

# COMUNE DI SIRACUSA

TITOLO PROGETTO:

**RIELABORAZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO DELL'APPRODO TURISTICO "MARINA DI SIRACUSA" SVILUPPATO SULLA BASE DEI CONTENUTI DEL PROGETTO PRESENTATO E DISCUSO IN CONFERENZA DEI SERVIZI IN DATA 15.02.2021**

COMMITTENTE:

**S.P.E.R.O. s.r.l.**  
**Via Elorina 29 - 96100 Siracusa - Italy**

PROGETTISTA GENERALE

**TEAMNETWORK s.r.l. - Engineering & Management**  
**Via Luigi Spagna 50/L-M, 96100 Siracusa - Italy**



TITOLO ELABORATO:

**STUDIO IDRAULICO MARITTIMO**

Scala

Formato

FILE

PROGETTISTA

Progettista architettonico:  
Arch. Mario Rizza

Progettista strutture ed impianti:  
Ing. Paolo Calafiore

Geologia e Ambiente:

Dott. G. Bellomo

Dott. G. Anselmo

NUMERO DOCUMENTO

IMM12-08	MdS	PD	REL	SIM	02	R0	
JOB N.	COD. 1	COD. 2	COD. 3	COD. 4	COD. 5	REV. n.	
N. REV	DATA	DESCRIZIONE			DRW.	CHK.	APP.

**Provincia di Siracusa**  
**COMUNE DI SIRACUSA**

**MARINA DI SIRACUSA**

**RIELABORAZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO DELL'APPRODO TURISTICO "MARINA DI SIRACUSA" SVILUPPATO SULLA BASE DEI CONTENUTI DEL PROGETTO PRESENTATO E DISCUSO IN CONFERENZA DEI SERVIZI IN DATA 15.02.2021**

**STUDIO IDRAULICO MARITTIMO**

**GIUGNO 2023**

VERSIONE	DESCRIZIONE:	PREPARATO	APPROVATO	DATA:
01	EMISSIONE			21/06/2023
NOME FILE:			DISTRIBUZIONE: RISERVATA	

## INDICE

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>1</b>
<b>2. LO STUDIO IDRAULICO MARITTIMO.....</b>	<b>2</b>
2.1 I FENOMENI METEOROLOGICI E MARITTIMI IN GIOCO .....	2
<b>3. LA STAGIONALITÀ DEGLI EVENTI.....</b>	<b>3</b>
3.1 DETERMINAZIONE DEI LIVELLI IDRICI .....	3
3.2 DETERMINAZIONE DEL CLIMA D'ONDA.....	3
3.3 DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI.....	4
3.4 CONCOMITANZA DI FENOMENI POTENZIALMENTE CALAMITOSI .....	4
<b>4. CARATTERISTICHE FISICHE E CLIMATICHE DEL SITO E DEL PARAGGIO .....</b>	<b>5</b>
<b>5. INDIVIDUAZIONE DEL CLIMA D'ONDA ED ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI .....</b>	<b>7</b>
5.1 FONTI DI DATI METEOMARINI A DISPOSIZIONE .....	7
5.2 DATI DA ELABORARE .....	8
5.3 ADATTABILITÀ DEI DATI RILEVATI A CATANIA AL SITO DI SIRACUSA.....	11
5.3.1 IDENTIFICAZIONE DEI FETCH GEOGRAFICI ED EFFICACI .....	12
5.3.2 CONFRONTO DEI CAMPI DI GENERAZIONE ONDOSA .....	14
5.3.3 TRASPOSIZIONE ED ADATTAMENTO DEI DATI DISPONIBILI .....	16
<b>6. CLIMA D'ONDA A LARGO DEL PARAGGIO.....</b>	<b>19</b>
6.1 PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO .....	19
6.2 DETERMINAZIONE DELLA FORMA ANALITICA DELLA PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO .....	19
6.3 PERIODI .....	21
6.4 DURATA DELLE MAREGGIATE .....	22
6.5 CONCLUSIONI.....	22
<b>7. EVENTI ESTREMI A LARGO DEL PARAGGIO .....</b>	<b>30</b>
7.1 DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI SECONDO BOCCOTTI.....	30
7.2 DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI TRAMITE IL SOFTWARE ACES.....	32
7.3 CONCLUSIONI SULLA DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI .....	35
7.4 ULTERIORI INDAGINI PER LA VALUTAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO PER IL PARAGGIO DI SIRACUSA.....	37
<b>8. PREVISIONI STATISTICHE STAGIONALI .....</b>	<b>43</b>
<b>9. ANALISI DEI LIVELLI IDRICI .....</b>	<b>48</b>
9.1 LE MAREE.....	48
9.2 ELEVAZIONE PER VENTO .....	49
9.3 ELEVAZIONE PER GRADIENTI DI PRESSIONE ATMOSFERICA .....	52
9.4 ELEVAZIONE PER ONDE (WAVE SETUP) .....	53
9.5 CONCLUSIONI SULLO STORM SURGE .....	54
9.6 CAMBIAMENTO CLIMATICO E LIVELLI DEL MARE.....	56
9.7 PREVISIONI DEL LIVELLO MEDIO MARINO .....	56
9.8 CONSIDERAZIONI FINALI .....	59

---

<b>10. TRASFORMAZIONE DELL'ONDA DAL LARGO VERSO RIVA.....</b>	<b>60</b>
10.1 LA RIFRAZIONE E LO SHOALING.....	60
10.2 MODELLO MATEMATICO UTILIZZATO.....	60
10.2.1 DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO	63
10.2.2 SIMULAZIONI NUMERICHE ESEGUITE	65
10.2.3 ANALISI DELLE SIMULAZIONI RELATIVE ALLA PROPAGAZIONE DEL CLIMA D'ONDA DAL LARGO VERSO RIVA	66
<b>11. PROPAGAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI DAL LARGO VERSO RIVA.....</b>	<b>72</b>
<b>12. ANALISI DELLE ONDE GENERATE DAL VENTO ALL'INTERNO DEL PORTO GRANDE .....</b>	<b>78</b>
12.1 RICHIAMI TEORICI.....	78
12.2 DESCRIZIONE DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE E DEI RISULTATI.....	81
<b>13. STUDIO DELL'AGITAZIONE PORTUALE.....</b>	<b>92</b>
13.1 DIFFRAZIONE ED EFFETTI COMBINATI.....	92
13.2 MODELLO DI CALCOLO UTILIZZATO.....	93
13.2.1 Equazioni di governo	93
13.2.2 Condizioni al contorno	95
13.3 STANDARD PIANC IN MERITO ALL'AGITAZIONE INTERNA .....	96
13.4 DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO .....	97
13.5 ANALISI CONDOTTE.....	98
13.5.1 INDIVIDUAZIONE DELLO SVILUPPO LONGITUDINALE OTTIMALE PER LA RIDUZIONE DELL'AGITAZIONE RESIDUA	98
13.5.2 INDIVIDUAZIONE DELLA TIPOLOGIA COSTRUTTIVA OTTIMALE PER LA RIDUZIONE DELL'AGITAZIONE RESIDUA	116
<b>14. ANALISI DELLA RISONANZA .....</b>	<b>131</b>
14.1 SIMULAZIONI NUMERICHE ESEGUITE.....	131
<b>15. VERIFICA DELL'AGIBILITA' PORTUALE.....</b>	<b>141</b>
15.1 DATI DIMENSIONALI DELLO SPECCHIO IDRICO .....	141
15.2 VERIFICA DELL' AREA DEI FRANGENTI.....	142
15.3 VERIFICA DELL'IMBOCCATURA PORTUALE .....	142
15.4 VERIFICA DELL'ACCESSIBILITA' PORTUALE .....	143

## **1. PREMESSA**

---

Questo elaborato fa parte degli studi specialistici redatti a supporto del progetto **PROGETTO DEFINITIVO DELL'APPRODO TURISTICO "MARINA DI SIRACUSA" SVILUPPATO SULLA BASE DEI CONTENUTI DEL PROGETTO PRESENTATO E DISCUSO IN CONFERENZA DEI SERVIZI IN DATA 15.02.2021**

Il concetto che sta alla base di questo corpo documentale, è quello che la realizzazione di qualsiasi tipologia di infrastruttura ovvero qualsiasi attività antropica legata alla presenza della stessa, interagisce inevitabilmente con i processi climatici, idrodinamici e sedimentologici del sistema costiero in cui è inserita, caratterizzato da un complesso equilibrio "dinamico".

Tali interazioni possono provocare fenomeni spesso complessi da prevedere e i cui effetti sicuramente ricadono sia sull'ambiente, sia sull'intero sistema, compromettendo talvolta anche le stesse strutture antropiche.

Un approccio moderno che consenta la comprensione dei possibili scenari futuri connessi alla costruzione delle opere in progetto è rappresentato da uno studio "omnicomprensivo" di tutte le caratteristiche in gioco, che, anche tramite l'uso di modelli matematici, descrive i fenomeni reali e propone la previsione degli scenari futuri.

Tale corpo documentale è quindi da intendersi come un unico testo organico, in cui ogni singolo elaborato rappresenta solo un capitolo dedicato ad un determinato aspetto.

In particolare lo studio climatologico, lo studio idraulico marittimo, lo studio idrodinamico, lo studio della dinamica della costa, lo studio della qualità delle acque e lo studio idrologico-idraulico costituiscono le tessere di un puzzle che insieme definiscono il "quadro ambientale" in cui viene inserito il progetto proposto e di cui si vogliono individuare gli impatti indotti.

## 2. LO STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

---

Il presente Studio Idraulico Marittimo deve fornire indicazioni fondamentali ai fini del progetto in questione, e ciò perseguendo finalità molteplici.

Occorre infatti:

A. investigare sotto il punto di vista idraulico-marittimo lo stato del paraggio in condizioni di “non intervento”, al fine di poter identificare le alternative di progetto ed effettuare i necessari confronti;

B. verificare il comportamento marittimistico delle varie proposte progettuali alternative, che soddisfino le finalità; il comportamento marittimistico in senso lato riguarda:

1. la modificazione e la trasformazione dell'onda che si propaga verso riva, in presenza del dispositivo progettato;

2. l'agitazione residua a tergo del dispositivo di protezione progettato;

3. l'influenza e gli effetti del dispositivo progettato sull'evoluzione della linea di riva;

C. fornire tutte le indicazioni necessarie per il calcolo strutturale e geotecnico delle opere connesse al dispositivo prescelto, in funzione delle caratteristiche di rischio accettabile e di funzionalità che l'intervento deve garantire nella sua vita utile.

### 2.1 I FENOMENI METEOROLOGICI E MARITTIMI IN GIOCO

---

L'analisi del clima meteomarinico del paraggio inizia con l'individuazione più esatta possibile dello scenario fisico e meteorologico in cui ci si muove.

Una lista sintetica di quanto entra in gioco nelle analisi di questo tipo è qui riportata:

- fattori climatici canonici;
- configurazione del bacino di generazione dei moti ondosi;
- batimetrie dei fondali;
- orografia dei luoghi;
- tipologia geologica e pedologica dei litorali e dei fondali;
- presenza di estuari e di fiumi con regimi significativi;
- presenza e caratteristiche di interventi antropici costieri;
- frequenza ed intensità dei venti e delle tempeste;
- presenza significativa di moti di marea;
- presenza significativa di correnti marine;
- presenza significativa di altri fenomeni ondosi di lungo periodo.

La raccolta e l'elaborazione di questi dati è attività cospicua e assai delicata. L'interpretazione delle risultanze è il momento tipico in cui l'ingegnere marittimista individua i successivi passaggi ai fini dell'individuazione dei dati da utilizzare, delle ipotesi fisiche da effettuare e dei più corretti approcci matematici per gli scopi fissati.

Tale momento porta ad elaborazioni specifiche e diverse volta per volta, sito per sito e peculiari per le finalità dello studio.

### 3. LA STAGIONALITÀ DEGLI EVENTI

---

La meteorologia e la climatologia hanno un peso importante nelle analisi idrodinamiche. I fenomeni naturali studiati da queste scienze hanno una forte caratterizzazione stagionale.

Diviene quindi importante rivolgere l'attenzione su una possibile caratterizzazione stagionale degli eventi meteomarini, quando ciò possa essere rilevante.

In particolare in tutti quei casi di attrezzaggi leggeri, o di previsioni infrastrutturali connesse a scopi ludici e ricreativi e al diporto, in cui l'uso stagionale è quello prevalente, è il caso che l'analisi delle condizioni di funzionalità e di comfort tengano conto della stagionalità degli eventi.

#### 3.1 DETERMINAZIONE DEI LIVELLI IDRICI

---

Un problema fondamentale per le analisi idrodinamiche facenti parte degli studi idraulici marittimi è la determinazione dei livelli idrici in gioco.

E' nozione diffusa quanto il livello delle acque marine possa essere variabile sia periodicamente, con il susseguirsi delle stagioni, sia in concomitanza con specifici fenomeni fisici e meteorologici: tale fenomeno, denominato storm surge, è maggiormente apprezzabile in corrispondenza delle zone litoranee. Un esempio è costituito dalle spiagge che d'inverno o durante una tempesta appaiono assottigliarsi proprio a causa dell'elevazione temporanea del livello idrico.

Ed è proprio nelle zone costiere e litoranee che l'evoluzione dei livelli idrici provoca i maggiori effetti sui fenomeni idrodinamici.

Valga pensare al fenomeno del frangimento dell'onda che progredisce verso riva. Il frangimento è fenomeno connesso alle caratteristiche delle onde e, in maniera determinante, alla profondità dell'acqua su cui l'onda progredisce. E' frequente il caso di valori sottostimati dell'onda frangente proprio perché è stato trascurato l'effettivo livello idrico in cui l'onda evolve. L'onda frangente è tenuta in considerazione per il dimensionamento delle opere costiere: un sottodimensionamento di quest'onda comporta sottodimensionamento delle opere e quindi eventi catastrofici (purtroppo accaduti).

I livelli idrici di base vengono ripresi o da fonti cartografiche e, soprattutto sottocosta, da rilievi batimetrici opportunamente elaborati in funzione della finalità degli studi. La Carta Nautica riporta le profondità dei fondali in metri riferita al livello medio delle basse maree sizigiali. Sulla stessa carta viene riportato il valore di scostamento rispetto al livello medio del mare  $z_0$  (media delle medie delle basse ed alte maree misurate in un periodo di almeno 19 anni).

E' doveroso, quando la prevedibile influenza di tali fenomeni è determinante nelle considerazioni calcolistiche, rivolgersi ad un livello idrico opportunamente corretto con le dovute considerazioni fisico-matematiche.

#### 3.2 DETERMINAZIONE DEL CLIMA D'ONDA

---

La finalità degli studi idraulici marittimi, come visto, può essere molteplice. In tutti quei casi in cui si voglia identificare lo stato del mare anche nel suo svolgersi quotidiano, e quindi rappresentare statisticamente le condizioni dello stesso, per ricostruire la frequenza di occorrenza di uno stato incompatibile con l'uso previsto (per esempio, la frequenza di una agitazione non compatibile con un buon livello di comfort degli ormeggi di un marina) occorre rivolgersi allo studio delle serie storiche degli eventi e, con le tecniche della statistica, rappresentare lo specifico clima d'onda del sito.

---

### 3.3 DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI

---

Discorso diverso da quello appena fatto si rivolge al caso della necessità di individuare le più idonee dimensioni di un manufatto costiero, affinché possa resistere alle mareggiate. In questo caso, come anche in altri, è necessario individuare le condizioni estreme dello stato del mare che, associate ad una analisi dei rischi, consentano di ben dimensionare le opere. L'approccio teorico e numerico specifico per tale analisi è, come ovvio, completamente differente da quello del caso precedente.

---

### 3.4 CONCOMITANZA DI FENOMENI POTENZIALMENTE CALAMITOSI

---

Altra considerazione da porre in attenzione si riferisce a quanto sia possibile che concorrano fenomeni che possano incrementare il livello calamitoso dello stato del mare: così livelli idrici superiori alla norma (per marea, per tempeste, o per altri fenomeni), fenomeni congiunti di mare vivo e di mare morto (intendendo in quest'ultimo caso quei fenomeni ondosi provenienti da tempeste occorse in altre zone geografiche), tempeste di vento locali che incrementino gli apporti di energia al mare, correnti, etc., possono se concomitanti portare a condizioni di mare notevolmente differenti da quelli stimati.

Ai fini della determinazione numerica e matematica di tali interferenze, soccorre l'elaborazione statistica che oggi, anche nel settore idraulico-marittimo, ha raggiunto un livello di approfondimento e di successiva verifica sul campo dei risultati ottenuti che può senz'altro giudicarsi soddisfacente per la maggior parte delle problematiche ingegneristiche.



#### 4. CARATTERISTICHE FISICHE E CLIMATICHE DEL SITO E DEL PARAGGIO

Il Porto Grande di Siracusa è situato lungo la costa orientale della Sicilia e ricade di fatto ricade all'interno dell'unità fisiografica Punta Castelluzzo – Isola delle Correnti, secondo la classificazione riportata nel “ Piano di Assetto Idrogeologico” della Regione Sicilia del 2002.

In particolare si estende tra l'isola di Ortigia e la penisola della Maddalena.

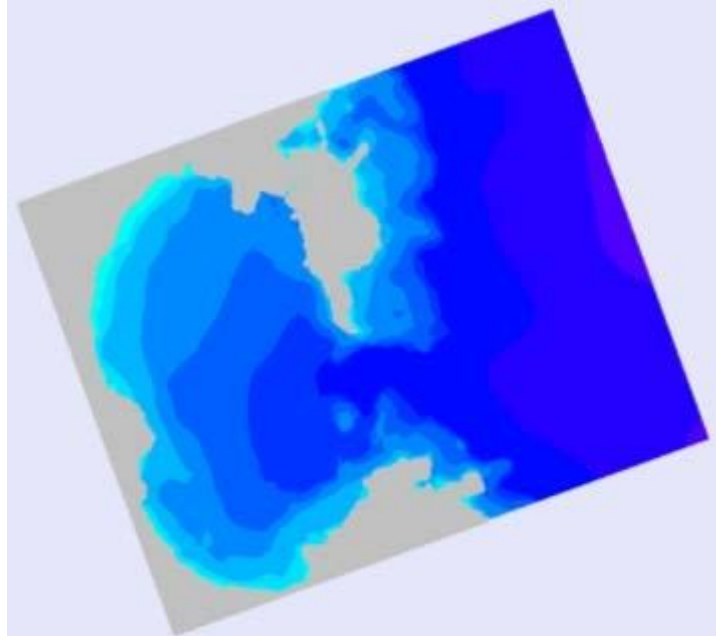


Figura 4.1. Modellazione numerica del sito del Porto Grande di Siracusa

L'individuazione del settore geografico di traversia, che sottende il paraggio in studio, è stata effettuata sulla carta Tecnica Regionale a scala 1:10.000 e sulle carte dell'Istituto Idrografico della Marina, su un punto sulla batimetrica del 100 m di fronte il sito interesse.

Esso risulta compreso tra 30°N e 165°N.

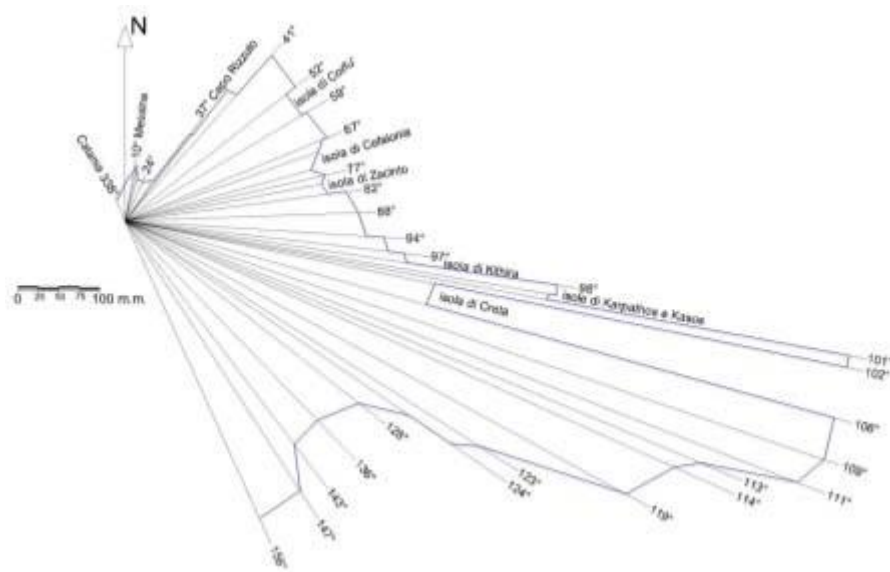


Figura 4.2 Individuazione del settore di traversia per il sito di Siracusa.

All'interno del Porto Grande sono presenti sia la foce del sistema fluviale Anapo-Ciane-Mammaiabica sia gli estuari di alcuni canali tra cui il Regina, il Pisimotta e il Grimaldi-Pantanelli (cfr. elaborato B.5-SIDR –“Studio idrologico Idraulico”).

Il regime termico può essere ricondotto al tipo temperato-mediterraneo, avendosi all'incirca un semestre (ottobre-marzo) caratterizzato da temperature relativamente basse seppure variabili con l'altitudine, a cui si contrappone un semestre (aprile-settembre) caratterizzato da alti valori occasionali di temperatura e sensibili escursioni giornaliere.

Anche il regime pluviometrico è di tipo temperato-mediterraneo, caratterizzato da un periodo piovoso da ottobre ad aprile e minimi stagionali da giugno ad agosto.

I venti regnanti sono quelli provenienti da est, i venti dominanti sono ancora da est e da N-E e S-E.

La caratterizzazione stagionale vede d'inverno la conferma della tendenza globale; d'estate invece i venti regnanti sono quelli da S-E (cfr. elaborato B.1-“Studio Climatologico”).

All'intero del Porto Grande, per via della deriva dei venti, degli effetti di marea e della portata continua dell'Anapo-Ciane, si genera una corrente in senso orario che segue la costa Ovest dell'Isola di Ortigia ed esce dall'imboccatura del porto.

Per maggiori chiarimenti si rimanda all'elaborato B.3-SDC-“Studio Idrodinamico”.

## 5. INDIVIDUAZIONE DEL CLIMA D'ONDA ED ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI

---

### 5.1 FONTI DI DATI METEOMARINI A DISPOSIZIONE

---

In linea estremamente sintetica gli studi idraulici marittimi si possono svolgere sia con metodo diretto che con metodi indiretti.

Il metodo diretto è quello dell'analisi statistica di serie storiche di dati ondometrici locali che rispondano a determinati requisiti scientifici. Tuttavia molto frequentemente i siti da analizzare non sono immediatamente interessati da letture ondometriche locali affidabili; e ancora, il tempo disponibile e l'impegno economico connesso spesso non consentono l'apposizione di specifici apparecchi rilevatori del clima d'onda nel paraggio per periodi sufficientemente lunghi.

Ci si affida quindi spesso a metodi indiretti, con i quali si prendono in considerazione le principali cause della formazione delle onde marine (vento, pressioni atmosferiche, etc.) e, tramite la elaborazione di queste cause, a mezzo di opportuni modelli matematici che simulino la realtà fisica, si determina una verosimile formazione ondosca.

A seguito della finalità dello studio ecco che occorre effettuare una ricognizione delle base dati eventualmente disponibili ed affidabili e "ricostruire", nel rispetto della fisica di generazione del clima d'onda in un paraggio, la base dei dati da analizzare.

L'acquisizione di rilevamenti strumentali diretti, eseguiti all'interno del campo d'onda, è un'esigenza molto importante per una conoscenza accurata e completa delle condizioni meteomarine di un paraggio.

In Italia non mancano misure ondometriche costiere, a partire dalle prime boe ondometriche varate dall'ENEL nel 1974-76, ma esse non sono mai state uniformemente distribuite, sia nello spazio che nel tempo, e soprattutto sono state poste e gestite da una moltitudine di Enti che hanno lavorato in modo non preordinato e non coordinato.

Sulla scorta di quanto accade da tempo in altri Paesi (in testa gli Stati Uniti, in Mediterraneo la Spagna e la Francia), anche in Italia dal 1989 esiste una Rete Ondometrica Nazionale (RON) gestita dal "Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale" che controlla una rete di 15 boe accelerometriche direzionali telecontrollate i cui dati sono registrati e raccolti con frequenza minima trioraria.

L'alto grado di affidabilità del sistema consente l'uso di un patrimonio informativo, ancora non completamente sviluppato ai fini scientifici, che certamente deve essere tenuto in opportuno conto per le elaborazioni relative all'ingegneria costiera.

Infine si evidenzia che le registrazioni puntuali di cui è possibile disporre sono strumento indispensabile per la ricostruzione di mareggiate particolari e gravose e per la calibrazione dei modelli matematici utilizzati per la determinazione di onde al largo con metodi indiretti.

La intensità del vento si può stimare effettuando una analisi delle carte meteorologiche di pressione atmosferica al livello del mare, ma tale metodo porta a notevoli imprecisioni e non è valido ove la topografia dei luoghi è molto particolare.

Nei casi di bacini limitati, quale quello del Mediterraneo, ove le regioni di formazione sono prossime alle coste, si possono utilizzare i dati raccolti da stazioni costiere, quali quelle dell'Aeronautica Militare in Italia.

Un cenno è doveroso per i sistemi di rilevamento satellitare, sistema che ancor oggi presenta dei notevoli limiti di affidabilità, ma che in futuro potrebbero divenire molto utili per le analisi del settore di nostro interesse. In Europa, per esempio, alcuni Enti, tra cui il "Satellite Observing Systems Ltd.-UK", forniscono rilevamenti satellitari (vento al suolo, onde,

temperature, etc.) i cui dati, provenienti da tre satelliti, l' "US Navy GEOSAT", il "France/NASA TOPEX", e l' "ESA ERS-1", vengono analizzati e validati numericamente in modo molto sofisticato.

Infine si accenna al fatto che esistono diverse banche dati a indirizzo oceanografico e meteorologico, in grado di fornire dati ed elaborazioni di grandezze meteomarine anche in tempo reale. I Paesi ove ciò è ad un alto livello di sviluppo e che detengono il merito per una ottima divulgazione delle informazioni, Sono gli U.S.A. e, in Europa, la Spagna. Tali realtà stanno oggi trascinando la crescita di molte altre nazioni in tal senso.

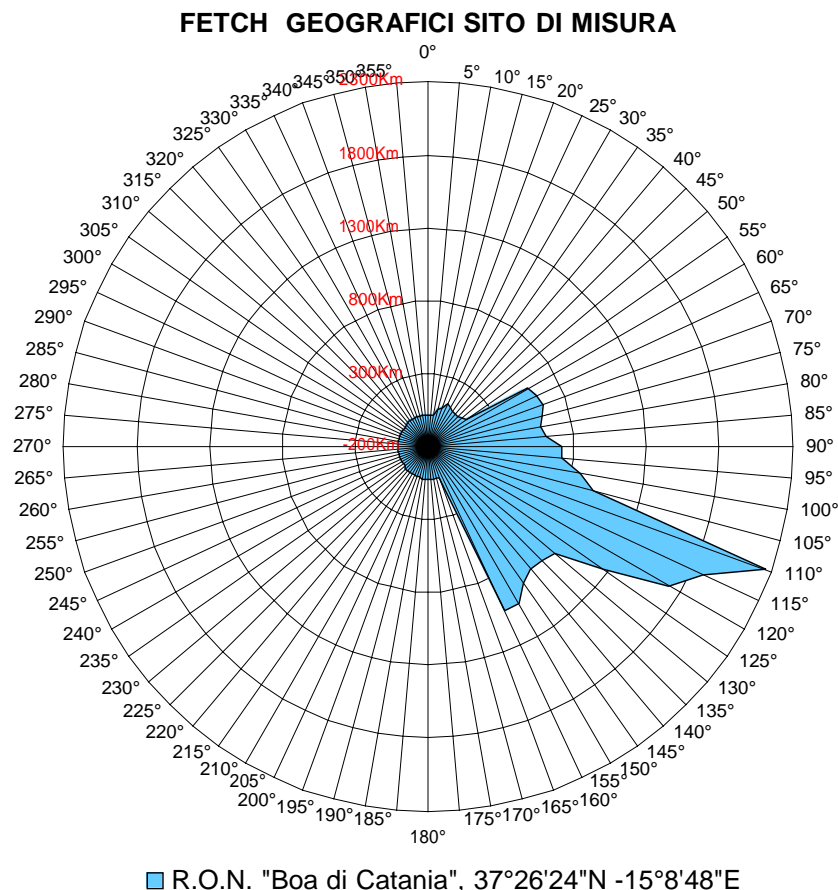
## 5.2 DATI DA ELABORARE

Non risultano esserci rilievi di tipo ondamentrico all'interno del Porto Grande di Siracusa, quindi per l'esecuzione dello studio si conviene di fare riferimento ai dati della boa R.O.N. di Catania, che saranno elaborati secondo le metodologie specifiche, da cui poter estrapolare risultati valevoli per il paraggio di Siracusa.

La boa R.O.N. è posizionata sul punto di coordinate 37° 26' 24" N; 15° 08' 48" E, dove la profondità dei fondali è di circa 100 m.

Per il sito della boa R.O.N. è stato determinato il relativo settore di traversia, che risulta compresa tra 20°N e 170°N.

La figura seguente mostra il diagramma delle distanze di mare libero del punto considerato, la cui ampiezza corrisponde al settore di traversia.



**Figura 5.1. Diagramma di distanza di mare libero del punto di rilevamento nel sito di Catania**

Lo scrivente si è attivato per la ricerca delle serie storiche ondamentriche registrate presso la stazione di misura di Catania che saranno utilizzate per le valutazioni statistiche del clima

d'onda e degli eventi estremi, dall'inizio delle attività di misura a oggi, e cioè durante il periodo 1989-2011.

Dal 1989 al 2002 i dati sono stati rilevati su base trioraria, dal 2002 in poi su base semioraria. Dal 2006 al 2010 la strumentazione è stata inattiva. Essa è stata ripristinata nel gennaio 2010.

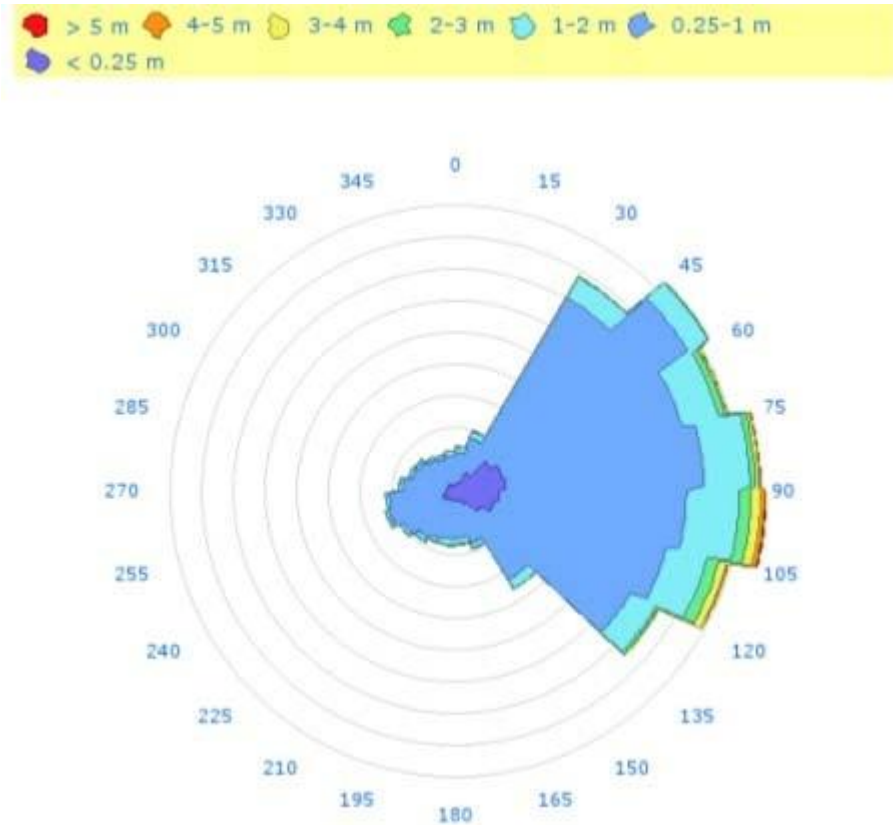
I dati registrati e ufficialmente disponibili ricoprono un periodo che va dal 1 Luglio 1989 al 5 Ottobre 2006; le registrazioni disponibili sono 92.325; i rilevamenti attesi erano 122720, quindi i mancanti sono 30394 (33% attesi), le calme totali ( $h \leq 0.5$ ) sono 14504 (16% effettivi). Inoltre sono stati elaborati i dati relativi al 2010 (cfr. paragrafo 7.4).

Di seguito si riporta la tabella di occorrenza  $H_s/a^\circ$  degli eventi ufficialmente disponibili nel sito strumentato di Catania, per settori direzionali di  $15^\circ$  di ampiezza (ogni settore è rappresentativo di onde che provengono da  $\pm 7.5^\circ$  rispetto alla direzione principale) e secondo classi di altezza d'onda di ampiezza 0,5 m.

°N	<=15	<=30	<=45	<=60	<=75	<=90	<=105	<=120	<=135	<=150	<=165	<=180	<=195	<=210	<=225	<=240	<=255	<=270	<=285	<=300	<=315	<=330	<=345	<=360	TOT	
m																										
>10																										
<=10																										0
<=9.5																										0
<=9																										0
<=8.5																										0
<=8																										0
<=7.5																										0
<=7							2																			2
<=6.5							9	1																		10
<=6					2	4	20	1																		27
<=5.5					4	10	37	14																		65
<=5					9	18	104	35		2				1	1			1								171
<=4.5					24	46	140	72	12	1	2	2	1	1				1			1			1	1	305
<=4	1	1	3	2	48	66	162	175	38	2	2	5	2	3	2			1					1		1	515
<=3.5	5	6	6	13	48	53	155	126	22	11	12	5	4	6	7	5	5	2	4	1	4	3	5	5	513	
<=3	17	16	26	28	136	125	216	253	61	9	10	21	19	15	11	4	8	3	7	7	12	1	10	10	1025	
<=2.5	40	56	126	147	373	341	531	450	201	54	53	53	59	39	29	31	24	26	24	30	26	33	25	46	2817	
<=2	133	157	609	583	842	1108	1129	863	702	259	123	132	136	104	110	90	81	73	90	86	93	86	104	92	7785	
<=1.5	417	610	3065	3183	2616	2908	2785	2542	2516	1207	498	397	430	446	458	483	619	592	507	429	406	344	339	389	28186	
<=1	554	810	3225	3956	3181	3258	3017	3011	2884	1520	837	733	766	764	876	998	1138	1138	843	686	621	553	495	536	36400	
<=0.5	231	298	708	1378	1591	1641	1451	1313	962	519	347	337	303	333	355	420	406	349	298	284	289	268	222	201	14504	
TOT	1398	1955	7768	9290	8874	9578	9758	8856	7398	3584	1884	1685	1720	1712	1849	2031	2283	2184	1773	1524	1451	1289	1201	1281	92325	

Tabella 5.2. Tabella di Frequenza dei dati registrati dal boa R.O.N. di Catania dal 1989 al 2006

Nella figura seguente è riportato il diagramma polare rappresentativo del regime medio direzionale delle occorrenze registrate a Catania, secondo una distribuzione che prevede settori direzionali di 15° e 7 classi di altezza d'onda significativa.



**Figura 5.3. Diagramma polare del regime ondoso annuale per settori di 15° e 7 classi di altezza significativa; dati BOA R.O.N. di Catania (1989 – 2006)**

### 5.3 ADATTABILITA' DEI DATI RILEVATI A CATANIA AL SITO DI SIRACUSA

Al fine di verificare l'adattabilità dei dati di Catania a Siracusa è stato condotto il confronto dei campi di generazioni dei treni d'onda, individuando i fetch geografici ed efficaci sia per il sito di misura che per quello in studio.

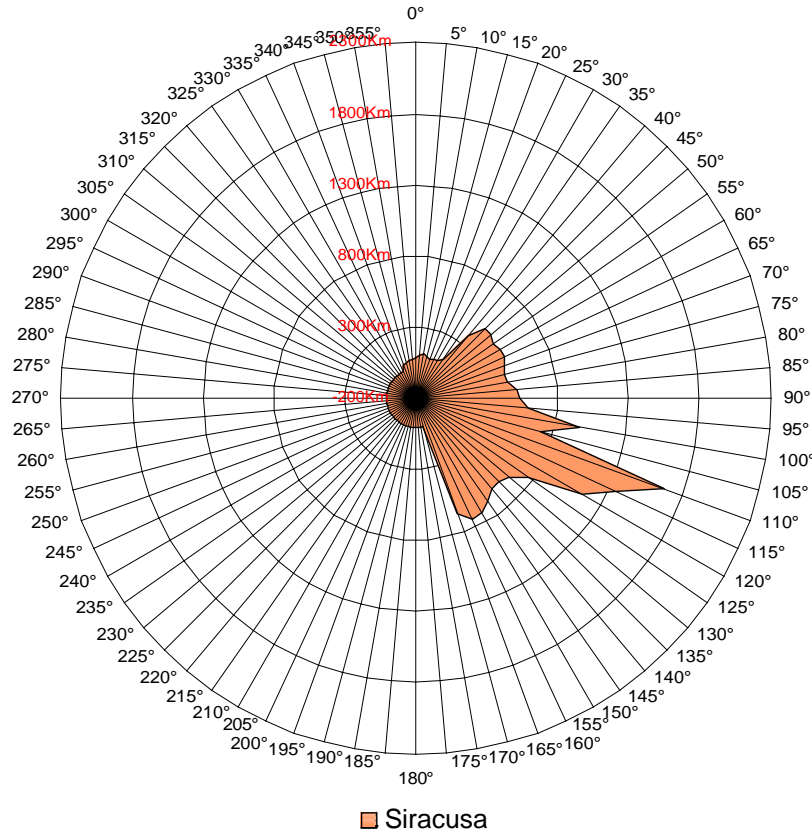
Si ricorda a tal fine che per fetch si intende la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso ad opera dell'azione esercitata dal vento. In bacini semichiusi di estensione limitata come il Mar Mediterraneo, l'individuazione dei fetch può essere eseguita facendo ricorso al concetto di "fetch geografico" che indica la distanza geografica tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione.

### 5.3.1 IDENTIFICAZIONE DEI FETCH GEOGRAFICI ED EFFICACI

L'individuazione del settore geografico di traversia, che sottende il paraggio in studio, è stata effettuata sulla carta Tecnica Regionale a scala 1:10.000 e sulle carte dell'Istituto Idrografico della Marina, su un punto sulla batimetrica del 100 m di fronte il sito interesse.

Esso risulta compreso tra 30°N e 165°N.

Nella figura seguente è rappresentato il diagramma delle distanze di mare libero del paraggio in studio, la cui ampiezza corrisponde al settore di traversia.



**Figura 5.4. Diagramma di distanza di mare libero per il sito di Siracusa**

Per completare l'inquadramento geografico del paraggio è necessario determinare i valori dei fetch efficaci sulla base dei valori dei fetch geografici individuati.

Il fetch efficace è definito come la porzione di mare che, sotto l'azione diretta del vento, costituisce l'area di generazione dell'evento di moto ondoso, tenendo debito conto delle lunghezze associate a direzioni laterali rispetto a quella principale e quindi anche alla larghezza dell'area di generazione. Di conseguenza la lunghezza dei fetch efficaci risulta essere diversa da quella dei fetch geografici. Il calcolo dei fetch efficaci può essere eseguito in base alla seguente relazione indicata da Sverdrup, Munk e Bretshneider con i successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1979):

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i = \phi_w - \Theta}^{\phi_w + \Theta} F \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i = \phi_w - \Theta}^{\phi_w + \Theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)} \quad (5)$$

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:



- $F_{e,w}$  lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione  $j_w$ ;
- $F_i$  lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima  $j_i$ ;
- $\varphi_w$  direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo il paraggio;
- $\varphi_w - \theta \leq \varphi_i \leq \varphi_w + \theta$  direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di  $2\theta$  considerato nell'intorno della direzione  $\varphi_w$ ;
- $\theta$  ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso,  $45^\circ$  con il metodo Saiville;
- $n$  termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume  $n=2$ ).

Nella figure seguenti sono rappresentati sia i diagrammi dei fetch efficaci del sito strumentato di Catania che quello di interesse di Siracusa.

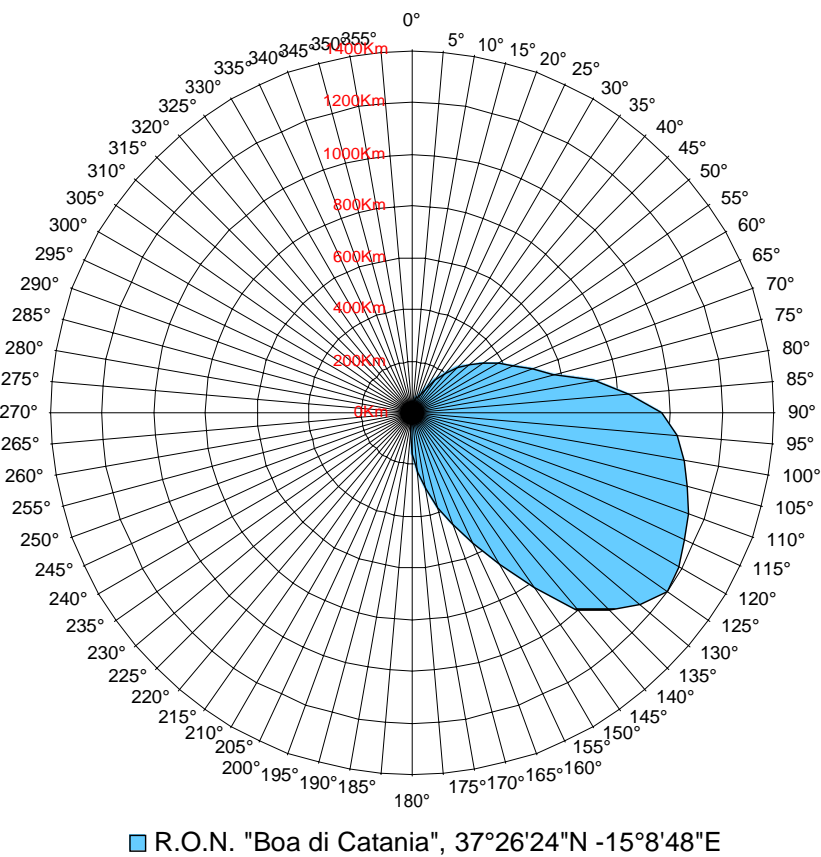


Figura 5.5. Diagramma del fetch efficace per il sito di Catania

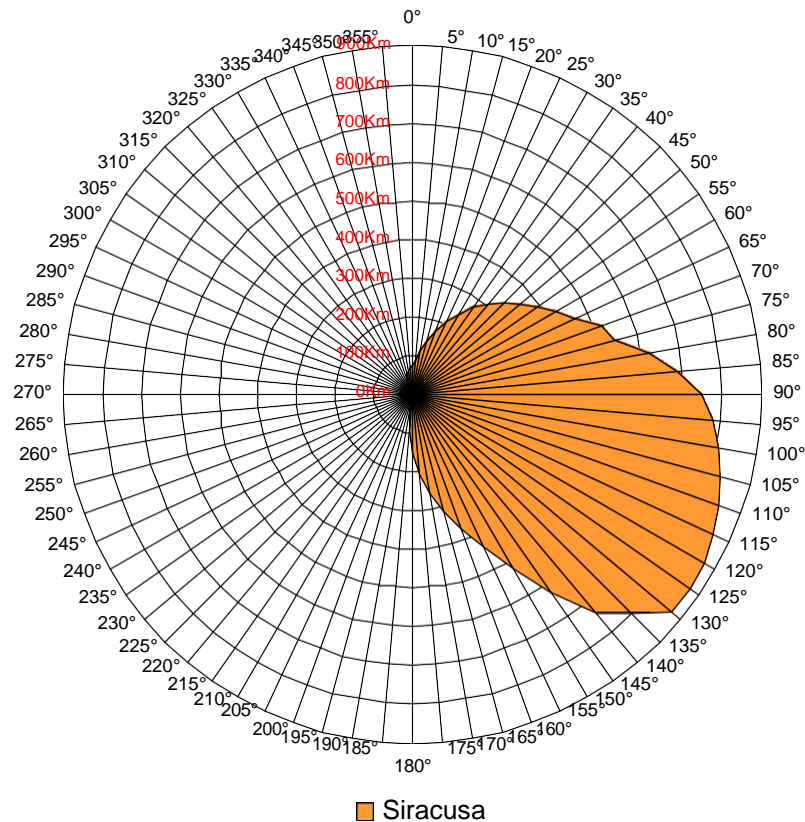


Figura 5.6. Diagramma del fetch efficace per il sito di Siracusa

### 5.3.2 CONFRONTO DEI CAMPI DI GENERAZIONE ONDOSA

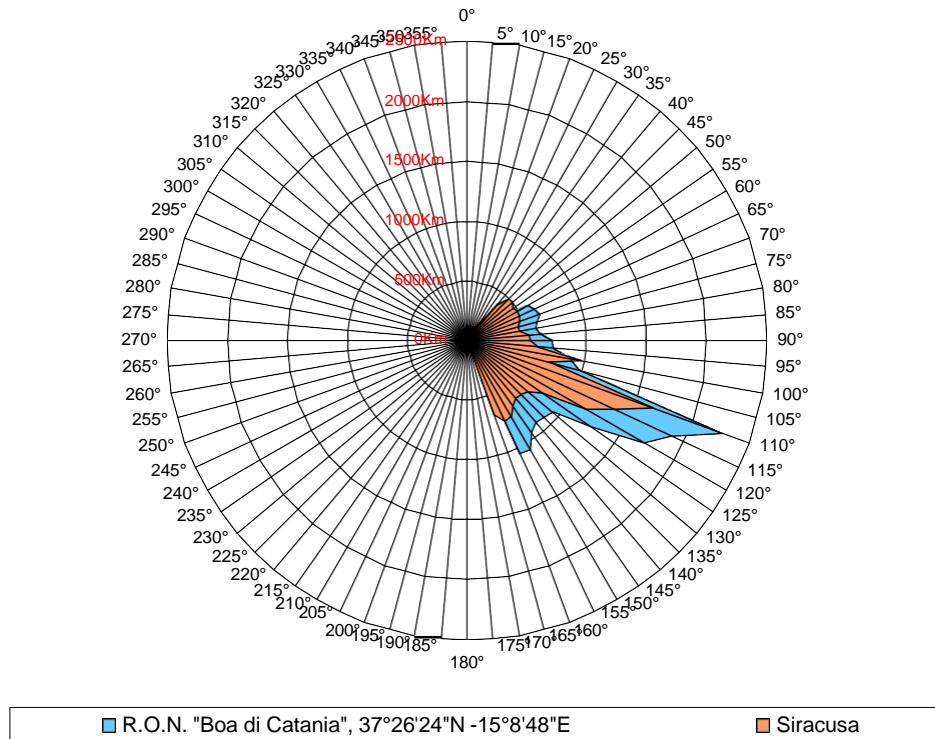
Il sito di interesse, pur ricadendo nella stessa area geografica, è situato in una posizione decentrata rispetto al tratto di mare "sotteso" dal punto in cui sono rilevati i dati ondamentrici: da qui nasce l'esigenza di ricorrere ad un metodo che consenta di "trasporre" geograficamente le misure ondamentriche dal punto di misura a quello di interesse.

