Regione Emilia-Romagna

AGENZIA REGIONALE PER LA SICUREZZA TERRITORIALE E LA PROTEZIONE CIVILE
Servizio Area Reno e Po di Volano - Sede di Ferrara

Deliberazione 11 giugno 2018 n. 859

Comune di Comacchio (FE) - COD. 7S1F004 - Interventi di manutenzione ordinaria delle opere di difesa della costa e ripascimento delle spiagge in erosione lungo il litorale ferrarese.

CUP: F51G18000250002

Importo: € 100.000,00

PROGETTO ESECUTIVO

ELABORATI:

RELAZIONE TECNICA DI CALCOLO DELLE STRUTTURE

I COLLABORATORI	I PROGETTISTI	IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO	TAV. N. ---
	Dott. Maurizio Farina	Dott. Claudio Miccoli	ALL. N. ---
	Dott. Alessandro Lanaro		SCALA: ------
	Ing. Stefano Bellesi		DATA: 05 novembre 2018
			COMUNE: Comacchio (FE)

REVISIONE	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	APPROVATO	AUTORIZZATO

SOMMARIO

1 DOCUMENTI DI SINTESI 1

1.1 SINTESI DEL PERCORSO PROGETTUALE 1
1.2 CONDIZIONI D'USO E LIVELLI DI SICUREZZA DELLA COSTRUZIONE 2
2 RELAZIONE DI CALCOLO 3

2.1 PREMESSA 3
2.2 DESCRIZIONE GENERALE DELL'OPERA E CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE 3
2.3 QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO ADOTTATO 3
2.3.1 Norme di riferimento cogenti 3

2.3.2 Altre norme e documenti tecnici integrativi 3

2.4 AZIONI DI PROGETTO SULLA COSTRUZIONE 3
2.4.1 Azione del moto ondoso 4

2.4.2 Prospetto azioni orizzontali sul palo 5

2.5 COMBINAZIONI E/O PERCORSI DI CARICO 5
2.6 CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI MATERIALI 6
3 VERIFICA PALI 7

3.1 METODOLOGIA DI MODELLAZIONE ED ANALISI 7
3.2 MODELLAZIONE DELLA GEOMETRIA, DEI VINCOLI E DEI CARICHI 7
3.3 SCHEDA CALCOLO PALO TIPO 1 8
3.4 SCHEDA CALCOLO PALO TIPO 2 10

ALLEGATO - Analisi meteo marina del paraggio costiero del Lido di Spina in comune di Comacchio (FE)

1 DOCUMENTI DI SINTESI

1.1 SINTESI DEL PERCORSO PROGETTUALE

L'opera oggetto della presente relazione consiste nel prolungamento a mare, per una lunghezza complessiva di 50 metri, del pennello n. 1 posizionato immediatamente a sud del "Bagno Jamaica" in località Lido di Spina, Comune di Comacchio (FE).

La struttura ha la funzione di garantire una maggiore protezione allo stabilimento balneare dalle mareggiate provenienti da scirocco e di intercettare una parte del trasporto solido litoraneo sotto costa, favorendo l'ampiamento della spiaggia circostante a vantaggio dell'argine di difesa subito a monte.

Il pennello n.1 è stato realizzato, parzialmente rispetto alla lunghezza prevista, nel 2014-15. È costituito da una fila continua di pali di legno di rovere di diametro ø=28 cm, di lunghezza 6 m a terra e di 8 m in mare, con quota di testa palo a +1,00 m.

L'intervento prevede di aggiungere altri pali in legno di castagno per 50 m complessivi. Considerando il profilo del fondale[1], e volendo garantire una profondità di infissione per almeno i 2/3 della lunghezza complessiva, nel tratto di progetto sono state previste due geometrie:

- Tipo 1 per primo tratto di 35 m circa, dalla quota -1.08 m a -1.78 m, ø=26 cm ed L=8 m;
- Tipo 2 per secondo tratto di 15 m circa, dalla quota -1.78 m a -2.46 m, ø=28 cm ed L=10 m.

La pendenza media del fondale è pari al 2.7%, con valori del 1.9% per il primo tratto e del 4.5% per il secondo tratto.

Il tracciato, il profilo longitudinale e lo schema di posa sono riportati rispettivamente nelle tavole 3.1, 3.2.

[1] Rilievo del 23/10-3/11-2017 nell'ambito dello "Studio morfologico su quattro aree della costa emiliano-romagnola comune di Comacchio (FE) con tecniche di indagini topografiche e batimetriche sperimentali"

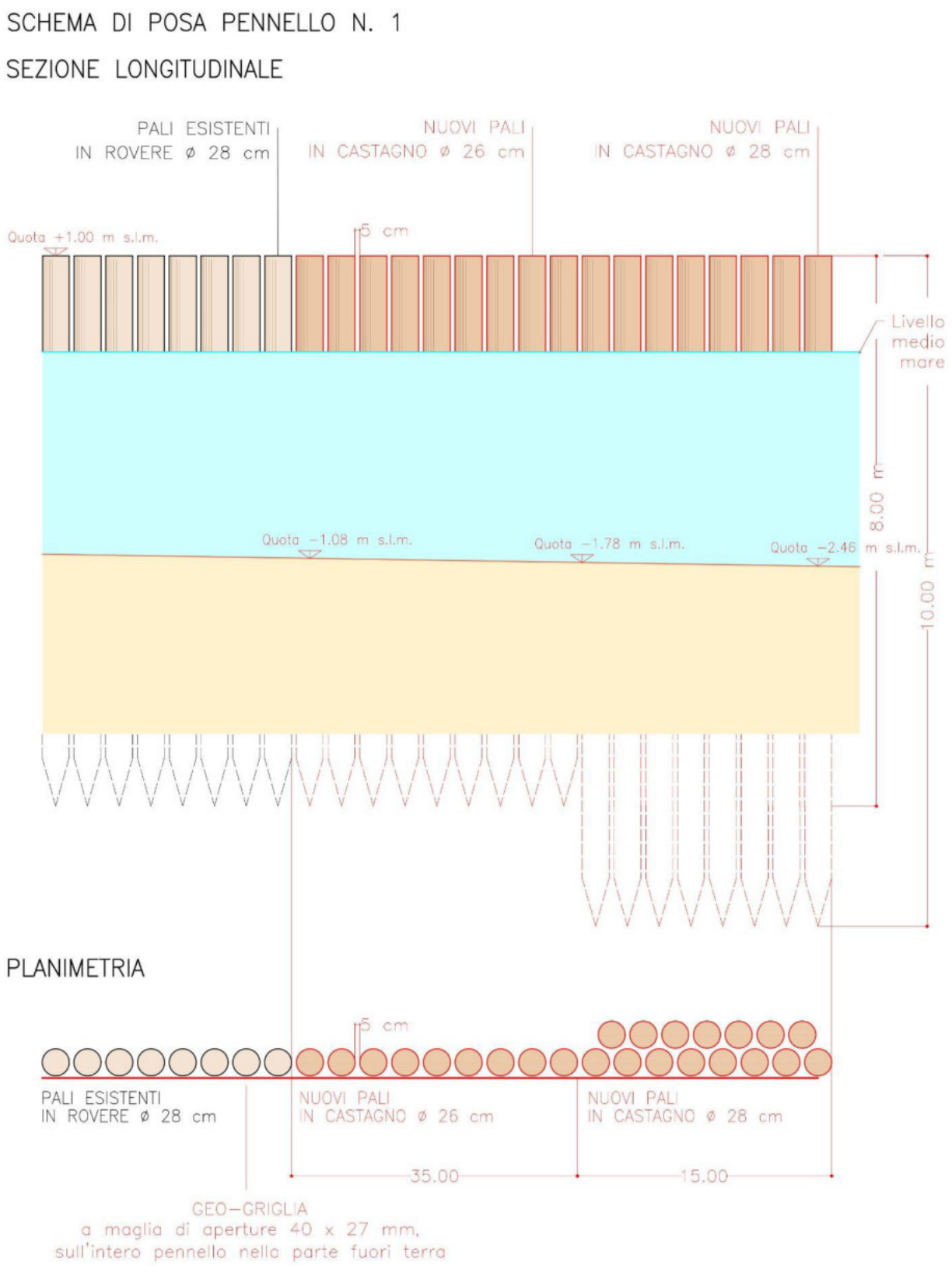


Figura 1 – Schema di posa pali per il prolungamento del pennello n. 1

1.2 CONDIZIONI D'USO E LIVELLI DI SICUREZZA DELLA COSTRUZIONE

Le condizioni d'uso, essendo un manufatto privo di rilevanza per la pubblica incolumità ai fini sismici, corrispondono alla classe I.

Nella tabella successiva si riportano alcuni principali parametri di progettazione:

Vita Nominale	Classe d'uso	Coeff. D'uso	Periodo di riferimento
10 anni	I	0,7	7 anni

2 RELAZIONE DI CALCOLO

2.1 PREMESSA

Scopo della seguente relazione di calcolo è verificare i pali più sollecitati nel tratto di prolungamento del pennello esistente alle azioni del moto ondoso e dell'urto di imbarcazioni. La struttura è posizionata nel Lido di Spina in comune di Comacchio (FE) e fa parte del sistema di difesa realizzato nel paraggio costiero per limitare l'erosione e l'ingressione marina verso l'abitato.
Nello specifico si considereranno come criteri di progetto/verifica del manufatto le prescrizioni riportate nelle NTC 2018 e nel CNR_DT 206/2007 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno", utilizzando un approccio agli stati limite (SLU e SLE) per le verifiche.

2.2 DESCRIZIONE GENERALE DELL'OPERA E CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE

Il nuovo tratto di pennello sarà realizzato in legno di castagno. In particolare, i pali sono disposti:

- secondo un interasse di 5 cm;
- con diametro ø=26 cm ed L=8 m per i primi 35 m a singola fila, con l'elemento più sollecitato posizionato a quota -1.78 m ed una lunghezza fuori terra stimata di 2.78 m;
- con diametro ø=28 cm ed L=10 m per gli ultimi 15 m a fila doppia sfalsata, con l'elemento più sollecitato posizionato a quota -2.46 ed una lunghezza fuori terra stimata di 3.46 m.

2.3 QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO ADOTTATO

2.3.1 Norme di riferimento cogenti

Strutture in legno: NTC 17/01/2018.

2.3.2 Altre norme e documenti tecnici integrativi

Strutture in legno: CNR DT 206/2007 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno".
Documenti tecnici integrativi: "Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe marittime", Consiglio Superiore sei Lavori Pubblici, pubbl.1450, Roma 1996 ed Eurocodice 1 EN 1991-1-7.

2.4 AZIONI DI PROGETTO SULLA COSTRUZIONE

La verifica di calcolo del pennello verrà eseguita considerando il palo singolo nel tratto 1 e due pali nel tratto 2. In particolare, saranno studiati gli elementi che risultano più sollecitati per tipologia e posizione rispetto al fondale:

- palo singolo, con diametro ø=26 cm ed L=8 m, posizionato a quota -1.78 m ed una lunghezza fuori terra stimata di 2.78 m (tipo 1);
- doppio palo, con diametro ø=28 cm ed L=10 m, posizionato a quota -2.46 ed una lunghezza fuori terra stimata di 3.46 m (tipo 2).

I pali sono sollecitati dalla sola azione dovuta al moto ondoso, che rientra fra i carichi accidentali.

2.4.1 Azione del moto ondoso

L'azione delle onde ha una distribuzione ed un'intensità risultano fortemente aleatorie. Gli aspetti che maggiormente la influenzano sono:

- la profondità del fondale marino e la possibilità di frangimento;
- l'onda di progetto;
- l'erosione al piede.

L'andamento del fondale marino in prossimità dell'opera è basato su un rilevo topo-batimetrico del 2017 (vedi nota 1 al paragrafo 1.1). Le profondità massime stimate per ogni tipo di palo sono di 1.78 e 2.46 m. La distanza massima raggiunta dalla battigia è di 123 m circa per una pendenza media del profilo pari a 2.7%, in particolare del 1.9% per il primo tratto e del 4.5% per il secondo tratto.

Nelle zone costiere il frangimento avviene in una zona relativamente ampia caratterizzata da una profondità variabile, chiamata *breaking-zone* o *surf-zone* (Goda, 2000).

Il meccanismo di attenuazione delle onde all'interno della *surf-zone* è molto difficile da capire, a causa della complicata natura dei processi che avvengono al suo interno. Per calcolare l'altezza dell'onda al frangimento si utilizza una formula empirica fornita da Goda (2000):

$$\frac{H_b}{l_o} = A\left\{1 - exp\left[-1.5\frac{\pi h}{l_0}\left(1 + 15tan^{\frac{4}{3}}\theta\right)\right]\right\}$$

- h è la profondità del fondale;
- l_0 è la lunghezza del pennello;
- θ denota l'angolo tra il fondale marino e il piano orizzontale e $tan\theta$ rappresenta la pendenza media del fondale.

Il coefficiente A varia a seconda che le onde siano regolari o irregolari; nel primo caso vale 0.17 mentre nel secondo varia tra 0.12 ÷ 0.18 a seconda delle caratteristiche del frangimento. In via semplificativa, si pone A = 0.17.

Il valore di H_b risulta essere pari a:

- 2.79 m nel tratto 1;
- 2.49 m nel tratto 2;

Nello studio del moto ondoso allegato alla presente relazione è stata individuata l'onda di progetto Hs = 2.00 m con direzione 90°. Per le verifiche di calcolo, essendo il palo cilindrico, il valore della direzione non è vincolante.

Considerando i bassi fondali per il calcolo della spinta dovuta al moto ondoso è possibile adottare la FORMULA DI HIROI (1919). Lo sviluppo di Hiroi per le pressioni d'onda si basa su un'analogia con la pressione idrodinamica. Questa formula si basa su un campo di misurazioni ottenute dalla calibrazione delle pressioni di Stevenson e le sue applicazioni sulle onde frangenti in mari
poco profondi. La distribuzione delle pressioni viene assunta uniforme lungo la verticale e pari a:

$$p = 1.5 \cdot \rho \cdot G \cdot H_d = 30\ kN/m^2$$

- p è la pressione della cresta;
- $H_d = 1.25 \cdot H_{1/3}$ è l'altezza dell'onda impattante.

Lungo l'altezza H_d sommata alla profondità del medio mare la pressione dell'onda solleciterà orizzontalmente il palo di sostegno. Essendo $H_d = 2{,}50\ m$ il palo sarà sollecitato in modo uniformemente distribuito per tutta la sua altezza fuori terra.

Nel calcolo dell'altezza fuori terra non sono stati considerati gli effetti dovuti all'erosione al piede dell'opera e della subsidenza, in quanto di difficile stima e previsione. L'eventuale aumento dell'altezza

fuori terra, comunque, sarà compensato dall'accumulo di sedimento catturato dalla struttura con conseguente stabilizzazione del fondale.
Per il palo di tipo 1 il valore viene considerato un valore $p = 15\ kN/m^2$, ovvero pari alla metà del carico stimato, in quanto l'onda in questo punto ha già buona parte della sua energia dissipata per via della doppia fila di pali del tratto 2 anteriore.

2.4.2 Prospetto azioni orizzontali sul palo

Carichi permanenti strutturali (G_1)	assenti
Carichi permanenti non strutturali (G_2)	assenti
Carichi accidentali (Q_{ki})	
Carico accidentale (Q_{k1})	
- azione moto ondoso	30/15 kN/m^2

I carichi dovuti al vento e alla neve, sono considerati trascurabili data l'altezza fuori terra dell'intera struttura e la presenza di acqua.
L'azione sismica, infine, non viene considerata in quanto sulla base dell'allegato 1 della D.G.R. n. 2272 del 21/12/2016[2] la passerella pedonale ricade fra gli interventi privi di rilevanza per la pubblica incolumità ai fini sismici quale "*A.2.3. Opere idrauliche minori, quali briglie, pennelli, opere di difesa spondale, di altezza ≤ 2 m prive di ancoraggi (L1)".*

2.5 COMBINAZIONI E/O PERCORSI DI CARICO

Le combinazioni delle azioni (Ed) per il calcolo sono, in base a quanto disposto al paragrafo § 2.5.3 delle NTC 2018, le seguenti:

SLU:	$\Upsilon_{G1}G_1+\Upsilon_{G2}G_2+\Upsilon_P P+\Upsilon_{Q1}Q_{k1}+\Upsilon_{Q2}\psi_{02}Q_{k2}+\Upsilon_{Q3}\psi_{03}Q_{k3}+\ldots$
SLE rara:	$G_1+G_2+P+Q_{k1}+\psi_{02}Q_{k2}+\psi_{03}Q_{k3}+\ldots$
SLE frequente:	$G_1+G_2+P+_{\psi 11}Q_{k1}+\psi_{22}Q_{k2}+\psi_{23}Q_{k3}+\ldots$
SLE quasi permanente:	$G_1+G_2+P+\psi_{21}Q_{k1}+\psi_{22}Q_{k2}+\psi_{23}Q_{k3}+\ldots$

I coefficienti parziali di sicurezza adottati sono dedotti dalla tabella 2.63.I:
Υ_{Qi}= 1,50 per carichi variabili (valore più gravoso)

[2] D.G.R. n. 2272 del 21/12/2016[2] "Atto di indirizzo recante l'individuazione degli interventi privi di rilevanza per la pubblica incolumità ai fini sismici e delle varianti in corso d'opera, riguardanti parti strutturali, che non rivestono carattere sostanziale, ai sensi dell'articolo 9, comma 4, della L.R. n. 19 del 2008"

I coefficienti di combinazione adottati sono quelli per le azioni dovute al vento, essendo il fattore scatenante del moto ondoso, e sono dedotti dalla tabella 2.5.I:

ψ_0= 0,60
ψ_1= 0,20
ψ_2= 0,00

Per le resistenze (Rd) i coefficienti parziali di sicurezza per i parametri geotecnici del terreno sono dedotti dalla tabella 6.2.II.

