



MINISTERO DELL'AMBIENTE



COMUNE DI REGGIO CALABRIA



CAPITANERIA DI PORTO DI REGGIO CALABRIA

DITTE PROPONENTI:

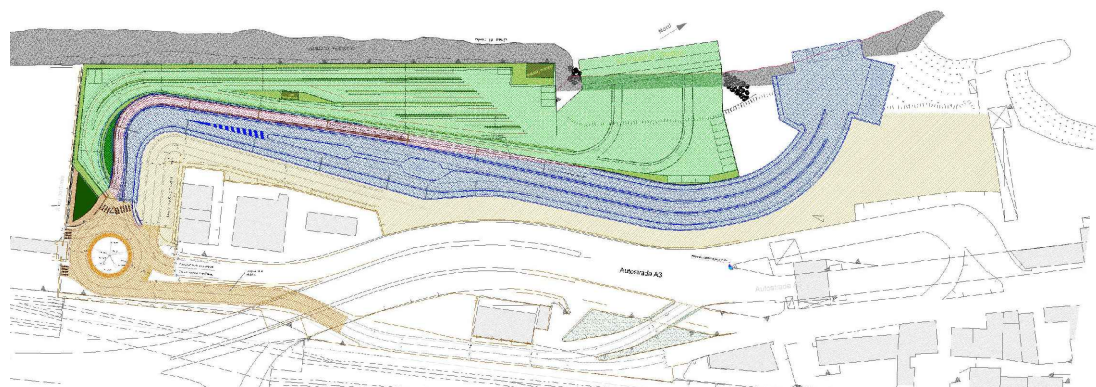


CARONTE&TOURIST S.P.A.



DIANO S.P.A.

Progetto per la realizzazione di un sistema di approdo per il collegamento marittimo Reggio Calabria/Messina presso le aree a nord del piazzale Porto a Reggio Calabria



Allegato

R3

Scala

--:--

ELABORATO:

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

TECNICI:

Ing. Alessandro Chirico

Ing. Alessandro De Domenico

Ing. Giovanni Ferlazzo

Ing. Edoardo Pracanica

Ing. Giovanni Pracanica

CONSULENTE TECNICO SCIENTIFICO:

Prof. Ing. Pasquale Filianoti

TECNICO INCARICATO V.I.A.:

Dott. PhD Fausto B.F. Ronsisvalle

Caronte&Tourist S.p.a.

Diano S.p.A.

REVISIONE¹:

A SEGUITO RIUNIONE
COMM.VIA DEL 16/06/16

DATA:

27/07/2016

CARONTE & TOURIST



s.p.a.

Caronte & Tourist S.p.A.

*Studio idraulico marittimo per la progettazione del nuovo approdo per navi
traghetto a nord del porto di Reggio Calabria*



A TERMINI DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETA' DI QUESTO DOCUMENTO CON DIVIETO DI RIPRODURLO, ANCHE IN PARTE, O DI RENDERLO NOTO A TERZI

Pagina vuota

CARONTE & TOURIST



Caronte & Tourist S.p.A.

Studio idraulico marittimo per la realizzazione di un approdo per navi traghetto in un'area a nord del piazzale del porto di Reggio Calabria

RELAZIONE

Aprile 2016

Emissione		Descrizione	Redazione	Approvazione
Data	Rev.			
	0	Prima emissione	FILIANOTI P.	FILIANOTI P.

PREMESSA

La società Caronte S.p.A. di seguito indicata come Committente ha dato incarico allo scrivente per la progettazione di un'opera di approdo per navi traghetto da realizzare in un'area immediatamente a Nord del piazzale del porto di Reggio Calabria. La realizzazione di questa nuova infrastruttura nasce dalla necessità di dotare il porto di Reggio Calabria di un punto di approdo per navi traghetto che costituisca la naturale interfaccia per il collegamento con il realizzando approdo di Tremestieri localizzato sulla frontistante sponda siciliana.

Nella presente relazione è riportato lo studio idraulico-marittimo propedeutico alla fase di calcolo e dimensionamento dell'opera di accosto prevista in progetto come banchina a giorno.

Il presente documento è suddiviso in due parti: la prima riguarda lo studio meteomarinico del sito in cui è trattata l'analisi delle forzanti meteomarine caratteristiche del sito in esame; la seconda parte è costituita dallo studio idraulico-marittimo con la modellizzazione della propagazione sottocosta del moto di generazione locale (all'interno dello Stretto) e del moto ondoso propagato dall'esterno dello Stretto, con la successiva determinazione delle caratteristiche ondometriche per il dimensionamento delle opere di progetto e per la verifica delle condizioni di agibilità dell'approdo.

INDICE

PREMESSA	3
1. INQUADRAMENTO DEL PARAGGIO	5
1.1 INTRODUZIONE.....	5
1.2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE E ESPOSIZIONE GEOGRAFICA DEL PARAGGIO.....	6
1.2.1 Fetches geografici ed efficaci.....	7
1.2.2 La correlazione tra la direzione del vento e quella dello stato di mare generato.....	16
1.2.3 Caratteristiche della costa.....	16
2. CLIMA ANEMOLOGICO	20
2.1 PREMESSA.....	21
2.2 INDAGINE SUI DATI DI VENTO DISPONIBILI.....	22
3. REGIME DELLE MAREE ED ANALISI DEI LIVELLI	71
3.1 PREMESSA.....	71
3.2 LE MAREE ASTRONOMICHE.....	71
3.3 LE OSCILLAZIONI DELLE MAREE NELLO STRETTO DI MESSINA.....	73
3.4 LE MAREE ASTRONOMICHE RISULTANTI DALL'ANALISI DELLE REGISTRAZIONI DEI MAREOGRAFI DI MESSINA E REGGIO.....	75
3.5 LE VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO PER CAUSE METEOROLOGICHE.....	78
3.5.1 Sopralzo barico.....	78
3.5.2 Sopralzo di vento.....	79
3.5.3 Le variazioni totali teoriche del livello marino sotto-costa nello Stretto di Messina.....	79
3.6 MISURE DI LIVELLI DISPONIBILI.....	79
3.6.1 Stazione Rete Mareografica Nazionale di Messina.....	80
3.6.2 ANALISI DELLE REGISTRAZIONI DEL LIVELLO DI MAREA.....	82
3.6.3 ELABORAZIONE STATISTICO-PROBABILISTICA DELLE MISURE DI LIVELLO DEL MARE.....	85
3.7 REGIME DELLE CORRENTI.....	86
3.7.1 LE CORRENTI NELLO STRETTO DI MESSINA.....	87
4. CLIMA DI MOTO ONDOSO	91
4.1 PREMESSA.....	91
4.2 DATI DI MOTO ONDOSO DELL'ECMWF.....	92
4.3 ANALISI DELLE SERIE DI DATI ONDAMETRICI.....	94
4.3.1 Flusso energetico del moto ondoso al largo dello stretto di Messina (Grid Point 37.50°N 16°E ECMWF) 104	
4.3.2 Determinazione della relazione più probabile fra altezza e periodo d'onda significativo.....	107
4.3.3 Criteri di valutazione del clima ondoso e del rischio di eventi estremi.....	110
4.4 TRASFERIMENTO DEL CLIMA DI MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA.....	113
4.4.1 Premessa.....	113
4.4.2 Studio della propagazione del moto ondoso.....	113
4.4.3 Modelli matematici applicati al trasferimento del moto ondoso sottocosta.....	114
4.4.4 Dati di input del modello.....	116
4.4.5 Applicazione del modello al paraggio di Reggio Calabria Porto.....	116
4.5 STUDIO DEL DOWNTIME DELLA BANCHINA.....	131
4.5.1 Premessa.....	131
4.5.2 Caratteristiche del sistema di attracco.....	131
4.5.3 Definizione dei limiti operativi.....	131
4.5.4 Curve di downtime.....	133
4.6 METODOLOGIA PER LA VALUTAZIONE DELLA RISALITA DEL MOTO ONDOSO SULLA BANCHINA.....	135
4.7 APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA DI STUDIO DEL RUN-UP AL CASO DI PROGETTO.....	138

1. INQUADRAMENTO DEL PARAGGIO

1.1 Introduzione

Nella presente relazione è riportato lo studio idraulico-marittimo propedeutico alla fase di dimensionamento delle opere relative al "Progetto per la realizzazione di un nuovo approdo per navi traghetto a Nord del Porto di Reggio Calabria".

Lo studio si è articolato nelle seguenti fasi:

1. Inquadramento geografico del paraggio;
2. Studio sull'esposizione del paraggio di mare antistante la costa in esame;
3. Reperimento dei dati meteo-marini significativi relativi al paraggio in esame;
4. Analisi dei dati reperiti al fine di definire le condizioni anemometriche relative all'area geografica in cui ricade il tratto di costa interessato dal progetto, individuando il regime dei venti caratteristico sia in termini di intensità ("velocità del vento" che in termini di distribuzione temporale (frequenza di accadimento annuale e stagionale);
5. Studio statistico-probabilistico degli eventi estremi di vento;
6. Studio delle correnti e del regime dei livelli marini;
7. Analisi dei dati di moto ondoso reperiti al fine di definire il clima al di fuori dello stretto di Messina, ovvero nelle acque in cui si generano i moti ondosi di swell, che possono propagarsi fino al sito in esame, all'interno dello Stretto;
8. Studio del clima e degli eventi estremi di moto ondoso di generazione locale all'interno dello stretto di Messina mediante l'utilizzo di modelli matematici di "hindcasting", basati sul trasferimento del contenuto energetico dal vento alla superficie del mare;
9. Previsione con metodi statistico-probabilistici degli eventi estremi con tempi di ritorno superiori alla durata delle serie storiche, al largo del sito di progetto;
10. Trasferimento del clima annuale e degli eventi estremi di moto ondoso dal largo fin sottocosta al sito in esame, mediante modello matematico di rifrazione spettrale, finalizzato al tracciamento dei piani d'onda ed all'acquisizione dell'onda di progetto per il dimensionamento delle opere;
11. Studio della risalita (run-up) del moto ondoso sui banchinamenti previsti in progetto;
12. Studio del downtime (o periodo di inagibilità nautica) dell'approdo;
13. Predimensionamento opere marittime;

L'affidabilità e l'accuratezza dei dati ondometrici è importante per la buona progettazione (e di conseguenza la riuscita) di un'infrastruttura portuale, sia per la definizione delle caratteristiche di resistenza statica delle opere marittime sulla base dei valori massimi attesi dei parametri di progetto per il periodo di ritorno prescelto, sia per la definizione del clima ondoso caratteristico del paraggio in esame, per lo studio delle caratteristiche di agitazione ondosa residua nell'area antistante le opere di accosto, al fine di definire i periodi di inagibilità e di ridotta funzionalità dell'opera.

Ad oggi, non sono disponibili misure dirette del moto ondoso nello Stretto di Messina, rilevate sistematicamente e per periodi sufficientemente lunghi, tali da consentire la definizione dei parametri medi del

clima ondoso di comune impiego nel campo dell'ingegneria marittima. Pertanto, si svolgerà un'analisi dell'insieme di dati attualmente disponibili (a conoscenza di chi scrive) nell'intorno a sud dello Stretto di Messina, cercando, attraverso essi, di "pervenire" al clima ondoso nel paraggio di interesse.

I dati ondometrici dei mari di generazione locale cui faremo riferimento sono prodotti da modelli numerici che usano come input dati anemometrici. La qualità di tali dati merita qualche osservazione. Dai confronti con i dati delle boe ondometriche emergono due fatti salienti. Primo: i picchi di altezza significativa previsti dai modelli numerici sono sistematicamente più piccoli dei picchi misurati. Secondo: per venti deboli, i modelli tendono a sovrastimare i valori di altezza significativa. Tali due errori si accentuano via via che i bacini divengono più piccoli. Vale a dire che gli errori delle stime dei modelli crescono passando dagli oceani ai mari chiusi come il Tirreno e l'Adriatico. Il motivo è dovuto soprattutto alla difficoltà di rappresentare la transizione delle superfici dal mare alla terraferma e viceversa.

I predetti errori nelle stime di Hs a partire dai modelli numerici hanno conseguenze diverse a seconda della finalità d'uso dei dati. Se l'obiettivo è dimensionare una struttura marittima, l'altezza significativa dello stato di mare di progetto risulterà più piccola dell'altezza significativa prevista a partire da misure dirette (strumentali e/o visuali), a parità di periodo di ritorno. Se l'obiettivo è prevedere l'evoluzione di un ripascimento, il tempo di dimezzamento previsto a partire dai dati ondosi generati con i modelli numerici è più piccolo del tempo previsto a partire da misure dirette di Hs, vale a dire il grado di stabilità del ripascimento sarà migliore del previsto.

In entrambi i casi (calcolo dell'altezza significativa di progetto, valutazione del grado di stabilità di un ripascimento) la quantificazione degli errori di stima è possibile se si dispone per l'area in esame di misure dirette da usare per la taratura dei dati del modello.

1.2 Inquadramento territoriale e esposizione geografica del paraggio

In tutte le applicazioni dell'ingegneria marittima e costiera è necessario definire preliminarmente le condizioni di "esposizione" del sito di interesse rispetto a vento, moto ondoso, correnti, livelli marini. Le analisi di questi fattori meteomarini sono finalizzate a determinare:

- condizioni medie climatiche (analisi statistiche di osservazioni e misure pluriennali);
- condizioni estreme (analisi della probabilità di occorrenza, nel tempo, dell'evento meteomarinario);

Limitando l'analisi al moto ondoso, una prima caratterizzazione delle potenziali condizioni di esposizione alle onde di un sito costiero viene effettuata in funzione della traversia geografica, individuando il settore angolare comprendente tutte le direzioni da cui possono arrivare le onde.

Questo settore di traversia viene suddiviso in:

- traversia principale, da dove possono provenire le mareggiate più violente;
- traversia secondaria, che include le direzioni associate a stati di mare minori.

Il paraggio costiero di Reggio Calabria Porto ricade sulla sponda calabrese dello Stretto di Messina, lungo il tratto di costa compreso tra Punta Pezzo a Nord e Punta Pellaro a Sud (v. freccia rossa di figura 1.1). Il tratto di litorale di interesse, localizzato subito a ridosso del piazzale settentrionale del porto di Reggio Calabria, riguarda da nord-nordovest fino a nordovest il litorale settentrionale della città di Messina compreso tra

Ganzirri e la zona falcata. Da nordovest a sud-ovest il sito guarda la sponda messinese dello stretto di Messina fino a Taormina; da sud-ovest a sud-sudovest il paraggio guarda la costa del catanese fino al confine con la provincia di Siracusa.



Figura 1.1- Inquadramento geografico dell'area dello stretto di Messina. In rosso è evidenziata la posizione del tratto di litorale di costa a nord del Porto di Reggio Calabria. [Ortofoto 2012 fonte Geoportale Nazionale]

1.2.1 Fetches geografici ed efficaci

L'analisi dell'esposizione geografica di un sito costiero si basa sulla determinazione dei fetch geografici ed efficaci.

Per fetch s'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 semichiusi di estensione limitata, l'individuazione dei fetches può essere eseguita facendo ricorso al concetto di "fetch geografico" che indica la distanza geografica tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione. Tale assunzione risulta plausibile quando le dimensioni caratteristiche delle perturbazioni che interessano il bacino sono dello stesso ordine di grandezza dei valori massimi che caratterizzano i fetches geografici. Quando invece i valori massimi dei fetches geografici sono superiori alle dimensioni delle perturbazioni, allora si assumerà quest'ultima come distanza di generazione del moto ondoso. Considerato che nel Mar Mediterraneo le perturbazioni cicloniche hanno estensioni massime dell'ordine dei 600 km, i fetches geografici relativi al sito in esame sono stati limitati a tale dimensione.

Per un'analisi del settore di traversia, più propriamente mirata alla valutazione delle condizioni di possibile esposizione agli stati di mare è ormai prassi consolidata fare riferimento, in luogo dei settori di traversia geografica, al cosiddetto "fetch efficace" (Seymour, 1977) (porzione di mare che costituisce, sotto l'azione diretta dei venti, l'area di generazione dell'evento di moto ondoso).

Per completare l'inquadramento geografico del paraggio è necessario determinare i valori dei fetches efficaci sulla base dei valori dei fetches geografici individuati. Il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione è funzione dei valori dei fetches geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata; in questo modo, i fetches 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 fetches efficaci risulta essere diversa da quella dei fetches geografici.

A tal proposito si è provveduto a tracciare dalla posizione al largo del sito costiero di interesse, i raggi di valutazione delle distanze di mare libero, suddividendo l'angolo di 360° in settori di 5° ciascuno.

I fetches geografici superiori a 600 km sono stati confinati a questa distanza corrispondente con la limitata estensione delle perturbazioni atmosferiche generatrici del moto ondoso nel Mar Mediterraneo.

Le lunghezze radiali dei fetches geografici determinate su base cartografica sono state interpolate utilizzando una funzione spline cubica, in modo da ottenere i valori dei fetches geografici per ogni grado di incremento su tutto l'angolo di 360° .

I fetches interpolati sono stati successivamente mediati in un settore di 15° nell'intorno della direzione i-esima i (secondo il metodo proposto dal C.E.R.C.).

I valori dei fetches geografici così ottenuti per le diverse direzioni contenute entro il settore di traversia del paraggio in esame, sono stati utilizzati per determinare il settore "efficace", valutando le porzioni di mare effettivamente coinvolte dal fenomeno di generazione del moto ondoso sulla base dei limiti geografici del settore di traversia:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \cos^{2+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} \cos^2(\phi_i - \phi_w)} \quad (1.1)$$

dove:

ϕ_w direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;

$\phi_i \leq \phi_w \pm \theta$ direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di $2 \cdot \theta$ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w . Il metodo classico di Saville prevede un valore di $\pm 45^\circ$ mentre la metodologia sviluppata da Seymour fa riferimento ad un valore di $\pm 90^\circ$ (nel presente lavoro si è adottata la metodologia di Seymour).

$F_{e,w}$ lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione ϕ_w ;

F_i lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima (si fa riferimento alla lunghezza calcolata su base cartografica) eventualmente assunta come valore medio relativo ad un settore di 15° nell'intorno della direzione i-esima i (metodo proposto dal C.E.R.C. nel software package A.C.E.S.)

n termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume $n=2$; nel caso in esame è stato considerato un coefficiente $n=3$).

Nella Figura 1.2 è riportato lo schema di riferimento, i simboli e le convenzioni usati nella relazione (1.1).

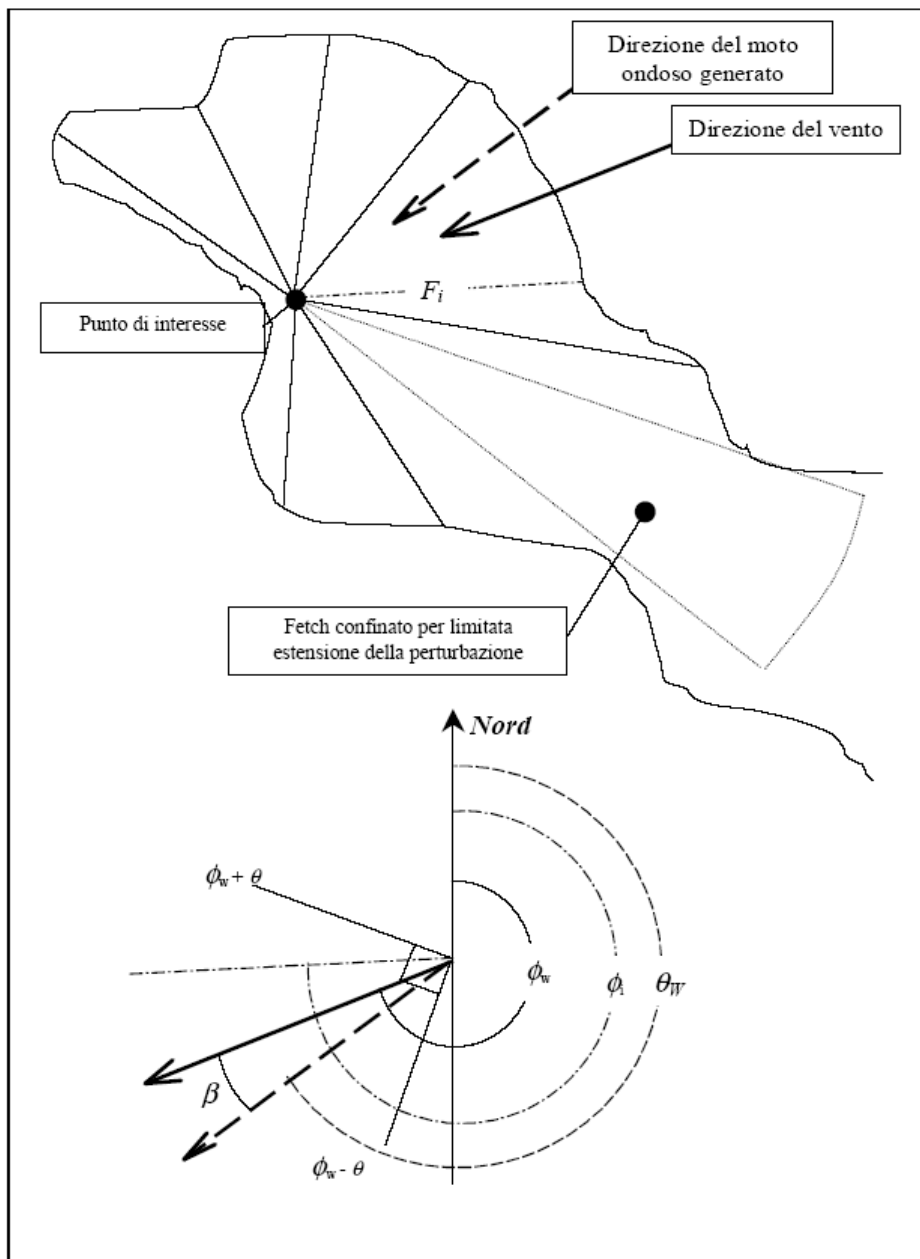


Figura 1.2. Schema di riferimento, simboli e convenzioni utilizzati per il calcolo dei fetches efficaci.

La relazione (1.1) per il calcolo dei fetches efficaci, deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, S.P.M. 1984, Smith 1991).

La definizione dei fetches geografici ed efficaci costituisce il punto di partenza per l'analisi del clima meteomarinario di un paraggio. Infatti i valori dei fetches sono utilizzati per i seguenti scopi:

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

Il sito costiero in esame è contraddistinto da un settore di traversia geografico delimitato a nord dalla cuspidi focale della Fiumara di S. Giuseppe (limite settentrionale del comune di Gallico) e a sud-sudovest dalla visuale di Punta Calamizzi, mentre da nord-nordovest ad ovest la traversia risulta limitata dalla costa della città di Messina che si affaccia sullo Stretto (Figura 1.3). Ponendosi al largo del sito di progetto (situato immediatamente a nord del piazzale del porto di Reggio Calabria), in un punto collocato in posizione baricentrica rispetto a questo tratto di costa, sulla linea batimetrica di -50 m, il settore di traversia geografico si estende dai 209° ai 344° N, per un'apertura angolare totale di 135°.

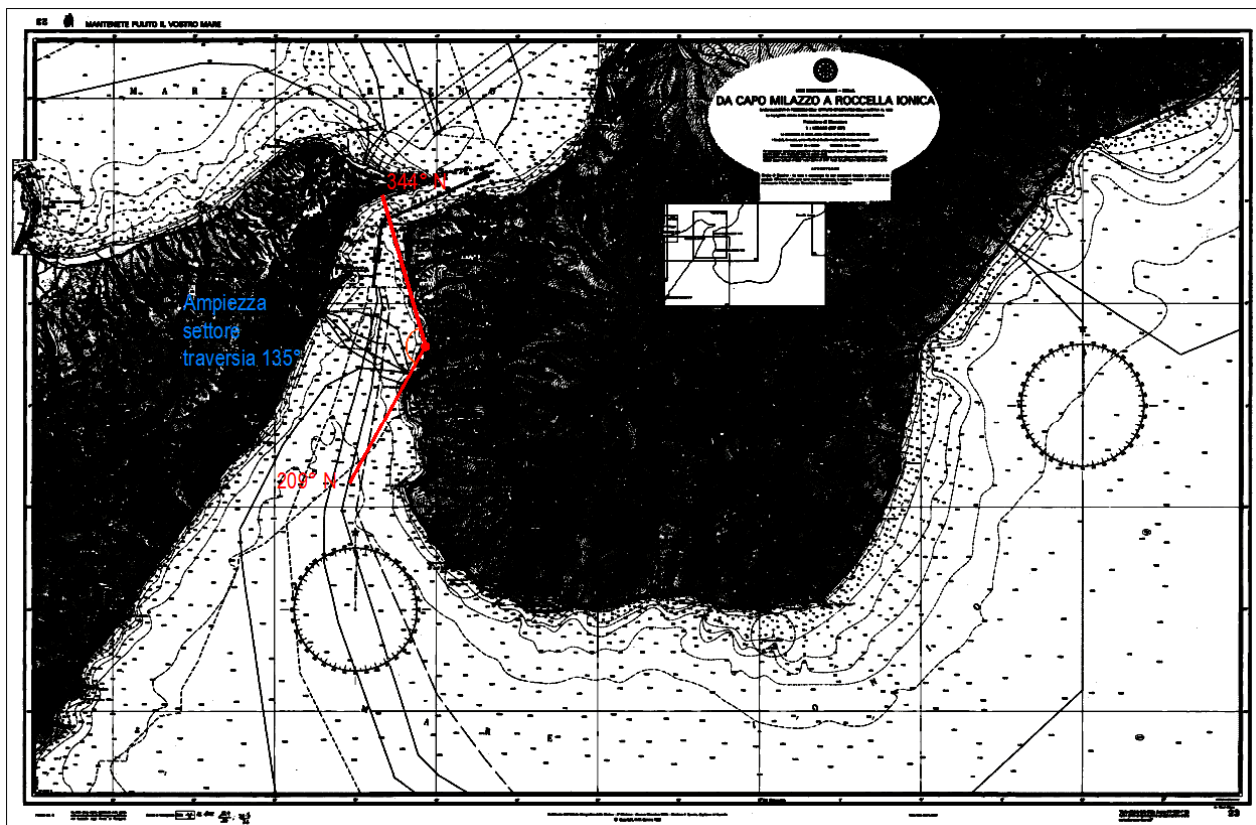


Figura 1.3– Settore di traversia del paraggio di Reggio Calabria Porto

Il paraggio è esposto al mare aperto (proveniente dall'area esterna all'imboccatura sud dello Stretto di Messina) solo all'interno di un settore di traversia molto ristretto compreso tra i 209° ed i 229° che quindi rappresenta il settore di traversia principale: pertanto il settore compreso tra i 229°N ed i 344°N rappresenta il settore di traversia secondario. Per la determinazione dell'esposizione del paraggio è stato considerato il settore di traversia geografico sotteso dal punto posto al largo del sito costiero che riguarda le direzioni provenienti da acque profonde (con profondità superiori ai 50 m), al fine di ricomprendere solamente quelle onde al largo che risultano quanto più possibile indisturbate.

I valori più elevati della lunghezza del fetch geografico si hanno secondo le direzioni che traggono la costa orientale siciliana del siracusano e del catanese (settore compreso tra i 209° ed i 224°N) e verso il litorale ionico della provincia di Messina (circa 225-235°N); la lunghezza del fetch geografico misurato cartograficamente risulta compreso tra i 100 ed i 45 km per il settore che riguarda il catanese ed il siracusano ed è invece compreso tra i 40 ed i 20 km il settore che guarda verso la costa della provincia di Messina. Il settore che riguarda le coste della città di Messina che si affacciano sullo stretto (240-344°N) è il più confinato ed è caratterizzato da lunghezze del fetch geografico comprese tra i 17 ed i 10 km. Le direzioni comprese tra i 345° ed i 225° N sono invece confinate dalle coste calabresi che si estendono tra Villa S. Giovanni e Reggio Calabria con distanze di mare libero comprese tra i 0.5 ed i 4 km. Nel diagramma cartesiano di Fig. 1.4 sono indicati graficamente i valori dei fetches geografici relativi al punto di analisi, rilevati cartograficamente.

Come è evidente dall'analisi cartografica, in più direzioni la distanza di mare libero non è mai superiore all'estensione massima delle perturbazioni che caratterizzano il bacino del Mediterraneo, pari a 600 km, per cui non è necessario confinare i fetches geografici a questo valore della distanza massima.

Nel diagramma cartesiano di Fig. 1.5 sono indicati graficamente i valori dei fetches geografici relativi al punto di analisi. La Tabella 1.1 riporta i valori dei fetches geografici rilevati cartograficamente e confinati. I fetches efficaci ottenuti utilizzando l'eq. (1.1) sono riportati nel diagramma di Fig. 1.5. Ai fini del confronto tra i fetches geografici e fetches efficaci sono riportati gli andamenti di queste due grandezze in forma cartesiana ed in forma polare rispettivamente nelle figure 1.6 ed 1.7.

Il fetch efficace massimo ottenuto risulta pari a circa 24 km ed è riferito alla direzione di Libeccio (sudovest 225°N), come è possibile dedurre dalla serie di dati riportati in tabella 1.1.

Nei grafici di Fig. 1.8-1.9 sono rappresentati su una base cartografica rispettivamente l'andamento dei fetches geografici cartografici mediati e l'andamento dei fetches efficaci calcolati.

I settori di Ponente-Libeccio, Ponente e Maestro rappresentano la traversia secondaria esposta ai mari formati da onde generate localmente dai venti che soffiano all'interno dello Stretto, le cui dimensioni sono pertanto limitate dall'estensione del fetch, che presenta ampiezza massima di circa 30 km traggendo la costa di Roccalumera sulla antistante sponda messinese dello Stretto in direzione di 230-235°N, ed un'ampiezza media di circa 10 km lungo le direzioni del IV° quadrante (Ponente-Maestrale) dalle quali possono sopraggiungere le ondate sulla costa di Reggio. Il settore compreso tra 210° e 230°N (Libeccio), rappresenta la traversia principale, cioè il settore da cui pervengono al litorale in oggetto i mari dominanti generati esternamente all'area dello Stretto.

Tabella 1.1– Fetches geografici ed efficaci al largo di Reggio Calabria Porto

Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetches geografici reali (km)	Fetches efficaci (km)	Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetches geografici reali (km)	Fetches efficaci (km)
0	0,89	3,962	180	0,32	8,224
5	0,88	3,313	185	0,38	10,437
10	0,84	2,715	190	0,57	12,782
15	0,79	2,185	195	1,35	15,152
20	0,74	1,731	200	1,15	17,425
25	0,68	1,357	205	0,65	19,480
30	0,64	1,060	210	98,28	21,205
35	0,60	0,834	215	72,99	22,509
40	0,56	0,668	220	59,77	23,328
45	0,52	0,551	225	43,40	23,634
50	0,48	0,469	230	31,54	23,433
55	0,48	0,412	235	22,80	22,768
60	0,40	0,370	240	17,69	21,710
65	0,28	0,337	245	15,27	20,356
70	0,28	0,309	250	13,88	18,815
75	0,29	0,285	255	12,98	17,198
80	0,27	0,263	260	12,27	15,611
85	0,22	0,244	265	11,57	14,143
90	0,21	0,227	270	11,14	12,862
95	0,19	0,213	275	10,69	11,806
100	0,19	0,202	280	10,28	10,985
105	0,19	0,193	285	10,05	10,385
110	0,19	0,186	290	9,84	9,967
115	0,19	0,182	295	9,72	9,682
120	0,20	0,180	300	9,51	9,476
125	0,20	0,181	305	9,58	9,299
130	0,20	0,189	310	9,45	9,112
135	0,18	0,218	315	11,15	8,884
140	0,18	0,297	320	11,82	8,595
145	0,19	0,468	325	12,74	8,231
150	0,19	0,782	330	13,22	7,786
155	0,20	1,298	335	13,95	7,262
160	0,22	2,069	340	14,01	6,669
165	0,22	3,138	345	4,00	6,022
170	0,23	4,527	350	3,42	5,340
175	0,28	6,234	355	1,01	4,646

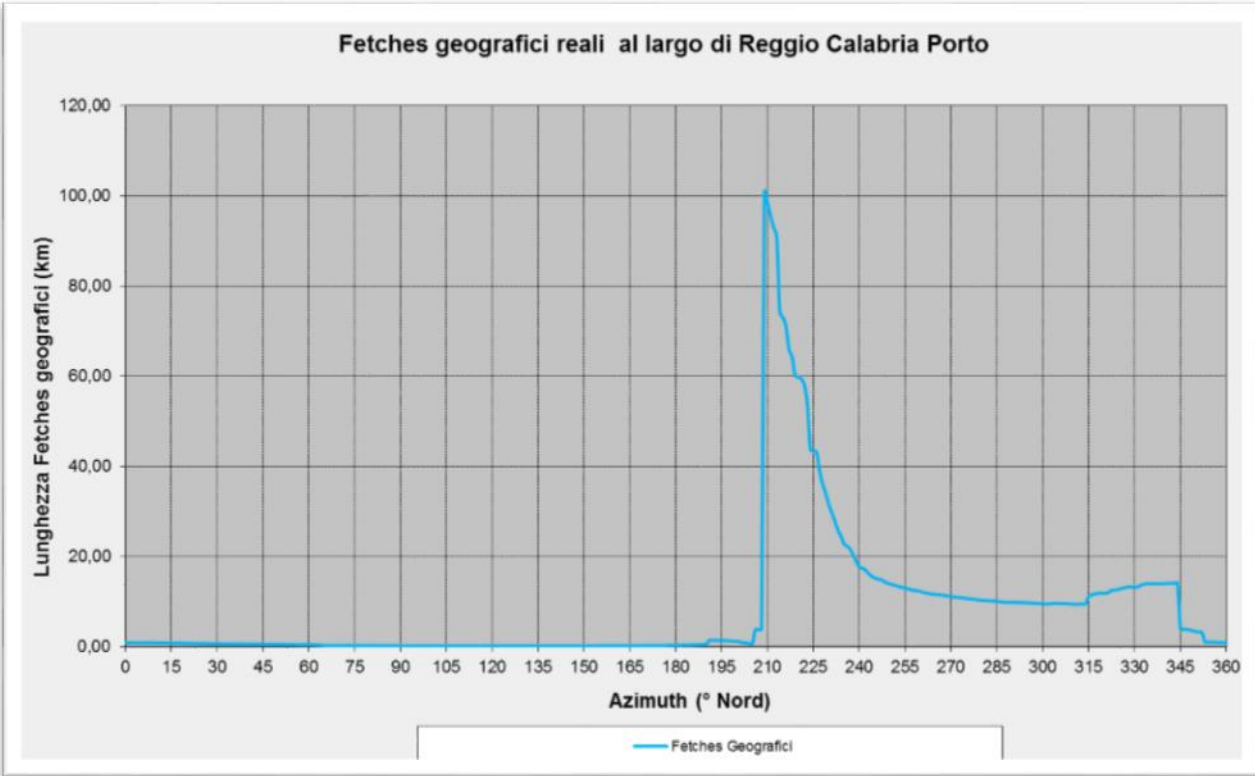


Figura 1.4– Diagramma cartesiano dei fetches geografici reali al largo di Reggio Calabria Porto.

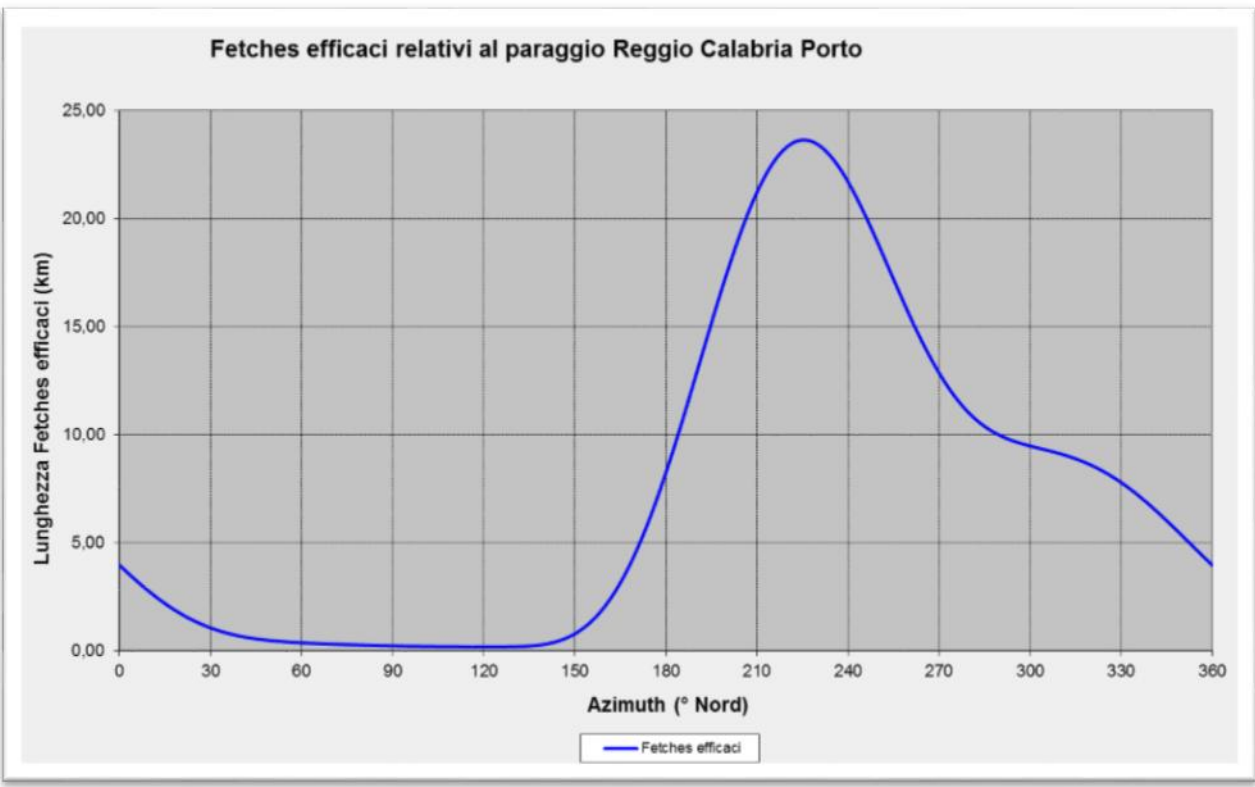


Figura 1.5– Diagramma cartesiano dei fetches efficaci al largo di Reggio Calabria Porto.

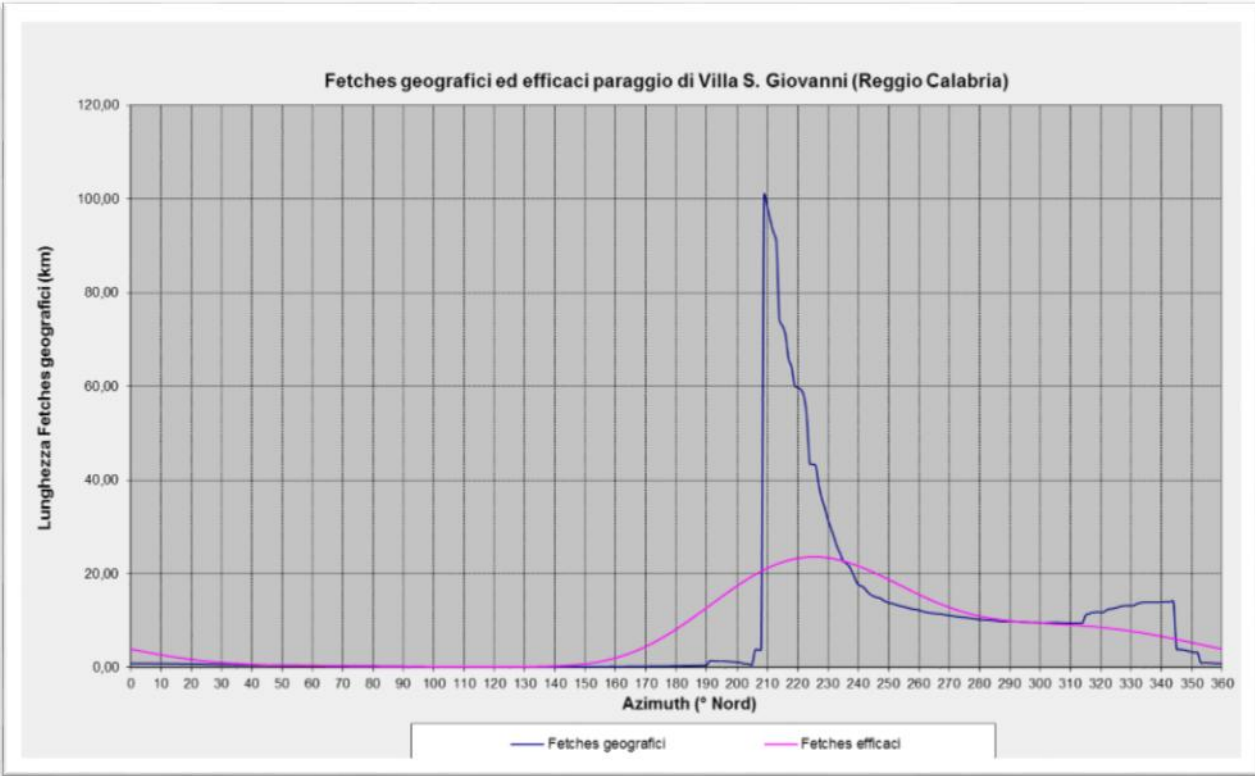


Figura 1.6– Diagramma cartesiano di sovrapposizione dei fetches geografici ed efficaci al largo di Reggio Calabria Porto.

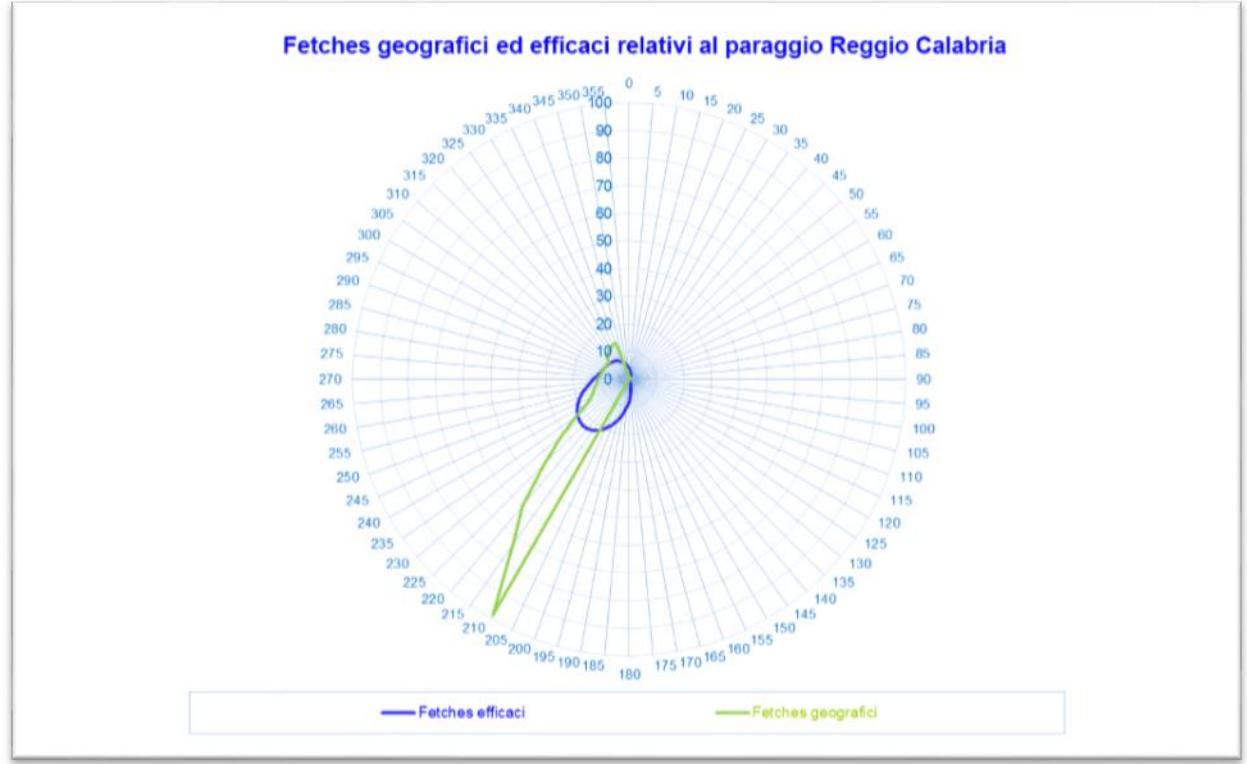


Figura 1.7– Diagramma polare con la sovrapposizione dell'andamento dei fetches efficaci (in blu) e dei fetches geografici (in verde) al largo di Reggio Calabria.

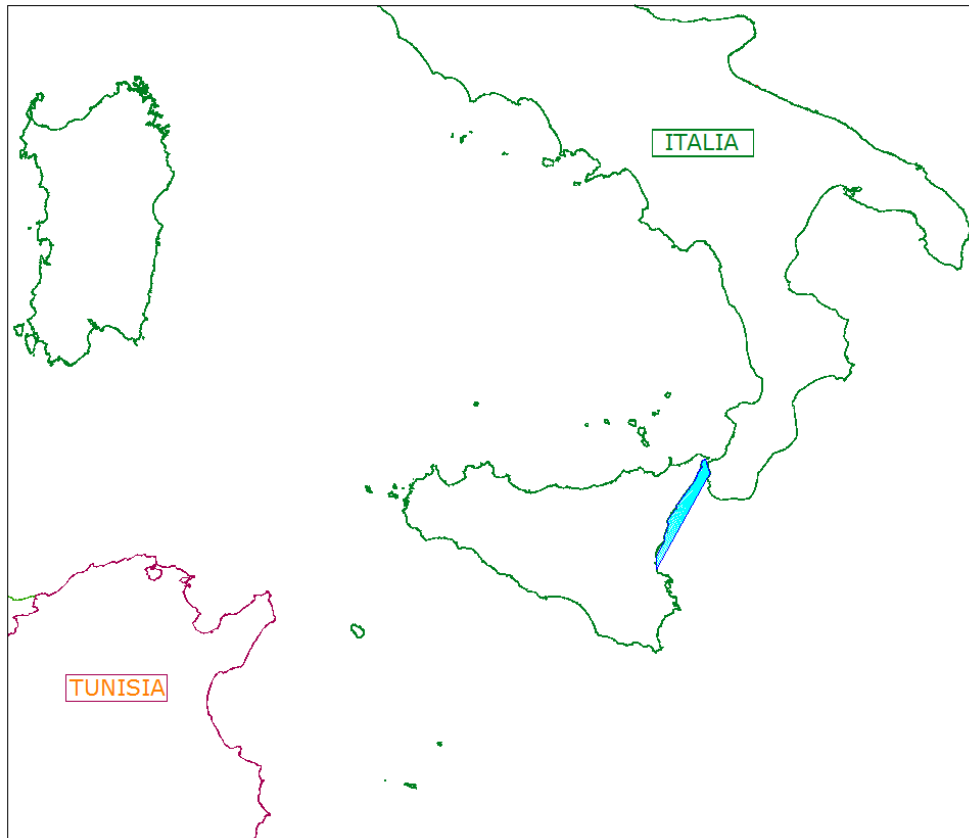


Figura 1.8– Fetches geografici al largo di Reggio Calabria Porto su base cartografica.



Figura 1.9– Fetches efficaci al largo di Reggio Calabria Porto su base cartografica.

1.2.2 La correlazione tra la direzione del vento e quella dello stato di mare generato

Per il calcolo della relazione esistente tra la direzione del vento e quella del moto ondoso generato, si può fare riferimento al criterio introdotto da *Donelan* (v. *Smith*, 1991) operando nell'ipotesi che:

- La direzione media del moto ondoso corrisponde alla direzione della componente spettrale associata al periodo di picco;
- Il moto ondoso generato dal vento è ben definito e rappresentabile tramite le relazioni introdotte dalla campagna oceanografica JONSWAP (JOint North Sea Wave Project, *Hasselmann* 1976).

In base a tale criterio, la direzione media del moto ondoso β generato da un vento caratterizzato da una direzione media ϕ_w è pari al valore dell'angolo cui corrisponde il massimo valore della funzione

$$f(\phi_w) = F_{e,\phi_w}^{0.28} \cdot (\cos\phi_w)^{0.44} \quad (1.2)$$

quindi per $f'(\phi_w) = 0$ e $f''(\phi_w) < 0$.

dove F_{e,ϕ_w} è la lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione ϕ_w del vento (si veda figura 48).

La correlazione tra la direzione del vento e quella dello stato di mare generato è un parametro generalmente utilizzato nelle seguenti analisi:

- 1) la correlazione tra i settori di traversia del vento e quelli del moto ondoso;
- 2) l'applicazione di modelli numerici di circolazione idrica;
- 3) la ricostruzione indiretta del moto ondoso sulla base di misure anemometriche;
- 4) la trasposizione geografica di misure ondometriche.

La legge di deviazione direzionale tra la direzione media del vento (spirante lungo il fetch efficace) e la direzione del moto ondoso è stata determinata per il sito in esame utilizzando l'equazione 1.2. La legge di deviazione della direzione vento-mare ricavata è riportata nelle Figure 1.10 – 1.11 e nella Tabella 1.2.

All'interno del settore di traversia geografica sotteso dal paraggio in esame, i maggiori valori della deviazione vento-mare si verificano per gli stati di mare generati dai venti che soffiano da Ponente; in queste condizioni anemometriche, i mari possono provenire da Libeccio-Ponente o Ponente-Maestro. Due sono le direzioni per cui risulta una deviazione vento mare nulla, cioè Libeccio e Maestro.

1.2.3 Caratteristiche della costa

Il tratto di costa su cui insiste il sito di progetto è situato al limitare settentrionale del piazzale di servizio del porto di Reggio Calabria, nel punto più a sud della rada di Pentimele.

L'orientamento medio del tratto di costa si ottiene tracciando dal punto posto in posizione baricentrica la linea che rettificando l'andamento della riva da insenature e protuberanze costiere definisce il cosiddetto "allineamento fondamentale", disposto nel caso in oggetto lungo la direzione nord - sud e presenta un angolo con il Nord di 28° circa. Il paraggio risulta, naturalmente protetto dall'aggetto di Punta Calamizzi e del molo

di sopraflutto del porto Reggio Calabria dall'azione delle onde che si propagano dall'esterno dello stretto dal settore compreso tra Mezzogiorno e Libeccio; viceversa risulta esposto ai mari di generazione locale provenienti dal settore compreso tra Libeccio e Maestrale-Tramontana.

Il tratto di costa oggetto dell'intervento presenta batimetria regolare con andamento che segue quello pressoché rettilineo della linea di riva. Il fondale compreso tra la linea di riva e la profondità di 0.5 m segue una pendenza media del 41.70% circa, corrispondente ad un angolo di circa 20° rispetto all'orizzontale; dalla profondità di -0.5 m fino a 20 m, il fondale assume una pendenza pressoché costante e pari al 54% circa, corrispondente ad un angolo rispetto all'orizzontale di circa 28.50°; tra quota -20- quota -28 il fondale inizia a diminuire l'elevata pendenza che caratterizza il primo tratto, passando ad un valore pari al 23.25%, cui corrisponde un angolo di discesa pari a circa 14°; successivamente a partire dalla batimetria dei -30 il fondale spiana ulteriormente passando ad una pendenza di circa il 16%, che corrisponde ad un angolo di discesa di circa 10°, che si mantiene pressoché costante fino alla profondità di -200 m. Il fondale è formato per lo più da ciottoli grossolani, frammisti a sabbie e ghiaie. Si tratta di materiale di riporto, essendo un tempo l'area sottoposta ad azioni di sversamento durante la realizzazione dell'autostrada A3.

Tabella 1.2– Deviazione vento-mare al largo di Reggio Calabria Porto

Direzione vento (°N)	Deviazione dir. vento-mare (°)	Direzione moto ondoso (°N)	Direzione vento (°N)	Deviazione dir. vento-mare (°)	Direzione moto ondoso (°N)
0	-27	-27	180	29	209
5	-30	-25	185	26	211
10	-32	-22	190	23	213
15	-35	-20	195	20	215
20	-37	-17	200	16	216
25	-39	-14	205	13	218
30	-42	-12	210	10	220
35	-44	-9	215	7	222
40	-47	-7	220	4	224
45	-49	-4	225	0	225
50	-51	-1	230	-3	227
55	-53	2	235	-6	229
60	-54	6	240	-9	231
65	-56	9	245	-12	233
70	-58	12	250	-15	235
75	-59	16	255	-18	237
80	-60	20	260	-21	239
85	-61	24	265	-24	241
90	72	162	270	29	299
95	70	165	275	26	301
100	69	169	280	23	303
105	67	172	285	20	305
110	65	175	290	16	306
115	63	178	295	13	308
120	61	181	300	10	310
125	59	184	305	7	312
130	57	187	310	4	314
135	54	189	315	0	315
140	52	192	320	-3	317
145	49	194	325	-6	319
150	47	197	330	-9	321
155	44	199	335	-12	323
160	41	201	340	-15	325
165	38	203	345	-18	327
170	35	205	350	-21	329
175	32	207	355	-24	331

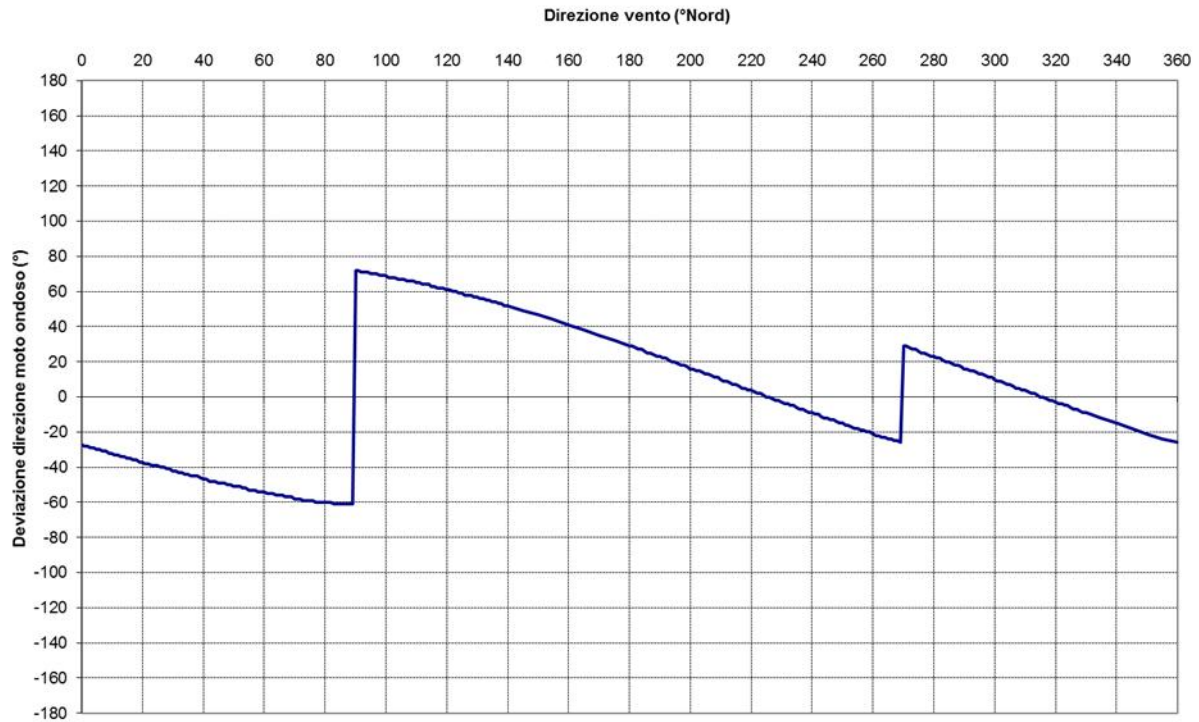


Figura 1.10– Deviazione della direzione del moto ondoso rispetto alla direzione del vento al largo di Reggio Calabria Porto

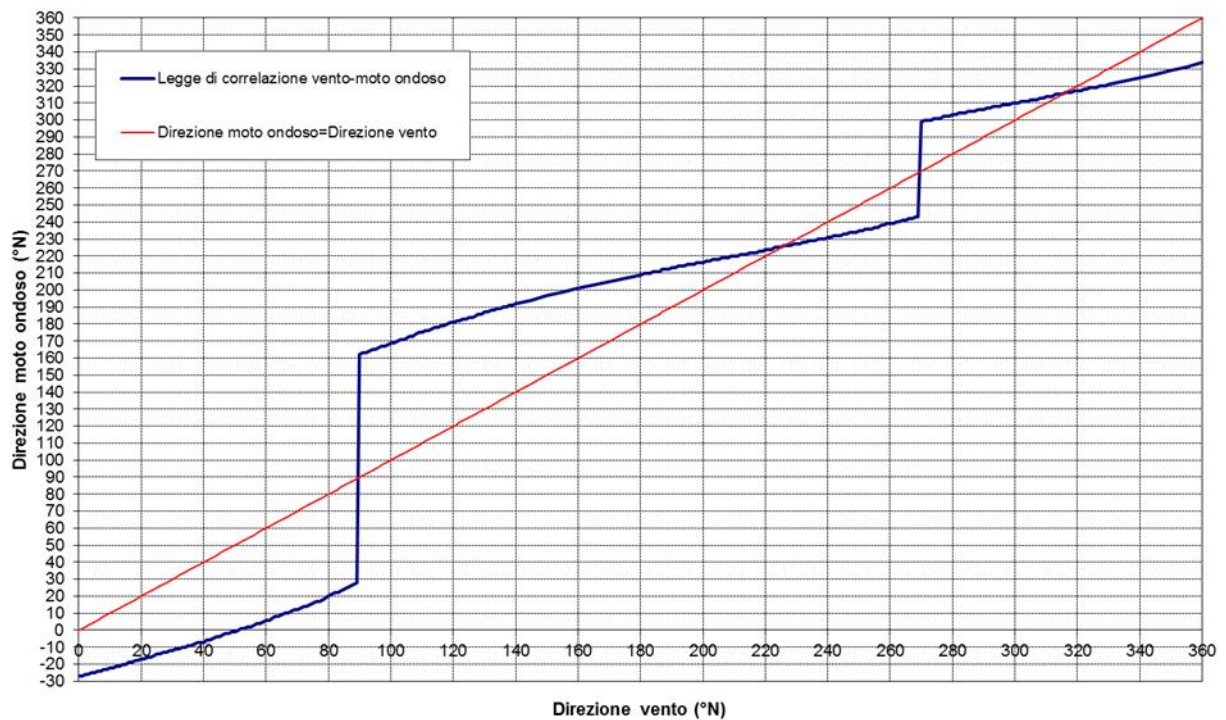


Figura 1.11–Legge di correlazione della direzione del moto ondoso rispetto alla direzione del vento al largo di Reggio Calabria Porto.