Per valutare l'effettiva estrapolazione dei dati acquisiti, mediante l'impiego di appositi modelli matematici di trasposizione, è stata appurata la coincidenza del campo di generazione del moto ondoso.

Il metodo utilizzato è stato il confronto dei diagrammi dei fetches geografici dei due siti, poiché la formazione dell'onda al largo, come è noto, dipende dal vento spirante (direzione, intensità e durata) e dalla lunghezza di mare libero (fetch) su cui tale vento spira.

Di seguito si riportano i grafici di sovrapposizione dei diagrammi delle distanze di mare libero e dei fetch efficaci per il sito strumentato di Catania e per il sito di interesse di Siracusa.

### CONFRONTO TRA I FETCH GEOGRAFICI



### CONFRONTO TRA I FETCH EFFICACI

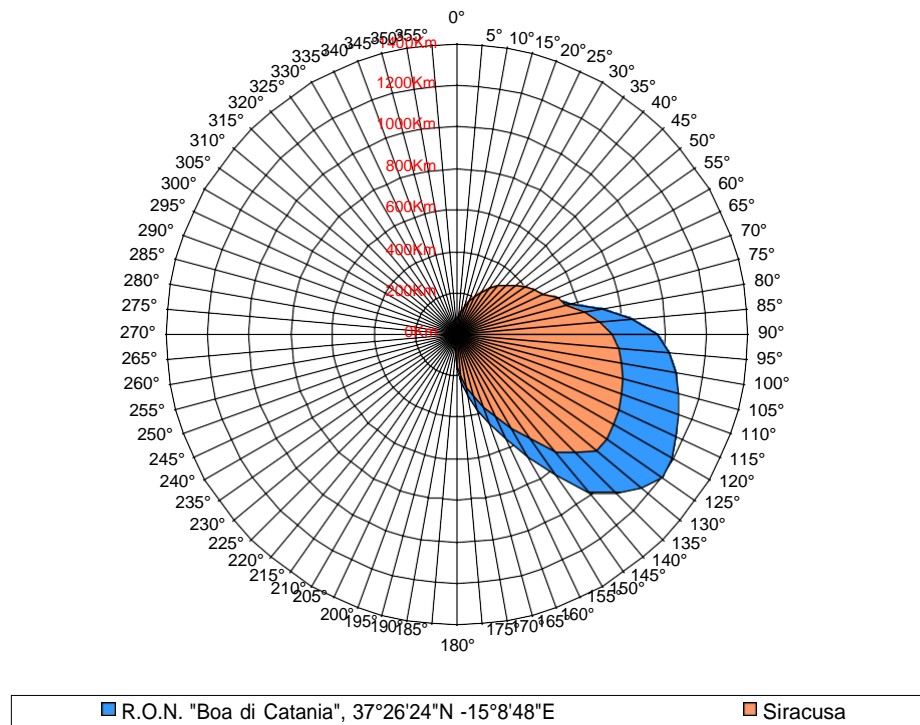


Figura 5.7. Confronto tra i Diagrammi dei fetches geografici ed efficaci.

Il confronto dei due diagrammi di distanze di mare libero e dei fetch efficaci evidenzia quanto segue:

- il settore di traversia per il sito di Catania compreso tra 20°N e 170°N;
- il settore di traversia per il sito di Siracusa è compreso tra 30°N e 165°N
- il campo di generazione del moto ondoso è sostanzialmente coincidente per le direzioni comprese tra 30° e 165°, che individuano il settore di traversia per il sito di Siracusa;
- in tale settore i diagrammi sono completamente sovrapponibili, ovvero sottendono praticamente lo stesso settore di traversia con accettabili differenze nelle distanze di mare libero, direzione per direzione, che ne consentono la trasposizione.

A seguito di queste osservazioni, appare fisicamente verosimile l'uso dei dati ondometrici del punto di rilevamento della boa R.O.N. di Catania, prima descritto, come identificativi del clima d'onda al largo del paraggio del porto di Siracusa e quindi risulta ragionevole applicare uno dei metodi di trasposizione del clima d'onda citati in letteratura.

### 5.3.3 TRASPOSIZIONE ED ADATTAMENTO DEI DATI DISPONIBILI

L'ipotesi di base della metodologia seguita consiste nel supporre che le stesse condizioni di vento (velocità e direzione), che hanno determinato le condizioni di moto ondoso registrate dall'ondametro, abbiano interessato anche l'area di generazione situata al largo del sito di interesse (Contini e De Girolamo, 1998).

Il metodo consiste nel determinare la corrispondenza tra le direzioni, le altezze ed i periodi del moto ondoso relativi al punto di misura e a quello di interesse. Questo procedimento verrà utilizzato per quelle direzioni in cui la differenza di mare libero non è trascurabile (>20 m.m.).

Per poter trasporre le misure di altezze d'onde per questi settori di traversia sono state considerate le equazioni usate nel caso di fetch limitati. Tali leggi permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa spettrale  $H_{mo}$  e il periodo di picco spettrale  $T_p$  in funzione della lunghezza del fetch e della velocità del vento, in particolare:

$$\frac{gH_{mo}}{U_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left| \frac{gF}{U_A} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\frac{gT_p}{U_A^2} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left| \frac{gF}{U_A} \right|^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

dove:

- $U_A$  è il fattore di velocità del vento, dipendente in modo non lineare della velocità del vento misurata alla quota +10 m s.l.m.;
- $F$  è il fetch efficace relativo ad una prefissata direzione geografica.

Indicando con gli apici O e P rispettivamente le grandezze relative al punto di misura e al punto di trasposizione, fissata una direzione geografica (direzione media da cui spira il vento) alla quale risultano associati i fetch efficaci  $F_p$  e  $F_o$ , le precedenti relazioni permettono di stabilire la ricercata corrispondenza tra le altezze ed i periodi delle onde relative al punto O e al punto P per fissata direzione:

$$\frac{H_{mo}^P}{H_{mo}^O} = \left| \frac{F_p}{F_o} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\frac{T^P}{T_{mo}^O} = \left| \frac{F^P}{F^O} \right|^3 \quad (4)$$

dove si è ovviamente supposto che il fattore di velocità del vento sia lo stesso nei due punti in esame.

Di seguito si riportano i diagrammi dei coefficienti di trasposizione ottenuti per il paraglio in esame.

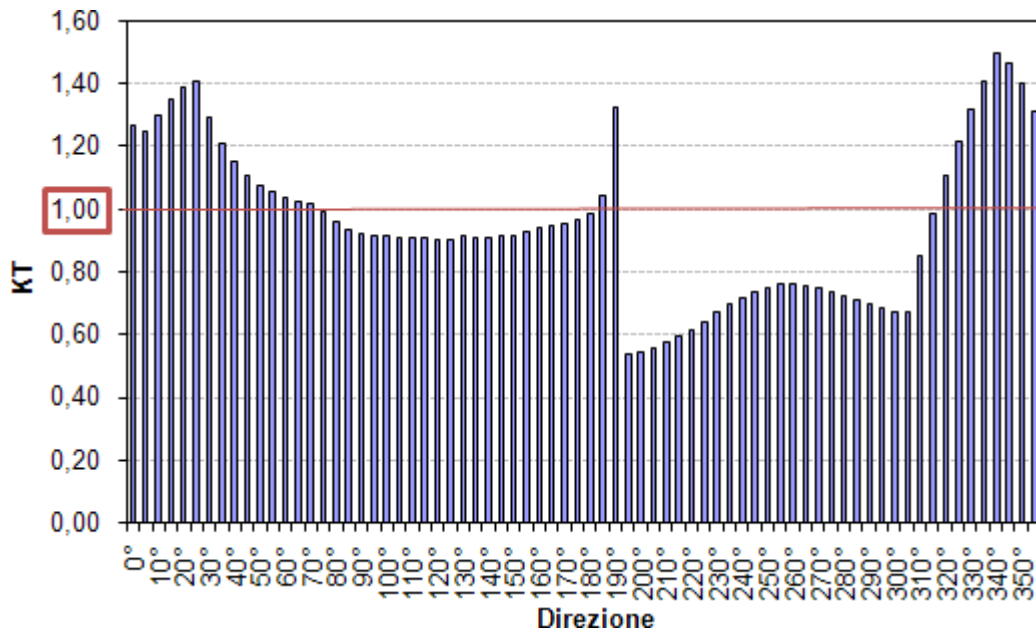


Figura 5.8. Coefficienti di trasposizione dei periodi

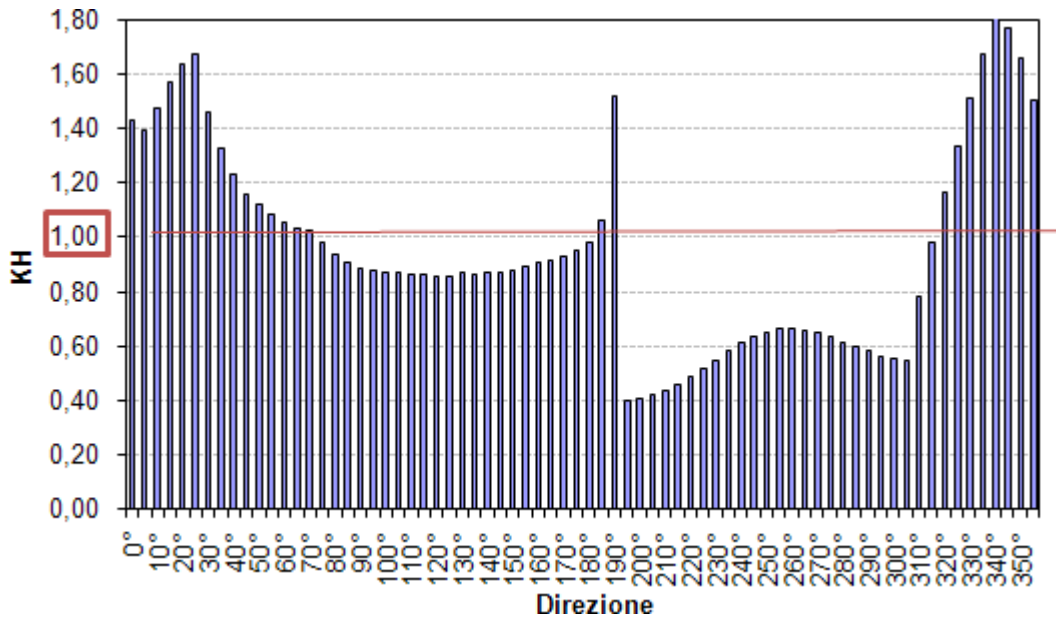


Figura 5.9. Coefficienti di trasposizione delle altezze d'onda

Si assume, in virtù dei coefficienti di trasposizione ottenuti, di amplificare i valori delle altezze onde significative ottenute per il sito di Catania tramite i relativi coefficienti di trasposizione, ottenendo così i valori delle altezze d'onde significative valevoli per le analisi da condurre per il sito di Siracusa.

Di seguito si riportano in funzione del parametro "direzione di attacco del moto ondoso ( $^{\circ}$ N)" i valori dei coefficienti di trasposizione delle altezze d'onda significative per il paraggio settore di traversia individuato (30-165 $^{\circ}$ N).

D( $^{\circ}$ N)	KH	KT
30	1.485	1.300
45	1.166	1.108
60	1.056	1.037
75	0.979	0.986
90	0.884	0.921
105	0.865	0.908
120	0.856	0.902
135	0.865	0.908
150	0.876	0.915
165	0.916	0.943

**Tabella 5.10. Coefficienti di trasposizione**

## 6. CLIMA D'ONDA A LARGO DEL PARAGGIO

Nel presente capitolo, mediante un'analisi statistica e la determinazione della probabilità di superamento per fissata direzione, sarà ricavata la distribuzione del clima d'onda caratteristico del sito strumentato di Catania, per poi effettuare la trasposizione nel sito di Siracusa tramite la metodologia esposta nel capitolo precedente.

### 6.1 PROBABILITA' DI SUPERAMENTO

Per effettuare le previsioni sui parametri ondosi è sufficiente conoscere  $P(H_s > h)$ , la probabilità di superamento (Boccotti, 2004): essa rappresenta la frazione di tempo in cui l'altezza significativa  $H_s$  si mantiene al di sopra di una certa soglia  $h$ , nella località in esame. Per cui diventa:

$$P(H_s > h) = \frac{1}{T} \sum_i \Delta t_i(h)$$

dove  $\Delta t_i(h)$  sono le durate di tempo in cui  $H_s$  è maggiore di  $h$  e  $T$  è il tempo totale.

Dalla definizione si capisce che per stimare la  $P(H_s > h)$  non è necessario analizzare una per una le mareggiate verificatesi nel periodo. Basta semplicemente contare il numero delle registrazioni in cui l'altezza significativa ha superato la soglia  $h$  assegnata e dividere il numero totale delle registrazioni. In estrema sintesi dalla tabella di occorrenza si ricava la frequenza cumulata per ogni classe di  $H_s$  e quindi si divide per il numero delle registrazioni.

### 6.2 DETERMINAZIONE DELLA FORMA ANALITICA DELLA PROBABILITA' DI SUPERAMENTO

Si è proceduto a determinare analiticamente la curva che meglio interpola i dati di probabilità di superamento omnidirezionale che direzionale.

Una curva che ben interpreta nel dominio dei valori di  $h$  la probabilità di superamento è quella di Weibull (Boccotti, 2004):

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

dove  $u$  e  $w$  sono i parametri della distribuzione e dipendono dalla località in esame.

Per rappresentare graficamente i dati si ricorre a variabili ausiliarie. In particolare nel caso in studio si è definito:

$$X = 100 \ln(2.5h)$$

$$Y = 100 \ln \ln \frac{1}{P}$$

Tali coppie di dati per fissata classe  $H_s$  si dispongono secondo una retta del tipo

$$Y = a + bX$$

Una volta individuati i valori dei parametri  $a$  e  $b$  della retta si possono ricavare direttamente i valori dei parametri  $u$  e  $w$  della  $P(H_s > h)$ , con le relazioni

$$u = b$$

e

$$w = \frac{1}{2.5} \exp\left(-\frac{a}{100b}\right)$$

Pertanto fissando  $T_R$  si ricava la relativa probabilità di superamento ( $P$ ) e quindi la  $H_s$  in quanto

$$H_s = w \left( \ln \frac{1}{P} \right)^{\frac{1}{u}}$$

Con considerazioni riportate in Boccotti (2004) è possibile effettuare una valutazione analitica anche della probabilità direzionale dell'altezza significativa, secondo la seguente espressione .

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

Si tratta della differenza tra due funzioni di Weibull in cui i parametri  $w_a$  e  $w_b$  dipendono dal settore direzionale in esame, mentre  $u$  è quello della probabilità omnidirezionale.

I parametri  $w_a$  e  $w_b$  devono essere maggiori di zero con

$$w > w_a > w_b.$$

Sul piano delle variabili ausiliari è rappresentata da una curva che si dispone parallela alla curva direzionale per le condizioni asintotiche  $X, Y$  tendente a  $+\infty$ .

Di seguito è descritto il procedimento per ricavare i valori di  $w_a$  e  $w_b$ .

Si fissano due punti sul piano delle variabili ausiliarie  $X_1, Y_1$  e  $X_2, Y_2$ , per cui si suppone debba passare la curva direzionale, in funzione dei dati di occorrenza direzionale: in particolare si individua l'interpolante per coppie  $X, Y$  dopo aver effettuato la trasformazione delle variabili  $h$  e  $P(H_s > h)$  per data direzione.

In particolare se si assume che  $h_1 < h_2$  e  $P_1 > P_2$  con:

$$P_1 = \exp\left[-\left(\frac{h_1}{w_\alpha}\right)^u\right] - \exp\left[-\left(\frac{h_1}{w_\beta}\right)^u\right]$$

$$P_2 = \exp\left[-\left(\frac{h_2}{w_\alpha}\right)^u\right] - \exp\left[-\left(\frac{h_2}{w_\beta}\right)^u\right]$$

e se si pone che

$$x' = \left[ \begin{array}{c} \left( \frac{1}{w_\alpha} \right) \\ \left( \frac{1}{w_\beta} \right) \end{array} \right]$$



e

$$y' = \left[ \begin{array}{c} 1 \\ w \\ u \\ \beta \end{array} \right]$$

Il sistema individuato dalle equazioni di  $P_1$  e  $P_2$  diventa un sistema di equazioni non lineari nelle incognite  $x'$  e  $y'$ .

Si introducono due nuove funzioni:

$$f_1(x) = \exp(-h_1 u x) \quad \text{per } x > 0$$

e

$$f_2(x) = P_1 + [\exp(-h_2 u x) - P_2]^{((h_1/h_2)u)} \quad \text{per } 0 < x < x_{\text{sup}}$$

in cui  $x_{\text{sup}}$  è il valore di  $x$  per cui l'argomento dentro la parentesi quadra dell'espressione di  $f_2(x)$  si annulla e cioè

$$x_{\text{sup}} = (1/h_2 u) \ln(1/P_2)$$

Si dimostra che il valore di  $x'$  detto  $x''$ , se esiste, che risolve il sistema di equazioni non lineari è quello per cui si verifica che:

$$f_1(x'') = f_2(x'')$$

A partire dal valore individuato di  $x''$  è possibile ricavare  $w_a$  e  $w_b$  tramite le seguenti espressioni:

$$w_a = \left[ \left( \frac{1}{x''} \right) \right]^{1/u}$$

e

$$w_b = h_1 \left[ \ln \left[ \exp \left( \frac{h_1^u}{w_a^u} \right) - P_1 \right] \right]^{-1/u}$$

Le condizioni da imporre per la verifica dell'esistenza della soluzione è che

$$f_2(0) > f_1(0)$$

Da questa condizione discende un'altra, di più immediata intuizione, che prevede che la retta congiungente i punti scelti abbia pendenza minore di  $u$  e cioè

$$\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} < u$$

### 6.3 PERIODI

Disponendo dei dati onda metrici, l'analisi dei periodi può compiersi con procedure statistiche di correlazione tra  $H_s$  e  $T_m$ , ovvero  $T_p$ .

E' stato dimostrato che le "onde di vento" tendono ad assumere una forma di spettro ben identificabile con forme matematiche. La forma su cui concordano molti autori è quella JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) che si riferisce al caso di alti fondali con valori caratteristici dei parametri in gioco.

E' dimostrabile che in tale spettro è estrapolabile un legame  $H_s-T_p$  che è rappresentato dalla forma seguente:

$$T_p = 8.5p(H_s/4g)^{1/2}$$

Sempre con considerazioni sullo spettro JONSWAPP medio si ottiene:

$$T_m = 0.78 T_p$$

#### 6.4 DURATA DELLE MAREGGIATE

---

In base all'analisi statistica sul campione di misure ondamiche disponibili è possibile determinare una forma che individui il valor medio della durata delle mareggiate di assegnata altezza significativa. Il procedimento originale che introduce il concetto delle "mareggiate triangolari equivalenti" (Boccotti, 2004) è quello che risulta maggiormente convincente per le calcolazioni in questione.

In particolare con il legame:

$$\bar{D}(h) = \frac{\bar{b}(h)}{1 + u \left(\frac{h}{W}\right)^u}$$

si identifica la "persistenza al di sopra della soglia".

In alcune fasi progettuali è necessario precisare la durata  $D$  dello stato di mare convenzionale di progetto. La durata  $D$  è ricavabile dalla suddetta persistenza tramite l'espressione seguente:

$$D = 2\bar{D}(h)$$

#### 6.5 CONCLUSIONI

---

Nella figure seguenti sono riportate le curve sul piano ausiliare X-Y, e quindi  $h - P(H_s > h)$ , ottenute con l'analisi omnidirezionale e direzionale per le fonti di dati utilizzate.

Viene inoltre riportata la curva della durata  $D$  dello stato del mare, utile per la determinazione di tale parametro in sede di determinazione della mareggiata convenzionale di progetto.

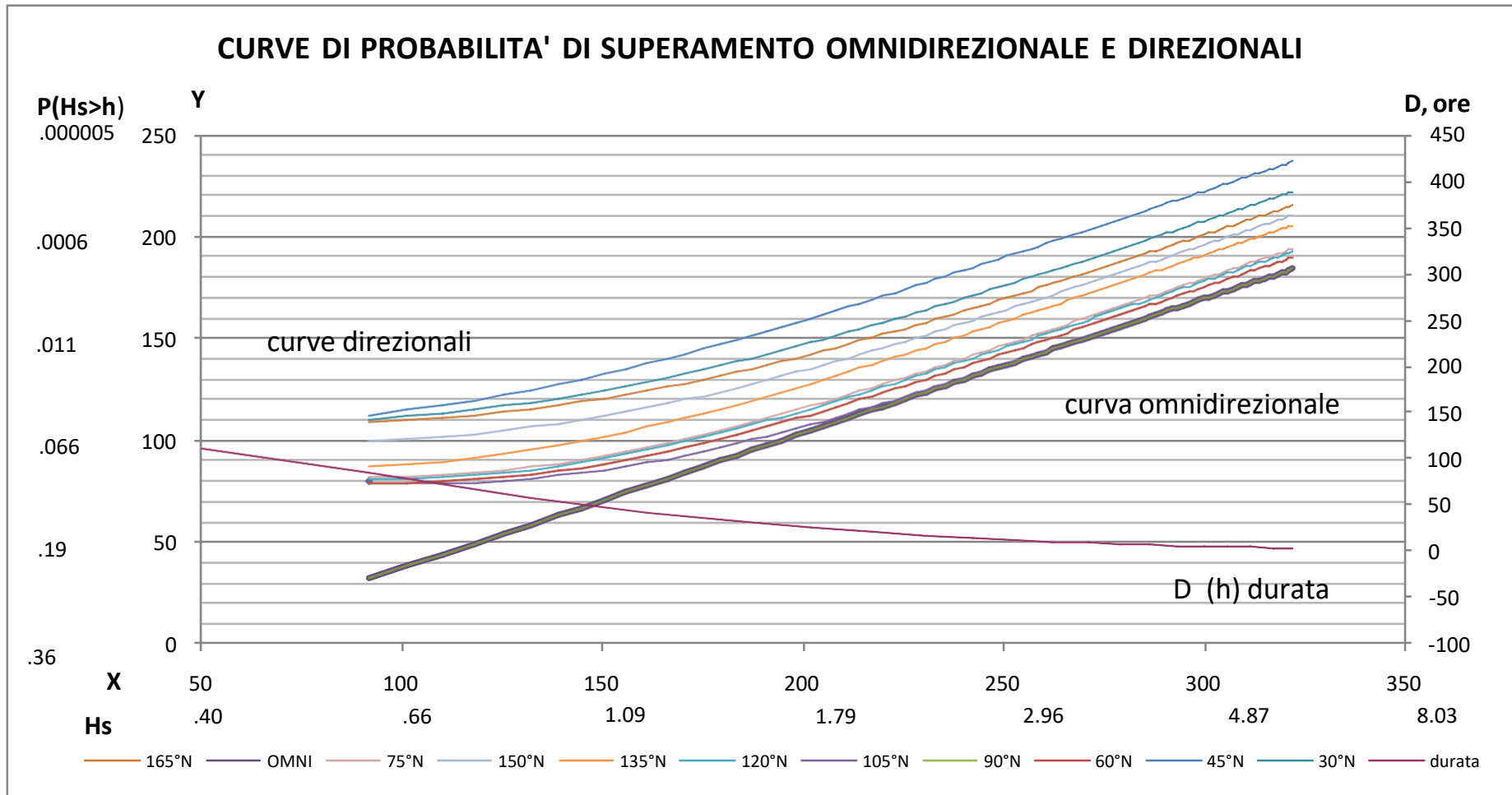


Figura 6.1. Analisi del Clima d'onda: curve di probabilità di superamento omnidirezionale e direzionali

L'esame delle curve evidenzia una buona correlazione sia per la distribuzione omnidirezionale, sia per le distribuzioni direzionali.

Tale dato di fatto implica che il clima d'onda del sito in studio è ben rappresentabile dall'analisi secondo il metodo di Boccotti usando i dati rilevati dalla boa R.O.N di Catania.

Di seguito si riporta sia la tabella di frequenza che il diagramma polare del clima d'onda del sito di Catania relativo al settore di traversia individuato.

°N	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	ALTRE DIR.	TOT
H (m)												
>10												
<=10												0
<=9.5												0
<=9												0
<=8.5												0
<=8												0
<=7.5												0
<=7						2					0	2
<=6.5						9	1				0	10
<=6				2	4	20	1				0	27
<=5.5				4	10	37	14				0	65
<=5				9	18	104	35		2		5	171
<=4.5				24	46	140	72	12	1	2	8	305
<=4	1	3	2	48	66	162	175	38	2	2	16	515
<=3.5	6	6	13	48	53	155	126	22	11	12	61	513
<=3	16	26	28	136	125	216	253	61	9	10	145	1025
<=2.5	56	126	147	373	341	531	450	201	54	53	485	2817
<=2	157	609	583	842	1108	1129	863	702	259	123	1410	7785
<=1.5	610	3065	3183	2616	2908	2785	2542	2516	1207	498	6256	28186
<=1	810	3225	3956	3181	3258	3017	3011	2884	1520	837	10701	36400
<=0.5	298	708	1378	1591	1641	1451	1313	962	519	347	4296	14504
TOT	1955	7768	9290	8874	9578	9758	8856	7398	3584	1884	23380	92325

°N	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	ALTRE DIR.	TOT
H (m)												
>10												
<=10												
<=9.5												
<=9												
<=8.5												
<=8												
<=7.5												
<=7						0.00%					0.00%	0.00%
<=6.5						0.01%	0.00%				0.00%	0.01%
<=6				0.00%	0.00%	0.02%	0.00%				0.00%	0.03%
<=5.5				0.00%	0.01%	0.04%	0.02%				0.00%	0.07%
<=5				0.01%	0.02%	0.11%	0.04%		0.00%		0.00%	0.19%
<=4.5				0.03%	0.05%	0.15%	0.08%	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.33%
<=4	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.07%	0.18%	0.19%	0.04%	0.00%	0.00%	0.02%	0.56%
<=3.5	0.01%	0.01%	0.01%	0.05%	0.06%	0.17%	0.14%	0.02%	0.01%	0.01%	0.05%	0.54%
<=3	0.02%	0.03%	0.03%	0.15%	0.14%	0.23%	0.27%	0.07%	0.01%	0.01%	0.12%	1.07%
<=2.5	0.06%	0.14%	0.16%	0.40%	0.37%	0.58%	0.49%	0.22%	0.06%	0.06%	0.41%	2.93%
<=2	0.17%	0.66%	0.63%	0.91%	1.20%	1.22%	0.93%	0.76%	0.28%	0.13%	1.17%	8.08%
<=1.5	0.66%	3.32%	3.45%	2.83%	3.15%	3.02%	2.75%	2.73%	1.31%	0.54%	5.54%	29.29%
<=1	0.88%	3.49%	4.28%	3.45%	3.53%	3.27%	3.26%	3.12%	1.65%	0.91%	9.87%	37.71%
<=0.5	0.32%	0.77%	1.49%	1.72%	1.78%	1.57%	1.42%	1.04%	0.56%	0.38%	3.94%	15.00%
TOT	2.12%	8.41%	10.06%	9.61%	10.37%	10.57%	9.59%	8.01%	3.88%	2.04%	21.12%	100.00%

Tabella 6.2. Tabelle di occorrenza del clima d'onda al largo di Catania per il settore 30°-165°N

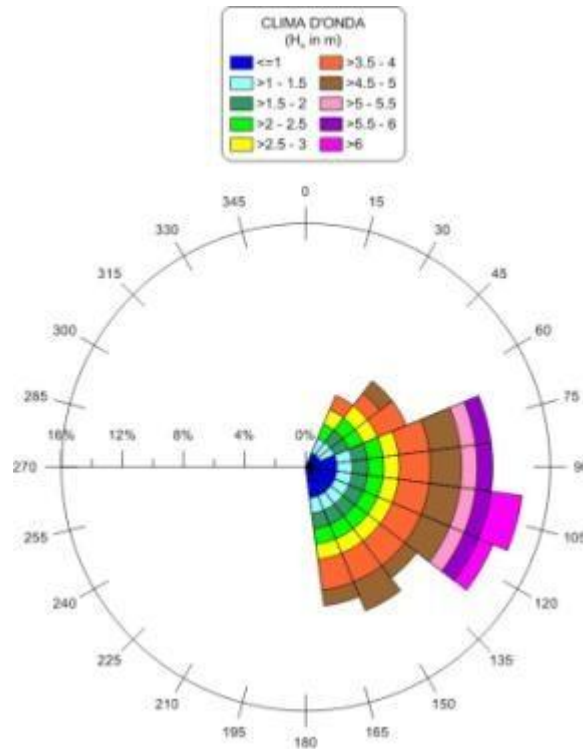


Figura 6.3. Clima d'onda al largo per il sito di Catania

A tal fine è possibile quindi estrapolare le soglie di altezza d'onda significativa delle mareggiate con date probabilità di superamento omnidirezionale, per il sito di Catania.

TEMPO "t"	U.m.	P(Hs>h)	H(m)
12	ore	0.0014	3.31
1	giorno	0.0027	3.10
2	gg	0.0055	2.88
5	gg	0.0137	2.58
30	gg	0.0822	1.88
1	mese	0.0833	1.88
3	mesi	0.25	1.34
6	mesi	0.5	0.89
9	mesi	0.75	0.54

Tabella 6.4. Onde caratteristiche del clima omnidirezionale per il sito di Catania

In modo analogo, applicando la distribuzione di Weibull di volta in volta ad ogni popolazione dei dati di altezza d'onda relativa ad ogni direzione di provenienza, è stato possibile determinare il clima d'onda per il paraggio in esame per ogni direzione di attacco.

In particolare si riportano le caratteristiche d'onda per la probabilità di superamento  $P(H_s > h) = 5 \text{ gg/anno}$  e  $P(H_s > h) = 12 \text{ h/anno}$ .

D (°N)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (sec)
30	2.45	6.67
45	2.32	6.49
60	2.28	6.43
75	3.23	7.66
90	3.41	7.87
105	4.22	8.76
120	3.69	8.19
135	2.80	7.14
150	2.64	6.93
165	2.65	6.94

**Tabella 6.5. Onde caratteristiche del clima direzionale per il sito di Catania associato alla probabilità di superamento  $P(H_s > h) = 5$  gg/anno**

D (°N)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (sec)
30	3.06	7.45
45	2.80	7.13
60	2.81	7.15
75	4.31	8.85
90	4.57	9.11
105	5.75	10.22
120	4.92	9.45
135	3.35	7.80
150	3.38	7.84
165	3.44	7.91

**Tabella 6.6. Onde caratteristiche del clima direzionale per il sito di Catania associato alla probabilità di superamento  $P(H_s > h) = 12$  h/anno**

Si è quindi proceduto alla trasposizione delle caratteristiche principali del clima d'onda dal sito di Catania a Siracusa, secondo la metodologia indicata nel capitolo precedente.

Di seguito si riportano le tabelle di occorrenza e il diagramma polare relativo al clima d'onda per il sito di Siracusa.

°N	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	ALTRE D.	TOT
H												
>10												
<=10												
<=9.5												
<=9												
<=8.5												
<=8											1	1
<=7.5											0	0
<=7											1	1
<=6.5						2					5	7
<=6	1			2		9	1				3	16
<=5.5	6			4	4	20	1				18	53
<=5		3		9	10	37	14				23	96
<=4.5	16	6	2	24	18	104	35		2	2	37	246
<=4	56		13	48	112	140	72	12	3	2	228	686
<=3.5		26	28	48	53	317	175	60	11	12	232	962
<=3	157	126	147	136	125	216	379	61	9	10	471	1837
<=2.5	610	609	583	373	341	531	450	201	54	53	1268	5073
<=2		3065	3183	842	1108	1129	863	702	259	123	2697	13971
<=1.5	810	3225	3956	2616	2908	2785	2542	2516	1207	498	1900	24963
<=1	298	708	1378	3181	3258	3017	3011	2884	1520	837	12359	32451
<=0.5				1591	1641	1451	1313	962	519	347	4138	11962
TOT	1954	7768	9290	8874	9578	9758	8856	7398	3584	1884	23381	92325

°N	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	ALTRE D.	TOT
H												
>10												
<=10												
<=9.5												
<=9												
<=8.5												
<=8											0.00%	0.00%
<=7.5											0.00%	0.00%
<=7											0.00%	0.00%
<=6.5						0.00%					0.01%	0.01%
<=6	0.00%			0.00%		0.01%	0.00%				0.00%	0.02%
<=5.5	0.01%			0.00%	0.00%	0.02%	0.00%				0.02%	0.06%
<=5		0.00%		0.01%	0.01%	0.04%	0.02%				0.02%	0.10%
<=4.5	0.02%	0.01%	0.00%	0.03%	0.02%	0.11%	0.04%		0.00%	0.00%	0.04%	0.27%
<=4	0.06%		0.01%	0.05%	0.12%	0.15%	0.08%	0.01%	0.00%	0.00%	0.25%	0.74%
<=3.5		0.03%	0.03%	0.05%	0.06%	0.34%	0.19%	0.06%	0.01%	0.01%	0.25%	1.04%
<=3	0.17%	0.14%	0.16%	0.15%	0.14%	0.23%	0.41%	0.07%	0.01%	0.01%	0.51%	1.99%
<=2.5	0.66%	0.66%	0.63%	0.40%	0.37%	0.58%	0.49%	0.22%	0.06%	0.06%	1.37%	5.49%
<=2		3.32%	3.45%	0.91%	1.20%	1.22%	0.93%	0.76%	0.28%	0.13%	2.92%	15.13%
<=1.5	0.88%	3.49%	4.28%	2.83%	3.15%	3.02%	2.75%	2.73%	1.31%	0.54%	2.06%	27.04%
<=1	0.32%	0.77%	1.49%	3.45%	3.53%	3.27%	3.26%	3.12%	1.65%	0.91%	13.39%	35.15%
<=0.5				1.72%	1.78%	1.57%	1.42%	1.04%	0.56%	0.38%	4.48%	12.96%
TOT	2.12%	8.41%	10.06%	9.61%	10.37%	10.57%	9.59%	8.01%	3.88%	2.04%	25.32%	100.00%

**Tabella 6.7. Tabelle di occorrenza del clima d'onda al largo di Siracusa per il settore 30°-165°N**

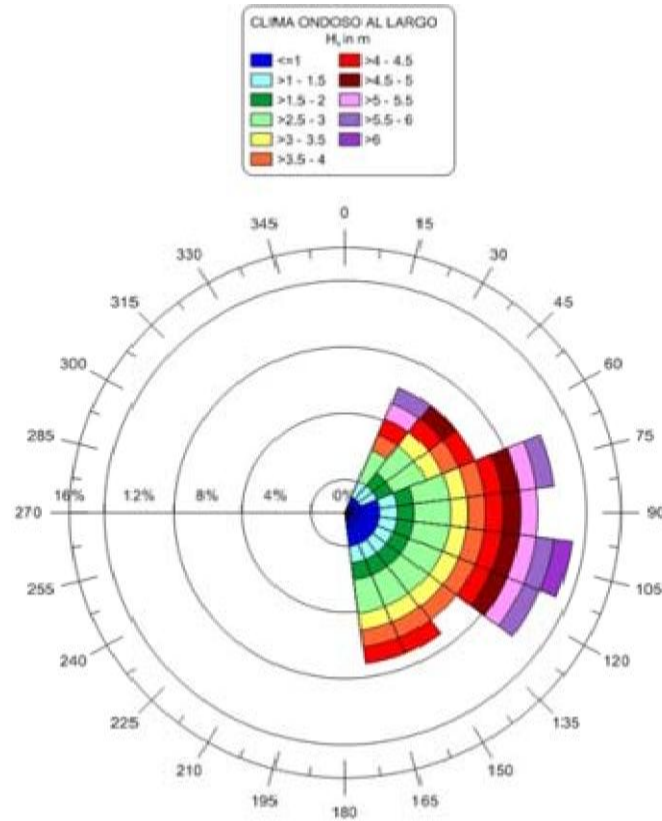


Figura 6.8. Clima d'onda al largo per il sito di Siracusa

A tal fine è possibile quindi estrapolare le soglie di altezza d'onda significativa delle mareggiate con fissata probabilità di superamento omnidirezionale, per il sito di Siracusa, utili per specifici casi di studio o di progetto.

TEMPO "t"	U.m.	P(Hs>h)	H(m)
12	ore	0,0014	4,98
1	giorno	0,0027	4,16
2	gg	0,0055	3,81
5	gg	0,0137	3,65
30	gg	0,0822	2,30
1	mese	0,0833	2,29
3	mesi	0,25	1,53
6	mesi	0,5	0,95
9	mesi	0,75	0,52

Tabella 6.9. Onde caratteristiche del clima omnidirezionale per il sito di Siracusa

Ai fini delle successive applicazioni ingegneristiche, che saranno analizzate e descritte nelle successive sezioni di questo studio, si riportano le caratteristiche d'onda per la probabilità di superamento  $P(H_s > h) = 5$  gg/anno e  $P(H_s > h) = 12$ h/anno.



D (°N)	Hs (m)	Tp (sec)
30	3.63	8.13
45	2.70	7.01
60	2.40	6.61
75	3.16	7.58
90	3.01	7.40
105	3.65	8.15
120	3.16	7.58
135	2.42	6.64
150	2.12	6.21
165	2.43	6.64

**Tabella 6.10. Onde caratteristiche del clima direzionale per il sito di Siracusa associato alla probabilità di superamento  $P(H_S > h) = 5$  gg/anno**

D (°N)	Hs (m)	Tp (sec)
30	4.54	9.08
45	3.26	7.70
60	2.97	7.35
75	4.22	8.75
90	4.04	8.57
105	4.98	9.51
120	4.21	8.74
135	2.89	7.25
150	2.96	7.34
165	3.15	7.57

**Tabella 6.11. Onde caratteristiche del clima direzionale per il sito di Siracusa associato alla probabilità di superamento  $P(H_S > h) = 12$  h/anno**

## 7. EVENTI ESTREMI A LARGO DEL PARAGGIO

---

L'analisi degli eventi estremi è fondamentale nell'ingegneria marittima per tutte le operazioni di calcolo relative al dimensionamento delle opere.

Il tempo di ritorno di progetto è stato determinato secondo la metodologia descritta nell'elaborato "STR.01", a cui si rimanda. Esso è stato fissato pari a 100 anni.

E' nota l'indisponibilità di serie storiche di stati ondosi affidabili e congrue per l'analisi di eventi estremi con elevati tempi di ritorno.

Il ricorso alla generazione degli stati del mare a partire da dati del vento, talvolta effettuato da alcuni autori, sconta difatti notevoli indeterminazioni, incertezze ed errori che hanno qualche volta comportato l'eccessiva sovrastima delle reali condizioni meteomarine locali.

Si preferisce allora verificare le risultanze con più sistemi di rilevamento e modellazione attuali, determinare l'affidabilità dei risultati e scegliere di conseguenza in via cautelativa.

Nei prossimi paragrafi viene descritta la metodologia utilizzata per la determinazione della distribuzione statistica degli eventi estremi con il grado di correlazione ottimale con i dati delle serie storiche disponibili.

### 7.1 DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI SECONDO BOCCOTTI

---

In questo paragrafo è stata effettuata la ricerca degli eventi estremi secondo il metodo di Boccotti (2004) al fine di valutare quale sia la distribuzione statistica migliore da applicare al dataset di dati ondometrici disponibili per l'estrapolazione degli eventi estremi.

Si dimostra che il periodo di ritorno  $R$  è legato alla probabilità di superamento omnidirezionale dell'altezza significativa  $P(H_s > h)$  tramite l'espressione seguente (Boccotti, 2004):

$$R(H_s > h) = \frac{b(h)}{1 + u \left( \frac{h}{w} \right)^u} \exp \left( \frac{h}{w} \right)^u$$

La soglia significativa  $h(R)$  che viene superata dall'altezza significativa con assegnato periodo di ritorno  $R$  può essere ricavata dal diagramma  $R(h)$  di seguito riportato.



Figura 7.1. Diagramma R(h) ottenuto dall'analisi omnidirezionale dei dati relativi alla boa R.O.N. di Catania

Per effettuare l'analisi direzionale degli eventi estremi si è utilizzato l'approccio di Scarsi (1992) in accordo con la teoria di Boccotti.

Secondo questa teoria, la previsione temporale direzionale del periodo di ritorno R in funzione dell'altezza d'onda significativa massima segue la seguente legge:

$$R(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2) = \frac{b(h)}{1 + u \left[ \frac{\left( \frac{h}{w} \right)^u}{\left( \frac{h}{a} \right)} - \left[ \frac{\left( \frac{h}{w} \right)^u}{\left( \frac{h}{b} \right)} + u \frac{\left( \frac{h}{w} \right)^u}{\left( \frac{h}{a} \right)} * \exp \left( \frac{-h}{w} \right) \right] \left[ \frac{-h}{a} \right]} \exp \left( \frac{h}{w} \right)^u$$

Tali curve R (h) al variare di  $\theta$  sono rappresentabili sul piano XY e su tali diagrammi entrando con R, è possibile leggere il valore  $H_s (R)$  corrispondente.

Di seguito sono riportati i valori di  $H_s$  e del relativo  $T_p$  in funzione della direzione (in °N) e del periodo di ritorno R, ottenuti per il sito di Catania.

