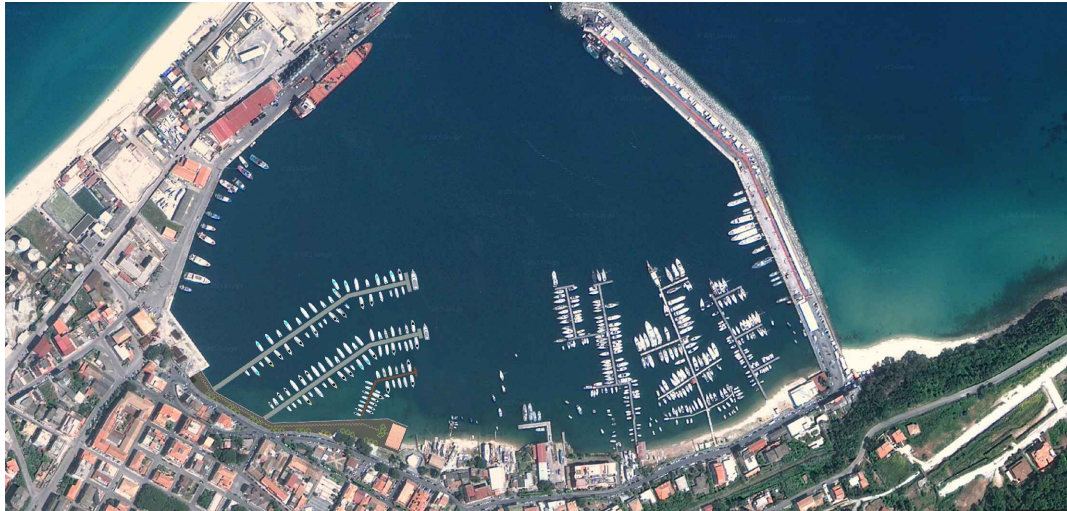


CADI s.r.l.



Porto Turistico "Marina Resort"

PROGETTO DEFINITIVO

Elaborato:

**RELAZIONE IDRAULICA-MARITTIMA E VERIFICA
AGITAZIONE INTERNA**

Rel.

R5

I progettisti:

Ing. Gianluca CANTISANI
Ing. Alberto BORSANI



Data: Febbraio 2015

Integrazione:
Aprile-Settembre 2021

STUDIO SPECIALISTICO IDRAULICO-MARITTIMO
E VERIFICA DI AGITAZIONE INTERNA

INDICE

PREMESSA.....	2
1. CLIMA METEOMARINO	3
1.1. Clima ondoso a largo di Cetraro	3
1.2. Trasposizione dei dati a largo di Vibo Valentia Marina	9
1.3. Clima ondoso al largo di Vibo Valentia Marina	18
1.4. Correlazioni altezza d'onda-periodo.....	21
2. PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA	24
2.1. Modello numerico di calcolo.....	24
2.2. Set-up modello numerico	30
2.3. Clima medio ondoso sottocosta.....	40
3. ANALISI EVENTI ESTREMI	46
4. CALCOLO DEI SOVRALZI	55
5. VERIFICA DELL'AGITAZIONE ONDOSA NELL'AREA DI STUDIO	59
5.1. Selezione scenari.....	61
5.2. Modello numerico di calcolo.....	64
5.3. Set-up modello numerico	67
5.3.1. Caratterizzazione perimetro portuale	67
5.3.2. Griglia computazionale di calcolo.....	68
5.3.3. Settaggio simulazioni.....	71
5.4. Risultati.....	71
5.4.1. Verifica agitazione ondosa – stato di fatto.....	71
5.4.2. Verifica agitazione ondosa – stato di progetto	80
6. CONCLUSIONI.....	89

PREMESSA

Il presente studio riguarda la caratterizzazione del paraggio di Vibo Valentia Marina in merito alle condizioni meteomarine a cui è esposto il porto, in particolare il clima medio ondosso e le condizioni estreme tipiche degli eventi di mareggiata. Inoltre, i risultati ottenuti dalla caratterizzazione sono stati utilizzati per la verifica delle condizioni di agitazione a cui sono potrebbero essere sottoposti i natanti ormeggiati in corrispondenza delle nuove opere previste per la realizzazione del porto turistico Marina Resort.

La presente relazione specialistica, commissionata dalla proponente CADI s.r.l., si rende necessaria, ad integrazione del progetto, a seguito della richiesta del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Provveditorato Interregionale per le OO.PP. Sicilia e Calabria – Ufficio 6, formulata in fase di conferenza dei servizi con nota prot. n. 30150 del 07/12/2020.

La prima parte dello studio ha riguardato la selezione dei dati meteomarini utilizzati per le analisi. In particolare, nel Capitolo 1 vengono analizzate i dati d'onda disponibili dalle serie storiche dell'altezza d'onda, periodo e direzione rilevati dalla boa ondometrica R.O.N. di Cetraro (CS).

Successivamente, nel Capitolo 2 i dati meteomarini della boa R.O.N. sono stati opportunamente trasferiti al largo del paraggio di Vibo Valentia Marina, attraverso il metodo della trasposizione geografica, che consente la determinazione dei valori di altezza e periodo nell'area oggetto di studio. Le analisi sono effettuate in base all'esposizione geografica dei paraggi all'azione dei venti foranei attraverso la determinazione dei fetch.

Nel Capitolo 3, le classi di altezza d'onda associate ai settori direzionali di provenienza delle onde sono state propagate da largo a sottocosta, in modo da determinare gli effetti che concorrono alla dissipazione ed evoluzione del moto ondosso durante la propagazione. Lo studio è stato condotto attraverso un modello numerico, basato sull'evoluzione spaziale dello spettro d'energia del moto ondosso, che tiene conto degli effetti di shoaling, rifrazione, trasmissione, diffrazione e frangimento.

Sulla base del clima meteomarino al largo, nel Capitolo 4 è stata condotta l'analisi statistica degli eventi estremi per il paraggio di Vibo Valentia Marina, per differenti settori di traversia, finalizzata alla determinazione delle onde per un assegnato tempo di ritorno.

La verifica dell'agitazione interna al bacino è stata preceduta, nel Capitolo 5, dall'analisi delle variazioni del livello marino, dovute all'azione concomitante di vento, marea, onde e variazioni atmosferiche.

Infine, nel Capitolo 6 è stato condotto lo studio di agitazione interna per la verifica delle condizioni di sicurezza nell'area in cui è prevista la realizzazione del nuovo Porto Marina Resort di Vibo Valentia Marina.

1. CLIMA METEOMARINO

1.1. Clima ondososo a largo di Cetraro

La caratterizzazione del moto ondososo al largo di Vibo Valentia Marina è stata effettuata a partire dall'analisi delle serie storiche registrate dagli ondometri del Tirreno Centro-Meridionale della Rete Ondometrica Nazionale (RON) del Sistema Idrografico e Mareografico Nazionale, aventi una sufficiente serie storica di dati ed un'esposizione del paraggio simile a quella di Vibo Valentia Marina, oggetto del presente studio. In particolare, è stato preso in esame l'ondometro ormeggiato al largo di Cetraro.

Lo scopo è ben raggiunto tanto più la serie di dati utilizzata per la modellazione è ampia. La boa di Cetraro è del tipo Datawell Directional Waverider MKII e registra i dati di moto ondososo a partire dal febbraio del 1999 (Figura 1). È localizzata nel punto di coordinate geografiche Latitudine 39° 29' 28" e Longitudine 15° 52' 16" e allo stato attuale, le registrazioni a disposizione della boa di Cetraro coprono il periodo febbraio 1999 - aprile 2008. Tale estensione risulta sufficiente per la definizione di un clima meteomarino e per la successiva analisi degli eventi estremi, tenute conto le limitazioni nella valutazione degli stati di mare associati ad elevati tempi di ritorno.



Figura 1: Boa Datawell Directional Waverider (ondometro di Cetraro)

Per la definizione del clima ondoso al largo di Cetraro, sono state effettuate le elaborazioni dei dati trionari dell'altezza d'onda significativa, del periodo di picco, della direzione media di propagazione, la temperatura dell'acqua, la densità spettrale, la direzione media spettrale di propagazione, curtosi, skewness e spread. I dati meteomarini della boa in esame sono stati acquisiti presso il sito www.idromare.it, previa opportuna registrazione.

La durata dello stato di mare per la definizione delle grandezze di cui sopra è pari a circa 20 minuti. I dati delle serie storiche vengono acquisiti normalmente per un periodo di 30 minuti ogni tre ore e con intervalli inferiori nel caso di mareggiate particolarmente significative, essendo, $H_{s\text{soglia}}$ (valore soglia per l'attivazione in continuo dell'ondametro) > 4.5 m per la boa di Cetraro. In alternativa, le serie storiche vengono forniti agli utenti attraverso appositi bollettini ondametrici trimestrali nel seguente formato:

1992	1	1	0	00	70	40	36	133
1992	1	1	3	00	60	43	36	135
1992	1	1	6	00	80	50	39	142
1992	1	1	9	00	70	53	36	179

dove:

- la 1^a colonna rappresenta l'anno;
- la 2^a colonna rappresenta il mese;
- la 3^a colonna rappresenta il giorno;
- la 4^a colonna rappresenta l'ora;
- la 5^a colonna rappresenta una colonna vuota;
- la 6^a colonna rappresenta l'altezza d'onda significativa (cm);
- la 7^a colonna rappresenta il periodo di picco (10^{-1} s)
- l'8^a colonna rappresenta il periodo medio (10^{-1} s)
- la 9^a colonna rappresenta la direzione media di provenienza ($^{\circ}$ N).

I dati totali della serie storica dalla boa posta al largo di Cetraro, per il periodo di tempo compreso tra il 27 febbraio del 1999 e il 5 aprile del 2008 (ultimo giorno di registrazione attualmente disponibile su www.idromare.it), risultano pari a 95266.

La serie storica è stata successivamente sottoposta ad opportuna validazione, attraverso l'eliminazione degli eventi non registrati dalla boa e gli eventi considerati anomali. In particolare, sono stati adottati i seguenti criteri di validazione dei dati:

- Eliminazione dei cosiddetti "outliers", rappresentati da stati di mare caratterizzati da valori di H_s , T_m e T_p eccessivamente elevati e non compatibili con l'esposizione in mare aperto della boa in esame;

- Eliminazione dei dati non registrati della boa, presenti nelle serie storiche registrati come dati pari a 0.
- Controllo tra 2 rilevazioni ondametriche successive della variazione del valore di altezza d'onda significativa, che deve essere inferiore a 1.5 m;
- Controllo tra 2 rilevazioni ondametriche successive della variazione del valore del periodo di picco, che deve essere inferiore a 5 s;
- Se vengono riscontrate le 2 succitate condizioni su H_s e T_p , ma la direzione di provenienza dell'evento ondoso tra 2 rilevazioni risulta maggiore di 30° , il dato ondametrico può essere considerato valido;
- Controllo per ogni evento registrato della ripidità massima compatibile dell'onda in acque profonde ($d/L_p > 0.5$, essendo d la profondità ed L_p la lunghezza di picco dell'onda) con il limite di stabilità geometrico; per ogni registrazione, deve essere verificato che:

$$\frac{H_s \cdot 2 \cdot \pi}{9.81 \cdot T_p^2} < 0.1$$

- Controllo per ogni evento registrato della non eccessiva differenza fra i valori di periodo di picco e di periodo medio; per ogni registrazione, deve essere verificato che:

$$\frac{T_p}{T_m} < 2$$

- Controllo delle eventuali ripetizioni della singola registrazione ondametrica a causa del malfunzionamento momentaneo della boa.

Sulla base di tali preliminari verifiche, gli eventi ondosi da considerare per le successive modellazioni meteomarine sono pari a 80086. Pertanto, il rendimento η , espresso in %, della boa RON di Cetraro nel periodo 1999-2008 risulta pari a:

$$\eta = \frac{n. \text{dati filtrati}}{n. \text{dati grezzi}} \cdot 100 = 84.07 \%$$

essendo, di conseguenza, la percentuale di inefficienza della boa in esame pari al 15.93 %. Pertanto, le osservazioni ondametriche filtrate sono state ordinate per classi di altezza d'onda significativa pari a 0.5 m e per settori direzionali di provenienza del moto ondoso pari a 10° .

Gli eventi caratterizzati da $H_s < 0.25$ m sono stati considerati come calme. Dall'analisi della Tabella 1 si osserva come gli eventi di moto ondoso caratterizzati da elevati

CADI s.r.l.
Porto Turistico "Marina Resort"

STUDIO IDRAULICO-MARITTIMO E VERIFICA DI AGITAZIONE INTERNA

valori di altezza d'onda significativa risultano essere compresi nei settori direzionali provenienti prevalentemente da Ovest (250°-260°N, 260°-270°N e 270°-280°N).

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)																	
		calme	0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	2.75-3.25	3.25-3.75	3.75-4.25	4.25-4.75	4.75-5.25	5.25-5.75	5.75-6.25	6.25-6.75	6.75-7.25	7.25-7.75	7.75-8.25	TOTALE
Dir (°N)																			
0	10	79	196	73	23	11	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	390
10	20	60	192	76	32	14	6	1	2	1	1	0	0	0	2	0	0	0	387
20	30	56	191	89	23	10	5	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	379
30	40	45	321	109	27	8	5	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	520
40	50	45	423	266	52	15	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	808
50	60	47	629	400	34	7	6	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1128
60	70	75	495	253	45	18	9	4	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	902
70	80	112	389	157	35	13	3	2	2	1	0	0	0	1	0	1	0	0	716
80	90	141	247	91	47	8	5	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	543
90	100	141	227	115	66	12	16	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	581
100	110	64	180	102	44	18	8	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	419
110	120	54	165	95	42	8	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370
120	130	46	136	94	31	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	315
130	140	41	120	48	25	9	3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	248
140	150	45	145	69	22	11	3	2	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	300
150	160	58	148	80	34	9	6	8	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	347
160	170	48	196	130	40	16	7	6	2	1	5	0	0	0	0	0	0	0	451
170	180	66	377	184	41	13	6	4	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	695
180	190	169	891	387	76	18	8	7	3	2	2	0	0	0	0	0	0	0	1563
190	200	277	1141	478	117	22	4	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2048
200	210	323	1114	516	98	24	10	11	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	2101
210	220	430	832	326	87	33	18	29	7	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1764
220	230	494	694	285	112	55	32	13	7	5	0	0	1	0	0	0	0	0	1698
230	240	770	873	397	209	119	43	12	5	6	1	0	1	0	0	0	0	0	2436
240	250	1314	2064	1177	655	393	179	82	27	24	4	2	2	2	0	0	0	0	5925
250	260	2376	5226	2905	1618	740	359	168	106	57	31	14	8	3	2	0	0	0	13613
260	270	3436	5719	2796	1549	745	358	129	77	34	20	15	2	0	1	1	0	1	14883
270	280	3109	4347	2189	904	328	128	103	62	27	3	0	6	1	0	0	0	0	11207
280	290	1862	2898	1337	482	220	115	49	12	18	9	0	5	0	0	0	0	0	7007
290	300	834	1181	509	137	42	19	10	3	6	2	0	0	0	1	0	1	0	2745
300	310	357	588	219	85	25	9	3	3	4	0	0	0	0	1	0	0	0	1294
310	320	124	400	163	23	20	12	6	2	3	0	0	2	0	0	0	0	0	755
320	330	80	222	120	26	18	2	3	5	1	2	1	1	0	0	0	0	0	481
330	340	72	167	86	30	13	1	3	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	376
340	350	66	133	90	29	12	4	1	6	1	0	0	0	0	1	0	0	0	343
350	360	56	159	89	21	11	5	3	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	348
TOTALE		17372	33426	16500	6921	3043	1407	692	346	202	91	35	30	7	10	2	1	1	80086

Tabella 1: Numero di apparizioni del moto ondoso al largo di Cetraro

I dati di moto ondoso al largo di Cetraro sono stati ulteriormente elaborati per le succitate classi d'altezza significativa e settori direzionali di provenienza del moto ondoso, determinando per ciascuna di essa la frequenza semplice di apparizione delle onde (vedi Tabella 2).

Gli stessi risultati ottenuti dai dati di boa di Cetraro sono riportati in Figura 2 in forma di istogramma, in cui le calme ($H_s < 0.25$ m) sono state separate dagli eventi di moto ondoso ($H_s > 0.25$ m).

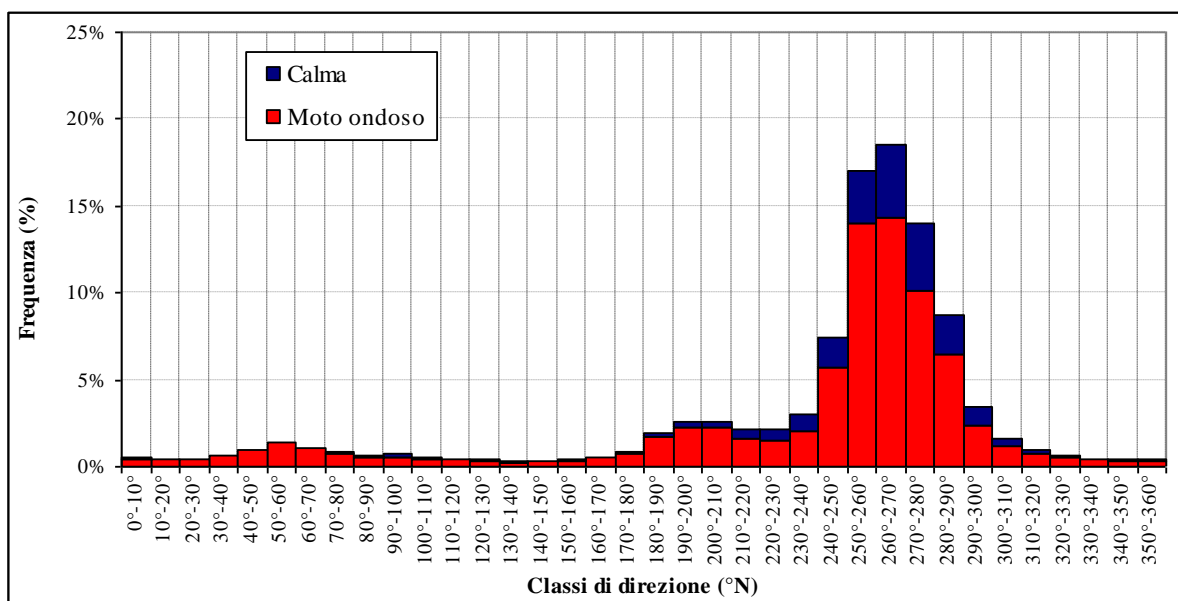


Figura 2: Istogramma delle percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Cetraro

CADI s.r.l.
Porto Turistico "Marina Resort"

STUDIO IDRAULICO-MARITTIMO E VERIFICA DI AGITAZIONE INTERNA

Dir (°N)		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)																TOTALE	
		calme	0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	2.75-3.25	3.25-3.75	3.75-4.25	4.25-4.75	4.75-5.25	5.25-5.75	5.75-6.25	6.25-6.75	6.75-7.25	7.25-7.75		7.75-8.25
0	10	0.099%	0.245%	0.091%	0.029%	0.014%	0.004%	0.004%	0.001%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.487%
10	20	0.075%	0.240%	0.095%	0.040%	0.017%	0.007%	0.001%	0.002%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.483%
20	30	0.070%	0.238%	0.111%	0.029%	0.012%	0.006%	0.005%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.473%
30	40	0.056%	0.401%	0.136%	0.034%	0.010%	0.006%	0.001%	0.001%	0.002%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.649%
40	50	0.056%	0.528%	0.332%	0.065%	0.019%	0.006%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	1.009%
50	60	0.059%	0.785%	0.499%	0.042%	0.009%	0.007%	0.005%	0.000%	0.000%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	1.408%
60	70	0.094%	0.618%	0.316%	0.056%	0.022%	0.011%	0.005%	0.001%	0.000%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	1.126%
70	80	0.140%	0.486%	0.196%	0.044%	0.016%	0.004%	0.002%	0.002%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.001%	0.000%	0.001%	0.000%	0.000%	0.894%
80	90	0.176%	0.308%	0.114%	0.059%	0.010%	0.006%	0.002%	0.001%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.678%
90	100	0.176%	0.283%	0.144%	0.082%	0.015%	0.020%	0.005%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.725%
100	110	0.080%	0.225%	0.127%	0.055%	0.022%	0.010%	0.001%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.523%
110	120	0.067%	0.206%	0.119%	0.052%	0.010%	0.005%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.462%
120	130	0.057%	0.170%	0.117%	0.039%	0.006%	0.001%	0.001%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.393%
130	140	0.051%	0.150%	0.060%	0.031%	0.011%	0.004%	0.000%	0.001%	0.000%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.310%
140	150	0.056%	0.181%	0.086%	0.027%	0.014%	0.004%	0.002%	0.000%	0.002%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.375%
150	160	0.072%	0.185%	0.100%	0.042%	0.011%	0.007%	0.010%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.433%
160	170	0.060%	0.245%	0.162%	0.050%	0.020%	0.009%	0.007%	0.002%	0.001%	0.006%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.563%
170	180	0.082%	0.471%	0.230%	0.051%	0.016%	0.007%	0.005%	0.001%	0.002%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.868%
180	190	0.211%	1.113%	0.483%	0.095%	0.022%	0.010%	0.009%	0.004%	0.002%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	1.952%
190	200	0.346%	1.425%	0.597%	0.146%	0.027%	0.005%	0.011%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	2.557%
200	210	0.403%	1.391%	0.644%	0.122%	0.030%	0.012%	0.014%	0.001%	0.001%	0.001%	0.001%	0.000%	0.000%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	2.623%
210	220	0.537%	1.039%	0.407%	0.109%	0.041%	0.022%	0.036%	0.009%	0.000%	0.001%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	2.203%
220	230	0.617%	0.867%	0.356%	0.140%	0.069%	0.040%	0.016%	0.009%	0.006%	0.000%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	2.120%
230	240	0.961%	1.090%	0.496%	0.261%	0.149%	0.054%	0.015%	0.006%	0.007%	0.001%	0.000%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	3.042%
240	250	1.641%	2.577%	1.470%	0.818%	0.491%	0.224%	0.102%	0.034%	0.030%	0.005%	0.002%	0.002%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	7.398%
250	260	2.967%	6.525%	3.627%	2.020%	0.924%	0.448%	0.210%	0.132%	0.071%	0.039%	0.017%	0.010%	0.004%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	16.998%
260	270	4.290%	7.141%	3.491%	1.934%	0.930%	0.447%	0.161%	0.096%	0.042%	0.025%	0.019%	0.002%	0.000%	0.001%	0.001%	0.000%	0.001%	18.584%
270	280	3.882%	5.428%	2.733%	1.129%	0.410%	0.160%	0.129%	0.077%	0.034%	0.004%	0.007%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	13.994%
280	290	2.325%	3.619%	1.669%	0.602%	0.275%	0.144%	0.061%	0.015%	0.022%	0.011%	0.000%	0.006%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	8.749%
290	300	1.041%	1.475%	0.636%	0.171%	0.052%	0.024%	0.012%	0.004%	0.007%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.001%	0.000%	0.001%	0.000%	3.428%
300	310	0.446%	0.734%	0.273%	0.106%	0.031%	0.011%	0.004%	0.004%	0.005%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	1.616%
310	320	0.155%	0.499%	0.204%	0.029%	0.025%	0.015%	0.007%	0.002%	0.004%	0.000%	0.000%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.943%
320	330	0.100%	0.277%	0.150%	0.032%	0.022%	0.002%	0.004%	0.006%	0.001%	0.002%	0.001%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.601%
330	340	0.090%	0.209%	0.107%	0.037%	0.016%	0.001%	0.004%	0.000%	0.000%	0.002%	0.001%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.469%
340	350	0.082%	0.166%	0.112%	0.036%	0.015%	0.005%	0.001%	0.007%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.428%
350	360	0.070%	0.199%	0.111%	0.026%	0.014%	0.006%	0.004%	0.002%	0.000%	0.001%	0.000%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.435%
TOTALE		21.692%	41.738%	20.603%	8.642%	3.800%	1.757%	0.864%	0.432%	0.252%	0.114%	0.044%	0.037%	0.009%	0.012%	0.002%	0.001%	0.001%	100.000%

Tabella 2: Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Cetraro

In Figura 3 sono state riportate, sotto forma di diagramma polare, le frequenze di apparizione delle classi di altezza d'onda significativa suddivise in questo caso, per maggiore accuratezza, in settori direzionali di 10°. Gli eventi ondosi aventi $H_s > 4$ m sono stati raggruppati in una stessa classe in modo da avere una visualizzazione grafica più chiara. Si evince che il settore direzionale 260°-270°N rappresenta quello cui competono il maggior numero di eventi di moto ondoso e quelli più estremi, seguiti, in ordine decrescente, dai settori 250°-260°N e 270°-280°N.

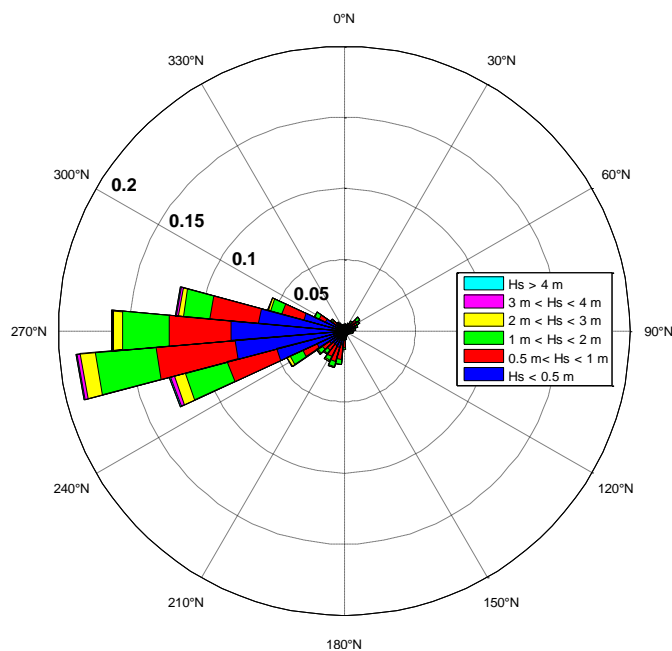


Figura 3: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso al largo di Cetraro

1.2. Trasposizione dei dati a largo di Vibo Valentia Marina

La definizione del clima di moto ondoso al largo di un paraggio risulta fondamentale per impostare gran parte degli studi che vengono eseguiti nel campo dell'ingegneria costiera e, più in generale, delle costruzioni marittime.

In generale, la fonte di dati più completa ed attendibile è costituita dalle serie storiche di misure registrate dagli ondometri. Tuttavia, in ragione del numero limitato di boe o strumenti presenti al largo delle coste italiane, il più delle volte il sito di interesse, pur ricadendo nella stessa area geografica, è situato in una posizione decentrata rispetto al tratto di mare "sotteso" dall'ondametro. Da qui nasce l'esigenza di ricorrere ad un metodo che consenta di "trasporre" geograficamente le misure ondometriche dal punto di misura a quello di interesse. Nel caso in esame, partendo dalle serie storiche dei dati di moto ondoso registrati dall'ondametro di Cetraro, occorre determinare quale sia il clima meteomarinico al largo del paraggio di Vibo Valentia Marina, che non risulta disporre di misure dirette di moto ondoso.

Il cosiddetto metodo della trasposizione geografica delle misure di moto ondoso, proposto da Contini e De Girolamo (1998), viene applicato per consentire il trasferimento dei dati di altezza d'onda significativa, periodo medio e periodo di picco. Un metodo empirico, applicato dai ricercatori del Laboratorio di Ingegneria Costiera del Politecnico di Bari, viene utilizzato per la determinazione della direzione di provenienza del moto ondoso nell'area di interesse, a partire dalla direzione del moto ondoso registrata dall'ondametro.

L'ipotesi di base del metodo della trasposizione geografica consiste nel supporre che le stesse condizioni di vento (velocità e direzione) che hanno determinato le condizioni di moto ondoso registrate dall'ondametro abbiano interessato anche l'area di generazione situata al largo del sito di interesse. Il metodo consiste nel determinare la corrispondenza tra le direzioni, le altezze ed i periodi del moto ondoso relativi al punto di misura (boa ondametrica di Cetraro) e a quello di interesse (boa virtuale di Vibo Valentia Marina) (Figura 4).

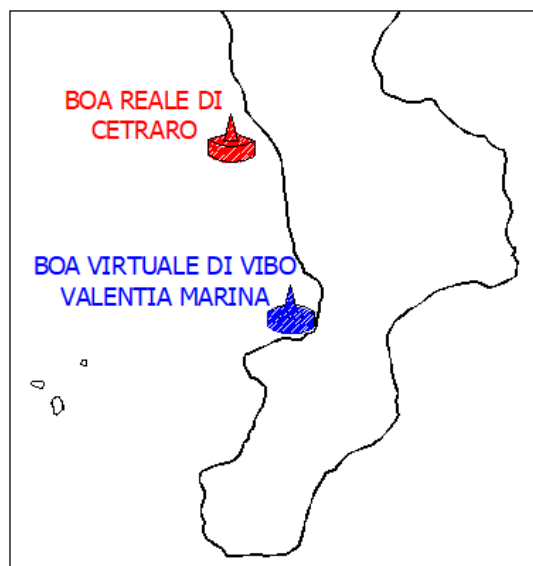


Figura 4: Localizzazione della boa ondametrica reale (Cetraro) e virtuale (Vibo Valentia Marina)

Le leggi che permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa H_s e il periodo medio T_m in funzione della lunghezza del fetch efficace e della velocità del vento sono le seguenti (Shore Protection Manual, 1984):

$$\frac{gH_s}{u_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left(\frac{gF_e}{u_A^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad ; \quad \frac{gT_m}{u_A} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left(\frac{gF_e}{u_A^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

dove:

- u_A è il fattore di velocità del vento ("wind stress factor"), dipendente in modo non lineare dalla velocità del vento misurata alla quota +10 m s.l.m.;
- F_e è il fetch efficace relativo ad una prefissata direzione geografica.

Per le analisi meteomarine di un paraggio e la definizione dell'esposizione geografica di una stazione di misura del moto ondoso o di un sito costiero, occorre determinazione i fetch geografici ed efficaci. Per fetch si intende la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso ad opera dell'azione esercitata dal vento. In bacini come il Mediterraneo, l'individuazione dei fetch può essere eseguita facendo ricorso al concetto di "fetch geografico" che indica la distanza geografica tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione. Nel Mediterraneo, in particolare, essendo assimilabile ad un bacino chiuso, si considera ai fini applicativi una distanza massima del fetch geografico pari a 500 km (Noli, 2004).

Ai fini della determinazione delle grandezze del moto ondoso a partire dai dati di vento e per poter determinare le grandezze del moto ondoso da un paraggio ad un altro, è necessario determinare i valori dei fetch efficaci sulla base dei valori dei fetch geografici individuati. Il fetch efficace viene introdotto per considerare l'effetto della larghezza del fetch e della dispersione direzionale dell'energia dell'onda sullo sviluppo e propagazione dell'onda. Il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione è funzione dei valori dei fetch geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata. In questo modo i fetch efficaci consentono di tener conto del fatto che il moto ondoso viene generato non solo nella direzione lungo la quale spira il vento ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore di $\pm 90^\circ$ rispetto alla direzione media di azione del vento. Di conseguenza la lunghezza dei fetch efficaci risulta essere diversa da quella dei fetch geografici. Il calcolo dei fetch efficaci, effettuato ogni 5° , può essere eseguito in base alla seguente relazione:

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

dove:

- $F_{e,w}$ è la lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione ϕ_w ;
- F_i è la lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima ϕ_i ;
- ϕ_w è la direzione media (riferita al Nord geografico) di possibile provenienza del vento;

- $\phi_w - \theta \leq \phi \leq \phi_w + \theta$ rappresenta la direzione i-esima (riferita al Nord geografico) relativa a un settore di ampiezza 2θ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w (il metodo di Saville prevede un valore di $\theta = 45^\circ$ mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di $\theta = 90^\circ$);
- θ è l'ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso;
- n è il termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente, si assume $n = 2$ per studi meteomarini effettuati nei mari italiani).

L'equazione precedente deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretschneider, 1947) e dai suoi successivi aggiornamenti (Saville, 1954; Seymour, 1977; Smith, 1991).

La definizione dei fetch geografici ed efficaci costituisce uno dei punti fondamentali degli studi meteomarini. Infatti, i valori dei fetch possono essere utilizzati nelle seguenti analisi:

- definizione preliminare dei settori di traversia principali e secondari per il sito di interesse;
- determinazione della correlazione tra direzione di provenienza del vento e quella del moto ondoso generato;
- ricostruzione indiretta del moto ondoso sulla base di misure anemometriche;
- trasposizione geografica di misure ondametriche;
- propagazione da largo a riva di stati di mare.

