Lettera di risposta della Autorità di Sistema Portuale di Savona

AUTORITÀ DI SISTEMA PORTUALE DEL MAR LIGURE OCCIDENTALE

PEC 18327 – 1 GIU. 2017 **SEDE DI SAVONA**

Spett.le
Comune di Santa Margherita Ligure
c.a. Dirigente Area 4 Ing. Giorgio Ottonello
PEC: protocollo@pec.comunesml.it

p.c. Regione Liguria
Settore VIA
PEC: protocollo@pec.regione.liguria.it

p.c. RUP Ing. Flavio Destefanis
destefanis@porto.sv.it

Prot. 5101/tec
Savona, 31.05.2017

OGGETTO: Disponibilità di utilizzo presso la Piattaforma multifunzionale di Vado Ligure di terre e rocce da scavo provenienti dai lavori del canale scolmatore e sistemazione idraulica dei torrenti San Siro e Magistrato in Comune di Santa Margherita Ligure.

Si risconta la nota prot. 15611 del 10.05.2017 di codesto Comune di richiesta di disponibilità all'utilizzo del materiale proveniente dai lavori oggetto, per il quale è in corso la progettazione.

In base alle informazioni contenute nella corrispondenza inviata il materiale sembrerebbe idoneo all'impiego presso la Piattaforma di Vado Ligure per riempimenti. Tuttavia per esprimere nulla osta al conferimento, vincolante, occorre fornire alla scrivente stralcio del Piano di utilizzo ex DM 161/12, per quanto riguarda le modalità di caratterizzazione, nonché copia delle analisi effettuate, granulometriche e ambientali, al fine di valutare la compatibilità rispetto al Protocollo di conferimento per il cantiere di cui alle DGR 779/2014, 202/2016 e 215/2017 che si allegano.

Si precisa che presso il cantiere Piattaforma i conferimenti saranno possibili indicativamente fino a tutto il primo semestre 2018.

Si esprime comunque interesse al possibile conferimento presso altri lavori realizzati dall'Amministrazione, previa verifica della compatibilità del materiale e delle tempistiche di cantiere.

Si resta a disposizione per chiarimenti.

Riferimenti: mail pelizza@porto.sv.it – telefono 019-8554222 – cellulare 334-6534492

Distinti saluti.

Ufficio del RUP
ing. Susanna Pelizza

Firmato digitalmente da
Susanna Pelizza

File: 600-TerreRocceSantaMargheritaLigure.docx

Via Gramsci 14 int. 7 – 17100 Savona
Tel. 019 85541 Fax 019 827399 Email: authority@porto.sv.it

Lettera di disponibilità della "Cave di Frisolino S.r.l." al recepimento dei materiali da scavo dell'opera prevista.

CAVE di FRISOLINO s.r.l.
PRODUZIONE E FORNITURA PIETRISCO
SABBIA E CONGLOMERATI BITUMINOSI
Via Frisolino - Loc. Rocche - 16040 NE
Tel. 0185 337006 - Fax 0185 337661
Reg. Imp. di Chiavari / C.F. 03121510105
Cap. Soc. € 52.000,00 I.V. - P.I.V.A.00205190994
Fasc. n. 6597 - R.E.A. di GE n. 319153 GE

CE 1372

37645
31/10/2017
FRA c/o geol. Minetti

Spett.le
Comune di Santa Margherita Ligure
Area di Linea 4 Servizio Opere
Infrastrutturali – Tutela - Ambiente
Piazza G. Mazzini 46
16038 Santa Margherita Ligure

Alla Cortese att. Ing.Pietro Feriani

Ne, lì 31/10/2017

Oggetto: PROGETTAZIONE DEFINITIVA PER LA REALIZZAZIONE DI UN CANALE SCOLMATORE E SISTEMAZIONE IDRAULICA DEI TORRENTI SAN SIRO E MAGISTRATO, IN COMUNE DI SANTA MARGHERITA LIGURE (GE)
- MATERIALI PROVENIENTI DAGLI SCAVI PREVISTI -

In riferimento ai rapporti intercorsi con Il Dr. Geol. Luciano Minetti, estensore della Studio sul Piano di Utilizzo Delle Terre e Rocce da Scavo, riferito al progetto di cui all'oggetto, il soscritto Signor Alloro Gianpiero in qualità dl legale rappresentante della società "Cave di Frisolino S.r.l.", con sede in 16040 Ne (Ge) via Frisolino loc. Rocche p.i. 00205190994 c.f. 03121510105, col la presente

COMUNICA

Che la scrivente Società si rende disponibile al recepimento dei materiali provenienti dalle operazioni di scavo previsti per la realizzazione dell'opera, di cui all'oggetto, nei nostri siti autorizzati in loc. Rocche e loc. Iscioli, presenti sul territorio comunale di Ne (GE) con la seguente ipotesi di gestione:

conferimento del materiale di risulta alla nostra Società con attività di recupero o smaltimento rifiuti non pericolosi con nostra gestione diretta.

Si sottolinea che per le operazioni prospettate di cui sopra la Società scrivente è dotata delle necessarie caratteristiche ed autorizzazioni richieste dalla specifica normativa di settore.

Sarà comunque attivata la comunicazione al Comune dl Ne a riguardo della attività previste.

La presente intesa non rappresenta obbligazione tra le parti, comunque si chiede di restare informati sulle successive fasi inerenti l'intervento a progetto per i fini cui si aderisce.

Si coglie l'occasione per porgere i più cordiali saluti.

CAVE DI FRISOLINO Srl
Via Frisolino - Loc. Rocche
16040 NE (GE)
Tel.: 0185.337006 - Fax 0185.337661
C.F.: 03121510105 - P.I.: 00205190994

ALLEGATO 6

Ripascimento strutturale Santa Margherita Ligure

Elaborati presentati dalla “Società Santa Benessere & Social S.p.A.” a titolo “Porto di Santa Margherita Ligure Progetto Definitivo di messa in sicurezza ed adeguamento funzionale con riqualificazione degli Ormeggi e del Litorale Sud”

PROGETTO:	**PROGETTO DEFINITIVO PORTO DI SANTA MARGHERITA LIGURE** **MESSA IN SICUREZZA ED ADEGUAMENTO FUNZIONALE CON RIQUALIFICAZIONE DEGLI ORMEGGI E DEL LITORALE SUD**
SOGGETTO PROMOTORE:	**SANTA BENESSERE & SOCIAL S.p.a.** Santa Benessere & Social S.p.a. Piazza Mazzini, 12 16045 Chiavari (GE) T +39 0185 320868 F +39 0185 323189 E mfelugo@yahoo.it PRESIDENTE: Maurizio Felugo - PROJECT MANAGER: Ing. Pietro Zanoni - ASSISTENZA TECNICA: Arch. Gio Gozzi
ARCHITETTURA:	**OBR** Open Building Research S.r.l. Via Ciovasso, 4 20121 Milano T +39 02 84268200 F +39 02 8268250 E info@obr.eu RESPONSABILE: Arch. Paolo Brescia - COORDINAMENTO: Arch. Andrea Casetto
INGEGNERIA IDRAULICO-MARITTIMA:	**ACQUATECNO** Acquatecno S.r.l. Via Ajaccio, 14 00198 Roma T +39 06 44702081 F +39 06 44704906 E info@acquatecno.it RESPONSABILE: Ing. Paolo Turbolente
INGEGNERIA STRUTTURALE:	**MILAN INGEGNERIA** Milan Ingegneria S.r.l. Via Thaon di Revel, 21 20159 Milano T +39 02 36798890 F +39 02 36798892 E info@buromilan.com RESPONSABILE: Ing. Maurizio Milan
INGEGNERIA IMPIANTISTICA, PREVENZIONE INCENDI E SICUREZZA:	**UNITED CONSULTING** United Consulting Via Thaon di Revel, 21 20152 Milano T + 39 02 45397370 E info@unitedconsulting.it RESPONSABILE: Ing. Luca Giannelli
DOCUMENTI TECNICO-ECONOMICI:	**GAD** Global Assistance Development S.r.l. via Maurizio Quadrio, 12 20154 Milano T +39 02 29005672 F +39 02 65560517 E info@gadstudio.e RESPONSABILE: Geom. Gianpiero Aresi
URBANISTICA:	**ARCH. CARLO BERIO** Arch. Carlo Berio Piazza Marsala, 13 16122 Genova T +39 010 8398483 E carloberio@studioberio.it RESPONSABILE: Arch. Carlo Berio
CONSULENZA LEGALE:	**IADEVAIA** Iadevaia - Studio Legale e Tributario Via Giacomo Leopardi, 21 20123 Milano T +39 02 92801820 F +39 02 92801820 E alberto@iadevaia.it RESPONSABILE: Avv. Alberto Iadevaia
RILIEVO:	**GEO-T.E.C.** GEO-T.E.C. Studio Tecnico Topografico Associato Corso Italia, 9 int.2 16035 Rapallo (GE) T +39 0185 62830 F +39 0185 1831378 E geotec@geotecrapallo.it RESPONSABILE: Geom. Paolo Ghigliotti
GEOLOGIA E AMBIENTE:	**GEOLAMBDA** Geolambda Engineering S.r.l Via A. Diaz, 22 26845 Codogno (LO) T +39 0377 433021 F +39 0377 402035 E segreteria@geolambda.it RESPONSABILE: Geol. Marco Daguati
ARCHEOLOGIA:	**STUDIUM S.A.S. ARCHEOLOGIA** Studium S.a.s. Archeologia Via Marco Polo, 32 bis 10129 Torino T +39 011 855666 F +39 011 855666 E info@studiumarcheologia.com RESPONSABILE: Dott.ssa Frida Occelli
TITOLO ELABORATO:	# Opere Marittime # Relazione intervento di ripascimento

CODICE PROGETTO	LIVELLO PROGETTAZIONE	DISCIPLINA	QUADRANTE	NUMERO ELABORATO	REVISIONE
079	PD	OM	-		-

NOME FILE	SCALA	EMESSO DA	DATA PRIMA EMISSIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
	-	ACQ	04-12-2017	P.Turbolente	P.Turbolente	P.Turbolente

REVISIONI:

NUMERO REVISIONE	DATA REVISIONE	OGGETTO REVISIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO

Indice

PREMESSA

1. ANALISI IDRAULICO MARITTIMA

1.1 MOTO ONDOSO A LARGO E NEL BACINO PORTUALE

1.2 VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

1.3 CIRCOLAZIONE COSTIERA, RICAMBIO DELLE ACQUE ALL'INTERNO DEL BACINO PORTUALE E CONSEGUENZE SUL LITORALE DI GHIAIA

1.4 DINAMICA LITORANEA E STABILITÀ DEL RIPASCIMENTO

2. BARRIERA SOFFOLTA PER PROTEZIONE RIPASCIMENTO ARTIFICIALE

2.1 VERIFICA STABILITA' MASSI DI MANTELLATA

2.2 VALUTAZIONE EQUILIBRIO EVOLUTIVO TRASVERSALE SPIAGGIA IN GHIAIA

3. BIBLIOGRAFIA

PREMESSA

La presente relazione di calcolo idraulico marittimo relativa al progetto di messa in sicurezza ed adeguamento funzionale con riqualificazione degli ormeggi e del litorale Sud del porto di Santa Margherita Ligure riporta i calcoli di verifica ingegneristica marittima relativi alla spiaggia artificiale.
In particolare la stabilità della mantellata di protezione della barriera soffolta posta al piede del ripascimento e la stabilità trasversale di una sezione tipo del ripascimento in ghiaia previsto.

1. ANALISI IDRAULICO MARITTIMA

1.1 MOTO ONDOSO A LARGO E NEL BACINO PORTUALE

Per il progetto definitivo porto di Santa Margherita Ligure, è stato calcolato il regime del moto ondoso al largo del sito di interesse.
Queste informazioni sono necessarie per il successivo studio di trasferimento largo-riva dell'onda di progetto e la conseguente agitazione ondosa interna dovuta ad essa.
La consultazione di dati storici della zona di interesse ha evidenziato la mancanza di strumentazioni di misura in prossimità del Porto.
Per far fronte a questa mancanza sono stati utilizzati i dati ondosi registrati dalla boa ondametrica di La Spezia con una copertura temporale di 25 anni, dal 1989 al 2014 e con esposizione del paraggio del tutto analoga a quella di Santa Margherita Ligure.
E' stato individuato un settore di traversia proveniente da Sud - Ovest (205° N - 265° N).
La costruzione del campione statistico ha imposto diverse fasi di calcolo. Il primo passo è stato andare ad individuare le mareggiate indipendenti tra loro.
Il secondo passo è stato quello di identificare le mareggiate omogenee. Questo è stato eseguito innalzando la soglia di troncamento da 1,00 m a 3,00 m. s.l.m.m..
Nella fase finale sono stati presi in considerazione solo i valori massimi delle singole mareggiate precedentemente individuate.
Determinato il campione statistico, è stato effettuato un processo di inferenza statistica che ha permesso di calcolare l'altezza d'onda di progetto in funzione di un determinato tempo di ritorno.
Il calcolo del tempo di ritorno è stato eseguito prendendo in considerazione due fattori principali: l'effetto economico e la perdita di vite umane.
Nel caso in cui, a seguito di una mareggiata, la diga frangiflutti subisse un danno totale, sulla base di questi fattori è stato utilizzato un tempo di ritorno pari a 154 anni.
I parametri per la stima del tempo di ritorno sono stati presi dalla TABELLA 1 e 2 delle Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe frangiflutti, edite dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (1996).
Il processo di inferenza statistica ha mostrato che la distribuzione di probabilità che meglio si adatta al campione statistico è quella di Frechet, quindi invertendo questa distribuzione, in funzione del tempo di ritorno, è stato possibile calcolare l'altezza dell'onda di progetto al largo.
Il calcolo del periodo significativo è stato effettuato per mezzo di una correlazione tra altezza d'onda ed il periodo di tutti i dati disponibili, applicando un coefficiente di amplificazione è stato calcolato il periodo di picco per l'onda di progetto.
La tabella sottostante riassume i dati di progetto elaborati:

Tr[anni]	Hs[m]	Ts[s]	Dir[°N]
154	7,47	8,72	205 - 265

Ai fini dell'individuazione dei vari parametri ondosi al largo utili agli studi di agitazione ondosa interna al porto di Santa Margherita Ligure e del calcolo dell'onda di progetto della diga frangiflutti in condizioni di danno incipiente e della barriera soffolta atta a realizzare la difesa al piede della spiaggia, si è anche stimato il modo ondoso avente tempo di ritorno pari a 5,10 e 50 anni.

Tr[anni]	Hs[m]	Ts[s]	Dir[°N]
5	5,31	7,94	205 – 265
10	5,69	8,09	205 – 265
50	6,68	8,45	205 – 265

Le condizioni ondose di largo sono state quindi propagate sotto costa mediante un modello matematico (Mike21)
Lo studio di propagazione delle onde da largo a riva è stato redatto per poter conoscere l'altezza d'onda in prossimità del porto di Santa Margherita Ligure.

Le condizioni ondose in ingresso sono state determinate dallo studio meteomarino.
Da tale studio è state individuate diverse onde rilevanti ai fini della progettazione delle opere di difesa, provenienti da Sud - Ovest (205°N - 265°N).
E' stato utilizzato il modello numerico MIKE 21 SW che è basato sulla risoluzione numerica nel dominio e nel tempo dell'equazione di bilancio dell'azione delle onde per la propagazione dell'onda da largo a riva (in prossimità dell'imboccatura portuale).
Tale modello è in grado di simulare la crescita dell'onda per effetto del vento, l' interazione non lineare tra le onde, la dissipazione dovuta al white capping, la dissipazione dovuta all'attrito con il fondo, il frangimento dell'onda su profondità limitate, la rifrazione e shoaling dovuti alla batimetria, la diffrazione e la riflessione semplice.
Da tale studio si sono potuti individuare i parametri d'onda in prossimità della barriera soffolta posta a protezione della spiaggia artificiale che risultano essere:

Direzione al largo [°N]	H largo [m]	ts largo [s]	H[m] barriera	ts costa[a]	Direzione costa[°N]
180	6.68	8.45	2.66	8.34	139
150	6.68	8.45	**3.13**	8.33	137
120	6.68	8.45	1.60	8.36	136

1.2 VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

La conoscenza delle massime variazioni quasi-statiche del livello marino, dovute a cause diverse (principalmente la marea astronomica e "meteorologica"), è necessaria per molteplici scopi: per una corretta progettazione delle quote da assegnare alle opere a mare e delle profondità minime richieste all'imboccatura.
Dal punto di vista geologico (lungo termine) la costa in esame si presenta abbastanza stabile; non risultano problemi di eustatismo o subsidenza.
Per quanto riguarda le variazioni a breve termine, periodiche e non, occorre distinguere gli effetti della marea astronomica, dall'azione del vento e della pressione atmosferica ("marea meteorologica"), le variazioni stagionali di densità ed anche il sovralzo d'onda presente sulla battigia durante le mareggiate.
Nel Mar Mediterraneo e soprattutto nel paraggio costiero di S. Margherita Ligure le escursioni del livello del mare sono di fatto molto modeste, anche se eccezionalmente si possono verificare variazioni significative.

Marea astronomica
Le ampiezze ed i tempi di marea giornalieri sono prevedibili con esattezza per un gran numero di località e sono pubblicati annualmente dall'Ufficio Idrografico della Marina Militare di Genova sulle "Tavole di Marea". Per il caso in esame si possono ben utilizzare i dati forniti per il vicino porto di Palermo, i massimi dislivelli positivi raggiungono i valori di $\pm$0.20 m rispetto al livello medio del mare,

Variazioni meteorologiche di livello marino
Dislivello barico
Un poco maggiore risulta invece il massimo contributo che può essere fornito da variazioni della pressione atmosferica. E' noto infatti che un abbassamento barico di 1 mb rispetto al valore normale (1013 mb) produce un innalzamento di circa 1 cm del livello marino e viceversa.
Nell'area di S. Margherita Ligure i valori misurati minimi e massimi della pressione (legati al passaggio dei cicloni ed anticicloni) risultano pari a 978 mb e 1044 mb.

Ne consegue quale effetto "barico" un massimo sovralzo marino di 0,35 m ed un massimo abbassamento del livello di 0,31 m. In condizioni estreme eccezionali tali valori possono aumentare ancora di qualche centimetro.

Sovralzo di vento
Trascurabile, invece, risulta il contributo del vento nella zona di S. Margherita Ligure.
Infatti il sovralzo di vento dovuto all'accumulo d'acqua sottocosta per azione di venti foranei permanenti è contenuto in pochi centimetri data la limitatissima estensione della piattaforma continentale: l'isobata -200 si trova a soli 8 Km dalla costa.
Il calcolo del massimo sovralzo di vento è stato effettuato mediante una nota formulazione analitica implicita: $S = \{K_p L_p U^2/[g (D - d - S)]\} \ln [D/(d + S)]$
dove:
U = velocità del vento persistente (m/s);
D = profondità limite della piattaforma continentale (200 m);
L_p = estensione della piattaforma (distanza tra d e D nella direzione del vento) (m);
d = profondità ove si calcola il sovralzo (m);
g = accelerazione di gravità (9,81 m/s2);
K_p = coefficiente pari a 3 x 10-6
Considerando l'azione di un vento costante diretto verso la costa con velocità di 28 m/s ed un'estensione della piattaforma continentale (fondale -200 m) pari a 8 km, si è ricavato un innalzamento massimo del livello del mare in corrispondenza delle opere progettate pari a 0,03 m.

Valori estremi
Considerando che in generale non si verifica la piena concomitanza per i sovralzi di carattere meteorologico ed astronomico, si può cautelativamente assumere una riduzione del 20% della somma dei termini di sovralzo meteorologico a quelli astronomici.
In definitiva, per i contributi positivi e negativi, si ottengono i seguenti massimi dislivelli rispetto al medio mare:
Sovralzo S_u = +0,20 m + 0,80 (0,35 m +0,03 m) = +0,50 m
Abbassamento S_d = -0,20 m + 0,80 (-0,31 m) = -0,45 m

1.3 CIRCOLAZIONE COSTIERA, RICAMBIO DELLE ACQUE ALL'INTERNO DEL BACINO PORTUALE E CONSEGUENZE SUL LITORALE DI GHIAIA

La morfologia costiera del paraggio e dell'infrastruttura portuale, alquanto aperta (anche alla penetrazione ondosa purtroppo) comporta minori problemi di ricambio idrico portuale, riducendo il rischio di fenomeni eutrofici.
Tale spiaggia artificiale è stata dimensionata a partire dalle condizioni ondose sotto costa ivi determinate e riportate nel precedente paragrafo 3.3.
La spiaggia artificiale progettata è caratterizzata da uno sviluppo longitudinale di circa 210 m e prevede un incremento verso largo dell'attuale linea di riva di circa 35 m.
Il materiale di ripascimento è costituito da ghiaia avente D_{50} = 5 mm ed è protetto al piede ed ai fianchi da una barriera soffolta avente coronamento alla quota -2,00 m s.l.m.m. costituita da una scogliera protetta da una mantellata in massi naturali da 3 a 7 t di pezzatura posta in doppio strato di spessore complessivo pari a 2,50 m su uno strato filtro di massi naturali da 50 – 1.000 kg posti in doppio strato per 1,20 m di spessore complessivo, a loro volta posti sul nucleo in tout venant di cava.
Al fine di impedire la "migrazione/erosione" delle parti più fine del ripascimento verso il largo è stata interposta tra la barriera ed il ripascimento un ulteriore filtro realizzato da uno strato di geotessuto e da un riempimento in massi naturali da 50 – 1.000 kg.
Si rimanda alla relativa relazione di calcolo per approfondimenti.

1.4 DINAMICA LITORANEA E STABILITÀ DEL RIPASCIMENTO

I calcoli di verifica della stabilità del ripascimento, riportati nei paragrafi seguenti, sono stati effettuati mediante il modello di Van der Meer (1988) che considera la stabilità trasversale dell'opera. L'esame dell'equilibrio morfologico longitudinale dell'opera non

sarebbe stato investigabile mediante i modelli ad una linea data la ridotta dimensione longitudinale della spiaggia artificiale (prevale la dinamica trasversale su quella longitudinale)
Le spiagge sono caratterizzate da una risposta dinamica all'azione del moto ondoso mediante la formazione di un profilo di equilibrio diverso a seconda delle caratteristiche del moto ondoso d'attacco.
Per le spiagge non è importante il grado di danneggiamento, inteso come percentuale di materiale movimentato a seguito di una mareggiata, bensì la configurazione del profilo ed altre caratteristiche geometriche che danno informazioni sulla sua stabilità (ad esempio il massimo arretramento della linea di riva, la massima oscillazione planimetrica della battigia oppure la presenza di frazioni di materiale fino in alcuni punti della spiaggia sommersa).
Il modello matematico proposto da Van der Meer (Delft Hydraulics 1988) per la descrizione delle caratteristiche geometriche del profilo trasversale in funzione delle grandezze significative del moto ondoso, è il risultato dell'analisi di numerose prove di laboratorio su modello fisico mediante l'utilizzo di onde irregolari.
Stimati i valori dei parametri di Van der Meer è stato individuato il profilo di equilibrio della spiaggia in funzione di un'onda avente tempo di ritorno 50 anni.
Da tale studio è emerso che il Dn50 a disposizione per riprofilare la spiaggia è stabile alla luce della presenza di una barriera soffolta che ne impedisce la dispersione in mare.

2. BARRIERA SOFFOLTA PER PROTEZIONE RIPASCIMENTO ARTIFICIALE

2.1 VERIFICA STABILITA' MASSI DI MANTELLATA

La mantella della sezione di tronco della barriera soffolta posta a protezione del ripascimento artificiale è stata dimensionata mediante le formule di Van der Meer il cui tabulato di calcolo è riportato di seguito:

Van der Meer (Prog. di scogliere in massi naturali)

Criterio discriminatore per uso Plunging/Surging

$H_{sc} = aT_m^2 =$	2,13	
ove:		
$T_m =$	7,35	s
cotg $\alpha =$	1,3333	
P =	0,4	

Formula base per Plunging (se $H_s > H_{sc}$) presente caso

$$\mathbf{M_{50}(t)} = \rho_r H_s^{2,25} T_m^{1,5} / K_{pl}^{*} \cot g\alpha^{1,5} \Delta^3 =$$

8,46572126	t	no tracimazione	
2,88707619	t	tracimazione	
2,89	**t**	= valore da considerare di M_{50}	

$\rho_r =$	2,6	t/m^3
$\rho_w =$	1,025	t/m^3
$\Delta =$	1,54	
cotg $\alpha =$	1,3333	
$T_m =$	7,35	s
$H_s =$	3,13	m
$K_{pl} =$	14,28	
$K_{pl}^{*} = K_{pl}K_1K_2 =$	41,87	
P =	0,4	
S =	2	
$K_1 =$	1	durata mareggiate
$K_2 =$	1	se no tracimabilità
$K_2 =$	2,93	tracimabilità diga
Rc (elev. Diga) =	-2	m s.l.m.m.

In favore della sicurezza viene quindi adottata una mantellata costituita da un doppio strato di massi naturali da 3 a 7 t (III categoria) posta su di uno strato filtro di massi naturali da 50 a 1.000 kg (I categoria) con pendenze del paramento pari a 3 su 4.
Gli spessori dei doppi strati sono stati valutati mediante l'espressione seguente

$$r = n K_\Delta (P/\gamma_s)^{1/3}$$

ove
n = 2 strati
K_Δ = 1,00 (coefficiente valido per massi naturali)
γ_s = peso specifico massi naturali = 2,6 t/m3
Di conseguenza per massi naturali da 3 a 7 t si ha r = 2,50 m mentre per i massi naturali da 50 a 1.000 kg si ha r = 1,20 m.