NOME PARAMETRO	SIMBOLO	COEFFICIENTE PARZIALE DI SICUREZZA	**(M1)**	**(M2)**
Tangente angolo resistenza al taglio	tan' ϕ	$\Upsilon_{\phi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\Upsilon_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	cu'_k	$\Upsilon_{cu'}$	1,0	1,4
Peso unità di volume	Υ	Υ_{Υ}	1,0	1,0

2.6 CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI MATERIALI

I pali saranno realizzati in legno massiccio di castagno.
Si riportano di seguito le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati ed i parametri dedotti dalle tabelle 4.4.III e 4.4.IV.

Legno massiccio Castagno

(da tabella 18.3 - Classi di resistenza secondo EN 11035, per specie legnose di provenienza italiana):

$f_{m,k}$	=	28,00	MPa	$E_{0,mean}$	=	11000	MPa
$f_{t,0,k}$	=	17,00	MPa	$E_{90,mean}$	=	730	MPa
$f_{t,90,k}$	=	0,50	MPa	$E_{0,05}$	=	8000	MPa
$f_{c,0,k}$	=	22,00	MPa	G_{mean}	=	950	MPa
$f_{c,90,k}$	=	3,80	MPa				
$f_{v,k}$	=	2,00	MPa	ρ_k	=	550	Kg/m^3

Classe di servizio 3

Υ_M	=	1,30	Legno massiccio	k_{mod}	=	0,90	Istantaneo
k_{def}	=	2,00					

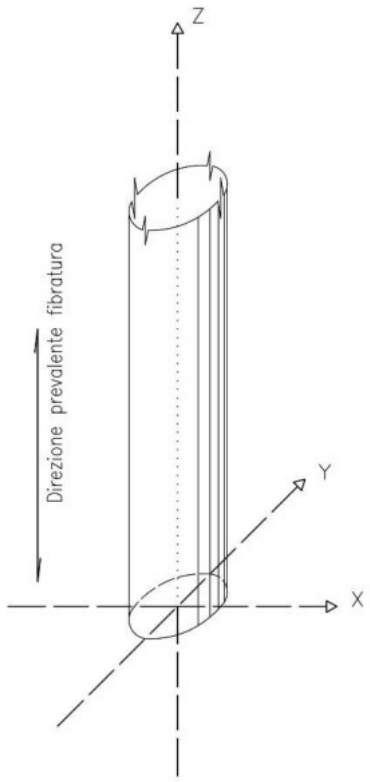
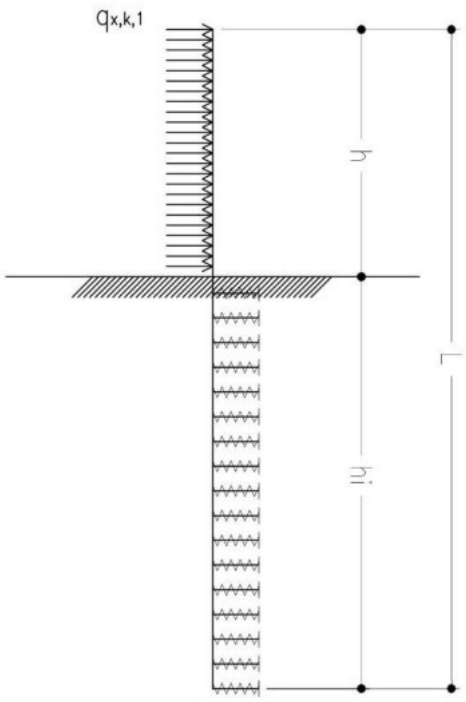
3 VERIFICA PALI

3.1 METODOLOGIA DI MODELLAZIONE ED ANALISI

Le azioni sollecitanti di progetto (E_d) e quelle resistenti (R_d) sono state determinate, secondo le indicazioni riportate al punto § 6.2 delle NTC 2018. La verifica di calcolo riguarda i due pali più sollecitati già descritti in precedenza.
I parametri geotecnici sono quelli riportati nel capitolo 3 ella Relazione tecnica illustrativa.

3.2 MODELLAZIONE DELLA GEOMETRIA, DEI VINCOLI E DEI CARICHI

Il palo, a sezione circolare, è sollecitato da azioni orizzontali, e può essere considerato come una mensola vincolata ad incastro cedevole con molle alla Winkler secondo il seguente schema statico.

Assi elemento in legno	Schema statico
	

Le sollecitazioni dovute ai carichi orizzontali sono state analizzate mediante programma agli elementi finiti inserendo la sola azione presente dovuta alla spinta sui parapetti opportunamente fattorizzata secondo la combinazione SLU-STR descritta dalle NTC 2018 e considerando il terreno come suolo elastico con costante di Winkler k_v = 5 Kg/cm^3, caratteristico dei terreni della spiaggia – sabbie medio fine debolmente limosa. Le verifiche SLE, data la tipologia di opera e di schema statico, non sono necessarie.

3.3 SCHEDA CALCOLO PALO TIPO 1

Titolo PALO TIPO 1

DATI DI PROGETTO

Caratteristiche geometriche

Altezza complessiva (valore massimo):	H	=	8000	[mm]
Altezza fuori terra (valore massimo):	h	=	2800	[mm]
Altezza infissione (valore minimo):	h_i	=	5200	[mm]
Diametro:	ϕ	=	260	[mm]
Area sezione:	A	=	53093	[mm^2]
Modulo di resistenza:	W	=	1,73E+06	[mm^3]
Momento d'inerzia:	J	=	2,24E+08	[mm^4]

Carichi

Peso proprio della parte strutturale:	$G_{z,k,1}$	=	0,00	[KN]
Carico permanente non strutturale:	$G_{z,k,2}$	=	0,00	[KN]
Carichi accidentali orizzontali:	$Q_{x,k,1}$	=	15,00	[KN/m^2]

Caratteristiche del materiale

Materiale:	Legno massiccio di tipo castagno		
Classe di resistenza (Gruppo EN11035-2):	S		
Classe di servizio:	Classe di servizio 3		
Coefficiente parziale per il materiale:	γ_M	=	1,30
Coefficiente di deformazione:	k_{def}	=	2,00

Coefficiente di correzione:

Combinazione I - acc. Istantaneo

$k_{mod,I}$ = 0,90

Valori caratteristici			Valori di progetto		$k_{mod,I}$	
$f_{m,k}$	[MPa]	28,00	$f_{m,d}$	[MPa]	19,38	Flessione
$f_{t,0,k}$	[MPa]	17,00	$f_{t,0,d}$	[MPa]	11,77	Trazione parallela alle fibre
$f_{t,90,k}$	[MPa]	0,50	$f_{t,90,d}$	[MPa]	0,35	Trazione ortogonale alle fibre
$f_{c,0,k}$	[MPa]	22,00	$f_{c,0,d}$	[MPa]	15,23	Compress. parallela alle fibre
$f_{c,90,k}$	[MPa]	3,80	$f_{c,90,d}$	[MPa]	2,63	Compress. orotogonale alle fibre
$f_{v,k}$	[MPa]	2,00	$f_{v,d}$	[MPa]	1,38	Taglio

Rigidezza

Modulo elastico parallelo medio:	$E_{0,mean}$	=	11000	[MPa]
Modulo elastico ortogonale medio:	$E_{90,mean}$	=	730	[MPa]
Modulo elastico parallelo caratteristico:	$E_{0,05}$	=	8000	[MPa]
Modulo elastico tangenziale medio:	G_{mean}	=	950	[MPa]

Massa

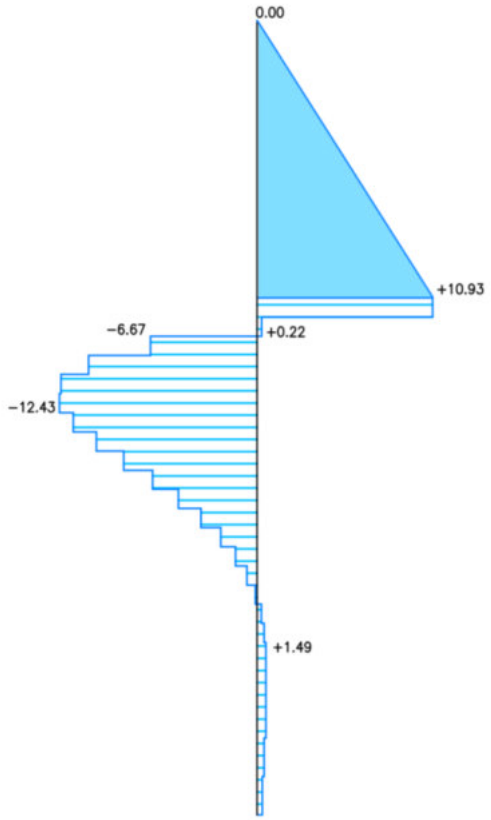
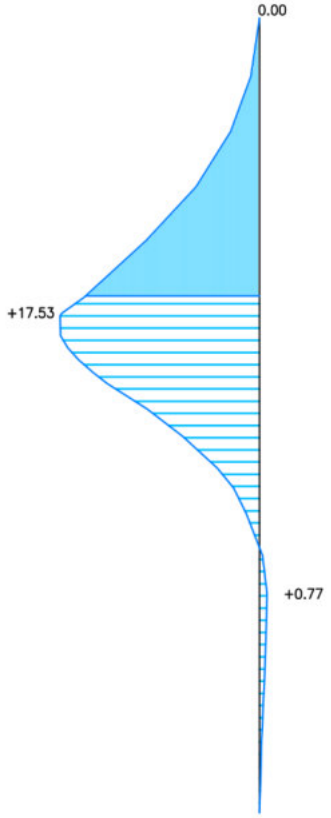
Massa volumica caratteristica:	ρ_k	=	5,39	[kN/m^3]
			550,00	[kg/m^3]

VERIFICHE ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Carichi accidentali: ρ_Q = 1,50

Combinazione di carico		F_d [kN/m]	M_d [kNm]	V_d [kN]	σ_d [MPa]	$f_{m,d}$ [MPa]	τ_d [MPa]	$f_{v,d}$ [Mpa]
I	acc.	3,90	26,30	18,64	15,24	19,38	0,53	1,38
					Verificato		Verificato	

DIAGRAMMI DELLE SOLLECITAZIONI:

Taglio (kN)	Momento (KNm)
	

3.4 SCHEDA CALCOLO PALO TIPO 2

Titolo PALO TIPO 2 (doppio palo)

DATI DI PROGETTO

Caratteristiche geometriche

Altezza complessiva (valore massimo):	H	=	10000	[mm]
Altezza fuori terra (valore massimo):	h	=	3500	[mm]
Altezza infissione (valore minimo):	h_i	=	6500	[mm]
Diametro:	ϕ	=	280	[mm]
Area sezione:	A	=	61575	[mm^2]
Modulo di resistenza:	W	=	2,16E+06	[mm^3]
Momento d'inerzia:	J	=	3,02E+08	[mm^4]

Carichi

Peso proprio della parte strutturale:	$G_{z,k,1}$	=	0,00	[KN]
Carico permanente non strutturale:	$G_{z,k,2}$	=	0,00	[KN]
Carichi accidentali orizzontali:	$Q_{x,k,1}$	=	30,00	[KN/m^2]

Caratteristiche del materiale

Materiale:	Legno massiccio di tipo castagno		
Classe di resistenza (Gruppo EN11035-2):	S		
Classe di servizio:	Classe di servizio 3		
Coefficiente parziale per il materiale:	γ_M	=	1,30
Coefficiente di deformazione:	k_{def}	=	2,00

Coefficiente di correzione:

Combinazione I - acc.			Istantaneo
$k_{mod,I}$	=	0,90	

Valori caratteristici			Valori di progetto		$k_{mod,I}$	
$f_{m,k}$	[MPa]	28,00	$f_{m,d}$	[MPa]	19,38	Flessione
$f_{t,0,k}$	[MPa]	17,00	$f_{t,0,d}$	[MPa]	11,77	Trazione parallela alle fibre
$f_{t,90,k}$	[MPa]	0,50	$f_{t,90,d}$	[MPa]	0,35	Trazione ortogonale alle fibre
$f_{c,0,k}$	[MPa]	22,00	$f_{c,0,d}$	[MPa]	15,23	Compress. parallela alle fibre
$f_{c,90,k}$	[MPa]	3,80	$f_{c,90,d}$	[MPa]	2,63	Compress. orotogonale alle fibre
$f_{v,k}$	[MPa]	2,00	$f_{v,d}$	[MPa]	1,38	Taglio

Rigidezza

Modulo elastico parallelo medio:	$E_{0,mean}$	=	11000	[MPa]
Modulo elastico ortogonale medio:	$E_{90,mean}$	=	730	[MPa]
Modulo elastico parallelo caratteristico:	$E_{0,05}$	=	8000	[MPa]
Modulo elastico tangenziale medio:	G_{mean}	=	950	[MPa]

Massa

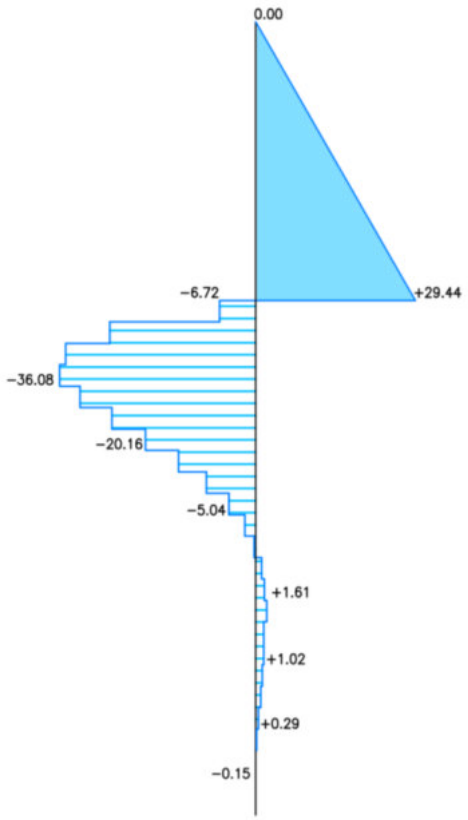
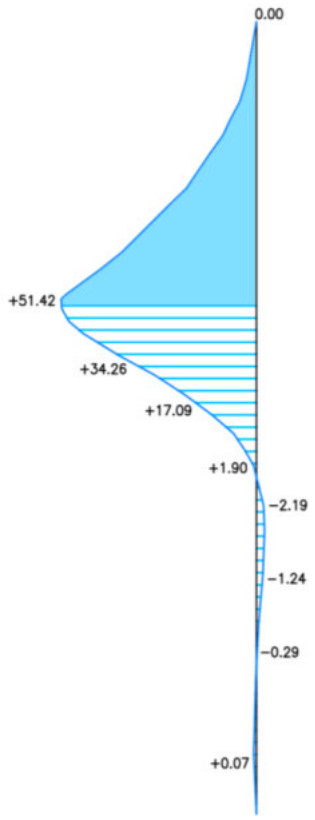
Massa volumica caratteristica:	ρ_k	=	5,39	[kN/m^3]
			550,00	[kg/m^3]

VERIFICHE ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Carichi accidentali: ρ_Q = 1,50

Combinazione di carico		F_d [kN/m]	M_d [kNm]	V_d [kN]	σ_d [MPa]	$f_{m,d}$ [MPa]	τ_d [MPa]	$f_{v,d}$ [MPa]
I	acc.	8,40	77,13	54,13	17,90	19,38	0,66	1,38
					Verificato		Verificato	

DIAGRAMMI DELLE SOLLECITAZIONI:

Taglio (kN)	Momento (KNm)
	

ALLEGATO

Analisi meteo marina del paraggio costiero del Lido di Spina in comune di Comacchio (FE)

Sommario

1 GENERALITÀ 1

2 CORRENTI SUPERFICIALI 1

3 CENNI SULLE OSCILLAZIONI DI MAREA 3

4 ANALISI DELLE CONDIZIONI ANEMOMETRICHE 3

5 CARATTERISTICHE ONDOSE 6

5.1 DATI ONDAMETRICI 6
5.2 REGIME ONDOSO MEDIO AL LARGO DI CESENATICO 8
5.3 Mareggiate nel periodo di osservazione 2007-2017 12
5.4 ANALISI STATISTICA DELLE ONDE ESTREME CON I DATI DELLA BOA DI CESENATICO 16
5.4.1 Correzione del valore estremo con fissato tempo di ritorno 18
5.4.2 Determinazione dei periodi ondosi significativi 19

6 CALCOLO DELL'ONDA DI PROGETTO 20

6.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO E DETERMINAZIONE DEI FETCHES 20
6.2 CONDIZIONI METEOMARINE NEL PARAGGIO DI LIDO DI SPINA, COMACCHIO (FE) 22

1 GENERALITÀ

Il presente studio è stato eseguito per determinare l'onda di progetto utile alle verifiche strutturali delle strutture in legno previste nel progetto "INTERVENTI DI MANUTENZIONE COSTA – 7S1F004 – Comune di Comacchio FE – Interventi di manutenzione ordinaria delle opere di difesa della costa e ripascimento delle spiagge in erosione lungo il litorale ferrarese".

Le analisi sono state condotte impiegando tutte le informazioni disponibili sull'area di Comacchio relativi alle correnti, al vento e alle onde, basandosi sulle pubblicazioni e/o sito di ARPAE e le serie storiche dei dati rilevati dalla boa ondametrica direzionale di Cesenatico NAUSICAA.

4 CORRENTI SUPERFICIALI

Il forte gradiente di densità che si viene a formare fra le coste italiane e slave nell'alto Adriatico costituisce il motore delle correnti superficiali di gradiente ascendenti lungo la costa dalmata e discendenti lungo quella italiana, che sono il motivo dominante della circolazione dell'Adriatico.

Lungo la costa adriatica occidentale tale corrente litoranea di circolazione si risente generalmente fino a 5-6 miglia marine dalla costa, ma, in taluni casi, può anche oltrepassare le 15 miglia marine da terra. In mancanza di relative misurazioni estese nel tempo e nello spazio, si stima che raggiunga la massima intensità a circa 2-3 miglia marine dalla riva.