2.

CLIMA ANEMOLOGICO

2.1 Premessa

Il regime anemometrico lungo un paraggio costiero rappresenta un parametro importante per la progettazione di opere marittime. Inoltre, può risultare importante per la ricostruzione, attraverso modelli matematici, del moto ondoso, come nel caso in studio.

Il clima anemometrico di una data località è sensibilmente influenzato dalle caratteristiche orografiche e dalle discontinuità termiche tra suolo e mare. Ciò risulta confermato dalla circostanza che osservazioni anemometriche relative a stazioni meteorologiche vicine, in alcuni casi possono dar luogo ad indicazioni apparentemente contrastanti. I risultati delle analisi di seguito esposte assumono quindi valore sicuramente attendibile nell'area locale della stazione di misura, una loro estensione ad aree geografiche più estese comporta necessariamente valutazioni accurate.

Per l'analisi del regime dei venti è possibile fare riferimento, in via preliminare, a quanto contenuto nella pubblicazione "Atlante delle Coste" del CNR-TCI. All'interno di questo studio è riportata la tavola tematica (rappresentata in figura 60) delle "rose dei venti" relative alle stazioni gestite dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare (CNMCA).

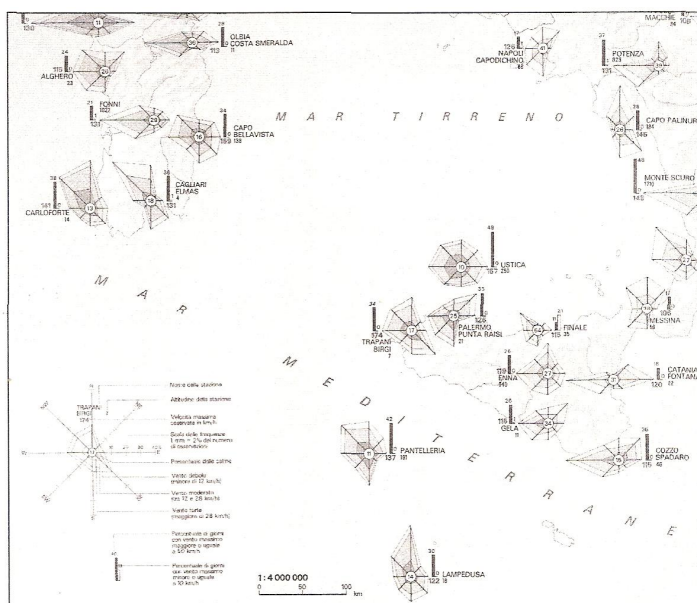


Figura 2.1- Regime dei venti dei venti nel Mar Mediterraneo Centro-Meridionale.

[Fonte "Atlante delle Spiagge"- CNR TCI.]

Dall'analisi della figura 2.1, si evince che all'interno dello stretto di Messina esiste solo una stazione di misura gestita dall'Aeronautica Militare, collocata proprio nella città di Messina. Come è mostrato dal grafico di frequenza della distribuzione direzionale del vento rilevato presso la stazione sinottica dell'A.M. di Messina si evince che sulla sponda siciliana settentrionale dello stretto di Messina i venti dominanti sono principalmente quelli provenienti da tramontana e maestro, seguiti in ordine di apparizione da quelli di Libeccio (sud-ovest). Sono inoltre molto frequenti i venti provenienti da Grecale, mentre risultano assenti le correnti provenienti da levante e scirocco, poiché l'orografia dell'antistante territorio calabrese, con il suo Massiccio dell'Aspromonte, offre uno schermatura alla propagazione dei venti provenienti dalle direzioni del II° Quadrante. Il paraggio della costa settentrionale di Messina risulta esposto anche ai venti provenienti dalla direzione di Mezzogiorno che si manifestano con discreta frequenza.

2.2 Indagine sui dati di vento disponibili

I dati di vento utili per individuare il regime anemometrico all'interno dell'area dello stretto di Messina sono quelli forniti dai punti di misura elencati in Tabella 2.1; per ciascuna stazione di misura è riportato l'ente gestore, la quota sul livello del mare, e lo stato di attività. Nell'area all'interno dello Stretto sono (o erano) localizzate in passato stazioni di misure anemometriche sia sulla costa siciliana che sulla costa calabrese. Al fine di completare il quadro conoscitivo sul regime anemologico dello stretto di Messina, la ricerca di dati anemometrici è stata estesa anche alle aree a sud e a Nord, al fine di valutare come il flusso delle correnti aeree provenienti dall'esterno si modifica per effetto dell'orografia che delimita il canale dello Stretto. A tale scopo sono state reperiti i dati caratteristici del clima di vento elaborato dal modello atmosferico gestito dall'UKMO in un punto situato poco a sud dell'imboccatura meridionale dello Stretto di Messina, e sono state acquisite le serie storiche di misure anemometriche fornite in output dal modello atmosferico gestito dall'ECMWF in altri due punti situati rispettivamente poco a nord e a sud delle due imboccature del canale dello Stretto. Le serie storiche messe a disposizione dall'ECMWF nei due punti individuati sono state elaborate al fine di descrivere il clima anemologico al limitare settentrionale e meridionale dello stretto di Messina. In figura 2.2 è riportata l'ubicazione di ciascun punto di misura e stazione anemometrica che insiste nell'area dello stretto di Messina o in sua prossimità.

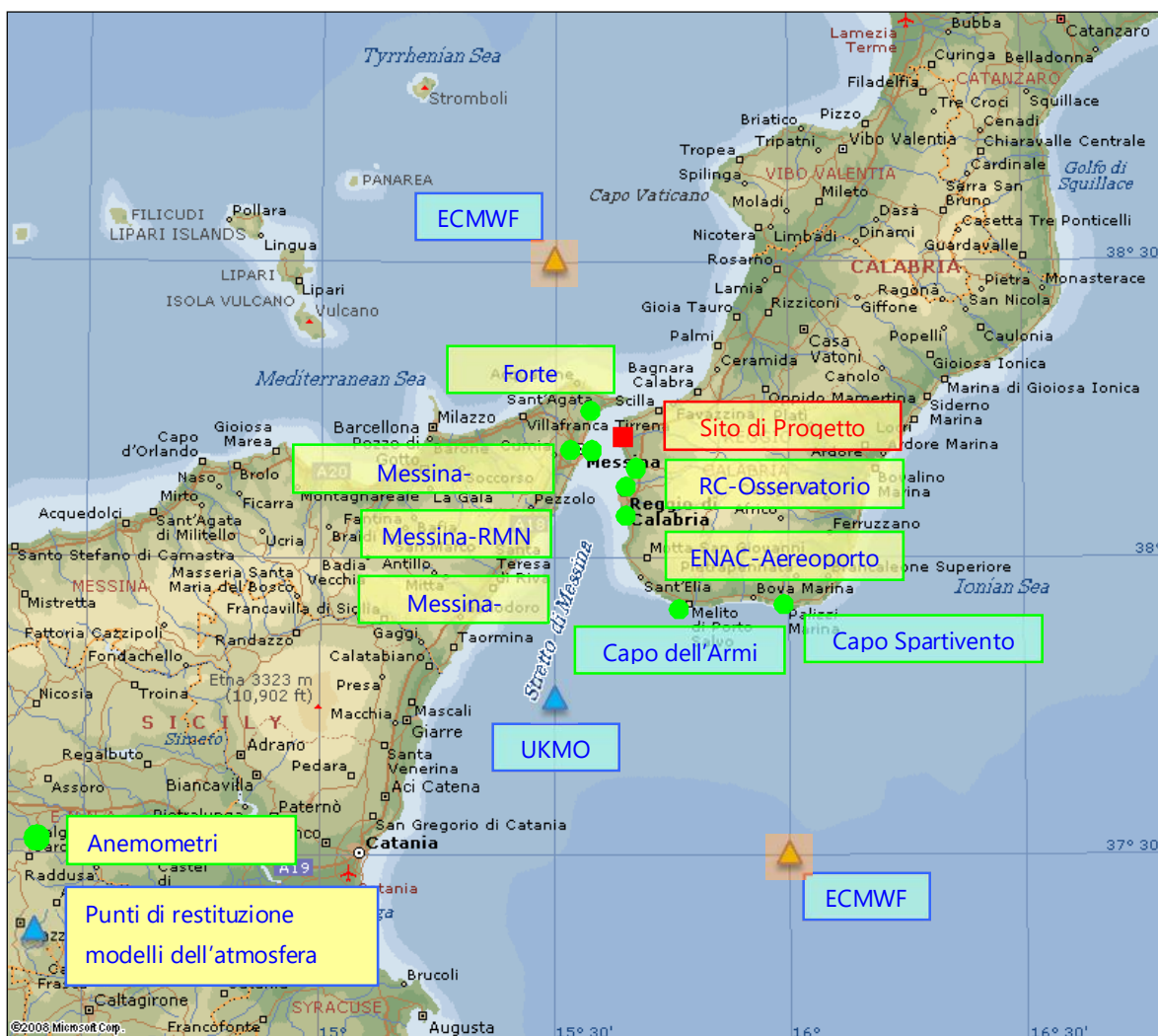


Figura 2.2 - Ubicazione delle stazioni di misura e dei punti di restituzione di dati anemometrici da modelli dell'atmosfera.

Come è evidenziato in tabella 2.3, alcune stazioni di rilevamento non sono più in attività, rimanendo comunque disponibili ed utilizzabili i dati registrati durante il loro funzionamento. Per le stazioni non più in attività i dati sono stati reperiti in riviste o pubblicazioni di settore.

I dati raccolti da ciascun punto di rilevamento, devono essere opportunamente sottoposti ad un controllo, per tenere conto dell'influenza di effetti locali sulle misure anemometriche (caratteristiche orografiche della località in cui è situata la stazione, collocazione della postazione su un versante di un'isola piuttosto che su un altro, presenza di ostacoli, incremento di velocità determinati dall'altimetria dei luoghi etc.). Ogni stazione sinottica interpreta bene il regime anemometrico relativo al settore aperto verso il quale "guarda" con visuale libera; per poter definire il regime anemometrico sulla zona oggetto di studio risulta necessario estrapolare esclusivamente quelli inerenti il settore d'interesse, durante l'analisi dei dati forniti da ciascuna stazione.

Nell'analisi dei dati forniti dalle diverse stazioni che interessano l'area dello Stretto oggetto del presente studio, è necessario considerare i fattori di disomogeneità tra le misure registrate da ciascuna stazione, derivanti dalle seguenti circostanze:

- a. gli orari di osservazione delle stazioni dell'Aeronautica Militare sono diversi rispetto a quelli dei posti semaforici della Marina Militare;
- b. gli elaborati statistici delle varie stazioni meteo e dei Posti semaforici della Marina si riferiscono a periodi di osservazioni non coincidenti;
- c. la quota sul livello del mare influenza la velocità del vento; le stazioni di registrazione sono collocate a quote differenti e quindi registrano stessi eventi con velocità diverse.

Di seguito sono descritte le caratteristiche per ciascuna delle stazioni di misura d'interesse, riportate in tabella 2.3, con un'attenta rassegna e valutazione tecnica dei dati anemometrici rilevati da ogni punto di osservazione.

Tabella 2.1 – Elenco delle stazioni di misura e dei punti di restituzione di dati anemometrici da modelli dell'atmosfera.

STAZIONE DI MISURA	ENTE GESTORE	POSIZIONE GEOGRAFICA	QUOTA m s.l.m.m.	STATO DI ATTIVITÀ
MESSINA FORTE SPURIA	Istituto Idrografico della Marina Militare	38°16'05"N 15°37'18"E	101	Soppressa
MESSINA OSSERVATORIO	Aeronautica Militare	38°12'02"N 15°33'12"E	59	In attività
MESSINA PORTO	Istituto Idrografico della Marina Militare	38°11'46"N 15°33'47"E	6	Soppressa
MESSINA BASE MILITARE MARINA	RMN-EX SIMN	38°11'49"N 15°34'05"E	10	In attività
REGGIO CALABRIA PORTO	RMN-EX SIMN	38°11'49"N 15°34'05"E	10	In attività
REGGIO CALABRIA AEREOPORTO	ENAV	38°04'25"N 15°39'07"E	11	In attività
REGGIO CALABRIA OSSERVATORIO	Marina Militare	-	15	Soppressa
CAPO DELL'ARMI	Istituto Idrografico della Marina Militare	37°57'19"N 15°40'49"E	126	Soppressa
CAPO SPARTIVENTO	Istituto Idrografico della Marina Militare	37°55'37"N 16°03'22"E	118	Soppressa
WAM-ERA INTERIM	ECMWF	37°30'00"N 16°00'00"E 38°30'00"N 15°30'00"E	10	In attività
EWM (European Wave Model)	UKMO	37°45'00"N 15°30'00"E	10	In attività

2.2.1.1 *Analisi della serie di misure anemometriche della Stazione di Messina - Forte Spuria (Posto semaforico della Marina Militare)*

Il posto Semaforico della Marina Militare di Forte Spuria era situato al limite della Catena dei Monti Peloritani su una collina che si affaccia su Capo Peloro ad una quota di 101 m.s.l.m.m e risultava aperto a tutte le direzioni di vento.

I dati raccolti da questa stazione sono relativi al periodo 1900-1905 (di cui esiste un resoconto in una pubblicazione *Eredia*) ed al periodo di registrazione che comprende gli anni 1930-1942 e 1947-1960, per complessivi 27 anni di osservazioni, la cui serie è stata messa a disposizione dall'Istituto Idrografico della Marina Militare. I diagrammi polari delle frequenze percentuali del vento nelle otto direzioni principali resi disponibili dalle due citate pubblicazioni (*Eredia* e *IIMM*), sono riportati in figura 2.3.

Dall'analisi delle due serie storiche appare evidente che le correnti provenienti da sud-ovest rilevate con maggiore frequenza nel periodo 1900-1905, sono sostituite dai venti provenienti da sud nelle registrazioni dell'*IIMM*. Con ogni probabilità ciò è stato determinato da una diversa collocazione dello strumento di misura.

Qualitativamente la stazione di Messina-Forte Spuria mette in evidenza le peculiari caratteristiche della circolazione delle correnti d'aria nell'area dello Stretto di Messina. Infatti i venti che al largo dello Jonio hanno una direzione di provenienza Sud-Est, sono deviati dalla particolare configurazione orografica dello Stretto: la catena dei Monti Peloritani sulla costa siciliana, orientata da sud-ovest verso nord-est, convoglia le correnti sciroccali imponendo una direzione di marcia da sud-ovest che piega all'interno dell'area dello stretto verso sud. Allo stesso tempo il massiccio montuoso dell'Aspromonte opera una deviazione verso sud delle correnti provenienti da sud-est e scherma la costa orientale siciliana dalle correnti di Levante. La conformazione dello stretto simile ad un imbuto o meglio ad un tubo Venturi determina infine un'accelerazione delle correnti che lo attraversano nella direttrice da sud verso Nord, determinando un forte incremento delle velocità dei venti.

Le registrazioni della stazione evidenziano che in inverno vi è un'assoluta prevalenza dei venti con componente meridionale, seguiti dai venti a componente settentrionale (nord e nord-ovest) ed occidentale e quasi totale assenza di venti dal I° e II° Settore, in accordo con quanto evidenziato dal punto di vista qualitativo in precedenza. Il carattere del clima dei venti in inverno è mantenuto pressoché invariato anche in primavera con un'ancora maggior scarsità di venti dal quadrante orientale. In estate si verifica invece una netta prevalenza dei venti deboli da nord e da nord-ovest, seguiti dai venti deboli da nord-est mentre si riduce la frequenza dei venti da sud che comunque continuano a presentarsi con intensità più elevate rispetto alle correnti provenienti da altre direzioni. In autunno si assiste infine ad una ripresa della frequenza di apparizione dei venti provenienti da sud che risultano sempre prevalenti seguiti dai venti con componente settentrionale ed occidentale.

Riguardo l'intensità dei venti registrati presso la stazione di Forte Spuria si può affermare che annualmente sono stati osservati nell'area dello Stretto di Messina venti di intensità compresa tra 80 ed i 100 km/h sempre provenienti da sud (in un periodo di osservazione di 12 anni 1947-1958); anche i venti da nord-ovest hanno raggiunto nello stesso periodo i 90 km/h. Da questi dati si può affermare che presso l'area di Capo Peloro si possono verificare nell'arco di un anno tipo, almeno 50 giorni di vento con velocità che abbia raggiunto o superato i 50 km/h, di cui almeno 12 con velocità superiori ai 70 km/h, tra cui 5 giorni in inverno, 5 in primavera, 0.5 in estate e 1.5 in autunno. I venti più forti e più frequenti sono in ordine di apparizione quelli provenienti dalle direzioni sud, sud-ovest e nord-ovest; i mesi maggiormente battuti dai venti più intensi sono Febbraio, Marzo ed Aprile.

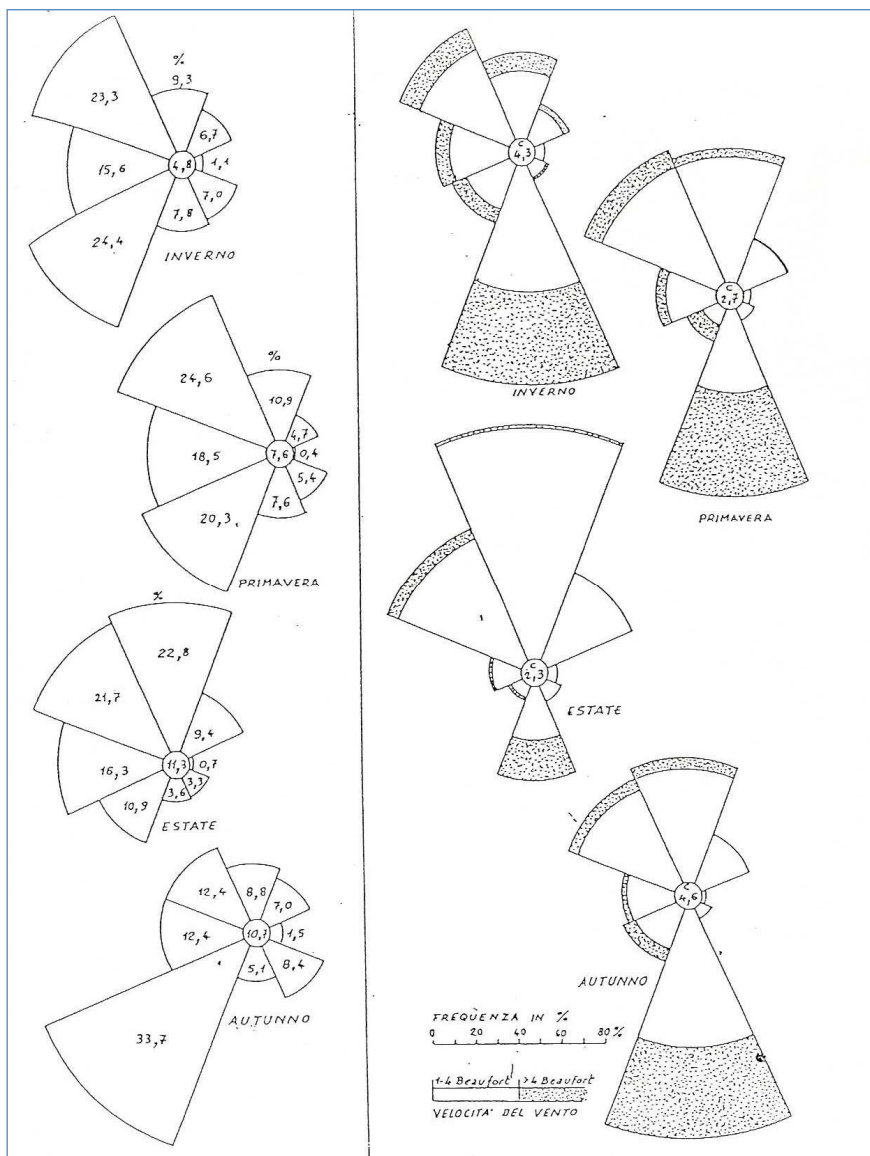


Figura 2.3- Diagrammi polari stagionali della frequenza del vento. Posto Semaforico Forte Spuria (Dati anemometrici 1900-1905 a sinistra e 1930-1942 1947-1960 a destra).

2.2.1.2 Analisi della serie di misure anemometriche della Stazione sinottica di Messina-Osservatorio (Aeronautica Militare).

La stazione meteorologica di Messina Osservatorio tuttora operativa è situata nei locali dell'ex Osservatorio Meteorologico ad una quota di 59 m.s.l.m.m.

Questo punto di rilevazione, ancora in funzione, fornisce delle registrazioni di dati anemometrici con cadenza trioraria. Nella presente relazione sono stati presi in considerazioni i risultati dell'elaborazione della serie storica dei dati registrati nel periodo intercorrente fra il Gennaio 1951 ed il Dicembre 1977 e della serie sinottica completa delle misure effettuate nel periodo compreso tra il 1951 ed il 1991.

Dall'analisi della serie storica è possibile ricavare la distribuzione delle frequenze annuali di accadimento degli stati di vento, suddivise per classi di velocità e settori di provenienza direzionale, i cui valori sono rappresentati nei diagrammi polari di Fig. 2.4.

I dati della serie storica rilevati presso questa stazione evidenziano che l'Aspromonte Calabro offre azione schermante dalle correnti di Levante e che le correnti sciroccali, che sfilano da sud-est al largo sullo Ionio, all'esterno dell'area dello Stretto, vengono deviate dall'orografia della costa siciliana verso sud-ovest, scorrendo parallelamente alla dorsale dei Monti Peloritani: questa catena ostacola il movimento delle correnti d'aria che spirano da occidente, che si presentano da nord-ovest e da nord-nord-ovest sulla città di Messina.

In estate si nota una netta prevalenza dei venti deboli o moderati di Grecale, con una notevole riduzione della frequenza d'apparizione dei venti di sud-ovest, che come già detto derivano dalla deviazione delle correnti sciroccali nell'area dello Stretto.

Molto inferiori, per frequenza ma soprattutto per intensità rispetto a quanto si è rilevato per la stazione di Forte Spuria, sono le correnti provenienti ovest e da nord-ovest, che man mano che si procede da Capo Peloro verso sud risultano sempre più attenuate, a causa dell'effetto schermante dei Peloritani.

I venti che provengono da sud e sud-ovest si presentano come i più violenti rispetto a quelli provenienti da altri settori specie in primavera.

In questa stazione la percentuale di venti deboli o calme è molto elevata: ciò probabilmente è dovuta all'ostacolo posto da edifici limitrofi alla postazione di misura.

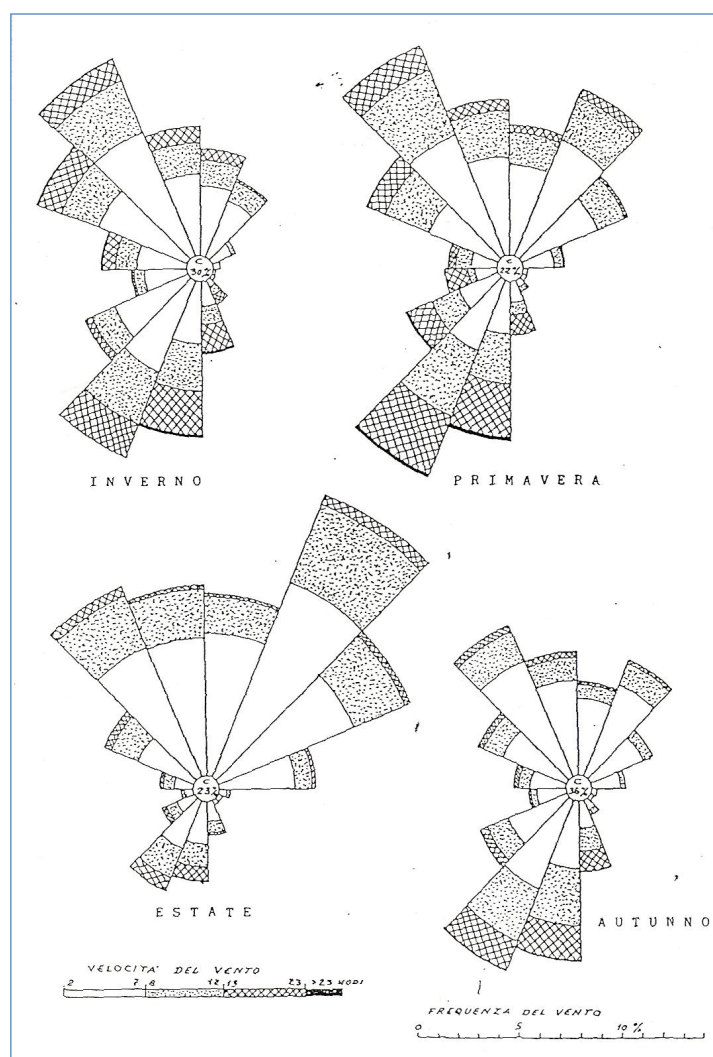


Figura 2.4- Diagrammi polari stagionali della frequenza del vento. Stazione sinottica dell'A.M. di Messina Osservatorio (Dati anemometrici 1951-1977).

La serie sinottica completa delle registrazioni anemometriche è disponibile per il periodo compreso tra il 1951 ed il 1991 (circa 40 anni).

L'elaborazione statistica delle registrazioni triorarie è stata condotta attraverso la suddivisione dei dati per classi di intensità e di direzione di provenienza: i risultati di questa elaborazione sono riportati in Fig. 2.5 e nella Tabella 2.2.

Tabella 2.2 – Stazione A.M. di Messina Osservatorio. (Quota strumento +59 m s.l.m.m) Distribuzione direzionale di frequenza annuale per classi di intensità del vento (Media sul periodo 1951-1991) - Numero totale eventi 108428.

Settori		Classi di velocità (nodi)						Totali
N.	Dir (°N)	0-1	2-4	5-7	8-12	13-23	>24	
1	0-22.5		29.19	20.60	11.10	2.25	0.35	63.49
2	22.5-45.0		37.06	30.21	15.99	2.37	0.08	85.71
3	45.0-67.5		23.68	22.96	12.21	1.06	0.01	59.92
4	67.5-90.0		8.70	8.52	3.24	0.12	0.02	20.60
5	90.0-112.5		2.09	0.64	0.24	0.02	0.02	3.01
6	112.5-135.0		1.42	0.42	0.08	0.11	0.00	2.03
7	135.0-157.5		2.20	1.19	0.82	1.24	0.20	5.65
8	157.5-180.0		4.58	4.09	5.24	5.68	0.44	20.03
9	180.0-202.5		10.46	13.47	19.43	14.41	0.81	58.58
10	202.5-225.0		19.73	26.03	28.33	16.20	0.47	90.76
11	225.0-247.5		12.86	12.19	10.02	5.14	0.18	40.39
12	247.5-270.0		7.91	4.39	2.66	0.83	0.04	15.83
13	270.0-292.5		7.97	6.84	6.31	2.85	0.13	24.10
14	292.5-315.0		16.73	18.75	16.67	6.44	0.29	58.88
15	315.0-337.5		33.10	31.98	21.97	6.22	0.14	93.41
16	337.5-360.0		28.89	23.83	14.98	3.56	0.06	71.32
Indefiniti			0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03
Calme 0-0.5 m/s		286.26						286.26
Totali		286.26	246.57	226.12	169.29	68.51	3.25	1000.00

Confrontando i grafici che rappresentano le distribuzioni percentuali annuali degli eventi anemometrici relativi alle due serie disponibili, non si rileva alcuna differenza sostanziale di distribuzione direzionale dei venti registrati presso questa stazione di misura.

In conclusione, il regime anemologico tipico osservato presso la stazione di misura di Messina Osservatorio è caratterizzato da venti più frequenti provenienti dalla direzione di Maestrale e Tramontana (nord-ovest) seguiti dai venti di Libeccio (sud-ovest e sud): la percentuale di apparizione cumulata dei venti provenienti dal IV° Quadrante è pari a circa il 25% seguiti dalla frequenza di apparizione dei venti provenienti dal III° Quadrante che si verificano per il 23% del periodo annuale. La direzione da cui spirano i venti più frequenti è quella di Libeccio (sud-ovest) con circa il 10% di frequenza di apparizione. Il settore di traversia secondario da cui spirano i venti registrati a Messina Osservatorio è quello compreso tra nord e nord-est (tra 0 e 70°N) con frequenza cumulata pari al 23% del totale delle registrazioni. I venti dominanti registrati a Messina Osservatorio, caratterizzati da intensità molto elevate, con velocità superiori ai 24 nodi, provengono dalla direzione di Mezzogiorno e Libeccio (compreso tra i 180° ed i 200°N) e con minore frequenza di apparizione da nord e nord-ovest. In definitiva è evidente la percentuale trascurabile da sud-est, poiché lo Scirocco all'interno dello Stretto ruota e risulta proveniente da sud-ovest sommandosi come frequenza di apparizioni ai venti realmente provenienti da Libeccio. Infine la presenza dei venti provenienti da est e ovest risulta molto scarsa, essendo pari al 3 e al 4% rispettivamente, per effetto schermante dei sistemi montuosi a levante (massiccio dell'Aspromonte) e a ponente dello Stretto (catena dei Monti Peloritani).

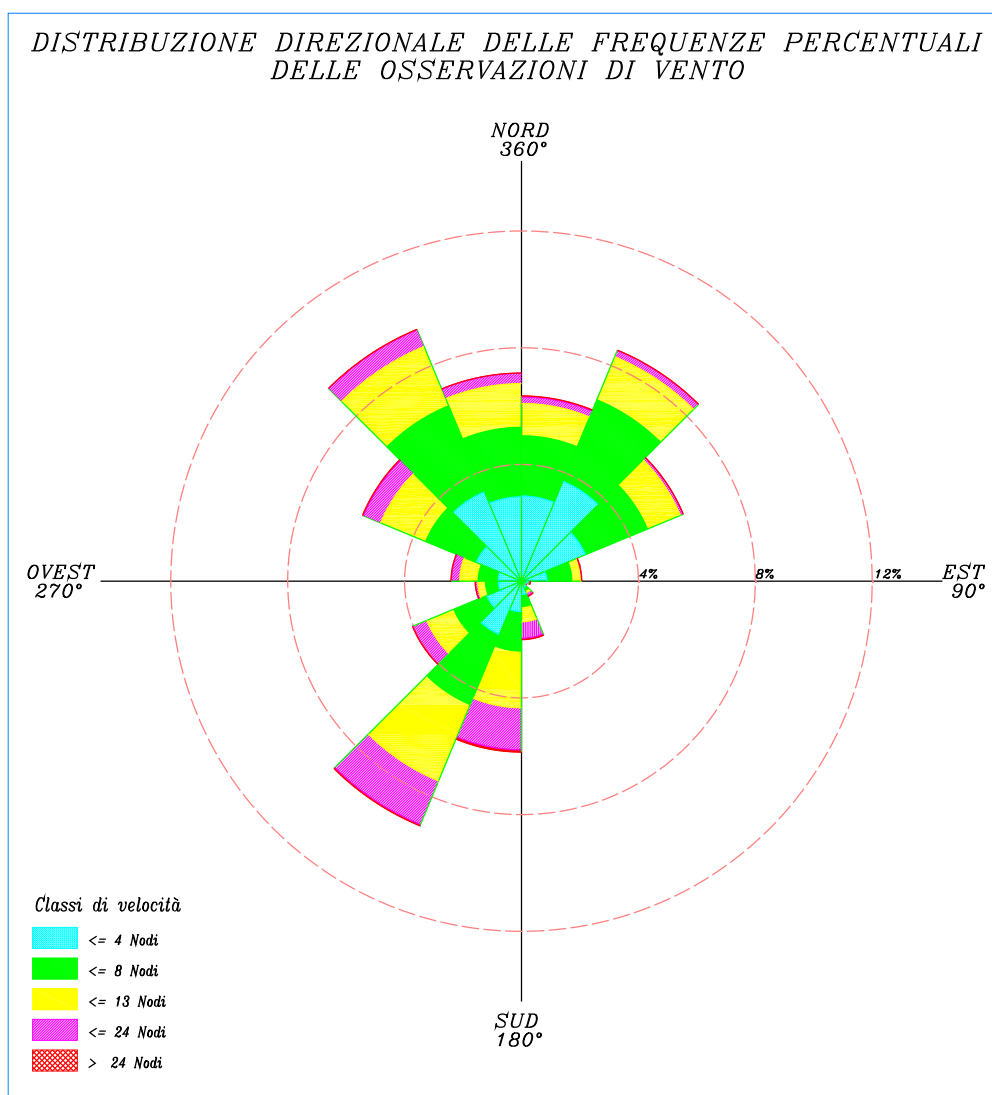


Figura 2.5- Distribuzione percentuale polare delle misure di vento presso la stazione di Messina Osservatorio (Serie sinottica del periodo di osservazione 1951-1991).

2.2.1.3 Analisi della serie di misure anemometriche della Stazione Meteorologica dell'IIMM di Messina-Porto (Marina Militare).

I dati registrati dalla stazione di Messina Porto non più in attività, sono stati rilevati da un anemometro posto a quota +6 m s.l.m.m. Ciò consente di trarre da questa serie una prima serie di informazioni sul regime di circolazione dei venti negli strati bassi dell'atmosfera, praticamente a livello del mare.

Le registrazioni, elaborate dall'Istituto Idrografico della Marina Militare, si riferiscono al periodo 1961-1970 pari a 10 anni di osservazioni.

In figura 2.6 sono rappresentati i diagrammi polari stagionali per 16 direzioni di provenienza, riferiti al numero di giorni per stagione, messi a disposizione dall'IIMM.

Da questi diagrammi appare evidente come dalla direzione di sud-ovest siano trascurabili i fenomeni di vento in ogni stagione, contrariamente a quanto rilevato dalle osservazioni di Forte Spuria e Osservatorio dell'A.M. Ciò evidentemente perché i venti di Scirocco e di Libeccio al livello del mare acquistano massima componente da Sud. Si rileva inoltre la quasi totale assenza, in tutte le stagioni, dei venti dal II° Quadrante, in particolare dalle direzioni comprese nel settore 70°-160°.

Dall'analisi dei grafici è facile rilevare l'incremento dei venti a componente nord a scapito dei venti meridionali, quando si passa dall'inverno all'estate; dal mese di ottobre questa tendenza si inverte.

Infine in estate i venti a componenti settentrionali (da nord e nord-est) si presentano come brezze piuttosto tese con velocità superiori ai 10 nodi.

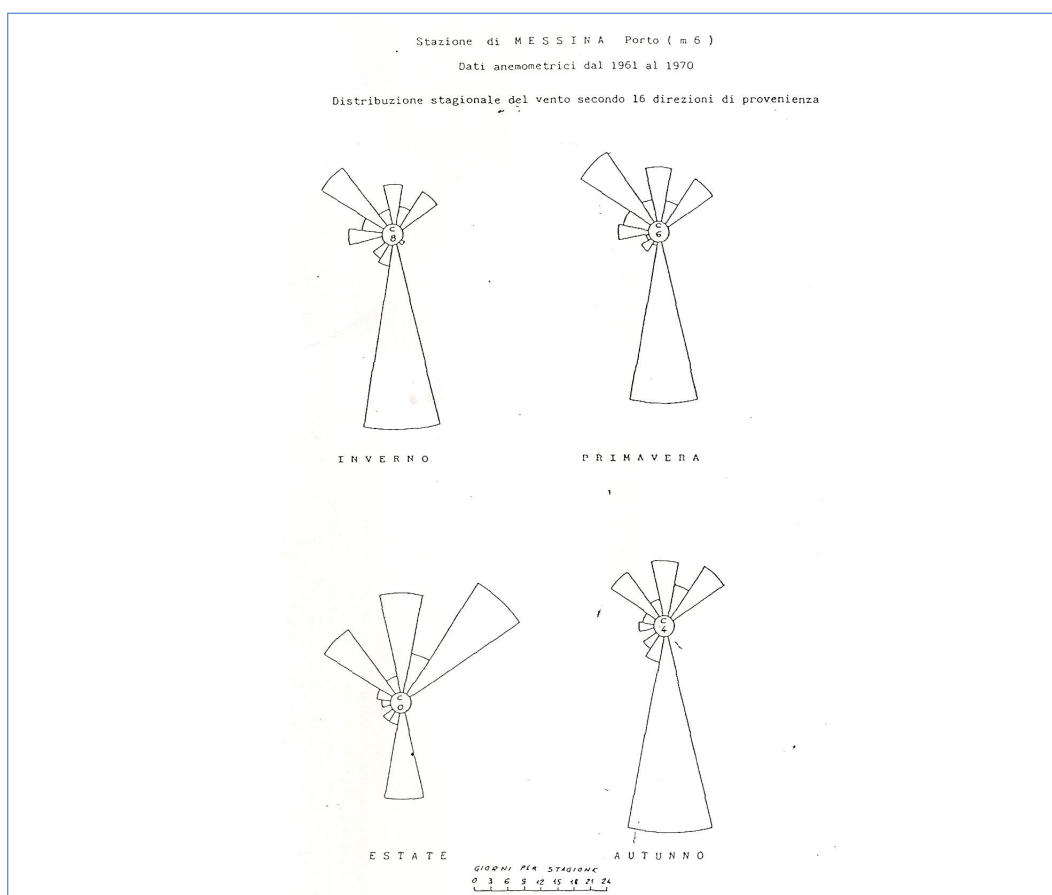


Figura 2.6- Stretto di Messina: Diagrammi polari stagionali della frequenza del vento. Stazione della Marina Militare Messina Porto (Dati anemometrici 1961-1970).

2.2.1.4 Analisi della serie di misure anemometriche della Stazione anemometrica della rete mareografica nazionale RMN ex SIMN di Messina-Porto (ISPRA).

La stazione meteorologica di Messina, facente parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN) gestita dall'ISPRA, è situata all'interno della base del Comando Militare Marittimo Autonomo della Sicilia, in corrispondenza dell'estremità dell'ampio promontorio a forma di falce che costituisce il porto naturale di Messina, nel punto di coordinate geografiche 38° 11' 49.56" N e 15° 34' 05.67" E (Fig. 2.7).



Figura 2.7- Inquadramento geografico della stazione meteo RMN di Messina Porto (Fonte Google Earth).

Questa stazione meteorologica è dotata di un anemometro collocato ad un'altezza di 10 m s.l.m.m. La stazione di misura è localizzata all'interno dello Stretto di Messina sulla sponda siciliana, a poca distanza dal sito in esame, circa 6 km a nord-ovest in linea d'aria; la sua posizione fornisce informazioni più attendibili riguardo l'andamento generale del clima di vento caratteristico a livello mare all'interno dello Stretto di Messina, rispetto a quelle effettuate sulla sponda calabrese, almeno per quanto riguarda le correnti che spirano dal settore di

Sud-Est e di Mezzogiorno, considerato che le stazioni che gravitano nell'area di Reggio Calabria sono parzialmente schermate ai venti provenienti da queste direzioni dal retrostante massiccio dell'Aspromonte.

I dati messi a disposizione dall'ISPRA per questa stazione si riferiscono alle registrazioni effettuate durante il periodo compreso tra il 03.08.1998 ed oggi. Le misurazioni effettuate a partire dalle ore 14.00 del 03.08.1998 fino alle ore 08.00 del 20.04.2011 sono riferite ai valori mediati della velocità (in m/s) e della direzione del vento (in gradi° rispetto al Nord) nell'intervallo temporale di un'ora. A partire dal 20.04.2011 la stazione fornisce registrazioni della velocità (in m/s) e della direzione del vento (in gradi° rispetto al Nord) ad intervalli di tempo di 10 minuti.

La base di dati della stazione di Messina è stata sottoposta ad un'analisi preventiva allo scopo di correggere eventuali anomalie derivanti da misure effettuate in condizioni di malfunzionamento strumentale per carenza di manutenzione, oppure perché fuori dalla scala di rilevazione dello strumento (che per la stazione in esame è compresa tra 0 e 50 m/s), o per perdita di dati dovuta ad arresto strumentale causato da eventi naturali (burrasche, fulmini, urti con corpi estranei) o da interventi di operatori (di manutenzione o sostituzione delle strumentazioni) o per mancata trasmissione delle registrazioni.

Effettuata la correzione della base dati, è stato possibile valutare la consistenza della serie temporale per ogni anno di registrazione, verificando il numero di dati attesi, il numero di registrazioni mancanti, il numero di dati considerati errati e nulli sulla base della metodologia di correzione precedentemente illustrata, il rendimento annuale stabilito come il rapporto tra il numero di dati validi ed il numero di dati attesi, ed infine il numero di calme, considerando tali i valori inferiori a 0.5 m/sec. I risultati di questa analisi sono riportati nella tabella 2.3.

In Figura 2.8 è rappresentato l'istogramma delle percentuali di rendimento annuali della stazione della Rete Mareografica Nazionale di Messina. Da questo grafico si evince che nel primo anno di funzionamento il rendimento dell'anemometro è stato inferiore al 90% (per altro le registrazioni si riferiscono agli ultimi quattro mesi dell'anno), mentre nei restanti anni della serie storica lo strumento ha avuto un rendimento sempre superiore al 90%, con alcuni anni in cui è stata registrata la totalità o quasi degli eventi anemologici (1999,2000,2001,2002, 2006, 2007, 2008). Il rendimento più basso si registra per l'anno 2015, il cui contributo molto scarso sarà quindi trascurato nelle successive elaborazioni statistiche.

Il rendimento complessivo della stazione nel periodo compreso tra il 1998 ed il 2014, espresso come il rapporto tra il numero totale degli eventi registrati depurati dai valori errati o nulli ed il numero di eventi teorici, è pari al 98,31%, per 16 e 1/2 anni di registrazioni.

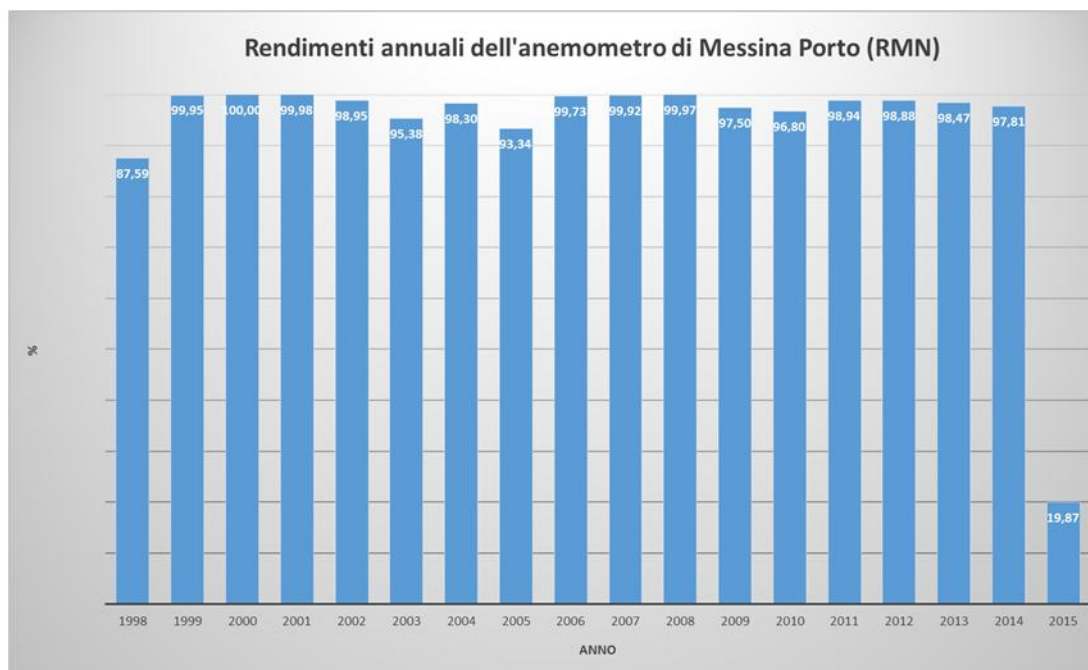


Figura 2.8- Istogramma delle percentuali di rendimento annuale della stazione anemometrica di Messina RMN (periodo di misura 1998-2015).

Tabella 2.3 – Consistenza e rendimento annuale serie temporale di misure anemometriche della stazione di Messina (Rete mareografica Nazionale)

	Numero registrazioni	Numero dati attesi	Numero dati mancanti	Numero dati nulli	Numero dati validi	Rendimento annuale	Calme V<0.5 m/sec
1998	3610	3610	0	448	3162	87.59%	186
1999	8759	8760	1	3	8756	99.95%	235
2000	8784	8784	0	0	8784	100.00%	404
2001	8758	8760	2	0	8758	99.98%	261
2002	8758	8760	2	90	8668	98.95%	915
2003	8356	8760	404	1	8355	95.38%	430
2004	8778	8784	6	143	8635	98.30%	810
2005	8760	8760	0	583	8177	93.34%	354
2006	8760	8760	0	24	8736	99.73%	1137
2007	8758	8760	2	5	8753	99.92%	411
2008	8781	8784	3	0	8781	99.97%	722
2009	8720	8760	40	179	8541	97.50%	512
2010	8721	8760	39	241	8480	96.80%	113
2011*	39216	39345	129	290	38926	98.94%	743
2012**	52382	52704	322	269	52113	98.88%	635
2013**	52404	52560	156	647	51757	98.47%	544
2014**	52559	52560	1	1149	51410	97.81%	567
2015***	30186	30528	341	24121	6065	19.87%	34

* L'anno 2011 ha registrato con frequenza di 10 minuti dal 20 aprile

** Durante gli anni 2012-2013-2014 i dati di vento sono stati registrati con frequenza temporale pari a 10 minuti.

*** Per l'anno 2015 sono state prese in considerazione le registrazioni fino al 31 luglio.

Sulla serie storica delle registrazioni della stazione di misura sono state eseguite delle elaborazioni, aventi lo scopo di studiare il clima anemologico caratteristico del paraggio; tali elaborazioni hanno riguardato le coppie di valori velocità media del vento-direzione media di provenienza del vento al suolo con lo scopo di calcolare le percentuali di apparizione di ciascuna coppia di valori nell'ambito di prefissate classi di appartenenza. Le calme sono state distinte facendo rientrare in tale classe ciascun evento caratterizzato da valori di velocità inferiori a 0,30 m/s.

L'analisi ha riguardato il periodo di misura compreso tra il 1998 ed il 2014 attraverso una suddivisione degli eventi in classi di ampiezza definite secondo la scala *Beaufort* (v. tab. 2.4), per le velocità, e di 22.5°, per le direzioni.

I risultati ottenuti sono stati infine sintetizzati in forma grafica ("rose dei venti"), variando l'ampiezza delle classi della velocità del vento. In particolare, le tredici classi iniziali sono state ridotte a cinque intervalli della scala *Beaufort* corrispondenti ai seguenti valori: 0, 1 ÷ 2, 3 ÷ 4, 5 ÷ 6, 7 ÷ 12, relativi cioè agli eventi di calma, di intensità debole, moderata, forte e fortissima.

Nella figura 2.9, è riportata la "rosa dei venti" annuale riferita all'intero periodo di osservazione. Nella figura 2.10 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza percentuale per classi di velocità del vento misurata in nodi.

Tabella 2.4 – Classi di ampiezza della Scala di Beaufort

Scala Beaufort	Denominazione del vento	Velocità (nodi)	Velocità (km/h)	Velocità (m/s)
0	Calma	<1	>1	≥0,2
1	Venticello	1÷3	1÷5	0,3÷1,5
2	Brezza debole	4÷6	6÷11	1,6÷3,3
3	Brezza moderata	7÷10	12÷19	3,4÷5,4
4	Brezza quasi forte	11÷16	20÷28	5,5÷7,9
5	Brezza tesa	17÷21	29÷38	8÷10,7
6	Brezza forte	22÷27	39÷49	10,8÷13,8
7	Vento quasi forte	28÷33	50÷61	13,9÷17,1
8	Vento teso	34÷40	62÷74	17,2÷20,7
9	Vento forte	41÷47	75÷88	20,8÷24,4
10	Vento violento	48÷55	89÷102	24,5÷28,4
11	Tempesta	56÷63	103÷117	28,5÷32,6
12	Uragano	>64	>118	>32,7

Nella figura 2.11 sono riportate le rose dei venti annuali degli eventi registrati dalla stazione, suddivise rispettivamente secondo le classi di velocità $1 \leq V_v < 7$ nodi (il primo grafico) $7 \leq V_v < 17$ nodi (il secondo grafico), $17 \leq V_v < 28$ nodi (il terzo grafico) e $28 \leq V_v$ (il quarto grafico).

Nelle tabelle 2.5 e 2.6 sono riportate le distribuzioni dei dati di vento e della loro frequenza percentuale, rilevati presso la stazione di Messina (Periodo 3.08.1998-31.12.2014), per classi di direzione e di velocità del vento (secondo la scala di *Beaufort*).

In tabella 2.7 sono riportate le frequenze di apparizione annuale delle calme e dei venti deboli, moderati, forti e fortissimi, secondo la suddivisione in classi di velocità precedentemente indicata.

Dall'analisi dei risultati si deduce che i venti caratterizzati da una maggiore frequenza (venti regnanti) sono quelli provenienti dalla direzione di nord-nordest (Greco-Tramontana), seguiti in ordine di apparizione dai venti compresi all'interno del settore che va da Maestrale (315°N) a Tramontana (0°N); altrettanto molto frequenti, ma con percentuale di apparizione inferiore, rispetto alle correnti provenienti dal settore settentrionale, sono i venti che soffiano dal settore sud, compreso tra i 180° ed i 205°; si tratta in realtà, per gran parte degli eventi registrati, degli stessi venti che, nell'area a sud dello stretto, soffiano da scirocco e che, incanalandosi all'interno dello Stretto, vengono deviati verso mezzogiorno dalla configurazione orografica caratteristica delle sponde, con direzione di più frequente apparizione (pari all'11,01% delle registrazioni totali) coincidente con 180°N.

Per i venti caratterizzati da elevati valori di velocità durante l'anno (i cosiddetti venti dominanti), le direzioni di provenienza principali sono individuabili all'interno del settore Nord-Est di Grecale compreso tra 30°N ÷ 40°N, anche se si evidenzia che la frequenza di apparizione di venti forti dalla direzione di sud-sudovest è certamente non trascurabile. Infine, dall'analisi dei risultati si deduce che i venti fortissimi sono stati registrati con maggiore frequenza dalla stessa direzione di 200°N ma anche, seppur con minore frequenza, dalla direzione di Tramontana.

Tabella 2.5 – Distribuzione di frequenza annuale dei dati di vento rilevati presso la stazione di Messina, per classi di direzione e di velocità del vento secondo la scala di Beaufort (Periodo 03.08.1998-31.12.2014).

		CLASSI DI VELOCITA'															
		Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
		V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64		
		V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118		
		V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6		
DIR °N	Classi Direzione														TOT.		
0	348,75 11,25	552	1003	3758	6410	4347	1285	320	70	1							17746
22,5	11,25 33,75	148	848	2821	6273	6846	2700	173	31	5	1						19846
45	33,75 56,25	134	738	1472	2900	5226	3471	80	4	4	2						14031
67,5	56,25 78,75	134	564	492	176	53	8										1427
90	78,75 101,25	154	520	240	20	3	1										938
112,5	101,25 123,75	191	546	200	30	3		2									972
135	123,75 146,25	246	593	275	70	15	18	6	2								1225
157,5	146,25 168,75	262	771	742	379	361	337	208	38	2							3100
180	168,75 191,25	390	1152	2889	4278	4052	2158	584	57	4							15564
202,5	191,25 213,75	367	949	2054	3510	3745	2580	924	142	14	1	1					14287
225	213,75 236,25	361	1099	1808	1083	456	191	39	5								5042
247,5	236,25 258,75	398	934	632	185	38	7	1									2195
270	258,75 281,25	461	1403	654	428	263	96	24	3								3332
292,5	281,25 303,75	635	2491	1518	2019	1427	544	104	20	2							8760
315	303,75 326,25	619	2953	4974	4417	2360	507	49	5								15884
337,5	326,25 348,75	288	1434	4530	5868	3632	917	276	45	2							16992
	CALME	5340															
	TOTALE	5340	17998	29059	38046	32827	14820	2790	422	34	4	1	0	0			141341
	FREQ.	5340	23338	52397	90443	123270	138090	140880	141302	141336	141340	141341	141341	141341			
	CUM.																

Tabella 2.6 – Distribuzione di frequenza percentuale annuale dati di vento rilevati presso la stazione di Messina, per classi di direzione e di velocità del vento secondo la scala di Beaufort (Periodo 03.08.1998-31.12.2014).

		CLASSI DI VELOCITA'																	
		Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
		V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64				
		V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118				
		V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6				
DIR °N	Classi Direzione														TOT.				
0	348,75 11,25	0,391	0,710	2,659	4,535	3,076	0,909	0,226	0,050	0,001						12,56			
22,5	11,25 33,75	0,105	0,600	1,996	4,438	4,844	1,910	0,122	0,022	0,004	0,001						14,04		
45	33,75 56,25	0,095	0,522	1,041	2,052	3,697	2,456	0,057	0,003	0,003	0,001						9,93		
67,5	56,25 78,75	0,095	0,399	0,348	0,125	0,037	0,006									1,01			
90	78,75 101,2	0,109	0,368	0,170	0,014	0,002	0,001									0,66			
112,5	101,2 123,7	0,135	0,386	0,142	0,021	0,002	0,000	0,001									0,69		
135	123,7 146,2	0,174	0,420	0,195	0,050	0,011	0,013	0,004	0,001									0,87	
157,5	146,2 168,7	0,185	0,545	0,525	0,268	0,255	0,238	0,147	0,027	0,001									2,19
180	168,7 191,2	0,276	0,815	2,044	3,027	2,867	1,527	0,413	0,040	0,003									11,01
202,5	191,2 213,7	0,260	0,671	1,453	2,483	2,650	1,825	0,654	0,100	0,010	0,001	0,001						10,11	
225	213,7 236,2	0,255	0,778	1,279	0,766	0,323	0,135	0,028	0,004									3,57	
247,5	236,2 258,7	0,282	0,661	0,447	0,131	0,027	0,005	0,001									1,55		
270	258,7 281,2	0,326	0,993	0,463	0,303	0,186	0,068	0,017	0,002									2,36	
292,5	281,2 303,7	0,449	1,762	1,074	1,428	1,010	0,385	0,074	0,014	0,001						6,20			
315	303,7 326,2	0,438	2,089	3,519	3,125	1,670	0,359	0,035	0,004									11,24	
337,5	326,25 348,75	0,204	1,015	3,205	4,152	2,570	0,649	0,195	0,032	0,001						12,02			
CALME		3,985																	
TOTALE		3,778	12,734	20,559	26,918	23,225	10,485	1,974	0,299	0,024	0,003	0,001						100,0	
FREQ. CUM.		3,778	16,512	37,071	63,989	87,215	97,700	99,674	99,972	99,996	99,999	100,00	100,00	100,00	100,00				

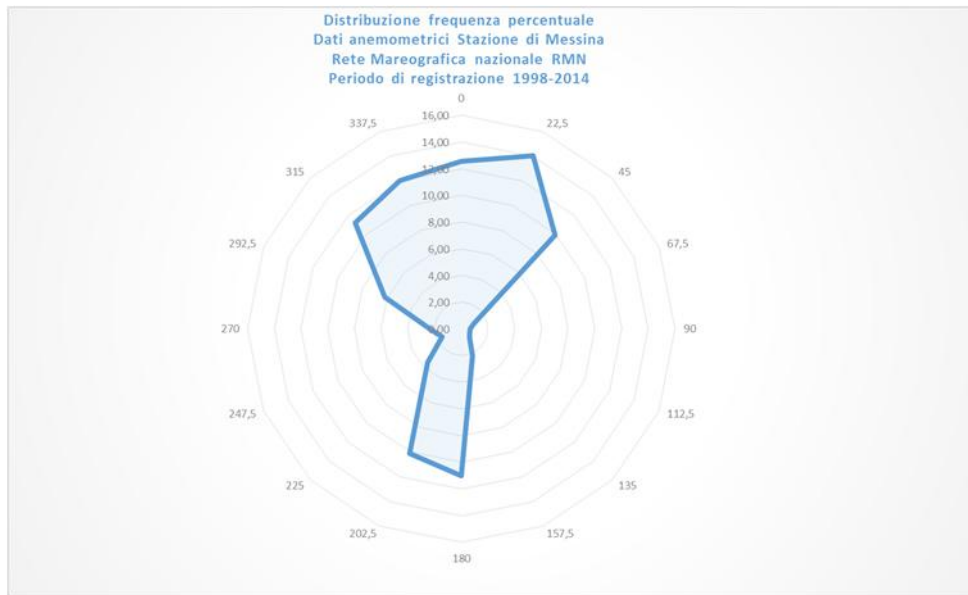


Figura 2.9- Stazione anemometrica di Messina (RMN): diagramma polare della frequenza annuale del vento (Periodo di registrazione 1998-2014).

