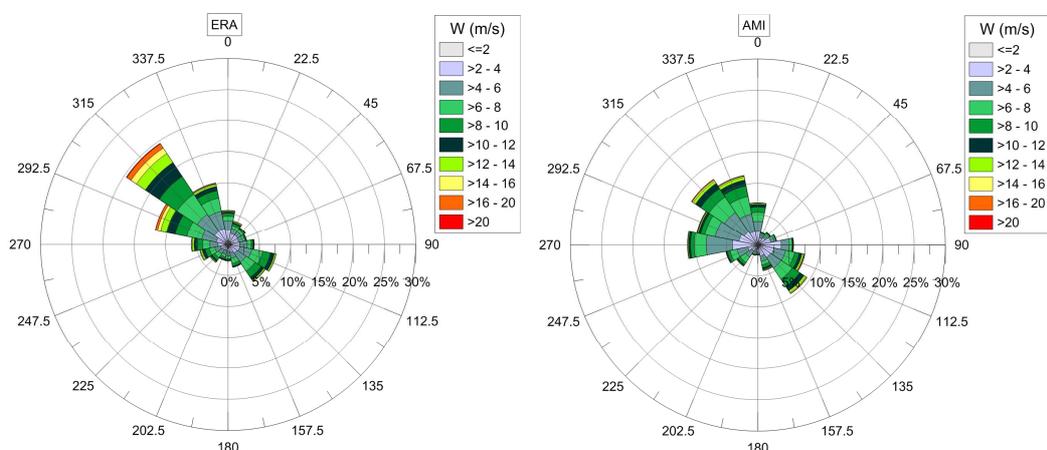
Anno	Ora (UTC)																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1985	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.6	2.6	2.8	2.7	2.8	2.8	2.7	2.6	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1986	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8	1.8	2.0	1.7	1.9	2.0	1.9	2.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1987	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	1.5	1.8	1.9	2.0	2.1	2.3	2.2	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.7	2.8	2.6	2.8	2.9	2.9	2.8	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.5	2.6	2.7	2.8	3.1	3.3	3.4	3.5	3.6	3.5	3.2	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1992	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	3.4	3.5	3.6	3.5	3.5	3.8	3.6	3.7	3.8	3.7	3.7	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1993	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	3.7	3.7	3.6	3.4	3.3	3.8	3.7	3.7	3.8	3.8	3.8	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1994	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	2.4	3.3	3.2	3.3	3.3	3.0	3.2	3.5	3.4	3.3	3.5	3.4	3.4	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1995	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	3.2	3.4	3.3	3.3	3.4	2.5	2.8	3.5	3.3	3.3	3.5	3.4	3.4	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1996	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	3.3	3.6	3.6	3.5	3.4	3.4	3.3	3.9	3.8	3.5	3.8	3.7	3.7	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1997	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	3.0	3.2	3.3	3.2	3.2	3.3	3.4	3.6	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1998	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	3.6	3.4	3.5	3.6	3.5	3.6	3.6	3.7	3.6	3.6	3.6	3.4	3.4	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	2.6	2.8	2.6	2.5	2.7	2.4	2.6	2.9	2.6	2.5	2.8	2.6	2.6	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	1.5	0.0	0.0	0.0	3.8	3.8	3.8	3.9	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2001	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	3.4	3.4	3.8	3.9	3.9	3.9	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9	3.9	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2002	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	3.8	3.8	3.8	3.8	3.9	3.9	3.9	3.8	3.9	3.8	3.9	3.9	3.8	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2003	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1	4.1	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2004	2.9	0.0	0.0	2.9	3.7	3.8	3.8	3.8	3.8	3.7	3.8	3.8	3.7	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7	0.1	0.0	2.9	0.0	0.0
2005	2.9	0.0	0.0	2.9	3.0	2.9	3.0	3.0	3.1	3.0	3.0	3.1	3.1	3.0	3.1	3.1	3.2	3.1	3.1	0.0	0.0	2.9	0.0	0.0
2006	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.3	2.4	2.4	2.3	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	2.6	2.4	2.5	2.6	2.5	2.5	2.6	2.5	2.5	2.6	2.5	2.4	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2008	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	2.1	2.1	2.1	2.2	2.1	2.1	2.2	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2009	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.6	2.7	2.7	2.6	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	2.7	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2011	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2012	1.1	0.0	0.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.1	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0
2013	0.8	0.0	0.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0
2014	3.0	0.0	0.0	3.1	3.1	3.2	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.8	3.7	3.6	3.7	3.7	3.7	3.6	0.0	0.0	3.2	0.0	0.0
TOT.	12.3	0.1	0.0	10.9	43.7	50.3	79.6	79.9	81.2	82.0	80.9	82.1	86.5	84.4	84.4	86.1	84.7	84.1	83.6	0.4	0.2	10.9	0.0	0.0



**Figura 3.4: Validazione STEP 2 - QQ-PLOT Tra Dati di Vento AMI (Misurati) e ricostruiti (ECMWF corretti STEP 1)**



**Figura 3.5: Validazione STEP 2 - Confronto tra le Distribuzioni Omnidirezionali del Vento ottenute dai Dati ECMWF(corretti STEP 1, linea verde) e dai Dati AMI (1985-2014, linea rossa)**



**Figura 3.6: Validazione STEP 2 - Rosa dei Venti ECMWF(Ricostruiti 1979-2014, corretti STEP1) e AMI (Misure 1985-2014)**

### 3.2.2 Validazione Dati di Onde

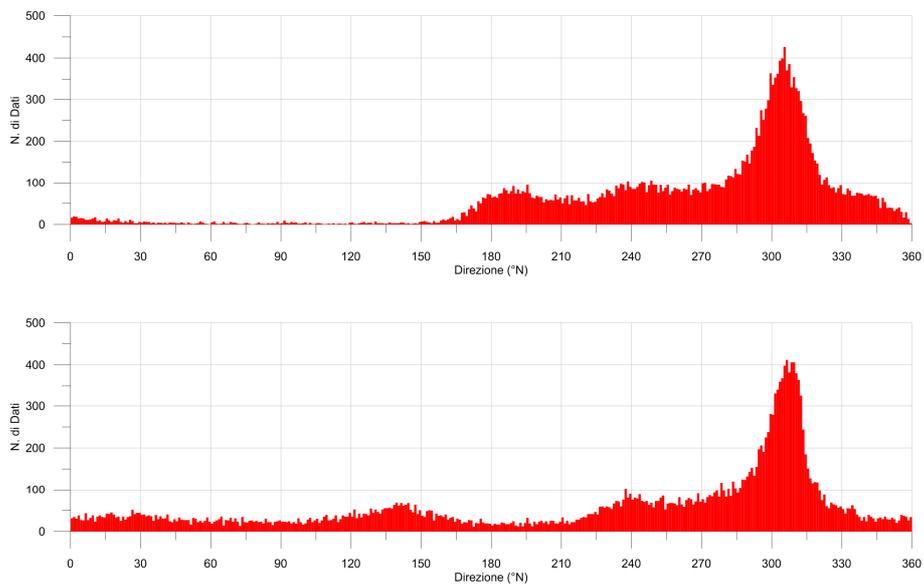
La metodologia applicata nel presente studio ha previsto l'utilizzo delle serie temporali ECMWF, di durata 36 anni, per la caratterizzazione delle condizioni meteomarine al largo del Golfo di Oristano e la successiva propagazione analitica a costa. Per la validazione di questi dati si è fatto riferimento alle misure RON di Alghero.

Poiché una prima analisi dei dati di onde ha messo in evidenza una generale sottostima dei dati di hindcast (ECMWF) rispetto alle misure (RON), si è ritenuto opportuno individuare una metodologia di confronto tra i due set di dati che permettesse di correggere le serie temporali ECMWF.

Il confronto è stato effettuato tra il punto ECMWF ERA\_ALG e le misure della boa RON di Alghero (Figura 3.1). Indicando quindi con A e B rispettivamente la serie ECMWF e la serie dei dati misurati della boa RON, la metodologia applicata è la seguente:

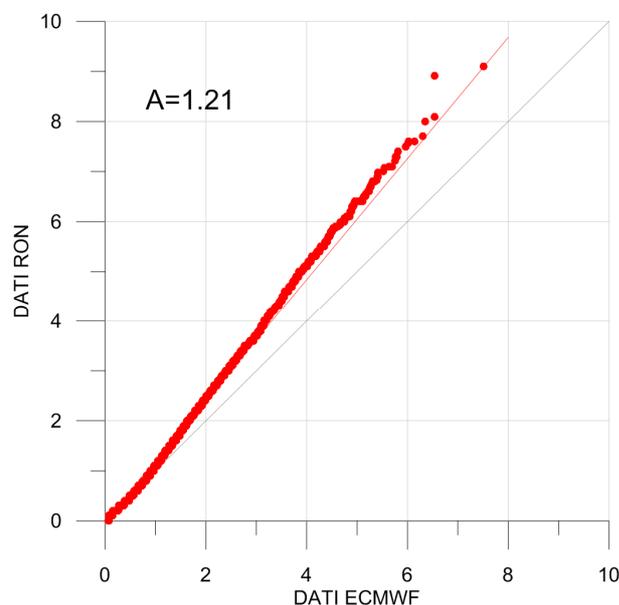
1. Selezione delle sole misure contemporanee nelle serie A e B;
2. Confronto delle distribuzioni direzionali A e B;
3. Confronto grafico (QQ-plot) delle distribuzioni omnidirezionali A e B considerando solo i dati simultanei (stessa data/ora);
4. Stima del coefficiente di correzione omnidirezionale da applicare a ECMWF.

Il confronto delle distribuzioni direzionali ha messo in evidenza, per alcune direzioni, differenze sostanziali. In Figura 3.7 sono riportati gli istogrammi di direzione dei dati simultanei (stessa data/ora) della serie misurata e ricostruita. Dalle misure (pannello superiore) risulta evidente che le onde provengono principalmente dai settori compresi tra 180 e 355°N, mentre nei dati ricostruiti (pannello inferiore) ci sono meno eventi provenienti da 180°N e un numero non trascurabile di eventi provenienti da direzioni comprese tra 0 e 165°N. Tuttavia, tali differenze riguardano settori che non sono particolarmente critici nel caso specifico del progetto in esame, e per questo si è proceduto all'individuazione di un fattore correttivo omnidirezionale per le onde ECMWF.



**Figura 3.7: Istogrammi della Densità di Distribuzione delle Direzioni dei Dati di Onde Misurati (Sopra) e Ricostruiti (Sotto)**

Il confronto delle distribuzioni omnidirezionali dei dati contemporanei (stessa data/ora), misurati in A e in B è stato effettuato mediante l'uso del QQ-plot.



**Figura 3.8: QQ-PLOT per il Confronto dei Dati di Onde Misurati (RON) e Ricostruiti (ECMWF)**

In Figura 3.8 viene mostrato il QQ-Plot ottenuto. Il confronto è stato effettuato su un periodo di 17 anni, escludendo gli anni 2002 e 2003 perché considerati dubbi a causa di una più omogenea distribuzione nelle direzioni rispetto agli altri anni. Il confronto grafico in Figura 3.8 evidenzia la generale sottostima delle onde

ECMWF: la retta di colore rosso rappresenta il miglior fitting lineare teorico tra le due distribuzioni a confronto, ed è anche il coefficiente di correzione che è stato applicato ai valori di  $H_s$  della serie ECMWF.

Lo stesso coefficiente è stato applicato alla serie al largo di Oristano (ERA\_ORI, si veda Figura 3.1), che presenta un clima molto simile a quello individuato al largo di Alghero (ERA\_ALG). La serie così ottenuta è considerata rappresentativa delle condizioni meteomarine al largo del Golfo di Oristano, ed è stata analizzata nell'ambito del presente studio.

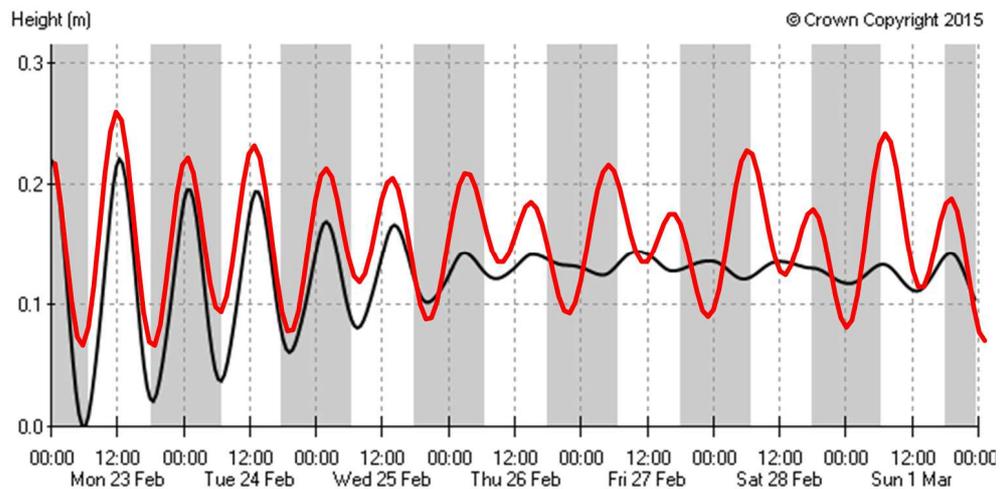
### 3.2.3 Validazione Dati di Livello

Per quanto riguarda i dati di livello, la validazione dei dati ricostruiti dal modello OTPS è stata effettuata facendo riferimento alla marea prevista da Admiralty Easytide, servizio di United Kingdom Hydrographic Office. Questo servizio fornisce la previsione del livello di marea in diversi punti, basata sulle armoniche di marea estrapolate da misure locali. Ai fini di questo studio sono state utilizzate le stazioni di Carloforte e Cagliari: pur essendo tali località molto distanti dall'area di studio, rappresentano comunque un buon riferimento per verificare l'attendibilità del modello OTPS.

Sono quindi state estratte le serie di previsione della marea del modello OTPS anche nei seguenti punti:

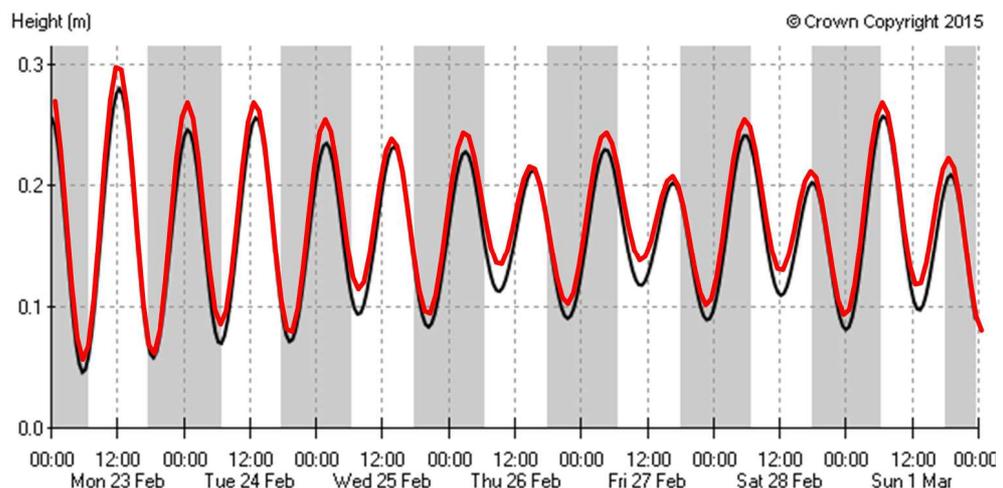
- Nel tratto di mare antistante Carloforte (OTPS\_Carloforte): 39.15°N, 8.35°E;
- Nel golfo di Cagliari (OTPS\_Cagliari): 39.15°N, 9.10°E.

Le Figura 3.9 e Figura 3.10 mostrano il confronto tra le previsioni nelle due stazioni. È evidente che nel caso di Carloforte il modello non ricostruisce bene il livello di marea di questa stazione per la sua particolare ubicazione geografica. La previsione del modello OTPS, sebbene effettuata su maglie molto fitte, non riesce a ricostruire bene la marea in piccoli golfi o in canali la cui morfologia influenza direttamente la marea con fenomeni di amplificazione o di sfasamento.



**Figura 3.9: Confronto tra la Previsione di Marea di OTPS (Rosso) e Easytide (Nero) a Carloforte**

Si osservi come invece, nel caso di Cagliari, il modello ricostruisce bene il livello di marea di questa stazione. È stato quindi scelto di estrarre i valori di livello della marea in un punto al largo del golfo di Oristano onde evitare di incorrere negli errori sopra descritti.



**Figura 3.10: Confronto tra la Previsione di Marea di OTPS (Rosso) e Easytide (Nero) a Cagliari**

## **4 CRITERI METODOLOGICI**

Nel seguito vengono presentati i principali criteri metodologici utilizzati.

### **4.1 CRITERI GENERALI**

La metodologia applicata nel presente studio consiste in un'analisi dei dati di onde, vento e livello del mare finalizzata alla descrizione delle condizioni tipiche ed estreme nell'area di studio.

Le attività svolte si possono sintetizzare in:

- acquisizione di serie temporali di dati anemologici (intensità e direzione del vento), di moto ondoso (altezza, periodo e direzione delle onde) e di livello marino;
- elaborazione e analisi dei dati e definizione del clima locale in condizioni tipiche;
- stima dei valori estremi nell'area di studio.

E' stato descritto il clima medio annuale e stagionale. Le stagioni considerate sono le seguenti: mesi di dicembre-gennaio-febbraio per l'inverno, marzo-aprile-maggio per la primavera, giugno-luglio-agosto per l'estate e settembre-ottobre-novembre per l'autunno.

### **4.2 STIMA DEI VALORI ESTREMI**

Nell'ambito dell'ingegneria costiera, la definizione dei parametri meteo-marini di progetto è basata sulla stima dei valori estremi di una grandezza (vento, moto ondoso, livello del mare), cioè di valori che abbiano associato un rischio di superamento nelle varie fasi di messa in opera e vita operativa delle strutture e delle opere in progetto.

La stima degli estremi comporta la definizione dei parametri caratteristici della distribuzione statistica dei valori rilevati, caratteristiche a priori ignote sia per quanto riguarda la forma funzionale sia per quanto riguarda i parametri della distribuzione che descrive tale forma funzionale.

A posteriori la scelta può essere giustificata con i metodi di analisi di "bontà del fitting" tra la distribuzione dedotta dai dati misurati e distribuzioni di probabilità che, negli anni, sono state proposte ed utilizzate. La consuetudine ha portato poi ad una certa standardizzazione nell'uso di tali distribuzioni teoriche: in tal senso la stima dei valori estremi di vento, onde e correnti viene effettuata con la distribuzione di Weibull o, più raramente, con quella di Gumbel, quest'ultima utilizzata soprattutto quando siano disponibili solo i massimi rilevati.

La teoria dei valori estremi fornisce dunque stime della probabilità che si verifichino, in un certo periodo temporale, valori estremi di un determinato parametro.

Dato un insieme N di valori estremi di una grandezza, sia  $F(x)$  la distribuzione estrema che meglio si adatta ad essi (il ragionamento è comunque indipendente dal tipo di distribuzione considerato).