Un tale schema generale di circolazione è modulato però, nella sua intensità, dalla periodicità delle stagioni, dalla più o meno ingressione nell'Adriatico di acqua proveniente dal Mediterraneo orientale, dalla più o meno portata del fiume Po, oltre che dalle condizioni meteorologiche (si intensifica considerevolmente con venti settentrionali, specie in inverno quando tale condizione può mantenersi persistente anche per lunghi periodi di tempo). Con tempo buono la velocità della corrente è generalmente di circa un nodo d'estate e 2-3 nodi d'inverno, ma con Tramontana e Ponente-Maestro può anche raggiungere i 5-6 nodi nel tratto estremo più settentrionale della costa marchigiana (dalle indicazioni riportate sul Portolano dell'I.I.M.).

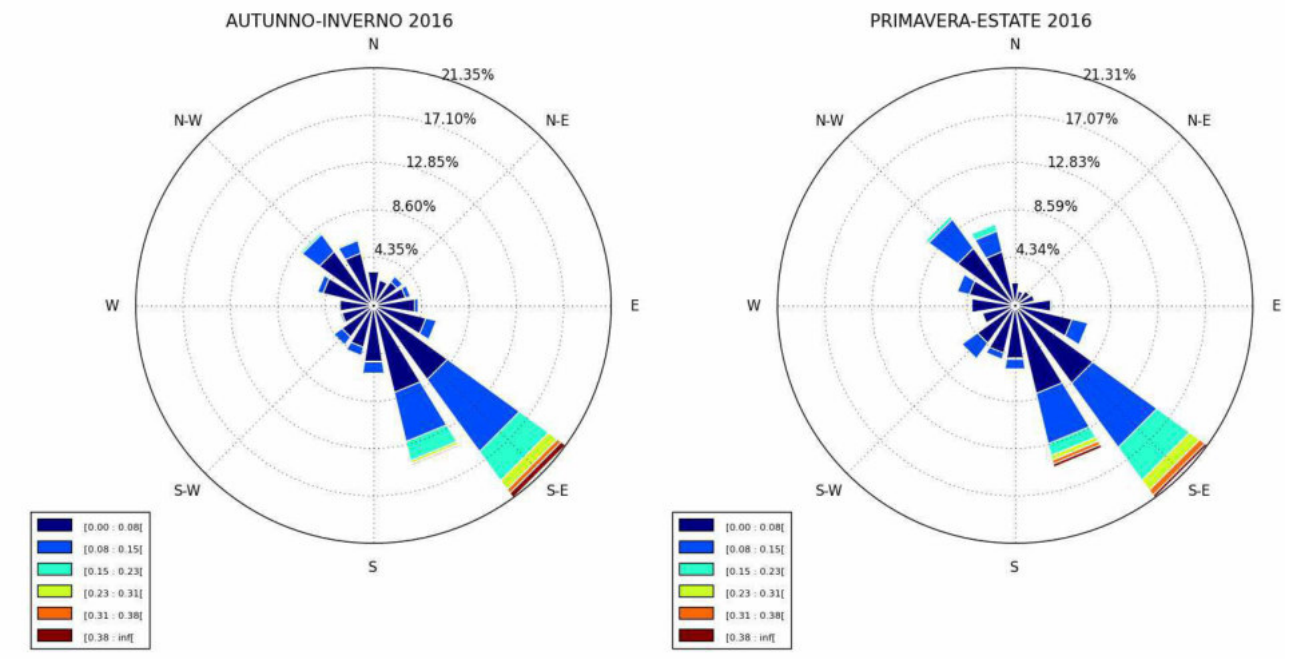


Figura 2.1 - Distribuzioni direzionali della corrente (m/s) nel 2016

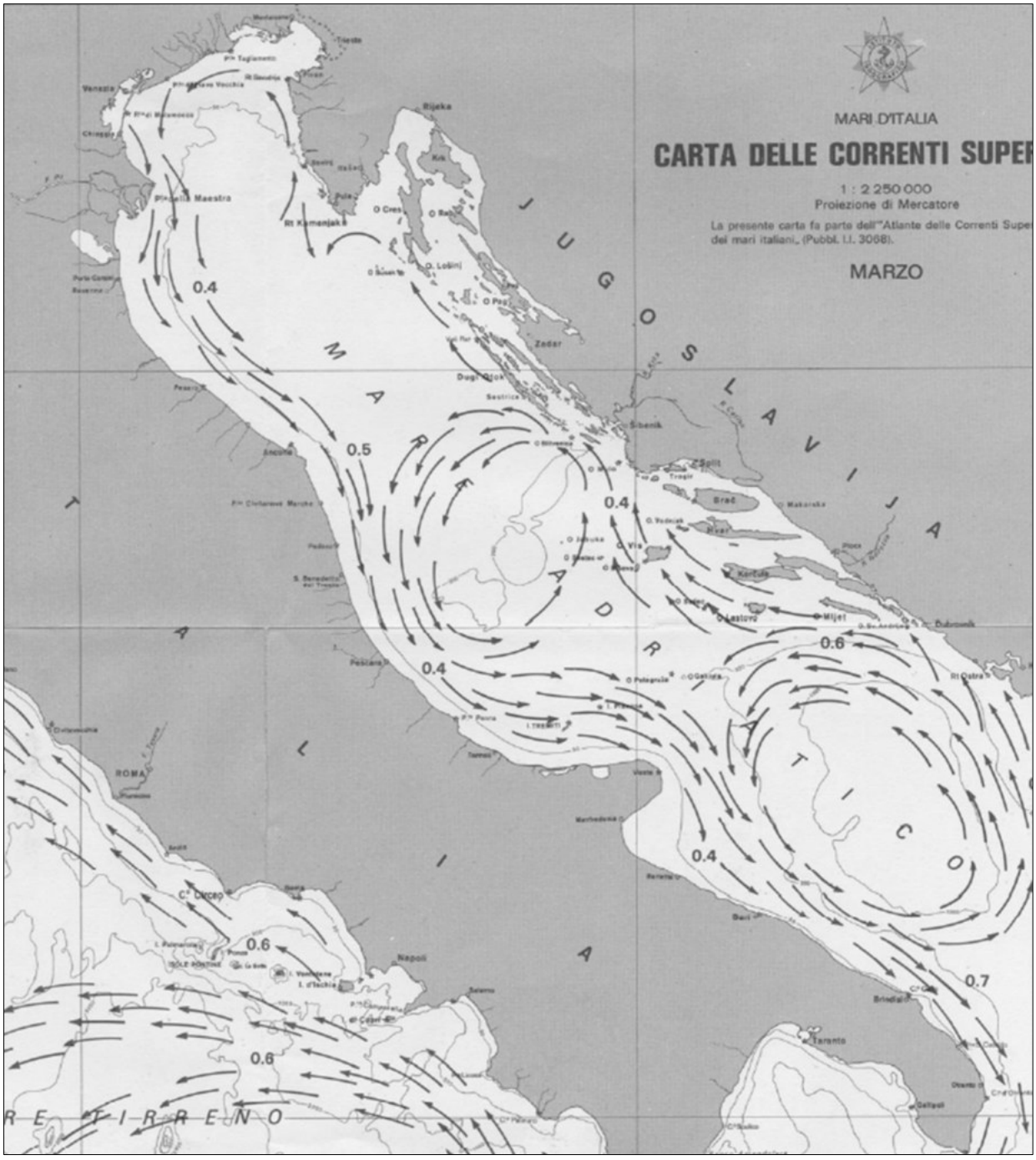


Fig. 2.2 - Carta delle correnti superficiali nel mare Adriatico centro-settentrionale del mese di marzo (da Istituto Idrografico della Marina)

La direzione e velocità delle correnti marine della costa emiliano-romagnola viene monitorata da ARPAE con lo strumento RCM SW dell'Aanderaa che esegue misure ad una profondità nota della colonna d'acqua; lo strumento è posizionato al largo di Cesenatico ad una profondità di 4 metri dalla superficie del mare (batimetria 10 m) a circa 3 km dalla costa, vicino ad una zona destinata all'allevamento di mitili ed interdetta alla pesca, alle coordinate 44°12.743N, 12°28.309E. Sono disponibili solo elaborazioni annuali, per l'anno 2016, con i valori mancanti nel periodo che va dal 13 marzo 2016 al 27 luglio, si osserva che il valore massimo di intensità della corrente durante il periodo autunno-inverno osservato ha un valore di 0.79 m/s ed una direzione di 150° (S/SE), mentre il valore più elevato registrato durante il periodo primavera-estate è di 0.49 m/s ed una direzione di 153° (S/SE).

Si osserva che le direzioni prevalenti della corrente sono Nord-Ovest e Sud-Est; lungo queste direzioni si riscontrano inoltre anche i maggiori valori di velocità della corrente stessa. In particolare, nel periodo autunno-inverno prevale la direzione Sud-Est in circa il 21% circa delle registrazioni, dove sono presenti anche i massimi di velocità; per quanto riguarda invece il periodo primavera-estate, tenendo conto di una gran quantità di dati mancanti in quel periodo, si ha che la direzione prevalente, che in questo caso è anche quella in cui si hanno i valori massimi di velocità, è la direzione Sud-Est, dove ricadono circa il 21% dei dati.

5 CENNI SULLE OSCILLAZIONI DI MAREA

Le oscillazioni della marea astronomica nel mare Adriatico non sono autonome, ma risultano indotte: esse vengono prevalentemente innescate dalle oscillazioni di marea ioniche. L'oscillazione del livello della superficie del mare è molto influenzata, oltre che dai fattori astronomici, anche da quelli meteorologici tra i quali, i più rilevanti sono le variazioni di pressione atmosferica ed il vento.

La pressione atmosferica è data dalla forza che le masse d'aria esercitano sulla superficie terrestre; pertanto, la sua azione si estende anche sui mari e sugli oceani, comprimendoli in relazione alla sua intensità. In particolare, a valori di bassa pressione corrispondono valori più elevati dei livelli marini (effetto barometrico inverso). L'effetto del vento invece risulta più complesso e dipende dalla sua forza, direzione e durata e dalla forma e dall'estensione del bacino su cui insiste: il vento tende a insaccare le acque nel proprio verso di propagazione. In particolare, è lo Scirocco (proveniente dai settori di SE) il vento che può generare significativi sovralzi nell'Adriatico settentrionale.

Inoltre, all'interno dell'Adriatico si sviluppano oscillazioni libere – denominate "sesse" – che rappresentano la risposta del mare ad un cambiamento rapido delle forzanti meteorologiche (vento e pressione). Ad una improvvisa diminuzione dell'intensità del vento, si generano delle oscillazioni periodiche che tendono a riportare l'equilibrio idrostatico. La principale sessa dell'Adriatico ha un periodo di 21 ore circa.

La somma di questi fenomeni fisici viene denominato con il termine "sovralzo", che dà luogo a incrementi positivi o negativi rispetto alle normali oscillazioni astronomiche.

Un grafico sull'andamento del livello del mare nel paraggio emiliano-romagnolo è riportato nel successivo paragrafo relativo alle mareggiate. Si osserva che il livello massimo è stato raggiunto nel 2015, SL_{max}=1,31 m, a fronte di un valore medio pari a 0,85 m. L'andamento di SL_{medio} si attesta, invece, intorno a 0,23 m.

6 ANALISI DELLE CONDIZIONI ANEMOMETRICHE

Non risultavano disponibili, al momento della redazione del presente studio, misure dirette delle condizioni anemometriche nell'area di Comacchio.

Nel 2009 è stata realizzata dalla Provincia di Ferrara con la collaborazione della facoltà di Ingegneria dell'Università di Ferrara, la stazione mareografica integrata di Porto Garibaldi, che è dotata di due mareografi distinti (uno radar, Kalesto ed uno a galleggiante, Encoder) per avere una misura precisa del livello del mare e di una stazione GPS permanente che misura costantemente la quota della piattaforma, per poter discriminare tra l'innalzamento del livello del mare (eustatismo) e l'abbassamento del fondale (subsidenza). La stazione così configurata corrisponde alle specifiche tecniche fornite dalla IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) per la realizzazione della rete mondiale dei mareografi (GLOOS, Global Sea Level Observing System). Inoltre, è dotata di una sonda multiparametrica, per monitorare la qualità dell'acqua marina, e di una stazione meteo completa di pluviometro, barometro, velocità e direzione del vento.

Tuttavia, non sono ancora consultabili le serie storiche dei dati, per cui ci si è riferiti a quanto al momento è pubblicato e disponibile sul web:

- Piano dell'Arenile di Comacchio (Approvato con D.C.C. n.20 del 21/03/2016);
- "Il clima meteo-marino del bacino adriatico nel settore emiliano romagnolo" – Regione Emilia-Romagna -Anno 2011, Autori: Marco Deserti, Luisa Perini, Samantha Lorito.

Nel primo caso si tratta di dati rilevati dalla stazione n°16141 di Volano ed elaborati dal Servizio IdroMetereologico Regionale, nel periodo che va da luglio 1986 a dicembre 1994.
In Figura 1.3 è riportata la rosa dei venti annuale, dalla quale si evidenzia come la direzione prevalente del vento sia SE con il 20,9% dei rilievi, seguita dalla direzione E con il 14,9%.

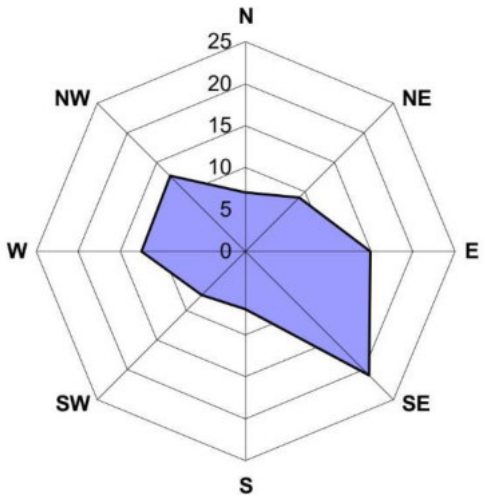


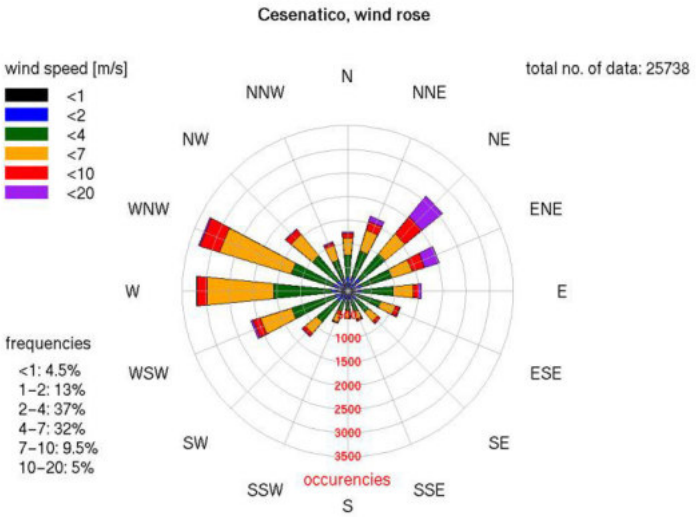
Figura 4.1 - Rosa dei venti annuale, stazione di Volano (periodo 1986-1994).

In generale, nella stagione fredda prevalgano i venti provenienti dal quadrante nord-occidentale che scendono lungo la pianura padana, seguendo la dorsale appenninica, diretti verso la costa adriatica. Viceversa, nella stagione calda prevalgono i venti provenienti dal quadrante sud-orientale. In questo caso si tratta dello stesso tipo di venti presenti nella stagione fredda che però percorrono il territorio in senso contrario.
Gli altri dati sono disponibili, in forma grafica (Rose dei venti) e tabellare, per classe di provenienza e modulo della intensità del vento. Essi provengono dalla analisi del vento a 10 m prodotte attraverso il modello meteorologico LAMA, operativo presso ARPAE.
I diagrammi polari del vento e le tabelle delle frequenze associate, sono stati prodotti considerando i dati del periodo 2005 - 2007 relativi a quattro punti della griglia di calcolo del modello, situati sul mare, in corrispondenza delle località di Comacchio, Ravenna, Cesenatico e Misano.
Le coordinate esatte dei punti griglia di Cesenatico e Comacchio sono:

Punto	Longitudine Est	Latitudine Nord
Comacchio	12.317	44.721
Cesenatico	12.466	44.280

La rappresentazione segue la convenzione dove l'angolo indica la provenienza del vento, suddiviso in 16 quadranti (22.5° ciascuno), mentre l'intensità del vento (in m/s) è suddivisa in classi di intensità. Sono considerate calme i venti di intensità inferiore o uguale ad 1 m/s
La ricostruzione della climatologia del vento mediante il modello di analisi meteorologica LAMA si basa sulla integrazione delle equazioni del moto dell'atmosfera mediante il modello meteorologico non Idrostatico Lokal Modell nel quale vengono assimilati i dati provenienti da vari sistemi di osservazione meteorologica alla superficie ed in quota. Poiché non sono disponibili osservazioni sistematiche di lungo periodo che permettano di rappresentare la climatologia del vento al largo delle coste dell'Emilia-Romagna, l'analisi meteorologica con il modello LAMA permette di ottenere una rappresentazione

realistica dei venti nell'Adriatico. I calcoli sono continuamente verificati con dati sperimentali disponibili all'interno del dominio di integrazione del modello.