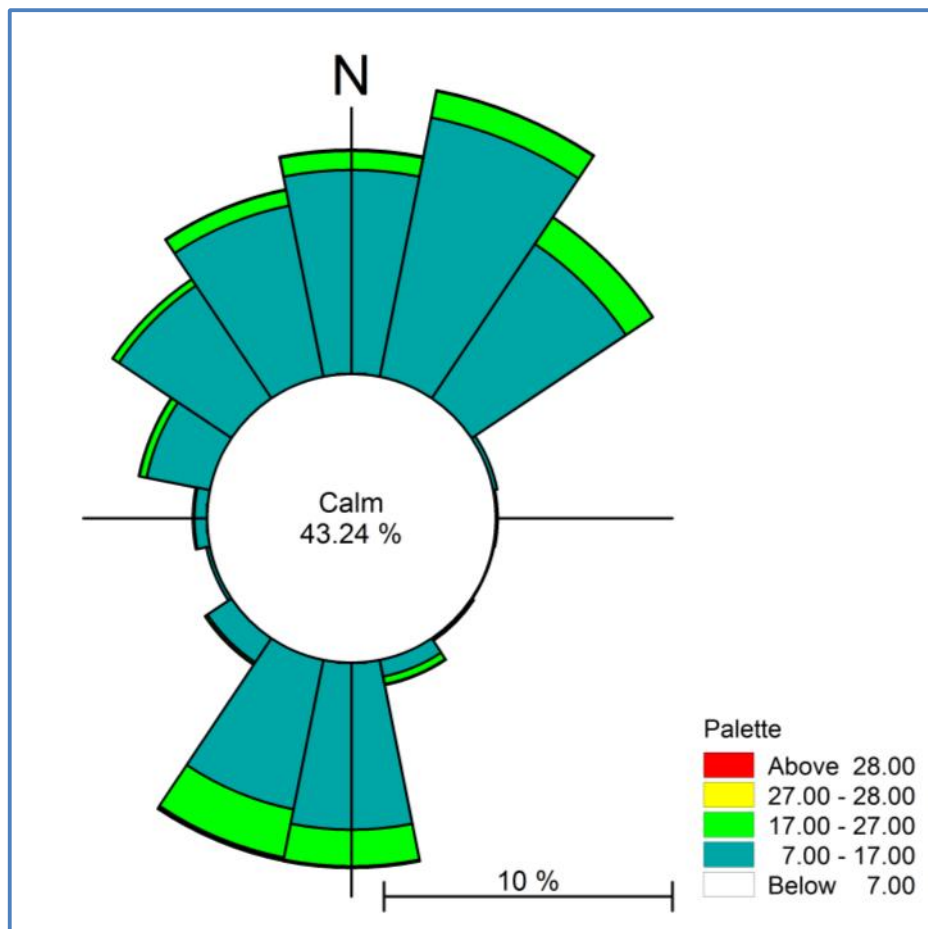


Figura 2.10 - Stazione anemometrica di Messina (RMN): Rosa dei venti misurati in nodi (Periodo di registrazione 1998-2014).

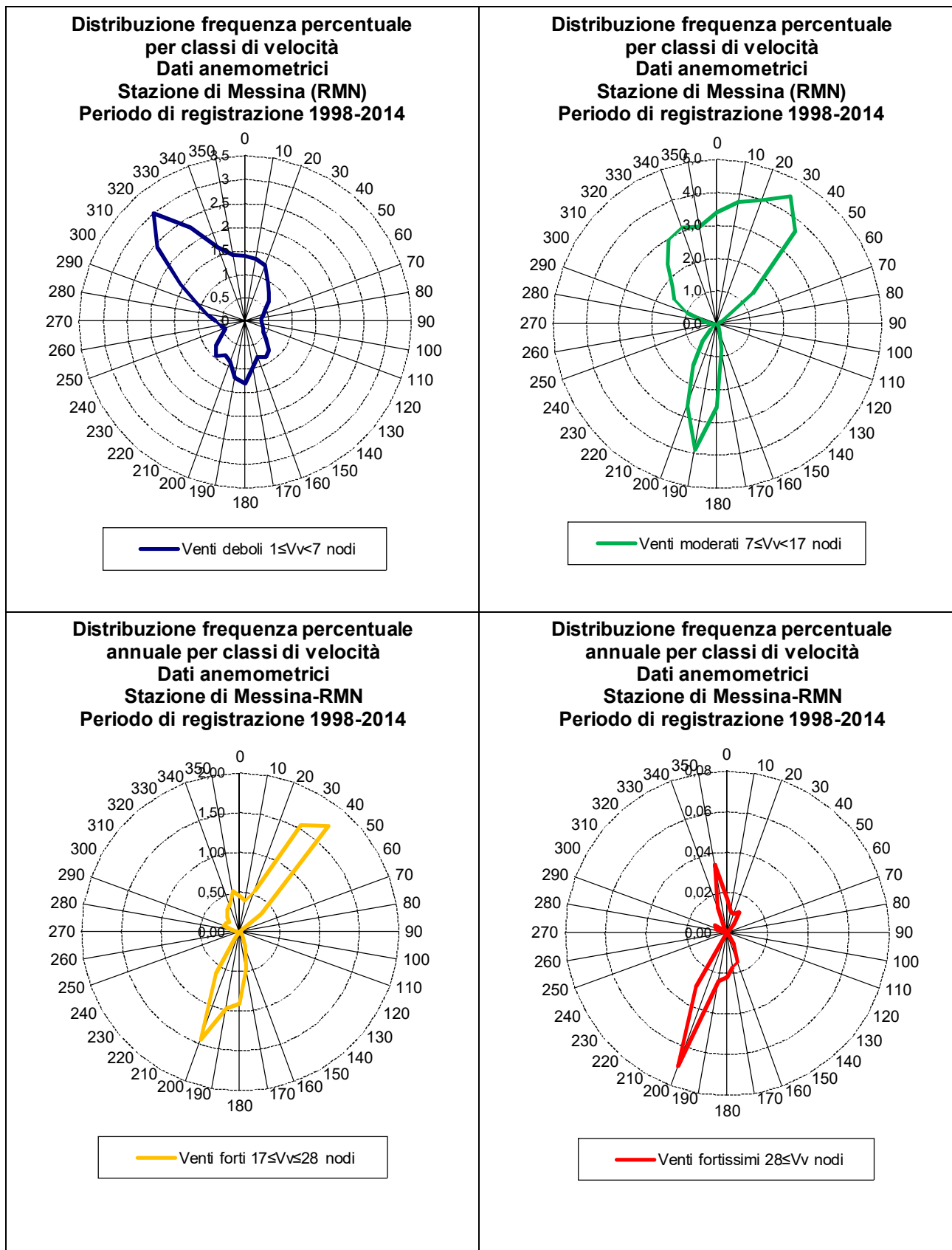


Figura 2.11 - Stazione anemometrica di Messina (RMN): diagramma polare della frequenza annuale del vento per classi di velocità deboli, moderate, forti e fortissime secondo la scala Beaufort (Periodo 1998-2014).

Tabella 2.7 – Frequenza di apparizione per classi di velocità

Denominazione venti	Classi di velocità	Frequenza di apparizione
	Vv (Nodi)	%
Calme	$1 < Vv$	3,78
Venti deboli	$1 \leq Vv < 7$	33,29
Venti moderati	$7 \leq Vv < 17$	50,14
Venti forti	$17 \leq Vv < 28$	12,46
Venti fortissimi	$Vv \geq 28$	0,33

2.2.1.4.1. Statistica della serie di misure anemometriche della Stazione anemometrica della rete mareografica nazionale RMN ex SIMN di Messina-Porto (ISPR).

La serie di dati registrata presso la stazione di Messina è stata sottoposta ad analisi statistica, determinando gli indici caratteristici delle variabili velocità e direzione. L'operazione è stata effettuata in termini di statistica lineare per la variabile velocità ed in termini di statistica circolare per la variabile direzione.

Nelle tabelle 2.8 ed 2.9 sono riportati gli indici statistici di posizione e di dispersione caratteristici della serie temporale della variabile velocità (rappresentata nel grafico di figura 2.12). In base ai valori degli indici di dispersione si deduce che la distribuzione di frequenza della velocità è caratterizzata da asimmetria positiva, cioè da una coda più lunga sulla destra (si veda anche il grafico box plot di figura 2.13).

Tabella 2.8 – Indici di posizione statistica Velocità del vento U_{10} (m/sec)

Media base dei dati	$\mu =$	4.49 m/sec
Mediana base dei dati	$M =$	4.11 m/sec
Massimo	$Max =$	24.8 m/sec
Minimo	$Min =$	0.00 m/sec
Quartile I° (25%) base dei dati	$Q_1 =$	2.20 m/sec
Quartile II° (50%) base dei dati	$Q_2 =$	4.30 m/sec
Quartile III° (75%) base dei dati	$Q_3 =$	6.35 m/sec
Quartile IV° (100%) base dei dati	$Q_4 =$	24.80 m/sec

Tabella 2.9 – Indici di dispersione del campione di dati delle velocità del vento U_{10} (m/sec)

Varianza	$\sigma^2 =$	8.04
Scarto quadratico medio	$\sigma =$	2.84
Asimmetria	$A =$	0.57
Coefficiente di asimmetria di Pearson	$Sk =$	0.41
Kurtosi	$K =$	0.13

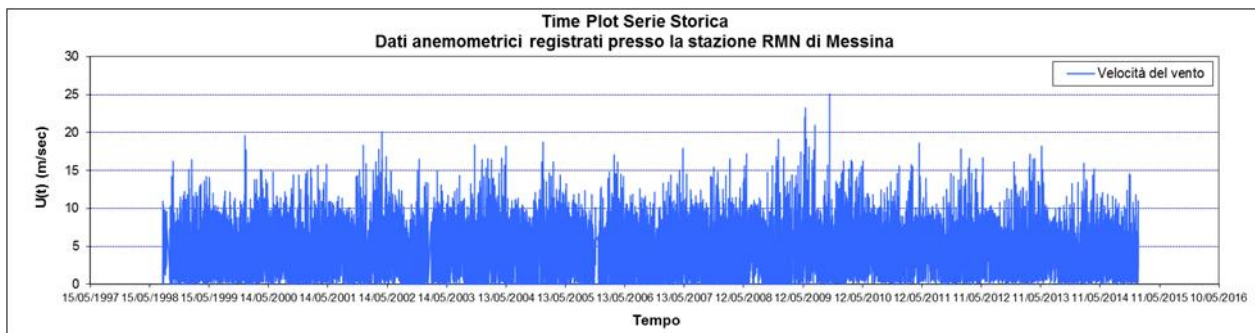


Figura 2.12 - Stazione anemometrica di Messina (RMN): time plot della serie storica della velocità del vento registrata nel periodo 1998-2014.

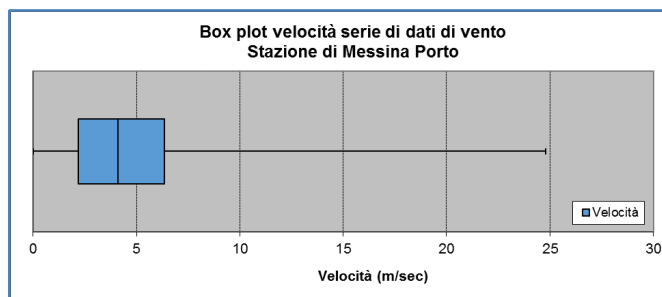


Figura 2.13 - Stazione anemometrica di Messina (RMN): diagramma box-plot della variabile velocità.

L'analisi della variabile direzione è stata effettuata secondo i principi della statistica circolare. Attraverso l'utilizzo del time plot della serie di dati di direzione registrati presso la stazione di Messina è possibile individuare la caratteristica bimodalità della distribuzione direzionale degli eventi anemologici nel sito di Messina (si veda la figura 2.14), che risulta ancor più evidenziata dalla rappresentazione ad istogramma della figura 2.15.

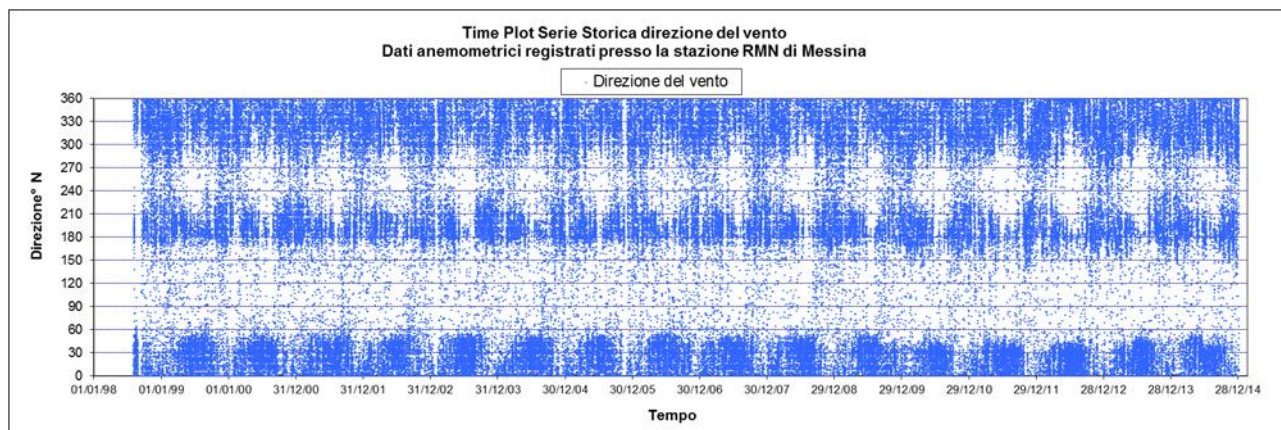


Figura 2.14 - Stazione anemometrica di Messina (RMN): time plot della serie storica della direzione del vento registrata nel periodo 1998-2014

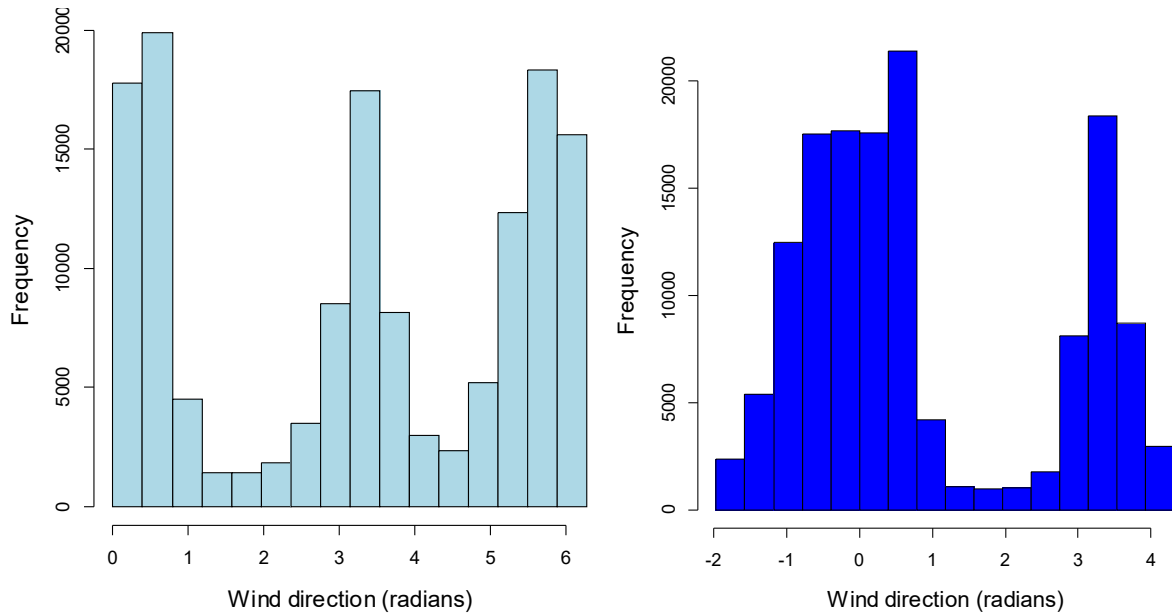


Figura 2.15 - Stazione anemometrica di Messina (RMN): istogrammi della distribuzione di direzioni (esprese in radianti in dati reali e normalizzati) delle registrazioni effettuate presso la stazione nel periodo 1998-2014

Le basi della statistica direzionale sono state poste da Fisher (1993) e Mardia (2000) che hanno proposto numerose definizioni per gli indici di posizione statistica riferiti a dati direzionali. Nelle tabelle 2.10 ed 2.11 sono riportati gli indici statistici di posizione e di dispersione caratteristici della serie temporale della variabile direzione. La media dei dati angolari x_i , rappresenta la direzione media della serie di dati, ed è determinata immaginando che ogni angolo rappresenti un vettore di lunghezza unitaria nella direzione dell'angolo, e quindi effettuando una somma vettoriale, mediante l'utilizzo delle equazioni (2.1) e 2.2 e 2.3:

$$\bar{x} = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{\bar{S}}{\bar{C}}\right) & \text{se } S > 0, C > 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{\bar{S}}{\bar{C}}\right) + \pi & \text{se } C < 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{\bar{S}}{\bar{C}}\right) + 2\pi & \text{se } S < 0, C > 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Dove \bar{S} e \bar{C} sono:

$$\bar{S} = \frac{S}{N} \quad (2.2)$$

$$\bar{C} = \frac{C}{N}$$

Avendo definito:

$$S = \sum_{i=1}^N \sin(x_i) \quad (2.3)$$

$$C = \sum_{i=1}^N \cos(x_i)$$

cioè immaginando che la somma vettoriale sia un singolo vettore risultante \vec{a} che abbia come lunghezza risultante R_p e \bar{R}_p è la lunghezza risultante media di \vec{a} e quindi:

$$R_p = \sqrt{S^2 + C^2} , \bar{R} = \frac{R_p}{N} \quad (2.4)$$

Il valore di \bar{R}_p varia tra 0 ed 1, avvicinandosi all'unità quando la variazione dei valori dell'angolo è modesta.

La varianza circolare V è un indice di variabilità che misura di quanto gli angoli si discostino rispetto alla direzione media; anch'essa varia tra 0 ed 1, assumendo valore nullo quando l'angolo è pari al valore medio, cioè il suo discostamento rispetto alla media è nullo. La formula che la rappresenta è :

$$V = 1 - \bar{R} \quad (2.5)$$

Mentre si definisce deviazione standard circolare

$$v = \sqrt{-2\ln(\bar{R})}$$

Nelle tabelle 2.10 e 2.11 è riportato il sommario dei più importanti parametri di statistica circolare della direzione del vento misurata a Messina.

Tabella 2.10 – Indici di posizione statistica circolare direzione del vento (°)

Media base dei dati	$\mu =$	336,10°
Lunghezza risultante media	$\bar{R} =$	0,310
Minimo	Min =	0°
Massimo	Max =	360°
Mediana	M =	196,04°
Quartile I° (25%) base dei dati	$Q_1 =$	39,01°
Quartile II° (50%) base dei dati	$Q_2 =$	196,04°
Quartile III° (75%) base dei dati	$Q_3 =$	313,17°

Tabella 2.11 – Indici di dispersione del campione di dati della direzione del vento

Varianza	$\sigma^2 =$	0,609
Scarto quadratico medio	$\sigma =$	39,66°

L'analisi è stata completata calcolando la distribuzione direzionale del flusso medio annuo di energia aerodinamica potenziale del vento sulla base delle registrazioni della stazione di Messina; nel grafico di figura 2.16 è rappresentata la rosa dell'energia associata al vento.

Distribuzione direzionale del flusso medio annuo di energia aerodinamica potenziale del vento nel sito di Messina Porto

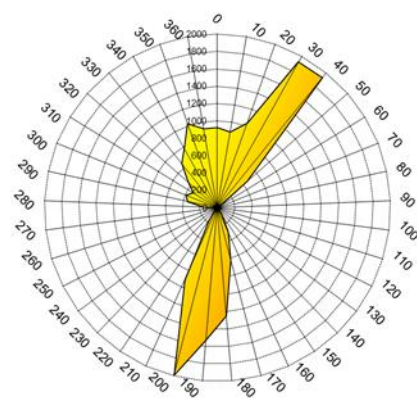


Figura 2.16 - Stazione anemometrica di Messina (RMN): distribuzione direzionale del flusso medio annuo di energia aerodinamica rilevata presso la stazione di Messina Porto espresso in kWh.

2.2.1.5 Analisi della serie di misure anemometriche della Stazione anemometrica della rete mareografica nazionale RMN ex SIMN di Reggio Calabria -Porto (ISPRA).

La stazione meteorologica di Reggio Calabria, facente anch'essa parte della Rete Mareografica Nazionale, è situata all'interno del porto di Reggio Calabria, in corrispondenza della radice del pontile degli aliscafi e vicino all'ex biglietteria delle FFSS, nel punto di coordinate geografiche 38° 11' 49.56" N e 15° 34' 05.67" E (Figura 2.17), dunque a brevissima distanza dal sito di progetto.

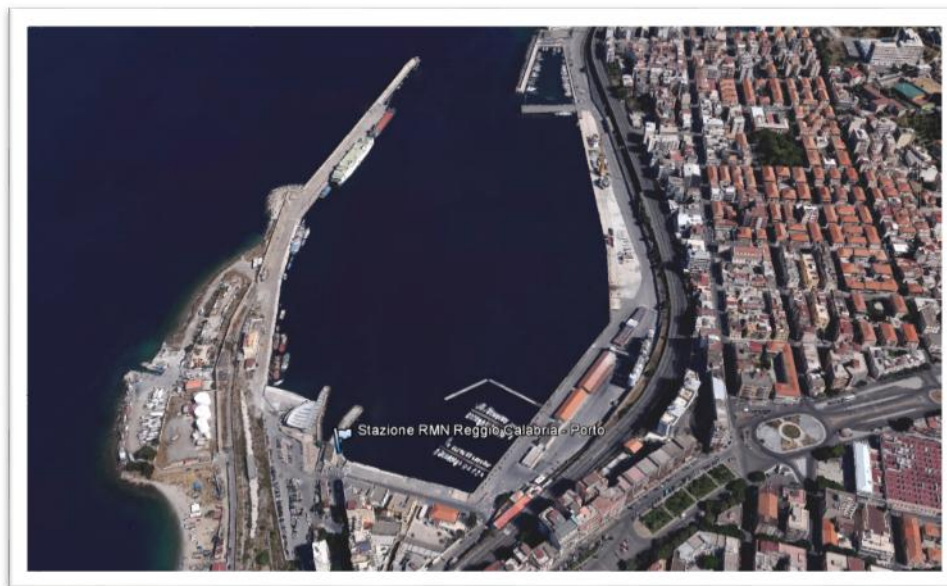


Figura 2.17 - Inquadramento geografico della stazione meteo RMN di Reggio Calabria Porto (Fonte Google Earth).

Questa stazione meteorologica è dotata di un anemometro collocato su di un palo ad un'altezza di 10 m s.l.m. L'anemometro è costituito da due trasduttori per la misura delle grandezze di direzione e velocità del vento.

La stazione di misura è localizzata all'interno dello Stretto di Messina, a poca distanza dal sito in esame (circa 1.5 km a nord); essa risulta schermata dal retrostante massiccio dell'Aspromonte, che impedisce alle correnti di Scirocco di essere rilevate.

I dati messi a disposizione dall'ISPRA per questa stazione si riferiscono alle registrazioni effettuate dal 04.11.1999 a oggi. Le misurazioni effettuate a partire dalle ore 08.00 del 04.11.1999 fino alle ore 08.00 del 20.04.2011 sono riferite ai valori mediati della velocità (in m/s) e della direzione del vento (in gradi° rispetto al Nord) nell'intervallo temporale di un'ora. A partire dal 20.04.2011 la stazione fornisce registrazioni della velocità (in m/s) e della direzione del vento (in gradi° rispetto al Nord) ad intervalli di tempo di 10 minuti.

La base di dati della stazione di Reggio Calabria è stata sottoposta ad un'analisi preventiva allo scopo di correggere eventuali anomalie derivanti da misure effettuate in condizioni di malfunzionamento strumentale per carenza di manutenzione, oppure perché fuori dalla scala di rilevazione dello strumento (che per la stazione in esame è compresa tra 0 e 50 m/s), o per perdita di dati dovuta ad arresto strumentale causato da eventi naturali (burrasche, fulmini, urti con corpi estranei) o da interventi di operatori (di manutenzione o sostituzione delle strumentazioni) o per mancata trasmissione delle registrazioni.

Effettuata la correzione della base dati è stato possibile valutare la consistenza della serie temporale per ogni anno di registrazione, determinando il numero di dati attesi, il numero di registrazioni mancanti, il numero di dati considerati errati e nulli sulla base della metodologia di correzione precedentemente illustrata, il rendimento annuale valutato come rapporto tra il numero di dati validi ed il numero di dati attesi, ed infine il numero di calme, considerate tali i valori inferiori a 0.5 m/sec. I risultati di questa analisi sono riportati nella tabella 2.12.

Tabella 2.12 – Consistenza e rendimento annuale serie temporale di misure anemometriche della stazione di Reggio Calabria (Rete mareografica Nazionale)

	Numero registrazioni	Numero dati attesi	Numero dati mancanti	Numero dati nulli	Numero dati validi	Rendimento annuale	Calme V<0.5 m/sec
1999	1384	8760	7376	0	1384	15,80	23
2000	8783	8784	1	34	8749	99,60	264
2001	8759	8760	1	0	8759	99,99	311
2002	8759	8760	13	2	8745	99,83	376
2003	4018	8760	4742	9	4009	45,76	360
2004	8783	8784	1	3	8780	99,95	283
2005	8760	8760	0	2	8758	99,98	247
2006	8722	8760	38	4	8718	99,52	336
2007	8760	8760	0	4	8756	99,95	355
2008	8754	8784	6	30	8748	99,59	521
2009	8555	8760	22	29	8533	97,41	245
2010	8660	8760	13	100	8647	98,71	103
2011*	39213	39345	4	132	39209	99,65	793
2012**	52378	52704	255	326	52123	98,90	618
2013**	52361	52560	294	199	52067	99,06	619
2014**	52558	52560	304	2	52254	99,42	601
2015***	38895	39312	417	242	38653	98,32	515

* L'anno 2011 ha registrato con frequenza di 10 minuti dal 20 aprile

** Durante gli anni 2012-2013-2014 i dati di vento sono stati registrati con frequenza temporale pari a 10 minuti.

*** Per l'anno 2015 sono state prese in considerazione le registrazioni fino al 30 settembre.

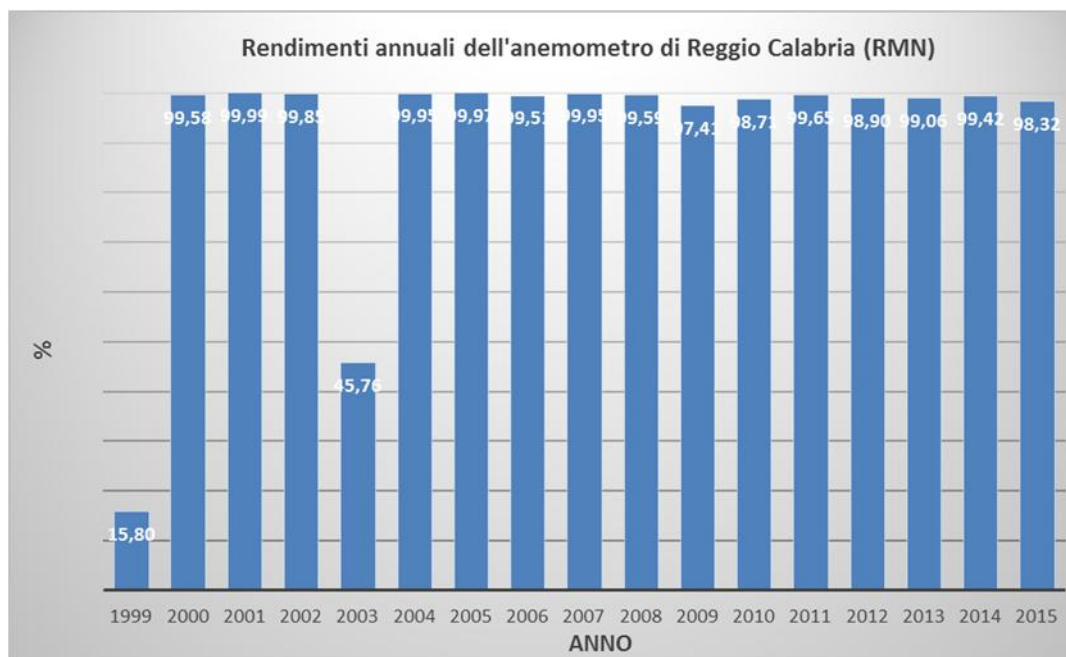


Figura 2.18- Istogramma delle percentuali di rendimento annuale della stazione anemometrica di Reggio Calabria Porto della RMN (periodo di misura 1999-2015).

In Figura 2.18 è rappresentato l'istogramma delle percentuali di rendimento annuali della stazione della Rete Mareografica Nazionale di Reggio Calabria. Da questo grafico si evince che nel primo anno di funzionamento il rendimento dell'anemometro è stato inferiore al 20% (per altro le registrazioni si riferiscono agli ultimi quattro mesi dell'anno), nel 2003 il rendimento è stato inferiore al 50%, mentre nei restanti anni della serie storica, lo strumento ha avuto un rendimento sempre superiore al 95%, con alcuni anni in cui è stata registrata la quasi totalità degli eventi anemologici (2001,2002, 2004, 2005, 2007). Il rendimento più basso dell'ultima decade si è registrato nell'anno 2008, con il 97,41% di casi registrati.

Il rendimento complessivo della stazione nel periodo compreso tra il 1999 ed il 2015, espresso come il rapporto tra il numero totale degli eventi registrati, depurati dai valori errati o nulli, ed il numero di eventi teorici, è pari al 95,67%, per circa 16 anni di registrazioni, inferiore al rendimento della stazione anemometrica di Messina.

Sulla serie storica delle registrazioni della stazione di misura sono state eseguite le elaborazioni per la definizione del clima anemologico caratteristico del paraggio secondo la metodologia illustrata nel precedente paragrafo.

L'analisi ha riguardato l'intero periodo di misura disponibile (1999 - 2014) attraverso una suddivisione degli eventi in classi di ampiezza definite secondo la scala *Beaufort* (v. tab. 2.4), per le velocità, e di 22,5°, per le direzioni.

I risultati ottenuti sono stati infine sintetizzati in forma grafica ("rose dei venti"), variando l'ampiezza delle classi della velocità del vento. Come per la precedente serie temporale dei dati di vento registrati presso la stazione di Messina, le tredici classi iniziali sono state ridotte a cinque intervalli della scala Beaufort corrispondenti ai seguenti valori: 0, 1 ÷ 2, 3 ÷ 4, 5 ÷ 6, 7 ÷ 12, relativi cioè agli eventi di calma, di intensità debole, moderata, forte e fortissima.

Nella figura 2.19, è riportata la “rosa dei venti” annuale riferita all’intero periodo di osservazione. Nella figura 2.20 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza percentuale per classi di velocità del vento, misurata in nodi.

Nella figura 2.21 sono riportate le rose dei venti annuali degli eventi registrati dalla stazione, suddivise rispettivamente secondo le classi di velocità $1 \leq Vv < 7$ nodi (il primo grafico) $7 \leq Vv < 17$ nodi (il secondo grafico), $17 \leq Vv < 28$ nodi (il terzo grafico) e $28 \leq Vv$ (il quarto grafico).

Nelle tabelle 2.13 e 2.14 sono riportate le distribuzioni dei dati di vento rilevati presso la stazione nel periodo compreso tra il 4.11.1999-10.10.2015 e la loro frequenza percentuale annuale, ottenute mediante la suddivisione degli stessi dati per classi di direzione e di velocità del vento (secondo la scala di *Beaufort*).

In tabella 2.15 sono riportate le frequenze di apparizione annuale delle calme e dei venti deboli, moderati, forti e fortissimi, secondo la suddivisione in classi di velocità, precedentemente indicata.

Dall’analisi dei risultati si può dedurre che i venti caratterizzati da una maggiore frequenza di apparizione (venti regnanti) sono quelli provenienti prevalentemente dalla direzione di nord (Tramontana 25%), e dalle vicine direzioni di Nord-NordOvest e Nord-NordEst. Con percentuale notevolmente più bassa la stazione rileva venti dal II° quadrante (tra Mezzogiorno e Libeccio) e dalla direzione di Levante. Per quanto riguarda i venti provenienti dal settore di Mezzogiorno e Libeccio si tratta in realtà degli stessi venti rilevati dalla stazione di Messina, in percentuale di apparizione inferiore presso Reggio, probabilmente perché le correnti di scirocco che si incanalano all’interno dello Stretto, si “appoggiano” prevalentemente lungo la sponda siciliana, seguendo l’allineamento dei Monti Peloritani, e quindi vengono rilevati con minore frequenza presso la sponda calabrese. Inoltre i venti da Sud e Sud-Est vengono rilevati prevalentemente con intensità debole e moderata confermando il fatto che queste correnti a livello del mare sfilano prevalentemente lungo la sponda siciliana con maggiore velocità e che lungo la costa calabrese si presentano con un flusso più rallentato. Per quanto riguarda i venti provenienti da Levante, la loro rilevazione sembra incompatibile con l’effetto di schermatura offerto dal massiccio dell’Aspromonte retrostante il sito di misura; in realtà le registrazioni si riferiscono a venti molto deboli a regime di brezza che probabilmente discendono dalle propaggini montuose incuneandosi lungo le vallate che si aprono sulla pianura costiera di Reggio Calabria.

Per quanto riguarda i venti caratterizzati da elevati valori di velocità (venti dominanti), essi provengono prevalentemente da Nord, con intensità forte e fortissima (si veda la figura 1.29). Pochi ma presenti gli eventi anemometrici provenienti da Libeccio-Mezzogiorno ($200^\circ N$) caratterizzati da intensità forte e fortissima.

Riassumendo, si può affermare che gli eventi con direzione di provenienza da Mezzogiorno sono rilevati dalla stazione quasi sempre con intensità debole e moderata e che il clima anemologico del sito di Reggio Calabria Porto è caratterizzato da un regime in cui prevalgono i venti provenienti dal settore settentrionale che si presentano anche con fortissima intensità.

Tabella 2.13 – Distribuzione di frequenza annuale dei dati di vento rilevati presso la stazione di Reggio Calabria Porto, per classi di direzione e di velocità del vento secondo la scala di Beaufort (Periodo 04.11.1999-30.09.2015).

		CLASSI DI VELOCITA'															
		Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
		V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64		
		V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118		
		V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6		
DIR °N	Classi Direzione														TOT.		
0	348,75 11,25	218	1413	4636	11979	11766	3051	342	28	1							33434
22,5	11,25 33,75	194	1160	4145	8764	3478	406	11		1	1						18160
45	33,75 56,25	176	1256	2473	1848	320	27	2									6102
67,5	56,25 78,75	196	2271	5329	1444	38	1										9279
90	78,75 101,25	175	2762	6785	1897	27	3	2									11651
112,5	101,25 123,75	138	1685	1009	105	31	9										2977
135	123,75 146,25	131	1375	915	215	54	12										2702
157,5	146,25 168,75	120	1350	1262	429	73	5										3239
180	168,75 191,25	107	1779	4571	3140	666	31	2									10296
202,5	191,25 213,75	84	808	2380	3246	1164	204	23		1							7910
225	213,75 236,25	90	721	1800	1628	263	62	6									4570
247,5	236,25 258,75	62	627	738	151	16	2										1596
270	258,75 281,25	66	478	267	88	25	4										928
292,5	281,25 303,75	82	463	272	151	44	11	3									1026
315	303,75 326,25	87	642	681	613	270	53	2									2348
337,5	345 355	132	1051	2295	6182	6142	1980	227	20		2	1					18032
	CALME	2058															
	TOTALE	2058	19841	39558	41880	24377	5861	620	48	3	3	1	0	0			134250
	FREQ. CUM.	2058	21899	61457	103337	127714	133575	134195	134243	134246	134249	134250	134250	134250			

Tabella 2.14 – Distribuzione di frequenza percentuale annuale dei dati di vento rilevati presso la stazione di Reggio Calabria Porto, per classi di direzione e di velocità del vento secondo la scala di Beaufort (Periodo 04.11.1999-30.09.2015).

		CLASSI DI VELOCITA'															
		Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
		V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64		
		V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118		
		V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6		
DIR °N	Classi Direzione														TOT.		
0	348,75 11,25	0,162	1,053	3,453	8,923	8,764	2,273	0,255	0,021	0,001							24,90
22,5	11,25 33,75	0,145	0,864	3,088	6,528	2,591	0,302	0,008		0,001	0,001						13,53
45	33,75 56,25	0,131	0,936	1,842	1,377	0,238	0,020	0,001									4,55
67,5	56,25 78,75	0,146	1,692	3,969	1,076	0,028	0,001										6,91
90	78,75 101,25	0,130	2,057	5,054	1,413	0,020	0,002	0,001									8,68
112,5	101,25 123,75	0,103	1,255	0,752	0,078	0,023	0,007										2,22
135	123,75 146,25	0,098	1,024	0,682	0,160	0,040	0,009										2,01
157,5	146,25 168,75	0,089	1,006	0,940	0,320	0,054	0,004										2,41
180	168,75 191,25	0,080	1,325	3,405	2,339	0,496	0,023	0,001									7,67
202,5	191,25 213,75	0,063	0,602	1,773	2,418	0,867	0,152	0,017		0,001							5,89
225	213,75 236,25	0,067	0,537	1,341	1,213	0,196	0,046	0,004									3,40
247,5	236,25 258,75	0,046	0,467	0,550	0,112	0,012	0,001										1,19
270	258,75 281,25	0,049	0,356	0,199	0,066	0,019	0,003										0,69
292,5	281,25 303,75	0,061	0,345	0,203	0,112	0,033	0,008	0,002									0,76
315	303,75 326,25	0,065	0,478	0,507	0,457	0,201	0,039	0,001									1,75
337,5	345 355	0,098	0,783	1,709	4,605	4,575	1,475	0,169	0,015		0,001	0,001					13,43
	CALME	1,533															
	TOTALE	1,533	14,779	29,466	31,196	18,158	4,366	0,462	0,036	0,002	0,002	0,001	0,00	0,00			100,0
	FREQ.																
	CUM.	1,533	16,312	45,778	76,974	95,131	99,497	99,959	99,995	99,997	99,999	100,0	100,0	100,0			

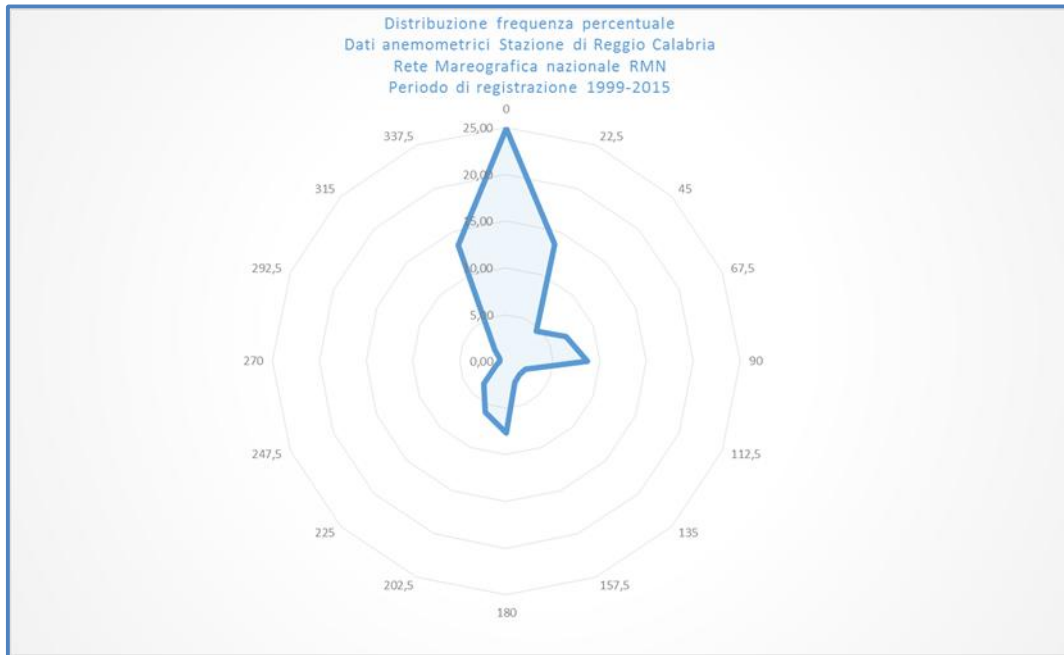


Figura 2.19 - Stazione anemometrica di Reggio Calabria (RMN): diagramma polare della frequenza annuale del vento (Periodo di registrazione 1999-2015).

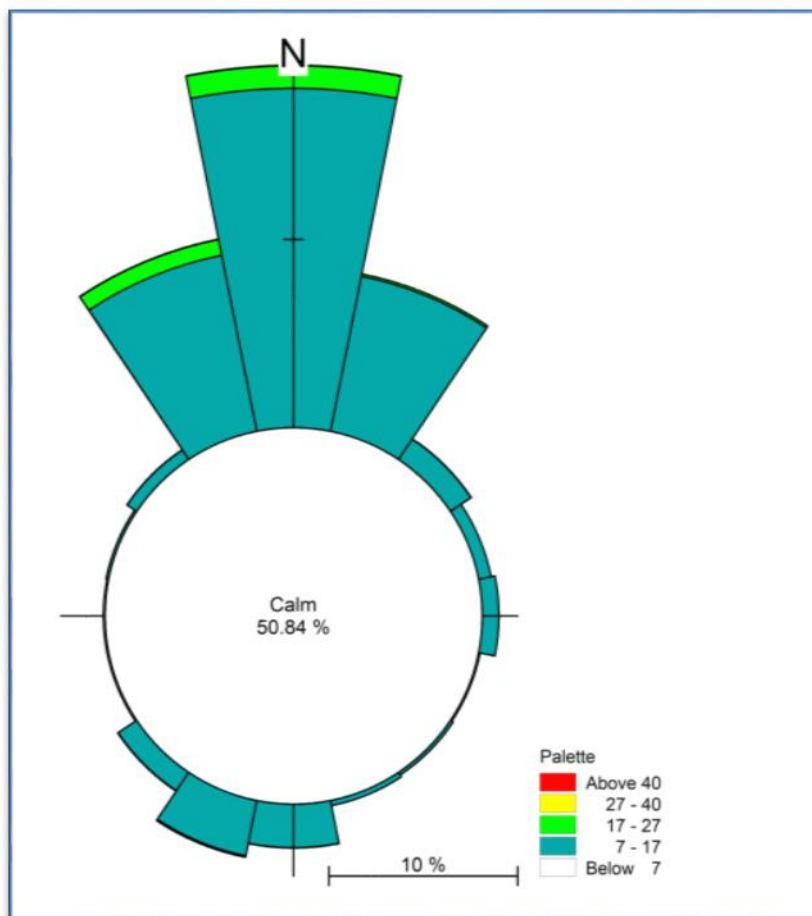


Figura 2.20- Stazione anemometrica di Reggio Calabria (RMN): rosa dei venti misurati in nodi (Periodo di registrazione 1999-2015).

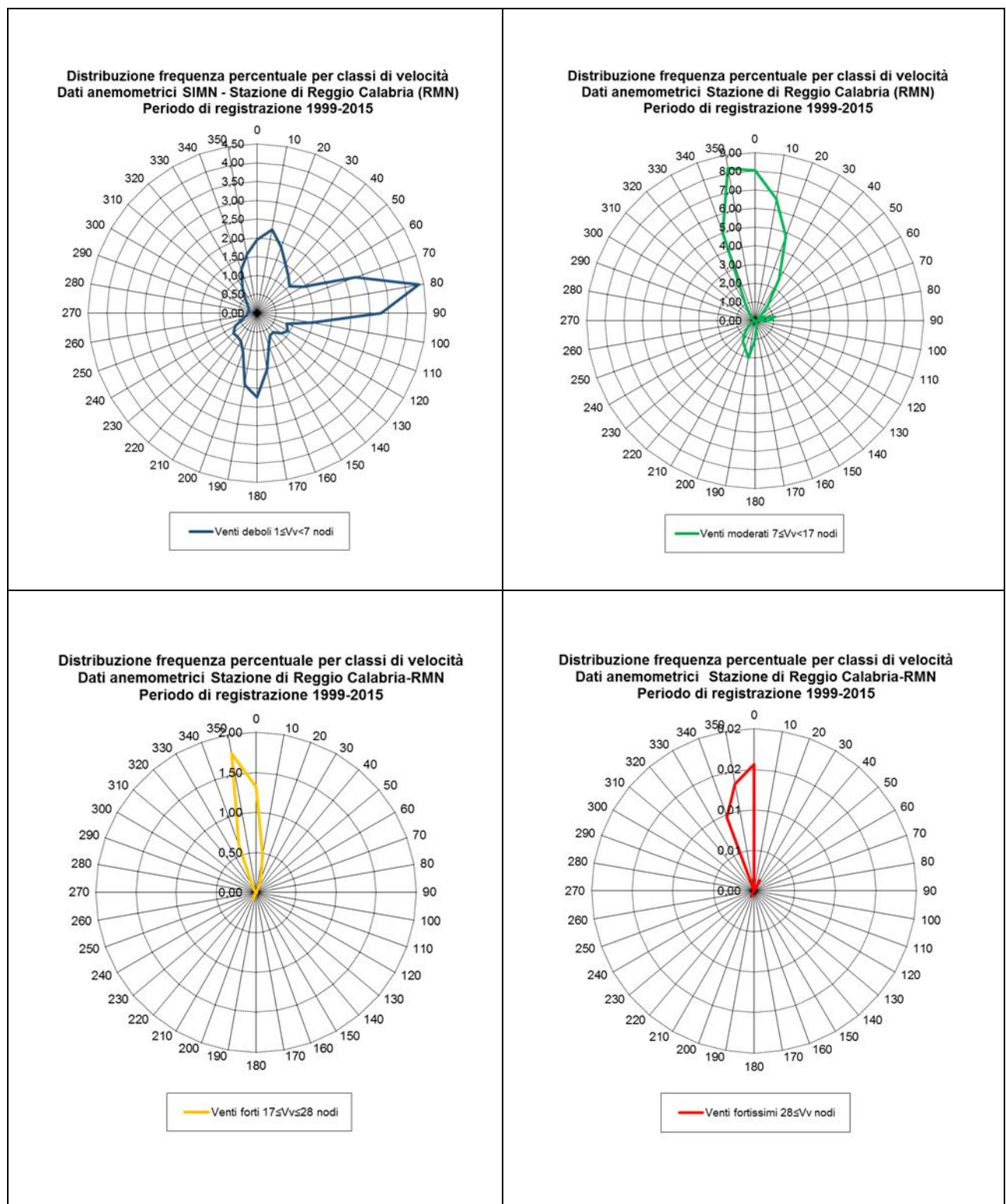


Figura 2.21-Stazione anemometrica di Reggio Calabria (RMN): diagramma polare della frequenza annuale del vento per classi di velocità deboli, moderate, forti e fortissime secondo la scala Beaufort (Periodo 1999-2015).

Tabella 2.15 – Frequenza di apparizione per classi di velocità.

Denominazione venti	Classi di velocità	Frequenza di apparizione
	Vv (Nodi)	%
Calme	$1 < Vv$	1,53
Venti deboli	$1 \leq Vv < 7$	44,25
Venti moderati	$7 \leq Vv < 17$	49,35
Venti forti	$17 \leq Vv < 28$	4,83
Venti fortissimi	$28 \leq Vv$	0,04

2.2.1.5.1. Statistica della serie di misure anemometriche della Stazione anemometrica della rete mareografica nazionale RMN ex SIMN di Reggio Calabria-Porto (ISPRA).

La serie di dati registrata presso la stazione di Reggio Calabria è stata sottoposta ad analisi statistica, determinando gli indici caratteristici statistici delle variabili velocità e direzione. L'operazione è stata effettuata in termini di statistica lineare per la variabile velocità ed in termini di statistica circolare per la variabile direzione.

Nelle tabelle 2.16 e 2.17 sono riportati gli indici statistici di posizione e di dispersione caratteristici della serie temporale della variabile velocità (rappresentata nel grafico di figura 2.22). In base ai valori degli indici di dispersione si deduce che la distribuzione di frequenza della velocità è caratterizzata da asimmetria positiva, cioè da una coda più lunga sulla destra (si veda anche il grafico box plot di figura 2.23).

Tabella 2.16 – Indici di posizione statistica

Media base dei dati	$\mu =$	3.77 m/sec
Moda	$m =$	3.00 m/sec
Mediana base dei dati	$M =$	3.50 m/sec
Massimo	$Max =$	24.4 m/sec
Minimo	$Min =$	0.00 m/sec
Quartile I° (25%) base dei dati	$Q_1 =$	2.00 m/sec
Quartile II° (50%) base dei dati	$Q_2 =$	3.50 m/sec
Quartile III° (75%) base dei dati	$Q_3 =$	5.20 m/sec
Quartile IV° (100%) base dei dati	$Q_4 =$	24.40 m/sec

Tabella 2.17 – Indici di dispersione del campione di dati delle velocità del vento

Varianza	$\sigma^2 =$	5.04
Scarto quadratico medio	$\sigma =$	2.25
Asimmetria	$A =$	0.68
Coefficiente di asimmetria di Pearson	$Sk =$	0.36
Kurtosi	$K =$	0.47

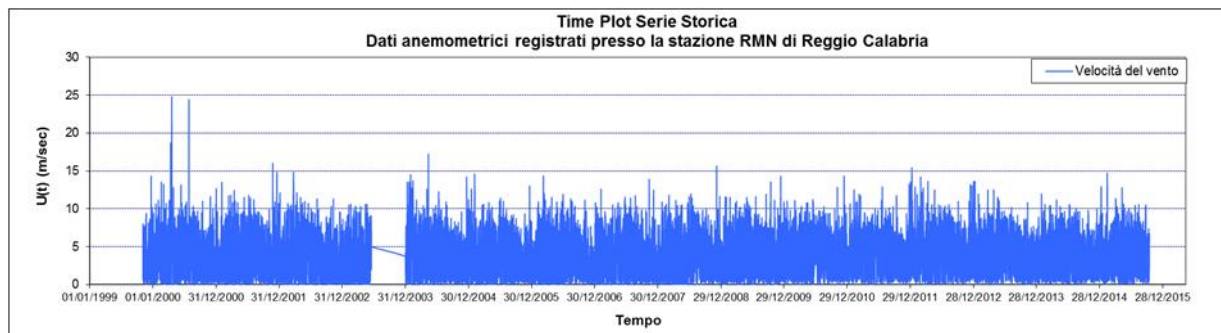


Figura 2.22- Stazione anemometrica di Reggio Calabria (RMN): time plot della serie storica della velocità del vento registrata nel periodo 1999-2015.

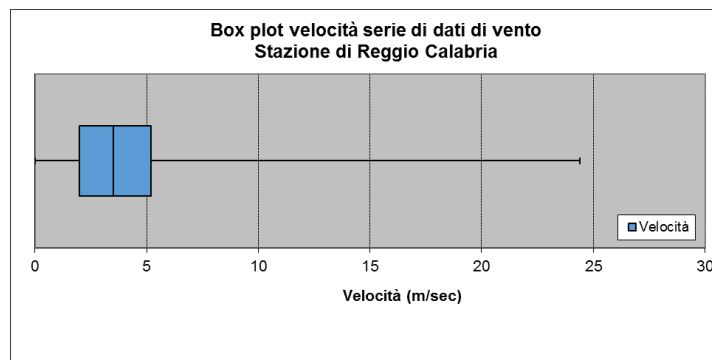


Figura 2.23 - Stazione anemometrica di Messina (RMN): diagramma box-plot della variabile velocità.

L'analisi della variabile direzione è stata effettuata secondo i principi della statistica circolare. Attraverso l'utilizzo del time plot della serie di dati di direzione registrati presso la stazione di Reggio è possibile individuare un andamento pressoché bimodale della distribuzione direzionale degli eventi anemologici, ad eccezione dei venti dal settore di levante che però, si è già visto, sono sempre a carattere di brezza (si vedano le figure 2.24 e 2.25).

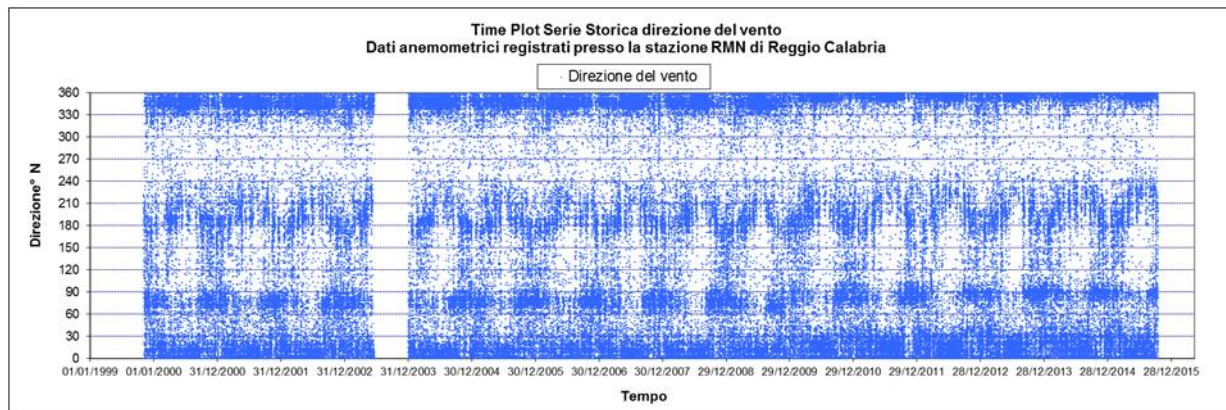


Figura 2.24- Stazione anemometrica di Reggio Calabria Porto (RMN): time plot della serie storica della direzione del vento registrata nel periodo 1999-2015

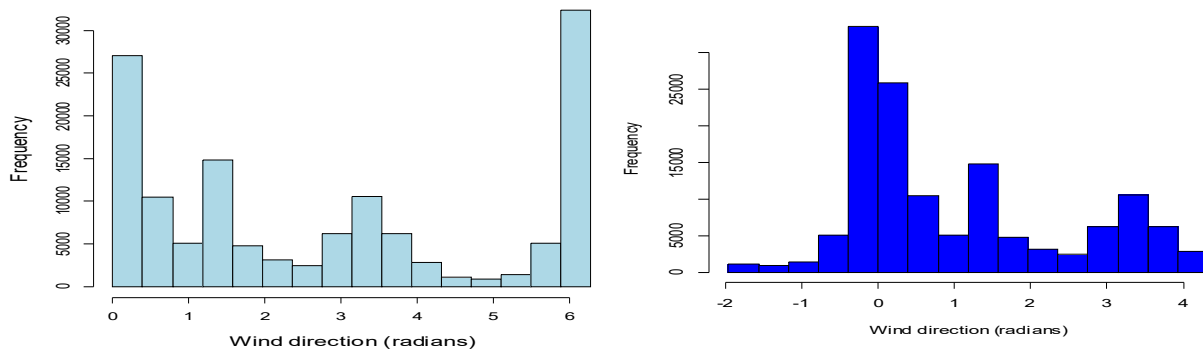


Figura 2.25 - Stazione anemometrica di Reggio Calabria (RMN): istogramma della distribuzione di direzioni (esprese in radianti) delle registrazioni effettuate presso la stazione nel periodo 1999-2015

Nelle tabelle 2.18 e 2.19 è riportato il sommario dei più importanti parametri di statistica circolare della direzione del vento misurata a Messina.

Tabella 2.18 – Indici di posizione statistica circolare direzione del vento (°)

Media base dei dati	$\mu =$	21,32°
Lunghezza risultante media	$\bar{R} =$	0.398
Minimo	Min =	0°
Massimo	Max =	360°
Mediana	M =	196,04°
Quartile I° (25%) base dei dati	Q ₁ =	39,01°
Quartile II° (50%) base dei dati	Q ₂ =	196,04°
Quartile III° (75%) base dei dati	Q ₃ =	313,17°

Tabella 2.19 – Indici di dispersione del campione di dati della direzione del vento

Varianza	$\sigma^2 =$	0.601
Scarto quadratico medio	$\sigma =$	27,27°

L’analisi è stata completata calcolando la distribuzione direzionale del flusso medio annuo di energia aerodinamica potenziale del vento sulla base delle registrazioni della stazione di Reggio Calabria; nel grafico di figura 2.26 è rappresentata la rosa dell’energia associata al vento.

Distribuzione direzionale del flusso medio annuo di energia aerodinamica potenziale del vento nel sito di Reggio Calabria Porto

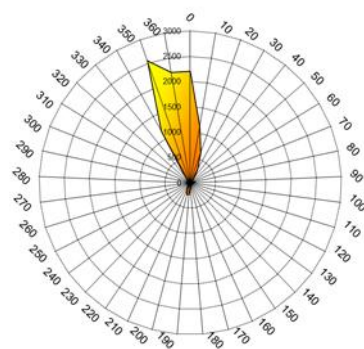


Figura 2.26 - Stazione anemometrica di Reggio Calabria (RMN): distribuzione direzionale del flusso medio annuo di energia aerodinamica rilevata presso la stazione di Messina Porto espresso in Kwh.