Il periodo di ritorno  $T(x)$  dell'evento  $x$  è definito come il numero di anni entro i quali  $x$  viene superato mediamente una volta. Allora  $T(x)$  è collegato a  $F(x)$  da:

$$T(x) = \frac{1}{[1 - F(x)]^\lambda} \quad (4.1)$$

dove  $\lambda$  è il numero medio di eventi annui.

La probabilità che il superamento di  $x$  avvenga entro un anno è  $1/T(x)$ , la probabilità di non superamento è  $[1 - 1/T(x)]$ , e quindi la probabilità che  $x$  non sia superato entro  $t$  anni è data da:

$$P^-(x) = \left[1 - \frac{1}{T(x)}\right]^t \quad (4.2)$$

(Si indica con  $P^-$  la probabilità di non-superamento, con  $P^+$  quella di superamento. E' evidente che  $P^- + P^+ = 1$ ).

Con l'esclusione dei più bassi valori di  $T$ , la (4.2) è sostituibile con ottima precisione (Gumbel, 1958) con:

$$P^-(x) = e^{-\frac{t}{T(x)}} \quad (4.3)$$

E' evidente che per applicare la (4.3) è necessario conoscere  $T(x)$ , e quindi  $F(x)$ .

Per  $t=T$  si ottiene  $P=63.2\%$ : tale valore è dunque la probabilità media o "rischio medio" associato ad  $x$  nel tempo  $T$ .

Per  $t < T$  tale rischio è ovviamente ridotto: ad es. per  $t=30$  anni e  $T=100$  anni la probabilità di superamento è del 25.9% e così via.

Nel caso attuale si procede alla stima dei valori estremi per i periodi di ritorno di 1, 10, 25, 50, 75 e 100 anni.

## 4.3 VENTO

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardanti il trattamento dei dati anemologici.

### 4.3.1 Profilo del Vento

In accordo con quanto prescritto dalla ISO di riferimento (ISO 19901), il profilo medio di velocità del vento  $U_w(z)$  durante le perturbazioni è ben riprodotto da un profilo logaritmico. Il profilo logaritmico raccomandato è il seguente:

$$U_{w,1h}(z) = U_{w0} [1 + C \ln(z/z_r)] \quad (4.4)$$

dove

$U_{w,1h}(z)$  vento medio orario riferito ad una generica quota  $z$  sul livello medio mare

$U_{w0}$  vento medio orario riferito alla quota di riferimento  $z_r$   
coefficient dimensionale dipendente dalla quota di riferimento  $z_r$  e dalla velocità di riferimento  $U_{w0}$ . Per  $z_r = 10$  m:

$$C = (0,0573) (1 + 0,15 U_{w0})^{1/2}$$

con  $U_{w0}$  è espresso in (m/s)

$z$  generica quota rispetto al livello medio del mare

$z_r$  quota di riferimento rispetto al livello medio del mare ( $z_r = 10$  m)

L'equazione suddetta è valida in unità SI.

#### 4.3.2 Durata del Vento

Per la stima di velocità del vento mediate su durate medie diverse (i.e., 1 ora, 10 minuti, 1 minuto), in questo studio si è fatto riferimento alla ISO 19901 (ISO 19901): noto il vento medio orario  $U_{w,1h}(z)$  come espresso in eq. (4.5), il vento medio riferito a durate inferiori è dato da:

$$U_{w,T}(z) = U_{w,1h}(z) [1 - 0,41 I_u(z) \ln(T/T_0)] \quad (4.5)$$

dove:

$U_{w,T}(z)$  velocità del vento riferito a quota  $z$  rispetto il livello medio del mare e mediato su una durata generica  $T < 3,600$  s

$U_{w,1h}(z)$  vento medio orario riferito ad una generica quota  $z$  sul livello medio mare (si veda eq. (4.5))

$T$  generica durata di riferimento con  $T < T_0 = 3,600$  s

$T_0$  durata media di riferimento standard 1 ora  $T_0 = 3,600$  s

$I_u(z)$  intensità della turbolenza del vento a quota  $z$  rispetto al livello medio del mare, che dipende dalla  $U_{w0}$  secondo la relazione:

$$I_u(z) = (0,06) [1 + 0,043 U_{w0}] (z/z_r)^{-0,22} \quad (4.6)$$

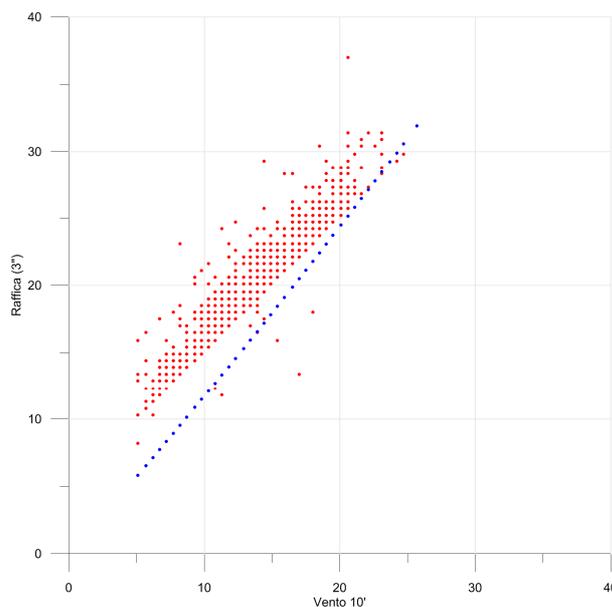
Le equazioni suddette sono valide in unità SI.

In questa Rev.1 dello studio, la relazione tra il vento dei 10 minuti e la raffica (3 secondi) è stata invece individuata a partire dai dati misurati a Capo Frasca, che contengono i valori di intensità del vento mediato su 10' ( $V_{10'}$ ) e su 3" ( $V_{3''}$ ). In Figura 4.1 viene riportato lo scatter diagram tra  $V_{10'}$  e  $V_{3''}$  (in rosso) della serie

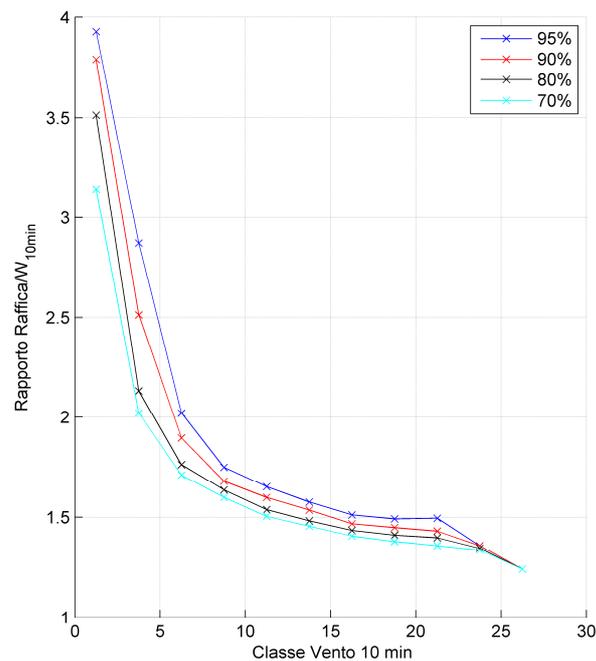
AMI, mentre in blu viene riportato il valore della raffica calcolato con la relazione (4.5) a partire dal vento dei 10 minuti. Dal confronto emerge, quindi, che la relazione (4.5) sottostima il valore della raffica rispetto ai dati misurati. Si consiglia, pertanto, di utilizzare la relazione (4.5) per stimare il valore rappresentativo dei 10 minuti e del minuto, e la relazione (4.7) ricavata dai dati misurati per stimare la raffica, a partire dal vento estremo dei 10 minuti.

Il rapporto tra la raffica ( $R$ ) e il vento dei 10 minuti ( $V_{10'}$ ) è stato ricavato per ogni classe di  $V_{10'}$  di 2.5 m/s. Per ogni classe è stato calcolato il rapporto  $Q=R/V_{10'}$ , ne sono stati calcolati i quantili di ordine 0.7, 0.8, 0.9 e 0.95 e infine riportati in forma grafica in Figura 4.2. I quantili indicano il valore di  $Q$  tale che il 70, 80, 90 o 95% dei valori di  $Q$  sia inferiore a quel dato: dalla Figura 4.2 emerge che per valori di  $V_{10'}$  maggiori di 15 m/s il rapporto  $R/V_{10'}$  del 70% dei dati ha valore inferiore a 1.4, mentre il rapporto  $R/V_{10'}$  del 95% dei dati ha valore inferiore a 1.5. Si suggerisce di utilizzare la relazione (4.7) per calcolare la raffica, a partire dal vento estremo dei 10 minuti.

$$V_{3''} = V_{10'} * 1.5 \quad (4.7)$$



**Figura 4.1: Scatter Diagram tra Velocità del Vento dei 10' e la Raffica (Misure in Rosso, Dati ricostruiti in Blu)**



**Figura 4.2: Rapporto tra Raffica e Vento dei 10 Minuti Ricavato dai Dati Misurati**

#### 4.3.3 Valori Estremi

I valori estremi, direzionali sono stati calcolati applicando la funzione probabilistica di Weibull:

$$P(w < W) = 1 - \exp[-(w/\alpha)^\beta] \quad (4.8)$$

dove  $P(w < W)$  è la probabilità di non superamento ossia la probabilità che un evento di intensità  $w$  sia minore del valore assegnato  $W$ ,  $w$  è la variabile (velocità del vento),  $\alpha$  e  $\beta$  sono i parametri della distribuzione calcolati mediante la tecnica di best-fit ai minimi quadrati.

#### 4.4 MOTO ONDOSO

I valori di altezza significativa su cui si basa il presente studio sono desunti dallo spettro di energia del moto ondoso, sono cioè calcolati nel “dominio della frequenza”. Tale valore viene generalmente indicato con  $H_{m0}$  (l'altezza d'onda calcolata dal momento spettrale di ordine 0 e quindi rappresentativa dell'energia dello spettro) per distinguerlo dal valore  $H_s$  calcolato nel “dominio del tempo” e definito come la media di un terzo delle onde singole più elevate.

Tuttavia, nel seguito tale valore verrà indicato come altezza d'onda significativa ( $H_s$ ).

#### 4.4.1 Relazioni fra le Grandezze Caratteristiche del Moto Ondoso

Generalmente i periodi associati all'altezza d'onda significativa  $H_s$  sono il "periodo significativo"  $T_s$ , calcolato come media dei periodi associati alle altezze con cui viene calcolata l'altezza d'onda significativa, e il periodo di picco  $T_p$ .

Per definire il periodo significativo da associare all'altezza d'onda significativa estrema occorre dunque effettuare un'analisi della probabilità congiunta altezza-periodo sulla base dei dati misurati, in quanto il periodo dell'onda non è una variabile indipendente ma, al contrario, è strettamente legato all'altezza d'onda.

Il problema, particolarmente attuale nell'ingegneria off-shore quando si stimano le onde di progetto, è stato a lungo studiato ed analizzato: non esistono tuttavia relazioni valide in ogni situazione, in quanto sono l'orografia/morfologia del bacino e le caratteristiche anemologiche dell'area a generare onde più o meno ripide.

Per l'area in esame è stata utilizzata la relazione:

$$H_s = 0.06 T_s^2 \quad (4.9)$$

dedotta dall'analisi di numerosi dati rilevati in vari bacini (Grancini et al, 1979; Cavalieri et al, 1986; Rampolli et al, 1996). Per associare ad  $H_s$  il valore del periodo di picco  $T_p$ , si può fare invece uso della relazione (Boccotti, 1997):

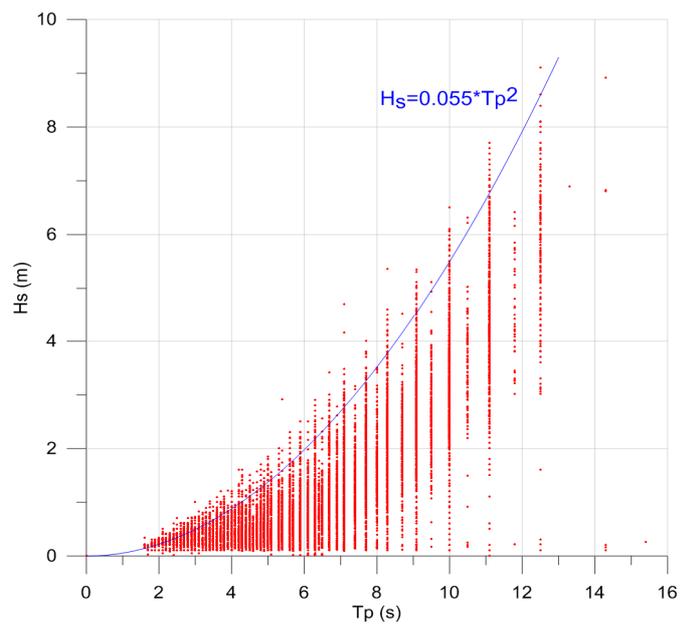
$$H_s = 0.055 T_p^2 \quad (4.10)$$

che deriva dal considerare le mareggiate ben rappresentate da uno spettro Jonswap. La Figura 4.3 mostra lo scatter diagram tra  $H_s$  e  $T_p$  relativo ai dati della boa RON di Alghero, che dimostra la validità di questa relazione per il Mar di Sardegna.

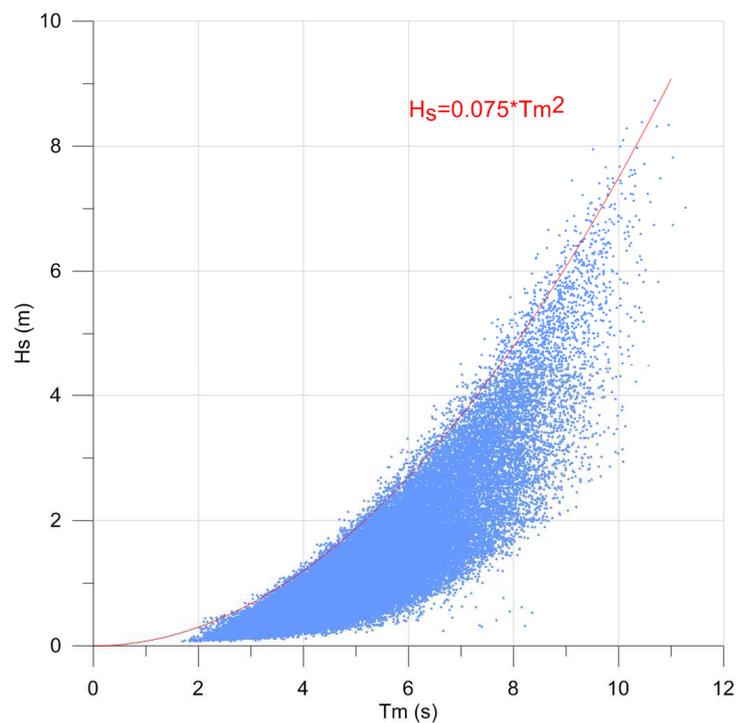
A partire dalla serie temporale di onde del Punto ERA\_ORI è stata inoltre ricavata la relazione che lega il periodo medio  $T_m$  all'altezza d'onda significativa  $H_s$ :

$$H_s = 0.075 T_m^2 \quad (4.11)$$

La Figura 4.4 mostra lo scatter diagram tra  $H_s$  e  $T_m$ .



**Figura 4.3: Scatter Diagram  $H_s$ - $T_p$  – Dati RON**



**Figura 4.4: Scatter Diagram  $H_s$ - $T_m$  – Dati ERA\_ORI**

#### 4.4.2 Valori Estremi

Per ciascuna delle distribuzioni direzionali sono stati calcolati i coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  della funzione probabilistica di Weibull:

$$P(h < H) = 1 - \exp[-(h/\alpha)^\beta] \quad (4.12)$$

dove  $P(h < H)$  è la probabilità di non superamento ossia la probabilità che un evento di altezza d'onda  $h$  sia minore del valore assegnato  $H$ ,  $h$  è la variabile (altezza d'onda),  $\alpha$  e  $\beta$  sono parametri della distribuzione calcolati mediante la tecnica di best-fit ai minimi quadrati. Nota la distribuzione di probabilità (4.12) è possibile valutare i valori estremi per i differenti periodi di ritorno considerati.

#### 4.5 LIVELLO MARINO

La genesi delle variazioni del livello marino è piuttosto complessa, poiché molteplici sono i fenomeni che possono generare o modificare il movimento delle masse d'acqua. Supponendo che ogni fenomeno causi un singolo effetto possiamo pensare al livello come una semplice sovrapposizione di più vettori del tipo:

$$V = \sum \eta_i \quad (4.13)$$

Una serie temporale  $\eta(t)$  di misure del livello del mare può essere considerata come la risultante della combinazione lineare di due componenti: una deterministica ( $\eta_T(t)$ ) e una stocastica ( $\eta_S(t)$ ):

$$\eta(t) = \eta_T(t) + \eta_S(t) \quad (4.14)$$

La parte deterministica è costituita dall'oscillazione di marea, mentre la parte stocastica  $\eta_S$  è dovuta principalmente agli effetti indotti dal vento e dai gradienti barici.

## 5 REGIME ANEMOLOGICO

Nel presente paragrafo vengono analizzate le caratteristiche anemologiche dell'area di studio. Si ricorda che i dati di base si riferiscono ai dati di vento del database ECMWF ERA- Interim estratti nel Punto ERA\_ORI (Figura 2.1) al largo di Oristano, validati e corretti con la metodologia descritta nel capitolo 3.2.1, che quindi non possono tenere conto degli effetti locali indotti dall'orografia del Golfo di Oristano. Si ritiene tuttavia che i dati suddetti siano sufficientemente rappresentativi delle condizioni anemologiche del porto di Oristano per i settori direzionali non influenzati dalla costa.

Successivamente all'emissione della Rev.0, è stata reperita la serie temporale del vento di Capo Frasca, con la quale è stato possibile valutare se le considerazioni fatte nella Rev.0 fossero accettabili. Le considerazioni relative ai nuovi dati disponibili vengono riportate nel paragrafo 3.2.1.

Sulla base dei nuovi dati reperiti è stato inoltre possibile stimare la relazione tra vento dei 10 minuti e la raffica, utilizzata poi per la stima dei valori estremi delle raffiche riportati in Tabella 5.7 e Tabella 5.9. I dettagli su come è stata ricavata questa relazione vengono descritti nel paragrafo 4.3.2.

### 5.1 CONDIZIONI TIPICHE

La distribuzione annuale dell'intensità del vento per direzione di provenienza è mostrata in Tabella 5.1 e, graficamente, nella Figura 5.1 (rosa del vento).

Il regime medio annuale del vento è caratterizzato da una netta prevalenza dei settori direzionali 300 e 330°N (con il 39% degli eventi) e secondariamente del settore 120°N (11% degli eventi). Il resto degli eventi è distribuito piuttosto equamente tra le altre direzioni.

Per quanto riguarda le intensità, gli eventi con velocità inferiore a 8 m/s sono circa il 70% del totale, quelli inferiori a 20 m/s sono circa il 99%; valori superiori a 20 m/s sono presenti in circa lo 0.1% degli eventi, mentre i valori massimi sono di 26 m/s, provenienti da 60°N.