D (°N)	30		45		60		75		90	
R (anni)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)
2	2.61	6.89	2.25	6.39	2.58	6.85	3.71	8.21	3.94	8.46
5	2.80	7.14	2.38	6.58	2.77	7.09	4.08	8.61	4.35	8.89
10	2.95	7.32	2.48	6.71	2.91	7.27	4.36	8.90	4.66	9.20
20	3.09	7.49	2.58	6.85	3.05	7.45	4.64	9.18	4.97	9.50
30	3.17	7.59	2.64	6.93	3.13	7.55	4.80	9.34	5.15	9.67
50	3.28	7.72	2.72	7.02	3.24	7.67	5.01	9.54	5.38	9.89
70	3.35	7.80	2.76	7.09	3.31	7.75	5.14	9.67	5.53	10.02
100	3.42	7.88	2.82	7.15	3.38	7.84	5.29	9.80	5.69	10.17

D (°N)	105		120		135		150		165	
R (anni)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)
2	4.31	8.85	3.78	8.29	3.17	7.59	2.99	7.38	2.83	7.17
5	4.79	9.33	4.16	8.69	3.45	7.92	3.24	7.68	3.05	7.45
10	5.14	9.67	4.45	8.99	3.66	8.16	3.43	7.89	3.22	7.65
20	5.50	10.00	4.74	9.28	3.87	8.39	3.62	8.11	3.39	7.84
30	5.71	10.19	4.91	9.44	3.99	8.52	3.73	8.23	3.48	7.96
50	5.97	10.42	5.12	9.64	4.15	8.68	3.86	8.38	3.61	8.10
70	6.15	10.57	5.26	9.78	4.25	8.79	3.96	8.48	3.69	8.19
100	6.33	10.73	5.41	9.91	4.36	8.90	4.05	8.58	3.77	8.28

**Tabella 7.2.** Tabella riepilogativa dei dati di  $H_s$  e  $T_p$  in funzione di  $R$  e della direzione (in °N) ottenuti dall'analisi direzionale delle onde estreme per il sito di Catania

## 7.2 DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI TRAMITE IL SOFTWARE ACES

In questo paragrafo è stata effettuata la previsione degli eventi estremi con i metodi statistici implementati nel codice ACES, prodotto dal C.H.L. dell'USACE, al fine di valutare quale sia la distribuzione statistica migliore da applicare al dataset di dati ondometrici disponibili per l'estrapolazione degli eventi estremi.

L'approccio del codice ACES prevede l'uso, per ogni anno, del valore massimo dell'altezze significative registrate.

Le funzione di probabilità implementata dal software (in accordo per altro con la teoria di Goda) è la distribuzione di Weibull:

$$F(H_s < h) = 1 - \exp_s - \exp[-(h-B)/A]_t^k$$

in cui

- $F(H_s < h)$  è la probabilità di non superamento;
- $H_s$  è l'altezza significativa;
- $h$  è il valore di soglia,
- $A, B, K$  sono il parametro di taglia, di scala e di forma della distribuzione.

I parametri  $A$  e  $B$  sono stimati a partire dai dati della popolazione applicando una regressione di tipo lineare.

Il legame tra l'altezza significativa  $H_s$  e il corrispondente tempo di ritorno  $R$  è dato dalla relazione lineare

$$H_s = A' y + B'$$

In cui:

- $y$  è la variabile ridotta
- $A'$  e  $B'$  sono i due parametri caratteristici della relazione.
- $y$  segue la seguente espressione:

$$y = [\ln(LR)]^{1/c}$$

in cui  $LR$  è il numero medio degli eventi per anno  $N_t/c$  e  $c$  l'ampiezza dell'intervallo di registrazione degli eventi.

La determinazione del grado di incertezza delle previsioni viene stimata tramite la determinazione del livello di confidenza.

In particolare l'approccio usato è quello di Gumbell (1958) e di Goda (1988) in cui la metodologia prevede il calcolo della deviazione standard "normalizzata" :

$$s_{nr} = (1/N^{0.5}) [1.0 + a(y - d + f \ln v)^2]^{1/2}$$

in cui :

- $s_{nr}$  è la deviazione standard normalizzata dell'altezza significativa con il tempo di ritorno  $R$ ;
- $N$  è il numero di eventi;
- $a$  è una funzione che vale  $a = a_1 \exp(a_2 N^{(-1.3)} + g [(-\ln q)^{0.5}]$ .

In particolare:

- $a_1, a_2, d, f, g$  sono parametri empirici che dipendono dal valore del parametro  $K$  della funzione di Weibull.
- $Q$  è il rapporto  $N/N_t$ .

L'errore standard dell'altezza significativa  $s_r$  segue la seguente formulazione:

$$s_r = s_{nr} s_h$$

in cui  $s_h$  è la deviazione standard del data set immesso.

Gli intervalli di confidenza sono calcolati assumendo che le altezze significative stimate seguono una distribuzione di tipo normale.

L'ampiezza della larghezza dell'intervallo di confidenza dipende dal coefficiente di amplificazione di  $s_r$  e quindi dai fattori  $N$  ed  $N/N_t$ .

La scelta della migliore distribuzione viene determinata applicando il metodo dei minimi quadrati agli scarti dei residui.

Si impone praticamente di scegliere la distribuzione per cui sia minima la seguente relazione:

$$S_n = [(H_{sm} - A'' y_m + B'')]^2$$

Per il data set disponibile per il sito di Catania si sono ottenuti le seguenti altezze significative massime annuali:

ANNO	H <sub>s, max</sub> (m)
1989	4.90
1990	4.50
1991	5.20
1992	5.80
1993	4.60
1994	4.80
1995	4.80
1996	6.20
1997	3.70
1998	4.80
1999	3.24
2000	3.29
2001	3.33
2002	3.50
2003	4.20
2004	3.41
2005	5.00
2006	1.72

Tabella 7.3. Prospetto riepilogativo dei dati di H<sub>s,max</sub> annuali ottenuti per le serie storiche relative al sito di Catania.

L'applicazione delle metodologie ACES ha condotto alle previsioni riportate nella tabella presente.

	Weibull Distribution				
	FT-1	k=0.75	k=1.00	k=1.40	k=2.0
<b>Correlation:</b>	<b>0.97</b>	<b>0.91</b>	<b>0.95</b>	<b>0.98</b>	<b>0.98</b>
<b>Sum square of residuals:</b>	<b>0.08</b>	<b>0.42</b>	<b>0.25</b>	<b>0.08</b>	<b>0.06</b>
<b>Return Period (Yr)</b>	<b>H<sub>s</sub>(m)</b>	<b>H<sub>s</sub>(m)</b>	<b>H<sub>s</sub>(m)</b>	<b>H<sub>s</sub>(m)</b>	<b>H<sub>s</sub>(m)</b>
<b>2</b>	<b>4.22</b>	<b>4.02</b>	<b>4.06</b>	<b>4.15</b>	<b>4.25</b>
<b>5</b>	<b>5.08</b>	<b>4.78</b>	<b>4.95</b>	<b>5.08</b>	<b>5.15</b>
<b>10</b>	<b>5.65</b>	<b>5.48</b>	<b>5.62</b>	<b>5.69</b>	<b>5.67</b>
<b>25</b>	<b>6.37</b>	<b>6.50</b>	<b>6.51</b>	<b>6.41</b>	<b>6.25</b>
<b>50</b>	<b>6.90</b>	<b>7.35</b>	<b>7.18</b>	<b>6.91</b>	<b>6.63</b>
<b>73</b>	<b>7.19</b>	<b>7.84</b>	<b>7.55</b>	<b>7.18</b>	<b>6.82</b>
<b>100</b>	<b>7.43</b>	<b>8.25</b>	<b>7.86</b>	<b>7.39</b>	<b>6.98</b>

Tabella 7.4. Previsione di H<sub>s</sub> in funzione del tempo di ritorno, ottenute applicando le distribuzioni FT-1 e di Weibull per il sito di Catania.

### 7.3 CONCLUSIONI SULLA DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI

Di seguito si riportano i plot delle previsioni statistiche effettuate, compresa quella per la determinazione degli eventi estremi effettuata con il metodo di Boccotti (cfr. paragrafo 7.1).

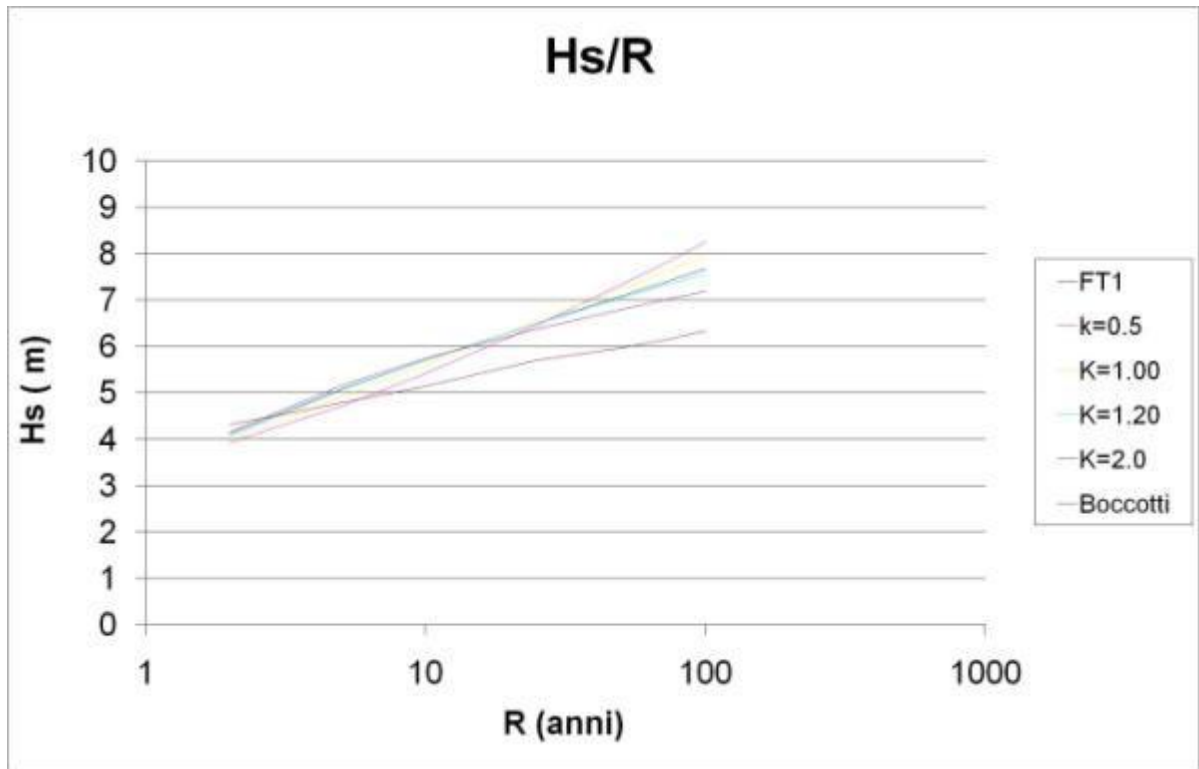


Figura 7.5. Diagramma delle previsioni di  $H_s$  in funzione del tempo di ritorno  $R$ , ottenute applicando le distribuzioni FT-1, di Weibull e di Boccotti

L'adattabilità di una determinata distribuzione alla serie è stata effettuata verificando i valori dei parametri statistici  $R^2$  e SQM, di seguito riportati.

DISTRIBUZIONE	$R^2$	SQM (m)
FT1	0,94	0,12
W k=0.75	0,82	0,54
W k=1.00	0,88	0,26
W k=1.40	0,92	0,12
W k=2.00	0,95	0,08
BOCCOTTI	0,94	0,12

Tabella 7.6. Tabelle riepilogativa dei parametri statistici  $R^2$  e SQM.

Si osserva che la distribuzione che meglio si adatta ai dati è la distribuzione di Weibull con  $K=2$  in quanto ha il coefficiente di correlazione  $R^2$  più elevato.

Inoltre a parità di  $R^2$ , sarebbe stata scelta la distribuzione con SQM minore.

Di seguito si riporta il diagramma di previsione delle altezze significative  $H_s$  al variare del tempo di ritorno, ottenuto applicando la distribuzione di Weibull con  $K=2$

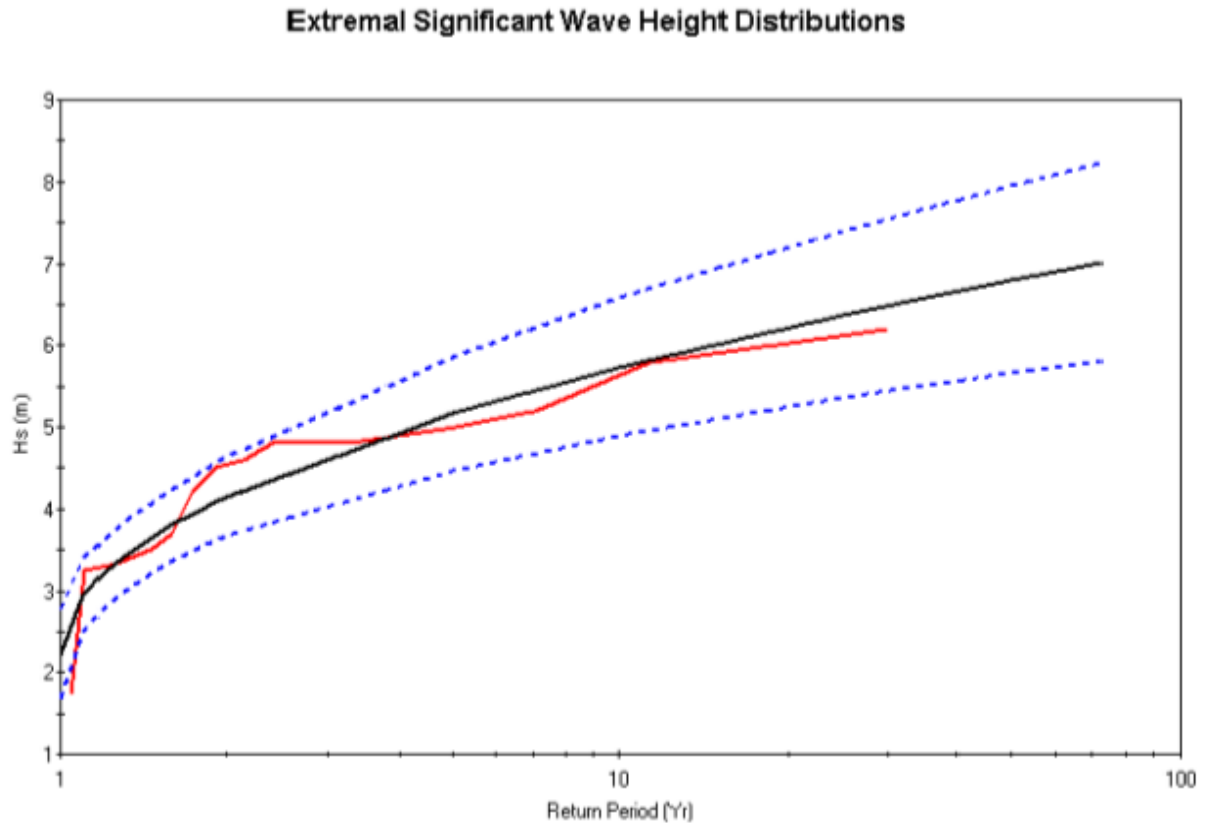


Figura 7.7. Diagramma delle previsioni di  $H_s$  in funzione del tempo di ritorno  $R$ , ottenute applicando le distribuzioni di Weibull, con  $K=2$ .

Si osserva che tali dati sono inoltre compatibili con le elaborazioni eseguite dall'A.P.A.T. sui dati della boa R.O.N. di Catania fino al 2001 in seno alla redazione dell' "Atlante delle onde dei mari italiani", a cui si rimanda.

La distribuzione di Weibull è stata applicata anche per l'analisi direzionale applicando dei filtri alle serie storiche ai fini di identificare i dati relativi ad un determinato settore di provenienza.

Infine, applicando i coefficienti di trasposizione determinati nel capitolo 5, è stato ottenuto il seguente prospetto degli eventi estremi direzionali previsti per Siracusa.

Hs (m) - ANALISI DIREZIONALE DEGLI EVENTI ESTREMI - SIRACUSA										
R (anni)	30°N	45°N	60°N	75°N	90°N	105°N	120°N	135°N	150°N	165°N
2	2,35	2,86	2,74	2,90	3,18	2,92	2,17	1,51	0,84	1,08
5	3,28	4,37	3,90	3,94	4,15	3,96	3,00	2,27	1,36	1,95
10	3,82	5,25	4,56	4,53	4,70	4,69	3,47	2,72	1,66	2,45
25	4,41	6,21	5,31	5,19	5,31	5,40	4,00	3,20	1,99	2,99
50	4,81	6,86	5,80	5,63	5,73	5,87	4,34	3,52	2,21	3,36
73	5,00	7,18	6,05	5,85	5,93	6,12	4,52	3,68	2,31	3,55
100	5,17	7,45	6,25	6,03	6,10	6,31	4,66	3,82	2,41	3,70

Tabella 7.8. Prospetto riepilogativo dei dati di altezze d'onda significativa al variare del tempo di ritorno  $R$ , ottenuta in seno all'analisi direzionale degli eventi estremi, valevoli per il sito di Siracusa



## 7.4 ULTERIORI INDAGINI PER LA VALUTAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO PER IL PARAGGIO DI SIRACUSA

A completamento delle valutazioni statistiche degli eventi estremi al largo di Siracusa, i valori determinati nel paragrafo precedente (cfr. tabella 7.6) sono stati confrontati con quelli ottenuti:

- includendo nel dataset della boa R.O.N. di Catania i dati relativi all'anno 2010, non ancora validati
- utilizzando il dataset ondametrico elaborato durante la redazione del progetto MedAtlas.

L'elaborazione statistica con la distribuzione di Weibull con  $K=2$ , del dataset di dati ondametrici della boa R.O.N. di Catania, includendo i dati relativi all'anno 2010 (che come già specificato in precedenza non sono ancora validati dall'I.S.P.R.A.), ha restituito valori di eventi estremi che, trasportati in modo opportuno per il paraggio di Siracusa (cfr. capitolo 5), al variare del tempo di ritorno e della direzione di provenienza, sono leggermente inferiori e comunque conformi ai valori ottenuti a partire dalla base dati 1989-2006.

Hs (m) - ANALISI DIREZIONALE DEGLI EVENTI ESTREMI - SIRACUSA - DATI FINO AL 2010										
R (anni)	30°N	45°N	60°N	75°N	90°N	105°N	120°N	135°N	150°N	165°N
2	2.26	2.73	3.02	2.93	3.17	2.98	2.03	1.52	0.82	1.08
5	3.24	4.29	4.19	3.94	4.11	4.07	3.18	2.27	1.38	1.92
10	3.79	5.19	4.85	4.51	4.65	4.70	3.84	2.71	1.71	2.41
25	4.41	6.18	5.60	5.15	5.25	5.40	4.57	3.18	2.08	2.95
50	4.81	6.83	6.08	5.58	5.65	5.86	5.06	3.50	2.31	3.30
73	4.95	7.17	6.34	5.80	5.85	6.10	5.31	3.67	2.44	3.48
100	5.20	7.44	6.54	5.96	6.01	6.29	5.50	3.79	2.53	3.63

**Tabella 7.9.** Valutazione degli eventi estremi al largo di Siracusa, includendo nel dataset dei dati della boa R.O.N. di Catania i dati relativi all'anno 2010, ancora non validati e sottoponendo il dataset a trasposizione.

Inoltre è stata utilizzata la fonte di dati "MedAtlas", elaborata durante la redazione del progetto omonimo nel periodo 2003-2004.

Tramite alcune elaborazioni numeriche, a partire da dati di tipo ondametrico, sia anemologico e satellitare, fornite dai vari enti partecipanti al progetto, è stato possibile ricostruire delle tabelle di frequenza di occorrenza  $H_s/T_p$ ,  $H_s/dir$ ,  $W_v/T_p$  e  $W_v/dir$  per ogni nodo della mesh in cui è stato suddiviso il bacino del Mar Mediterraneo.

Per ulteriori informazioni si rimanda al report scientifico RTP10.10/TR/IE's/04 del 14/04/2004.

Il nodo più prossimo per il sito di interesse è il nodo con coordinate 37°N - 16°E.

Nella figura successiva è riportata la localizzazione del punto di calcolo ritenuto idoneo.



Figura 7.10. Localizzazione del punto MEDATLAS (coordinate 37°N, 16°E)

Nella tabella successiva sono riportate le occorrenze  $H_s/dir$  per il sito MedAtlas scelto.

th wave-hs	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	Total	
9.00 - 10.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.50 - 9.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.00 - 7.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.00 - 6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.00 - 5.00	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
3.50 - 4.00	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
3.00 - 3.50	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	8
2.50 - 3.00	0	0	1	1	1	0	1	1	2	1	2	2	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	18
2.00 - 2.50	0	1	2	2	1	1	1	1	2	2	4	3	2	1	2	2	4	3	2	1	0	0	0	1	1	39
1.75 - 2.00	1	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	2	1	1	2	2	3	1	1	0	0	0	0	1	29
1.50 - 1.75	0	1	2	2	0	1	1	2	2	2	4	4	3	3	2	3	4	4	2	1	1	1	1	0	0	45
1.25 - 1.50	1	2	3	4	1	1	2	3	2	2	6	6	6	3	3	6	6	6	2	2	2	1	1	1	1	69
1.00 - 1.25	1	2	5	6	3	2	2	4	5	5	6	8	8	6	5	5	6	6	4	3	1	2	1	2	98	
0.75 - 1.00	2	4	8	10	6	4	4	4	4	5	9	11	12	10	7	8	10	7	4	4	2	2	3	5	145	
0.50 - 0.75	3	8	16	15	7	6	5	3	6	6	8	12	16	13	11	13	13	8	6	4	3	4	5	9	200	
0.25 - 0.50	6	12	20	24	7	7	7	6	6	5	8	10	16	11	12	17	17	8	5	6	4	5	8	13	240	
0.00 - 0.25	2	6	10	8	6	2	2	2	1	2	3	3	5	4	5	6	5	2	1	0	2	1	2	2	82	
total	16	51	69	74	33	25	26	30	32	34	55	63	70	53	49	60	68	48	28	22	15	16	21	35	978	

Tabella 7.11. Tabella occorrenza H/Dir, relativa al punto MEDATLAS.

Attraverso la metodologia descritta al capitolo 5, è stata verificata l'adattabilità del campo di generazione ondosa del sito di misura rispetto al sito di interesse.

Di seguito si riportano i diagrammi di sovrapposizione dei fetch geografici ed efficaci dei due siti in studio, da cui si evince la assoluta adattabilità dei campi di generazione ondosa tra i siti per il settore di traversia individuato (30-165°N)

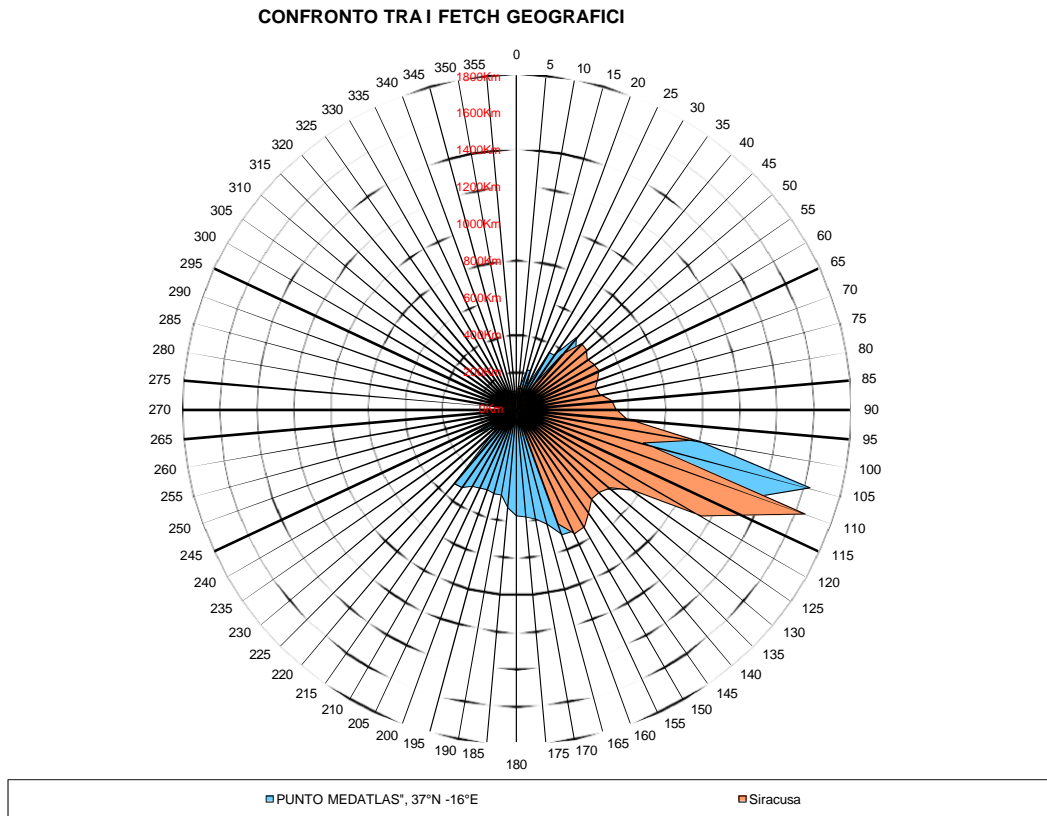


Figura 7.12. Confronto tra i fetch geografici del sito MEDATLAS e del sito di Siracusa

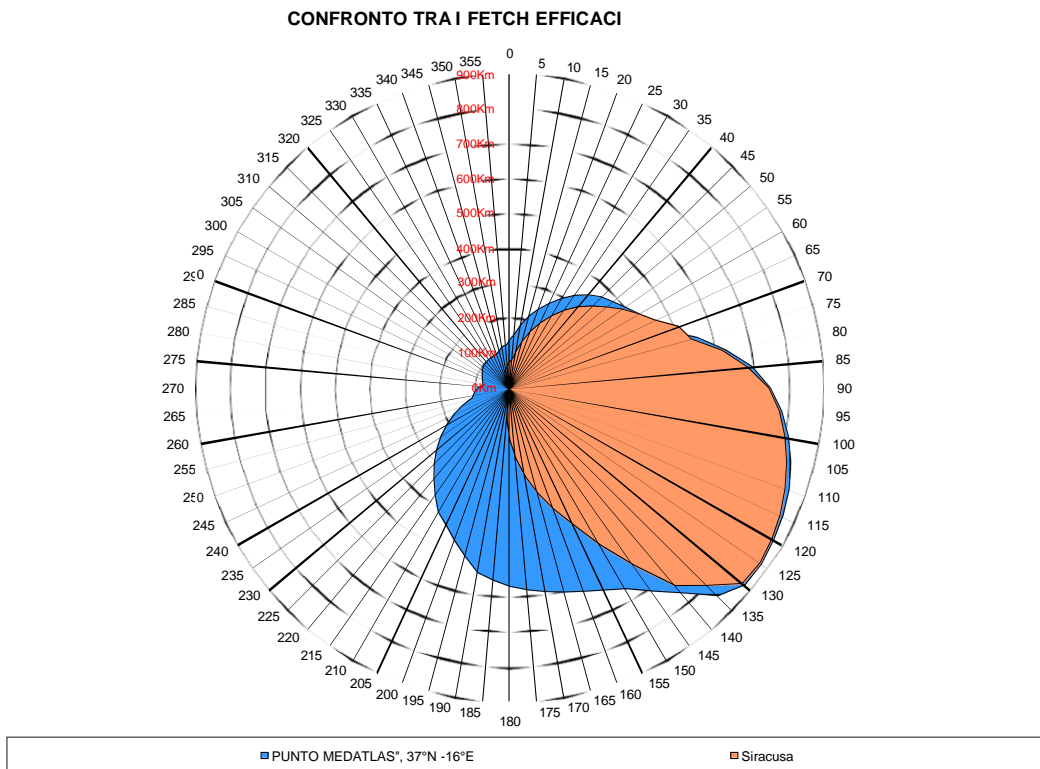


Figura 7.13. Confronto tra i fetch efficaci del sito MEDATLAS e del sito di Siracusa

All'interno del settore di traversia individuato (30°N-165°N), i diagrammi sono completamente sovrapponibili, ovvero i due paraggi sottendono praticamente lo stesso campo di generazione ondosa, con minime differenze nelle distanze di mare libero, che ne consentono la trasposizione.

A seguito di queste osservazioni, appare fisicamente verosimile l'uso dei dati ondometrici del punto di rilevamento MEDATLAS per la valutazione degli eventi estremi al largo del paraggio del porto di Siracusa e quindi risulta ragionevole applicare il metodo di trasposizione utilizzato nel capitolo 5.

Di seguito si riportano la tabella di riepilogo dei coefficienti di trasposizione e i diagrammi dei coefficienti di trasposizione ottenuti per il paraggio in esame.

COEFFICIENTI DI TRASPOSIZIONE MEDATLAS -SIRACUSA										
	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
KH	0.896	0.950	1.005	1.005	0.996	0.994	0.997	0.983	0.879	0.717
KT	0.929	0.966	1.003	1.003	0.997	0.996	0.998	0.989	0.917	0.801

Tabella 7.14. Trasposizione del campo di generazione ondosa tra il sito MEDATLAS e il sito di Siracusa. Valutazione dei coefficienti di trasposizione.

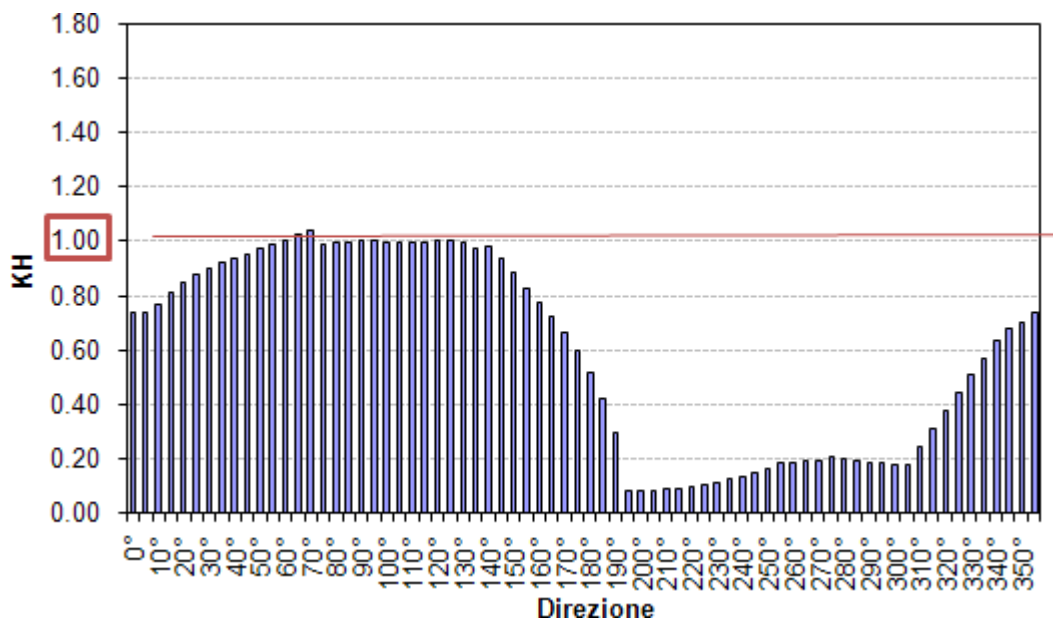


Figura 7.15. Trasposizione del campo di generazione ondosa tra il sito MEDATLAS e il sito di Siracusa. Diagramma di trasposizione delle altezze.

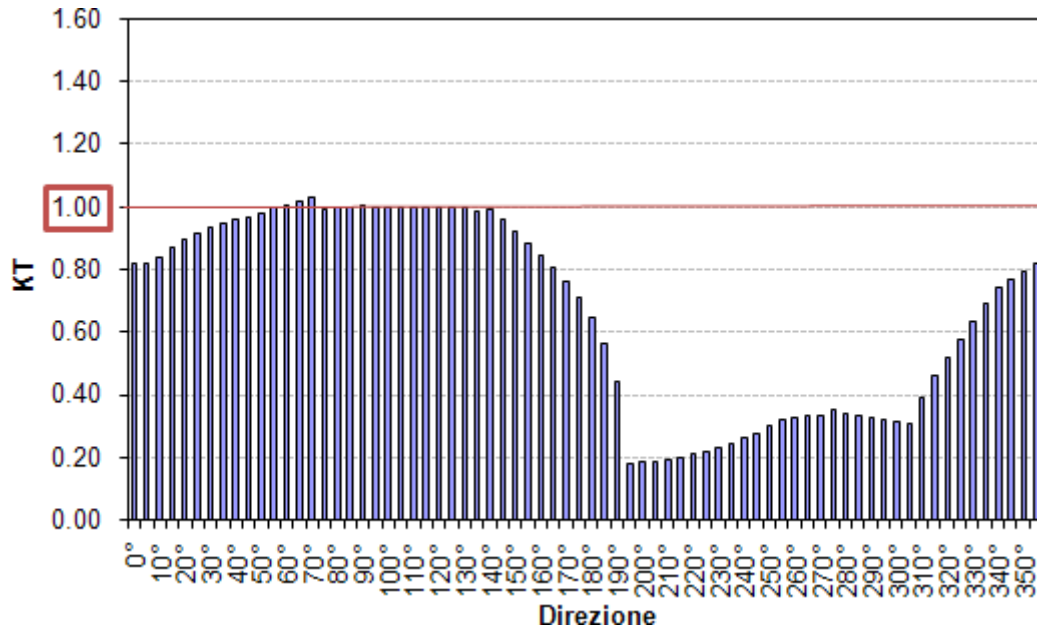


Figura 7.16. Trasposizione del campo di generazione ondosa tra il sito MEDATLAS e sito di Siracusa  
Diagramma di trasposizione delle del periodo.

Infine è stata effettuata la previsione degli eventi estremi secondo il metodo di Boccotti (cfr. il paragrafo 7.1) al fine di valutare la distribuzione statistica degli eventi estremi.

Di seguito sono riportati i valori di  $H_s$  e del relativo  $T_p$  in funzione della direzione (in °N) e del periodo di ritorno R, ottenuti per il sito MedAtlas.

EVENTI ESTREMI SITO MEDATLAS - METODO DI BOCCOTTI

D (°N)	30		45		60		75		90	
R (anni)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
2	2.52	6.77	3.17	7.59	2.60	6.88	3.36	7.81	3.90	8.42
5	2.67	6.96	3.41	7.87	2.77	7.09	3.63	8.13	4.27	8.81
10	2.78	7.11	3.59	8.08	2.89	7.25	3.84	8.35	4.56	9.10
20	2.89	7.25	3.77	8.28	3.02	7.41	4.05	8.58	4.84	9.38
30	2.95	7.33	3.87	8.39	3.09	7.50	4.17	8.71	5.00	9.53
50	3.04	7.43	4.01	8.53	3.18	7.61	4.32	8.86	5.21	9.73
70	3.09	7.49	4.09	8.63	3.24	7.68	4.42	8.97	5.35	9.86
100	3.15	7.56	4.19	8.72	3.31	7.75	4.53	9.07	5.49	9.99

D (°N)	105		120		135		150		165	
R (anni)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
2	4.01	8.54	3.78	8.29	3.17	7.59	3.00	7.38	3.10	7.51
5	4.42	8.97	4.16	8.69	3.45	7.92	3.26	7.69	3.37	7.82
10	4.74	9.28	4.45	8.99	3.66	8.16	3.45	7.92	3.57	8.05
20	5.05	9.58	4.74	9.28	3.87	8.39	3.64	8.14	3.77	8.28
30	5.23	9.75	4.91	9.44	3.99	8.52	3.76	8.26	3.89	8.40
50	5.46	9.96	5.12	9.64	4.15	8.68	3.90	8.42	4.03	8.56
70	5.61	10.10	5.26	9.78	4.25	8.79	4.00	8.52	4.13	8.67
100	5.77	10.24	5.41	9.91	4.36	8.90	4.10	8.63	4.24	8.77

Tabella 7.17. Previsione degli eventi estremi valutati presso il punto MEDATLAS (coordinate : 37°N, 16°E)

Applicando i coefficienti di trasposizione determinati, è stato ottenuto il seguente prospetto degli eventi estremi direzionali previsti per il sito di Siracusa.

## EVENTI ESTREMI SITO DI SIRACUSA- METODO DI BOCCOTTI

D (°N)	30		45		60		75		90	
R (anni)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)
2	2.26	6.29	3.01	7.33	2.62	6.90	3.37	7.84	3.88	8.39
5	2.39	6.47	3.24	7.60	2.78	7.12	3.65	8.15	4.25	8.79
10	2.49	6.60	3.41	7.80	2.91	7.27	3.86	8.38	4.53	9.07
20	2.59	6.73	3.58	8.00	3.03	7.43	4.07	8.61	4.82	9.35
30	2.65	6.81	3.68	8.11	3.11	7.52	4.19	8.73	4.98	9.51
50	2.72	6.90	3.81	8.24	3.20	7.63	4.35	8.89	5.19	9.70
70	2.77	6.96	3.89	8.33	3.26	7.70	4.45	9.00	5.32	9.83
100	2.82	7.03	3.98	8.43	3.32	7.78	4.55	9.10	5.47	9.96

D (°N)	105		120		135		150		165	
R (anni)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)
2	3.99	8.50	3.77	8.27	3.12	7.50	2.64	6.77	2.22	6.01
5	4.40	8.93	4.15	8.68	3.39	7.83	2.86	7.06	2.41	6.26
10	4.71	9.24	4.43	8.97	3.60	8.06	3.03	7.26	2.56	6.45
20	5.02	9.54	4.72	9.26	3.81	8.29	3.20	7.46	2.70	6.63
30	5.20	9.71	4.89	9.42	3.93	8.42	3.30	7.58	2.79	6.73
50	5.43	9.92	5.10	9.62	4.08	8.59	3.43	7.72	2.89	6.86
70	5.58	10.06	5.24	9.75	4.18	8.69	3.51	7.82	2.96	6.94
100	5.74	10.20	5.39	9.89	4.29	8.80	3.60	7.91	3.04	7.02

**Tabella 7.18. Previsione degli eventi estremi al largo di Siracusa a partire dai dati ondametrici "MEDATLAS".**

Dal confronto tra:

- la tabella 7.5 relativa alla valutazione degli eventi estremi al largo di Siracusa, a partire dai dati ondametrici della boa R.O.N. di Catania fino al 2006,
- la tabella 7.6 relativa alla valutazione degli eventi estremi al largo di Siracusa, a partire dai dati ondametrici della boa R.O.N. di Catania fino al 2010,
- la tabella 7.10, relativa alla valutazione degli eventi estremi al largo di Siracusa a partire dai dati ondametrici MEDATLAS,

Si osserva che la tabella 7.5 relativa alla valutazione degli eventi estremi al largo di Siracusa, a partire dai dati ondametrici della boa R.O.N. di Catania fino al 2006, fornisce valori di eventi estremi maggiori, sia per ogni direzione sia per ogni tempo di ritorno.

Solo a fine di notizia si rappresenta che tali eventi sono stati confrontati anche con studi recenti redatti da altre organizzazioni per progettualità sullo stesso territorio, verificandone la sostanziale congruenza.

Si conviene quindi che i valori di eventi estremi al largo relativi al paraggio di Siracusa, ottenuti a partire dall'elaborazione statistica dei dati ondametrici della boa R.O.N. di Catania fino al 2006, sono quelli con caratteristiche ondametriche più gravose e quindi più cautelative.

Tali dati saranno utilizzati per le successive fasi di progettazione e dimensionamento delle opere.

## 8. PREVISIONI STATISTICHE STAGIONALI

Per meglio identificare sia il clima d'onda stagionale, sia per effettuare le stime degli eventi estremi locali si è provveduto ad effettuare un'analisi dei dati storici identificando all'interno delle annate due semestri, quello estivo da maggio ad ottobre, e quello invernale da novembre ad aprile.

Di seguito si riportano i diagrammi polari ottenuti durante l'analisi del clima d'onda stagionale al largo del paraggio utilizzando i dati di occorrenza della boa R.O.N. di Catania, in cui ogni cerchio corrisponde ad un passo percentuale di occorrenza pari al 2,5%.

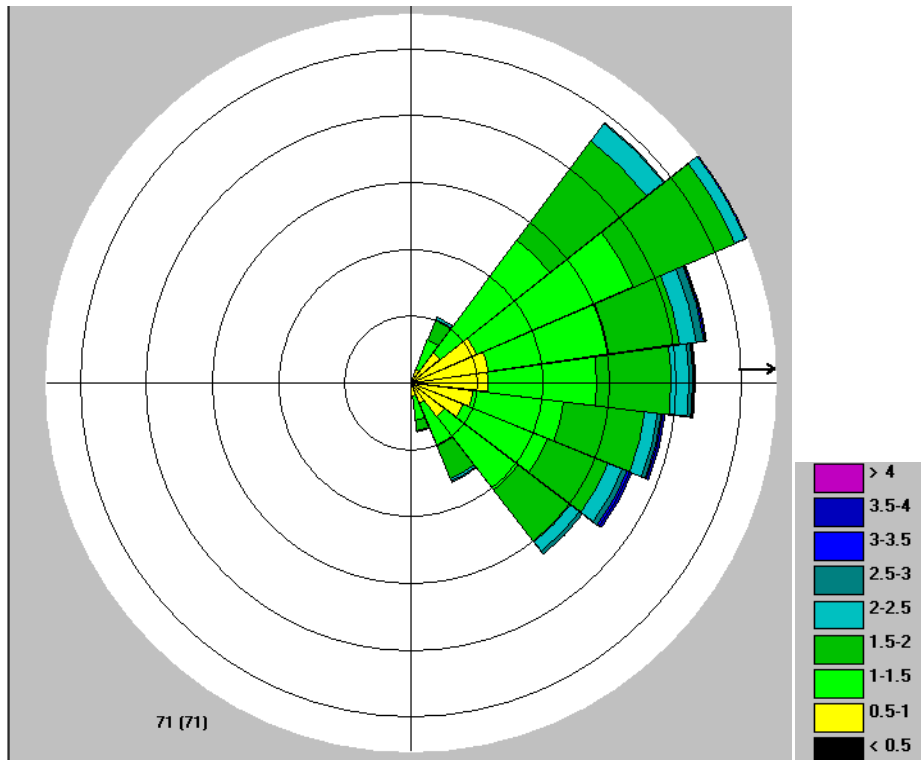


Figura 8.1. Diagramma polare del clima d'onda stagionale estivo per il paraggio 30°N-165°N per il sito di Catania

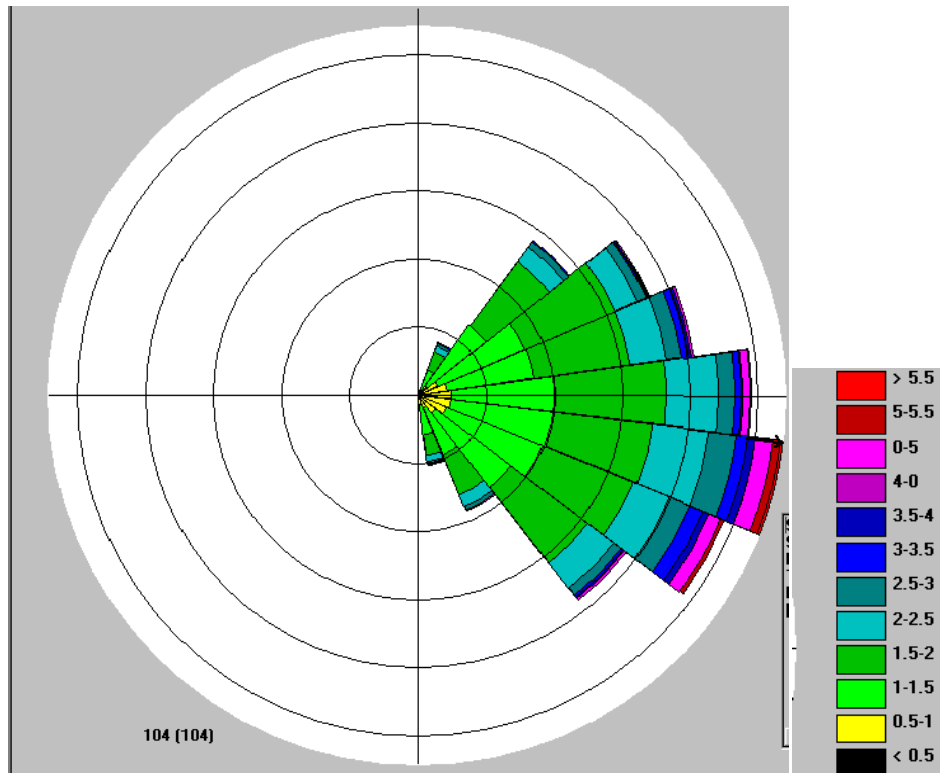


Figura 8.2. Diagramma polare del clima d'onda stagionale invernale per il paraggio 30°N-165°N per il sito di Catania

Si è inoltre effettuata l'analisi stagionale omnidirezionale degli eventi estremi al largo del paraggio, applicando varie distribuzioni di probabilità.

Di seguito si riportano i risultati per la stagione estiva e per la stagione invernale.

Hs(m) - AN. OMNIDIR. STAGIONE ESTIVA					
R (anni)	FT-1	k=0.75	k=1.00	k=1.40	k=2.0
2	2,39	2,38	2,3	2,35	2,41
5	2,93	2,74	2,85	2,94	2,99
10	3,29	3,16	3,26	3,31	3,31
25	3,74	3,78	3,81	3,76	3,67
50	4,08	4,3	4,22	4,08	3,92
73	4,26	4,59	4,45	4,24	4,04
100	4,41	4,84	4,64	4,38	4,14

Tabella 8.3. Prospetto delle previsioni di H<sub>s</sub> in funzione del tempo di ritorno R relativamente al periodo estivo, ottenute applicando le distribuzioni FT-1 e di Weibull.