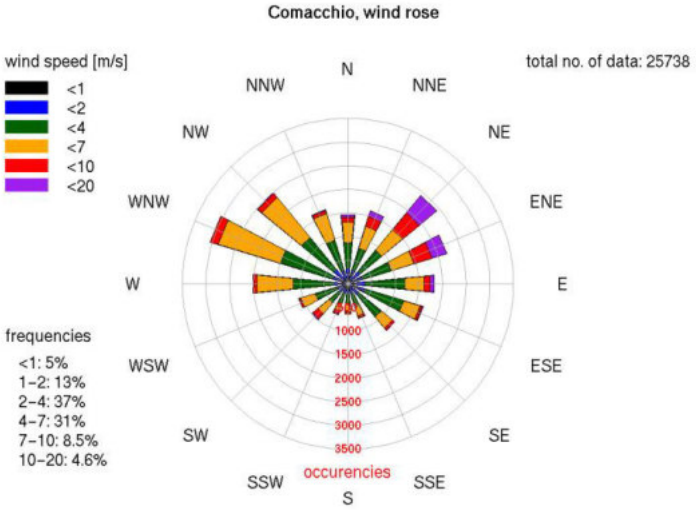


Figura 4.2 - "Rosa dei venti" in forma grafica e tabelle per classe di provenienza e modulo della intensità del vento

Dai grafici si deduce che la climatologia del vento fra i due punti si differenzia solo nel settore di scirocco dove Comacchio per ragioni geografiche risulta più esposto.

Dall'esame delle elaborazioni sopradescritte si possono desumere le seguenti indicazioni generali relative alle condizioni anemometriche nel sito:

- una modifica della climatologia con un incremento dei venti provenienti da NE-E con una frequenza complessiva del 35%;
- direzione di provenienza del vento regnante dei settori W e NW con una frequenza percentuale complessiva maggiore del 40%.

7 CARATTERISTICHE ONDOSE

Le caratteristiche del moto ondoso sono state studiate impiegando i dati della boa ondametrica NAUSICAA e tutte le analisi ed elaborazioni più recenti realizzate e pubblicate da ARPAE sul clima meteo marino della costa emiliano-romagnola, con particolare riguardo alle mareggiate[3].

Le classi d'altezza d'onda sono state così determinate:

- H_s< 0.20 m (calma);
- 0.20≤ H_S <0.50
- 0.50≤ H_S <1.25
- 1.25≤ H_S <2.50
- 2.50≤ H_S <4.00
- H_s≥ 4.00

Mentre per quanto riguarda le direzioni di provenienza è stata adottata la convenzione nautica secondo la quale la direzione Nord rappresenta l'asse di riferimento ed il verso positivo degli angoli è quello orario.

0°N	**22,5°N**	**45°N**	**67,5°N**	**90°N**	**112,5°N**	**135°N**	**157,5°N**
N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
180°N	**202,5°N**	**225°N**	**247,5°N**	**270°N**	**292,5°N**	**315°N**	**337,5°N**
S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW

7.1 DATI ONDAMETRICI

I dati marini analizzati in questo rapporto (altezza e direzione delle onde) vengono acquisiti dalla boa ondametrica NAUSICAA (tipo Datawell Directional wave rider MkIII 70) della Regione Emilia-Romagna, installata il 23 maggio 2017 da ARPAE al largo di Cesenatico (www.arpae.it/sim/?mare/boa) collocata a circa 8 km al largo di Cesenatico (FC) su un fondale di 10 m di profondità, in zona interdetta alla navigazione, all'attracco e alla pesca (posizione in coordinate geografiche 44.2155°N, 12.4766°E nel sistema WGS84). Il sistema ricevente a terra è situato presso la struttura oceanografica Daphne a Cesenatico. I dati vengono acquisiti ogni 30' ed archiviati nel Database meteo-marino del Servizio IdroMeteoClima di ARPAE.

Riguardo alle misure, si dispone delle registrazioni dei dati ondosi di oltre 10 anni, pur con alcuni periodi di interruzione, rilevati nel periodo dal 01 giugno 2007 al 31 dicembre 2017.

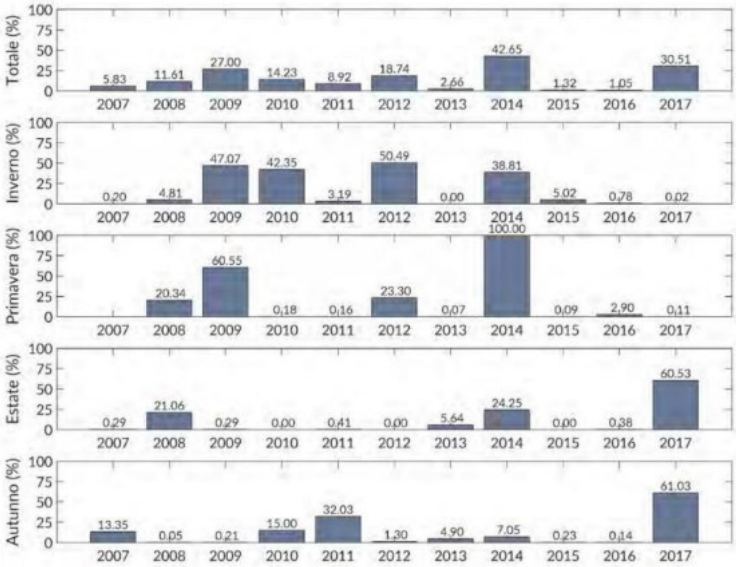


Figura 5.1.1 - Dati mancanti nell'archivio dati della boa di Cesenatico (FC) nel periodo 06/2007 – 12/2017.

[3] "Rapporto idrometeoclima per l'Emilia-Romagna Anno 2017" a cura di ARPAE

Precisamente nel citato periodo di osservazione di 3867 giorni (10 anni e 6 mesi) si hanno a disposizione dati statistici relativamente a 145027 stati di mare considerati validi su 168095 totali, con una percentuale di dati mancanti pari al 13%. Nel 2017 si è provveduto a una manutenzione straordinaria della boa che ha portato ad avere un lungo periodo di inattività durante l'estate (che risulta essere però il periodo meno energetico dell'anno) e l'inizio dell'autunno, con conseguente percentuale di dati osservati mancanti attorno al 30%.
Il moto ondoso è qui descritto attraverso l'evoluzione nel tempo dell'altezza significativa, il periodo e la direzione delle onde. L'altezza significativa dell'onda (in inglese SWH - Significant Wave Height), espressa in metri (m), è definita come l'altezza media del terzo più alto di un gruppo di onde registrate in un certo punto e ordinate per altezza crescente. L'altezza dell'onda è definita come la differenza tra il massimo livello raggiunto dall'onda (cresta) e il suo livello minimo (cavo). L'altezza significativa, indicata con H_s oppure con H_{m0}, ha il vantaggio di essere abbastanza simile all'altezza che percepisce un osservatore a occhio nudo ed è quindi di facile interpretazione e assunzione.
Il periodo medio delle onde, in secondi (s), è la semplice media dei periodi di tutte le onde considerate in un'area di superficie del mare, dove per periodo si intende l'intervallo di tempo necessario affinché in uno stesso punto si alternino due creste d'onda successive.
La conoscenza dell'andamento cronologico delle altezze significative del moto ondoso ha consentito di individuare, per l'intero periodo di osservazione, sia il regime ondoso medio (o clima ondoso) che tutti gli eventi di mareggiata, i cui valori massimi sono stati utilizzati nell'analisi statistica degli eventi estremi per la determinazione del periodo di ritorno più probabile relativamente alle altezze d'onda raggiunte dalle mareggiate provenienti da predefiniti settori direzionali.

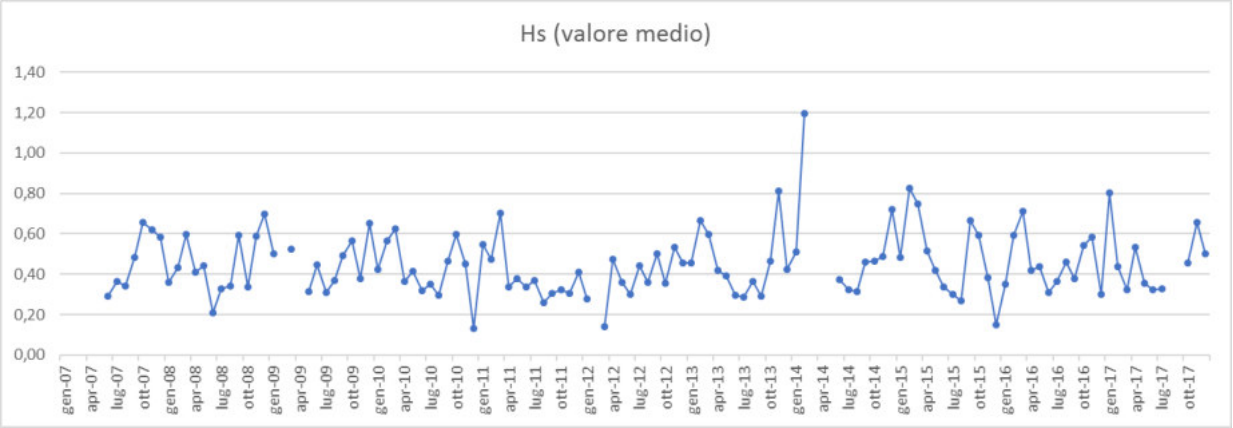


Fig. 5.1.2 - Andamento cronologico delle altezze d'onda significative medie mensili.

Dall'esame della rappresentazione cronologica delle altezze d'onda medie mensili, riportata in Figura 5.2, si nota che i mesi con altezza media più alta sono quelli invernali da novembre a febbraio, con un valore medio dell'altezza significativa sopra i *60cm* da settembre-ottobre fino ad aprile-maggio. Nei mesi estivi tale valore, generalmente, non viene raggiunto e quasi sempre le medie mensili si mantengono attorno ai *40 cm*. Si nota, negli ultimi anni un incremento della soglia media nel periodo invernale con valori massimi oltre gli *80 cm* registrati tra gennaio e febbraio.
Dal punto di vista ondametrico le stagioni calme (altezze d'onda medie inferiori a *60 cm*) sono durate fino ad oltre 6 mesi (quelle del 2010, 2011, 2012 e 2016 da aprile a dicembre). In particolare, i mesi più calmi risultano spesso essere quelli di primavera (giugno, luglio e agosto).
L'inverno più critico è stato quello del '14-'15: nel periodo da dicembre a marzo l'altezza d'onda media mensile è stata superiore a *70 cm* ed è stato raggiunto il picco di oltre *80 cm* nel febbraio '15.

Altre altezze simili sono state registrate nel febbraio '14, dove il valore medio è arrivato a *120 cm*, mentre nel gennaio '17 si è attestato a *80 cm*. Gli inverni veri e propri, quindi, sono di breve durata e con forti mareggiate concentrate sempre nei mesi di dicembre, gennaio e febbraio.
Sono frequenti picchi d'onda superiori ai *60 cm* nel mese di marzo come negli anni '08, '10, '11, '13, '15 e '16.
Va comunque rilevato che la citata carenza di dati in certi periodi può aver influito sul risultato descritto, alterando un poco tale climatologia mensile ondosa.

7.2 REGIME ONDOSO MEDIO AL LARGO DI CESENATICO

Il clima o regime ondoso medio in un paraggio marino individua la fenomenologia ondosa completa nella zona di mare cui si riferisce, caratterizzandone l'esposizione alle condizioni ondose provenienti dal largo. Generalmente il regime ondoso viene ricavato in condizioni di profondità infinita, in cui il moto delle onde è direttamente collegato al vento agente in superficie che lo ha generato e non risulta alterato dagli effetti di rifrazione, morfologia dei fondali, batimetria, acclività e diminuzione del fondale. Il successivo trasferimento su profondità finite viene effettuato adottando modelli matematici basati su schemi di onde regolari o irregolari spettrali, da cui è possibile poi individuare le altezze delle onde significative alle varie posizioni sotto costa.
L'esposizione di un paraggio marino è data dall'intensità delle agitazioni ondose che possono raggiungerlo per effetto dell'azione dei venti provenienti dal largo. Il settore di traversia è l'angolo comprendente le direzioni da cui possono provenire gli eventi ondosi da vento dal largo e si suddivide nella traversia principale, da cui provengono le onde più violente, e nella traversia secondaria, che include tutte le direzioni meno pericolose.
L'andamento significativo del regime ondoso medio o clima generale nel paraggio di Cesenatico è stato ricostruito utilizzando tutti i dati registrati nel periodo preso in esame.
Ai fini della ricostruzione del regime climatico ondoso, oltre alla distribuzione della frequenza (assoluta o percentuale) dei valori di altezza d'onda significativa, si può considerare anche la distribuzione (assoluta o percentuale) del flusso (o potenza) energetico *F*, che rappresenta l'energia delle onde che nell'unità di tempo passa attraverso una superficie verticale normale alla direzione di propagazione dell'onda di larghezza unitaria e altezza pari alla profondità del fondale nel punto in cui esso viene calcolato, che è funzione sia dell'altezza d'onda che del periodo ondoso. In particolare, il flusso energetico ondoso medio viene valutato proporzionalmente al quadrato dell'altezza d'onda significativa spettrale ed al periodo medio relativi a ciascuna registrazione, quindi $F = f\,(H^2, T)$, secondo la relazione seguente:

$$\bar{F} = cost \cdot H_{m0}^2 \cdot T_m \;\; [kgf/(s \cdot m)]$$

dove H_{m0} è l'altezza d'onda significativa media spettrale, T_m è il periodo medio e *cost* è un termine costante che viene preventivamente calcolato. Per ogni classe di altezza d'onda, il flusso energetico assoluto si ottiene come somma dei flussi di ciascun evento appartenente alla classe presa in considerazione. La potenza complessiva è la somma di tutti i flussi di energia per metro di lunghezza di cresta degli stati di mare compresi negli intervalli temporali e dei parametri ondosi prescelti. La potenza media per metro di lunghezza di cresta è il rapporto tra la potenza e il numero di dati totali considerati.
Le tabelle dalla 5.2.1 alla 5.2.3 contengono le raccolte della distribuzione di frequenza percentuale dei dati, rispettivamente suddivisi per classi di altezze d'onda significative e di periodi di picco, classi di altezze d'onda significative e di periodi medi, classi di altezze d'onda significative e di settori direzionali di provenienza. Infine, la Tabella 5.2.4 contiene la raccolta della distribuzione di frequenza percentuale dei flussi energetici per l'intero periodo di osservazione, suddivisi per classi di altezze d'onda significative e di settori direzionali di provenienza.

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA							
T_P	**CLASSI H_{m0} (metri)**						
(sec)	0,2	0,2-0,5	0,5-1,25	1,25-2,5	2,5-4,0	4	**TOTALE**
<2,0	0,0475	0,0154	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**6,2881**
2,0-2,5	0,0411	0,0483	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	**8,9560**
2,5-3,0	0,0427	0,0519	0,0029	0,0000	0,0000	0,0000	**9,7486**
3,0-3,5	0,0512	0,0510	0,0131	0,0000	0,0000	0,0000	**11,5310**
3,5-4,0	0,0292	0,0515	0,0143	0,0000	0,0000	0,0000	**9,5050**
4,0-4,5	0,0244	0,0681	0,0241	0,0001	0,0000	0,0000	**11,6761**
4,5-5,0	0,0137	0,0377	0,0316	0,0006	0,0000	0,0000	**8,3587**
5,0-5,5	0,0119	0,0250	0,0428	0,0015	0,0000	0,0000	**8,1176**
5,5-6,0	0,0162	0,0175	0,0444	0,0073	0,0000	0,0000	**8,5349**
6,0-6,5	0,0072	0,0075	0,0166	0,0096	0,0000	0,0000	**4,0896**
6,5-7,0	0,0051	0,0062	0,0125	0,0132	0,0001	0,0000	**3,7010**
7,0-7,5	0,0037	0,0062	0,0099	0,0105	0,0007	0,0000	**3,1119**
7,5-8,0	0,0044	0,0054	0,0094	0,0050	0,0020	0,0000	**2,6189**
8,0-8,5	0,0048	0,0036	0,0067	0,0029	0,0020	0,0000	**2,0019**
8,5-9,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0025**
9,0-9,5	0,0042	0,0027	0,0025	0,0022	0,0008	0,0000	**1,2525**
9,5-10,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0070**
>10,00	0,0008	0,0013	0,0010	0,0018	0,0000	0,0000	**0,4987**
TOTALE	**0,5082**	**39,9359**	**23,1956**	**5,4592**	**0,5846**	**0,0083**	**100**

Tab. 5.2.1 - Distribuzione delle frequenze percentuali di H_{m0}-T_P

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA							
T_m	**CLASSI H_{m0} (metri)**						
(sec)	0,2	0,2-0,5	0,5-1,25	1,25-2,5	2,5-4,0	4	**TOTALE**
<2,0	0,0011	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,1291**
2,0-2,5	0,0919	0,0911	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	**18,3102**
2,5-3,0	0,1461	0,1339	0,0245	0,0000	0,0000	0,0000	**30,4449**
3,0-3,5	0,0526	0,0992	0,0573	0,0000	0,0000	0,0000	**20,9088**
3,5-4,0	0,0124	0,0457	0,0662	0,0014	0,0000	0,0000	**12,5774**
4,0-4,5	0,0032	0,0182	0,0489	0,0153	0,0000	0,0000	**8,5629**
4,5-5,0	0,0007	0,0063	0,0172	0,0212	0,0000	0,0000	**4,5413**
5,0-5,5	0,0001	0,0033	0,0109	0,0119	0,0011	0,0000	**2,7360**
5,5-6,0	0,0001	0,0012	0,0049	0,0024	0,0029	0,0000	**1,1431**
6,0-6,5	0,0000	0,0002	0,0014	0,0012	0,0016	0,0000	**0,4497**
6,5-7,0	0,0000	0,0000	0,0003	0,0007	0,0003	0,0000	**0,1342**
7,0-7,5	0,0000	0,0001	0,0000	0,0004	0,0000	0,0001	**0,0598**
7,5-8,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0006**
8,0-8,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0006**
8,5-9,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0000**
9,0-9,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0000**
9,5-10,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0000**
>10,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0013**
TOTALE	**0,5082**	**39,9359**	**23,1956**	**5,4592**	**0,5846**	**0,0083**	**100**