L'analisi stagionale, è presentata in Tabella 5.2-Tabella 5.5. In Figura 5.2 le relative distribuzioni stagionali dei venti sono mostrate in forma grafica.

Dalle tabelle e dalle figure si nota che il vento proviene principalmente dai settori di 300 e 330°N, come già evidenziato dall'analisi annuale, ma, mentre nelle stagioni invernale, primaverile e autunnale risulta caratterizzato da una netta prevalenza del settore 300°N (circa 22% degli eventi), nella stagione estiva i venti più frequenti sono quelli associati al settore 330°N (circa il 26% degli eventi).

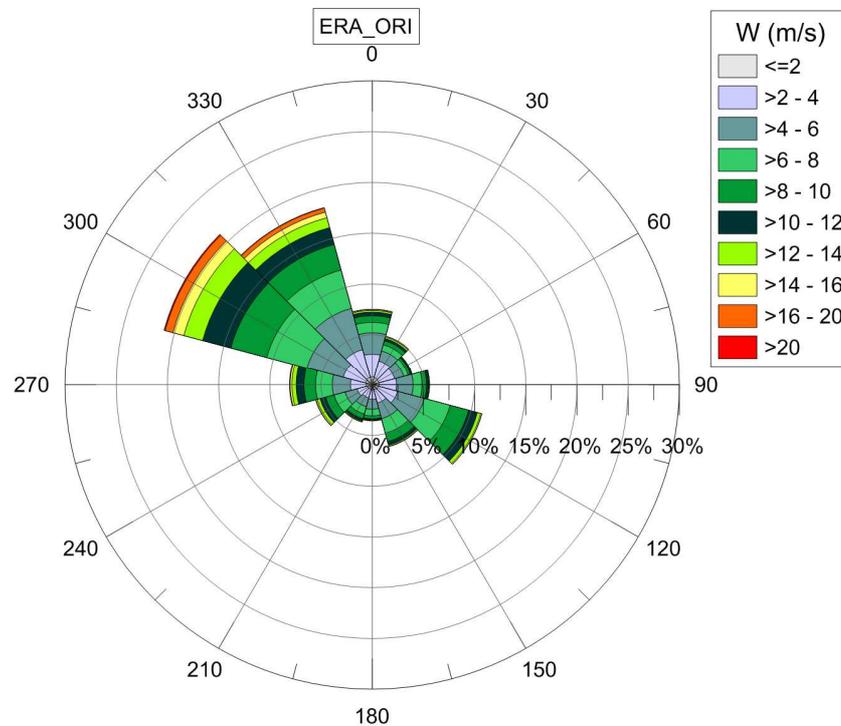
Per quanto riguarda le intensità, dalla Figura 5.2 appare evidente come il periodo estivo risulti caratterizzato da una minore energia rispetto alle altre stagioni: circa l'82% degli eventi risulta inferiore a 8 m/s (70% circa in primavera e autunno e 60% circa in inverno), il 99% circa è inferiore a 14 m/s (97% circa in primavera e

autunno e 92% in inverno) e valori superiori a 14 m/s sono presenti con frequenza inferiore allo 0.1% (3% circa in primavera e autunno e 8% circa in inverno).

**Tabella 5.1: Distribuzione Annuale della Frequenza Percentuale dell'Intensità del Vento per Direzione di Provenienza (Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

Dir (°N)	W (m/s)														TOT
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	
0	0.79	2.30	2.13	1.03	0.65	0.35	0.17	0.09	0.03	0.00	0.00				7.54
30	0.72	1.76	1.06	0.63	0.41	0.23	0.16	0.08	0.02	0.00	0.00				5.07
60	0.67	1.59	0.91	0.46	0.23	0.13	0.03	0.01	0.00				0.00		4.03
90	0.66	1.71	1.62	0.88	0.44	0.20	0.07	0.02	0.00						5.60
120	0.60	1.95	2.71	2.60	1.88	0.88	0.33	0.11	0.02	0.00					11.08
150	0.54	1.34	1.59	1.49	0.85	0.35	0.12	0.02	0.02	0.00					6.32
180	0.52	0.92	0.98	0.66	0.29	0.13	0.05	0.02	0.00						3.57
210	0.47	0.88	0.89	0.75	0.48	0.22	0.08	0.03	0.01	0.00	0.00				3.81
240	0.51	1.03	1.20	1.12	0.85	0.56	0.29	0.12	0.03	0.01	0.00				5.72
270	0.59	1.55	1.77	1.63	1.13	0.76	0.41	0.18	0.05	0.01	0.00				8.08
300	0.66	2.26	3.67	4.07	3.64	2.83	1.90	1.08	0.55	0.25	0.10	0.02			21.03
330	0.76	2.90	4.22	3.90	2.61	1.71	1.01	0.56	0.31	0.13	0.03	0.01			18.15
TOT	7.49	20.19	22.75	19.22	13.46	8.35	4.62	2.32	1.04	0.40	0.13	0.03	0.00		100.00

0.00 SIGNIFICA %<0.01



**Figura 5.1: Rosa Annuale del Vento– Punto ERA\_ORI**

**Tabella 5.2: Inverno - Distribuzione della Frequenza Percentuale  
dell'Intensità del Vento per Direzione di Provenienza (Punto ERA\_ORI di  
Figura 2.1)**

Dir (°N)	W (m/s)														TOT
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	
0	0.45	1.42	1.36	1.22	1.13	0.64	0.39	0.18	0.08		0.02				6.89
30	0.59	1.17	1.30	1.27	0.91	0.64	0.45	0.27	0.04	0.01	0.01				6.66
60	0.48	1.19	1.11	0.89	0.48	0.30	0.09	0.02	0.01						4.57
90	0.38	1.12	1.55	0.95	0.60	0.24	0.15	0.05	0.01						5.05
120	0.53	1.22	2.06	1.67	1.37	0.68	0.32	0.07	0.02	0.01					7.95
150	0.44	1.08	1.42	1.35	0.75	0.42	0.14	0.02	0.02						5.64
180	0.30	0.89	1.20	0.86	0.46	0.24	0.11	0.03							4.09
210	0.37	0.75	1.02	1.12	0.82	0.44	0.16	0.02	0.02	0.01	0.01				4.74
240	0.42	0.94	1.42	1.76	1.25	1.05	0.55	0.24	0.08	0.03					7.74
270	0.38	1.38	1.65	1.96	1.85	1.21	0.91	0.40	0.10	0.04	0.02				9.90
300	0.39	1.53	2.73	3.63	3.47	3.24	2.69	1.92	1.12	0.63	0.21	0.06			21.62
330	0.38	1.80	2.14	2.42	2.10	2.02	1.81	1.12	0.88	0.32	0.11	0.05			15.15
TOT	5.11	14.49	18.96	19.10	15.19	11.12	7.77	4.34	2.38	1.05	0.38	0.11			100.00

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 5.3: Primavera - Distribuzione della Frequenza Percentuale  
dell'Intensità del Vento per Direzione di Provenienza  
(Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

Dir (°N)	W (m/s)														TOT
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	
0	0.68	1.92	1.99	0.98	0.68	0.40	0.20	0.10	0.02	0.00					6.97
30	0.59	1.46	1.01	0.48	0.34	0.14	0.10								4.12
60	0.71	1.49	0.81	0.42	0.20	0.11	0.03								3.77
90	0.67	1.62	1.73	1.10	0.61	0.38	0.11	0.03							6.25
120	0.59	1.86	2.60	2.91	2.60	1.38	0.69	0.28	0.06	0.01					12.98
150	0.44	1.06	1.52	1.47	0.79	0.32	0.11	0.02	0.05	0.00					5.78
180	0.63	0.86	1.03	0.63	0.15	0.11	0.02								3.43
210	0.44	1.03	1.03	0.74	0.40	0.19	0.04	0.01							3.88
240	0.58	1.16	1.40	1.21	0.98	0.50	0.28	0.10	0.01	0.01	0.00				6.23
270	0.66	1.70	2.27	2.03	1.29	1.06	0.38	0.16	0.04						9.59
300	0.65	2.18	3.84	4.19	3.95	3.16	2.05	1.20	0.55	0.15	0.07	0.02			22.01
330	0.74	2.63	3.64	3.31	1.99	1.17	0.84	0.46	0.12	0.08	0.01				14.99
TOT	7.38	18.97	22.87	19.47	13.98	8.92	4.85	2.36	0.85	0.25	0.08	0.02			100.00

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 5.4: Estate - Distribuzione della Frequenza Percentuale dell'Intensità del Vento per Direzione di Provenienza (Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

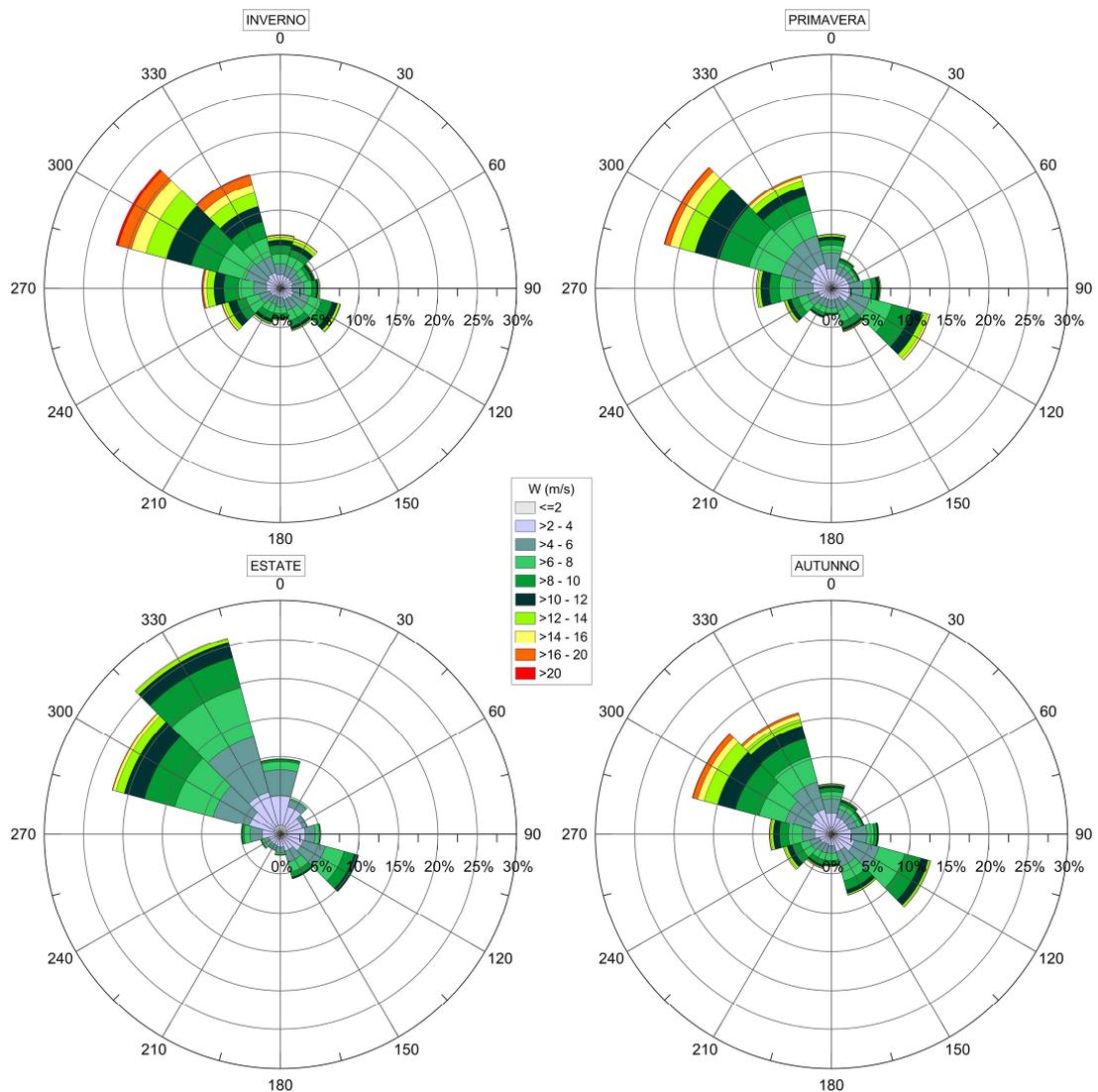
Dir (°N)	W (m/s)														TOT
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	
0	1.15	3.90	3.28	1.05	0.29	0.07									9.74
30	1.08	2.66	0.87	0.18	0.02										4.81
60	0.83	2.08	0.59	0.05	0.01										3.56
90	0.89	2.26	1.25	0.54	0.15	0.03	0.01								5.13
120	0.65	2.34	2.93	2.44	1.36	0.53	0.05								10.30
150	0.59	1.64	1.49	1.25	0.68	0.18	0.02		0.01						5.86
180	0.62	1.01	0.70	0.26	0.08	0.02									2.69
210	0.65	0.81	0.40	0.25	0.05	0.01									2.17
240	0.56	0.93	0.68	0.29	0.09	0.04	0.01								2.60
270	0.66	1.64	1.55	0.77	0.26	0.03	0.03	0.03							4.97
300	0.92	3.19	4.75	5.02	4.00	2.63	1.10	0.41	0.06	0.02					22.10
330	1.08	4.58	7.38	6.46	3.94	1.99	0.51	0.12	0.01						26.07
TOT	9.68	27.04	25.87	18.56	10.93	5.53	1.73	0.56	0.08	0.02					100.00

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 5.5: Autunno - Distribuzione della Frequenza Percentuale dell'Intensità del Vento per Direzione di Provenienza (Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

Dir (°N)	W (m/s)														TOT
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	
0	0.86	1.94	1.82	0.89	0.52	0.29	0.11	0.07	0.03	0.01					6.54
30	0.60	1.75	1.08	0.59	0.37	0.15	0.07	0.06	0.02	0.01	0.01				4.71
60	0.66	1.59	1.16	0.50	0.24	0.09	0.02		0.01				0.01		4.28
90	0.71	1.82	1.95	0.92	0.40	0.15	0.03	0.01							5.99
120	0.67	2.36	3.22	3.36	2.17	0.93	0.26	0.08	0.01						13.06
150	0.69	1.60	1.95	1.87	1.18	0.48	0.17	0.04	0.01						7.99
180	0.53	0.93	0.98	0.91	0.48	0.14	0.08	0.03	0.02						4.10
210	0.40	0.94	1.14	0.92	0.64	0.25	0.11	0.08	0.02						4.50
240	0.47	1.09	1.31	1.24	1.09	0.64	0.34	0.14	0.03						6.35
270	0.66	1.47	1.59	1.76	1.15	0.76	0.34	0.12	0.05	0.02					7.92
300	0.65	2.11	3.36	3.42	3.13	2.34	1.75	0.85	0.47	0.18	0.04	0.01			18.31
330	0.84	2.56	3.62	3.37	2.43	1.66	0.90	0.57	0.20	0.08	0.02				16.25
TOT	7.74	20.16	23.18	19.75	13.80	7.88	4.18	2.05	0.87	0.30	0.07	0.01	0.01		100.00

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01


**Figura 5.2: Rose Stagionali del Vento– Punto ERA\_ORI**

## 5.2 CONDIZIONI ESTREME

Seguendo la metodologia evidenziata nel capitolo 4, mediante il best-fit dei dati con la funzione di distribuzione estrema di Weibull, sono stati stimati i valori estremi del vento omnidirezionali e successivamente i valori per direzioni di provenienza principali.

Nella Tabella 5.6 sono riportati i parametri  $\alpha$  e  $\beta$  della funzione estrema di Weibull e il coefficiente R.

**Tabella 5.6: Parametri della Distribuzione di WEIBULL degli Estremi del Vento**

Parametri della distribuzione di WEIBULL			
(°N)	$\alpha$	$\beta$	R
<b>0</b>	5.729	1.631	.9986
<b>30-60</b>	4.844	1.345	.9947
<b>90</b>	5.509	1.924	.9954
<b>120-150</b>	6.996	2.232	.9988
<b>180</b>	5.654	1.861	.9989
<b>210-240</b>	6.957	1.958	.9990
<b>270</b>	7.389	2.070	.9962
<b>300-330</b>	8.787	2.222	.9962
<b>OMNI</b>	7.346	1.890	.9991

Nella Tabella 5.7 sono presentati i valori estremi della velocità del vento per i differenti periodi di ritorno considerati, estrapolati dai dati ECMWF validati. Si noti che le direzioni di provenienza sono state raggruppate in 8 macrosettori. I valori estremi del vento riferiti alle durate di 10 minuti e 1 minuto sono stati calcolati con la formula (4.5), mentre i valori estremi del vento riferiti ai 3" (raffica) sono stati calcolati con la relazione (4.7), stimata a partire dai dati misurati a Capo Frasca.

La disponibilità dei dati AMI di Capo Frasca (1985-2014), ritenuti essere i più aggiornati e appropriati per la descrizione della fenomenologia locale, permette di verificare la validità dei valori di progetto stimati nella precedente Rev.0 di questo studio.

A tal proposito, si ricorda che la validazione di tali dati ha messo in evidenza un'alta percentuale di dati non validi/mancanti, che rende questa serie temporale poco affidabile per l'estrapolazione dei valori estremi. Tuttavia, il confronto delle distribuzioni estreme omnidirezionali (AMI e ECMWF, corretti con i coefficienti individuati dalla Rev.0) mostra un buon accordo, indice che le due popolazioni di dati rappresentano mediamente lo stesso clima anemologico e che la correzione dei dati ECMWF effettuata nella Rev.0 può essere considerata accettabile sulla base di misure del vento più recenti.

Dato che le rose dei venti dei dati misurati e ricostruiti mostravano alcune differenze, sono stati stimati i valori estremi direzionali della serie AMI a titolo di confronto rispetto ai valori estremi calcolati dai dati ECMWF. I valori estremi estrapolati dai dati ricostruiti sono risultati i più cautelativi in tutti i settori, tranne che per i settori 90 e 120-150°N, dove invece i valori estrapolati dai dati misurati risultano essere più elevati. Per questi settori si consiglia pertanto di fare riferimento ai valori estremi direzionali calcolati dalla distribuzione dei dati AMI, riportati in

Tabella 5.8 (i parametri della distribuzione di weibull sono riportati in Tabella 5.9).