DISTRIBUZIONE	R <sup>2</sup>	SQM (m)
FT1	0.98	0.06
W k=0.75	0.89	0.42
W k=1.00	0.94	0.15
W k=1.40	0.98	0.08
W k=2.00	0.99	0.03

Tabella 8.4. Prospetto riepilogativo dei parametri statistici R<sup>2</sup> e SQM.



Si osserva che anche per il caso della stagione estiva, la distribuzione che meglio si adatta ai dati delle serie storiche registrate a Catania è la distribuzione di Weibull con  $K=2$ .

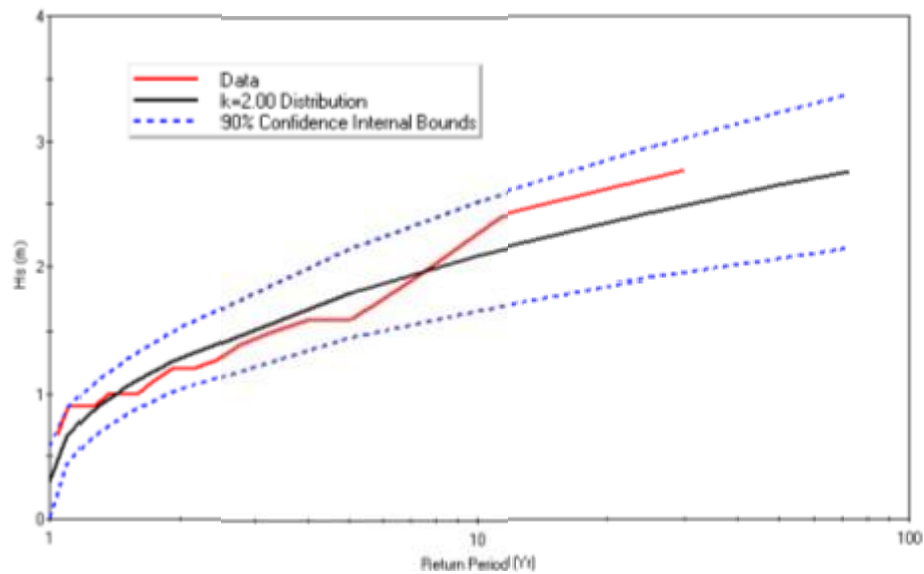


Figura 8.5. Diagramma stagionale delle previsioni di  $H_s$  relative al semestre estivo, ottenute applicando la distribuzione di Weibull, con  $K=2$

Hs(m) - AN. OMNID. - STAGIONE INVERNALE					
R (anni)	FT1	W k=0.75	W k=1.00	W k=1.40	W k=2.00
2	4,18	3,99	4,03	4,12	4,22
5	5,15	4,78	4,97	5,14	5,25
10	5,79	5,49	5,69	5,80	5,83
25	6,60	6,55	6,63	6,59	6,48
50	7,20	7,42	7,34	7,15	6,92
73	7,52	7,92	7,73	7,44	7,14
100	7,79	8,35	8,06	7,68	7,31

Tabella 8.6. Prospetto delle previsioni di  $H_s$  in funzione del tempo di ritorno R relativamente al periodo invernale, ottenute applicando le distribuzioni FT-1 e di Weibull.

DISTRIBUZIONE	$R^2$	SQM (m)
FT1	0.95	0.13
W k=0.75	0.81	0.50
W k=1.00	0.88	0.33
W k=1.40	0.93	0.15
W k=2.00	0.96	0.08

Tabella 8.7. Prospetto riepilogativo dei parametri statistici  $R^2$  e SQM.

Si osserva che anche per il caso della stagione invernale, la distribuzione che meglio si adatta ai dati delle serie storiche registrate a Catania è la distribuzione di Weibull con  $K=2$ .

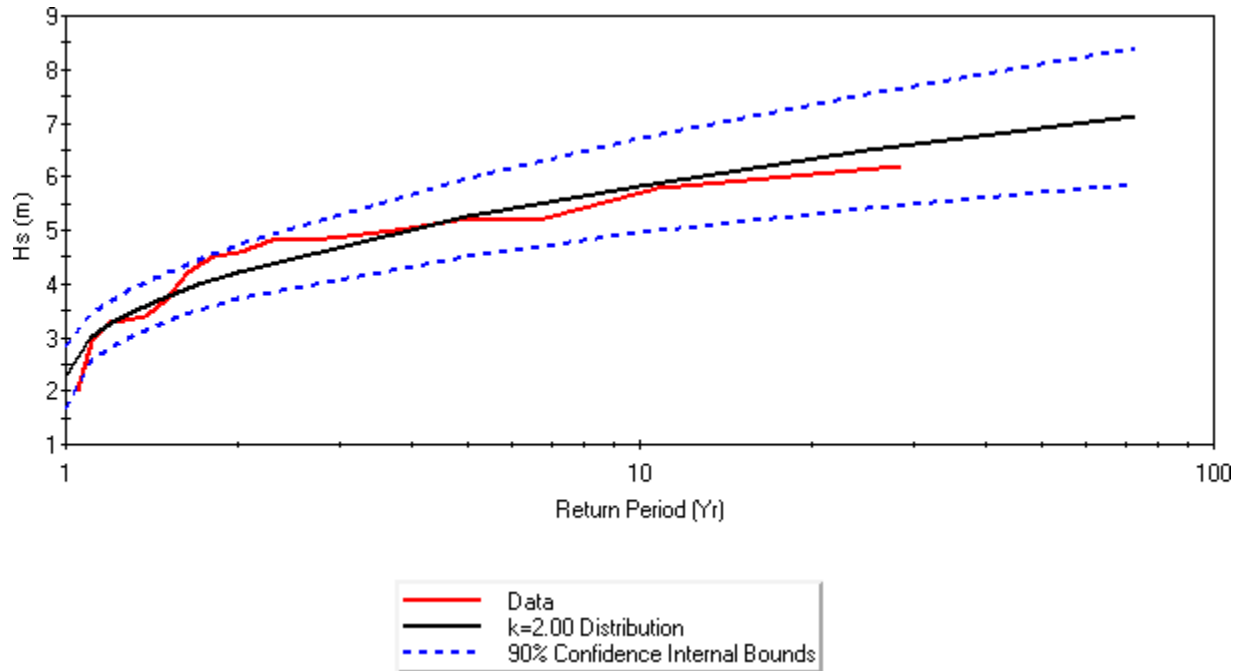


Figura 8.8. Diagramma stagionale delle previsioni di  $H_s$  relative al semestre invernale, ottenute applicando le distribuzioni di Weibull, con  $K=2$

Di seguito di riporta il prospetto di riepilogo degli eventi estremi stagionali omnidirezionali stimati per il sito di Catania.

EVENTI ESTREMI OMNIDIREZIONALI ANALISI STAGIONALE		
R (anni)	STAGIONE	
	EST.	INV.
2	2,41	4,22
5	2,99	5,25
10	3,31	5,83
25	3,67	6,48
50	3,92	6,92
73	4,04	7,14
100	4,14	7,31

Tabella 8.9. Prospetto riepilogativo degli eventi estremi stagionali omnidirezionali per il sito di Catania.

La distribuzione di Weibull con  $K=2$  è stata applicata anche per l'analisi direzionale stagionale applicando dei filtri alle serie storiche ai fini di identificare i dati stagionali relativi ad un determinato settore di provenienza.

Infine, applicando i coefficienti di trasposizione determinati nel capitolo 5, è stato ottenuto il seguente prospetto degli eventi estremi stagionali direzionali previsti per Siracusa.

Hs (m) -ANALISI DIREZIONALE DEGLI EVENTI ESTREMI -SR -STAGIONE ESTIVA										
R (anni)	30°N	45°N	60°N	75°N	90°N	105°N	120°N	135°N	150°N	165°N
2	1,50	1,64	1,40	1,90	1,71	1,86	1,68	0,92	0,77	0,81
5	2,11	2,06	1,77	2,42	2,39	2,46	2,03	1,26	1,18	1,24
10	2,45	2,31	1,97	2,71	2,78	2,79	2,29	1,46	1,42	1,48
25	2,83	2,58	2,21	3,04	3,17	3,21	2,56	1,68	1,68	1,76
50	3,09	2,75	2,37	3,27	3,42	3,49	2,74	1,83	1,85	1,93
73	3,22	2,85	2,44	3,38	3,55	3,64	2,83	1,90	1,94	2,02
100	3,32	2,92	2,50	3,47	3,65	3,76	2,91	1,96	2,01	2,10

Hs (m) -ANALISI DIREZIONALE DEGLI EVENTI ESTREMI -SR -STAGIONE INVERNALE										
R (anni)	30°N	45°N	60°N	75°N	90°N	105°N	120°N	135°N	150°N	165°N
2	2,66	0,91	2,65	3,08	1,71	3,45	2,70	1,80	1,20	1,10
5	3,64	1,55	3,42	4,15	2,39	4,39	3,48	2,66	1,94	1,94
10	4,19	2,13	3,85	4,79	2,78	4,92	3,91	3,14	2,37	2,43
25	4,81	3,00	4,34	5,59	3,21	5,52	4,40	3,68	2,84	2,97
50	5,23	3,71	4,66	6,11	3,49	5,92	4,72	4,04	3,15	3,32
73	5,44	4,10	4,82	6,44	3,64	6,12	4,89	4,22	3,31	3,51
100	5,60	4,45	4,95	6,68	3,76	6,27	5,02	4,37	3,44	3,65

**Tabella 8.10.** Prospetto riepilogativo dei dati di altezze d'onda significativa al variare del tempo di ritorno R, ottenuta durante all'analisi direzionale stagionale degli eventi estremi, per il sito di Siracusa.

## 9. ANALISI DEI LIVELLI IDRICI

---

I livelli idrici del sito in un determinato momento nel paraggio in esame possono avere un ruolo determinante nell'attività di studio e di analisi marittimistica dei siti e delle strutture.

Tali livelli infatti, influenzando la meccanica delle onde che si propagano, possono determinare condizioni più o meno gravose rispetto a quelle riferite al livello medio del mare, che, se non prese in opportuna considerazione, possono portare a risultati falsati ed erronei.

Valga pensare al fenomeno del frangimento, certamente connesso, tra l'altro, alla profondità del fondale su cui l'onda evolve. Considerazioni superficiali sui livelli idrici effettivamente verificabili possono portare ad onde frangenti sottostimate, con gravi conseguenze sul calcolo strutturale delle opere, come è avvenuto in una cospicua casistica.

Deve considerarsi che i livelli idrici effettivi in un sito sono condizionati essenzialmente da:

- *marea*
- *storm surge*, ovvero dalla combinazione di effetti meteorologici connessi alla tempesta, tra cui l'elevazione da gradiente di pressione, dal *wind stress* e dal *wave setup*

La combinazione degli effetti delle suddette componenti è una caratteristica peculiare dei luoghi e differente tempesta per tempesta, per cui, ai fini di studio, l'unica previsione fattibile prende le mosse da considerazioni di tipo statistico e con tecniche basate sulla *life-cycle analysis*.

Considerando che per ogni tempesta vi sarà una condizione di modificazione del livello idrico, dettata dalla presenza di un certo *storm surge* e del livello di marea insistente in quel dato istante, per le calcolazioni ingegneristiche occorrerà definire quale condizione è più utile prendere in considerazione per il tipo di analisi in questione.

Per il sito in esame esistono basi dati (pressione, altezze d'onda, velocità del vento) utilizzabili per l'elaborazione statistica dei livelli idrici al di fuori di quelli determinati dalla marea di cui si dirà appresso.

Assume invece rilevanza sempre crescente la considerazione degli effetti del cambiamento climatico, su cui c'è ammissione concorde circa le influenze dirette sulle zone costiere.

### 9.1 LE MAREE

---

Le maree possono avere una influenza notevolissima sulle escursioni dei livelli idrici che in alcuni casi possono raggiungere diversi metri.

Nelle coste della Sicilia il fenomeno è in genere significativo, presentando generalmente escursioni inferiori al metro.

Anche per questa grandezza è in genere difficile la disponibilità di dati immediatamente locali per periodi di tempo sufficientemente lunghi per una analisi completa. Viepiù che nel caso delle maree la configurazione orografica del sito riveste un ruolo determinante nell'elevazione locale del livello idrico.

Di solito ci si affida quindi a:

- misure mareografiche in siti vicini a quello in esame;
- analisi numeriche con modelli di calcolo che descrivano, con le dovute semplificazioni la fisica del fenomeno;
- osservazioni *in situ*, importanti e spesso determinanti ai fini dell'individuazione corretta delle possibili escursioni massime e minime.

Si evidenzia che non esiste un mareografo installato nella zona in studio.

Si fa riferimento al mareografo appartenente alla rete R.M.N. più vicino che è quello di Catania e di cui si riporta di seguito il diagramma delle oscillazioni di marea derivanti dai rilievi mareografici dal 1984 a oggi.

Deve intanto segnalarsi che i dati sulla escursione dei livelli idrici, come letti da un mareografo, sono strettamente dipendenti dalle condizioni orografiche del sito ove il mareografo è installato (verosimilmente all'interno di porti) ed includono la componente di tipo climatico atmosferica, denominata *storm surge*.

Purtroppo la serie storica è discontinua, per problemi legati al funzionamento della strumentazione mareografica.

### Oscillazione del livello idrico Stazione R.M.N. di Catania

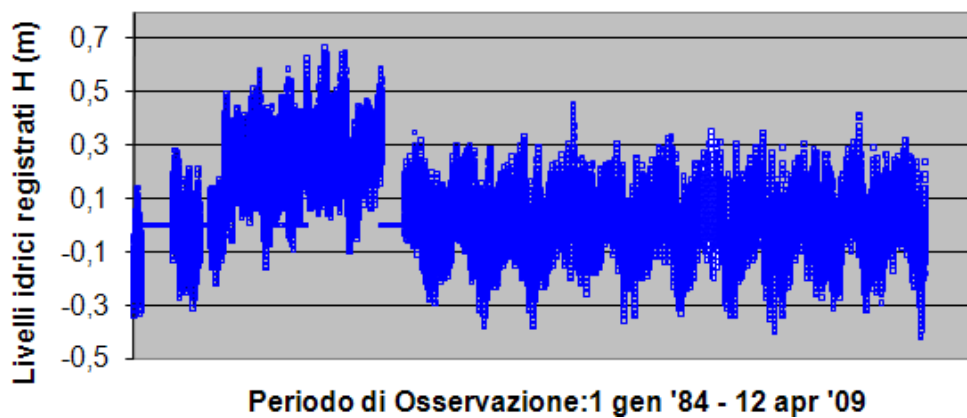


Figura 9.1. Rilevamenti mareografici condotti a Catania (nel periodo 1984-2009)

Dai dati rilevati, si osserva che il range di variazione del livello idrico per il sito di riferimento, nel periodo di osservazione, varia tra  $-0,45$  e  $+0,69$  m.

## 9.2 ELEVAZIONE PER VENTO

L'azione del vento radente sugli specchi idrici comporta una leggera inclinazione degli stessi, montante nel verso della velocità dello stesso. Seguendo le indicazioni del manuale CECW-EH EM 1110-2-1414 del U.S. Corps of Engineers, nei bacini chiusi, di semplice forma con dimensioni comparabili è stato stimato che l'innalzamento del livello idrico rispetto al l.m.m. può essere fornito dalla:

$$S_w = U^2 F / (404.41 d)$$

Con:

- $S_w$ (m), detto Wind Setup, che rappresenta l'innalzamento del livello rispetto al l. m.;
- $U$ (m/s), velocità del vento (massima registrata alla quota di 10 metri) ;
- $F$ (km), fetch;
- $Z$ (m), profondità media dei fondali sul fetch.

Per il sito di interesse , si è scelto per individuare il Wind Setup, di considerare i treni d'onda, che individuano il settore di traversia, con valori di  $H_s$  crescenti al variare del periodo di ritorno R e di considerare la misura dei fetch geografici .

Di seguito vengono riportati in forma tabellare per le direzioni suddette i valori del fetch e delle profondità medie dei fondali lungo il fetch.

DIR (°N)	F (km)	P(m)
30	103	1845
45	93	2126
60	589	2650
75	607	299
90	715	3850
105	971	3200
120	1700	3100
135	900	2521
150	1045	1800
165	25	1300

**Tabella 9.2. Rappresentazione tabellare delle misure dei fetch efficaci e delle profondità medie per la stima di  $S_w$**

Per quanto riguarda l'analisi delle velocità del vento si è scelto di caratterizzare questa grandezza tramite la scala BEAFOURT, che può essere usata in modo tale da estrapolare il valore di velocità del vento equivalente in funzione di un range di altezze d'onda probabili relativo ad un particolare stato del mare.

Infine è stato possibile effettuare un'analisi al variare del periodo di ritorno R, dell'aliquota dell'elevazione del livello marino dovuto al vento  $S_w$ . Di seguito viene riportata la tabella riepilogativa dei dati ottenuti.

dir (°N)	30			45			60			75			90		
R (anni)	H (m)	U (m/s)	S <sub>w</sub> (m)	H (m)	U (m/s)	S <sub>w</sub> (m)	H (m)	U (m/s)	S <sub>w</sub> (m)	H (m)	U (m/s)	S <sub>w</sub> (m)	H (m)	U (m/s)	S <sub>w</sub> (m)
2	2.35	9.5	0.01	2.80	10.8	0.02	2.74	10.7	0.06	2.90	11.1	0.06	3.18	11.9	0.07
3	3.28	12	0.02	4.26	16.2	0.03	3.90	13.1	0.09	3.94	13.2	0.09	4.15	16.1	0.12
5	3.82	13	0.03	5.22	20.2	0.04	4.56	16.4	0.15	4.53	16.3	0.14	4.70	16.4	0.14
10	4.41	18.3	0.04	6.44	22.9	0.05	5.31	20.3	0.23	5.19	19.8	0.20	5.31	20.3	0.19
20	4.81	19.4	0.05	7.35	23.7	0.06	5.80	20.9	0.24	5.63	20.9	0.23	5.73	21.6	0.21
50	5.00	20	0.05	7.49	24.4	0.06	6.05	21.7	0.26	5.85	21.7	0.24	5.93	21.8	0.22
100	5.17	20.1	0.06	8.24	25.6	0.07	6.25	22.2	0.27	6.03	22.1	0.25	6.10	22.6	0.23

dir (°N)	105			120			135			150			165		
R (anni)	H (m)	U (m/s)	S <sub>w</sub> (m)	H (m)	U (m/s)	S <sub>w</sub> (m)	H (m)	U (m/s)	S <sub>w</sub> (m)	H (m)	U (m/s)	S <sub>w</sub> (m)	H (m)	U (m/s)	S <sub>w</sub> (m)
2	2.92	11.2	0.09	2.17	9	0.11	1.51	8.5	0.06	0.84	6.5	0.06	1.08	7	0.01
3	3.96	13.2	0.13	3.00	11.8	0.19	2.27	10	0.09	1.36	8	0.09	1.95	8.8	0.01
5	4.69	16.6	0.21	3.47	12.5	0.21	2.72	10.8	0.10	1.66	8.7	0.11	2.45	10.4	0.01
10	5.40	20.7	0.32	4.00	16	0.34	3.20	12	0.13	1.99	8.8	0.12	2.99	11.9	0.01
20	5.87	21.2	0.34	4.34	16.3	0.35	3.52	12.5	0.14	2.21	9.1	0.13	3.36	12.2	0.01
50	6.12	21.9	0.36	4.52	16.4	0.36	3.68	12.8	0.15	2.31	9.2	0.14	3.55	12.5	0.01
100	6.31	22.5	0.38	4.66	16.5	0.37	3.82	13.1	0.16	2.41	9.3	0.15	3.70	12.8	0.01

Tabella 9.3. Rappresentazione tabellare dell'aliquota di storm surge dovuta agli effetti del vento S<sub>w</sub> al variare del periodo di ritorno R

### 9.3 ELEVAZIONE PER GRADIENTI DI PRESSIONE ATMOSFERICA

I gradienti di pressione, tra il centro della tempesta e le zone periferiche provocano dislivelli idrici.

L'elevazione prodotta dalle variazioni di pressione atmosferica dovute ad una tempesta sono state oggetto di rilevamenti sul campo da parte del CERC. Valori di innalzamento del livello del mare riferito a quello per la pressione atmosferica di 1013 mbars, possono ricavarsi in secondo la metodologia indicata nel manuale CECW-EH EM 1110-2-1414.

I dati di pressione disponibili provengono dai rilievi effettuati dalla stazione di misura più prossima, (la boa R.M.N. di Catania) e si riferiscono al decennio 1998 – 2009; tali misure barometriche sono purtroppo discontinue ed evidenziano livelli di pressione che oscillano tra 1041 e 985 mbars; nella figura seguente si riporta, a titolo di esempio, il diagramma temporale dei dati rilevati relativo al periodo 1998-2009.

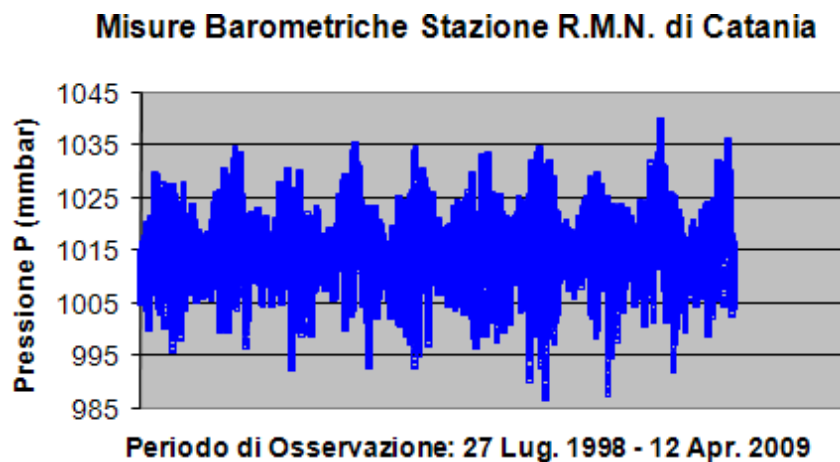


Figura 9.4. Misure barometriche rilevate nel sito RMN di Catania per il periodo 1998-2009

Dalla osservazione della tabella di seguito riportata, si evince che generalmente per i bacini chiusi si osserva un variazione di livello marino, per un'escursione della pressione di 10 mbars, pari a 0,33 ft che corrispondono a circa 10 cm.

Atmospheric Pressure Effect on Water Level

Storm Central Pressure mb	Pressure in. of Hg	Water Level Rise* ft
900	26.58	3.78
910	26.87	3.45
920	27.17	3.11
930	27.46	2.78
940	27.76	2.44
950	28.05	2.11
960	28.35	1.77
970	28.64	1.44
980	28.94	1.10
990	29.23	0.77
1000	29.53	0.43

\*Relative to water level for atmospheric pressure of 1013 millibars = 29.91 inches of Hg.

Tabella 9.5. Tabella di riferimento per la valutazione dell'escursione del livello idrico, dovuta agli effetti della pressione.



Effettuando le dovute conversioni tra i sistemi di misura, per il sito di Catania, si osserva che l'oscillazione del livello idrico per effetto dei gradienti di pressione ( $S_p$ ), potrebbe variare tra +28,8 e -25,5 cm rispetto al l.m.m.

In mancanza di dati di pressione rilevati in situ, si conviene di considerare questi risultati valevoli pure per il sito in esame.

#### 9.4 ELEVAZIONE PER ONDE (WAVE SETUP)

Per determinare l'aliquota di Storm Surge definita Wave Setup, legata al fenomeno del frangimento dell'onda si usa la seguente espressione riportata nel manuale CECW-EH EM 1110-2-1414:

$$S_{wave} = 0.15 d_b - \frac{g^{1/2} (H'_0)^2 T}{64\pi d_b^{3/2}} \cos \alpha$$

I parametri presenti nell'espressione sono:

- $d_b$ , profondità al frangimento
- $g$ , accelerazione di gravità
- $H'_0$ , altezza d'onda al largo non rifratta (m)
- $T_s$  periodo
- $\alpha$  angolo di incidenza della cresta d'onda

I parametri  $d_b$  e  $H'_0$  derivano dalla teoria sul frangimento di Weggel (1972) e di Komar e Gaughan (1973).

L'analisi dei dati è stata condotta in modo da poter stimare le aliquote di storm surge dovute al fenomeno del frangimento,  $S_{wave}$ , associandole al periodo di ritorno  $R$ ; il parametro  $H'_0$ , da cui deriva la profondità di frangimento  $d_b$ , viene fatto corrispondere al valore di  $H_s(R)$ , che deriva dall'analisi statistica degli eventi estremi.

A conferma dei risultati stimati, si è utilizzata la teoria di Goda, (1985) secondo la quale il wave setup è pari al massimo a  $0.15H'_0$ , limite di soglia indicativo rispettato dai risultati.

Di seguito si riporta sia il prospetto riepilogativo dei valori stimati della profondità di frangimento  $d_b$ , in funzione di  $H_s$ , sia quello dei valori ottenuti di  $S_{wave}$

dir	30°N		45°N		60°N		75°N		90°N	
R (anni)	H (m)	$T_s$ (s)	H (m)	$T_s$ (s)	H (m)	$T_s$ (s)	H (m)	$T_s$ (s)	H (m)	$T_s$ (s)
2	2.35	6.53	2.80	7.13	2.74	7.05	2.90	7.26	3.18	7.60
5	3.28	7.72	4.26	8.79	3.90	8.41	3.94	8.46	4.15	8.68
10	3.82	8.33	5.22	9.74	4.56	9.10	4.53	9.08	4.70	9.24
25	4.41	8.95	6.44	10.81	5.31	9.82	5.19	9.71	5.31	9.83
50	4.81	9.35	7.35	11.55	5.80	10.26	5.63	10.11	5.73	10.20
73	5.00	9.54	7.49	11.66	6.05	10.49	5.85	10.31	5.93	10.38
100	5.17	9.69	8.24	12.24	6.25	10.66	6.03	10.47	6.10	10.53

dir (°N)	30°N		45°N		60°N		75°N		90°N	
R (anni)	$H_s$ (m)	$D_b$ (s)	$H_s$ (m)	$D_b$ (s)	$H_s$ (m)	$D_b$ (s)	$H_s$ (m)	$D_b$ (s)	$H_s$ (m)	$D_b$ (s)
2	2.60	2.70	3.10	3.20	3.00	3.10	3.20	3.30	3.50	3.60
5	3.60	3.70	4.70	4.80	4.30	4.40	4.30	4.50	4.50	4.70
10	4.20	4.30	5.70	5.90	5.00	5.20	5.00	5.10	5.10	5.30
25	4.80	5.00	7.00	7.30	5.80	6.00	5.70	5.90	5.80	6.00
50	5.30	5.40	8.00	8.30	6.30	6.60	6.20	6.40	6.30	6.50
73	5.50	5.60	8.20	8.50	6.60	6.80	6.40	6.60	6.50	6.70
100	5.70	5.80	9.00	9.30	6.80	7.10	6.60	6.80	6.70	6.90

dir (°N)	105°N		120°N		135°N		150°N		165°N	
R (anni)	H (m)	$T_p$ (s)	H (m)	$T_p$ (s)	H (m)	$T_p$ (s)	H (m)	$T_p$ (s)	H (m)	$T_p$ (s)
2	2.92	7.29	2.17	6.29	1.51	5.23	0.84	3.91	1.08	4.43
5	3.96	8.48	3.00	7.38	2.27	6.43	1.36	4.97	1.95	5.95
10	4.69	9.23	3.47	7.94	2.72	7.03	1.66	5.49	2.45	6.67
25	5.40	9.90	4.00	8.52	3.20	7.63	1.99	6.01	2.99	7.38
50	5.87	10.33	4.34	8.88	3.52	8.00	2.21	6.33	3.36	7.82
73	6.12	10.54	4.52	9.06	3.68	8.18	2.31	6.48	3.55	8.04
100	6.31	10.70	4.66	9.20	3.82	8.34	2.41	6.62	3.70	8.20

dir (°N)	105°N		120°N		135°N		150°N		165°N	
R (anni)	$H_b$ (m)	$D_b$ (s)	$H_b$ (m)	$D_b$ (s)	$H_b$ (m)	$D_b$ (s)	$H_b$ (m)	$D_b$ (s)	$H_b$ (m)	$D_b$ (s)
2	3.20	3.30	2.40	2.50	1.60	1.70	0.90	0.90	1.20	1.20
5	4.30	4.50	3.30	3.40	2.50	2.60	1.50	1.50	2.10	2.20
10	5.10	5.30	3.80	3.90	3.00	3.10	1.80	1.90	2.70	2.80
25	5.90	6.10	4.40	4.50	3.50	3.60	2.20	2.20	3.30	3.40
50	6.40	6.60	4.70	4.90	3.80	4.00	2.40	2.50	3.70	3.80
73	6.70	6.90	4.90	5.10	4.00	4.20	2.50	2.60	3.90	4.00
100	6.90	7.10	5.10	5.30	4.20	4.30	2.60	2.70	4.00	4.20

**Tabella 9.6. Valori dei parametri  $H_b$ ,  $D_b$ ,  $H_s$  e  $T_p$  necessari per la stima aliquota di storm surge dovuto al fenomeno del frangimento dell'onda,  $S_{wave}$ , in funzione del periodo di ritorno R.**

R (anni)	$S_{wave}$ (m)									
	30°N	45°N	60°N	75°N	90°N	105°N	120°N	135°N	150°N	165°N
2	0.28	0.33	0.31	0.34	0.36	0.33	0.26	0.17	0.08	0.12
5	0.36	0.48	0.44	0.47	0.48	0.46	0.34	0.27	0.15	0.22
10	0.43	0.60	0.53	0.51	0.53	0.54	0.39	0.32	0.20	0.29
25	0.51	0.74	0.61	0.60	0.61	0.62	0.45	0.36	0.22	0.35
50	0.54	0.84	0.67	0.65	0.66	0.66	0.49	0.41	0.25	0.38
73	0.56	0.86	0.68	0.67	0.68	0.70	0.51	0.42	0.26	0.40
100	0.58	0.94	0.72	0.69	0.70	0.71	0.54	0.43	0.27	0.43

**Tabella 9.7. Valori dell' aliquota di storm surge dovuto al fenomeno del frangimento dell'onda,  $S_{wave}$ , in funzione del periodo di ritorno R.**

## 9.5 CONCLUSIONI SULLO STORM SURGE

Relativamente allo *storm surge*, SS, dalle analisi effettuate, assumendo in via cautelativa come verosimile la composizione lineare dei fattori  $S_{wave}$ ,  $S_p$  e  $S_w$ , si ottengono i valori riportati nella tabella seguente; inoltre si osserva che si è scelto di fissare in via cautelativa il valore dell'aliquota di SS dovuta all'escursione di pressione,  $S_p$ , pari al valore di 0,20 m.

Tali valori andranno considerati nelle elaborazioni successive relativamente alle finalità ingegneristiche a cui si riferiscono.

dir (°N)	30				45				60				75				90			
R (anni)	S <sub>w</sub> (m)	S <sub>p</sub> (m)	S <sub>wave</sub> (m)	SS(m)	S <sub>w</sub> (m)	S <sub>p</sub> (m)	S <sub>wave</sub> (m)	SS(m)	S <sub>w</sub> (m)	S <sub>p</sub> (m)	S <sub>wave</sub> (m)	SS(m)	S <sub>w</sub> (m)	S <sub>p</sub> (m)	S <sub>wave</sub> (m)	SS(m)	S <sub>w</sub> (m)	S <sub>p</sub> (m)	S <sub>wave</sub> (m)	SS(m)
2	0.01	0.20	0.28	0.49	0.02	0.20	0.33	0.55	0.06	0.20	0.31	0.57	0.06	0.20	0.34	0.60	0.07	0.20	0.36	0.63
3	0.02	0.20	0.36	0.58	0.03	0.20	0.48	0.71	0.09	0.20	0.44	0.73	0.09	0.20	0.47	0.76	0.12	0.20	0.48	0.80
5	0.03	0.20	0.43	0.66	0.04	0.20	0.60	0.84	0.15	0.20	0.53	0.88	0.14	0.20	0.51	0.85	0.14	0.20	0.53	0.87
10	0.04	0.20	0.51	0.75	0.05	0.20	0.74	0.99	0.23	0.20	0.61	1.04	0.20	0.20	0.60	1.00	0.19	0.20	0.61	1.00
20	0.05	0.20	0.54	0.79	0.06	0.20	0.84	1.10	0.24	0.20	0.67	1.11	0.23	0.20	0.65	1.08	0.21	0.20	0.66	1.07
50	0.05	0.20	0.56	0.81	0.06	0.20	0.86	1.12	0.26	0.20	0.68	1.14	0.24	0.20	0.67	1.11	0.22	0.20	0.68	1.10
100	0.06	0.20	0.58	0.84	0.07	0.20	0.94	1.21	0.27	0.20	0.72	1.19	0.25	0.20	0.69	1.14	0.23	0.20	0.70	1.13

dir (°N)	105				120				135				150				165			
R (anni)	S <sub>w</sub> (m)	S <sub>p</sub> (m)	S <sub>wave</sub> (m)	SS(m)	S <sub>w</sub> (m)	S <sub>p</sub> (m)	S <sub>wave</sub> (m)	SS(m)	S <sub>w</sub> (m)	S <sub>p</sub> (m)	S <sub>wave</sub> (m)	SS(m)	S <sub>w</sub> (m)	S <sub>p</sub> (m)	S <sub>wave</sub> (m)	SS(m)	S <sub>w</sub> (m)	S <sub>p</sub> (m)	S <sub>wave</sub> (m)	SS(m)
2	0.09	0.20	0.33	0.62	0.11	0.20	0.26	0.57	0.06	0.20	0.17	0.43	0.06	0.20	0.08	0.34	0.01	0.20	0.12	0.33
3	0.13	0.20	0.46	0.79	0.19	0.20	0.34	0.73	0.09	0.20	0.27	0.56	0.09	0.20	0.15	0.44	0.01	0.20	0.22	0.43
5	0.21	0.20	0.54	0.95	0.21	0.20	0.39	0.80	0.10	0.20	0.32	0.62	0.11	0.20	0.20	0.51	0.01	0.20	0.29	0.50
10	0.32	0.20	0.62	1.14	0.34	0.20	0.45	0.99	0.13	0.20	0.36	0.69	0.12	0.20	0.22	0.54	0.01	0.20	0.35	0.56
20	0.34	0.20	0.66	1.20	0.35	0.20	0.49	1.04	0.14	0.20	0.41	0.75	0.13	0.20	0.25	0.58	0.01	0.20	0.38	0.59
50	0.36	0.20	0.70	1.26	0.36	0.20	0.51	1.07	0.15	0.20	0.42	0.77	0.14	0.20	0.26	0.60	0.01	0.20	0.40	0.61
100	0.38	0.20	0.71	1.29	0.37	0.20	0.54	1.11	0.16	0.20	0.43	0.79	0.15	0.20	0.27	0.62	0.01	0.20	0.43	0.64

**Tabella 9.8. Rappresentazione tabellare del valore storm surge SS in funzione del periodo di ritorno R e della direzione (°N)**

## 9.6 CAMBIAMENTO CLIMATICO E LIVELLI DEL MARE

---

E' concordemente accettato ormai che il cambiamento climatico in atto ha tra i suoi effetti salienti la modifica dei livelli del mare e quindi delle coste.

Notoriamente, il clima in generale influenza il volume delle grandi masse d'acqua della terra. Questo sia per la relazione diretta con la temperatura dell'acqua (espansione/contrazione termica) sia per il mutare del rapporto fra acque allo stato liquido e acque allo stato solido (ghiacci).

La tendenza corrente all'innalzamento del livello del mare non si manifesta con incrementi identici per ciascun punto del globo e questo rappresenta una limitazione alla previsione degli scenari futuri.

La discussione scientifica in corso sulle modificazioni di bilancio della radiazione solare dovute all'aumento dei gas serra, a causa delle attività antropiche, nell'atmosfera è nota. L'effetto consiste nell'alterazione delle temperature e della circolazione nell'atmosfera e negli oceani con conseguente variazioni meteorologiche.

Tra gli aspetti più evidenti è l'incremento di temperatura media della superficiale globale di 0,3 - 0,6 °C negli ultimi 150 anni.

Le previsioni climatiche annunciano che gli effetti diverranno ancor più pronunciati nelle prossimi decenni.

Ad esempio le proiezioni al 2100 rispetto al 1990, suggeriscono che la temperatura potrebbe subire incrementi da 0,6 a 4°C.

L'incremento delle temperature comporterà lo scioglimento delle calotte polari e causerà la formazione di fenomeni atmosferici molto gravosi, che andranno modificare gli equilibri idrodinamici ed incidendo notevolmente sul livello medio marino.

Quest'ultimo aspetto del fenomeno è quello che interessa maggiormente l'ingegneria costiera, soprattutto per gli aspetti che riguardano la stabilità e la funzionalità operativa delle strutture.

L'incremento dei livelli idrici marini causerà:

- una maggior frequenza dei fenomeni di overtopping, di allagamenti dei spiazzali e delle banchine, con conseguenziale arresto delle operazioni di carico e scarico merci e passeggeri;
- una maggiore esposizione ad agenti corrosivi delle strutture (pontili, dei pali e di banchine)
- l'incremento delle forzanti indotte dal moto ondoso;
- l'aumento dei fenomeni di erosione della linea di riva.

Per la progettazione di opere con lunga vita utile è indispensabile quindi analizzare gli effetti di tale aumento.

## 9.7 PREVISIONI DEL LIVELLO MEDIO MARINO

---

Nel recente passato il livello marino è aumentato e le previsioni numeriche annunciano che in futuro il gradiente subirà brusche accelerazioni.

Bindoff et al., (2007) hanno osservato che il livello medio marino mondiale è aumentato di  $1.7 \pm 0.5$  mm/anno nel XX secolo con un gradiente leggermente maggiore nel periodo 1961-2003.

Le proiezioni climatiche suggeriscono che la velocità di incremento del livello aumenterà fino ai 2,5 mm/anno, in modo che nel 2100 il livello medio marino supererà quello attuale (n.d.r. 2009) di circa 0,2-0,5 m.

L'incremento del livello marino potrebbe raggiungere una quota compresa tra 0,6-1 m nelle Regioni Polari (Horton et al., 2008) entro il 2100.

I cambiamenti climatici si manifesteranno soprattutto tramite i fenomeni atmosferici: aumenterà la durata dei periodi caldi e siccitosi e la frequenza delle piogge torrenziali; cicloni tropicali e dei livelli estremi di marea;

La distribuzione spazio-temporale dei venti, sia in termini di velocità e direzione, sia di frequenza e durata degli eventi estremi sarà modificata.

In particolare le previsioni annunciano che la percentuale dei venti con velocità maggiori di 15 m/s sarà incrementata soprattutto nell'emisfero boreale

Lo stesso scenario si prospetta anche per moto ondoso.

In particolare Trenberth et al., (2007) prevedono un significativo trend di crescita per i valori di altezza dell'onda significativa (Hs) a livello mondiale, fino ad un massimo di 0,4 m per decade nell' Oceano Atlantico.

Per quanto riguarda i fenomeni del storm surge e dell'innalzamento dei livelli di marea, le valutazioni effettuate sono al quanto incerte per via dell'impossibilità di effettuare simulazioni numeriche adatte per l'individuazione dei trend atmosferici e barometrici, per via delle carenze previsionali dei modelli di forecasting regionali e locali, ancora in via di sviluppo.

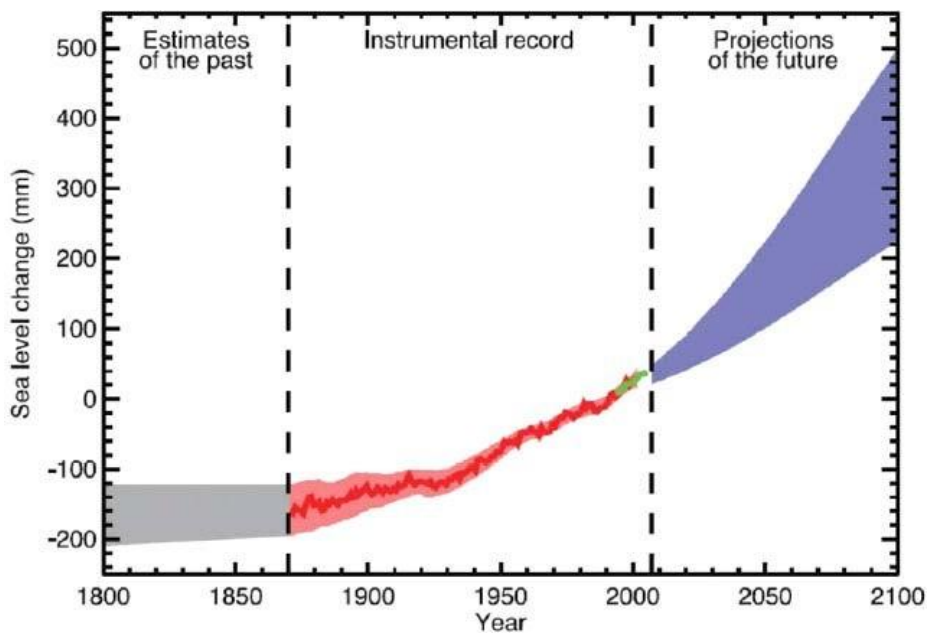


Figura 9.9. Previsione della variazione del livello del mare (Bindolff et al., 1987)

Nel 2007 è stato pubblicato da parte dell'organizzazione dell'O.N.U., l'IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change - il "Quarto Rapporto sul Cambiamento Climatico".

Le valutazioni IPCC 2007 rispetto al livello del mare 1980-99 rispecchiano i trend descritti prima e prevede il seguente scenario:

- 2050: incremento del livello medio mare pari a  $18 \pm 6$  cm
- 2100: incremento del livello medio mare pari a  $35 \pm 14$  cm

La regionalizzazione degli effetti del riscaldamento globale sul livello del mare del bacino del Mar Mediterraneo è oggetto di numerosi studi già da anni. Nella figura seguente sono riportate le stazioni disponibili di misura dei livelli del mare nel bacino del Mediterraneo ed i trends misurati in Italia.

Solo dalle osservazioni non si possono trarre valutazioni affidabili per gli scenari futuri: sono necessari modelli di atmosfera e oceano. Alcuni autori sono tuttavia concordi sul fatto che il trend di crescita del livello del mare nel Mar Mediterraneo sarà circa la metà di quello globale.

Nelle stime dei livelli idrici delle coste italiane per tempi di ritorno lunghi si possono cautelativamente considerare i seguenti incrementi di valore:

2050:  $+9 \pm 3$  cm

2100:  $+18 \pm 7$  cm

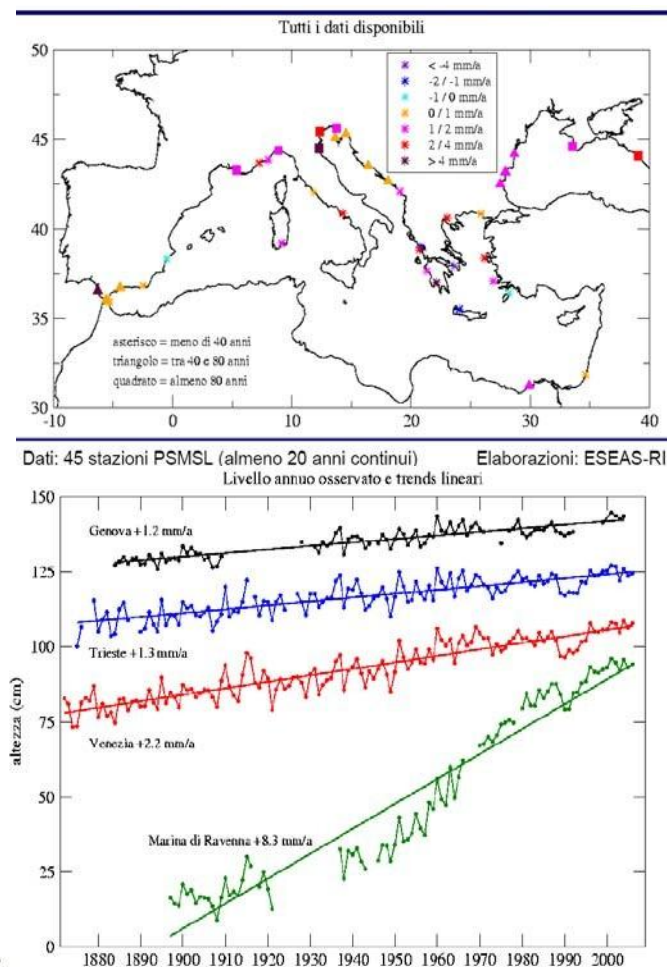


Figura 9.10. Stazioni di misura nel mar Mediterraneo e Trends osservati in Italia

## 9.8 CONSIDERAZIONI FINALI

Di seguito sono riassunti i valori stimati in via preliminare di innalzamento del livello idrico relativi dello Storme Surge e ai cambiamenti climatici.