2.2 VALUTAZIONE EQUILIBRIO EVOLUTIVO TRASVERSALE SPIAGGIA IN GHIAIA

Le strutture quali le spiagge e le scogliere, vengono definite anche “strutture a stabilità dinamica”, in quanto rispondono con una variazione del profilo, sia longitudinale sia trasversale, all’azione del moto ondoso.
I singoli elementi granulometrici che la compongono sono spostati dall’energia dell’onda fino a quando non si genera una particolare forma per la quale la capacità di trasporto lungo il profilo si azzera.
Per le spiagge, il materiale presente nell’intorno del livello medio mare (swash zone) viene continuamente movimentato ad ogni risalita (run up) e ridiscesa (run down) dell’onda, ma quando il trasporto netto si azzera, il profilo della spiaggia raggiunge una condizione di equilibrio dinamico alla quale corrisponde una geometria costante che dura finché le condizione del modo ondoso rimangono anch’esse costanti.
Le spiagge sono caratterizzate da una risposta dinamica all’azione del moto ondoso mediante la formazione di un profilo di equilibrio diverso a seconda delle caratteristiche del moto ondoso d’attacco.
Per le spiagge non è importante il grado di danneggiamento, inteso come percentuale di materiale movimentato a seguito di una mareggiata, bensì la configurazione del profilo ed altre caratteristiche geometriche che danno informazioni sulla stabilità di essa come ad esempio il massimo arretramento della linea di riva, la massima oscillazione planimetrica della battigia oppure la presenza di frazioni di materiale fino in alcuni punti della spiaggia sommersa.
Per i motivi sopracitati la stabilità dei materiali messi in movimento dal moto ondoso costituisce un argomento molto diffuso da molti anni.
Gli studi di letteratura più recenti includono la stabilità dinamica dei frangiflutti in massi naturali ed uno degli obiettivi principali di tali studi fu quello di individuare i punti mancanti nella conoscenza sulla stabilità statica e dinamica di scarpate rocciose e di spiagge in ghiaia.
I risultati di questi studi sono poi stati utilizzati da Van der Meer per perfezionare un più efficiente modello di analisi (Delft Hydraulics 1988).
Il modello matematico proposto da Van der Meer per la descrizione delle caratteristiche geometriche del profilo trasversale in funzione delle grandezze significative del moto ondoso, è il risultato dell’analisi di numerose prove di laboratorio su modello fisico mediante l’utilizzo di onde irregolari.
Le prove sono state eseguite in modo da descrivere l’intero campo di stabilità dinamica delle spiagge in ghiaia che può essere posto pari a

$$6 < \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} < 500.$$

A tal fine sono state utilizzate rappresentazioni con valori del diametro nominale Dn50=0.011-0.026 m adottando un assortimento dei granuli pari a D85/D15 ed altezze d’onda significativa variabili tra 0.13 e 3.0 m con periodi medi Tm= 1.3-3.0s.
La stabilità dinamica può essere descritta da 6 parametri di altezza o lunghezza e due angoli di inclinazione che caratterizzano il profilo sotto l’attacco del moto ondoso.
Le variabili che governano la stabilità dinamica sono:

Diametro nominale	Dn50
Densità relativa del granulo	Δ
Altezza d’onda significativa sulla spiaggia	Hs
Periodo medio	Tm
Durata della mareggiata o numero di onde	N
Profondità al piede della spiaggia	H
Angolo d’attacco	ψ

Descrizione dei parametri e loro influenza

L'altezza d'onda e periodo hanno effetti simili sulla formazione del profilo, questa caratteristica viene espressa mediante la variabile adimensionale combinata altezza d'onda-periodo Ho To descritta da:

$$H_o T_o = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \sqrt{\frac{g}{D_{n50}}} \cdot T_m$$

Ove:

$H_o = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}}$ = parametro adimensionale d'altezza d'onda (=Ns)

$T_o = \sqrt{\frac{g}{D_{n50}}} \cdot T_m$ = parametro adimensionale di periodo d'onda, riferiti al Dn50

La durata della mareggiata ha influenza fino ad un numero elevato di onde, la forma dello spettro non ha influenza sul profilo, usando Tm come periodo dell'onda, per valori del rapporto

$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} < 15 - 20$

il profilo risultante è influenzato dalla pendenza iniziale.

La forma del materiale, spigoloso, allungato e liscio o arrotondato, non ha nessuna influenza sul profilo, esso è influenzato dall'angolo di attacco del moto ondoso ψ. I parametri di altezza e lunghezza vanno ridotti secondo il coseno di ψ.

Il profilo al disotto del livello medio marino diviene più inclinato quando la struttura è situata in acque basse.

Tutti i parametri geometrici del profilo, tranne lt, possono essere espressi nella seguente forma:

$$\frac{par}{D_{n50} N_a} = \left(\frac{H_o T_o}{b}\right)^{\frac{1}{c}}$$

Dove i coefficienti a, b e c variano da un parametro all'altro.

In particolare si ha:

$$l_r = \left(\frac{H_o T_o}{2{,}9}\right)^{1/1{,}3} D_{n50} N^{0{,}05}$$

$$l_c = \left(\frac{H_o T_o}{22}\right)^{1/1{,}2} D_{n50} N^{0{,}12}$$

$$h_c = \left(\frac{H_o T_o}{25}\right)^{1/1{,}5} D_{n50} N^{0{,}15}$$

$$l_s = \left(\frac{H_o T_o}{3{,}8}\right)^{1/1{,}3} D_{n50} N^{0{,}07}$$

$$h_s = \left(\frac{H_o T_o}{16{,}5}\right)^{1/1{,}5} D_{n50} N^{0{,}07}$$

$$h_t = \left(\frac{H_o T_o}{5}\right)^{1/1{,}5} D_{n50} N^{0{,}04}$$

Le curve che rappresentano rispettivamente la parte emersa e quella sommersa della zona di swash (run-up e run-down), sono costituite dalle due funzioni di potenza seguenti:

$y = a_4 x^{0,83}$ per il tratto sotto il livello del mare

$y = a_5(-x)^{1,15}$ per il tratto sopra il livello del mare

Nella quali i valori da attribuire ai coefficienti a4 ed a5 vanno determinati inserendo le coppie di valori hc, lc e di hs, ls rispettivamente nella prima e nella seconda equazione.

Applicazione al presente caso

La prima fase consiste nell'individuare dai profili misurati i parametri geometrici associati alle condizioni d'onda determinate dallo studio di trasferimento ondoso largo-riva, non si sono riscontrate grosse difficoltà nell'individuare i parametri hc, lc ed lr soprattutto per quanto riguarda i profili risultanti da azioni molto intense del moto ondoso, mentre è stato più difficoltoso stimare i parametri ls ed hs inerenti la parte sommersa della spiaggia, la quale è stata realizzata mediante un attento confronto tra profili.

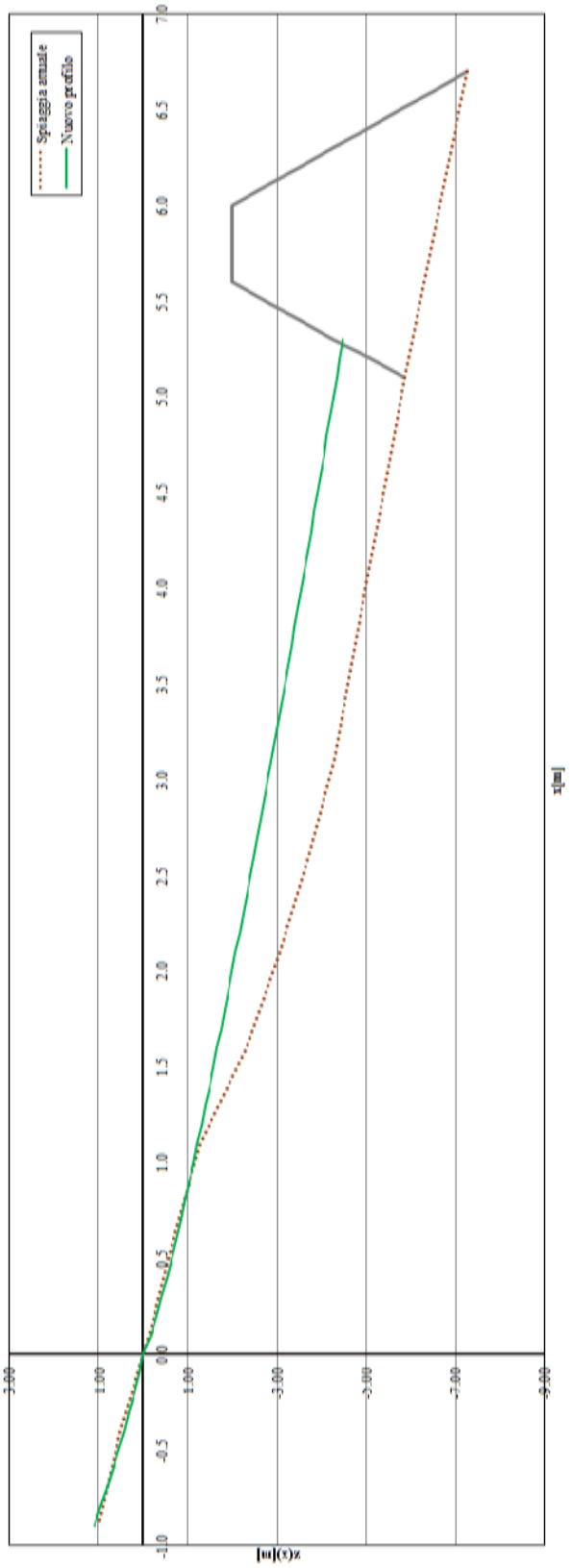
I valori delle grandezze individuate sono riportati nella tabella sottostante.

HoTo	5721375	-	Numero di Van der Meer
lr	44.46	m	limite Run-up
lc	40.09	m	posizione cresta
hc	6.10	m	altezza cresta
ls	43.56	m	posizione scarpata
hs	3.80	m	profondità scarpata
ht	6.37	m	profondità di transizione

Stimati i valori dei parametri di Van der Meer è stato individuato il profilo di equilibrio della spiaggia in funzione di un'onda avente tempo di ritorno 50 anni, da tale studio è emerso che il Dn50 a disposizione per riprofilare la spiaggia è stabile alla luce della presenza di una barriera soffolta che ne impedisce la dispersione in mare.

Nella figura sottostante è riportata la curva del profilo di equilibrio della spiaggia stimata con i parametri di Van der Meer.

γ_w	**10.1**	kN/m^3	Peso specifico dell'acqua di mare
γ_s	**26.0**	kN/m^3	Peso specifico materiale
Δ	1.57	-	$(\rho_s/\rho_w) - 1$
Hs	**3.13**	m	Altezza d'onda di progetto
D_{n50}	**0.4**	mm	Diametro nominale
P	**0.4**	-	Permeabilità
cot(α)	0.00	-	Inclinazione
T_{0m}	**7.35**	s	Periodo medio
L_{0m}	84.3	m	Lunghezza onda
s_m	0.037	-	Ripidità onda
N_z	**0**	-	Numero di onde


Spiaggia attuale
Nuovo profilo
z(m)
[m]

3. BIBLIOGRAFIA

- U.S. CORP OF ENGINEERS – Coastal Engineering Manual - Coastal Engineering Research Center, Washington D.C., 2001.
- U.S. CORP OF ENGINEERS - Shore Protection Manual - Coastal Engineering Research Center, Washington D.C., 1984.
- ISTITUTO IDROGRAFICO DELLA MARINA MILITARE – Portolano dei mari d'Italia, vol. 1A – Genova.
- ISTITUTO IDROGRAFICO DELLA MARINA MILITARE – Tavole di marea 1998 – Genova.
- ISTITUTO IDROGRAFICO DELLA MARINA MILITARE – Carte nautiche n. 908 INT 3300 (scala 1:250.000), n. 2 (scala 1:100.000), n. 107 (scala 1:30.000) - Genova
- J.E. BOWLES – Foundation Analysis and Design – Mc Graw Hill 4th ed.

PROGETTO:	**PROGETTO DEFINITIVO PORTO DI SANTA MARGHERITA LIGURE** **MESSA IN SICUREZZA ED ADEGUAMENTO FUNZIONALE CON RIQUALIFICAZIONE DEGLI ORMEGGI E DEL LITORALE SUD**
SOGGETTO PROMOTORE:	**SANTA BENESSERE & SOCIAL S.p.a.** Santa Benessere & Social S.p.a. Piazza Mazzini, 12 16045 Chiavari (GE) T +39 0185 320868 F +39 0185 323189 E mfelugo@yahoo.it PRESIDENTE: Maurizio Felugo - PROJECT MANAGER: Ing. Pietro Zanoni - ASSISTENZA TECNICA: Arch. Gio Gozzi
ARCHITETTURA:	**OBR** Open Building Research S.r.l. Via Ciovasso, 4 20121 Milano T +39 02 84268200 F +39 02 8268250 E info@obr.eu RESPONSABILE: Arch. Paolo Brescia - COORDINAMENTO: Arch. Andrea Casetto
INGEGNERIA IDRAULICO-MARITTIMA:	**ACQUATECNO** Acquatecno S.r.l. Via Ajaccio, 14 00198 Roma T +39 06 44702081 F +39 06 44704906 E info@acquatecno.it RESPONSABILE: Ing. Paolo Turbolente
INGEGNERIA STRUTTURALE:	**MILAN INGEGNERIA** Milan Ingegneria S.r.l. Via Thaon di Revel, 21 20159 Milano T +39 02 36798890 F +39 02 36798892 E info@buromilan.com RESPONSABILE: Ing. Maurizio Milan
INGEGNERIA IMPIANTISTICA, PREVENZIONE INCENDI E SICUREZZA:	**UNITED CONSULTING** United Consulting Via Thaon di Revel, 21 20152 Milano T + 39 02 45397370 E info@unitedconsulting.it RESPONSABILE: Ing. Luca Giannelli
DOCUMENTI TECNICO-ECONOMICI:	**GAD** Global Assistance Development S.r.l. via Maurizio Quadrio, 12 20154 Milano T +39 02 29005672 F +39 02 65560517 E info@gadstudio.e RESPONSABILE: Geom. Gianpiero Aresi
URBANISTICA:	**ARCH. CARLO BERIO** Arch. Carlo Berio Piazza Marsala, 13 16122 Genova T +39 010 8398483 E carloberio@studioberio.it RESPONSABILE: Arch. Carlo Berio
CONSULENZA LEGALE:	**IADEVAIA** Iadevaia - Studio Legale e Tributario Via Giacomo Leopardi, 21 20123 Milano T +39 02 92801820 F +39 02 92801820 E alberto@iadevaia.it RESPONSABILE: Avv. Alberto Iadevaia
RILIEVO:	**GEO-T.E.C.** GEO-T.E.C. Studio Tecnico Topografico Associato Corso Italia, 9 int.2 16035 Rapallo (GE) T +39 0185 62830 F +39 0185 1831378 E geotec@geotecrapallo.it RESPONSABILE: Geom. Paolo Ghigliotti
GEOLOGIA E AMBIENTE:	**GEOLAMBDA** Geolambda Engineering S.r.l Via A. Diaz, 22 26845 Codogno (LO) T +39 0377 433021 F +39 0377 402035 E segreteria@geolambda.it RESPONSABILE: Geol. Marco Daguati
ARCHEOLOGIA:	**STUDIUM S.A.S. ARCHEOLOGIA** Studium S.a.s. Archeologia Via Marco Polo, 32 bis 10129 Torino T +39 011 855666 F +39 011 855666 E info@studiumarcheologia.com RESPONSABILE: Dott.ssa Frida Occelli
TITOLO ELABORATO:	# Opere Marittime Computo metrico intervento di ripascimento

CODICE PROGETTO	LIVELLO PROGETTAZIONE	DISCIPLINA	QUADRANTE	NUMERO ELABORATO	REVISIONE
079	PD	OM	-		-

NOME FILE	SCALA	EMESSO DA	DATA PRIMA EMISSIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
	-	ACQ	04-12-2017	P.Turbolente	P.Turbolente	P.Turbolente

REVISIONI:

NUMERO REVISIONE	DATA REVISIONE	OGGETTO REVISIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO

N. ord.	Art.el. prezzi	Descrizione opere	U.m.	parti simili	Area (m^2)	interasse/lunghezza (m)	Quantità totale	Costo unitario	Importo
		Porto di S. Margherita Ligure (GE)							
		SPIAGGIA ARTIFICIALE							
		Ripascimento in ghiaia con mezzi terrestri							
		Sezione di computo SP1			98,00	30,00	2.940,00		
		Sezione di computo SP2			112,07	55,00	6.163,85		
		Sezione di computo SP3			148,56	57,00	8.467,92		
		Sezione di computo SP4			160,00	52,00	8.320,00		
		Sezione di computo SP5			140,00	30,00	4.200,00		
		subtot	m^3				30.091,77		
		Tout Venant di Cava con mezzi marittimi (>150 t)							
		Sezione di computo SP1			0,71	45,00	31,95		
		Sezione di computo SP2			2,03	46,00	93,38		
		Sezione di computo SP3			1,55	43,00	66,65		
		Sezione di computo SP4			6,47	47,00	304,09		
		Sezione di computo SP5			37,20	55,00	2.046,00		
		subtot	m^3				2.542,07		
		Massi naturali 50-1.000 kg (γ=1,8t/m^3) con mezzi marittimi							
		Sezione di computo SP1			21,71	45,00	976,95		
		Sezione di computo SP2			24,90	46,00	1.145,40		
		Sezione di computo SP3			24,45	43,00	1.051,35		
		Sezione di computo SP4			28,72	47,00	1.349,84		
		Sezione di computo SP5			41,55	55,00	2.285,25		
		subtot	m^3				6.808,79		
		subtot	t	1,80			12.255,82		
		Massi naturali 3-7 t (γ=1,8t/m^3) con mezzi marittimi							
		Sezione di computo SP1			32,75	45,00	1.473,75		
		Sezione di computo SP2			35,12	46,00	1.615,52		
		Sezione di computo SP3			34,90	43,00	1.500,70		
		Sezione di computo SP4			43,55	47,00	2.046,85		
		Sezione di computo SP5			70,73	55,00	3.890,15		
		subtot	m^3				10.526,97		
		subtot	t	1,80			18.948,55		

PROGETTO:

PROGETTO DEFINITIVO PORTO DI SANTA MARGHERITA LIGURE

MESSA IN SICUREZZA ED ADEGUAMENTO FUNZIONALE CON RIQUALIFICAZIONE DEGLI ORMEGGI E DEL LITORALE SUD

SOGGETTO PROMOTORE:

SANTA BENESSERE & SOCIAL S.p.a.
Santa Benessere & Social S.p.a.
Piazza Mazzini, 12
16045 Chiavari (GE)
T +39 0185 320868
F +39 0185 323189
E mfelugo@yahoo.it
PRESIDENTE: Maurizio Felugo - PROJECT MANAGER: Ing. Pietro Zanoni - ASSISTENZA TECNICA: Arch. Gio Gozzi

ARCHITETTURA:

OBR
Open Building Research S.r.l.
Via Ciovasso, 4
20121 Milano
T +39 02 84268200
F +39 02 8268250
E info@obr.eu
RESPONSABILE: Arch. Paolo Brescia - COORDINAMENTO: Arch. Andrea Casetto

INGEGNERIA IDRAULICO-MARITTIMA:

ACQUATECNO
Acquatecno S.r.l.
Via Ajaccio, 14
00198 Roma
T +39 06 44702081
F +39 06 44704906
E info@acquatecno.it
RESPONSABILE: Ing. Paolo Turbolente

INGEGNERIA STRUTTURALE:

MILAN INGEGNERIA
Milan Ingegneria S.r.l.
Via Thaon di Revel, 21
20159 Milano
T +39 02 36798890
F +39 02 36798892
E info@buromilan.com
RESPONSABILE: Ing. Maurizio Milan

INGEGNERIA IMPIANTISTICA, PREVENZIONE INCENDI E SICUREZZA:

UNITED CONSULTING
United Consulting
Via Thaon di Revel, 21
20152 Milano
T + 39 02 45397370
E info@unitedconsulting.it
RESPONSABILE: Ing. Luca Giannelli

DOCUMENTI TECNICO-ECONOMICI:

GAD
Global Assistance Development S.r.l.
via Maurizio Quadrio, 12
20154 Milano
T +39 02 29005672
F +39 02 65560517
E info@gadstudio.e
RESPONSABILE: Geom. Gianpiero Aresi

URBANISTICA:

ARCH. CARLO BERIO
Arch. Carlo Berio
Piazza Marsala, 13
16122 Genova
T +39 010 8398483
E carloberio@studioberio.it
RESPONSABILE: Arch. Carlo Berio

CONSULENZA LEGALE:

IADEVAIA
Iadevaia - Studio Legale e Tributario
Via Giacomo Leopardi, 21
20123 Milano
T +39 02 92801820
F +39 02 92801820
E alberto@iadevaia.it
RESPONSABILE: Avv. Alberto Iadevaia

RILIEVO:

GEO-T.E.C.
GEO-T.E.C. Studio Tecnico Topografico Associato
Corso Italia, 9 int.2
16035 Rapallo (GE)
T +39 0185 62830
F +39 0185 1831378
E geotec@geotecrapallo.it
RESPONSABILE: Geom. Paolo Ghigliotti

GEOLOGIA E AMBIENTE:

GEOLAMBDA
Geolambda Engineering S.r.l
Via A. Diaz, 22
26845 Codogno (LO)
T +39 0377 433021
F +39 0377 402035
E segreteria@geolambda.it
RESPONSABILE: Geol. Marco Daguati

ARCHEOLOGIA:

STUDIUM S.A.S. ARCHEOLOGIA
Studium S.a.s. Archeologia
Via Marco Polo, 32 bis
10129 Torino
T +39 011 855666
F +39 011 855666
E info@studiumarcheologia.com
RESPONSABILE: Dott.ssa Frida Occelli

TITOLO ELABORATO:

Opere Marittime
Studio meteomarino di largo

CODICE PROGETTO	LIVELLO PROGETTAZIONE	DISCIPLINA	QUADRANTE	NUMERO ELABORATO	REVISIONE
079	PD	OM	-	0002	-

NOME FILE	SCALA	EMESSO DA	DATA PRIMA EMISSIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
079_PD_OM_0002_0.dwg	-	ACQ	04-12-2017	P.Turbolente	P.Turbolente	P.Turbolente

REVISIONI:

NUMERO REVISIONE	DATA REVISIONE	OGGETTO REVISIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO

1. PREMESSA 1

2. METODOLOGIA DI STUDIO 2

3. METODO DI TRASPOSIZIONE GEOGRAFICA DELLE MISURE ONDAMETRICHE. 3

3.1. JONSWAP (1973), SPM (1984) 4

3.2. Donelan (1989) 4

3.3. Contini e De Girolamo (1998) 5

4. CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE DEL SITO 6

4.1. Calcolo dei fetches geografici 7

4.2. Calcolo dei fetches efficaci 8

5. REGIME D'ONDA AL LARGO 12

5.1. Descrizione delle fonti di dati disponibili 12

5.2. Clima ondoso al largo 13

5.3. Correlazione tra altezza d'onda e periodo 30

6. ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI 31

6.1. Calcolo del tempo di ritorno 32

6.2. Analisi di inferenza statistica 33

6.3. Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati 37

6.4. Adattamento delle distribuzioni di probabilità 38

6.5. Calcolo delle fasce fiduciarie per il campione statistico 48

6.6. Verifica di adattamento delle distribuzioni attraverso l'impiego di test statistici 51

6.7. Parametri dell'onda di progetto 56

6.8. Stima intervallare dell'onda di progetto 58

7. CONCLUSIONI 60

INDICE DELLE FIGURE 62

INDICE DELLE TABELLE 64

1. PREMESSA

Il presente Studio Meteomarino è stato elaborato a supporto delle attività connesse alla stesura del progetto definitivo del porto di Santa Margherita Ligure.

Nell'ambito del presente Studio sono state inizialmente svolte le indagini conoscitive volte al reperimento dei dati necessari e, successivamente, le analisi finalizzate alla definizione sia dei regimi ondosi sia delle caratteristiche degli stati di mare estremi, tipici del paraggio antistante l'imboccatura del porto di Santa Margherita Ligure.

Il presente documento costituisce la relazione finale ad illustrazione dei risultati ottenuti durante lo Studio suddetto. Pertanto, nel seguito si descriveranno sia la metodologia adottata, sia le tecniche d'elaborazione dati, sia i risultati ottenuti dalle analisi.

2. METODOLOGIA DI STUDIO

Al fine di stabilire l'operatività del porto di Santa Margherita Ligure, è necessario calcolare i regimi ondosi. Pertanto, si è dato corso in primo luogo ad un'indagine conoscitiva riguardo la disponibilità di fonti storiche per i dati relativi all'agitazione ondosa e al vento presenti nell'area d'interesse. Tale indagine ha evidenziato la presenza di una stazione di misura ondametrica direzionale, per il calcolo del regime ondoso, al largo di La Spezia facente parte della Rete Ondametrica Nazionale. In ragione delle differenti caratteristiche del punto di misura e di quello d'interesse, i dati della serie storica di La Spezia non sono stati direttamente impiegati nel calcolo del regime ondoso all'esterno del porto di Santa Margherita Ligure.

Introducendo il concetto di boa virtuale, definito come strumento di calcolo puntuale per la rettifica delle serie ondametriche reali in funzione degli effetti prima elencati, si può affermare che il calcolo del regime ondoso all'esterno del porto è passato per la calibrazione di una boa virtuale:

- i dati misurati al largo di La Spezia sono stati trasposti in un punto al largo di Santa Margherita Ligure, valutando la diversa esposizione all'azione delle perturbazioni atmosferiche.

La calibrazione della suddetta boa virtuale ha implicato la determinazione di funzioni di trasferimento, capaci di rettificare i parametri Hmo, Tp e ϑm in funzione della differenza tra le conformazioni delle aree di generazione e della variabilità del fondale. La prima funzione di trasferimento, per la trasposizione delle serie storiche reali in acqua profonda, è stata determinata in conformità alla metodologia proposta da Contini e De Girolamo (1998), denominata trasposizione geografica del moto ondoso.

In sintesi, la metodologia seguita nello svolgimento dello studio meteomarino può essere schematizzata come segue.

- Caratteristiche geografiche del sito
  - Calcolo dei fetches geografici
  - Calcolo dei fetches efficaci
- Regime d'onda al largo
  - Descrizione delle fonti di dati disponibili
  - Clima ondoso al largo
  - Correlazione tra altezza d'onda e periodo della medesima
- Analisi statistica degli eventi estremi
  - Calcolo del tempo di ritorno
  - Analisi di inferenza statistica
  - Parametri dell'onda di progetto

3. METODO DI TRASPOSIZIONE GEOGRAFICA DELLE MISURE ONDAMETRICHE

Nelle applicazioni d'ingegneria costiera e portuale è necessario disporre di affidabili serie storiche di moto ondoso, caratteristiche del paraggio oggetto di studio. In contrapposizione a tale esigenza si pone il principio di parsimonia nello stabilire il numero delle boe ondametriche, che, necessariamente, risultano ubicate in un ridotto numero di punti, generalmente localizzati al largo delle coste.

Accettare l'ipotesi, per la quale le caratteristiche ondose misurate da una boa siano rappresentative degli stati di mare presenti al largo di un paraggio decentrato rispetto al punto di misura, può condurre ad un errato calcolo dei regimi ondosi e degli eventi estremi per il sito oggetto di studio. A tal riguardo, Contini e De Girolamo (1998) hanno elaborato una procedura di calcolo per la trasposizione delle misure ondametriche tra due punti, caratterizzati da un'esposizione simile delle traversie principali.