**Tabella 5.7: Valori Estremi della Velocità del Vento al largo di Oristano (dati ECMWF)**

DIR (°N)	VALORI ESTREMI DEL VENTO (m/s) - PERIODO DI RITORNO											
	1 ANNO				10 ANNI				25 ANNI			
	1h	10'	1'	3"	1h	10'	1'	3"	1h	10'	1'	3"
0	18.0	19.4	21.2	29.1	21.7	23.5	25.9	35.3	23.1	25.1	27.7	37.7
30-60	19.9	21.5	23.6	32.3	24.8	27.1	30.0	40.7	26.6	29.1	32.3	43.7
90	14.2	15.2	16.5	22.8	16.8	18.1	19.7	27.2	17.7	19.1	20.8	28.7
120-150	17.1	18.4	20.1	27.6	19.3	20.9	22.9	31.4	20.1	21.8	23.9	32.7
180	14.5	15.5	16.9	23.3	17.4	18.7	20.5	28.1	18.4	19.9	21.7	29.9
210-240	18.4	19.9	21.7	29.9	21.4	23.2	25.5	34.8	22.5	24.5	27.0	36.8
270	18.3	19.7	21.6	29.6	21.2	23.0	25.3	34.5	22.2	24.1	26.6	36.2
300-330	22.6	24.6	27.1	36.9	25.2	27.5	30.5	41.3	26.2	28.7	31.8	43.1
OMNI	23.6	25.7	28.4	38.6	26.6	29.1	32.3	43.7	27.7	30.4	33.8	45.6

DIR (°N)	VALORI ESTREMI DEL VENTO (m/s)- PERIODO DI RITORNO											
	50 ANNI				75 ANNI				100 ANNI			
	1h	10'	1'	3"	1h	10'	1'	3"	1h	10'	1'	3"
0	24.1	26.3	29.0	39.5	24.7	26.9	29.8	40.4	25.1	27.4	30.4	41.1
30-60	28.0	30.7	34.2	46.1	28.8	31.6	35.3	47.4	29.3	32.2	36.0	48.3
90	18.3	19.7	21.6	29.6	18.7	20.2	22.1	30.3	19.0	20.5	22.5	30.8
120-150	20.7	22.4	24.6	33.6	21.0	22.8	25.0	34.2	21.3	23.1	25.4	34.7
180	19.1	20.6	22.6	30.9	19.6	21.2	23.2	31.8	19.9	21.5	23.6	32.3
210-240	23.3	25.4	28.0	38.1	23.7	25.8	28.5	38.7	24.0	26.1	28.9	39.2
270	23.0	25.0	27.6	37.5	23.4	25.5	28.1	38.3	23.7	25.8	28.5	38.7
300-330	26.9	29.5	32.7	44.3	27.3	29.9	33.3	44.9	27.6	30.3	33.7	45.5
OMNI	28.6	31.4	35.0	47.1	29.0	31.9	35.6	47.9	29.3	32.2	36.0	48.3

**Tabella 5.8: Parametri della Distribuzione di WEIBULL degli Estremi del Vento (Dati AMI)**

Parametri della distribuzione di WEIBULL			
(°N)	$\alpha$	$\beta$	R
90	3.558	1.241	.9891
120-150	6.787	1.742	.9968

**Tabella 5.9: Valori Estremi della Velocità del Vento al largo di Oristano (dati AMI)**

DIR (°N)	VALORI ESTREMI DEL VENTO (m/s) - PERIODO DI RITORNO											
	1 ANNO				10 ANNI				25 ANNI			
	1h	10'	1'	3"	1h	10'	1'	3"	1h	10'	1'	3"
90	15.5	16.6	18.1	24.9	20.0	21.6	23.7	32.4	21.7	23.5	25.9	35.3
120-150	21.6	23.4	25.8	35.1	25.2	27.5	30.5	41.3	26.5	29.0	32.2	43.5

DIR (°N)	VALORI ESTREMI DEL VENTO (m/s) - PERIODO DI RITORNO											
	50 ANNI				75 ANNI				100 ANNI			
	1h	10'	1'	3"	1h	10'	1'	3"	1h	10'	1'	3"
90	22.9	24.9	27.5	37.4	23.7	25.8	28.5	38.7	24.2	26.4	29.2	39.6
120-150	27.5	30.1	33.5	45.2	28.1	30.8	34.4	46.2	28.4	31.2	34.8	46.8

Si noti che il valore estremo con periodo di ritorno 50 anni e mediato su 10 minuti andrebbe confrontato con il valore  $V_{b0}$  fornito dalle Nuove Norme Tecniche Per Le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008). Il valore stimato al largo di Oristano è di 31.4 m/s, mentre il  $V_{b0}$  indicato dalle suddette normative per l'area costiera della Sardegna Occidentale è di 28 m/s. Tale differenza potrebbe essere giustificata dal fatto che i valori in Tabella 5.7 si riferiscono a condizioni di mare aperto, mentre il  $V_{b0}$  è rappresentativo di condizioni attese sulla terraferma. Tuttavia, avendo effettuato una correzione dei dati al largo con misure costiere (stazione AMI di Capo Frasca), si ritiene che tale differenza possa essere, invece, indice del fatto che il valore  $V_{b0}$  indicato dalle normative sia sottostimato per la specifica area di studio.

Lo stesso decreto suggerisce di utilizzare  $V_{b0}$  esclusivamente in caso di assenza di specifiche ed adeguate indagini statistiche. Si suggerisce, pertanto, di utilizzare il valore 31.4 m/s in sostituzione del  $V_{b0}=28$  m/s indicato dalla normativa.

## 6 CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO

Nel presente capitolo viene definito il clima del moto ondoso e vengono calcolati i valori estremi al largo e a costa. Si ricorda che i dati di base si riferiscono ai dati di vento del database ECMWF ERA-Interim estratti nel Punto ERA\_ORI (Figura 2.1) al largo di Oristano, validati e corretti con la metodologia descritta nel capitolo 3.2.2.

### 6.1 CLIMA AL LARGO NEL LUNGO TERMINE

La distribuzione annuale dell'altezza d'onda al largo in funzione delle direzioni di provenienza è mostrata in Tabella 6.1 e graficamente in Figura 6.1 (rosa delle onde).

Dall'osservazione della tabella e della figura appare subito evidente la marcata direzionalità del clima ondoso, caratterizzata dai settori 300 e 330°N che rappresentano circa il 50% degli eventi totali.

Per quanto riguarda le altezze, circa l'80% delle onde risulta inferiore a 2 m, circa il 17% risulta compreso tra 2 e 4 m, circa il 2% risulta compreso tra 4 e 5 m e solo l'1% è caratterizzato da altezze superiori a 5 m. Si noti che le onde più alte, comprese tra 7 e 9 m, provengono dai settori direzionali 270-330°N.

In Tabella 6.2 è mostrata la distribuzione dell'altezza d'onda in funzione del periodo medio, da cui si nota che l'85% circa dei periodi è inferiore o uguale a 7 s, mentre alle mareggiate più intense sono associati periodi medi di 11 – 12 s.

L'analisi stagionale è presentata in Tabella 6.3-Tabella 6.6 per quanto riguarda la distribuzione dell'altezza d'onda in funzione delle direzioni di provenienza e in Tabella 6.7-Tabella 6.10 per quanto riguarda la distribuzione dell'altezza d'onda in funzione del periodo medio. In Figura 6.2 le relative distribuzioni direzionali delle onde sono mostrate in forma grafica.

Dalle tabelle e dalle figure si nota che il moto ondoso proviene principalmente dai settori di 300 e 330°N, come già evidenziato dall'analisi annuale, ma, mentre nelle stagioni invernale, estiva e autunnale risulta caratterizzato da una netta prevalenza del settore 330°N, nella stagione primaverile le onde più frequenti sono quelle associate al settore 300°N. Nella stagione invernale si nota inoltre una riduzione degli eventi ondosi provenienti dai settori 120 e 150°N (circa 9% degli eventi totali) rispetto alle altre stagioni.

Per quanto riguarda l'altezza d'onda, dalla

Tabella 6.5 risulta evidente come il periodo estivo risulti caratterizzato da una minore energia ondosa rispetto alle altre stagioni: circa il 92% delle onde risulta inferiore a 2 m (81% in primavera e autunno e 65% in inverno) e le onde massime appartengono alla classe di 6 m (8 m in primavera e autunno e 9 m in inverno).

## 6.2 VALORI ESTREMI DELLE ONDE AL LARGO

Seguendo la metodologia evidenziata nel capitolo 4, mediante il best-fit della distribuzione delle altezze con la funzione estrema di Weibull, sono stati stimati i valori estremi omnidirezionali e direzionali delle onde al largo, in corrispondenza del Punto ERA\_ORI di Figura 2.1, limitatamente alle direzioni principali del settore di traversia dell'area in esame.

I valori stimati sono presentati in Tabella 6.12 e in Tabella 6.13 rispettivamente per i periodi di ritorno di 1, 10, 25 anni e 50, 75, 100 anni: si noti che a ciascun valore di altezza d'onda è stato associato il periodo significativo  $T_s$ , il periodo di picco  $T_p$  e il periodo medio  $T_m$  calcolati adottando le relazioni (4.9)-(4.11).

Si sottolinea che i valori riportati nella suddetta tabella sono rappresentativi di stati di mare priorari.

**Tabella 6.1: Distribuzione Annuale della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Dati al Largo (Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

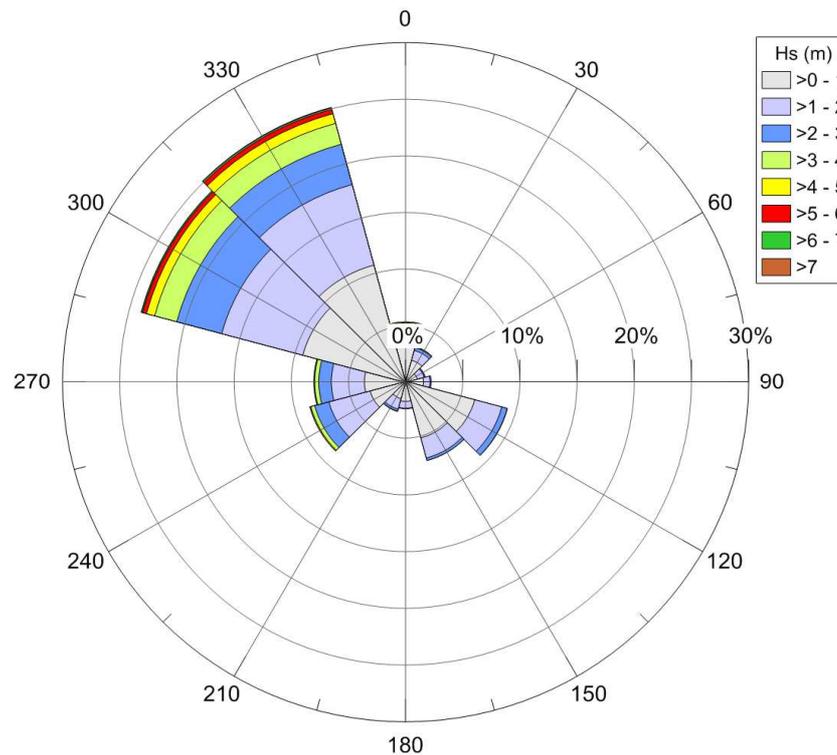
Dir (°N)	Hs (m)																		
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	TOT
0	1.55	1.68	0.71	0.54	0.33	0.23	0.11	0.11	0.05	0.02	0.01	0.00							5.34
30	0.86	1.16	0.63	0.28	0.19	0.07	0.07	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					3.29
60	0.51	0.56	0.38	0.24	0.07	0.02	0.02	0.00		0.01									1.81
90	0.72	0.84	0.38	0.21	0.08	0.02	0.01												2.26
120	2.89	3.33	1.68	0.77	0.35	0.13	0.04	0.02	0.00	0.00									9.21
150	2.21	2.93	1.32	0.50	0.16	0.08	0.00	0.02											7.22
180	0.64	1.13	0.47	0.13	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00										2.43
210	0.47	1.09	0.66	0.31	0.12	0.06	0.04	0.01	0.00	0.00									2.76
240	0.87	2.33	2.18	1.54	0.83	0.45	0.24	0.11	0.08	0.02	0.01	0.00	0.00						8.66
270	1.19	2.40	1.76	1.13	0.68	0.42	0.24	0.12	0.04	0.03	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00			8.06
300	3.45	5.82	4.25	3.06	2.38	1.68	1.20	0.79	0.46	0.29	0.22	0.14	0.07	0.04	0.02	0.01	0.01		23.89
330	4.44	6.22	4.28	3.04	2.10	1.58	1.12	0.78	0.56	0.31	0.28	0.14	0.11	0.05	0.04	0.01	0.00	0.00	25.06
TOT	19.80	29.49	18.70	11.75	7.34	4.75	3.09	1.98	1.20	0.68	0.54	0.30	0.18	0.10	0.06	0.02	0.01	0.00	100.00

0.00 SIGNIFICA %<0.01

**Tabella 6.2: Distribuzione Annuale della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Periodo Medio – Dati al Largo (Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

Tm (s)	Hs (m)																		
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	TOT
2	0.05																		0.05
3	3.29	0.12																	3.41
4	10.13	7.83	0.31																18.27
5	5.78	13.14	7.20	0.93	0.00														27.05
6	0.52	7.35	6.98	5.41	1.76	0.17	0.01												22.20
7	0.02	1.03	3.74	3.88	3.69	2.12	0.69	0.10	0.00	0.00									15.27
8	0.01	0.02	0.47	1.43	1.57	1.89	1.75	1.12	0.42	0.10	0.02	0.00							8.80
9	0.00	0.00	0.00	0.10	0.31	0.52	0.56	0.66	0.61	0.44	0.33	0.13	0.03	0.01					3.70
10					0.01	0.05	0.08	0.10	0.16	0.13	0.17	0.16	0.14	0.06	0.03	0.00			1.09
11						0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.15
12														0.00	0.00	0.00			0.01
TOT	19.80	29.49	18.70	11.75	7.34	4.75	3.09	1.98	1.20	0.68	0.54	0.30	0.18	0.10	0.06	0.02	0.01	0.00	100.00

0.00 SIGNIFICA %<0.01



**Figura 6.1: Rosa Annuale delle Onde al Largo – Punto ERA\_ORI**

**Tabella 6.3: Inverno - Distribuzione della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Dati al Largo (Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

Dir (°N)	Hs (m)																		
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	TOT
0	0.94	1.79	1.26	1.09	0.76	0.58	0.28	0.29	0.15	0.04	0.01	0.01							7.20
30	0.77	1.64	1.26	0.65	0.44	0.18	0.21	0.06	0.05										5.26
60	0.33	0.86	0.66	0.56	0.20	0.08	0.05	0.02											2.76
90	0.45	1.21	0.70	0.36	0.17	0.08	0.02												2.99
120	0.63	1.59	1.14	0.72	0.35	0.15	0.02	0.01											4.61
150	1.00	1.49	1.12	0.48	0.18	0.11		0.01											4.39
180	0.28	0.97	0.63	0.18	0.12	0.01	0.01	0.01											2.21
210	0.21	0.85	0.94	0.54	0.26	0.12	0.07	0.01	0.01										3.01
240	0.49	1.72	2.54	2.47	1.64	0.92	0.50	0.18	0.14	0.07	0.03	0.01	0.01						10.72
270	0.70	2.29	2.45	1.84	1.27	0.83	0.56	0.28	0.07	0.05	0.05	0.07	0.01	0.02	0.01	0.01			10.51
300	1.29	3.96	4.21	3.36	2.89	2.49	1.81	1.48	0.89	0.58	0.48	0.36	0.15	0.12	0.05	0.02	0.02		24.16
330	1.34	3.38	3.13	2.91	2.62	2.11	1.78	1.30	1.21	0.75	0.72	0.40	0.28	0.12	0.09	0.02	0.01	0.01	22.18
TOT	8.43	21.75	20.04	15.16	10.90	7.66	5.31	3.65	2.52	1.49	1.29	0.85	0.45	0.26	0.15	0.05	0.03	0.01	100.00

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.4: Primavera - Distribuzione della Frequenza Percentuale  
dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Dati al Largo  
(Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

Dir (°N)	Hs (m)																		
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	TOT
0	1.29	1.66	0.70	0.51	0.23	0.23	0.08	0.10	0.02	0.03	0.01	0.01							4.87
30	0.71	0.79	0.57	0.22	0.13	0.08													2.50
60	0.42	0.51	0.37	0.20	0.03		0.00												1.53
90	0.72	0.68	0.38	0.26	0.08	0.01													2.13
120	2.51	4.18	2.47	1.25	0.76	0.31	0.11	0.02	0.02	0.01									11.64
150	1.68	2.92	1.59	0.57	0.17	0.07	0.02	0.04											7.06
180	0.64	1.38	0.56	0.17	0.05	0.01													2.81
210	0.58	1.50	0.66	0.26	0.05	0.02	0.01												3.08
240	1.39	3.40	2.94	1.52	0.77	0.43	0.20	0.06	0.02	0.01	0.01								10.75
270	1.31	3.53	2.28	1.29	0.65	0.38	0.23	0.10	0.01	0.01	0.01								9.80
300	2.65	6.36	4.68	3.44	2.98	1.90	1.35	0.85	0.40	0.29	0.20	0.07	0.06	0.02	0.03	0.02			25.30
330	2.34	4.83	3.46	2.49	1.51	1.41	0.88	0.69	0.41	0.19	0.17	0.07	0.04	0.03	0.01				18.53
TOT	16.24	31.74	20.66	12.18	7.41	4.85	2.88	1.86	0.88	0.54	0.40	0.15	0.10	0.05	0.04	0.02			100.00

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.5: Estate - Distribuzione della Frequenza Percentuale dell'Altezza  
d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Dati al Largo  
(Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0	2.34	1.26	0.22	0.07	0.02														3.91
30	0.80	0.14																	0.94
60	0.66	0.15	0.01																0.82
90	0.90	0.29	0.04	0.02															1.25
120	5.43	3.65	0.97	0.21	0.02	0.02													10.30
150	4.11	3.64	0.97	0.18	0.04		0.01												8.95
180	0.93	0.88	0.10																1.91
210	0.64	0.71	0.06	0.02															1.43
240	1.01	2.03	0.74	0.20	0.05														4.03
270	1.84	1.87	0.42	0.17	0.03	0.02	0.01												4.36
300	7.64	8.39	4.14	2.80	1.59	0.96	0.61	0.23	0.10	0.02	0.02	0.02						26.52	
330	10.37	10.81	6.17	3.77	2.08	1.19	0.73	0.32	0.10	0.03	0.01							35.58	
TOT	36.67	33.82	13.84	7.44	3.83	2.19	1.36	0.55	0.20	0.05	0.03	0.02						100.00	

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.6: Autunno - Distribuzione della Frequenza Percentuale dell'Altezza  
d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Dati al Largo  
(Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0	1.63	1.98	0.67	0.47	0.32	0.12	0.07	0.07	0.04	0.03	0.02								5.42
30	1.14	2.08	0.67	0.27	0.19	0.02	0.07	0.02		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01					4.51
60	0.62	0.74	0.48	0.21	0.03	0.02	0.02			0.01									2.13
90	0.82	1.19	0.42	0.20	0.07	0.02													2.72
120	2.96	3.88	2.16	0.88	0.27	0.07	0.01												10.23
150	2.04	3.64	1.61	0.79	0.24	0.12	0.00	0.02											8.46
180	0.69	1.28	0.61	0.18	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01										2.85
210	0.45	1.30	0.97	0.43	0.18	0.08	0.08	0.02	0.01	0.01									3.53
240	0.60	2.18	2.52	1.98	0.89	0.46	0.25	0.20	0.10	0.02	0.01								9.21
270	0.89	1.91	1.89	1.23	0.79	0.47	0.18	0.11	0.07	0.02	0.02	0.01							7.59
300	2.14	4.53	3.98	2.63	2.07	1.37	1.05	0.63	0.45	0.25	0.15	0.11	0.07	0.04	0.02				19.49
330	3.65	5.82	4.33	3.01	2.19	1.60	1.11	0.83	0.56	0.30	0.22	0.07	0.09	0.03	0.03	0.02			23.86
TOT	17.63	30.53	20.31	12.28	7.28	4.37	2.85	1.91	1.24	0.65	0.43	0.20	0.17	0.08	0.05	0.02			100.00