2.2.1.5.2. Analisi della persistenza del vento presso della stazione anemometrica di Reggio Calabria-Porto (ISPRA).

In appendice allo studio di statistica descrittiva è stato prodotto lo studio della persistenza (o durata) del vento. Attraverso questa analisi è stata dedotta la curva di durata del vento in forma adirezionale e settoriale, rappresentando la frequenza cumulata di superamento (espressa sia in termini di giorni /anno che ore/anno) per ogni velocità del vento. Nella figura 2.27 sono riportate le curve di durata che rappresentano il numero di giorni e di ore annue di apparizione di venti con valore uguale o superiore ad un certo limite di velocità.

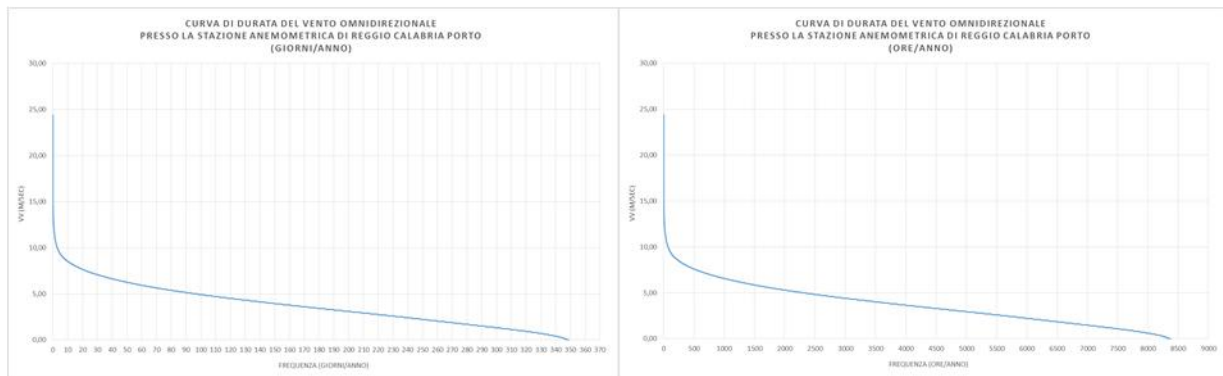
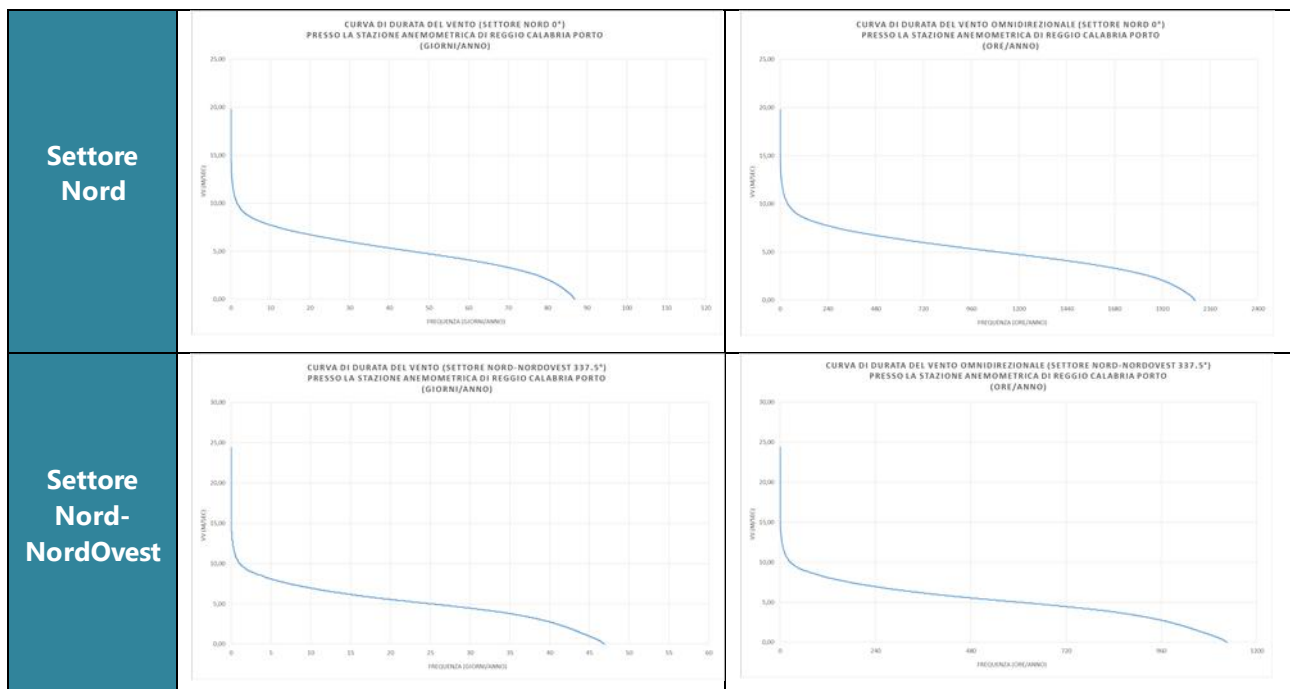


Figura 2.27 - Stazione anemometrica di Reggio Calabria (RMN): curva di persistenza omnidirezionale del vento .

L’elaborazione è stata condotta anche per settori direzionali. La serie completa è stata suddivisa secondo i settori di ampiezza pari a 22.5°, compresi tra ; si è quindi provveduto alla determinazione delle curve di durata per le serie parziali riferite al settore Nord compreso tra 348.75-11.25° (individuato dalla direzione centrale 0°), per il settore NNO (compreso tra 326.25-348.75° e direzione centrale 337.50°), NO (compreso tra 303.75-326.25° e direzione centrale 315°), ONO, O ed infine OSO (compreso tra 236.25-258.75° e direzione centrale 247.50°). I risultati dell’elaborazione sono riportati nella figura 2.38



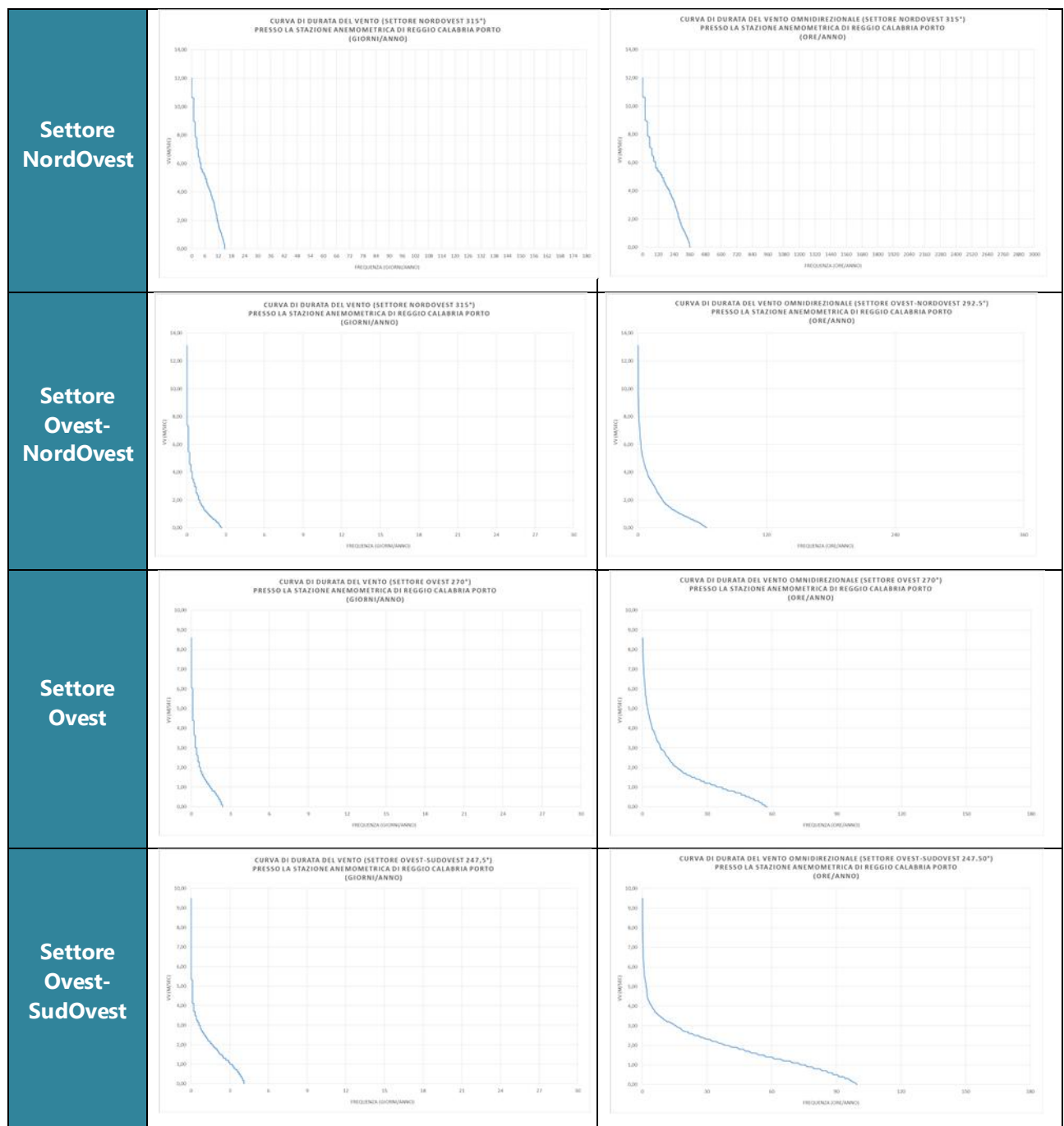


Figura 2.28 - Stazione anemometrica di Reggio Calabria (RMN):
curva di persistenza per settori direzionali del vento

2.2.1.5.3. Analisi probabilistica della serie di misure anemometriche della stazione anemometrica di Reggio Calabria-Porto (ISPRA).

L'indagine sin qui eseguita, pur evidenziando le caratteristiche del vento per la zona in esame, nulla dice sulla distribuzione degli eventi ed in particolare sui tempi di ritorno con cui tenderebbero a manifestarsi.

La stazione di Reggio Calabria-Porto ha pubblicato le misure di vento relative ad un periodo di registrazione abbastanza ampio (circa 17 anni): la disponibilità di questi dati consente, attraverso opportune elaborazioni di tipo statistico-probabilistico, di effettuare delle valutazioni di tipo quantitativo della grandezza meteorologica anemometrica, ed in particolare di determinare la frequenza di apparizioni degli eventi di particolare intensità.

Il vento, come tutti gli eventi meteorologici determinati da una grande serie di dati può considerarsi un fenomeno stocastico; gli eventi s'ipotizzano indipendenti e quindi elaborabili mediante un approccio probabilistico.

L'elaborazione statistico-probabilistica consiste nell'adattare una prescelta distribuzione di probabilità al campione di dati in nostro possesso, in modo da ricavare le equazioni di probabilità, che consentano almeno teoricamente, estrapolazioni di là del limite stesso delle osservazioni.

In altri termini la distribuzione degli eventi storici deve essere ampliata statisticamente al fine di ottenere un numero di eventi sufficientemente grande da poter ritenere la frequenza di un certo evento come un valore approssimato della sua probabilità.

L'elaborazione statistico-probabilistica consiste nell'adattare una prescelta distribuzione di probabilità al campione di dati in nostro possesso, in modo da ricavare le equazioni di probabilità, che consentano almeno teoricamente, estrapolazioni di là del limite stesso delle osservazioni.

In altri termini la distribuzione degli eventi storici deve essere ampliata statisticamente al fine di ottenere un numero di eventi sufficientemente grande da poter ritenere la frequenza di un certo evento come un valore approssimato della sua probabilità.

Il problema posto si risolve cercando di adattare una distribuzione di probabilità al campione dei valori estremi. Le registrazioni della stazioni di Reggio Calabria-Porto sono state effettuate ad un'altezza di 10 m.l.m.m e pertanto non necessitano di alcuna correzione legata alla quota di rilevamento.

La valutazione è stata effettuata solo per quei settori, caratterizzati dall'apparizione con una certa frequenza di venti forti e fortissimi, che possono generare localmente i mari all'interno dello Stretto di Messina che possono pervenire al paraggio in esame. L'analisi è stata quindi circoscritta ai settori di ampiezza pari a 22.5° con direzione centrale 0° (Nord) 337.50° (NNO) e 315° (NO).

Poiché lo scopo finale dell'analisi degli eventi estremi di vento è diretto alla valutazione degli eventi di moto ondoso ad essi correlati, si è adottato una metodologia opportunamente adattata a questo obiettivo.

Per questi settori è stata operata una selezione dei dati disponibili, costruendo con i massimi valori per ogni perturbazione atmosferica la serie di durata parziale dei valori estremi, per ciascuna di queste direzioni. Queste serie contengono quindi i massimi valori di velocità di eventi indipendenti, che risultano superiori ad una determinata soglia. Il valore limite considerato è quello relativo a velocità del vento di 10.7 m/s, corrispondenti a venti superiori a 21 nodi (venti pari a forza 6 della scala di Beaufort).

Si è quindi utilizzato un codice di calcolo inserito nel software ACES, dedicato all'analisi ed alla stima degli eventi estremi per vari tempi di ritorno.

Questo software è basato sull'approccio statistico sviluppato da Goda ((1988) che consiste nell'adattare cinque diverse distribuzioni di probabilità alla serie campione di eventi estremi significativi: si tratta delle distribuzioni di probabilità Fisher-Tippet I e di Weibull con coefficienti k pari a 0.75, 1.00, 1.40 e 2.00.

Il vettore di input è estratto dalla serie di osservazioni effettuate nei 17 anni di registrazioni.

I dati di input sono rappresentati dalle serie di durata parziale annuale, per ogni direzione individuata in precedenza, dei venti di intensità superiore ad una determinata soglia, che in questo caso è stata stabilita come già detto al di sopra di 21 nodi.

Le serie di durata parziale sono state elaborate con il codice di calcolo, producendo le cinque distribuzioni di probabilità precedentemente menzionate. La scelta della funzione di distribuzione di probabilità che meglio si adatta al campione a disposizione, tra quelle calcolate con il codice ACES, è effettuata attraverso l'utilizzo di due semplici criteri: il primo è legato all'analisi delle rappresentazioni grafiche dei risultati del calcolo (basta verificare quale curva di distribuzione di probabilità si sovrappone meglio alla linea che rappresenta la distribuzione del campione), mentre il secondo è dato dal migliore coefficiente di correlazione tra i dati ed il modello considerato: generalmente la distribuzione FT I è quella preferita nell'analisi di dati di vento. Infine è noto che, come regola generale è possibile estrapolare delle stime attendibili di intensità di velocità del vento per tempi di ritorno non superiori a 3 volte il numero di anni di osservazioni effettuate.

Nelle tabelle 2.10-2.23 sono riportati i risultati in output del programma. Nelle figure 2.16-2.29 sono riportate i grafici delle distribuzioni di probabilità adattate alle serie di durata parziale estratte dalla serie storica delle registrazioni, per ogni classe di direzione prescelta. Come è noto, adattando una distribuzione di probabilità ad un campione di dati consente di determinare una funzione attraverso cui è possibile estrapolare il valore estremo di una variabile per un assegnato tempo di ritorno.

Dall'esame qualitativo della distribuzione di frequenza percentuale dei venti forti registrati presso la stazione di Messina si è dedotto che l'andamento delle correnti è bimodale con i venti più forti e prevalenti provenienti dalla direzione Sud-SudOvest (che rappresenta il settore di traversia principale) e venti forti provenienti anche da Nord Nord-Est ma con frequenza d'apparizione inferiore (traversia secondaria). Pertanto è possibile individuare tre settori principali di provenienza dei venti: il settore Nord (Tramontana) compreso tra 340° - 20° , il settore Nord-Est (Grecale) compreso tra 30° - 40° , ed il settore Sud-Sud-Ovest (Mezzogiorno Libeccio) compreso tra 170° - 210° . Ai dati relativi al settore di mezzogiorno si adatta meglio la distribuzione di probabilità di Gumbel (Weibull $k=1.00$), al settore di Grecale si adatta la distribuzione di Weibull con $k=0.75$, mentre al settore di Maestrale-Tramontana si adatta meglio la distribuzione di Weibull $k=1.40$. Si assume come direzione rappresentativa del settore di traversia principale (Sud) la direzione di 200° N e come direzioni rappresentativa del settore secondario rispettivamente 350° N (settore Nord) e 40° N (settore Nord-Est).

Nella tabella 2.9 sono riportati i valori estremi della velocità del vento per le tre direzioni individuate in funzione dei tempi di ritorno prescelti attraverso l'utilizzo delle funzioni di distribuzioni di probabilità individuate mediante l'utilizzo del codice di calcolo ACES e dedotte dalle tabelle 2.10-2.23: sono evidenziati i valori di velocità del vento per un tempo di ritorno pari a 25 anni.

2.2.1.6 Analisi della serie di misure anemometriche della Stazione anemometrica di Reggio Calabria-Aeroporto (Stazione ENAV).

La stazione anemometrica di Reggio Calabria Aeroporto, collocata presso l'omonima aerostazione, è posta ad una quota di +11 m s.l.m.m (figura 1.28).



Figura 2.1 - Inquadramento geografico della stazione meteo AM di Reggio Calabria Aeroporto Porto (Fonte Google Earth)

(Fonte Google Earth)

Questo punto di rilevazione, ancora in funzione, fornisce delle registrazioni di dati anemometrici con cadenza trioraria. Nella raccolta di volumi ENEL-A.M. sono disponibili i risultati delle analisi effettuate sulla serie di dati registrati dal 1951 al 1977, che mostrano quanto il clima di vento rilevato presso questo sito risulti caratterizzato da una distribuzione bimodale, con elevate frequenze di apparizione dai due settori Nord e Libeccio (Figura 1.29) . La stazione, nel periodo sopra indicato, ha registrato come venti più frequenti quelli provenienti dal settore Nord (compreso tra le direzioni di Maestro e di Grecale) che si presentano anche con elevate intensità, sebbene i venti più forti siano risultati quelli di scirocco compresi nel settore tra Sud-Est e Sud.

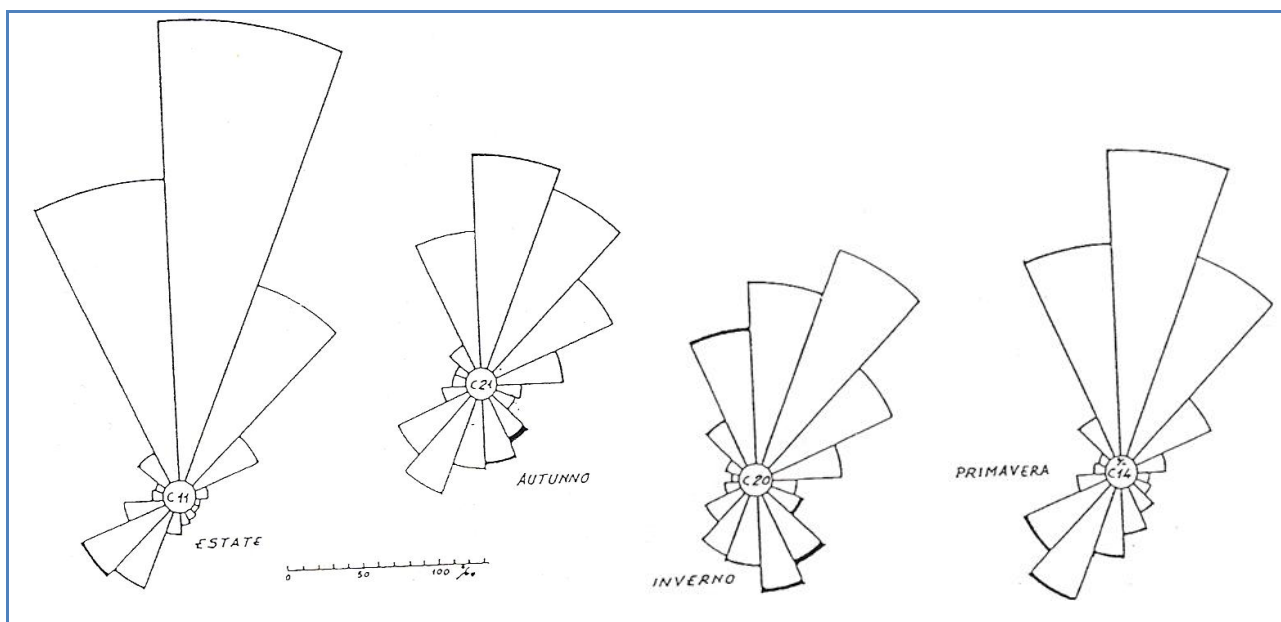


Figura 2.2 -Diagramma delle frequenze percentuali stagionali di vento presso la Stazione sinottica Aeronautica Militare di Reggio Calabria Aeroporto Periodo di registrazione 1951-1977

Di questa stazione di misura è disponibile anche la serie sinottica delle registrazioni anemometriche con cadenza oraria effettuate dal 01 gennaio 2006 fino al 31 dicembre 2014; la stazione registra la provenienza dei venti secondo le direzioni principali dei 16 settori di ampiezza pari a 22.50°, in cui viene generalmente suddivisa la rosa dei venti. La serie dati è stata sottoposta ad un'analisi preventiva di consistenza valutando, per ogni anno di registrazione, il numero di dati attesi, il numero di registrazioni mancanti, il numero di dati considerati errati e nulli, il rendimento annuale stabilito come il rapporto tra il numero di dati validi ed il numero di dati attesi, ed infine il numero di calme, considerando tali, i valori inferiori a 0.5 m/sec. I risultati di questa analisi sono riportati nella tabella 1.14.

Tabella 1.14. - Consistenza e rendimento annuale serie temporale di misure anemometriche della stazione di Reggio Calabria Aeroporto (Aeronautica Militare)

Anno	Numero registrazioni	Numero dati attesi	Numero dati mancanti	Numero dati nulli	Numero dati validi	Rendimento annuale	Calme V<0.5 m/sec
2006	7955	8760	805	1765	6190	70.66%	203
2007	7860	8760	900	1085	6775	77.34%	377
2008	7041	8784	1743	670	6371	72.53%	305
2009	6568	8760	2192	440	6128	69.95%	251
2010	6848	8760	1912	368	6480	73.97%	159
2011	6651	8760	2109	291	6360	72.60%	62
2012	6793	8784	1991	372	6421	73.10%	41
2013	6844	8760	1916	365	6479	73.96%	52
2014	6891	8760	1869	362	6529	74.53%	31

In Figura 1.30 è rappresentato l'istogramma delle percentuali di rendimento annuali della stazione di Reggio Aeroporto. Da questo grafico si evince che nel 2009 il rendimento dell'anemometro è stato inferiore al 70%, mentre nei restanti anni della serie sinottica lo strumento ha avuto un rendimento sempre sopra il 70%. Il rendimento complessivo della stazione nel periodo compreso tra il 2006 ed il 2014, espresso come il rapporto tra il numero totale degli eventi registrati depurati dai valori errati o nulli ed il numero di eventi teorici, è pari al 73,18%, per 9 anni di registrazioni. Il rendimento di questa stazione appare mediocre; pertanto, si ritiene questa fonte di dati poco affidabile per successive elaborazioni di tipo probabilistico; tuttavia l'analisi condotta su questa serie può risultare utile per il confronto con le rilevazioni effettuate sulle altre stazioni di misura.

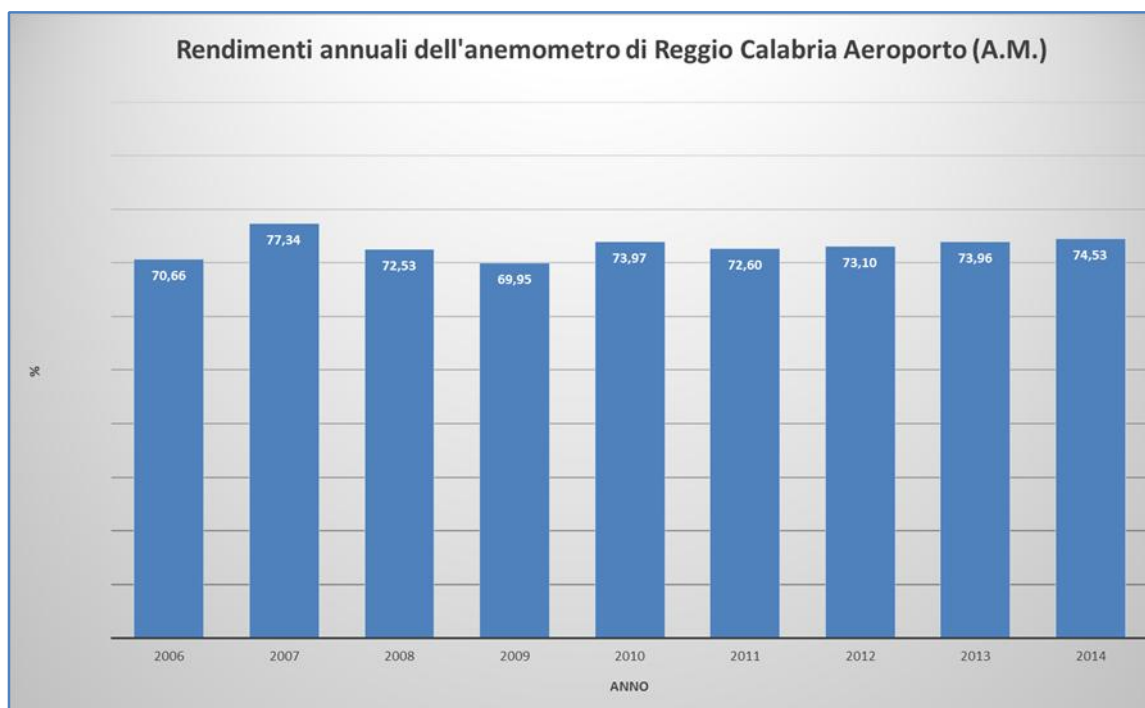


Figura 2.3 - Iistogramma delle percentuali di rendimento annuale della stazione anemometrica di Reggio Calabria Aeroporto (periodo di misura 2006-2014).

Sulla serie storica delle registrazioni della stazione di misura sono state eseguite delle elaborazioni, aventi lo scopo di studiare il clima anemologico caratteristico del paraggio; tali elaborazioni hanno riguardato le coppie di valori velocità media del vento-direzione media di provenienza del vento al suolo con lo scopo di calcolare le percentuali di apparizione di ciascuna coppia di valori nell'ambito di prefissate classi di appartenenza. Le calme sono state distinte facendo rientrare in tale classe ciascun evento caratterizzato da valori di velocità inferiori a 0,30 m/s.

L'analisi ha riguardato l'intero periodo di misura disponibile (2006 - 2014) attraverso una suddivisione degli eventi in classi di ampiezza definite secondo la scala Beaufort (v. tab. 1.6), per le velocità, e di 22.5°, per le direzioni.

I risultati ottenuti sono stati infine sintetizzati in forma grafica ("rose dei venti"); nella figura 1.31, è riportata la "rosa dei venti" annuale riferita all'intero periodo di osservazione. Nella figura 1.32 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza percentuale per classi di velocità del vento misurata in nodi.

Nella figura 1.33 sono riportate le rose dei venti annuali degli eventi registrati dalla stazione, suddivise rispettivamente secondo le classi di velocità $1 \leq V_v < 7$ nodi (il primo grafico) $7 \leq V_v < 17$ nodi (il secondo grafico), $17 \leq V_v < 28$ nodi (il terzo grafico) e $28 \leq V_v$ (il quarto grafico).

Nelle tabelle 1.14 e 1.15 sono riportate le distribuzioni dei dati di vento e della loro frequenza percentuale, per classi di direzione e di velocità del vento (secondo la scala di Beaufort).

In tabella 1.16 sono riportate le frequenze di apparizione annuale delle calme e dei venti deboli, moderati, forti e fortissimi, secondo la suddivisione in classi di velocità, precedentemente indicata.

Dall'analisi dei risultati si può dedurre che i venti registrati presso l'Aeroporto situato a sud di Reggio Calabria, caratterizzati da maggiore frequenza (venti regnanti), provengono prevalentemente dalla direzione di Tramontana, con percentuale di apparizione quasi del 40%; con minore frequenza, intorno a 10% degli eventi registrati, la stazione ha rilevato venti provenienti, sempre dal settore settentrionale, ma dalle direzioni di Grecale, Greco-Tramontana e Maestro-Tramontana. Anche dal settore meridionale (direzioni comprese tra 180° e 202.5°) la stazione registra l'apparizione di eventi, seppur con frequenza ancor più bassa dell'ordine del 5%.

In base a quanto rappresentato in figura 1.33 si deduce che il regime direzionale dei venti si mantiene pressoché inalterato sia per i venti deboli che per quelli moderati e forti, con venti più frequenti provenienti da Nord e apparizione più scarsa dei fenomeni provenienti da mezzogiorno.

Per quanto riguarda i venti fortissimi, questi si presentano sempre con maggiore frequenza da Tramontana, ma anche con frequenza apprezzabile da Libeccio-Mezzogiorno.

Rispetto al regime rilevato presso la stazione di Reggio Porto, la stazione situata presso l'Aeroporto è dunque caratterizzata da un clima di vento ancor più accentuatamente unidirezionale (direzione principale dei venti regnanti 0°N). Viceversa presso l'aeroporto sono totalmente assenti i venti sotto forma di brezza provenienti da Levante, rilevati più a Nord presso il porto. Infine i venti provenienti da Mezzogiorno sono rilevati con minore frequenza di apparizione presso la stazione di Reggio Aeroporto rispetto a quanto censito presso la stazione di Reggio Porto. Il confronto tra le rose dei venti delle due stazioni conferma che il clima anemologico caratteristico del versante calabrese dello Stretto di Messina è governato dai venti provenienti da Nord e che la direzione dei venti regnanti e dominanti è quella di tramontana (0°N).

Tabella 1.14. Distribuzione di frequenza annuale dei dati di vento rilevati presso la stazione di Reggio Calabria Aeroporto, per classi di direzione e di velocità del vento secondo la scala di Beaufort (Periodo 01.01.2006-31.12.2014).

		CLASSI DI VELOCITA'														
		Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64	
		V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118	
		V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6	
DIR °N	Classi Direzione															
0	348,75 11,25		113	76	1690	1710	1615	530	73	9	1		1		1	5819
22,5	11,25 33,75		100	76	1564	1304	1356	374	37	9					1	4821
45	33,75 56,25		56	48	794	648	742	181	29	6					1	2505
67,5	56,25 78,75		30	20	535	405	442	123	17							1572
90	78,75 101,25		20	10	272	226	222	59	18	2						829
112,5	101,25 123,75		27	21	367	359	344	100	16	1	1					1236
135	123,75 146,25		37	29	593	636	698	229	28	5						2255
157,5	146,25 168,75		72	42	974	964	1011	309	59	4	1					3436
180	168,75 191,25		50	38	969	1016	999	291	49	12	1				2	3427
202,5	191,25 213,75		45	38	654	629	614	191	47	5						2223
225	213,75 236,25		45	25	397	360	425	123	28	3						1406
247,5	236,25 258,75		20	13	226	211	226	79	18	1						794
270	258,75 281,25		9	9	139	125	143	33	13	0						471
292,5	281,25 303,75		15	13	283	227	227	61	10	0						836
315	303,75 326,25		52	41	1057	1250	1390	324	36	1	1					4152
337,5	345 355		476	274	5550	6306	7082	1980	249	25	1	1		1	1	21946
		CALME	1167													
		TOTALE	1167	773	16064	16376	17536	4987	727	83	6	1	1	1	6	57728
		FREQ. CUM.	1167	1940	18004	34380	51916	56903	57630	57713	57719	57720	57721	57722	57728	

Tabella 1.15. Distribuzione di frequenza percentuale annuale dati di vento rilevati presso la stazione di Reggio Calabria Aeroporto, per classi di direzione e di velocità del vento secondo la scala di Beaufort (Periodo 01.01.2006-31.12.2014).

		CLASSI DI VELOCITA'														
		Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64	
		V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118	
		V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6	
DIR °N	Classi Direzione														TOT.	
0	348,75 11,25	0,825	0,475	9,614	10,924	12,268	3,430	0,431	0,043	0,002	0,002		0,002	0,002		38,02
22,5	11,25 33,75	0,196	0,132	2,928	2,962	2,798	0,918	0,126	0,016	0,002		0,002		0,002		10,08
45	33,75 56,25	0,173	0,132	2,709	2,259	2,349	0,648	0,064	0,016					0,002		8,35
67,5	56,25 78,75	0,097	0,083	1,375	1,123	1,285	0,314	0,050	0,010					0,002		4,34
90	78,75 101,25	0,052	0,035	0,927	0,702	0,766	0,213	0,029								2,72
112,5	101,25 123,75	0,035	0,017	0,471	0,391	0,385	0,102	0,031	0,003							1,44
135	123,75 146,25	0,047	0,036	0,636	0,622	0,596	0,173	0,028	0,002	0,002						2,14
157,5	146,25 168,75	0,064	0,050	1,027	1,102	1,209	0,397	0,049	0,009							3,91
180	168,75 191,25	0,125	0,073	1,687	1,670	1,751	0,535	0,102	0,007	0,002						5,95
202,5	191,25 213,75	0,087	0,066	1,679	1,760	1,731	0,504	0,085	0,021	0,002				0,003		5,94
225	213,75 236,25	0,078	0,066	1,133	1,090	1,064	0,331	0,081	0,009							3,85
247,5	236,25 258,75	0,078	0,043	0,688	0,624	0,736	0,213	0,049	0,005							2,44
270	258,75 281,25	0,035	0,023	0,391	0,366	0,391	0,137	0,031	0,002							1,38
292,5	281,25 303,75	0,016	0,016	0,241	0,217	0,248	0,057	0,023								0,82
315	303,75 326,25	0,026	0,023	0,490	0,393	0,393	0,106	0,017								1,45
337,5	345 355	0,090	0,071	1,831	2,165	2,408	0,561	0,062	0,002	0,002						7,19
	CALME	2,022														
	TOTALE	2,022	1,339	27,827	28,368	30,377	8,639	1,259	0,144	0,010	0,002	0,002	0,002	0,002	0,010	100,0
	FREQ. CUM.	2,022	3,361	31,188	59,555	89,932	98,571	99,830	99,974	99,984	99,986	99,988	99,99	100,00		

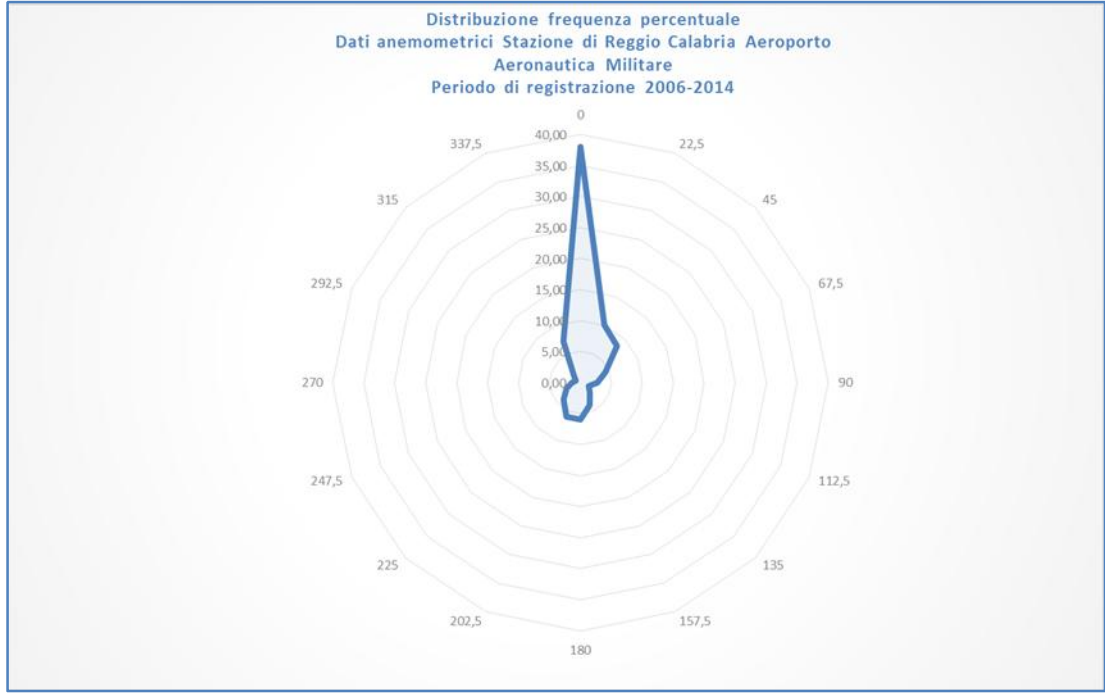


Figura 2.4 - - Stazione anemometrica di Reggio Calabria Aeroporto (A.M.):
 Diagramma polare della frequenza annuale del vento (Periodo di registrazione 2006-2014).

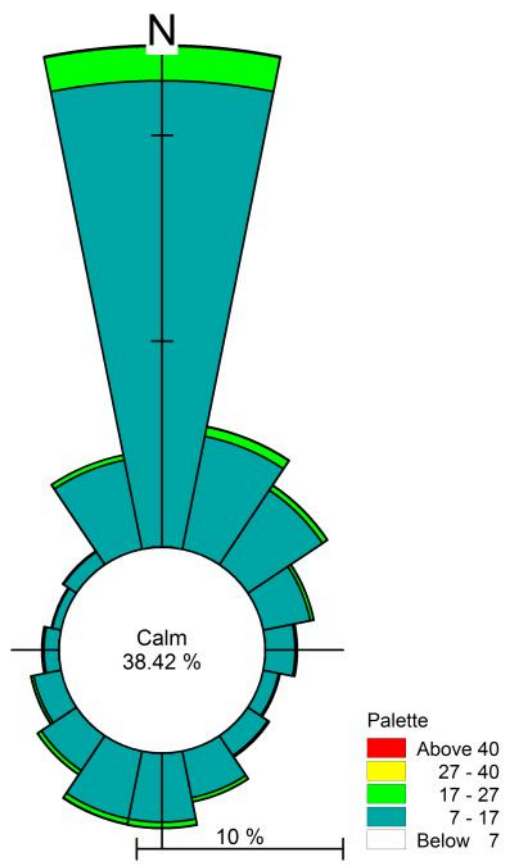


Figura 2.5 - Stazione anemometrica di Reggio Calabria Aeroporto:
 Rosa dei venti misurati in nodi (Periodo di registrazione 2006-2014).

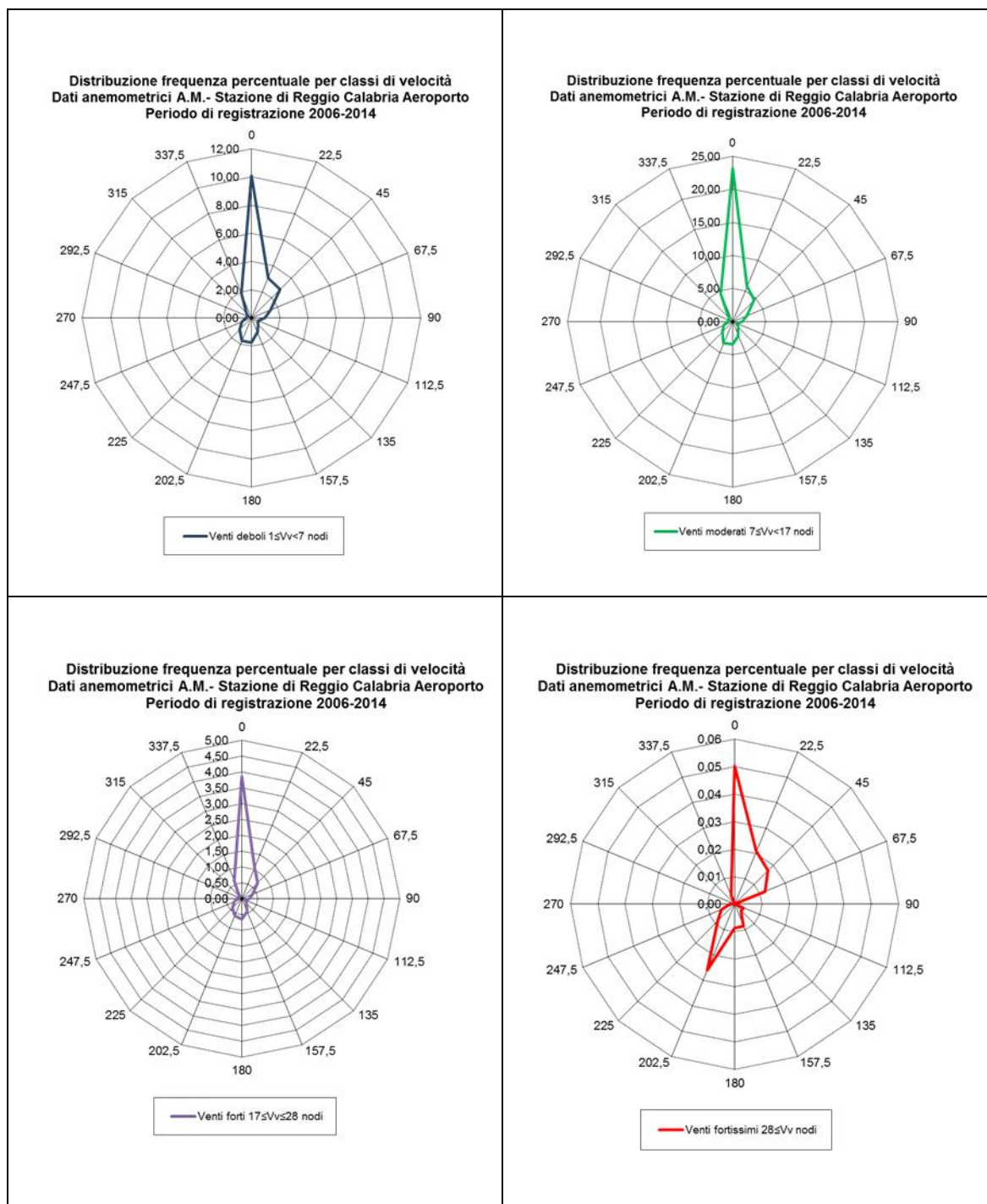


Figura 2.6 - Stazione anemometrica di Reggio Calabria Aeroporto (A.M.): diagramma polare della frequenza annuale del vento per classi di velocità deboli, moderate, forti e fortissime secondo la scala Beaufort (Periodo 2006-2014).

Tabella 1.16 – Frequenza di apparizione per classi di velocità stazione di Reggio Aeroporto.

Denominazione venti	Classi di velocità Vv (Nodi)	Frequenza di apparizione %
Calme	$1 < Vv$	2,02
Venti deboli	$1 \leq Vv < 7$	29,17
Venti moderati	$7 \leq Vv < 17$	58,74
Venti forti	$17 \leq Vv < 28$	9,90
Venti fortissimi	$28 \leq Vv$	0,17

2.2.1.7 Analisi della serie di misure anemometriche della Stazione di Capo dell'Armi (Posto semaforico della Marina Militare)

Il posto Semaforico della Marina Militare di Capo dell'Armi era situato su uno sperone roccioso della costa calabrese situato a sud di Reggio Calabria presso Melito Porto Salvo, ad una quota di + 126 m s.l.m..

I dati disponibili per questa stazione sono quelli divulgati nella pubblicazione di Eredia riferiti alle osservazioni effettuate negli anni 1900-1905 e quelli pubblicati nella raccolta di volumi dell'I.I.M. dedotti dalle 3 osservazioni giornaliere registrate nel periodo compreso tra il 1930 ed il 1942 e dal 1947 al 1956 per complessivi 22 anni di osservazioni.

Nella figura 1.34 sono riportate le frequenze medie in percentuali del vento espresso in scala Beaufort, e la distribuzione direzionale delle burrasche di vento aventi forza (7-12). Dalla rosa dei venti rappresentata in fig. 1.34 si deduce che il clima anemologico rilevato, è caratterizzato da un andamento bimodale, in quanto i venti regnanti (più frequenti) provengono sia dal 4° (direzioni Nord e Nord-Ovest) che dal 2° quadrante (direzioni di Sud-Est). All'aumentare dell'intensità del vento la bimodalità tende a diminuire a scapito del II° quadrante: i venti dominanti provengono prevalentemente dal 4° quadrante, con l'80% degli eventi con forza maggiore a 7 provenienti dalle direzioni di N e NW e solo il 15% da SE.

Sono quasi assenti le correnti dal I° Quadrante a causa dell'effetto schermante dell'orografia dovuto al Massiccio dell'Aspromonte: altrettanto bassa è la frequenza delle correnti da libeccio, probabilmente perché tali venti si mantengono più accostati alla costa siciliana nel loro moto verso l'imboccatura dello Stretto di Messina, forse per la presenza di una depressione barica sottovento ai Monti Peloritani che funge da richiamo a tali correnti.

In ogni stagione sono molto frequenti le correnti sciroccali da Sud-Est che si presentano in media per circa due mesi e mezzo all'anno (75 giorni).

L'elevata frequenza di venti provenienti da Nord è probabilmente dovuta al fatto che le correnti sul Tirreno Meridionale che provengono anche da Maestrale e da Ponente imboccano lo Stretto di Messina e sono piegate nella loro direzione verso sud dall'orografia per poi aprirsi a ventaglio a sud di Capo dell'Armi.

La stazione di Capo dell'Armi è molto interessante perché per la sua posizione permette di fare delle considerazioni e delle analisi del reale andamento delle correnti provenienti da Sud che si inoltrano successivamente nell'area dello Stretto di Messina.

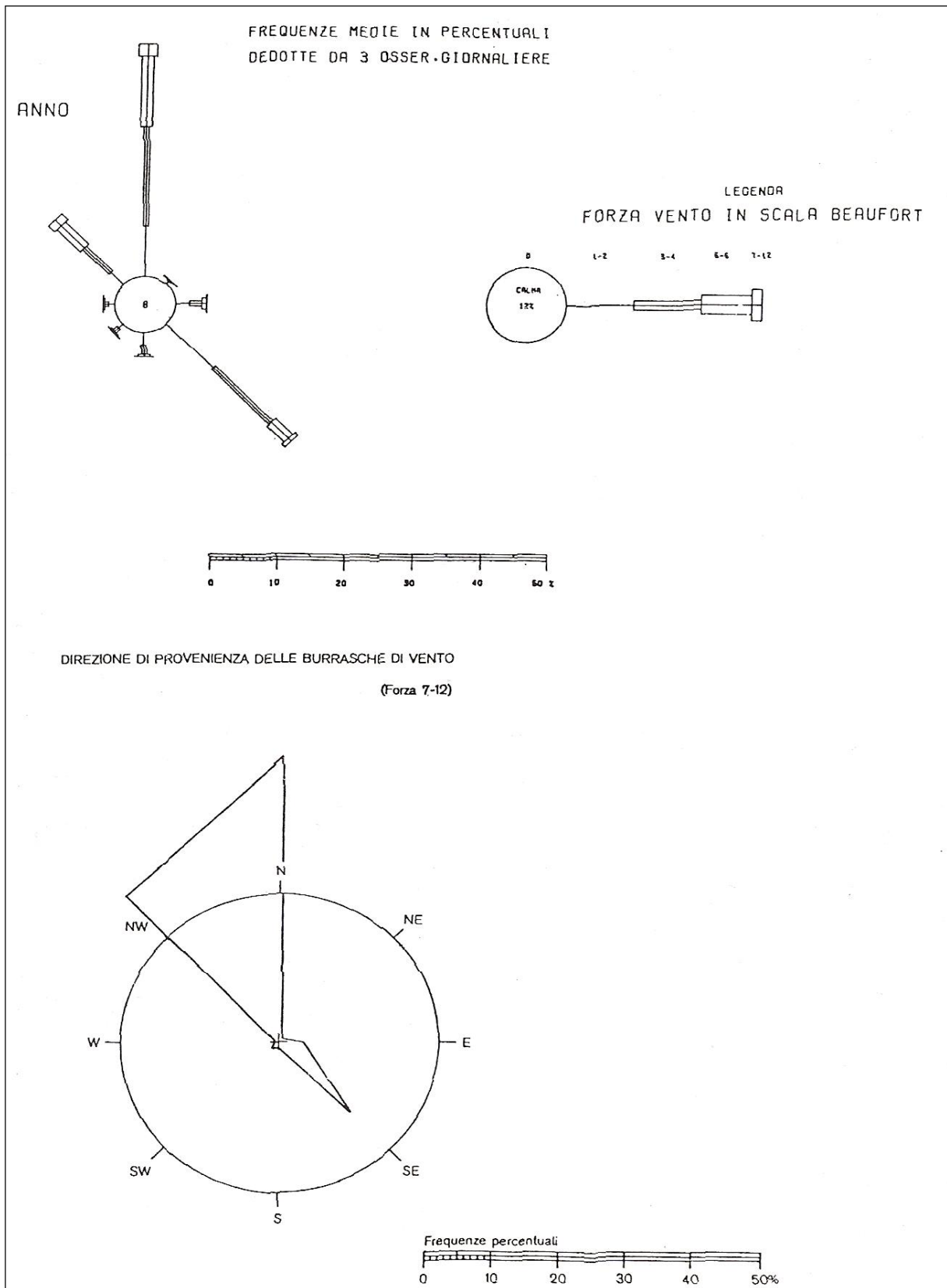


Figura 2.7 – Diagramma delle frequenze percentuali annuali di vento e delle percentuali di burrasche (Posto Semaforico di Capo dell'Armi - Periodo di misura 1930-1942 e 1947-1956).

2.2.1.8 Analisi della serie di misure anemometriche della Stazione di Capo Spartivento (Posto semaforico della Marina Militare)

La stazione di misura di Capo Spartivento era collocata ad una quota di 118 m sul mare all'estremità sud-orientale della costa calabrese.

I dati disponibili per questa stazione sono quelli divulgati nella pubblicazione di Eredia riferiti alle osservazioni effettuate negli anni 1900-1905 e quelli pubblicati nella raccolta di volumi dell'I.I.M. dedotti dalle 3 osservazioni giornaliere registrate nel periodo compreso tra il 1951-1977 per complessivi 31 anni di osservazioni.

Nella figura 1.35 sono riportate le frequenze medie in percentuali del vento espresso in scala *Beaufort*, e la distribuzione direzionale delle burrasche di vento aventi forza (7-12). Dalla rosa dei venti rappresentata in fig. 1.35 si deduce che il clima anemologico rilevato, è caratterizzato da venti regnanti (più frequenti) provenienti da Sud-Ovest e da Nord-Est che sono anche i più forti. Risultano in questo caso quasi del tutto assenti i venti da Sud-Est: ciò probabilmente è dovuto al fatto che le correnti sciroccali che spirano da Sud-Est al largo delle coste calabresi, incontrando il massiccio dell'Aspromonte scivolino lungo la costa calabrese e si presentino presso la stazione di Capo Spartivento da Ovest e Sud-Ovest. Parimenti la stazione registra con scarsa frequenza i venti provenienti da Nord-Ovest e da Nord perché la stazione è riparata dalle retrostanti montagne. I venti dal I° Quadrante si riconducono a situazioni di Grecale.

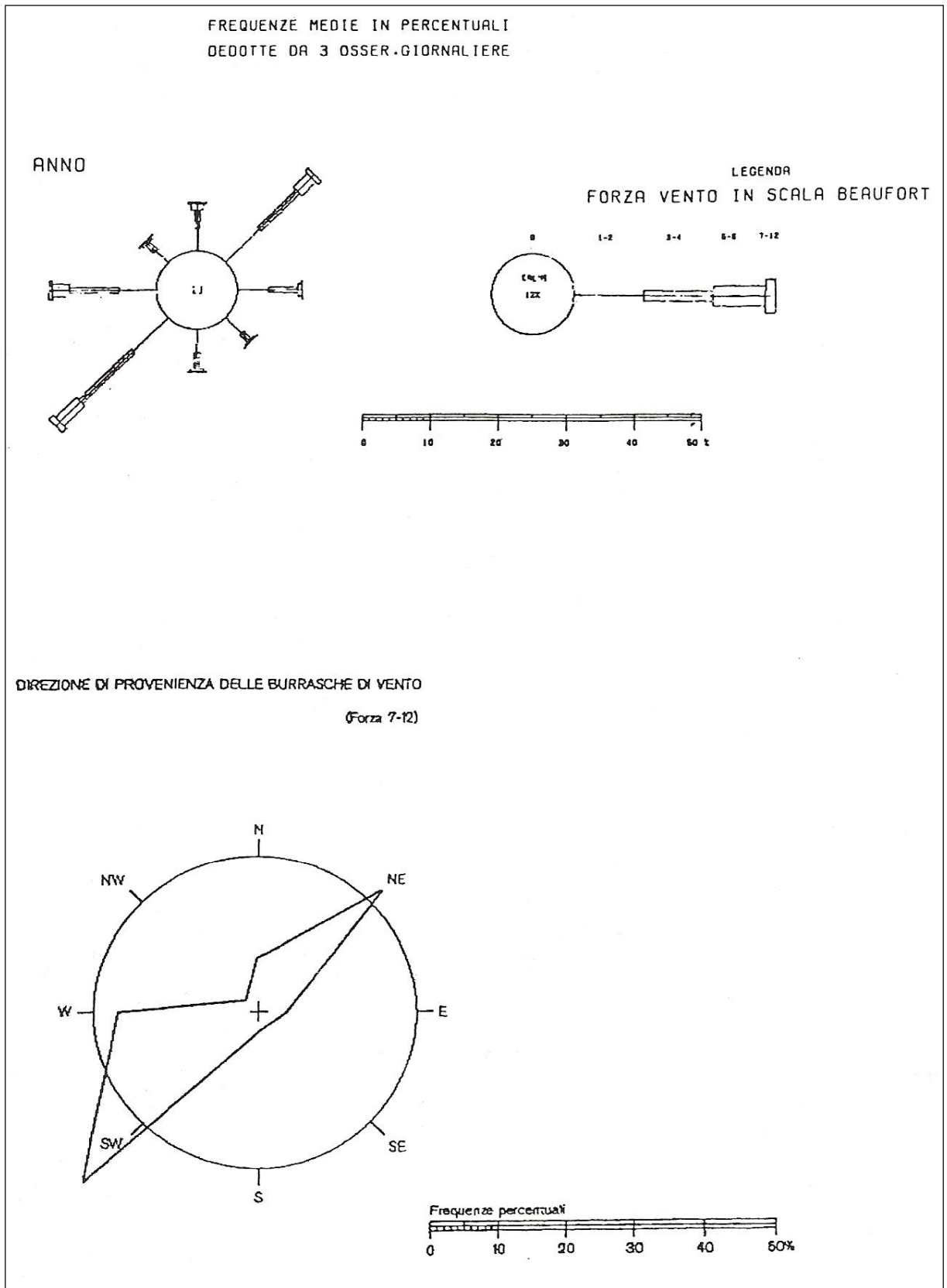


Figura 2.8 – Diagramma delle frequenze percentuali annuali di vento e delle percentuali di burrasche (Posto Semaforico di Capo Spartivento - Periodo di misura 1951-1977).

3. Regime delle maree ed analisi dei livelli

3.1 Premessa

Nel presente capitolo sono descritte le caratteristiche del regime delle maree nelle acque antistanti il sito oggetto del presente studio e sono analizzate tutte le possibili variazioni dei livelli rispetto al medio mare. Questo studio riveste una grande importanza per la corretta progettazione di opere marittime: infatti le variazioni del livello medio del mare influiscono sulla capacità delle strutture collocate in ambiente marino-costiero di sopportare le sollecitazioni delle mareggiate senza che siano arrecati significativi danneggiamenti, mantenendo l'integrità strutturale, e garantendo l'effettiva funzionalità dell'opera. Gli effetti che le variazioni del livello marino hanno sulle strutture sono direttamente legati alla diretta interazione con il moto ondoso in acque basse, specie laddove le onde sono vicine al punto di frangimento, così come il moto ondoso ha un'influenza diretta sull'altezza del livello marino, specie nella cosiddetta *surf zone* (la zona al di là del punto di frangimento) ove il cosiddetto fenomeno del *wave-setup* può innalzare notevolmente il livello locale del mare. Infine la conoscenza delle variazioni del livello marino è un parametro importante per la scelta della profondità minima in corrispondenza della quale collocare le strutture, affinché un'opera di difesa costiera non sia tracimabile. Le informazioni riportate sono relative alle condizioni su larga scala che si presentano nel tratto di mare antistante le coste calabresi dello Stretto di Messina.

3.2 Le maree astronomiche

In tutte le applicazioni dell'ingegneria marittima e costiera è necessario definire preliminarmente le condizioni di "esposizione" del sito di interesse rispetto a vento, moto ondoso, correnti, livelli marini. Le analisi di questi fattori meteomarini sono finalizzate a determinare:

- condizioni medie climatiche (analisi statistiche di osservazioni e misure pluriennali);
- condizioni estreme (analisi della probabilità di occorrenza, nel tempo, dell'evento meteomarino);

Limitando l'analisi al moto ondoso, una prima caratterizzazione delle potenziali condizioni di esposizione alle onde di un sito costiero viene effettuata in funzione della traversia geografica, individuando il settore angolare comprendente tutte le direzioni da cui possono arrivare le onde.