Si conviene quanto segue:

- al fine della stima di Storm Surge, si considera la composizione lineare degli effetti relativi ai gradienti barometrici, al frangimento dell'onda, e all'azione del vento;
- le previsioni di Storm Surge hanno fornito dati compatibili con le osservazioni di variazione di livello del mare effettuate presso il sito strumentato più prossimo;
- l'innalzamento idrico dovuto al cambiamento climatico è caratterizzato da una limitata affidabilità, per via delle difficoltà relative alla previsione di alcuni fenomeni e soprattutto alle loro interazioni.

SS(m)										
R (anni)	30°N	45°N	60°N	75°N	90°N	105°N	120°N	135°N	150°N	165°N
2	0.49	0.55	0.57	0.60	0.63	0.62	0.57	0.43	0.34	0.33
5	0.58	0.71	0.73	0.76	0.80	0.79	0.73	0.56	0.44	0.43
10	0.66	0.84	0.88	0.85	0.87	0.95	0.80	0.62	0.51	0.50
25	0.75	0.99	1.04	1.00	1.00	1.14	0.99	0.69	0.54	0.56
50	0.79	1.10	1.11	1.08	1.07	1.20	1.04	0.75	0.58	0.59
73	0.81	1.12	1.14	1.11	1.10	1.26	1.07	0.77	0.60	0.61
100	0.84	1.21	1.19	1.14	1.13	1.29	1.11	0.79	0.62	0.64

Tabella 9.11. Rappresentazione tabellare del valore di storm surge e in funzione del periodo di ritorno R

ANNO	$\Delta$
2050	+9 cm
2100	+18 cm

Tabella 9.12. Previsioni dell'ICPP (2007) a 50 e a 100 anni dell'innalzamento del livello idrico marino nel Mediterraneo per effetto dei cambiamenti climatici rispetto al livello medio marino del ventennio 1980-1999.

Tali valori andranno considerati nelle elaborazioni successive relativamente alle finalità ingegneristiche a cui si riferiscono.

## 10. TRASFORMAZIONE DELL'ONDA DAL LARGO VERSO RIVA

---

In questo capitolo è stato dedicato alla valutazione dei fenomeni di trasformazione dell'onda, durante la propagazione dal largo verso la riva.

Dapprima saranno descritti i principali fenomeni in gioco, in seguito sarà descritto il modello matematico utilizzato per simulare tali fenomeni ed infine verranno commentati i risultati ottenuti.

### 10.1 LA RIFRAZIONE E LO SHOALING

---

Con l'avvicinarsi verso riva le onde subiscono una trasformazione dovuta principalmente:

- alla orografia e al tipo di fondale;
- all'azione della marea;
- alla presenza di vento,
- all'azione delle correnti,
- all'interazione con le infrastrutture presenti.

Un'interpretazione semplice ed efficace dei fenomeni del primo tipo è fornita dalla teoria delle onde di piccola altezza, secondo la quale un'onda di oscillazione di periodo costante che avanza dal largo verso la riva, inizia a risentire del fondale sottostante ad una profondità  $h$  che si ritiene pari a 0,5 volte la lunghezza d'onda  $L$ ; l' "avvertimento" da parte dell'onda della presenza del fondale ha degli effetti diretti sulla celerità con la quale l'onda si propaga (relazione di Airy); in pratica, un medesimo fronte di un'onda monocromatica sarà caratterizzato da punti con celerità diversa in relazione ai fondali ad esso sottostanti; conseguenza ne è che il fronte dell'onda avanzerà con celerità diverse nei suoi punti subendo una rotazione progressiva man mano che si approssima alla riva, tendendo a disporsi parallelamente alla batimetria del fondale (*rifrazione*).

Altra importante conseguenza dell'arrivo dell'onda nella zona di transizione è di carattere energetico: ammettendo che l'energia non si trasmetta in direzione trasversale al fronte dell'onda, può dimostrarsi con semplici passaggi matematici, che la morfologia del paraggio ha effetti diretti sulla concentrazione o sulla dispersione dell'energia, con conseguente aumento o diminuzione dell'altezza dell'onda (*shoaling*).

Un approccio più completo per lo studio della trasformazione dell'onda nel suo moto verso riva, deve necessariamente tenere conto nel contempo del fenomeno del frangimento e della conseguente dissipazione energetica ad esso associata. Il frangimento si verifica allorché vengono raggiunte precise condizioni fisiche (generalmente espresse in termini di ripidità dell'onda) o a seguito dell'interazione dell'onda con strutture di protezione. L'individuazione delle zone in cui avviene il frangimento risulta determinante per comprendere l'effettiva operatività e sicurezza del bacino in concomitanza di eventi particolarmente gravosi.

### 10.2 MODELLO MATEMATICO UTILIZZATO

---

Lo studio dei fenomeni legati alla trasformazione del clima d'onda verso riva è stato affrontato per mezzo del modello matematico STWAVE, modello stazionario spettrale alle differenze finite proposto da *J. McKee Smith, D. T. Resio e A. K. Zundel*. Lo scopo del modello è predire quantitativamente il cambiamento dei parametri dell'onda (altezza d'onda, periodo, direzione, e forma spettrale) tra il largo e la zona sottocosta.

STWAVE simula la rifrazione e lo shoaling indotti dalla variazione della profondità del fondale, il frangimento a cui è sottoposta l'onda in particolari condizioni fisiche e il fenomeno della diffrazione (trasferimento di energia in direzione trasversale rispetto alla cresta dell'onda); il modello è in grado di considerare la presenza di correnti e l'apporto energetico



costituito dalla presenza del vento. L'input delle caratteristiche del moto ondoso incidente è costituito da uno spettro energetico di tipo bidimensionale.

Lo spettro è una rappresentazione statistica del campo d'onda; concettualmente può essere pensato come una sovrapposizione di più onde monocromatiche di diverso periodo e direzione; lo spettro rappresenta la distribuzione dell'energia associata al moto ondoso come funzione della frequenza (spettro monodimensionale) o come funzione della frequenza e della direzione (spettro bidimensionale); in quest'ultimo caso esso può essere descritto da una funzione da  $R^2$  in  $R$ , ovvero da una superficie  $z=f(x,y)$ , in cui  $x$  e  $y$  rappresentano rispettivamente le frequenze e le direzioni, mentre  $z$  rappresenta la densità di energia.

Le ipotesi del modello sono:

- fondo con dolce pendenza e riflessione dell'onda trascurabile;
- condizione dell'onda incidente costante su tutto il confine al largo del dominio di calcolo;
- stato stazionario delle onde, delle correnti e dei venti;
- rifrazione e shoaling lineari;
- corrente costante per tutta l'altezza della colonna d'acqua;
- attrito al fondo e fenomeni riflessivi trascurabili.

A ben guardare, l'ultima ipotesi comporta la necessità di ricorrere ad un ulteriore modello di calcolo per lo studio di dettaglio dell'agitazione interna del bacino portuale.

Dal momento che il modello consente di considerare la presenza di corrente, le equazioni di governo sono scritte rispetto un sistema di riferimento solidale con la corrente stessa. I parametri dell'onda sono contrassegnati con il pedice  $r$ , quelli valutati rispetto al sistema di riferimento assoluto sono contrassegnati con il pedice  $a$ . La relazione della dispersione dell'onda rispetto al sistema di riferimento relativo è (Jonsson et al., 1990):

$$\omega_r^2 = gk \tanh kd$$

dove:

$\omega$  = frequenza angolare;

$g$  = accelerazione di gravità;

$k$  = numero d'onda;

$d$  = profondità.

Nel sistema di riferimento assoluto, l'equazione della dispersione diventa:

$$\omega_a = \omega_r + kU \cos(\delta - \alpha)$$

dove:

$U$  = velocità della corrente

$\delta$  = direzione della corrente rispetto all'asse delle  $x$  del sistema di riferimento assoluto

$\alpha$  = angolo che la normale alla cresta dell'onda forma con l'asse delle  $x$  del sistema di riferimento assoluto (cfr. Figura 10.1).

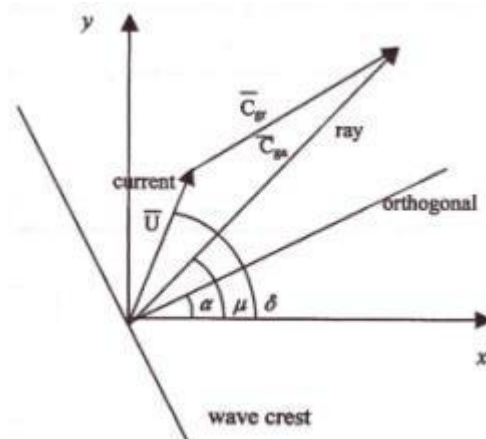


Figura 10.1. Definizione del sistema di riferimento

Le soluzioni per la rifrazione e lo shoaling richiedono sia la celerità dell'onda  $C$  che la celerità di gruppo  $C_g$  in entrambi i sistemi di riferimento; nel sistema di riferimento relativo si ha:

$$C = \frac{\omega_r}{k}$$

$$C_{gr} = 0.5 C_r \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

La direzione di entrambe le celerità è  $\alpha$ ; nel sistema di riferimento assoluto le componenti delle celerità lungo  $x$  e  $y$  valgono invece:

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha)$$

e

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i$$

Anche la celerità assoluta forma con l'asse delle  $x$  un angolo pari ad  $\alpha$ . La celerità di gruppo assoluta definisce la direzione del raggio d'onda (direzione di propagazione dell'energia) (cfr. Figura 10.1); quest'ultima risulta dunque definita da:

$$\mu = \tan^{-1} \left( \frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \cos \alpha + U \cos \delta} \right)$$

L'ortogonale dell'onda indica la perpendicolare alla cresta dell'onda stessa, invece il raggio d'onda indica la direzione di propagazione dell'energia. La distinzione tra le due grandezze è necessaria solo nel caso in cui vi sia l'interazione tra onda e corrente; nel caso di assenza di quest'ultima, le due grandezze coincidono. La direzione dell'ortogonale dell'onda in condizioni stazionarie è data da (Mei 1989; Jonsson 1990):

$$C_{ga} \frac{D\alpha}{DR} = - \frac{C_r k}{\sinh 2kd} \frac{Dd}{Dn} - \frac{k_i}{k} \frac{DU_i}{Dn}$$

dove  $D$  è il simbolo di derivata,  $R$  è una coordinata nella direzione del raggio d'onda ed  $n$  è una coordinata normale all'ortogonale d'onda.

In condizioni stazionarie, l'equazione della conservazione dell'azione dell'onda spettrale lungo la direzione del raggio d'onda è (Jonsson, 1990):

$$\left( C \right)_{ga} \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E}{\omega_r} = \sum \frac{S}{\omega_r}$$

dove:

E= densità d'energia dello spettro d'onda che è funzione della frequenza angolare assoluta  $\omega_a$  e direzione  $q$ ;

S = termine che indica un'entrata o un'uscita di energia.

Il criterio adottato per l'individuazione delle fasce di frangimento è quello proposto da Smith, Resio e Vincent (1997), i quali, a seguito di prove di laboratorio sul frangimento delle onde irregolari, proposero la seguente relazione:

$$\left( H_{m0} \right)_{\max} = 0.1L \tanh kd$$

Ogni qual volta il criterio risulta verificato, l'energia associata ad ogni frequenza dello spettro viene ridotta.

### 10.2.1 DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO

Data la particolare posizione del sito, al fine di ottimizzare al massimo i tempi computazionali, sono stati individuati due domini di calcolo differenti in funzione della direzione di provenienza del clima ondoso a largo simulato.

Il dominio di calcolo denominato "1" (cfr. Figura 10.2) è stato utilizzato per le ondazioni a largo provenienti da 30,45, 60,75,90,105,120,135,150°N, ed ha le seguenti caratteristiche:

#### Dati Griglia 1

angolo di rotazione: 200,0°  
 dimensioni: i= 4899 j= 3940  
 numero celle: 48.265 (197 righe x 245 colonne)  
 dimensione cella: 20 m  
 $Z_{\max}$ : 127 m

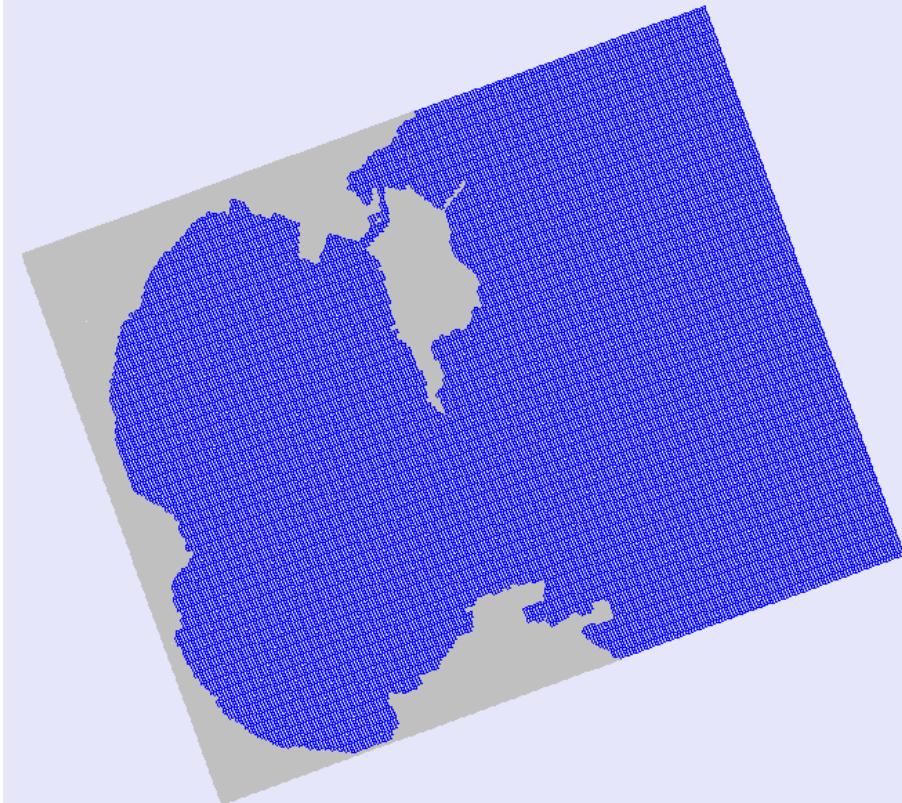
Il dominio di calcolo denominato "2" (cfr. Figura 10.3) è stato utilizzato per le ondazioni a largo provenienti da 165°N, ed ha le seguenti caratteristiche:

#### Dati Griglia 2

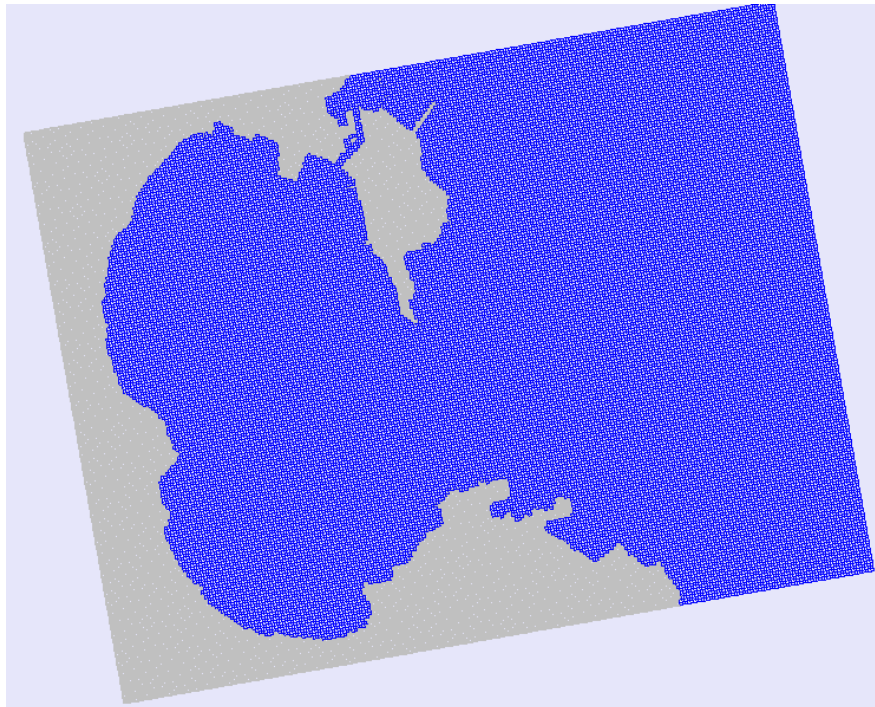
angolo di rotazione: 190,0°  
 dimensioni: i= 5464 j=4149  
 numero celle: 56.192 (208 righe x 274 colonne)  
 dimensione cella: 20 m  
 $Z_{\max}$ : 120 m

Come richiesto dal modello, per entrambi i domini l'asse j è stato orientato in maniera tale da risultare parallelo alla linea di costa; l'asse i, ortogonale al primo, è stato orientato positivamente nella direzione che dal largo punta la costa

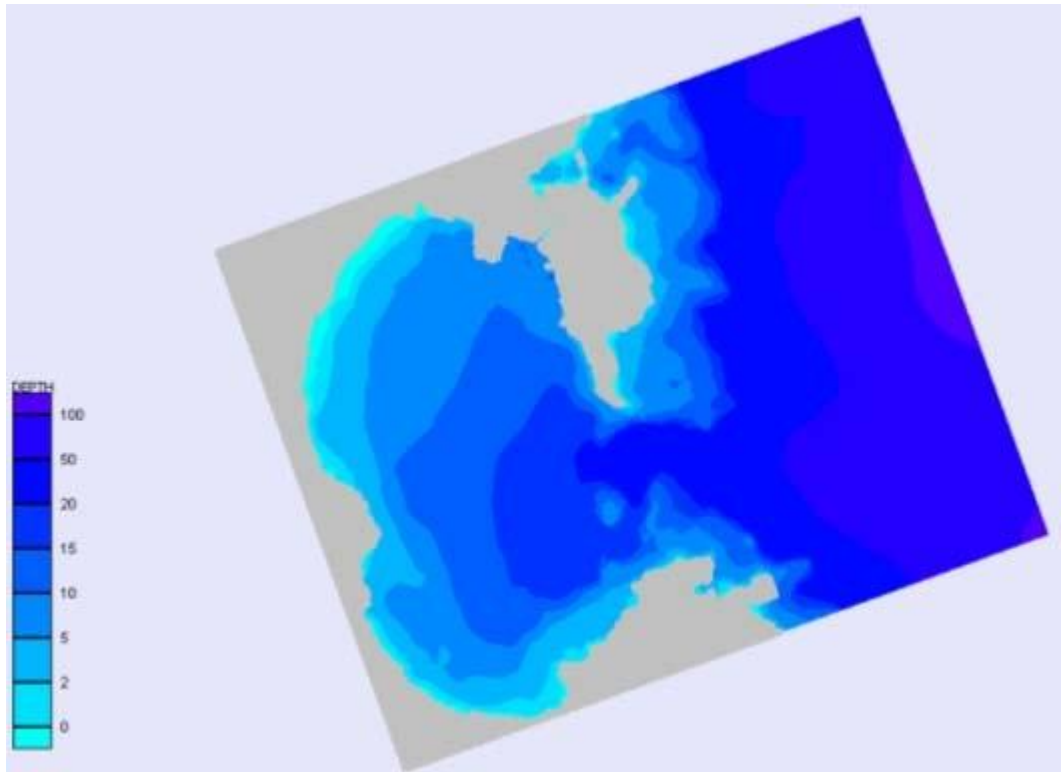
La Figura 10.4 mostra l'andamento della profondità dei fondali della zona in esame; la distribuzione è stata ottenuta attraverso un opportuno algoritmo di interpolazione applicato alle informazioni batimetriche ottenute dalle carte nautiche disponibili per l'area.



**Figura 10.2. Definizione del dominio di calcolo "1"**



**Figura 10.3. Definizione del dominio di calcolo "2"**



**Figura 10.4. Batimetrie dei fondali del paraggio in studio**

#### 10.2.2 SIMULAZIONI NUMERICHE ESEGUITE

Il modello di calcolo è stato utilizzato per analizzare la trasformazione subita dalle onde nel loro procedere dal largo verso riva ed, in particolare, per individuare le fasce di frangimento.

Sono state oggetto di elaborazione gli stati del mare caratteristici dei treni d'onda al largo del paraggio in esame (98 simulazioni) sia quelli caratteristici degli eventi estremi per R da 5 a 100 anni (40 simulazioni), per un totale di 138 simulazioni.

Per ciascuna simulazione, a partire dai dati sull'altezza significativa, il periodo e la direzione, è stato costruito uno spettro energetico bidimensionale, utilizzato come condizione al contorno su ciascun elemento della colonna più al largo. Lo spettro è stato specificato usando una funzione di forma (Bouws et al. 1985), caratterizzata oltre che dalle grandezze suddette, dai parametri  $g$  e  $nn$ , che controllano rispettivamente il grado di apertura dello spettro nella direzione dell'asse delle frequenze e dell'asse delle direzioni; i valori di  $g$  e  $nn$  sono stati messi in relazione al valore del periodo.

In particolare si osserva che sono stati determinati i valori delle onde trasformate in quattro punti selezionati; in particolare si osserva che il punto di controllo 1 è stato scelto in prossimità dell'apertura del Porto Grande, mentre il punto di controllo 4 è stato scelto in prossimità del sito interessato dalle opere in progetto.

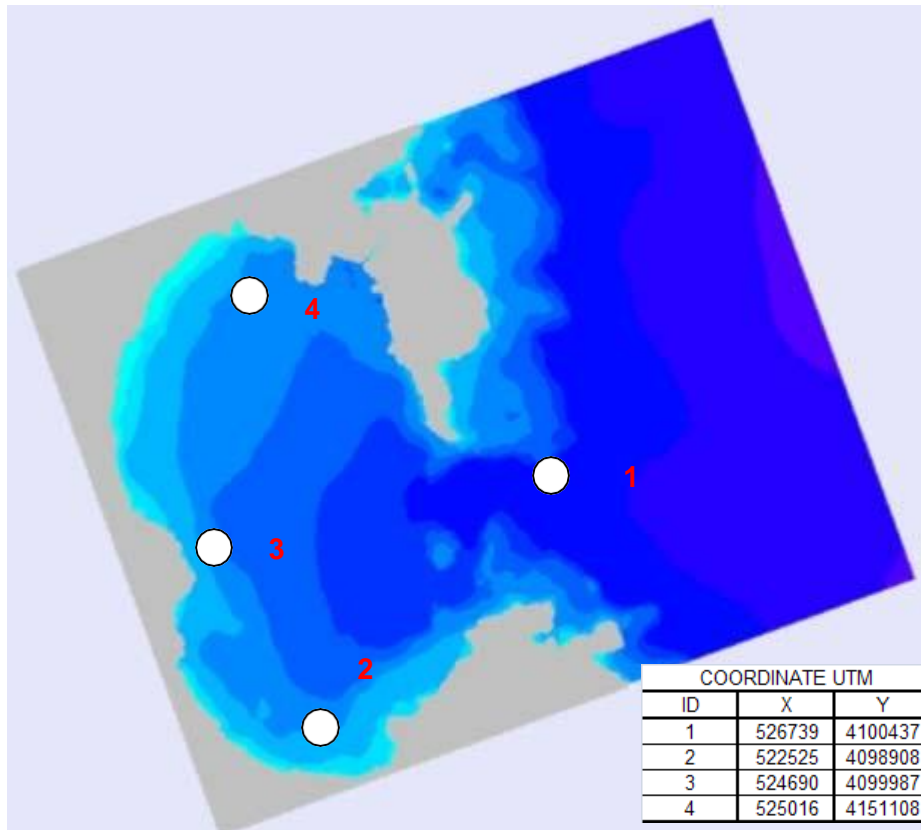


Figura 10.5. Visualizzazione dei punti di lettura sottocosta delle onde trasformate

### 10.2.3 ANALISI DELLE SIMULAZIONI RELATIVE ALLA PROPAGAZIONE DEL CLIMA D'ONDA DAL LARGO VERSO RIVA

Per quanto riguarda la propagazione verso riva, dei treni d'onda caratteristici del clima d'onda al largo si è proceduto secondo la seguente metodologia.

Dopo aver effettuato la trasposizione delle altezze d'onda caratteristiche del clima ondoso dal sito di Catania a quello di Siracusa, amplificando i dati tramite i relativi coefficienti di trasposizione (cfr. Capitolo 5), e dopo aver escluso le inondazioni esterne al settore di traversia individuato (30°N-165° N), è stata effettuata la ridistribuzione in frequenza delle occorrenze secondo classi di altezza d'onda di ampiezza 0,5 m e secondo classi direzionali di ampiezza 15°; in questo modo è stato possibile associare ad ogni classe la propria percentuale di occorrenza.

Le tabelle di occorrenza, sia in numero di accadimenti che in percentuale, del clima d'onda al largo di Siracusa sono state già riportate nella tabella 6.5, a cui si rimanda.

Si ricorda che il numero delle occorrenze totali è circa 93225; di queste occorrenze, 68944 sono all'interno del settore di traversia individuato (30°-165°N), che corrispondono a circa il 75% del totale.

Per quanto riguarda i periodi, si è fatto riferimento alla relazione di calcolo seguente:

$$T_p = 8.5p(H_s/4g)^{1/2}$$

In particolare sono state effettuate 98 simulazioni.

Al termine delle simulazioni è stato possibile per ciascuna onda incidente simulata ricostruire:

- la distribuzione delle direzioni e dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo;
- la determinazione della fascia di frangenza;

Inoltre per ognuno dei 4 punti di controllo scelti, al fine di identificare il clima d'onda locale, è stato possibile ricostruire la distribuzione delle onde trasformate sotto costa .

Di seguito si riportano sia la tabella riepilogativa che i diagrammi polari, in cui ogni cerchio corrisponde ad un passo percentuale del 2,5%.





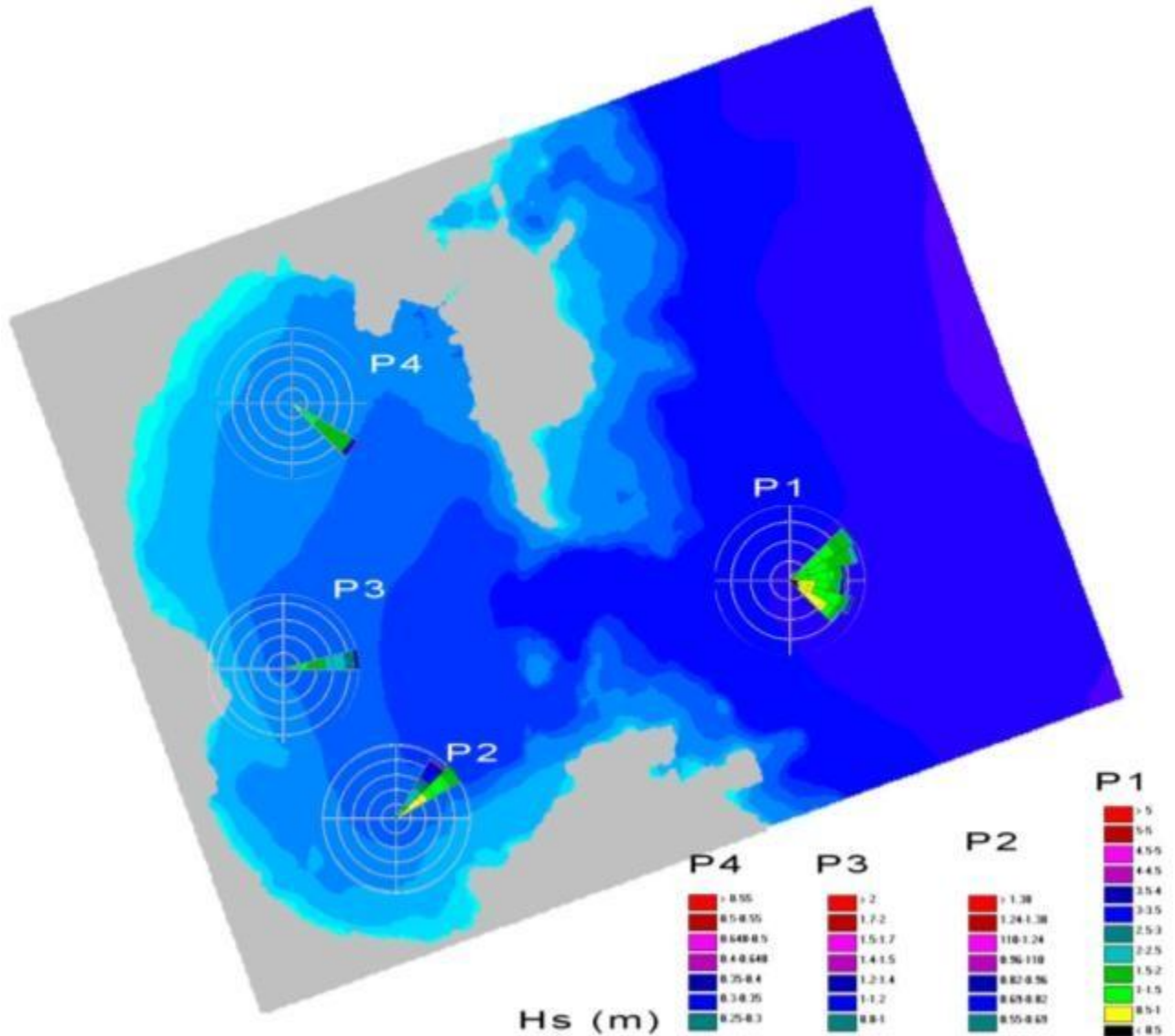


Figura 10.7. Planimetria del Porto Grande di Siracusa, che riporta i diagrammi polari del clima d'onda locale identificativo di ognuno dei quattro punti di controllo.

E' possibile formulare le seguenti considerazioni:

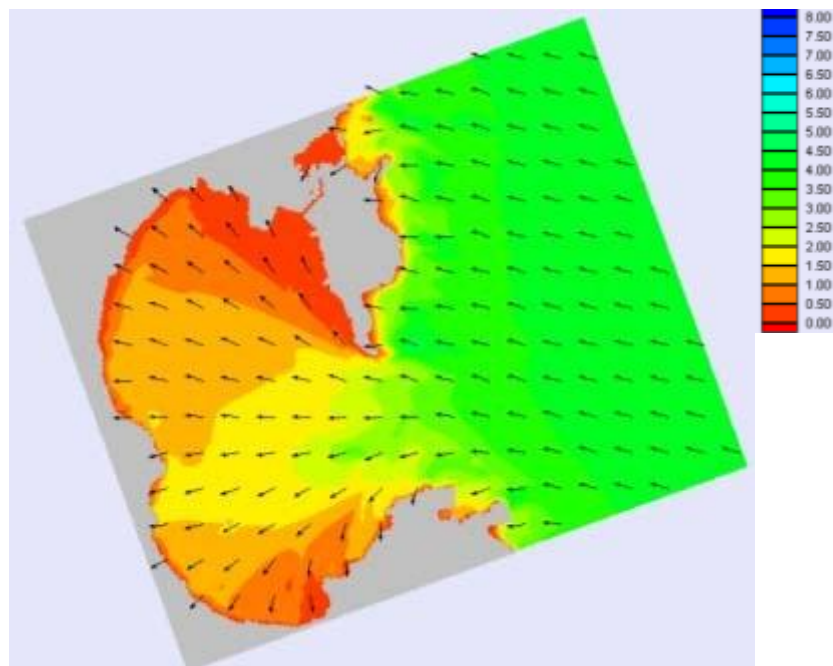
- l'onda che si propaga sottocosta e che proviene da una direzione appartenete al settore di traversia individuato si trasforma proponendosi in direzione d'attacco più vicina possibile all'ortogonale alla riva; in particolare i treni d'onda sottocosta in prossimità del punto P4 tendono a posizionarsi con direzioni comprese tra 127°N e 135°N.
- l'area dei frangenti è molto limitata all'interno del Porto Grande; il frangimento dell'onda si localizza a ridosso della costa in corrispondenza di fondali profondi circa 1 m.

Di seguito, per il punto di controllo P4, si riporta la tabella riepilogativa delle distribuzione ottenuta in seno alla propagazione dei treni d'onda associati a P=5gg/anno.

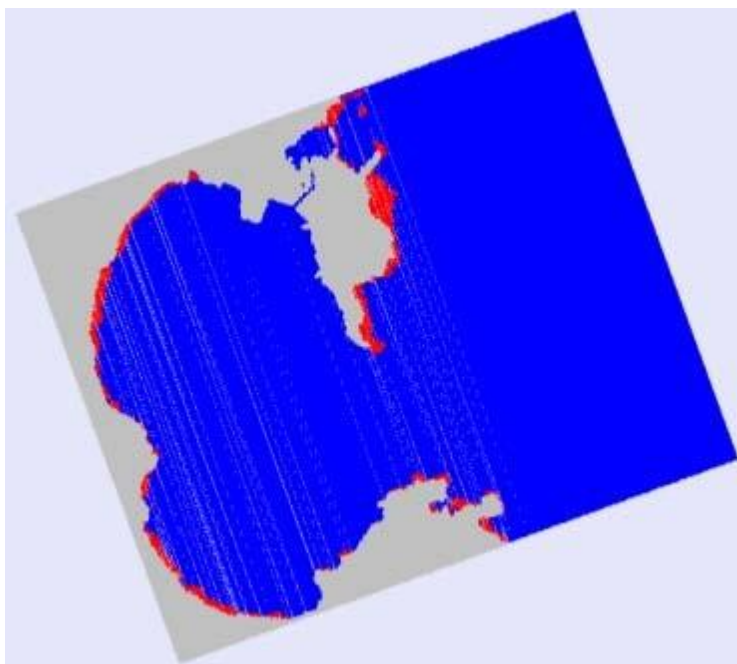
PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO - $P(h < H_s) = 5\text{gg/a}$					
AL LARGO			SOTTOCOSTA (P4)		
$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	D (°N)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	D (°N)
3.63	8.13	30	0.23	8.30	131
2.70	7.01	45	0.19	7.10	130
2.40	6.61	60	0.20	6.70	131
3.16	7.58	75	0.31	7.70	129
3.01	7.40	90	0.36	7.10	131
3.65	8.15	105	0.46	8.30	129
3.16	7.58	120	0.42	7.70	130
2.42	6.64	135	0.30	6.70	130
2.31	6.49	150	0.24	6.70	131
2.43	6.64	165	0.18	6.70	131

**Tabella 10.8.** Tabella di riepilogo delle grandezze caratteristiche del treno d'onda associato alla  $P=5\text{gg/a}$  al variare della direzione di attacco, misurate nel punto sottocosta 4.

A titolo esemplificativo si riportano i grafici relativi alla distribuzione delle altezze d'onda residue sottocosta e all'individuazione della fascia di frangenza ottenuti simulando l'onda associata alla probabilità di supermanto pari a  $5\text{gg/anno}$  per la direzione  $105^\circ\text{N}$ , a cui è associata il valore di altezza d'onda maggiore.



**Figura 10.9.** Trasformazione del treno d'onda associato a  $P=5\text{gg/a}$  per  $D=105^\circ\text{N}$  dal largo sottocosta. Distribuzione delle altezze residue



**Figura 10.10. Trasformazione del treno d'onda associato a  $P=5\text{gg/a}$  per  $D=105^\circ\text{N}$  dal largo sottocosta. Individuazione delle fasce di frangenza.**

## **11. PROPAGAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI DAL LARGO VERSO RIVA**

---

Al fine di ottenere precise informazioni riguardo la trasformazione delle onde caratteristiche degli eventi estremi dal largo sottocosta sono state effettuate 40 simulazioni tramite il modello di calcolo STWAVE.

Tali simulazioni sono state relative ai treni d'onda al variare del tempo di ritorno che assunto valori pari a 5, 25, 50 e 100 anni.

Sono stati quindi determinati:

- la distribuzione delle direzioni e dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo;
- la determinazione della fascia di frangenza.

Rimandando alla visione dei grafici suddetti per un esame completo della casistica esaminata, appare opportuno formulare le seguenti considerazioni:

- l'onda che si propaga sottocosta si trasforma proponendosi in direzione d'attacco più vicina possibile all'ortogonale alla riva; in particolare i treni d'onda in prossimità del punto di controllo 4, localizzato in prossimità del sito destinato ad ospitare le opere in progetto ( cfr. figura 10.5) tendono disporsi intono alla direzione 130°N;
- per fissata direzione, all'aumentare del tempo di ritorno R si osserva un aumento del valore di altezza d'onda sottocosta;
- per fissato R, le onde più elevate provengono dal settore 75°-120°N
- nei pressi del punto di controllo 4 (cfr. figura 10.5), il valore maggiore di altezza d'onda sottocosta è 0,77 m e si riscontra per tempo di ritorno R=100 anni e direzione al largo D=105°N.
- l'area dei frangenti è molto limitata all'interno del Porto Grande; il frangimento dell'onda si localizza a ridosso della costa in corrispondenza di fondali profondi circa 1,2 m.

Di seguito, per il punto di controllo 4 (cfr. figura 10.5), si riporta la tabella riepilogativa delle distribuzioni ottenute in seno alla propagazione degli eventi estremi di Siracusa dal largo verso riva al variare del tempo di ritorno R.

PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSONO - EVENTI ESTREMI						
	AL LARGO			SOTTOCOSTA (P4)		
R (anni)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	D (°N)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	D (°N)
5	3.28	7.72	30	0.25	7.70	131
25	4.41	8.95	30	0.28	9.10	133
50	4.81	9.35	30	0.31	9.10	132
100	5.17	9.69	30	0.34	10.00	131
5	4.37	8.91	45	0.32	9.10	133
25	6.21	10.63	45	0.43	11.10	134
50	6.86	11.16	45	0.46	11.10	133
100	7.45	11.64	45	0.50	11.10	132
5	3.90	8.41	60	0.35	8.30	131
25	5.31	9.82	60	0.41	10.00	133
50	5.80	10.26	60	0.44	10.00	134
100	6.25	10.66	60	0.47	11.10	133
5	3.85	8.36	75	0.38	8.30	133
25	5.31	9.82	75	0.50	10.00	133
50	5.91	10.37	75	0.52	10.00	132
100	6.52	10.89	75	0.55	11.10	132
5	4.15	8.68	90	0.47	8.30	132
25	5.31	9.83	90	0.60	10.00	132
50	5.73	10.20	90	0.63	10.00	132
100	6.10	10.53	90	0.66	11.10	131
5	3.96	8.48	105	0.49	8.30	132
25	5.40	9.90	105	0.62	10.00	133
50	5.87	10.33	105	0.72	10.00	132
100	6.31	10.70	105	0.77	11.10	133
5	3.00	7.38	120	0.40	7.10	131
25	4.00	8.52	120	0.50	8.30	132
50	4.34	8.88	120	0.53	9.10	131
100	4.66	9.20	120	0.55	9.80	132
5	2.27	6.43	135	0.29	6.30	131
25	3.20	7.63	135	0.37	7.70	132
50	3.52	8.00	135	0.40	7.70	131
100	3.82	8.34	135	0.43	8.30	132
5	1.36	4.97	150	0.18	5.00	130
25	1.99	6.01	150	0.22	5.90	131
50	2.21	6.33	150	0.24	6.20	131
100	2.41	6.62	150	0.25	6.60	130
5	1.79	5.71	165	0.15	5.90	130
25	3.39	7.85	165	0.23	7.70	130
50	4.08	8.61	165	0.28	8.30	131
100	4.75	9.29	165	0.31	9.10	132

Tabella 11.1. Tabella di riepilogo delle grandezze caratteristiche dei treno d'onda al variare della direzione di attacco D (°N) che del tempo di ritorno R(in anni), misurate nel punto sottocosta 4.

A titolo esemplificativo si riportano i risultati relative alle fasce di frangenza e alla distribuzione dei treni d'onda associati al tempo di ritorno R=5, 25, 50 e 100 anni per la direzione 105°N, che fornisce sottocosta i valori di altezza d'onda residua maggiori.

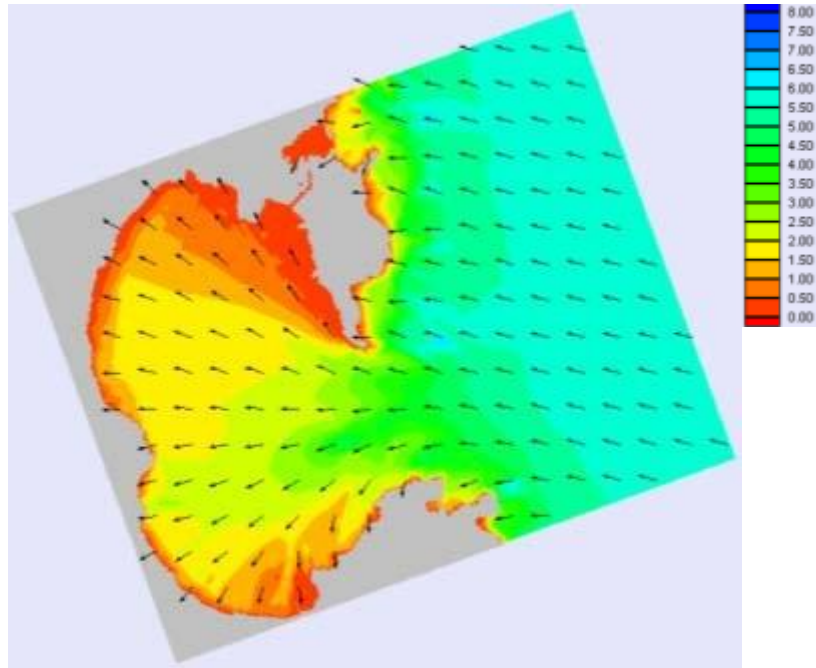


Figura 11.2. Trasformazione del treno d'onda ( $H_s=3,96m$ ;  $T_p=8,48s$ ;  $D=105^\circ N$ ;  $R=5$  anni) dal largo sottocosta. Distribuzione delle altezze residue

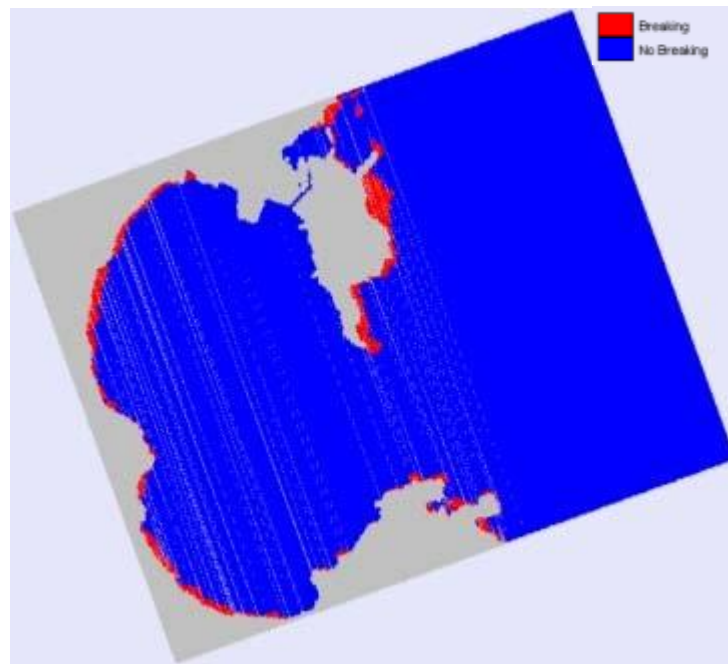


Figura 11.3. Trasformazione del treno d'onda ( $H_s=3,96m$ ,  $T_p=8,48s$ ;  $D=105^\circ N$ ;  $R=5$  anni) dal largo sottocosta. Individuazione delle fasce di Frangenza.