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.7: Inverno - Distribuzione della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Periodo Medio – Dati al Largo (Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

Tm (s)	Hs (m)																		
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	TOT
2	1.40	0.02																	1.42
3	4.05	5.72	0.27																10.04
4	2.62	9.44	7.45	1.11	0.02														20.64
5	0.34	5.68	7.71	6.86	2.73	0.28	0.02												23.62
6	0.02	0.88	3.96	4.79	4.92	3.43	1.34	0.23	0.01	0.01									19.59
7		0.01	0.64	2.24	2.56	2.72	2.73	2.01	0.92	0.22	0.06	0.01							14.12
8			0.01	0.16	0.65	1.11	1.02	1.11	1.18	0.99	0.77	0.36	0.07	0.01					7.44
9					0.02	0.11	0.18	0.28	0.38	0.25	0.41	0.45	0.35	0.19	0.12	0.01			2.75
10						0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.05	0.03	0.03	0.06	0.03	0.03	0.03	0.01	0.37
11																0.01			0.01
12																			
TOT	8.43	21.75	20.04	15.16	10.90	7.66	5.31	3.65	2.52	1.49	1.29	0.85	0.45	0.26	0.15	0.05	0.03	0.01	100.00

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.8: Primavera - Distribuzione della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Periodo Medio – Dati al Largo (Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

Tm (s)	Hs (m)																		
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	TOT
2	1.94	0.16																	2.10
3	7.99	6.84	0.38																15.21
4	5.71	14.61	7.51	1.01															28.84
5	0.54	8.78	7.95	5.74	1.99	0.20	0.02												25.22
6	0.03	1.30	4.29	3.93	3.72	2.27	0.72	0.08											16.34
7	0.02	0.03	0.53	1.43	1.44	1.84	1.55	1.10	0.31	0.10	0.01								8.36
8	0.01	0.02	0.00	0.07	0.26	0.50	0.54	0.63	0.47	0.32	0.28	0.05	0.02						3.17
9						0.04	0.05	0.05	0.10	0.10	0.11	0.08	0.07	0.02	0.02				0.64
10										0.02		0.02	0.01	0.02	0.02	0.02			0.11
11														0.01					0.01
12																			
TOT	16.24	31.74	20.66	12.18	7.41	4.85	2.88	1.86	0.88	0.54	0.40	0.15	0.10	0.05	0.04	0.02			100.00

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.9: Estate - Distribuzione della Frequenza Percentuale dell'Altezza  
d'Onda Significativa per Periodo Medio – Dati al Largo  
(Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

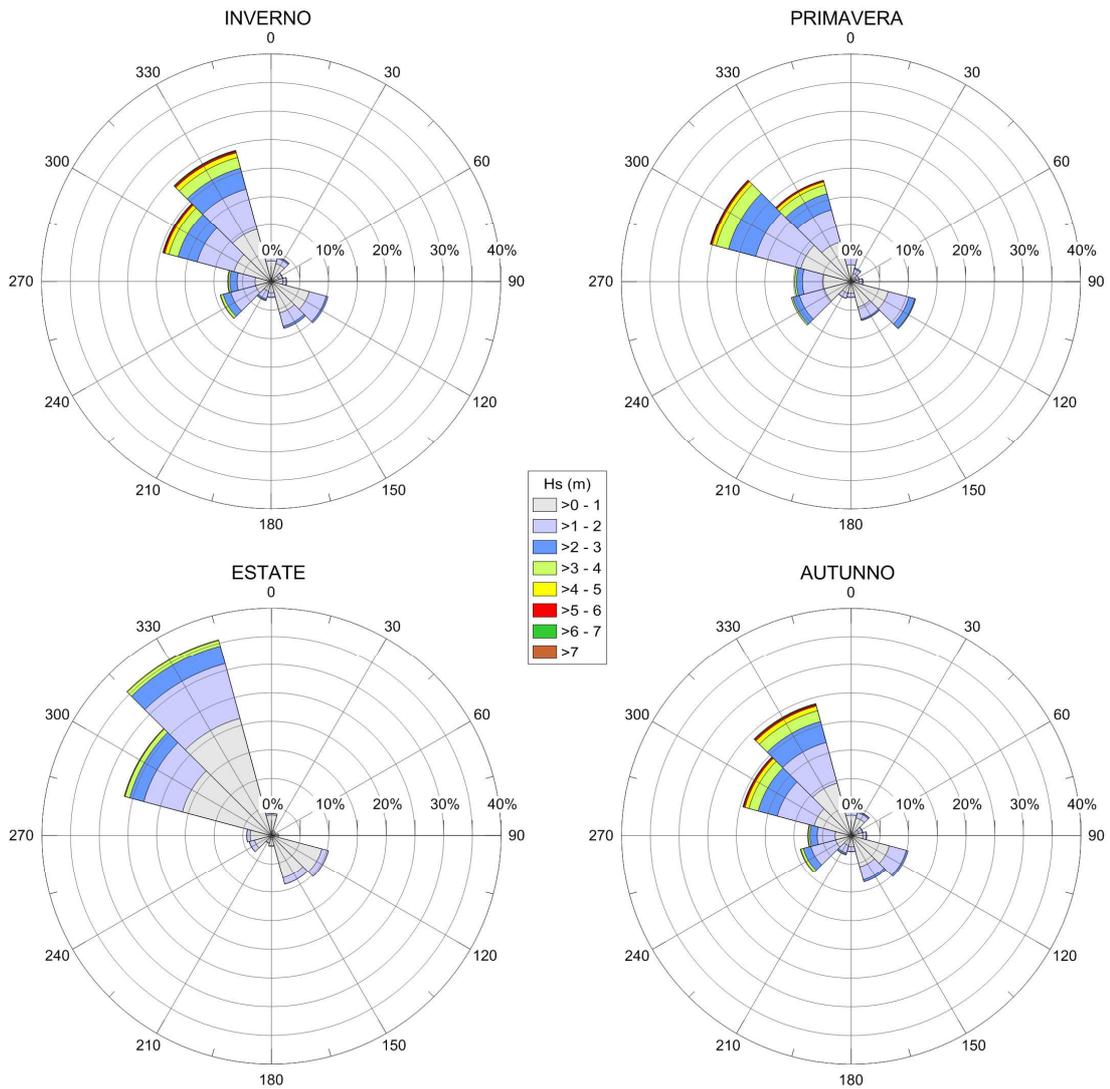
Tm (s)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
2	7.07	0.16																	7.23
3	19.41	9.90	0.29																29.60
4	9.41	14.94	5.57	0.47															30.39
5	0.77	7.83	5.03	3.63	0.63	0.03													17.92
6	0.01	0.97	2.69	2.82	2.53	1.04	0.20	0.01											10.27
7		0.02	0.26	0.50	0.63	1.06	1.03	0.37	0.09										3.96
8				0.02	0.04	0.05	0.12	0.17	0.11	0.04	0.02	0.01							0.58
9						0.01	0.01			0.01	0.01	0.01							0.05
10																			
11																			
12																			
TOT	36.67	33.82	13.84	7.44	3.83	2.19	1.36	0.55	0.20	0.05	0.03	0.02							100.00

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.10: Autunno - Distribuzione della Frequenza Percentuale  
dell'Altezza d'Onda Significativa per Periodo Medio – Dati al Largo  
(Punto ERA\_ORI di Figura 2.1)**

Tm (s)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
2	2.94	0.13																	3.07
3	8.94	8.82	0.31																18.07
4	5.30	13.52	8.25	1.12															28.19
5	0.44	7.10	7.24	5.44	1.70	0.17	0.01												22.10
6	0.01	0.96	4.04	3.99	3.62	1.76	0.51	0.08											14.97
7			0.47	1.59	1.68	1.94	1.71	1.03	0.36	0.07	0.01								8.86
8				0.14	0.28	0.44	0.56	0.72	0.70	0.43	0.26	0.08	0.02	0.02					3.65
9						0.06	0.06	0.08	0.18	0.13	0.14	0.11	0.13	0.04	0.01	0.01			0.95
10										0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01			
11															0.01				
12																			
TOT	17.63	30.53	20.31	12.28	7.28	4.37	2.85	1.91	1.24	0.65	0.43	0.20	0.17	0.08	0.05	0.02			100.00

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01


**Figura 6.2: Rose Stagionali delle Onde al Largo – Punto ERA\_ORI**
**Tabella 6.11: Parametri della Distribuzione di WEIBULL degli Estremi delle Onde al Largo**

Parametri della distribuzione di WEIBULL			
(°N)	$\alpha$ (scale)	$\beta$ (shape)	R
180	0.520	0.970	0.9808
210	0.973	1.249	0.9963
240	1.440	1.464	0.9996
270	1.262	1.211	0.9918
300	1.781	1.438	0.9945
330	1.699	1.366	0.9922
OMNI	1.419	1.289	0.9964

**Tabella 6.12: Onde Estreme al Largo (Punto ERA\_ORI di Figura 2.1) –  
Periodo di Ritorno 1, 10 e 25 Anni**

DIREZIONE (°N)	PERIODO DI RITORNO (Anni)											
	1				10				25			
	Hs	Ts	Tp	Tm	Hs	Ts	Tp	Tm	Hs	Ts	Tp	Tm
	(m)	(s)	(s)	(s)	(m)	(s)	(s)	(s)	(m)	(s)	(s)	(s)
180	2.3	6.2	6.5	5.6	3.6	7.8	8.1	6.9	4.1	8.3	8.7	7.4
210	3.2	7.3	7.6	6.5	4.5	8.6	9.0	7.7	4.9	9.1	9.5	8.1
240	4.6	8.8	9.2	7.9	5.9	9.9	10.3	8.9	6.3	10.3	10.7	9.2
270	5.1	9.2	9.7	8.3	6.9	10.7	11.2	9.6	7.5	11.2	11.7	10.0
300	6.6	10.5	10.9	9.4	8.1	11.6	12.1	10.4	8.7	12.0	12.6	10.8
330	6.8	10.6	11.1	9.5	8.4	11.8	12.4	10.6	9.0	12.3	12.8	11.0
OMNIDIR	7.1	10.9	11.4	9.7	8.7	12.0	12.5	10.7	9.3	12.4	13.0	11.1

**Tabella 6.13: Onde Estreme al Largo (Punto ERA\_ORI di Figura 2.1) –  
Periodo di Ritorno 50, 75 e 100 Anni**

DIREZION E (°N)	PERIODO DI RITORNO (Anni)											
	50				75				100			
	Hs	Ts	Tp	Tm	Hs	Ts	Tp	Tm	Hs	Ts	Tp	Tm
	(m)	(s)	(s)	(s)	(m)	(s)	(s)	(s)	(m)	(s)	(s)	(s)
180	4.5	8.7	9.1	7.8	4.8	8.9	9.3	8.0	4.9	9.1	9.5	8.1
210	5.3	9.4	9.8	8.4	5.5	9.6	10.0	8.6	5.7	9.7	10.1	8.7
240	6.7	10.6	11.0	9.4	6.9	10.7	11.2	9.6	7.0	10.8	11.3	9.7
270	8.0	11.6	12.1	10.3	8.3	11.8	12.3	10.5	8.5	11.9	12.4	10.6
300	9.1	12.3	12.9	11.0	9.4	12.5	13.0	11.2	9.5	12.6	13.2	11.3
330	9.5	12.6	13.1	11.3	9.8	12.8	13.3	11.4	10.0	12.9	13.5	11.5
OMNIDIR	9.7	12.7	13.3	11.4	9.9	12.9	13.4	11.5	10.1	13.0	13.6	11.6

### 6.3 PROPAGAZIONE DELLE ONDE A COSTA

Nella propagazione dal largo verso acque meno profonde le onde subiscono delle trasformazioni dovute all'effetto del fondale (che inizia quando la profondità dell'acqua diventa circa metà della lunghezza d'onda).

Si hanno così i fenomeni di "rifrazione", cioè la rotazione dei fronti d'onda dovuta alla diminuzione della velocità delle onde con la profondità, di "shoaling", cioè un incremento o decremento dell'altezza d'onda legato alla concentrazione o dispersione dell'energia per effetto delle differenze tra velocità di fase dell'onda e velocità di gruppo (velocità con cui si propaga l'energia) causato dal fondale, di "attrito", cioè dalla dispersione di energia per effetto dell'attrito sul fondo che determina una riduzione dell'altezza dell'onda e di "diffrazione", cioè l'effetto indotto dall'interazione delle onde con le strutture.

Nel presente studio, la propagazione delle onde dal largo a costa (clima del moto ondoso e valori estremi) è stata effettuata mediante l'applicazione del metodo analitico, tenendo conto dei fenomeni di rifrazione, shoaling e attrito al fondo, per cui l'altezza d'onda locale  $H_i$  può essere calcolata secondo la seguente relazione:

$$H_i = H_0 K_r K_s K_f \quad (6.1)$$

dove  $H_0$  è l'altezza d'onda al largo,  $K_r$ ,  $K_s$ ,  $K_f$  sono rispettivamente i coefficienti di rifrazione, shoaling e attrito, calcolati secondo le seguenti relazioni (Goda, 2010):

$$K_r = (b_0/b)^{1/2} \quad (6.2)$$

dove  $b$  è la distanza tra due raggi d'onda nel punto costiero di interesse e  $b_0$  è la distanza tra gli stessi raggi d'onda al largo;

$$K_s = ((C_g)_0/C_g)^{1/2} \quad (6.3)$$

dove  $C_g$  è la velocità di gruppo dell'onda e  $(C_g)_0$  è la velocità di gruppo dell'onda in acque profonde.

Per quanto riguarda il coefficiente di attrito  $K_f$ , dato il carattere preliminare dello studio, è stato considerato cautelativamente pari a 1.

Con questa metodologia semplificata sono state propagate a costa le onde appartenenti al settore di esposizione di ciascun punto considerato, definito dai limiti geografici di Capo San Marco a nord e Capo Frasca a sud. Inoltre, è stata considerata un'orientazione media dei fondali, il più possibile rappresentativa dell'andamento delle batimetriche in corrispondenza dei punti costieri di calcolo del moto ondoso.

Nella propagazione verso fondali più bassi, oltre una certa profondità le onde diventano instabili e vanno incontro al frangimento. In questo studio l'onda massima compatibile con la profondità del fondale è stata calcolata secondo la seguente relazione (Army Corps of Engineers, 1984):

$$(H/d)_{MAX} = 0.78 \quad (6.4)$$

dove  $d$  è la profondità del fondale a cui avviene il frangimento dell'onda con altezza  $H$ .

Si ritiene che tale metodologia sia appropriata ai fini di uno studio di fattibilità. Tuttavia, date le caratteristiche morfologiche del Golfo di Oristano e l'esposizione del paraggio del molo del porto, nelle fasi più avanzate di progettazione sarà opportuno pianificare l'applicazione di modellistica numerica allo stato dell'arte, in grado di riprodurre in maniera ottimale la distribuzione dell'energia ondosa all'interno del Golfo.

#### 6.4 CLIMA ONDOSO A COSTA

Il clima tipico annuale delle onde è stato calcolato in corrispondenza del Punto A (30 m di profondità) , del Punto B (20 m di profondità) e del Punto C (10 m di profondità) di Figura 2.1, rispettivamente rappresentativi della parte esterna, centrale ed interna dell'imboccatura del Golfo di Oristano. E' necessario sottolineare che la metodologia applicata (si veda par. 6.3) non tiene conto degli effetti di riduzione/amplificazione delle onde dovuti al fenomeno di diffrazione, che si verifica in corrispondenza di strutture e elementi morfologici come capi, isole etc. Ne consegue che il clima costiero al Punto C (10 m) potrebbe risultare sovrastimato/sottostimato rispetto alle condizioni che si verificano nella realtà.

I risultati vengono presentati in Tabella 6.14- Tabella 6.16 e graficamente in Figura 6.3- Figura 6.5 rispettivamente per i Punti A, B e C.

Si evidenzia che, di tutte le onde presenti al largo, il 52% circa raggiunge la parte esterna dell'imboccatura del golfo (Punto A), circa 39% raggiunge la parte centrale del golfo (Punto B) e circa il 13% raggiunge l'imboccatura del molo.

Dalla Tabella 6.14 si nota che in corrispondenza del Punto A le onde sono comprese nei settori direzionali che vanno da 180 a 330°N; il 50% circa di queste onde residue presenta altezze minori di 3.5 m, il 2% circa delle onde ha un'altezza maggiore di 4.0 m e le onde più alte, appartenenti alla classe di 7.5 m e provenienti 300°N, si presentano con una frequenza di accadimento molto bassa, inferiore allo 0.01%.

Dalla Tabella 6.15 si nota che in corrispondenza del Punto B le onde sono comprese nei settori direzionali che vanno da 210 a 300°N; il 38% circa di queste onde residue presenta altezze minori di 3.5 m, lo 0.7% circa delle onde ha un'altezza maggiore di 4.0 m e le onde più alte, appartenenti alla classe di 7.0 m e provenienti da 270 e 300°N, si presentano con una frequenza di accadimento molto bassa.

Dalla Tabella 6.16 si nota che in corrispondenza del Punto C le onde sono comprese nei settori direzionali che vanno da 210 a 270°N e, nel corso della propagazione all'interno del Golfo, aumentano in altezza per effetto dello shoaling. Il 12% circa di queste onde residue presenta altezze minori di 3.0 m, lo 0.2% circa delle onde ha un'altezza maggiore di 4.0 m e le onde più alte, appartenenti alla classe di 8.0 m e provenienti da 270°N, si presentano con una frequenza di accadimento minore dello 0.01%.

L'analisi stagionale, effettuata sui periodi descritti nel capitolo 4.4.2, è presentata in Tabella 6.17 -Tabella 6.20, in Tabella 6.21-Tabella 6.24 e in Tabella 6.25-Tabella 6.28 per quanto riguarda la distribuzione dell'altezza d'onda in funzione delle direzioni di provenienza rispettivamente per il Punto A, B e C. Le relative distribuzioni direzionali delle onde sono mostrate in forma grafica in Figura 6.6 - Figura 6.8.