Tab. 5.2.2 - Distribuzione delle frequenze percentuali di H_{m0}-T_M

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI DIREZIONE E DI ALTEZZA D'ONDA							
DTM	**CLASSI H_{m0} (metri)**						
(°)	0,2	0,2-0,5	0,5-1,25	1,25-2,5	2,5-4,0	4	**TOTALE**
0°N	0,02483429	0,0233	0,0067	0,0003	0,0000	0,0000	**5,5076**
22,5°N	0,029776975	0,0306	0,0167	0,0035	0,0002	0,0000	**8,0890**
45°N	0,031628096	0,0330	0,0342	0,0145	0,0024	0,0000	**11,5711**
67,5°N	0,034407959	0,0413	0,0602	0,0265	0,0032	0,0001	**16,5755**
90°N	0,079432832	0,1084	0,0789	0,0096	0,0000	0,0000	**27,6262**
112,5°N	0,053396267	0,1121	0,0293	0,0002	0,0000	0,0000	**19,5036**
135°N	0,007200926	0,0095	0,0015	0,0000	0,0000	0,0000	**1,8250**
157,5°N	0,001469447	0,0007	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	**0,2220**
180°N	0,00097327	0,0005	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	**0,1578**
202,5°N	0,001291332	0,0008	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	**0,2093**
225°N	0,001927456	0,0010	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	**0,2945**
247,5°N	0,002124655	0,0025	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	**0,4962**
270°N	0,003517767	0,0037	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	**0,7373**
292,5°N	0,010158904	0,0073	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	**1,7843**
315°N	0,012665233	0,0114	0,0009	0,0000	0,0000	0,0000	**2,4898**
337,5°N	0,013358609	0,0134	0,0024	0,0000	0,0000	0,0000	**2,9109**
TOTALE	**30,8164**	**39,9359**	**23,1956**	**5,4592**	**0,5846**	**0,0083**	**100**

Tab. 5.2.3 - Distribuzione delle frequenze percentuali di H_{m0}-DMT

DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DEL FLUSSO ENERGETICO DELLE ONDE PER METRO DI LUNGHEZZA DI CRESTA							
DTM	**CLASSI H_{m0} (metri)**						
(°)	0,2	0,2-0,5	0,5-1,25	1,25-2,5	2,5-4,0	4	**TOTALE**
0°N	0,0007	0,0036	0,0057	0,0014	0,0000	0,0000	**1,1389**
22,5°N	0,0008	0,0057	0,0196	0,0284	0,0059	0,0000	**6,0377**
45°N	0,0008	0,0069	0,0486	0,1202	0,0642	0,0005	**24,1197**
67,5°N	0,0009	0,0089	0,0963	0,2057	0,0976	0,0057	**41,5199**
90°N	0,0023	0,0243	0,1166	0,0683	0,0003	0,0000	**21,1870**
112,5°N	0,0018	0,0206	0,0246	0,0010	0,0000	0,0000	**4,7993**
135°N	0,0002	0,0013	0,0009	0,0000	0,0000	0,0000	**0,2487**
157,5°N	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0146**
180°N	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0146**
202,5°N	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0204**
225°N	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0197**
247,5°N	0,0000	0,0004	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0569**
270°N	0,0001	0,0005	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0672**
292,5°N	0,0003	0,0008	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	**0,1324**
315°N	0,0003	0,0013	0,0006	0,0000	0,0000	0,0000	**0,2234**
337,5°N	0,0003	0,0018	0,0018	0,0000	0,0000	0,0000	**0,3997**
TOTALE	**0,8664**	**7,6309**	**31,5749**	**42,5071**	**16,8032**	**0,6177**	**100**

Tab. 5.2.4 - Distribuzione delle frequenze percentuali del flusso energetico, riferito ad un metro di lunghezza di cresta

Dal punto di vista grafico in Figura 5.2.1 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza percentuale del moto ondoso rilevato dalla boa ondametrica posta al largo di Cesenatico, secondo il dato direzionale di provenienza media suddiviso per intervalli di 22,5°.

Nella Figura 5.2.2 è riportata la distribuzione direzionale delle frequenze percentuali del flusso energetico per metro di lunghezza di cresta delle stesse onde, suddivise negli stessi settori direzionali di 22,5°.

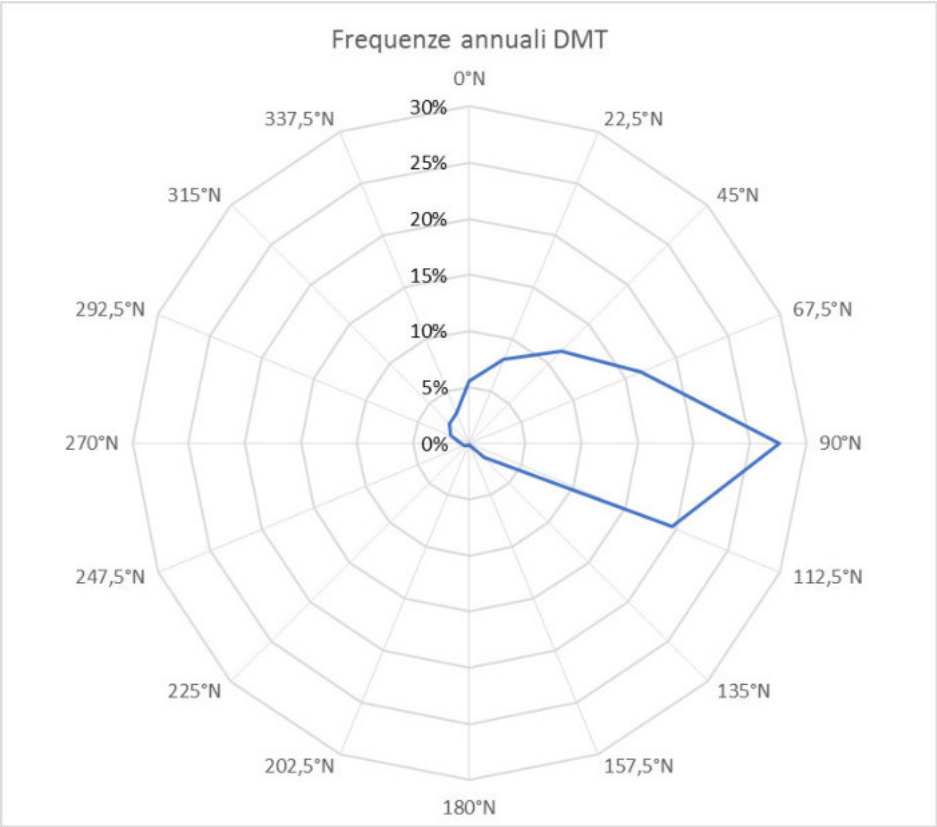


Fig. 5.2.1 - Distribuzione direzionale delle frequenze percentuali dei dati ondosi registrati dalla stazione di rilievo al largo di Cesenatico, dal 01 giugno 2007 al 31 dicembre 2017

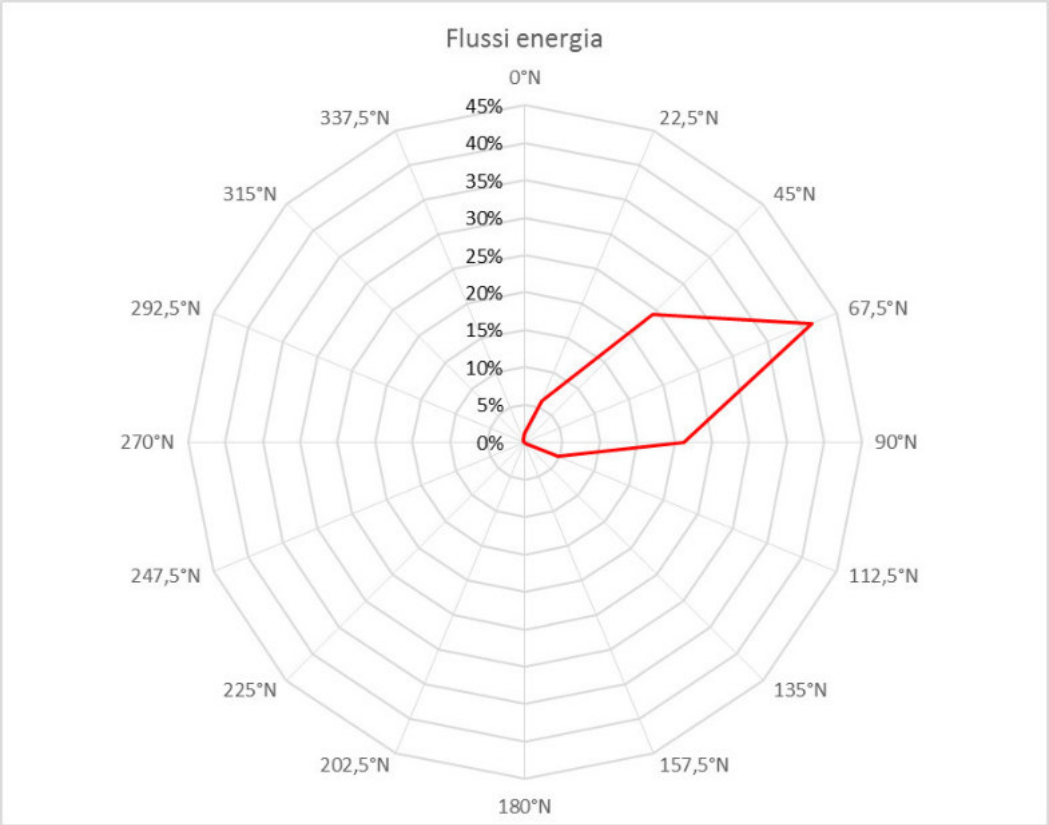


Fig. 5.2.2 - Distribuzione direzionale delle frequenze percentuali dei flussi energetici per metro di lunghezza di cresta dei dati ondosi, registrati dalla stazione di misura ondametrica al largo di Cesenatico, dal 01 giugno 2007 al 31 dicembre 2017

Dall'analisi di tali andamenti ed anche dal grafico di confronto delle suddette distribuzioni direzionali delle serie complessive dei dati, riportato in Figura 5.2.3, si può evidenziare una serie di caratteristiche legate alla fenomenologia climatologica ondosa del mare Adriatico: risulta, infatti, che gli eventi ondosi provengono più frequentemente (mari regnanti) dai settori attorno a ESE (scirocco-levante), a N-NE (bora-greco) e a NO (maestro), mentre i casi più violenti (mari dominanti, per esempio con altezze significative maggiori e relativi flussi energetici più intensi) interessano soprattutto le direzioni da scirocco-levante e da bora-greco, ed in misura minore le rimanenti direzioni da maestro-tramontana, greco-levante e quelle al di fuori della traversia costiera del paraggio centrale adriatico emiliano-romagnolo.

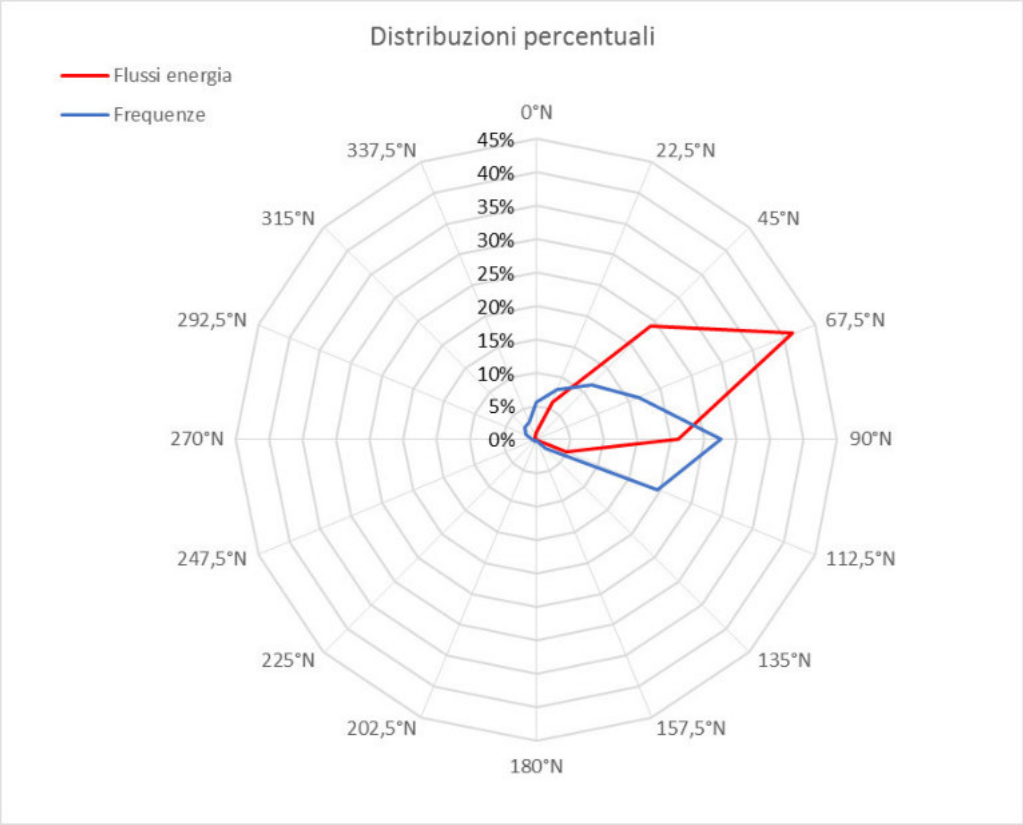


Fig. 5.2.3 - Distribuzione direzionale percentuale di confronto fra la frequenza ed il flusso di energia per metro di lunghezza di cresta delle onde, registrati dalla stazione di misura ondametrica al largo di Cesenatico, dal 01 giugno 2007 al 31 dicembre 2017

7.3 Mareggiate nel periodo di osservazione 2007-2017[4]

Sono state identificate e definite come "mareggiate" tutti gli eventi marini caratterizzati da un'altezza significativa d'onda superiore alla soglia di 1.5 m (Boccotti, 1997). Due mareggiate consecutive sono state considerate indipendenti se separate da almeno 12 ore con onde sotto la soglia.

L'energia totale (E) di ogni mareggiata, che fornisce l'indicazione della potenziale pericolosità che la mareggiata esercita sulla zona costiera, seguendo la metodologia adottata da Mendoza and Jimenez (2004), è stata calcolata integrando l'altezza significativa dell'onda (Significant Wave Height, SWH) per la durata dell'evento (t_1,t_2):

[4] "Rapporto idrometeoclima per l'Emilia-Romagna Anno 2017" a cura di ARPAE

$$E = \int_{t_1}^{t_2} SWH^2 \cdot dt$$

Con l'energia si può poi calcolare la relativa classe di ogni mareggiata secondo la classificazione seguente:

Classe mareggiata	Contenuto energetico m^2/h
I debole	E≤58,84
II moderata	58,84 <E≤127,9
III significativa	127,9 <E≤389,7
IV severa	389,7 <E≤706,9
V estrema	E>706,9

In questo modo, oltre al numero di mareggiate totali registrate, ogni anno si effettua anche una caratterizzazione basata sul contenuto energetico totale e sull'energia di mareggiata normalizzata, ottenuta dividendo l'energia totale annuale per il numero totale di mareggiate occorse.
Per completezza di informazione, infine, oltre alle misure osservate dalla boa ondametrica, sono stati integrate quelle del livello del mare fornite dai due mareografi installati in Emilia-Romagna (Porto Garibaldi FE e Porto Corsini RA). Per ogni mareggiata sono stati aggiunti il livello medio e massimo del mare registrati durante l'evento.
Considerando il periodo giugno 2007 - dicembre 2017 sono state osservate in totale 193 mareggiate, con una durata media di 17 ore ed una durata massima, per singola mareggiata, di 96 ore. Durante le mareggiate, la direzione media di provenienza delle onde è risultata essere Est-Nord-Est (ENE) con un'altezza media dell'onda pari a 1.83 m. Nello stesso periodo, l'altezza massima assoluta delle onde è stata di 4.66 m, registrata il 2 febbraio 2015. Nella tabella 5.3.1 è visibile il riepilogo dettagliato delle mareggiate osservate nel periodo 2007-2017.

Anno	Numero mareggiate	Durata totale (h)	Durata media (h)	Energia totale (m2 h)	Energia normalizzata (m2 h)	SWH media (m)	SWH massima (m)	SL massimo durante mareggiata (m)	SL medio durante mareggiata (m)
2007	12	277	23.1	1042.9	86.9	1.90	3.04	0.66	0.18
2008	17	363.5	21.4	1255.8	73.9	1.67	3.19	0.87	0.09
2009	20	211.5	10.6	759.3	38.0	1.75	2.96	0.82	0.17
2010	16	250	15.6	959.9	60.0	1.83	3.91	0.87	0.30
2011	14	311	22.2	1219.8	87.1	1.83	3.92	0.66	0.15
2012	14	237	16.9	947.3	67.7	1.86	3.23	1.18	0.27
2013	24	381.5	15.9	1632.9	68.0	1.84	3.79	1.02	0.35
2014	11	181.5	16.5	780.7	71.0	1.88	3.52	0.98	0.33
2015	25	496	19.8	2162.7	86.5	1.85	4.66	1.31	0.27
2016	23	343	14.9	1268.0	55.1	1.80	3.11	0.93	0.28
2017	17	325	19.1	1629.9	95.9	1.89	3.68	0.87	0.18

Tabella 5.3.1 - Analisi delle mareggiate nel periodo 2007-2017, con le loro caratteristiche principali.

Nel periodo giugno 2007 - dicembre 2017, il numero di mareggiate annuali è variato da 11 a 25: in questo lasso di tempo non è riconoscibile un trend specifico, mentre si è constatata una forte variabilità interannuale anche per quanto ha riguardato la durata degli eventi.