In Figura 5a sono indicati i fetch geografici relativi al transetto costiero di Vibo Valentia Marina. I valori massimi dei fetch geografici sono compresi fra le direzioni 265°N e 310°N , in cui i fetch, potenzialmente lunghi migliaia di km, sono tagliati a 500 km, sulla base delle esperienze acquisite negli studi meteomarini in Italia (Noli, 2004). A parità di velocità del vento spirante sulla superficie marina, da questo settore angolare possono provenire sul tratto costiero d'interesse gli attacchi ondosi più elevati. In Figura 5b sono invece indicati i fetch efficaci ottenuti per il paraggio di Vibo Valentia Marina.

In Figura 6a sono indicati i fetch geografici tracciati a partire dal punto in cui posizionata la boa ondametrica di Cetraro. I valori massimi dei fetch geografici sono compresi fra le direzioni 250°N e 300°N . Rispetto al paraggio di Vibo Valentia Marina, l'ondametro di Cetraro risulta leggermente più esposto agli attacchi ondosi provenienti da Ovest e Nord-Ovest. In generale, l'esposizione della boa di Cetraro ai venti foranei non risulta particolarmente differente da quella di Vibo Valentia Marina per i fetch più estesi. Maggiori differenze sui fetch fra i 2 siti si possono osservare da Sud-Ovest e Nord-Ovest. In Figura 6b sono invece indicati i fetch efficaci determinati per il paraggio di Cetraro.

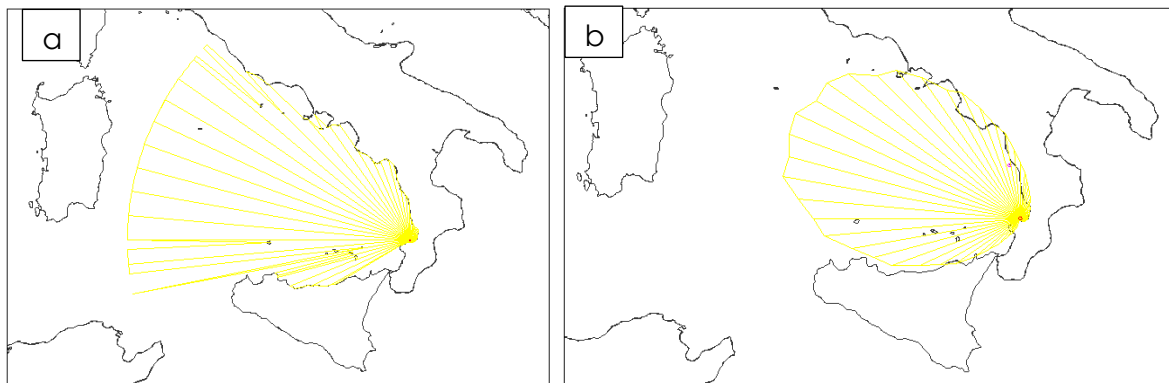


Figura 5: Tracciamento dei fetch geografici ed efficaci per il paraggio di Vibo Valentia Marina

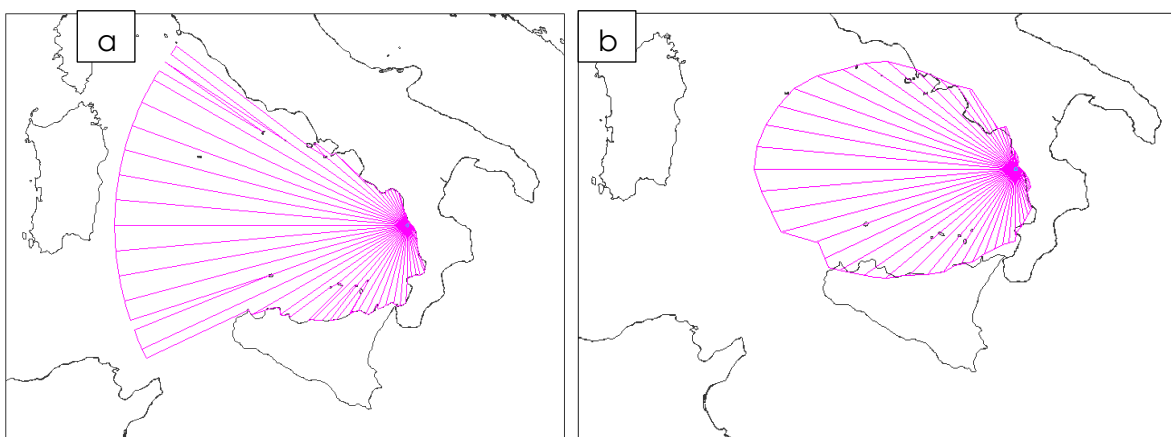


Figura 6: Tracciamento dei fetch geografici ed efficaci per il paraggio di Cetraro

In Tabella 3 sono mostrati, rispettivamente, i valori dei fetch efficaci, F_e , ed geografici, F_g , espressi in km, per Vibo Valentia Marina e Cetraro.

Direzione (°N)	Fe (km)	Fg (km)	Direzione (°N)	Fe (km)	Fg (km)	Direzione (°N)	Fe (km)	Fg (km)	Direzione (°N)	Fe (km)	Fg (km)
5	70.9	36	185	3.9	3.6	5	22.6	9	185	106.4	137.7
10	58.3	29.5	190	4.1	3.7	10	18.5	8.1	190	119.1	135.6
15	48.5	27.3	195	6.5	3.7	15	15.1	7.5	195	128.3	141.4
20	40.7	25	200	12.7	3.9	20	12.8	7.1	200	140.4	149.2
25	34.4	24.6	205	16.5	4.1	25	10.2	6.8	205	159.3	166
30	29.2	24.4	210	26.1	4.3	30	8.1	6.6	210	180.8	168.1
35	24.5	24.1	215	34.4	4.6	35	7	6.4	215	194.1	116.6
40	21.5	23.1	220	50.4	5.7	40	6.6	6.3	220	215.8	133.4
45	19.3	21.3	225	67.1	7	45	6.3	6.3	225	245	227.7
50	17.8	19.1	230	90.2	9.1	50	6.3	6.3	230	259.3	152.9
55	16.7	17	235	119.6	12.7	55	6.4	6.3	235	280.3	264.5
60	15.7	15.8	240	141.1	158.9	60	6.5	6.4	240	313.2	306.7
65	14.8	14.8	245	169.7	192.5	65	6.7	6.6	245	327.3	500
70	13.9	14	250	207.7	101.1	70	7	6.8	250	345.2	245
75	13	13.4	255	230.7	242.1	75	7.4	7.1	255	376.4	500
80	12.2	12.9	260	259.7	148.9	80	7.8	7.4	260	384.6	500
85	11.3	12.4	265	300.1	500	85	8.4	7.9	265	396.2	500
90	10.6	11.9	270	315.5	500	90	9.1	8.5	270	405.2	500
95	9.9	10.9	275	340.1	500	95	9.9	9.2	275	402.8	500
100	9.2	9.2	280	366.5	500	100	10.9	10	280	394	500
105	8.6	8.5	285	364.4	500	105	12	11.1	285	381.4	500
110	8	8.2	290	373.8	500	110	13.5	12.4	290	365.8	500
115	7.5	7.8	295	377.9	500	115	15.9	13.8	295	341.2	500
120	7	7.5	300	358.5	500	120	19.1	15.7	300	309.5	500
125	6.5	6.9	305	358.7	500	125	22.8	17.4	305	286	253
130	6.1	6.3	310	341.9	500	130	26.2	19.4	310	259.4	181.7
135	5.6	5.8	315	307.1	318.6	135	30.7	21.7	315	220.8	174.6
140	5.3	5.4	320	294.6	281.8	140	36.9	24.5	320	196	92.5
145	4.9	5	325	262.2	247.3	145	42.9	27.9	325	168.9	67.8
150	4.6	4.6	330	225.6	183.7	150	49.2	34	330	134.6	68.6
155	4.4	4.2	335	210.3	156.1	155	57.3	41.6	335	113.1	68.6
160	4.2	4	340	178.7	149.3	160	65.1	84.8	340	90.3	65.1
165	4	3.8	345	147	146.7	165	72.6	87.9	345	65.3	57.3
170	3.9	3.7	350	131.5	91.5	170	81.4	85.9	350	50	22.8
175	3.8	3.7	355	105.9	79.9	175	90.1	88.1	355	34.4	17.6
180	3.8	3.6	360	84.7	54.6	180	99.3	91	360	27.4	9.7

Vibo Valentia

Cetraro

Tabella 3 : Valori dei fetch efficaci, Fe, e geografici, Fg, per il paraggio di Vibo Valentia Marina e Cetraro

Indicando con gli apici O e P rispettivamente le grandezze relative al punto di misura ed al punto di trasposizione, e fissata una direzione geografica (direzione media da cui spira il vento) alla quale risultano associati i fetch efficaci F_e^P e F_e^O , le precedenti relazioni dello Shore Protection Manual permettono di ricavare la ricercata corrispondenza tra le altezze significative, H_s , ed i periodi medi, T_m , delle onde relative al punto O e al punto P:

$$\frac{H_s^P}{H_s^O} = \left(\frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{2}} ; \quad \frac{T_m^P}{T_m^O} = \left(\frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Per ottenere le precedenti relazioni si è supposto che il fattore di velocità del vento, u_A , sia lo stesso nei due punti messi a confronto (Cetraro-Vibo Valentia Marina).I

coefficienti di trasposizione per l'altezza d'onda significativa, $C_1 = \left(\frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{2}}$, per il

periodo medio, $C_2 = \left(\frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{3}}$ e per il periodo di picco, $C_3 = C_2 * T_p / T_m$, sono stati messi

a confronto con la direzione di provenienza del moto ondoso nella Figura 7, nel caso di trasferimento geografico dei dati da Cetraro a Vibo Valentia Marina. Nel calcolo del coefficiente C_3 , il rapporto T_p/T_m è stato determinato sulla base delle curve di regressione H_s-T_m e H_s-T_p per la boa reale di Cetraro (vedi paragrafo relativo alle correlazioni periodo-altezza d'onda).

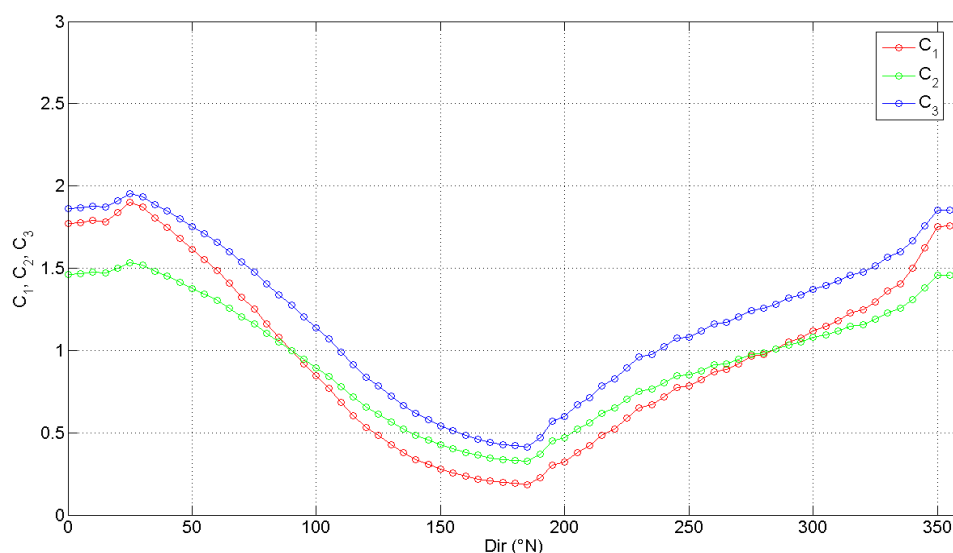


Figura 7: Coefficienti di trasposizione in funzione della direzione di provenienza del moto ondoso

Dall'analisi si evince un forte aumento dell'altezza d'onda significativa ($C_1 > 1$) e del periodo medio ($C_2 > 1$) per le direzioni di provenienza del moto ondoso comprese fra 280° e $80^\circ N$ e per il periodo di picco ($C_3 > 1$) per le direzioni comprese fra 240° e $120^\circ N$. L'aumento delle caratteristiche ondose lungo le succitate direzioni è dovuto alla particolare esposizione del paraggio di Vibo Valentia Marina, i cui fetch risultano più sviluppati nelle direzioni succitate. Nelle altre direzioni, cioè quelle ad Ovest, si osserva una diminuzione dei valori di C_1 , C_2 e C_3 .

Ai fini della determinazione della direzione del moto ondoso al largo del paraggio di Vibo Valentia Marina, occorre rilevare che il metodo dello Shore Protection Manual (SMB) da cui si determinano indirettamente i dati di moto ondoso dai dati di vento, prevede che la direzione di provenienza delle onde sia coincidente con quella del vento. La direzione dell'onda risulta in questo caso la media delle direzioni di tutte le registrazioni che compongono l'evento, pesata rispetto alle intensità, trascurando quindi gli effetti della geometria dell'area di generazione sulla direzione dell'onda.

Si rende quindi necessario introdurre delle relazioni finalizzate alla correzione della direzione del vento per tenere in considerazione che il trasferimento di energia dal vento al mare dipende anche dalla distribuzione direzionale dei fetch. Si può quindi pensare di assegnare allo stato di mare una direzione calcolata come media

pesata delle direzioni rispetto alla lunghezza del fetch geografico. Si ipotizza che il trasferimento di energia avvenga in un settore di ampiezza variabile tra $\pm 45^\circ$ intorno la direzione media del vento e che la funzione di trasferimento dell'energia sia rappresentabile da una potenza ennesima del coseno. In particolare, si può osservare che il trasferimento di energia si riduce lungo le direzioni più lontane da quella di provenienza, mentre aumenta lungo le direzioni a cui competono i fetch più estesi. Di conseguenza, le onde generate da venti spiranti da direzioni prossime ai limiti del settore di traversia tendono a propagarsi lungo direzioni più interne.

Lo scarto tra la direzione media del vento e la direzione del moto ondoso che esso genera, β , viene valutato attraverso una relazione empirica basata sugli studi meteomarini effettuati dai ricercatori del Laboratorio di Ingegneria Costiera del Politecnico di Bari:

$$\beta = \arctan \left(\frac{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \sin(\phi_i - \phi_w) \cos^n(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \cos(\phi_i - \phi_w) \cos^n(\phi_i - \phi_w)} \right)$$

- dove F_i è il fetch geografico valutato lungo le direzioni adiacenti alla direzione media del vento comprese in un settore di ampiezza variabile;
- ϕ_w è la direzione media (riferita al Nord geografico) di possibile provenienza del vento;
- $\phi_w - \theta \leq \phi \leq \phi_w + \theta$ rappresenta la direzione i -esima (riferita al Nord geografico) relativa a un settore di ampiezza 2θ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w ;
- θ è l'ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso, valutato in questo caso pari a 45° ;
- n è l'esponente del coseno, posto in questo caso pari a 2, come nella formula di Saville per il calcolo dei fetch efficaci.

Le grandezze succitate sono mostrate in Figura 8, con riferimento allo schema adottato per le convenzioni degli angoli relativi alle direzioni di provenienza del vento e del moto ondoso rispetto al Nord Cartografico. In particolare, θ_w rappresenta la direzione di propagazione del moto ondoso.

Pertanto, considerando costante la direzione di provenienza del vento nell'area del Tirreno in cui è posta la boa reale di Cetraro e quella virtuale di Vibo Valentia Marina, è possibile determinare, attraverso l'applicazione della legge di correlazione tra la direzione dell'onda e quella del vento, le direzioni del moto ondoso del punto di interesse (Vibo Valentia Marina) rispetto al Nord Cartografico, note le direzioni di provenienza del moto ondoso registrate dagli ondometri reali. In

Figura 9 viene mostrata la correlazione fra le direzioni del moto ondoso fra la boa reale di Cetraro e quella virtuale di Vibo Valentia Marina. Supponendo costante la direzione del vento, fissata una direzione del moto ondoso registrata dall'ondametro reale (Cetraro), si interseca la curva di correlazione onda-vento relativa all'ondametro in esame trovando la corrispondente curva di correlazione onda-vento relativa a Vibo Valentia Marina e la relativa nuova direzione del moto ondoso.

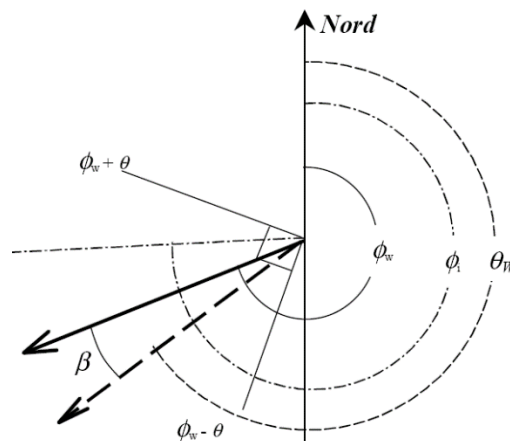


Figura 8: Schema di riferimento, convenzioni e simboli relativi alle direzioni del vento e del moto ondoso

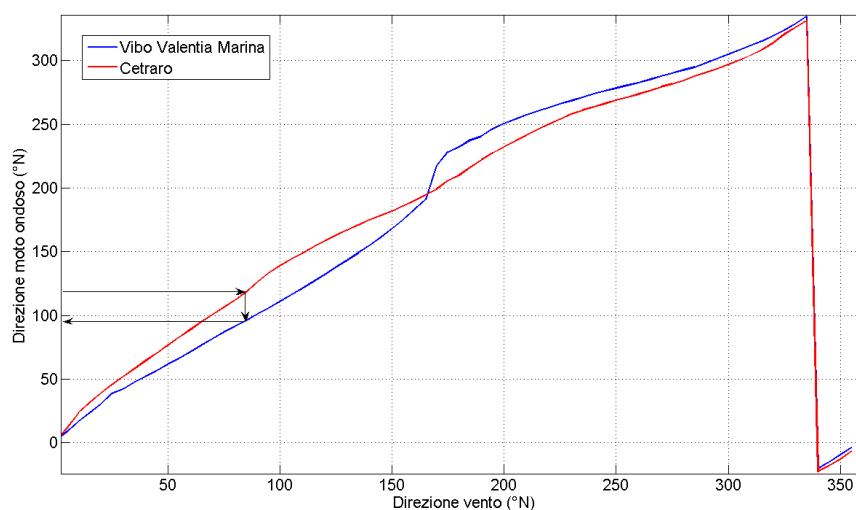


Figura 9: Variazione della direzione del moto ondoso rispetto a quella vento

L'entità della variazione che subisce la direzione di provenienza del moto ondoso durante la trasposizione geografica dell'evento ondoso dagli ondametri reali a quello virtuale al largo di Vibo Valentia Marina è mostrata in Figura 10.

Le massime deviazioni della direzione delle onde che si hanno passando da Cetraro a Vibo Valentia Marina risultano comprese circa fra $+20^{\circ}$ e -30° , a testimonianza

della differente esposizione geografica dei due paraggi nel settore 100°-220°N. La rotazione subita dalle onde nella trasposizione da Cetraro a Vibo Valentia Marina fa sì esse tendano a disporsi nelle direzioni in cui i fetch sono più sviluppati.

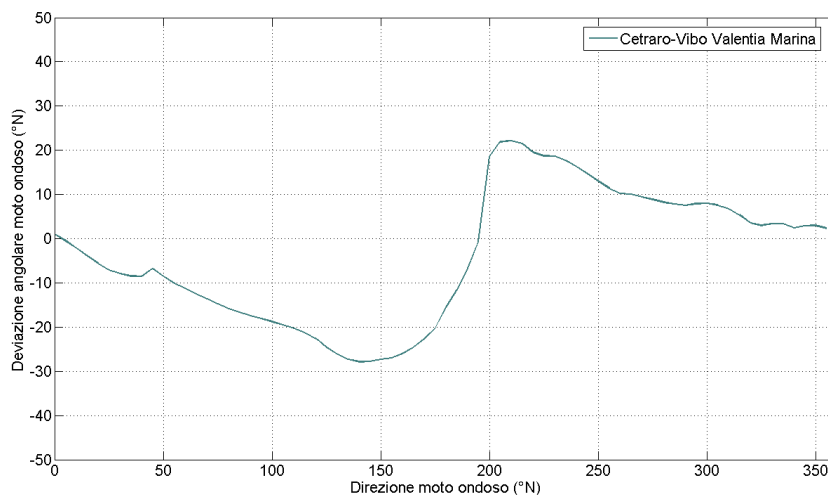


Figura 10: Variazione della deviazione angolare del moto ondoso fra la boa reale e quella virtuale

1.3. Clima ondoso al largo di Vibo Valentia Marina

L'applicazione del metodo della trasposizione geografica consente di determinare il clima meteomarinico al largo di Vibo Marina, con riferimento agli eventi ricadenti nel settore proprio di traversia a cui è esposto il paraggio, ovvero il settore angolare comprendente tutte le direzioni da cui si presumano possano provenire le agitazioni ondose determinate dai venti foranei. L'arco di circonferenza mostrato in Figura 11 è stato ottenuto considerando le possibili direzioni di provenienza delle onde sulla base della particolare esposizione del paraggio.

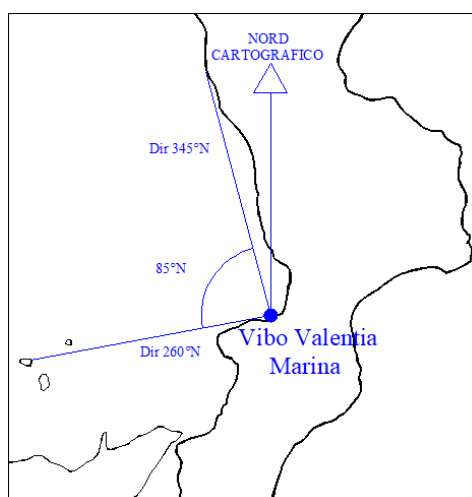


Figura 11: Individuazione del settore di traversia del paraggio di Vibo Valentia Marina

Per il paraggio in esame il settore di traversia è compreso tra 260°N e 345°N, per un'ampiezza angolare pari a 85°. La scelta di tale traversia è dettata dal fatto che l'allargamento del settore angolare, in particolare verso Nord (Golfo di Policastro) e Nord-Est (Golfo di Sant'Eufemia), comporta valori di moto ondoso eccessivi nella fase di trasposizione geografica, non risultando compatibili con le reali estensioni geografiche in mare aperto del paraggio di Vibo Valentia Marina in queste direzioni e con la presenza del porto.

La totalità degli eventi di moto ondoso nel settore di traversia al largo di Vibo Valentia Marina risulta il 69.97 % delle registrazioni della boa in mare aperto di Cetraro, che sono effettuate nell'intero settore angolare 0°-360°N. Gli eventi totali, afferenti al periodo 1999-2008, risultano 56037, di cui 14402 eventi di calma, caratterizzati da $H_s < 0.25$ m, che rappresentano il 25.70 % degli eventi totali.

In Tabella 4 e in Tabella 5 sono mostrati, rispettivamente, i numeri di apparizione e le percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Vibo Valentia Marina, con riferimento alla trasposizione dei dati ondometrici dalla boa di Cetraro.

Come si può osservare dall'istogramma mostrato in Figura 12 e dal diagramma polare mostrato in Figura 13 risulta che, con riferimento alla suddivisione dei settori direzionali effettuati al largo del paraggio di Vibo Valentia Marina, gli stati di mari più frequenti provengono dal settore di traversia 260°-270°N. Valori di H_s elevati risultano tuttavia afferenti ai settori direzionali 270°-280°N e 280°-290°N, i cui eventi massimi raggiungono un range di altezze significative che arrivano nel range 6.25-6.75 m. Si assiste ad una progressiva diminuzione degli stati di mare man mano che il settore angolare considerato (ogni 10° e l'ultimo con 15°) si sposta da Est e Nord: infatti, dal settore 330°-345° N si ha il minor numero di stati di mare afferenti. Infatti i valori massimi di altezza d'onda significativa risultano lievemente maggiori di quelli afferenti alle registrazioni della boa di Cetraro, poiché l'esposizione del paraggio di Vibo Valentia Marina è relativa a valori del fetch maggiormente sviluppati per i succitati settori angolari. L'applicazione della trasposizione geografica tende pertanto a far aumentare lievemente i valori di H_s , nel caso in cui i fetch nel sito di interesse sono maggiormente sviluppati. In particolare, dall'analisi del clima meteomarinario al largo del paraggio di Vibo Valentia Marina derivante dalla trasposizione dei dati di Cetraro emergono le seguenti caratteristiche:

- la percentuale degli eventi caratterizzata da un'altezza d'onda inferiore a 0.75 m è pari al 66.38 %;
- gli eventi più frequenti provengono, per il 30.37 % del totale dei casi, dal settore angolare 260°-270°N, per il 28.43 % dal settore 270°-280°N e per il 21.61 % dal settore 280°-290°N;

- i moti ondosi più intensi, aventi $H_s > 2.75$ m, rappresentano l'1.42 % degli eventi totali, provengono da tutti i settori angolari; in particolare, una forte aliquota degli stati di mare mediamente intensi proviene dal settore di traversa relativo agli eventi più frequenti, anche se eventi dalla direzione più esposta a Nord (330° - 345° N) risultano essere poco frequenti ma con buona percentuali di stati di mare tuttavia intensi;
- l'applicazione del metodo di trasposizione geografica delle onde ha comportato che gli eventi al largo del paraggio in esame tendano a concentrarsi nel settore angolare orientato dalla direzione normale al tratto di costa fino ad una direzione sub-parallela alla spiaggia proveniente da Est;

		Classi di altezza d'onda significativa, H_s (m)														
		calme	0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	2.75-3.25	3.25-3.75	3.75-4.25	4.25-4.75	4.75-5.25	5.25-5.75	5.75-6.25	6.25-6.75	TOTALE
Dir (°N)																
260	270	4019	6960	3430	1478	633	262	142	49	21	19	3	0	0	0	17016
270	280	4219	6430	2848	1417	599	226	112	40	29	7	2	1	2	0	15932
280	290	3491	4774	2324	859	321	156	97	51	26	3	4	4	0	0	12110
290	300	1649	2600	1196	421	192	95	41	12	9	10	3	1	1	0	6230
300	310	644	887	385	131	44	19	8	6	3	6	1	3	1	1	2139
310	320	246	632	237	103	22	27	9	8	2	2	2	0	0	1	1291
320	330	74	308	208	75	19	21	11	4	3	6	1	2	0	0	732
330	345	60	206	157	83	42	16	11	2	4	3	0	1	1	1	587
TOTALE		14402	22797	10785	4567	1872	822	431	172	97	56	16	12	5	3	56037

Tabella 4: Numero di apparizioni del moto ondoso al largo di Vibo Valentia Marina

		Classi di altezza d'onda significativa, H_s (m)														
		calme	0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	2.75-3.25	3.25-3.75	3.75-4.25	4.25-4.75	4.75-5.25	5.25-5.75	5.75-6.25	6.25-6.75	TOTALE
Dir (°N)																
260	270	7.172%	12.420%	6.121%	2.638%	1.130%	0.468%	0.253%	0.087%	0.037%	0.034%	0.005%	0.000%	0.000%	0.000%	30.366%
270	280	7.529%	11.475%	5.082%	2.529%	1.069%	0.403%	0.200%	0.071%	0.052%	0.012%	0.004%	0.002%	0.004%	0.000%	28.431%
280	290	6.230%	8.519%	4.147%	1.533%	0.573%	0.278%	0.173%	0.091%	0.046%	0.005%	0.007%	0.007%	0.000%	0.000%	21.611%
290	300	2.943%	4.640%	2.134%	0.751%	0.343%	0.170%	0.073%	0.021%	0.016%	0.018%	0.005%	0.002%	0.002%	0.000%	11.118%
300	310	1.149%	1.583%	0.687%	0.234%	0.079%	0.034%	0.014%	0.011%	0.005%	0.011%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	3.808%
310	320	0.439%	1.128%	0.423%	0.184%	0.039%	0.046%	0.016%	0.011%	0.002%	0.004%	0.002%	0.000%	0.000%	0.002%	2.295%
320	330	0.132%	0.550%	0.371%	0.134%	0.034%	0.037%	0.020%	0.007%	0.005%	0.011%	0.002%	0.004%	0.000%	0.002%	1.308%
330	345	0.107%	0.368%	0.280%	0.148%	0.075%	0.029%	0.020%	0.004%	0.007%	0.005%	0.000%	0.002%	0.002%	0.004%	1.049%
TOTALE		25.701%	40.682%	19.246%	8.150%	3.341%	1.465%	0.769%	0.303%	0.171%	0.100%	0.027%	0.016%	0.007%	0.007%	100%

Tabella 5: Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Vibo Valentia Marina

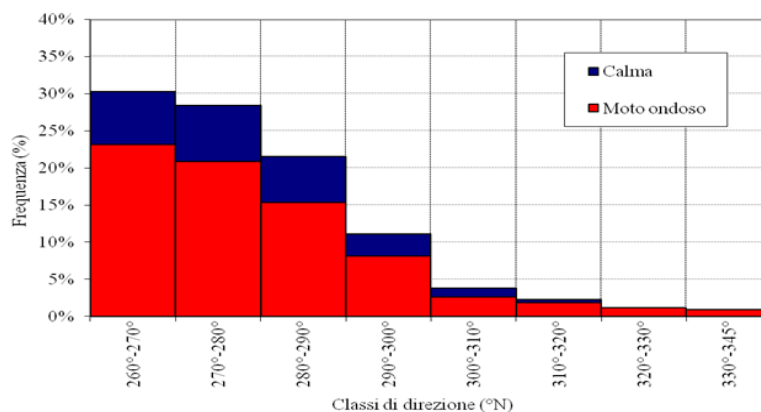


Figura 12: Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Vibo Valentia Marina

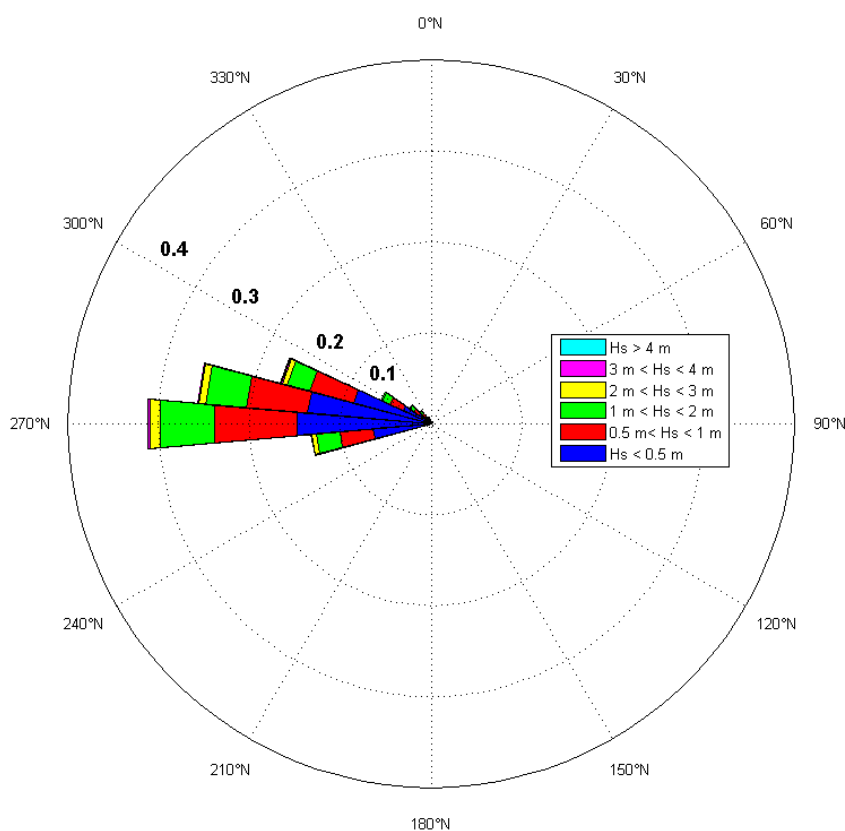


Figura 13: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso al largo di Vibo Valentia Marina

1.4. Correlazioni altezza d'onda-periodo

Partendo dall'analisi dei dati di boa di Cetraro e per i dati di moto ondoso trasposti al largo del paraggio di Vibo Valentia Marina, selezionati per la successiva determinazione del clima meteomarinico sottocosta, è stato possibile determinare la correlazione tra l'altezza d'onda significativa a largo e i corrispondenti valori di

periodo medio e di picco. Tali correlazioni risultano utili ai fini dell'individuazione degli eventi ondosi che occorre propagare sottocosta. Essi sono suddivisi per classi di altezza d'onda significativa a cui corrispondono, sulla base di opportune correlazioni, i valori del periodo. La formulazione matematica scelta risulta del tipo:

$$T = \alpha * H_s^\beta \quad \text{dove:}$$

- T è il periodo dell'onda, espresso in s;
- H_s è l'altezza d'onda significativa, espressa in m;
- α e β sono i coefficienti di correlazione.