**Tabella 6.14: Distribuzione Annuale della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto A (30 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180	0.06	0.11	0.04	0.01	0.00														0.22
210	0.47	1.09	0.66	0.32	0.13	0.06	0.03	0.01	0.00										2.77
240	0.88	2.34	2.18	1.54	0.84	0.47	0.26	0.11	0.04	0.01	0.00	0.00							8.67
270	1.19	2.40	1.76	1.15	0.72	0.52	0.34	0.16	0.07	0.05	0.04	0.01	0.02	0.01					8.44
300	3.45	5.83	4.32	3.24	2.78	2.05	1.46	0.80	0.40	0.27	0.13	0.06	0.02	0.01	0.00				24.82
330	1.55	2.17	1.46	1.03	0.63	0.38	0.18	0.06	0.02	0.00									7.48
TOT	7.60	13.94	10.42	7.29	5.10	3.48	2.27	1.14	0.53	0.33	0.17	0.07	0.04	0.02	0.00				52.40

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.15: Distribuzione Annuale della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto B (20 m di Profondità)**

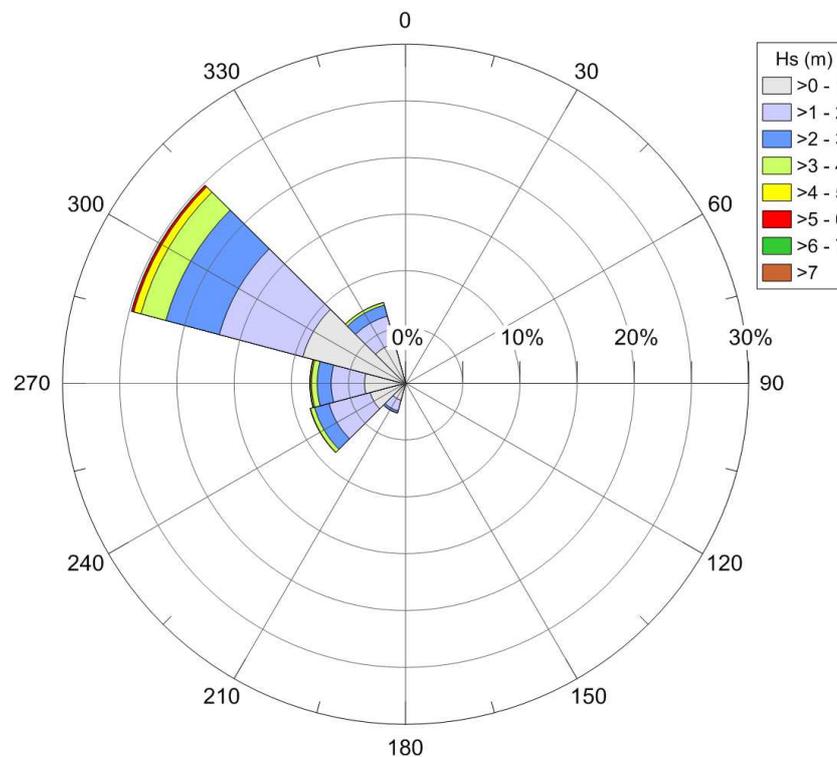
Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180																			
210	0.40	0.93	0.56	0.27	0.10	0.04	0.01	0.00											2.31
240	0.88	2.34	2.19	1.55	0.91	0.58	0.17	0.07	0.02	0.01	0.00								8.72
270	1.19	2.41	1.82	1.26	1.03	0.75	0.34	0.15	0.10	0.09	0.07	0.03	0.02	0.01					9.27
300	2.93	4.94	3.62	2.76	2.33	1.22	0.60	0.32	0.19	0.11	0.05	0.02	0.01	0.00					19.10
330																			
TOT	5.40	10.62	8.19	5.84	4.37	2.59	1.12	0.54	0.31	0.21	0.12	0.05	0.03	0.01					39.40

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

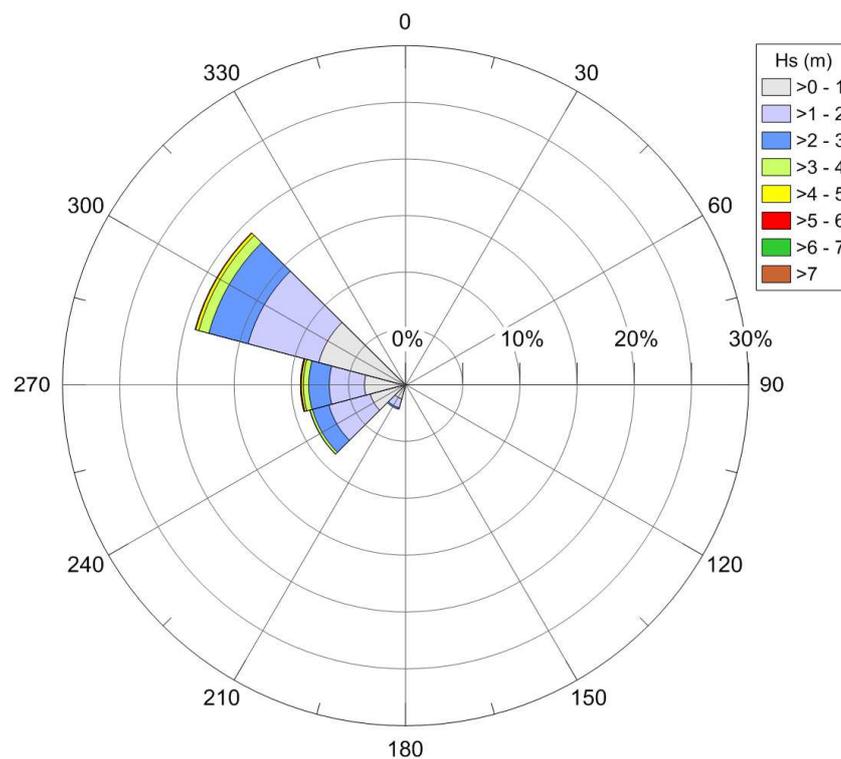
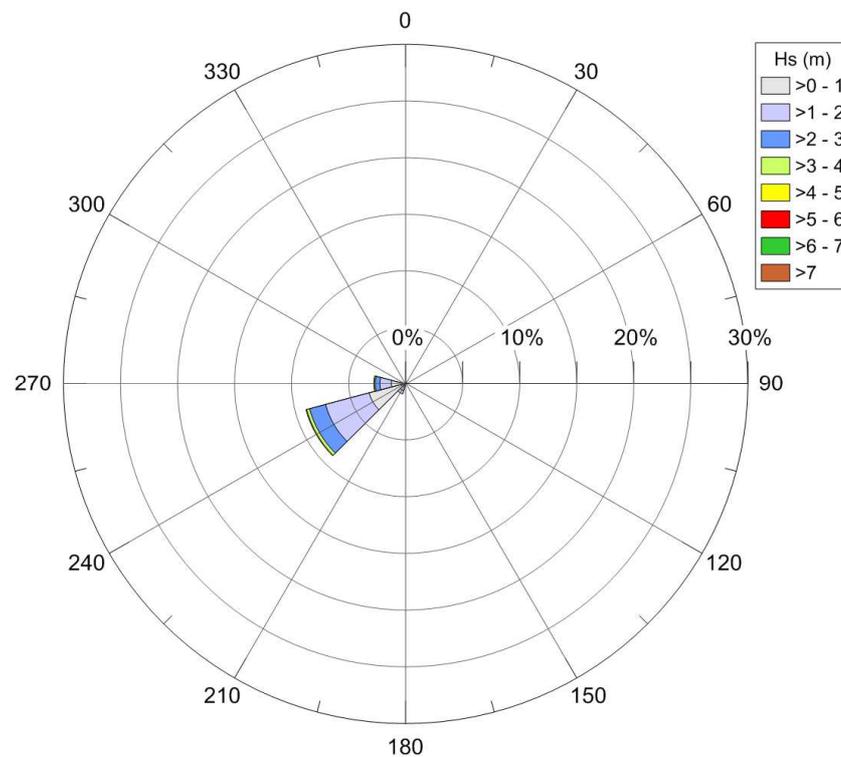
**Tabella 6.16: Distribuzione Annuale della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto C (10 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	TOT
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180																			
210	0.23	0.45	0.22	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00										0.98
240	0.89	2.43	2.30	1.65	0.99	0.46	0.20	0.07	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00						9.06
270	0.42	0.84	0.62	0.39	0.24	0.17	0.09	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			2.82
300																			
330																			
TOT	1.53	3.72	3.14	2.13	1.23	0.63	0.29	0.09	0.05	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00			12.86

0.00 SIGNIFICA %<0.01



**Figura 6.3: Rosa delle Onde a Costa – Punto A (30 m di Profondità)**


**Figura 6.4: Rosa delle Onde a Costa – Punto B (20 m di Profondità)**

**Figura 6.5: Rosa delle Onde a Costa – Punto C (10 m di Profondità)**

**Tabella 6.17: Distribuzione Invernale della Frequenza Percentuale  
dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto A  
(30 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	TOT
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180	0.03	0.10	0.06	0.02	0.01														0.22
210	0.21	0.85	0.94	0.54	0.27	0.13	0.06	0.01	0.00										3.01
240	0.49	1.72	2.54	2.47	1.64	0.92	0.51	0.19	0.15	0.07	0.01	0.02							10.73
270	0.70	2.29	2.45	1.84	1.27	0.87	0.61	0.31	0.14	0.11	0.10	0.02	0.04	0.02					10.77
300	1.29	3.96	4.21	3.40	3.04	2.68	2.13	1.78	1.01	0.69	0.46	0.20	0.10	0.04	0.01				25.00
330	0.47	1.18	1.09	1.02	0.89	0.66	0.56	0.37	0.25	0.12									6.61
TOT	3.19	10.10	11.29	9.29	7.12	5.26	3.87	2.66	1.55	0.99	0.58	0.24	0.14	0.06	0.01				56.34

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.18: Distribuzione Primaverile della Frequenza Percentuale  
dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto A  
(30 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	TOT
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180	0.06	0.14	0.06	0.02	0.00	0.00													0.28
210	0.58	1.50	0.67	0.27	0.05	0.02	0.01												3.10
240	1.39	3.40	2.94	1.53	0.77	0.44	0.20	0.06	0.02	0.01									10.76
270	1.31	3.53	2.28	1.29	0.65	0.39	0.24	0.12	0.04	0.03	0.01	0.01	0.00						9.89
300	2.65	6.36	4.69	3.45	3.05	2.01	1.49	0.97	0.42	0.28	0.09	0.06	0.03	0.02					25.57
330	0.82	1.69	1.21	0.86	0.52	0.45	0.29	0.17	0.07	0.03									6.11
TOT	6.81	16.62	11.85	7.42	5.04	3.31	2.23	1.32	0.55	0.35	0.10	0.07	0.03	0.02					55.71

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.19: Distribuzione Estiva della Frequenza Percentuale dell'Altezza  
d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto A  
(30 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180	0.09	0.09	0.01																0.19
210	0.64	0.71	0.06	0.02															1.43
240	1.01	2.03	0.74	0.20	0.05														4.03
270	1.84	1.87	0.42	0.17	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00										4.36
300	7.64	8.39	4.15	2.82	1.61	1.01	0.67	0.26	0.07	0.02	0.02								26.66
330	3.63	3.78	2.16	1.31	0.71	0.39	0.23	0.07	0.01	0.00									12.29
TOT	14.85	16.87	7.54	4.52	2.40	1.42	0.91	0.33	0.08	0.02	0.02								48.96

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.20: Distribuzione Autunnale della Frequenza Percentuale  
dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto A  
(30 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180	0.07	0.13	0.06	0.02	0.00	0.00													0.28
210	0.44	1.31	0.97	0.44	0.19	0.08	0.08	0.02	0.01										3.54
240	0.60	2.18	2.52	1.98	0.89	0.46	0.27	0.21	0.09	0.02									9.22
270	0.89	1.90	1.89	1.23	0.79	0.49	0.20	0.14	0.10	0.04	0.02	0.01	0.01						7.71
300	2.14	4.53	3.98	2.66	2.16	1.49	1.21	0.86	0.44	0.22	0.15	0.08	0.03	0.00					19.95
330	1.28	2.04	1.51	1.05	0.74	0.51	0.36	0.21	0.09	0.03									7.82
TOT	5.42	12.09	10.93	7.38	4.77	3.03	2.12	1.44	0.73	0.31	0.17	0.09	0.04						48.52

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.21: Distribuzione Invernale della Frequenza Percentuale  
dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto B  
(20 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180																			
210	0.18	0.72	0.80	0.46	0.24	0.11	0.03	0.01											2.55
240	0.49	1.72	2.54	2.48	1.68	1.00	0.50	0.21	0.07	0.03	0.01								10.73
270	0.70	2.29	2.45	1.87	1.42	1.04	0.79	0.30	0.14	0.15	0.15	0.06	0.04	0.02					11.42
300	1.10	3.37	3.58	2.92	2.83	2.35	1.58	0.75	0.47	0.36	0.17	0.07	0.03	0.01					19.59
330																			
TOT	2.47	8.10	9.37	7.73	6.17	4.50	2.90	1.27	0.68	0.54	0.33	0.13	0.07	0.03					44.29

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.22: Distribuzione Primaverile della Frequenza Percentuale  
dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto B  
(20 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180																			
210	0.49	1.28	0.56	0.22	0.04	0.01	0.00												2.60
240	1.39	3.40	2.95	1.53	0.78	0.47	0.19	0.04	0.01	0.01									10.77
270	1.31	3.53	2.29	1.31	0.74	0.49	0.35	0.11	0.05	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01					10.29
300	2.25	5.40	3.98	2.95	2.79	1.85	1.03	0.34	0.22	0.12	0.05	0.02	0.02	0.01					21.03
330																			
TOT	5.44	13.61	9.78	6.01	4.35	2.82	1.57	0.49	0.28	0.18	0.07	0.04	0.03	0.02					44.69

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.23: Distribuzione Estiva della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto B (20 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180																			
210	0.55	0.60	0.05	0.02															1.22
240	1.01	2.03	0.74	0.20	0.05														4.03
270	1.84	1.87	0.43	0.18	0.05	0.05	0.05	0.01	0.00	0.00									4.48
300	6.49	7.13	3.52	2.38	1.48	0.97	0.32	0.08	0.02	0.02	0.01								22.42
330																			
TOT	9.89	11.63	4.74	2.78	1.58	1.02	0.37	0.09	0.02	0.02	0.01								32.15

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.24: Distribuzione Autunnale della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto B (20 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180																			
210	0.38	1.11	0.82	0.37	0.17	0.09	0.04	0.01											2.99
240	0.60	2.18	2.52	1.98	0.91	0.51	0.34	0.18	0.02	0.01									9.25
270	0.89	1.90	1.90	1.25	0.86	0.57	0.31	0.17	0.07	0.05	0.04	0.02	0.01						8.04
300	1.82	3.85	3.38	2.26	1.97	1.38	0.71	0.37	0.19	0.11	0.07	0.03	0.01						16.15
330																			
TOT	3.69	9.04	8.62	5.86	3.91	2.55	1.40	0.73	0.28	0.17	0.11	0.05	0.02						36.43

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.25: Distribuzione Invernale della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto C (10 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180																			
210	0.10	0.41	0.41	0.23	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00										1.22
240	0.49	1.73	2.61	2.58	2.05	1.02	0.25	0.14	0.08	0.03	0.01	0.02	0.00						11.01
270	0.25	0.80	0.86	0.64	0.44	0.44	0.14	0.03	0.02	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00			3.68
300																			
330																			
TOT	0.84	2.94	3.87	3.45	2.55	1.47	0.39	0.17	0.10	0.05	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00			15.90

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.26: Distribuzione Primaverile della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto C (10 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180																			
210	0.29	0.72	0.29	0.10	0.01	0.00													1.41
240	1.39	3.43	2.99	1.57	0.95	0.44	0.08	0.02	0.01	0.01	0.00								10.88
270	0.46	1.24	0.80	0.45	0.23	0.20	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00								3.43
300																			
330																			
TOT	2.14	5.39	4.08	2.12	1.19	0.64	0.13	0.02	0.01	0.01	0.00								15.72

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

**Tabella 6.27: Distribuzione Estiva della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto C (10 m di Profondità)**

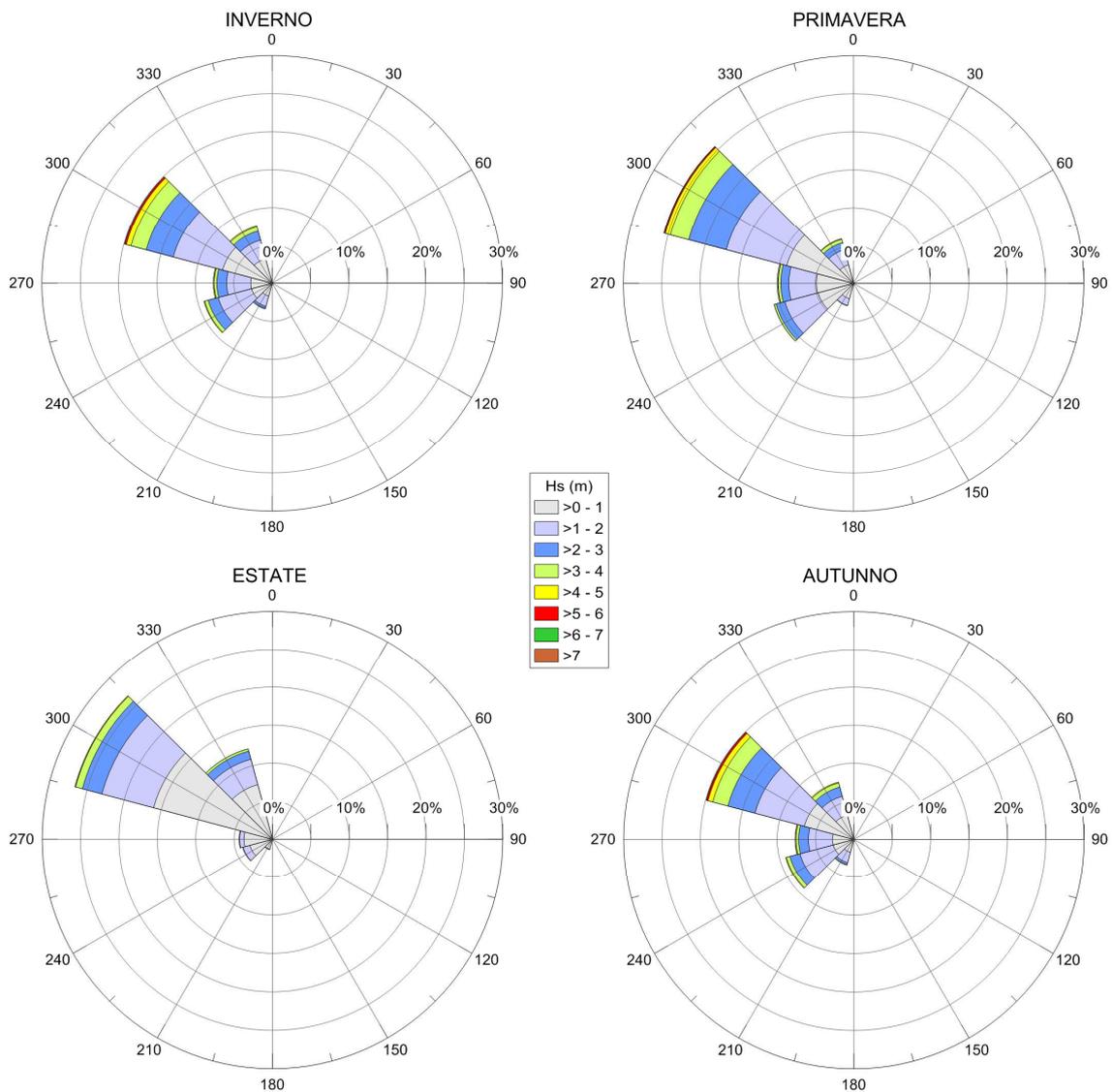
Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180																			
210	0.32	0.34	0.03	0.01															0.70
240	1.01	2.04	0.74	0.20	0.05														4.05
270	0.65	0.66	0.15	0.06	0.01	0.01													1.52
300																			
330																			
TOT	1.98	3.04	0.92	0.27	0.06	0.01													6.27