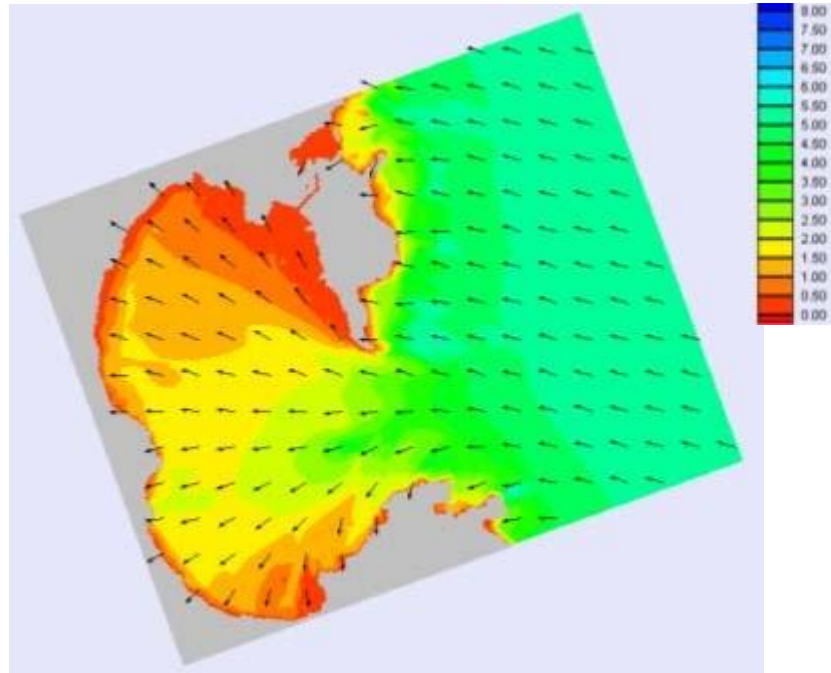


Figura 11.4. Trasformazione del treno d'onda ( $H_s=5,40\text{m}$ ;  $T_p=9,90\text{s}$ ;  $D=105^\circ\text{N}$ ;  $R=25\text{anni}$ ) dal largo sottocosta. Distribuzione delle altezze residue

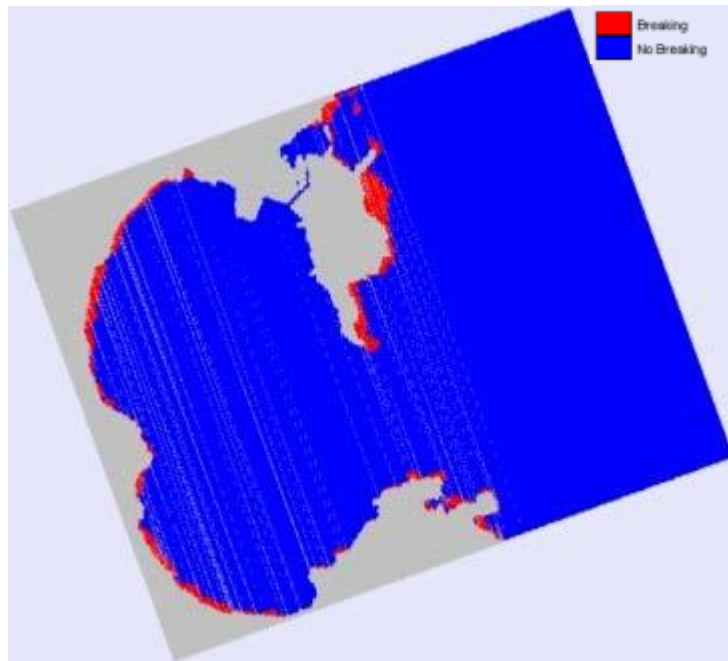


Figura 11.5. Trasformazione del treno d'onda ( $H_s=5,40\text{ m}$ ;  $T_p=9,90\text{s}$ ;  $D=105^\circ\text{N}$ ;  $R=25\text{anni}$ ) dal largo sottocosta. Individuazione delle fasce di Frangenza.

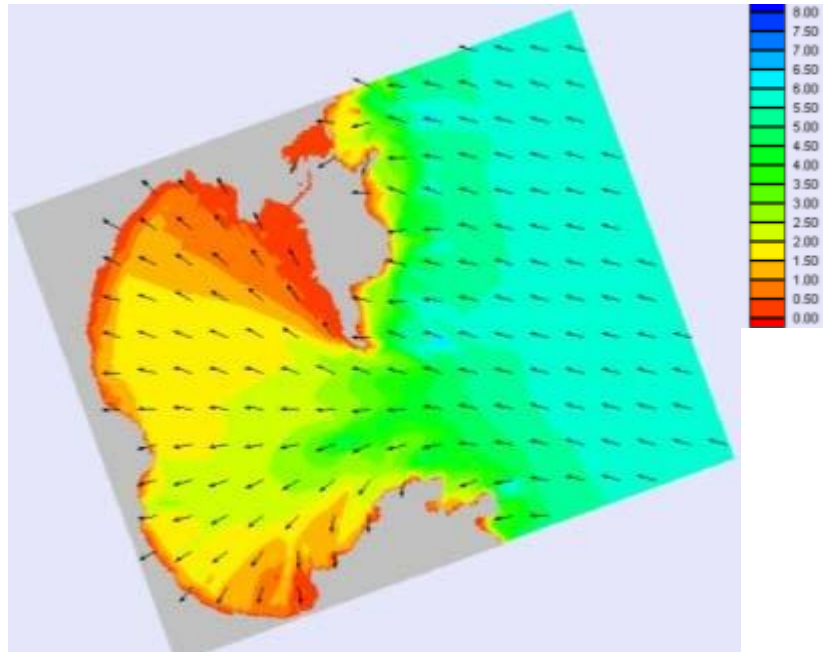


Figura 11.6. Trasformazione del treno d'onda ( $H_s=5,87m, T_p=10,83s, D=105^\circ N, R= 50$ anni) dal largo sottocosta. Distribuzione delle altezze residue

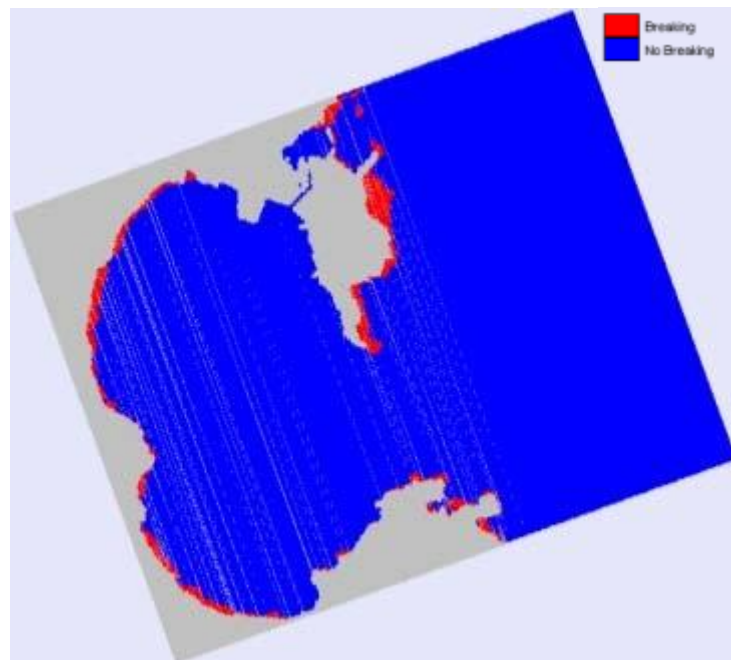


Figura 11.7. Trasformazione del treno d'onda ( $H_s=5,87 m, T_p=10,83s, D=105^\circ N, R= 50$ anni) dal largo sottocosta. Individuazione delle fasce di Frangenza.



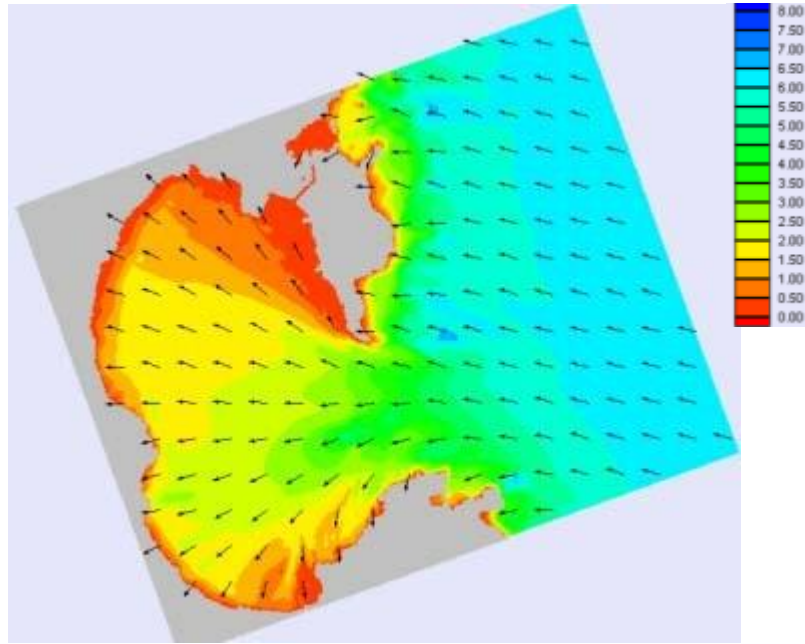


Figura 11.8. Trasformazione del treno d'onda ( $H_s=6,31$  m,  $T_p=10,90$  s,  $D=105^\circ N$ ,  $R=100$  anni) dal largo sottocosta. Distribuzione delle altezze residue

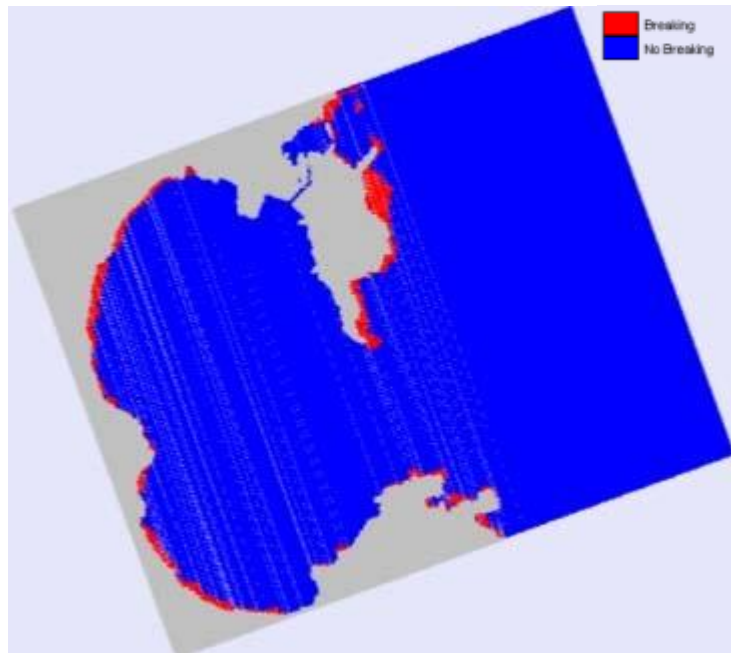


Figura 11.9. Trasformazione del treno d'onda ( $H_s=6,31$  m  $T_p=10,90$ s,  $D=105^\circ N$ ,  $R=100$  anni) dal largo sottocosta. Individuazione delle fasce di Frangenza.

## 12. ANALISI DELLE ONDE GENERATE DAL VENTO ALL'INTERNO DEL PORTO GRANDE

In questo capitolo sarà analizzato il fenomeno legato alla generazione del modo ondosso all'interno del Porto Grande, per via delle interazioni tra vento e superficie marina.

Dapprima verrà descritta la metodologia di riferimento per le analisi, per proseguire poi nella descrizione dei risultati ottenuti.

### 12.1 RICHIAMI TEORICI

La previsione dell'entità delle onde generate da vento sia in acque profonde che in acque basse sono state affrontate e sono stati sviluppati con metodi di calcolo sia per domini di mare aperto che per corpi idrici limitati per fetch (SPM, Vincent 1984; Smith 1991).

Il metodo di Smith valido per le previsioni relativi a corpi idrici limitati per fetch si differenzia rispetto al metodo SPM per la legge di resistenza utilizzata.

Le assunzioni base del metodo sono:

- le aliquote di energia legate alla presenza di altre tipologia di treni d'onda è trascurabile;
- la lunghezza massima del fetch deve essere minore di 75 miglia (dominio dei fetch "relativamente corti")
- intensità e direzione del vento costanti ( $D_i$  minore o uguale a 5 nodi;  $D_a^\circ$  minore o uguale a  $15^\circ$ )
- quota di osservazione dei dati anemometrici  $Z=10$  m;
- condizioni di stabilità atmosfera neutrali;
- coefficiente di resistenza  $C_d=0.001$

Ai fini della previsione della crescita dell'onda occorre conoscere non l'intensità del vento osservata  $U_{obs}$ , ma bensì quella relativa a  $Z=10$ m in condizioni di stabilità atmosferiche neutrali,  $U_e$ .

La velocità del vento modificata  $U_e$  viene calcolata secondo le teorie di Cardone (1976) e di Resio (1987), riportata per altro nel manuale di riferimento del software ACES, a cui si rimanda per maggiori chiarimenti.

In particolare si fa riferimento alla seguente espressione:

$$U_e = U^* (\ln 1000/z_o) - DT$$

In cui:

- $U^*$  è la velocità di attrito;
- $K$  è la costante di Von Karman;
- $z_o$  è la lunghezza di scabrezza superficiale,
- $DT$  è il gradiente di temperatura, indicatore delle condizioni di stabilità atmosferica (=0 se le condizioni sono neutrali).

Inoltre Vincent ha suggerito che  $U_e$  sia modificata in funzione degli effetti non lineari derivanti dal wind stress generato sulla superficie marina; facendo riferimento alla legge di resistenza di Garratt (1977)

$$t = r_a C_d U^2$$

in cui :

- $r$  è la densità dell'aria,
- $C_d = 0.001 (0.75 + 0.067U)$

L'intensità del vento in condizioni neutrali viene linearizzata tramite la seguente espressione:

$$U_a = U_e (C_d / 0.001)^{0.5}$$

La previsione delle onde generate da vento segue 4 formulazioni diverse a seconda della tipologia di bacino.

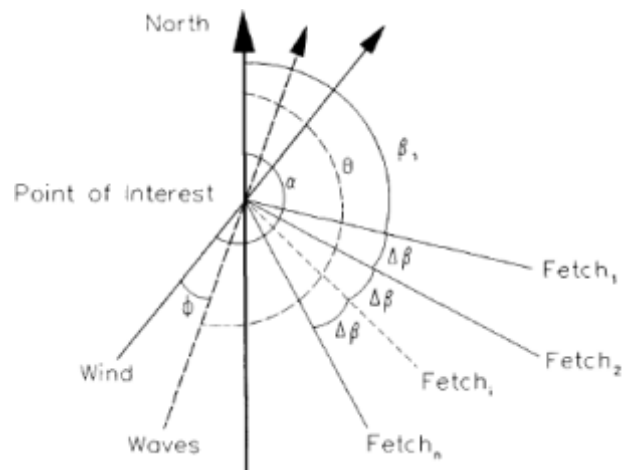
Si hanno 4 casi:

- bacini di grandi dimensioni (bacini di mare aperto) :
  - di acque profonde
  - di acque basse
- bacini di piccole dimensioni (bacini limitati per fetch):
  - di acque profonde
  - di acque basse

Nei bacini di mare aperto la generazione delle onde è limitata dalle dimensioni della perturbazione meteorologica e la larghezza del fetch è dello stesso ordine di grandezza della lunghezza. La previsione dell'onda generata da vento può essere limitata sia per durata sia per fetch e viene effettuata in funzione della lunghezza del fetch lungo la direzione del vento.

Nei corpi idrici limitati o di geometria complessa, quali laghi, fiumi, baie invece viene applicata la metodologia di (SMITH 1991) dello sviluppo dell'onda limitata per fetch lungo la direzione "OFF-Wind", in funzione della geometria del bacino.

Il sistema di riferimento adottato prevede un sistema ad assi radiali, con centro nel punto di interesse e in cui il verso positivo è quella uscente; la direzione 0 coincide con la direzione del Nord Geografico e l'avanzamento delle gradazioni è in senso orario.



**Figura 12.1. Sistema di riferimento adottato per la previsione delle onde generate dal vento**

Secondo il metodo, il periodo dell'onda, espresso in funzione delle lunghezze del fetch lungo le direzioni del vento, è quello massimo.

Secondo questo approccio la geometria del bacino viene descritta dalle lunghezze radiali del fetch dal punto di interesse alla linea di costa.

La direzione dell'onda generata dal vento si ottiene trovando il punto di massimo della funzione

$$F_f^{0.28} (\cos f)^{0.44}$$

L'angolo  $f$  è definito come l'angolo di direzione del vento associato alla lunghezza del Fetch efficace  $F_f$ ; in particolare  $f_{max}$  è l'angolo che massimizza l'espressione e rappresenta l'angolo tra l'onda generata e il vento generatore.

Di seguito si riporta la procedura a step seguita per effettuare la previsione delle onde generate di vento sia nel caso di bacini di acque profonde sia di bacini in acque basse. Per ognuno dei due casi si riportano le formulazioni riferite alle condizioni di mare aperto ( OPEN WATER) che di bacino chiuso ( RESTRICTED FETCH).

### ACQUE PROFONDE

La previsione delle onde generate da vento in acque profonde viene ricondotta agli all'analisi delle limitazioni al loro sviluppo per via della durata della perturbazione o della lunghezza del fetch.

Ecco la procedura da implementare in ognuno dei due casi.

- Determinazione della durata minima,  $t_{fetch}$ ,

<b>Open Water</b>	<b>Restricted Fetch</b>
$t_{fetch} = 68.8 \frac{F^{2/3}}{g^{1/3} U_a^{1/3}} \quad (27)$	$t_{fetch} = 51.09 \frac{F^{0.72}}{g^{0.28} \hat{U}_a^{0.44}} \quad (28)$

- Determinazione delle caratteristiche dell'onda:

*onde limitate per durata*

<b>Open Water</b>	Duration Limited	<b>Restricted Fetch</b>
$H = 0.0000851 \left( \frac{U_a^2}{g} \right) \left( \frac{gt_i}{U_a} \right)^{5/7} \quad (29)$		$H = 0.000103 \left( \frac{\hat{U}_a^2}{g} \right) \left( \frac{gt_i}{\hat{U}_a} \right)^{0.69} \quad (30)$
$T = 0.0702 \left( \frac{U_a}{g} \right) \left( \frac{gt_i}{U_a} \right)^{0.411} \quad (31)$	$(t_i < t_{fetch})$	$T = 0.082 \left( \frac{\hat{U}_a}{g} \right) \left( \frac{gt_i}{\hat{U}_a} \right)^{0.39} \quad (32)$

*onde limitate per fetch.*

$H = 0.0016 \left( \frac{U_a^2}{g} \right) \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{1/2} \quad (33)$	Fetch Limited	$H = 0.0015 \left( \frac{\hat{U}_a^2}{g} \right) \left( \frac{gF}{\hat{U}_a^2} \right)^{1/2} \quad (34)$
$T = 0.2857 \left( \frac{U_a}{g} \right) \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{1/3} \quad (35)$	$(t_i \geq t_{fetch})$	$T = 0.3704 \left( \frac{\hat{U}_a}{g} \right) \left( \frac{gF}{\hat{U}_a^2} \right)^{0.28} \quad (36)$

- Determinazione delle condizioni di completo sviluppo

<b>Open Water</b>	Fully Developed	<b>Restricted Fetch</b>
$H_{fd} = 0.2433 \left( \frac{U_a^2}{g} \right) \quad (37)$		$H_{fd} = 0.2433 \left( \frac{\hat{U}_a^2}{g} \right) \quad (38)$
$T_{fd} = 8.134 \left( \frac{U_a}{g} \right) \quad (39)$		$T_{fd} = 8.134 \left( \frac{\hat{U}_a}{g} \right) \quad (40)$

- Verifica che le condizioni di completo sviluppo non vengano superate:

$$H_{m_0} = \min(H, H_{fd})$$

$$T_p = \min(T, T_{fd})$$

### ACQUE BASSE:

La previsione delle onde generate dal vento in acque basse viene ricondotta alle formule relative alle formule adottate al caso delle acque profonde con fetch limitati, ma modificate tenendo conto degli effetti dovuti all'attrito del fondo.

Le formule valide per i bacini di mare aperto sono :

$$H_{m_0} = \frac{U_a^2}{g} 0.283 \tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right] \tanh \left\{ \frac{0.0016 \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{0.5}}{\tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right]} \right\}$$

$$T_p = \frac{U_a}{g} 7.54 \tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right] \tanh \left\{ \frac{0.2857 \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{0.333}}{\tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right]} \right\}$$

Le formule valide per i bacini chiusi sono:

$$H_{m_0} = \frac{U_a^2}{g} 0.283 \tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right] \tanh \left\{ \frac{0.0015 \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{0.5}}{\tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right]} \right\}$$

$$T_p = \frac{U_a}{g} 7.54 \tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right] \tanh \left\{ \frac{0.3704 \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{0.28}}{\tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right]} \right\}$$

## 12.2 DESCRIZIONE DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE E DEI RISULTATI

Per il sito di Porto Grande di Siracusa, al fine di caratterizzare il clima medio del regime del vento, si è fatto riferimento ai dati acquisiti dalla Aeronautica Militare.

Il sito di misura si trova a Siracusa nel punto di coordinate geografiche:

- LATITUDINE:37.07°N
- LONGITUDINE:15.28°E

Tali dati sono compatibili con la serie anemologica della serie MEDATLAS relativa al periodo 1991-2002, nel punto più prossimo al sito di progetto aventi coordinate geografiche:

- LATITUDINE 37,00° N
- LONGITUDINE 16,00° E

Le analisi hanno permesso di individuare i valori di intensità e direzione del vento associato alla frequenza di occorrenza maggiore sia stagionale che globale, nonché i valori estremi presenti, sia stagionale che globale.

Di seguito si riporta la tabella riepilogativa di questi dati:

i (m/s)	D(°N)
18	240
18	90
18	0
16	150
20	225
20	90
12	225
12	270

**Tabella 12.2. Valori caratteristici dei venti con la maggiore frequenza di occorrenza**

i (m/s)	D(°N)
9	270
4	330
3	210
3	285
4	345
3	345
4	330
5	255
6	15
4	315

**Tabella 12.3. Valori caratteristici estremi**

Di seguito si riportano anche le rose dei venti secondo il sistema di riferimento oceanografico, a seguito delle analisi di tipo stagionale e globale effettuate.

Ogni cerchio corrisponde ad un passo percentuale del 2,5%.

Si osserva che, per il sistema di riferimento adottato, un vento che soffia da SO (135°N) viene indicato con direzione NE (45°N).

L' intensità di vento è riportata in m/s.



**Figura 12.4. Schema del sistema di riferimento oceanografico.**

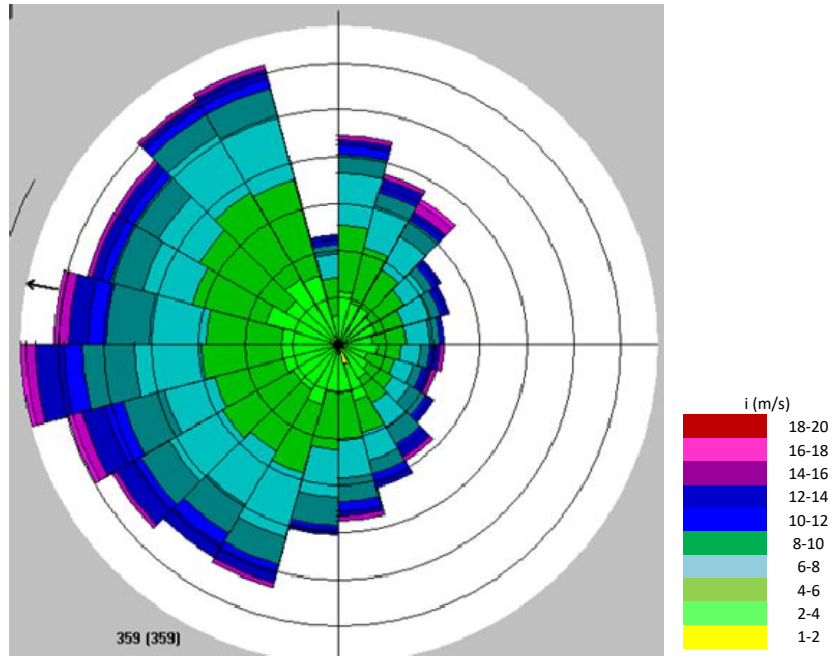


Figura 12.5. Rosa dei venti. Analisi globale

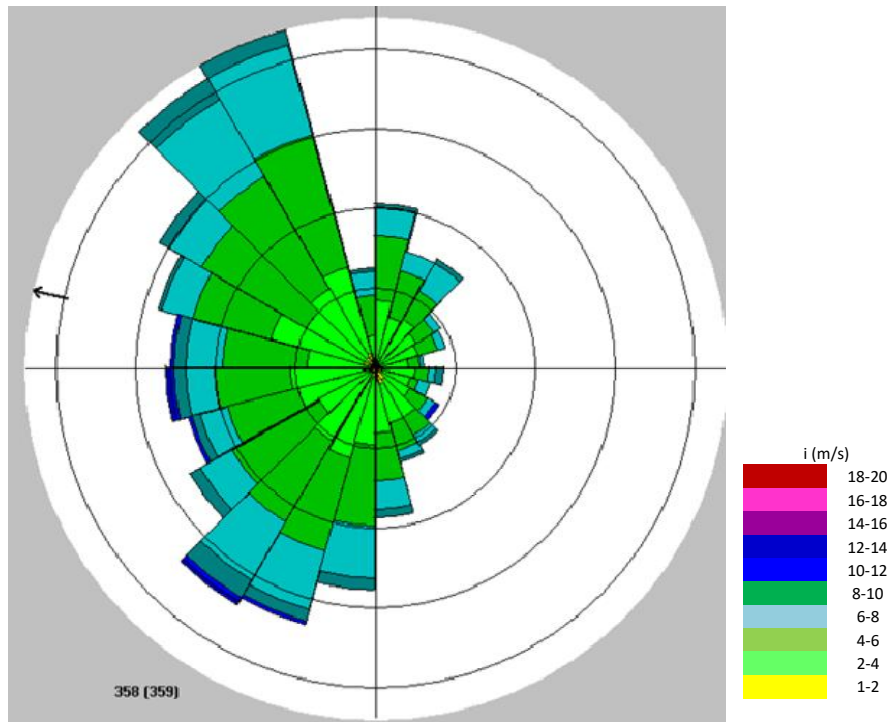


Figura 12.6. Rosa dei venti. Stagione estiva.

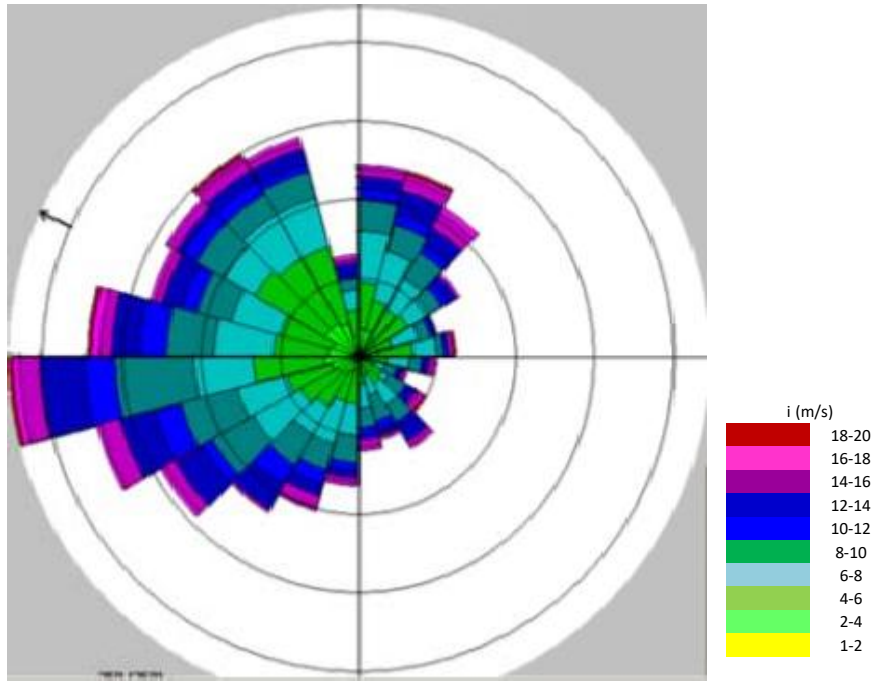


Figura 12.7. Rosa dei venti. Stagione invernale.

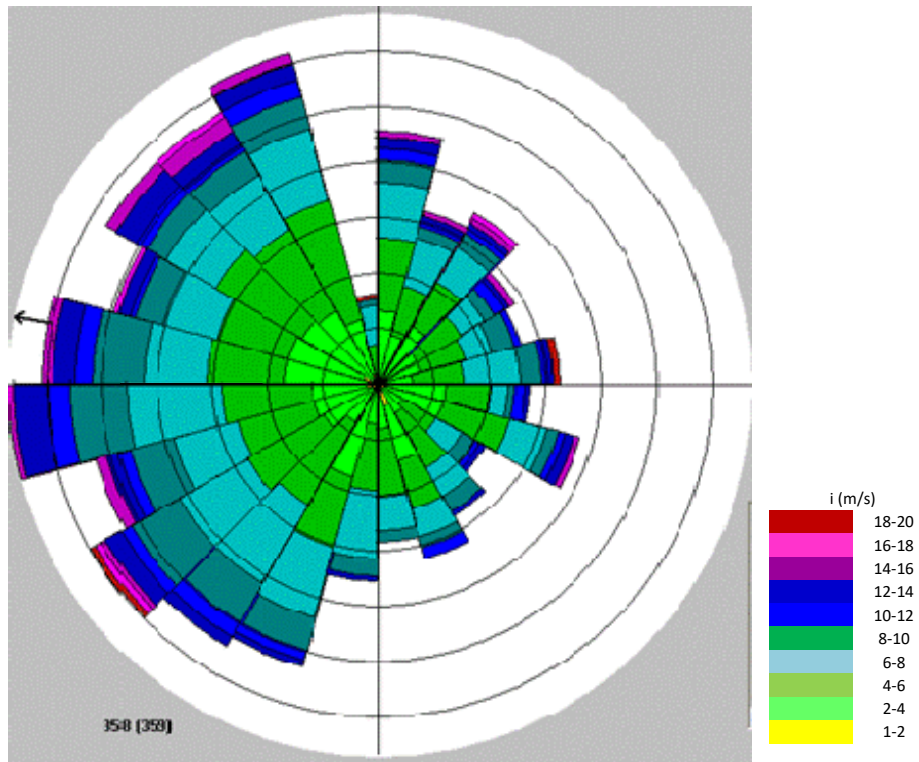


Figura 12.8. Rosa dei venti Stagione primaverile.



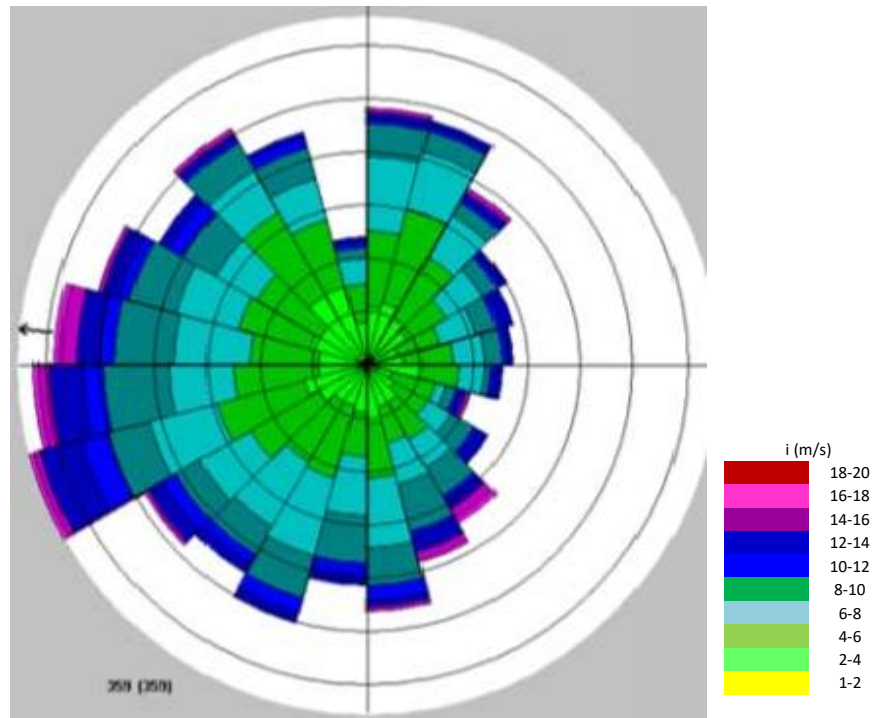
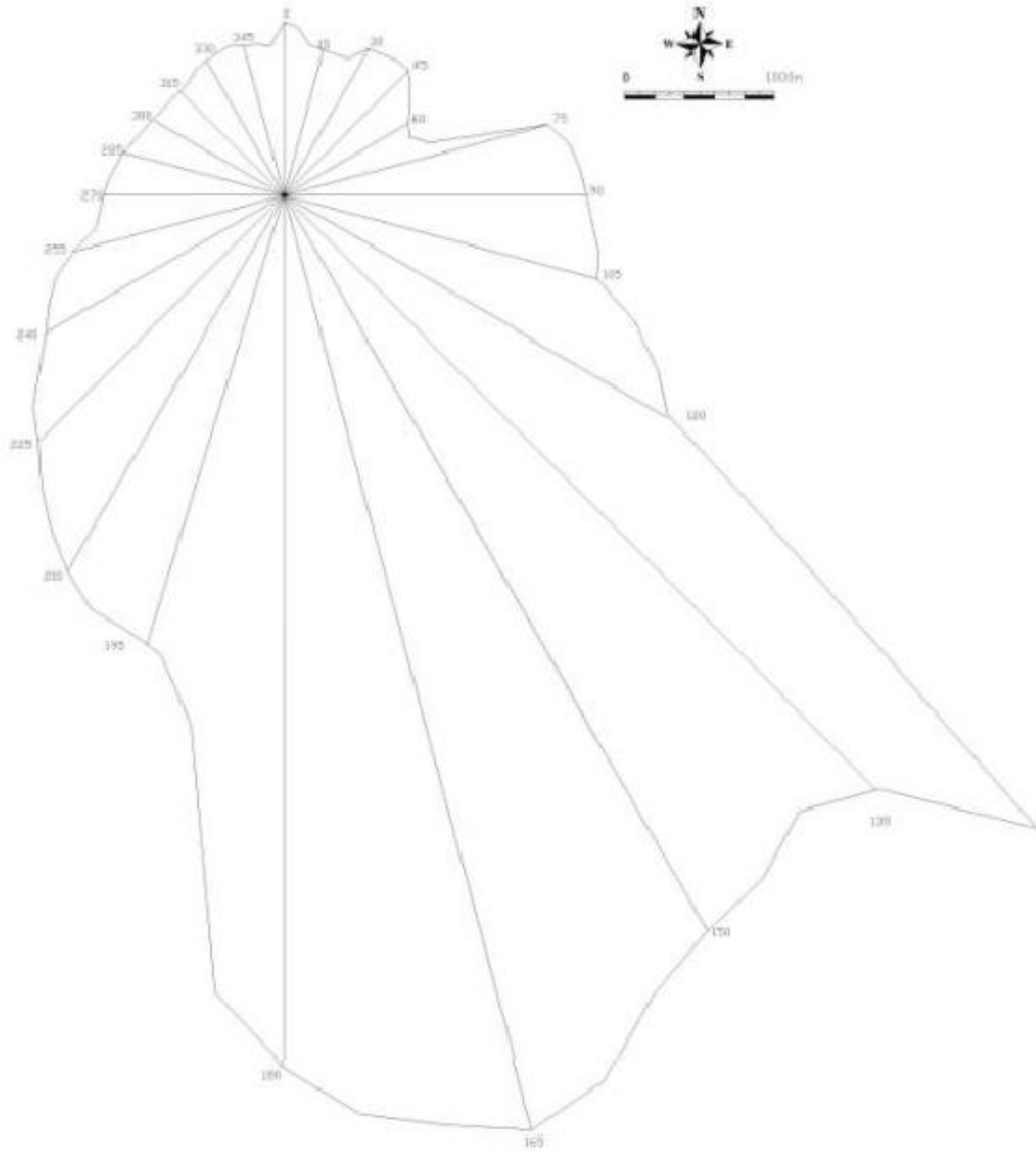


Figura 12.9. Rosa dei venti Stagione autunnale.

Sono state quindi determinate le distanze del fetch geografico all'interno del Porto Grande.

L'origine del sistema di riferimento radiale è il punto di controllo P4 già utilizzato nelle simulazioni STWAVE (cfr. figura 10.5); la discretizzazione del dominio è stata effettuata in senso orario a partire dal nord geografico.

Di seguito si riportano lo schema semplificato e la tabella di riepilogo delle lunghezze di mare libero determinate.



**Figura 12.10. Schema semplificato per l'individuazione delle lunghezze di mare libero all'interno del Porto Grande, rispetto all'ubicazione del punto di controllo P4.**

D(°N)	F (m)
0	585
10	511
20	504
30	570
40	590
50	552
60	484
70	516
80	972
90	1015
100	1070
110	1257
120	1486
130	3283
140	2686
150	2839
160	3150
170	3155
180	2911
190	1794
200	1548
210	1553
220	1259
230	1096
240	923
250	814
260	642
270	604
280	572
290	542
300	509
310	495
320	514
330	522
340	533
350	514

**Tabella 12.11. Tabella delle distanze di mare libero all'interno del porto grande di Siracusa, rispetto all'ubicazione di punto di controllo P4.**

Si è quindi passati alla valutazione delle onde generate da vento all'interno del Porto Grande nel punto di controllo P4.

Per ognuna delle 8 simulazioni effettuate sono stati indicati:

- intensità e direzione del vento osservato;
- quota di osservazione
- latitudine di osservazione
- profondità dei fondali lungo la direzione del vento indagata
- lunghezze del fetch all'interno del bacino

Inoltre date le caratteristiche del bacino (bacino chiuso con profondità media intorno ai -10 m rispetto al l.m.m.) si è optato per la modalità di simulazioni in “shallow water” limitate per fetch.

Per ogni intensità di vento indagata, sono stati simulati più stati del mare in funzione della durata dell'evento; in particolare le simulazioni effettuate hanno permesso di individuare la durata caratteristica “dello stato di mare completamente sviluppato”, cioè quella durata caratteristica dell'evento meteorologico oltre la quale le caratteristiche dell'onda generata da vento rimangono completamente costanti.

In particolare sono simulate durate degli eventi pari a 1, 3, 6 e 9 ore.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva relativa alla previsione delle onde generate da vento nel punto di interesse al variare delle durate.

i (m/s)	d(h)	D(°N)	H <sub>s</sub> (m)	T(s)	D <sub>s</sub> (°N)
18	1	240	0.31	1.81	265
18	1	90	0.29	1.65	62
18	1	0	0.41	2.54	351
16	1	150	0.21	1.49	153
20	1	225	0.31	1.81	262
20	1	90	0.33	1.86	62
12	1	225	0.16	1.15	262
12	1	270	0.25	1.72	310

i (m/s)	d(h)	D(°N)	H <sub>s</sub> (m)	T(s)	D <sub>s</sub> (°N)
18	3	240	0.33	2.11	265
18	3	90	0.31	1.63	62
18	3	0	0.43	2.61	352
16	3	150	0.48	2.43	160
20	3	225	0.44	2.61	180
20	3	90	0.48	2.42	120
12	3	225	0.19	1.17	180
12	3	270	0.36	1.16	250

i (m/s)	d(h)	D(°N)	H <sub>s</sub> (m)	T(s)	D <sub>s</sub> (°N)
18	6	240	0.35	2.01	240
18	6	90	0.42	2.27	130
18	6	0	0.43	2.61	7
16	6	150	0.48	2.43	160
20	6	225	0.44	2.71	180
20	6	90	0.48	2.42	130
12	6	225	0.22	1.21	181
12	6	270	0.39	1.39	242

i (m/s)	d(h)	D(°N)	H <sub>s</sub> (m)	T(s)	D <sub>s</sub> (°N)
18	9	240	0.35	2.01	240
18	9	90	0.42	2.27	130
18	9	0	0.43	2.61	7
16	9	150	0.48	2.43	160
20	9	225	0.44	2.71	180
20	9	90	0.48	2.42	130
12	9	225	0.22	1.21	181
12	9	270	0.39	1.39	242

Tabella 12.12. Onde generate dal vento con le caratteristiche anemologiche estreme nel punto P4.

i (m/s)	d(h)	D(°N)	H <sub>s</sub> (m)	T(s)	D <sub>s</sub> (°N)
9	1	270	0.12	1.21	310
4	1	330	0.03	0	340
3	1	210	0.03	0.61	177
3	1	285	0.02	0.57	311
4	1	345	0.03	0.6	345
3	1	345	0.01	0.42	345
4	1	330	0.03	0.61	340
5	1	255	0.05	0.83	308
6	1	15	0.05	0.85	354
4	1	315	0.03	0.59	314

i (m/s)	d(h)	D(°N)	H <sub>s</sub> (m)	T(s)	D <sub>s</sub> (°N)
9	3	270	0.12	1.21	242
4	3	330	0.03	0.6	335
3	3	210	0.03	0.64	177
3	3	285	0.02	0.57	311
4	3	345	0.03	0.6	342
3	3	345	0.01	0.42	342
4	3	330	0.03	0.61	333
5	3	255	0.05	0.83	225
6	3	15	0.05	0.85	30
4	3	315	0.03	0.59	320

i (m/s)	d(h)	D(°N)	H <sub>s</sub> (m)	T(s)	D <sub>s</sub> (°N)
9	6	270	0.12	1.21	242
4	6	330	0.03	0.6	333
3	6	210	0.04	0.88	177
3	6	285	0.04	0.94	311
4	6	345	0.05	1.04	342
3	6	345	0.03	0.61	342
4	6	330	0.03	0.61	333
5	6	255	0.05	0.83	225
6	6	15	0.05	0.85	30
4	6	315	0.03	0.59	320

i (m/s)	d(h)	D(°N)	H <sub>s</sub> (m)	T(s)	D <sub>s</sub> (°N)
9	9	270	0.12	1.21	242
4	9	330	0.03	0.6	333
3	9	210	0.04	0.88	177
3	9	285	0.04	0.94	311
4	9	345	0.05	1.04	342
3	9	345	0.03	0.61	342
4	9	330	0.03	0.61	333
5	9	255	0.05	0.83	225
6	9	15	0.05	0.85	30
4	9	315	0.03	0.59	320

Tabella 12.13. Onde generate dal vento associato alla frequenze di accadimento maggiori nel punto P4.

Dai risultati si evince che, in termini di analisi di onde a maggiore frequenza di accadimento, il vento caratterizzato da  $i=9$  m/s  $d=3$  h,  $D=270^\circ\text{N}$  a cui è associata la con frequenza di accadimento maggiore genera nel punto di interesse l'onda più gravosa caratterizzata da  $H_s=0.12$  m e  $T=1,21$ s e  $D_s=310^\circ\text{N}$ ; la durata di 3 ore risulta essere quella che consente il completo sviluppo dei marosi.

Similmente in termini di eventi anemometrici estremi; il vento caratterizzato da  $i=16$  m/s  $d=6$  h,  $D=150^\circ\text{N}$ , genera nel punto di interesse l'onda più gravosa caratterizzata da  $H_s=0.48$  m e  $T=2,43$  s e  $D_s=160^\circ\text{N}$ ; in termini di eventi estremi la durata di 6 ore risulta essere quella che consente il completo sviluppo dei marosi.

Si osserva che tutti i treni d'onda generati da vento all'interno del Porto Grande, valutati a partire dai dati anemometrici della stazione di misura di Siracusa, risultano essere meno gravosi rispetto a quelli generati all'esterno del Porto Grande e trasposti sottocosta nel punto di controllo scelto (cfr. capitoli 10 e 11).

Al fine quindi della valutazione degli effetti degli stati ondosi totalmente sviluppati all'interno del Porto Grande, che possono cumularsi a quelli che si propagano dall'alto mare, si può concludere che questi potranno influire solo marginalmente e con frequenza molto ridotta sui secondi.

## 13. STUDIO DELL'AGITAZIONE PORTUALE

---

In funzione delle caratteristiche delle opere da realizzare, sono state sviluppate indagini di tipo numerico ed empirico con lo scopo di individuare quale sia il dispositivo tale da garantire che le condizioni di agitazione residua verifichino gli standard internazionali, come quelli suggeriti dal P.I.A.N.C.

Dapprima sarà introdotto brevemente un inquadramento generale sui fenomeni in gioco, sul modello numerico utilizzato e sugli standard internazionali da rispettare; in seguito verranno descritte le analisi condotte al fine di individuare la configurazione ottimale delle opere in progetto.

### 13.1 DIFFRAZIONE ED EFFETTI COMBINATI

---

Le informazioni fondamentali per valutare le condizioni di agitazione nell'ambito di un bacino sono l'altezza, il periodo e la direzione dell'onda in ciascun punto di esso; dal momento che, come nella quasi totalità dei casi, non sono disponibili registrazioni dirette di queste grandezze nell'ambito del sito in studio, è necessario far riferimento ad un modello di trasformazione in grado di trasferire le informazioni relative alle onde al largo, ottenute nei capitoli precedenti, al sito di interesse.

Con lo spostamento dell'onda dalla zona delle acque profonde (rapporto tra lunghezza dell'onda e profondità minore o uguale a 2) alla zona delle acque basse, i parametri fondamentali subiscono delle variazioni principalmente a seguito dei fenomeni rifrattivi, diffrattivi e riflessivi.