I dati d'onda sono stati suddivisi per altezze congruenti, fissando un fattore di soglia pari a 0.5 m, indipendentemente dalla direzione di provenienza. Per ogni altezza d'onda H_{si} sono state tabulate tutte le n direzioni di provenienza, i corrispondenti n periodi e gli m numeri di apparizione b_s . Si è ricavato il periodo riferito alla i-esima

onda come
$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^m T_{sj} * b_s}{m}, \text{ espresso in s.}$$

Una volta calcolato il periodo d'onda T_i per ogni altezza d'onda H_{si} , è stata cercata la regressione fra i valori di T_i e i valori di H_{si} . Le elaborazioni effettuate hanno consentito di determinare per i dati di Cetraro e per quelli relativi a Vibo Valentia Marina differenti valori dei coefficienti di regressione.

In Figura 14 sono riportate le regressioni fra l'altezza significativa e il periodo medio, e fra altezza significativa e il periodo di picco per i dati della boa di Cetraro e Vibo.

Con questi valori è stato ricostruito il clima medio locale per Cetraro e Vibo Valentia Marina, considerando le classi di altezza d'onda significativa variabili fra 0.5 m e 8 m per Cetraro e fra 0.5 m e 6.5 m per Vibo Valentia Marina, separate da intervalli discreti di 0.5 m (vedi Tabella 6). La lunghezza d'onda a largo, L_0 , è stata calcolata con la relazione di dispersione lineare ricavata dalla teoria di Stokes al 1° ordine in acque profonde (clima meteomarinico a largo), attraverso la relazione: $L_0 = 1.56 * T_m^2$.

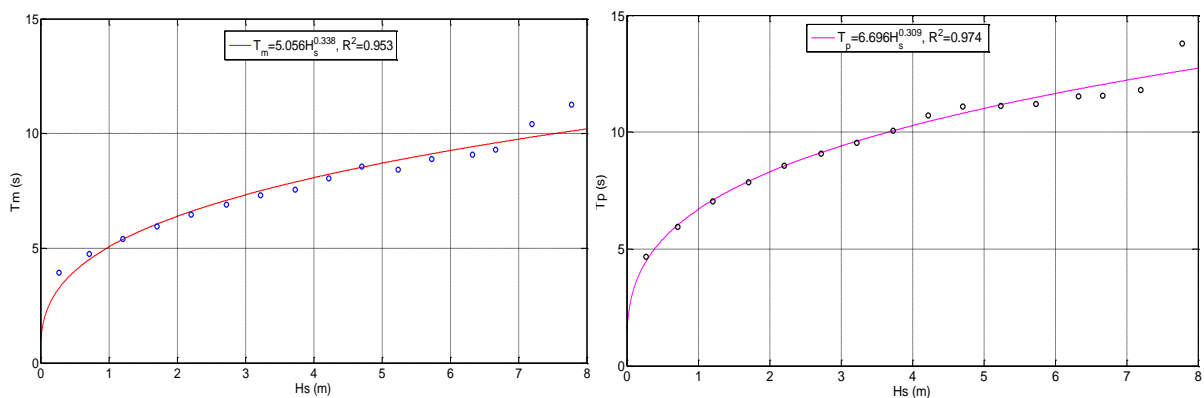


Figura 14: Curva di regressione Hs-Tm per Cetraro e Vibo Valentia Marina

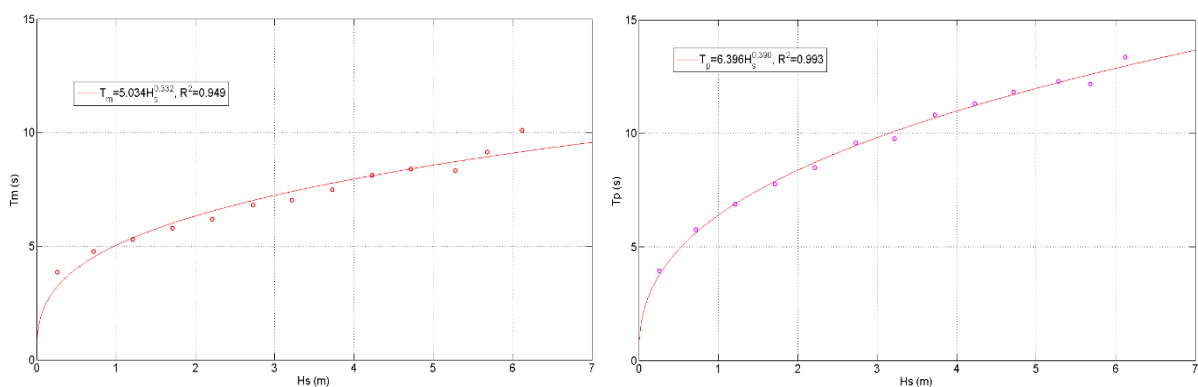


Figura 15: Curva di regressione Hs-Tp per Cetraro e Vibo Valentia Marina

H _s (m)	T _m (s)	T _p (s)	L ₀ (m)	H _s (m)	T _m (s)	T _p (s)	L ₀ (m)
0.50	4.00	5.41	24.96	0.50	4.00	4.88	24.95
1.00	5.06	6.70	39.88	1.00	5.03	6.40	39.53
1.50	5.80	7.59	52.45	1.50	5.76	7.49	51.75
2.00	6.39	8.30	63.71	2.00	6.34	8.38	62.64
2.50	6.89	8.89	74.09	2.50	6.82	9.14	72.64
3.00	7.33	9.40	83.81	3.00	7.25	9.82	81.99
3.50	7.72	9.86	93.01	3.50	7.63	10.43	90.83
4.00	8.08	10.28	101.80	4.00	7.98	10.98	99.25
4.50	8.41	10.66	110.23	4.50	8.29	11.50	107.32
5.00	8.71	11.01	118.37	5.00	8.59	11.98	115.10
5.50	9.00	11.34	126.25	5.50	8.87	12.44	122.62
6.00	9.26	11.65	133.90	6.00	9.13	12.86	129.91
6.50	9.52	11.94	141.34	6.50	9.37	13.27	137.00
7.00	9.76	12.22	148.60				
7.50	9.99	12.48	155.70				
8.00	10.21	12.73	162.64				

Tabella 6: Andamento di altezza, periodo e lunghezza d'onda al largo di Cetraro

2. PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA

La corretta descrizione delle trasformazioni che le onde subiscono in prossimità della costa risulta essere di estrema importanza per la comprensione dei processi di costieri e per l'eventuale progettazione o verifica di opere marittime. L'onda, nella sua propagazione da largo verso riva, subisce modifiche di forma, altezza, direzione e celerità. Le caratteristiche delle onde variano a causa di fenomeni quali lo shoaling, la rifrazione, la diffrazione, la riflessione e il frangimento, associati a fenomeni non-lineari dovuti alle interazioni fra le stesse onde e tra le onde e le correnti. Il trasporto di massa liquida legato al frangimento genera inoltre delle correnti che possono avere intensità notevoli e che influiscono in maniera importante sull'evoluzione dei litorali.

2.1. Modello numerico di calcolo

La propagazione del clima ondoso da largo verso riva in corrispondenza del paraggio di Vibo Valentia Marina è stata effettuata con il modello numerico SWAN, acronimo di Simulating WAVes Nearshore, la cui implementazione è stata sviluppata dal Dipartimento di Meccanica dei Fluidi del Politecnico di Delft (Olanda). Lo SWAN permette di ottenere stime reali dei parametri d'onda in aree costiere, laghi ed estuari una volta note le condizioni del fondo, del vento e delle correnti. In particolare, il modello simula lo sviluppo degli spettri d'onda che viaggiano da acque profonde verso acque poco profonde, come nel caso del moto ondoso che si propaga verso riva. Nel modello SWAN sono rappresentati i seguenti processi di propagazione d'onda:

Propagazione lungo lo spazio geografico;

- Rifrazione dovuta a variazioni del fondale marino e della corrente;
- Shoaling dovuto a variazioni del fondale marino e della corrente;
- Bloccaggio e riflessione da parte di correnti in direzione opposta;
- Trasmissione, bloccaggio o riflessione da parte di ostacoli.

Inoltre, nello SWAN vengono rappresentati i seguenti processi di generazione e dissipazione d'onda:

- Generazione dovuta al vento;
- Dissipazione dovuta alla rottura in cresta (whitecapping);
- Dissipazione dovuta alla rottura d'onda indotta dalla profondità;
- Dissipazione dovuta all'attrito sul fondo;
- Interazioni onda-onda (quadruple e triple);
- Diffrazione a tergo di ostacoli.

Tale modello può essere utilizzato in condizioni sia stazionarie sia non stazionarie, considerando coordinate sia cartesiane (nel caso di piccole scale) sia sferiche (nel caso di piccole e grandi scale).

Nel modello SWAN le onde sono descritte attraverso la densità d'azione spettrale dell'onda bidimensionale anche quando sono presenti fenomeni non lineari (ad esempio nella zona dei frangenti). La ragione fondamentale per l'utilizzo dello spettro anche in condizioni fortemente non lineari è che, anche in tali condizioni, è possibile definire con buona accuratezza la distribuzione spettrale del momento del secondo ordine delle onde (sebbene esso non è sufficiente per descrivere le onde da un punto di vista statistico). Lo spettro utilizzato in SWAN è la densità d'azione spettrale $N(\sigma, \theta)$ anziché la densità di energia spettrale $E(\sigma, \theta)$ poiché, in presenza di correnti, la densità d'azione spettrale viene conservata mentre non lo è la densità d'energia.

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa σ e la direzione d'onda θ (la direzione normale alla cresta dell'onda di ogni componente spettrale). La densità d'azione è funzione della densità d'energia e della frequenza relativa:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

Nella presente modellazione, l'evoluzione dello spettro d'onda è descritta attraverso la seguente equazione del bilancio d'azione spettrale valida per coordinate cartesiane, che rappresenta l'equazione fondamentale di tutta la teoria dello SWAN:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial z} c_z N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

In tale equazione il primo termine di sinistra rappresenta la variazione della densità d'azione spettrale rispetto al tempo; il secondo, il terzo e il quarto termine rappresentano la propagazione dell'azione nello spazio geografico (con le velocità di propagazione c_x , c_y e c_z riferite, rispettivamente, alle direzioni x, y e z); il quinto termine rappresenta la variazione della frequenza relativa dovuta alle variazioni di profondità e delle correnti (con la velocità di propagazione c_σ riferita allo spazio delle frequenze σ); il sesto termine, l'ultimo dei termini di sinistra dell'equazione, rappresenta la rifrazione indotta dalla profondità e dalla corrente (con la velocità di propagazione c_θ riferita allo spazio delle direzioni d'onda θ). Le espressioni per descrivere tali velocità di propagazione sono date dalla teoria dell'onda lineare di Stokes al 1° ordine. Il termine S , che è comunque funzione della frequenza e delle direzioni d'onda ($S = f(\sigma, \theta)$), presente nei termini a destra dell'equazione del

bilancio d'azione spettrale, rappresenta il termine sorgente rispetto agli effetti della generazione, della dissipazione e delle interazioni non lineari onda-onda.

Se il modello SWAN viene utilizzato per mari con secche o su scala oceanica, l'equazione fondamentale del bilancio d'azione spettrale in coordinate sferiche può essere scritta nella forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial \lambda} c_{\lambda} N + (\cos \varphi)^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} c_{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_{\sigma} N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_{\theta} N = \frac{S}{\sigma}$$

dove λ rappresenta la longitudine e φ la latitudine.

Nel modello SWAN il trasferimento di energia alle onde da parte del vento viene descritto attraverso un meccanismo di risonanza ed un meccanismo di ritorno. Il termine sorgente di tali meccanismi è comunemente descritto come la somma di crescite lineari ed esponenziali, attraverso l'equazione:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + B \cdot E(\sigma, \theta)$$

dove i coefficienti A e B sono funzione della direzione e della frequenza d'onda ed anche della direzione e della velocità del vento.

Gli effetti delle correnti sono descritti nello SWAN attraverso l'utilizzo della velocità e della direzione del vento locale.

Il termine A è descritto attraverso la relazione data da Cavaleri e Malanotte-Rizzoli (1981), mentre per il termine B in tale modello vengono utilizzate due differenti espressioni. La prima è dovuta a Snyder riscalata da Komen in termini di velocità d'attrito U^* . Il coefficiente di resistenza per collegare U^* alla trasmissione della velocità del vento a 10 m d'altezza rispetto al L.M.M., U_{10} , è dato da Wu (1982). La seconda relazione di B è fornita da Janssen (1991) e descrive in modo esplicito l'interazione tra vento ed onde considerando gli effetti dello strato limite dell'atmosfera e considerando l'estensione della scabrezza della superficie del mare. Il corrispondente gruppo di equazioni è risolto con una procedura iterativa da Mastenbroek (1993).

La dissipazione di energia dell'onda viene rappresentata dalla somma di tre diversi contributi:

- Whitecapping (fenomeno di rottura nella cresta dell'onda): $S_{ds,w}(\sigma, \theta)$;
- Attrito del fondo: $S_{ds,b}(\sigma, \theta)$;
- Rottura indotta dalla profondità: $S_{ds,br}(\sigma, \theta)$.

Il whitecapping è principalmente controllato dalla ripidezza delle onde. Attualmente, nelle operazioni riguardanti modelli d'onda di terza generazione come lo SWAN, le formule per descrivere il whitecapping sono basate su un modello ad impulso (Hansselmann, 1974):

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \cdot \tilde{\sigma} \cdot \frac{k}{\tilde{k}} \cdot E(\sigma, \theta)$$

dove Γ è un coefficiente dipendente dalla ripidezza dell'onda, k è il numero d'onda mentre \tilde{k} e $\tilde{\sigma}$ indicano rispettivamente una frequenza media ed un numero d'onda medio. Komen ha stimato il valore di Γ col concludere il bilancio d'energia delle onde in condizioni pienamente sviluppate. Ciò implica che tale valore dipende dalla formula della trasmissione di energia da parte del vento che viene utilizzata. La prima formulazione è dovuta a Komen e viene considerata quando viene utilizzato il coefficiente B di Komen per il vento. La seconda espressione è un adattamento di questa espressione basata su Janssen e viene considerata quando viene utilizzato il coefficiente B di Janssen per il vento. Alcuni studiosi hanno dimostrato che, utilizzando tali formule, i risultati dipendono in maniera critica dalla scelta di una alta frequenza limite che viene utilizzata per la coda dello spettro.

Un'altra formula utilizzata per la definizione del whitecapping è basata sul Metodo di Ripidezza Aggiuntivo (Cumulative Steepness Method) che viene definito come segue:

$$S_{st}(\sigma, \theta) = \int_0^{\sigma} \int_0^{2\pi} k^2 \cdot |\cos(\theta - \theta')|^m \cdot E(\sigma, \theta) \cdot d\sigma \cdot d\theta$$

dove m è un coefficiente che regola la dipendenza direzionale. Nelle computazioni, si suppone che tale coefficiente sia pari a 1, se è dominante il meccanismo di deformazione, sia minore di 1, se sono presenti altri meccanismi. Nello SWAN tale valore è posto pari a 0 come default. Ne consegue che la nuova formula per il whitecapping sia espressa nella seguente forma:

$$S_{wc}^{st}(\sigma, \theta) = -C_{wc}^{st} \cdot S_{st}(\sigma, \theta) \cdot E(\sigma, \theta)$$

dove C_{wc}^{st} è un coefficiente sintonizzabile.

La dissipazione di energia indotta dalla profondità può essere causata dall'attrito del fondo, dal movimento del fondo, dalla percolazione e dalla dispersione presenti a causa della irregolarità del fondo. Per mari con secche e fondi sabbiosi, il meccanismo dominante sembra essere l'attrito sul fondo che può essere rappresentato attraverso l'espressione:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \cdot \frac{\sigma^2}{g^2 \cdot \sinh^2(k \cdot d)} \cdot E(\sigma, \theta)$$

dove C_{bottom} rappresenta il coefficiente di attrito del fondo. Esistono una serie di modelli per definire tale costante in modo empirico che danno buoni risultati in molte condizioni differenti sempre che sia stato scelto il valore opportuno (differente per mari gonfi e ventosi), come ad esempio una formulazione non lineare basata sulla resistenza proposta da Hasselmann e Collins (1968), semplificato in seguito da Collins (1972), ed una formulazione più complicata caratterizzata da modelli basati sulla viscosità dei vortici fu sviluppata da Madsen e Weber (1991). Considerando le ampie variazioni delle condizioni del fondo nelle aree costiere (materiale del fondo, estensione della scabrosità del fondo, altezza delle increspature ecc.) non si può dare preferenza ad alcun modello.

Per questa ragione, nello SWAN è stato considerato il più semplice di questi modelli: il modello empirico JONSWAP di Hasselmann (1973), il modello di resistenza di Collins (1972), ed il modello basato sulla viscosità dei vortici di Madsen (1989).

Il processo della rottura dell'onda indotta dalla profondità è ancora scarsamente compreso e si conosce poco circa la sua modellazione spettrale. Al contrario la dissipazione totale (ad es. integrata su tutto lo spettro) dovuta a questo tipo di rottura dell'onda può essere ben modellata con la dissipazione di un cavallone in un campo casuale. Le osservazioni di laboratorio mostrano come la forma di uno spettro inizialmente unimodale, che si propaga lungo semplici profili di spiaggia, è abbastanza indifferente a tale tipo di rottura. Ciò ha portato degli studiosi a formulare una versione spettrale del modello della dissipazione del cavallone che includendo anche le direzioni, viene descritto nello SWAN nel modo seguente:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} \cdot E(\sigma, \theta)$$

in cui E_{tot} è l'energia totale dell'onda e D_{tot} , valore che risulta negativa, è la stima della dissipazione dell'energia totale dovuta alla rottura dell'onda. Se si aggiunge una dipendenza quadratica sulla frequenza avremo un evidente effetto sui risultati dati dallo SWAN. IL valore di D_{tot} dipende in modo particolare dal parametro di rottura $\gamma = H_{max}/d$, dove H_{max} è la massima altezza d'onda possibile relativa alla profondità d . Nel modello SWAN è possibile considerare sia un valore costante ($\gamma = 0.73$) che un valore variabile di tale costante.

SWAN può stimare inoltre l'onda trasmessa oltre una struttura (eventualmente lineare) come un frangiflutti, uno sbarramento. In tal modo un ostacolo influirà sul campo d'onda in due modi, per prima cosa ridurrà l'altezza d'onda lungo tutto il

campo, e poi causerà la diffrazione vicino ai suoi limiti. In campi d'onda con piccole creste, irregolari, sembra che gli effetti della diffrazione siano trascurabili ad eccezione di una zona di estensione non più di una o due lunghezze d'onda posta in prossimità dell'ostacolo. Conseguentemente, il modello può trascurare le onde in prossimità dell'ostacolo se lo spettro direzionale delle onde in arrivo non è troppo limitato. Poiché gli ostacoli hanno un'area trasversale troppo piccola per essere risolta con la griglia di fondo nello SWAN, un ostacolo sarà modellato come una linea. Se la cima del frangiflutti ha un'altezza tale da poter esser superata dalle onde, il coefficiente di trasmissione, K_t , definito come il rapporto tra l'altezza d'onda (significativa) al di sotto dell'ostacolo e l'altezza d'onda (significativa) al di sopra dell'ostacolo, è funzione dell'altezza d'onda e della differenza fra l'altezza dell'ostacolo e il livello dell'acqua.

L'espressione di K_t è fornita da Goda (1967):

$$k_t = 0.5 \cdot \left(1 - \sin \left(\frac{\pi}{2\alpha} \cdot \left(\frac{F}{H_i} + \beta \right) \right) \right) \quad \text{per} \quad -\beta - \alpha < \frac{F}{H_i} < \alpha - \beta$$

dove $F = h-d$ è il bordo libero della barriera, H_i è l'altezza d'onda significativa incidente nella zona al di sopra dell'ostacolo, h è l'altezza della cima dell'ostacolo al di sopra del livello di riferimento (come riferimento si può considerare anche il livello del fondo), d è il livello d'acqua medio sempre relativo al riferimento mentre i coefficienti α e β sono funzioni della forma della barriera.

Le espressione precedente è stata ricavata sperimentalmente considerando solo onde incidenti in direzione normale all'ostacolo. Ne consegue che, poiché non esistono dati disponibili circa onde incidenti in direzione obliqua, si assume che il coefficiente di trasmissione non dipende dalla direzione dell'onda incidente. Un altro fenomeno da considerare è un cambiamento della frequenza dell'onda dal momento che spesso il processo al di sopra della barriera è fortemente non lineare. Date le poche informazioni in merito, anche in questo caso, nello SWAN si assume che le frequenze rimangono immutate anche al di sopra dell'ostacolo.

Per ciò che riguarda le interazioni non lineari fra le diverse onde, in acque profonde le interazioni quaduple onda-onda dominano l'evoluzione dello spettro. Esse trasferiscono l'energia d'onda dal picco dello spettro verso frequenze più basse (spostando in tal modo la frequenza di picco verso valori più bassi) e verso frequenze più elevate (dove l'energia viene dissipata attraverso il fenomeno del whitecapping). In acque poco profonde, invece, le interazioni triple onda-onda trasferiscono l'energia dalle frequenze più basse verso quelle più alte. Il calcolo delle interazioni quaduple viene eseguito dallo SWAN con la Discrete Interaction Approximation (DIA) di Hansselmann (1985), che ha portato ad avere buoni risultati

per quanto riguarda la descrizione delle caratteristiche fondamentali dello sviluppo dello spettro d'onda. Il calcolo delle interazioni triple viene eseguito nello SWAN con la Lumped Triad Approximation (LTA) che fornisce ottimi risultati nel descrivere le principali caratteristiche del trasferimento di energia dal principale picco dello spettro alle super-armoniche.

2.2. Set-up modello numerico

Il primo passo nello studio di propagazione del clima ondoso da largo verso riva con il modello SWAN ha riguardato la preparazione di una griglia di calcolo innestata sulla batimetria in corrispondenza del paraggio di Vibo Valentia Marina. La modellazione del fondale marino è stata realizzata sulla base dei rilievi batimetrici delle carte nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina (I.I.M.) del 1993 e dei rilievi batimetrici fatti recentemente sottocosta nella zona della spiaggia attiva (emersa e sommersa) del tratto di costa del comune di Vibo Valentia Marina interessato dall'intervento, effettuando in seguito un'interpolazione per triangolazione sulle batimetriche rilevate per avere tutti i valori di tutte le profondità nella griglia di calcolo considerata. Al fine di coprire in maniera significativa tutta l'area interessata allo studio meteomarinario, è stata utilizzata una prima serie di simulazioni utilizzando una griglia di calcolo rettangolare avente dimensioni 10000 m in lunghezza e di 7000 m in larghezza, avente un numero pari rispettivamente a 200 maglie e 140 maglie, aventi ciascuna dimensioni 50 m x 50 m, che si estendono a partire da profondità di circa 300 m, nella condizione di acque profonde ($d/L > 0.5$) per tutti gli attacchi ondosi, fino a terra.

In Figura 16 sono mostrati i limiti della griglia di calcolo generale, posizionata in corrispondenza del litorale di Vibo Valentia Marina, posizionato a Sud. Sono inoltre evidenziate, con differenti colori, le linee batimetriche determinate attraverso le carte nautiche dell'I.I.M.

Ai fini di un maggiore rilievo del fondale marino nei pressi dell'ingombro del porto e della sua batimetria (Figura 16), è stata inoltre adottata la Carta del Portolano del Mediterraneo (n. 915, 12, 134 - Vol. 1 B, p. 189, Elenco dei Fari).

Sui limiti della griglia di calcolo lato mare (Nord, Est e Ovest) sono state effettuate le propagazioni del moto ondoso da largo a sottocosta, con particolare attenzione al clima ondoso in corrispondenza di un punto sottocosta rappresentativo del tratto costiero oggetto di studio, posto alla batimetrica -10 m, ai fini per la modellazione della dinamica evolutiva del litorale. Le onde propagate con lo SWAN vengono definite da un valore di altezza d'onda, H_s , di periodo di picco, T_p , e di direzione di provenienza rispetto al Nord Cartografico ricadenti nel settore di traversia 260°-345°N del paraggio di Vibo Valentia Marina.

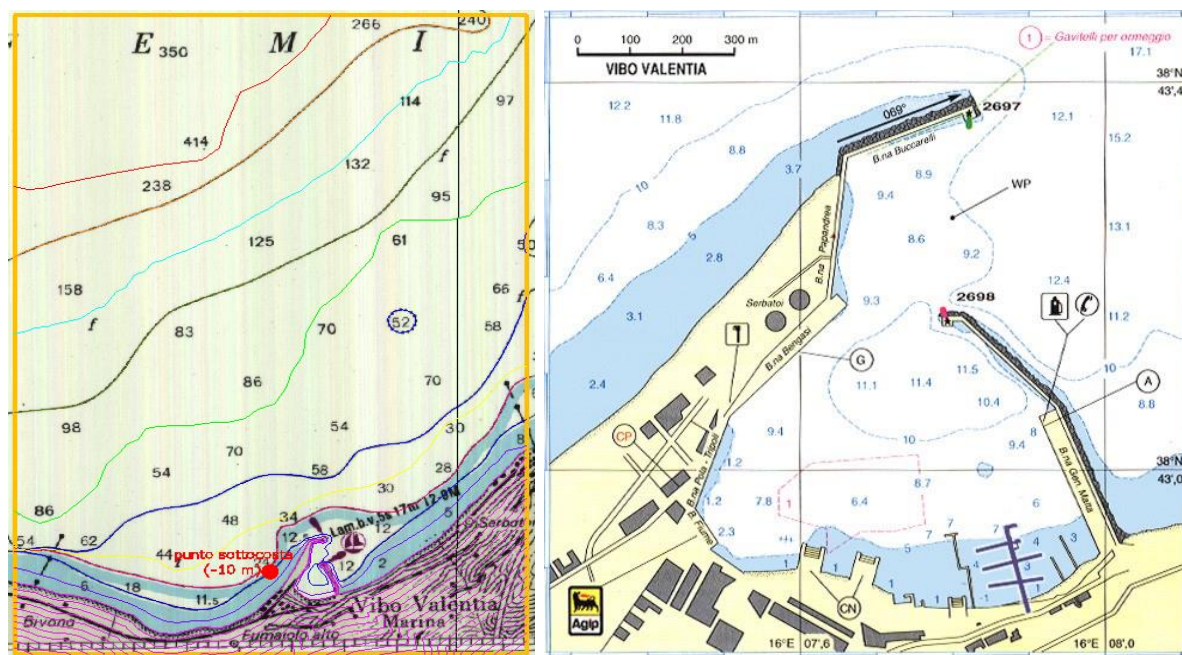


Figura 16: Limiti griglia di calcolo e principali batimetriche del porti i Vibo Valentia Marina

Nelle propagazioni effettuate con lo SWAN è stato utilizzato uno classico spettro di tipo Jonswap con γ (coefficiente di picco dello spettro) = 3.3, assumendo un range di direzioni spettrali pari a 180° , una frequenza minima dello spettro, $f_1 = 0.01$ Hz, e una frequenza massima, $f_2 = 0.5$ Hz. Il frangimento del moto ondoso per raggiunto limite di profondità è stato definito nell'input del programma in base al rapporto limite $H_s/d = 0.78$, in cui d è la profondità.

Sulla base delle batimetrie rilevate dalla carta nautica, è stata effettuata una modellazione del fondale marino attraverso un'interpolazione per triangolazione su tutti i nodi della griglia di calcolo.

In Figura 17 sono mostrati i limiti della griglia di calcolo generale ($x = 5500$ m e $y = 5000$ m), posizionata in corrispondenza di un'ampia fascia del litorale di Vibo Valentia Marina. Sono inoltre evidenziate le principali linee batimetriche determinate attraverso l'analisi delle carte nautiche. Nella seguente è mostrata una visualizzazione 3D della batimetria del fondale marino, situata all'interno della griglia di calcolo. La successiva Figura 18 mostra invece la visualizzazione 3D della batimetria del fondale marino.

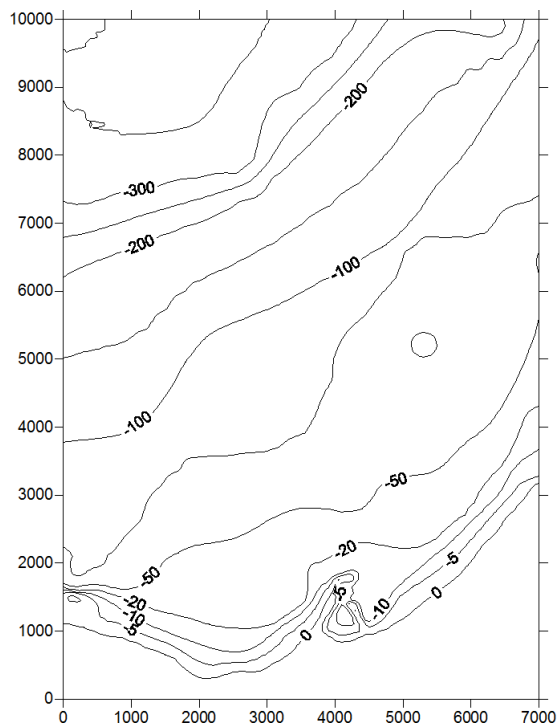


Figura 17: Visualizzazione 2D delle principali batimetriche all'interno della griglia di calcolo (vista da Sud)

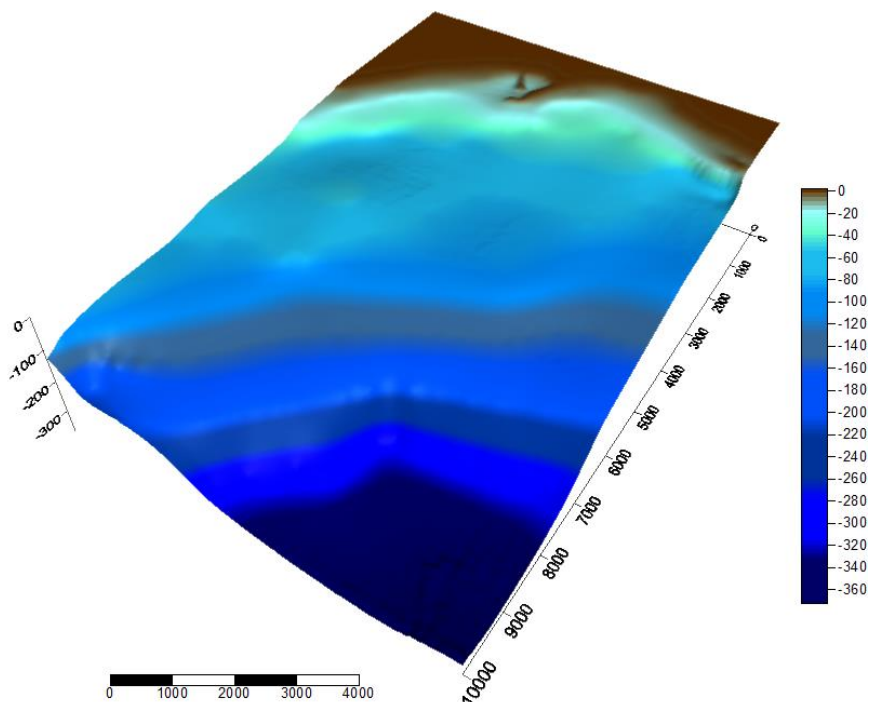


Figura 18: Visualizzazione 3D della batimetria all'interno della griglia generale (vista da Nord-Ovest)

Nella successive Figure sono riportati, a scopo esemplificativo, una serie di grafici relativi ai risultati delle simulazioni effettuate con il modello di propagazione del

moto ondoso SWAN da largo a riva nel dominio di calcolo considerato. In particolare, sono stati selezionati i due eventi ondosi estremi dei settori direzionali più significativi, con T (tempo di ritorno) = 50 anni, che risulta un tipico periodo per la progettazione di difese costiere quali barriere frangiflutto e pennelli. Essi sono caratterizzati al largo, nella condizione indisturbata di acque profonde ($d/L > 0.5$), dai seguenti valori (vedi paragrafo relativo alla determinazione degli eventi estremi):

- $H_s = 6.72$ m, $T_p = 13.44$ s e $Dir = 275^\circ N$;
- $H_s = 6.61$ m, $T_p = 13.36$ s e $Dir = 305^\circ N$.