0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01

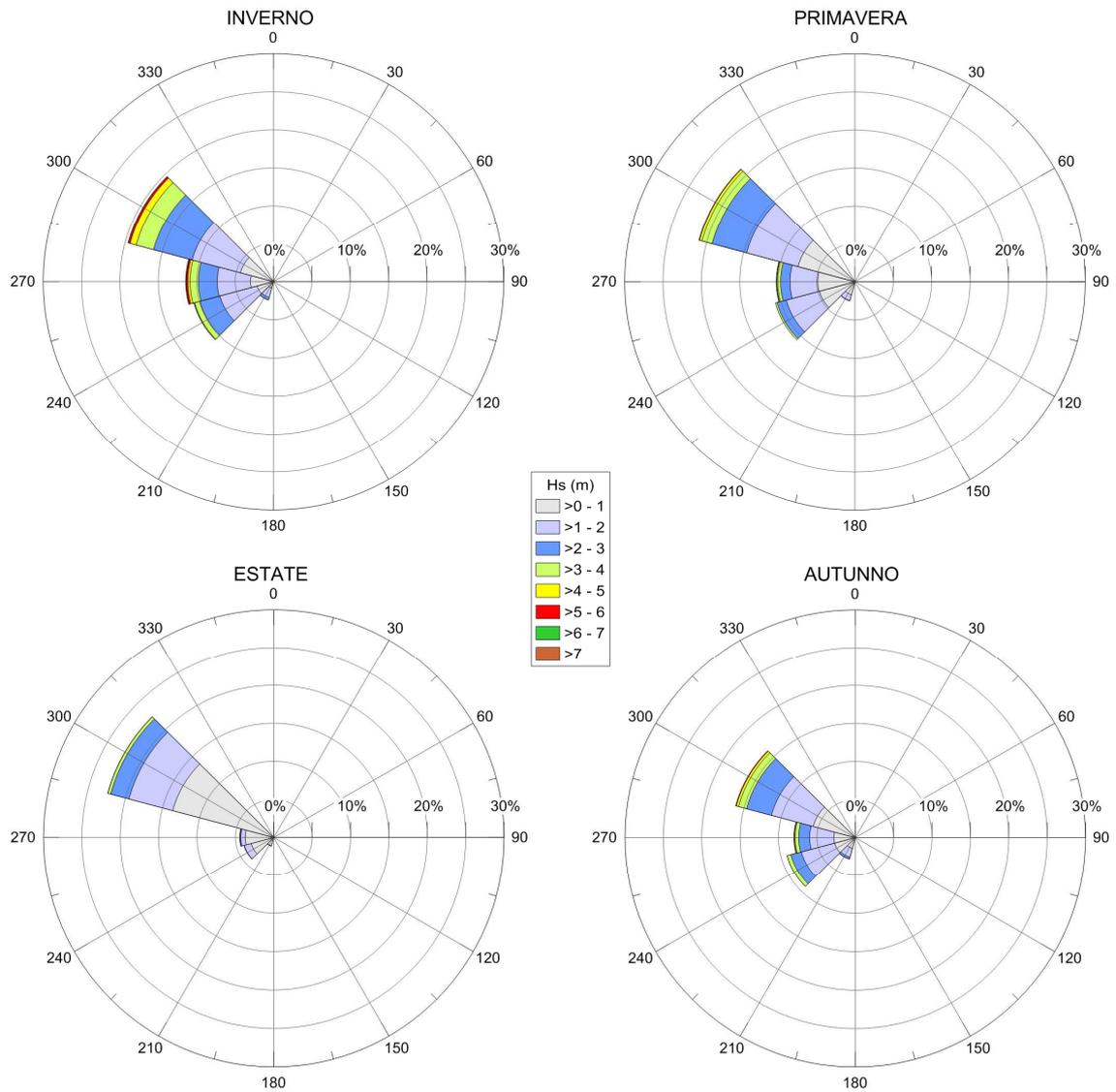
**Tabella 6.28: Distribuzione Autunnale della Frequenza Percentuale dell'Altezza d'Onda Significativa per Direzione di Provenienza – Punto C (10 m di Profondità)**

Dir (°N)	Hs (m)																		TOT
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	
0																			
30																			
60																			
90																			
120																			
150																			
180																			
210	0.22	0.63	0.43	0.19	0.03	0.01	0.00	0.00											1.51
240	0.60	2.21	2.58	2.06	1.11	0.53	0.24	0.10	0.03	0.01	0.00								9.47
270	0.31	0.67	0.66	0.43	0.28	0.22	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00								2.65
300																			
330																			
TOT	1.13	3.50	3.67	2.67	1.42	0.76	0.30	0.12	0.04	0.01	0.01								13.63

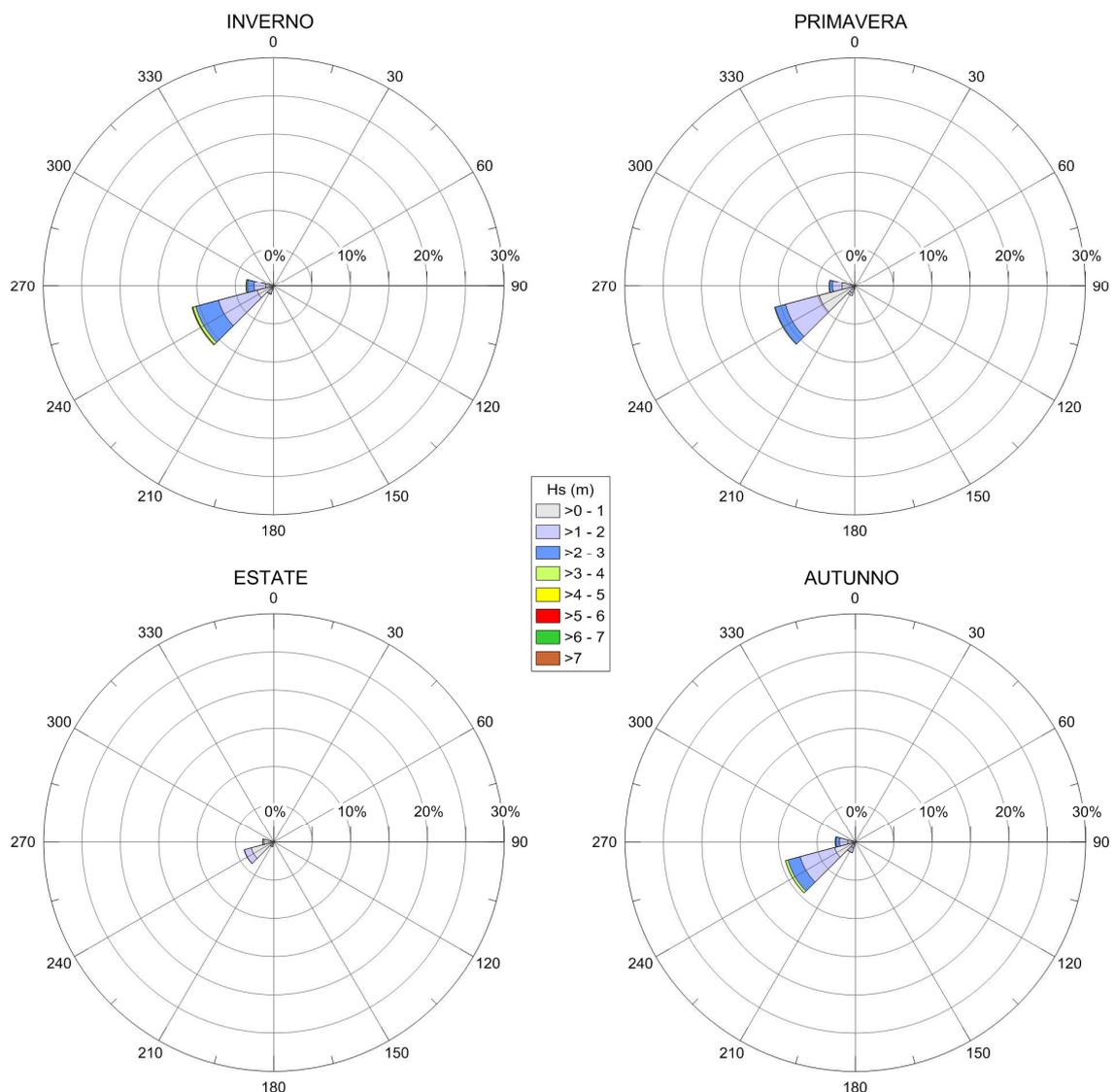
0.00 SIGNIFICA %&lt;0.01



**Figura 6.6: Rose Stagionali delle Onde a Costa – Punto A (30 m di Profondità)**



**Figura 6.7: Rose Stagionali delle Onde a Costa – Punto B (20 m di Profondità)**



**Figura 6.8: Rose Stagionali delle Onde a Costa – Punto C (10 m di Profondità)**

## 6.5 VALORI ESTREMI DELLE ONDE A COSTA

Le onde estreme a costa sono state calcolate in corrispondenza dei Punti A e B con il metodo di rifrazione analitica applicato alle onde estreme al largo (Tabella 6.12 e Tabella 6.13). In particolare, per ciascun punto di calcolo sono state selezionate le onde provenienti dalle direzioni comprese nel settore di esposizione locale: da 180 a 330°N per il Punto A e da 210 a 300°N per il Punto B.

I valori estremi a costa così ottenuti sono riportati in Tabella 6.29 e in Tabella 6.30 per il Punto A (30 m di profondità) e in Tabella 6.31 e in Tabella 6.32 per il Punto B (20 m di profondità). Nelle tabelle sono riportati, per ciascun periodo di ritorno considerato, i valori di altezza d'onda significativa locale, periodo significativo e direzione locale associati alle direzioni al largo. Si noti che i valori in tabella sono rappresentativi di stati di mare triorari.

I valori estremi sono stati inoltre calcolati nel Punto C, in prossimità del molo di sopraflutto del Porto di Oristano, su una profondità di 10 m, allo scopo di stimare l'agitazione ondosa residua interna al Porto dovuta alla penetrazione del moto ondoso in corrispondenza dell'imboccatura. I risultati sono presentati in Tabella 6.33 e in Tabella 6.34. Dalle tabelle si nota che le onde, nel corso della propagazione all'interno del Golfo, aumentano in altezza per effetto dello shoaling.

I valori omnidirezionali sono stati ottenuti propagando le onde omnidirezionali al largo, associando loro la direzione maggiormente critica all'interno del settore di esposizione di ciascun punto considerato (300°N nel caso dei Punti A e B e 270°N nel caso del Punto C).

Si noti che in corrispondenza del molo di sopraflutto (Tabella 6.33 e Tabella 6.34) in molti casi le onde estreme corrispondono all'altezza d'onda limite compatibile con la profondità di 10 m, pari a 7.8 m secondo l'equazione (6.4). In questi casi l'onda è da considerarsi frangente.

**Tabella 6.29: Onde Estreme a Costa (Punto A 30 m di Profondità di Figura 2.1) – Periodo di Ritorno 1, 10 e 25 Anni**

DIREZIONE AL LARGO (°N)	PERIODO DI RITORNO (Anni)								
	1			10			25		
	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.
	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)
180	2.2	6.2	181	2.9	7.8	186	3.1	8.3	188
210	3.1	7.3	211	4.1	8.6	213	4.4	9.1	214
240	4.3	8.8	241	5.4	9.9	242	5.7	10.3	242
270	4.7	9.2	269	6.3	10.7	268	6.8	11.2	267
300	5.7	10.5	292	6.9	11.6	289	7.4	12.0	289
330	4.2	10.6	310	4.9	11.8	305	5.2	12.3	303
OMNIDIR	6.1	10.9	291	7.4	12.0	289	7.8	12.4	288

**Tabella 6.30: Onde Estreme a Costa (Punto A 30 m di Profondità di Figura 2.1) – Periodo di Ritorno 50, 75 e 100 Anni**

DIREZIONE AL LARGO (°N)	PERIODO DI RITORNO (Anni)								
	50			75			100		
	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.
	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)
180	3.3	8.7	190	3.4	8.9	191	3.5	9.1	192
210	4.7	9.4	215	4.8	9.6	215	5.0	9.7	216
240	6.1	10.6	242	6.3	10.7	242	6.4	10.8	242
270	7.3	11.6	267	7.6	11.8	268	7.7	11.9	267
300	7.7	12.3	288	7.9	12.5	288	8.0	12.6	288
330	5.4	12.6	302	5.6	12.8	302	5.7	12.9	302
OMNIDIR	8.2	12.7	287	8.3	12.9	287	8.5	13.0	287

**Tabella 6.31: Onde Estreme a Costa (Punto B 20 m di Profondità di Figura 2.1) – Periodo di Ritorno 1, 10 e 25 Anni**

DIREZIONE AL LARGO (°N)	PERIODO DI RITORNO (Anni)								
	1			10			25		
	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.
	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)
210	2.9	7.3	214	3.9	8.6	218	4.2	9.1	219
240	4.2	8.8	242	5.4	9.9	243	5.8	10.3	244
270	4.6	9.2	267	6.3	10.7	266	6.9	11.2	266
300	5.6	10.5	287	6.8	11.6	284	7.4	12.0	284
OMNIDIR	6.0	10.9	286	7.4	12.0	284	7.9	12.4	283

**Tabella 6.32: Onde Estreme a Costa (Punto B 20 m di Profondità di Figura 2.1) – Periodo di Ritorno 50, 75 e 100 Anni**

DIREZIONE AL LARGO (°N)	PERIODO DI RITORNO (Anni)								
	50			75			100		
	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.
	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)
210	4.5	9.4	220	4.7	9.6	221	4.8	5.0	221
240	6.1	10.6	244	6.3	10.7	244	6.4	6.4	244
270	7.4	11.6	265	7.7	11.8	265	7.9	7.7	265
300	7.7	12.3	283	8.0	12.5	283	8.1	8.0	282
OMNIDIR	8.3	12.7	282	8.5	12.9	282	8.6	13.0	282

**Tabella 6.33: Onde Estreme in Corrispondenza del Molo di Sopraflutto (Punto C 10 m di Profondità) – Periodo di Ritorno 1, 10 e 25 Anni**

DIREZIONE AL LARGO (°N)	PERIODO DI RITORNO (Anni)								
	1			10			25		
	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.
	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)
210	2.7	7.3	223	3.8	8.6	227	4.2	9.1	228
240	4.3	8.8	245	5.7	9.9	246	6.2	10.3	246
270	4.9	9.2	265	6.9	10.7	263	7.6	11.2	263
OMNIDIR	7.1	10.9	263	7.8*	12.0	263	7.8*	12.4	263

(\*) Onda Frangente

**Tabella 6.34: Onde Estreme in Corrispondenza del Molo di Sopraflutto  
(Punto C 10 m di Profondità) – Periodo di Ritorno 50, 75 e 100 Anni**

DIREZIONE AL LARGO (°N)	PERIODO DI RITORNO (Anni)								
	50			75			100		
	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.	Hs Loc.	Ts	Dir Loc.
	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)	(m)	(s)	(°N)
210	4.6	9.4	228	4.7	9.6	229	4.9	9.7	230
240	6.6	10.6	247	6.9	10.7	247	7.0	10.8	247
270	7.8*	11.6	263	7.8*	11.8	263	7.8*	11.9	263
OMNIDIR	7.8*	12.7	263	7.8*	12.9	263	7.8*	13.0	263

(\*) Onda Frangente

## 6.6 VALORI ESTREMI DELLE ONDE ALL'INTERNO DEL PORTO DI ORISTANO

Sono stati infine stimati i valori estremi delle altezze d'onda in due punti selezionati all'interno del porto (Figura 6.9), denominati Punto 1 e Punto 2.

Per quanto riguarda il Punto 2 sono state stimate le onde generate localmente, attraverso l'applicazione di formule semplificate (SPM method, Army Corps of Engineers, 1984), considerando il vento estremo e la lunghezza del fetch relativi alle direzioni di interesse, quelle cioè dalle quali si può generare il moto ondoso. Le formule utilizzate sono le seguenti:

$$H_s = 5.112 \cdot 10^{-4} U_A F^{1/2} \quad (6.5)$$

$$U_A = 0.71 (U)^{1.23} \quad (6.6)$$

Dove  $H_s$  è l'altezza d'onda significativa,  $F$  è il fetch,  $U_A$  è il fattore di stress del vento.

Per quanto riguarda il Punto 1, sono invece state considerate sia le onde generate localmente dai venti estremi che agiscono su fetch limitati, sia le onde estreme che propagando dal largo verso costa riescono ad arrivare nei pressi del molo di sopraflutto del Porto e a penetrare al suo interno con altezze ridotte a causa della diffrazione indotta dal molo stesso. La stima di queste onde residue è stata effettuata mediante l'applicazione di coefficienti di diffrazione ( $K_d$ ) estratti dai nomogrammi di riferimento (Figura 6.10, Army Corps of Engineers, 1984) applicati alle onde estreme di Tabella 6.33-Tabella 6.34.

I risultati per le direzioni di interesse sono riportati in Tabella 6.35-

(\*) Onda Frangente

Tabella 6.37 per quanto riguarda il Punto 1 e in

(\*) Onda Frangente

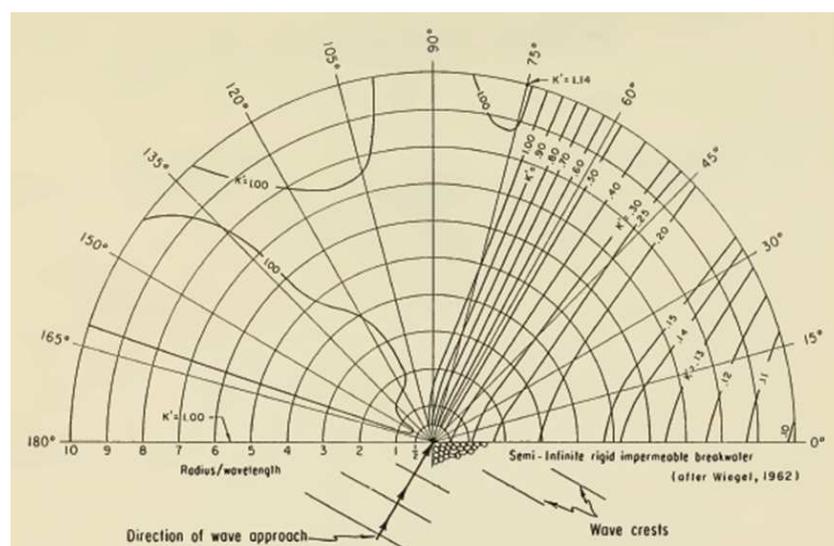
Tabella 6.38 per il Punto 2. Si nota che nel Punto 1 le onde provenienti dal largo, in particolare le onde associate al settore 270°N, non subiscono una significativa riduzione dell'altezza d'onda dovuta alla diffrazione per cui si presentano

praticamente indisturbate all'ingresso del Porto di Oristano. Al Punto 1 l'altezza d'onda limite compatibile con il fondale è di 6.2 m, corrispondente a 8 m di profondità secondo la relazione (6.4).