Il fenomeno della diffrazione consiste nel trasferimento di energia lateralmente rispetto alla cresta dell'onda; esso risulta evidente allorché un treno d'onda intercettato da un ostacolo (molo, promontorio etc.) pone in oscillazione la massa liquida dello specchio acqueo retrostante l'ostacolo stesso, con onde di espansione laterale radiali aventi per centro l'estremità di questo.

L'approccio tradizionalmente usato nei decenni passati (*wave ray theory*), secondo il quale l'energia del moto ondoso può trasferirsi esclusivamente in direzione normale alle creste dell'onda, trascura di fatto la presenza dei fenomeni diffrattivi nella zona di transizione, attribuendo la modifica delle caratteristiche dell'onda esclusivamente a fenomeni rifrattivi.

Nell'ambito della zona costiera, e più ancora all'interno di bacini protetti, si risentono pesantemente gli effetti combinati della diffrazione e della riflessione, potendosi questi sommare in modo tale da dar luogo a condizioni peggiori rispetto a quelle presenti a largo (risonanza).

A partire dagli anni '80, i ricercatori impegnati nel campo dell'ingegneria costiera hanno riconosciuto l'importanza degli effetti combinati della rifrazione e della diffrazione da una parte, della diffrazione e della riflessione dall'altra, e hanno cominciato a sviluppare teorie e modelli che ne potessero tener conto; esiste oggi una copiosa serie di teorie disponibili che consentono di descrivere in maniera appropriata i fenomeni sopra richiamati, che caratterizzano il moto ondoso nella sua migrazione da acque profonde ad acque basse; tra queste, una delle più efficaci è la *mild slope equation*, equazione differenziale alle derivate parziali di tipo ellittico, mediata sulla profondità, alla base della quale sussiste l'ipotesi che le variazioni della profondità del fondale nell'ambito di una lunghezza d'onda siano contenute, da cui la dizione "*mild slope*"; in pratica, simulazioni numeriche confrontate con esperienze di pieno campo, hanno dimostrato che la *mild slope equation* è in grado di fornire soluzioni accurate in situazioni in cui la pendenza del fondale vale al massimo 1:3.



## 13.2 MODELLO DI CALCOLO UTILIZZATO

Il modello numerico utilizzato per lo studio dei fenomeni in questione è CGWAVE, modello agli elementi finiti messo a punto da Zeki Demirbilek e Vijay Panchang; come confermato da numerosi studi presenti in letteratura, il modello rappresenta oggi uno degli strumenti più efficaci per studiare l'agitazione interna di un bacino portuale.

Le ipotesi semplificative introdotte nella formulazione del modello, da tenere ben presente per una corretta interpretazione dei risultati, possono essere così sintetizzate:

- non avviene trasmissione dell'onda attraverso le barriere frangiflutti;
- non sussiste il fenomeno dell'overtopping delle strutture;
- sono trascurati gli effetti sulla propagazione dell'onda legati alla presenza delle correnti;
- i fenomeni diffrattivi in corrispondenza delle estremità delle strutture sono assimilati a quelli che si verificano nel caso di parete verticale caratterizzata da un dato coefficiente di riflessione.

Il modello è in grado di simulare:

- gli effetti combinati della rifrazione e della diffrazione;
- l'effetto dissipativo legato all'attrito del fondo;
- l'effetto dissipativo dovuto al frangimento dell'onda;
- la propagazione di onde non lineari.

Il modello simula di fatto la propagazione di onde regolari (monocromatiche); lo studio delle onde irregolari può farsi combinando opportunamente i risultati relativi a casi diversi di onde regolari.

### 13.2.1 Equazioni di governo

L'equazione di governo, come precedentemente discusso, è la *mild slope equation*; essa può scriversi nella seguente forma:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \eta^{\wedge}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \eta^{\wedge} = 0$$

dove:

- $\eta^{\wedge} = \eta^{\wedge}(x, y)$  è la surface elevation function, funzione complessa a partire dalla quale può essere derivata l'altezza d'onda;
- $\sigma$  è la frequenza d'onda;
- $C = C(x, y)$  è la velocità di fase, pari al rapporto  $\sigma / k$  ;
- $C_g = \frac{C}{n} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$  è la velocità di gruppo, pari a  $\partial \sigma / \partial k = nC$ , con  $n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$ ;
- $k = k(x, y)$  è il numero d'onda ( $= 2\pi / L$ ), dipendente dalla profondità  $d(x, y)$  per mezzo della relazione:
- $\sigma^2 = gk \tanh(kd)$

La *mild slope equation* è in grado di descrivere analiticamente i fenomeni della rifrazione, della diffrazione e della riflessione di un'onda, nell'ambito di una regione costiera di forma qualunque.

Dal momento che anche altri fenomeni influenzano il comportamento dell'onda nella zona costiera, la *mild slope equation* può essere modificata in maniera tale da includere gli effetti:

- della dissipazione energetica per l'attrito del fondale (Dalrymple et al, 1984; Chen, 1986; Liu e Tsay, 1985),
- del frangimento dell'onda (Dally et al., 1985; De Girolamo et al., 1988);

L'equazione risultante in questo caso si può scrivere nella forma:

$$\nabla \cdot (CC \nabla \eta) + \left( \frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma \gamma \right) \eta = 0$$

dove  $w$  è un fattore di attrito e  $\gamma$  è un parametro di frangimento dell'onda; per il parametro  $w$  il modello utilizza l'espressione proposta da Dalrymple et al. (1984):

$$w = \left( \frac{2n\sigma}{k} \right) \left[ \frac{2f_r a k^2}{3\pi (2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right]$$

dove  $a$  ( $= H/2$ ) è l'ampiezza d'onda ed  $f_r$  è un coefficiente di attrito dipendente dal numero di Reynolds e dalla scabrezza del fondale (Madsen, 1976, Dalrymple et al., 1984); valori usuali per  $f_r$  sono dello stesso ordine di grandezza del coefficiente di Manning.

Per il parametro  $\gamma$  si utilizza la seguente espressione (Dally et al., 198; Demirbilek, 1994; Demirbilek et al., 1996):

$$\gamma = \frac{\chi}{d} \left( 1 - \frac{\Gamma^2 d^2}{4a^2} \right)$$

dove  $\chi$  è una costante il cui valore può porsi pari a 0.15 (Dally et al, 1985), e  $\Gamma$  è un parametro sperimentale a cui si attribuisce il valore 0,4.

Oltre ai meccanismi sopracitati, la *mild slope equation* è in grado di simulare onde non lineari, per mezzo dell'adozione di una relazione tra frequenza d'onda, numero d'onda e profondità, che tenga conto anche dell'ampiezza d'onda:

$$\sigma^2 = gk \left[ 1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 kd \right] \tanh \left\{ kd + ka F_2 \right\}$$

Con:

$$F_1 = \frac{\cosh(4kd) - 2 \tanh^2(kd)}{8 \sinh^4(kd)} \quad \text{e} \quad F_2 = \left( \frac{kd}{\sinh(kd)} \right)^4$$

### 13.2.2 Condizioni al contorno

Lungo una parete verticale impermeabile, la condizione che il flusso normale alla superficie stessa sia nullo, è matematicamente espressa dalla relazione  $\partial \hat{\eta} / \partial n = 0$ . Nel caso di una parete parzialmente riflettente l'espressione diventa:

$$\frac{\partial \hat{\eta}}{\partial n} = \alpha \hat{\eta},$$

dove  $\alpha = \alpha_1 + i\alpha_2$  è un coefficiente complesso, che può essere messo in relazione al coefficiente di riflessione del contorno ( $K_r$ ) per mezzo della seguente espressione (Tsay e Liu, 1983; Chen e Houston, 1987):

$$\alpha = ik \frac{1 - k_r}{1 + k_r};$$

Il dominio di calcolo, nella direzione del mare aperto, è delimitato da un arco di circonferenza centrato in corrispondenza del *waypoint* del bacino portuale; lungo tale porzione del contorno si assume che le onde in uscita si propaghino all'infinito; tale condizione è analiticamente espressa dal soddisfacimento della seguente relazione (*Sommerfield Radiation Condition*):

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left( \frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \hat{\eta}_s \rightarrow 0$$

dove  $\hat{\eta}_s$  è lo *scattering wave potential*.

Può dimostrarsi (May, 1983) che l'espressione per  $\hat{\eta}_s$  che sia soluzione della *mild slope equation* e che soddisfi la condizione precedente può scriversi come:

$$\hat{\eta}_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) (\alpha_n \cos n\Theta + \beta_n \sin n\Theta)$$

dove  $H_n(kr)$  rappresentano i valori delle funzioni di Hankel del primo tipo calcolati nel punto  $kr$ ; l'espressione vista per  $\hat{\eta}_s$  è valida nell'ipotesi in cui:

- la profondità del fondale nella regione esterna al dominio si mantenga costante,
- i tratti di contorno della regione esterna A0-A1 e A2-A3 (cfr. Figura 13.1) siano rettilinei, appartengano alla stessa retta di sostegno e possano considerarsi totalmente riflettenti.

Per superare le limitazioni imposte dalle ipotesi suddette, alcuni autori (Xu, Panchang e Demirbilek, 1996) hanno proposto un modo alternativo di trattare il contorno della regione esterna; in particolare gli autori suggeriscono l'utilizzo della seguente approssimazione parabolica:

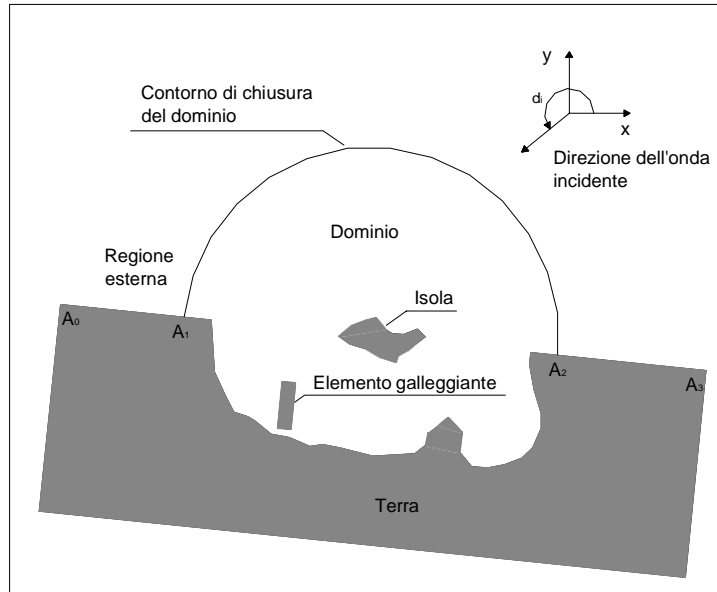
$$\frac{\partial \hat{\eta}_s}{\partial r} + \rho \hat{\eta}_s + q \frac{\partial \hat{\eta}_s^2}{\partial \Theta^2} = 0$$

dove:

$$p = \frac{k^2 r^2 + k_0^2 r^2 + ik_0 r + \frac{1}{4}}{2ik_0 r^2};$$

$$q = \frac{1}{2ik_0 r^2}$$

in cui  $k_0$  è assunto pari al numero d'onda corrispondente al valore medio della profondità lungo l'arco di chiusura del dominio.



**Figura 13.1. Definizione del dominio di calcolo**

### 13.3 STANDARD PIANC IN MERITO ALL'AGITAZIONE INTERNA

Il PIANC, Associazione Internazionale di Navigazione, ai fini del controllo delle agitazioni degli specchi acquei protetti a servizio della nautica da diporto, raccomanda le seguenti altezze d'onda significativa all'interno del porto (con periodo di picco spettrali compresi tra 2 e 8 s).

- condizione di "comfort" :  
 $H_s = 0.15$  m, per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni/anno;
- condizione di "sicurezza":  
 $H_s = 0.30$  m, per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni;
- condizione "limite":  
 $H_s = 0.50$  m, per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni.

## 13.4 DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO

---

La configurazione delle opere in progetto è stata ottimizzata a partire da quella prevista dal progetto preliminare, tenendo in considerazione le prescrizioni tecniche indicate dagli enti preposti durante la Conferenza dei Servizi e dai risultati ottenuti a seguito delle indagini condotte durante la redazione del progetto definitivo.

Si osserva, che a seguito delle verifiche tecniche effettuate, è stato possibile redigere una configurazione delle opere conforme alle seguenti prescrizioni progettuali indicate dall'Assessorato Regionale Territorio Ambiente della Regione Sicilia:

- garantire un cerchio di manovra di almeno 150 m, tra le testate del molo foraneo in progetto e del molo di sopraflutto del realizzando Marina di Archimede, operando una rotazione verso ovest del molo rispetto la configurazione del progetto preliminare;
- garantire un corridoio di specchio acqueo pubblico tale da garantire che la distanza tra il molo di sottoflutto del realizzando Marina di Archimede e il contorno esterno delle aree richieste in concessione sia di 125 m.

Le opere marittime principali previste in progetto sono:

- Molo foraneo di ponente,
- Colmate e banchine di riva;
- Pennello antisedimentazione;
- Opere di dragaggio per la regolarizzazione dei fondali.

Il molo foraneo di ponente è lungo circa 520 m ed è costituito da una bilatera.

Rispetto alla posizione prevista nel progetto preliminare, esso ha subito una traslazione dell'asse longitudinale verso ovest, tale operazione ha reso necessaria la rotazione del tratto terminale per garantire la necessaria protezione dello specchio acqueo.

Il piano di calpestio è a quota +1,60 m rispetto al l.m.m, mentre la larghezza del molo foraneo è di 8 m per il primo tratto e di 10 m nel secondo.

Il molo è realizzato su pali trivellati in cls.a. rivestiti, per la parte non infissa, da lamierino in acciaio corten e aventi diametro:

- D=1,00 m, fino alla batimetrica dei -5m rispetto al l.m.m.
- D=1,20 m dalla batimetrica dei -5 m fino a quella di -9 m rispetto al l.m.m.

I pali sono disposti secondo una maglia 6 x 6 m.

La lunghezza di infissione sotto la quota del fondale è di circa 35 m.

Ai fini di garantire gli standard dell'agitazione residua, la tipologia costruttiva prevede:

- uno schermo totalmente immerso costituito da setti in cls, lungo la fila di pali lato mare;

- uno schermo parzialmente immerso lungo la fila di pali lato specchio acqueo protetto, costituito da setti in cls;

Sopra ogni fila trasversale di pali è realizzata la trave pulvino su cui poggiano i tegoli in cls precompresso e quindi la soletta collaborante. Sopra è disposta la pavimentazione in elementi autobloccanti.

Le colmate saranno delimitate da barriere di pali secanti. Lungo i lati che delimitano lo specchio acqueo per il diporto, sui pali saranno solidarizzati dei cassoncini antiriflettenti sfinestrati sul lato esterno.

I cassoncini hanno dimensioni planimetriche di 3.00 x 3.00 m ed altezza 3.00 m, posti sulla paratia di pali accostati e sul terreno consolidato a quota - 2.40 m s.l.m.; l'apertura frontale del cassone è alta 1,20 m; la pendenza dello strato di scogli interno è 3/2.

Ai piedi della palificata saranno posizionati dei massi guardiani per la protezione al piede della stessa.

Dal lato del canale di vivificazione, la palificata sarà coronata con un cavidotto impiantistico.

La quota di calpestio delle banchine di riva è posta pari a +1,20 m rispetto al l.m.m.; le pavimentazioni sono realizzate in elementi autobloccanti.

A nord ovest dell'opera portuale verrà realizzato un pennello antisedimentazione che si radica sulla battigia. Questo sarà lungo circa 210 m e orientato secondo l'asse N/S. Esso sarà realizzato con massi di 2° categoria. La quota della berma sarà di 0,50 m rispetto al l.m.m.

Il pennello sarà radicato presso la foce del Canale Regina, la testata dello stesso raggiungerà fondali sulla batimetrica dei -2,0 m rispetto al l.m.m.

Le opere di dragaggio saranno effettuate per ottenere un fondale a quota -5,00 m s.l.m. nello specchio acqueo per il diporto e dello specchio acqueo cantieristico, a quota -3,00 m s.l.m. nella darsena polifunzionale, ed a quota -2,00 m s.l.m. nel canale di vivificazione

## 13.5 ANALISI CONDOTTE

---

Lo studio dell'agitazione residua è stato articolato in più fasi.

Dapprima è stato effettuato il confronto tra alcune possibili configurazioni del molo foraneo al fine di individuare lo sviluppo longitudinale ottimale dello stesso.

Successivamente si è proceduto con l'individuazione della tipologia costruttiva ottimale per garantire la verifica degli standards internazionali.

### 13.5.1 INDIVIDUAZIONE DELLO SVILUPPO LONGITUDINALE OTTIMALE PER LA RIDUZIONE DELL'AGITAZIONE RESIDUA

---

#### 13.5.1.1 MODALITA' DI INDAGINE

---

Il modello di calcolo CGWAVE è stato utilizzato per simulare l'agitazione indotta da onde incidenti caratterizzate da diverse combinazioni di direzione e periodo e individuare quale sia lo sviluppo longitudinale ottimale del molo foraneo

Le direzioni di attacco del moto ondoso sono state scelte in modo da rappresentare l'intero settore di traversia, mentre i valori di periodo sono tali da ricoprire il range riscontrato nell'analisi di frequenza delle onde

La mesh di calcolo è stata scelta di forma semicircolare, centrata rispetto al layout e costituita da elementi di forma triangolare. Il numero di elementi è pari a 140.685 e il numero di nodi è 20.920

Le simulazioni sono state effettuate considerando onde di altezza unitaria al fine di ottenere la distribuzione dei coefficienti di amplificazione (rapporto tra l'altezza dell'onda in un punto e l'altezza dell'onda incidente) valevoli per qualsiasi valore dell'altezza dell'onda incidente; a tal fine sono stati esclusi nel modello gli apporti di termini non lineari: in pratica, per la tipologia di onde in esame (*short wave*) e per la limitatezza dell'estensione del dominio si è ritenuto trascurabile l'effetto dell'attrito al fondo sulla propagazione dell'onda; altra esclusione ha riguardato la dissipazione energetica dovuta al frangimento dell'onda. A causa delle semplificazioni fatte, come ampiamente dimostrato in letteratura, i valori del coefficiente di amplificazione ottenuti risultano sovrastimati, e sono quindi da ritenersi cautelativi.

Gli stati del mare simulati sono stati scelti in funzione delle direzioni sottocosta ottenute dalle elaborazioni STWAVE.

Da queste si è visto che in prossimità dell'area interessata dalle opere in progetto (punto di controllo 4, cfr. capitolo 10), i treni d'onda al variare della direzione si dispongono normalmente alla linea di costa, lungo la direzione sottocosta (media) di 130°N e che per qualsiasi valore del tempo di ritorno R i valori delle onde trasformate sottocosta più gravosi sono quelli relativi alla direzione al largo di 105°N.

Si riporta il prospetto riepilogativo:

RIF	AL LARGO			STAZIONE P.4		
	H <sub>s,max</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	D (°N)	H <sub>s,max</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	D (°N)
F=5 gg/a	3.63	8.13	105	0.46	8.30	130
R=5 anni	3.96	8.48	105	0.49	9.10	130
R=25 anni	5.40	9.90	105	0.62	11.10	130
R=50 anni	5.87	10.33	105	0.72	11.10	130
R=100 anni	6.31	10.70	105	0.77	11.10	130

Tabella 13.2. Grandezze caratteristiche del fenomeno della trasformazione del treno d'onda da 105°N misurate nel punto di controllo 4.

Gli stati del mare simulati sono:

D (°N)	T <sub>p</sub> (s)
130°N	8
	10
	12

Tabella 13.3. Gli stati del mare simulati

Sono state quindi effettuate numerose simulazioni, relative a varie configurazioni portuali, al fine di scegliere quel layout che ottimizzi le opere idraulico-marittime sia in termini di grado di protezione fornito sia di agitazione residua, nel rispetto degli standards progettuali internazionali. In particolare è stato approfondito il comportamento idraulico marittimo del testata del molo ed in particolare come la lunghezza della testata possa influenzare l'agitazione portuale all'interno dell'area di interesse.

### 13.5.1.2 DETERMINAZIONE DEI COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE

Per la determinazione dei coefficienti di riflessione K si è fatto riferimento a studi di Thompson del 1996, secondo lo schema di seguito riportato:

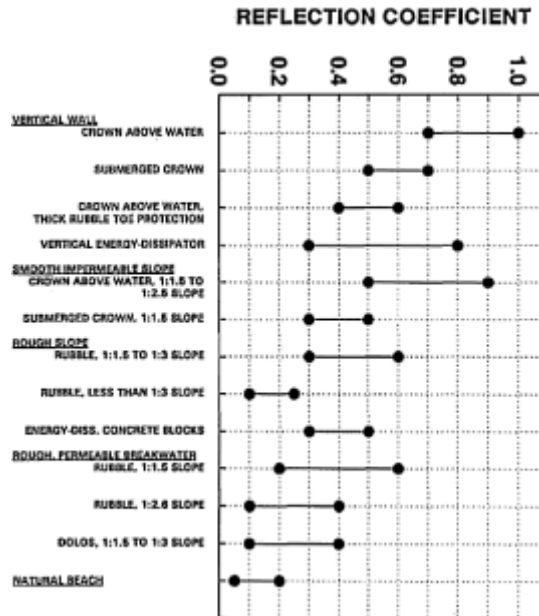


Tabella 13.4. Coefficienti di riflessione – fonte: Thompson, E. F., H. S. Chen and L. L. Hadley, 1996: Validation of numerical model for wind waves and swell in harbours. J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 122,5. 245-257.

I coefficienti di riflessione K richiesti dal modello sono stati così attribuiti secondo i suggerimenti della letteratura di settore:

- $K=0,5$  per le strutture caratterizzate da un grado intermedio di riflessione (diga a parete verticale antiriflettente; scogliera emersa in massi naturali basse o soffolte; costa rocciosa bassa),
- $K=0,9$  per le strutture con un grado di riflessività dell'onda elevato (dighe a pareti verticali semplici, falesie naturali),
- $K=0,1$  per tipologia di coste basse come spiagge sabbiose e/o ciottolose.

Sono stati attribuiti i seguenti valori del coefficiente di riflessione K:

- Molo foraneo lato esterno:  $K=0,9$
- Molo foraneo lato interno:  $K=0,5$
- Marina di Archimede :  $K=0,5$
- Banchina di Riva:  $K=0,5$
- Arenile:  $K=0,1$
- Scogliera antisedimentazione:  $K=0,5$



### 13.5.1.3 DETERMINAZIONE DELLE ZONEOMOGENEE

Ai fini di una puntuale disamina delle agitazioni residue dello specchio acqueo protetto, per fornire una "zonizzazione" utile per la più corretta gestione degli ormeggi, viene eseguita la suddivisione dello specchio idrico in oggetto in 6 zone.

### 13.5.1.4 ANALISI DEI RISULTATI

Per ogni layout e per ogni zona, per tutte le condizioni d'onda analizzate, è stato calcolato il coefficiente di amplificazione medio in funzione delle caratteristiche dell'onda.

Di seguito si riportano i tabulati di riepilogo dei coefficienti di amplificazione ottenuti.

ZONA	D (°N)	LAYOUT	Tp (s)	Coeff. ampl.
A	130	1	8	0,79
			10	0,46
			12	0,79
		2	8	0,52
			10	0,62
			12	0,65
		3	8	0,56
			10	0,52
			12	0,47
		4	8	0,50
			10	0,53
			12	0,48

ZONA	D (°N)	LAYOUT	Tp (s)	Coeff. ampl.
B	130	1	8	0,78
			10	0,71
			12	0,58
		2	8	0,49
			10	0,52
			12	0,56
		3	8	0,54
			10	0,49
			12	0,34
		4	8	0,31
			10	0,40
			12	0,32

ZONA	D (°N)	LAYOUT	Tp (s)	Coeff. ampl.
C	130	1	8	0,66
			10	0,44
			12	0,64
		2	8	0,31
			10	0,40
			12	0,51
		3	8	0,41
			10	0,24
			12	0,28
		4	8	0,29
			10	0,21
			12	0,28

ZONA	D (°N)	LAYOUT	Tp (s)	Coeff. ampl.
D	130	1	8	0,48
			10	0,36
			12	0,57
		2	8	0,24
			10	0,32
			12	0,43
		3	8	0,35
			10	0,21
			12	0,25
		4	8	0,24
			10	0,18
			12	0,25

ZONA	D (°N)	LAYOUT	Tp (s)	Coeff. ampl.
E	130	1	8	0,12
			10	0,09
			12	0,08
		2	8	0,09
			10	0,11
			12	0,15
		3	8	0,09
			10	0,07
			12	0,05
		4	8	0,09
			10	0,07
			12	0,10

ZONA	D (°N)	LAYOUT	Tp (s)	Coeff. ampl.
F	130	1	8	0,40
			10	0,64
			12	1,04
		2	8	0,97
			10	0,97
			12	0,99
		3	8	0,35
			10	0,65
			12	0,97
		4	8	0,60
			10	0,83
			12	0,61

**Tabella 13.5. Riepilogo dei coefficienti di amplificazione per ogni area omogenea individuata, in funzione della direzione di propagazione dell'onda sottocosta e del periodo T.**

Con particolare attenzione alla zona sede dell'intervento, possono formularsi le seguenti considerazioni:

- le zone B,C,D,E (zone destinate al piano di ormeggio) sono caratterizzate da valori del coefficiente di amplificazione che diminuisce all'aumentare della lunghezza del molo,
- la zona A (area dell'avamposto) è caratterizzata dai coefficienti di amplificazione più alti in assoluto,

- la zona F (area destinata all'ormeggio nelle condizioni di bel tempo) assume coefficienti compatibili con la destinazione d'uso.

Dall'osservazione dei risultati delle simulazioni STWAVE, relative alla trasposizione dal largo verso riva si evince che i treni d'onda al largo si propongono sottocosta in prossimità delle opere (punto di controllo 4 delle simulazioni STWAVE coincidente il nodestring della mesh numerica di CGWAVE – cfr. i capitoli 10 e 11 ed il paragrafo 13.5.1.1) secondo le caratteristiche ondose seguenti:

PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO - $P(h < H_s) = 5\text{gg/a}$					
ALL LARGO			SOTTOCOSTA (P4)		
$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	D (°N)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	D (°N)
3.63	8.13	30	0.23	8.30	270
2.70	7.01	45	0.19	7.10	130
2.40	6.61	60	0.20	6.70	270
3.16	7.58	75	0.31	7.70	129
3.01	7.40	90	0.36	7.10	270
3.65	8.15	105	0.46	8.30	129
3.16	7.58	120	0.42	7.70	270
2.42	6.64	135	0.30	6.70	270
2.31	6.49	150	0.24	6.70	270
2.43	6.64	165	0.18	6.70	270

PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO - EVENTI ESTREMI						
R (anni)	ALL LARGO			SOTTOCOSTA (P4)		
	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	D (°N)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	D (°N)
5	3.28	7.72	30	0.25	7.70	130
50	4.81	9.35	30	0.31	9.10	130
5	4.37	8.91	45	0.32	9.10	130
50	6.86	11.16	45	0.46	11.10	130
5	3.90	8.41	60	0.35	8.30	130
50	5.80	10.26	60	0.44	10.00	130
5	3.85	8.36	75	0.38	8.30	130
50	5.91	10.37	75	0.52	10.00	130
5	4.15	8.68	90	0.47	8.30	130
50	5.73	10.20	90	0.63	10.00	130
5	3.96	8.48	105	0.49	8.30	130
50	5.87	10.33	105	0.72	10.00	130
5	3.00	7.38	120	0.40	7.10	130
50	4.34	8.88	120	0.53	9.10	130
5	2.27	6.43	135	0.29	6.30	130
50	3.52	8.00	135	0.40	7.70	130
5	1.36	4.97	150	0.18	5.00	130
50	2.21	6.33	150	0.24	6.20	130
5	1.79	5.71	165	0.15	5.90	130
50	4.08	8.61	165	0.28	8.30	130

**Tabella 13.6. Tabella riassuntiva delle caratteristiche dei treni d'onda sottocosta.**

Di seguito vengono sintetizzati in tabelle riepilogative i risultati delle verifiche per le varie condizioni raccomandate dal PIANC dall'esame delle quali possibile è desumere le conclusioni in merito all'agitazione interna di ognuno dei layout in funzione della direzione d'attacco dei treni d'onda al largo per l'attacco d'onda più gravoso individuato ( $D_L=105^\circ\text{N}$ )

Condizione di confort - Layout 1			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	8	0,36	NV
B		0,36	NV
C		0,30	NV
D		0,22	NV
E		0,06	V
F		0,18	NV

Condizione di confort - Layout 2			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	8	0,24	NV
B		0,14	V
C		0,13	V
D		0,11	V
E		0,04	V
F		0,45	NV

Condizione di sicurezza - Layout 1			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	8	0,39	NV
B		0,38	NV
C		0,32	NV
D		0,24	V
E		0,06	V
F		0,18	V

Condizione di sicurezza - Layout 2			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	8	0,25	V
B		0,24	V
C		0,15	V
D		0,12	V
E		0,04	V
F		0,45	NV

Condizione di limite - Layout 1			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	10	0,57	NV
B		0,42	V
C		0,46	V
D		0,35	V
E		0,09	V
F		0,71	NV

Condizione di limite - Layout 2			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	10	0,47	V
B		0,40	V
C		0,37	V
D		0,31	V
E		0,11	V
F		0,71	NV

Tabella 13.7. Confronto tra i layout in funzione degli standard sulla agitazione interna allo specchio acqueo in progetto secondo le raccomandazioni PIANC. Layout 1 e 2.

Condizione di confort - Layout 3			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	8	0,26	NV
B		0,25	NV
C		0,13	V
D		0,16	NV
E		0,04	V
F		0,16	NV

Condizione di confort - Layout 4			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	8	0,23	NV
B		0,14	V
C		0,13	V
D		0,11	V
E		0,04	V
F		0,28	NV

Condizione di sicurezza - Layout 3			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	8	0,27	V
B		0,26	V
C		0,20	V
D		0,17	V
E		0,04	V
F		0,16	V

Condizione di sicurezza - Layout 4			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	8	0,25	V
B		0,15	V
C		0,14	V
D		0,12	V
E		0,04	V
F		0,28	V

Condizione di limite - Layout 3			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	10	0,34	V
B		0,24	V
C		0,20	V
D		0,18	V
E		0,04	V
F		0,70	NV

Condizione di limite - Layout 4			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	10	0,35	V
B		0,23	V
C		0,20	V
D		0,18	V
E		0,07	V
F		0,44	V

Tabella 13.8. Confronto tra i layout in funzione degli standard sulla agitazione interna allo specchio acqueo in progetto secondo le raccomandazioni PIANC. Layout 3 e 4 .

In cui:

zona = zone omogenee in cui è stato suddiviso il bacino in studio;

$T_p$ = periodi di picco di riferimento;

$H_s$ = altezza d'onda significativa residua all'interno della zona d'agitazione;

Status= identifica se la condizione è verificata (V.) o meno (N.V.).

Dall'osservazione delle risultanze delle verifiche si evince che il "LAYOUT 2" garantisce la verifica degli standards internazionali in generale per tutti i treni d'onda che si presentano sottocosta.

Inoltre tale configurazione è stata analizzata in modo ancora più approfondito; infatti è stata analizzata la risposta del layout in funzione della modellazione dei pontili del costruendo "Marina di Archimede".

Tali moli saranno realizzati su pali; questa tipologia di struttura assume un comportamento intermedio tra quello di un pontile galleggiante ed un opera opaca.

Le seguenti tabelle permettono invece di confrontare direttamente i coefficienti di amplificazione calcolati per il layout standard e quello modificato

LAYOUT	D (°N)	AREA	Tp (s)	Coeff. ampl.
<b>2</b>	<b>130</b>	A	8	0,52
			10	0,62
			12	0,65
		B	8	0,49
			10	0,52
			12	0,56
		C	8	0,31
			10	0,40
			12	0,51
		D	8	0,24
			10	0,32
			12	0,43
		E	8	0,09
			10	0,11
			12	0,15
		F	8	0,97
			10	0,97
			12	0,99

LAYOUT	D (°N)	AREA	Tp (s)	Coeff. ampl.
<b>2 mod</b>	<b>130</b>	A	8	0,99
			10	0,87
			12	0,75
		B	8	0,57
			10	0,64
			12	0,46
		C	8	0,50
			10	0,40
			12	0,70
		D	8	0,4
			10	0,26
			12	0,66
		E	8	0,10
			10	0,13
			12	0,17
		F	8	0,93
			10	0,98
			12	1,02

**Tabella 13.9. Tabella riassuntiva per il confronto dei coefficienti di amplificazione tra le configurazioni "LAYOUT2"( moli del marina di archimede come opere opache) e "LAYOUT2 MODIFICATO" (moli del marina di Archimede come pontili galleggianti).**

Si osserva una variazione del coefficiente di amplificazione tra le configurazioni come riportato nella seguente tabella.

DA	A	AREA	Tp (s)	Δ
<b>L.2</b>	<b>L.2 mod</b>	A	8	0,47
			10	0,25
			12	0,10
		B	8	0,08
			10	0,12
			12	-0,10
		C	8	0,19
			10	0,00
			12	0,19
		D	8	0,16
			10	-0,06
			12	0,23
		E	8	0,01
			10	0,02
			12	0,02
		F	8	-0,04
			10	0,01
			12	0,03

**Tabella 13.10. Variazione tra i coefficienti di amplificazione delle due configurazioni analizzati.**

Per la zona dell'Avamporto (area A) si osserva un aumento del coefficiente di amplificazione A compreso tra il 10% e il 47%.

Per la zona B la variazione del coefficiente di è compresa tra -10% e 12%.

Per la zona C l'incremento è al massimo del 26%.

Per la zona D la variazione del coefficiente di amplificazione A è compreso tra - 6% e 23%.

Per la zone E e la zona F la variazione del coefficiente di amplificazione A è molto ridotta e si riduce a qualche punto percentuale.

Di seguito si riporta anche il confronto tra le due configurazioni investigate in termini di altezze residue relative al treno d'onda al largo proveniente da 105°N, che fornisce le altezze d'onda sottocosta più gravose.

Condizione di confort - Layout 2				Condizione di confort - Layout 2M			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status	zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	8	0,24	NV	A	8	0,46	NV
B		0,14	V	B		0,17	NV
C		0,13	V	C		0,18	NV
D		0,11	V	D		0,14	V
E		0,04	V	E		0,05	V
F		0,45	NV	F		0,43	NV

Condizione di sicurezza - Layout 2				Condizione di sicurezza-Layout 2M			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status	zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	8	0,25	V	A	8	0,49	NV
B		0,24	V	B		0,18	V
C		0,15	V	C		0,20	V
D		0,12	V	D		0,15	V
E		0,04	V	E		0,05	V
F		0,45	NV	F		0,46	NV

Condizione di limite - Layout 2				Condizione di limite - Layout 2M			
zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status	zona	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Status
A	10	0,47	V	A	10	0,54	NV
B		0,40	V	B		0,33	V
C		0,37	V	C		0,50	V
D		0,31	V	D		0,48	V
E		0,11	V	E		0,12	V
F		0,71	NV	F		0,73	NV

**Tabella 13.11. Confronto in termini di altezze d'onda residua e di verifica degli standard internazionali tra il layout 2 e il layout 2 modificato**

Da tale confronto si evince che la differenze in termini di altezze d'onda residue tra le due tipologie di implementazione sono al più di qualche centimetro e che non vengono modificati gli status di verifica degli standards internazionali.

Considerando che il comportamento reale risulta essere intermedio tra le due soluzioni qualitative, si conferma che il layout 2 risulta essere quello caratterizzato dalla lunghezza ottimale ai fini dell'agitazione residua.

### 13.5.2 INDIVIDUAZIONE DELLA TIPOLOGIA COSTRUTTIVA OTTIMALE PER LA RIDUZIONE DELL'AGITAZIONE RESIDUA

Ai fini di individuare quale sia la tipologia costruttiva per le opere del molo foraneo su pali più adatta a ridurre l'agitazione portuale all'interno dell'approdo sono state effettuate indagini specifiche, in conformità degli standard PIANC.

Secondo gli studi geotecnico – strutturali i pali dovranno avere le seguenti caratteristiche:

- Diametro  $d=1,00$  m fino alla batimetrica dei -5 m
- Diametro  $d=1,20$  m tra la batimetrica dei -5 a quella dei -9 m.
- interdistanza trasversale di 6 m
- interdistanza longitudinale di 6 m.

Sono state effettuate alcune indagini per la valutazione dell'interazione tra moto ondoso e strutture per alcuni tipologie costruttive, sia applicando il modello numerico CGWAVE, già descritto in precedenza, sia facendo ricorso alla letteratura di settore.

#### 13.5.2.1 PRIME SIMULAZIONI

Lo scopo principale è individuare la tipologia costruttiva caratterizzata da un coefficiente di riflessione  $C_r$  minore o uguale a 0,5 e tale quindi che vengano rispettati gli standard PIANC sull'agitazione residua.

In particolare sono state indagate le seguenti tipologie strutturali:

- Tipologia 1: pali disposti su file parallele con allineamento ortogonale;
- Tipologia 2: pali disposti su file parallele con allineamento inclinato;
- Tipologia 3: pali disposti su file parallele, con schermo completamente immerso lungo la fila centrale.

Di seguito si riportano le figure relative a tali tipologie strutturali.

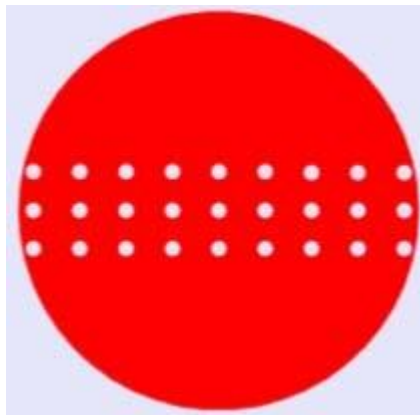
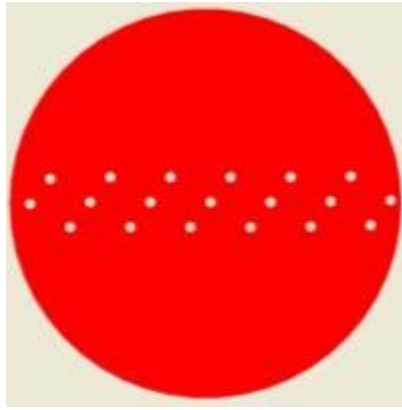
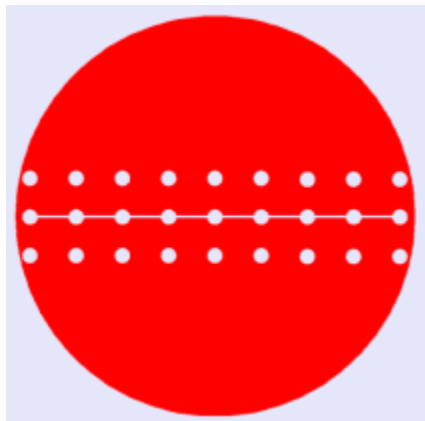


Figura 13.12. Tipologia costruttiva 1



**Figura 13.13. Tipologia costruttiva 2**



**Figura 13.14. Tipologia costruttiva 3**

Il modello di calcolo utilizzato è CGWAVE, già descritto precedentemente.

In conformità con gli studi effettuati dagli sviluppatori di CGWAVE e al fini di enfatizzare al meglio i risultati si è scelto di effettuarle simulazioni relative all'interazione moto ondoso-palo, applicando un fattore di scala pari a circa 1/17,35, e con i seguenti parametri ondometrici:

$$H_s=2,0 \text{ m}$$

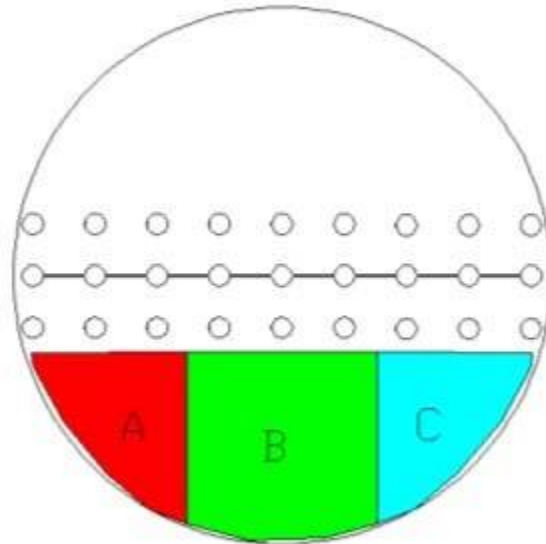
$$T_s=10,0 \text{ s}$$

Il coefficiente di riflessione attribuito al singolo palo è  $C_r=1$

Per ognuna delle tipologie investigate è stata effettuata una zonizzazione per indagare la capacità di trasmissione e di riflessione.

Di seguito si riporta l'immagine relativa alla zonizzazione per la tipologia 3, si osserva che tale zonizzazione è valevole per ogni tipologia costruttiva.

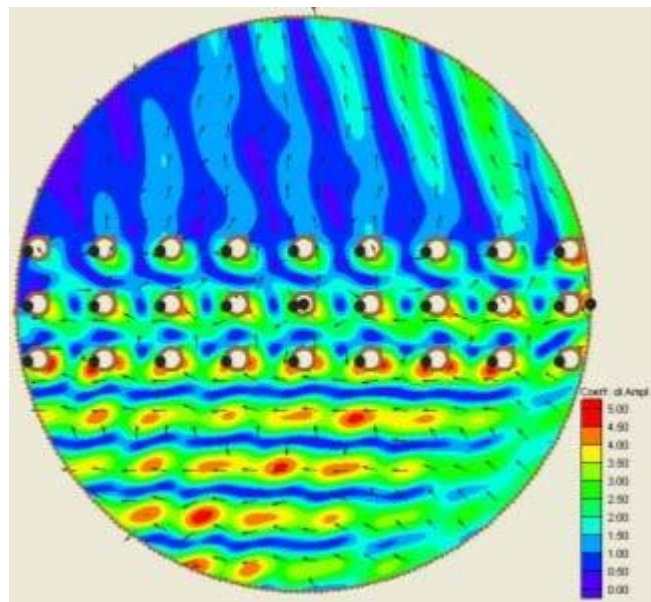




**Figura 13.15. Zonizzazione valevole per le indagini relative all'individuazione della capacità di riflessione e di riflessione delle tipologie strutturali investigate.**

Sono state indagate le risposte di ogni tipologia strutturale relative ai fenomeni di riflessione e trasmissione sotto l'attacco di treni d'onda ortogonali ed inclinati rispetto l'asse della struttura stessa.

Di seguito se ne riportano le immagini.



**Figura 13.16. Tipologia1. Distribuzione dell'altezza d'onda residua -  $H=2$  m,  $T=10$  s. Attacco d'onda inclinato di  $45^\circ$  rispetto all'asse longitudinale della struttura.**

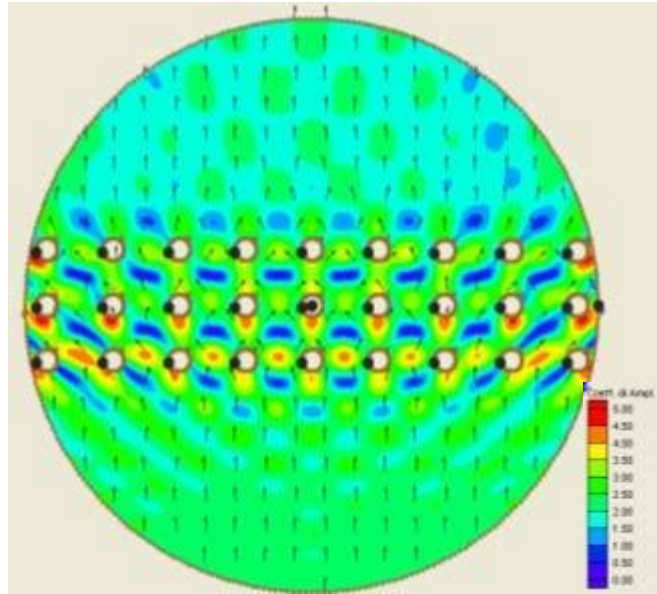


Figura 13.17 .Tipologia 1 - Distribuzione dell'altezza d'onda residua-  $H=2$  m,  $T=10$  s. Attacco d'onda normale all'asse longitudinale della struttura.