Gli output grafici delle simulazioni effettuate sulla griglia generale, avente dimensione 7000 m * 10000 m, fanno riferimento al sistema di coordinate cartesiano xyz, dove x rappresenta la coordinata diretta verso la costa, y la coordinata ortogonale ad essa, e z la coordinata verticale, diretta lungo la profondità.

In particolare, per i due attacchi ondosi considerati i grafici fanno riferimento a:

- profondità del fondale, con indicazione delle linee batimetriche principali (segnalate ogni circa 5 m a partire circa dalla -300 m) e della linea di riva, comprendente i raggi d'onda, rappresentati come linee di flusso, relativi alla direzione di propagazione del moto ondoso, al fine di evidenziare gli effetti rifrattivi del moto ondoso nella sua propagazione verso riva i vettori per effetto dell'incidenza dei fronti d'onda posti a differenti profondità (Figura 19 e Figura 24); in particolare, il valore della direzione del moto ondoso, Dir ($^\circ N$), che risulta ortogonale alle creste d'onda, viene calcolata secondo la relazione (Kuyt et al., 1988):

$$Dir = \arctan \left[\frac{\int \sin(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \cos(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right]$$

dove $E(\sigma, \theta)$ rappresenta la densità spettrale.

- distribuzione spaziale tridimensionale su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa, H_s (m), nel sistema di coordinate xyz, al fine di comprendere il fenomeno di abbattimento dell'altezza d'onda per effetto di shoaling e rifrazione a causa della progressiva diminuzione di profondità (Figura 20e Figura 25) il valore di H_s viene determinato dal modello attraverso la relazione:

$$H_s = 4 \sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

dove $E(\omega, \theta)$ rappresenta la varianza della densità spettrale e ω la frequenza angolare.

- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa, H_s (m) (Figura 21 e Figura 26);
- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo del periodo medio dell'onda, T_m (s) (Figura 22 e Figura 27), determinato secondo la relazione:

$$T_m = 2\pi \frac{\iint \omega^{-1} E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo della lunghezza d'onda, L (m) (Figura 23 e Figura 28); essa viene valutata secondo la seguente relazione:

$$L = 2\pi \left(\frac{\iint k^p E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\iint k^{p-1} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right)^{-1}$$

dove il coefficiente p viene solitamente posto pari a 1.

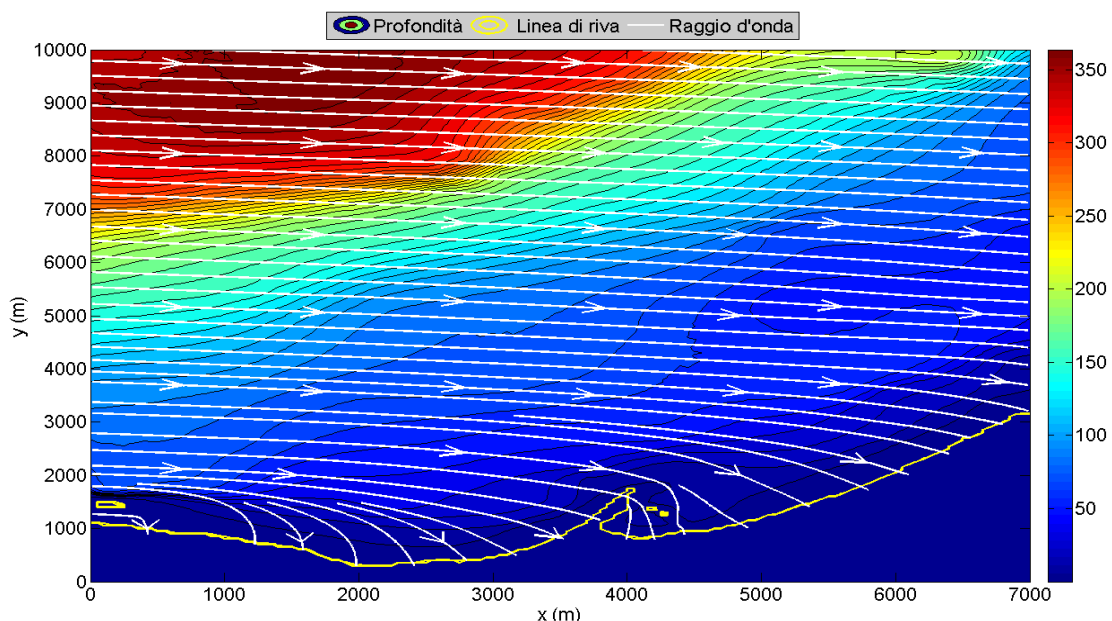


Figura 19: Profondità del fondale e raggi d'onda relativi alla propagazione del moto ondoso su tutto il dominio di calcolo ($H_s = 6.72$ m, $T_p = 13.44$ s, $Dir = 275^\circ N$)

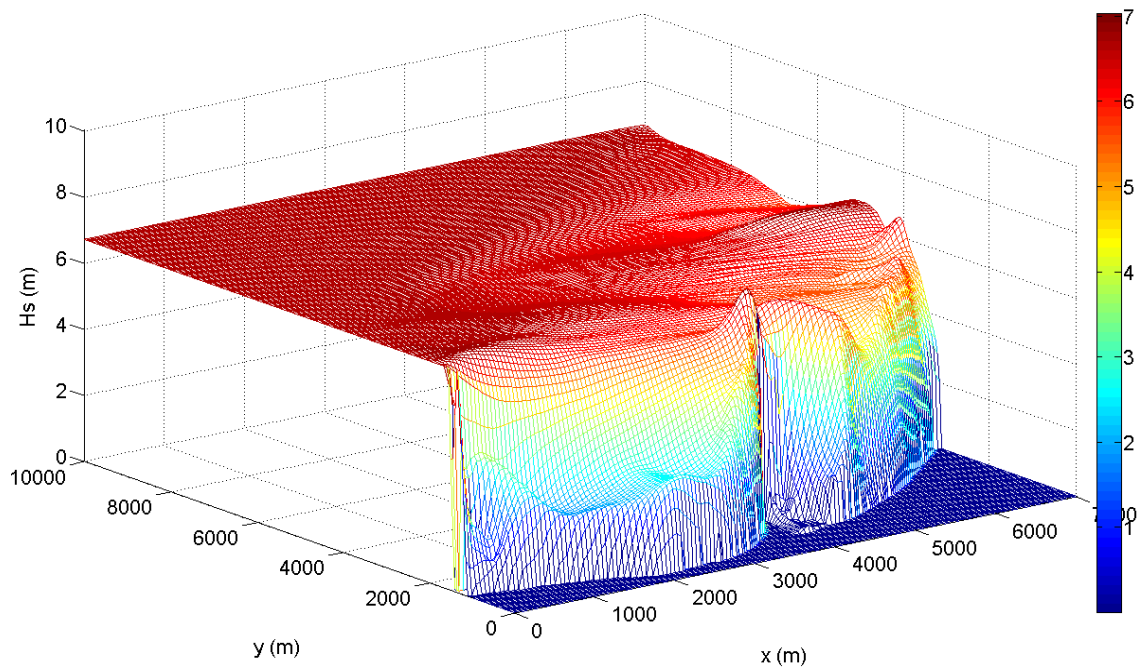


Figura 20: Distribuzione spaziale 3D su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa, H_s (m)

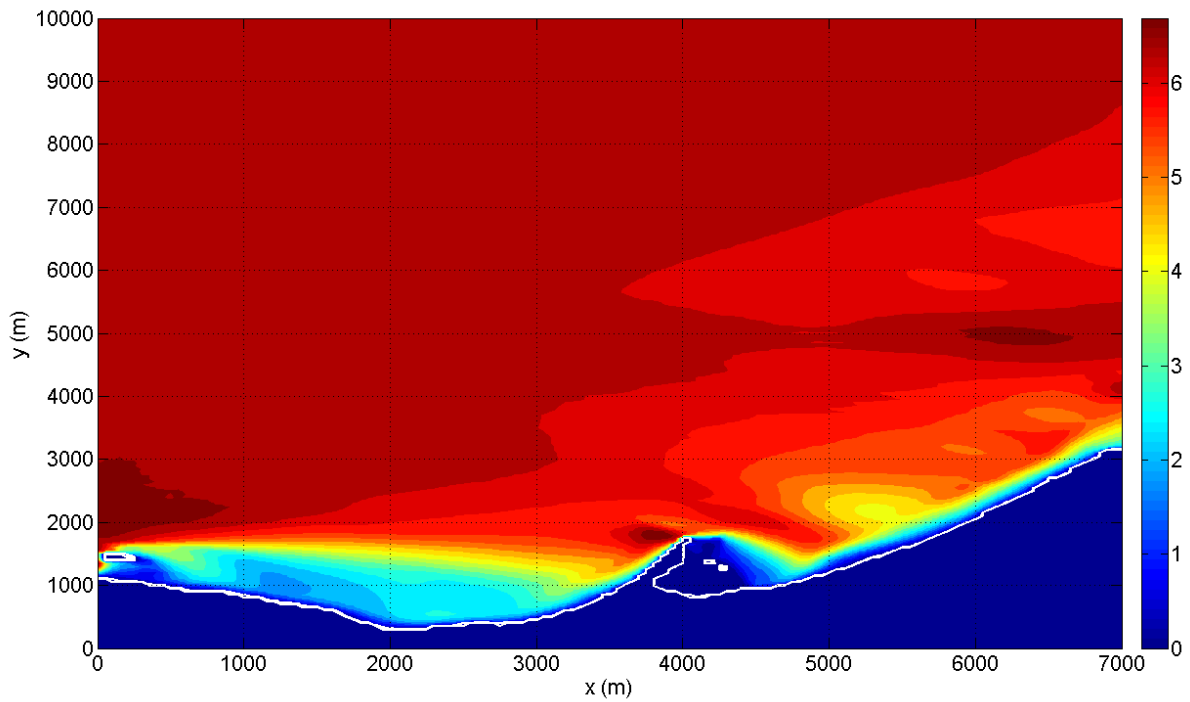


Figura 21: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa, H_s (m)

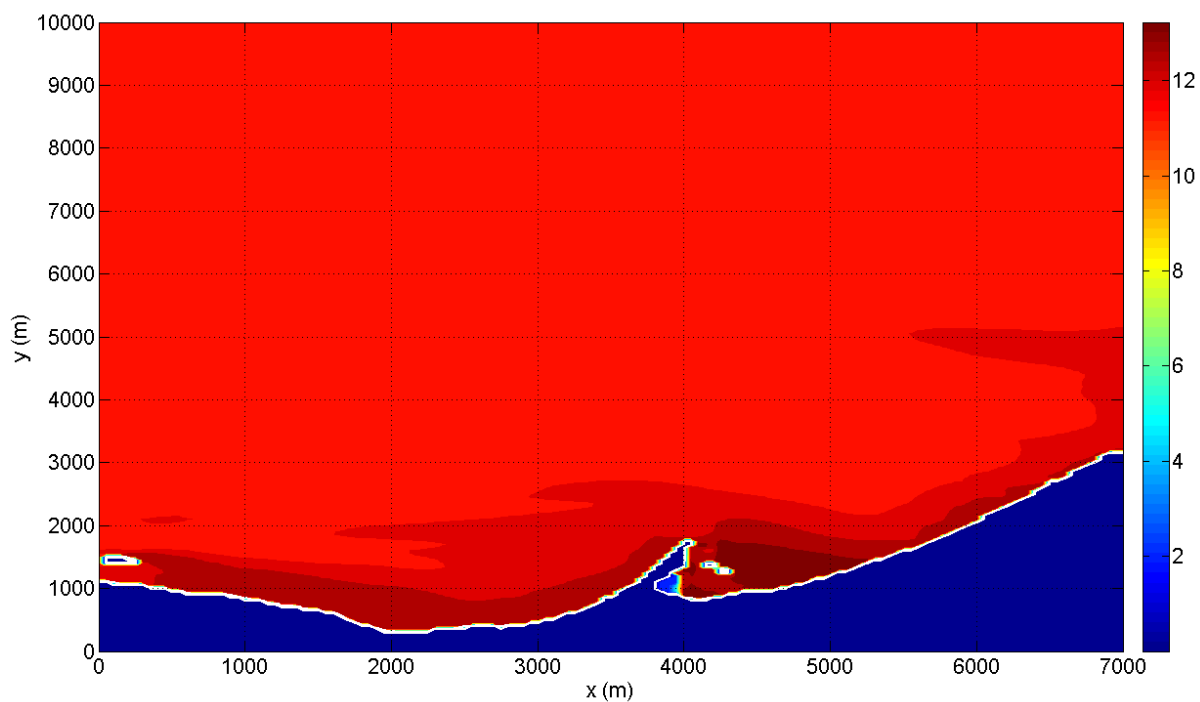


Figura 22: Distribuzione spaziale bidimensionale del periodo medio dell'onda, T_m (s)

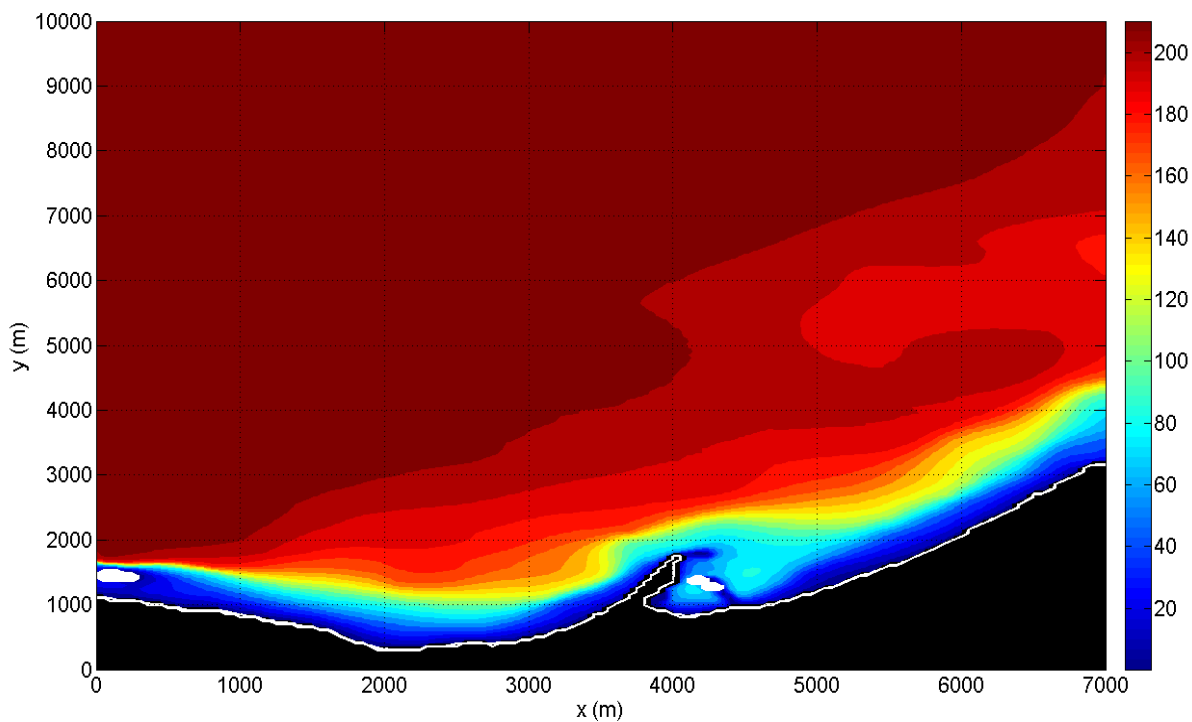


Figura 23: Distribuzione spaziale bidimensionale della lunghezza d'onda, L (m)

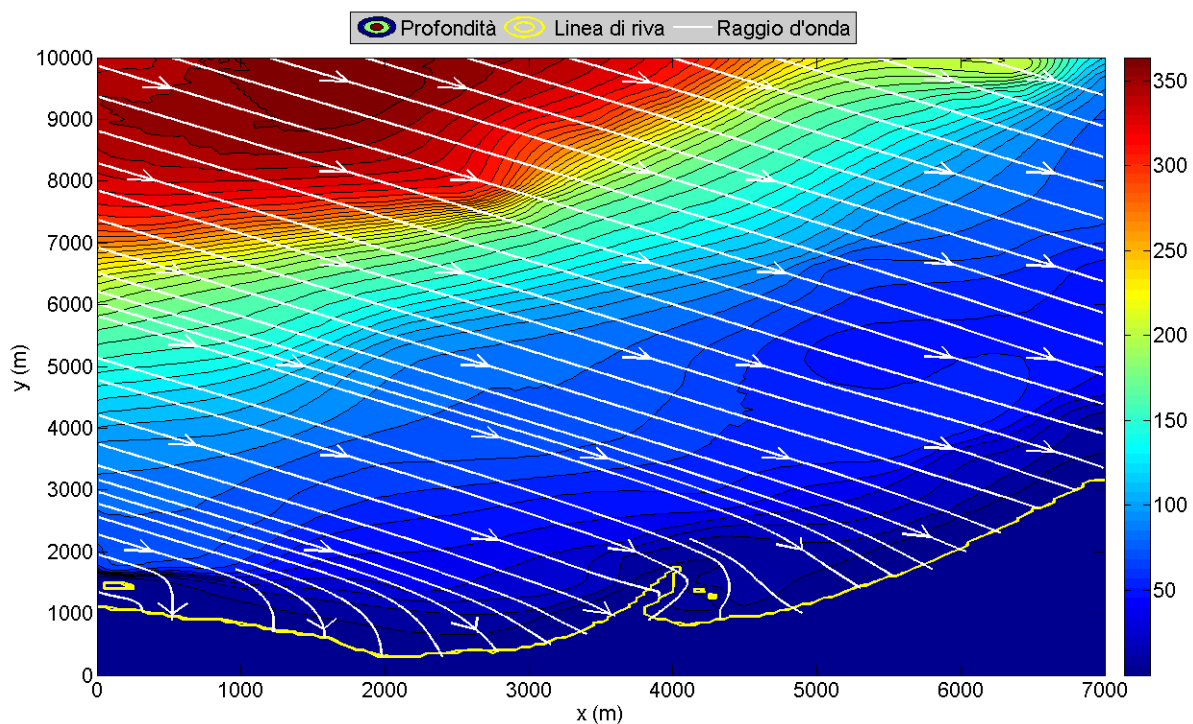


Figura 24: Profondità del fondale e raggi d'onda relativi alla propagazione del moto ondoso su tutto il dominio di calcolo ($H_s = 6.61$ m, $T_p = 13.36$ s, $Dir = 305^\circ N$)

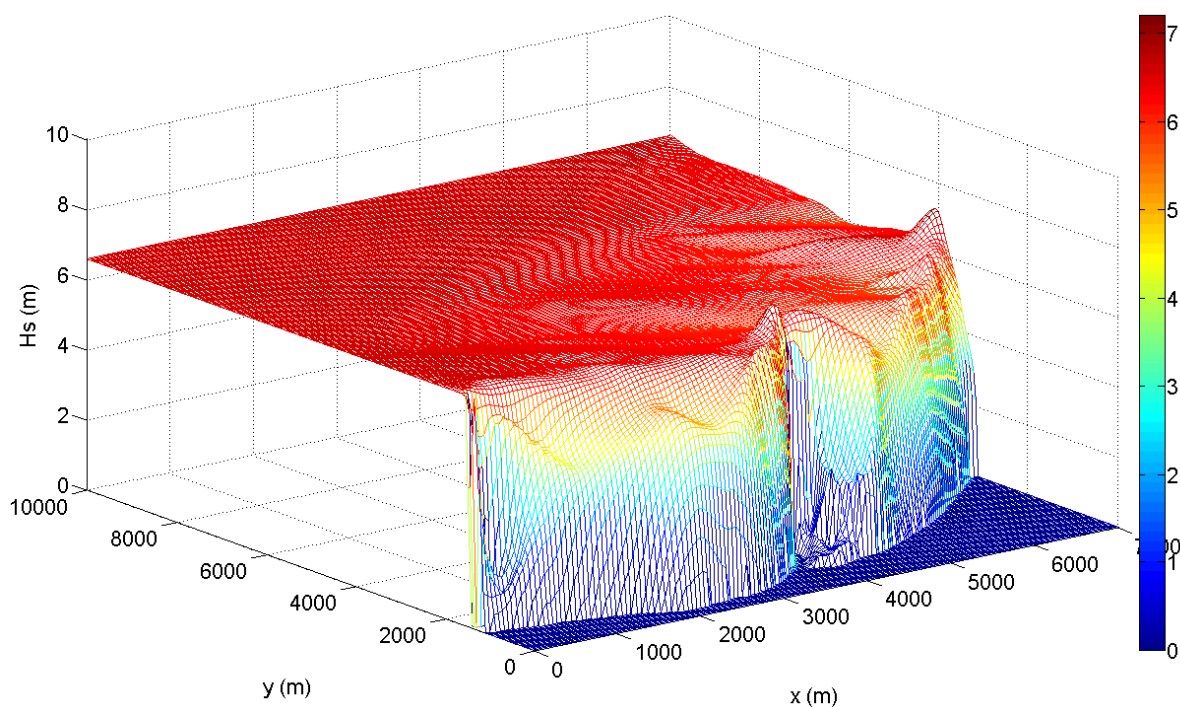


Figura 25: Distribuzione spaziale 3D su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa, H_s (m)

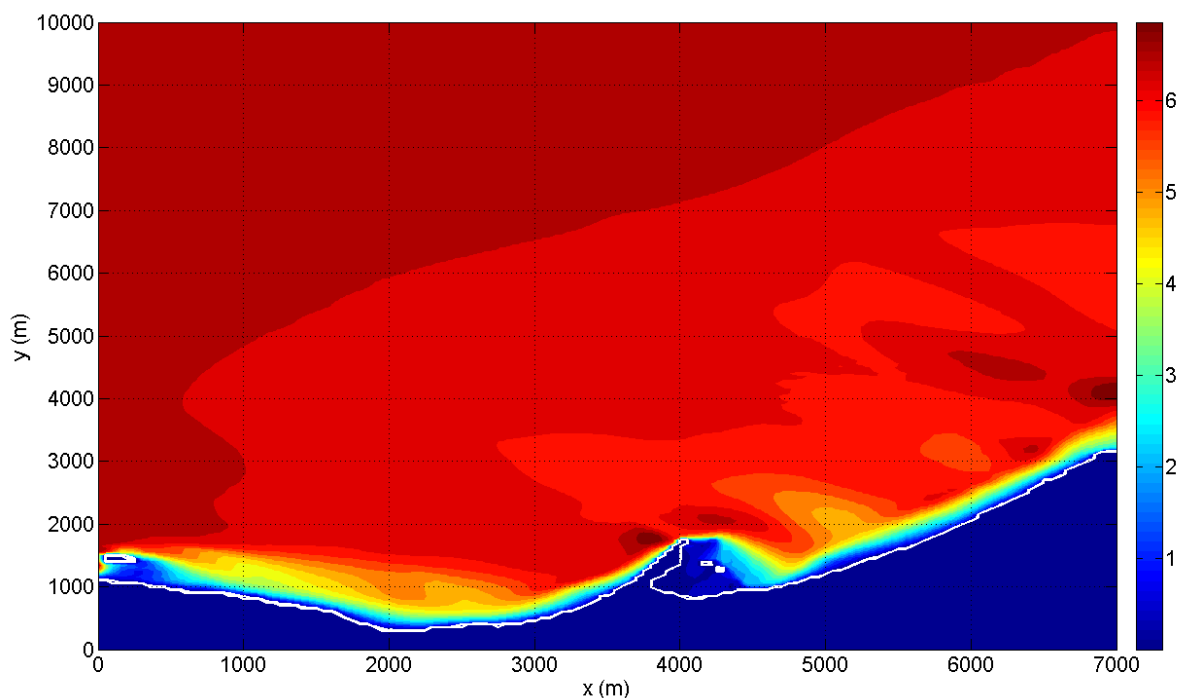


Figura 26: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa, H_s (m)

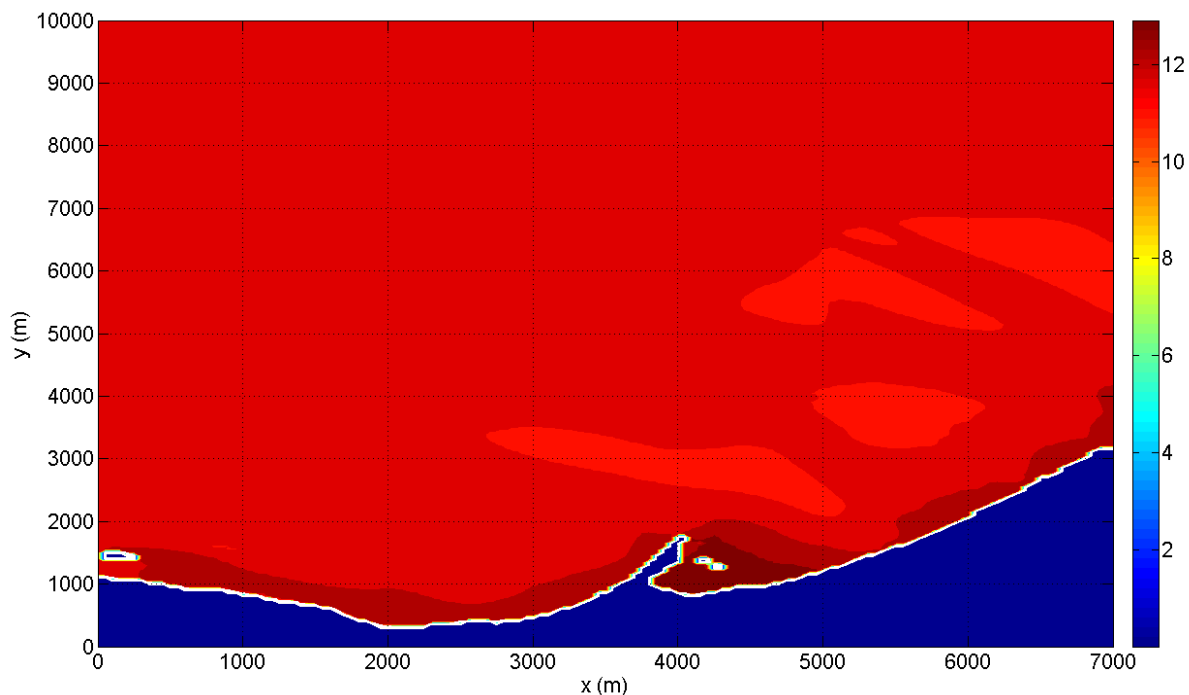


Figura 27: Distribuzione spaziale bidimensionale del periodo medio dell'onda, T_m (s)

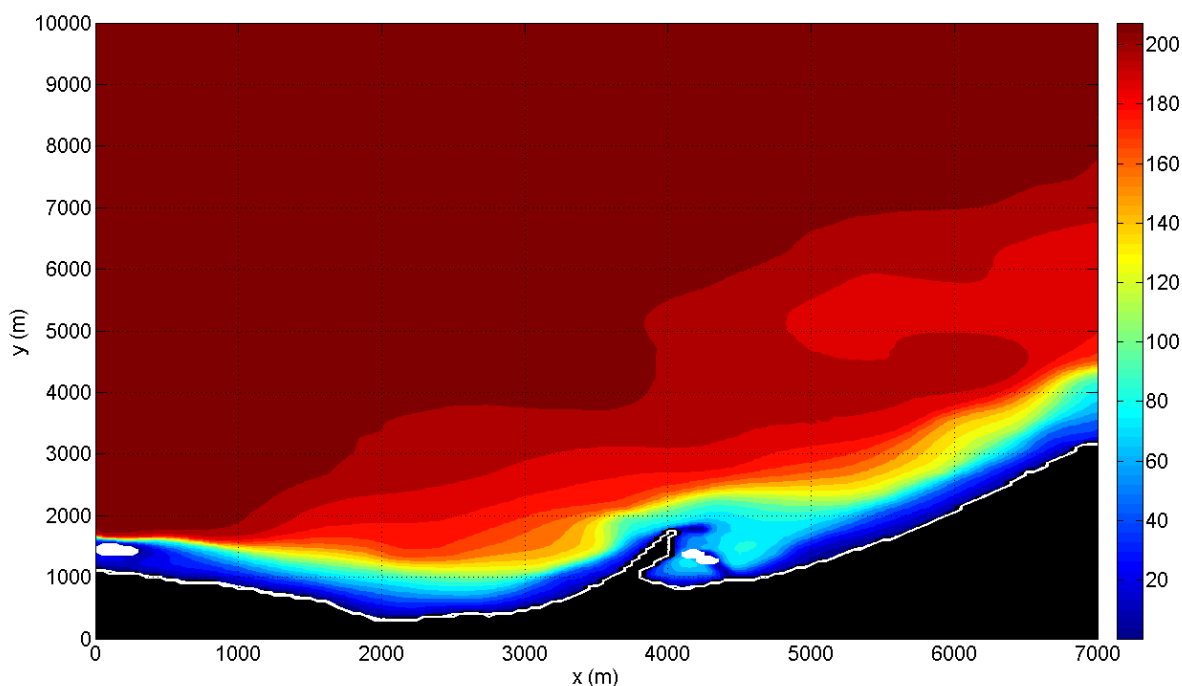


Figura 28: Distribuzione spaziale bidimensionale della lunghezza d'onda, L (m)

Nei diversi grafici mostrati nelle precedenti figure, le grandezze d'onda in esame (direzione, altezza significativa, periodo medio, lunghezza e celerità) evidenziano le seguenti caratteristiche:

- Progressiva rotazione delle direzioni di propagazione del moto ondoso, i cui raggi d'onda tendono a disporsi ortogonalmente alla linea di riva per effetto della rifrazione;
- Progressiva diminuzione dell'altezza d'onda significativa, dalla condizione di acque profonde al limite della condizione di acque intermedie ($0.04 < d/L < 0.5$), e successivo lieve innalzamento dell'altezza d'onda significativa, dalla condizione di acque basse ($d/L < 0.04$) fino al limite di frangimento delle onde per raggiunto limite di profondità;
- Variabilità minima del periodo medio dell'onda da largo verso riva sul dominio di calcolo;
- Progressiva diminuzione da largo verso riva della lunghezza d'onda e, di conseguenza, progressivo rallentamento del moto ondoso, descritto dall'abbattimento dei valori della celerità dell'onda.

Occorre infine osservare che il periodo di picco, T_p , risulta una grandezza invariante del moto ondoso nella sua propagazione da largo fino al frangimento per raggiunto limite di profondità. La dissipazione energetica associata all'onda fa sì che esso risulti variabile nella cosiddetta surf zone (fascia costiera compresa fra la profondità di frangimento e la linea di riva).

2.3. Clima medio ondosu sottocosta

Sulla base delle simulazioni numeriche effettuate con il modello SWAN, in Tabella 7a viene mostrato il clima meteomarinu medio ricavatu sottocosta, corrispondente al punto sottocosta di riferimento per i successive analisi morfodinamiche, posizionatu circa alla batimetrica -10 m (più precisamente, alla profondità di 10.7 m, cioè il valore più vicino a 10 m nell'approssimazione dovuta alla discretizzazione della griglia calcolo) e avente coordinate nel dominio di calcolo utilizzato ($x = 3400$ m, $y = 1200$ m). Il clima ondosu è stato suddiviso per classi di direzioni medie di provenienza del moto ondosu ricadenti all'interno del settore di traversia del paraggio di Vibo Valentia Marina (260° - 345° N), pari cioè a 275° (settore angolare 260° - 290° N), 305° (settore angolare 290° - 320° N) e 332.5° (settore angolare 320° - 345° N), e caratterizzate da uno specifico valore di classe d'altezza d'onda H_s , a partire da 0.5 m, e dai rispettivi valori di T_m e T_p , determinati attraverso le correlazioni altezza-periodo calcolate in precedenza.

Nella Tabella 7b relativa al clima ondosu medio sottocosta viene mostrato, oltre i nuovi valori di direzione, altezza e periodo, anche il valore di $\Delta\alpha$, che rappresenta l'entità della rotazione angolare prodotta dai raggi d'onda nella loro propagazione da largo a riva, e il valore di ΔH_s , espresso in %, che rappresenta l'entità della variazione del moto ondosu nella sua propagazione da largo al punto sottocosta considerato.