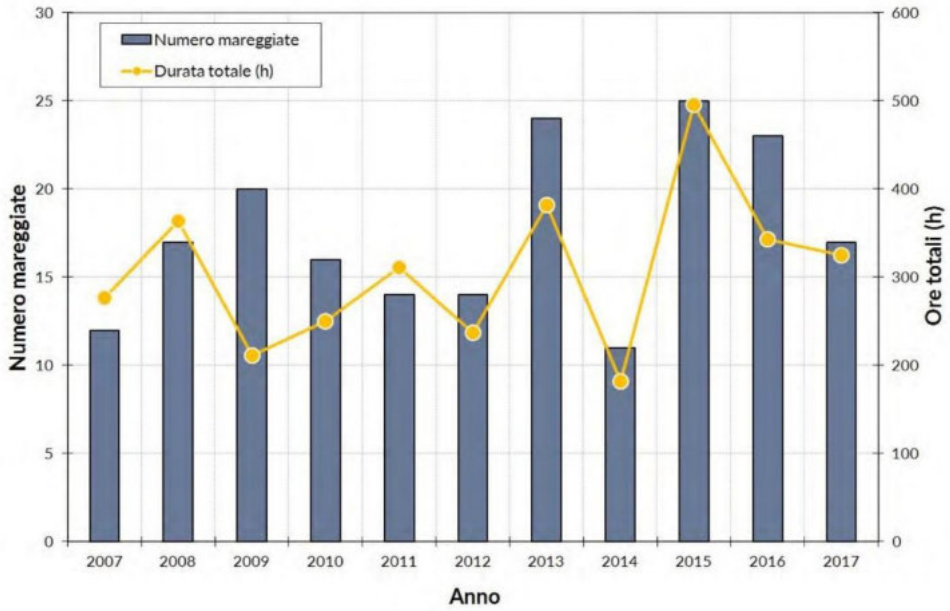


Figura 5.3.1 - Distribuzione del numero di eventi (istogramma blu) e delle ore totali di mareggiata (linea arancio) nel periodo

È interessante considerare, oltre al numero di mareggiate totali, anche la caratterizzazione basata sul contenuto energetico totale, che fornisce l'indicazione della potenziale pericolosità esercitata dalle mareggiate sulla zona costiera, e sull'energia di mareggiata normalizzata, ottenuta dividendo l'energia totale annuale per il numero di mareggiate occorse.

L'anno 2017, rispetto al numero di mareggiate complessive, risultando l'annata con l'energia di mareggiata normalizzata più alta di tutta la serie storica. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che, durante l'anno, sono state registrate una serie di mareggiate particolarmente lunghe e con altezze d'onda sostenute come quella del 15-19 che, dovuta a forti venti di Bora, con una durata complessiva di 95.5 ore, è risultata essere la mareggiata più lunga mai registrata dalla boa con un valore massimo di altezza significativa d'onda di 3.62 metri.

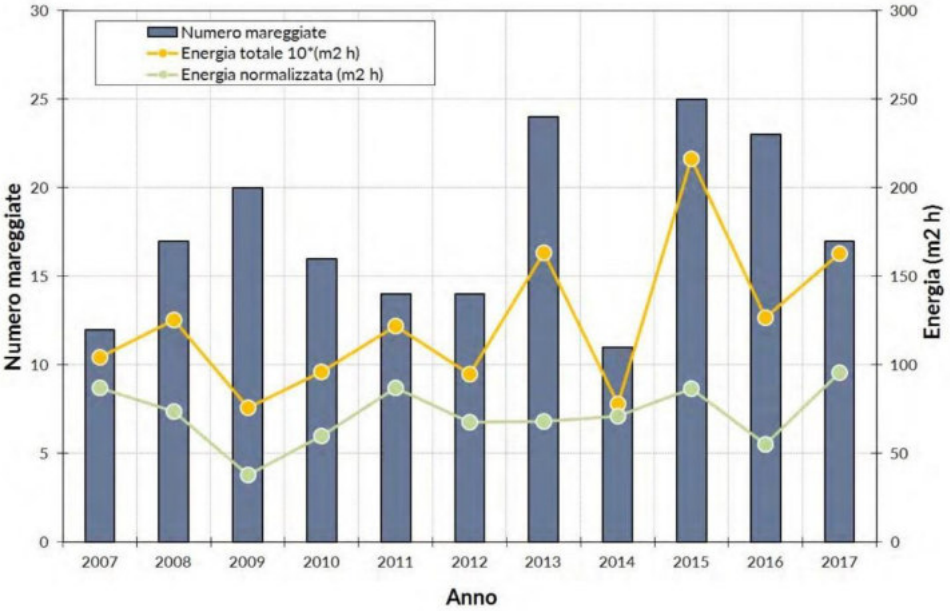


Figura 5.3.2 - Distribuzione del numero di eventi (istogramma blu), dell'energia totale (linea arancio) e dell'energia normalizzata (linea verde) nel periodo giugno 2007 - dicembre 2017.

Nella tabella 5.3.2 è riportato il numero di mareggiate per ogni mese, nel periodo giugno 2007-dicembre 2017.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	TOTALE
Gen		1	2	2	2	0	2	2	2	1	4	18
Feb		3	0	3	3	0	4	0	4	3	2	22
Mar		1	1	3	3	0	4	0	4	6	1	23
Apr		0	0	3	1	2	1	0	3	1	2	13
Mag		0	2	1	3	2	3	0	1	1	0	13
Giu	0	0	2	1	0	0	0	0	2	1	1	7
Lug	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	5
Ago	1	0	1	1	0	1	2	1	0	2	0	9
Set	2	2	2	0	1	2	0	3	3	1	0	16
Ott	3	1	4	2	0	2	2	1	3	3	0	21
Nov	2	4	2	0	0	2	4	1	2	2	4	23
Dic	3	4	4	0	1	2	2	3	0	1	3	23
TOTALE												193

Tabella 5.3.2: riepilogo mensile delle mareggiate nel periodo 2007-2017.

I mesi che, generalmente, registrano il maggior numero di mareggiate (quindi maggiormente energetici) sono quelli da ottobre a marzo.
Nella figura 5.3.3, infine, è mostrato l'andamento dei valori massimi e medi dell'altezza significativa dell'onda e del livello del mare registrati durante le mareggiate nel periodo giugno 2007 - dicembre 2017. Si può rilevare che il 2017 risulta in linea con gli anni precedenti e non si ritrova un trend definito di periodo, né per quanto riguarda l'altezza d'onda, né per il livello del mare durante le mareggiate.

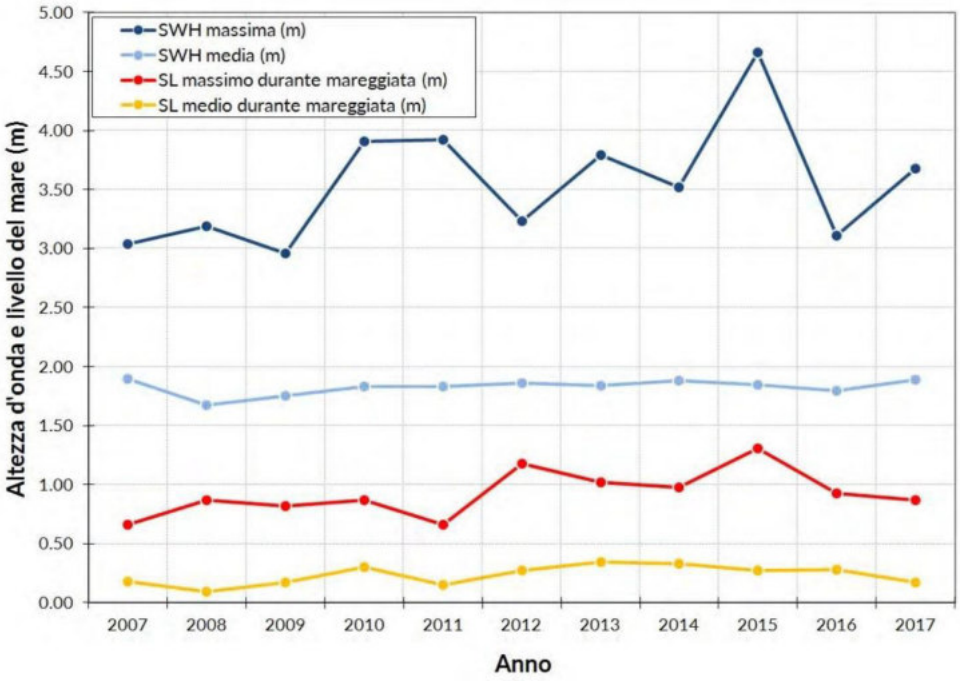


Figura 5.3.3 - Andamento negli anni, e durante le mareggiate, dei valori di altezza significativa d'onda massimi (blu scuro) e medi (blu chiaro), del livello del mare massimo (in rosso) e medio (in arancio).

7.4 ANALISI STATISTICA DELLE ONDE ESTREME CON I DATI DELLA BOA DI CESENATICO

L'intero procedimento descritto nei paragrafi precedenti è stato utilizzato per l'elaborazione degli eventi ondosi estremi dei dati rilevati e registrati dalla boa posta al largo di Cesenatico la serie dei dati nei seguenti settori direzionali di provenienza:

- 15°N – 45°N;
- 45°N – 75°N;
- 75°N – 105°N;
- 15°N – 105°N (intero settore omnidirezionale).

Sono state analizzate le mareggiate più intense individuate da ARPAE, secondo i criteri già descritti, durante il periodo di tempo preso in considerazione (in cui si aveva la disponibilità di registrazioni), compresi volta per volta in ognuno dei suddetti settori direzionali. Come valore rappresentativo di ogni evento indipendente è stata considerata la massima altezza d'onda significativa raggiunta dal picco della mareggiata.

Per ogni settore direzionale considerato la serie dei dati ondosi estremi così determinati è stata elaborata statisticamente secondo la procedura sopra indicata ed utilizzando la legge analitica di Gumbel per tentare l'adattamento della distribuzione probabilistica al campione statistico. L'interpolazione della serie dei dati estremi sperimentali analizzati sono stati impiegati per le eventuali valutazioni probabilistiche dei prevedibili eventi ondosi futuri e dei relativi tempi di ritorno associati. La procedura è stata applicata senza un'ulteriore soglia di troncamento essendo la vita d'esercizio dell'opera da realizzare non elevata.

Di seguito dalla Figura 5.4.1 alla Figura 5.4.4 sono riportati gli andamenti della legge probabilistica di miglior adattamento con la nuvola dei dati sperimentali per ciascun settore direzionale analizzato.

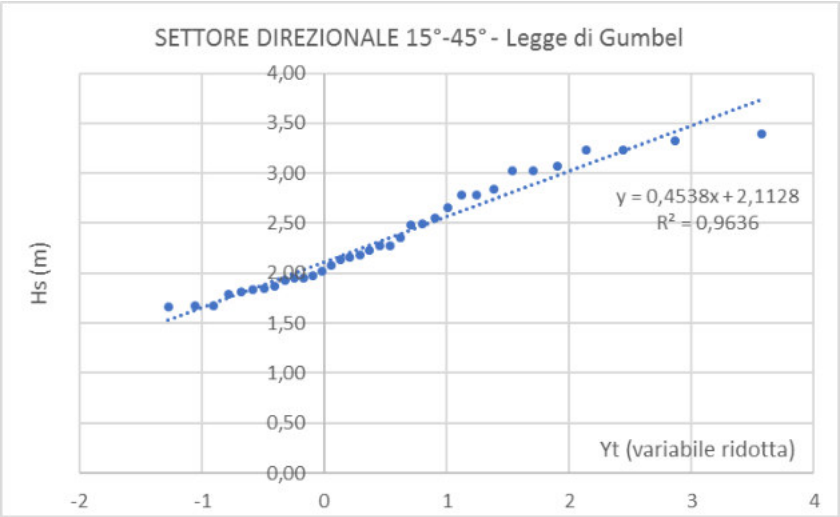


Fig. 5.4.1 - Dati sperimentali e legge probabilistica di Gumbel - settore direzionale 15°N-45°N

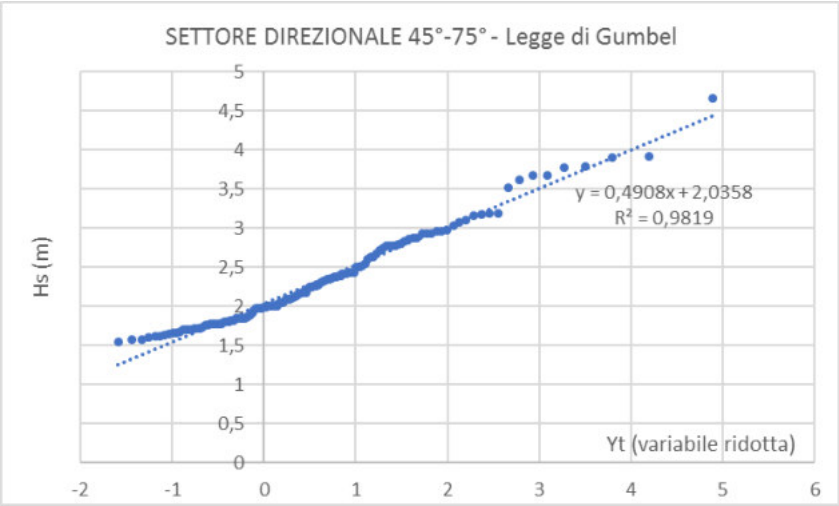


Fig. 5.4.2 - Dati sperimentali e legge probabilistica di Gumbel - settore direzionale 45°N-75°N

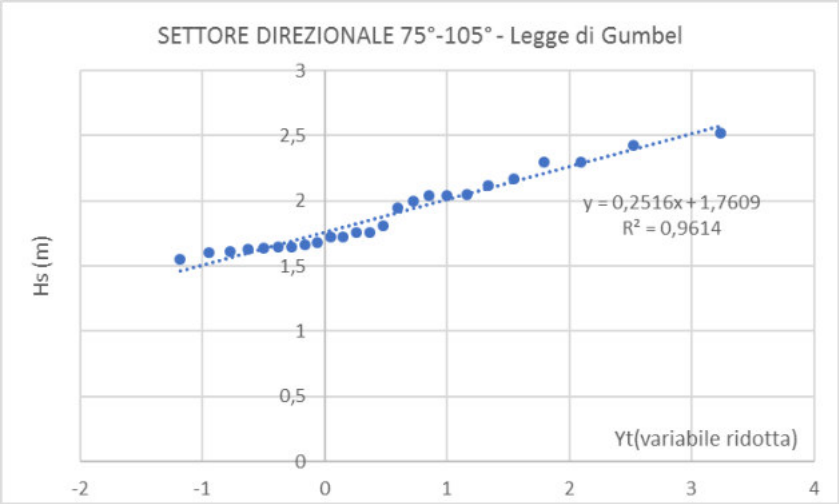


Fig. 5.4.3- Dati sperimentali e legge probabilistica di Gumbel - settore direzionale 75°N-105°N

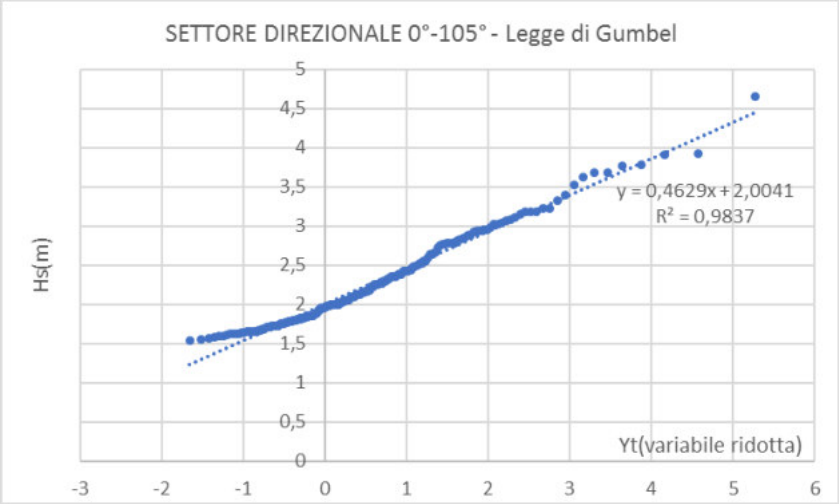


Fig. 5.4.4 - Dati sperimentali e legge probabilistica di Gumbel - settore omni-direzionale

Nella Figura 5.4.5 e nella Tabella 5.4.1 sono invece riportati, in forma grafica ed in forma numerica, in maniera sintetica per tutti i settori direzionali di provenienza presi in esame, i principali risultati dell'elaborazione statistica in termini di legami analitici risultati fra altezza d'onda e tempo di ritorno dell'evento ondoso.