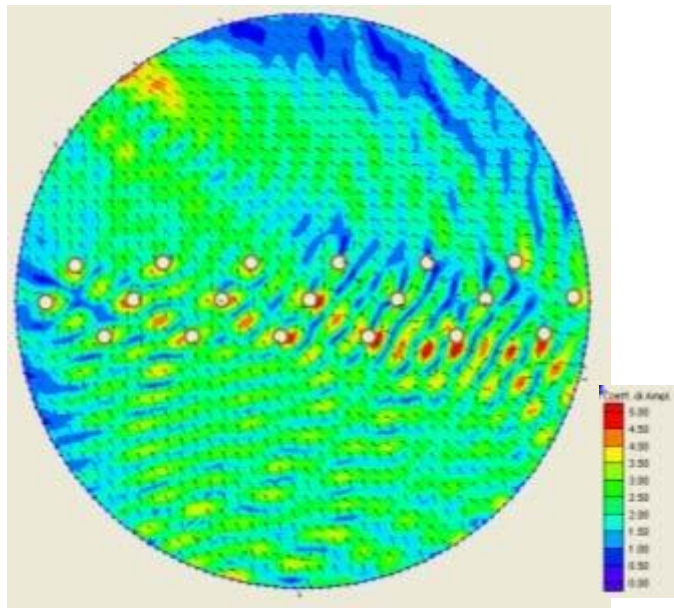


Figura 13.18. Tipologia 2 - Distribuzione dell'altezza d'onda residua-  $H=2$  m,  $T=10$  s. Attacco d'onda inclinato di  $45^\circ$  rispetto all'asse longitudinale della struttura.

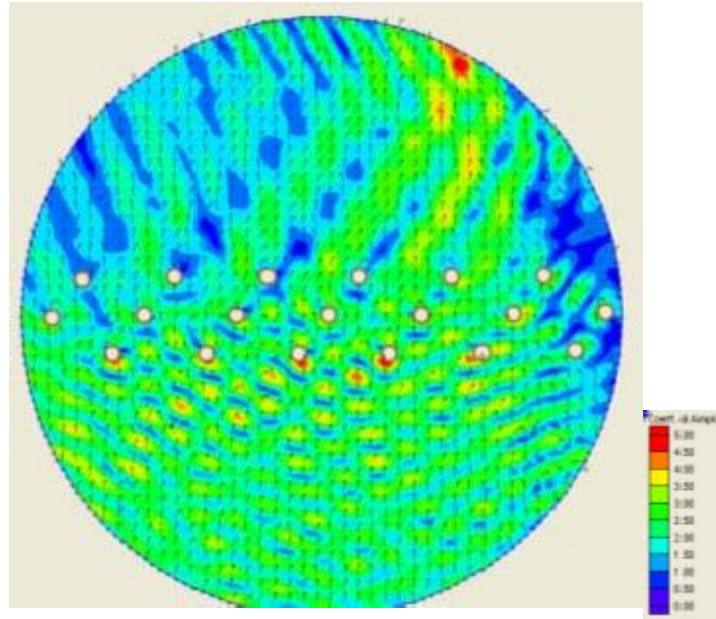


Figura 13.19. Tipologia 2 - Distribuzione dell'altezza d'onda residua -  $H=2$  m,  $T=10$  s. Attacco d'onda normale all'asse longitudinale della struttura.

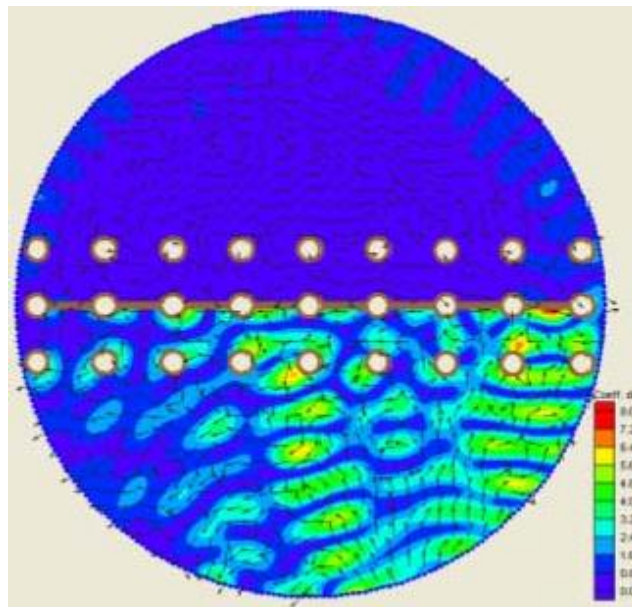
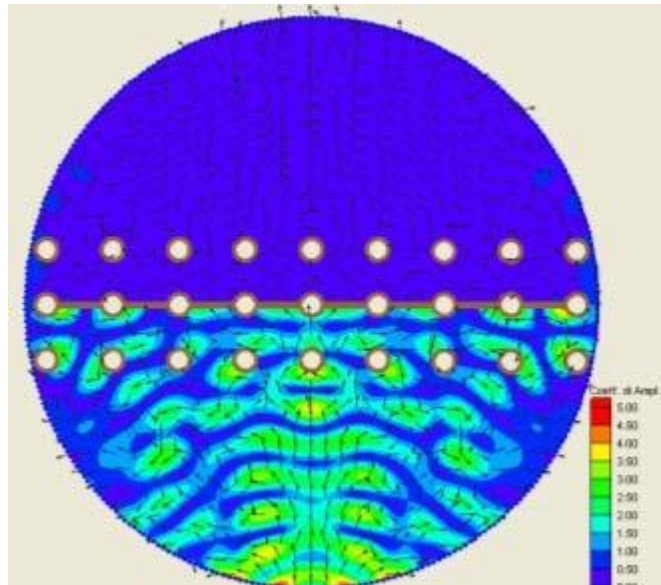


Figura 13.20. Tipologia 3 - Distribuzione dell'altezza d'onda residua -  $H=2$  m,  $T=10$  s. Attacco d'onda inclinato di  $45^\circ$  rispetto all'asse longitudinale della struttura.



**Figura 13.21 .Tipologia 3 - Distribuzione dell'altezza d'onda residua-  $H=2$  m,  $T=10$  s. Attacco d'onda normale all'asse longitudinale della struttura.**

Inoltre sono stati determinati i coefficienti di riflessione e di trasmissione per ogni tipologia costruttiva.

Si osserva che:

1. Per la tipologia 1 sotto l'attacco d'onda normale:
  - il coefficiente di riflessione varia tra 1,16 e 1,18, con valore medio  $R=1,17$ .
  - Il coefficiente di trasmissione varia tra 0,90 e 1,02, con valore medio  $T=0,97$ .
2. Per la tipologia 1 sotto l'attacco inclinato:
  - il coefficiente di riflessione varia tra 1 e 1,10, con valore medio  $R=1,06$ .
  - Il coefficiente di trasmissione varia tra 0,39 e 0,65, con valore medio  $T=0,53$ .
3. Per la tipologia 2 sotto l'attacco d'onda normale:
  - il coefficiente di riflessione varia tra 1,07 e 1,09, con valore medio  $R=1,08$ .
  - Il coefficiente di trasmissione varia tra 0,83 e 0,91, con valore medio  $T=0,88$ .
4. Per la tipologia 2 sotto l'attacco d'onda inclinato:
  - il coefficiente di riflessione varia tra 1,05 e 1,38, con valore medio  $R=1,15$ .
  - Il coefficiente di trasmissione varia tra 0,62 e 0,90, con valore medio  $T=0,73$ .
5. Per la tipologia 3 sotto l'attacco d'onda normale:
  - il coefficiente di riflessione varia tra 0,54 e 0,82, con valore medio  $R=0,65$

- il coefficiente di trasmissione è ovviamente nullo.

6. Per la tipologia 3 sotto l'attacco d'onda inclinato:

- il coefficiente di riflessione varia tra 0.67 e 1.15, con valore medio 0.99.
- il coefficiente di trasmissione è ovviamente nullo.

I risultati ottenuti con queste tipologie strutturali non risultano soddisfacenti in termini di coefficienti di riflessione e di trasmissione poiché nessuna tipologia indagata è caratterizzata da un coefficiente di riflessione  $C_r$  minore o uguale a 0,5.

### 13.5.2.2 ANALISI RELATIVE ALLA TIPOLOGIA COSTRUTTIVA 4

E' stata quindi investigata un'ulteriore tipologia costruttiva che prevede la realizzazione del molo foraneo su pali, disposti su due file parallele, con una interdistanza trasversale tra i baricentri di 6 m e una interdistanza longitudinale tra i baricentri di 6 m e con l'installazione di due elementi:

- un setto verticale, parzialmente immerso montato tra i pali della fila lato porto con interasse  $2A$  e spaziatura  $2a$ ,
- un setto verticale, immerso totalmente sino al fondale (di profondità  $h$ ) da posizionare tra i pali della fila lato mare,

Di seguito si riportano le sezioni tipo dell'elemento A.

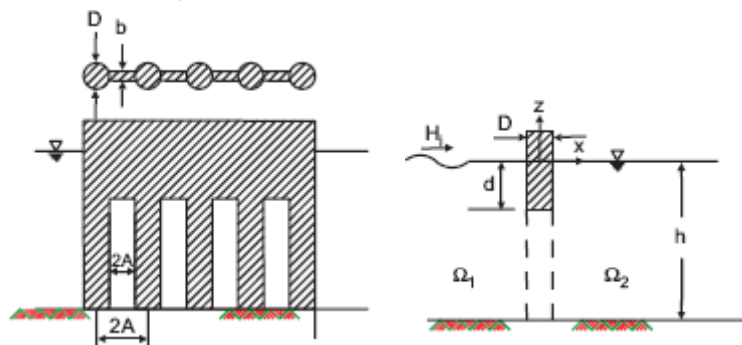


Figura 13.22. Sezione tipo dell'elemento A

La porosità che caratterizza l'array di pali è  $r_0 = a/A$ .

Gli studiosi Suh, Jung e Pyun (2007) hanno condotto prove sperimentali su un modello fisico a scala ridotta per valutare i coefficienti di Riflessione ( $C_r$ ) e Trasmissione ( $C_t$ ) caratterizzanti l'elemento A.

Si definisce  $Kh$  la profondità relativa, avente la seguente espressione:

$$Kh = 2\pi h/L$$

In cui:

- $h$  è la profondità del fondale (in m)
- $L$  è la lunghezza d'onda (in m)

In particolare sono state condotte numerose prove sperimentali, al variare dell'affondamento relativo  $d/h$  e della grado di porosità  $r_0$ , le quali hanno permesso di tracciare le curve  $C_r/kh$  e  $C_t/kh$  al variare dell' affondamento relativo  $d/h$  ed grado di porosità  $r_0$ .

Si osserva che nel nostro caso si ha:

- Per  $h=9$  m e  $7$  s  $< T < 10$  s  $\rightarrow 0,65 < kh < 1,30$
- Per  $h=5$  m e  $7$  s  $< T < 10$  s  $\rightarrow 0,35 < kh < 0,75$
- $2A=6$  m,  $2a= 5$  m  $\rightarrow r_0=a/A=0.83$

Di seguito si riportano le curve  $C_r/kh$  e  $C_t/kh$  ottenute fissando  $r_0=0.6$  e variando il parametro  $d/h$ .

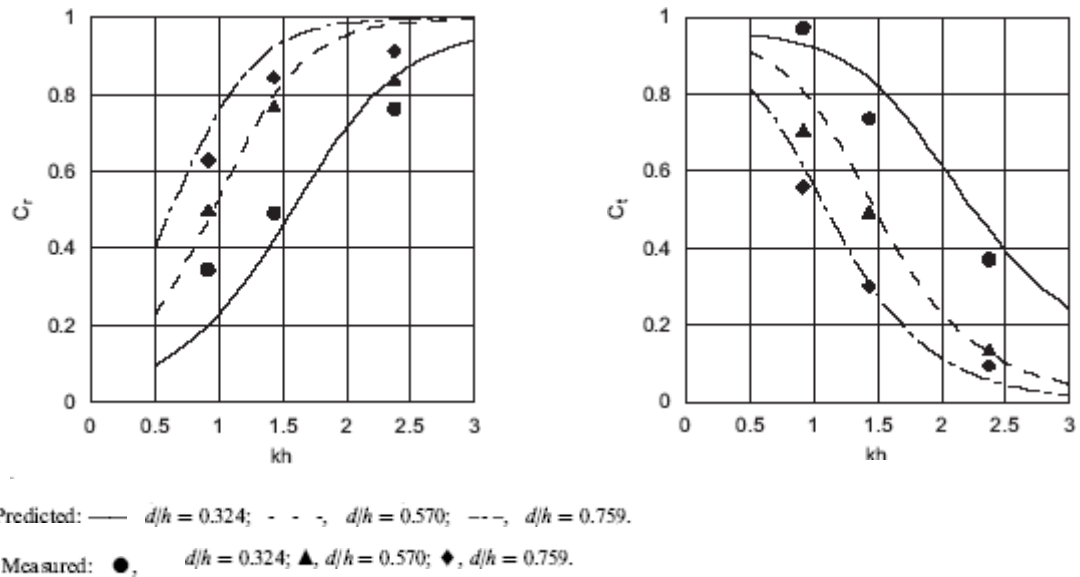


Figura 13.23. Curve  $C_r/kh$  e  $C_t/kh$  ottenute fissando  $r_0=0.6$

Dalle estrapolazioni eseguite, si ottiene che per  $d/h=0,324$ :

- Per  $h=9$  m e  $7$  s  $< T < 10$  s  $\rightarrow 0.18 < C_r < 0,30$   $0,85 < C_t < 0,95$
- Per  $h=5$  m e  $7$  s  $< T < 10$  s  $\rightarrow 0.12 < C_r < 0,30$   $0,82 < C_t < 0,95$

Di seguito si riportano le sezioni tipo dell'elemento B.

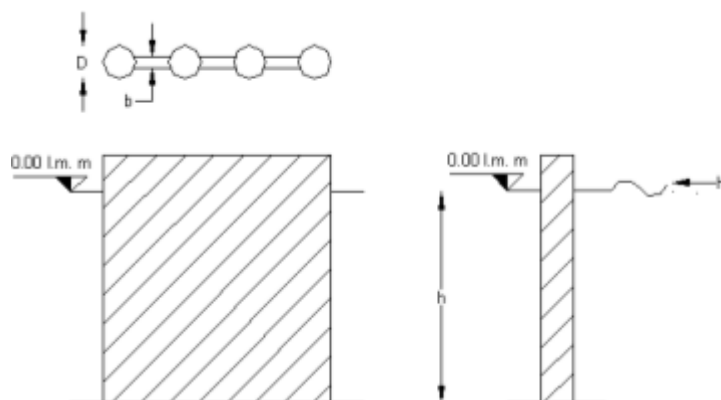


Figura 13.24. Sezioni tipo elemento B.

L'elemento B invece è caratterizzato da  $C_r=1$  e  $C_t=0$ .

Di seguito si riporta lo schema complessivo della tipologia costruttiva 4.

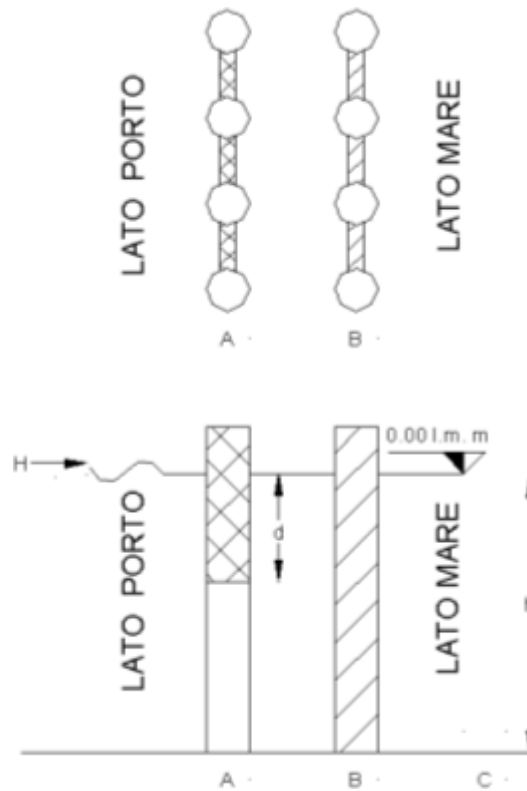


Figura 13.25. Sezioni tipo della tipologia costruttiva 4.

Al fine di valutare se la tipologia costruttiva in esame è tale da essere caratterizzata da un coefficiente di riflessione minore o uguale a 0,5 e tale da garantire il rispetto degli standard PIANC, è stato osservato che il valore di agitazione residua lato porto è pari ad:

$$H_{res} = H_r + H_t$$

In cui :

- $H_r = K_r H$  è l'aliquota relativa alla riflessione diretta dell'elemento A
- $H_t = K_t^2 H$  è l'aliquota relativa alla doppia trasmissione attraverso l'elemento A in quanto :
  - $H \rightarrow 1^\circ$  attraversamento elemento A  $\rightarrow K_t H$
  - $K_t H \rightarrow$  riflessione elemento B  $\rightarrow 1 \times K_t H$
  - $1 \times K_t H \rightarrow 2^\circ$  attraversamento A  $\rightarrow 1 \times K_t \times K_t H$

Si osserva che si sono trascurati gli effetti "a catena" dovuti ai fenomeni riflessivi tra gli elementi A e B.

Si osserva che  $H$  è stato posto pari ad  $H_{diff}$ , cioè l'aliquota relativa ai soli effetti dovuti al fenomeno della diffrazione.

Tale aliquota è stata ottenuta tramite il codice CGWAVE imponendo alle strutture del molo foraneo e della banchina di riva coefficiente di riflessione nullo.

In particolare è stato determinato un coefficiente di rifrazione  $C_{diff}$ , variabile tra 0 e 1, sotto le seguenti condizioni:

- $H_i=1$  m
- $D=130^\circ N$
- $7s < T < 10$  s

COEFFICIENTE DI DIFFRAZIONE			
H=1 m, D=130°N			
ZONA	T=10	T=8s	T=7s
A	0.36	0.38	0.39
B	0.25	0.21	0.19
C	0.25	0.29	0.31
D	0.28	0.26	0.25
E	0.04	0.05	0.03
F	0.51	0.56	0.57

Tabella 13.26. Determinazione del coefficiente di difrazione  $C_{diff}$  al variare del periodo T

Le altezze  $H_i$  più gravose e rilevate durante le simulazioni STWAVE nel punto di controllo P.4, coincidente con il nodestring del dominio CGWAVE, sono quelle per attacco d'onda al largo da  $D_L=105^\circ N$  che si presentano sottocosta con le seguenti caratteristiche:

$T_{rif}$	H ( m )	T ( s )	D ( °N )
5gg/a	0.42	7	130
5 anni	0.46	8	130
50 anni	0.72	10	130

Tabella 13.27. Attacchi d'onda più gravosi sottocosta nel punto di controllo P.4 per la valutazione delle condizioni di agitazione residua secondo gli standard PIANC.

Per valutare quindi le condizioni PIANC è stato valutato se per ognuna delle scenari analizzati fosse rispettata la seguente condizione:

$$H_{res} = C_{rifr}(C_r + C_t^2)H_i < H_{ST}$$

in cui il termine  $H_{ST}$  indica il valore suggerito dagli standard da non superare.

Di seguito si riporta il prospetto riepilogativo relativa alle verifiche degli standard internazionali PIANC



VALUTAZIONE AGITAZIONE RESIDUA - CONFORT				
$H_j=0.42\text{ m}$ , $D=130^\circ\text{N}$ , $T=7\text{ s}$ , $T_{rif}=5\text{gg/a}$ ; $H_{st}=0.15\text{ m}$				
ZONA	$C_{rifr}$	$C_r$	$C_t$	$H_{res}\text{ (m)}$
A	0,39	0,31	0,90	0,18
B	0,19	0,18	0,97	0,09
C	0,29	0,18	0,97	0,14
D	0,25	0,50	0,00	0,05
E	0,03	0,50	0,00	0,01
F	0,57	1,00	0,00	0,24

VALUTAZIONE AGITAZIONE RESIDUA - SICUREZZA				
$H_j=0.46\text{ m}$ , $D=130^\circ\text{N}$ , $T=8\text{ s}$ , $T_{rif}=5\text{ anni}$ ; $H_{st}=0.30\text{ m}$				
ZONA	$C_{rifr}$	$C_r$	$C_t$	$H_{res}\text{ (m)}$
A	0,38	0,23	0,95	0,20
B	0,21	0,11	0,97	0,10
C	0,29	0,18	0,97	0,15
D	0,26	0,50	0,00	0,06
E	0,05	0,50	0,00	0,01
F	0,56	1,00	0,00	0,26

VALUTAZIONE AGITAZIONE RESIDUA - LIMITE				
$H_j=0.72\text{ m}$ , $D=130^\circ\text{N}$ , $T=10\text{ s}$ , $T_{rif}=50\text{ anni}$ ; $H_{st}=0.50\text{ m}$				
ZONA	$C_{rifr}$	$C_r$	$C_t$	$H_{res}\text{ (m)}$
A	0,36	0,18	0,97	0,29
B	0,25	0,08	0,98	0,19
C	0,25	0,08	0,98	0,19
D	0,28	0,50	0,98	0,29
E	0,04	0,50	0,00	0,01
F	0,51	1,00	0,00	0,37

**Tabella 13.28. Calcolo delle altezze d'onda residua.**

In particolare si osserva che:

- la condizione di confort nella zona A (avanporto) e nell'area zona F (approdo di bel tempo) viene superata rispettivamente di circa 3 cm e 9 cm, valori compatibili con la destinazione d'uso delle stesse;
- le restanti condizioni sono sempre verificate in ogni zona.

Infine, è stato verificato se effettivamente la zona F durante il periodo di bel tempo sia soggetta a livelli di agitazione residua conformi agli standard di agitazione PIANC.

Dalla tabella sugli eventi stagionali direzionali per il periodo estivo, si è osservato che il treno d'onda al largo più gravoso al variare del tempo di ritorno R, è quello da  $105^\circ\text{N}$  (cfr. capitolo 8) con le seguenti caratteristiche:

- $P=5\text{ gg/a}$ ,  $H=1,98$   $T=7,10\text{ s}$

- R= 5 anni , H=2,46 T=7,24 s
- R= 50 anni , H= 3,49 T= 7,98 s

Tali treni d'onda si presentano sottocosta in prossimità delle opere in progetto (punto di controllo 4, cfr. figura 10.6) con le seguenti caratteristiche (cfr. tabella 10.2):

- P= 5 gg/a, H=0,29 T=7,10 s
- R= 5 anni , H=0,34 T=7,24 s
- R= 50 anni , H= 0,45 T= 7,98 s

Per la zona F, destinata agli accosti di buon tempo, è stata effettuata la verifica degli standard PIANC sull'agitazione residua, di seguito si riporta il prospetto riepilogativo.

VALUTAZIONE AGITAZIONE RESIDUA - CONFORT				
PERIODO ESTIVO				
H <sub>i</sub> =0.29 m, D=130°N, T=7 s, T <sub>ref</sub> =5gg/a; H <sub>st</sub> =0.15 m				
ZONA	C <sub>refr</sub>	C <sub>r</sub>	C <sub>t</sub>	H <sub>res</sub> (m)
F	0,57	1	0	0,14

VALUTAZIONE AGITAZIONE RESIDUA - SICUREZZA				
PERIODO ESTIVO				
H <sub>i</sub> =0.34 m, D=130°N, T=8s, T <sub>ref</sub> =5 anni; H <sub>st</sub> =0.30 m				
ZONA	C <sub>refr</sub>	C <sub>r</sub>	C <sub>t</sub>	H <sub>res</sub> (m)
F	0,56	1	0,00	0,19

VALUTAZIONE AGITAZIONE RESIDUA - LIMITE				
PERIODO ESTIVO				
H <sub>i</sub> =0.45 m, D=130°N, T=8s, T <sub>ref</sub> =5 anni; H <sub>st</sub> =0.30 m				
ZONA	C <sub>refr</sub>	C <sub>r</sub>	C <sub>t</sub>	H <sub>res</sub> (m)
F	0,51	1	0,00	0,23

**Tabella 13.29. Calcolo delle altezze d'onda residua, per la valutazione dell'agitazione per l'approdo di buon tempo.**

Si osserva che le condizioni di agitazione residua indicate dagli standard PIANC sono verificate anche per l'approdo di bel tempo.

Si conviene che la tipologia 4 garantisce il rispetto delle condizioni PIANC sull'agitazione residua.

### 13.5.2.3 Conclusioni

Si conclude quindi che tra tutte le tipologie costruttive analizzate, quella ottimale che garantisce il rispetto delle condizioni PIANC sull'agitazione residua è la tipologia 4.

Tale tipologia prevede una configurazione del molo foraneo con pali distribuiti su più file con una interdistanza trasversale di 6 m e una interdistanza longitudinale di 6 m e con l'installazione di:

A) uno schermo parzialmente immerso [rapporto di immersione D/h=0,324] sulla fila interna lato porto,

B) uno schermo completamente immerso sulla fila esterna lato mare.

Si osserva quindi che l'immersione del pannello dell'elemento A sarà:

- lungo il tratto con  $Z=5\text{m}$ ,  $d=0,324Z=1,62\text{ m} \rightarrow d^*=1,65\text{ m}$
- lungo il tratto con  $Z=9\text{m}$ ,  $d=0,324Z=2,92\text{ m} \rightarrow d^*=3\text{ m}$

## 14. ANALISI DELLA RISONANZA

---

Il fenomeno della risonanza si manifesta quando il moto ondoso raggiunge l'imboccatura di un porto ed interagisce dinamicamente con lo specchio d'acqua protetto provocando l'amplificazione ovvero lo smorzamento delle diverse componenti dello spettro d'onda incidente, a seconda che queste coincidano o meno con i periodi propri di oscillazione del bacino, in funzione delle sue caratteristiche geometriche (Miles, 1974)

In particolare, le onde lunghe (cioè quelle infragravitazionali, generate dall'interazione non lineare delle onde di vento; Herbets, 1995, Lo & Dean, 1995), caratterizzate da periodi dell'ordine delle centinaia di secondi, sono le più interessanti: infatti si riscontra la corrispondenza tra i periodi di picco di tali onde con i periodi propri di oscillazione di molti porti commerciali.

Più raramente, fenomeni simili possono essere innescati da oscillazioni del bacino durante un terremoto (Tsunami) o dalle escursioni della pressione dovute al transito di celle di convezione atmosferiche (ad esempio, fenomeni come il "Marrobbio", che si verifica in Sicilia presso la costa del Trapanese).

Queste oscillazioni di lungo periodo (dette anche sesse) possono essere amplificate dalla risposta dinamica del bacino dando origine ad ampi movimenti delle navi in banchina e provocando sforzi eccessivi sulle cime e sui dispositivi di ormeggio, fino a compromettere l'integrità strutturale dei dispositivi stessi, rendendo pericolose le attività del porto.

La valutazione della potenziale inoperatività del porto indotta dai fenomeni di risonanza viene effettuata sulla stima della capacità di amplificazione delle componenti di lungo periodo del moto ondoso derivante da uno studio preliminare di risonanza mediante un modello numerico agli elementi finiti basato sulla versione ellittica dell'equazione di mild-slope (Beltrami et al., 2001).

Dall'esame delle cosiddette "curve di risonanza", ottenute diagrammando i coefficienti di amplificazione  $A$  restituiti dalle simulazioni numeriche delle onde lunghe, in funzione della frequenza, si possono infatti evincere quali siano le frequenze delle onde che possono indurre la risonanza del porto.

Si ricorda che (Harkins and Dorrel, 2000) sono riconosciuti degli standard internazionali di operatività per le attività di un porto secondo i quali tali attività non subiscono gravi disagi per coefficienti di amplificazione  $A < 5$ , mentre per coefficienti di amplificazione  $A > 10$  esse diventano molto difficoltose.

### 14.1 SIMULAZIONI NUMERICHE ESEGUITE

---

L'analisi della risonanza è stata eseguita con il layout progettuale che prevede le opere di tipo opaco; tale layout risulta essere molto restrittivo e severo ai fini del suddetto studio e quindi gli scenari simulati forniscono risultati più gravosi, e quindi sono a vantaggio di sicurezza.

Di seguito sono riportati i risultati di 18 simulazioni di onde lunghe di altezza unitaria con periodo  $T_p$  compreso nel range 15-800 sec, corrispondente nel dominio delle frequenze all'intervallo 0.05-0.00125 Hz; tali simulazioni sono state effettuate con l'ausilio del codice CGWAVE.

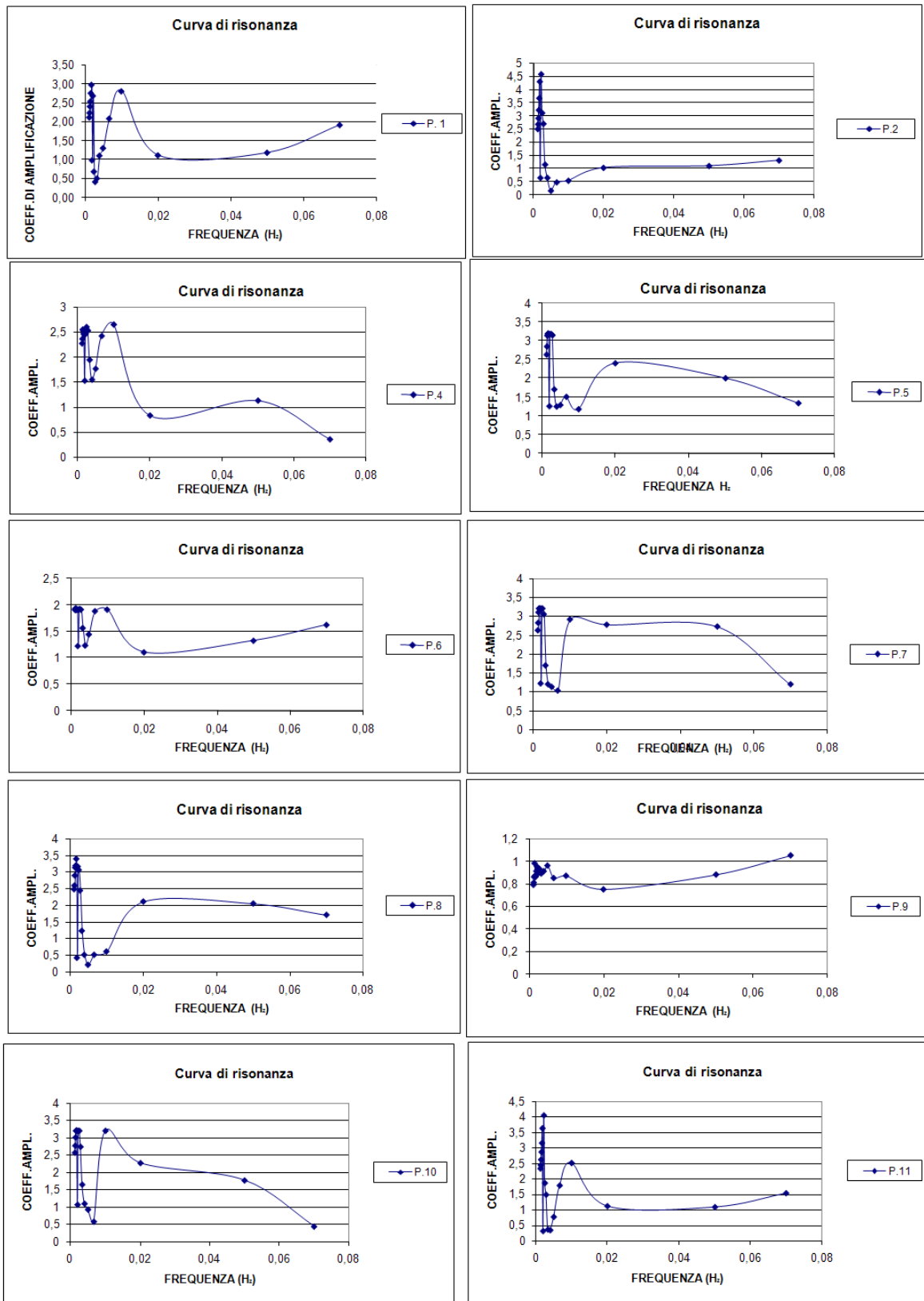
Lo scenario simulato è quello di onde provenienti dalla direzione 130°N, la direzione del fronte d'onda con cui si presentano tutti gli attacchi d'onda al largo presso l'area portuale.

Il coefficiente di riflessione  $K_R$  assegnato alle infrastrutture portuali è pari all'unità; in questo modo si considera una riflessione totale delle onde che implica quindi la sovrapposizione massima delle stesse.

All'interno del porto sono stati individuati 13 punti di controllo strategici per l'operatività portuale, per ognuno di questi per cui è stata effettuata la ricognizione dei coefficienti di amplificazione restituiti dalle simulazioni. Le aree nodali, caratterizzate da valori di fase nulli in quanto soggetti a componenti orizzontali delle velocità elevate e a moti verticali trascurabili, sono individuabili nelle fasce di transizione dalla fase negativa alla fase positiva.

Gli antinodi sono caratterizzati, invece da valori del coefficiente di amplificazione elevati che derivano da moti verticali non trascurabili.

Infine, in base ai risultati ottenuti, per ogni punto di controllo, diagrammando i dati simulati del coefficiente medio di amplificazione  $A$  (adimensionale) in funzione della frequenza (Hz), è stata costruita la curva di risonanza, di seguito riportate, che ha permesso di individuare i modi risonanza del bacino, cioè le frequenze più sfavorevoli per cui si riscontrano dei picchi di amplificazione maggiori, che mettono in crisi l'operatività del porto.



Si ricorda che (Harkins and Dorrel, 2000) sono riconosciuti degli standard internazionali di operatività per le attività del porto secondo i quali tali attività non subiscono gravi disagi per coefficienti di amplificazione  $A < 5$ , mentre per coefficienti di amplificazione  $A > 10$  esse diventano molto difficoltose.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei coefficienti di amplificazione ottenuti.

coefficienti di amplificazione medi A (adimensionale)						
Tp (s)	f (hz)	P.1	P.2	P.4	P.5	P.6
15	0,07	1,92	1,32	0,35	1,34	1,63
20	0,05	1,19	1,11	1,13	2,01	1,33
50	0,02	1,12	1,04	0,83	2,41	1,11
100	0,01	2,81	0,55	2,66	1,18	1,92
150	0,007	2,09	0,49	2,43	1,51	1,89
200	0,005	1,31	0,17	1,77	1,29	1,45
250	0,004	1,11	0,66	1,55	1,25	1,24
300	0,003	0,51	1,16	1,95	1,71	1,57
350	0,0029	0,42	2,71	2,54	3,16	1,92
400	0,0025	0,69	3,12	2,61	3,19	1,93
450	0,0022	2,69	4,59	2,47	3,19	1,92
500	0,0020	0,99	0,66	1,53	1,26	1,23
550	0,0018	2,98	4,31	2,46	4,33	1,92
600	0,0017	2,76	3,68	2,48	3,21	1,92
650	0,0015	2,54	3,23	2,54	3,19	1,94
700	0,0014	2,41	2,92	2,56	3,15	1,91
750	0,0013	2,24	2,69	2,37	2,86	1,94
800	0,00125	2,12	2,51	2,28	2,64	1,92

coefficienti di amplificazione medi A (adimensionale)						
Tp (s)	f (hz)	P.7	P.8	P.9	P.10	P.11
15	0,07	1,19	1,71	1,05	0,45	1,54
20	0,05	2,73	2,05	0,88	1,78	1,09
50	0,02	2,78	2,11	0,75	2,28	1,12
100	0,01	2,92	0,61	0,87	3,21	2,52
150	0,007	1,02	0,51	0,85	0,59	1,79
200	0,005	1,12	0,21	0,96	0,94	0,77
250	0,004	1,19	0,51	0,91	1,11	0,34
300	0,003	1,69	1,23	0,89	1,66	0,36
350	0,0029	3,06	2,44	0,93	2,75	1,49
400	0,0025	3,21	3,06	0,89	3,21	1,87
450	0,0022	3,21	3,16	0,95	3,21	4,07
500	0,0020	1,21	0,42	0,91	1,08	0,31
550	0,0018	3,21	3,39	0,86	3,21	3,65
600	0,0017	3,21	3,19	0,87	3,22	3,17
650	0,0015	3,21	3,13	0,98	3,21	2,88
700	0,0014	3,11	2,89	0,86	3,02	2,63
750	0,0013	2,83	2,59	0,81	2,78	2,45
800	0,00125	2,63	2,48	0,79	2,58	2,34

**Tabella 14.1. Analisi della risonanza. Coefficienti di Amplificazione rilevati nei punti di controllo.**

Ai fini dell'analisi della risonanza, lo scenario simulato per la configurazione di progetto non crea disagi per le attività portuali all'intero del bacino protetto. Infatti per tutti i punti di controllo indagati, l'analisi di risonanza restituisce picchi del coefficiente di amplificazione  $A < 5$ .

Si conclude quindi che le verifiche sulla risonanza della configurazione portuale hanno dato esito positivo; in particolare all'interno del range di periodi di onde lunghe analizzato non si verificano disagi relativi alla operatività dell'approdo protetto.

---

## 15. VERIFICA DELL'AGIBILITA' PORTUALE

---

### 15.1 DATI DIMENSIONALI DELLO SPECCHIO IDRICO

---

I requisiti per il corretto dimensionamento sono stati forniti dal committente, che come già espresso in fase di progettazione preliminare, con questa iniziativa propone di colmare la lacuna dell'offerta turistica della città di Siracusa con la realizzazione di un Marina con le attrezzature necessarie allo scopo, tenendo in opportuno conto e risolvendo le condizioni al contorno imprescindibili.

Le indicazioni che hanno costituito la base per la progettazione preliminare sono state quindi ottimizzate in funzione della configurazione progettuale redatta in fase di progetto definitivo per tenere conto delle prescrizioni ricevute dagli enti preposti durante la conferenza dei servizi.

Lo specchio acqueo sarà destinato in buona parte alla nautica da diporto con la possibilità dell'attracco di idrovolanti, mentre la restante parte sarà destinata agli sport acquatici, ad attività polifunzionali e all'area cantieristica-tecnica.

Lo specchio acqueo protetto sarà così suddiviso:

- *Diporto*
- *Darsena polifunzionale*
- *Campo pratica sports acquatici*
- *Area tecnica*

E' stata inoltre ipotizzata una flotta tipo, con posti barca definiti nel rispetto delle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici" del PIANC del febbraio 2002. Per la visualizzazione della distribuzione spaziale dei posti barca si rimanda all'elaborato specifico facente parte del corpo documentale del presente progetto.



## 15.2 VERIFICA DELL' AREA DEI FRANGENTI

Sono state individuate tramite le simulazioni di tipo STWAVE le fasce di frangenza in presenza delle opere in progetto.

In particolare è riportata l'immagine relativa all'attacco d'onda al largo da 105°N e R=100 anni che si presenta sottocosta con le condizioni più gravose largo.

Ipotizzando la presenza delle opere in progetto, l'area dei frangenti continua ad essere molto limitata; il frangimento dell'onda si localizza a ridosso della costa in corrispondenza di fondali profondi circa 1-2 m, come nelle condizioni di stato di fatto e al di fuori della imboccatura portuale.



Figura 15.1.Fasce di frangenza in presenza delle opere in progetto sotto l'attacco d'onda da D=105°N e R=100 anni.

## 15.3 VERIFICA DELL'IMBOCCATURA PORTUALE

La determinazione dell'orientamento dell'imboccatura portuale, e quindi la sua relativa localizzazione è stata effettuata già al livello di progettazione preliminare, cercando di cogliere principalmente i seguenti obiettivi:

- limitare i fenomeni di insabbiamento della darsena protetta;
- garantire la migliore risposta dello specchio acqueo in termini di agitazione interna residua;
- garantire la sicurezza massima per le manovre di ingresso ed uscita al porto in relazione ai mari ed ai venti.

In fase di progettazione definitiva, si è tenuto conto delle considerazioni ricavate durante la fase di progettazione precedente, delle prescrizioni tecniche indicate dagli Enti durante la Conferenza di Servizi, e dei risultati ottenuti durante le indagini sul clima ondoso, sull'anemologia, sull'idrodinamica, sul trasporto litoraneo, svolte in questa fase (cfr. elaborati "Studio climatologico", "Studio idrodinamico", "Studio della Dinamica delle Coste", "Studio della qualità delle acque").

E' risultato conveniente:

- orientare il tratto terminale del molo foraneo in posizione sub-ortogonale alla direzione SE, direzione assunta dai treni d'onda in prossimità delle opere in progetto (cfr. il capitolo 10);

- posizionare l'imboccatura portuale in corrispondenza di una profondità media di circa -9 m rispetto il l.m.m. che è sempre esterna alla zona dei frangenti e per garantire l'ingresso ai navigli più grandi con un ottimale livello di sicurezza.

Per definirne le dimensioni si è fatto riferimento ad autorevoli raccomandazioni tecniche, ed in particolare al documento del PIANC "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici" del febbraio 2002.

Quale "imbarcazione di progetto" si è considerata l'imbarcazione più grande prevista nella Flotta Tipo:

- lunghezza fuori tutta =90,0 m
- larghezza massima =13,5 m

Adottando i criteri del citato documento PIANC, la larghezza del varco navigabile (calcolata alla quota di fondo) da considerare accettabile deve essere pari a 5 volte la larghezza dell'imbarcazione più grande, e cioè pari a 67,5 m, ciò implica che l'opzione di porre la larghezza della imboccatura pari a 150 m e la larghezza del corridoio pari a 125 m, appare cautelativa.

#### 15.4 VERIFICA DELL'ACCESSIBILITA' PORTUALE

---

La miglior disposizione delle opere esterne di un porto, al fine di garantire il grado maggiore di protezione di specchio acqueo, è quella che prevede un molo di sopraflutto in direzione normale alla traversa principale e uno di sottoflutto disposto al ridosso del primo e rivolto alla traversa secondaria.

Per quanto riguarda la accessibilità dello specchio acqueo protetto, le convenzioni sulla navigazione prevedono che la manovra di entrata sia effettuata rivolgendo la poppa al mare, formando un angolo di 11°15', con la direzione di avanzamento dell'onda, e procedendo alla massima velocità possibile.

Durante le operazioni di virata, al fine di non presentare il fianco al mare, la rotta dovrà stringere al massimo la testata del molo foraneo, e dovrà sempre rivolgere la poppa al mare, procedendo nell'avamposto in moto rotatorio.

In prossimità della testata, la rotta sarà inclinata di 11°15' rispetto alla direzione dell'onda, (ricavato dal piano d'onda), e tangente al cerchio avente raggio pari alla distanza minima della rotta dalla testata del molo foraneo, pari alla semilunghezza della barca, e cioè:

$$r = L/2$$

Il raggio minimo della virata invece viene scelto in base alle dimensioni dello scafo e delle condizioni meteomarine.

Si pone:

- (condizioni di tempesta) :  $R=3L$
- (condizioni di bel tempo):  $R= 1,5L$

Le imbarcazioni devono avere lo spazio per eseguire le virate con inversione di marcia nel canale principale o nell'avamposto; risulta quindi necessario verificare questa possibilità per i natanti maggiori ospitabili nel porto, individuando l'area libera circolare, definita cerchio di manovra, che occorre per compiere queste operazioni.

Considerando il caso relativo alle imbarcazioni meno manovriere, con una sola elica ad asse fisso, si ha che il raggio del cerchio di manovra viene fissato pari a  $R_m=0,58 R$ , in cui  $R$  è il raggio della virata più stretta che l'imbarcazione può compiere, è posto pari a  $1,5 L$ , con  $L$ , lunghezza del natante.

A questo valore occorre aggiungere la semilunghezza della barca, per cui il diametro complessivo della zona di ingombro della manovra è

$$D_m = 2(R_m + L/2) = 2,75 L.$$

Dapprima si sono effettuate le verifiche le operazioni di ingresso e di manovra per un natante di categoria IX (L.O.A.=24 m), tipologia di imbarcazione presente sia nella flotta tipo dell'approdo in progetto sia in quella del Marina di Archimede, al fine di verificare l'assenza di interferenze tra i due approdi.

Per la tipologia di imbarcazione scelta i valori caratteristici dei raggi di manovra e di tangenza sono:

- $r = 12$  m
- $R = 72$  m
- $R_m = 20,88$  m
- $D_m = 33$  m

Le verifiche hanno fornito esito positivo (cfr. elaborato grafico OM.10), in quanto la configurazione delle opere è tale da non creare ostacoli o problematiche alla manovra delle imbarcazioni che atterrano sia nell'approdo in progetto che nel limitrofo Marina di Archimede.

Sono state effettuate anche le verifiche per un natante avente L.O.A.=40 m per le operazioni di ingresso e di manovra all'interno dell'approdo in progetto.

Per la tipologia di imbarcazione scelta i valori caratteristici dei raggi di manovra e di tangenza sono:

- $r = 20$  m
- $R = 120$  m
- $R_m = 44,88$  m
- $D_m = 55$  m

Le verifiche hanno fornito esito positivo (cfr. elaborato grafico OM.10).

Le operazioni di ingresso e di manovra all'interno dell'approdo in progetto da parte delle imbarcazioni più grandi previste secondo la configurazione della flotta tipo (L.O.A.=60 m ed L.O.A.=90 m) non destano preoccupazione in quanto tali navigli sono provvisti di sistemi di propulsione e di governo (propulsori di prua e di poppa e/o motori azimutali tipo "azipod") che consentono agli stessi di manovrare in completa sicurezza anche in spazi limitati.

SIRACUSA, 21/06/2023

IL TECNICO

Ing. Paolo Calafiore