Questo settore di traversia viene suddiviso in:

- traversia principale, da dove possono provenire le mareggiate più violente;
- traversia secondaria, che include le direzioni associate a stati di mare minori.

Il paraggio costiero di Reggio Calabria Porto ricade sulla sponda calabrese dello Stretto di Messina, lungo il tratto di costa compreso tra Punta Pezzo a Nord e Punta Pellaro a Sud (v. freccia rossa di figura 1.1). Il tratto di litorale di interesse, localizzato subito a ridosso del piazzale settentrionale del porto di Reggio Calabria, riguarda da nord-nordovest fino a nordovest il litorale settentrionale della città di Messina compreso tra Ganzirri e la zona falcata. Da nordovest a sud-ovest il sito guarda la sponda messinese dello stretto di Messina fino a Taormina; da sud-ovest a sud-sudovest il paraggio guarda la costa del catanese fino al confine con la provincia di Siracusa.

Le maree sono le variazioni periodiche di livello della superficie del mare, ossia i movimenti verticali della massa liquida dovuti principalmente alle attrazioni gravitazionali che gli astri più vicini alla terra (Sole e Luna) esercitano sulla superficie liquida del nostro pianeta. In genere, queste variazioni del livello del mare, coincidono con il giorno lunare (24 ore, 52 minuti ca.), durante il quale si alternano due alte con due basse maree (la loro differenza determina l'ampiezza della marea). Per circa sei ore si ha il flusso (e cioè il livello del mare aumenta fino a giungere a una altezza massima, detta alta marea), quindi, dopo una sosta più o meno breve durante la quale il livello si mantiene invariato, segue il riflusso per il quale il livello diminuisce per circa sei ore, fino alla bassa marea, dopo una sosta ricomincia il flusso e il fenomeno si ripete con le medesime fasi.

Relativamente alla Terra, tenendo conto delle distanze e delle masse, solo il Sole e la Luna sono i corpi in grado di causare forze di marea apprezzabili; il sole benché più distante agisce per la sua enorme massa, la Luna pur essendo molto più piccola, per la breve distanza. La forza d'attrazione del Sole è tuttavia esplicita con un'intensità pari a meno della metà rispetto a quella della Luna. Pur essendo inferiore a quella della Luna, anche l'azione del Sole si esplica in modo analogo. Le forze di attrazione lunari e solari, possono però sommarsi o contrastarsi; maree sono più pronunciate in prossimità del novilunio e del plenilunio, perché quando il Sole, la Terra e la Luna si trovano allineati, cioè nelle sigizie, le azioni lunisolari si sommano e si raggiungono i massimi valori della marea (maree vive o sigiziali-spring tides); quando invece i centri del Sole e della Luna formano un angolo retto con quello della Terra, cioè nelle quadrature, le attrazioni lunisolari si annullano parzialmente e si hanno le minori oscillazioni del mare (maree morte-neap tides), che si verificano nel primo e nell'ultimo quarto lunare.

L'escursione reale delle maree si discosta notevolmente dal valore medio teorico di 60 cm, quale dovrebbe essere il rigonfiamento di una massa liquida uniforme, per effetto dell'attrazione della Luna e del Sole. In realtà il fenomeno risulta molto più complesso, in quanto entrano in gioco diversi fattori:

- gli oceani non ricoprono in modo uniforme il globo;
- il fenomeno è legato sia alla profondità e alla forma dei bacini marini, sia alla direzione e alla configurazione della linea di costa;
- esso dipende anche dall'effetto delle forze d'inerzia, dalle masse d'acqua e dal loro attrito sul fondo.

In generale si osservano due oscillazioni complete del mare durante un giorno lunare, avendosi un'alta e una bassa marea ogni 12 ore e 25 minuti (maree semidiurne). Tuttavia esistono delle zone in cui in un giorno lunare si manifesta un solo flusso e un solo riflusso (maree diurne), ed altre ancora in cui si hanno due alte e due basse maree ogni giorno lunare ma con ampiezza diversa (maree miste).

A causa dell'attrito col fondo e dell'attrito interno delle masse d'acqua, l'alta marea non si verifica esattamente quando la Luna culmina sul meridiano del luogo considerato, ma si può presentare con un certo ritardo che è costante per ogni singola località e che varia da punto a punto raggiungendo anche le 12 ore e che prende il nome di *ora di porto*. La conoscenza di tale ritardo è importante ai fini del traffico portuale; a questo scopo si effettuano le previsioni delle maree e si costruiscono delle carte su cui vengono disegnate le linee *isocotidiali*, luogo dei punti in cui l'alta marea si verifica nello stesso istante con lo stesso ritardo rispetto al passaggio della Luna su un meridiano prefissato (di solito Greenwich). Ogni linea è contraddistinta da un numero che indica appunto l'ora di porto. Una caratteristica delle carte cotidali è la presenza di punti per i quali passano tutte le curve cotidali; in questi punti, chiamati *anfidromici*, l'escursione della marea è nulla perché vi interferiscono maree opposte. In pratica, in corrispondenza dei punti anfidromici il livello del mare si mantiene costante, cioè

le maree non si verificano affatto, e da essi si irradiano le cotidali lungo le quali, invece, l'ampiezza di marea, ossia la variazione del livello del mare, aumenta progressivamente. Nel Mediterraneo, tali punti sono ubicati nel Canale di Sicilia, nel Mare Egeo, nell'Adriatico e nello Stretto di Messina.

La spiegazione più valida del diverso comportamento delle maree nelle varie zone del globo viene fornita dalla *teoria dell'onda stazionaria o teoria dell'onda oscillante*. Essa si basa sul concetto che i vari oceani e i mari più grandi sono suddivisi, dalla configurazione irregolare del fondo, in diversi bacini (ad es., nel Mar Mediterraneo si possono individuare un bacino occidentale uno orientale ed altri minori, come l'Adriatico); in ognuno di questi bacini di marea la massa d'acqua oscilla per effetto delle forze lunisolari, ma con ampiezza e periodo che dipendono dalla forma e dalle dimensioni di ciascun bacino. L'oscillazione possiede anche un moto circolare impartito dalla rotazione terrestre (forza di *Coriolis*), che fa girare l'alta marea in senso antiorario nel nostro emisfero attorno ai punti nodali anfidromici.

3.3 Le oscillazioni delle maree nello Stretto di Messina

Le oscillazioni di marea nello stretto di Messina sono certamente legate alla diversa escursione dei livelli che caratterizza i due mari, Tirreno ed Ionio, messi in comunicazione da questo canale; infatti nei due mari la marea, almeno nelle sue componenti principali risulta in opposizione di fase.

Proprio l'opposizione di fase nei due bacini comunicanti attraverso lo Stretto di Messina porta a far sì che le maree semidiurne presentino un nodo anfidromico (punto in cui le escursioni di marea si annullano) posto a circa 3 miglia marine NE dal porto di Messina e circa ad un miglio di distanza a Nord Ovest dal porto di Villa S. Giovanni, in posizione centrale rispetto al braccio di mare che separa le due sponde dello stretto di Messina proprio di fronte al sito di progetto, con linee cotidali che ruotano intorno ad esso in senso orario (si veda la figura 3.1). L'effetto risultante all'interno dello stretto è quindi l'anfidromia, cioè la rotazione dell'onda di marea attorno al nodo posto di fronte Punta Pezzo. L'alta marea percorre le coste in senso antiorario completando il giro in 12 ore, proprio perché la componente principale di marea (rappresentata da quella semidiurna M2), presenta una differenza di fase fra i due limiti Nord e Sud dello Stretto di circa 180°.

Lungo tutta la costa tirrenica della provincia di Messina ed ugualmente all'interno dello Stretto di Messina, le componenti principali della marea sono quelle semi-giornaliere, così come si evince osservando i valori delle costanti armoniche della marea relative alle stazioni di Messina Porto e di Messina Capo Peloro, pubblicate nella Tavola delle Maree, Mediterraneo – Mar Rosso dell'Istituto Idrografico Della Marina, Italia, e riportate rispettivamente nella tabella 3.1 e 3.2.

Dalle stesse costanti armoniche è possibile dedurre l'opposizione di fase delle maree nei due mari Tirreno ed Ionio.

Altro contributo non trascurabile al moto mareale è rappresentato dalla componente diurna K1, che presenta una differenza di fase tra i due limiti dello Stretto di 50°-60°, ed è caratterizzata da ampiezza comunque inferiore a quella della M2. Come indicato da Mosetti (1988), la corrente diurna è pari a circa 1/4 di quella semidiurna

L'analisi in frequenza condotta sulle registrazioni dei mareografi di Messina riportate nel predetto volume ha mostrato come le componenti della marea di ampiezza significativa siano quelle riportate nelle Tabelle 3.1 e 3.2.

Tabella 3.1 - Costanti armoniche della componente astronomica della marea nel porto di Messina riportate nella pubblicazione "Tavola delle maree della Marina, Volume 2, Europa – Mar Mediterraneo e Oceano Atlantico"

Componente Armonica	Periodo [h min]	Ampiezza H [cm]	Fase ϕ [°]
M2	12h 25' 14.16"	5.0	31
S2	12h 00' 00.00"	3.0	56
K1	23h 56' 04.08"	1.0	290
O1	25h 49' 09.64"	1.0	65

Tabella 3.2 - Costanti armoniche della componente astronomica della marea di Capo Peloro Messina riportate nella pubblicazione "Tavola delle maree della Marina, Volume 2, Europa – Mar Mediterraneo e Oceano Atlantico"

Componente Armonica	Periodo [h min]	Ampiezza h [cm]	Fase ϕ [°]
M2	12h 25' 14.16"	5.0	267
S2	12h 00' 00.00"	3.0	313
K1	23h 56' 04.08"	2.0	231
O1	25h 49' 09.64"	1.0	249

Nelle tabelle 3.1 e 3.2, H è l'ampiezza della componente armonica mentre ϕ è la sua fase. M2 e S2 sono le componenti semigiornaliere, avendo considerato un periodo approssimativo di 12 ore, mentre O1 and K1 sono le componenti giornaliere per un periodo di circa 24 ore.

L'analisi delle tavole di marea consente di esplicitare per la componente astronomica, riferita al porto di Messina, un'ampiezza massima dell'oscillazione pari a 60 cm con un valore massimo di alta marea di 40 cm (marea di sigizie) ed un valore minimo di bassa marea di -20 cm.

L'analisi delle tavole di marea dell'IIMM consente di esplicitare per la componente astronomica, riferita al porto di Reggio Calabria, un'ampiezza massima dell'oscillazione pari a 70 cm con un valore massimo di alta marea di 50 cm (marea di sigizie) ed un valore minimo di bassa marea di -20 cm.

Inoltre, poiché i mareografi di Messina e Reggio sono ubicati all'interno di aree portuali protette dal moto ondoso, le misure esaminate non risentono dell'innalzamento del livello del mare dovuto al frangimento delle onde (wave setup).

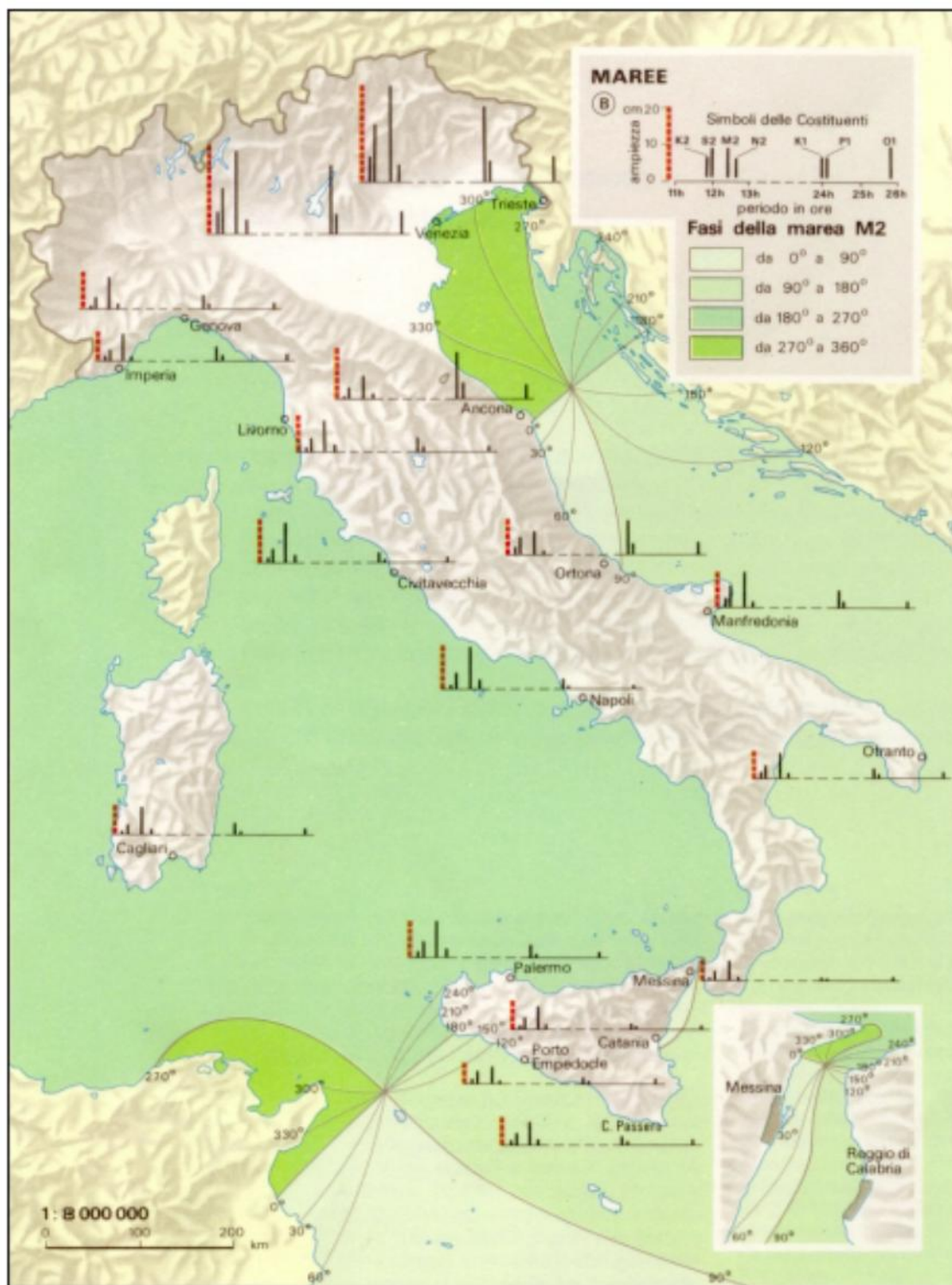


Figura 3.1 – Tavole di marea dei mari italiani.

3.4 Le maree astronomiche risultanti dall’analisi delle registrazioni dei mareografi di Messina e Reggio

L’ISPRA gestisce nei mari italiani la Rete Mareografica Nazionale: tale network di osservazione è composto di 33 stazioni di misura uniformemente distribuite sul territorio nazionale ed ubicate prevalentemente all’interno delle strutture portuali. In ognuna di queste stazioni sono monitorati i seguenti parametri: livello del mare, temperatura dell’acqua e dell’aria, pressione atmosferica, direzione e velocità del

vento. All'interno dello stretto di Messina sono collocate due stazioni di misura appartenenti a questa rete mareografica: la stazione di misura di Messina operativa nell'ambito del RMN dal 1998, ma di cui sono disponibili le registrazioni di livello di stazioni già esistenti prima del subentro del nuovo organismo dal 13.03.1992 e la stazione di Reggio Calabria anch'essa gestita dalla RMN dal 1998.

In figura 3.2-3.3 sono riportate le monografie delle stazioni mareografiche ricadenti all'interno del bacino dello Stretto di Messina e collocate rispettivamente nei porti di Messina e Reggio Calabria, estratte dal sito www.mareografico.it dell'ISPRA.

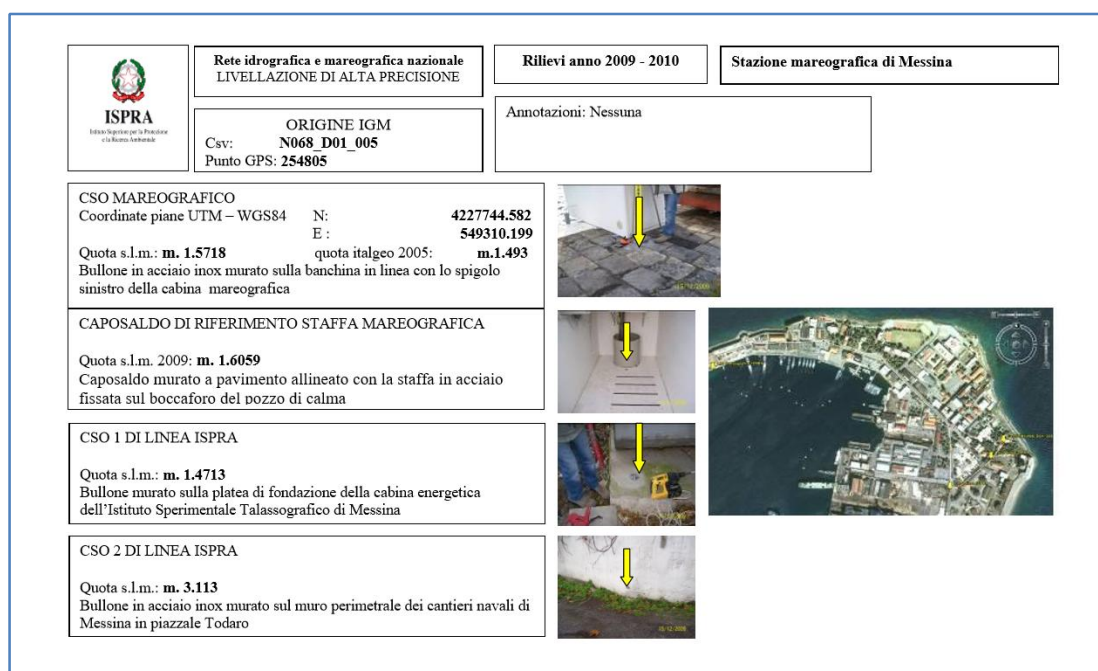


Figura 3.2 – Monografia della stazione mareografica di Messina (estratta dal sito Internet dell'ISPRA).

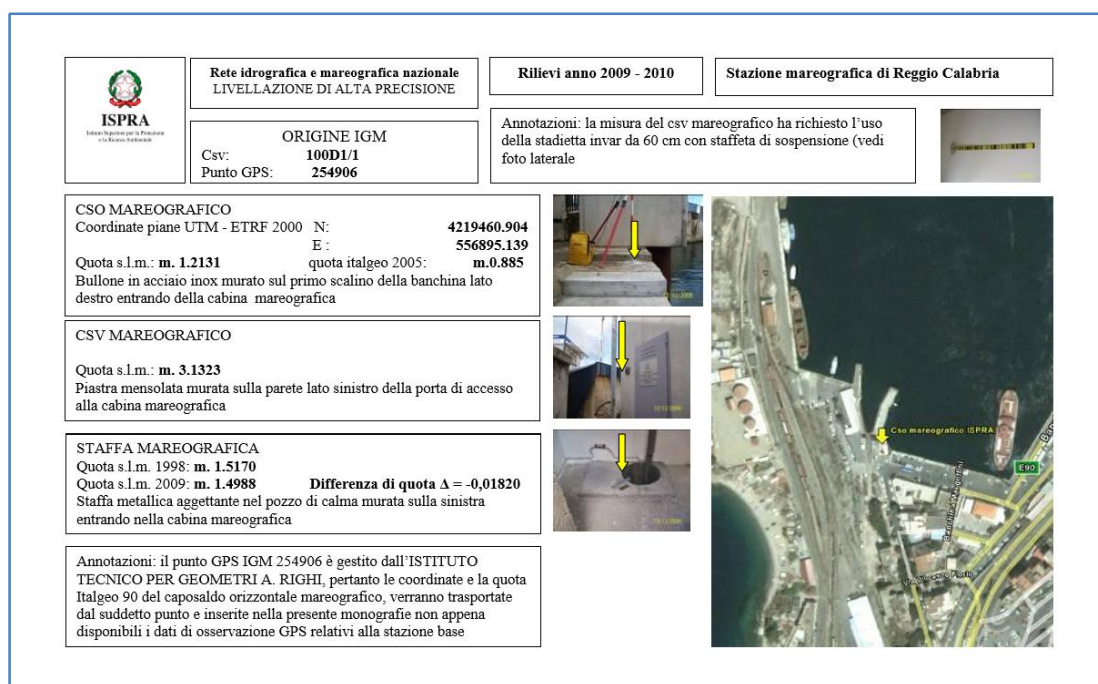


Figura 3.3 – Monografia della stazione mareografica di Reggio Calabria (estratta dal sito Internet dell'ISPRA).

Secondo il metodo dell'analisi armonica, la marea astronomica in un determinato luogo può essere calcolata come sovrapposizione di oscillazioni sinusoidali, ciascuna caratterizzata da una propria ampiezza e fase.

Per calcolare la marea astronomica in una determinata località, si utilizza lo sviluppo della marea in componenti armoniche. Si assume cioè che il livello ad un certo istante t si ottenga come somma di più onde sinusoidali del tipo $A \cos(\omega t - \varphi)$, dove A , ω e φ sono caratteristiche della particolare componente: A è l'ampiezza, ω la velocità angolare (o pulsazione), e φ il ritardo di fase. A questa somma si aggiunge, il livello medio di riferimento osservato nel periodo indicato.

L'Ispra, a partire dal 2001, fornisce anche il servizio dell'analisi di marea e delle elaborazioni parametriche per le stazioni delle RMN: nell'archivio messo a disposizione da questo ente sono contenuti i risultati delle analisi per la determinazione delle componenti armoniche costituenti la marea fino all'anno 2014. Tali risultati sono disponibili per le stazioni di Messina e Reggio Calabria per il periodo compreso tra il 2001 ed il 2014.

Utilizzando i dati delle analisi armoniche sul periodo di disponibilità delle analisi è possibile dedurre i valori caratteristici delle costanti armoniche delle maree nei siti presi in esame, che sono riportati nelle tabelle 3.3 (Messina) e 3.4 (Reggio Calabria).

Tabella 3.3. Componenti armoniche marea Messina

	M2 Lunare semidiurna principale	S2 Solare semidiurna principale	N2 Lunare semidiurna ellittica magg.	K2 lunisolare declinaz. semidiurna	K1 lunisolare declinaz. diurna	O1 Lunare diurna principale	P1 Solare diurna principale	M4 Sovra marea Quarto diurna	MS4 Composta Quarto diurna
A (cm)	5,00	2,67	0,76	0,83	0,70	0,87	0,16	1,45	1,11
Fase °	323,79	347,26	314,27	339,97	253,93	36,87	313,49	170,88	195,97

Tabella 3.4. Componenti armoniche marea Reggio Calabria

	M2 Lunare semidiurna principale	S2 Solare semidiurna principale	N2 Lunare semidiurna ellittica magg.	K2 lunisolare declinaz. semidiurna	K1 lunisolare declinaz. diurna	O1 Lunare diurna principale	P1 Solare diurna principale	M4 Sovra marea Quarto diurna	MS4 Composta Quarto diurna
A (cm)	6,38	3,01	1,17	0,96	1,38	1,03	0,60	0,56	0,33
Fase °	34,61	37,91	37,26	31,78	23,46	31,49	16,09	305,71	320,93

3.5 LE VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO PER CAUSE METEOROLOGICHE

Le variazioni del livello del mare possono essere determinate in conseguenza a variazioni repentine della pressione atmosferica determinate dalla presenza sull'area in esame di sistemi ciclonici (basse pressioni) che determinano degli innalzamenti o dalla presenza di aree anticicloniche (alte pressioni), cui fanno seguito degli abbassamenti del livello. Tali tipi di variazioni vengono definiti sopralzo barico. In alcune circostanze sotto-costa può verificarsi un innalzamento indotto dall'azione dei venti foranei.

3.5.1 Sopralzo barico

L'escursione di livello è pari a 0.01 m per ogni millibar di scostamento barico dal valore medio atmosferico (pari a 1013 mb).

Per valutare i valori massimi di variazione del livello medio marino si sono, dunque, ricercati i minimi e i massimi valori barometrici registrati nella zona. In particolare si sono utilizzati i valori forniti dalla stazione meteorologica della Rete Mareografica Nazionale sita presso il porto di Reggio Calabria, di cui in Fig. 3.4 se ne riporta la registrazione nel periodo gennaio 1999 - dicembre 2015.

Il massimo valore rilevato è risultato di 1039 mb, cui corrisponde un abbassamento locale del livello marino pari a 26 cm; mentre il livello barometrico minimo registrato è di 981 mb, cui corrisponde un innalzamento del livello medio marino di 32 cm.

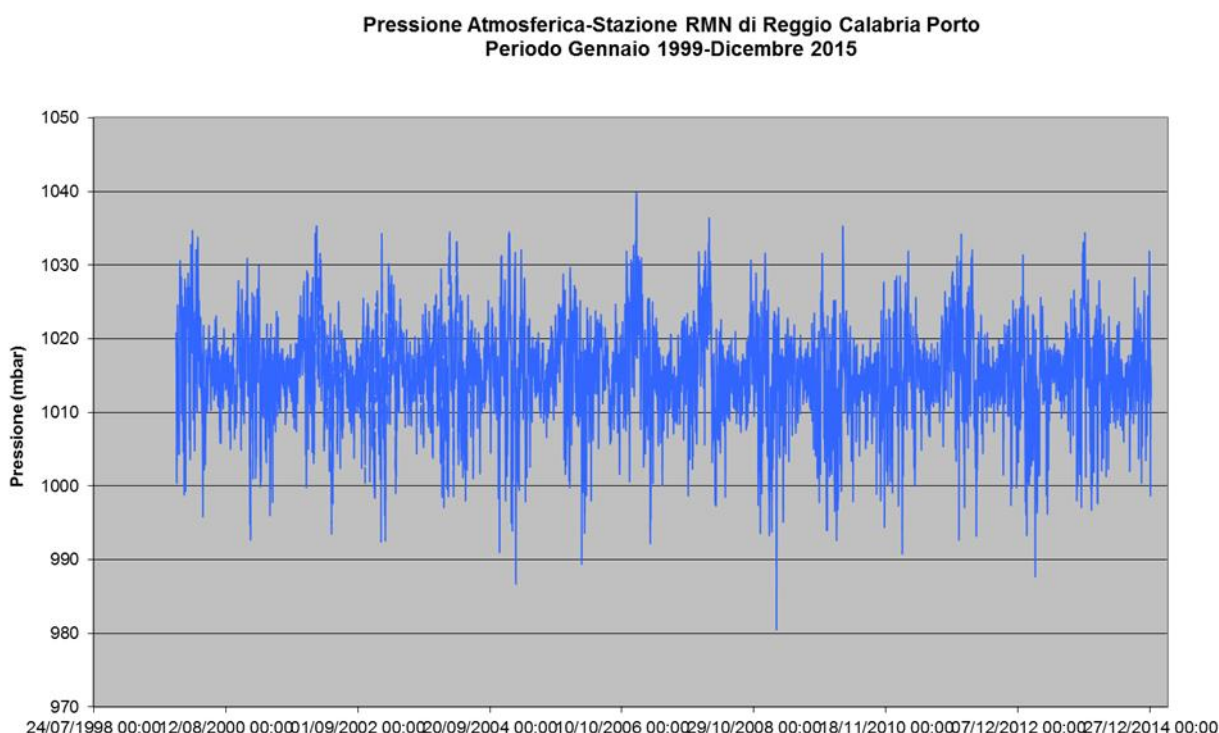


Figura 3.4– Pressione atmosferica registrata nel periodo gennaio 1999- dicembre 2014 dalla stazione della Rete Mareografica Italiana sita nel porto di Reggio Calabria.

3.5.2 Sopralzo di vento

Il calcolo del sopralzo determinato dal vento può essere determinato mediante la seguente relazione:

$$S = \frac{K_p \cdot L_p \cdot U^2}{g(D - d - S)} \cdot \ln\left(\frac{D}{d + S}\right) \quad (3.1)$$

ove:

- D= profondità limite della piattaforma continentale assunta pari a 200 m;
- L_p = estensione della piattaforma continentale (assunta pari a 1400 m per i fondali antistanti Reggio Calabria);
- K_p = 3×10⁻⁶;
- g= 9.81 m/s²;
- U= velocità del vento estremo posta pari a 25 m/s;
- d= profondità sotto costa posta pari a -10 m (prima dei frangenti);

Applicando la (3.1) si ottiene che il sopralzo per effetto del vento è stimabile in 1 cm e pertanto può essere ritenuto trascurabile.

3.5.3 Le variazioni totali teoriche del livello marino sotto-costa nello Stretto di Messina

In definitiva l'escursione totale massima del livello marino per il tratto di mare antistante il porto di Messina, per effetto combinato delle maree astronomiche del sopralzo barico ed in presenza del fenomeno indotto dai venti conosciuto come "marrobbio"), può essere calcolata assumendo che la probabilità del verificarsi di tutti i fenomeni in contemporanea porti ad una riduzione del 25% della somma di tutti i contributi di variazione del livello del mare. Quindi il sopralzo totale è stimabile in:

$$St = 0.75(0.50 + 0.32 + 0.01) = 0.62 \text{ m}$$

Si evidenzia che la variazione del livello medio marino in condizione di mareggiata è fortemente influenzata, in prossimità della linea di riva, anche da un altro fenomeno comunemente indicato con "wave setup" (sopralzo dovuto al moto ondoso frangente). Tale sopralzo, dipendente sia dalle caratteristiche delle onde frangenti (altezza, periodo e direzione) che dalla batimetria dei fondali, può assumere valori considerevoli dell'ordine del 10-20% dell'altezza d'onda al frangimento. Pertanto il valore estremo indicato in precedenza può essere assunto come valido solo per l'area esterna alla zona di frangimento.

3.6 MISURE DI LIVELLI DISPONIBILI

Nell'area dello Stretto sono disponibili le registrazioni dei livelli del mare presso le due stazioni misura della RMN, situate presso Messina Porto e presso Reggio Calabria, rispettivamente sulla sponda siciliana e quella calabrese. Di seguito si riporta la descrizione e l'analisi delle serie di registrazioni effettuate presso queste due stazioni, di cui si fornisce anche la descrizione sommaria della strumentazione.

3.6.1 Stazione Rete Mareografica Nazionale di Messina

La stazione mareografica di Messina rileva dati del livello del mare con strumentazioni diverse e con rendimenti alterni a partire dal 1897 quando fu installato un mareografo del tipo Mati-Ricci, che funzionò fino al 1922, con una breve interruzione a cavallo del 1908, a causa del terremoto. Nel luglio 1957 fu installato un nuovo mareografo del tipo Mod. M450 lagunare in corrispondenza del lato Sud del Pontile Libia. Nel 1960 il mareografo è stato spostato alla base del molo Norimberga (lato ponente) alle spalle della stazione Marittima FS, nell'area esterna al manufatto, ed ha cominciato a fornire delle misurazioni a partire dal maggio dello stesso anno con il mareografo meccanico a registrazione cartacea gestito dal Genio Civile Opere Marittime. A partire dal 1986 la stazione è stata strutturata all'interno della rete impiantata dal Ministero dei Lavori Pubblici su una parte di installazioni già esistenti, dotandola di un nuovo mareografo modello SM3810 della ditta SIAP di tipo elettronico a galleggiante con registrazione locale in memoria EPROM.

Nel 1989, con l'entrata in vigore della legge n° 183 sulla difesa del suolo, le competenze in materia di mareografia sono state trasferite alla Presidenza del Consiglio dei Ministri, e nello specifico al Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale. A partire dal 1998 l'ultima rete mareografica, impiantata nel 1986 dal Ministero dei Lavori Pubblici su una parte di installazioni già esistenti, cessa l'attività per essere sostituita da quella della Presidenza del Consiglio dei Ministri, Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale. Questa nuova rete ha adottato tecnologie moderne per le misurazioni ed il monitoraggio e la verifica delle stesse strumentazioni. La stazione di Messina inglobata all'interno della nuova Rete Mareografica ha anch'essa subito un aggiornamento della strumentazione di rilevamento.



Figura 3.6 – Stazione di misura mareografica di Messina.

La nuova stazione di Messina (fig 3.6) è composta da due strumenti di misura della marea: uno (principale) ad ultrasuoni con guida tubolare del fascio e compensazione di temperatura, ed uno (secondario) a galleggiante e registrazione cartacea per la verifica puntuale delle misure, l'analisi di eventi o fenomeni particolari ed il recupero dei dati nei casi di mancato funzionamento dello strumento principale. Il mareografo è riferito ad un caposaldo quotato con livellazione di alta precisione, opportunamente verificato su di un caposaldo IGM. La stazione è dotata a partire dal 1998 anche di un sensore anemometrico (velocità e direzione del vento a 10 metri dal suolo), di un sensore barometrico, di un sensore di temperatura dell'aria e di un sensore di temperatura dell'acqua. L'anemometro è collocato presso la Base Comando Militare Marittimo Autonomo della Sicilia.

Dalla data del 06/12/09 il valore che compare con la denominazione "livello idrometrico" viene misurato con un nuovo sensore radar denominato SIAP+MICROS TLR con precisione millimetrica. ISPRA garantisce l'uniformità della misura con la serie di dati precedenti a tale data prodotti con il sensore SIAP+MICROS ID0710 basato su un trasduttore ad ultrasuoni avendone verificato il preciso allineamento.

I livelli di marea misurati presso la stazione sono il risultato della combinazione tra le oscillazioni dovute alla marea astronomica (funzione della posizione relativa della terra, della luna e del sole) e le oscillazioni dovute alle variazioni della pressione atmosferica (marea barometrica) e all'azione del vento (wind setup). Poiché lo stazione di misura di Messina è ubicata all'interno dell'area portuale protetta dal moto ondoso, la misura non comprende l'innalzamento del livello del mare dovuto al frangimento delle onde (wave setup).

Il periodo di misura della stazione di Messina va dal 20.03.1992 ad oggi, con una durata della serie storica di circa 23 anni. Nella figura 3.7 è riportato l'andamento del rendimento annuale delle stazioni di misura (percentuale degli eventi misurati nell'arco di un anno rispetto a quelli teorici). Si evidenzia che il rendimento annuale della stazione di Messina risulta notevolmente basso per buona parte della serie storica (fino al 1999), e successivamente, con il cambio di strumentazione, il rendimento sale notevolmente attestandosi su valori oscillanti intorno al 99%. In media il rendimento della serie storica risulta discreto e pari a circa il 78%.

Nella Tabella 3.5 sono riportati per ciascun anno il numero di dati attesi il numero di dati rilevati, il numero di dati utili, i dati mancanti ed il rendimento percentuale. In figura 88 è rappresentato il grafico ad istogramma dei rendimenti medi annuali.

Tabella 3.5 – Rendimenti medi annuali della stazione mareografica di Messina.

Anno	Numero dati attesi	Numero dati rilevati	Dati validi	Dati nulli	Dati mancanti	Rendimento %
1992	6888	6873	6042	831	846	87.72
1993	8760	8336	3992	4344	4768	45.57
1994	8760	3407	3407	0	5353	38.89
1995	8760	1873	1854	19	6906	21.16
1996	8784	4181	4167	14	4617	47.44
1997	8760	2997	2988	9	5772	34.11
1998	8760	8014	2603	5411	6157	29.71
1999	52560	48290	27433	20857	25127	52.19
2000	52704	49281	46027	3254	6677	87.33
2001	52560	52486	52486	0	74	99.86
2002	52560	52558	52558	0	2	99.996
2003	52560	52507	52507	0	53	99.90
2004	52704	52700	52700	0	4	99.99
2005	52560	52521	52436	85	124	99.76
2006	52560	52552	52106	446	454	99.14
2007	52560	52560	52560	0	0	100.00
2008	52704	51967	51967	0	737	98.60
2009	52560	52102	52102	0	458	99.13
2010	8760	8721	6721	2000	2039	76.72

2011	52560	39216	39203	13	13357	74.59
2012	52704	52382	52358	24	346	99.34
2013	52560	52404	52308	96	252	99.52
2014	52560	52559	52235	324	325	99.38

Rendimento annuale del mareografo di Messina

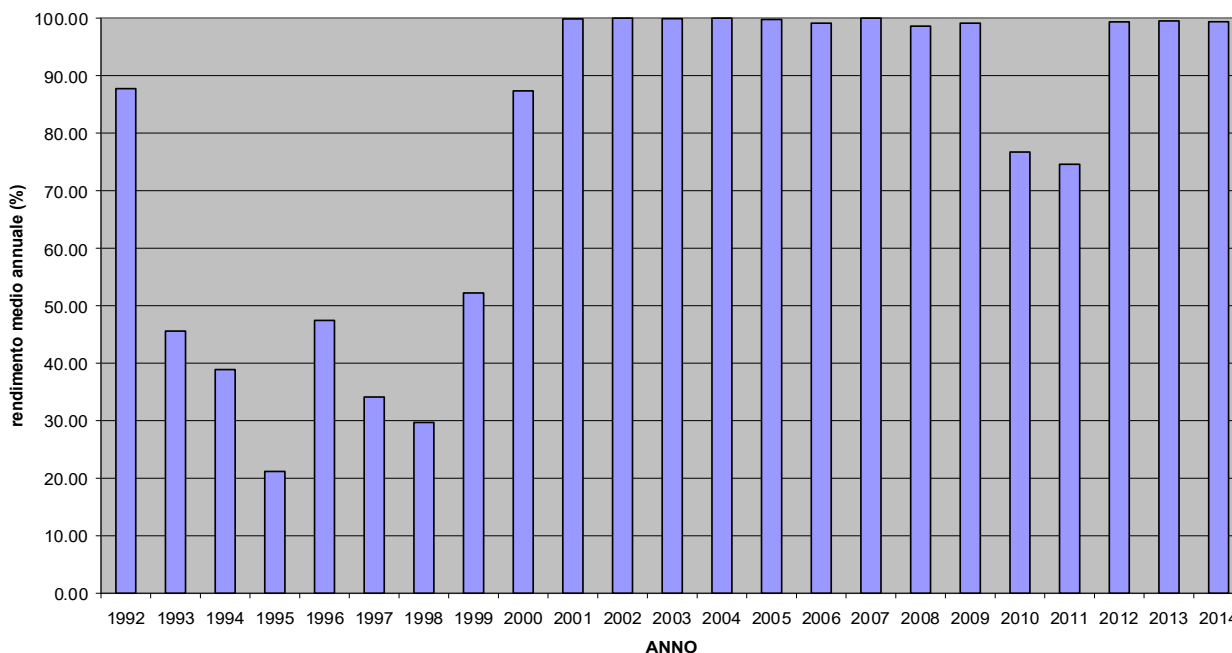


Figura 3.7– Andamento nel tempo del rendimento annuale del mareografo di Messina.

3.6.2 ANALISI DELLE REGISTRAZIONI DEL LIVELLO DI MAREA

Le analisi delle misure registrate presso la stazione di Messina hanno avuto per obiettivo la definizione delle caratteristiche mensili delle oscillazioni del livello di marea. Attraverso questo tipo di analisi è stato possibile determinare i livelli massimi, minimi e medi mensili per le serie storiche di misure in esame. I risultati dell'analisi sono riportati nella figura 3.8 che evidenziano come le escursioni massime del livello di marea rispetto al livello medio marino siano mediamente comprese tra -30 cm e +40 cm.

Per quanto riguarda le massime escursioni del livello di marea, nella tabella 3.6 sono riportati i valori massimi e minimi mensili registrati dal mareografo di Messina. Si evidenzia che il valore di minima marea registrato è stato di -0.44 m.s.l.m.m. del 23.02.2008 alle h 20.30, mentre il livello di massima marea registrato è stato di +0.52 m.s.l.m.m. del 31.12.2000 alle h 5.00.

Questi valori sono sostanzialmente in accordo con il risultato ottenuto nel paragrafo 3.3.3, ove si è stimato il valore massimo della variazione totale teorica del livello marino nello Stretto di Messina per effetto combinato delle maree astronomiche, dell'effetto barico e del sopralzo di vento.

La media dei livelli di bassa marea è di -0.15 m, mentre il valore medio delle alte maree è di +0.26 m.

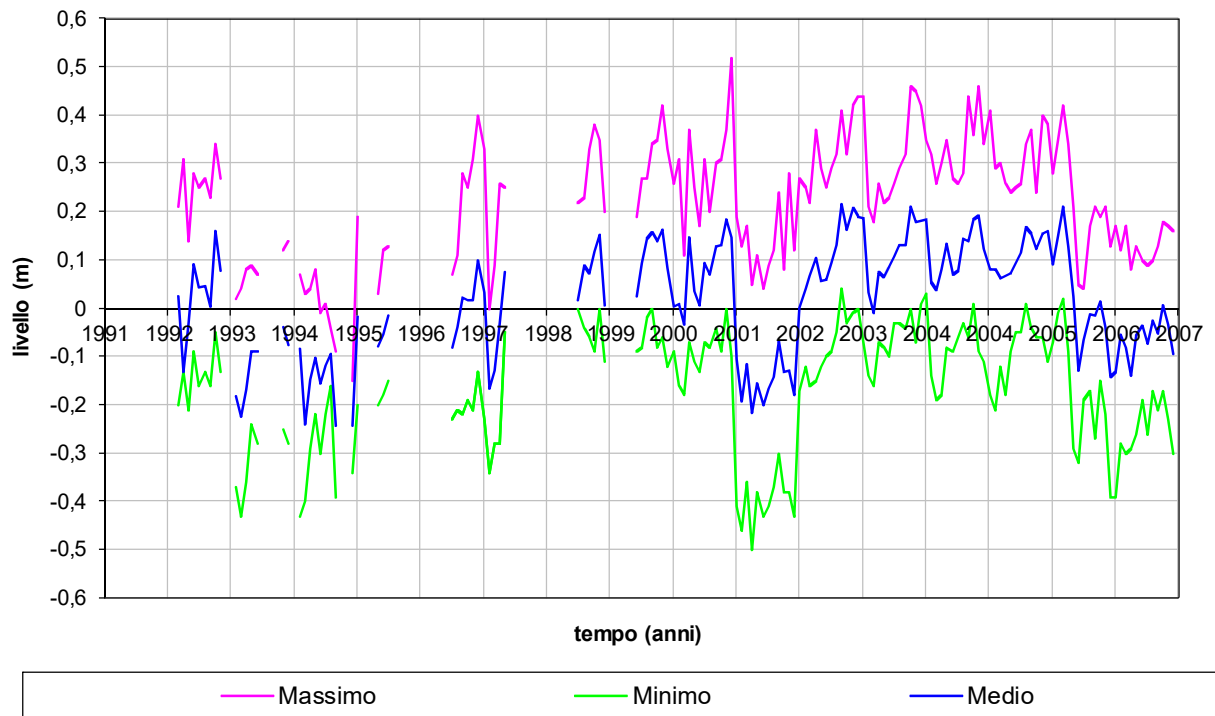


Figura 3.8 – Andamento nel tempo dei livelli massimi, minimi e medi mensili registrati dal mareografo di Messina. Per quanto riguarda le massime escursioni del livello di marea, in tabella 2.22 sono riportati i valori massimi e minimi annuali registrati presso il mareografo di Messina.

Tabella 3.6 – Valori massimi e minimi annuali della stazione mareografica di Messina.

Anno	Livello massimo (cm)	Livello minimo (cm)
1992	0.34	-0.21
1993	0.14	-0.43
1994	0.08	-0.43
1995	0.19	-0.20
1996	0.40	-0.23
1997	0.33	-0.34
1998	0.38	-0.11
1999	0.46	-0.14
2000	0.52	-0.18
2001	0.43	-0.13
2002	0.47	-0.18
2003	0.49	-0.18
2004	0.50	-0.19
2005	0.43	-0.21
2006	0.42	-0.39
2007	0.20	-0.39
2008	0.27	-0.44
2009	0.40	-0.30
2010	0.39	-0.30
2011	0.31	-0.33
2012	0.33	-0.38
2013	0.38	-0.32
2014	0.29	-0.29

3.6.3 ELABORAZIONE STATISTICO-PROBABILISTICA DELLE MISURE DI LIVELLO DEL MARE

I livelli di marea misurati presso la stazione di Messina sono il risultato della combinazione tra le oscillazioni dovute alla marea astronomica (funzione della posizione relativa della terra, della luna e del sole) e le oscillazioni dovute alle variazioni della pressione atmosferica (marea barometrica) e all'azione del vento (wind setup), durante gli eventi di perturbazione atmosferica e delle conseguenti mareggiate. Assumendo che la durata degli eventi meteo-marini estremi sia abbastanza lunga da far sì che il picco della variazione di livello marino determinato dagli effetti della perturbazione meteorologica possa coincidere con l'alta e bassa marea diurna, le misure effettuate dallo strumento consentono di individuare i valori estremi delle variazioni di livello come combinazione del picco di tempesta e del picco di marea (riportati nella tabella 3.7).

La stazione di Messina-Porto del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale ha pubblicato le misure del livello del mare per un periodo di registrazione abbastanza ampio (circa ventidue anni): la disponibilità di questi dati consente, attraverso opportune elaborazioni di tipo statistico-probabilistico, di effettuare delle valutazioni di tipo quantitativo della grandezza, ed in particolare di determinare la frequenza di apparizione degli eventi estremi di massimo e minimo livello del mare.

Il livello del mare, come tutti gli eventi meteorologici determinati da una grande serie di dati può considerarsi un fenomeno stocastico; gli eventi, in base alle considerazioni espresse in precedenza circa la probabilità combinata della marea e dei fenomeni barotropici, s'ipotizzano indipendenti e quindi elaborabili mediante un approccio probabilistico. Si tratta quindi di adattare una prescelta distribuzione di probabilità al campione di dati in nostro possesso, in modo da ricavare le equazioni di probabilità, che consentano almeno teoricamente, estrapolazioni di là del limite stesso delle osservazioni. In altri termini la distribuzione degli eventi storici deve essere ampliata statisticamente al fine di ottenere un numero di eventi sufficientemente grande da poter ritenere la frequenza di un certo evento come un valore approssimato della sua probabilità.

Il problema posto si risolve cercando di adattare una distribuzione di probabilità al campione dei valori estremi annuali. Le serie dei massimi (e minimi) annuali sono state elaborate con il codice di calcolo ACES, producendo cinque distribuzioni di probabilità. Nella tabella 3.7 sono riportati i valori estremi dei massimi e dei minimi livelli del mare in funzione dei tempi di ritorno prescelti attraverso l'utilizzo delle funzioni di distribuzioni di probabilità individuate mediante l'utilizzo del codice di calcolo ACES, scegliendo come distribuzione di probabilità che meglio si adatta alle serie campione la distribuzione di Weibull con $k=2.0$, con un intervallo di confidenza del 99%: sono evidenziati i valori del livello marino per il tempo di ritorno pari a 25 anni.

Tabella 3.7 – Valori dei livelli marini per diversi tempi di ritorno e per tre direzioni principali.

Tempo di ritorno (anni)	Livelli di marea massimi (m s.l.m.m)	Livelli di marea minimi (m s.l.m.m)
2	0.34	-0.29
5	0.45	-0.19
10	0.51	-0.13
25	<i>0.58</i>	<i>-0.07</i>
50	0.62	-0.03
100	0.64	-0.01

3.7 REGIME DELLE CORRENTI

Nel presente capitolo sono analizzate le caratteristiche generali del regime correntometrico nelle acque antistanti il sito oggetto del presente studio.

Le informazioni riportate sono relative alle condizioni su larga scala che si presentano nel tratto di mare dello Stretto di Messina.

Le correnti marine sono i moti prevalentemente superficiali o subsuperficiali delle acque. Le correnti marine sono dei movimenti con trasporto di masse d'acqua anche a grandi distanze, che risultano limitate soltanto dall'energia disponibile e dalle configurazioni geografiche dei mari. Tali moti sono caratterizzati da parametri cinematici variabili tra lo strato superficiale del mare e quelli intermedi o più profondi, e sono spesso dotati da una rilevante componente verticale. Le correnti marine dipendono da molteplici cause, ed in base alla fenomenologia che le origina si possono distinguere in:

- correnti generate dal vento
- correnti di densità
- correnti di marea
- correnti da moto ondoso

Per quanto riguarda le correnti generate dal vento, il meccanismo nasce dall'interazione tra le masse d'aria e le masse d'acqua: l'energia dell'aria in moto viene trasmessa alla superficie dell'acqua sotto forma di tensioni tangenziali e successivamente da questa agli strati sottostanti per effetto di mescolamento turbolento.

Il secondo tipo di correnti è generato da un fenomeno legato alle condizioni fisiche dell'acqua, la distribuzione della densità relativa, determinata dalle condizioni di temperatura e salinità: l'acqua defluisce dall'area di bassa a quella di alta densità.

Il terzo tipo di correnti è legato alla ciclicità delle maree: esse hanno grande importanza laddove il paraggio è interessato da forti escursioni di marea o in quelle zone caratterizzate da modeste escursioni, quando l'effetto dell'onda di marea è accentuato da particolari condizioni geometriche dei fondali e delle coste. Le velocità delle correnti di marea variano con continuità durante i cicli di marea e possono presentare valori opposti durante la giornata.

Di rilevante interesse per il regime costiero sono le correnti litoranee, generate dagli spostamenti di masse d'acqua per effetto del moto ondoso che evolve sui bassi fondali; per rispettare l'equazione della continuità si determinano infatti flussi locali di compensazione degli spostamenti dovuti al moto ondoso. Le correnti litoranee possono interessare sia la zona dei frangenti che la fascia esterna.

Nella zona dei bassi fondali sottocosta, il moto ondoso, caratterizzato dai moti orbitali delle particelle che descrivono traiettorie aperte, genera normalmente delle correnti risultanti da moti pulsanti, capaci di trasportare grandi quantità di materiale solido sia per trascinamento di fondo che per sospensione, in funzione della loro intensità, direzione, verso, portata e delle caratteristiche dei sedimenti.

3.7.1 LE CORRENTI NELLO STRETTO DI MESSINA

Le correnti nello Stretto di Messina sono fortemente legate e dominate dal ciclo delle maree, di cui sono una diretta conseguenza. Infatti come è stato descritto nel paragrafo precedente, la marea, almeno nelle sue componenti principali risultano in opposizione di fase nel Tirreno e nello Ionio: le maree opposte nel Tirreno e nello Jonio non sono rilevanti come valori assoluti di variazione di livello, ma a causa del forte gradiente spaziale che si genera data la limitata distanza tra i due bacini, portano ad un intenso flusso mareale nello Stretto associato direttamente al dislivello che si crea tra i due mari.

La marea nell'area dello Stretto è di tipo semidiurno per cui si hanno due alte maree e due basse maree simili di intensità. Per questo motivo le correnti di marea nello Stretto si invertono ritmicamente ogni sei ore e dodici minuti circa, in media.

L'ampiezza e la velocità delle correnti di marea varia col ritmo di 14 giorni passando dai massimi ai minimi valori. La marea raggiunge la massima ampiezza intorno al periodo di luna nuova, mentre la minima ampiezza è raggiunta intorno al primo ed ultimo quarto.

L'esperienza locale testimonia che alle quadrature l'inizio della corrente montante (risultante) si trova considerevolmente ritardato (1h 40' dopo l'inizio della marea) e la sua durata è ridotta a 2h 15': alla luna nuova, l'inizio della montante si ha due ore dopo il sorgere del sole ed essa raggiunge il suo massimo intorno alla terza. Il massimo della discendente si ha alla seconda ora dal suo inizio.

La velocità massima della corrente (sia montante che scendente) varia in media da 2,4 nodi (circa 1,25 m/sec) alle quadrature a 4,2 nodi (circa 2,1 m/s) alle sigizie.

Al termine delle correnti montanti e discendenti, per un periodo di tempo inferiore ad un'ora, la corrente diventa praticamente nula e si orienta in senso trasversale all'asse dello stretto, dove si formano curiose fasce in cui l'acqua sembra ribollire, dette "taglio".

Alla corrente di carattere mareale dominante si sovrappone un flusso permanente dal Tirreno allo Jonio che è conseguente della diversa densità media dei due bacini (l'acqua del Tirreno è più leggera) ed alla conseguente diversità di livello tra i due bacini risultando il livello medio del Tirreno più alto rispetto a quello dello Jonio: tale corrente diretta verso sud è costante e raggiunge al massimo la velocità di un nodo (0,5 m/s).

Il flusso permanente dal Tirreno allo Jonio è il risultato netto di due flussi opposti. Esiste in superficie un movimento d'acqua verso lo Jonio con una velocità di 0.10 m/s, mentre sul fondo l'acqua relativamente pesante di questo bacino si muove verso Nord con velocità di 0.13 m/s, fino a quando questo flusso incontra tra Capo Peloro (sulla sponda siciliana) e Cannitello (sulla sponda calabrese), una forte riduzione della profondità per la presenza di una sella sottomarina (qui la profondità media è di -80 m), che viene superato dalla corrente quasi per tracimazione (anche con velocità di 0.5 m/s), per poi scendere verso le profondità del Mar Tirreno. Il bilancio dei due flussi porta ad un movimento netto di acqua da Nord verso Sud.

Un'analisi dell'andamento planimetrico qualitativo delle correnti alla quota di navigazione mostra che esse sono abbastanza canalizzate nello Stretto, ossia hanno una componente assiale più sviluppata di quella trasversale, anche se quest'ultima non è mai nulla.

La corrente si comporta nello Stretto come un fiume che scorre con qualche tortuosità determinata dalla non semplice geometria dell'alveo. Pertanto la loro velocità è tanto più forte quanto minore è l'area della sezione attraversata e, riferendosi ad ogni singola sezione, la corrente è più forte verso il centro. Di conseguenza la

corrente di marea è molto forte nella zona della sella ove può raggiungere velocità anche di 3 m/s e si smorza poco verso lo sbocco verso il Tirreno. Lo smorzamento verso lo Jonio è invece più forte e più rapido.

Poiché la morfologia del versante ionico, salvo qualche discontinuità minore in corrispondenza di Messina, presenta una riduzione continua e regolare della sezione d'acqua, la corrente montante mantiene per tutto il percorso, anche oltre la sella, un andamento assiale, turbato, in prossimità delle coste da controcorrenti.

A causa della diversa morfologia dell'imboccatura tirrenica rispetto all'imboccatura ionica la corrente scendente attraversa lo Stretto con un percorso tortuoso. La massa d'acqua tirrenica si getta contro la costa Calabria da Torre Cavallo, che la riflette specularmente verso Paradiso, mentre una parte della stessa segue la costa calabrese fino sotto Villa San Giovanni per poi ritirarsi su Punta Pezzo creando così una controcorrente che rimarrà in zona fino a mescolarsi con la montante in salita. Le zone a sud di Villa San Giovanni verranno interessate più tardi da una corrente diretta a Sud con fronte su Reggio Calabria la quale si ritirerà poi a mezzo miglio circa dalla costa interessando questa con una controcorrente.

Le controcorrenti lungo le coste dello stretto che si verificano in fase di corrente montante sono dette "bastardi", mentre quelle che iniziano due ore dopo la formazione della corrente scendente sono dette "refoli". Da notare che le controcorrenti dovute alla scendente non sono della vastità e potenza di quelle che si verificano per la montante.

Come è noto lo scorrere a breve distanza di acque muoventesi in direzione opposta o con velocità diverse provoca la formazione di mulinelli anche ampi detti "garofali": ciò avviene in particolare in punti in cui la corrente principale incontra forti dislivelli del fondale. I principali garofali dovuti alla corrente montante si formano dinanzi a Scilla sulla costa calabrese e Cariddi su quella siciliana. Il vortice principale dovuto alla scendente si forma davanti a Punta S. Raineri.

Queste correnti possono essere fortemente influenzate dal vento: di fatto un forte vento dal primo, quarto e parte del secondo quadrante, fa aumentare d'intensità e durata la corrente montante, impedendo a volte la venuta della scendente. Viceversa, un forte vento meridionale, fa aumentare l'intensità e la durata della corrente scendente impedendo la venuta della montante.

Il valore massimo della velocità della corrente atteso per un tempo di ritorno di 25 anni si può assumere pari a 5 m/sec. Lo schema delle correnti nello Stretto è rappresentato nelle figure 3.9 e 3.10, ove è indicato rispettivamente la configurazione della corrente scendente e della corrente montante.