La metodologia di trasposizione geografica è basata sull'ipotesi che la velocità e la direzione del vento, agente sull'area di generazione del sito d'interesse, siano equivalenti a quelle che hanno determinato lo stato di mare misurato dalla boa. Sotto tale ipotesi, il metodo di trasposizione geografica permette il calcolo delle correlazioni esistenti tra la direzione media di provenienza, l'altezza significativa ed il periodo di picco del moto ondoso misurato e gli stessi parametri relativi al moto ondoso presente nel punto d'interesse.

Nel caso di fetch limitati, le leggi di correlazione cercate possono essere determinate facendo uso delle formule di ricostruzione del moto ondoso a partire dai dati di vento. In particolare, a seconda della teoria utilizzata, si possono ricavare le seguenti relazioni.

3.1. JONSWAP (1973), SPM (1984)

$$\theta_{\text{virtuale}} = \theta_{\text{misurata}} \qquad (eq.\ 1)$$

$$\frac{H_{mo}\big|_{\text{virtuale}}}{H_{mo}\big|_{\text{misurata}}} = \sqrt{\frac{F_{\text{sito}}(\theta_v)}{F_{\text{boa}}(\theta_v)}} \qquad (eq.\ 2)$$

$$\frac{T_p\big|_{\text{virtuale}}}{T_p\big|_{\text{misurata}}} = \sqrt[3]{\frac{F_{\text{sito}}(\theta_v)}{F_{\text{boa}}(\theta_v)}} \qquad (eq.\ 3)$$

Nelle precedenti relazioni, θ_{misurata} è la direzione media di provenienza del moto ondoso alla boa, θ_{virtuale} è quella nel punto di trasposizione, mentre θv è la direzione media di provenienza del vento, in questo caso coincidente con quella del moto ondoso misurato. Infatti, le teorie di ricostruzione a cui le eq. (2) e (3) fanno riferimento non prevedono alcuna deviazione tra la direzione di provenienza del vento e quella del moto ondoso. Il pedice "misurato" si riferisce alle caratteristiche del moto ondoso registrato dalla boa, mentre quello "virtuale" si riferisce alle caratteristiche del moto ondoso trasposto. Infine, con $F_{\text{sito}}(\theta_v)$ e $F_{\text{boa}}(\theta_v)$ si indicano, rispettivamente, le lunghezze del fetch efficace, lungo la direzione θ_v, con centro nel punto di trasposizione e in quello di ubicazione della boa.

3.2. Donelan (1989)

$$\theta_{\text{virtuale}} = \theta_{\text{misurata}} - \Delta\theta_{boa} + \Delta\theta_{sito} \qquad (eq.\ 4)$$

$$\theta_{\text{virtuale}} = \theta_{\text{misurata}} - \Delta\theta_{boa} + \Delta\theta_{sito} \qquad (eq.\ 5)$$

$$\frac{T_p\big|_{\text{virtuale}}}{T_p\big|_{\text{misurata}}} = \left(\frac{F_{\text{sito}}(\theta_{\text{virtuale}})}{F_{\text{boa}}(\theta_{\text{misurata}})}\right)^{0.23} \left(\frac{\cos(\Delta\theta_{\text{sito}})}{\cos(\Delta\theta_{\text{boa}})}\right)^{0.54} \qquad (eq.\ 6)$$

Nelle precedenti equazioni, oltre ai simboli precedentemente richiamati, si è introdotto l'angolo di deviazione ($\Delta\theta = \theta_o - \theta_v$) tra la direzione media del vento (θ_v) e quella del moto ondoso (θ_o), in un determinato punto dello spazio. Tale angolo di deviazione, secondo Donelan, è funzione della distribuzione direzionale delle lunghezze del fetch efficace. In particolare, data una generica direzione di provenienza del vento (θ_v), l'angolo di deviazione del moto ondoso, in un generico punto della traversia, può essere ricavato determinando il massimo della funzione:

$$\Phi(\Delta\theta) = F(\theta_o)^{0.426} \cos(\Delta\theta) \qquad (eq.\ 7)$$

3.3. Contini e De Girolamo (1998)

$$\theta_{\text{virtuale}} = \theta_{\text{misurata}} - \Delta\theta_{boa} + \Delta\theta_{sito} \qquad (eq.\ 8)$$

$$\frac{H_{mo}\big|_{\text{virtuale}}}{H_{mo}\big|_{\text{misurata}}} = \sqrt{\frac{F_{\text{sito}}(\theta_v)}{F_{\text{boa}}(\theta_v)}} \qquad (eq.\ 9)$$

$$\frac{T_p\big|_{\text{virtuale}}}{T_p\big|_{\text{misurata}}} = \sqrt[3]{\frac{F_{\text{sito}}(\theta_v)}{F_{\text{boa}}(\theta_v)}} \qquad (eq.\ 10)$$

Nelle precedenti formulazioni la direzione del vento in boa (θ_v) è calcolata sottraendo alla direzione misurata delle onde il valore dell'angolo di deviazione nel punto boa ($\Delta\theta_{boa}$). In questo caso, l'angolo di deviazione compreso tra la direzione di provenienza del moto ondoso e la direzione di provenienza del vento, in un generico punto della traversia, si ottiene determinando il massimo della funzione:

$$\Phi(\Delta\theta) = F(\theta_o)^{0.28}\cos(\Delta\theta)^{0.44} \qquad (eq.\ 11)$$

4. CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE DEL SITO

Al fine di studiare il regime di onda lungo il sito di interesse, è necessario prima conoscere l'esposizione al settore di generazione del moto ondoso mediante calcolo dei Fetches geografici e dei Fetches efficaci .

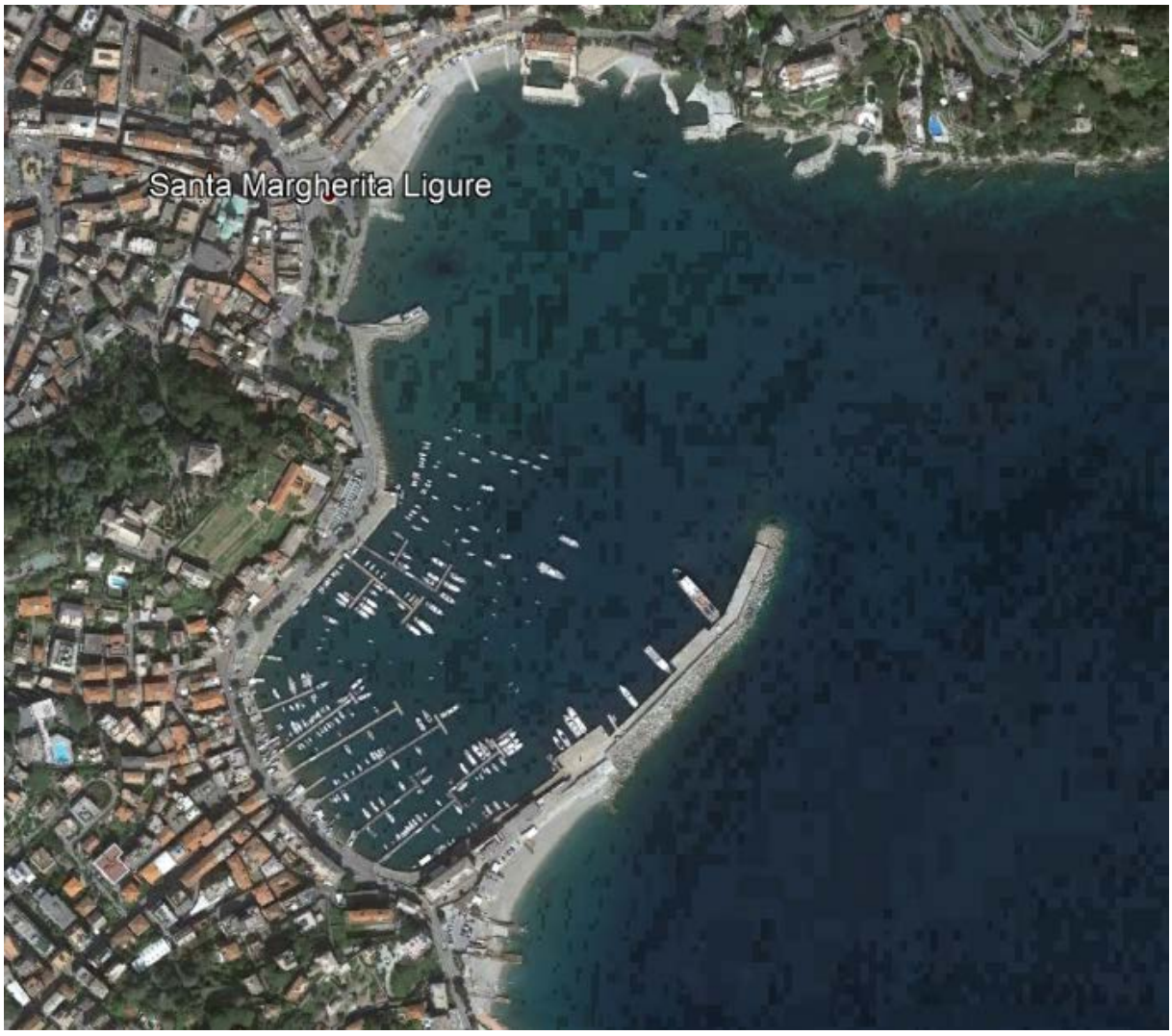


Figura 1. Area di studio (stato attuale)

4.1. Calcolo dei fetches geografici

Si premettono alcune definizioni generali. La traversia geografica è definita come la porzione di mare dalla quale può potenzialmente giungere il moto ondoso. La traversia è abitualmente divisa in due settori (principale e secondario) in funzione delle lunghezze delle aree potenzialmente soggette all'azione diretta del vento. Tali lunghezze sono definite traguardando la costa limitrofa lungo la direzione media di provenienza del vento. Per il Mediterraneo la misura massima del Fetch Geografico è generalmente assunto pari a 500 km.

Considerando un punto situato di fronte alla zona di studio, è possibile misurare l'estensione di mare in ogni direzione, fino a trovare la costa o il limite massimo di perturbazione nel Mediterraneo:

- Lato Est: vi è una zona di mare confinata dalle coste della Liguria che raggiunge una estensione di circa 6 km.
- Lato Sud - Sud Est: vi è una zona di mare confinata dalle coste della Toscana che raggiunge una estensione massima di circa 150 km.
- Lato Sud: vi è una zona di mare confinata dalla coste della Corsica che raggiunge una estensione massima di circa 180 km.
- Lato Sud Ovest : non vi è nessun ostacolo fino alle coste del Nord Africa ad una distanza di circa 900 km.

4.2. Calcolo dei fetches efficaci

Con il termine " Fetch efficace " di solito è rappresentata la lunghezza virtuale della porzione di mare nel punto di analisi su cui l'azione del vento, responsabile della generazione delle onde, è in grado di trasferire efficacemente il suo contributo alla formazione degli stati di mare che arrivano a quel punto.

Va tenuto presente che il processo di generazione del moto ondoso sulla superficie del mare è influenzato anche dalle estensioni geografiche lungo la direzione media del vento (φw) e dalle porzioni di mare circostante.

Per tener conto di questo effetto e della lunghezza effettiva delle porzioni di mare circostanti, con particolare riguardo alle aree geografiche limitate dalle coste vicine, come nel caso in questione, si fa riferimento al " Fetch efficace " .

Per il calcolo del fetch efficace si fa riferimento a due diverse metodologie, entrambe derivate da teorie di ricostruzione delle caratteristiche del moto ondoso da dati di vento. In particolare, tra le tante ipotesi avanzate, vengono qui considerate quella proposta da Donelan et al. (1989) e quella indicata da Sverdrup, Munk e Bretschneider (1947), con successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977).

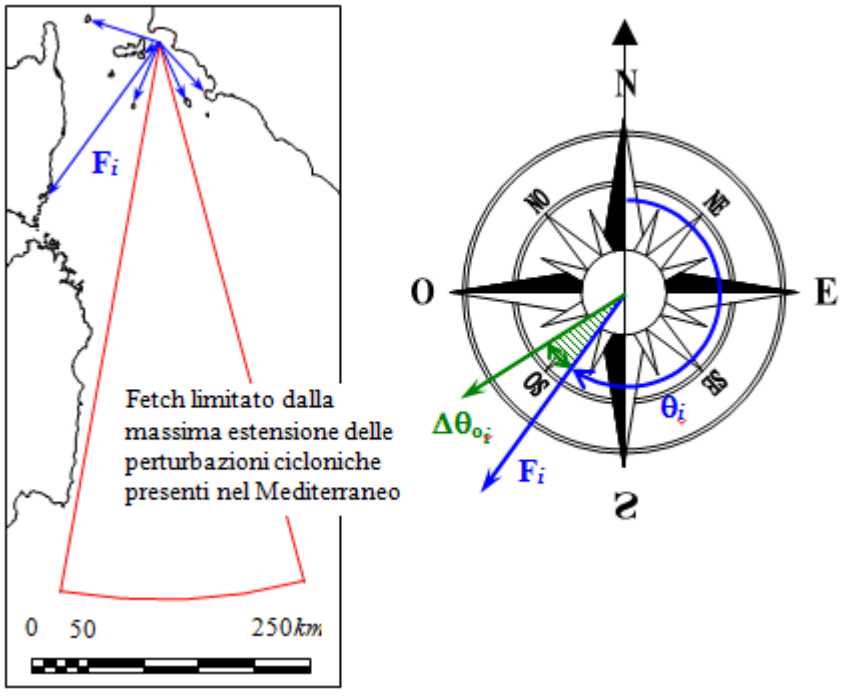


Figura 2. Schema di riferimento, simboli e convenzioni per il calcolo dei fetch efficaci e della legge di correlazione tra le direzioni del vento e delle onde.

ϑ	Fg (km)	Feff (km)
0	0	9
10	9	8
20	9	8
30	8	8
40	8	8
50	9	9
60	10	11
70	11	14
80	12	21
90	18	32
100	23	51
110	32	80
120	96	119
130	113	164
140	165	209
150	500	251
160	500	285
170	500	311
180	172	330
190	203	344
200	500	350
210	500	348
220	500	333
230	500	304
240	500	262
250	96	212
260	85	161
270	67	115
280	61	80
290	51	55
300	43	38
310	22	28
320	9	21
330	8	15
340	9	12
350	10	10

Nel metodo SMB, la lunghezza del fetch efficace (Feff(θj)), da associare alla direzione media del vento (θj), è calcolata come media ponderale delle lunghezze della traversia geografica (Fi), inclusa in un settore angolare, centrato sulla direzione del vento e di ampiezza pari a 90° (metodo di Saville) o a 180° (metodo di Seymour). Nel presente studio, le lunghezze della traversia geografica che contribuiscono alla determinazione del fetch efficace sono state calcolate secondo il metodo di Seymour con un passo radiale di 10°. Pertanto, si è adottata la seguente formulazione , in cui l'esponente n è stato posto pari a 2:

$$F_{eff}(\theta) = \frac{\int_{\theta-90^\circ}^{\theta+90^\circ} F_{geo}(\alpha) cos^{n+1}(\alpha-\theta) d\alpha}{\int_{\theta-90^\circ}^{\theta+90^\circ} cos^{n}(\alpha-\theta) d\alpha} \qquad (eq.\ 12)$$

o dalla seguente versione discretizzata:

$$F_{eff}(\theta) = \frac{\sum_{\alpha=\theta-90^\circ}^{\theta+90^\circ} F_{geo}(\alpha) cos^{n+1}(\alpha-\theta)}{\sum_{\alpha=\theta-90^\circ}^{\theta+90^\circ} cos^{n}(\alpha-\theta)} \qquad (eq.\ 13)$$

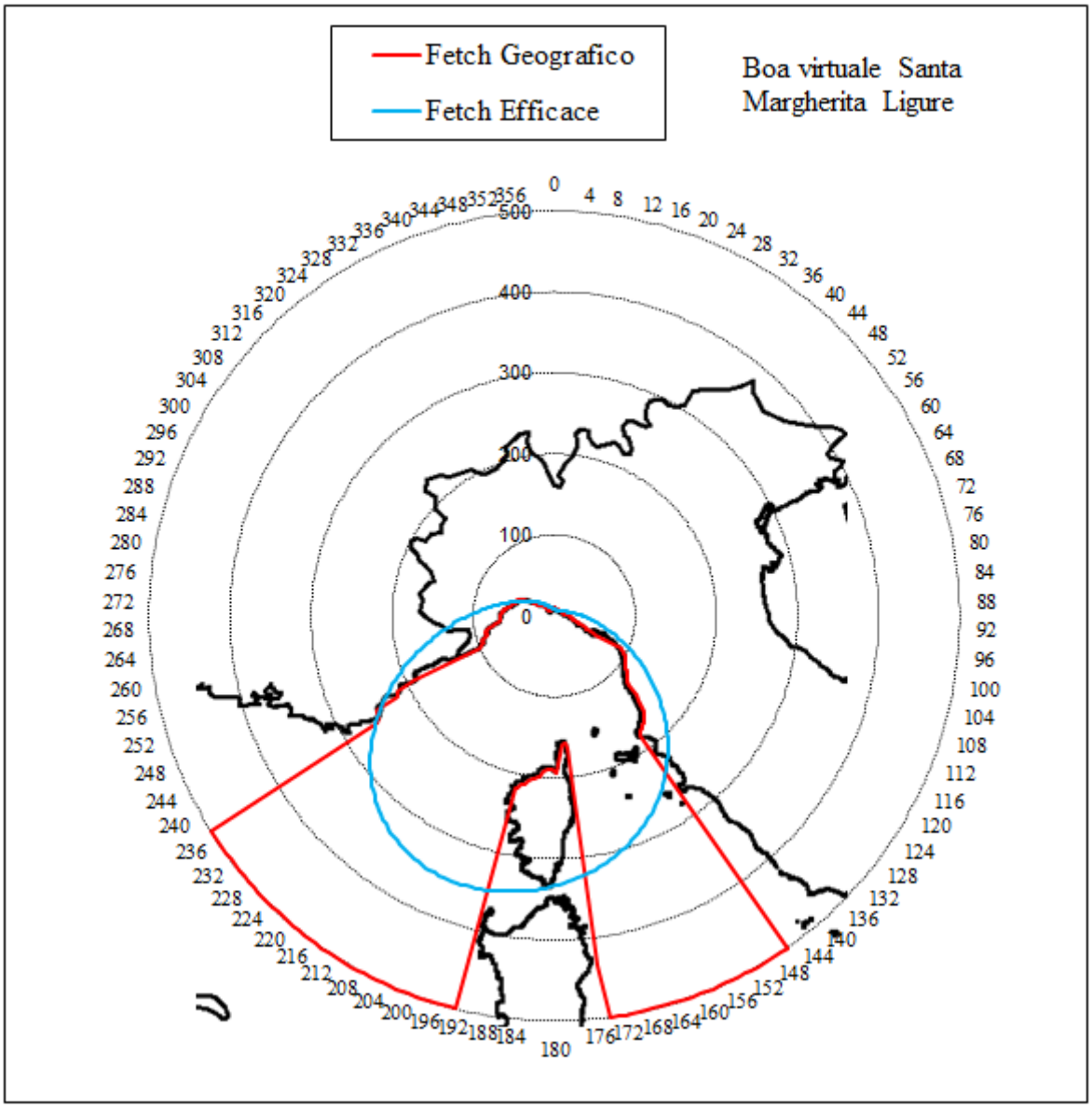


Figura 3. Fetch geografico ed efficace Santa Margherita Ligure

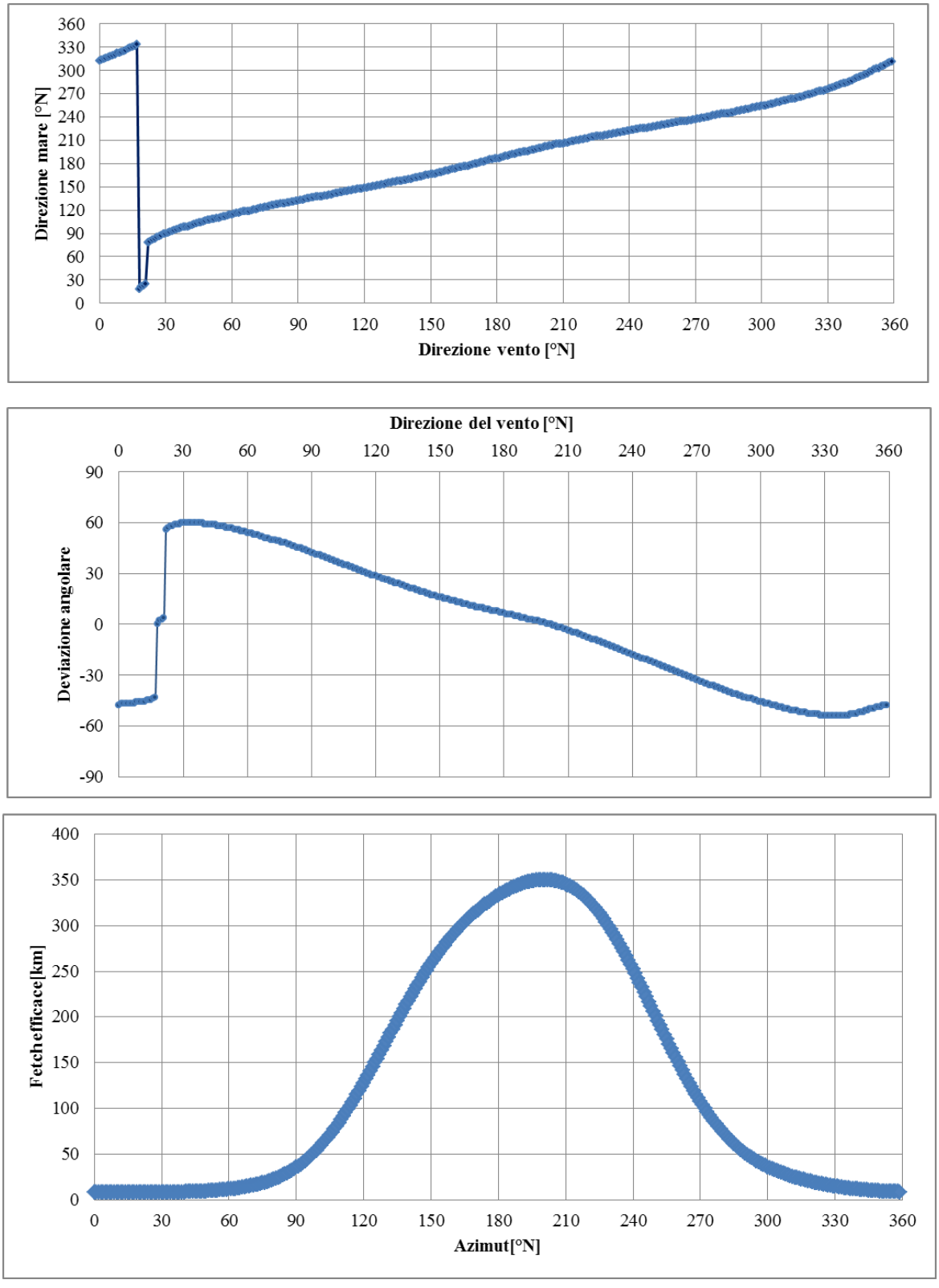


Figura 4. Deviazione vento-mare Santa Margherita Ligure

5. REGIME D'ONDA AL LARGO

5.1. Descrizione delle fonti di dati disponibili

Dal tipo di dati disponibili è determinata la metodologia degli studi e la qualità dei risultati.
I requisiti ideali per i dati ondosi sono:

- Alto contenuto di informazioni e capacità di estrarre tutti i parametri caratteristici;
- Affidabilità e precisione;
- Buona copertura del periodo di rilevazione;
- Rappresentatività per il lungo termine;
- Rappresentazione geografica del sito in questione.

Al fine di stabilire l'operatività del Porto di Santa Margherita Ligure è necessario calcolare i regimi ondosi. Pertanto, si è dato corso in primo luogo ad un'indagine conoscitiva riguardo la disponibilità di fonti storiche per i dati relativi all'agitazione ondosa presenti nell'area d'interesse. Tale indagine ha evidenziato la mancanza di una stazione ondametrica direzionale nei pressi dell'area d'interesse. Dunque, per il calcolo del regime ondoso, si è dovuto reperire una fonte strumentale a distanza dall'area di studio e si sono dovuti opportunamente trattare i dati contenuti nelle serie storiche misurate.
La stazione di misura ondametrica direzionale più vicina all'area d'interesse è stata individuata al largo di La Spezia già parte della Rete Ondametrica Nazionale.

5.2. Clima ondoso al largo

I dati ondosi della boa ondametrica di La Spezia coprono un periodo di 25 anni (1989-2014).

Il punto in cui sono stati estratti i dati si trova ad una distanza dalla costa di circa 15 km ad una profondità di circa -100 m s.l.m.m..

Nella figura 5 è mostrato il clima d'onda dei dati acquisiti che mostra, in un grafico polare, le direzioni di provenienza delle onde e la loro intensità e probabilità di accadimento.

Da questo possiamo identificare un'area di generazione dell'onda proveniente da Sud-Ovest (205° N - 265° N).

Nelle figure successive (fig 6, 7, 8 e 9), lo stesso clima d'onda viene calcolato per i quattro diversi periodi stagionali.