7.a CLIMA ONDOSU MEDIO AL LARGO			
DIR (°N)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)
265.00	0.50	4.00	4.88
265.00	1.00	5.03	6.40
265.00	1.50	5.76	7.49
265.00	2.00	6.34	8.38
265.00	2.50	6.82	9.14
265.00	3.00	7.25	9.82
265.00	3.50	7.63	10.43
265.00	4.00	7.98	10.98
265.00	4.50	8.29	11.50
265.00	5.00	8.59	11.98
275.00	0.50	4.00	4.88
275.00	1.00	5.03	6.40
275.00	1.50	5.76	7.49
275.00	2.00	6.34	8.38
275.00	2.50	6.82	9.14
275.00	3.00	7.25	9.82
275.00	3.50	7.63	10.43
275.00	4.00	7.98	10.98
275.00	4.50	8.29	11.50
275.00	5.00	8.59	11.98

7.b CLIMA ONDOSU MEDIO SOTTOCOSTA (-10 m)					
$\Delta\alpha$ (°)	DIR (°N)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	ΔH_s (%)
22.99	287.99	0.20	3.44	4.88	59.64
28.75	293.75	0.38	4.62	6.40	62.13
32.55	297.55	0.59	5.63	7.49	60.74
35.10	300.10	0.82	6.48	8.38	58.87
36.87	301.87	1.09	7.21	9.14	56.44
38.30	303.30	1.40	7.43	9.82	53.40
39.19	304.19	1.70	7.54	10.43	51.37
39.96	304.96	2.03	7.77	10.98	49.37
40.58	305.58	2.41	8.31	11.50	46.46
41.00	306.00	2.74	8.51	11.98	45.18
15.27	290.27	0.31	3.41	4.88	38.51
20.67	295.67	0.57	4.58	6.40	42.96
24.21	299.21	0.87	5.54	7.49	42.09
26.58	301.58	1.19	6.38	8.38	40.48
28.26	303.26	1.55	6.80	9.14	37.90
29.62	304.62	1.97	7.22	9.82	34.45
30.50	305.50	2.37	7.51	10.43	32.18
31.26	306.26	2.80	7.90	10.98	29.90
31.89	306.89	3.32	8.26	11.50	26.30
32.31	307.31	3.76	8.50	11.98	24.85

CADI s.r.l.
Porto Turistico "Marina Resort"

STUDIO IDRAULICO-MARITTIMO E VERIFICA DI AGITAZIONE INTERNA

275.00	5.50	8.87	12.44
275.00	6.00	9.13	12.86
285.00	0.50	4.00	4.88
285.00	1.00	5.03	6.40
285.00	1.50	5.76	7.49
285.00	2.00	6.34	8.38
285.00	2.50	6.82	9.14
285.00	3.00	7.25	9.82
285.00	3.50	7.63	10.43
285.00	4.00	7.98	10.98
285.00	4.50	8.29	11.50
285.00	5.00	8.59	11.98
285.00	5.50	8.87	12.44
295.00	0.50	4.00	4.88
295.00	1.00	5.03	6.40
295.00	1.50	5.76	7.49
295.00	2.00	6.34	8.38
295.00	2.50	6.82	9.14
295.00	3.00	7.25	9.82
295.00	3.50	7.63	10.43
295.00	4.00	7.98	10.98
295.00	4.50	8.29	11.50
295.00	5.00	8.59	11.98
295.00	5.50	8.87	12.44
295.00	6.00	9.13	12.86
305.00	0.50	4.00	4.88
305.00	1.00	5.03	6.40
305.00	1.50	5.76	7.49
305.00	2.00	6.34	8.38
305.00	2.50	6.82	9.14
305.00	3.00	7.25	9.82
305.00	3.50	7.63	10.43
305.00	4.00	7.98	10.98
305.00	4.50	8.29	11.50
305.00	5.00	8.59	11.98
305.00	5.50	8.87	12.44
305.00	6.00	9.13	12.86
305.00	6.50	9.37	13.27
315.00	0.50	4.00	4.88
315.00	1.00	5.03	6.40
315.00	1.50	5.76	7.49
315.00	2.00	6.34	8.38
315.00	2.50	6.82	9.14
315.00	3.00	7.25	9.82
315.00	3.50	7.63	10.43
315.00	4.00	7.98	10.98
315.00	4.50	8.29	11.50

32.69	307.69	4.21	8.92	12.44	23.53
33.05	308.05	4.74	9.04	12.86	20.98
10.00	295.00	0.39	3.49	4.88	22.22
14.55	299.55	0.74	4.65	6.40	26.05
17.45	302.45	1.13	5.57	7.49	24.97
19.40	304.40	1.53	6.35	8.38	23.56
20.80	305.80	1.98	7.04	9.14	20.95
21.98	306.98	2.48	7.31	9.82	17.32
22.76	307.76	2.98	7.56	10.43	14.99
23.45	308.45	3.49	7.88	10.98	12.66
24.03	309.03	4.11	8.18	11.50	8.71
24.42	309.42	4.63	8.54	11.98	7.47
24.78	309.78	5.14	8.79	12.44	6.56
6.05	301.05	0.44	3.54	4.88	12.66
9.62	304.62	0.85	4.69	6.40	15.28
11.88	306.88	1.29	5.59	7.49	13.83
13.39	308.39	1.75	6.35	8.38	12.56
14.50	309.50	2.25	6.80	9.14	10.01
15.44	310.44	2.81	7.26	9.82	6.42
16.07	311.07	3.35	8.13	10.43	4.16
16.63	311.63	3.92	8.42	10.98	1.99
17.11	312.11	4.58	8.44	11.50	1.87
17.44	312.44	5.13	8.64	11.98	2.68
17.73	312.73	5.21	8.92	12.44	5.27
18.02	313.02	5.73	9.64	12.86	4.00
3.38	308.38	0.46	3.55	4.88	8.26
5.84	310.84	0.90	4.72	6.40	9.97
7.40	312.40	1.38	5.61	7.49	8.26
8.45	313.45	1.86	6.35	8.38	7.17
9.21	314.21	2.38	6.89	9.14	4.82
9.86	314.86	2.95	7.31	9.82	1.51
10.28	315.28	3.44	7.69	10.43	1.71
10.67	315.67	3.89	7.90	10.98	2.75
10.99	315.99	4.41	8.37	11.50	2.00
11.04	316.04	4.89	8.46	11.98	2.20
11.11	316.11	5.40	8.76	12.44	1.82
11.18	316.18	5.71	9.20	12.86	4.83
11.22	316.22	6.04	9.33	13.27	7.08
1.62	316.62	0.47	3.56	4.88	6.76
2.88	317.88	0.92	4.73	6.40	7.94
3.71	318.72	1.41	5.61	7.49	6.13
4.26	319.26	1.89	6.34	8.38	5.27
4.65	319.66	2.42	6.98	9.14	3.22
4.98	319.98	2.99	7.54	9.82	0.32
5.20	320.20	3.44	8.05	10.43	1.71
5.39	320.39	3.91	7.99	10.98	2.25
5.55	320.55	4.76	8.33	11.50	5.71

315.00	5.00	8.59	11.98	5.66	320.66	4.91	8.68	11.98	1.80
315.00	6.50	9.37	13.27	5.92	320.92	6.21	9.86	13.27	4.46
325.00	0.50	4.00	4.88	0.23	325.23	0.47	3.56	4.88	6.44
325.00	1.00	5.03	6.40	0.31	325.31	0.93	4.74	6.40	7.41
325.00	1.50	5.76	7.49	0.41	325.41	1.42	5.61	7.49	5.59
325.00	2.00	6.34	8.38	0.50	325.50	1.90	6.34	8.38	4.87
325.00	2.50	6.82	9.14	0.57	325.57	2.42	6.96	9.14	3.04
325.00	3.00	7.25	9.82	0.63	325.63	2.91	7.33	9.82	3.00
325.00	3.50	7.63	10.43	0.66	325.66	3.48	7.69	10.43	0.57
325.00	4.00	7.98	10.98	0.69	325.69	3.91	8.03	10.98	2.25
325.00	4.50	8.29	11.50	0.70	325.70	4.38	8.33	11.50	2.67
325.00	5.00	8.59	11.98	0.71	325.71	4.87	8.67	11.98	2.60
325.00	5.50	8.87	12.44	0.71	325.71	5.22	9.02	12.44	5.09
337.50	0.50	4.00	4.88	1.58	335.92	0.47	3.56	4.88	6.83
337.50	1.00	5.03	6.40	2.97	334.53	0.92	4.73	6.40	8.08
337.50	1.50	5.76	7.49	3.82	333.68	1.40	5.61	7.49	6.35
337.50	2.00	6.34	8.38	4.32	333.18	1.89	6.33	8.38	5.71
337.50	2.50	6.82	9.14	4.67	332.83	2.40	6.95	9.14	3.96
337.50	3.00	7.25	9.82	4.96	332.54	2.96	7.21	9.82	1.49
337.50	3.50	7.63	10.43	5.16	332.34	3.49	7.67	10.43	0.27
337.50	4.00	7.98	10.98	5.35	332.15	3.87	7.99	10.98	3.25
337.50	4.50	8.29	11.50	5.52	331.98	4.29	8.35	11.50	4.67
337.50	5.50	8.87	12.44	5.75	331.75	5.33	8.99	12.44	3.09
337.50	6.00	9.13	12.86	5.87	331.63	5.79	9.34	12.86	3.50
337.50	6.50	9.37	13.27	5.96	331.54	6.24	9.51	13.27	2.77

Tabella 7: Clima ondoso medio a largo e sottocosta (-10 m) per il paraggio di Vibo Valentia Marina

Dall'analisi dei risultati relativi alla propagazione del moto ondoso sottocosta corrispondenti circa alla batimetrica -10 m, si evince una maggiore rotazione delle onde provenienti da Ovest, cioè per quei settori angolari aventi direzioni medie pari a 265°N, 275°N e 285°N, in cui esse risultano tendenzialmente subparallele alla linea di riva del litorale in esame. Per questi attacchi ondosi, le deviazioni angolari delle direzioni di propagazione delle onde sono più elevate per le onde estreme e comprese circa fra 15° e 41° con rotazioni nel verso orario. A causa dei fenomeni di rifrazione e shoaling nella propagazione delle onde sottocosta proveniente dai 3 settori angolari succitati, le percentuali di abbattimento delle altezze d'onda significative sono comprese fra il 7 % e il 62 % circa. Per le direzioni medie al largo pari a 295°N, 305°N, 315°N e 325°N, le deviazioni angolari variano da 0.2° a 18° circa, con maggiore rotazioni delle onde più grandi. Le onde presentano ancora rotazione orarie nella loro propagazione, tendendo cioè a disporsi lungo la normale al litorale. Le percentuali di abbattimento delle altezze d'onda sono comprese fra lo 0.5 % e il 15 % circa, con forti abbattimenti per le onde più basse. Le deformazioni del moto ondoso da largo a sottocosta risultano comunque essere molto piccole durante le propagazioni da questi settori angolari fino alla batimetrica -10 m. Per le

direzione media al largo pari a 337.5°N , si osservano, dal confronto del clima ondoso al largo e sottocosta, basse deviazioni angolari fino a circa 6° per le onde più elevate e abbattimenti delle altezze d'onda significative compresi fra lo 0.3 % e l'8 % circa. In generale, l'incidenza tendenzialmente ortogonale delle direzioni di propagazione del moto ondoso rispetto alle batimetriche fa sì che le onde mutino in altezza e direzione soprattutto per il fenomeno dello shoaling, che risulta meno preponderante nel cambiamento delle onde rispetto alla \ln questo caso, risulta così minimizzato l'effetto della rifrazione delle onde poiché i fronti d'onda viaggiano a profondità non molto variabili fra di loro.

Si osserva inoltre che le direzioni di propagazione delle onde per i diversi settori angolari analizzati tendono sostanzialmente a disporsi normalmente al litorale, o meglio i fronti d'onda tendono a disporsi parallelamente alla linea di riva. Le onde più elevate subiscono abbattimenti in altezza più forti, i cui valori massimi sottocosta, alla profondità di circa 10 m, si attestano fino a valori di poco superiori a 6 m. Occorre tuttavia sottolineare che ad una profondità più prossima al frangimento (-5 m, in cui solitamente vengono imbastite le opere di difesa costiera dall'erosione), le onde subiscono un forte abbattimento per effetto della diminuzione del fondale marino.

In Tabella 8 e in Tabella 9 sono mostrate, rispettivamente, per il paraggio di Vibo Valentia Marina i numeri di apparizione e le percentuali di apparizione del moto ondoso alla profondità di circa -10 m nel punto rappresentativo sottocosta avente coordinate $x = 3400$ e $y = 1200$ m.

In forma di istogramma nella Figura 29 e sotto forma di diagramma polare (escludendo gli eventi di calma con $H_s < 0.25$ m) in Figura 30 vengono mostrate le percentuali di apparizione del moto ondoso sottocosta per il paraggio di Vibo Valentia Marina.

Circa il 79 % degli eventi risultano prevalentemente ricadere dai soli 3 settori direzionali 280° - 290°N , 290° - 300°N e 300° - 310°N a causa degli effetti dei fenomeni di shoaling e rifrazione connessi al moto ondoso nella sua propagazione verso riva che fanno sì che la direzione del moto ondoso si avvicini alla direzione normale al litorale. Il 43.5 % degli eventi sottocosta risulta provenire dal solo settore angolare 290° - 300°N , corrispondente agli stati di mare tuttavia poco elevati e compresi nel range in cui $0.25 \text{ m} < H_s < 1.25 \text{ m}$.

Gli eventi di maggiore intensità, anche se poco frequenti, ricadono nel settore angolare 300° - 345°N , che risultano essere quelli che interessano maggiormente le conseguenti variazioni della dinamica costiera. In tale area le onde arrivano, alla batimetrica -10 m, con una intensità simile a quelle avute al largo, nella condizione

di acque profonde (assenza di interazione col fondale marino). Dal suddetto settore angolare, i valori massimi di Hs si attestano nel range 5.75 m-6.25 m.

Dir (°N)		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)												TOTALE	
		calme	0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	2.75-3.25	3.25-3.75	3.75-4.25	4.25-4.75	4.75-5.25	5.25-5.75		5.75-6.25
260	270	4019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4019
270	280	4219	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4219
280	290	10451	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10451
290	300	1649	21284	1417	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24350
300	310	644	3487	3549	1159	481	254	80	33	6	6	5	0	0	9704
310	320	246	632	622	234	66	45	58	18	12	10	9	5	1	1958
320	330	74	308	208	75	19	21	11	10	4	6	3	6	1	746
330	345	60	206	157	83	42	16	11	2	4	4	0	3	2	590
TOTALE		21362	25917	5953	1551	608	336	160	63	26	26	17	14	4	56037

Tabella 8: Numero di apparizioni del moto ondoso nel punto sottocosta (-10 m) per il paraggio di Vibo Valentia Marina (punto di coordinate: x = 3400 m, y = 1200 m)

Dir (°N)		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)												TOTAL E	
		calme	0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	2.75-3.25	3.25-3.75	3.75-4.25	4.25-4.75	4.75-5.25	5.25-5.75		5.75-6.25
260	270	7.172%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	7.172%
270	280	7.529%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	7.529%
280	290	18.650%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	18.650%
290	300	2.943%	37.982%	2.529%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	43.453%
300	310	1.149%	6.223%	6.333%	2.068%	0.858%	0.453%	0.143%	0.059%	0.011%	0.011%	0.009%	0.000%	0.000%	17.317%
310	320	0.439%	1.128%	1.110%	0.418%	0.118%	0.080%	0.104%	0.032%	0.021%	0.018%	0.016%	0.009%	0.002%	3.494%
320	330	0.132%	0.550%	0.371%	0.134%	0.034%	0.037%	0.020%	0.018%	0.007%	0.011%	0.005%	0.011%	0.002%	1.331%
330	345	0.107%	0.368%	0.280%	0.148%	0.075%	0.029%	0.020%	0.004%	0.007%	0.007%	0.000%	0.005%	0.004%	1.053%
TOTAL E		38.121%	46.250%	10.623%	2.768%	1.085%	0.600%	0.286%	0.112%	0.046%	0.046%	0.030%	0.025%	0.007%	100%

Tabella 9: Percentuali di apparizione del moto ondoso nel punto sottocosta (-10 m) per il paraggio di Vibo Valentia Marina (punto di coordinate: x = 3400 m, y = 1200 m)

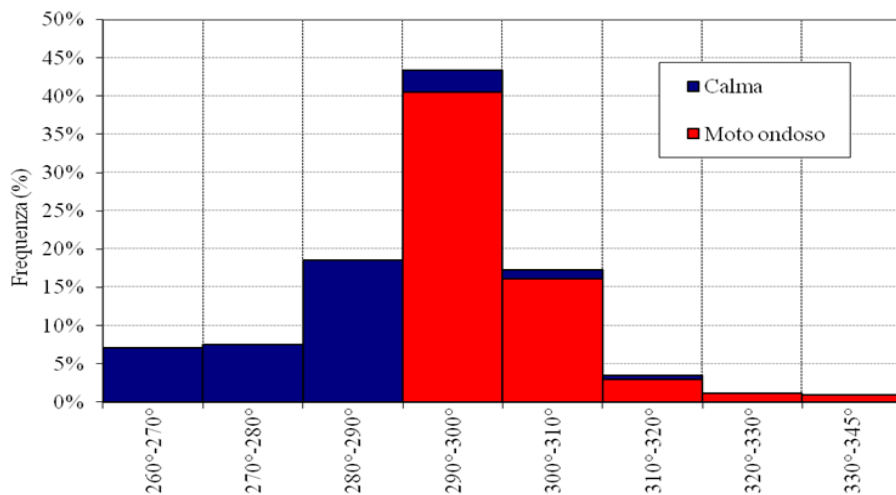


Figura 29: Istogrammi relativi alle percentuali di apparizione del moto ondoso sottocosta (-10 m) per il paraggio di Vibo Valentia Marina (punto di coordinate: x = 3400 m, y = 1200 m)

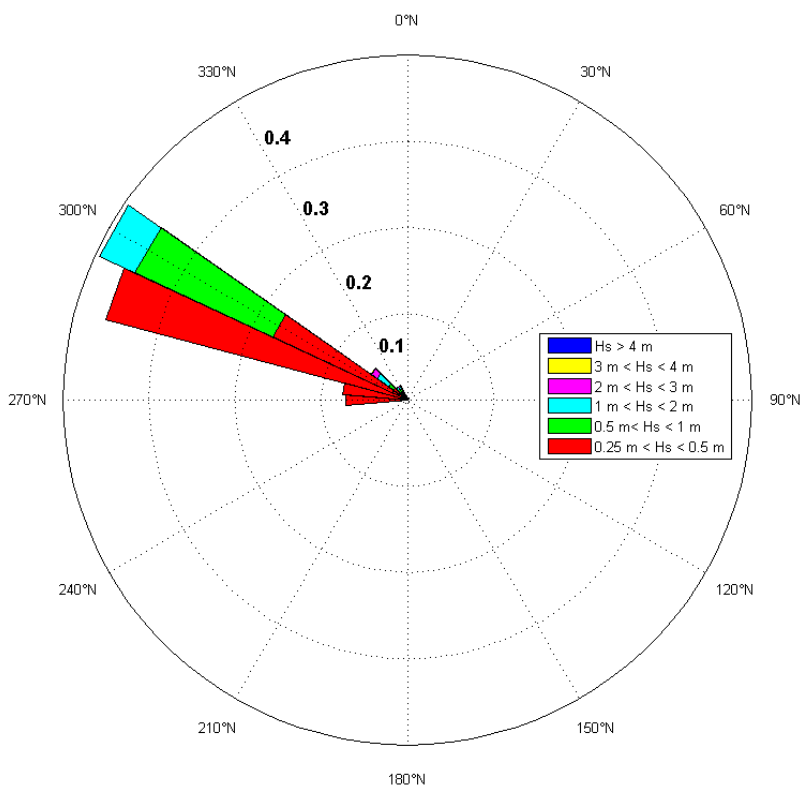


Figura 30: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso sottocosta (-10 m) per il paraggio di Vibo Valentia Marina (punto di coordinate: x = 3400 m, y = 1200 m)

3. ANALISI EVENTI ESTREMI

Al fine di verificare la stabilità delle opere marittime, è necessario conoscere l'onda di progetto, ossia quel valore dell'altezza d'onda che non sia superato in lunghi periodi di tempo. Ricorrendo a metodi propri dell'analisi probabilistica, la stima dell'altezza d'onda massima probabile è stata condotta secondo il seguente approccio:

- definizione dell'evento (eccedenze o massimi e quindi il livello di soglia o l'intervallo temporale);
- scelta della distribuzione probabilistica rappresentativa degli eventi statistici (campione degli eventi);
- valutazione del numero degli eventi nella vita presunta dell'opera;
- valutazione della distribuzione di probabilità dell'altezza d'onda massima.

L'individuazione dell'onda di progetto necessita la conoscenza delle caratteristiche delle mareggiate che si sono verificate nel paraggio considerato. L'approccio probabilistico porta alla determinazione di un valore di altezza significativa, H_s , in funzione del periodo di ritorno, T . Il periodo di registrazione dei dati di moto ondoso (circa 9 anni per la boa di Cetraro) risulta affidabile per la determinazione degli eventi estremi aventi tempi di ritorno non particolarmente lunghi, cioè pari a circa 3 volte la durata degli anni di osservazione.

Partendo dalle serie storica dei dati di moto ondoso al largo del paraggio di Vibo Valentia Marina riguardanti le altezze d'onda significative e la loro direzione di provenienza, ricavati dalla trasposizione geografica dei dati registrati dall'ondometro di Cetraro è stata effettuata un'operazione di "estrazione" dalla popolazione dei dati, volta alla determinazione di un campione di eventi (altezze massime al culmine della mareggiata) omogenei e statisticamente indipendenti.

A tal fine, è stato assunto che l'agitazione della superficie libera possa essere considerata una mareggiata quando l'altezza significativa supera una determinata soglia, posta pari a 2.5 m, sulla base delle analisi delle mareggiate osservate per le boe italiane della RON (Corsini et al., 2002; Cavalieri et al., 2004), per un periodo di tempo significativo, considerato almeno di durata pari a 6 ore, e quando le direzioni di provenienza degli stati di mare rimangano confinati entro un settore angolare di massimo 30° (Corsini et al., 2002). La durata della mareggiata è quindi individuata da due attraversamenti della soglia, mentre la misura della sua intensità è data dalla massima altezza d'onda significativa verificatasi in tale durata. La direzione di provenienza della mareggiata viene posta pari alla direzione media registrata durante l'evento.

In particolare, dall'analisi della serie dei valori di altezza d'onda significativa, H_s , al largo del paraggio di Vibo Valentia Marina sono state individuati 168 eventi di mareggiata afferenti al settore di traversia in esame (260° - 345° N), per come mostrato in Tabella 10, scegliendo 3 settori direzionali principali (260° - 290° , 290° - 320° N e 320° - 345° N) in modo tale che fossero rappresentativi di un numero sufficiente di mareggiate utili per la determinazione degli eventi estremi, e in Figura 37 attraverso una rappresentazione polare degli stessi. Il maggior numero di mareggiate e quelle aventi frequenza maggiore sono risultate provenire principalmente dal settore angolare 260° - 290° N con 119 eventi, e, a seguire, dal settore 290° - 320° N con 35 eventi.

Settore 260° - 290° N		Settore 290° - 320° N		Settore 320° - 345° N	
Dir ($^\circ$ N)	Hs (m)	Dir ($^\circ$ N)	Hs (m)	Dir ($^\circ$ N)	Hs (m)
261.75	3.15	290.36	4.12	321.36	2.73
261.37	3.04	290.24	4.21	324.27	3.54
263.99	3.80	290.31	2.82	323.22	2.92
262.46	3.49	291.80	2.69	324.49	4.78
263.75	3.63	291.30	4.08	327.15	2.56
263.22	2.78	293.88	2.68	328.81	5.44
262.86	3.08	292.66	3.73	330.39	3.87
263.42	2.69	293.00	4.28	328.47	5.62
262.38	3.01	292.76	3.01	329.07	2.92
262.79	3.29	291.81	4.59	331.67	3.05
263.53	4.69	292.23	5.77	333.45	6.27
264.18	4.69	291.74	2.84	332.99	4.14
266.34	4.85	292.23	2.98	342.84	3.00
267.23	4.11	292.23	2.98	343.66	4.02
266.53	3.61	296.48	4.42		
266.09	3.28	299.15	3.28		
265.46	2.93	298.28	2.62		
265.03	2.71	296.98	4.68		
266.68	3.41	296.97	3.00		
266.14	2.79	296.95	3.00		
266.19	2.56	301.43	3.61		
267.32	3.62	303.20	2.58		
266.20	2.54	307.31	3.99		
266.36	3.25	308.98	4.67		
266.50	2.70	307.48	3.47		
267.08	5.16	308.98	4.59		
266.50	2.70	305.98	2.58		
267.08	5.16	307.53	4.93		
270.19	4.00	312.65	2.74		
270.94	2.75	311.00	4.42		
269.69	4.03	318.49	4.03		
270.19	4.96	317.27	3.23		
271.02	3.07	317.60	3.74		
269.44	2.70	318.88	3.74		
270.08	3.01	319.00	4.09		
269.14	3.18				
270.49	2.93				

269.87	3.60
269.73	3.08
270.79	2.58
268.14	2.72
268.99	2.65
269.79	3.92
270.00	3.48
269.86	3.32
270.33	3.09
270.42	4.73
270.42	4.73
275.99	2.95
274.89	2.85
274.37	2.68
274.69	2.56
275.04	3.96
274.81	6.00
275.26	3.59
275.56	2.67
276.12	3.24
275.25	3.11
274.81	3.07
274.52	3.60
274.49	2.55
274.23	3.66
273.96	2.69
274.87	3.30
275.97	4.16
274.18	2.76
274.71	3.16
275.16	2.67
274.65	4.25
274.65	4.25
278.43	3.50
279.43	2.71
279.32	3.31
278.87	3.43
279.48	3.60
279.98	2.66
280.51	3.03
281.33	3.02
278.83	3.82
279.04	2.75
278.02	3.17
278.87	5.38
278.46	3.15
280.82	2.78
280.82	2.78
283.61	3.88
283.56	2.90
283.14	3.48
283.32	3.91
284.89	3.15

281.77	3.99
284.44	3.32
283.04	2.70
283.99	3.79
282.56	2.77
283.13	2.68
283.84	4.30
283.16	3.05
283.71	5.53
284.06	3.36
283.44	3.01
283.44	3.01
288.26	2.95
286.64	3.57
286.45	3.71
287.25	4.02
286.44	2.71
287.47	4.13
288.38	3.36
288.25	2.97
288.23	2.81
287.71	4.39
289.33	2.57
287.83	5.46
287.62	3.05
287.41	2.57
287.60	3.24
287.41	2.57
287.60	3.24

Tabella 10: Altezze d'onda massime al culmine della mareggiata e direzioni medie di provenienza

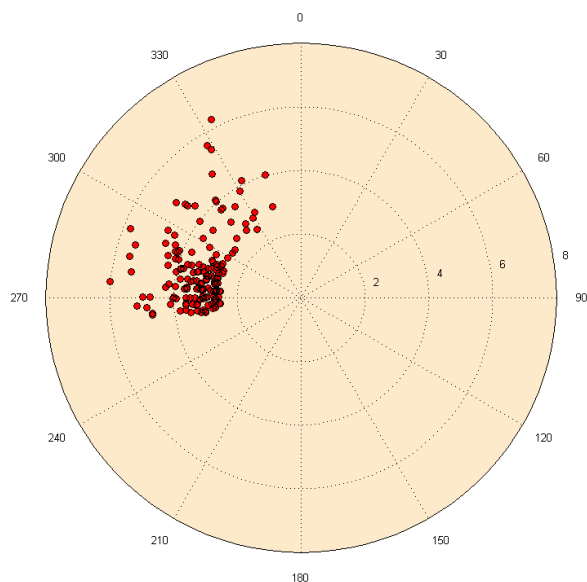


Figura 31: Diagramma polare delle altezze d'onda significative massime al culmine della mareggiata in funzione della direzione media di provenienza

Gli eventi estremi di moto ondoso da determinare sono stati scelti afferire pertanto a 2 principali settori direzionali (260°-290°N e 290°-320°N), afferenti del settore di traversia del paraggio di Vibo Valentia Marina. Gli eventi relativi al settore 320°-345°N non sono stati considerati perché il campione di dati estratto dalla popolazione di eventi è limitato e proviene da settore sub-parallelo al litorale, comportando che tali mareggiate, nella loro propagazione sottocosta, abbiano un forte abbattimento delle caratteristiche ondose per effetto della rifrazione.

Al fine di determinare le altezze d'onda significative a prefissato T , si fa riferimento al metodo di Goda (1988), basato sulle seguenti ipotesi:

- tutte le altezze d'onda significative del campione provengono da una singola popolazione statistica di eventi di mareggiate;
- le altezze d'onda di una mareggiata sono ragionevolmente rappresentate dall'altezza significativa;
- le altezze d'onda estreme facenti parte del campione non sono limitate da qualche fattore fisico, come ad esempio la profondità in acque intermedie o basse.

In particolare, Goda considera le seguenti funzioni di distribuzione a lungo termine:

- $F(H_s \leq \hat{H}_s) = e^{-e^{-\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)}}$ distribuzione di Fisher-Tippet I (FT-I o Gumbel)
- $F(H_s \leq \hat{H}_s) = 1 - e^{-e^{-\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)^k}}$ distribuzione di Weibull

dove:

- $F(H_s \leq \hat{H}_s)$ è la probabilità che H_s non superi il valore di soglia di altezza significativa, \hat{H}_s (in questo caso posto uguale a 2.5 m);
- B è il parametro del sito;
- A è il parametro di scala;
- k è il parametro di forma.

Il valore di k viene posto pari a 0.75, 1.00, 1.40 e 2.00. Al variare di tale coefficiente, si esaminano quindi 4 differenti distribuzioni a lungo termine di Weibull.

Il primo passo relativo all'applicazione della metodologia consiste nel prendere i valori di altezza d'onda significativa di input e posizionarli in ordine decrescente. Ad ogni valore di H_s viene assegnata una probabilità (plotting position) secondo le espressioni:

$$F(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0.44}{NT + 0.12} \quad (\text{secondo la Fisher-Tippet I})$$

$$F(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0.20 - \frac{0.27}{\sqrt{k}}}{NT + 0.20 + \frac{0.23}{\sqrt{k}}} \quad (\text{secondo la Weibull})$$

in cui:

- $F(H_s \leq H_{sm})$ rappresenta la probabilità che l' m -esima altezza significativa non venga superata;
- H_{sm} è l' m -esimo valore del campione delle altezze significative;
- m (livello del valore dell'altezza significativa) = 1, 2, ..., N, in cui N rappresenta il numero totale delle mareggiate;
- NT è il numero totale degli eventi durante la lunghezza della serie storica considerata.

I coefficienti ottimali della distribuzione Fisher-Tippet I (o di Gumbel) i coefficienti della plotting position sono stati ottenuti da Grigorten (1963), mentre quelli relativi alla distribuzione di Weibull sono stati ottenuti da Goda (1988).

Per tutte e 5 le distribuzioni (FT-I e Weibull con $k = 0.75, 1.00, 1.40$ e 2.00), sono stati considerati gli eventi a partire da un valore di soglia \hat{H}_s , fissato pari a 2.5 m. I parametri A e B vengono determinati verificando l'adattabilità ai dati delle 5 funzioni, attraverso un'analisi di regressione lineare effettuata con il metodo dei minimi quadrati. I calcoli sono basati sull'analisi di regressione lineare della relazione:

$$H_{sm} = \hat{A}y_m + \hat{B}$$

dove y_m (variabile ridotta) si calcola trasformando logicamente le espressioni delle probabilità di non superamento, $F(H_s \leq H_{sm})$, ottenendo per le due distribuzioni selezionate:

$$y_m = -\ln[-\ln F(H_s \leq H_{sm})] \quad (\text{secondo la Fisher-Tippet I})$$

$$y_m = \{-\ln[1 - F(H_s \leq H_{sm})]\}^{1/k} \quad (\text{secondo la Weibull})$$

I valori di \hat{A} e \hat{B} rappresentano, rispettivamente, i parametri di scala e di sito ricavati dall'analisi di regressione lineare.

Per la selezione della funzione di distribuzione che meglio si adatta al campione dei dati in esame, con riferimento alle mareggiate afferenti ai diversi settori angolari di provenienza del moto ondoso al largo dei paraggi in esame, si considera quella che fornisce il alto valore del coefficiente di correlazione, R^2 . Tali distribuzioni probabilistiche verranno considerate ai fini della determinazione delle altezze d'onda significative a prefissato tempo di ritorno.

In Tabella 11 vengono mostrati, per il paraggio al largo di Vibo Valentia Marina, i valori dei coefficienti di correlazioni per le distribuzioni di probabilità adottate, evidenziando quelle distribuzioni che forniscono il valore più elevato di R^2 . In particolare, per i settori 260°-290°N e 290°-320°N è stato trovato che le distribuzioni di Weibull, rispettivamente, con $k = 1.4$ e $k = 2$ presentano i maggiore valore di R^2 . Tali distribuzioni sono state quindi considerate nei successivi calcoli per la determinazione delle onde di progetto.