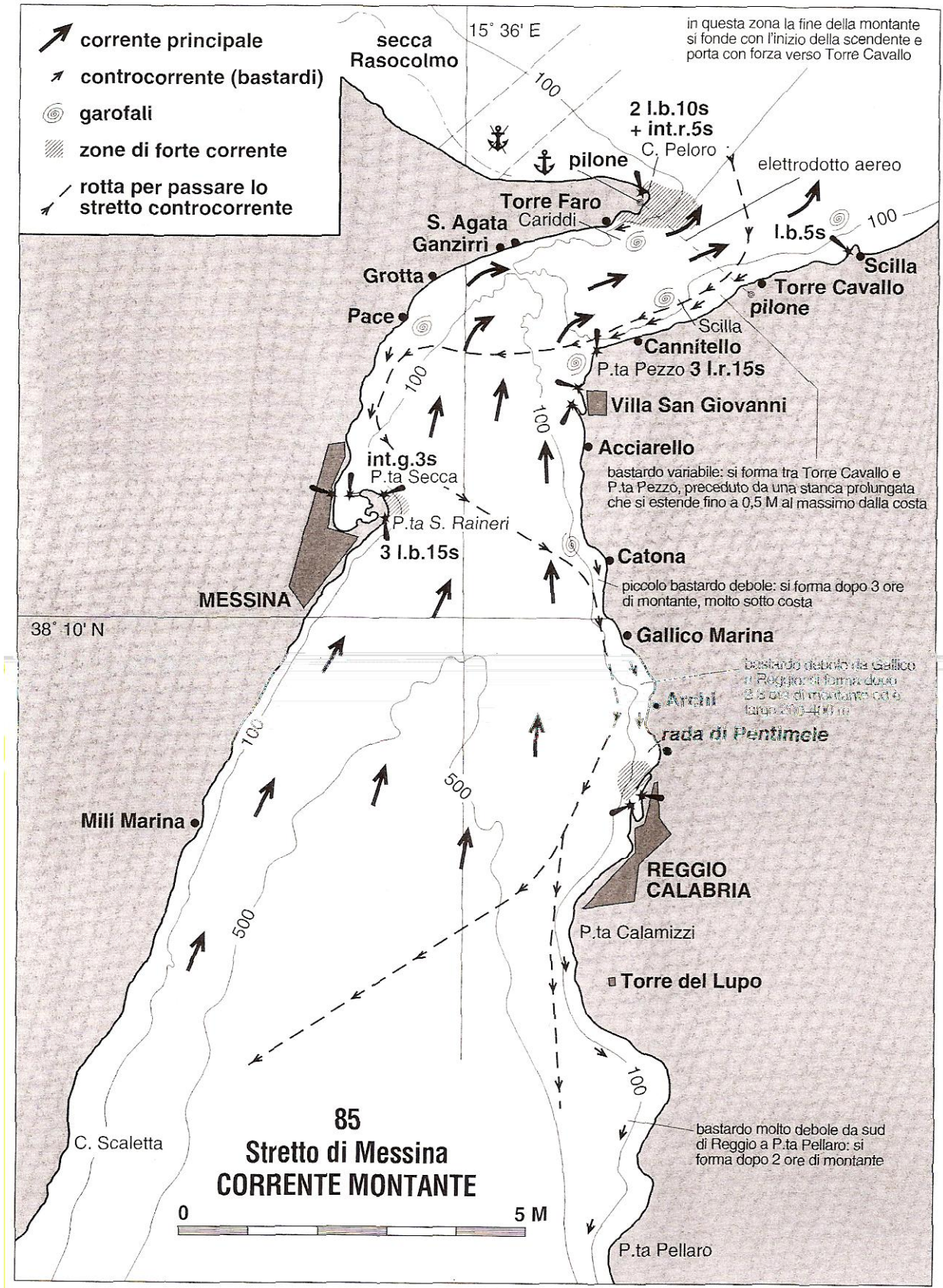


Figura 3.9 – Andamento della corrente montante nello Stretto di Messina.

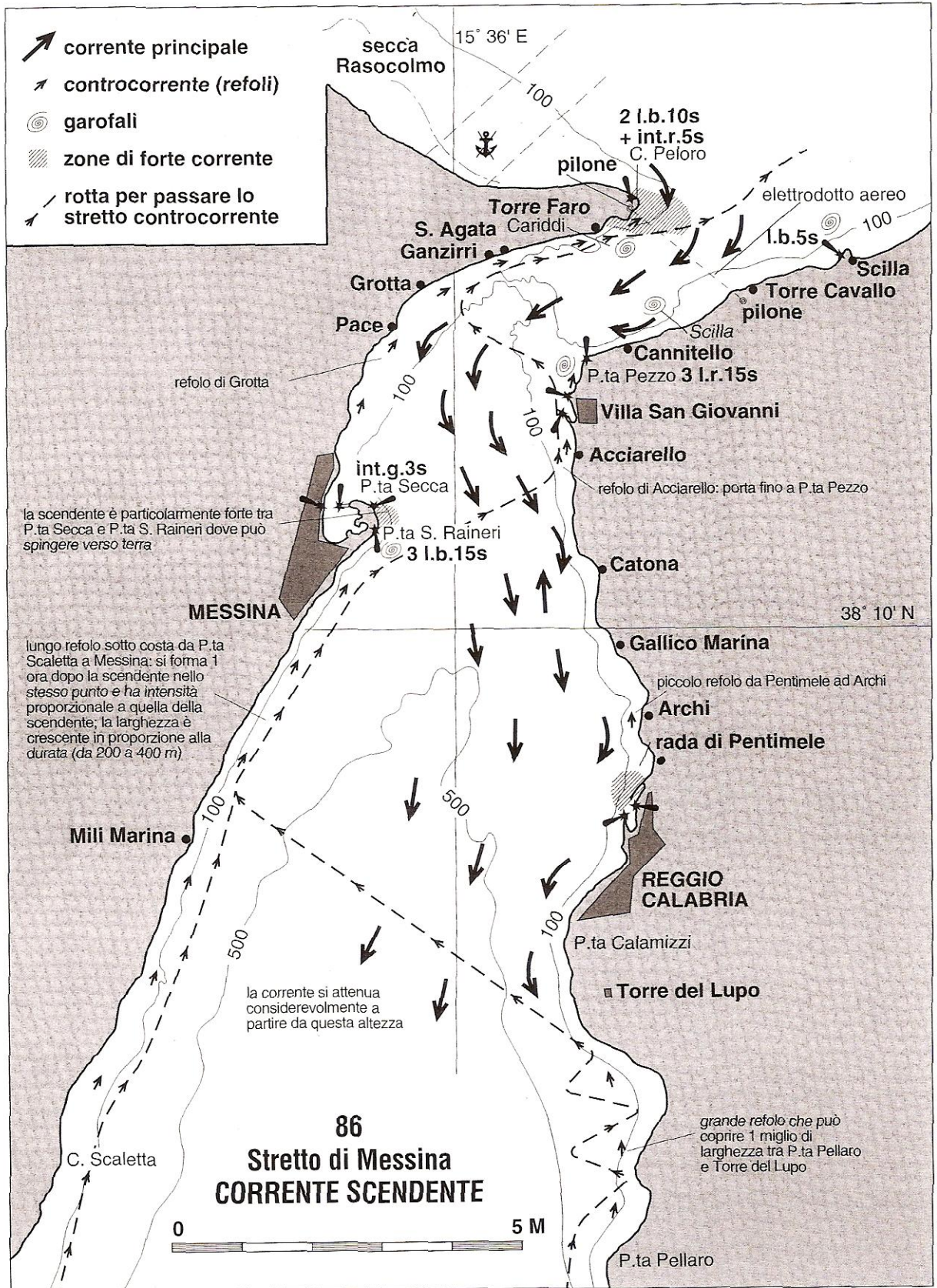


Figura 3.10 – Andamento della corrente scendente nello Stretto di Messina.

4.

CLIMA DI MOTO ONDOSO

4.1 Premessa

I dati migliori per la ricostruzione del clima ondoso di un paraggio sono quelli ricavati a mezzo di boe ondometriche operanti con regolarità per un congruo numero di anni. In mancanza di tali dati si può ricorrere alle ricostruzioni dello stato di mare a partire da dati meteorologici (*hindcasting*). Tali ricostruzioni si basano sull'integrazione dell'equazione che esprime il bilancio energetico di un volumetto d'acqua, tenendo conto dell'energia trasferita dal vento sulla superficie del mare e dei fenomeni dissipativi interni al moto ondoso. Il risultato è lo spettro direzionale delle onde di superficie. Le ricostruzioni vengono fatte ad intervalli regolari di alcune ore per i punti di una griglia. La qualità delle ricostruzioni a partire dai dati meteo è migliorata molto negli ultimi anni grazie ad un grandissimo lavoro di ricerca applicata, che ha condotto alla formulazione di diversi modelli matematici, la cui evoluzione è stata suddivisa in tre generazioni.

Alla "*prima generazione*" appartengono i modelli sviluppati nei primi anni '60 i quali tenevano conto solo dei fenomeni di crescita dell'energia ondosa e di dissipazione. Dai loro risultati è apparso chiaro che le interazioni non-lineari tra onde di frequenze diverse sono importanti nel determinare la distribuzione di energia nello spettro. Queste interazioni non-lineari sono molto difficili e richiedono molto tempo per essere calcolate in modo esplicito, quindi per tenerne conto sono stati sviluppati dei modelli di tipo parametrico, i cosiddetti modelli della "*seconda generazione*". Ulteriori affinamenti dei modelli condussero alla formulazione approssimata del meccanismo di trasferimento energetico tra onde di diversa frequenza. Nacquero allora i modelli spettrali, o di "*terza generazione*" dove, conformemente all'immagine intuitiva del mare, questo è concepito come la sovrapposizione di onde di altezza, lunghezza e direzione diverse – si pensi ad un mare in fase di generazione sovrapposto ad un mare lungo da altra direzione –. Lo spettro è appunto l'insieme dell'energia associata a queste diverse componenti, ognuna specificata come frequenza (cioè periodo, e quindi lunghezza) e direzione. La somma di tutte queste energie è collegata alla altezza significativa, così detta perché corrispondente alla stima visiva dell'altezza d'onda che facciamo osservando una mareggiata.

Come accennato, non sono disponibili, a conoscenza di chi scrive, rilievi strumentali sistematici del moto ondoso all'interno dello Stretto di Messina. Non essendo disponibili rilievi strumentali del moto ondoso in aree prossime al paraggio d'interesse, verranno utilizzati i dati del moto ondoso ricostruiti dai dati meteorologici.

Al fine di determinare il clima di moto ondoso al largo di Reggio Calabria occorre tenere presente che i mari che caratterizzano il paraggio in esame possono essere distinti in mari di generazione locale (all'interno dello Stretto di Messina) e mari che si propagano fino al sito in esame generatisi al di fuori dello Stretto di Messina.

Per determinare i mari di generazione locale si prenderanno in considerazione i dati di vento forniti da stazioni anemometriche vicine al sito in esame, che verranno utilizzati come dati di input in un modello matematico che simula il trasferimento energetico dai movimenti delle masse d'aria alla superficie del mare.

Per determinare il clima di moto ondoso al largo di Reggio Calabria provenienti dall'area di generazione collocata a sud dello stretto di Messina, verranno utilizzati i dati ricostruiti dall'*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

4.2 Dati di moto ondoso dell'ECMWF

L'*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) è un'organizzazione indipendente sostenuta da 18 Stati Membri europei e 15 Stati Cooperativi, conosciuta nel mondo come il miglior centro previsionale atto a fornire previsioni a media scadenza e le previsioni stagionali a 12 mesi.

L'ECMWF è stato istituito nel 1973, in riconoscimento della necessità di mettere in comune le risorse scientifiche e tecniche dei servizi meteorologici europei e delle istituzioni per la produzione di previsioni meteorologiche a medio termine.

La finalità principale del Centro (ECMWF) sono lo sviluppo di un'affidabile servizio di previsioni meteorologiche a medio raggio e la fornitura di previsioni meteorologiche a medio termine per gli Stati Membri. Gli obiettivi del Centro sono quelli di sviluppare e gestire su base regolare, i modelli globali ed i sistemi di acquisizione delle dinamiche atmosferiche nonché la termodinamica e la composizione dell'atmosfera allo scopo di individuarne le interazioni nelle varie parti del sistema "Terra-Atmosfera". Scopo finale è l'elaborazione di un modello previsionale a media scadenza su scala europea e globale.

Il modello meteorologico implementato e gestito dall'ECMWF funziona sia in una "previsione deterministica" che in modalità ENS (ensemble), basato cioè su tecniche dinamico-statistiche. Il modello meteorologico ECMWF di tipo spettrale risolve le equazioni del clima lavorando con 800 armoniche su 91 livelli compresi tra la superficie terrestre e gli 80 km dell'atmosfera, basandosi su un troncamento triangolare. Il modello determina su ciascuno di questi 91 livelli considerati rispetto al suolo i parametri del vento, temperatura, pressione al suolo, umidità, copertura nuvolosa, precipitazioni atmosferiche ed ozono: gli output del modello sono forniti su punti di una griglia gaussiana posti ad una distanza media di circa 25 km (corrispondenti a circa $\frac{1}{4}$ di grado), con un run ogni 12 ore (run 00z, 12z), e con una risoluzione temporale di uscita del modello di 1 giorno (24 ore) fino ad un range di 10 giorni. Il modello ECMWF è principalmente utilizzato come confronto con il modello globale GFS.

L'ECMWF rende disponibili in forma pubblica, attraverso uno dei suoi prodotti denominato ERA Interim, numerosi parametri atmosferici e di superficie: tra essi sono inclusi le componenti u e v del vento a 10 m dalla superficie del mare, l'altezza significativa (H_s), il periodo medio (T_m) e la direzione dominante (θ_m) del moto ondoso; questi ultimi parametri vengono stimati in prefissati punti del bacino per mezzo del modello matematico WAM, che utilizzano come dati di input i valori della velocità del vento ricavati con i modelli di previsione meteorologica.

I modelli di previsione del moto ondoso si basano sull'integrazione dell'equazione che esprime il bilancio energetico di un volumetto d'acqua, tenendo conto dell'energia trasferita dal vento sulla superficie del mare e dei fenomeni dissipativi interni al moto ondoso. Il risultato è lo spettro direzionale delle onde di superficie.

L'ECMWF elabora le previsioni ondose sui nodi di una griglia di 25-30 km di lato. L'archivio dell'ECMWF dispone attualmente di osservazioni relative al periodo gennaio 1979 – marzo 2015. I valori di altezza significativa, periodo medio e direzione dominante sono registrati ad intervalli di 6 ore. Pertanto i dati utilizzati per questo lavoro si riferiscono a tale periodo.

Operativamente il modello è configurato per sviluppare uno spettro con considerate 13 frequenze e 16 direzioni, uniformemente distribuite sui 360°. Le 136 frequenze vanno da 0.04 a 0.33 Hz, coprendo così le lunghezze d'onda da 975 a 15 m. I calcoli vengono eseguiti ai nodi di una griglia geografica con risoluzione 1/4 di grado in latitudine e di 2/5 di grado in longitudine, corrispondente nel Mediterraneo ad una griglia di circa 30 Km di lato. I valori di altezza significativa, periodo medio (Rice) e direzione dominante sono registrati ad intervalli di 6 ore.

Nell'area in esame sono disponibili i dati di moto ondoso prodotti dall'ECMWF nei punti rappresentati in figura in figura 4.1



Figura 4.1 - Punti della griglia di output del modello WAM - ECMWF nell'intorno dell'area dello stretto di Messina.

A causa delle notevoli imprecisioni nella previsione del moto ondoso che si verificano in prossimità alle coste, i dati di moto ondoso che sono stati utilizzati nelle presenti elaborazioni sono stati quelli prodotti dal modello WAM dell'ECMWF nel Grid Point 37.50°N 15.75°E, il punto più vicino al disotto dell'imboccatura Sud dello Stretto, situato grossomodo alla stessa latitudine di Catania (si veda fig. 4.1): i parametri meteomarini elaborati sono quelli riferiti al periodo compreso tra il 1° gennaio 1979 ed il 31 dicembre 2014.

Nel presente studio la taratura dei dati è stata effettuata utilizzando per il confronto i dati ondometrici della boa della Rete Ondometrica Nazionale (RON) acquisiti nel periodo 1989 – 1999 al largo di Catania.

4.3 Analisi delle serie di dati ondametrici

Le misure di moto ondoso disponibili, non necessitano di analisi e verifiche di presenza di valori anomali essendo prodotte da un modello matematico.

Nel grafico di figura 4.2 viene riportato l'andamento cronologico dell'altezza d'onda per i 36 anni di dati a disposizione.

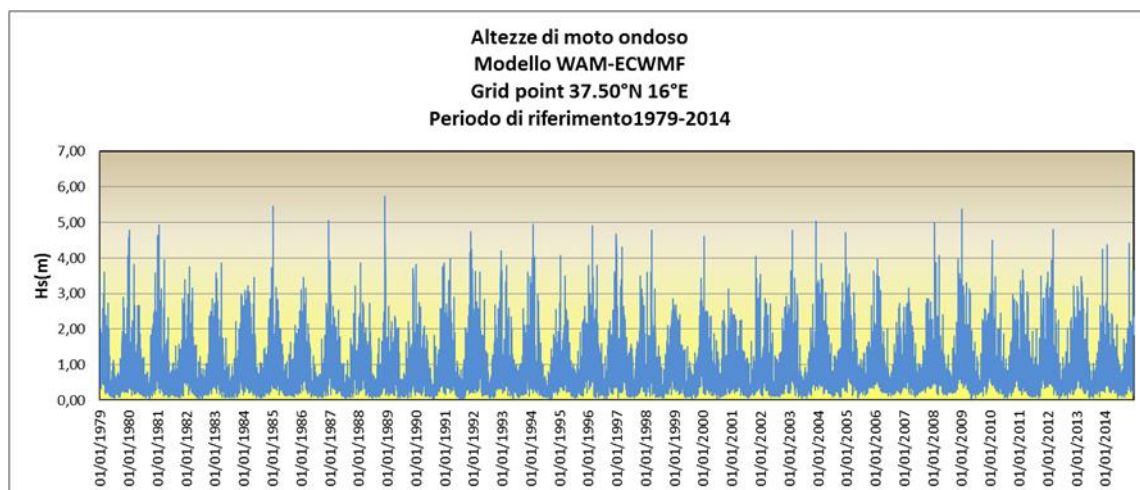


Figura 4.2 – Andamento cronologico dell'altezza d'onda modello ECWMF.

L'analisi della distribuzione degli eventi di moto ondoso è di fondamentale importanza in molti campi di applicazione. A titolo di esempio, per quanto riguarda gli studi di morfologia costiera si possono derivare dalla distribuzione degli eventi le caratteristiche quantitative (altezza, periodo, durata e direzione) e qualitative (bidirezionalità, variazioni stagionali) delle onde di modellazione o la larghezza della fascia attiva di una spiaggia. Per quanto riguarda le costruzioni marittime, l'analisi della distribuzione degli eventi di moto ondoso consente di determinare la principale forzante sulla base delle quale eseguire ulteriori studi.

Questo tipo di analisi consiste nel suddividere gli eventi di moto ondoso in base al valore dell'altezza d'onda significativa ed alla direzione di provenienza al fine di individuare la frequenza di accadimento di ogni singola classe di eventi. Per quanto riguarda la suddivisione degli eventi in classi di altezza d'onda significativa si possono considerare due diversi criteri in funzione del tipo di rappresentazione che si intende dare al risultato dell'analisi. Nel caso di rappresentazione in forma tabellare è stato adottato il seguente schema:

- per gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda inferiore a 0,5 m (definite "calme") si prendono in esame due classi: $0 \div 0,25$ m, $0,25 \div 0,5$ m;
- per gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 0,5 m si prendono in esame classi di altezza d'onda aventi un intervallo di ampiezza pari a 0,5 m ($0,5 \div 1,0$ m; $1,0 \div 1,5$ m; ...).

Nel caso della rappresentazione grafica è stato adottato il seguente schema:

- per gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda inferiore a 1,0 m due classi: $0,50 \div 1,0$ m e $< 0,5$;
- per gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 1,0 m le seguenti classi: $1,0 \div 2,0$ m; $2,0 \div 3,0$ m; $3,0 \div 4,0$ m; $4,0 \div 5,0$ m $> 5,0$ m.

Si evidenzia che i due criteri di classificazione indicati hanno la funzione di permettere nel primo caso di analizzare gli eventi con maggior dettaglio e nel secondo caso di avere un quadro d'insieme, seppur meno dettagliato, della distribuzione degli eventi di moto ondoso.

Per quanto riguarda la suddivisione degli eventi in base alla direzione di provenienza del moto ondoso sono stati considerati settori di ampiezza pari a 22.5° . Si evidenzia che la suddivisione degli eventi per settori di provenienza di con l'ampiezza sopra stabilita consente di semplificare l'analisi dei risultati senza penalizzare molto il livello di dettaglio; tra l'altro l'ampiezza dei settori direzionali prescelta è adeguata al grado di affidabilità offerto dai risultati di un modello matematico di previsione del clima ondoso.

Nelle Tabella 4.1 sono raccolte le misure ondametriche, operando, secondo quanto descritto precedentemente, una distribuzione dei rilevamenti, per altezza d'onda e direzione media di provenienza annuali. Nella Tabella 4.2 gli stessi dati sono raccolti secondo la distribuzione della frequenza percentuale per classi di altezza d'onda e di direzione media di provenienza annuale.

Nella Figura 4.3 è rappresentato il grafico della distribuzione direzionale della frequenza del moto ondoso prodotto dal modello, secondo il dato direzionale di picco annuale.

Dall'analisi del grafico di figura 4.3 si evince che il clima di moto ondoso, nel punto della griglia preso in esame, è caratterizzato da una distribuzione complessa in cui prevalgono gli eventi provenienti dal I° quadrante; infatti, i mari più frequenti provengono dal settore di Tramontana-Grecale (con direzione principale di propagazione pari a 20°N), seguiti in ordine di apparizione dai mari provenienti dal settore di Tramontana (direzione principale 0°N), da Ponente-Libeccio (direzione principale 255°) ed infine da Scirocco- Mezzogiorno (con direzione principale di provenienza 160°N); meno frequenti sono gli eventi di mare dai settori compresi tra Grecale e Scirocco e tra Ponente-Maestro e Maestrale.

Gli stati di mare d'intensità maggiore provengono con maggiore frequenza dal settore di Levante, Levante-Scirocco e Scirocco (settore tra 85° - 145°N); con frequenza minore si propagano fino al punto ECMWF i mari provenienti dalle direzioni che insistono nel settore compreso tra Tramontana e Grecale, per i quali il modello ha registrato gli stati più intensi in assoluto; a tal proposito si vedano i grafici riportati nella figura 4.4 in cui sono rappresentate le rose di frequenza direzionale degli eventi suddivisi in base ai valori limite di soglia di 1,2,3,4 m.

L'analisi della base di dati esaorari nel punto ECMWF a sud dello Stretto è stata estesa anche alla verifica del clima di moto ondoso stagionale. I risultati di questa elaborazione sono riportati in forma grafica nella figura 4.5. Da questa rappresentazione si evince che i mari di Tramontana-Grecale sono i più frequenti durante tutte le stagioni tranne che in Primavera, quando risultano molto più frequenti le ondate provenienti dal settore di Scirocco e Scirocco-Mezzogiorno.

Gli eventi di Scirocco sono abbastanza frequenti anche durante l'autunno e l'inverno, mentre sono più rari in estate. Gli eventi da Libeccio e Ponente-Libeccio sono abbastanza frequenti durante il periodo invernale ed autunnale. Gli eventi più intensi si verificano in Inverno ed Autunno dal settore di Tramontana-Greco e dal settore di Scirocco.

Riferendosi al paraggio del porto di Reggio Calabria si individuano quattro settori direzionali da cui possono propagarsi i mari rilevati nel punto ECMWF all'interno dello stretto, che teoricamente possono presentarsi dinanzi il sito di progetto; si tratta dei settori individuati dalle seguenti direzioni principali: 157.5° , 180° , 202.5° e 225°N . In relazione a questi settori la frequenza di apparizione maggiore è quella relativa agli eventi che

provengono dalla direzione di Scirocco-Mezzogiorno seguiti, in ordine di apparizione, da quelli di Libeccio e Mezzogiorno.

Facendo riferimento al grafico riportato in figura 4.4 si può osservare che nel punto in esame gli eventi di mare di altezza significativa H_s superiore a 3,0 m si verificano maggiormente dalle direzioni di Scirocco e Scirocco Levante seguiti da quelli di Tramontana-Grecale.

Ciò risulta confermato anche dal grafico di figura 4.6 in cui è rappresentato il diagramma polare dei valori al colmo delle mareggiate ricostruite dal modello nel punto in esame.

L'analisi statistica della base dati è stata completata con il calcolo della persistenza che consente di mettere in relazione le caratteristiche di un evento con la sua durata media annuale. Il risultato di questo calcolo eseguito in termini omnidirezionali ha permesso la rappresentazione della curva di durata misurata in giorni×anno ed in ore×anno. In figura 4.7 e 4.8 sono rappresentate le curve di durata dei mari rilevati presso il Grid-Point ECMWF per le due diverse unità di misura. Da queste curve si evince che i mari caratterizzati da altezza d'onda superiore a 3 m si verificano in un anno medio statistico per poco più di tre giorni, mentre eventi ondosì con altezza superiore a 4 m si verificano per circa 12 ore all'anno.

Nelle tabelle 4.3 e 4.4 è riportata la distribuzione bivariata H_s - T_m in frequenza assoluta e percentuale per classi di altezza d'onda e periodo medio della serie di dati ondosì dell'ECMWF nel grid point di coordinate 37.5°N 16°E.

Tabella 4.1 – Clima di moto ondoso annuale: distribuzione di frequenza assoluta dei dati esaorari di moto ondoso forniti dal modello ERA-Interim dell'ECMWF nel grid point di coordinate 37.5°N 16°E, classificati per altezza d'onda e direzione media di provenienza (nel periodo compreso tra il 01.10.1979 e il 31.12.2014).

		Classi di altezza d'onda																Totale	
		Hs (m)	0,25	0,50	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	>7,0		
DIR °N	Classi Direzione		0,25	0,50	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0		
0	348,75 11,25		1298	2331	179	591	289	129	55	24	11	7	4	1	2			6540	
22,5	11,25 33,75		388	785	875	312	117	53	14	9	5	2	4					2564	
45	33,75 56,25		191	461	666	248	92	62	30	17	6	3	1					1777	
67,5	56,25 78,75		179	479	662	296	159	73	45	18	12	4	1	1				1929	
90	78,75 101,25		176	548	997	525	247	163	72	45	29	11	5	1				2819	
112,5	101,25 123,75		243	675	112	594	311	133	66	30	14	6	2	1				3199	
135	123,75 146,25		312	889	131	731	343	151	62	22	10	3						3840	
157,5	146,25 168,75		257	815	114	536	247	78	37	8	2	1	1					3123	
180	168,75 191,25		191	689	935	436	180	51	18	7	4							2511	
202,5	191,25 213,75		285	844	107	504	246	87	32	10	2	1						3087	
225	213,75 236,25		459	1153	128	721	411	173	39	17	4							4265	
247,5	236,25 258,75		416	836	128	739	351	171	64	23	5	1	1					3888	
270	258,75 281,25		348	738	942	385	152	63	29	10	5							2672	
292,5	281,25 303,75		430	853	789	235	79	38	24	5	3							2456	
315	303,75 326,25		720	1370	943	247	87	50	18	11	1	1						3448	
337,5	326,25 348,75		869	1670	125	348	159	94	41	26	15	3	2	1				4478	
CALME			6762																
TOTALE			6762	15136	17084	7448	3470	1569	646	282	128	43	21	5	2	0	0	0	52596
FREQ. CUM.			6762	21898	38982	46430	49900	51469	52115	52397	52525	52568	52589	52594	52596	52596	52596	52596	

Tabella 4.2 – Clima di moto ondoso annuale: distribuzione di frequenza assoluta dei dati esaorari di moto ondoso forniti dal modello ERA-Interim dell'ECMWF nel grid point di coordinate 37.5°N 16°E, classificati per altezza d'onda e direzione media di provenienza (nel periodo compreso tra il 01.10.1979 e il 31.12.2014).

		Classi di altezza d'onda																Totale	
		Hs (m)	0,25	0,50	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	>7,0		
DIR °N	Classi Direzione		0,25	0,50	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0		
0	348,75 11,25		2,47	4,43	3,42	1,12	0,55	0,25	0,10	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00			12,4	
22,5	11,25 33,75		0,74	1,49	1,66	0,59	0,22	0,10	0,03	0,02	0,01	0,004	0,01					4,87	
45	33,75 56,25		0,36	0,88	1,27	0,47	0,17	0,12	0,06	0,03	0,01	0,01	0,002					3,38	
67,5	56,25 78,75		0,34	0,91	1,26	0,56	0,30	0,14	0,09	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00				3,67	
90	78,75 101,25		0,33	1,04	1,90	1,00	0,47	0,31	0,14	0,09	0,06	0,02	0,01	0,00				5,36	
112,5	101,25 123,75		0,46	1,28	2,14	1,13	0,59	0,25	0,13	0,06	0,03	0,01	0,004	0,00				6,08	
135	123,75 146,25		0,59	1,69	2,50	1,39	0,65	0,29	0,12	0,04	0,02	0,01						7,30	
157,5	146,25 168,75		0,49	1,55	2,17	1,02	0,47	0,15	0,07	0,02	0,00	0,002	0,002					5,94	
180	168,75 191,25		0,36	1,31	1,78	0,83	0,34	0,10	0,03	0,01	0,01							4,77	
202,5	191,25 213,75		0,54	1,60	2,05	0,96	0,47	0,17	0,06	0,02	0,00	0,002						5,87	
225	213,75 236,25		0,87	2,19	2,45	1,37	0,78	0,33	0,07	0,03	0,01							8,11	
247,5	236,25 258,75		0,79	1,59	2,44	1,41	0,67	0,33	0,12	0,04	0,01	0,002	0,002					7,39	
270	258,75 281,25		0,66	1,40	1,79	0,73	0,29	0,12	0,06	0,02	0,01							5,08	
292,5	281,25 303,75		0,82	1,62	1,50	0,45	0,15	0,07	0,05	0,01	0,01							4,67	
315	303,75 326,25		1,37	2,60	1,79	0,47	0,17	0,10	0,03	0,02	0,00	0,002						6,56	
337,5	326,25 348,75		1,65	3,18	2,38	0,66	0,30	0,18	0,08	0,05	0,03	0,01	0,004	0,00				8,51	
CALME																			
TOTALE			12,86	28,78	32,48	14,16	6,60	2,98	1,23	0,54	0,24	0,08	0,04	0,01	0,004				100,
FREQ. CUM.			12,86	41,63	74,12	88,28	94,87	97,86	99,09	99,62	99,87	99,95	99,99	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	

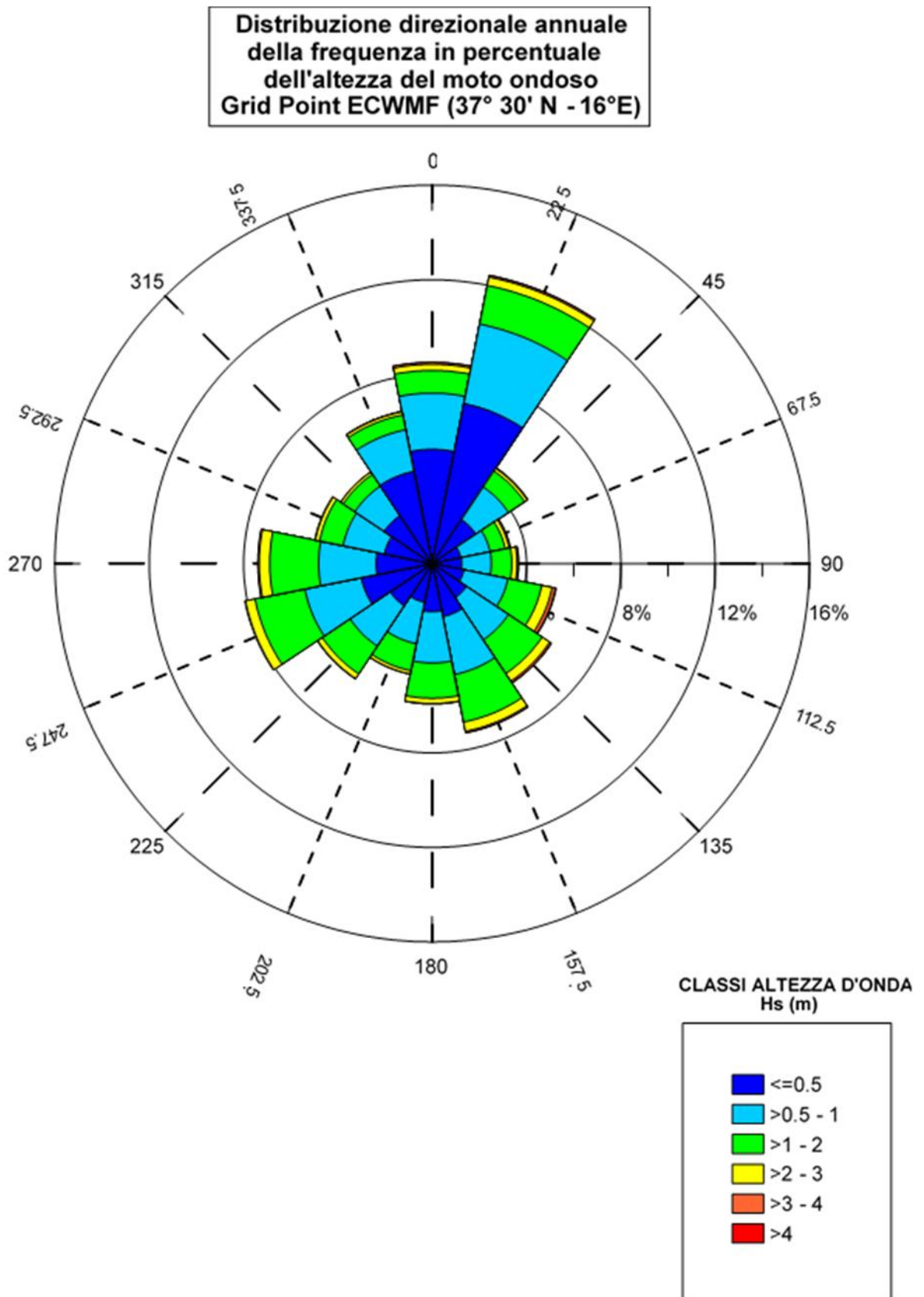


Figura 4.3 – Distribuzione direzionale (direzione media di provenienza) stagionale delle frequenze percentuali dei dati ondosi esaorari forniti dal modello ERA-Interim (ECMWF) nel punto di coordinate 37.50°N 16°E al largo dell'imboccatura meridionale dello Stretto di Messina nel periodo compreso tra il giorno 01.01.1979 e il giorno 31.12.2014.

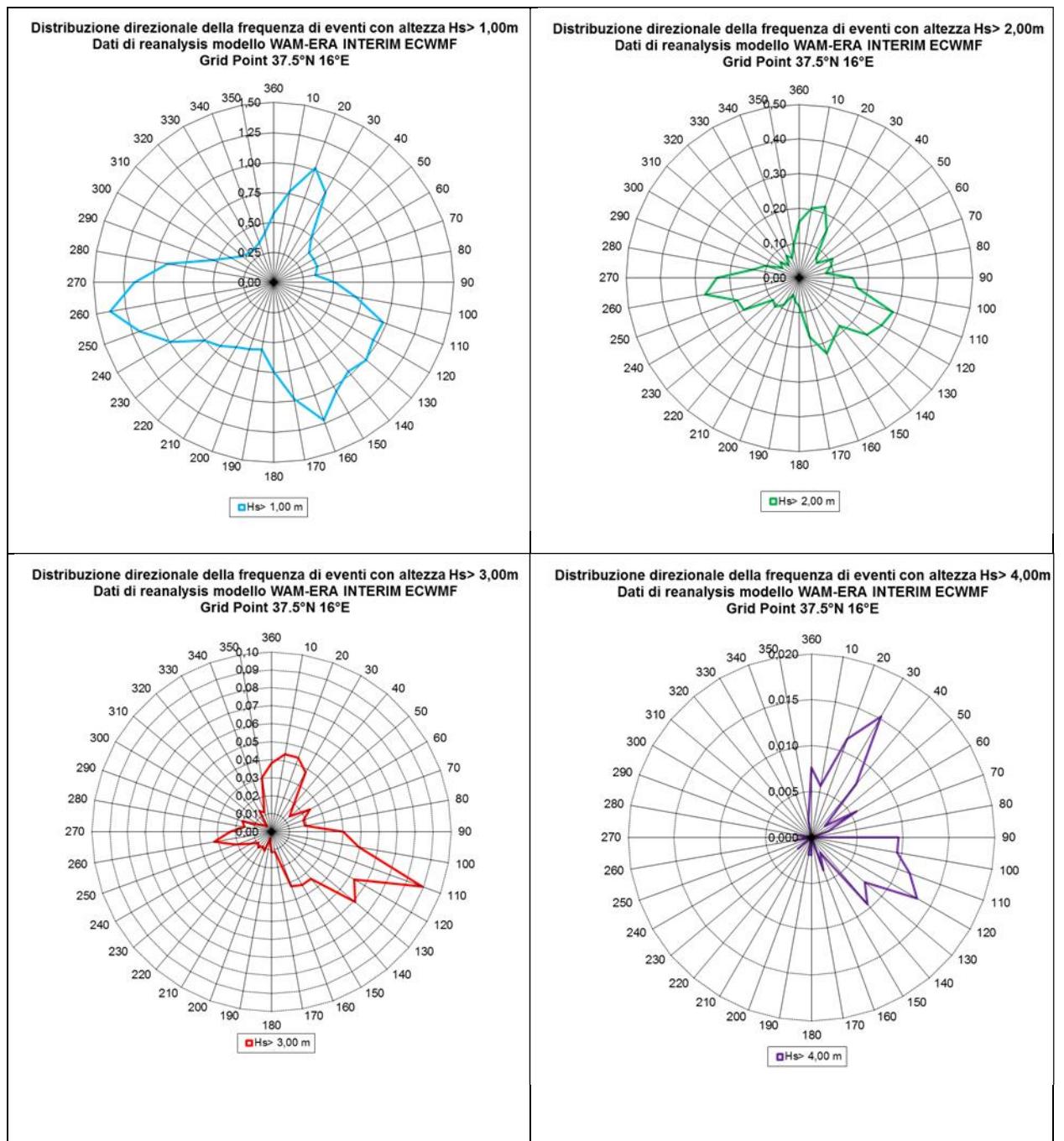


Figura 4.4 – Distribuzione direzionale delle frequenza degli stati di mare ricostruiti con il modello WAM-ERA-Interim al largo dello stretto di Messina nel grid point 37.50°N-16°E riferite al periodo compreso tra il 01.01.1979 e il 31.12.2014, suddivise in base ai valori limite di soglia di 1,2,3,4 m.

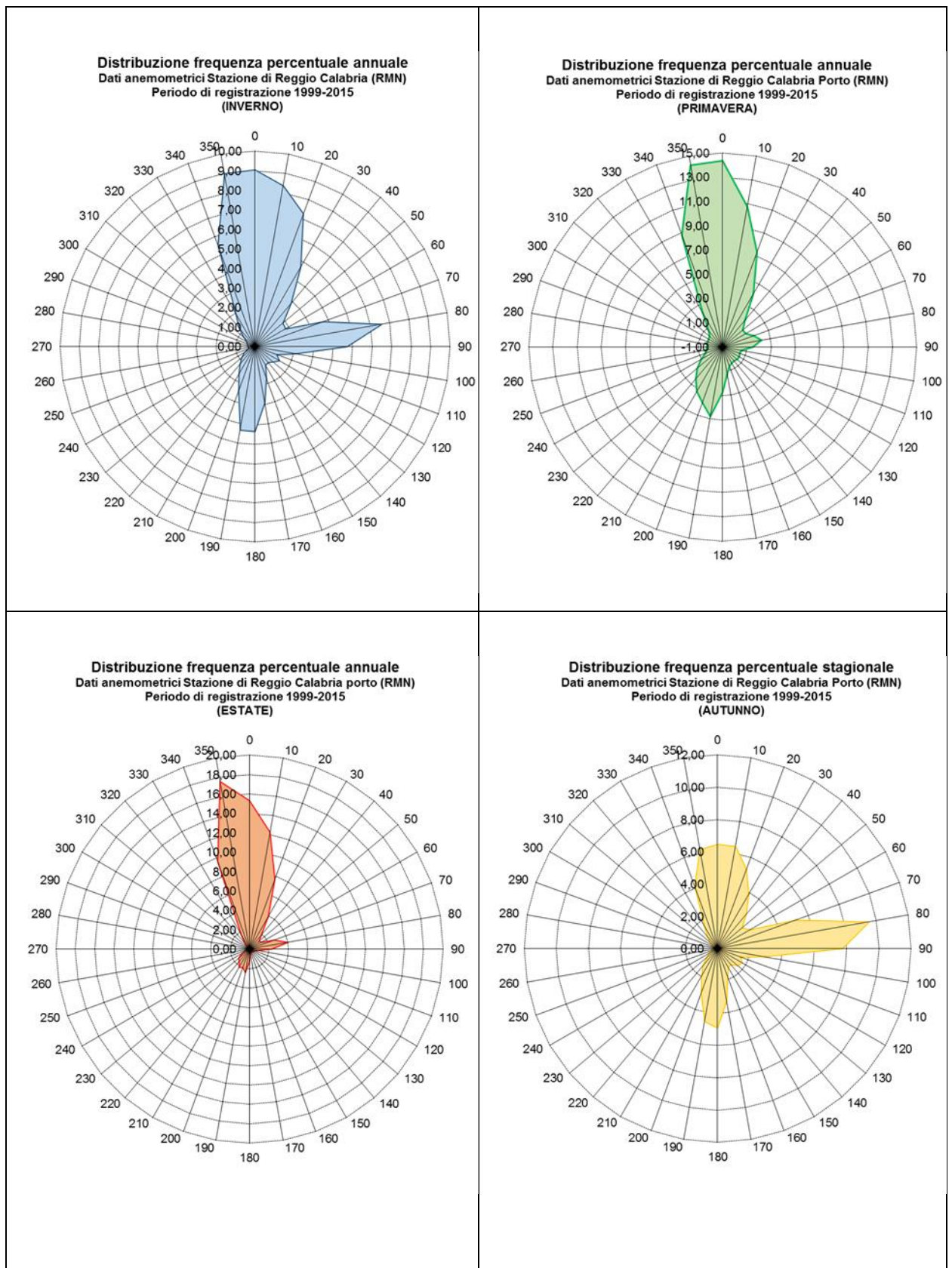


Figura 4.5. Stazione anemometrica di Messina (RMN): diagramma polare della frequenza stagionale del vento (Periodo 1998-2014).

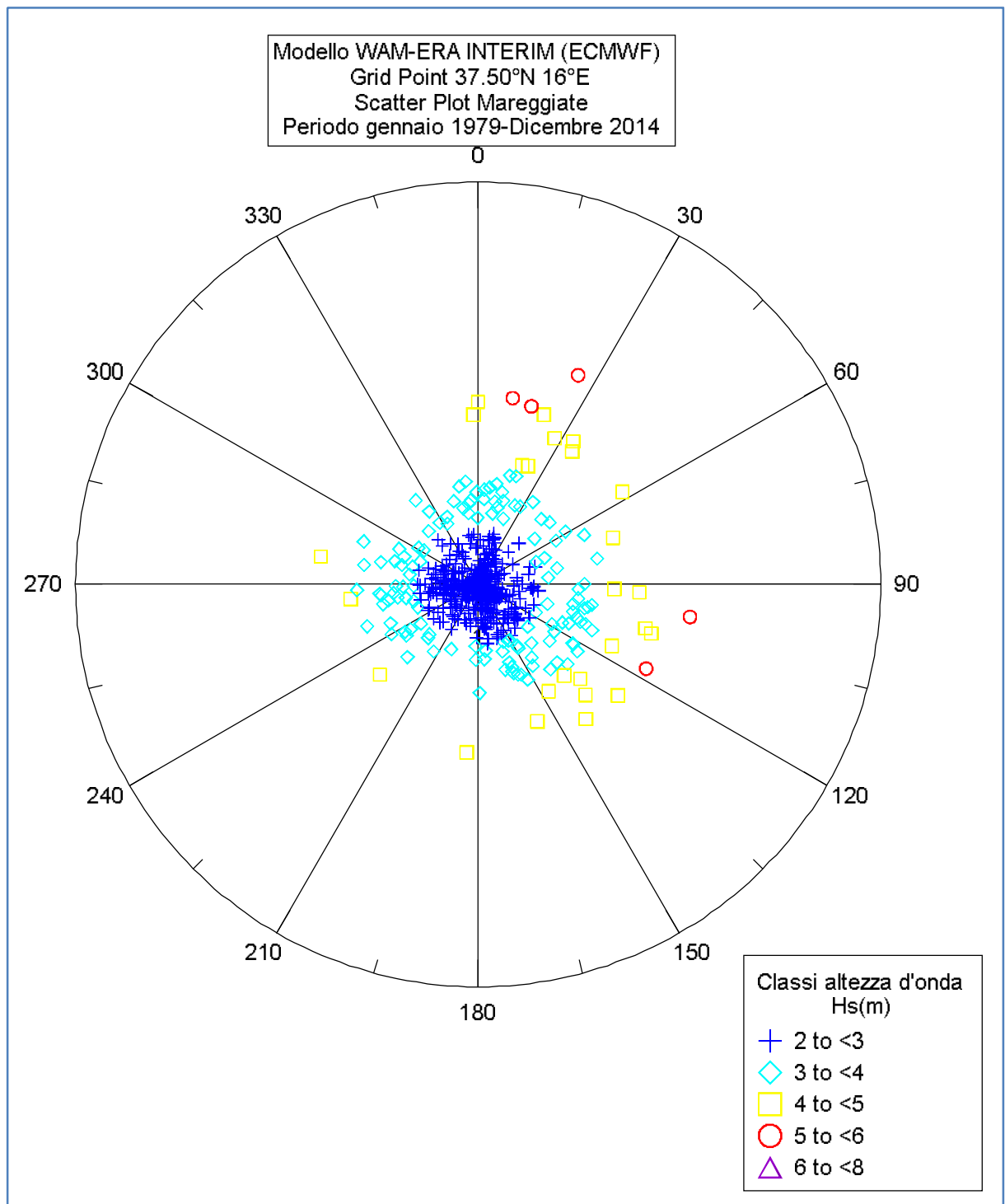


Figura 4.6 – Distribuzione direzionale delle mareggiate ricostruite con il modello WAM-ERA-Interim al largo dello stretto di Messina nel grid point 37.50°N-16°E riferite al periodo compreso tra il 01.01.1979 e il 31.12.2014.

Tabella 4.3 – Distribuzione per classi di altezza d'onda e di periodo medio T_m dei dati esaorari di moto ondoso forniti dal modello ERA-Interim dell'ECMWF nel grid point di coordinate 37.5°N 16°E, classificati per altezza d'onda e direzione media di provenienza (nel periodo compreso tra il 01.10.1979 e il 31.12.2014).

		Classi di altezza d'onda															Totale	
		Hs (m)	0,0 0,5	0,5 1,0	1,0 1,5	1,5 2,0	2,0 2,5	2,5 3,0	3,0 3,5	3,5 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0		>7,0
Classi Periodo																		
0	2	59															59	
2	4	15151	4578	32	4	4	1											19770
4	6	6552	11572	5811	1831	233	7											26006
6	8	130	933	1599	1576	1213	550	199	60	6	3						6269	
8	10	6	1	6	59	119	88	82	65	34	17	5	2				484	
10	12								1	3	3	1						8
12	14																0	
14	16																0	
16	18																0	
18	20																0	
>20																	0	
TOTALE		21898	17084	7448	3470	1569	646	282	128	43	21	5	2	0	0	0		
FREQ. CUM.		21898	38982	46430	49900	51469	52115	52397	52525	52568	52589	52594	52596	52596	52596	52596	52596	

Tabella 4.4 – Distribuzione di frequenza percentuale per classi di altezza d'onda e di periodo medio T_m dei dati esaorari di moto ondoso forniti dal modello ERA-Interim dell'ECMWF nel grid point di coordinate 37.5°N 16°E, classificati per altezza d'onda e direzione media di provenienza (nel periodo compreso tra il 01.10.1979 e il 31.12.2014).

		Classi di altezza d'onda															Totale	
		Hs (m)	0,0 0,5	0,5 1,0	1,0 1,5	1,5 2,0	2,0 2,5	2,5 3,0	3,0 3,5	3,5 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0		>7,0
Classi Periodo																		
0	2	0,112															59	
2	4	28,80	8,704	0,061	0,00	0,00	0,00											19770
4	6	12,45	22,00	11,04	3,48	0,44	0,01											26006
6	8	0,247	1,774	3,040	2,99	2,30	1,04	0,37	0,114	0,01	0,00						6269	
8	10	0,011	0,002	0,011	0,11	0,22	0,16	0,15	0,124	0,06	0,03	0,010	0,00				484	
10	12								0,00	0,006	0,00	0,00						8
12	14																0	
14	16																0	
16	18																0	
18	20																0	
>2																	0	
TOTALE		41,63	32,48	14,16	6,60	2,98	1,23	0,54	0,24	0,08	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
FREQ. CUM.		41,63	74,12	88,28	94,87	97,8	99,0	99,62	99,8	99,9	99,9	100,0	100,00	100,0	100,0	100,0	100,00	

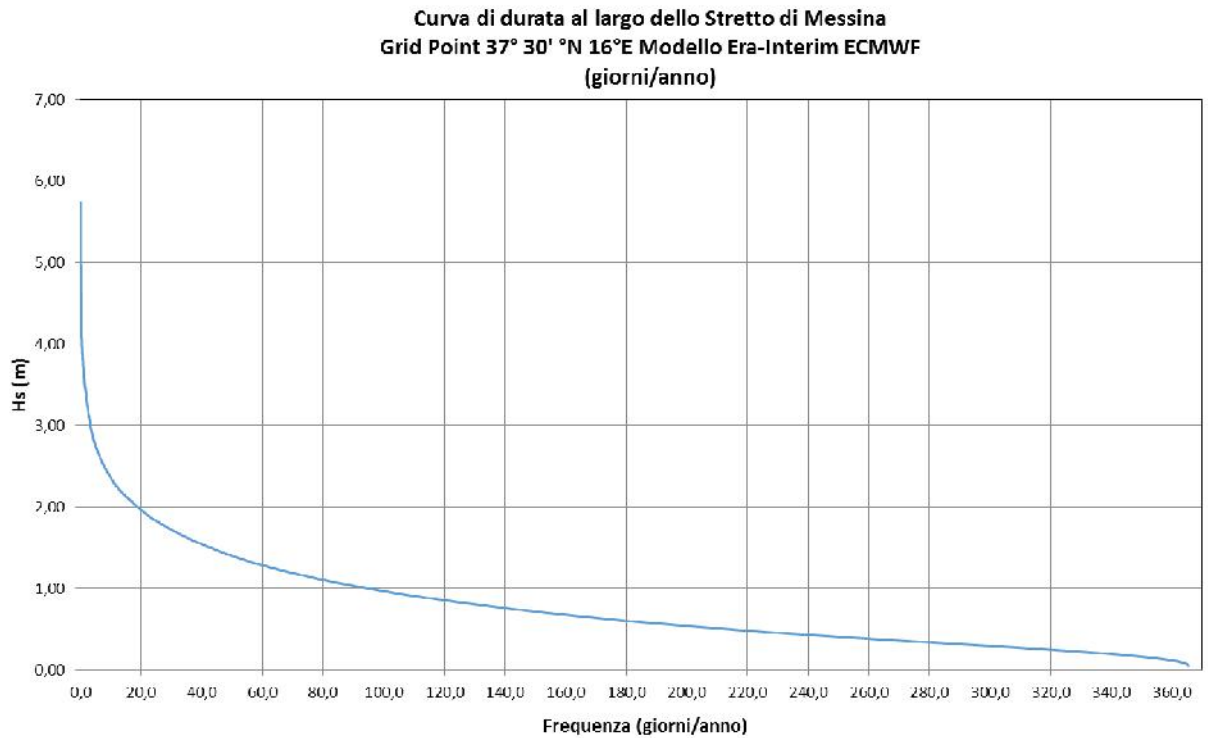


Figura 4.7 – Curva di durata omnidirezionale in frequenza (giorni/anno) dei dati ricostruiti e forniti con il modello WAM-ERA-Interim al largo dello stretto di Messina nel grid point 37.50°N-16°E riferite al periodo compreso tra il 01.01.1979 e il 31.12.2014.

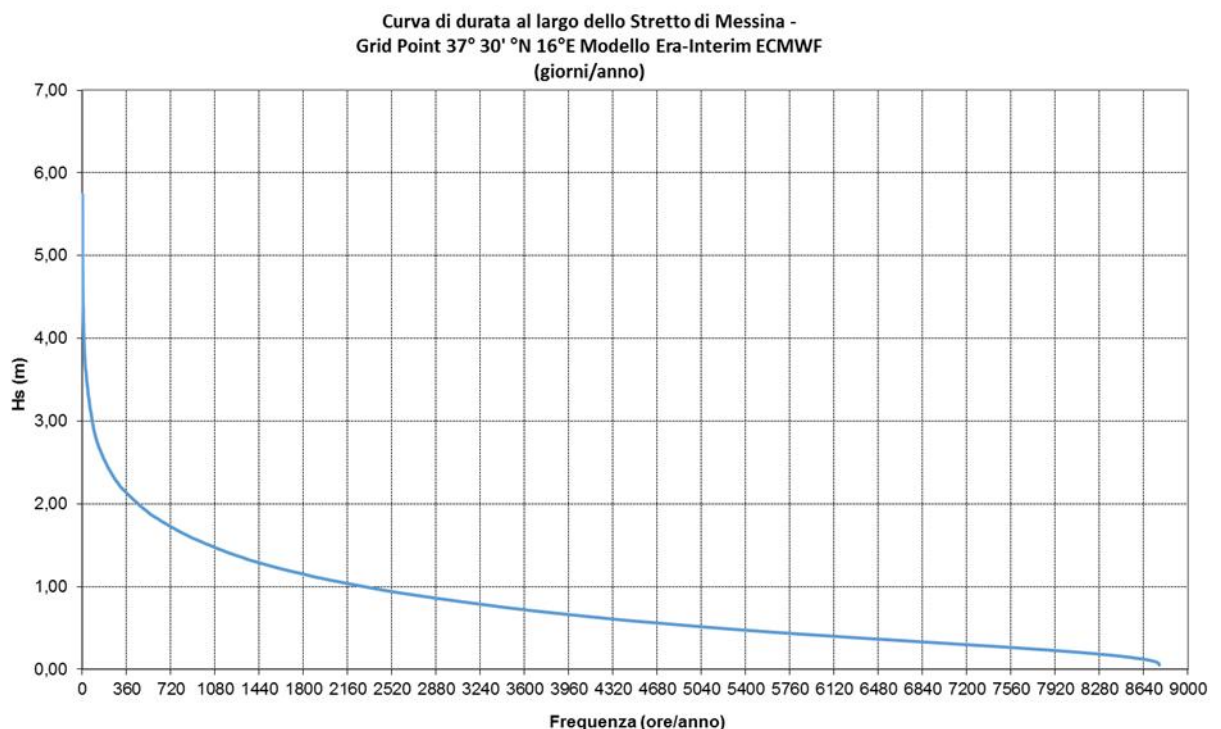


Figura 4.8 – Curva di durata omnidirezionale in frequenza di (ore/anno) dei dati ricostruiti e forniti con il modello WAM-ERA-Interim al largo dello stretto di Messina nel grid point 37.50°N-16°E riferite al periodo compreso tra il 01.01.1979 e il 31.12.2014.

4.3.1 Flusso energetico del moto ondoso al largo dello stretto di Messina (Grid Point 37.50°N 16°E ECMWF)

Sulla base del moto ondoso ricostruito dal modello WAM ERA-Interim dell'ECMWF nel punto al largo dello Stretto di Messina, è stato determinato il flusso caratteristico dell'energia del moto ondoso in acqua profonda a sud dell'imboccatura meridionale.

Per ogni stato di mare (rappresentato da ciascuno dei dati della serie ondometrica ricostruita al largo del sito in esame) è stato determinato il valore del flusso energetico del moto ondoso, dato dalla seguente relazione:

$$E = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot H_s^2 \cdot n \cdot C \quad (4.1)$$

dove:

$g = 9.806 \text{ m/s}^2$ – accelerazione di gravità;

$\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$ – densità dell'acqua di mare;

H_s = altezza d'onda significativa (m)

$n = 0.5 \times (1 + 2kh/\sinh(2kh))$ (in acqua profonda $n = 0.5$)

$k = 2\pi/L$

h = profondità nel punto;

L = lunghezza d'onda;

$C = \frac{g \cdot T}{2\pi}$ celerità dell'onda in acqua profonda;

T = è il periodo significativo dell'onda in secondi;

da cui:

$$E = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H_s^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{g \cdot T_s}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{32 \cdot \pi} \cdot \rho \cdot g^2 \cdot H_s^2 \cdot T_s = 0.986 \cdot H_s^2 \cdot T_s \text{ (kW / m)} \quad (4.2)$$

Per ogni classe di altezza i (passo di discretizzazione di 0,5m) e direzione j (passo di discretizzazione di 10°) è stato determinato il valore del flusso di energia medio annuo compiuto dal moto ondoso, per unità di fronte d'onda, $E_{mij} = \sum E_{ij}/N$.

Essendo E_{ij} il flusso di energia del singolo evento di classe (i,j) e N il numero degli eventi totali registrati. Nel calcolo sono stati esclusi gli eventi caratterizzati da un'altezza significativa inferiore ai 50 cm, in quanto dal punto di vista energetico si possono ritenere trascurabili.

I risultati del calcolo del flusso energetico medio annuo sono sintetizzati nella Tabella 4.5 e nella Figura 4.9, con la simbologia utilizzata nel testo. In figura 4.9 è riportato il diagramma polare del flusso di energia con passo di discretizzazione ogni 10° gradi.

Sulla base della distribuzione degli eventi ondosi osservati, al largo dello stretto di Messina corrisponde una direzione media risultante del vettore flusso di energia del moto ondoso pari a circa 144°N (Scirocco), con modulo pari a circa 1kW. Il massimo flusso di energia media è associato alla direzione di 110°N (Levante-Scirocco) ed è pari a circa 0,4 kW/m.

Tabella 4.5 – Distribuzione direzionale del flusso di energia medio annuo (W/m) dei dati esaorari di moto ondoso forniti dal modello WAM ERA-Interim dell'ECMWF nel grid Point 37.50°N 16°E Distribuzione al largo dello Stretto di Messina – Periodo 01.01.1979-31.12.2014.