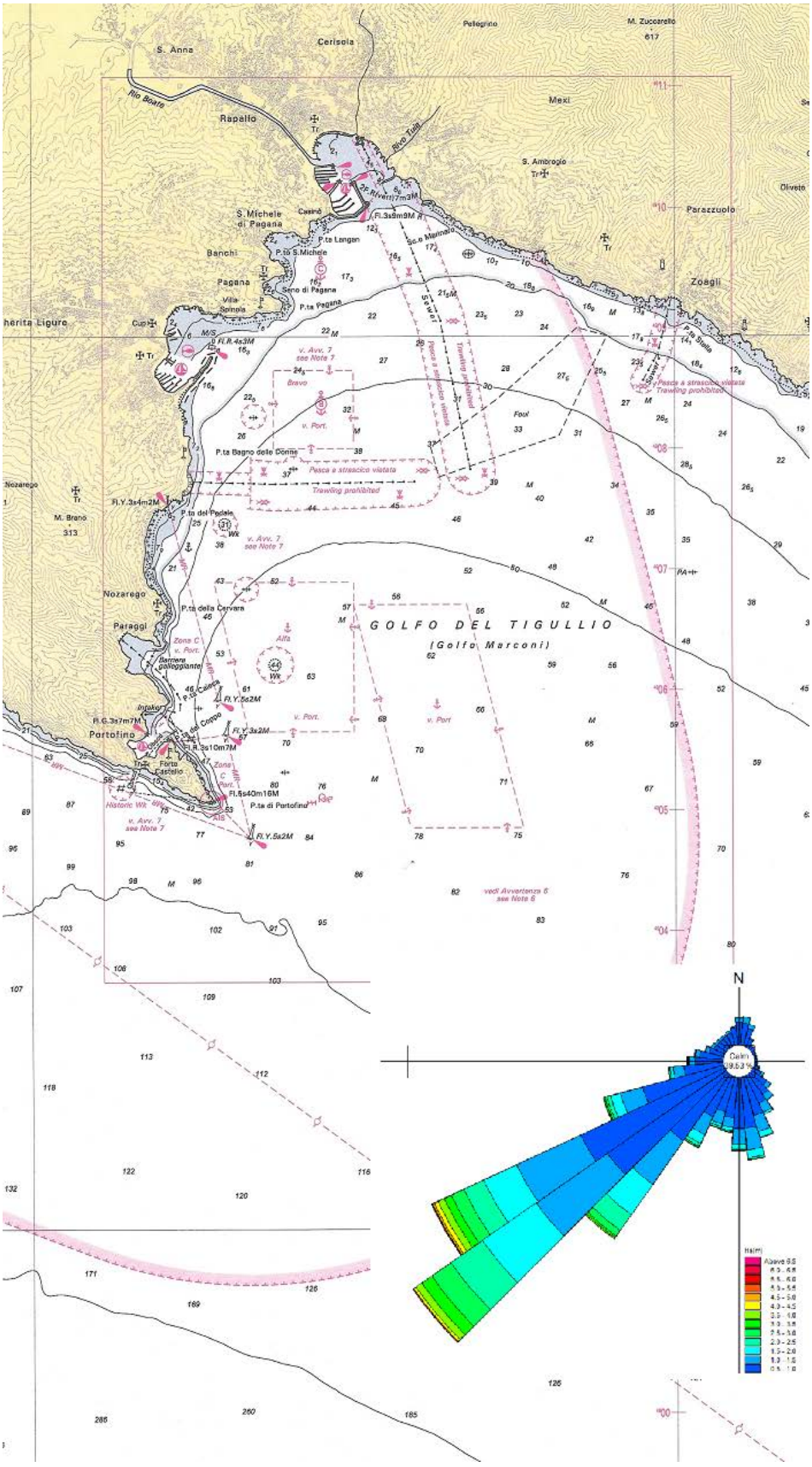


Figura 5. Clima ondoso al largo di Santa Margherita Ligure

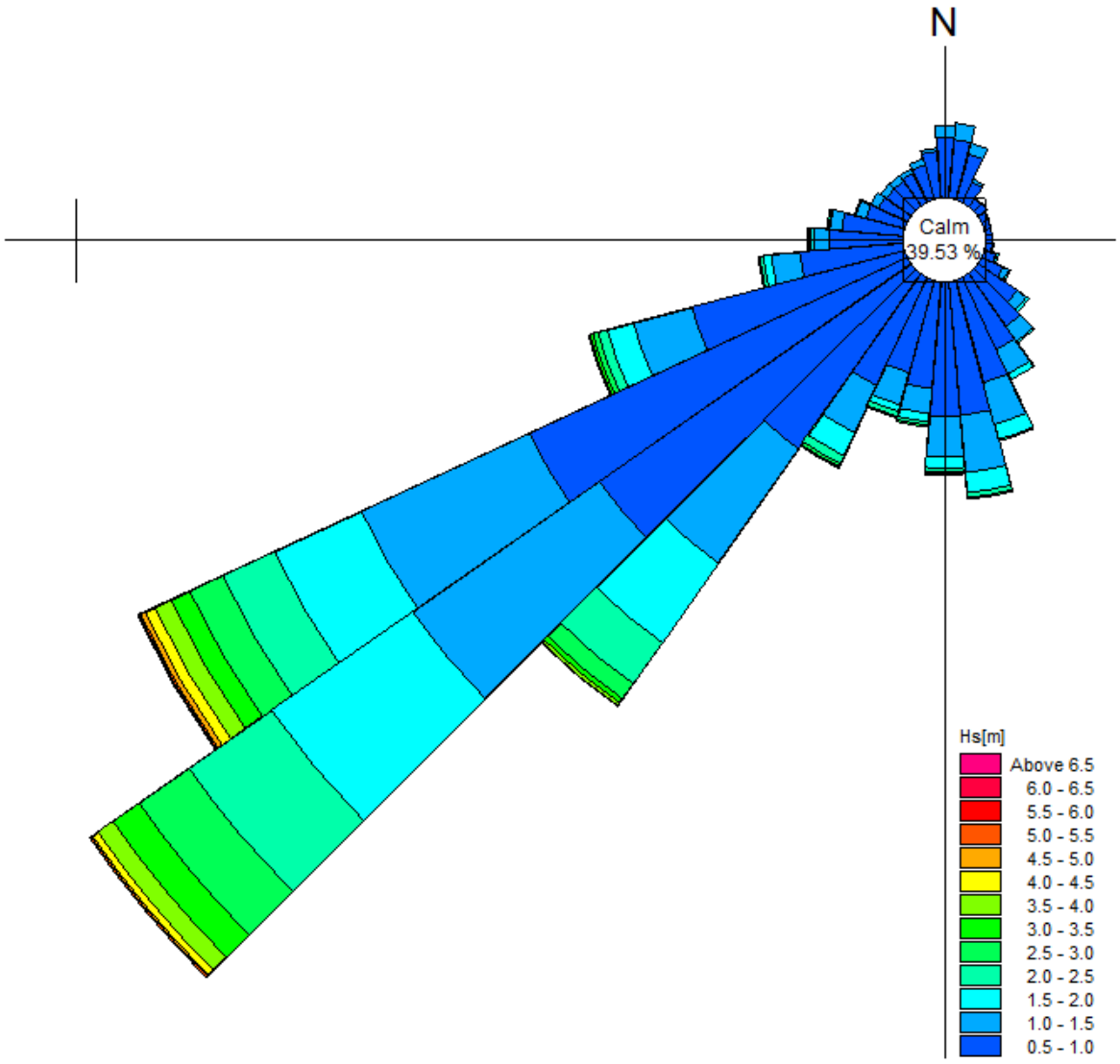


Figura 6. Clima ondoso trasposto al largo di Santa Margherita Ligure

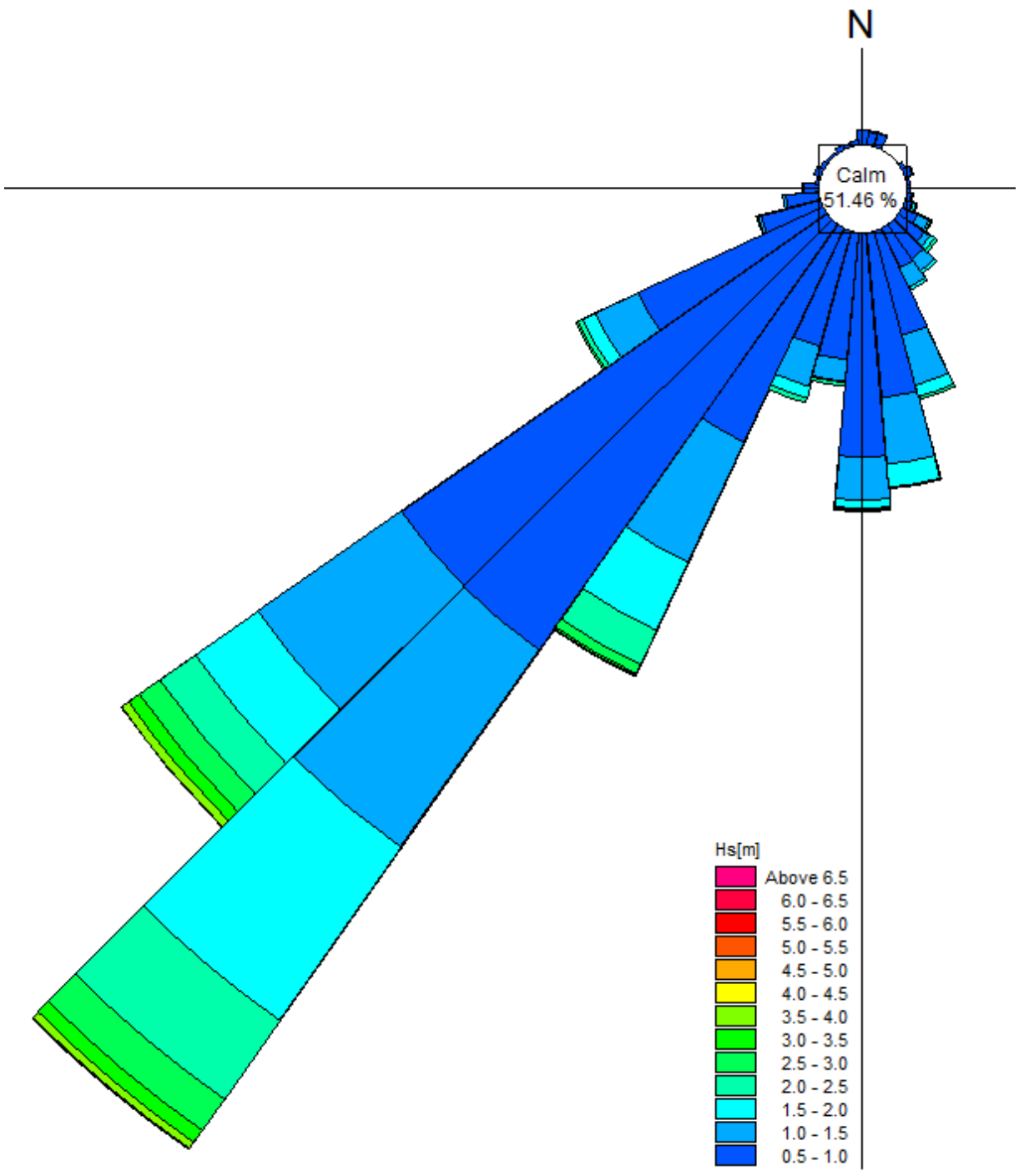


Figura 7. Clima ondoso primavera

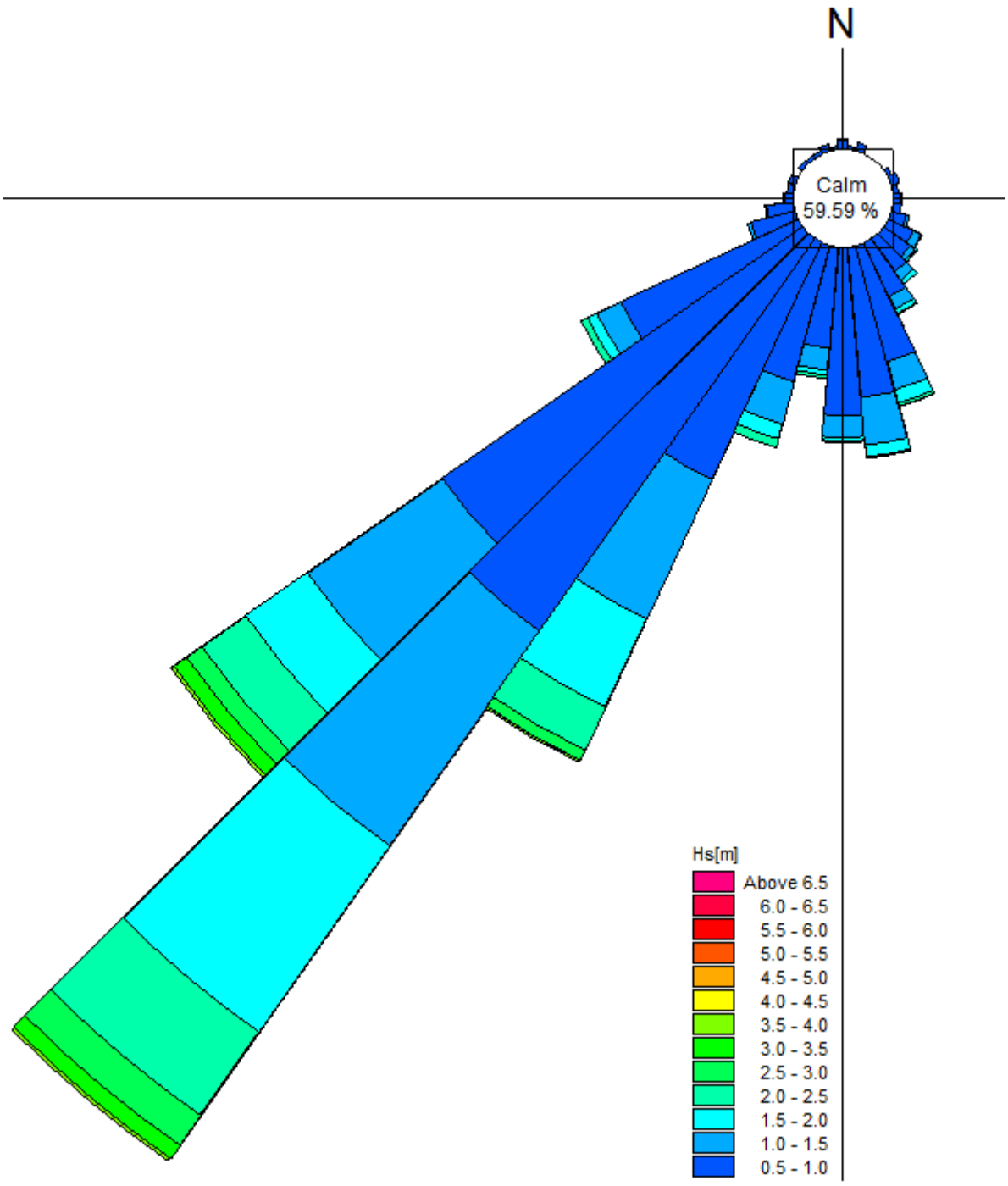


Figura 8. Clima ondoso estate

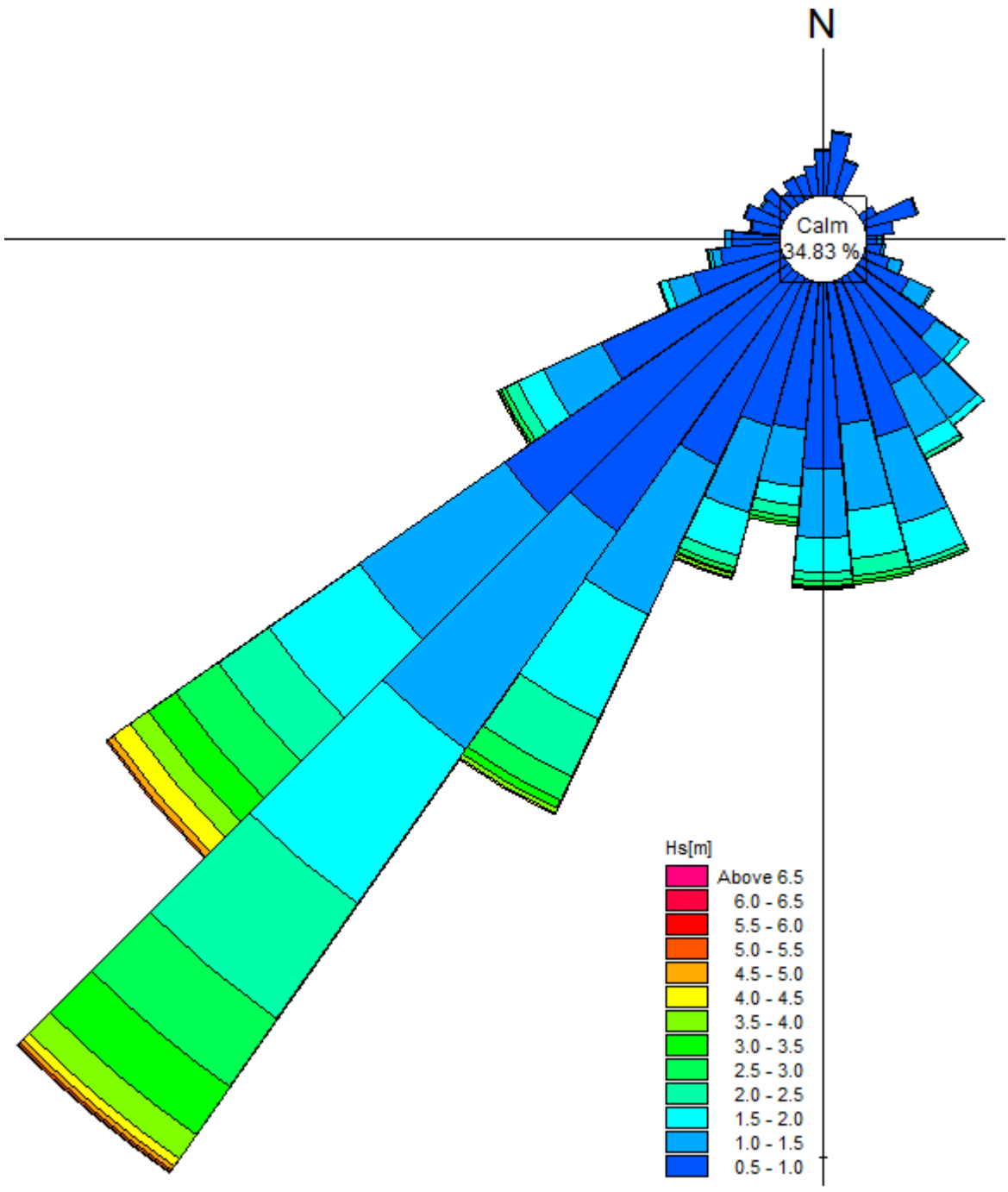


Figura 9. Clima ondoso Autunno

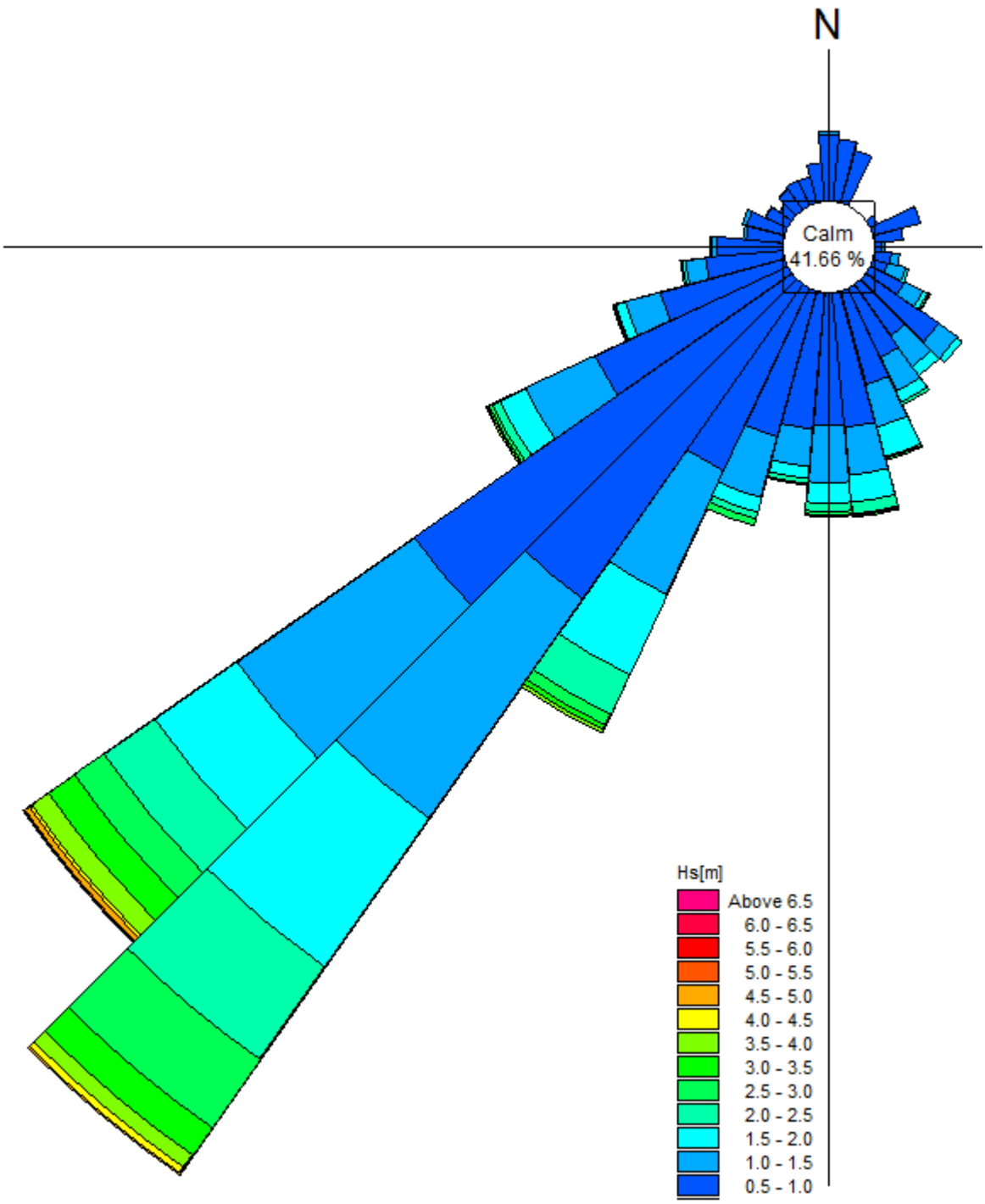


Figura 10. Clima ondoso Inverno

DIR	ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA (m) - DIREZIONE (°N)														
(°N)	0.1-0.6	0.6-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	5-5.5	5.5-6	6-6.5	6.5-7	*TOT.*
10	0.98	0.18	0.01												1.17
20	1.17	0.26	0.02												1.45
30	0.14	0.04	0.00												0.19
40															
50															
60	0.26	0.04													0.30
70	0.73	0.09	0.01												0.83
80	1.12	0.11	0.01												1.24
90	0.45	0.07	0.01	0.00											0.52
100	0.18	0.07	0.03	0.00	0.00										0.29
110	0.16	0.11	0.05	0.01											0.32
120	0.19	0.16	0.14	0.03	0.00										0.53
130	0.65	0.47	0.20	0.04	0.01	0.00									1.38
140	0.79	0.46	0.23	0.08	0.01										1.56
150	0.90	0.57	0.37	0.09	0.02	0.00									1.96
160	1.01	0.73	0.47	0.16	0.02	0.00									2.40
170	1.47	1.08	0.67	0.30	0.07	0.02	0.01								3.60
180	2.10	1.27	0.62	0.24	0.08	0.03	0.01	0.00	0.00		0.00				4.37
190	2.52	1.17	0.41	0.14	0.05	0.02	0.01					0.00			4.31
200	2.48	1.00	0.52	0.11	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				4.21
210	2.50	1.24	0.87	0.45	0.18	0.06	0.01	0.02	0.01						5.33
220	4.33	2.51	2.28	1.77	0.96	0.34	0.16	0.06	0.01		0.00				12.41
230	6.93	3.89	3.11	1.86	1.14	0.69	0.39	0.22	0.08	0.04	0.01	0.01			18.35
240	6.77	2.67	1.11	0.51	0.24	0.13	0.09	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00			11.61
250	4.17	0.80	0.26	0.08	0.02	0.01									5.35
260	3.00	0.38	0.12	0.04	0.01	0.00									3.55
270	2.17	0.21	0.05	0.01											2.44
280	2.09	0.21	0.03												2.34
290	1.25	0.10	0.01												1.36
300	1.07	0.10	0.01												1.19
310	0.91	0.08	0.00												0.99
320	0.81	0.06	0.00												0.88
330	0.82	0.07	0.01												0.89
340	0.60	0.07													0.67
350	0.80	0.07	0.01												0.88
360	0.96	0.17	0.01	0.00	0.00										1.14
TOT.	56.5	20.5	11.6	5.9	2.9	1.3	0.7	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0			100.00
	56.5	77.0	88.6	94.6	97.4	98.8	99.4	99.8	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

Tabella 1. Distribuzione percentuale degli eventi ondosi per classi di altezza e direzione di provenienza

	PERIODO SIGNIFICATIVO ts (s)								
Hs (m)	Tp < 4	4 £ Ts < 6	6 £ Ts < 8	8 £ Ts < 10	10 £ Ts < 12	12 £ Ts < 14	Ts > 14	Tot	Tot. cumul.
0.1-0.6		43.80	12.01	0.68	0.01	0.00		56.50	56.50
0.6-1		8.68	10.28	1.53	0.02			20.51	77.01
1-1.5		1.42	8.75	1.42	0.05			11.64	88.65
1.5-2		0.01	4.59	1.30	0.03			5.93	94.58
2-2.5			1.62	1.21	0.04			2.86	97.44
2.5-3			0.49	0.77	0.06			1.32	98.76
3-3.5			0.09	0.54	0.05			0.68	99.44
3.5-4			0.01	0.31	0.04			0.35	99.79
4-4.5				0.10	0.02			0.12	99.92
4.5-5				0.03	0.02			0.05	99.97
5-5.5				0.01	0.01			0.03	99.99
5.5-6				0.01	0.00			0.01	100.00
6-6.5								0.00	100.00
6.5-7								0.00	100.00
7-7.5								0.00	100.00
Tot.		53.91	37.83	7.92	0.34	0.00		100.00	
Tot. cumul.		53.91	91.74	99.66	100.00	100.00	100.00		

Tabella 2. Ripartizione percentuale per classi di altezze d’onda e periodo significativo

DIR	ALTEZZA D'ONDA PRIMAVERA (m) - DIREZIONE (°N)														
(°N)	0.1-0.6	0.6-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	5-5.5	5.5-6	6-6.5	6.5-7	*TOT.*
10	0.67	0.05													0.73
20	0.74	0.11	0.02												0.87
30	0.12	0.02													0.13
40															
50															
60	0.13	0.03													0.16
70	0.49	0.06	0.01												0.56
80	0.49	0.01	0.01												0.51
90	0.18	0.03													0.21
100	0.16	0.03													0.20
110	0.10	0.04	0.01	0.02											0.17
120	0.09	0.09	0.09	0.06	0.01										0.34
130	0.40	0.27	0.11	0.02	0.02										0.83
140	0.56	0.21	0.09	0.05	0.02										0.93
150	0.66	0.38	0.23	0.05											1.31
160	0.73	0.61	0.46	0.05											1.85
170	1.63	1.06	0.71	0.23	0.05										3.69
180	2.61	1.66	0.65	0.19	0.01	0.01									5.12
190	3.12	1.22	0.31	0.07	0.01	0.01									4.74
200	2.72	1.04	0.38	0.04	0.05										4.22
210	2.64	1.14	0.60	0.36	0.13	0.01	0.01	0.01							4.90
220	4.88	3.06	2.30	1.66	0.75	0.25	0.06	0.02							12.98
230	8.77	4.89	3.11	2.02	0.99	0.50	0.27	0.13	0.03	0.01					20.72
240	9.06	3.03	1.17	0.42	0.23	0.11	0.02	0.03							14.08
250	5.28	0.63	0.14	0.02	0.01										6.07
260	3.31	0.27	0.02												3.61
270	2.57	0.11	0.03												2.71
280	2.44	0.03													2.47
290	1.31	0.04													1.35
300	0.84	0.02													0.87
310	0.66	0.02													0.68
320	0.62	0.01													0.63
330	0.52	0.02													0.54
340	0.45	0.02													0.47
350	0.40	0.02													0.42
360	0.89	0.04													0.93
TOT.	60.3	20.3	10.5	5.3	2.3	0.9	0.4	0.2	0.0	0.0					100.00
	60.3	80.5	91.0	96.3	98.5	99.4	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