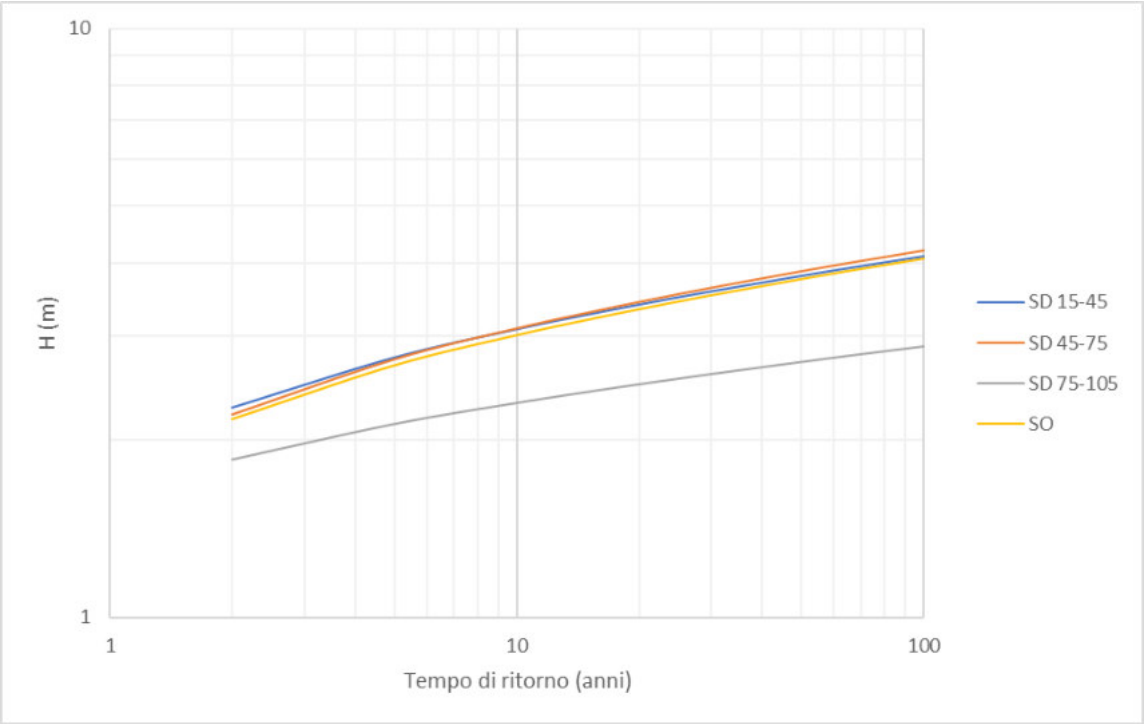


Fig. 5.4.5 - Risultati dell'elaborazione in termini di tempo di ritorno da associare alle mareggiate

Settore 15°-45°		
T_R (anni)	H (m)	H_{CORR} (m)
2	2.28	2.27
5	2.79	2.76
10	3.13	3.09
15	3.33	3.27
20	3.46	3.40
25	3.56	3.50
30	3.65	3.58
50	3.88	3.80
70	4.04	3.95
100	4.20	4.10

Settore 45°-75°		
T_R (anni)	H (m)	H_{CORR} (m)
2	2.22	2.21
5	2.77	2.74
10	3.14	3.09
15	3.35	3.29
20	3.49	3.43
25	3.61	3.54
30	3.70	3.63
50	3.95	3.87
70	4.12	4.03
100	4.29	4.20

Settore 75°-105°		
T_R (anni)	H (m)	H_{CORR} (m)
2	1.85	1.85
5	2.14	2.13
10	2.33	2.31
15	2.43	2.42
20	2.51	2.49
25	2.57	2.54
30	2.61	2.59
50	2.74	2.72
70	2.83	2.80
100	2.92	2.89

Settore OmniDir		
T_R (anni)	H (m)	H_{CORR} (m)
2	2.17	2.17
5	2.70	2.68
10	3.05	3.01
15	3.24	3.20
20	3.38	3.34
25	3.48	3.44
30	3.57	3.52
50	3.81	3.76
70	3.97	3.91
100	4.13	4.07

Tab. 5.4.1 - Risultati dell'elaborazione per i settori direzionali

7.4.1 Correzione del valore estremo con fissato tempo di ritorno

Adattare un campione di dati ad una distribuzione probabilistica quando non si conosce la esatta consistenza e distribuzione della intera popolazione da cui il campione viene estratto, comporta sempre un errore nella stima del valore estremo, calcolato per un fissato tempo di ritorno, detto "errore sistematico". Goda (1988) tenta una correzione di questo eventuale errore sistematico assumendo che le leggi di distribuzione considerate (4 Gumbel) abbiano la stessa probabilità di esistere in natura. Con simulazioni tipo Montecarlo, Goda ha costruito da 2000 a 10000 campioni. Dall'analisi dei risultati

propone una formulazione empirica che rappresenti l'errore dovuto alla mancata conoscenza della reale consistenza e della esatta distribuzione della intera popolazione:

$$\bar{Z}_n = \begin{cases} A_c(y_T + \alpha ln\nu) & per\ y_T > -\alpha ln\nu \\ 0 & per\ y_T \leq -\alpha ln\nu \end{cases}$$

Nel caso della legge di Gumbel:

- *per* $\nu = 1.0$;
  $Ac = 0.046-0.40[\log_{10}(60/N)]^3$ *quando* $N<60$
  $Ac = 0.046 \exp\{-2.5[\log_{10}(60/N)]^2\}$ *quando* $N\geq 60$
  $\alpha = 0.9,\ \ p = 1.0$

- *per* $\nu = 0.5$ & 0.25;
  $Ac = 0.01-0.044[\log_{10}(N/300)]^4$
  $\alpha = 0.9,\ \ p = 1.0$

dove $\nu = N/N_T$

- N = numero di campioni elaborato dopo il troncamento;
- N_T =numero complessivo di campioni.

La correzione viene fatta attraverso $\bar{Z}_n$ con la relazione:

$$(H_{corr}) = H-\bar{Z}_n \cdot \sigma_x$$

Con σ_x pari alla varianza della distribuzione delle altezze d'onda.

7.4.2 Determinazione dei periodi ondosi significativi

Le onde di mare possiedono e conservano caratteristiche diverse in funzione del differente vento che le genera, in particolare della sua forza, della sua durata e soprattutto anche della sua direzione di provenienza, collegata con la lunghezza dei fetches da ogni settore direzionale. Ciò è ovviamente dovuto alle diversità meteorologiche generative dei vari venti (tipi di perturbazioni, distribuzione dei campi di pressione, ecc.) provenienti dalle differenti direzioni.
Per le onde misurate divise e raggruppate per i settori direzionali sono state individuate e studiate diverse relazioni analitiche tra le altezze e periodo d'onda. Il dato più rappresentativo sembra essere quello di picco perché si riferisce alla componente spettrale di maggior contenuto energetico.
La distribuzione nella quale il periodo più probabile è definito, in generale, dalla relazione:

$$T_S = \exp(\mu - \sigma^2)$$

Per il calcolo dei valori T_S delle altezze d'onda associate ai T_R delle elaborazioni statistiche è stata impiegata la relazione impiegata e determinata dalla società IDROSER nella prima fase dello studio "Aggiornamento ed integrazione del piano progettuale per la difesa della costa emiliano-romagnola per i due settori:

- 330°-75°N

$$\mu(lnT_S) = 14.1 \tan^{-1}[9.33(H_S + 0.859)] - 19.9$$

$$\sigma(lnT_S)^2 = 0.0332 {H_S}^{-1.145}$$

- 75°-165°N

$$\mu(lnT_S) = 4.30\, tan^{-1}[2.10(H_S + 1.13)] - 4.37$$

$$\sigma(lnT_S)^2 = 0.03{H_S}^{-1.13}$$

8 CALCOLO DELL'ONDA DI PROGETTO

8.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO E DETERMINAZIONE DEI FETCHES

La zona di studio è collocata tra le foci del Canale Logonovo e del Canale Gobbino in corrispondenza del Bagno Jamaica.

Fig. 6.1.1 - Immagine satellitare della zona di intervento (Fonte Google Earth del 30/04/2017)

Una prima analisi delle potenziali condizioni di esposizione al moto ondoso di un paraggio può essere effettuata sulla base della cosiddetta "traversia geografica" che rappresenta la massima estensione della superficie marina da cui possono provenire gli stati di mare. Per valutare la traversia geografica di un sito si considera un punto al largo "punto di trasposizione" dal quale vengono tracciati, in un sistema di riferimento polare, i distinti settori che da quel punto traguardano i margini delle coste opposte.
La traversia (fetch) geografica viene solitamente suddivisa in un settore principale (caratterizzato dalle massime estensioni geografiche cui risultano associate le mareggiate più intense) e in un settore secondario (caratterizzato da estensioni geografiche minori, e stati di mare meno intensi).
Ponendosi al largo del Bagno Jamaica su un fondale di circa -10 m l.m.m. (profondità a cui è posta la boa di Cesenatico della Regione Emilia-Romagna installata nell'ambito del progetto Beachmed-E, sotto-progetto NAUSICAA), ad una distanza di circa 4 km dalla riva, il settore geografico è delimitato a nord dal Delta del Po, a sud-est dal promontorio del Monte Conero, ad est dalla costa croata, a nord-est dalla costa che va dal Veneto alla Slovenia. Il paraggio risulta esposto al mare aperto al settore compreso tra le direzioni 30°N e 130°N, traguardando le coste Albanesi a sud-est per distanze superiori a 500km.

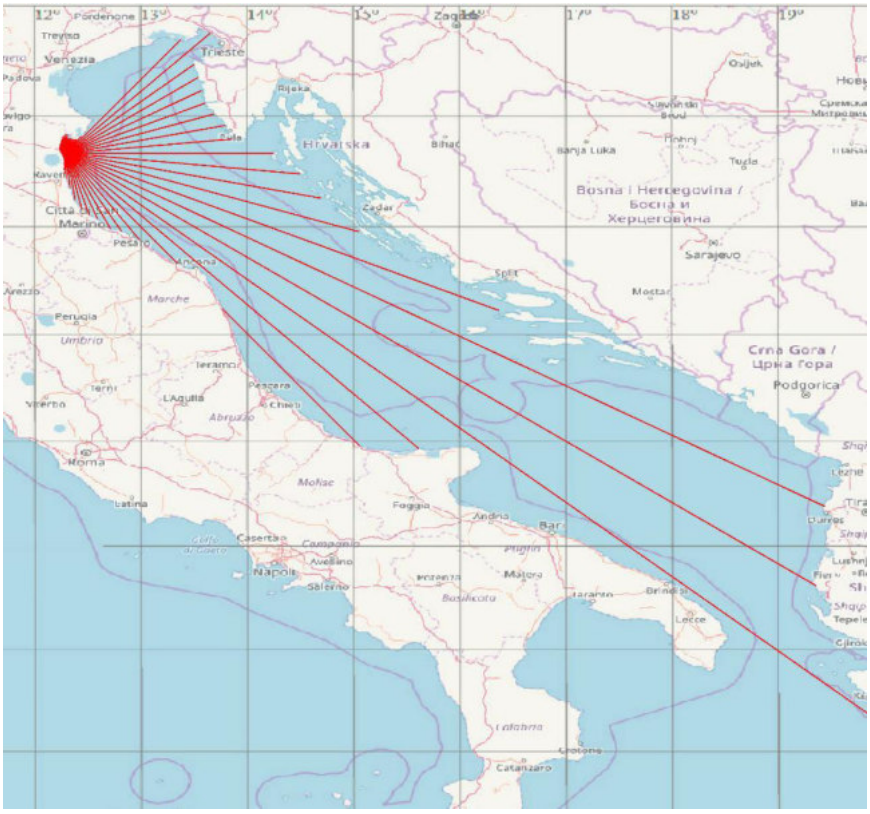


Fig. 6.1.2 - Fetches geografici del sito costiero di Lido di Spina Sud

Considerando che nel Mare Adriatico le perturbazioni cicloniche hanno estensioni massime dell'ordine dei 500km, i fetch geografici vanno limitati a quel valore. I valori massimi della lunghezza del fetch geografico si hanno per il settore di levante-scirocco.
Per fetch efficace si intende la traversia o lunghezza virtuale della porzione di mare rispetto al punto di riferimento sulla quale l'azione del vento trasferisce efficacemente la sua azione per la generazione degli stati di mare che pervengono al suddetto sito di interesse. Nel processo di generazione del moto ondoso, infatti, oltre alla superficie marina (fetch geografico) individuata dalla direzione media di provenienza lungo la quale spira il vento, contribuiscono anche le porzioni di mare adiacenti. Il valore del *fetch* efficace relativo ad una determinata direzione è quindi funzione dei valori dei *fetches* geografici associati a direzioni contigue a quella considerata in quanto uno stato di mare viene generato non solo nella direzione lungo la quale spira il vento, ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore q (±90° metodo di Seymour, ±45° metodo di Saville) rispetto alla direzione media del vento.
Il calcolo dei *fetches* efficaci può essere eseguito tramite la seguente relazione (metodo *S.M.B. Svendrup, Munk e Bretshneider, 1947*):

$$F_{e,W} = \frac{\sum_{\emptyset_i=\emptyset_w-\theta}^{\emptyset_w+\theta} F_i * \cos^{n+1}(\emptyset_i - \emptyset_W)}{\sum_{\emptyset_i=\emptyset_w-\theta}^{\emptyset_w+\theta} \cos^{n}(\emptyset_i - \emptyset_W)}$$

con

- $F_{e,W}$ lunghezza del *fetch* efficace relativo alla direzione $\emptyset_w$;
- F_i lunghezza del *fetch* geografico relativo alla direzione i-esima $\emptyset_i$;
- $\emptyset_w$ direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso;

- $\varnothing_i$ direzione i-esima compresa nel settore di possibile provenienza del moto ondoso $\varnothing_w \pm\theta$ (nel nostro studio si è assunto θ pari a 45°);
- n termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso del sito in esame (in genere si assume n pari a 2).

La seguente figura riporta graficamente i fetch efficaci per il paraggio del Lido di Spina ottenuti considerando una discretizzazione polare si 5°, ampiezza del settore di 45° e termine esponenziale pari a 2.

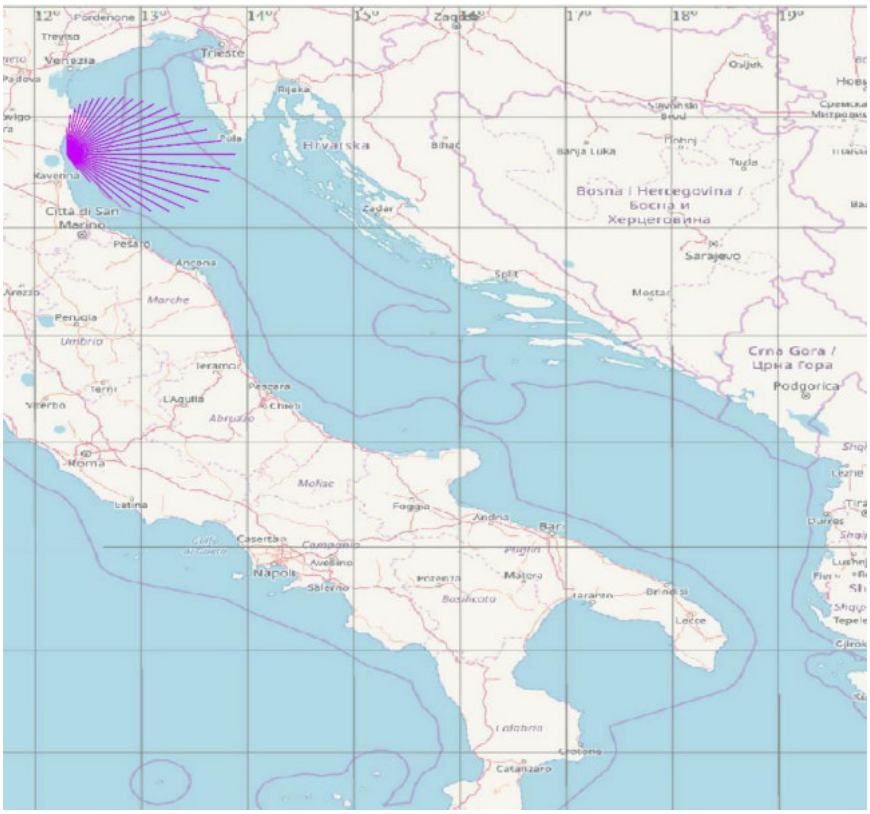


Fig. 6.1.2 - Fetches efficaci del sito costiero Lido di Spina

Per i settori di studio il fetch efficace massimo ottenuto risulta pari a circa 126 km ed è riferito alla direzione di 90°N (settore di levante).

8.2 CONDIZIONI METEOMARINE NEL PARAGGIO DI LIDO DI SPINA, COMACCHIO (FE)

Per definire il clima meteomarino relativo al Lido di Spina, Comacchio (FE) sono stati elaborati i dati relativi alle registrazioni della boa ondametrica direzionale di Cesenatico della Regione Emilia-Romagna installata nell'ambito del progetto Beachmed-E, sotto-progetto NAUSICAA nel periodo tra Giugno 2007 e il Dicembre 2017.

Il sito in esame è collocato a circa 50 km a nord della stazione ondametrica, pertanto è necessario applicare un metodo di "trasposizione geografica" del moto ondoso di Cesenatico al largo di Spina. Il metodo di trasposizione consiste nel determinare la corrispondenza tra le direzioni, le altezze e i periodi del moto ondoso relative al punto di misura e quelle del punto di interesse.

Per trasferire i dati misurati a Cesenatico nel paraggio di Spina è stato utilizzato il metodo di trasposizione basato sulla similitudine dei *fetches* efficaci, ipotizzando che l'evento climatico responsabile di una

mareggiata registrata dall'ondametro di riferimento abbia interessato anche l'area di generazione del sito costiero in esame.

A partire dai valori estremi di H_{m0} e T_{m0} delle onde registrate dall'ondametro di riferimento e dalle mareggiate come definite da ARPAE secondo i criteri esposti nel precedente paragrafo 5.2, le caratteristiche ondose per il paraggio di Spina sono state valutate secondo le seguenti relazioni, valide nel caso di fetch di limitata lunghezza:

$$H_{m0,Spina} = \left(\frac{F_{e,Spina}}{F_{e,Cesenatico}}\right)^{1/2} * H_{m0,Cesenatico}$$

$$T_{m0,Spina} = \left(\frac{F_{e,Spina}}{F_{e,Cesenatico}}\right)^{1/3} * T_{m0,Cesenatico}$$

L'applicazione del metodo richiede la caratterizzazione dei fetch geografici ed efficaci anche del sito di misura, di cui le seguenti figure mostrano i risultati.