Settore 260°-290°N		Settore 290°-320°N	
Distribuzione	R^2	Distribuzione	R^2
Gumbel	0.978	Gumbel	0.951
Weibull $k = 0.75$	0.918	Weibull $k = 0.75$	0.790
Weibull $k = 1$	0.980	Weibull $k = 1$	0.886
Weibull $k = 1.4$	0.990	Weibull $k = 1.4$	0.949
Weibull $k = 2$	0.957	Weibull $k = 2$	0.968

Tabella 11: Coefficienti di correlazione per le distribuzioni di probabilità adottate, al largo di Vibo Valentia Marina

Successivamente, i valori dell'altezza d'onda significativa per differenti periodi di ritorno sono calcolati, per le funzioni di probabilità considerate, mediante la seguente espressione:

$$H_{sr} = \hat{A}y_r + \hat{B} \quad \text{dove:}$$

$$y_r = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{\lambda T} \right) \right] \quad (\text{Fisher-Tippet I});$$

$$y_r = [\ln(\lambda T)]^{1/k} \quad (\text{Weibull});$$

- H_{sr} rappresenta l'altezza d'onda significativa, associata ad un periodo di ritorno T ;
- λ (numero medio degli eventi per anno) = NT / K ;
- K (lunghezza della registrazione dei dati di moto ondoso).

Per i periodi di ritorno più significativi, relativi a $T = 1, 2, 5, 10, 20, 50$ e 100 anni e per i settori direzionali afferenti al settore di traversia di Vibo Valentia Marina, sono mostrati, rispettivamente, in Tabella 12 valori di H_s a prefissato tempo di ritorno e i rispettivi valori di periodo medio, T_m , e di periodo di picco, T_p , ottenuti sulla base

delle correlazioni altezze-periodi precedentemente determinate. I valori leggermente maggiori delle onde estreme sono relativi al settore angolare 260°-290°N per i maggiori tempi di ritorno.

T (anni)	Settore 260°-290°N			Settore 290°-320°N		
	H _s (m)	T _m (s)	T _p (s)	H _s (m)	T _m (s)	T _p (s)
1	4.75	8.51	11.84	5.13	8.70	12.16
2	5.10	8.68	12.12	5.39	8.83	12.37
5	5.54	8.89	12.47	5.72	8.98	12.63
10	5.91	9.08	12.79	6.01	9.13	12.87
25	6.38	9.31	13.17	6.36	9.31	13.16
50	6.72	9.47	13.44	6.61	9.42	13.36
100	7.04	9.62	13.69	6.85	9.53	13.54

Tabella 12: Eventi estremi direzionali a prefissato tempo di ritorno al largo del paraggio di Vibo Valentia Marina

La Tabella 13 mostra gli andamenti delle altezze d'onda significative in funzione del periodo di ritorno per i 2 diversi settori direzionali considerati al largo di Vibo Valentia Marina e per le 5 distribuzioni probabilistiche utilizzate. I valori di altezza d'onda significativa presi in considerazione sono, come esposto in precedenza, quelli relativi alla distribuzione probabilistica che offre il maggior valore del grado di correlazione fra la variabile ridotta e l'altezza d'onda significativa al culmine della mareggiata, ovvero Weibull con $k = 1.4$ e $k = 2$.

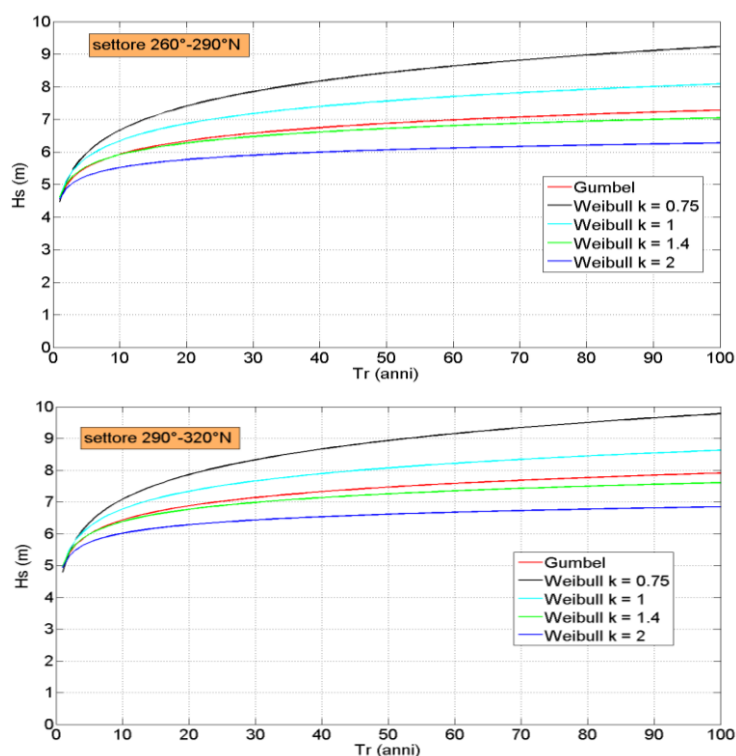


Tabella 13: Variazione dell'altezza significativa, Hs (m), in funzione del periodo di ritorno per differenti settori direzionali al largo del paraggio di Vibo Valentia Marina

Oltre alla propagazione del clima ondoso da largo verso riva, comprendente le diverse classi di altezza d'onda significativa suddivise per differenti settori direzionali, è stata effettuata attraverso il modello SWAN la propagazione da largo a sottocosta, fino al punto sottocosta rappresentativo posto alla batimetrica -10 m, degli eventi estremi di moto ondoso associati ai periodi di ritorni più significativi ($T = 25$ e 50 anni). Ciò risulta utile nel dimensionamento e nella verifica delle strutture di difesa costiera dall'erosione, in cui sono necessari i valori delle onde di progetto che possono direttamente incidere su di esse.

La Tabella 14 illustra i risultati della propagazione effettuata con il modello numerico SWAN per gli eventi estremi direzionali di moto ondoso associati ai periodi di ritorno più significativi a livello di progettazione delle opere di difesa costiera dall'erosione ($T = 25$ e 50 anni).

T (anni)	Settore	$\Delta\alpha$ (°)	DIR (°N)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	ΔH_s (%)
25	260°-290°N	33.61	308.61	5.42	9.41	13.17	15.08
50	260°-290°N	33.80	308.80	5.88	9.86	13.44	12.47
25	290°-320°N	12.35	317.35	6.11	9.36	13.16	7.59
50	290°-320°N	12.44	317.44	6.34	9.67	13.36	7.41

Tabella 14: Eventi estremi direzionali di moto ondoso sottocosta con $T = 25$ e 50 anni (-10 m)

Dall'analisi dei risultati di tale tabella, si osserva un progressivo abbattimento delle altezze d'onda significative estreme da largo verso riva all'aumentare del tempo di ritorno per il settore direzionale 260°-290°N, con valori compresi fra circa 5.4 m e 5.9 m. Per il settore angolare 290°-320°N, si assiste ad una minima variazione dei valori di Hs che si attesta fra circa 6.1 m e 6.3 m. La tendenziale propagazione normale alla costa e la particolare batimetria dell'area, nel lato sopraflutto del porto, fa sì che alla profondità di circa 10 m tali onde di progetto presentino valori alquanto elevati.

Le rotazioni delle direzioni di propagazione tendono ad essere più accentuate per il settore direzionale 260°-290°N con valori inferiori di Hs per i 2 tempi di ritorno di riferimento rispetto al caso 290°-320°N. Le deviazioni angolari massime, per questo settore, arrivano a circa 15°, facendo sì che le onde di progetto tendano a disporsi all'incirca normalmente alla direzione media del litorale oggetto di studio. Minori rotazioni d'onda si hanno invece per il settore 290°-320°N.

4. CALCOLO DEI SOVRALZI

La conoscenza delle massime variazioni quasi statiche del livello marino, dovute a cause diverse (principalmente marea astronomica e meteorologica), è necessaria per molteplici scopi, quali la corretta progettazione delle quote da assegnare ad eventuali opere di difesa e la determinazione dell'altezza limite di swash (quota della spiaggia emersa raggiunta dal mare). In generale, per quanto riguarda le variazioni a breve termine, periodiche e non, occorre distinguere gli effetti della marea astronomica da quelli della marea "meteorologica" (indotta essenzialmente dall'azione del vento e dalle variazioni di pressione atmosferica). Nella zona del Mar Tirreno ove ricade il paraggio costiero in esame le escursioni del livello del mare sono di fatto modeste. Per la stima della componente oscillatoria della marea astronomica è possibile ricorrere all'analisi dei livelli basata sulla serie mareografiche.

Nel calcolo del sovrizzo indotto dagli eventi meteorologici è necessario considerare i contributi dovuti all'azione del moto ondoso (wave setup), all'azione del vento (wind setup) e all'effetto barico inverso.

Una prima causa è quindi il sovrizzo indotto dal frangimento del moto ondoso. Tale fenomeno è dovuto alla trasformazione di energia cinetica in potenziale, necessaria per alimentare le correnti di ritorno. Dopo un primo abbassamento nella zona dei frangenti, il livello medio aumenta avvicinandosi alla linea di battigia, ove si ha un massimo pari a circa ad un sesto dell'altezza d'onda frangente. Il sovrizzo di vento si genera quando il vento comincia a spirare sulla superficie del mare, cosicché la sua azione tangenziale tende in primo luogo a spingere la massa d'acqua verso la costa, accelerandola. Le variazioni di livello marino determinate da un aumento o da una diminuzione della pressione atmosferica sono indicate come effetto barometrico inverso, poiché ad un aumento di pressione dell'area corrisponde un abbassamento dell'acqua sottostante e viceversa.

Per quanto riguarda l'azione del moto ondoso è possibile calcolare il sovrizzo (wave setup), S_w , ad esso dovuto, ricorrendo alla seguente formulazione:

$$S_w = 0.15d_b - \frac{0.536\sqrt{H_{sb}^3}}{T_m\sqrt{g}} = 0.96 \text{ m}$$

dove:

d_b e H_{sb} rappresentano il valore della profondità e di altezza d'onda significativa in condizioni di frangimento, pari, rispettivamente, a 8.38 m e 6.54 m (dalla propagazione al frangimento effettuata con il modello numerico SWAN dell'evento estremo più gravoso riferito a $T = 50$ anni, caratterizzato al largo da $H_s = 6.61$ m, $T_p =$

13.36 s e Dir = 305°N e, sottocosta, alla profondità di 10.7 m, da $H_s = 6.34$ m, $T_p = 13.36$ s e Dir = 317.44°N

- T_m (periodo medio dell'onda) = 9.67 s;
- g (accelerazione di gravità) = 9.81 m/s².

In questo caso, al fine di determinare il valore del massimo livello d'acqua, si considerano i valori di d_b e H_b riferiti ad un onda di progetto avente $T = 50$ anni, calcolata in base all'analisi degli eventi estremi. Il periodo T risulta quello medio (T_m), legato al valore di H_s per $T = 25$ anni.

Viene successivamente preso in considerazione il sovrizzo dovuto all'azione del vento (storm surge o wind setup), S_v , calcolabile attraverso la seguente relazione implicita, risolta per successive iterazioni:

$$S_v = \left[\frac{kU^2 x_p}{g(D_p - d - S_v)} \right] \ln \left(\frac{D_p}{d + S_v} \right) = 0.036 \text{ m}$$

essendo:

- U (velocità, costante, del vento foraneo di tempesta di lunga durata diretto verso la costa) ≈ 100 km = 27.78 m/s;
- D_p è la profondità della piattaforma continentale, pari a 200 m;
- x_p è l'estensione della piattaforma continentale, che risulta pari alla distanza nella direzione del vento fra la profondità D_p e la profondità d , dove si calcola il sovrizzo (in questo caso, si pone $d = 0$ sulla linea di riva, ove viene calcolato il sovrizzo di vento); per la conformazione batimetria al largo di Vibo Valentia Marina, il valore di $x_p = 3355$ m;
- k (coefficiente empirico) = $3 \cdot 10^{-6}$.

La limitata estensione della piattaforma continentale fa sì che il sovrizzo di vento sia un termine pressoché trascurabile per il paraggio in esame ai fini del calcolo del sovrizzo totale.

Infine, per quanto riguarda la componente dovuta all'effetto barico inverso, si può considerare una condizione di minimo barico (legata al passaggio dei centri di bassa pressione caratterizzanti i cicloni) nell'area in esame pari a 975 mb rispetto ad una condizione media di 1013 mb, essendo 1 mb (millibar) = 1 cm. Ne consegue (da un punto di vista prettamente statico) un effetto di sovrizzo marino massimo pari a 0.38 m, calcolabile come differenza fra la condizione media di pressione e quella legata alla condizione di minimo barico. Per ciò concerne la determinazione dei massimi livelli di marea astronomica, sono stati analizzati i dati mareali acquisiti dal mareografo di Palinuro (SA) (Figura 32) facente parte della Rete Mareografica

Nazionale (RMN). I dati mareometrici sono scaricabili, previa registrazione, presso il sito www.idromare.it. La stazione di Palinuro risulta quella più vicina al paraggio di Vibo Valentia Marina.

Le registrazioni orarie analizzate della stazione di Palinuro vanno dal 20/01/2006 al 27/3/2008, per una durata complessiva di più di 2 anni, sufficiente per un'analisi mareografica della zona in esame. In Figura 33 è illustrato l'andamento temporale dei massimi livelli mareali registrati, che vengono presi per l'analisi del massimo valore del livello mareale astronomico da adottare. L'analisi per la determinazione del massimo livello mareale è orientata all'analisi dell'evento estremo mareale legato ad un tempo di ritorno, $T = 25$ anni. Si effettua pertanto, sulla falsariga della procedura di calcolo per gli eventi estremi ondosi, un'analisi statistica delle maree a lungo termine.

Gli eventi mareali significativi sono stati esaminati scegliendo una soglia di livello mareale pari a 0.05 m, mostrata con una linea rossa in Figura 47. Successivamente, sono state adottate le distribuzioni probabilistiche di Gumbel e di Weibull con k variabile. La distribuzione probabilistica utilizzata per il calcolo del livello di mare astronomico di progetto risulta quella di Weibull con $k = 1.4$. Tale distribuzione presenta il coefficiente di correlazione più alto fra i valori dei livelli mareali sopra soglia e la variabile ridotta della distribuzione, dipendente dalla probabilità di non superamento (Tabella 15).



Figura 32: Individuazione planimetrica e struttura del Mareografo di Palinuro

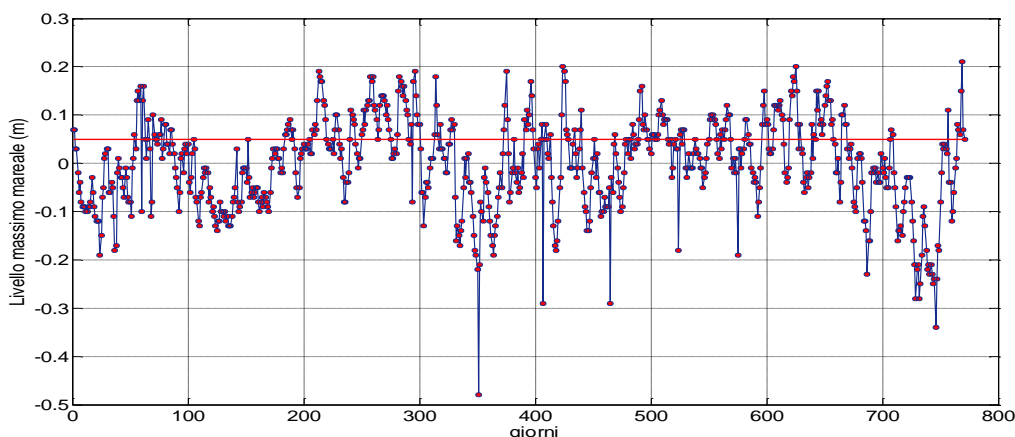


Figura 33: Andamento temporale dei massimi livelli mareali registrati dal mareografo di Palinuro

In Figura 34 sono mostrati i valori degli eventi estremi più significativi delle altezze di marea astronomica.

Distribuzione	R ²
Gumbel	0.955
Weibull k = 0.75	0.823
Weibull k = 1	0.925
Weibull k = 1.4	0.972
Weibull k = 2	0.967

Tabella 15: Coefficienti di correlazione per le distribuzioni di probabilità adottate per la marea astronomica di progetto

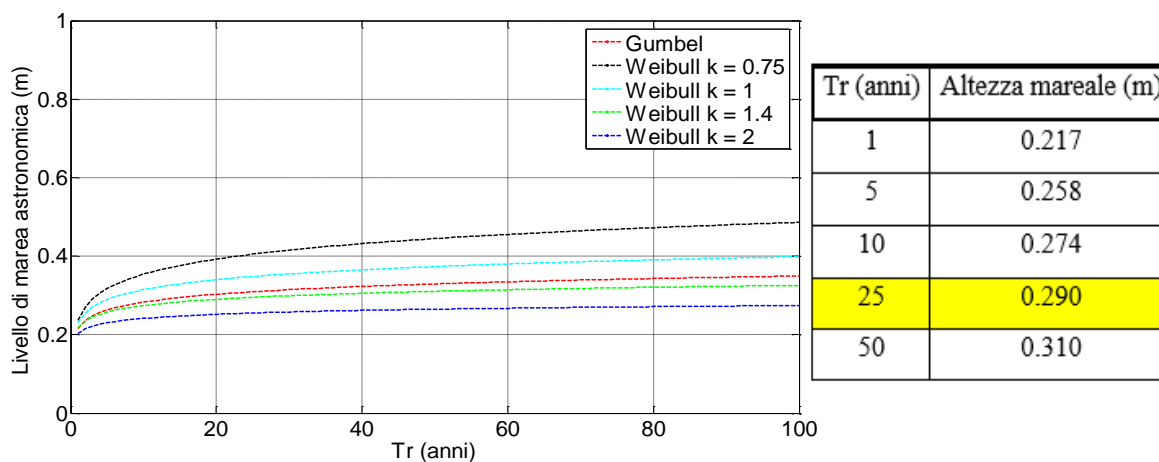


Figura 34: Eventi estremi a prefissato tempo di ritorno

Determinati i valori dei massimi livelli di marea meteorologica e astronomica, è possibile calcolare il sovrizzo di tempesta, inteso come somma di tutti i succitati contributi: sovrizzo d'onda (0.96 m) e di vento (0.036 m), effetto barico inverso (0.38 m) e marea astronomica (0.29 m), ottenendo un valore complessivo pari a 1.666 m.

5. VERIFICA DELL'AGITAZIONE ONDOSA NELL'AREA DI STUDIO

Lo studio dell'agitazione ondosa nel porto è uno strumento fondamentale per definire la configurazione planimetrica e le caratteristiche principali delle opere da realizzarsi al suo interno. Lo stato di agitazione interna ad un qualsiasi bacino è strettamente legato alle caratteristiche del moto ondoso (direzione di provenienza e intensità) e alle caratteristiche delle strutture interne (riflessione/dissipazione che oppongono al moto ondoso, funzione della geometria e della tipologia di opera). Per lo studio in oggetto, nel porto di Vibo Valentia Marina sono state analizzate le seguenti caratteristiche per le opere presenti:

- la lunghezza, la conformazione e l'orientamento delle opere foranee di difesa esterne, di sopraflutto e di sottoflutto;
- le caratteristiche di riflessione delle banchine e delle altre opere di bordo individuate lungo il perimetro portuale interno;
- la caratteristiche di riflessione per le opere previste dal progetto.

L'obiettivo è definire le condizioni a cui saranno esposti i natanti ormeggiati o in transito nelle aree oggetto d'intervento, verificando le condizioni di sicurezza rispetto alle soglie indicate dalle linee guida.

Le opere in oggetto interessano la parte sud del bacino portuale, in cui attualmente esiste una passeggiata cittadina che si affaccia sul mare. Come mostrato in Figura 35 la zona antistante è composta prevalentemente da un fondale sabbioso che emerge fino alla superficie ed è protetto da elementi cubici in calcestruzzo, posizionati per miglioroare la dissipazione dell'eventuale moto ondoso.



Figura 35: stato attuale del sito oggetto d'intervento

Le opere consentiranno lo sviluppo delle aree ricadenti all'interno del bacino del porto di Vibo Valentia per la realizzazione dell'approdo "Marina Resort" e come mostrato in Figura 36 comprendono:

- la realizzazione di una banchina a servizio del Marina Resort, di estensione fronte mare pari a circa 275 ml, caratterizzata da struttura antiriflettente per consentire un più efficace abbattimento dell'energia del moto ondoso;
- una stazione di rifornimento carburante dedicata ai natanti della Marina;
- un totale di 3 pontili di lunghezza cumulata complessiva pari a 630 ml (pontile A lungo 294 ml, pontile B lungo 228 ml, pontile C lungo 108 ml);
- piccoli edifici di servizio alla Marina.



Figura 36: planimetria di progetto

5.1. Selezione scenari

La definizione delle onde di riferimento per le simulazioni è stata condotta nell'ottica di verificare, ricorrendo alla modellazione numerica, la rispondenza della soluzione progettuale alle indicazioni fornite dal PIANC-AIPCN, Associazione Internazionale di Navigazione, ai fini del controllo delle agitazioni degli specchi acquei protetti a servizio della nautica da diporto. In particolare, si raccomanda di verificare le seguenti altezze d'onda:

condizione di "comfort" (particolarmente importante nel caso di porti in cui si prevede la presenza prolungata di persone a bordo delle imbarcazioni):

- $H_s = 0.15$ m, per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni/anno;

condizione di "sicurezza":

- $H_s = 0.30$ m, per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni;

condizione "limite":

- $H_s = 0.50$ m, per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni.

Le verifiche relative alla condizione di "Comfort" sono state condotte considerando tre direzioni principali di provenienza del moto ondoso, una per ogni settore di traversia significativo per il paraggio in esame, a partire dal clima annuale al largo del bacino portuale definito nell'ambito del Cap 1 e riportato in sintesi in Tabella 4 e Tabella 5 (frequenze di apparizione per classi d'altezza d'onda e direzione media di provenienza). In particolare, le onde selezionate si riferiscono ad:

- eventi con frequenza di accadimento nell'ordine di pochi giorno l'anno, tale da risultare significativa per la verifica della condizione di comfort (5 giorni all'anno);
- un'altezza d'onda significativa in grado di determinare, all'interno del porto, valori di altezza d'onda residua significativi per la verifica della condizione di comfort ($H_s = 0.15$ m).

Le verifiche relative alla condizione di "Sicurezza" e condizioni "Limite", invece, sono state condotte considerando i settori di traversia principali per cui sono stati definiti nel Cap 3 gli eventi estremi con assegnato tempo di ritorno. In particolare, dall'analisi statistica condotta sono stati selezionati gli eventi con tempo di ritorno 5 anni, corrispondente alla condizione di "Sicurezza" e gli eventi con tempo di ritorno 50 anni, corrispondente alla condizione "Limite".

Le onde selezionate sono state estratte in corrispondenza della boa virtuale di Vibo Valentia Marina e trasferite verso riva in corrispondenza di un punto P0 in prossimità del porto, ad una profondità di 30 metri (Figura 37).

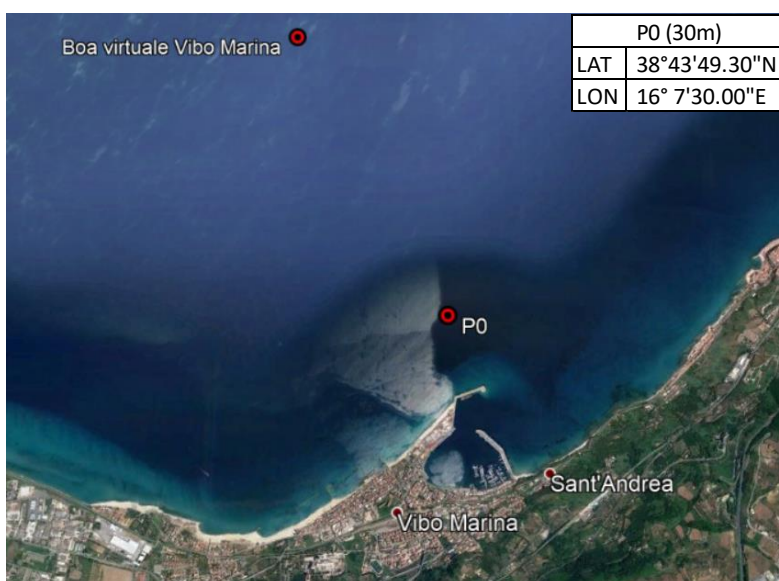


Figura 37: localizzazione boa virtuale di Vibo Marina e del punto di estrazione P0, in prossimità dell'ingresso al porto

Il trasferimento delle onde da largo a riva è basato sulla metodologia analitica proposta da Goda (Goda 1985 e 2013), in cui:

$$H_s = \begin{cases} K_s H_{s0} & d/L_{s0} \geq 0.2 \\ \min[(\beta_0 H_{s0} + \beta_1 d); \beta_{max} H_{s0}; K_s H_{s0}] & \frac{d}{L_{s0}} < 0.2 \end{cases}$$

dove:

$$\beta_0 = 0.028(H_{s0}/L_{s0})^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \nu)$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan \nu)$$

$$\beta_{max} = \max[0.92; 0.32(H_{s0}/L_{s0})^{-0.29} e^{(2.4 \tan \nu)}]$$

θ = inclinazione del fondale marino

K_s = coefficiente di shoaling.

Si riporta di seguito (Tabella 16) la tabella degli eventi ondosi selezionati per le simulazioni.

condizioni a largo (boa virtuale Vibo)				condizione	condizioni al punto P0 (h = 30m)			verifica per le opere
settore	Tr	H _{s0} (m)	T _{p0} (s)		H _s (m)	T _p (s)	Dir (°N)	
260-290	5 gg/anno	3.3	10.1	comfort	2.6	10.1	270	H ≤ 0.15 m
	5	5.5	12.5	sicurezza	4.5	12.5	260	H ≤ 0.30 m
	50	6.7	13.4	limite	5.5	13.4	260	H ≤ 0.50 m
290	5 gg/anno	2.8	9.6	comfort	2.4	9.6	290	H ≤ 0.15 m
	5	5.7	12.6	sicurezza	5.1	12.6	280	H ≤ 0.30 m
	50	6.6	13.4	limite	6.0	13.4	280	H ≤ 0.50 m
290-320	5 gg/anno	1.8	8.0	comfort	1.7	8.0	305	H ≤ 0.15 m
	5	5.7	12.6	sicurezza	5.3	12.6	300	H ≤ 0.30 m
	50	6.6	13.4	limite	6.2	13.4	300	H ≤ 0.50 m

Tabella 16: condizioni ondose selezionate per la verifica dell'agitazione interna al porto

In tabella sono distinti i diversi scenari al variare della condizione di sicurezza da soddisfare e in funzione delle caratteristiche delle onde selezionate nel punto a largo, corrispondente alla boa virtuale per cui è stato caratterizzato il clima ondoso medio ed estremo per il paraggio di Vibo Valentia Marina. In particolare le direzioni principali selezionate ricadono all'interno del settore 260-320°N.

I risultati ottenuti tengono conto delle trasformazioni che il moto ondoso subisce durante la propagazione da largo a riva. In particolare, dal confronto tra condizioni di largo e condizioni al punto di estrazione P0 si nota l'effetto della rifrazione e delle

diverse componenti dissipative, che inducono lo smorzamento e la rotazione parziale dei fronti ondosi.

I risultati della modellazione saranno estratti in 12 punti selezionati all'interno dell'area in concessione, scelti in modo da analizzare in maniera omogenea l'intera area d'interesse. Come mostrato in Figura 38, i punti P1, P2, P3, P6, P7 e P10 sono stati selezionati per caratterizzare l'agitazione residua lungo lo sviluppo longitudinale dei pontili, i punti P4, P8 e P12 sono stati selezionati in testa ai suddetti pennelli e, infine, i punti P5, P9 e P12 sono stati scelti in corrispondenza di zone di ormeggio lungo la banchina.



Figura 38: localizzazione punti di estrazione per la verifica dell'agitazione

Le condizioni da verificare, dunque, determinano un set di 12 punti di estrazione per ognuna delle tre direzioni del moto ondoso incidente selezionate ed ognuna delle condizioni di sicurezza da verificare, per un totale di 108 verifiche da soddisfare per lo stato di progetto. Per confronto, l'analisi è stata svolta anche per la configurazione attuale dei luoghi.

5.2. Modello numerico di calcolo

Lo studio dell'agitazione interna ad un bacino portuale richiede un'analisi complessa e dettagliata di tutte le fenomenologie che caratterizzano la propagazione e la trasformazione del moto ondoso nell'area di studio. Le informazioni fondamentali per valutare le condizioni di agitazione interna sono l'altezza, il periodo e la direzione dell'onda propagata. Dal momento che quasi

sempre non sono disponibili registrazioni dirette di queste grandezze all'interno del porto o di una specifica area di studio, è necessario far riferimento ad un modello numerico di trasformazione in grado di valutare in maniera concomitante tutti le variabili e determinare in output la risposta del sistema in ogni punto del dominio.

Nel presente studio la modellazione numerica dell'agitazione nel porto è stata eseguita utilizzando il codice numerico ARTEMIS (Agitation and Refraction with TElemac on a MIdSlope) (e.g., Aelbrecht, 1997; EDF R&D, 2010), che costituisce parte della suite di calcolo idrodinamico agli elementi finiti TELEMAR (EDF R&D). Il modello risolve i processi di riflessione, dissipazione per frangimento, attrito al fondo, rifrazione e diffrazione dell'onda sia su fondali dolcemente acclivi che in presenza di ostacoli o bruschi cambiamenti di pendenza. Tra le ipotesi fondamentali vi sono quelle di:

- fluido non viscoso e incomprimibile,
- moto irrotazionale,
- fondale che non varia nel tempo,
- fondale poco acclive e altezza d'onda piccola rispetto alla profondità, che permettono di considerare la teoria lineare delle onde.

Sebbene il modello integra gli effetti delle correnti indotte dal moto ondoso all'interno del dominio di calcolo (e.g., Chen, Panchang e Demirebilek, 2005), la variazione temporale della forzante idrodinamica non è stata inclusa nel presente studio, consentendo di simulare la penetrazione del moto ondoso nel porto escludendo la sovrapposizione degli effetti dovuti alla circolazione.

Al fondale fisso (non varia nel tempo) sono assegnate caratteristiche di attrito e l'altezza d'onda H_s è assunta trascurabile rispetto alla lunghezza d'onda L , ovvero si assume ($H_s/L \ll 1$) e per la profondità h ($H_s/h \ll 1$). Infine, l'assunzione del fondale a debole pendenza consente di trascurare i processi di dissipazione infinitesimi ($(\Delta h/h)/(h/L) \ll 1$), più complessi da risolvere dal punto di vista computazionale.

Artemis risolve le equazioni estese per fondali a debole pendenza proposte da Booij (1981) e De Girolamo, Kostense e Dingemans (1988). La formulazione originale che combina gli effetti di rifrazione e diffrazione fu invece derivata da Berkhoff (1972, 1976) e successivamente modificata da Smith e Sprinks (1975) per integrare gli effetti dissipativi associati al frangimento del moto ondoso e all'attrito al fondo.

L'equazione estesa per fondale a debole pendenza è fornita nel sistema di coordinate Cartesiane (x,y) come:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + CC_g(k^2 + ik\mu)\phi = 0 \quad \text{mild slope equation}$$

in cui

- ω è la frequenza d'onda,
- $C = \omega/k$ è la celerità con cui viaggia l'onda,
- $C_g = \partial\omega/\partial k$ è la celerità di gruppo con cui viaggia l'energia,
- ϕ è il potenziale tale che $\nabla\phi = u$ con
- u la velocità della particella d'acqua,
- k il numero d'onda ottenuto dalla legge di dispersione,
- μ è un coefficiente di dissipazione.