Tabella 3. Distribuzione percentuale degli eventi ondosi per classi di altezza e direzione di provenienza (primavera)

PERIODO SIGNIFICATIVO PRIMAVERA ts (s)									
Hs (m)	Tp < 4	4 ≤ Ts < 6	6 ≤ Ts < 8	8 ≤ Ts < 10	10 ≤ Ts < 12	12 ≤ Ts < 14	Ts > 14	Tot	Tot. cumul.
0.1-0.6		45.88	13.58	0.78	0.02			60.25	60.25
0.6-1		7.64	11.11	1.53	0.01			20.29	80.55
1-1.5		1.16	8.38	0.88	0.03			10.45	91.00
1.5-2		0.01	4.24	1.02				5.26	96.26
2-2.5			1.28	0.98	0.02			2.28	98.54
2.5-3			0.37	0.47	0.05			0.88	99.42
3-3.5			0.03	0.31	0.02			0.36	99.78
3.5-4			0.02	0.16	0.01			0.00	99.78
4-4.5				0.02	0.01			0.00	99.78
4.5-5					0.01			0.00	99.78
5-5.5								0.00	99.78
5.5-6								0.00	99.78
6-6.5								0.00	99.78
6.5-7								0.00	99.78
7-7.5								0.00	99.78
Tot.		54.70	38.99	6.15	0.16	0.00	0.00	100.00	
Tot. cumul.		54.70	93.69	99.84	100.00	100.00	100.00		

Tabella 4. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda e periodo (primavera)

DIR	ALTEZZA D'ONDA ESTATE (m) - DIREZIONE (°N)														
(°N)	0.1-0.6	0.6-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	5-5.5	5.5-6	6-6.5	6.5-7	*TOT.*
10	0.88	0.01													0.89
20	1.14	0.03													1.17
30	0.15	0.01													0.16
40															
50															
60	0.38	0.01													0.39
70	0.70	0.03													0.72
80	1.22	0.02													1.24
90	0.57	0.03													0.60
100	0.22	0.04	0.02												0.28
110	0.24	0.06	0.01												0.31
120	0.32	0.12	0.05												0.49
130	0.77	0.26	0.09	0.01		0.01									1.14
140	0.95	0.22	0.06	0.04	0.01										1.27
150	1.04	0.26	0.18	0.05	0.01										1.54
160	1.11	0.66	0.22	0.10											2.08
170	1.59	1.00	0.41	0.12	0.03	0.01									3.16
180	2.23	1.16	0.31	0.08	0.01	0.01									3.81
190	2.87	0.88	0.24	0.06	0.02										4.06
200	3.14	0.78	0.29	0.06	0.05										4.31
210	3.17	1.13	0.76	0.35	0.15	0.04	0.01								5.61
220	5.96	2.87	2.26	1.84	0.83	0.19	0.08	0.03							14.07
230	8.84	3.67	2.65	1.79	0.98	0.40	0.18	0.04	0.01						18.56
240	7.90	2.18	0.74	0.30	0.19	0.03	0.06	0.01							11.40
250	5.20	0.43	0.10	0.01	0.01										5.74
260	3.94	0.18	0.03	0.01											4.15
270	2.39	0.06	0.01	0.01											2.47
280	2.50	0.05	0.01												2.56
290	1.60	0.02													1.62
300	1.42														1.42
310	1.01														1.01
320	0.80	0.01													0.81
330	0.77	0.01	0.01												0.78
340	0.48	0.02													0.50
350	0.72	0.03													0.74
360	0.89	0.03	0.01												0.93
TOT.	67.1	16.3	8.4	4.8	2.3	0.7	0.3	0.1	0.0						100.00
	67.1	83.3	91.8	96.6	98.9	99.6	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

Tabella 5. Distribuzione percentuale degli eventi ondosi per classi di altezza e direzione di provenienza (estate)

PERIODO SIGNIFICATIVO ESTATE ts (s)									
Hs (m)	Tp < 4	4 ≤ Ts < 6	6 ≤ Ts < 8	8 ≤ Ts < 10	10 ≤ Ts < 12	12 ≤ Ts < 14	Ts > 14	Tot	Tot. cumul.
0.1-0.6		55.93	10.82	0.31	0.01			67.07	67.07
0.6-1		7.09	8.58	0.61				16.28	83.34
1-1.5		0.88	6.83	0.71	0.01			8.43	91.78
1.5-2			3.92	0.87	0.03			4.81	96.59
2-2.5			1.58	0.70	0.03			2.30	98.89
2.5-3			0.35	0.35				0.70	99.59
3-3.5			0.05	0.26	0.01			0.33	99.92
3.5-4			0.01	0.07				0.08	99.99
4-4.5				0.01				0.00	99.99
4.5-5								0.00	99.99
5-5.5								0.00	99.99
5.5-6								0.00	99.99
6-6.5								0.00	99.99
6.5-7								0.00	99.99
7-7.5								0.00	99.99
Tot.		63.90	32.13	3.89	0.08			100.00	
Tot. cumul.		63.90	96.03	99.92	100.00	100.00	100.00		

Tabella 6. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda e periodo (estate)

DIR	ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA AUTUNNO (m) - DIREZIONE (°N)														
(°N)	0.1-0.6	0.6-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	5-5.5	5.5-6	6-6.5	6.5-7	*TOT.*
10	1.19	0.27	0.02												1.48
20	1.59	0.42	0.03												2.04
30	0.16	0.03	0.01												0.20
40															
50															
60	0.28	0.08													0.36
70	0.95	0.19	0.01												1.15
80	1.55	0.27	0.03												1.85
90	0.55	0.13	0.01	0.02											0.71
100	0.20	0.09	0.05	0.01	0.01										0.36
110	0.15	0.20	0.08												0.42
120	0.20	0.25	0.23	0.02											0.70
130	0.73	0.83	0.36	0.07											1.99
140	0.89	0.86	0.48	0.09	0.01										2.33
150	0.98	1.16	0.61	0.16	0.04	0.01									2.95
160	1.19	1.05	0.91	0.34	0.05										3.53
170	1.25	1.31	0.93	0.49	0.12	0.05	0.02								4.18
180	1.70	1.24	0.97	0.51	0.17	0.07	0.02	0.01	0.01		0.01				4.69
190	1.57	1.63	0.66	0.30	0.12	0.03	0.04					0.01			4.37
200	1.72	1.17	0.80	0.27	0.13	0.09	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01				4.26
210	1.67	1.41	1.23	0.71	0.24	0.11	0.02	0.04	0.02						5.46
220	2.46	2.18	2.55	2.02	1.42	0.52	0.34	0.15	0.01		0.01	0.01			11.65
230	3.68	3.23	3.25	1.87	1.28	1.08	0.69	0.41	0.23	0.11	0.04	0.02			15.89
240	3.53	2.55	1.27	0.70	0.34	0.20	0.11	0.11	0.09	0.03		0.01			8.95
250	2.44	1.03	0.40	0.16	0.04	0.02									4.08
260	1.98	0.48	0.20	0.07	0.02	0.01									2.75
270	1.82	0.28	0.07	0.02											2.19
280	1.54	0.35	0.04												1.93
290	1.06	0.15	0.01												1.22
300	1.11	0.23	0.02												1.37
310	1.01	0.17	0.02												1.20
320	1.00	0.12	0.01												1.13
330	1.05	0.08	0.01												1.14
340	0.78	0.13													0.91
350	1.06	0.12	0.01												1.19
360	1.05	0.31	0.01	0.01											1.38
TOT.	44.1	24.0	15.2	7.8	4.0	2.2	1.3	0.7	0.4	0.1	0.1	0.0			100.00
	44.1	68.1	83.4	91.2	95.2	97.4	98.7	99.4	99.8	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	

Tabella 7. Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di altezza e direzione di provenienza (autunno)

PERIODO SIGNIFICATIVO AUTUNNO tS(s)									
Hs (m)	Tp < 4	4 < Ts < 6	6 < Ts < 8	8 < Ts < 10	10 < Ts < 12	12 < Ts < 14	Ts > 14	Tot	Tot. cumul.
0.1-0.6		32.49	10.80	0.83				44.11	44.11
0.6-1		10.15	11.62	2.22	0.02			24.01	68.12
1-1.5		2.09	10.83	2.30	0.03			15.25	83.37
1.5-2		0.02	6.02	1.73	0.07			7.84	91.21
2-2.5			2.31	1.61	0.07			3.99	95.20
2.5-3			0.79	1.33	0.05			2.17	97.38
3-3.5			0.20	1.02	0.06			1.28	98.66
3.5-4				0.66	0.05			0.72	99.38
4-4.5				0.30	0.07			0.37	99.75
4.5-5				0.10	0.05			0.15	99.90
5-5.5				0.03	0.03			0.06	99.96
5.5-6				0.03	0.01			0.04	100.00
6-6.5								0.00	100.00
6.5-7								0.00	100.00
7-7.5								0.00	100.00
Tot.		44.74	42.57	12.17	0.52	0.00	0.00	100.00	
Tot. cumul.		44.74	87.31	99.48	100.00	100.00	100.00		

Tabella 8. Ripartizione percentuale per classi di altezze d’onda e periodo (autunno)

DIR	ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA INVERNO (m) - DIREZIONE (°N)														
(°N)	0.1-0.6	0.6-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	5-5.5	5.5-6	6-6.5	6.5-7	*TOT.*
10	0.01	1.20	0.45	0.01											1.67
20		1.23	0.55	0.02											1.79
30		0.15	0.10												0.25
40															
50															
60		0.21	0.04	0.01											0.26
70		0.77	0.11	0.01											0.88
80		1.20	0.19												1.39
90		0.45	0.09	0.02											0.56
100		0.14	0.10	0.07											0.31
110		0.13	0.14	0.11	0.02										0.40
120		0.15	0.14	0.24	0.04		0.01								0.59
130		0.59	0.62	0.29	0.06	0.02									1.58
140		0.74	0.57	0.31	0.12										1.74
150		0.89	0.53	0.51	0.13	0.03									2.08
160		1.01	0.54	0.40	0.16	0.02	0.02								2.14
170		1.36	0.97	0.63	0.40	0.06	0.01								3.43
180		1.83	1.01	0.58	0.26	0.13	0.03	0.02	0.01	0.01					3.87
190		2.44	0.96	0.42	0.16	0.08	0.03	0.02							4.10
200		2.20	1.04	0.64	0.08	0.03	0.03		0.01						4.04
210		2.38	1.29	0.95	0.39	0.19	0.08	0.01	0.02	0.01					5.30
220		3.35	2.14	2.05	1.57	0.88	0.44	0.16	0.03	0.02					10.63
230		6.07	3.77	3.43	1.87	1.29	0.83	0.49	0.31	0.08	0.04	0.02	0.01		18.20
240		6.23	2.91	1.57	0.67	0.20	0.19	0.17	0.08	0.01	0.02	0.02			12.06
250		3.57	1.16	0.51	0.18	0.04	0.01								5.47
260		2.57	0.67	0.28	0.09	0.02									3.63
270		1.86	0.41	0.12	0.01										2.40
280		1.82	0.46	0.08											2.36
290		0.95	0.22	0.05											1.22
300		0.84	0.19	0.03											1.05
310		0.95	0.13												1.09
320		0.83	0.12												0.95
330		0.95	0.19	0.01											1.15
340		0.72	0.10												0.82
350		1.03	0.19												1.22
360		0.99	0.32	0.03		0.01									1.35
TOT.	0.0	51.8	22.4	13.3	6.2	3.0	1.7	0.9	0.5	0.1	0.1	0.0	0.0		100.00
	0.0	51.8	74.3	87.6	93.8	96.8	98.5	99.3	99.8	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	

Tabella 9. Distribuzione percentuale degli eventi ondosi per classi di altezza e direzione di provenienza (inverno)

CLASSI DI PERIODO SIGNIFICATIVO ts (s)									
Hs (m)	Tp < 4	4 < Ts < 6	6 < Ts < 8	8 < Ts < 10	10 < Ts < 12	12 < Ts < 14	Ts > 14	Tot	Tot. cumul.
0.1-0.6		38.18	12.76	0.87	0.01	0.01		51.83	51.83
0.6-1		10.42	10.01	1.95	0.06			22.43	74.26
1-1.5		1.71	9.55	1.95	0.13			13.34	87.61
1.5-2		0.02	4.41	1.76	0.02			6.21	93.82
2-2.5			1.27	1.67	0.04			2.98	96.80
2.5-3			0.51	1.02	0.13			1.66	98.46
3-3.5			0.12	0.63	0.11			0.86	99.32
3.5-4				0.35	0.11			0.45	99.77
4-4.5				0.11	0.02			0.13	99.90
4.5-5				0.05	0.01			0.06	99.96
5-5.5				0.01	0.03			0.03	99.99
5.5-6					0.01			0.01	100.00
6-6.5								0.00	100.00
6.5-7								0.00	100.00
7-7.5								0.00	100.00
Tot.		50.33	38.64	10.35	0.67	0.01		100.00	
Tot. cumul.		50.33	88.97	99.33	99.99	100.00	100.00		

Tabella 10. Ripartizione percentuale per classi di altezze d’onda e periodo (inverno)

5.3. Correlazione tra altezza d'onda e periodo

Utilizzando tutti i dati disponibili, si è cercata una legge di correlazione tra l'altezza d'onda significativa ed il periodo ad essa associato.

Come mostra la figura seguente, la legge che determina il periodo dell'onda risulta essere una funzione di tipo potenza.

$$T_s = \mathrm{a}H_s^b$$

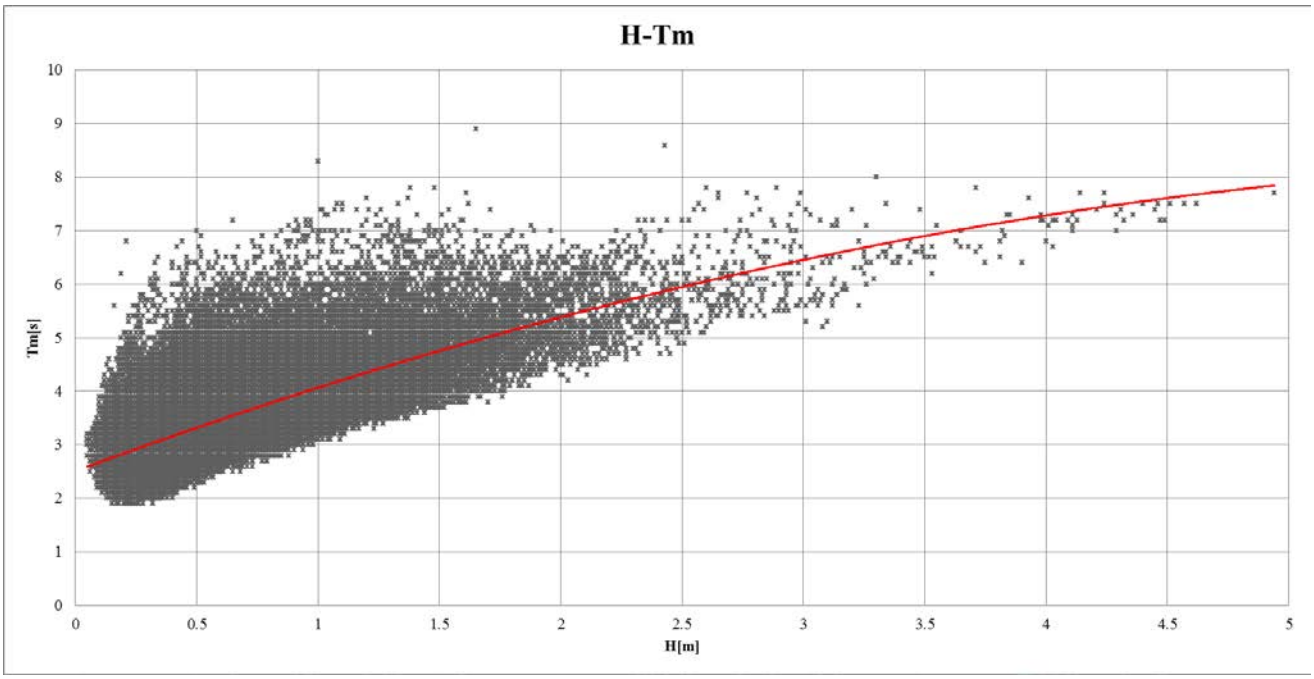


Figura 11. Correlazione tra altezza d'onda e periodo

Per il calcolo del periodo di picco si è utilizzata la seguente relazione:

$$\frac{T_p}{T_s} = 1.15$$

6. ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI

L'onda di progetto deve essere rappresentativa delle condizioni ambientali che possono considerarsi pericolose ai fini della stabilità delle strutture marittime e pertanto deve essere associata al tempo di vita previsto per l'opera stessa.

In generale, l'onda di progetto può essere sia un'onda significativa, rappresentante uno stato di mare, sia un'onda individuale, rappresentante una singola onda random d'altezza massima all'interno di uno stato di mare. In entrambi i casi, l'onda di progetto è definita mediante un'altezza, un periodo e una direzione di provenienza.

Il "rischio" da associare all'onda di progetto si specifica attraverso il periodo di ritorno Tr degli stati di mare che la contengono e con la probabilità che questi si verifichino durante la vita prevista dell'opera.

Le fasi da affrontare in un'analisi volta alla previsione dei massimi valori che l'altezza d'onda può assumere in un determinato arco temporale si possono riassumere come segue:

- selezione dei dati omogenei e indipendenti tra quelli disponibili;
- individuazione del modello probabilistico che meglio rappresenta i dati selezionati;
- determinazione del massimo valore di altezza d'onda atteso in un fissato arco di tempo, in base al modello probabilistico individuato.

6.1. Calcolo del tempo di ritorno

Nel progetto di ogni opera marittima si deve valutare la durata di vita presunta dell'opera stessa, in relazione al progetto in cui è inserita e tenendo conto delle sue caratteristiche funzionali.

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

Nelle Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe frangiflutti, edite dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (1996), si consigliano i valori riportati nelle Tabelle 11 e 12.

Tipo dell'opera	Livello di sicurezza richiesto		
	1	2	3
	Vita di progetto (anni)		
Infrastrutture d'uso generale	25	50	100
Infrastrutture d'uso specifico	15	25	50

Tabella 11. Vita di progetto minima dell'opera

Per infrastrutture di uso generale si intendono opere di difesa di complessi civili o industriali, che non siano destinati ad uno specifico scopo e per i quali non è chiaramente identificabile il termine della vita funzionale dell'opera. Per infrastrutture d'uso specifico si intendono le opere di difesa di singole istallazioni industriali, di porti industriali, di depositi o piattaforme di carico e scarico, di piattaforme petrolifere, ecc.

Danneggiamento incipiente		
Ripercussione economica	Rischio per la vita umana	
	Limitato	Elevato
Bassa	0.50	0.30
Media	0.30	0.20
Alta	0.25	0.15
Distruzione totale		
Ripercussione economica	Rischio per la vita umana	
	Limitato	Limitato
Bassa	0.20	0.15
Media	0.15	0.10
Alta	0.10	0.05

Tabella 12. Massima probabilità di danneggiamento ammissibile nel periodo di vita dell'opera

In questo caso è stato considerato un basso impatto economico ed un rischio limitato alla vita umana .
Il tempo di ritorno è stato calcolato utilizzando la seguente formula:

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

Opera	Vita di progetto (anni) T_v	Massimo valore di probabilità di danneggiamento P_f	Tempo di ritorno (anni) T_{rp}
Diga	25	0.50	50
	25	0.15	154
Barriera soffolta	25	0.50	50
	25	0.20	112

6.2. Analisi di inferenza statistica

Le serie temporali sono rappresentative delle condizioni meteomarine locali, osservate con cadenza prefissata. Tale cadenza, chiamata scala di aggregazione della serie, influisce sulla risoluzione con cui si osservano le variazioni della grandezza che è oggetto d'indagine. Maggiore è la scala di aggregazione, minore è il dettaglio con cui è descritta la variabilità della grandezza osservata.
La scala di aggregazione, inoltre, influenza anche l'indipendenza dei dati che formano la serie temporale. Per un fenomeno continuo, lentamente variabile, come quello del moto ondoso, minore è la scala di aggregazione e maggiore è il grado di correlazione tra i dati osservati.
Uno dei passaggi più delicati dell'inferenza statistica è la selezione dei dati da analizzare dalla serie temporale osservata. In particolare, tale cernita deve assicurare l'omogeneità e l'indipendenza dell'insieme del campione fornito. Nasce, pertanto, l'esigenza di definire criteri di selezione in base ai quali estrarre dalla serie temporale quei valori che siano, contemporaneamente, descrittivi del fenomeno fisico e mutuamente indipendenti.
Le popolazioni statistiche estratte dai dati osservati possono essere distinte in due diversi tipi, in relazione al procedimento seguito per la loro formazione: il primo prevede il campionamento regolare della serie osservata e genera una popolazione temporalmente aggregata; l'altro prevede un campionamento ad evento e quindi genera una popolazione temporalmente disaggregata. Il primo procedimento è riconducibile al metodo del campione totale, il secondo è riconducibile al metodo delle durate parziali sopra soglia, o al metodo dei massimi annuali.
Il metodo del campione totale non assicura a priori né l'indipendenza né l'omogeneità dei dati che formano l'insieme campionario. Al contrario, il metodo delle durate parziali sopra soglia, previa la

definizione di opportuni criteri di individuazione degli eventi, permette la cernita di dati sia omogenei che indipendenti.

In particolare, nel caso delle serie ondametriche, se è relativamente semplice garantire l'indipendenza dei dati selezionati, non è altresì agevole garantirne l'omogeneità. Infatti, le osservazioni strumentali raccolte sono relative a stati di mare che hanno avuto diversa genesi e, molto spesso, tale diversità non ha radice stocastica, ma deterministica.

Nel Mediterraneo centrale, per esempio, le limitazioni geografiche delle aree di generazione determinano una risposta del mare alle forzanti meteorologiche che è funzione della direzione di provenienza del vento. Una medesima perturbazione può, dunque, generare onde molto diverse secondo il settore direzionale forzato. Inoltre, anche le caratteristiche delle perturbazioni meteorologiche esercitano un'influenza sulla risposta del mare alle azioni eoliche.

Pertanto, l'inferenza statistica applicata alle serie ondametriche risulta complicata dalla dipendenza direzionale dei dati e dalla loro relazione con il regime anemometrico locale. Inoltre, si deve considerare la forte dipendenza statistica tra i dati osservati in condizioni di tempesta, quando le variazioni temporali dei parametri ondosi sono lente.

La definizione dell'evento "mareggiata" permette di semplificare l'insieme campionario per l'inferenza statistica. La mareggiata si può definire come la successione temporale degli stati di mare caratterizzati da valori d'altezza, periodo e direzione del moto ondoso, variabili in fissati intervalli. E' regola caratterizzare una mareggiata assegnandole i valori d'altezza, periodo e direzione corrispondenti al culmine d'intensità della successione degli stati di mare. In particolare, si considera come mareggiata la successione temporale degli stati di mare caratterizzati da:

- persistenza dell'altezza d'onda sopra la soglia di 1 metro maggiore di 12 ore consecutive
- attenuazione dell'altezza d'onda sotto la soglia di 1 metro per meno di 6 ore consecutive
- appartenenza della direzione di provenienza a un determinato settore angolare (± 30° rispetto alla direzione iniziale)

L'indipendenza campionaria della serie dei colmi è assicurata imponendo un valore di soglia per l'intervallo che intercorre tra due mareggiate successive. Nel caso in esame, tale intervallo è pari a 48 ore.

L'indipendenza dell'insieme formato da mareggiate susseguitesi con cadenza non inferiore a due giorni non ne assicura l'omogeneità. Tale requisito può essere conseguito vagliando ulteriormente il campione indipendente. In particolare, sono utilizzati nelle analisi soltanto i valori superiori ad una seconda soglia d'altezza d'onda, più alta di quella prescelta nella definizione della mareggiata. La definizione della soglia di troncamento per la serie disaggregata, quindi, può essere finalizzata a separare le mareggiate generate da venti di tempesta, ciclonici o anticiclonici, da quelle generate da brezze costiere, anche se intense. Inoltre, nel caso dei nostri mari, in cui le aree di generazione sono

limitate e irregolari, la definizione della seconda soglia può essere sfruttata per distinguere le mareggiate generate da vaste perturbazioni meteorologiche, che si estendono su scale continentali e dalle mareggiate generate da perturbazioni locali, che si estendono su scale regionali. In ogni caso, la scelta della soglia è un'operazione molto delicata, poiché essa condiziona notevolmente le stime dell'altezza d'onda con assegnato tempo di ritorno. Una soglia troppo bassa, infatti, conduce ad avere molti elementi nel campione, la maggior parte dei quali non è rappresentativa di condizioni estreme. Tali circostanze determinano previsioni stabili ma sovrastimate dell'altezza d'onda con assegnato tempo di ritorno. Al contrario, una soglia troppo alta conduce ad avere pochi elementi campionari, anche se tutti rappresentativi di condizioni estreme. Tali circostanze determinano previsioni dell'altezza d'onda variabili con la numerosità campionaria.
Ai fini dell'individuazione dell'altezza d'onda significativa, considerando le caratteristiche locali del moto ondoso, è stata fissata una soglia di 3.0 metri.

Sulla base delle considerazioni di cui sopra, si è individuato un campione statistico avente 92 valori di altezza d'onda, periodo significativo e direzione di propagazione. I valori, selezionati secondo i criteri di indipendenza e omogeneità esposti in precedenza, sono stati poi utilizzati per lo studio statistico al fine di determinare le caratteristiche dell'onda di progetto.

Ai fini del calcolo dell'altezza d'onda di progetto si sono utilizzate le onde provenienti dal settore di traversia compreso tra 205°N e 265°N in quanto risulta essere il settore più penalizzante sia per il dimensionamento del nuovo tratto della diga di sopraflutto e della barriera soffolta e sia per quanto riguarda la penetrazione ondosa all'interno del porto..