**Si sottolinea che si tratta di stime preliminari e indicative: per una adeguata descrizione dell'agitazione ondosa all'interno della rada portuale è necessaria l'applicazione di opportuni modelli numerici che richiedono la schematizzazione del Golfo e del Porto di Oristano. Si suggerisce di pianificare l'esecuzione di un apposito studio nelle successive fasi di progettazione.**



**Figura 6.9: Punti di Calcolo delle Onde Estreme Locali**



**Figura 6.10: Esempio di Diagramma di Diffrazione (Army Corps of Engineers, 1984)**

**Tabella 6.35: Valori Estremi delle Onde in Corrispondenza del Punto 1 –  
Onde Generate Localmente**

Direzione di Provenienza del Vento (°N)	PERIODO DI RITORNO (Anni)					
	1	10	25	50	75	100
	Hs Loc (m)	Hs Loc (m)	Hs Loc (m)	Hs Loc (m)	Hs Loc (m)	Hs Loc (m)
120-150	0.63	0.77	0.82	0.86	0.89	0.90
300-330	1.44	1.66	1.75	1.81	1.84	1.87

**Tabella 6.36: Valori Estremi delle Onde in Corrispondenza del Punto 1 –  
Onde Provenienti dal Largo – Periodo di Ritorno di 1, 10 e 25 Anni**

PERIODO DI RITORNO (Anni)								
1			10			25		
Dir Onde alla Testa del Molo (°N)	Kd	Hs Loc (m)	Dir Onde alla Testa del Molo (°N)	Kd	Hs Loc (m)	Dir Onde alla Testa del Molo (°N)	Kd	Hs Loc (m)
223	0.5	1.4	227	0.5	1.9	228	0.5	2.1
245	0.8	3.4	246	0.8	4.6	246	0.8	5.0
265	1.0	4.9	263	1.0	6.2*	263	1.0	6.2*

(\*) Onda Frangente

**Tabella 6.37: Valori Estremi delle Onde in Corrispondenza del Punto 1 –  
Onde Provenienti dal Largo – Periodo di Ritorno di 50, 75 e 100 Anni**

PERIODO DI RITORNO (Anni)								
50			75			100		
Dir Onde alla Testa del Molo (°N)	Kd	Hs Loc (m)	Dir Onde alla Testa del Molo (°N)	Kd	Hs Loc (m)	Dir Onde alla Testa del Molo (°N)	Kd	Hs Loc (m)
228	0.5	2.3	229	0.5	2.4	230	0.5	2.5
247	0.8	5.3	247	0.8	5.5	247	0.8	5.6
263	1.0	6.2*	263	1.0	6.2*	263	1.0	6.2*

(\*) Onda Frangente

**Tabella 6.38: Valori Estremi delle Onde in Corrispondenza del Punto 2 –  
Onde Generate Localmente**

Direzione di Provenienza del Vento (°N)	PERIODO DI RITORNO (Anni)					
	1	10	25	50	75	100
	Hs Loc (m)	Hs Loc (m)	Hs Loc (m)	Hs Loc (m)	Hs Loc (m)	Hs Loc (m)
120-150	0.55	0.68	0.72	0.76	0.78	0.79
270	0.63	0.77	0.81	0.85	0.87	0.88

## 7 VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

La variazione del livello marino in prossimità della costa è dovuta a varie cause, nel seguito elencate e commentate.

### 7.1 OSCILLAZIONE DOVUTA ALLA MAREA

La parte deterministica dell'oscillazione del livello, dovuta alla marea, risulta dal contributo di un gran numero di componenti elementari di periodicità nota (componenti armoniche) e può essere espressa con l'equazione:

$$L_D(t) = \sum_1^N A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (7.1)$$

dove:

$A_k$  è l'ampiezza della k-esima componente armonica della corrente di marea;

$\omega_k$  è la sua velocità angolare;

$\varphi_k$  è la sua fase;

$N$  è il numero di componenti armoniche.

Poiché le  $\omega_k$  sono note, l'individuazione dell'oscillazione di marea si riduce alla determinazione delle costanti armoniche  $A_k$  e  $\varphi_k$  delle principali componenti di marea.

Ampiezza e fase delle principali componenti armoniche per l'area in esame vengono fornite dal modello OTPS e sono riportate nella Tabella 7.1.

Le oscillazioni legate all'effetto della marea calcolate dal modello OTPS sono state estratte per un periodo di 20 anni. In questo modo è possibile valutare anche il livello di L.A.T. (lowest astronomical tide) e H.A.T. (highest astronomical tide) per cui è necessario un periodo di almeno 18.6 anni.

Un esempio della serie temporale di livello di marea, relativa a un mese, viene mostrato in Figura 7.1: si noti che l'escursione di marea è di circa 31 cm in fase di sizige e precisamente (come è specificato nella Tabella 7.2):

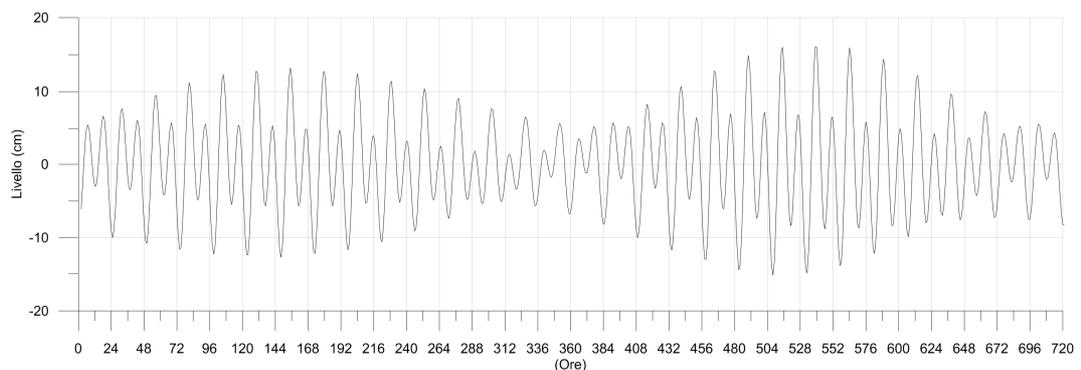
- M.H.W.S., cioè la media del livello, in fase di sizigie, durante l'alta marea;
- M.H.W.N., cioè la media del livello, in fase di quadratura, durante l'alta marea;
- M.L.W.N., cioè la media del livello, in fase di quadratura, durante la bassa marea;
- M.L.W.S., cioè la media del livello, in fase di sizigie, durante la bassa marea;
- M.T.L., cioè il livello medio di marea.

**Tabella 7.1: Ampiezza e Fase delle Principali Componenti di Marea al Largo di Oristano**

COMPONENTE	AMPIEZZA	FASE
ARMONICA	(cm)	(°)
M2	7.0	-128
S2	2.7	-112
N2	1.4	-141
K2	0.8	-114
K1	3.6	-176
O1	1.6	116
P1	1.2	173
Q1	0.2	46

**Tabella 7.2: Variazioni del Livello Marino Dovuto alla Marea**

Parametro	Altezza del Livello (cm)
H.A.T	18.0
M.H.W.S.	14.5
M.H.W.N.	3.0
M.T.L.	0.0
M.L.W.N.	-4.0
M.L.W.S.	-14.0
L.A.T.	-16.0


**Figura 7.1: Serie Temporale del Livello di Marea al Largo di Oristano (OTPS)**

## 7.2 SET UP DA VENTO

La variazione del livello del mare a costa, causata dallo stress del vento sulla superficie marina si può estendere ad una fascia costiera piuttosto ampia, le cui dimensioni trasversali sono dell'ordine del "raggio di deformazione di Rossby",  $R$ .

Vengono pertanto calcolati i contributi di vari termini forzanti nell'innalzamento complessivo del livello del mare.

L'equazione che descrive l'equilibrio tra lo stress del vento ortogonale a costa e la pendenza della superficie del mare è scritta come:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\tau_w}{\rho_w d_R} \quad (7.2)$$

dove  $d_R$  è la profondità del fondale,  $\rho_w$  la densità dell'acqua,  $\tau_w$  lo stress del vento che può essere calcolato in funzione della velocità del vento  $W$  come:

$$\tau_w \equiv \rho_{air} C_d W^2$$

ed il coefficiente di drag  $C_d$  può essere calcolato come (Garrat, 1977):

$$C_d = 6.9 \cdot 10^{-4} + 7.5 \cdot 10^{-5} W \quad (7.3)$$

dove  $W$  rappresenta la velocità media del vento su un intervallo di 10' e alla quota di 10 m rispetto al livello medio del mare.

La distanza su cui si esplica la variazione del livello del mare espresso dall'equazione (7.2) può essere assunta uguale al "raggio di Rossby", definito come:

$$R = \frac{\sqrt{d_R}}{f} \quad (7.4)$$

dove  $f = 2\omega \sin \varphi$  è il parametro di Coriolis,  $\omega$  la velocità di rotazione della terra,  $\varphi$  la latitudine.

L'innalzamento del livello medio per effetto del vento longitudinale a costa, con la costa a destra rispetto alla direzione da cui il vento spirava, è descritta dall'equazione:

$$\eta = \frac{t \tau_w}{\rho_{air} f R} e^{-x/R} \quad (7.5)$$

dove  $x$  è la distanza da costa e  $t$  è il tempo per cui spirava il vento.

Tale formula viene ottenuta in approssimazione di costa infinita e assenza di attrito, da cui deriva che l'innalzamento cresce indefinitamente con il tempo. In realtà, anche con vento costante, si raggiungerebbe una condizione di equilibrio definita dai fenomeni di attrito. Nei calcoli si è assunta una durata del vento di 3 ore, cioè la durata tipica stimata per i picchi di tempesta, ed una profondità  $d_R$  pari a 200 m, che è all'incirca quella media antistante la costa in esame.

### 7.3 VALORI ESTREMI

I risultati ottenuti dall'applicazione delle formule precedenti sono sintetizzati nella Tabella 7.3.

**Tabella 7.3: Valori Estremi del Livello Marino Indotti da Marea e Vento**

Valori Estremi di Innalzamento del Livello del Mare (cm)						
Termine Forzante	Periodo di Ritorno (Anni)					
	1	10	25	50	75	100
Set up da vento trasversale	42	57	64	69	72	74
Set up da vento longitudinale	27	40	47	51	54	55
Marea	20	20	20	20	20	20

I valori stimati richiedono un breve commento:

- il valore della componente di marea è stato considerato identico, per tutti i periodi di ritorno, il che non è rigorosamente vero in quanto esistono le armoniche di lungo periodo, che però sono di ampiezza tale da non modificare sostanzialmente i valori qui definiti;
- per i calcoli del set-up da vento sono state utilizzate formule semplificate ma che hanno spesso avuto riscontri oggettivi;
- nella stima non sono stati inclusi gli effetti dovuti alle depressioni atmosferiche, in quanto non sono risultate disponibili informazioni sui gradienti barici tipici dell'area.

Si suggerisce pertanto, per maggiore cautela, di considerare come valore estremo ai fini ingegneristici la somma dell'elevazione di marea a del set up indotto dal vento trasversale:

$$\eta_{1\text{anno}} = 42+20 \approx 62 \text{ cm}$$

$$\eta_{10\text{anni}} = 57+20 \approx 77 \text{ cm}$$

$$\eta_{25\text{anni}} = 64+20 \approx 84 \text{ cm}$$

$$\eta_{50\text{anni}} = 69+20 \approx 89 \text{ cm}$$

$$\eta_{100\text{anni}} = 72+20 \approx 92 \text{ cm}$$

$$\eta_{150\text{anni}} = 74+20 \approx 94 \text{ cm}$$

## 8 LE CORRENTI NELLA DARSENA

Per la stima dell'intensità delle correnti che si possono sviluppare all'interno del Porto, in assenza di misure - come in questo caso - sarebbe necessario effettuare un'accurata modellazione idrodinamica che tenga in considerazione i principali fattori di generazione, come vento, marea, gradienti barici, etc.. Tuttavia, tale attività non è compatibile con le tempistiche tipiche di uno studio di fattibilità.

### 8.1 CORRENTI SUPERFICIALI MASSIME

Al fine di fornire dei valori indicativi della corrente massima attesa nel bacino portuale, in prima analisi si può ricorrere alle formule di Ekman per la stima della corrente da vento, assumendo cioè che il vento sia il principale termine forzante. Sono stati quindi considerati i valori tipici ed estremi di velocità del vento associati alle direzioni di maggiore interesse, vale a dire quelle che agiscono lungo gli assi principali di estensione del porto, e stimate le correnti indotte sulla superficie. Le analisi hanno evidenziato la scarsa entità delle correnti da vento, con valori massimi di circa 5-7 cm/s in superficie in condizioni sia tipiche che estreme.

Tuttavia, tale stima non considera il contributo alla corrente dovuto alle variazioni di marea, che nel Porto di Santa Giusta potrebbero essere non trascurabili in quanto pesantemente influenzate dal retrostante Stagno di Santa Giusta, cui il porto è connesso mediante un canale. Non è possibile stimare l'entità di queste correnti di marea senza un'appropriata modellazione idrodinamica del bacino: in fase preliminare, suggeriamo di considerare un contributo massimo di 5-10 cm/s.

Sommando i due contributi suddetti, si ottengono valori massimi di corrente superficiale compresi nel range 10-17 cm/s.

**Si sottolinea che tale stima preliminare non è supportata né da misure né da simulazioni numeriche, e che pertanto andrà verificata con un apposito studio idrodinamico da effettuarsi nelle successive fasi di progettazione.**

### 8.2 PROFILO VERTICALE DELLA CORRENTE

In acque basse il sistema è essenzialmente barotropico, caratterizzato cioè da omogeneità verticale del campo di densità che, ai fini pratici, corrisponde anche alla condizione più energetica. Per stimare l'intensità della corrente a varie quote lungo la colonna d'acqua si può, pertanto, ipotizzare che il profilo verticale sia del tipo "power profile", caratterizzato cioè da una relazione del tipo:

$$\frac{V_{z1}}{V_{z2}} = \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^{1/n} \quad (8.1)$$

dove  $V_{z1}$  è la velocità di corrente al livello  $z_1$  e  $V_{z2}$  è la velocità di corrente al livello  $z_2$ , ed  $n$  un valore desumibile dai dati sperimentali. Il coefficiente  $n$ , per acque basse o intermedie assume valori variabili da 4 a 7. Tenuto conto che non esistono dati locali sul decadimento verticale della velocità di corrente, è preferibile adottare il valore  $n = 7$ , leggermente più cautelativo rispetto agli altri.

## 9 CONCLUSIONI

Il presente studio si inserisce nell'ambito dello studio di fattibilità di un deposito costiero di GNL da ubicarsi nel Porto di Santa Giusta di Oristano, e si pone l'obiettivo di fornire un inquadramento meteomarinario preliminare dell'area di studio.

Per quanto riguarda vento, onde e correnti sono stati reperiti e opportunamente validati dati da varie fonti, fino a giungere alla definizione di un dataset ottimale per ciascun parametro. Mediante l'analisi statistica sono state poi definite le condizioni tipiche annuali e stagionali, nonché i valori estremi per periodi di ritorno di 1, 10, 25, 50, 75 e 100 anni al largo di Oristano.

In questa Rev.1, sono stati inoltre reperiti ed analizzati i dati di vento misurati a Capo Frasca, che hanno permesso di verificare la validità dei risultati ottenuti nella precedente Rev.0, e ricavare la relazione tra il vento dei 10' e la raffica.

E' stata quindi effettuata la propagazione delle onde dal largo a costa in tre punti, a 30 m (Punto A), 20 m (Punto B) e 10 m (Punto C) di profondità, mediante l'applicazione del metodo di rifrazione analitica. Infine, allo scopo di fornire i dati necessari per la realizzazione degli studi di manovrabilità e ormeggio, sono stati stimati - con metodi semplificati - i valori estremi delle altezze d'onda in due punti selezionati all'interno del porto, denominati Punto 1 e Punto 2, considerando sia le onde generate localmente dai venti estremi, sia le onde estreme che, propagando dal largo verso costa, riescono a penetrare attraverso l'imboccatura portuale, sebbene diffratte per interazione con il molo di sopraflutto.

Per quanto riguarda le correnti, non essendo disponibili né misure né dati ricostruiti, e non potendo effettuare un'adeguata modellazione idrodinamica del bacino (non compatibile con i tempi di esecuzione dello studio), sono stati forniti dei valori puramente indicativi delle correnti massime superficiali ragionevolmente attese.

Per le fasi successive del progetto in esame, si suggerisce quanto segue:

- date le caratteristiche morfologiche del Golfo di Oristano e l'esposizione del paraggio del molo del porto, si suggerisce di pianificare l'applicazione di modellistica numerica allo stato dell'arte, in grado di riprodurre in maniera ottimale la distribuzione dell'energia ondosa all'interno del Golfo;
- di pianificare la realizzazione di uno studio di agitazione ondosa, basato sull'applicazione di appropriati modelli numerici, finalizzato alla stima accurata delle onde residue nelle aree di manovra e di ormeggio, in condizioni sia tipiche che estreme, necessarie alla definizione del *downtime* e delle finestre operative;
- di pianificare la realizzazione di un apposito studio idrodinamico, finalizzato a riprodurre le correnti massime attese all'interno della darsena tenendo conto del ciclo di marea, dei venti tipici ed estremi nonché delle caratteristiche morfologiche del bacino. A tale proposito, si ricorda che i valori di corrente stimati in questo studio non sono supportati né da misure né da simulazioni numeriche, e che pertanto sono da considerarsi puramente indicativi.

**RIFERIMENTI**

APAT, 2004 – “Italian Wave Atlas”, Università di Roma Tre.

Army Corps of Engineers, 1984, “*Shore Protection Manual*”, vol. 1, 2 edition, 1984.

Boccotti P., 1997. “*Idraulica Marittima*”, UTET.

Cavalieri L., De Filippi G.L., Grancini G.F., Iovenitti L.M. and Tosi R., 1986. “Extreme wave conditions in the Tyrrhenian Sea” *Ocean Engng.*, Vol. 13, no. 2, pp. 257 – 280.

Grancini G.F., Iovenitti L.M. e De Filippi G.L., 1979. “Analisi del moto ondoso nel Canale di Sicilia” Cetena, Genova.

Goda Y., 2010, “*Random Seas and Design of Maritime Structures*”, 3rd Edition, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 33.

Gumbel E.J., 1958. “*Statistics of Extremes*”, Columbia University Press.

Rampolli M., Biancardi A. and De Filippi G.L., 1996. “Meteo-oceanographic Premises for Structural Design Purposes in the Adraitic Sea: Aquisition and processing of data”, 15 th Int. Conf. O.M.A.E., Firenze.

DNV, 2010, *ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL LOADS*, - item 3.6 Long term statistics.

International Standard ISO 19901-1:2005(E) – Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 1: Metocean Design and operating considerations.