In base ai processi fisici da includere nel dominio di riferimento, il termine μ varia aggiungendo i termini da considerare nella formulazione matematica del problema. L'altezza d'onda H_s è ottenuta dalla espressione matematica

$$H_s = \frac{2\omega}{g} |\phi|$$

In cui g è l'accelerazione di gravità. Il coefficiente di dissipazione μ (espresso in m^{-1}) è utilizzato per la parametrizzazione del frangimento e dell'attrito al fondo. La dissipazione attraverso il frangimento dovuto alla variazione di fondale è computata in accordo con la formulazione di Battjes e Janssen (1978), basata sull'analogia tra il frangimento d'onda e il salto idraulico espresso in termini di perdita di energia. L'espressione matematica di μ è la seguente:

$$\mu = \frac{4\alpha f_p Q_b}{C_g} \left(\frac{H_m}{H_s} \right)^2$$

Con H_m che vale

$$H_m = \frac{0.88}{k} \tanh\left(\frac{\gamma_s}{0.88} kh\right)$$

È l'altezza d'onda critica al frangimento, in accordo con Miche (1944), γ_s è pari a 0.88, Q_b è la componente frangente dell'onda, calcolata considerando la funzione di distribuzione di probabilità di Rayleigh al valore critico H_m , mentre f_p è la frequenza di picco e α un coefficiente di calibrazione assunto pari ad 1. La dissipazione dovuta all'attrito al fondo è invece parametrizzata in accordo con le equazioni di Putman e Johnson (1949). È formulata assumendo che la velocità è derivata dalle soluzioni di primo ordine del potenziale di Stokes. Ciò conduce alla seguente formulazione matematica:

$$\mu = \frac{2}{3\pi} \frac{f_\omega H_s \omega^3}{g C_g \sinh^3(kh)}$$

In cui f_ω è il coefficiente di attrito assunto pari a 0.001. Il calcolo computazionale è ottenuto considerando una generazione di tipo random monodirezionale. Lo spettro di energia è discretizzato in n bande di uguale energia e frequenza nel range tra

0.066 e 0.33 Hz. Le equazioni estese per fondali a debole pendenza sono risolte per ognuna delle n discretizzazioni in frequenza dello spettro di energia, per ognuno dei potenziali d'onda ridotti e per ogni altezza d'onda significativa. I risultati numerici sono combinati per fornire poi la soluzione globale dell'altezza d'onda significativa H_s . Il coefficiente di dissipazione, invece, è calcolato attraverso una procedura iterativa che risolve la dipendenza rispetto a μ . Artemis calcola in prima approssimazione un coefficiente di dissipazione μ trascurando i contributi del frangimento e dell'attrito al fondo. Successivamente, il modello effettua una seconda calcolo integrando i contributi di frangimento e attrito al fondo, fornendo una successiva stima del coefficiente μ . La procedura diventa poi iterativa fino al raggiungimento della convergenza imposta come soglia limite. Infine, la soluzione numerica viene forzata per soddisfare il criterio per il minore degli elementi che compongono la mesh di calcolo, confrontato con la lunghezza d'onda.

5.3. Set-up modello numerico

Le ipotesi semplificative introdotte nella formulazione del modello, possono essere così sintetizzate:

- non avviene trasmissione dell'onda attraverso le barriere frangiflutti;
- non si tiene in conto l'eventuale fenomeno dell'overtopping delle strutture;
- sono trascurati gli effetti della propagazione d'onda legati alla presenza di correnti;
- i pontili presenti nel bacino sono considerati "trasparenti" ai fini dello studio. Tale assunzione è vincolata alla risoluzione spaziale del dominio di calcolo.

5.3.1. Caratterizzazione perimetro portuale

Attualmente nel porto di Vibo Valentia Marina sono presenti diverse tipologie di strutture portuali. Ognuna di esse assolve ad una destinazione d'uso differente e nei confronti del moto ondoso incidente offre una diversa risposta in termini di riflessione o dissipazione. La suddivisione delle diverse aree è proposta in Figura 39.

Per tenere conto di ciò, il modello numerico di calcolo viene impostato assegnando lungo il perimetro portuale gli opportuni coefficienti di riflessione C_r in funzione della tipologia strutturale, in particolare:

- spiaggia: $C_r=20\%$
- scogliere: $C_r=50\%$
- banchine a parete verticale: $C_r=90\%$
- banchine con dispositivi anti-riflessione $C_r=50\%$



Figura 39: tipologie di strutture individuate lungo il perimetro portuale

5.3.2. Griglia computazionale di calcolo

Per le analisi è stato necessario adoperare una griglia di calcolo che comprendesse l'intero bacino portuale ed una porzione sufficientemente estesa di mare antistante. In particolare, è stata utilizzata una griglia computazionale non strutturata (mesh), costituita da elementi triangolari. Come mostrato in Figura 40 si è scelto di attribuire una risoluzione (distanza tra i nodi) via via più fitta (maggiore) procedendo da largo verso il porto e le strutture. Ciò consente di ottimizzare l'onere computazionale ma allo stesso tempo garantisce un'adeguata definizione del dominio in aree in cui è richiesta una modellazione più spinta.

Nel caso in esame la griglia di calcolo copre una superficie di $3.0 \times 2.7 \text{ km}$ ed è ottimizzata garantendo una risoluzione minima degli elementi pari a 40 m nella parte più esterna e una risoluzione massima di 2 m nelle aree interne al porto, più "onerose" dal punto di vista computazionale. Per la simulazione dell'agitazione residua sono state considerate due configurazioni:

- stato di fatto (Figura 40a), ovvero la configurazione delle opere interne per come si presentano attualmente,

- stato di progetto (Figura 40b), che comprende le modifiche introdotte dalle nuove opere in oggetto.

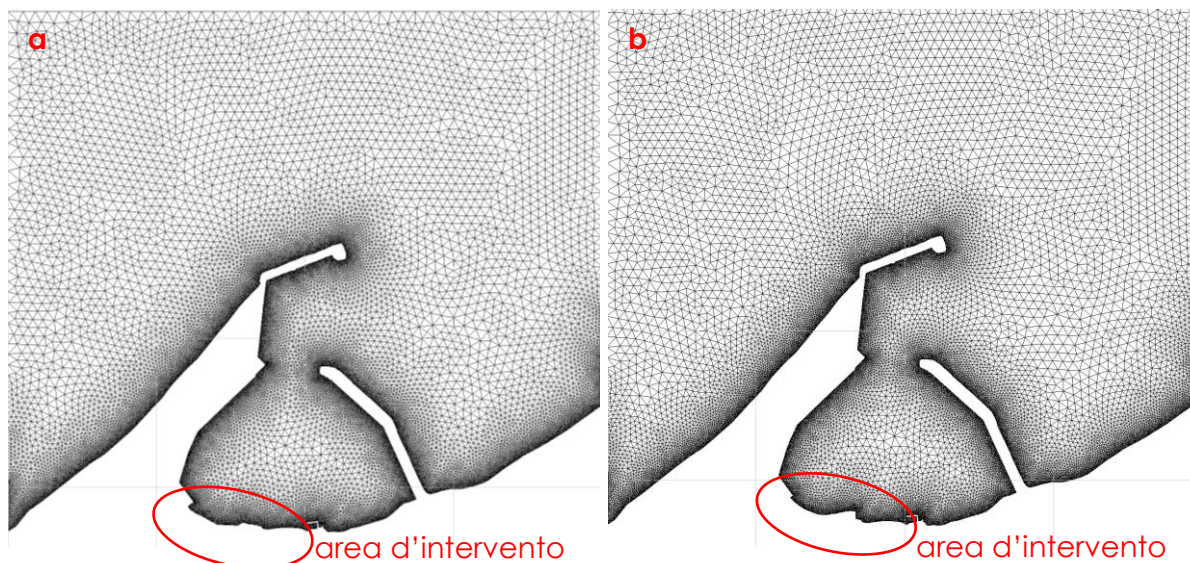


Figura 40: griglia computazionale per: (a) stato di fatto; 8b) stato di progetto

L'influenza dei fondali marini è stata inclusa nella modellazione attraverso la successiva interpolazione della griglia di calcolo rispetto alle profondità desumibili dalle informazioni barimetriche. Il procedimento è stato applicato per la configurazione di fatto e per quella di progetto, determinando le mappe batimetriche mostrate in e Figura 42. La mesh così ottenuta mostra attraverso le diverse tonalità della scala cromatica dei blue le profondità dei fondali in metri.

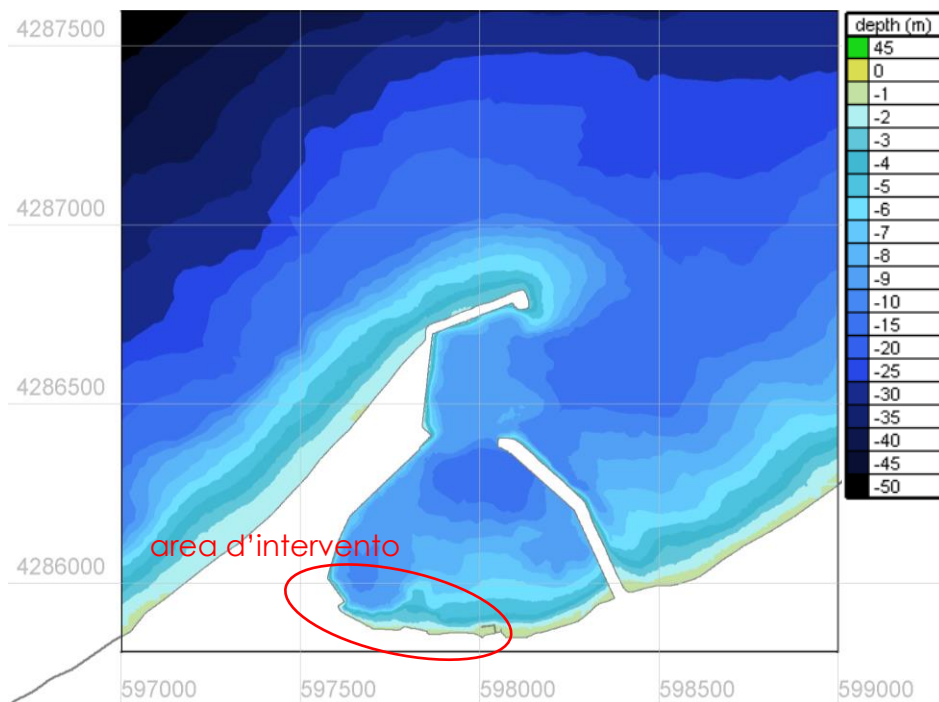


Figura 41: batimetria per la configurazione di fatto

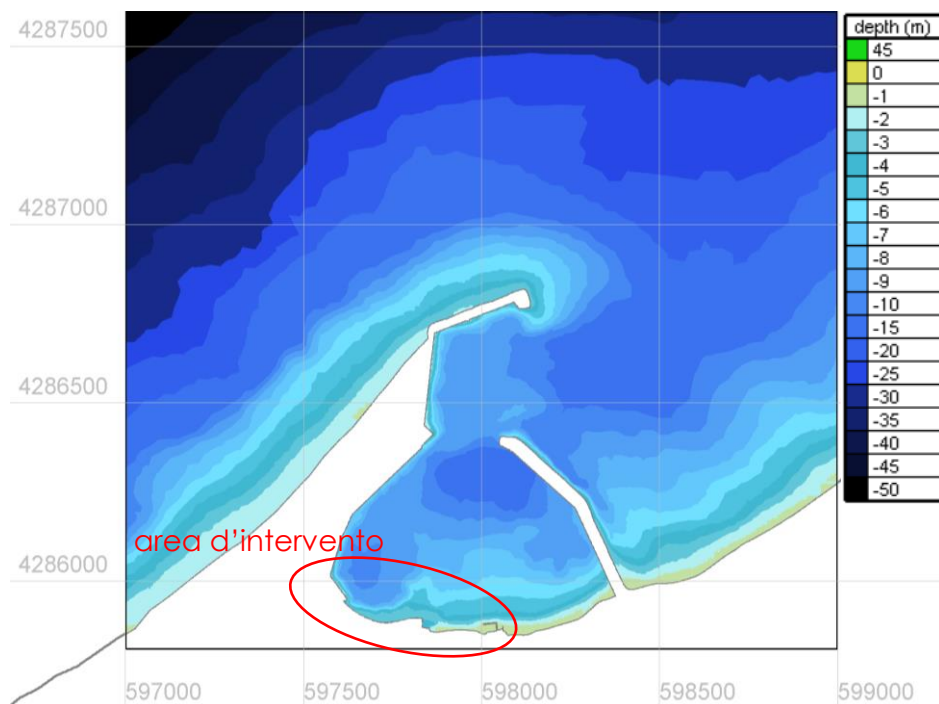


Figura 42: batimetria per la configurazione di progetto

5.3.3. Settaggio simulazioni

La propagazione del moto ondoso nel bacino è stata simulata per ognuna delle condizioni riportate in Tabella 16. Al modello sono stati assegnati gli input di altezza d'onda H_s , periodo di picco T_p , direzione di propagazione nell'area di generazione all'esterno del porto e livello idrico da considerare per tenere in conto il sovrizzo dovuto allo storm surge e al wave set-up. Le simulazioni sono state effettuate considerando uno spettro d'energia dell'onda di tipo Jonswap per onde multi direzionali random, variabile in direzione e frequenza.

Inoltre, è stato necessario assegnare una durata e un passo temporale di simulazione (time step) che garantissero la stabilità computazionale e il raggiungimento della condizione di stazionarietà dell'onda, necessaria a definire l'agitazione residua.

Per ottimizzare l'onere computazionale (notevole) di ognuna delle simulazioni effettuate, è stato adoperata una funzionalità del software che consente di calcolare un time step variabile, da assegnare alla n-esima iterazione di calcolo in maniera da verificare la cosiddetta condizione di Courant-Friedrichs-Lewy, spesso abbreviata con CFL, ovvero la condizione necessaria per la convergenza numerica della soluzione, espressa attraverso la relazione

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{C}$$

in cui C è il numero di Courant, che per la stabilità di tali applicazioni dovrà essere sempre minore di 1, Δx e Δt sono rispettivamente la dimensione spaziale e temporale del dominio del calcolo all'interno del dominio assegnato. Ogni simulazione è stata conclusa dal raggiungimento della convergenza della soluzione ottenendo la condizione stazionaria dell'onda all'interno del dominio.

5.4. Risultati

Di seguito si riportano i risultati delle analisi ottenute per la simulazione dell'agitazione ondosa nel porto, riferita al bacino per la configurazione attuale dei luoghi (stato di fatto) e per quella di progetto.

5.4.1. Verifica agitazione ondosa – stato di fatto

Da Tabella 17 a Tabella 25 si riportano i risultati delle simulazioni condotte per lo stato di fatto. Per ognuno dei punti di estrazione selezionati e riportati in Figura 38, le condizioni di Comfort, Sicurezza e Limite sono risultate verificate. I risultati sono riportati in termini di altezza d'onda residua H_s . In particolare si evidenzia che:

- la penetrazione del moto ondoso è nettamente smorzata in corrispondenza dell'imboccatura, dove le strutture dei moli principali e gli effetti combinati di rifrazione e diffrazione contribuiscono a dissipare l'energia delle onde;
- il moto ondoso residuo che si insinua all'interno del bacino, interessa prevalentemente la parte sud ovest, ovvero la zona in cui si prevede la realizzazione delle opere per il nuovo Marina Resort;
- delle tre direzioni considerate, quella più vicina al nord (290-320 °N) è quella che determina la maggiore agitazione interna al porto;
- l'agitazione residua in corrispondenza di tutti i punti di estrazione considerati si mantiene al di sotto delle soglie determinate dalle linee guida PIANC-AIPCN;
- la massima agitazione residua è stata rilevata per la condizione $T_r=50$ anni e direzione 290-290°N, in corrispondenza del punto P7 e pari a 0.20 m (< 0.50 m);
- in generale, la parte più esposta all'agitazione residua è quella est della concessione, nella zona di confine con i pontili della GDF.

STATO DI FATTO - COMFORT ($H_s \leq 0.15$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)	estrazione	(m)	
SETTORE 260-290 °N	2.6	10.1	270	P1	0.03	VERIFICATA
				P2	0.05	VERIFICATA
				P3	0.03	VERIFICATA
				P4	0.07	VERIFICATA
				P5	0.03	VERIFICATA
				P6	0.06	VERIFICATA
				P7	0.08	VERIFICATA
				P8	0.04	VERIFICATA
				P9	0.04	VERIFICATA
				P10	0.07	VERIFICATA
				P11	0.04	VERIFICATA
				P12	0.05	VERIFICATA

Tabella 17: verifica condizione di Comfort ($H_s \leq 0.15$ m) per settore 260-290°N – stato di fatto

STATO DI FATTO - SICUREZZA ($H_s \leq 0.30$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 260-290 °N	4.5	12.5	260	P1	0.10	VERIFICATA
				P2	0.06	VERIFICATA
				P3	0.08	VERIFICATA
				P4	0.07	VERIFICATA
				P5	0.10	VERIFICATA
				P6	0.08	VERIFICATA
				P7	0.09	VERIFICATA
				P8	0.07	VERIFICATA
				P9	0.06	VERIFICATA
				P10	0.11	VERIFICATA
				P11	0.05	VERIFICATA
				P12	0.07	VERIFICATA

Tabella 18: verifica condizione di Sicurezza ($H_s \leq 0.30$ m) per settore 260-290°N – stato di fatto

STATO DI FATTO - LIMITE ($H_s \leq 0.50$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 260-290 °N	5.5	13.4	260	P1	0.11	VERIFICATA
				P2	0.07	VERIFICATA
				P3	0.11	VERIFICATA
				P4	0.10	VERIFICATA
				P5	0.11	VERIFICATA
				P6	0.08	VERIFICATA
				P7	0.13	VERIFICATA
				P8	0.09	VERIFICATA
				P9	0.08	VERIFICATA
				P10	0.13	VERIFICATA
				P11	0.08	VERIFICATA
				P12	0.09	VERIFICATA

Tabella 19: verifica condizione Limite ($H_s \leq 0.50$ m) per settore 260-290°N – stato di fatto

STATO DI FATTO - COMFORT ($H_s \leq 0.15$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 290° N	2.4	9.6	290	P1	0.08	VERIFICATA
				P2	0.10	VERIFICATA
				P3	0.10	VERIFICATA
				P4	0.08	VERIFICATA
				P5	0.10	VERIFICATA
				P6	0.09	VERIFICATA
				P7	0.08	VERIFICATA
				P8	0.08	VERIFICATA
				P9	0.08	VERIFICATA
				P10	0.09	VERIFICATA
				P11	0.06	VERIFICATA
				P12	0.05	VERIFICATA

Tabella 20: verifica condizione di Comfort ($H_s \leq 0.15$ m) per settore 290°N – stato di fatto

STATO DI FATTO - SICUREZZA ($H_s \leq 0.30$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 290° N	5.1	12.6	280	P1	0.13	VERIFICATA
				P2	0.08	VERIFICATA
				P3	0.13	VERIFICATA
				P4	0.10	VERIFICATA
				P5	0.12	VERIFICATA
				P6	0.10	VERIFICATA
				P7	0.13	VERIFICATA
				P8	0.10	VERIFICATA
				P9	0.09	VERIFICATA
				P10	0.13	VERIFICATA
				P11	0.07	VERIFICATA
				P12	0.08	VERIFICATA

Tabella 21: verifica condizione di Sicurezza ($H_s \leq 0.30$ m) per settore 290°N – stato di fatto

STATO DI FATTO - LIMITE ($H_s \leq 0.50$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 290° N	6.0	13.4	280	P1	0.13	VERIFICATA
				P2	0.07	VERIFICATA
				P3	0.12	VERIFICATA
				P4	0.13	VERIFICATA
				P5	0.12	VERIFICATA
				P6	0.08	VERIFICATA
				P7	0.15	VERIFICATA
				P8	0.11	VERIFICATA
				P9	0.09	VERIFICATA
				P10	0.15	VERIFICATA
				P11	0.09	VERIFICATA
				P12	0.10	VERIFICATA

Tabella 22: verifica condizione Limite ($H_s \leq 0.50$ m) per settore 290°N – stato di fatto

STATO DI FATTO - COMFORT ($H_s \leq 0.15$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 290 - 320° N	1.7	8.0	305	P1	0.08	VERIFICATA
				P2	0.10	VERIFICATA
				P3	0.11	VERIFICATA
				P4	0.08	VERIFICATA
				P5	0.10	VERIFICATA
				P6	0.05	VERIFICATA
				P7	0.07	VERIFICATA
				P8	0.05	VERIFICATA
				P9	0.04	VERIFICATA
				P10	0.08	VERIFICATA
				P11	0.03	VERIFICATA
				P12	0.03	VERIFICATA

Tabella 23: verifica condizione di Comfort ($H_s \leq 0.15$ m) per settore 290-320°N – stato di fatto

STATO DI FATTO - SICUREZZA ($H_s \leq 0.30$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 290 - 320 °N	5.3	12.6	300	P1	0.16	VERIFICATA
				P2	0.12	VERIFICATA
				P3	0.18	VERIFICATA
				P4	0.16	VERIFICATA
				P5	0.16	VERIFICATA
				P6	0.13	VERIFICATA
				P7	0.18	VERIFICATA
				P8	0.13	VERIFICATA
				P9	0.12	VERIFICATA
				P10	0.16	VERIFICATA
				P11	0.10	VERIFICATA
				P12	0.11	VERIFICATA

Tabella 24: verifica condizione di Sicurezza ($H_s \leq 0.30$ m) per settore 290-320°N – stato di fatto

STATO DI FATTO - LIMITE ($H_s \leq 0.50$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 290 - 320 °N	6.2	13.4	300	P1	0.17	VERIFICATA
				P2	0.13	VERIFICATA
				P3	0.19	VERIFICATA
				P4	0.17	VERIFICATA
				P5	0.15	VERIFICATA
				P6	0.13	VERIFICATA
				P7	0.20	VERIFICATA
				P8	0.14	VERIFICATA
				P9	0.12	VERIFICATA
				P10	0.19	VERIFICATA
				P11	0.12	VERIFICATA
				P12	0.13	VERIFICATA

Tabella 25: verifica condizione Limite ($H_s \leq 0.50$ m) per settore 290-320°N – stato di fatto

I risultati delle simulazioni sono inoltre riportati di seguito in forma di mappe cromatiche che esprimono il campo dei valori di altezza d'onda significativa (H_s) corrispondente alla conclusione del periodo di simulazione, ovvero per condizione di stazionarietà.

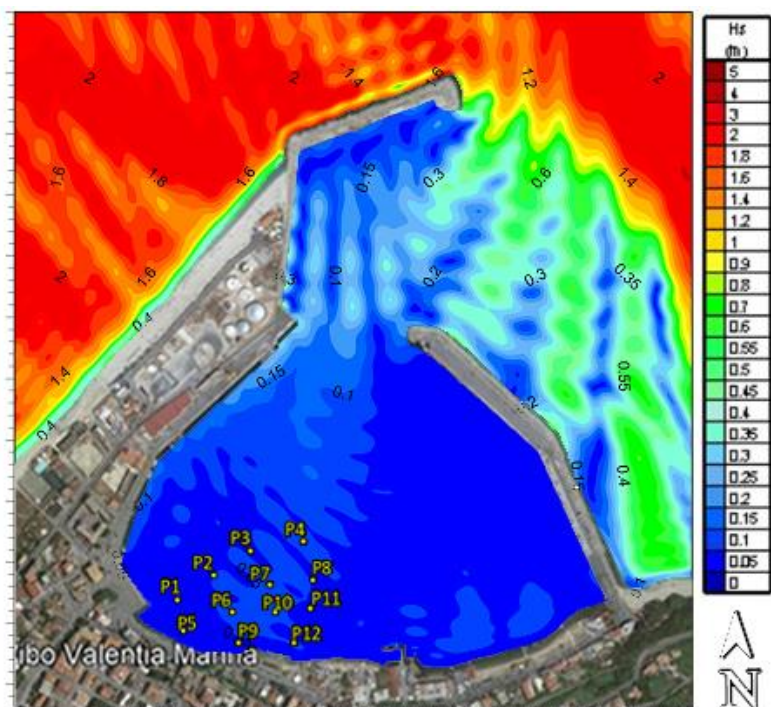


Figura 43: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Comfort, $H_s \leq 0.15m$ - settore 260-290°N – stato di fatto

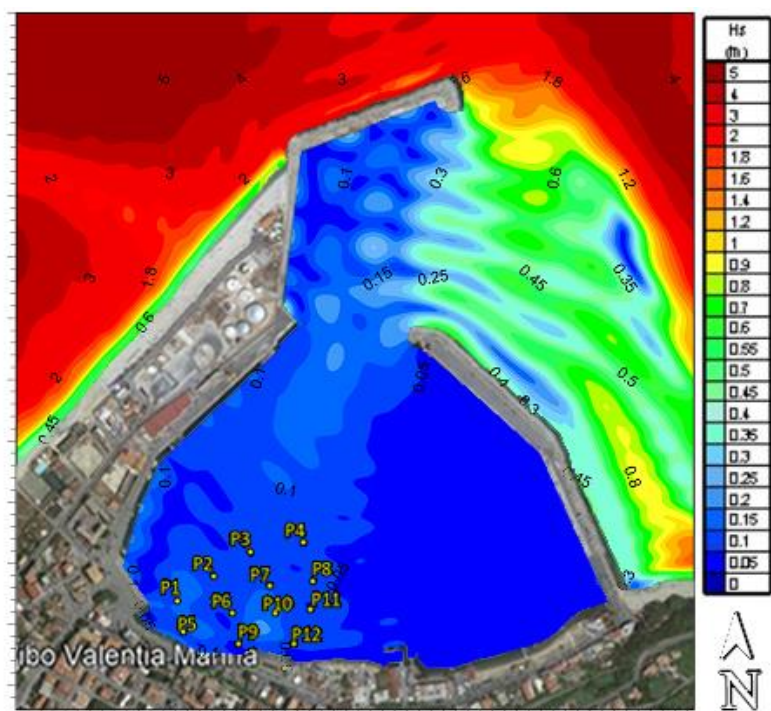


Figura 44: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Sicurezza, $H_s \leq 0.30m$ - settore 260-290°N – stato di fatto

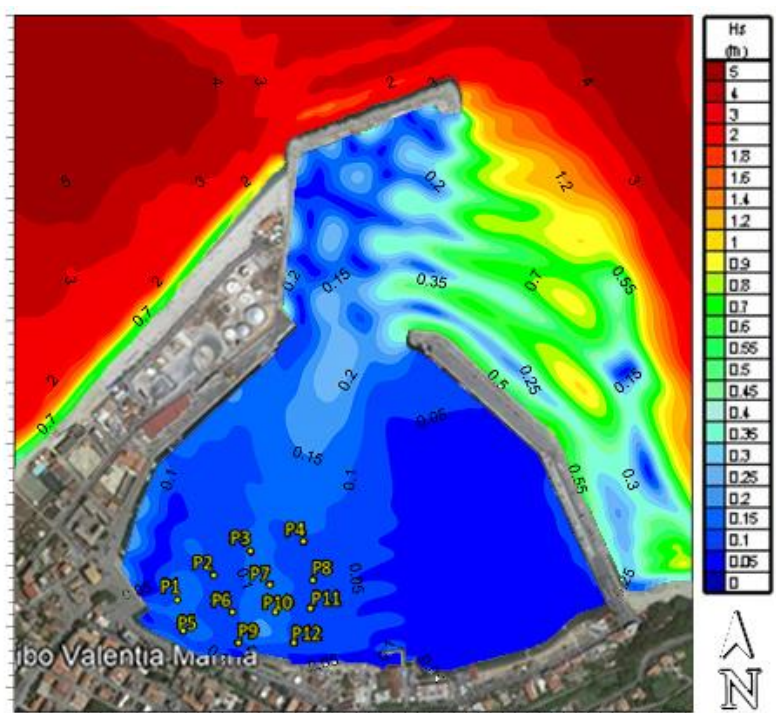


Figura 45: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione Limite, $H_s \leq 0.50m$ - settore 260-290°N – stato di fatto

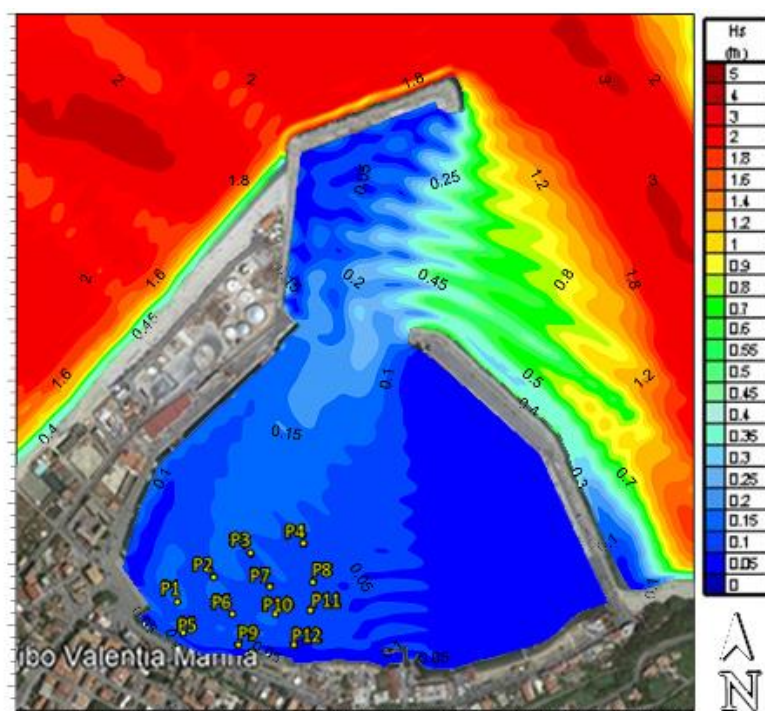


Figura 46: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Comfort, $H_s \leq 0.15m$ - settore 290°N – stato di fatto

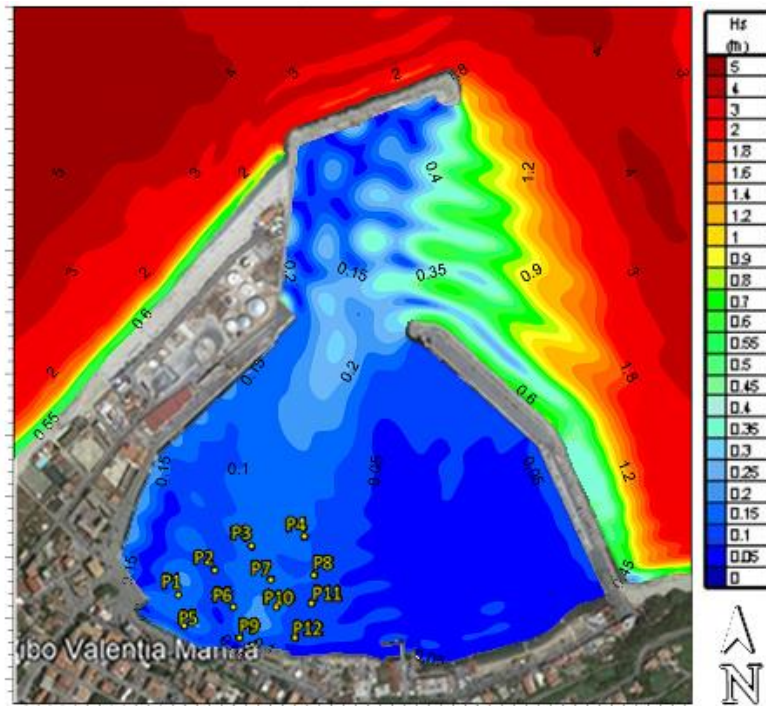


Figura 47: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Sicurezza, $H_s \leq 0.30m$ - settore $290^\circ N$ - stato di fatto

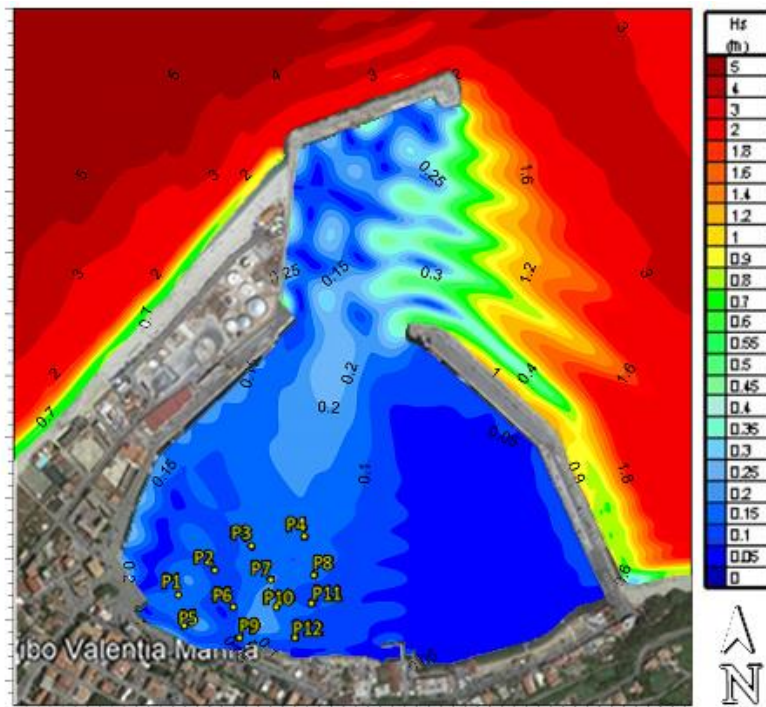


Figura 48: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione Limite, $H_s \leq 0.50m$ - settore $290^\circ N$ - stato di fatto