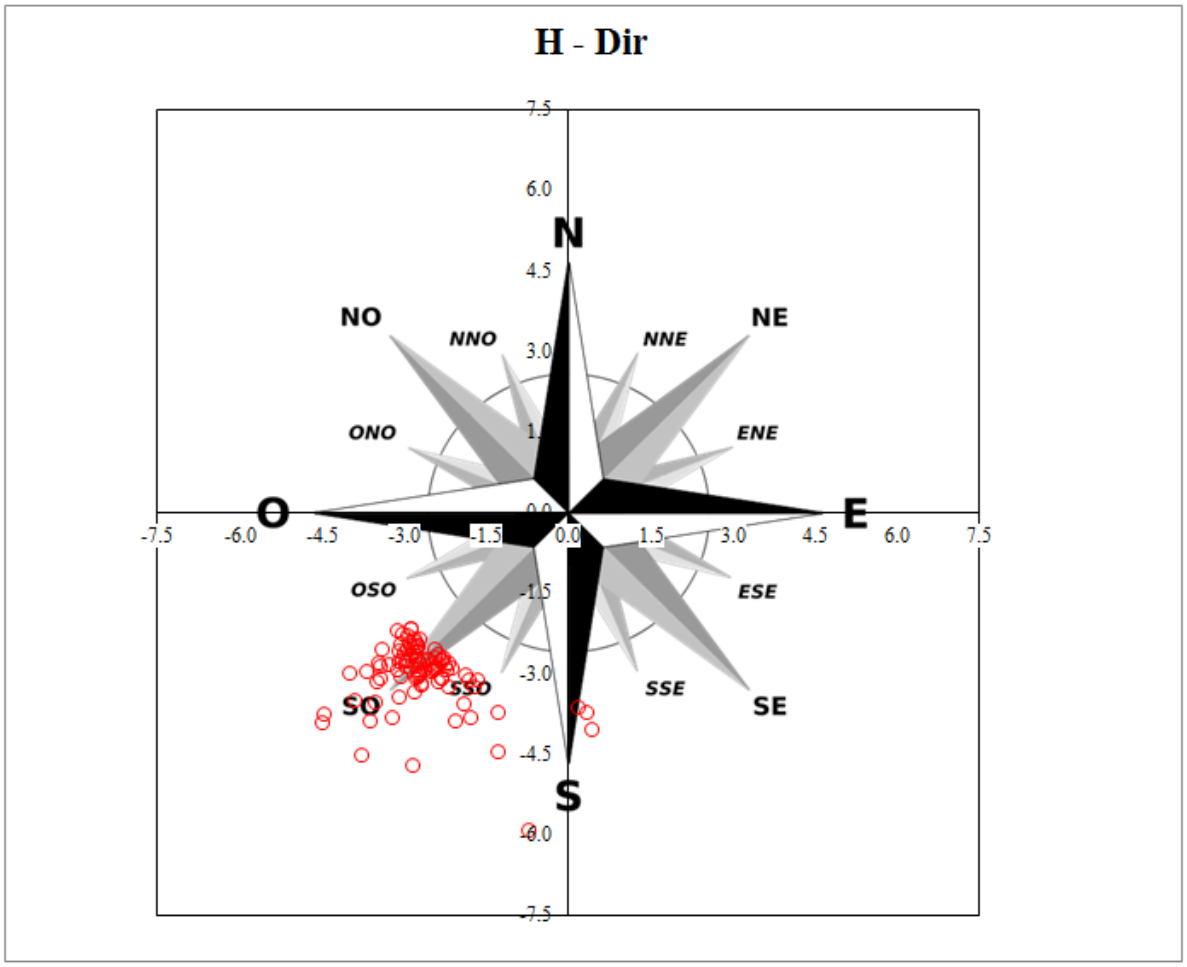


Figura 12. Scatter plot campione statistico

6.3. Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati

La rappresentazione dei picchi di mareggiata mediante un'appropriata legge di distribuzione di probabilità introduce nuove problematiche. Infatti, la distribuzione di probabilità delle altezze d'onda non è nota a priori. In linea di principio, dunque, qualsiasi distribuzione di probabilità può essere verosimile. Nella prassi operativa, tale presupposto obbliga i progettisti a definire alcuni criteri di scelta, volti ad individuare tra le possibili distribuzioni la legge di probabilità che meglio rappresenta alcune caratteristiche statistiche dei dati, per esempio un migliore adattamento della coda della distribuzione ai valori estremi rilevati.

Le distribuzioni utilizzate nello studio in esame sono la Normale, la log-Normale, la Gumbel e la Frechet. Si procederà ora alla stima dei parametri per ciascuna di queste distribuzioni e alla verifica di adattamento attraverso l'impiego di alcuni test statistici.

Tra i comuni metodi d'adattamento statistico si preferisce frequentemente il metodo dei momenti, poiché più semplice e comunque robusto. Il metodo dei momenti consiste nell'attribuire a ciascun momento della popolazione il valore del corrispondente momento del campione estratto da quella popolazione. Poiché gli n parametri della distribuzione possono essere espressi in funzione dei suoi momenti dei primi n ordini, il problema della stima dei parametri può essere ricondotto a quello della stima dei momenti.

Il metodo dei momenti fornisce stimatori corretti, ma in genere poco efficienti: questo perché una stima è tanto migliore quanto minore è la sua varianza. Ma, poiché a parità di grandezza del campione la varianza della stima cresce al crescere dell'ordine del momento da stimare, per campioni di poche decine di elementi è già sconsigliato il ricorso al momento del terzo ordine. Nel caso in esame, tuttavia, pur avendo un campione di limitata numerosità (N=92), sono state considerate solo distribuzioni a due parametri: questo implica che per stimare questi due parametri è necessario far ricorso solo ai momenti del primo e del secondo ordine. L'applicazione del metodo dei momenti al caso che si sta studiando è dunque accettabile.

Innanzitutto si è proceduto al calcolo degli stimatori corretti, ovvero di quegli stimatori il cui valore è dato dal momento campionario corrispondente, ma la cui media è sempre pari al momento teorico.

- Media

$$m = \mu$$

- Varianza

$$s^2 = \frac{N}{N-1}\sigma^2$$

6.4. Adattamento delle distribuzioni di probabilità

Distribuzione Normale

La densità di probabilità della distribuzione normale è data da:

$$p(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H-m}{s}\right)^2\right]$$

dove la variabile è l'altezza d'onda H, ed m e s sono rispettivamente la media e la deviazione standard campionarie.

Poiché si vuole confrontare la densità di probabilità appena ricavata con la frequenza empirica del campione, e sapendo che quest'ultima è una probabilità elementare, data dunque dal prodotto fra una densità di probabilità e un intervallo ΔH:

$$f_k = p_k(H)\Delta H$$

per poter procedere con il confronto fra le due grandezze si deve prima riportare la frequenza empirica a una densità di frequenza empirica:

$$p_k(H) = \frac{f_k}{\Delta H}$$

L'intervallo ΔH è dato da:

$$\Delta H = \frac{H_{max} - H_{min}}{k}$$

dove k è il numero delle classi in cui si è suddiviso il campione per il calcolo della frequenza empirica.

In Figura 13 è riportato il confronto fra la densità di probabilità della distribuzione normale adattata al campione e la densità di frequenza empirica.

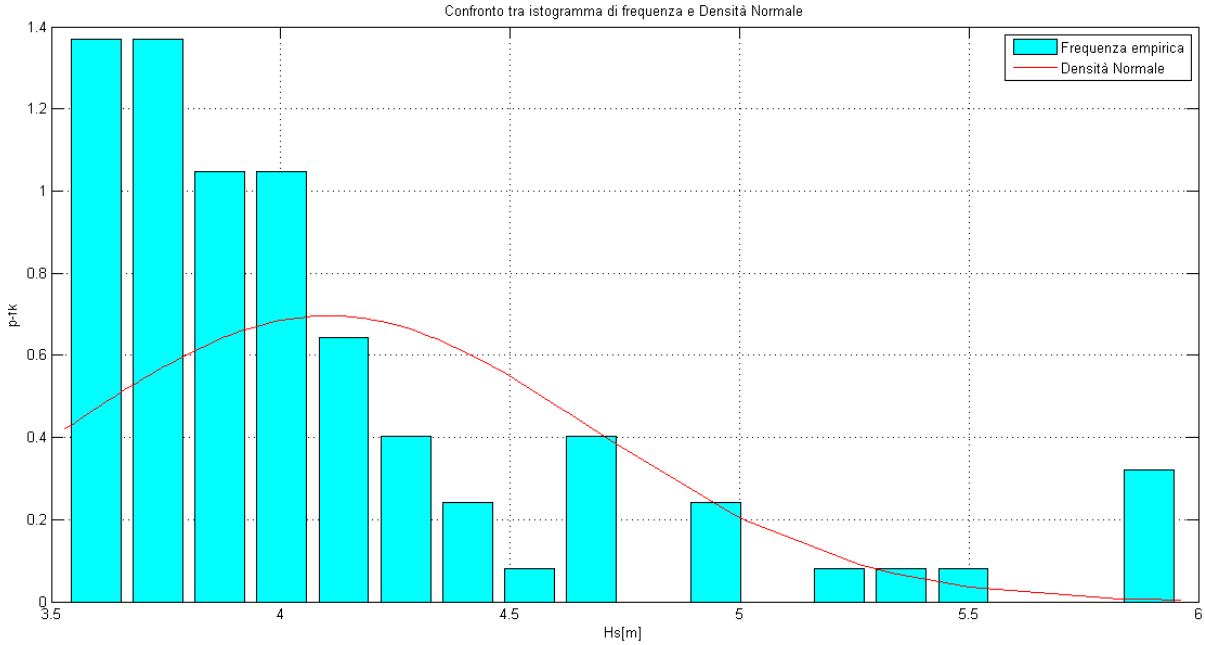


Figura 13. Confronto tra istogramma empirico e densità di probabilità Normale

Si procede ora con il calcolo della probabilità cumulata della distribuzione normale adattata al campione, attraverso la relazione:

$$P(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s}\int_{-\infty}^{H} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H-m}{s}\right)^2\right] dH$$

e al confronto fra tale probabilità cumulata e la frequenza empirica di non superamento (Figura 14).

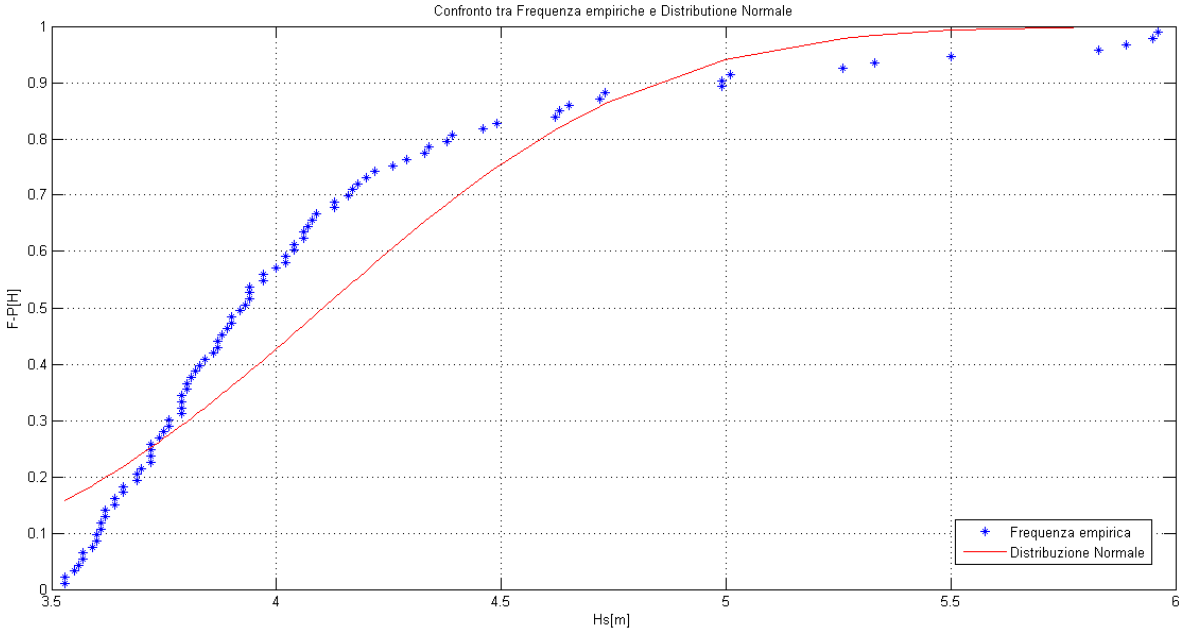


Figura 14. Confronto tra Frequenza di non superamento e Distribuzione Normale

Distribuzione Log-Normale

La Distribuzione Log-Normale a due parametri è caratterizzata dal fatto che a seguire la legge normale non è la variabile originaria H, ma il suo logaritmo:

$$y = \ln(H)$$

La media e la varianza della variabile y sono legati alla media e alla varianza della variabile originaria H dalle relazioni:

$$m(y) = \ln[m(H)] - \frac{1}{2}\ln\left[1 + \frac{s^2(H)}{m^2(H)}\right]$$

$$s^2(y) = \ln\left[1 + \frac{s^2(H)}{m^2(H)}\right]$$

L'espressione della densità di probabilità è:

$$p(H) = \frac{1}{H\sqrt{2\pi}s(y)}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(H) - m(y)}{s(y)}\right]^2\right\}$$

Nella Figura 15 si riporta un confronto grafico fra la densità di probabilità della distribuzione log-normale adattata al campione in esame e la densità di frequenza empirica, già precedentemente definita e calcolata.

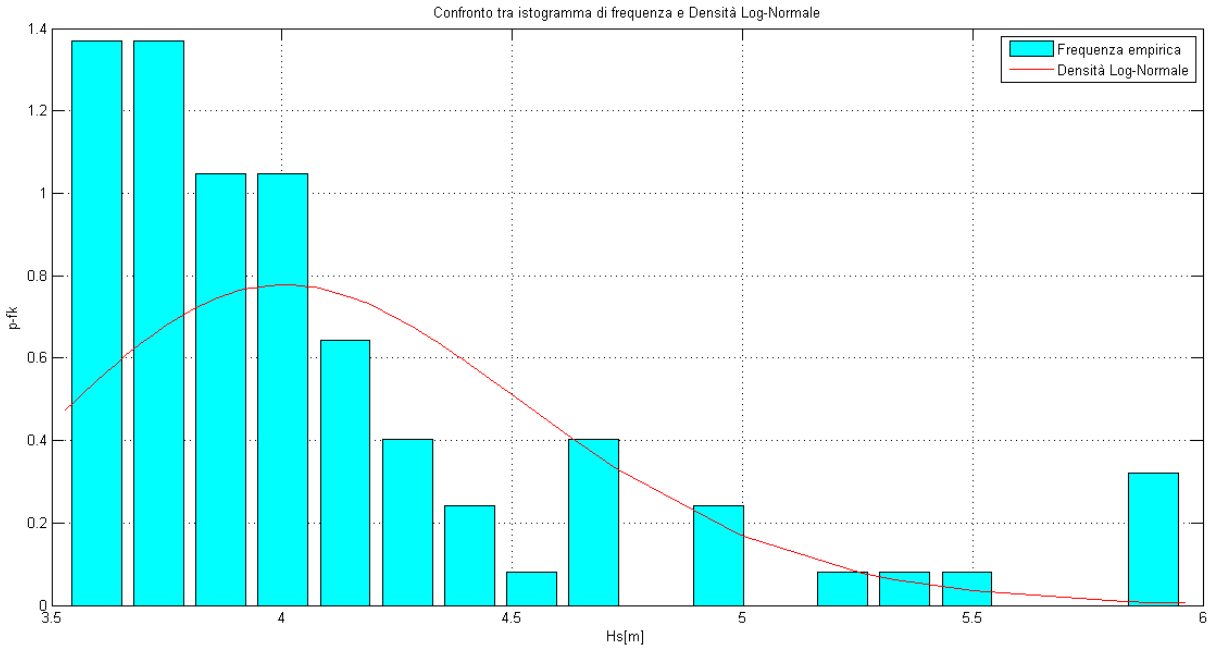


Figura 15. Confronto tra istogramma empirico e densità di probabilità Log-Normale

Si nota come la distribuzione sia limitata inferiormente con limite zero, e come sia asimmetrica con coda sui valori alti.

La probabilità di non superamento della distribuzione log-normale è data dalla relazione:

$$P(H) = \frac{1}{s(y)\sqrt{2\pi}} \int_0^Q \frac{1}{H} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(H) - m(y)}{s(y)}\right]^2\right\}$$

Si riporta il confronto grafico tra la probabilità cumulata della distribuzione log-normale e la frequenza empirica cumulata:

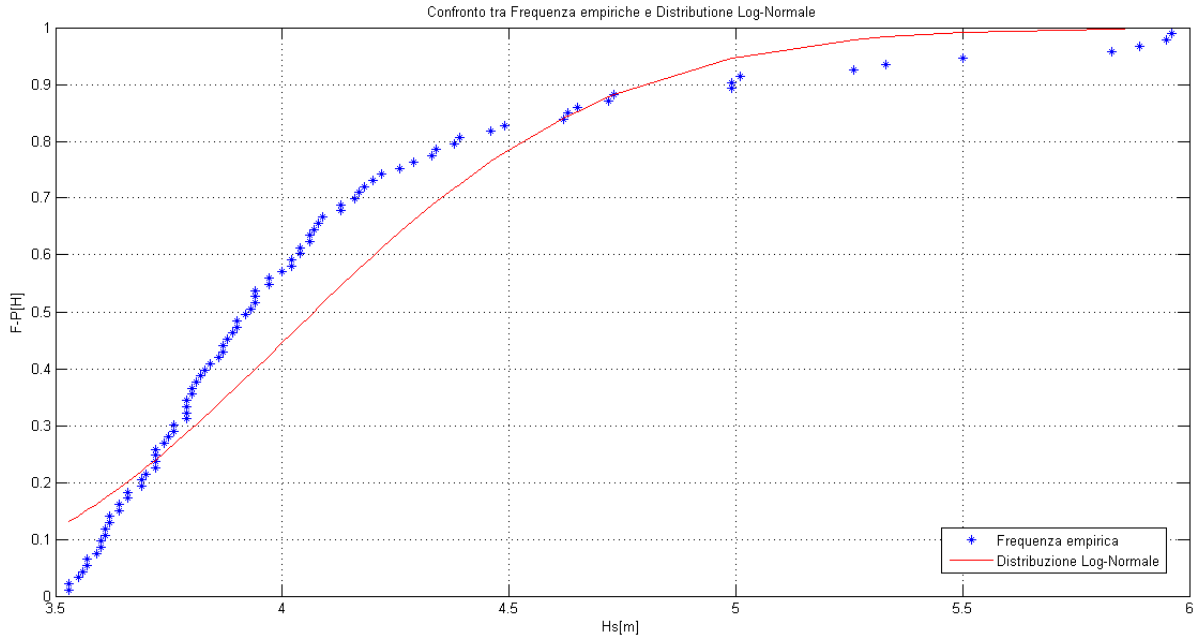


Figura 16. Confronto tra Frequenza di non superamento e Distribuzione Log-Normale

Distribuzione di Gumbel

La Distribuzione di Gumbel, così come la distribuzione di Frechet che verrà analizzata in seguito, sono entrambe distribuzioni asintotiche del massimo valore, rispettivamente del I e del II tipo: queste distribuzioni interpretano le osservazioni dei valori massimi di variabili casuali, come è ad esempio il caso delle altezze d'onda significative. Il tipo della forma asintotica dipende dal modo in cui la funzione di probabilità della distribuzione originaria tende a uno: il I tipo, ovvero la distribuzione di Gumbel, corrisponde a distribuzioni la cui funzione di probabilità, illimitata superiormente, tende a uno in forma esponenziale; il II tipo, ovvero la distribuzione di Frechet, corrisponde a distribuzioni la cui funzione di probabilità, ancora illimitata superiormente, tende a uno secondo la forma della distribuzione di Pareto, ovvero molto più lentamente della forma esponenziale. Per quanto riguarda la distribuzione di Gumbel, la sua caratteristica è che la funzione di probabilità P(x) si può approssimare, per i valori grandi della x, con una curva che tende esponenzialmente ad uno al tendere ad infinito di x.

Dopo aver calcolato i due parametri della distribuzione:

$$\alpha = \frac{1.2825}{s}$$

$$\varepsilon = m - 0.45s$$

è possibile determinare la densità di probabilità della distribuzione di Gumbel, secondo la relazione:

$$p(H) = \alpha e^{-e^{-\alpha(H-\varepsilon)}-\alpha(H-\varepsilon)}$$

e confrontare per via grafica (Figura 17) l'andamento della densità di probabilità con l'andamento della densità di frequenza empirica.

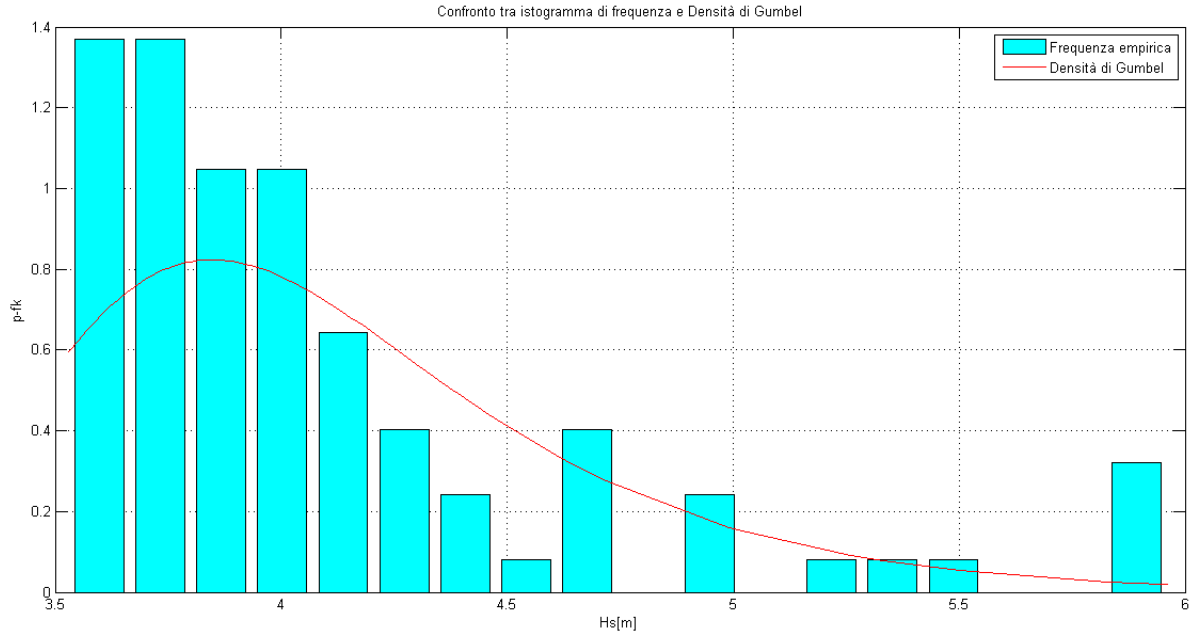


Figura 17. Confronto tra istogramma empirico e densità di probabilità di Gumbel

La probabilità cumulata è data dalla relazione:

$$P(H) = e^{-e^{-a(H-\varepsilon)}}$$

In Figura 18 si riporta il confronto grafico tra la probabilità cumulata della distribuzione di Gumbel e la frequenza empirica cumulata.

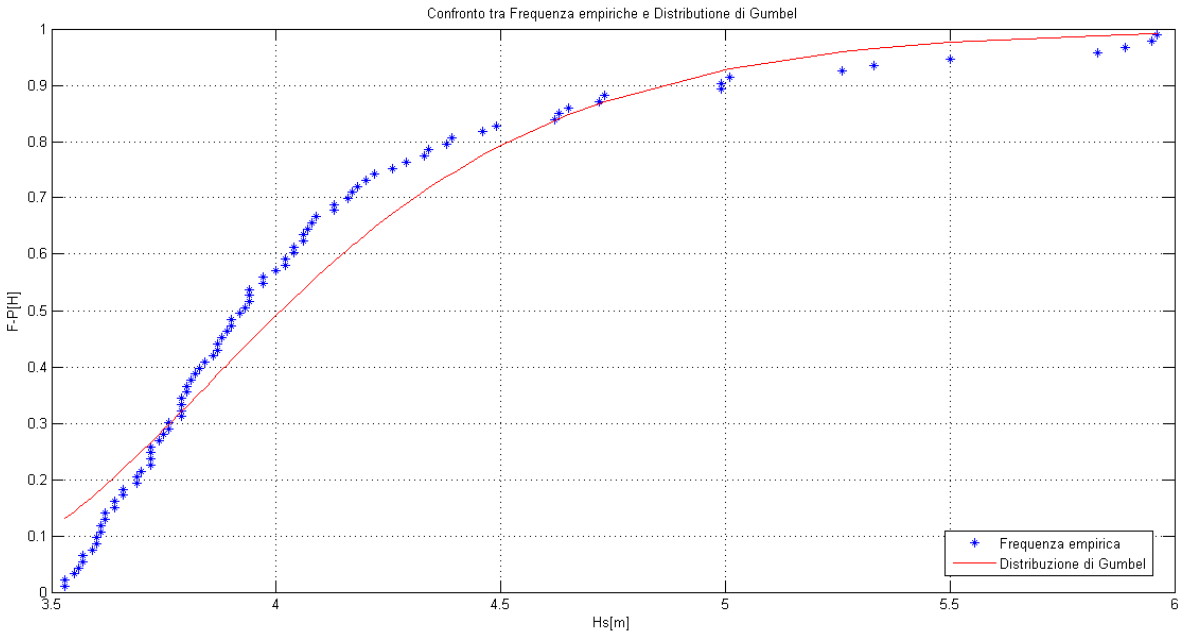


Figura 18. Confronto tra Frequenza di non superamento e Distribuzione di Gumbel

Distribuzione di Frechet

Le Distribuzioni di questa famiglia, per le quali al crescere della variabile x la funzione di probabilità tende a uno molto lentamente, sono del tipo della distribuzione di Pareto, limitata inferiormente con limite in zero.

I due parametri possono essere stimati con il metodo dei momenti:

$$k = \frac{1.2825}{s(y)}$$

$$\varepsilon = \exp[m(y) - 0.45006 * s(y)]$$

dove s(y) e m(y) sono i parametri della distribuzione log-normale, precedentemente calcolati.

La funzione di densità di probabilità è data dalla relazione:

$$p(H) = \exp\left[-\left(\frac{H}{\varepsilon}\right)^{-k}\right]\frac{k}{\varepsilon}\left(\frac{H}{\varepsilon}\right)^{-(k+1)}$$

Si procede con il confrontare l'andamento della densità di probabilità con la densità di frequenza empirica (Figura 19).