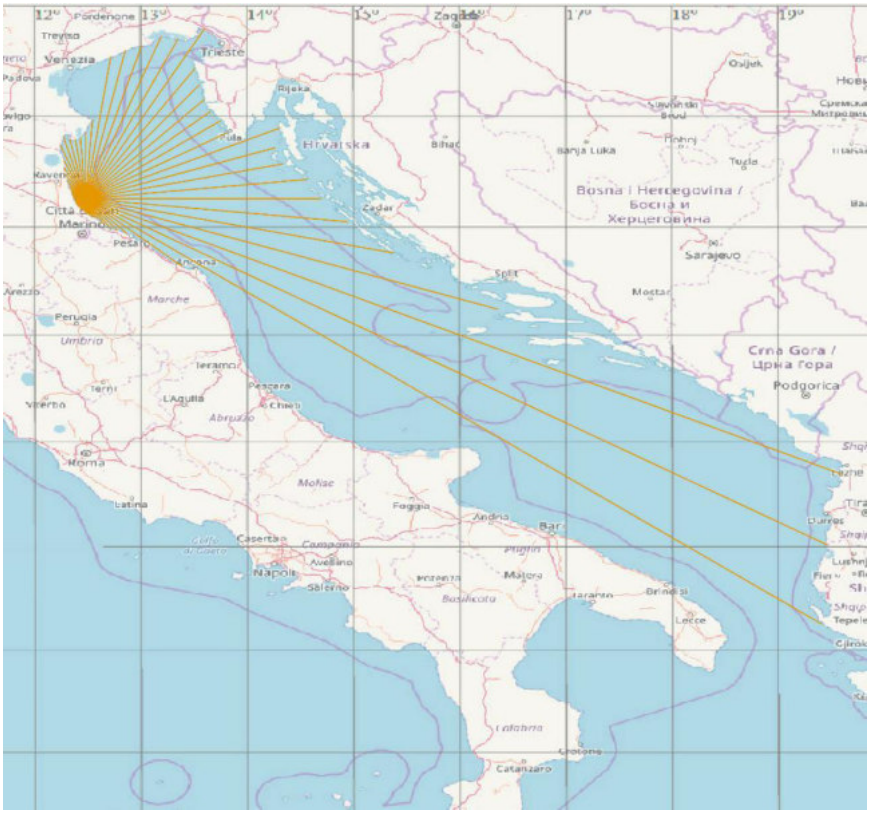


Fig. 6.2.1 - Fetches geografici Boa NAUSICAA di Cesenatico

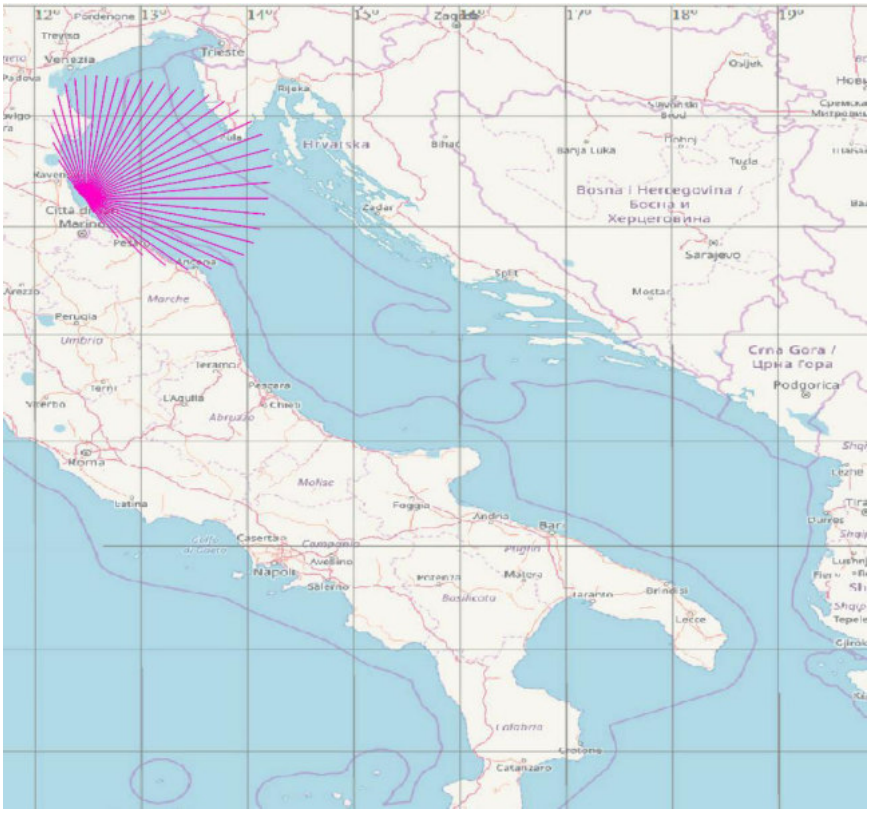


Fig. 6.2.2 - Fetches efficaci Boa NAUSICAA di Cesenatico

L'analisi è stata effettuata per i settori direzionali di ampiezza 30° dove sono state registrate le mareggiate:

- *15°N – 45°N;*
- *45°N – 75°N;*
- *75°N – 105°N;*

ottenendo i seguenti risultati:

15° - 45°		
T_r (anni)	**$H_{S(Spina)}$ (m)**	**$T_{P(Spina)}$ (s)**
2	1,57	4,52
5	1,91	4,83
10	2,14	5,01
15	2,26	5,10
20	2,35	5,15
25	2,42	5,20
30	2,48	5,23
50	2,63	5,32
70	2,73	5,37
100	2,84	5,43

45° - 75°		
T_r (anni)	**$H_{S(Spina)}$ (m)**	**$T_{P(Spina)}$ (s)**
2	1,69	4,78
5	2,10	5,15
10	2,37	5,36
15	2,52	5,46
20	2,63	5,53
25	2,71	5,58
30	2,78	5,62
50	2,96	5,72
70	3,08	5,78
100	3,21	5,84

75° - 105°		
T_r (anni)	**$H_{S(Spina)}$ (m)**	**$T_{P(Spina)}$ (s)**
2	1,68	5,07
5	1,93	5,38
10	2,10	5,57
15	2,19	5,67
20	2,26	5,74
25	2,31	5,79
30	2,35	5,83
50	2,47	5,93
70	2,54	6,00
100	2,62	6,07

Tab. 6.2.1 - Valori delle altezze significative e dei periodi delle onde al largo di Spina

Una volta ottenuti i valori delle caratteristiche ondose al largo si è proceduto al trasferimento a riva delle onde determinate, considerando i vari effetti che separatamente agiscono su di esse: rifrazione e shoaling, ovvero riduzione e rotazione del fronte d'onda, che provocano la variazione della celerità di

propagazione e dell'altezza d'onda, a parità di contenuto energetico dalla situazione a largo a quella a profondità ridotte sino al limite del frangimento.
Nel nostro caso il trasferimento a riva viene eseguito con il procedimento numerico e grafico proposto da *Goda* ("*Random Seas and Design of Marittime Structures*").
Dalla conservazione del flusso di energia trasmesso da due raggi adiacenti (nell'ipotesi di effetti dissipativi trascurabili), otteniamo l'altezza d'onda alla profondità voluta prima del frangimento. Poiché l'energia dell'onda è proporzionale al quadrato dell'altezza d'onda, la variazione dell'altezza d'onda dovuta alla rifrazione è data dalla seguente equazione:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{b_0}{b}} = K_r$$

dove b è la distanza fra i raggi d'onda nella zona di interesse, b_0 è la distanza fra gli stessi raggi in acque profonde, e K_r è il coefficiente di rifrazione dell'onda regolare con periodo costante ed unica direzione di propagazione.
Il coefficiente di rifrazione delle onde irregolari e la variazione della loro direzione predominante possono essere rispettivamente determinati mediante i grafici delle Fig. 6.2.3 e 6.2.4.

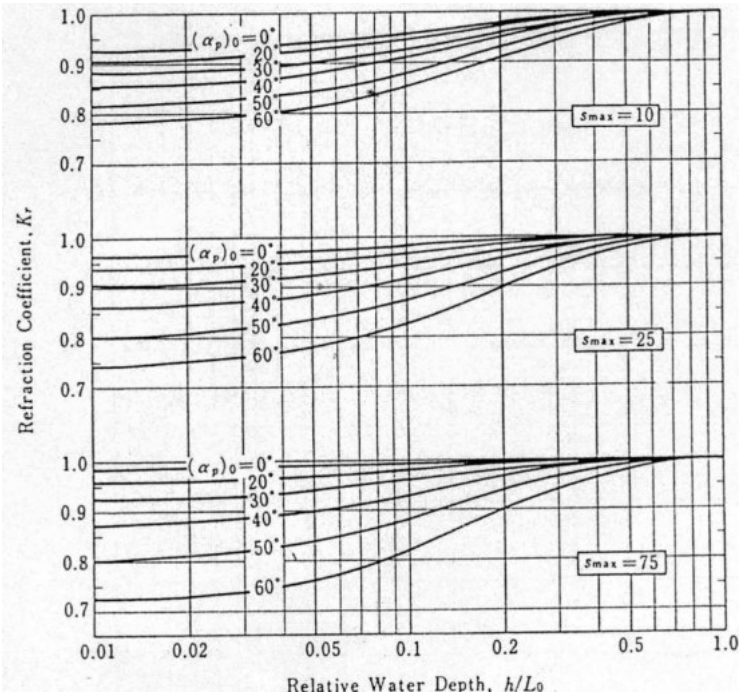


Fig. 6.2.3 - Coefficiente di rifrazione di onde irregolari in un fondale con isobate rettilinee e parallele (Goda 1985)

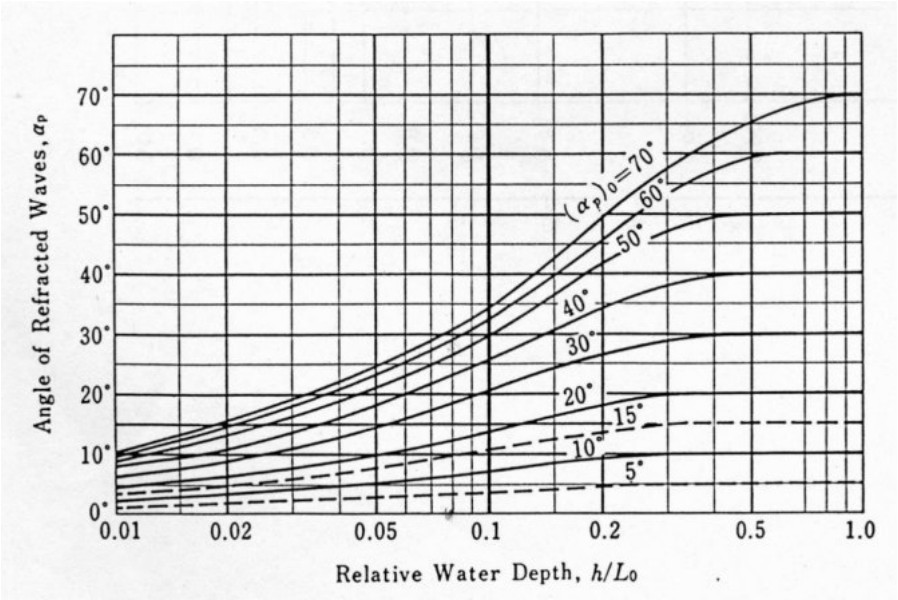


Fig. 6.2.4 - Variazione della direzione predominante delle onde irregolari dovuta alla rifrazione. (Goda 1985)

La lunghezza d'onda L_0 che compare nella ascissa dei diagrammi precedenti è la lunghezza d'onda in acque profonde corrispondente al periodo significativo T_0; il parametro $(\alpha_p)_0$ rappresenta l'angolo di incidenza delle onde in acque profonde.
Il coefficiente di rifrazione delle onde irregolari dipende dal parametro di dispersione s_{max} dello spettro direzionale, anche se l'errore commesso nel non considerare questo parametro risulta essere trascurabile (per onde da vento consideriamo il parametro di dispersione s_{max}=10).
L'analisi della trasformazione delle onde durante la fase di trasferimento verso riva può essere facilitata introducendo il concetto di altezza d'onda equivalente H'_0:

$$H'_0 = K_d \cdot K_r \cdot H_0$$

$$T'_0 = T_0$$

- H'_0 = altezza d'onda equivalente (corrispondente all'altezza significativa)
- H_0 = altezza d'onda significativa in acque profonde
- T_0 = periodo d'onda significativo in acque profonde
- K_d = coefficiente di diffrazione
- K_r = coefficiente di rifrazione

Il coefficiente di shoaling è stato ottenuto tramite la relazione:

$$K_s = \frac{H}{H'_0} = \sqrt{\frac{(C_G)_0}{C_G}} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh\left(4\pi h/L\right)}\right] \cdot \tanh\frac{2\pi h}{L}}}$$

- K_s = coefficiente di shoaling
- C_G = celerità di gruppo

- $(C_G)_0$ = celerità di gruppo in acque profonde.

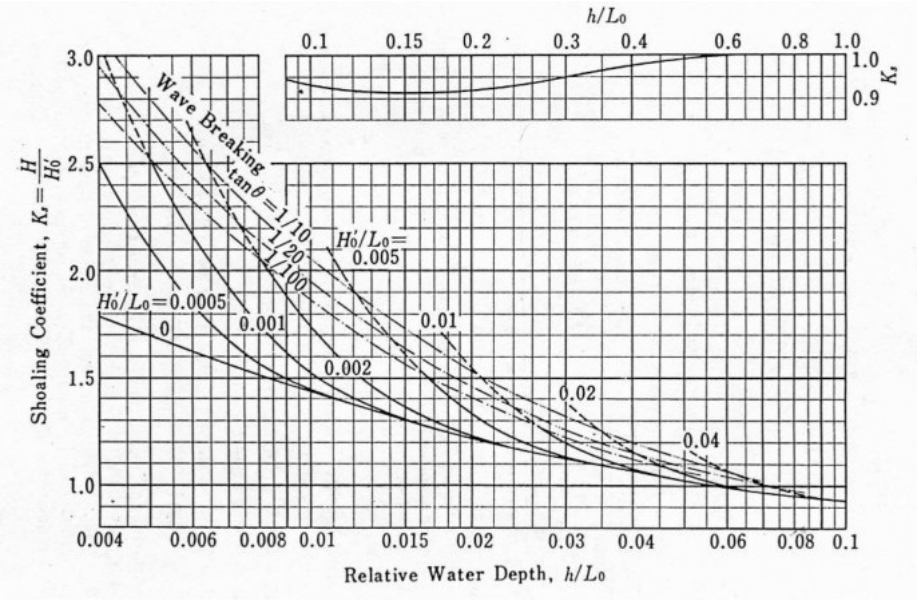


Fig. 6.2.5 - Coefficiente di shoaling per onde irregolari. (Goda 1985)

Le curve tratteggiate indicate con la scritta "wave breaking" rappresentano il limite oltre il quale l'attenuazione di *H* dovuta al fenomeno del frangimento è superiore al 2%. In questa zona l'altezza d'onda deve essere valutata tenendo conto del processo dissipativo dovuto al frangimento.

Nelle seguenti tabelle sono rappresentati per onde aventi tempi di ritorno di 5, 10, 15 anni, i risultati del trasferimento a riva per il quale si è scelto di considerare la profondità di -3.5 m l.m.m. che si ritrova poco più al largo del pennello in esame.

	Θ_O(°N)	Hs(m)	Ts(s)	Lo(m)	α_0	h/Lo	Kr	H'o(m)	H'o/Lo	Ks	$H_{1/3}$(progetto)	Θ_h(°N)
Tr = 2	30	1,57	4,52	31,80	50	0,110	0,89	1,399298	0,044	0,979468	1,371	49
	60	1,69	4,78	35,61	20	0,098	0,96	1,622401	0,046	1,009896	1,638	67
	90	1,68	5,07	40,16	-10	0,087	0,95	1,596698	0,040	1,04819	1,674	73

	Θ_O(°N)	Hs(m)	Ts(s)	Lo(m)	α_0	h/Lo	Kr	H'o(m)	H'o/Lo	Ks	$H_{1/3}$(progetto)	Θ_h(°N)
Tr = 5	30	1,91	4,83	36,43	50	0,096	0,88	1,681973	0,046	1,016622	1,710	51
	60	2,10	5,15	41,44	20	0,084	0,86	1,804113	0,044	1,059262	1,911	68
	90	1,93	5,38	45,22	-10	0,077	0,95	1,836032	0,041	1,091995	2,005	74

	Θ_O(°N)	Hs(m)	Ts(s)	Lo(m)	α_0	h/Lo	Kr	H'o(m)	H'o/Lo	Ks	$H_{1/3}$(progetto)	Θ_h(°N)
Tr =10	30	2,14	5,01	39,11	50	0,089	0,87	1,858179	0,048	1,039240	1,931	52
	60	2,37	5,36	44,79	20	0,078	0,94	2,22574	0,050	1,088252	2,422	68
	90	2,10	5,57	48,40	-10	0,072	0,95	1,994491	0,041	1,119719	2,233	74

	Θ_O(°N)	Hs(m)	Ts(s)	Lo(m)	α_0	h/Lo	Kr	H'o(m)	H'o/Lo	Ks	$H_{1/3}$(progetto)	Θ_h(°N)
Tr = 15	30	2,26	5,10	40,51	50	0,086	0,86	1,945752	0,048	1,051202	2,045	53
	60	2,52	5,46	46,52	20	0,075	0,94	2,368934	0,051	1,103311	2,614	68
	90	2,19	5,67	50,14	-10	0,070	0,94	2,061957	0,041	1,134833	2,340	74

Tab. 6.2.2 - Risultati del trasferimento di alcune onde di interesse alla profondità di -3.50 m l.m.m.

Per la determinazione dell'onda di progetto per il dimensionamento dell'opera a gettata si è scelto un opportuno tempo di ritorno valutato secondo quanto suggerito dalle "*Istruzioni Tecniche per la Progettazione delle Dighe Marittime"* emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel 1994:

$$T_R = T_V/[-ln(1 - P_F)]$$

con T_V e P_F rispettivamente la vita d'esercizio dell'opera e la probabilità di danneggiamento. I valori di probabilità attesa dell'evento con tempo di ritorno T_R sono definiti dall'espressione:

$$E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^{T_V}$$

Probabilità attesa				
T_v (anni)	**T_R (anni)**			
	2	**5**	**10**	**15**
10	100%	89%	65%	50%

Tab. 6.2.3 - Valori di probabilità attesa

L'onda considerata ai fini dei calcoli e delle verifiche idrauliche delle opere di progetto ha un tempo di ritorno di 5 anni e caratteristiche ondose, altezza significativa ***H_s* = 2.00 m**, **periodo *T_s* = 5,38 s**, direzione al largo **Θ_O= 90°*N*** e direzione alla profondità delle strutture **Θ_h = 74°N**, determinate applicando il metodo spettrale per il trasferimento dell'onda a profondità finita e i diagrammi di rifrazione per il trasferimento alla profondità di – 3.50 m l.m.m.