DIR °N	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA H _s (m)													TOTAL E
	<0,50	0,50 1,0	1,0 1,5	1,5 2,0	2,0 2,5	2,5 3,0	3,0 3,5	3,5 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	>6,0	
0	5,45	38,41	33,49	29,43	35,87	28,95	19,58	16,41	7,22	9,67				224,48
10	7,44	44,83	43,59	48,99	52,41	28,23	23,8	21,66	7,48		5,72			284,15
20	10,18	64,3	60,41	70,05	49,09	45,32	26,2	11,18	7,08	9,72	5,58	7,46		366,57
30	8,87	58,11	59,67	51,44	44,74	12,73	15,96	10,78	15,08	13,9		7,05		298,33
40	3,54	30,44	33,32	26,9	20,63	6,83	8,14	5,39	4,03	13,52				152,74
50	2,46	24,13	27,14	19,28	17,41	8,83	5,83	8,02	3,59					116,69
60	1,66	22,4	22,86	19,68	26,15	18,59	14,43	8,23	7,79	4,99				146,78
70	1,9	21,69	25,49	20,59	23,2	19,43	14,86	5,9	3,85					136,91
80	1,68	19,78	21,52	25,97	18,32	13,84	14,82	8,79						124,72
90	1,88	21,13	28,97	35,58	34,06	33,2	20,82	16,5	15,73	4,7				212,57
100	1,93	29,43	45,62	49,68	42,99	29,22	19,63	34,21	7,68	10,36	6,28			277,03
110	1,95	35,03	61,37	59,71	71,32	45,43	55,74	46,02	16,55	9,99				403,11
120	2,28	37,18	60,05	62,78	70,16	61,6	30,43	20,84	19,9	5,31	6,27			376,8
130	2,22	36,89	59,72	73,07	58,96	52,59	43,7	24,78	9,17	5,68	6,46			373,24
140	2,71	38,64	64,54	67,92	47,62	31,84	19,36	11,78	15,3	4,91				304,62
150	3,26	40,95	71,48	71,53	54,94	31,54	26,61	11,75	3,55					315,61
160	3,1	46,18	81,82	85,95	62,38	46,74	17,99	16,9	7,72					368,78
170	2,85	42,09	65,05	69,67	52,54	34,26	8,02	5,32						279,8
180	2,74	38,28	52,11	53,22	22,29	15,29	7,96	2,84		4,62				199,35
190	2,33	30,2	43,69	27,91	20,75	12,39	2,31		3,83					143,41
200	1,89	26,01	41,77	37,18	13,64	6,71	3,76	11,04						142
210	2,07	29,04	38,16	43,25	22,26	17,79	10,07							162,64
220	2,23	30,31	42,51	46,53	30,62	17,32	9,7	3,29						182,51
230	2,69	30,02	49,81	46,26	29,34	16,18	5,7	2,68	3,68					186,36
240	3,49	36,6	53,57	73,9	58,13	22,94	12,2	2,65						263,48
250	3,46	34,82	69,29	81,06	57,48	19,57	17,18	5,43						288,29
260	3,14	40,56	79,67	82,14	75,85	38,98	22,63	10,36	3,41					356,74
270	2,64	37,44	65,5	71,73	63,69	41,81	20,86	2,64						306,31
280	2,62	33,73	56,34	55,87	38,2	21,25	9,41	5,24		4,38				227,04
290	2,57	27,66	33,4	31,75	22,78	20,07	11,05	8,22						157,5
300	2,21	25,17	29,37	20,28	15,34	8,75	5,52	2,6						109,24
310	2,71	23,42	22,15	14,72	17,87	15,06	3,52	2,67						102,12
320	3,14	21,78	21,73	16,44	10,11	12,69	1,91	2,6						90,4
330	3,65	23,81	19,51	16,26	19,22	9,79	9,12	5,16						106,52
340	5,22	26,94	23,7	16,38	15,89	7,74	10,99							106,86
350	5,27	33,19	25,46	23,13	15,3	19,11	20,78	10,65	3,41					156,3
TOTALE	119,43	1200,6	1633,9	1646,2	1331,6	872,61	570,59	362,53	166,05	101,75	30,31			8050

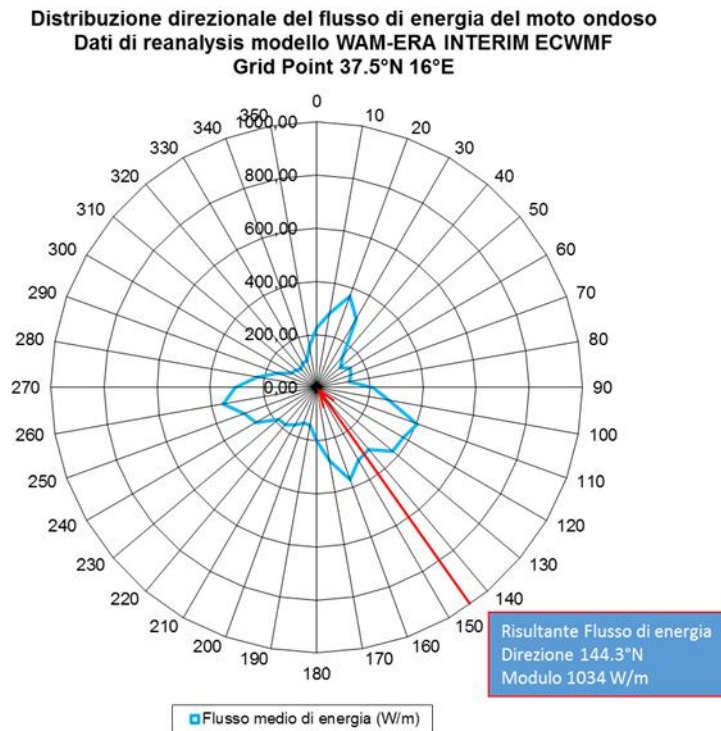


Figura 4.9 – Diagramma polare del flusso medio annuo di energia nel punto al largo (W/m) dei dati esarari di moto ondoso forniti dal modello WAM ERA-Interim dell'ECMWF nel grid Point 37.50°N 16°E- Distribuzione al largo dello Stretto di Messina – Periodo 01.01.1979-31.12.2014.

4.3.2 Determinazione della relazione più probabile fra altezza e periodo d'onda significativo

Considerata l'indisponibilità nel database di pubblico dominio dell'ECMWF della serie di dati del periodo di picco T_p , per la determinazione del legame analitico periodo-altezza d'onda si è potuto operare esclusivamente sui dati di periodo medio *zero-crossing* $T_m = T_z = T_{0.2}$. Inoltre, ai fini della determinazione della relazione più probabile fra altezza e periodo del moto ondoso risulta più significativo operare sui dati di periodo medio T_m poiché questo parametro risulta sempre più disperso nei valori rispetto a T_p : il periodo di picco infatti, essendo l'inverso della frequenza di picco che è cadenzata ogni *0.01 Hertz*, risulta assumere solo valori cadenzati anch'esso.

Nelle Figura 4.9 sono riportati i grafici delle distribuzioni altezza significativa-periodo medio $T_m = T_{0.2}$ dei dati esaorari per i quattro settori direzionali precedentemente indicati come significativi per la propagazione degli stati di mare dal largo all'interno dello stretto di Messina. Nelle stesse figure sono rappresentate le curve di correlazione dei due parametri Hs-Tm e le relative equazioni, dedotte operando sull'intero archivio dei dati a disposizione suddiviso secondo settori direzionali. Nelle stesse figure sono rappresentate le curve di correlazione dei due parametri Hs-Tm e le relative equazioni.

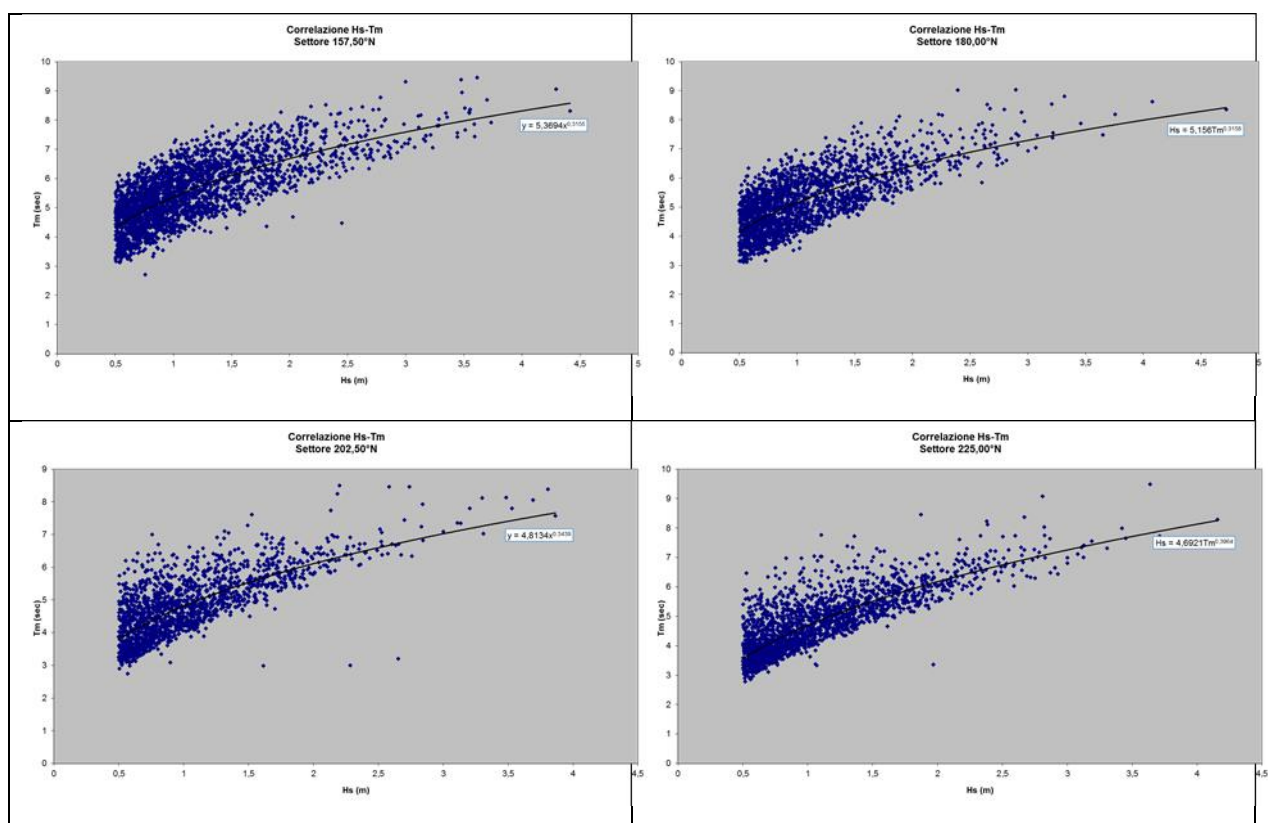


Figura 4.9 – Grafici di correlazione Hs-Tm per quattro settori direzionali (Scirocco-Mezzogiorno, Mezzogiorno, Libeccio-Mezzogiorno e Libeccio) dei dati di moto ondoso della serie ricostruite con il modello WAM-ERA-Interim al largo dello stretto di Messina nel grid point 37.50°N-16°E riferite al periodo compreso tra il 01.01.1979 e il 31.12.2014

Lo studio della correlazione tra altezza e periodo del moto ondoso è stato effettuato utilizzando la metodologia di seguito descritta. Per ciascun settore direzionale interessante ai fini della propagazione del moto ondoso nello Stretto, si è determinata la somma dei periodi medi di tutti gli eventi ricadenti in ogni classe di suddivisione per direzione ed altezza d'onda della serie di dati. Ciascuna sommatoria è stata divisa per il numero di eventi che caratterizza ogni classe determinando così il periodo medio T_m associabile al

valore di altezza d'onda centrale della classe. Attraverso quest'analisi sono stati determinati i valori del periodo medio caratteristici di ogni classe, riportati nella tabella 4.6. In blu sono evidenziati i periodi medi delle classi di direzione dei mari caratterizzati dalla propensione a propagarsi e penetrare all'interno dell'area dello Stretto.

Tabella 4.6 – Periodi medi T_m caratteristici di ogni classe di direzione e di altezza d'onda per i dati esaorari di moto ondoso forniti dal modello ERA-Interim dell'ECMWF nel grid point di coordinate 37.5°N 16°E, classificati per altezza d'onda e direzione media di provenienza (nel periodo compreso tra il 01.10.1979 e il 31.12.2014).

		Classi di altezza d'onda															
		Hs (m)	0,0 0,5	0,5 1,0	1,0 1,5	1,5 2,0	2,0 2,5	2,5 3,0	3,0 3,5	3,5 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0	>7,0
DIR °N	Classi Di direzione																
0	0 348,75		4,51	5,37	6,02	6,50	6,93	7,44	7,81	8,33	8,73	8,48					
22,5	22,5 11,25		4,89	5,53	6,14	6,66	7,07	7,74	7,86	8,28	8,67	8,27	8,98				
45	45 33,75		4,62	5,27	5,84	6,48	6,94	7,48	7,73	8,57	8,11						
67,5	67,5 56,25		4,72	5,55	6,33	6,71	7,18	7,94	8,17	8,73	9,01						
90	90 78,75		5,03	5,96	6,68	7,29	7,66	8,08	8,14	8,85	8,49	9,30					
112,5	112,5 101,25		5,17	6,08	6,93	7,56	7,91	8,27	8,63	9,03	9,27	9,29					
135	135 123,75		4,94	5,75	6,60	7,02	7,46	8,31	8,67	9,18	9,57	9,57					
157,5	157,5 146,25		4,90	5,77	6,40	6,90	7,31	7,75	8,24	8,46							
180	168,75 191,25		4,70	5,52	6,12	6,75	7,34	7,70	7,84	8,63	8,35						
202,5	191,25 213,75		4,33	5,13	5,82	6,41	6,82	7,55	7,95								
225	213,75 236,25		4,14	5,13	5,79	6,47	7,07	7,32	8,60	8,29							
247,5	236,25 258,75		4,14	5,02	5,68	6,20	6,75	7,44	7,57								
270	258,75 281,25		4,28	4,99	5,68	6,25	6,71	7,24	7,61	7,68							
292,5	281,25 303,75		4,32	5,09	5,75	6,27	6,67	7,06	7,75								
315	303,75 326,25		4,24	5,03	5,64	6,29	6,71	7,02	7,61								
337,5	345 355		4,14	5,08	5,69	6,31	6,67	6,90	7,22	7,68							

Il periodo significativo T_s può essere calcolato, a partire dal periodo $T_m=T_{02}$, con la relazione (4.3):

$$T_s = 1,2048 \cdot T_{02} \quad (4.3)$$

con il coefficiente moltiplicativo dedotto dal valore medio del campo di variazione dei valori ($T_{02}=0.81\div 0.85\cdot T_s$) ricavato dalle misure della intera Rete Ondametrica Nazionale nei primi sei anni di rilevazione. Le "Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe frangiflutti" del 1994 indicano, "in mancanza di informazioni specifiche", un diverso campo di variazione ($T_s=1.16\div 1.19\cdot T_{02}$). Inoltre nelle stesse istruzioni il periodo significativo $T_s= 1.12\div 1.14\cdot T_m$ mentre il periodo di picco $T_p=(1.13\div 1.07) \cdot T_m$. Applicando i valori medi dei coefficienti delle due precedenti relazioni si ottiene che il periodo di picco è dato da:

$$T_p = 1,26 \cdot T_m \quad (4.4)$$

Nella tabella 4.7 sono riportati i periodi di picco T_p calcolati a partire dai valori riportati nella tabella 4.6 relativi alle classi di direzione dei mari, significative per la loro propensione di propagarsi e penetrare all'interno dell'area dello stretto.

Tabella 4.7 – Periodi di picco T_p caratteristici di ogni classe di direzione e di altezza d'onda per i dati esaorari di moto forniti dal modello ERA-Interim dell'ECMWF nel grid point di coordinate 37.5°N 16°E, classificati per altezza d'onda e direzione media di provenienza (nel periodo compreso tra il 01.10.1979 e il 31.12.2014).

		Classi di altezza d'onda															
		Hs (m)	0,0 0,5	0,5 1,0	1,0 1,5	1,5 2,0	2,0 2,5	2,5 3,0	3,0 3,5	3,5 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0	>7,0
DIR °N	Classi Di direzione																
157,5	157,5 146,25		6,17	7,27	8,07	8,69	9,21	9,77	10,38	10,66							
180	168,75 191,25		5,92	6,95	7,71	8,50	9,24	9,70	9,88	10,87	10,52						
202,5	191,25 213,75		5,46	6,47	7,34	8,08	8,60	9,52	10,02								
225	213,75 236,25		5,22	6,46	7,30	8,16	8,91	9,22	10,84	10,45							

Interpolando i dati di T_p relativi a ciascun settore direzionale e associati al valore centrale della classe di altezza d'onda, sono state tracciate le curve che rappresentano l'andamento del legame funzionale direzionale tra l'altezza d'onda significativa ed il periodo di picco, riportate nella figura 4.10.

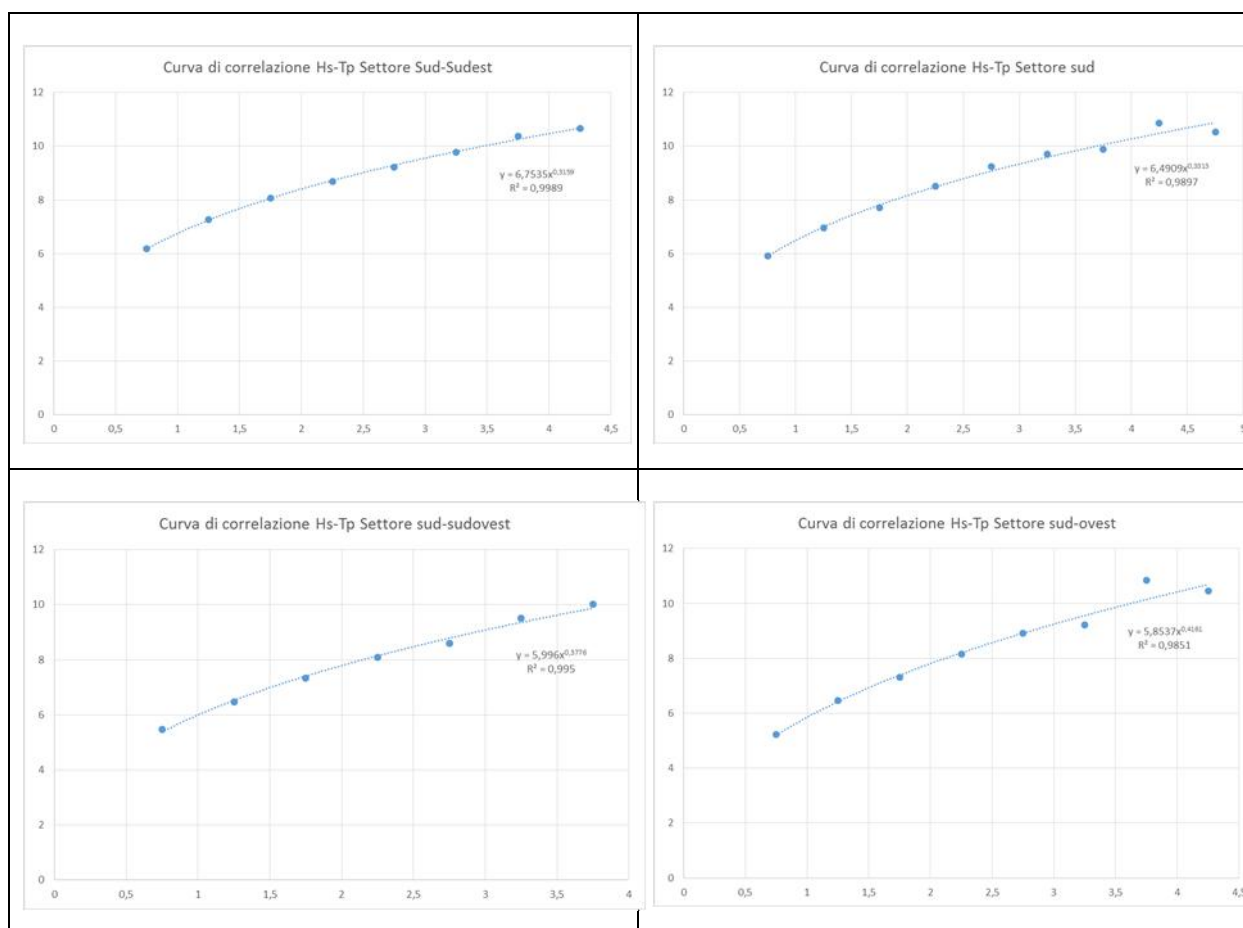


Figura 4.10 – Grafici di correlazione H_s-T_p relativi a quattro settori direzionali (Scirocco-Mezzogiorno, Mezzogiorno, Libeccio-Mezzogiorno e Libeccio). Dati di moto ondoso della serie ricostruita dal modello WAM-ERA-Interim al largo dello stretto di Messina nel grid point 37.50°N-16°E, riferita al periodo compreso tra il 01.01.1979 e il 31.12.2014.

Nella tabella 4.8 sono riportate le equazioni dei legami funzionali H_s-T_m e H_s-T_p per ciascun settore direzionale.

Tabella 4.8 – Legami funzionali caratteristici tra altezze e periodi medi e di picco T_p caratteristici di diversi settori direzionali.

DIR °N	Classi di direzione		Settore	Relazione Hs-Tm	Relazione Hs-Tp
157,5	157,5	146,25	Sud-SudEst	$T_p = 5.36 \cdot (H_s)^{0.3159}$	$T_p = 6.75 \cdot (H_s)^{0.3159}$
180	168,75	191,25	Sud	$T_p = 5.15 \cdot (H_s)^{0.3313}$	$T_p = 6.49 \cdot (H_s)^{0.3313}$
202,5	191,25	213,75	Sud-SudOvest	$T_p = 4.76 \cdot (H_s)^{0.3776}$	$T_p = 6.00 \cdot (H_s)^{0.3776}$
225	213,75	236,25	Sud-Ovest	$T_p = 4.64 \cdot (H_s)^{0.4161}$	$T_p = 5.85 \cdot (H_s)^{0.4161}$

4.3.3 Criteri di valutazione del clima ondoso e del rischio di eventi estremi

Le funzioni base per la descrizione del clima ondoso di un paraggio sono:

$P(H_s > h)$, la probabilità che l'altezza d'onda significativa H_s superi una qualsiasi soglia assegnata h , ovvero la frazione di tempo in cui la H_s si mantiene al disopra di una qualsiasi soglia assegnata h , nella località in esame. [Naturalmente P è una funzione decrescente di h];

$P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$, la probabilità che la H_s superi una qualsiasi assegnata soglia h con direzione di propagazione delle onde contenuta entro un assegnato settore $[\theta_1, \theta_2]$;

$\bar{b}(a)$, la regressione basi-altezze delle mareggiate triangolari equivalenti, vale a dire la durata di tempo media di mareggiate nelle quali la H_s tocchi un valor massimo pari ad a .

Due funzioni fondamentali per l'analisi di rischio di eventi ondosi estremi sono

$R(H_s > h)$, il periodo di ritorno di una mareggiata nella quale la H_s superi una qualsiasi assegnata soglia h ;

$R(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$, il periodo di ritorno di una mareggiata nella quale la H_s superi una qualsiasi assegnata soglia h con direzione di propagazione delle onde contenuta entro un assegnato settore $[\theta_1, \theta_2]$

Qui verranno proposte le probabilità $P(H_s > h)$ e $P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ nel piano delle variabili ausiliarie

$$X \equiv 100 \ln(2.5h) \quad \text{con } h \text{ in metri} \quad Y \equiv 100 \ln \ln \frac{1}{P}. \quad (4.5)$$

Quanto alla direzione delle onde, si farà riferimento sia ad A = angolo orario tra il Nord e la direzione di provenienza delle onde, sia a θ = angolo orario tra l'asse y di una coppia cartesiana x, y (con x parallelo all'allineamento di costa) e la direzione di propagazione delle onde.

Nel Mediterraneo la $P(H_s > h)$ per P minore grossomodo di 0.20 è ben rappresentata dall'espressione

$$P(H_s > h) = \exp \left[- \left(\frac{h}{w} \right)^u \right], \quad (4.6)$$

con i parametri w e u che variano in generale da località a località. Nel piano delle variabili ausiliarie X, Y la (4.6) è rappresentata da una retta. La $P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$, per P minore grossomodo di 0.01, è di solito ben rappresentata dall'espressione

$$P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2) = \exp \left[- \left(\frac{h}{w_\alpha} \right)^u \right] - \exp \left[- \left(\frac{h}{w_\beta} \right)^u \right], \quad (4.7)$$

dove il valore dell'esponente u è lo stesso dell'espressione (4.6), e w_α e w_β variano in generale da settore a settore, oltreché da località a località.

Per tutti i mari del pianeta $\bar{b}(a)$ è ben espressa da un'esponenziale:

$$\bar{b}(a) = K_1 b_{10} \exp\left(K_2 \frac{a}{a_{10}}\right). \quad (4.8)$$

Il parametro K_2 è minore di zero in tutti i mari cosicché la regressione è monotona decrescente: debolmente decrescente nel Mediterraneo, decrescente in modo più marcato in Atlantico, ed in modo ancora più marcato nel Pacifico. Nel Mediterraneo si può assumere $K_1 = 1.1$, $K_2 = -0.11$. Quanto ai parametri a_{10} e b_{10} nell'area tirrenica meridionale si può fissare $a_{10} = 3.4$ m, $b_{10} = 70$ ore.

Per il periodo di ritorno $R(H_s > h)$ vale la soluzione analitica (4.9)

$$R(H_s > h) = \frac{\bar{b}(h)}{h p(H_s = h) + P(H_s > h)}, \quad (4.9)$$

dove $p(H_s = h)$ è la densità di probabilità relativa alla probabilità di superamento $P(H_s > h)$:

$$p(H_s = h) = -\frac{dP(H_s > h)}{dh}. \quad (4.10)$$

Infine il periodo di ritorno $R(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ si può ricavare seguendo la logica proposta da *Boccotti* (1997). Per il settore di traversia principale si può assumere che $R(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ coincida con $R(H_s > h)$. Per gli altri settori si può operare la costruzione grafica indicata nella Fig. 2.1. Si entra (input) con l'altezza h corrispondente ad un assegnato valore R del periodo di ritorno $R(H_s > h)$. Si ricava la probabilità corrispondente a tale valore di h in base alla $P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ del settore di traversia principale. Si ricava il valore di h (output) corrispondente a tale valore di P , attraverso la probabilità $P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ del generico settore di interesse. Tale valore di h (output) rappresenta la soglia di altezza significativa superata con periodo di ritorno R nel generico settore direzionale di interesse.

NOTA

Le soluzioni $R(H_s > h)$ e $R(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ si basano sul concetto di mareggiata triangolare equivalente introdotto da Boccotti negli anni '80 per risolvere il problema dei periodi di ritorno di mareggiate di assegnate caratteristiche. [Per un approfondimento si veda Boccotti, UTET, 1997.]

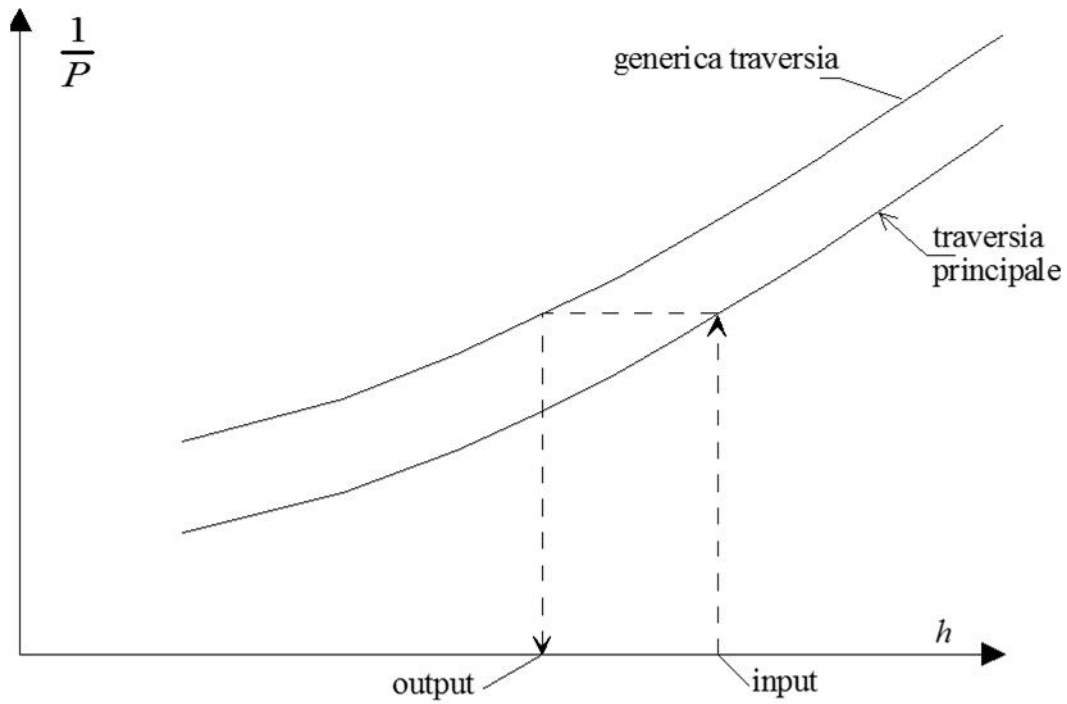


Fig. 4.11 – Si entra in ascisse con il valore di altezza significativa della traversia principale, si segue il flusso indicato dalle frecce e si esce con il corrispondente valore di altezza significativa per il generico settore direzionale.

4.4 Trasferimento del clima di moto ondoso sottocosta

4.4.1 Premessa

Nel precedente capitolo è stato determinato il clima ondoso in acque profonde a sud dello Stretto, in un punto che convenzionalmente è stato posto in posizione baricentrica, caratterizzato da fondali di elevata profondità (oltre -1000 m.s.l.m.). Al contempo nel capitolo relativo all'analisi anemologica è stato possibile determinare il clima di vento caratteristico dell'area all'interno dello stretto, fronti stante il paraggio in esame.

In questo capitolo verranno trattati i seguenti aspetti:

- Il trasferimento del clima di moto ondoso dall'esterno dello stretto di Messina al largo del sito in esame all'interno dello stretto e, successivamente fino al limite sottocosta;
- Lo studio del fenomeno di trasferimento del contenuto energetico dei venti al mare per determinare il moto ondoso di generazione locale all'interno dello Stretto di Messina
- Valutazione dei parametri caratteristici del moto ondoso di generazione locale (interno allo Stretto) al limite sottocosta del paraggio in esame.

Per lo studio della trasformazione del moto ondoso dall'esterno dello Stretto fino al paraggio in esame e della generazione locale delle onde è stato utilizzato un modello matematico le cui caratteristiche saranno di seguito descritte.

4.4.2 Studio della propagazione del moto ondoso

Nella propagazione dalle zone di acqua profonda verso i bassi fondali il moto ondoso subisce modifiche a causa di differenti fenomeni.

Avvicinandosi alla costa l'onda progressiva procede su fondali di profondità decrescente ed assumendo il principio di conservazione dell'energia si deduce che l'onda riduce la propria altezza H mano a mano che avanza verso la costa: questo effetto viene detto "shoaling". Quando la profondità d è tale che il rapporto con il periodo dell'onda d/T^2 è uguale a 0.24 m/s^2 la lunghezza dell'onda si riduce, l'onda risale rapidamente diventando più ripida (H/L aumenta), fino a diventare instabile in prossimità della battigia (in acque basse) per poi frangere, dissipando in tal modo l'energia trasferita dal largo alla riva.

L'onda inoltre modifica le sue caratteristiche anche per effetto del fenomeno della rifrazione. Quando infatti si avvicina alla costa con la cresta angolata di un angolo α_0 su acque profonde rispetto alle isobate di fondo, la cresta ruota riducendo il suo valore α_0 e tendendo al parallelismo con la linea di riva: la celerità decresce al ridurre la profondità e quindi la parte di cresta che si trova su maggiori fondali, viaggia più veloce di quella su più bassi fondali. Tale fenomeno determina una ripercussione sull'altezza dell'onda che si riduce sulla base di un rapporto K_r detto coefficiente di rifrazione definibile mediante semplici valutazioni geometriche, trovando analogia con la legge di Snell dell'ottica geometrica. Gli effetti della rifrazione intervengono sulle profondità intermedie ed in acque basse, là dove l'onda "sente" i fondali e non in acque profonde, nelle quali la celerità dell'onda non è condizionata dalla profondità d .

La stima dei procedimenti di trasformazione del moto ondoso sottocosta, rappresenta una componente critica di molti problemi dell'ingegneria marittima quali la previsione dei mutamenti della batimetria e della

linea di costa, la progettazione delle opere marittime, e la valutazione degli effetti determinati dalle opere costiere sulla naturale evoluzione delle spiagge.

Per realizzare la riproduzione dei fenomeni di trasformazione nella propagazione del moto ondoso sono stati sviluppati numerosi modelli matematici. Questi modelli permettono di descrivere quantitativamente i cambiamenti dei parametri dell'onda (altezza, periodo, direzione e forma dello spettro) nel passaggio tra la zona offshore e la zona vicino alla costa.

4.4.3 *Modelli matematici applicati al trasferimento del moto ondoso sottocosta*

Nell'esecuzione dello studio del moto ondoso si è provveduto a separare il processo di propagazione del moto ondoso dall'area esterna allo stretto, dal processo di generazione dei mari all'interno di esso.

Il processo di propagazione del moto ondoso studiato nel presente capitolo è volto alla determinazione delle caratteristiche delle onde nell'area antistante il sito in esame in modo da procedere successivamente alle valutazioni inerenti il fenomeno .

Per studiare in dettaglio la trasformazione che l'onda subisce nella sua propagazione verso costa, DHI Italia ha costruito un modello numerico bidimensionale, utilizzando il modulo SW (Spectral Waves) del codice di calcolo MIKE 21 DHI (Danish Hydraulics Institute).

L'analisi dell'evoluzione del moto ondoso e delle trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione verso costa è stata condotta mediante tale modello numerico bidimensionale. Il pacchetto MIKE 21 dispone di diverse versioni che si differenziano in base alle schematizzazioni geometriche, con la versione ai volumi finiti e maglia flessibile (Flexible Mesh) che offre la possibilità di condurre simulazioni integrate tra diversi moduli, simulando quindi la mutua influenza delle diverse fenomenologie considerate quali onde, correnti, trasporto solido.

La propagazione del moto ondoso viene modellata con algoritmi di calcolo che simulano le trasformazioni delle grandezze spettrali del moto ondoso (principalmente, gli effetti dissipativi dovuti ai frangimenti, all'attrito con il fondo, agli effetti di rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche).

MIKE 21 SW include due differenti formulazioni: "Directional decoupled parametric" e "Fully spectral". La prima delle due formulazioni è basata su una parametrizzazione dell'equazione di conservazione dell'energia del moto ondoso. La parametrizzazione è effettuata nel dominio della frequenza mediante l'introduzione come variabili dipendenti del momento di ordine zero e del momento di primo ordine dello spettro (Holthuijsen, 1989). La seconda formulazione è basata sulla conservazione dell'energia del moto ondoso come descritta da Komen (1994) e Young (1999). I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- Generazione dell'onda ad opera del vento;
- Interazione non lineare tra le onde;
- Dissipazione dovuta al cosiddetto "white capping"
- Dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- Dissipazione dovuta al frangimento;

- Rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni del fondale;
- Interazione onde-correnti;
- Diffrazione;
- Riflessione semplice;
- Frangimento.

I passi di un'indagine tipo consistono in:

- acquisizione ed importazione dei dati (ondametrici, batimetrici e immagini georiferite);
- analisi del clima ondoso al largo;
- individuazione delle classi (H_s , T_p , MWD);
- costruzione della mesh di calcolo;
- setup del modello SW;
- analisi e visualizzazione dei risultati.

MIKE 21 SW è un modello spettrale per vento ed onde di nuova generazione, basato su una griglia non strutturata. Il modello simula la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di swell sia offshore, sia in aree costiere.

Il processo di propagazione dell'onda si risolve considerando l'equazione di bilancio dell'energia associata al moto ondoso che tiene in conto i diversi contributi: la variazione nel tempo, la propagazione nello spazio, la variazione nella direzione, la variazione nel dominio delle frequenze e i termini sorgente. I termini sorgente sono fenomeni fisici che contribuiscono alla variazione dell'energia del moto ondoso sia in senso negativo sia in senso positivo. I termini sorgente negativi sono i fenomeni che hanno una funzione dissipativa, come quelli sopra elencati, i termini positivi sono invece quelli che svolgono una funzione di accrescimento, come la generazione del moto ondoso per effetto del vento.

Il modello descrive l'evoluzione delle caratteristiche delle onde (altezza, periodo, direzione e forma spettrale) nella propagazione dal largo verso riva in seguito ai fenomeni di rifrazione e shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, di frangimento, di diffrazione, di interazione tra le onde e di whitecapping.

Le simulazioni effettuate con MIKE 21 SW permettono di ottenere una dettagliata rappresentazione della distribuzione dell'altezza d'onda significativa in tutto il dominio di calcolo, con particolare attenzione alla zona più prossima alla spiaggia, laddove la risoluzione spaziale della mesh di calcolo è pari a circa 5m (lunghezza media dei lati dei triangoli che compongono la mesh).

L'osservazione dei risultati del modello risulta di interesse nella valutazione dei processi di propagazione del moto ondoso dovuti alle variazioni batimetriche. In particolare si può affermare che, data l'elevata profondità del fondale, non si avverte una concreta riduzione dell'altezza d'onda per effetto della rifrazione. In tutte le condizioni le onde dissipano buona parte dell'energia per effetto del frangimento determinando di conseguenza valori di altezza d'onda significativa abbastanza elevati in prossimità della spiaggia.

Durante la propagazione verso la costa l'onda subisce diverse trasformazioni; una delle trasformazioni più rilevanti nello studio delle dinamiche costiere è il processo di rifrazione: la rotazione del fronte d'onda che tende a disporsi parallelo alle isobate ed alla linea di costa è in grado di determinare l'insorgenza di sforzi di taglio al fondo (radiation stress). I gradienti dei radiation stress, massimi in corrispondenza del

frangimento, sono i responsabili della generazione delle correnti litoranee. A parità di direzione di incidenza dell'onda, i gradienti di radiation stress, e quindi le correnti litoranee, sono tanto più elevati quanto maggiore è l'altezza d'onda al frangimento. A parità di altezza d'onda al frangimento, i gradienti di radiation stress, e quindi le correnti litoranee, sono tanto più elevati quanto maggiore è l'angolo di incidenza tra il fronte d'onda e le isobate.

Il software MIKE può inoltre eseguire direttamente il calcolo del frangimento solo ad elevate risoluzioni avendo a disposizione un rilievo di dettaglio del fondale in esame, sfruttando la grandezza statistica "Breaking Index".

Nell'analisi di dettaglio vengono quindi fornite le altezze d'onda in punti specifici individuati sotto costa e le profondità al frangimento.

4.4.4 *Dati di input del modello*

I primi passi affrontati nell'ambito della modellazione sono stati la costruzione della griglia di calcolo a partire dai dati batimetrici/topografici dell'area oggetto di studio e la definizione dello spettro bidimensionale.

I principali passi che compongono la messa a punto del modello sono i seguenti.

- Individuazione spaziale dei punti rappresentativi dei parametri d'onda al largo, da fornire come input ai modelli sul contorno di largo del modello (offshore boundary conditions);
- definizione della linea di costa con punti equidistanti: particolare attenzione deve essere posta in corrispondenza delle strutture di protezione del litorale in modo da riprodurre una linea di costa quanto più coerente alla realtà;
- definizione delle condizioni al contorno: le boundary offshore e laterali devono essere inserite in modo coerente all'esposizione del paraggio in esame e al numero di elementi supportabili dal modello;
- costruzione della mesh di calcolo e interpolazione sulle batimetriche: il risultato costituisce l'input batimetrico rappresentativo dello specchio di interesse. La costruzione della mesh di calcolo consente di realizzare una griglia di calcolo variabile, distinguendo da un dominio più ampio al largo e più dettagliato sotto costa, in corrispondenza dei rilievi batimetrici di dettaglio. La griglia variabile consente di affinare le zone a risoluzione diversa distinte in base all'influenza della geometria dei fondali e dell'orografia costiera sulle variabili della propagazione del moto ondoso.
- Set-up del modello: all'interno del file di simulazione si inseriscono tutte le impostazioni relative alle diverse componenti da considerare.

4.4.5 *Applicazione del modello al paraggio di Reggio Calabria Porto*

Sulla base di quanto riportato nell'analisi delle caratteristiche del paraggio è emerso che il sito a nord del porto di Reggio Calabria è esposto ai mari generati localmente dalla forzante vento e a quelli completamente sviluppati che si propagano dentro lo stretto penetrando attraverso l'imboccatura Sud. Come già detto la traversia geografica del sito è tale che esso risulta esposto ai mari locali che si generano all'interno del settore compreso tra Ponente-Libeccio (235°) e Tramontana-Maestro (337.50°N), mentre dal

settore racchiuso tra i settori di Mezzogiorno (con direzione principale 180°) e di Libeccio (direzione principale di 225°) provengono i mari che si propagano dall'esterno dello Stretto.

Per tenere conto di queste due diverse tipologie di evoluzione dei mari, il modello SW è stato opportunamente adattato, eseguendo le simulazioni con due diverse modalità che si descrivono di seguito.

4.4.5.1 Modellazione dei mari generati dal vento

La griglia di input per la modellazione al largo è stata costruita sulla base delle isobate derivate dal modello dei fondali del Mare Mediterraneo prodotto dall'Istituto Idrografico della Marina, mentre la griglia sottocosta è stata generata a partire dai dati del rilievo batimetrico di dettaglio, eseguito lungo il tratto di costa in esame. La mesh di calcolo è stata generata esclusivamente per l'area all'interno dello stretto, che costituisce il dominio di calcolo di mare sottoposti a forzanti di vento (si veda la figura 98). Le celle della griglia sono state impostate nella mesh di calcolo definendo la linea di largo alla profondità di 100 m in modo tale che i triangoli della mesh più grossolana abbiano una lunghezza media di metri 150, tale risoluzione è stata poi variata in prossimità del fondale alla profondità di 50 metri con una lunghezza media dei triangoli che varia da 70 metri a 5 metri sotto costa. Il modello del fondale per il dominio di calcolo prescelto è caratterizzato dalla configurazione batimetrica rappresentata in figura 4.12.

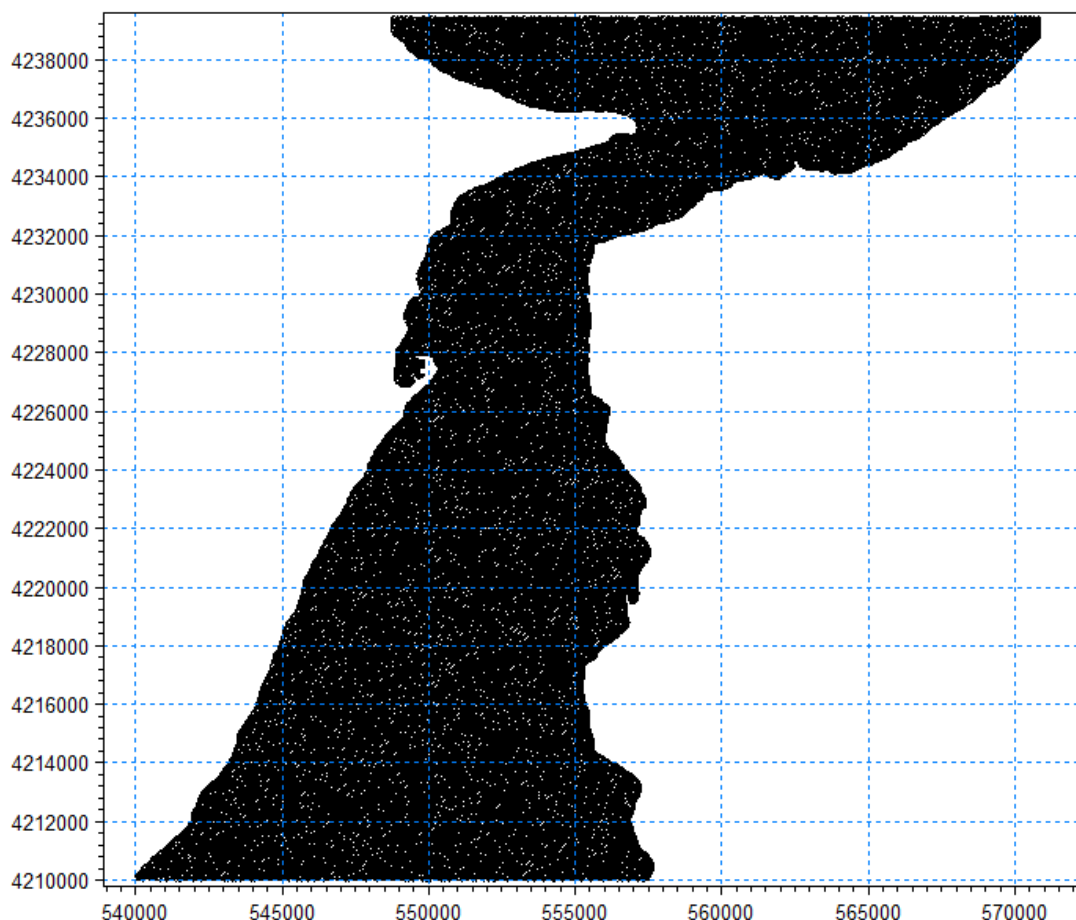


Figura 4.12 – Mesh di calcolo utilizzata come input per il modello SW DHI, per il calcolo del moto ondoso locale generato dal vento.

Per tutte le simulazioni eseguite è stato utilizzato l'algoritmo di calcolo in modalità *fully spectral* basato sulla conservazione dell'energia formulazione sufficiente per i modelli alla scala considerata e per le

applicazioni in cui occorre considerare la forzante meteorologica del vento che trasferisce la sua energia interagendo con la superficie del mare.

Si sono forniti come input al modello i dati centrali delle classi di velocità del vento per ogni classe di direzione ricadente all'interno del settore compreso tra 247.50° e 360° N in cui sono contenuti gli eventi anemologici registrati presso la stazione meteo di Reggio Calabria. Ciò perché l'obiettivo finale della modellazione è quello di ricostruire le caratteristiche del moto ondoso sottocosta a partire dai dati di vento. Definita la griglia di calcolo e determinati i dati di input è stata analizzata la generazione del moto ondoso all'interno dello Stretto di Messina e la sua propagazione fino alla costa di Reggio Calabria. Il modello è stato fatto girare in modalità non stazionaria. Il confine del dominio di calcolo è stato considerato tutto assorbente (land boundary; si veda la figura 4.14) al fine di valutare il trasferimento di energia dal moto ondoso all'interno dello specchio d'acqua ad opera del vento e nessuna propagazione di moto ondoso da o verso l'esterno dello stretto.

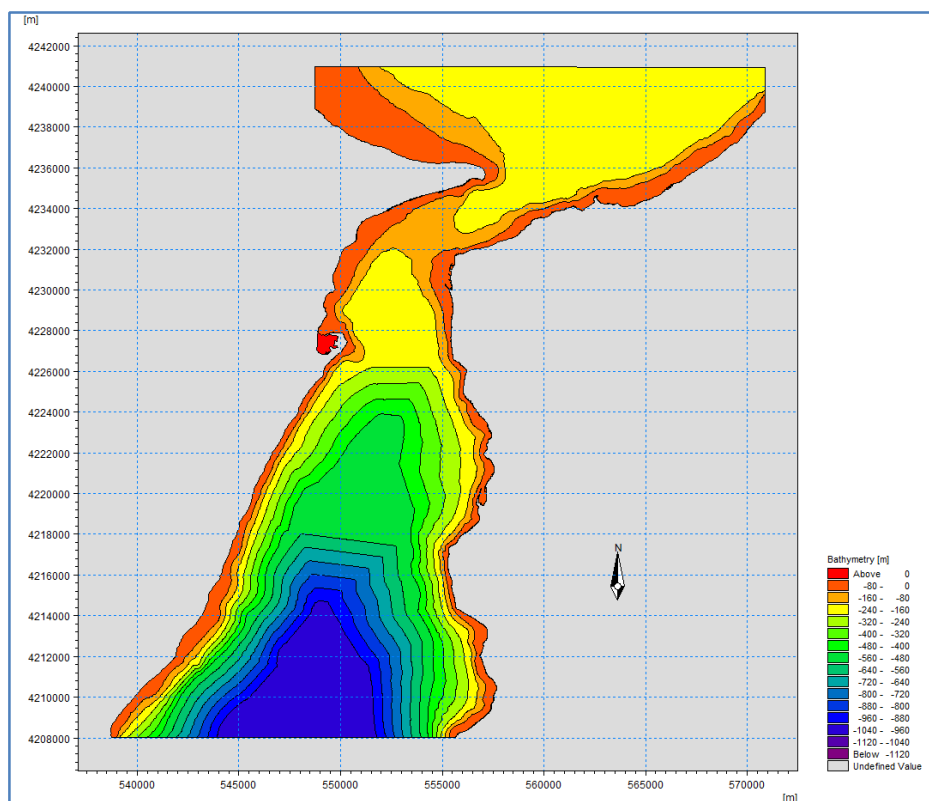


Figura 4.13 – Batimetria ed isolinee della mesh di calcolo utilizzata per la generazione del moto ondoso a partire dai dati di vento.

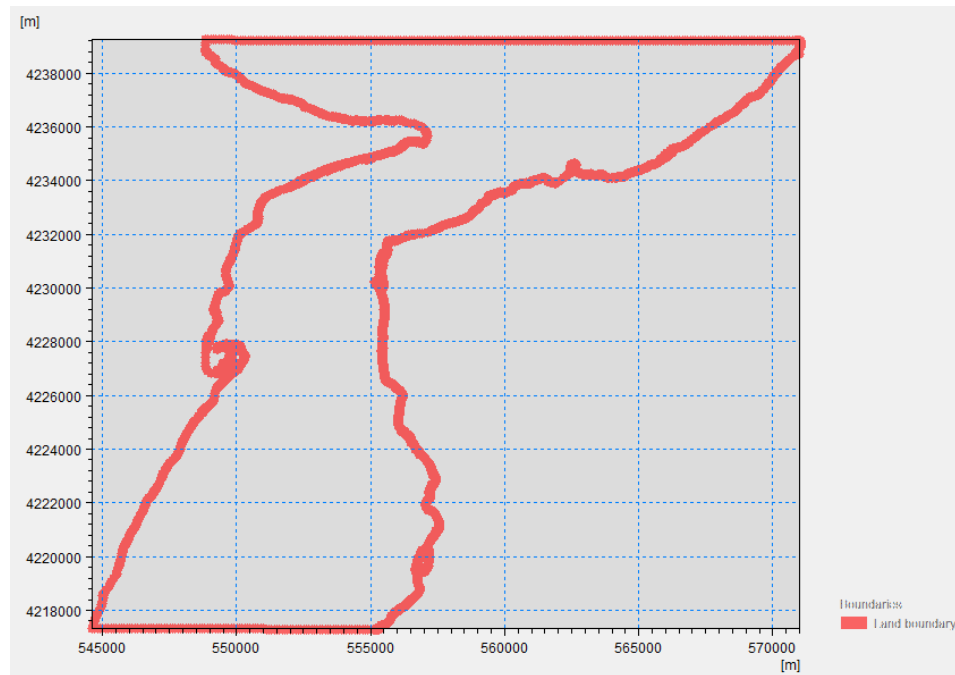


Figura 4.14 – Boundary condition applicata alla modellazione dei mari di generazione locale.

A titolo di esempio in figura 4.15 è rappresentata la distribuzione delle altezze d'onda, relativa all'evento ondoso generato da un vento che soffia costante su tutto il dominio di calcolo con direzione media principale di 337.50° e velocità di 24 m/sec. In figura 4.16 è rappresentato un ingrandimento nell'area oggetto di studio del piano d'onda generato dal vento con le caratteristiche di cui sopra, in cui sono rappresentati anche i vettori di direzione di propagazione del moto ondoso.

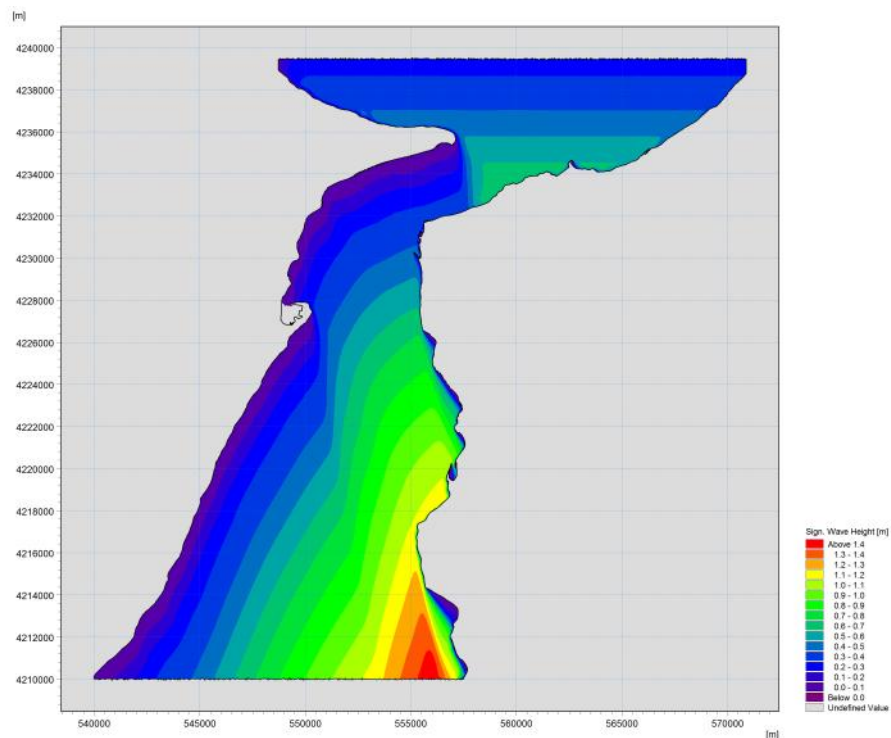


Figura 4.15 – Rappresentazione del piano d'onda generato dal vento che spira sullo stretto dalla direzione di $337.50^\circ N$ con velocità di 26.4 m/sec.

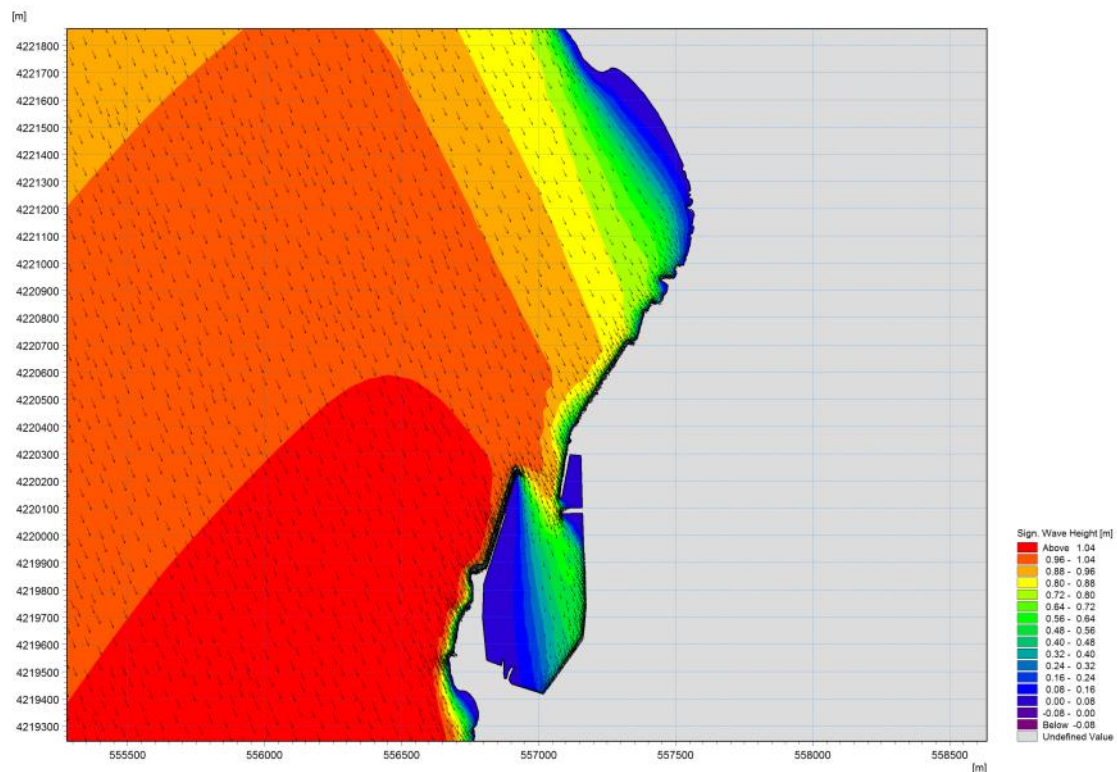


Figura 4.16 – Ingrandimento dell'area a sud di Villa del piano di moto ondoso generato dal vento che spirava sullo stretto dalla direzione di $337.50^{\circ}N$ con velocità di 26.4 m/sec , con in nero i vettori di direzione di propagazione

La rappresentazione dei vettori di direzione delle onde fornisce una schematizzazione globale delle ortogonali d'onda (o raggi d'onda), che evidenziano la rotazione dei fronti d'onda al variare delle profondità. Tali vettori, che in acque profonde sono equidistanti e paralleli tra loro, procedendo verso le acque basse variano la loro distanza e diventano convergenti o divergenti in funzione delle caratteristiche batimetriche e della morfologia costiera, evidenziando (dal punto di vista grafico) le aree a maggiore e minore concentrazione di energia ondosa.