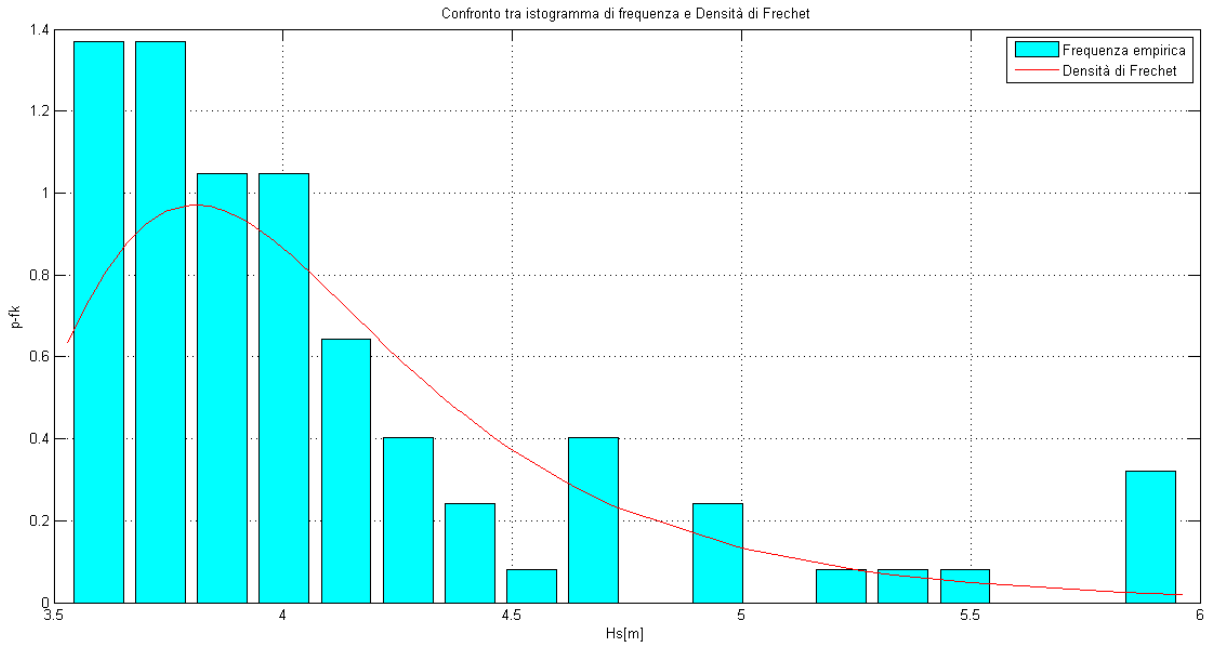


Figura 19. Confronto tra istogramma empirico e densità di probabilità di Frechet

La funzione di probabilità è:

$$P(H) = \exp\left[-\left(\frac{H}{\varepsilon}\right)^{-k}\right]$$

Si riporta il confronto grafico tra la probabilità cumulata della distribuzione di Frechet e la frequenza empirica cumulata (Figura 20).

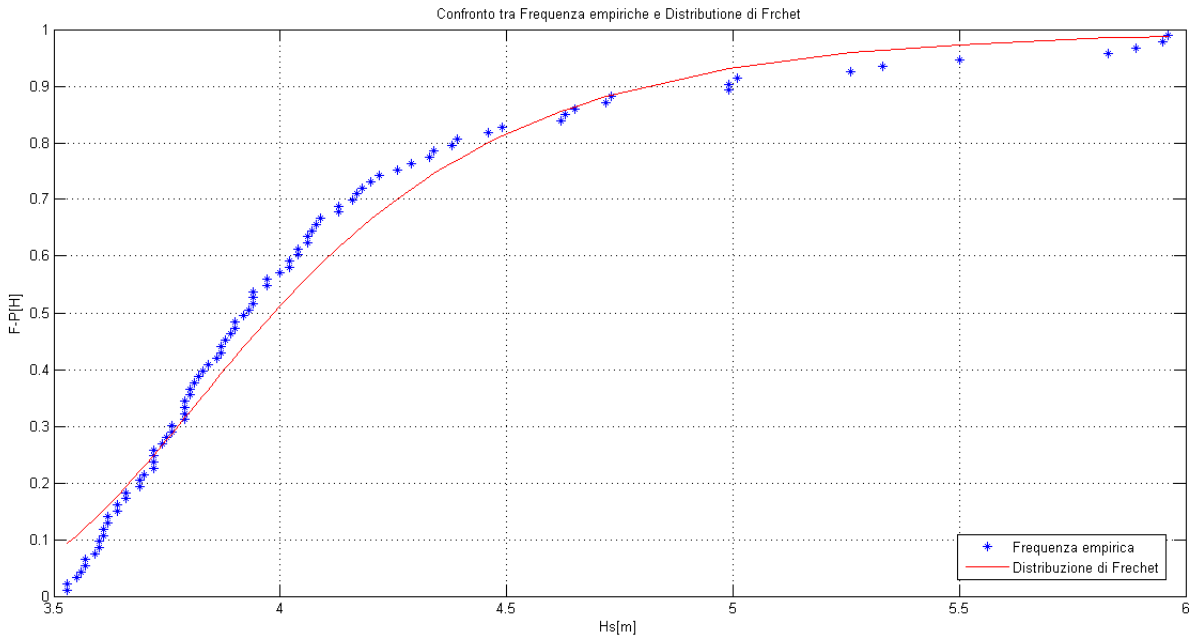


Figura 20. Confronto tra Frequenza di non superamento e Distribuzione di Frechet

Questa distribuzione sembra rappresentare meglio il campione di osservazioni in esame. In effetti, già nel grafico delle densità di probabilità ci si accorgeva che la densità di probabilità della distribuzione di Frechet seguiva con buona approssimazione l'andamento della densità di frequenza empirica.

Confronto delle distribuzioni adattate al campione statistico

Si è voluto riportare un confronto conclusivo fra gli andamenti delle densità di probabilità delle varie distribuzioni adattate al campione e l'istogramma della densità di frequenza empirica.

In tal modo è possibile osservare contemporaneamente tutte le curve, e paragonare il loro comportamento per i valori bassi, alti e di picco.

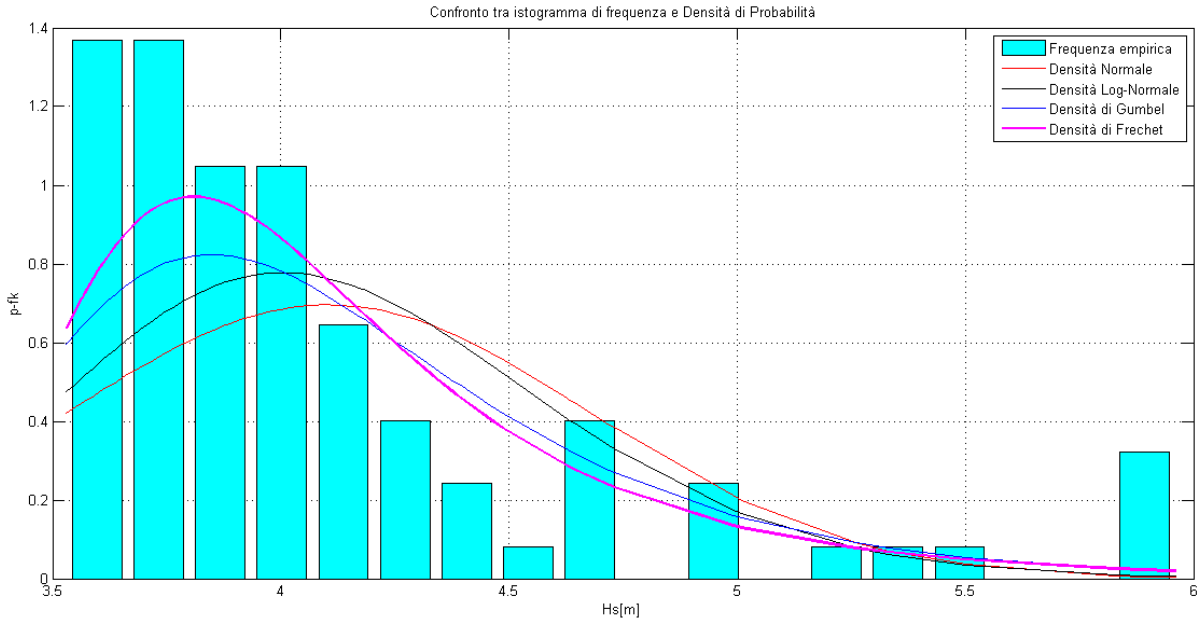


Figura 21. Confronto tra istogramma empirico e densità di probabilità

Per quanto riguarda i valori bassi delle altezze d'onda H, si nota come nessuna delle distribuzioni esaminate li rappresenti in modo adeguato, perché i corrispondenti valori di p(H) sono tutti inferiori ai valori delle densità di frequenza empirica del campione in esame. Tra tutte, la distribuzione di Frechet è quella che si adatta meglio.

Relativamente ai valori di picco, si nota come la distribuzione di Frechet si adatti bene al campione in esame.

L'adattamento migliore ai valori alti è quindi garantito dalla distribuzione di Frechet.

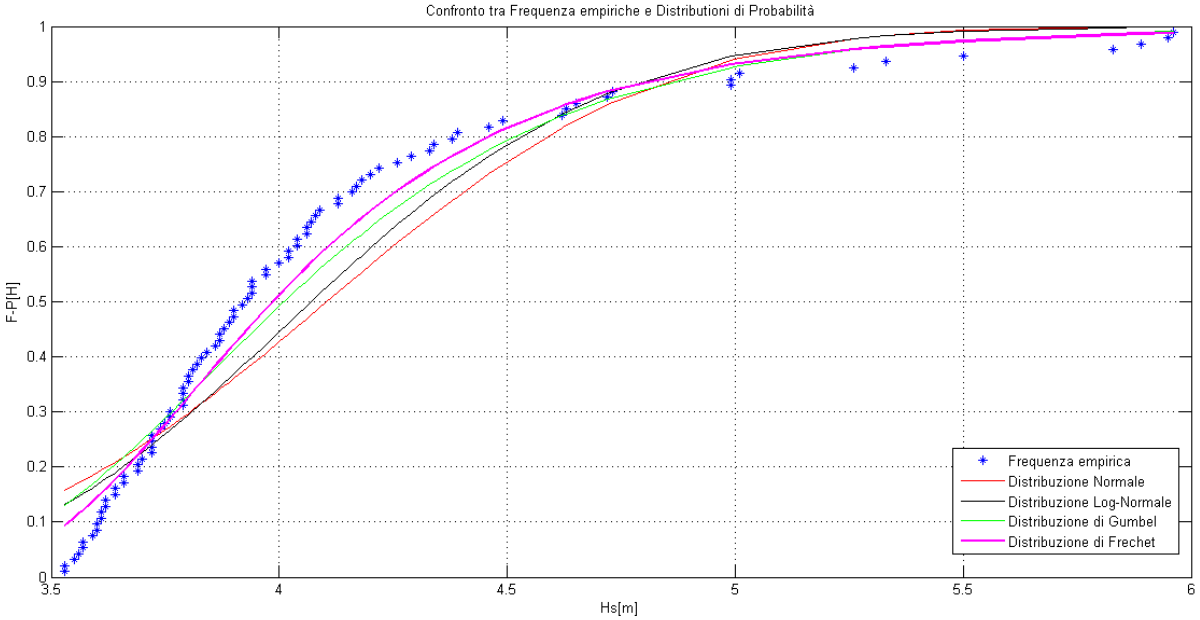


Figura 22. Confronto tra Frequenza di non superamento e distribuzioni di probabilità

Nel confronto delle probabilità cumulate delle varie distribuzioni adattate al campione con le frequenze cumulate del campione stesso, si nota che per valori bassi la distribuzione di Frechet si adatta sufficientemente bene. Tale distribuzione si adatta meglio delle altre ai valori delle frequenze cumulate relativi ai valori centrali della H, e rappresenta anche i valori alti.

6.5. Calcolo delle fasce fiduciarie per il campione statistico

Per determinare le fasce fiduciarie è stato necessario ricorrere al metodo Monte Carlo. Si sono dunque generati 1000 campioni di numerosità fissata pari a 92, distribuiti in maniera uniforme fra 0 e 1. In questo modo si è ottenuta una matrice di N righe e M colonne, con:

$$i = 1 \div N \quad j = 1 \div M$$
$$N = 92 \quad M = 1000$$

A questo punto si è ordinato in senso crescente ogni j-esimo campione e si è assegnata una frequenza empirica Fi a ogni i-esimo valore del j-esimo campione:

$$F_i = \frac{i}{N + 1}$$

Si consideri che ogni riga i della matrice generata ha uno stesso valore di frequenza empirica, per il fatto che la numerosità di ciascun campione è fissata.

Una volta noto il valore della Fi, si sono invertite le funzioni di probabilità delle distribuzioni utilizzate, per tutti gli M campioni generati, in modo da ottenere una riga di M punti, per ogni valore di Fi, più o meno addensati intorno al modello.
La fascia fiduciaria è, per ciascun Fi, l'intervallo che racchiude il 95% in probabilità dei valori trovati. Si è considerata dunque ogni singola riga di punti come un nuovo campione di numerosità 1000; si è proceduto ad ordinare in senso crescente ognuno dei 92 nuovi campioni appena definiti e per ogni valore si è definita una nuova frequenza empirica:

$$F_j = \frac{j}{M + 1}$$

Una volta nota Fj, si è proceduto con lo scartare i valori di coda di ogni singolo campione, individuando i valori di probabilità $\alpha/2$ e $1 - \alpha/2$, corrispondenti rispettivamente al limite inferiore e superiore della fascia fiduciaria. Tutti i valori che ricadono fra quei due estremi costituiscono l'ampiezza della fascia fiduciaria corrispondente alla Fi considerata, per un valore del livello di significatività pari al 5%.

Una volta individuata la fascia fiduciaria della distribuzione considerata, si è andato a verificare che i modelli stimati sul campione di altezze d'onda ricadano nell'intervallo definito dalle fasce. In particolare, si è contato il numero dei valori della frequenza empirica Fk che ricadono all'interno dell'intervallo e si è verificato che siano per lo meno il 95% del totale.

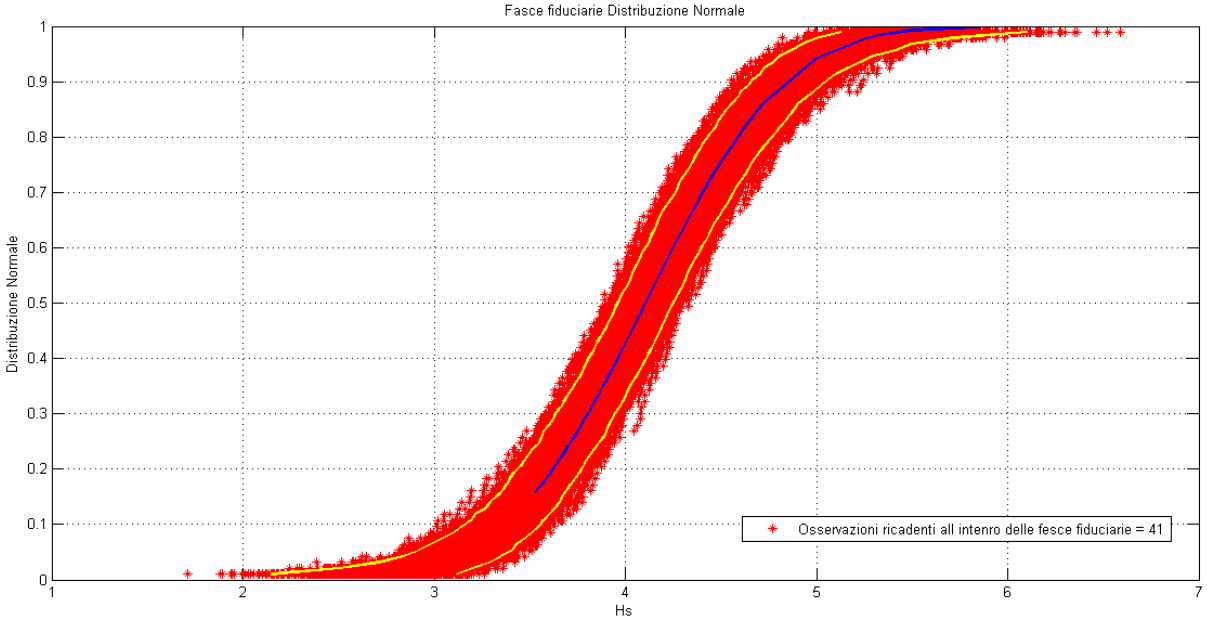


Figura 23. Fasce fiduciarie per la distribuzione Normale

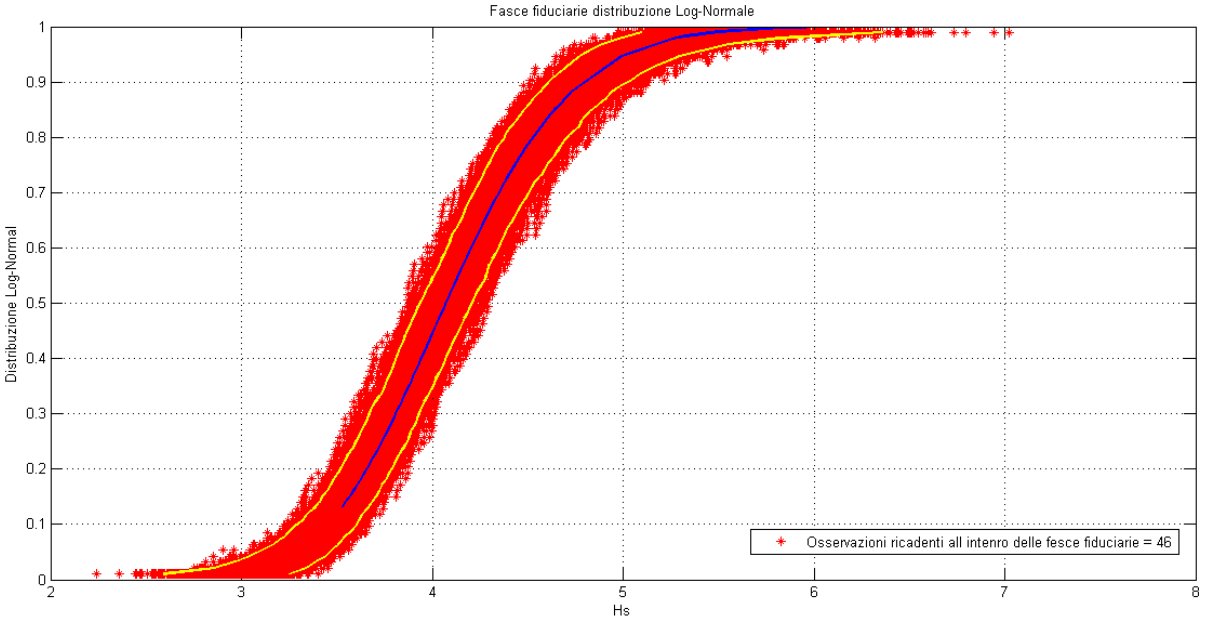


Figura 24. Fasce fiduciarie per la distribuzione Log-Normale

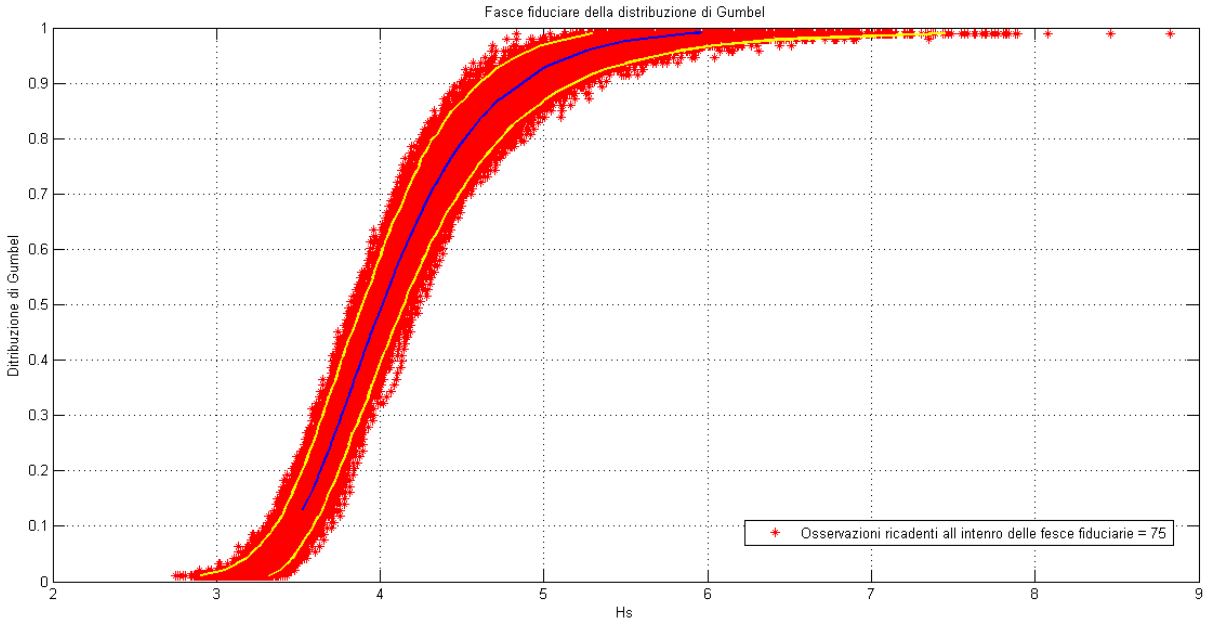


Figura 25. Fasce fiduciarie per la distribuzione di Gumbel

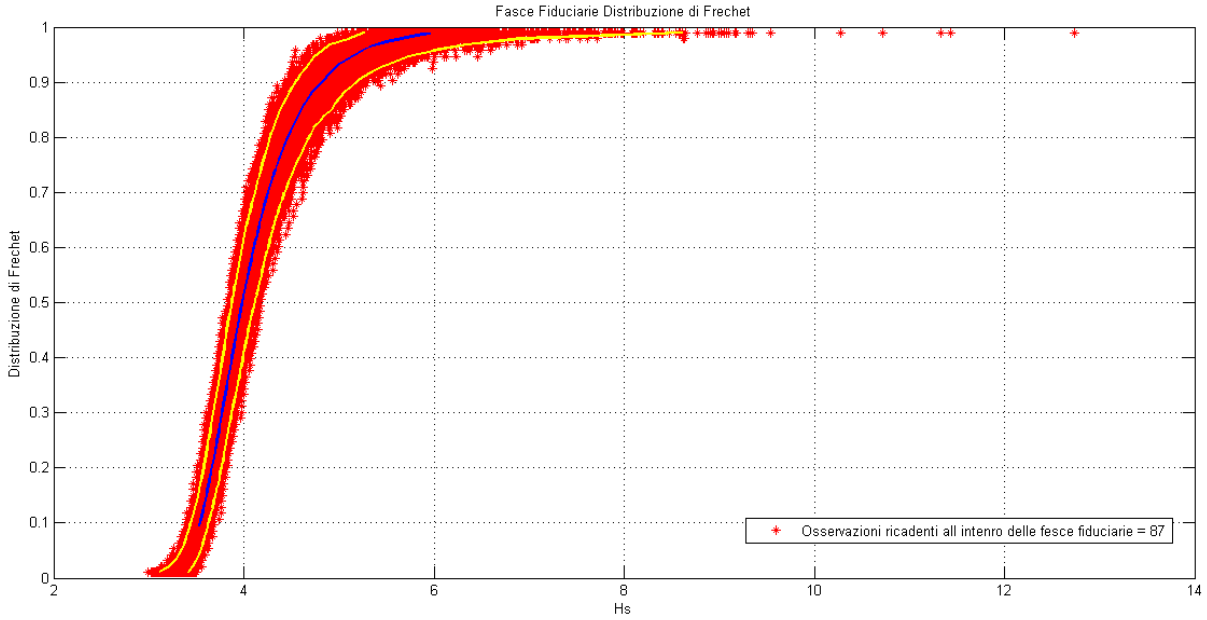


Figura 26. Fasce fiduciarie per la distribuzione di Frechet

Osservando i valori che ricadono all'interno delle Fasce fiduciarie si nota come le distribuzioni di Gumbel e di Frechet si adattino meglio rispetto alla distribuzione Normale e Log-Normale.

6.6. Verifica di adattamento delle distribuzioni attraverso l'impiego di test statistici

Test di Pearson

Il Test di Pearson si adotta per controllare l'ipotesi che la distribuzione dalla quale un dato campione è stato estratto coincida con una distribuzione assegnata.

Per fare ciò, si considera la grandezza statistica:

$$X^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{[N_i - Np_i]^2}{N_i}$$

dove N_i è il numero di osservazioni che ricadono in un medesimo intervallo e:

$$Np_i = Np(x)dx$$

è una probabilità elementare.

La statistica X^2 è una variabile casuale; la sua distribuzione asintotica al crescere del numero di osservazioni N, tuttavia, non è esattamente conosciuta: è compresa tra la distribuzione di un χ^2 con k-1 gradi di libertà, e quella di un χ^2 con k-p-1 gradi di libertà, dove p è il numero di parametri della distribuzione che si vuole verificare. Queste considerazioni sono valide quando la distribuzione che si vuole testare è stata ricavata proprio a partire dal campione in esame e quindi risultano valide per il caso che si sta analizzando. Nel caso in cui la distribuzione che si vuole verificare attraverso il test sia nota a priori, i gradi di libertà del χ^2 sono maggiori, e pari a k-1.

Nell'eseguire il Test di Pearson, si segue la regola dell'equiprobabilità ai fini della suddivisione in classi:

$$p_1 = p_2 = \cdots = p_i$$

nonché la regola empirica di definire le classi in modo da rispettare la disuguaglianza:

$$Np_i \geq 5$$

Si assume dunque il numero delle classi k uguale al più grande numero intero che non superi $N/5$.

Poiché nel caso in questione N = 92, si è assunto un numero di classi pari a:

$$k = \frac{N}{5.1} 21$$

a cui corrisponde:

$$p_i = \frac{5.1}{N} = 0.02 = \text{cost}$$

che rispetta la condizione di equiprobabilità. Pertanto l'ampiezza delle classi risulta variabile; una volta stabilita l'entità di p_i, invertendo la funzione di probabilità della distribuzione di cui si vuole testare l'adattamento, si ricavano le ampiezze delle k classi.
A questo punto si procede individuando il numero N_i di elementi che ricadono in ciascuna classe, e successivamente valutando il valore della statistica X^2.
Questo valore andrà infine confrontato con un valore limite:

$$\chi^2{}_{k-p-1}(1-\alpha) = \chi^2{}_{21-2-1}(1-0.05) = \chi^2{}_{18}(0.95) = 28.9$$

La regione di accettazione così definita abbraccia un intervallo che va da $-\infty$ a 28.9 La sua unilateralità è giustificata dal fatto che i valori sulla coda sinistra sono tutti accettabili. In effetti, tanto più piccolo è lo scarto calcolato dalla statistica, tanto migliore è l'approssimazione della distribuzione in esame.