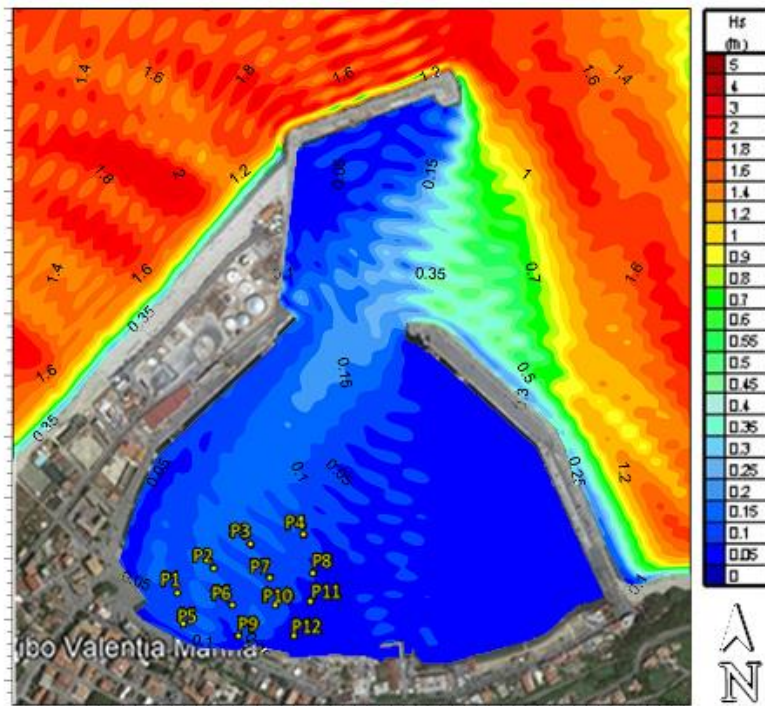


Figura 49: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Comfort, $H_s \leq 0.15\text{m}$ - settore 290-320°N – stato di fatto

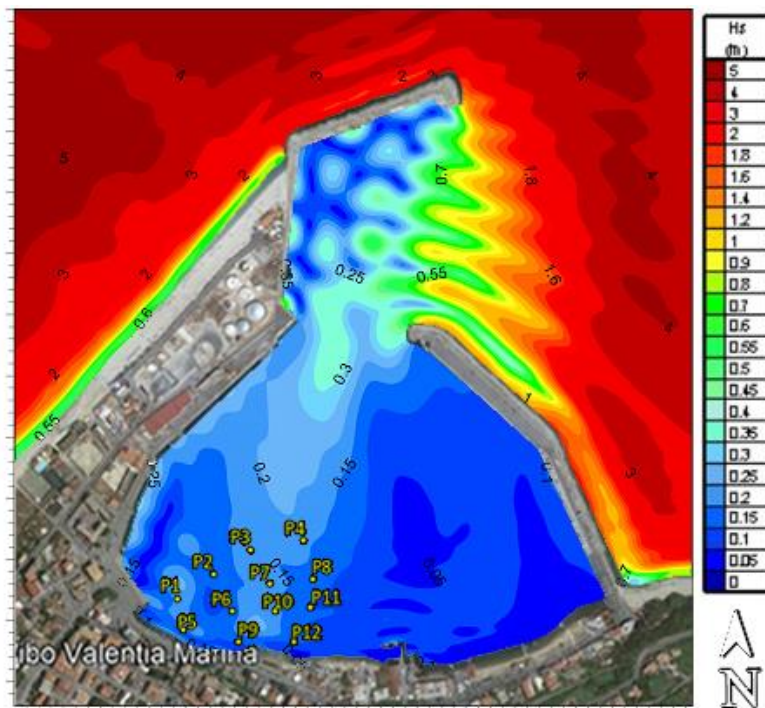


Figura 50: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Sicurezza, $H_s \leq 0.30\text{m}$ - settore 290-320°N – stato di fatto

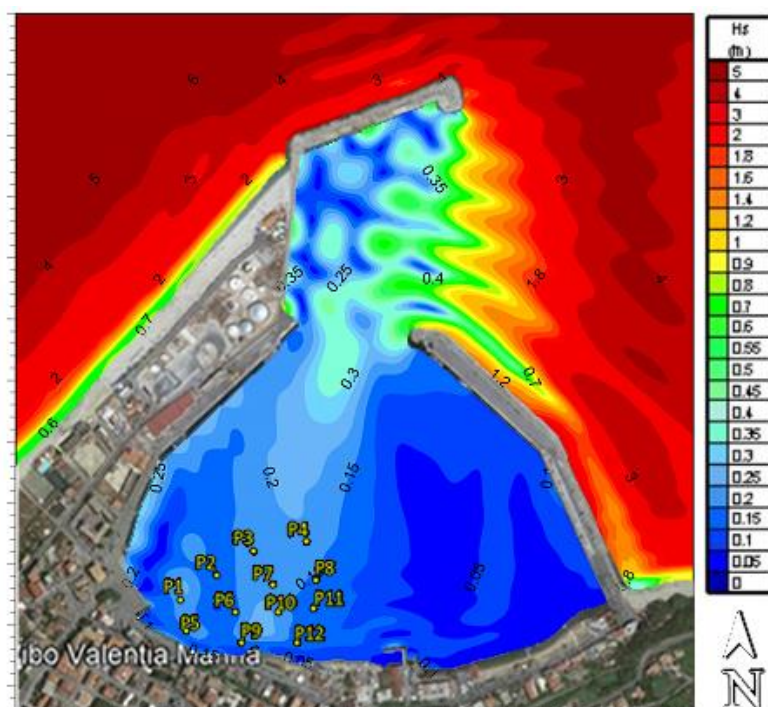


Figura 51: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione Limite, $H_s \leq 0.50\text{m}$ - settore 290-320°N – stato di fatto

5.4.2. Verifica agitazione ondosa – stato di progetto

Da Tabella 26 a Tabella 34 si riportano i risultati delle simulazioni condotte per la configurazione di progetto. Per ognuno dei punti di estrazione selezionati e riportati in Figura 38, le condizioni di Comfort, Sicurezza e Limite sono risultate verificate. I risultati sono riportati in termini di altezza d'onda residua H_s . In particolare si evidenzia che:

- come per lo stato di fatto, anche per la configurazione di progetto la penetrazione del moto ondoso è nettamente smorzata in corrispondenza dell'imboccatura;
- il moto ondoso residuo che si insinua all'interno del bacino, interessa prevalentemente la parte sud ovest, ovvero la zona in cui si prevede la realizzazione delle opere per il nuovo Marina Resort;
- delle tre direzioni considerate, quella più vicina al nord (290-320 °N) è quella che determina la maggiore agitazione interna al porto;
- l'agitazione residua in corrispondenza di tutti i punti di estrazione considerati si mantiene al di sotto delle soglie determinate dalle linee guida PIANC-AIPCN;
- la massima agitazione residua è stata rilevata per la condizione $Tr=50$ anni e direzione 290-290°N, in corrispondenza del punto P7, pari a 0.20 m e P9, pari a 0.22 m (< 0.50 m);

- in generale, all'interno dell'area in concessione la parte più esposta all'agitazione residua è quella est, nella zona di confine con i pontili della GDF.

STATO DI PROGETTO - COMFORT ($H_s \leq 0.15$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 260-290 °N	2.6	10.1	0	P1	0.02	VERIFICATA
				P2	0.06	VERIFICATA
				P3	0.08	VERIFICATA
				P4	0.07	VERIFICATA
				P5	0.03	VERIFICATA
				P6	0.06	VERIFICATA
				P7	0.10	VERIFICATA
				P8	0.05	VERIFICATA
				P9	0.06	VERIFICATA
				P10	0.05	VERIFICATA
				P11	0.02	VERIFICATA
				P12	0.03	VERIFICATA

Tabella 26: verifica condizione di Comfort ($H_s \leq 0.15$ m) per settore 260-290°N – stato di progetto

STATO DI PROGETTO - SICUREZZA ($H_s \leq 0.30$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 260-290 °N	4.5	12.5	260	P1	0.11	VERIFICATA
				P2	0.03	VERIFICATA
				P3	0.08	VERIFICATA
				P4	0.08	VERIFICATA
				P5	0.08	VERIFICATA
				P6	0.04	VERIFICATA
				P7	0.07	VERIFICATA
				P8	0.07	VERIFICATA
				P9	0.11	VERIFICATA
				P10	0.08	VERIFICATA
				P11	0.06	VERIFICATA
				P12	0.07	VERIFICATA

Tabella 27: verifica condizione di Sicurezza ($H_s \leq 0.30$ m) per settore 260-290°N – stato di progetto

STATO DI PROGETTO - LIMITE ($H_s \leq 0.50$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 260-290 °N	5.5	13.4	260	P1	0.12	VERIFICATA
				P2	0.07	VERIFICATA
				P3	0.12	VERIFICATA
				P4	0.10	VERIFICATA
				P5	0.09	VERIFICATA
				P6	0.04	VERIFICATA
				P7	0.12	VERIFICATA
				P8	0.08	VERIFICATA
				P9	0.15	VERIFICATA
				P10	0.12	VERIFICATA
				P11	0.08	VERIFICATA
				P12	0.09	VERIFICATA

Tabella 28: verifica condizione di Limite ($H_s \leq 0.50$ m) per settore 260-290°N – stato di progetto

STATO DI PROGETTO - COMFORT ($H_s \leq 0.15$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 290° N	2.4	9.6	290	P1	0.08	VERIFICATA
				P2	0.11	VERIFICATA
				P3	0.10	VERIFICATA
				P4	0.08	VERIFICATA
				P5	0.09	VERIFICATA
				P6	0.09	VERIFICATA
				P7	0.09	VERIFICATA
				P8	0.06	VERIFICATA
				P9	0.11	VERIFICATA
				P10	0.09	VERIFICATA
				P11	0.06	VERIFICATA
				P12	0.04	VERIFICATA

Tabella 29: verifica condizione di Comfort ($H_s \leq 0.15$ m) per settore 290°N – stato di progetto

STATO DI PROGETTO - SICUREZZA ($H_s \leq 0.30$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 290° N	5.1	12.6	280	P1	0.14	VERIFICATA
				P2	0.04	VERIFICATA
				P3	0.11	VERIFICATA
				P4	0.11	VERIFICATA
				P5	0.10	VERIFICATA
				P6	0.05	VERIFICATA
				P7	0.11	VERIFICATA
				P8	0.10	VERIFICATA
				P9	0.16	VERIFICATA
				P10	0.11	VERIFICATA
				P11	0.08	VERIFICATA
				P12	0.08	VERIFICATA

Tabella 30: verifica condizione di Sicurezza ($H_s \leq 0.30$ m) per settore 290°N – stato di progetto

STATO DI PROGETTO - LIMITE ($H_s \leq 0.50$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 290° N	6.0	13.4	280	P1	0.14	VERIFICATA
				P2	0.09	VERIFICATA
				P3	0.16	VERIFICATA
				P4	0.13	VERIFICATA
				P5	0.10	VERIFICATA
				P6	0.03	VERIFICATA
				P7	0.16	VERIFICATA
				P8	0.10	VERIFICATA
				P9	0.17	VERIFICATA
				P10	0.15	VERIFICATA
				P11	0.10	VERIFICATA
				P12	0.11	VERIFICATA

Tabella 31: verifica condizione Limite ($H_s \leq 0.50$ m) per settore 290°N – stato di progetto

STATO DI PROGETTO - COMFORT ($H_s \leq 0.15$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 290 - 320 °N	1.7	8.0	305	P1	0.09	VERIFICATA
				P2	0.12	VERIFICATA
				P3	0.09	VERIFICATA
				P4	0.07	VERIFICATA
				P5	0.09	VERIFICATA
				P6	0.06	VERIFICATA
				P7	0.09	VERIFICATA
				P8	0.04	VERIFICATA
				P9	0.04	VERIFICATA
				P10	0.07	VERIFICATA
				P11	0.04	VERIFICATA
				P12	0.02	VERIFICATA

Tabella 32: verifica condizione di Comfort ($H_s \leq 0.15$ m) per settore 290-320°N – stato di progetto

STATO DI PROGETTO - SICUREZZA ($H_s \leq 0.30$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti estrazione	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)		(m)	
SETTORE 290 - 320 °N	5.3	12.6	300	P1	0.16	VERIFICATA
				P2	0.11	VERIFICATA
				P3	0.18	VERIFICATA
				P4	0.16	VERIFICATA
				P5	0.13	VERIFICATA
				P6	0.10	VERIFICATA
				P7	0.17	VERIFICATA
				P8	0.13	VERIFICATA
				P9	0.20	VERIFICATA
				P10	0.13	VERIFICATA
				P11	0.10	VERIFICATA
				P12	0.11	VERIFICATA

Tabella 33: verifica condizione di Sicurezza ($H_s \leq 0.30$ m) per settore 290-320°N – stato di progetto

STATO DI PROGETTO - LIMITE ($H_s \leq 0.50$ m)						
	Hs0	Tp	Dir	punti	Hs	verifica
	(m)	(s)	(°N)	estrazione	(m)	
SETTORE 290 - 320 °N	6.2	13.4	300	P1	0.17	VERIFICATA
				P2	0.12	VERIFICATA
				P3	0.19	VERIFICATA
				P4	0.17	VERIFICATA
				P5	0.13	VERIFICATA
				P6	0.10	VERIFICATA
				P7	0.20	VERIFICATA
				P8	0.14	VERIFICATA
				P9	0.22	VERIFICATA
				P10	0.18	VERIFICATA
				P11	0.12	VERIFICATA
				P12	0.13	VERIFICATA

Tabella 34: verifica condizione Limite ($H_s \leq 0.50$ m) per settore 290-320°N – stato di progetto

I risultati delle simulazioni sono inoltre riportati di seguito in forma di mappe cromatiche che esprimono il campo dei valori di altezza d'onda significativa (H_s) corrispondente alla conclusione del periodo di simulazione, ovvero alla condizione di stazionarietà.

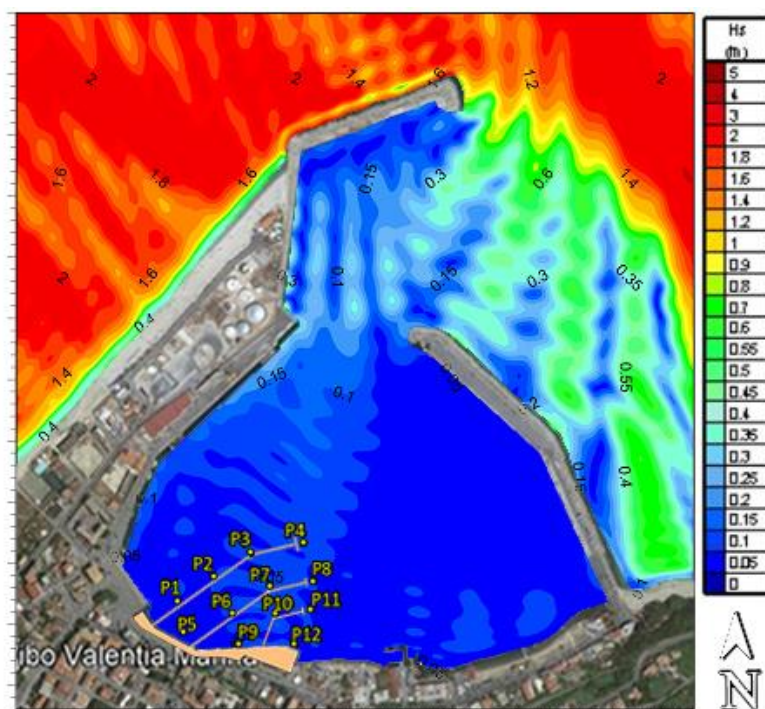


Figura 52: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Comfort, $H_s \leq 0.15$ m - settore 260-290°N – stato di progetto

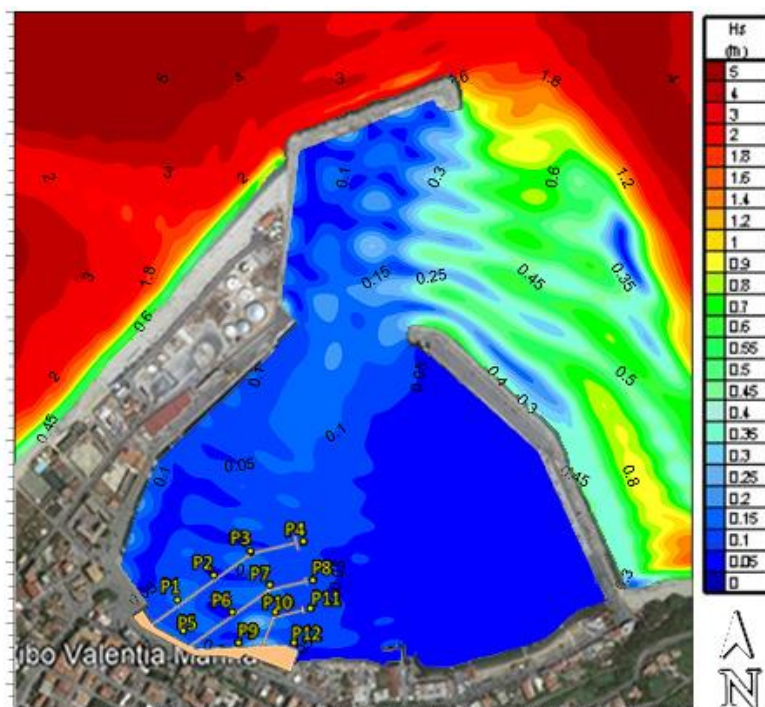


Figura 53: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Sicurezza, $H_s \leq 0.30m$ - settore 260-290°N – stato di progetto

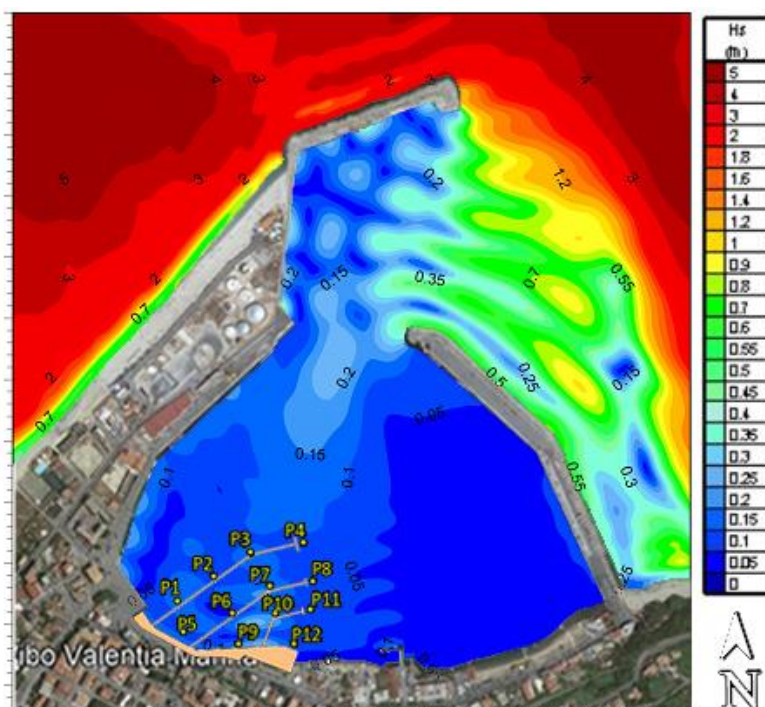


Figura 54: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione Limite, $H_s \leq 0.50m$ - settore 260-290°N – stato di progetto

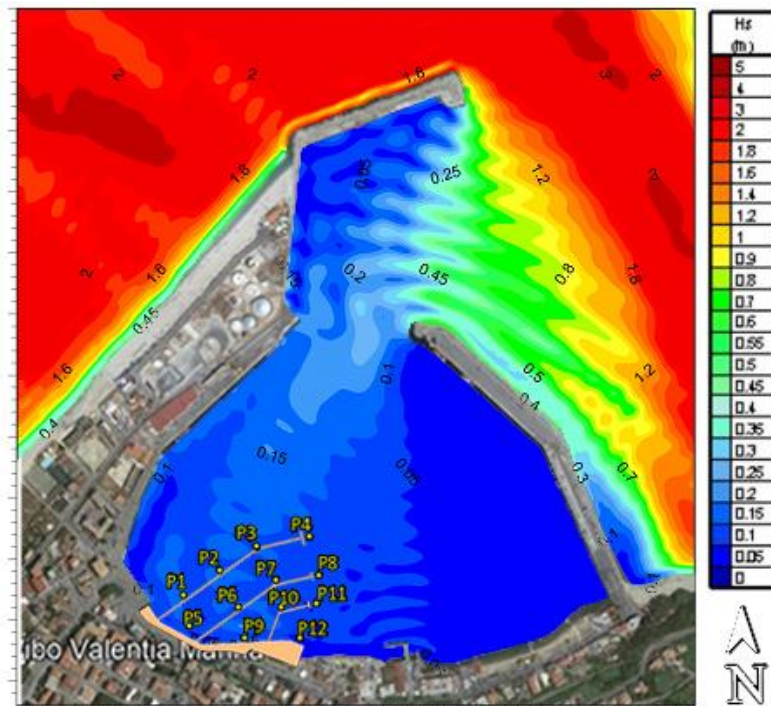


Figura 55: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Comfort, $H_s \leq 0.15m$ - settore $290^\circ N$ - stato di progetto

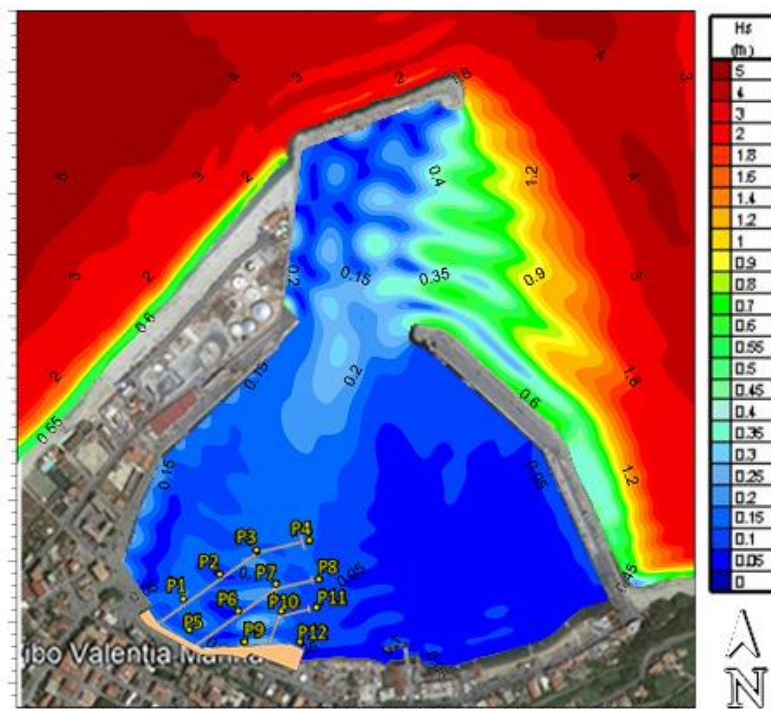


Figura 56: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Sicurezza, $H_s \leq 0.30m$ - settore $290^\circ N$ - stato di progetto

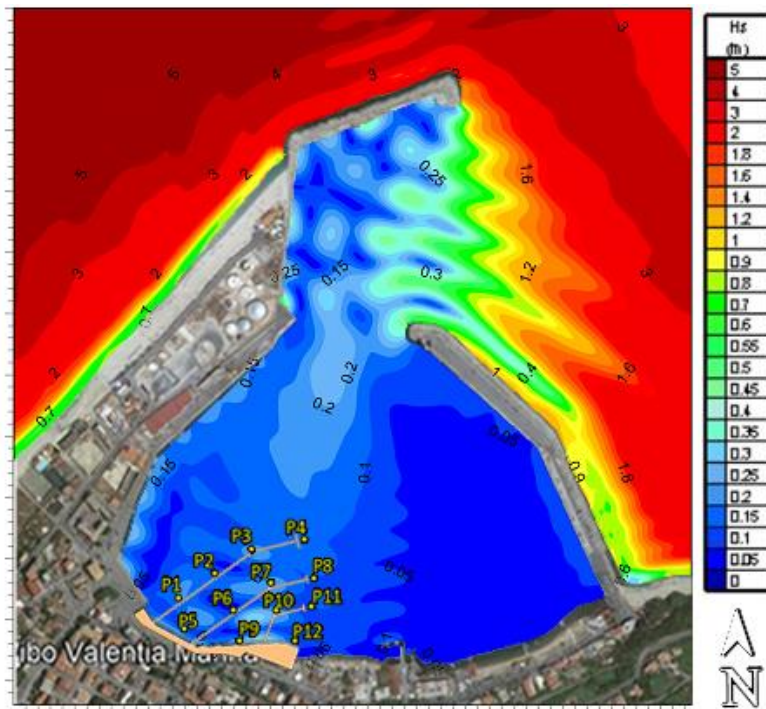


Figura 57: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione Limite, $H_s \leq 0.50m$ - settore $290^\circ N$ - stato di progetto

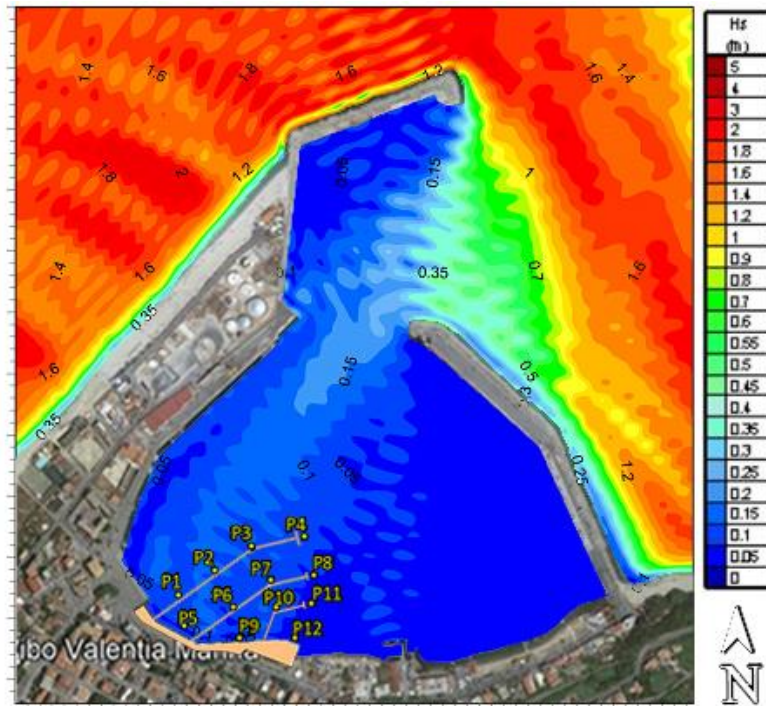


Figura 58: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Comfort, $H_s \leq 0.15m$ - settore $290-320^\circ N$ - stato di progetto

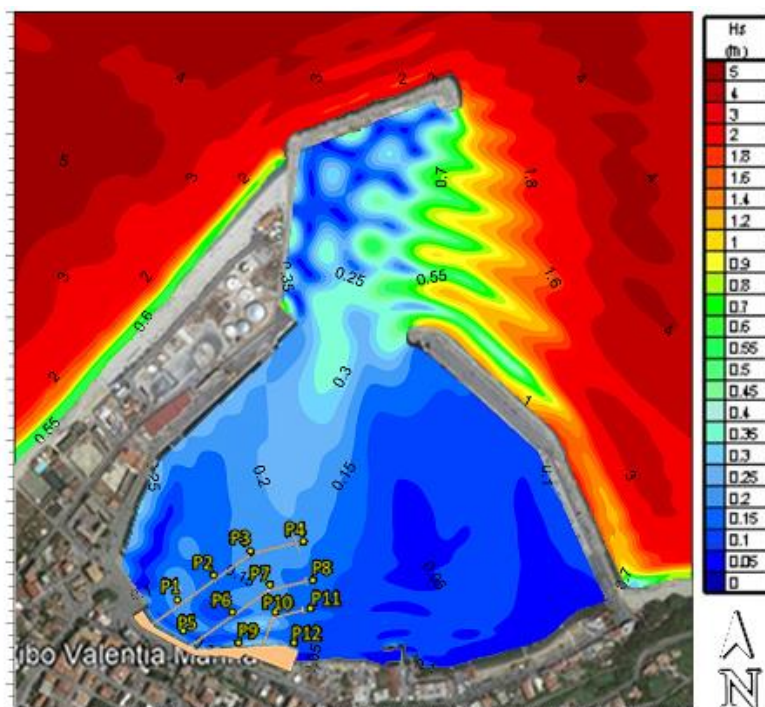


Figura 59: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione di Sicurezza, $H_s \leq 0.30m$ - settore 290-320°N – stato di progetto

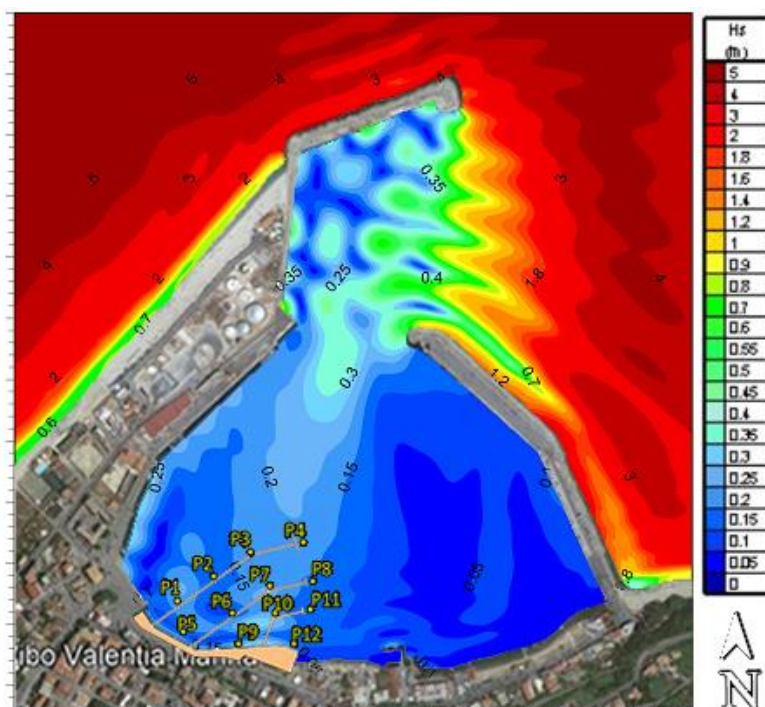


Figura 60: Mappa dell'agitazione residua - verifica condizione Limite, $H_s \leq 0.50m$ - settore 290-320°N – stato di progetto

6. CONCLUSIONI

Il presente studio Idraulico Marittimo ha avuto lo scopo di caratterizzare le condizioni meteomarine a cui è esposto il porto di Vibo Valentia Marina ed in particolare le caratteristiche di penetrazione del moto ondoso all'interno del bacino nel quale è prevista la realizzazione di opere marittime che consentiranno di sviluppare l'area e il futuro "Marina Resort", opera di pregio che favorirà la crescita del territorio e lo sviluppo del turismo dell'intera area.

Lo studio è stato suddiviso nei principali temi che caratterizzano il clima meteomarinico di un sito costiero. In particolare, sono stati dapprima analizzati i dati meteomarini rilevati dalla boa ondometrica RON di Cetraro, trasferiti poi a largo di Vibo ed utilizzati per elaborare lo studio del clima meteomarinico per il porto di Vibo Valentia Marina.

La modellazione numerica è stata utilizzata per trasferire le informazioni del clima meteomarinico nei pressi del porto, determinando la tabella delle frequenze e la rosa del moto ondoso medio. Tali informazioni definiscono la frequenza di apparizione per assegnate classi di altezza d'onda e direzioni di provenienza del moto ondoso, aspetti necessari a comprendere le condizioni meteomarine a cui è mediamente esposto il porto.

E' stata eseguita l'analisi degli eventi estremi per definire i cosiddetti eventi di mareggiata, ovvero le altezze d'onda, i periodi d'onda e le direzioni di provenienza per eventi con assegnato tempo di ritorno. La procedura ha consentito di definire gli eventi estremi di mareggiata per il porto.

Tale analisi, è stata poi utilizzata per il successivo studio dell'agitazione ondosa nel porto. Lo studio è stato esteso all'intero bacino ed è stato finalizzato alla verifica delle condizioni di sicurezza per le aree oggetto di concessione, per le quali è necessario garantire il rispetto dei limiti definiti dagli standard internazionali AIPNC-PIANC, che definiscono i valori di altezza d'onda limite per garantire rispettivamente il comfort, la sicurezza e il limite di praticabilità per le imbarcazioni ormeggiate ai pontili e alle banchine.

Per tutti i n.12 punti individuati lungo l'area in concessione, definiti in considerazione dei posti barca e degli ormeggi previsti, le verifiche di agitazione sono risultate soddisfatte.