Una volta a disposizione i risultati della modellazione matematica sono stati individuati i valori dell'altezza d'onda spettrale, il periodo e la direzione dell'onda nei pressi di due stazioni di calcolo, individuate in posizione baricentrica rispetto allo sviluppo della linea di costa, utile per le successive elaborazioni all'interno del paraggio, e precisamente nel punto di coordinate $4220827N - 557188E$, posto in corrispondenza ad un fondale di profondità -50 m s.l.m.m , e nel punto di coordinate $4220775N - 557353E$ posto in un punto di fondale pari -6 m s.l.m.m , profondità in cui si prevede sia posto il punto di attracco di progetto.

Le caratteristiche delle onde sono state individuate a profondità tali che non si sia ancora verificato il fenomeno del frangimento, nella propagazione dal largo verso riva.

Nelle tabelle 4.9-4.14 sono riportati i valori caratteristici di altezza, periodo, direzione e orientamento del piano d'onda rispetto alla normale alla linea di riva ottenuti nel primo punto al largo dell'approdo a profondità di -50 m e nel punto sottocosta di profondità pari a -6 m .

I risultati sono stati ottenuti facendo girare il modello per 40 eventi di vento.

Tabella 4.9 – Altezza di moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220827N – 557188E con profondità del fondale pari a -50, generato localmente per varie classi di velocità del vento e di direzione del vento.

CLASSI DI VELOCITA' DEL VENTO													
Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64
V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118
V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6
DIREZIONE PRINCIPALE °N	Classi Direzione Vento		Altezze del moto ondoso (m)										
0	348,75	11.25	-	-	-	-	0,03	0,09	0,12	0,17			
247,5	236,25	258,75	-	-	-	0,10	0,18						
270	258,75	281,25	-	-	-	0,01	0,14						
292,5	281,25	303,75	-	-	-	0,01	0,10	0,18					
315	303,75	326,25	-	-	-	0,01	0,14	0,20					
337,5	326,25	348,75	-	-	-	0,02	0,13	0,22	0,35	0,48	0,68	0,90	

Tabella 4.10 – Altezza di moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220775N – 557353E con profondità del fondale pari a -6, generato localmente per varie classi di velocità del vento e di direzione del vento.

CLASSI DI VELOCITA' DEL VENTO													
Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64
V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118
V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6
DIREZIONE PRINCIPALE °N	Classi Direzione Vento		Altezze del moto ondoso (m)										
0	348,75	11.25	-	-	-	-	0,01	0,05	0,07	0,11			
247,5	236,25	258,75	-	-	-	0,10	0,18						
270	258,75	281,25	-	-	-	0,01	0,14						
292,5	281,25	303,75	-	-	-	0,01	0,10	0,17					
315	303,75	326,25	-	-	-	0,01	0,14	0,20					
337,5	326,25	348,75	-	-	-	0,02	0,12	0,21	0,31	0,36	0,53	0,65	

Tabella 4.11 – Periodo di picco T_p del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220827N – 557188E con profondità del fondale pari a -50, generato localmente per varie classi di velocità del vento e di direzione del vento.

		CLASSI DI VELOCITA' DEL VENTO													
		Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64
		V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118
		V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6
DIREZIONE PRINCIPALE °N	Classi Direzione Vento	Periodo di picco del moto ondoso (sec)													
0	348,75 11,25	-	-	-	-	1,85	2,00	2,40	2,60						
247,5	236,25 258,75	-	-	-	1,85	2,75									
270	258,75 281,25	-	-	1,85	1,85										
292,5	281,25 303,75	-	-	1,85	1,85	2,45									
315	303,75 326,25	-	-	1,85	1,85	2,76									
337,5	326,25 348,75	-	-	1,85	2,14	3,14	3,39	3,95	4,05	4,50					

Tabella 4.12 – Periodo di picco T_p del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220775N – 557353E con profondità del fondale pari a -6, generato localmente per varie classi di velocità del vento e di direzione del vento.

		CLASSI DI VELOCITA' DEL VENTO													
		Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64
		V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118
		V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6
DIREZIONE PRINCIPALE °N	Classi Direzione Vento	Periodo di picco del moto ondoso (sec)													
0	348,75 11,25	-	-	-	-	1,85	1,85	1,85	1,85						
247,5	236,25 258,75	-	-	-	1,85	2,75									
270	258,75 281,25	-	-	1,85	1,85										
292,5	281,25 303,75	-	-	1,85	1,85	2,46									
315	303,75 326,25	-	-	1,85	1,85	2,75									
337,5	326,25 348,75	-	-	1,85	2,06	2,86	3,11	3,30	3,51	3,73					

Tabella 4.13 – Direzione media Dm del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220827N – 557188E con profondità del fondale pari a -50, generato localmente per varie classi di velocità del vento e di direzione del vento.

		CLASSI DI VELOCITA' DEL VENTO													
		Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64
		V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118
		V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6
DIREZIONE PRINCIPALE °N	Classi Direzione Vento	Direzione media del moto ondoso (°N)													
0	348,75 11,25	-	-	-	-	-	-	349,30	350,50	352,10					
247,5	236,25 258,75	-	-	-	241,95	244,60									
270	258,75 281,25	-	-	-	266,65	268,7									
292,5	281,25 303,75	-	-	-	281,5	291,75	292,60								
315	303,75 326,25	-	-	-	321,45	318,0	316,70								
337,5	326,25 348,75	-	-	-	336,00	335,5	333,70	334,10	333,70	334,0	334,2				

Tabella 4.14 – Direzione media Dm del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220775N – 557353E con profondità del fondale pari a -6, generato localmente per varie classi di velocità del vento e di direzione del vento.

		CLASSI DI VELOCITA' DEL VENTO													
		Scala Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		V (knots)	<1	1 3	4 6	7 10	11 16	17 21	22 27	28 33	34 40	41 47	48 55	56 63	>64
		V (km/h)	<1	1 5	6 11	12 19	20 28	29 38	39 49	50 61	62 74	75 88	89 102	103 117	>118
		V (m/s)	0 0,3	0,3 1,5	1,5 3,3	3,3 5,4	5,4 7,9	7,9 10,7	10,7 13,8	13,8 17,1	17,1 20,7	20,7 24,4	24,4 28,4	28,4 32,6	32,6
DIREZIONE PRINCIPALE °N	Classi Direzione Vento	Direzione media del moto ondoso Teta													
0	348,75 11,25	-	-	-	-	-	-	349,30	349,80	351,20					
247,5	236,25 258,75	-	-	-	243,20	246,15									
270	258,75 281,25	-	-	-	266,60	268,9									
292,5	281,25 303,75	-	-	-	281,5	291,75	292,35								
315	303,75 326,25	-	-	-	321,40	317,7	316,35								
337,5	326,25 348,75	-	-	-	334,50	332,80	332,50	333,05	332,90	333,7	333,7				

4.4.5.2 Modellazione dei mari completamente sviluppati

La griglia di input per la modellazione al largo è stata costruita sulla base delle isobate derivate dal modello dei fondali del Mare Mediterraneo prodotto dall'Istituto Idrografico della Marina, mentre la griglia sottocosta è stata generata a partire dai dati del rilievo batimetrico di dettaglio eseguito lungo il tratto di costa in esame. La mesh di calcolo è stata generata anche per l'area che si estende a sud dell'imboccatura meridionale dello stretto fino a coprire tutto il braccio di mare in cui si propagano gli eventi di moto ondoso registrati nel grid point dell'ECWMF di coordinate 37.5°N 16°E (si veda la figura 4.17). Le celle della griglia sono state impostate nella mesh di calcolo definendo la linea di largo alla profondità di 1000 m in modo tale che i triangoli della mesh più grossolana abbiano una lunghezza media di metri 1000, tale risoluzione è stata poi variata in prossimità del fondale alla profondità di 50 metri con una lunghezza media dei triangoli che varia da 70 metri a 5 metri sotto costa. Il modello del fondale per il dominio di calcolo prescelto è caratterizzato dalla configurazione batimetrica rappresentata in figura 4.18.

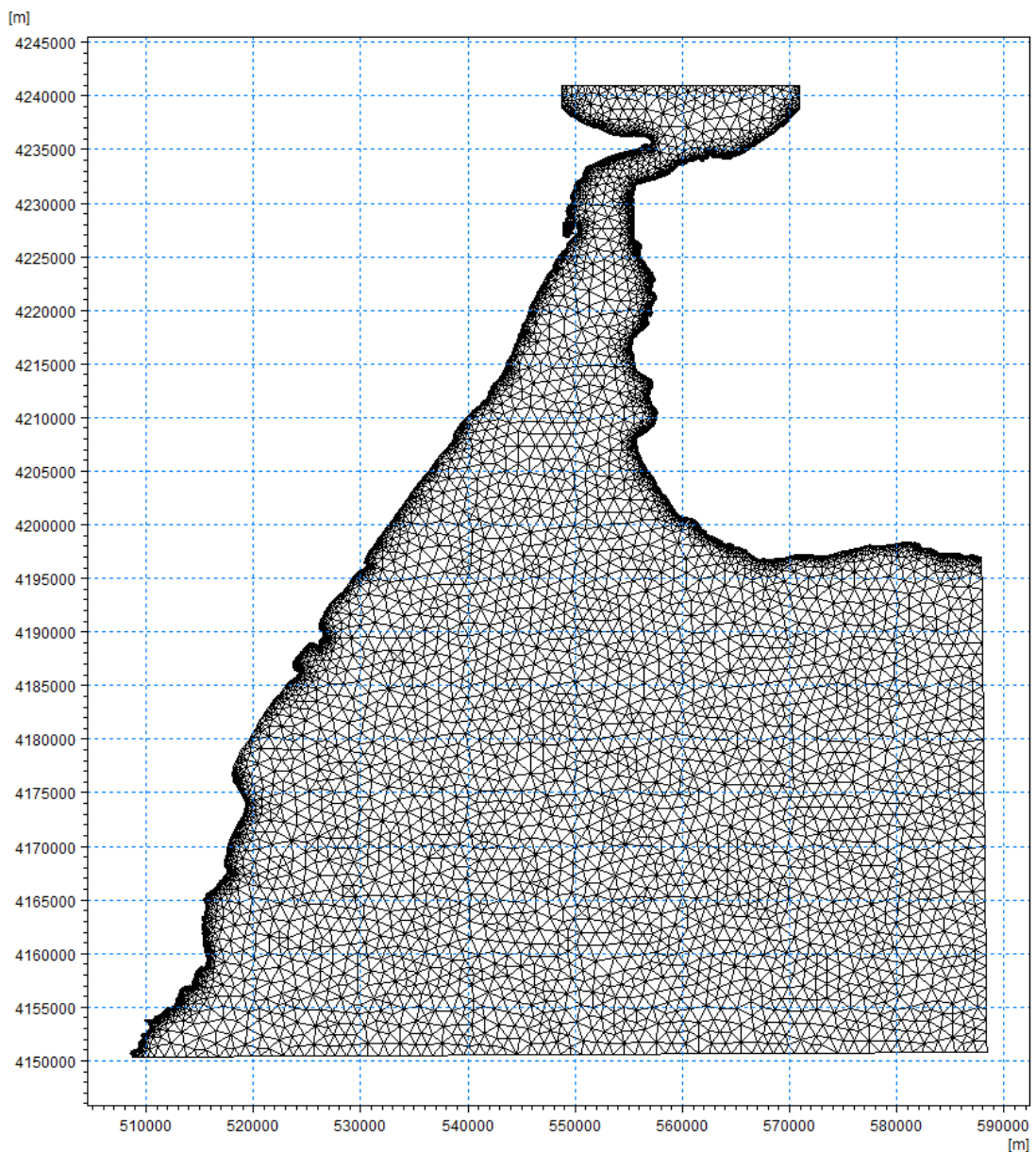


Figura 4.17 – Mesh di calcolo utilizzata come input per il modello SW DHI, per il calcolo della propagazione del moto ondoso dal punto a largo dell'imboccatura sud dello Stretto di Messina dal punto ECMWF 37.5°N 16°E.

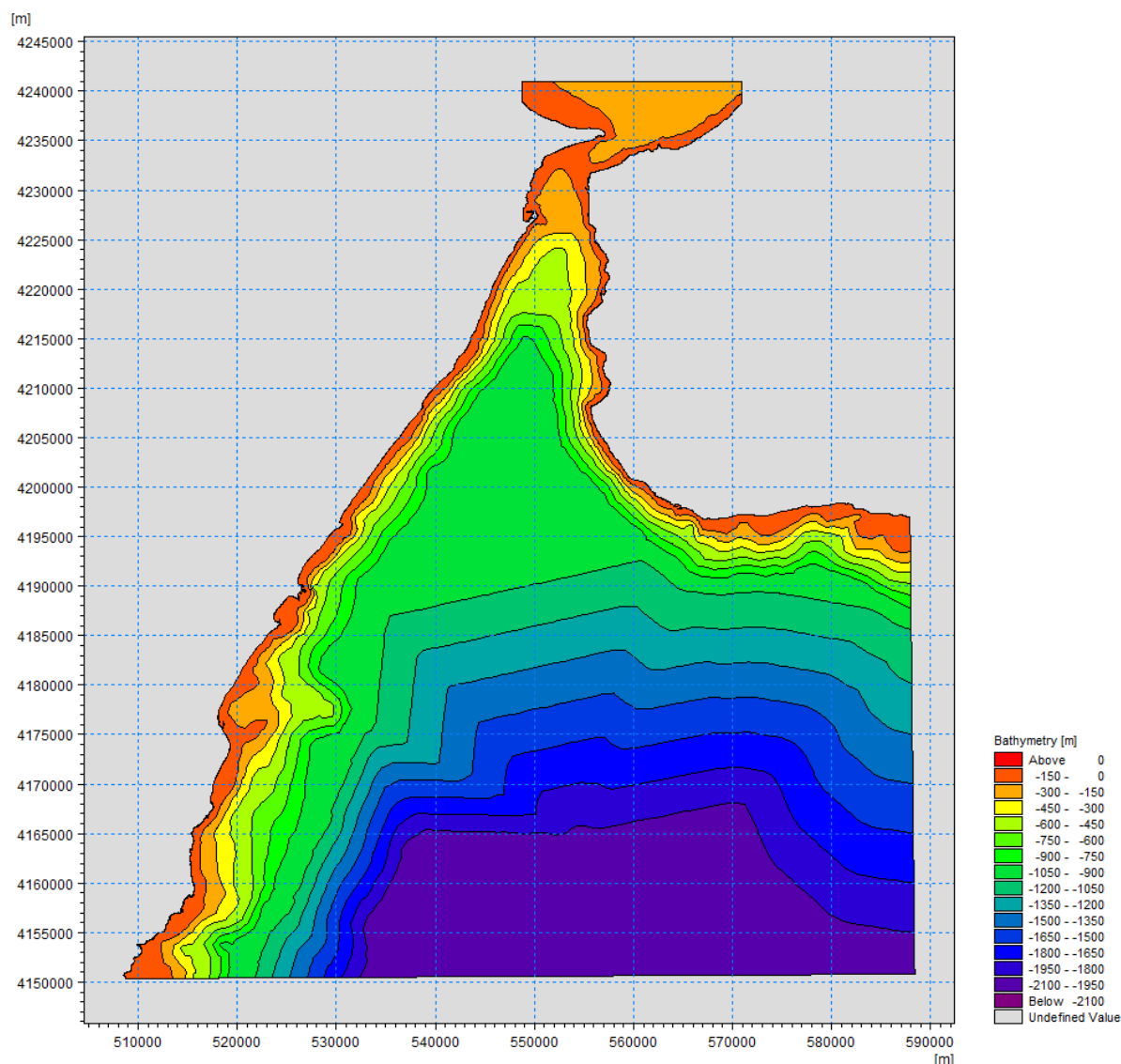


Figura 4.18 – Batimetria ed isolinee della mesh di calcolo utilizzata per la generazione del moto ondoso a partire dai dati di vento.

Per tutte le simulazioni eseguite è stato utilizzato l'algoritmo di calcolo in modalità *directionally decoupled parametric* basata su una parametrizzazione dell'equazione di conservazione dell'energia del moto ondoso; tale modalità disaccoppiata, in cui lo spettro è discretizzato nelle direzioni e parametrizzato nelle frequenze, è una formulazione sufficiente per i modelli alla scala considerata e per le applicazioni in cui domina il mare completamente sviluppato senza considerare ulteriori forzanti meteorologiche.

Per la modellazione della propagazione del moto ondoso sono state utilizzate come input i dati caratteristici delle onde stazionarie, cioè i parametri di altezza significativa, direzione media e periodo di picco, del moto ondoso al largo nel punto ECWMF.

Sono stati forniti pertanto, come input al modello, i valori centrali delle classi di altezza del moto ondoso con i corrispondenti valori di periodo di picco determinati nel paragrafo 4.3, per ogni classe di direzione ricadente all'interno del settore compreso tra 180° e 225° N, in cui sono contenuti gli eventi di moto ondoso registrati presso il grid point ECWMF. Ciò perché l'obiettivo finale della modellazione è quello di ricostruire le caratteristiche del moto ondoso sottocosta propagando i mari completamente sviluppati che si presentano nel punto di coordinate 37.5° N e 16° E, con direzione di provenienza Mezzogiorno e Libeccio.

Definita la griglia di calcolo e determinati i dati di input è stata analizzata la propagazione del moto ondoso dal largo all'interno dello Stretto di Messina fino alla costa di Reggio Calabria. Il modello è stato fatto girare in modalità non stazionaria. Il confine del dominio di calcolo è stato considerato a nord assorbente tipo *land boundary* (si veda la figura 4.19) a sud ed est *water* rispettivamente di tipo *offshore e lateral*; nel primo caso il limite a nord impedisce la propagazione del moto ondoso da o verso l'esterno dello stretto. Sul confine meridionale è stata imposta la condizione al contorno rappresentata dallo spettro del moto ondoso parametrizzato secondo i valori caratteristici (altezza significativa, periodo di picco e direzione media), mentre il confine laterale consente anche la propagazione del mare verso l'esterno.

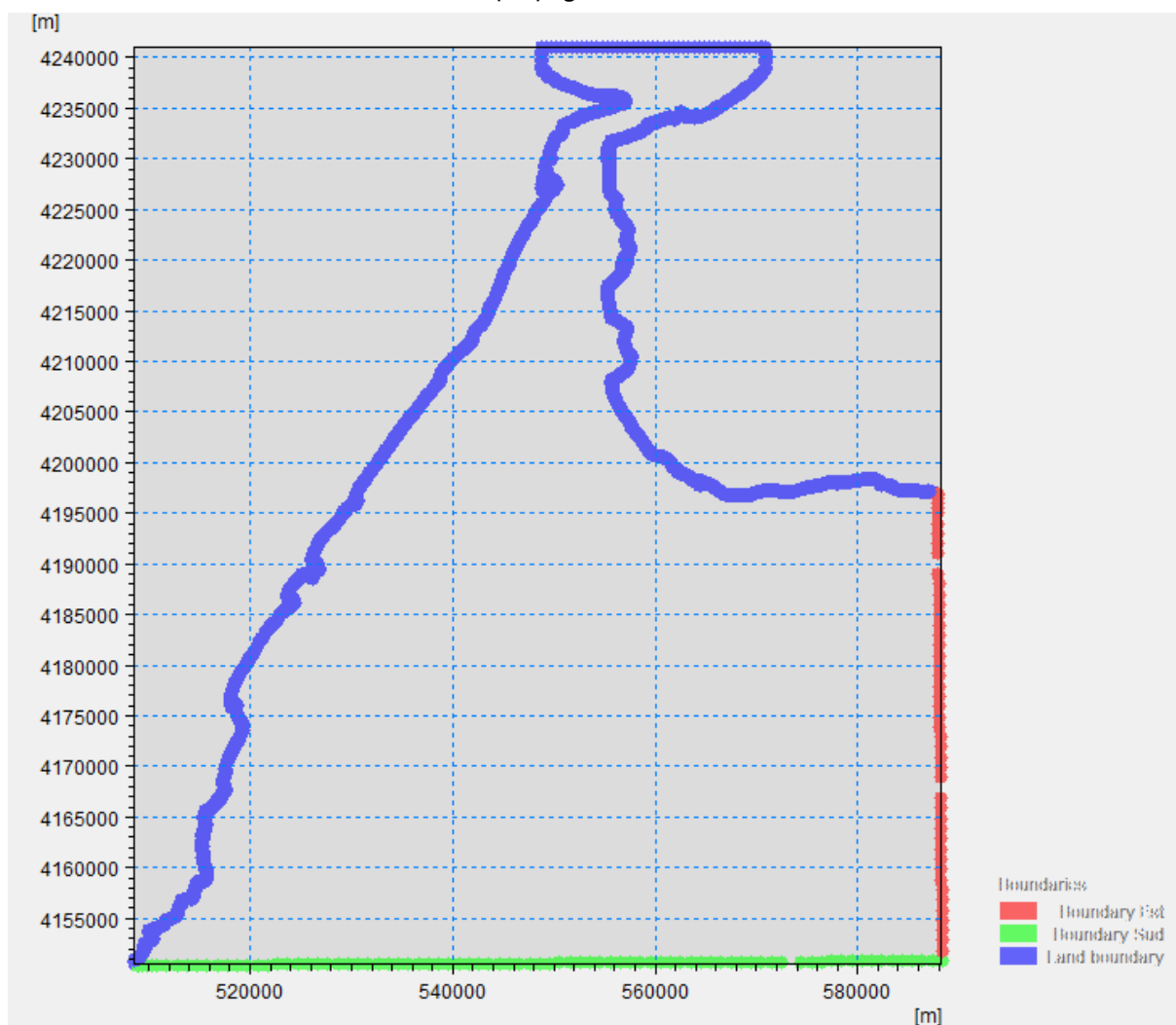


Figura 4.19 – Boundary condition applicata alla modellazione della propagazione del moto ondoso dal punto a largo dell'imboccatura sud dello Stretto di Messina dal punto ECMWF 37.5°N 16°E

A titolo di esempio in figura 4.20 è rappresentata la distribuzione delle altezze d'onda, con indicazione dei vettori della direzione di propagazione del moto ondoso, relativa all'evento ondoso di al largo con direzione media principale di 202.50, Hs di 3.75 m e periodo di picco $T_p=9,97$. In figura 4.21 è rappresentato un ingrandimento nell'area oggetto di studio del piano d'onda generato dal vento con le caratteristiche di cui sopra.

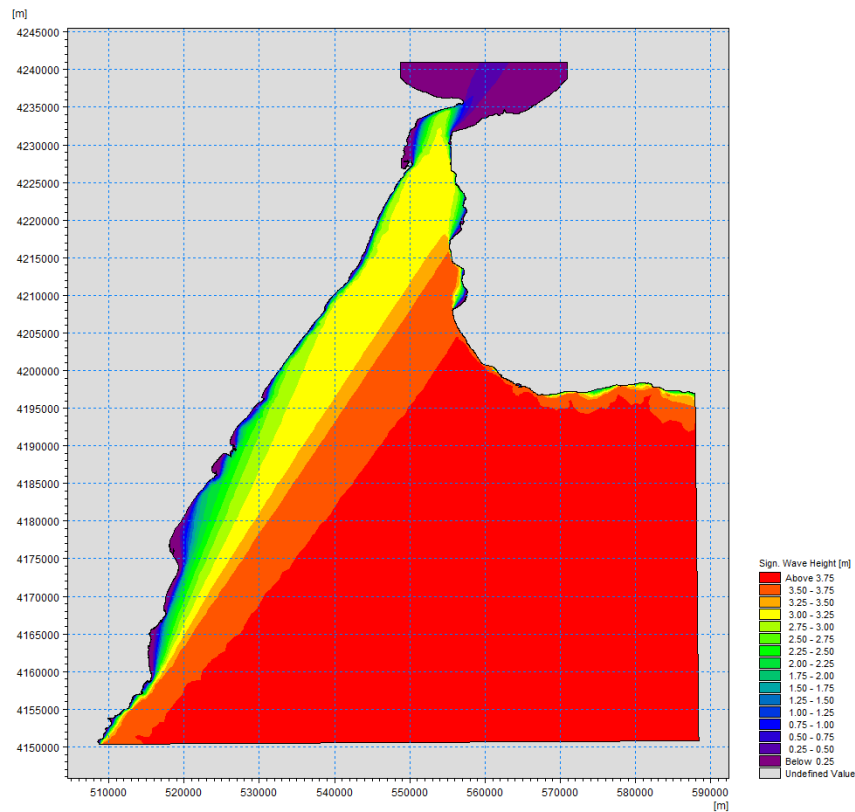


Figura 4.20 – Rappresentazione del piano d'onda generato dal moto ondoso al largo con direzione di propagazione $202.50^\circ N$ $H_s=3.75$ m e $T_p=9.97$ sec.

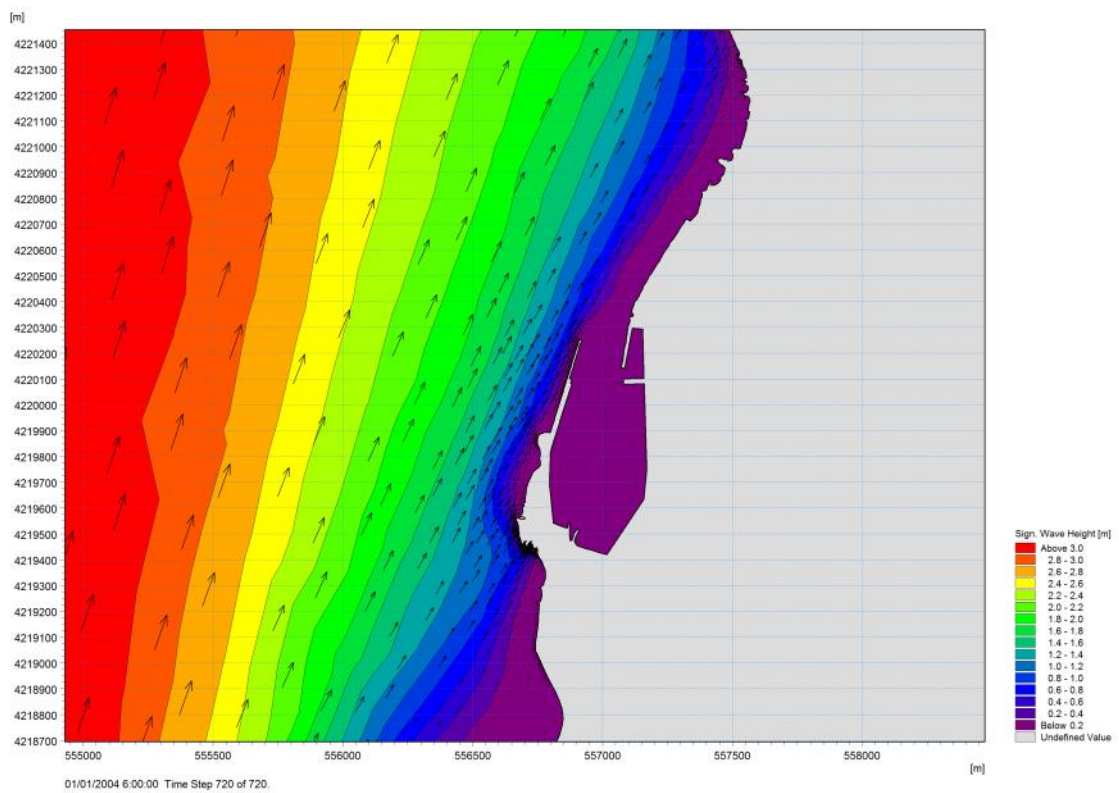


Figura 4.21 – Ingrandimento dell'area a nord del porto di Reggio Calabria del piano di moto ondoso generato dal moto ondoso al largo con direzione di propagazione $202.50^\circ N$ $H_s=3.75$ m e $T_p=9.97$ sec; i vettori in nero indicano la direzione di propagazione del moto ondoso

Una volta a disposizione i risultati della modellazione matematica sono stati individuati i valori dell'altezza d'onda spettrale, il periodo e la direzione dell'onda nei pressi delle stesse stazioni utilizzate nelle precedenti modellazioni.

Nelle tabelle 4.15-4.20 sono riportati i valori caratteristici del moto ondoso ottenuti in due punti di osservazione situati di fronte alla struttura di progetto in corrispondenza alla batimetrica -50 e -6 m s.l.m.m: si tratta altezza, periodo, direzione e orientamento del piano d'onda rispetto alla normale alla linea di riva. I risultati sono stati ottenuti facendo girare il modello per 42 eventi di moto ondoso.

Infine nelle tabelle 4.21 e 4.22 sono riportati i valori delle frequenze di apparizione distribuite per classi di altezze e settori direzionali caratteristiche del clima di moto ondoso annuali risultante dall'applicazione del modello nei due punti di osservazione precedentemente indicati. In figura 4.22 è rappresentata la rosa direzionale del clima di moto ondoso trasferito al largo del sito in esame in corrispondenza alla batimetrica di - 50 m.

Tabella 4.15 – Altezza del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220827N – 557188E con profondità del fondale pari a -50, propagato dal punto ECMWF 37.50°N 16°E posto a sud dello Stretto di Messina, per varie classi di altezza e direzione d'onda a largo.

		Classi di altezza d'onda														
		Hs (m)	0,0 0,5	0,5 1,0	1,0 1,5	1,5 2,0	2,0 2,5	2,5 3,0	3,0 3,5	3,5 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0
DIR °N	Classi Di direzione	Altezze del moto ondoso (m)														
135	135 123,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
157,5	157,5 146,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180	168,75 191,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
202,5	191,25 213,75	0.27	0.40	0.50	0.57	0.63	0.71	0.78								
225	213,75 236,25	0.24	0.37	0.47	0.55	0.62	0.71	0.64	0.85							

Tabella 4.16 – Altezza del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220827N – 557188E con profondità del fondale pari a -6, propagato dal punto ECMWF 37.50°N 16°E posto a sud dello Stretto di Messina, per varie classi di altezza e direzione d'onda a largo.

		Classi di altezza d'onda														
		Hs (m)	0,0 0,5	0,5 1,0	1,0 1,5	1,5 2,0	2,0 2,5	2,5 3,0	3,0 3,5	3,5 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0
DIR °N	Classi Di direzione	Altezze del moto ondoso (m)														
135	135 123,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
157,5	157,5 146,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180	168,75 191,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
202,5	191,25 213,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
225	213,75 236,25	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	-	-	0.06							

Tabella 4.17 – Periodo di picco T_p del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4229151N – 555391E con profondità del fondale pari a -50, propagato dal punto ECMWF 37.50°N 16°E posto a sud dello Stretto di Messina, per varie classi di altezza e direzione d'onda a largo.

		Classi di altezza d'onda															
		Hs (m)	0,0 0,5	0,5 1,0	1,0 1,5	1,5 2,0	2,0 2,5	2,5 3,0	3,0 3,5	3,5 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0	>7,0
DIR °N	Classi Di direzione	Periodo di picco del moto ondoso (sec)															
135	135 123,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
157,5	157,5 146,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180	168,75 191,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
202,5	191,25 213,75	5.46	6.47	7.34	8.08	8.60	9.23	10.02									
225	213,75 236,25	5.20	6.45	7.30	8.15	8.90	9.22	10.85	10.45								

Tabella 4.18 – Periodo di picco T_p del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4229151N – 555391E con profondità del fondale pari a -50, propagato dal punto ECMWF 37.50°N 16°E posto a sud dello Stretto di Messina, per varie classi di altezza e direzione d'onda a largo.

		Classi di altezza d'onda															
		Hs (m)	0,0 0,5	0,5 1,0	1,0 1,5	1,5 2,0	2,0 2,5	2,5 3,0	3,0 3,5	3,5 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0	>7,0
DIR °N	Classi Di direzione	Periodo di picco del moto ondoso (sec)															
135	135 123,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
157,5	157,5 146,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180	168,75 191,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
202,5	191,25 213,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
225	213,75 236,25	5.17	6.45	7.30	8.15	8.83	-	-	10.45								

Tabella 4.19 – Direzione media D_m del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4229151N – 555391E con profondità del fondale pari a -50, propagato dal punto ECMWF 37.50°N 16°E posto a sud dello Stretto di Messina, per varie classi di altezza e direzione d'onda a largo.

		Classi di altezza d'onda															
		Hs (m)	0,0 0,5	0,5 1,0	1,0 1,5	1,5 2,0	2,0 2,5	2,5 3,0	3,0 3,5	3,5 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0	>7,0
DIR °N	Classi Di direzione	Direzione media del moto ondoso (°N)															
135	135 123,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
157,5	157,5 146,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180	168,75 191,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
202,5	191,25 213,75	211.86	212.10	212.30	213.20	213.25	215.05	213.40									
225	213,75 236,25	214.2	214.20	214.20	214.40	214.80	215.00	218.70	219.20								

Tabella 4.20– Direzione media Dm del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4229151N – 555391E con profondità del fondale pari a -6, propagato dal punto ECMWF 37.50°N 16°E posto a sud dello Stretto di Messina, per varie classi di altezza e direzione d'onda a largo.

		Classi di altezza d'onda															
		Hs (m)	0,0 0,5	0,5 1,0	1,0 1,5	1,5 2,0	2,0 2,5	2,5 3,0	3,0 3,5	3,5 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0	>7,0
DIR °N	Classi Di direzione	Direzione media del moto ondoso (°N)															
135	135 123,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
157,5	157,5 146,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180	168,75 191,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
202,5	191,25 213,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
225	213,75 236,25	231.20	234.30	235.10	235.40	235.15	-	-	-	-	219.20	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.21 – Distribuzione di frequenza percentuale annuale del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220827N – 557188E con profondità del fondale pari a -50.

DIREZIONE PRINCIPALE °N	Classi Direzione moto ondoso		0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,50	0,50-1
0	348,75	11,25	2,273	0,255	0,022			
202,5	191,25	213,75				2,05	0,96	0,722
225	213,75	236,25				2,45	2,15	0,44
247,5	236,25	258,75		0,012	0,001			
270	258,75	281,25	0,019		0,003			
292,5	281,25	303,75	0,033	0,008	0,002			
315	303,75	326,25	0,201		0,04			
337,5	326,25	348,75	4,575		1,475	0,169	0,015	0,002

Tabella 4.22 – Distribuzione di frequenza percentuale annuale del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220827N – 557188E con profondità del fondale pari a -6.

DIREZIONE PRINCIPALE °N	Classi Direzione moto ondoso		0.0-0.10	0.10-0.20	0.20-0.30	0.30-0.50	0.50-1.00
0	348,75	11,25	2,549	0,001			
225	213,75	236,25	6,00				
247,5	236,25	258,75		0,013			
270	258,75	281,25	0,019	0,003			
292,5	281,25	303,75	0,033	0,01			
315	303,75	326,25	0,24	0,001			
337,5	326,25	348,75	4,575	1,475	0,169	0,015	0,002

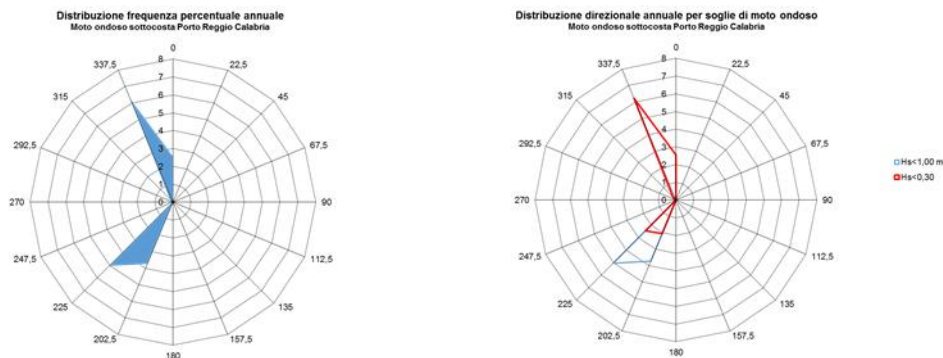


Figura 4.22- Diagramma polare della frequenza percentuale annuale del moto ondoso al largo del sito di progetto (-50 m s.lm.m.), complessivo e per soglie di altezza d'onda.

4.5 Studio del downtime della banchina

4.5.1 Premessa

I risultati delle simulazioni effettuate permettono di definire il clima di agitazione ondosa residua dinanzi l'opera di progetto ed in particolare in corrispondenza alla banchina di ormeggio del terminal traghetti. Ciò risulta di fondamentale importanza per garantire la sicurezza dei natanti in fase di ormeggio e durante le operazioni di carico e scarico dei mezzi in banchina.

Lo studio sull'operatività del terminal si basa sulla definizione delle curve di *downtime*, rappresentazione grafica dei risultati dell'analisi statistica che stima il numero medio di giorni/anno nei quali l'altezza delle onde è maggiore di una Hs limite di agibilità della banchina imposta dal progettista in funzione delle dimensioni delle navi e della sensibilità e tolleranza operativa delle dotazioni di ormeggio di banchina.

4.5.2 Caratteristiche del sistema di attracco

Le caratteristiche dimensionali delle navi che ormeggiano alla banchina di progetto sono quelle riportate nella seguente tabella:

Tabella 4.23 – Dimensioni caratteristiche delle navi

NAVE	TIPO	Lunghezza LOA	Larghezza	Stazza	Pescaggio
Nave traghetto Vestfold	Ro-Ro	120	19	3980	3,81
Nave traghetto Tremestieri	Ro-Ro	113,60	19,15	5042	4,75
Nave traghetto Franza	Ro-Ro	94,18	17,00	1396	3,84

4.5.3 Definizione dei limiti operativi

Nella tabella 4.24, estratta dal libro "Port designer's handbook", 2003 Carl Thoresen, sono riportati i massimi valori di altezza d'onda all'ormeggio per i quali le operazioni di carico e scarico in banchina possono procedere in condizioni di sicurezza, in funzione delle diverse tipologie di naviglio. Tali valori limite sono ripresi da un articolo del PIANC Bulletin n° 56 di Velsink (1986), e si riferiscono ai valori di altezza residua delle onde di alti fondali con periodo compreso tra 7-12 sec; viceversa, le onde generate localmente dal vento, essendo caratterizzate da corti periodi hanno un effetto relativamente contenuto sulle navi ormeggiate e pertanto non vengono generalmente prese in considerazione nello studio delle condizioni di sicurezza delle imbarcazioni durante le operazioni di carico e scarico. Altri fattori che influiscono sulla stima del downtime sono:

- sensibilità e tolleranza operativa dell'equipaggiamento di ormeggio in banchina;
- sistemi di sicurezza applicabili;
- condizioni di sicurezza a bordo nave e a terra.

Tali fattori, spesso più vincolanti delle caratteristiche delle navi, impongono la massima prudenza nella scelta di Hs limite.

Tabella 4.24 – Massime altezze d'onda significative agli ormeggi per differenti direzioni di onda PIANC Bulletin n° 56 di Velsink (1986) (Carl A. Thoresen, "Port designer's handbook", 2003)

TIPOLOGIA NAVE	Altezza d'onda limite Hs (m)	
	0° Direzione parallela alla prua	45-90° Direzione rispetto alla prua
Nave mercantile generica	1,00	0,80
Container, Nave RO-RO	0,50	
Nave da carico (secco) 30 000 – 100 000 dwt Fase di carico	1,50	1,00
Nave da carico (secco) 30 000 – 100 000 dwt (Dry bulk) fase di scarico	1,00	0,80-1,00

La tabella 4.25 riporta invece i valori di Hs limite che l'autore del manuale "Port designer's handbook", 2003 indica come generalmente accettabili per le navi all'accosto con onde di periodo fino a 10 sec. Per onde di periodo maggiore tali valori devono essere ridotti.

Tabella 4.25 – Valori di Hs limite (Carl A. Thoresen, "Port designer's handbook", 2003)

TIPOLOGIA NAVE	Altezza d'onda limite Hs (m)
Imbarcazioni da diporto	0,15
Navi passeggeri	0,70
Pescherecci	0,40
Nave mercantile generica <30000 DWT	0,70
Nave da carico (secco) 30 000 – 100 000 dwt (Dry bulk) fase di scarico	0,80-1,50

In virtù delle considerazioni di cui sopra e delle indicazioni fornite dal concessionario del terminal, nel caso in esame è stata considerata l' Hs limite pari a 0,5 m per onde con direzione di prua, e 0,30 per onde al traverso.

4.5.4 Curve di downtime

Le curve di downtime sono la rappresentazione grafica dei risultati dell'analisi statistica che stima il numero medio di giorni/anno nei quali l'altezza delle onde è maggiore di una H_s limite di agibilità della banchina. Per l'analisi è necessario stimare la frequenza di accadimento delle onde al largo, per classi di altezza significativa H_s e direzione di provenienza MWD. L'analisi come detto nel precedente paragrafo è limitata alle onde che si propagano dall'esterno dello stretto di Messina fino al sito di progetto, escludendo a priori le onde di generazione locale da vento, in quanto caratterizzate da un periodo troppo corto per poter infastidire e rendere incerte le operazioni di ormeggio delle navi traghetto.

I risultati dell'elaborazione del clima marino ordinario riportati nella seguente tabella mostrano le frequenze di apparizione dei mari che interessano il paraggio in esame in corrispondenza al fondale in cui è prevista l'opera di accosto.

Tabella 4.26 – Distribuzione di frequenza percentuale annuale del moto ondoso, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220827N – 557188E con profondità del fondale pari a -6.

DIREZIONE PRINCIPALE °N	Classi		0.0-0.10	0.10-0.20	0.20-0.30	0.30-0.50	0.50-1.00
	Direzione moto ondoso						
0	348,75	11.25	2,549	0,001			
225	213,75	236,25	6,00				
247,5	236,25	258,75		0,013			
270	258,75	281,25	0,019	0,003			
292,5	281,25	303,75	0,033	0,01			
315	303,75	326,25	0,24	0,001			
337,5	326,25	348,75	4,575	1,475	0,169	0,015	0,002

Per ogni onda di assegnate caratteristiche al largo nel punto esterno allo Stretto di Messina di coordinate 37-5°N 16°E (direzione, altezza e periodo), il modulo di calcolo MIKE 21 SW restituisce un valore di altezza media dell'onda in tutti i punti del dominio di calcolo. Il rapporto adimensionale tra l'altezza media dell'onda restituita dal modello matematico in un punto a ridosso dell'opera di progetto e la H_s che l'ha generata (coefficiente di disturbo), rappresenta, in termini di altezza, l'attenuazione dell'onda che penetra all'interno dello Stretto con una certa direzione. Il coefficiente di disturbo assume valori costanti in ogni singola direzione di propagazione dell'onda (tempo-invarianti). Il passo successivo dello studio consiste nell'individuare, per ogni direzione, l'altezza dell'onda al largo che può generare un'onda con $H_m = H_s$ limite in banchina. Nota questa H_m e il numero di osservazioni (frequenza) associate alle diverse classi di altezza d'onda, è possibile determinare il numero medio di giorni e/o di ore l'anno in cui staticamente si verifica un evento con le caratteristiche limite.

Nella tabella 4.27 è mostrato il numero di ore anno in cui i mari provenienti al largo da diversi settori direzionali si presentano con valori di definite classi di altezza d'onda, sottocosta al paraggio in esame.

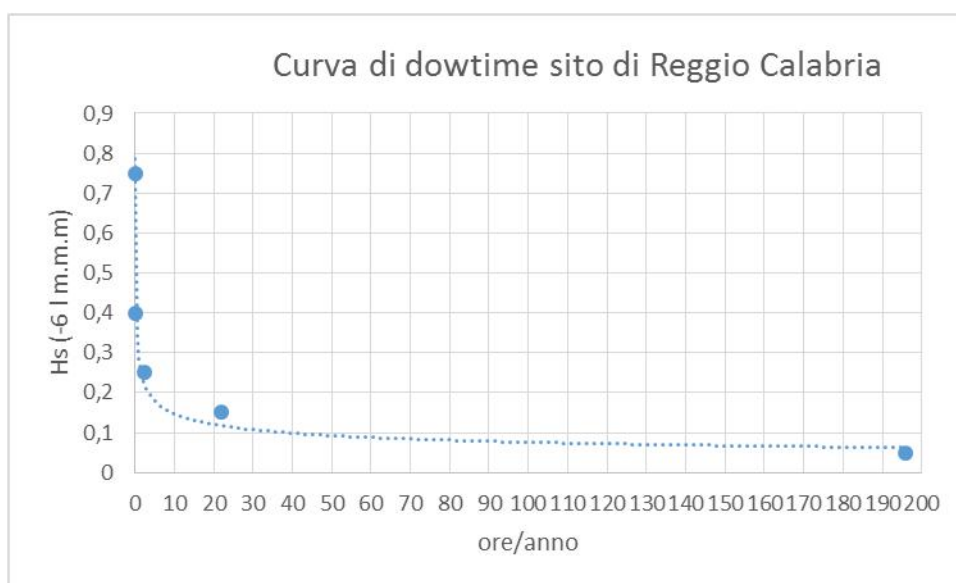
Tabella 4.27 – Numero di ore medie annue, di apparizione di mari per classi di altezza d’onda distinte nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220827N – 557188E con profondità del fondale pari a -6.

DIREZIONE PRINCIPALE °N	Classi		0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,50	0,50-1
	Direzione moto ondoso						
0	348,75	11,25	37,22	0,01			
202,5	191,25	213,75	0,00				
225	213,75	236,25	87,60				
247,5	236,25	258,75		0,19			
270	258,75	281,25	0,28	0,04			
292,5	281,25	303,75	0,48	0,15			
315	303,75	326,25	3,50	0,01			
337,5	326,25	348,75	66,80	21,54	2,47	0,22	0,03

Sulla base di quanto riportato nella tabella appare evidente che in banchina il valore limite di 0.30 m, assunto per condizioni di mare al traverso, viene raggiunto e superato mediamente in un anno per un tempo inferiore ad un’ora (per la precisione circa un quarto d’ora all’anno), peraltro per mari di generazione locale caratterizzati da periodo d’onda basso inferiore a 4 sec, che difficilmente impensieriscono le navi ro-ro all’acceso in banchina. in quanto il sito di progetto risulta riparato per la presenza a sud dell’oggetto del molo di sopraflutto del porto di Reggio Calabria.

Nella seguente figura è mostrata la curva di downtime omnidirezionale per il sito in esame.

Figura 4.23 – Curva di downtime del nuovo approdo di reggio Calabria espressa in ore medie per anno di Hs, nel punto (baricentrico al tratto di spiaggia) di coordinate 4220827N – 557188E con profondità del fondale pari a -6.



4.6 Metodologia per la valutazione della risalita del moto ondoso sulla banchina

Studi più recenti hanno mostrato come la valutazione del runup sia legata alle modalità con cui l'onda in arrivo dal largo frange. La tipologia di frangimento può essere individuata sulla base del cosiddetto numero di Irribarren, definito come:

$$\varepsilon = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_o}} \quad (4.11)$$

essendo:

- α la pendenza della struttura;
- s_o la ripidità dell'onda al largo (=Ho/Lo)

La massima risalita verticale del moto ondoso, resa adimensionale attraverso l'altezza d'onda H_s , è funzione del parametro ε , dell'angolo d'attacco del moto ondoso e della geometria della scogliera (pendenza, scabrezza, porosità). Solitamente si distingue il caso di strutture permeabili (tipicamente il caso di frangiflutti a scogliera), da quello di strutture impermeabili (rivestimenti in cemento, asfalto o in massi) al quale nel seguito si farà riferimento.

In quest'ultimo caso il runup può essere espresso utilizzando la relazione suggerita da Battjes (1974):

$$\frac{R_{ui\%}}{H_s} = (A\varepsilon + C) \cdot \gamma_r \cdot \gamma_b \cdot \gamma_h \cdot \gamma_\beta \quad (4.12)$$

dove:

- $R_{ui\%}$ è la massima risalita verticale superata dall' $i\%$ delle onde incidenti;
- A, C sono due coefficienti dipendenti dal numero di Irribarren e dalla percentuale i , riferiti al caso di parete impermeabile e liscia, ad onde bidimensionali, incidenti ortogonalmente alla struttura e distribuite secondo una distribuzione di probabilità di Rayleigh;
- γ_r è un fattore di riduzione che tiene conto della scabrezza del paramento (γ_r è uguale ad 1 nel caso di superficie liscia);
- γ_b è un fattore di riduzione che tiene conto della eventuale presenza di una berma (γ_b è uguale ad 1 nel caso di un profilo senza berma)
- γ_h è un fattore di riduzione che tiene conto dell'influenza delle condizioni di acque basse quando le onde incidenti non seguono la distribuzione di Rayleigh (γ_h è uguale ad 1 nel caso di un distribuzione rayleighiana)

- γ_β è un fattore che tiene conto dell'angolo di attacco delle onde incidenti (γ_β è uguale ad 1 nel caso di onde ortogonali alla struttura).

I coefficienti A e C sono definiti nella seguente tabella (CEM, 2003) rispettivamente per un livello di superamento del massimo runup pari al 2% e al 33% delle onde incidenti (valore significativo):

Tabella 4.28- Coefficienti A e C per il calcolo del runup

R_u	ε	A	C
$R_{u2\%}$	$\varepsilon \leq 2.5$	1.6	0
	$2.5 < \varepsilon < 9$	-0.2	4.5
$R_{u33\%}$	$\varepsilon \leq 2.0$	1.35	0
	$2.0 < \varepsilon < 9$	-0.15	3

Il fattore di riduzione dovuto alla scabrezza dipende dal tipo di rivestimento che la struttura presenta. I valori suggeriti da de Waal e van der Meer (1992) per parametri di Irribarren inferiori a circa 4 distinguono i casi di parete liscia ricoperta da calcestruzzo o asfalto, rivestita con blocchi di diversa tipologia, con erba, etc. Nel caso di due o più strati di materiale lapideo il valore suggerito per γ_r è compreso tra 0.55 e 0.6.

La presenza di una berma influisce notevolmente non solo sulla stabilità della struttura come mostrato nel paragrafo precedente, ma anche sulla massima risalita del moto ondoso. L'influenza di una berma viene quantificata attraverso il fattore γ_b , generalmente compreso tra 0.6 e 1, e calcolabile sulla base della seguente relazione:

$$\gamma_b = 1 - r_b(1 - r_{db}) \quad (4.13)$$

essendo:

$$r_b = 1 - \frac{\tan \alpha_{eq}}{\tan \alpha} \quad \text{ed} \quad r_{db} = 0.5 \cdot \left(\frac{d_b}{H_s} \right)^2$$

con d_b quota della berma rispetto al livello medio del mare, mentre rispettivamente α ed α_{eq} sono la pendenza media dei due tratti intervallati dalla berma e una pendenza equivalente, quest'ultimo funzione della larghezza b della berma, definiti sulla base della figura 4.24:

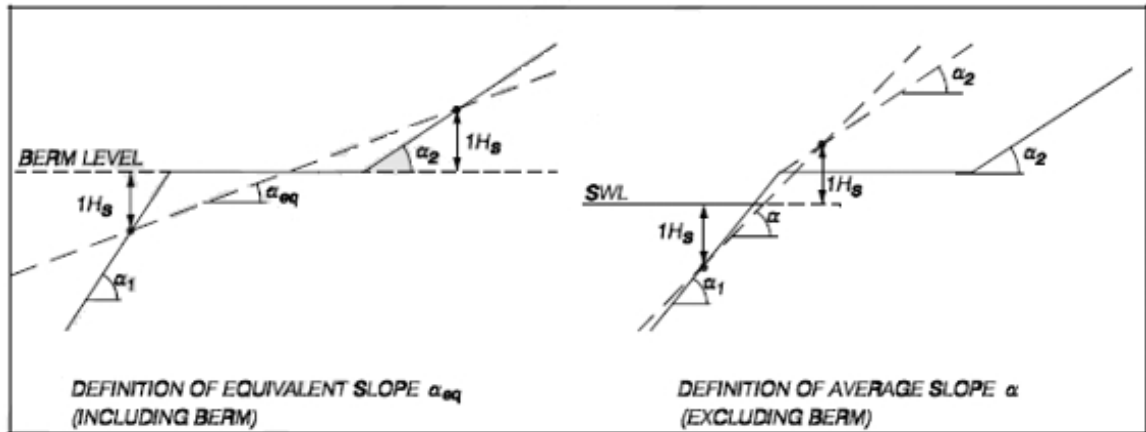


Figura 4.24 – Definizione degli angoli α ed α_{eq} .

Il fattore correttivo γ_h tiene conto del fatto che in acque basse, quando alcune onde frangono prima di raggiungere la struttura, la distribuzione delle altezze d'onda può discostarsi dalla rayleighiana. In questi casi il coefficiente γ_h si stima secondo la relazione:

$$\gamma_h = \frac{H_{2\%}}{1.4 \cdot H_s} \quad (4.14)$$

($H_{2\%}/H_s=1.4$ nel caso di altezze d'onda che seguono la distribuzione di Rayleigh).

Sia l'angolo d'attacco che la dispersione direzionale delle onde influiscono sul runup. Una stima dell'influenza di questi fattori è stata valutata sperimentalmente da de Waal e van der Meer (1992) e tradotta in forma grafica ed analitica. Più in particolare, indicando con β l'angolo formato tra l'ortogonale d'onda e la perpendicolare alla struttura, vengono fornite nel caso di onde lunghe le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} 1.0 & \quad \text{per } 0^\circ \leq \beta \leq 10^\circ \\ \gamma_\beta = \cos(\beta - 10^\circ) & \quad \text{per } 10^\circ \leq \beta \leq 63^\circ \\ 0.6 & \quad \text{per } \beta > 63^\circ \end{aligned}$$

4.7 Applicazione della metodologia di studio del run-up al caso di progetto

La determinazione della massima risalita del moto ondoso sul rivestimento in scogliera a tergo della banchina di accosto in oggetto è stata dunque subordinata alla stima dei parametri correttivi della formula (4.12).

Più nel dettaglio, per quanto riguarda il fattore γ_r , tenendo conto che si intende procedere con la realizzazione di una scogliera in materiale lapideo disposto in uno o più strati, si assume il valore:

$$- \gamma_r = 0.60$$

Inoltre, avendo scelto di realizzare una scogliera con profilo con berma intermedia di 2 m posta a quota di -0.50 s.l.m.m e uguale pendenza 3/2:

$$- \gamma_b = 0.86-0.68$$

Per quanto riguarda il coefficiente correttivo γ_h relativo alla modalità con cui le altezze d'onda sono distribuite attorno al loro valore medio, tenendo conto che gli eventi ondosi nel Mediterraneo sono ben descritti dalla distribuzione di probabilità di Rayleigh, si può assumere:

$$- \gamma_h = 1.0$$

Infine, in merito alla correzione relativa all'angolo d'attacco del moto ondoso, come specificato nei precedenti paragrafi, le onde più gravose per il paraggio esaminato sono quelle con direzione di provenienza di 337.50° , ovvero caratterizzate da un angolo β pari a 34° , rispetto alla normale alla linea di costa; pertanto si avrà:

$$- \gamma_\beta = 0.91$$

Occorre in ultimo specificare il valore assunto dai coefficienti A e C, funzioni del parametro di Irribarren. Quest'ultimo è stato valutato per le due condizioni in esame individuando valori in entrambi maggiore di 3,5 e quindi corrispondenti ad una figura di frangimento di tipo surging. Dalla Tabella 6.2 si individuano pertanto i valori dei coefficienti A e C, riportati in Tabella 4.29 insieme al parametro di Irribarren.

Tabella 4.29-Parametro di Irribarren e coefficienti A e C per il caso in studio.

T_r	T	H	ε	A	C
[anni]	[s]	[m]			
20	3,6	0.45	4.43	-0.15	3.0
50	4,0	0.55	4.46	-0.2	4.5

In definitiva è stato calcolato il valore della massima risalita verticale del moto ondoso sulla struttura, facendo riferimento al tempo di ritorno di 20 anni per la determinazione del runup significativo R_{Us} , ovvero la risalita superata da un terzo delle onde incidenti, e al tempo di ritorno di 50 anni per la valutazione del runup $R_{U2\%}$, ovvero la risalita superata dal 2% delle onde incidenti, da interpretarsi come valore estremo di runup. I valori adottati per il calcolo unitamente ai risultati ottenuti per la risalita sono riassunti in Tabella 4.30.

Tabella 4.30 - Parametri adottati per il calcolo del runup e valore della massima risalita verticale del moto ondoso.

Tr	ε	A	C	γ_r	γ_b	γ_h	γ_β	Ru
[anni]								[m]
25	4.43	-0.15	3.0	0.6	1.0	0.86	0.91	0.50
65	4.45	-0.2	4.5	0.6	1.0	0.68	0.91	0.73

Considerato che occorre aggiungere ad Ru il sopralzo totale pari a 0.60 m si avrà che la risalita massima dell'onda raggiungerà quota + 1.35 s.l.m.m che viene assunta come altezza della berma di testa della scogliera radente, a protezione della scarpata retrostante il banchinamento. Tale quota è anche inferiore all'intradosso della soletta di banchina che nel punto più basso è posta a +1.40 m rispetto al livello mare, risultando così non raggiungibile dall'onda di risalita che quindi non esercita alcuna azione di sottopressione sulla struttura orizzontale del banchinamento.

Per quanto sopra non specificato si rimanda all'elaborato grafico allegato alla presente relazione.