Se il valore della statistica X^2, calcolato per ogni distribuzione che si vuole testare, risulterà inferiore al valore limite $\chi^2 = 28.9$, la relativa distribuzione avrà superato il test di adattamento di Pearson, ovvero risulterà statisticamente accettabile per rappresentare la distribuzione della variabile in esame.

Verifica delle distribuzioni

Considerando il valore $p_i = 0.2$ precedentemente definito, si è proceduto con l'invertire la funzione di probabilità normale, in modo da individuare gli intervalli relativi a ciascuna classe.
Si è calcolato il numero di elementi n_k del campione in esame che ricadono in ciascuna classe.

Si è individuato il valore della statistica per tutte le distribuzione utilizzando la seguente formula:

$$X^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{[N_i - Np_i]^2}{N_i}$$

Nella tabella 13 sono riportati i risultati del Test di Pearson per tutte le distribuzioni di probabilità utilizzate:

$\chi^2(0.95)$	X^2 Normale	X^2 Log-Normale	X^2 Gumbel	X^2 Frechet
28.9	92.0	48.5	35.2	**18.7**

Tabella 13. Risultati del test di Pearson

L'unica Distribuzione di probabilità che ha superato il Test di Pearson Distribuzione di Frechet in quanto il valore del χ^2 è inferiore al valore limite pari a 28.9.

Test di Kolmogorov – Smirnov

Il test di adattamento di Kolmogorov – Smirnov si basa sul confronto tra le probabilità cumulate, relative alle varie distribuzioni che si vogliono testare, e la frequenza empirica del campione.
In particolare, la statistica di questo test tiene conto dello scarto massimo in valore assoluto fra le i-esime frequenze cumulate e le i-esime probabilità di non superamento, secondo la relazione:

$$D = \max|F_i - P_0(x_i)|$$

Come si può vedere dalla precedente relazione, questo test, a differenza del test di Pearson, non si basa sulla probabilità elementare p_i, ma sulla probabilità cumulata: questo consente di non dover classificare il campione, ma di poter adottare direttamente le funzioni di probabilità già precedentemente definite per ogni distribuzione in esame.
Anche in questo caso, la statistica del test è a sua volta una variabile casuale. L'andamento della sua distribuzione è dato da:

$$\lim_{N\to+\infty} \text{prob}\left[D\sqrt{N} \le z\right] = \frac{\sqrt{2\pi}}{z}\sum_{j=1}^{\infty} \exp\left[\frac{-(2j-1)^2\pi^2}{8z^2}\right]$$

dove z è un generico valore. A causa della difficoltà nell'esplicitare la distribuzione della statistica D, si adotta un valore limite pari a:

$$\alpha = 0.05 \rightarrow D_\alpha = \frac{1.3582}{\sqrt{N}} = 0.14$$

In questo modo, basterà semplicemente valutare la statistica per ogni distribuzione di cui si vuole testare l'adattamento, e verificare la disequazione:

$$D \le D_\alpha$$

Verifica delle distribuzioni

Si è ricavato il valore della statistica:

$$D = \max\left|F_{k_i} - P(Q_i)\right|$$

Nella tabella 14 sono riportati i risultati del test KS per tutte le distribuzioni di probabilità utilizzate

D_α	D Normale	D Log-Normale	D Gumbel	D Frechet
0.14	0.010	0.009	0.002	0.001

Tabella 14. Risultati del test di Pearson

Nel caso del test K-S tutte le Distribuzione di probabilità risultano idonee in quanto i valori del parametro D sono sempre inferiori al valore limite pari a 0.14.

Test di Anderson-Darling

Il Test Anderson - Darling, come quello K-S, confronta la frequenza cumulata con le probabilità cumulate relative alle varie distribuzioni.

Sebbene la statistica di questo test abbia una distribuzione simile alla statistica del Test di Pearson, si riesce a dare un maggior peso ai valori alti e bassi del campione.

La statistica è data dalla relazione:

$$A^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[F_i - P_0(x)]^2}{P_0(x)[1 - P_0(x)]} p_0(x)dx$$

ovvero dalla relazione semplificata:

$$A^2 = -N - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(2i-1)\ln P_0(x_i) + (2N - 2i + 1)\ln\left[1 - P_0(x_i)\right]$$

Questa statistica prende tutti gli scarti fra le frequenze cumulate e le funzioni di probabilità che si vogliono testare, e li normalizza rispetto alla probabilità di superamento e di non superamento.

Affinché una certa distribuzione superi il test di Anderson – Darling, è necessario che sia verificata la disequazione:

$$A^2 \leq {A_\alpha}^2$$

dove $A_\alpha{}^2$ è un valore limite, funzione del livello di significatività α che, nel caso in esame, assume valore:

$$\alpha \rightarrow 0.05 \; A_\alpha{}^2 = 2.492$$

Verifica delle distribuzioni

Nella tabella 15 sono riportati i risultati del test di Anderson-Darling per tutte le distribuzioni di probabilità utilizzate:

$A_\alpha{}^2$	A^2 Normale	A^2 Log-Normale	A^2 Gumbel	A^2 Frechet
2.49	5.89	4.36	2.64	1.48

Tabella 15. Risultati del test di Pearson

Nel caso del Test di Anderson Darling tutte solo la Distribuzione di probabilità di Frechet risulta idonea in quanto il valori del parametro A^2 è inferiore al valore limite pari a 2.49.

Conclusioni sull'applicazione dei test statistici alle distribuzioni

Dopo aver adattato al campione, attraverso il metodo dei momenti per la stima dei parametri, alcune delle distribuzioni di probabilità a due parametri, si è proceduto con il testare l'adattamento di queste distribuzioni.

Per far ciò si è fatto ricorso ad alcuni test statistici, quali il test di Pearson, il test di Kolmogorov – Smirnov e il test di Anderson – Darling.

L'unica distribuzione che risulta sempre accettata è la distribuzione di Frechet. Il risultato dei test conferma quanto precedentemente affermato.

Si è deciso pertanto di adottare la distribuzione di Frechet per la stima dell'altezza d'onda di progetto associata ad un dato tempo di ritorno.

6.7. Parametri dell'onda di progetto

Sulla base dei risultati ottenuti, si procede ora alla stima puntuale dell'altezza d'onda di progetto, per un tempo di ritorno fissato, considerando la distribuzione di Frechet come quella che, fra le 4 stimate, meglio si è adattata al campione in esame.

Applicando la semplice relazione:

$$P_{Tr}(H) = 1 - \frac{1}{T^*_r}$$

si ottiene la probabilità cumulata associata al tempo di ritorno considerato.

A questo punto, per ottenere il valore di altezza d'onda significativa (Hs), è necessario invertire la distribuzione di probabilità di Frechet precedentemente stimata per il valore di probabilità cumulata appena ricavato.

$$Hs = \left(-log(P_{Tr})\right)^{\left(-\frac{1}{k}\right)\varepsilon}$$

Si tenga presente che le formule sopra riportate sono valide nel caso in cui vi sia esatta corrispondenza tra numero di misure e numero di anni di osservazione. Nel caso in esame, in cui tale condizione non è verificata, è necessario correggere il tempo di ritorno per tenere conto della disuguaglianza. In particolare della probabilità corrispondente ad un assegnato tempo di ritorno Tr, va utilizzato il tempo di ritorno corretto T^*_r calcolato mediante la seguente formula:

$$T_r^* = T_r \frac{N}{M}$$

nella quale M è il numero di anni di osservazione ed N il numero di mareggiate considerate. Nel presente caso gli anni si osservazione sono 25, ma tenendo conto di un rendimento della boa ondametrica del 69,59% si è utilizzato un valore di M = 17,4 anni.

In questo modo, si ottiene un'altezza d'onda significativa per un tempo di ritorno di 154 anni (corrispondente ad un tempo di ritorno corretto pari a 816 anni) pari a:

$$H_s = 7.47 \text{ metri}$$

6.8. Stima intervallare dell'onda di progetto

La determinazione degli intervalli di confidenza per i quantili si basa, come nel caso delle fasce fiduciarie, sulla generazione di un numero M=1000 di campioni con numerosità N=32 uniformemente distribuiti fra 0 e 1. Dopo aver ordinato ciascun campione in senso crescente, averne calcolato la frequenza empirica Fi secondo il metodo dell'ordinamento, e averli invertiti rispetto alla distribuzione originariamente stimata sulla serie storica di altezze d'onda, si procede con la stima dei parametri (media e deviazione standard) per ciascuno dei 1000 campioni.

$$m_{x_j} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_{ij}) \qquad s_{x_j}{}^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_{ij} - m_{x_j})^2$$

In questo modo, dunque, si sono ottenuti due nuovi campioni per ogni distribuzione, ciascuno di numerosità 1000, contenenti rispettivamente le medie e le deviazioni standard precedentemente individuate.

A questo punto, si invertono i valori di frequenza empirica Fi per la distribuzione di cui si sono appena stimati i parametri, ottenendo una nuova matrice di 32 righe e 1000 colonne: ogni j-esima colonna contiene un campione di numerosità pari a 92, i cui elementi sono stati ricavati dopo aver invertito, secondo la distribuzione di Frechet, la Fi al variare delle j-esime coppie di parametri media e deviazione standard.

Se ora si considera ogni i-esima riga della matrice appena definita, se ne possono calcolare i percentili in relazione al livello di significatività richiesto, fissato pari al 5% nel caso in esame: se infatti si ordina in senso crescente ogni i-esima riga corrispondente all'i-esimo valore della Fi, si ottengono 92 campioni ordinati, ciascuno costituito da 1000 elementi. Se a ciascuno di questi si associa una frequenza empirica:

$$F_j = \frac{j}{M+1}$$

si possono facilmente individuare i valori di altezza d'onda corrispondenti a una frequenza di $\alpha/2$ e di $1 - \alpha/2$, che coincidono con il limite inferiore e superiore dell'intervallo di confidenza per un dato valore della Fi.

L'intervallo di confidenza misura la variabilità nella stima del frattile, corrispondente ad un determinato valore di probabilità cumulata; la probabilità cumulata è legata al tempo di ritorno corretto dalla relazione:

$$P[H(Tr)] = 1 - \frac{1}{T_r^*}$$

Considerando un tempo di ritorno di 154 anni, e invertendo gli estremi dell'intervallo di confidenza per il valore di probabilità cumulata associato al tempo di ritorno corretto precedentemente calcolato, si è ottenuta una stima intervallare dell'altezza d'onda corretta:

$$H_s{}^* = \begin{cases} 7.47m + 0.6m \\ 7.47m - 1.3m \end{cases}$$

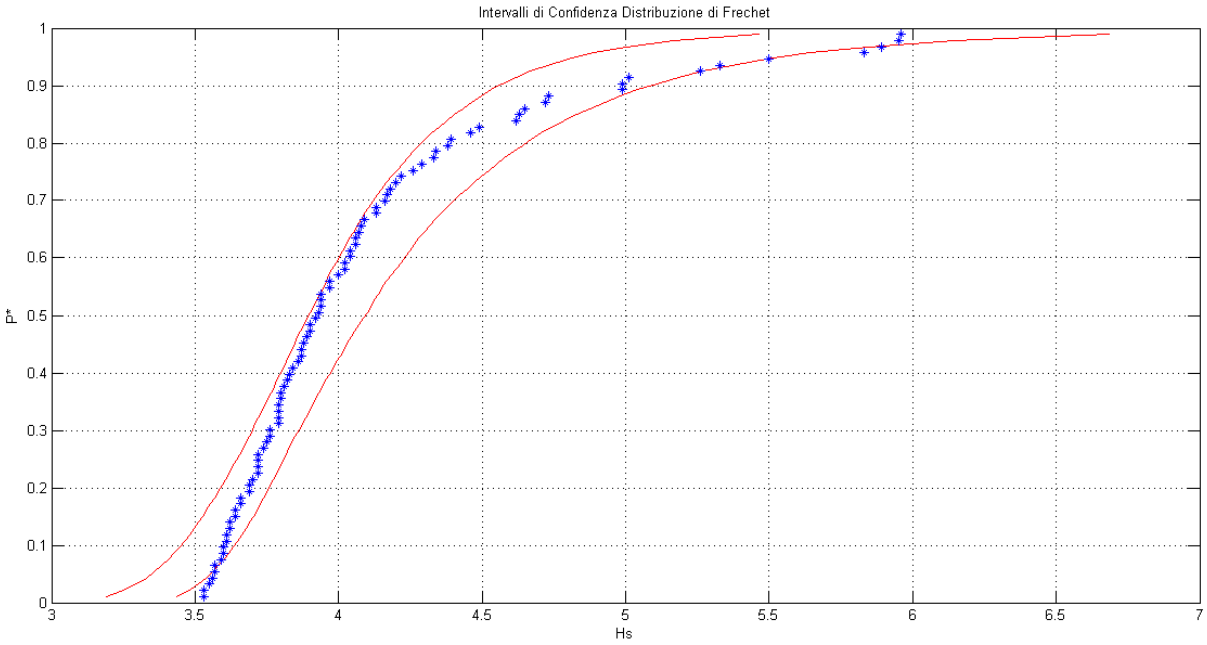


Figura 27. Intervalli di confidenza della distribuzione di Frechet

7. CONCLUSIONI

Per il progetto definitivo porto di Santa Margherita Ligure, è stato calcolato il regime del moto ondoso al largo del sito di interesse. Queste informazioni sono necessarie per il successivo studio di trasferimento largo-riva dell'onda di progetto e la conseguente agitazione ondosa interna dovuta ad essa.

La consultazione di dati storici della zona di interesse ha evidenziato la mancanza di strumentazioni di misura in prossimità del Porto. Per far fronte a questa mancanza sono stati utilizzati i dati ondosi registrati dalla boa ondametrica di La Spezia con una copertura temporale di 25 anni, dal 1989 al 2014 e con esposizione del paraggio del tutto analoga a quella di Santa Margherita Ligure.

E' stato individuato un settore di traversia proveniente da Sud - Ovest (205° N - 265° N).

La costruzione del campione statistico ha imposto diverse fasi di calcolo. Il primo passo è stato andare ad individuare le mareggiate indipendenti tra loro. Questo è stato possibile introducendo una prima soglia di troncamento di 1,00 m s.l.m.m. e misurando un passo temporale che ha permesso di identificare le mareggiate. Tale identificazione è stata possibile imponendo che la soglia di troncamento venisse superata per almeno 48 ore consecutive e si concludesse quando questa soglia non veniva superata per almeno 6 ore consecutive.

Il secondo passo è stato quello di identificare le mareggiate omogenee. Questo è stato eseguito innalzando la soglia di troncamento da 1,00 m a 3,00 m. s.l.m.m.. Nella fase finale sono stati presi in considerazione solo i valori massimi delle singole mareggiate precedentemente individuate.

Determinato il campione statistico, è stato effettuato un processo di inferenza statistica che ha permesso di calcolare l'altezza d'onda di progetto in funzione di un determinato tempo di ritorno. Il calcolo del tempo di ritorno è stato eseguito prendendo in considerazione due fattori principali: l'effetto economico e la perdita di vite umane. Nel caso in cui, a seguito di una mareggiata, la diga frangiflutti subisse un danno totale, sulla base di questi fattori è stato utilizzato un tempo di ritorno pari a 154 anni. I parametri per la stima del tempo di ritorno sono stati presi dalla TABELLA 1 e 2 delle Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe frangiflutti, edite dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (1996).

Il processo di inferenza statistica ha mostrato che la distribuzione di probabilità che meglio si adatta al campione statistico è quella di Frechet, quindi invertendo questa distribuzione, in funzione del tempo di ritorno corretto, è stato possibile calcolare l'altezza dell'onda di progetto al largo.

Il calcolo del periodo significativo è stato effettuato per mezzo di una correlazione tra altezza d'onda ed il periodo di tutti i dati disponibili, applicando un coefficiente di amplificazione è stato calcolato il periodo di picco per l'onda di progetto.

La tabella sottostante riassume i dati di progetto elaborati:

Tr[anni]	Hs[m]	ts[s]	Dir[°N]
154	7.47	8.72	205 - 265

Ai fini dell'individuazione dei vari parametri ondosi al largo utili agli studi di agitazione ondosa interna al porto di Santa Margherita Ligure e del calcolo dell'onda di progetto della diga frangiflutti in condizioni di danno incipiente e della barriera soffolta atta a realizzare la difesa al piede della spiaggia, si è anche stimato il modo ondoso avente tempo di ritorno corretto pari a 5,10 e 50 anni.

Tr[anni]	Hs[m]	tp[s]	Dir[°N]
5	5.31	7.94	205 – 265
10	5.69	8.09	205 – 265
50	6.68	8.45	205 – 265

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Area di studio (stato attuale) 6

Figura 2. Schema di riferimento, simboli e convenzioni per il calcolo dei fetch efficaci e della legge di correlazione tra le direzioni del vento e delle onde. 8

Figura 3. Fetch geografico ed efficace Santa Margherita Ligure 10

Figura 4. Deviazione vento-mare Santa Margherita Ligure 11

Figura 5. Clima ondoso al largo di Santa Margherita Ligure 14

Figura 6. Clima ondoso trasposto al largo di Santa Margherita Ligure 15

Figura 7. Clima ondoso primavera 16

Figura 8. Clima ondoso estate 17

Figura 9. Clima ondoso Autunno 18

Figura 10. Clima ondoso Inverno 19

Figura 11. Correlazione tra altezza d'onda e periodo 30

Figura 12. Scatter plot campione statistico 36

Figura 13. Confronto tra istogramma empirico e densità di probabilità Normale 39

Figura 14. Confronto tra Frequenza di non superamento e Distribuzione Normale 39

Figura 15. Confronto tra istogramma empirico e densità di probabilità Log-Normale 41

Figura 16. Confronto tra Frequenza di non superamento e Distribuzione Log-Normale 42

Figura 17. Confronto tra istogramma empirico e densità di probabilità di Gumbel 43

Figura 18. Confronto tra Frequenza di non superamento e Distribuzione di Gumbel 43

Figura 19. Confronto tra istogramma empirico e densità di probabilità di Frechet 44

Figura 20. Confronto tra Frequenza di non superamento e Distribuzione di Frechet 45

Figura 21. Confronto tra istogramma empirico e densità di probabilità 46

Figura 22. Confronto tra Frequenza di non superamento e distribuzioni di probabilità 47

Figura 23. Fasce fiduciarie per la distribuzione Normale 49

Figura 24. Fasce fiduciarie per la distribuzione Log-Normale 49

Figura 25. Fasce fiduciarie per la distribuzione di Gumbel 50

Figura 26. Fasce fiduciarie per la distribuzione di Frechet 50

Figura 27. Intervalli di confidenza della distribuzione di Frechet..... 59

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Distribuzione percentuale degli eventi ondosi per classi di altezza e direzione di provenienza 20

Tabella 2. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda e periodo significativo 21

Tabella 3. Distribuzione percentuale degli eventi ondosi per classi di altezza e direzione di provenienza (primavera) 22

Tabella 4. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda e periodo (primavera) 23

Tabella 5. Distribuzione percentuale degli eventi ondosi per classi di altezza e direzione di provenienza (estate) 24

Tabella 6. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda e periodo (estate) 25

Tabella 7. Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di altezza e direzione di provenienza (autunno) 26

Tabella 8. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda e periodo (autunno) 27

Tabella 9. Distribuzione percentuale degli eventi ondosi per classi di altezza e direzione di provenienza (inverno) 28

Tabella 10. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda e periodo (inverno) 29

Tabella 11. Vita di progetto minima dell'opera 32

Tabella 12. Massima probabilità di danneggiamento ammissibile nel periodo di vita dell'opera . 32

Tabella 13. Risultati del test di Pearson 53

Tabella 14. Risultati del test di Pearson 55

Tabella 15. Risultati del test di Pearson 56

PROGETTO:	**PROGETTO DEFINITIVO PORTO DI SANTA MARGHERITA LIGURE** **MESSA IN SICUREZZA ED ADEGUAMENTO FUNZIONALE CON RIQUALIFICAZIONE DEGLI ORMEGGI E DEL LITORALE SUD**
SOGGETTO PROMOTORE:	**SANTA BENESSERE & SOCIAL S.p.a.** Santa Benessere & Social S.p.a. T +39 0185 320868 Piazza Mazzini, 12 F +39 0185 323189 16045 Chiavari (GE) E mfelugo@yahoo.it PRESIDENTE: Maurizio Felugo - PROJECT MANAGER: Ing. Pietro Zanoni - ASSISTENZA TECNICA: Arch. Gio Gozzi
ARCHITETTURA:	**OBR** Open Building Research S.r.l. T +39 02 84268200 Via Ciovasso, 4 F +39 02 8268250 20121 Milano E info@obr.eu RESPONSABILE: Arch. Paolo Brescia - COORDINAMENTO: Arch. Andrea Casetto
INGEGNERIA IDRAULICO-MARITTIMA:	**ACQUATECNO** Acquatecno S.r.l. T +39 06 44702081 Via Ajaccio, 14 F +39 06 44704906 00198 Roma E info@acquatecno.it RESPONSABILE: Ing. Paolo Turbolente
INGEGNERIA STRUTTURALE:	**MILAN INGEGNERIA** Milan Ingegneria S.r.l. T +39 02 36798890 Via Thaon di Revel, 21 F +39 02 36798892 20159 Milano E info@buromilan.com RESPONSABILE: Ing. Maurizio Milan
INGEGNERIA IMPIANTISTICA, PREVENZIONE INCENDI E SICUREZZA:	**UNITED CONSULTING** United Consulting T + 39 02 45397370 Via Thaon di Revel, 21 E info@unitedconsulting.it 20152 Milano RESPONSABILE: Ing. Luca Giannelli
DOCUMENTI TECNICO-ECONOMICI:	**GAD** Global Assistance Development S.r.l. T +39 02 29005672 via Maurizio Quadrio, 12 F +39 02 65560517 20154 Milano E info@gadstudio.e RESPONSABILE: Geom. Gianpiero Aresi
URBANISTICA:	**ARCH. CARLO BERIO** Arch. Carlo Berio T +39 010 8398483 Piazza Marsala, 13 E carloberio@studioberio.it 16122 Genova RESPONSABILE: Arch. Carlo Berio
CONSULENZA LEGALE:	**IADEVAIA** Iadevaia - Studio Legale e Tributario T +39 02 92801820 Via Giacomo Leopardi, 21 F +39 02 92801820 20123 Milano E alberto@iadevaia.it RESPONSABILE: Avv. Alberto Iadevaia
RILIEVO:	**GEO-T.E.C.** GEO-T.E.C. Studio Tecnico Topografico Associato T +39 0185 62830 Corso Italia, 9 int.2 F +39 0185 1831378 16035 Rapallo (GE) E geotec@geotecrapallo.it RESPONSABILE: Geom. Paolo Ghigliotti
GEOLOGIA E AMBIENTE:	**GEOLAMBDA** Geolambda Engineering S.r.l T +39 0377 433021 Via A. Diaz, 22 F +39 0377 402035 26845 Codogno (LO) E segreteria@geolambda.it RESPONSABILE: Geol. Marco Daguati
ARCHEOLOGIA:	**STUDIUM S.A.S. ARCHEOLOGIA** Studium S.a.s. Archeologia T +39 011 855666 Via Marco Polo, 32 bis F +39 011 855666 10129 Torino E info@studiumarcheologia.com RESPONSABILE: Dott.ssa Frida Occelli
TITOLO ELABORATO:	# Opere Marittime Studio della propagazione del moto ondoso da largo a riva

CODICE PROGETTO	LIVELLO PROGETTAZIONE	DISCIPLINA	QUADRANTE	NUMERO ELABORATO	REVISIONE
079	PD	OM	-	0003	-

NOME FILE	SCALA	EMESSO DA	DATA PRIMA EMISSIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
079_PD_OM_0003_0.dwg	-	ACQ	04-12-2017	P.Turbolente	P.Turbolente	P.Turbolente

REVISIONI:

NUMERO REVISIONE	DATA REVISIONE	OGGETTO REVISIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO

1. PREMESSA 1

2. CONDIZIONI ONDOSE DI RIFERIMENTO 2

3. MODELLO DI CALCOLO UTILIZZATO 3

3.1. SW (Spectral Wave) 3

3.2. Definizione delle griglie di calcolo (SW) 4

3.3. Periodo di simulazione e passo di integrazione 6

3.4. Risultati delle simulazioni 6

4. CONCLUSIONI 12

INDICE DELLE FIGURE 13

INDICE DELLE TABELLE 14

1. PREMESSA

Nell'ambito della progettazione definitiva del porto si Santa Margherita Ligure (GE), è stato effettuato lo studio di trasferimento largo-riva del moto ondoso in prossimità del porto per verificarne l'operabilità in funzione delle modifiche previste dal progetto definitivo.

Nella figura 1 è riportata l'area di studio.



Figura 1. Vista aerea del porto di Santa Margherita Ligure

Per la simulazione numerica bidimensionale è stato utilizzato il modello matematico MIKE 21, sviluppato dal Danish Hydraulic Institute. Esso è basato sulla risoluzione alle differenze finite su griglia strutturata o flessibile, ed è costituito da differenti moduli che implementano le numerose equazioni che governano gran parte dei fenomeni idraulici riscontrabili in un determinato sistema marino.

Nel caso in esame sono stati utilizzati il modello SW (Spectral Wave), che consente di simulare la penetrazione ondosa all'interno del bacino portuale tenendo conto di vari fenomeni quali shoaling, diffrazione, rifrazione, riflessione semplice e l'amplificazione ondosa indotta dal vento che spira all'interno di esso.

2. CONDIZIONI ONDOSE DI RIFERIMENTO

Per la definizione di moto ondoso (altezza, periodo, direzione di provenienza) in prossimità del porto di Santa Margherita Ligure sono stati utilizzati i dati ricavati dallo studio meteomarino redatto in questa fase progettuale per poter poi propagare tali valori in prossimità dell'imboccatura portuale.

Nella tabella 1 sono riportate le caratteristiche del moto ondoso utilizzato:

Tr[anni]	Hs[m]	ts[s]	Dir[°N]
5	5.31	7.94	180
10	5.69	8.09	180
50	6.68	8.45	180
112	7.23	7.51	180
154	7.47	8.72	180

Tabella 1. Tabella dati ondosi

La scelta di tali dati ondosi è stata fatta per poter analizzare in dettaglio la condizione ondosa in prossimità delle opere di difesa per poter poi individuare l'onda di progetto più gravosa ed il moto ondoso ordinario per il calcolo dell'agitazione ondosa interna al porto.

La propagazione all'interno del dominio di calcolo delle condizioni ondose, individuate precedentemente, viene eseguita dal modello considerando l'intero spettro in termini di direzione e frequenza, utilizzando in particolare onde direzionali irregolari con spettro JONSWAP medio. Nel caso in esame è stata simulata anche la presenza di un innalzamento del livello medio mare di +0.50m dovuto alle maree ed allo storm-surge.