

# COMUNE DI REGGIO CALABRIA

## CAPITANERIA DI PORTO DI REGGIO CALABRIA

Proponente:

CARONTE & TOURIST S.p.A.



REALIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI APPRODO PER IL COLLEGAMENTO  
MARITTIMO REGGIO CALABRIA/MESSINA PRESSO LE AREE A NORD DEL  
PIAZZALE PORTO IN REGGIO CALABRIA

PROGETTO PRELIMINARE

Elaborato

Relazione meteomarina

Scala

Elaborato n.

04



**Progettisti**

Ing. Giovanni Ferlazzo  
Ing. Giovanni Pracanica

**Consulente tecnico-scientifico**

Prof. Ing. Pasquale Filianoti

Data

Messina 01/02/2013

Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione  
(D. Lgs. n. 81/2008)

Ing. Alessandro De Domenico

Revisione

Rev 01 04/12/2013

elaborato originale in rev 0 non modificato



# Caronte & Tourist

---

## **ANALISI METEOMARINA PRELIMINARE DAVANTI A REGGIO CALABRIA**

Prof. ing. Pasquale Filianoti

---

Giugno 2012

## INDICE

<b>1</b>	<b>INQUADRAMENTO TERRITORIALE E ESPOSIZIONE GEOGRAFICA</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>DATI DI MOTO ONDOSI E PARAMETRI METEOMARINI</b>	<b>9</b>
2.1	CRITERI DI VALUTAZIONE DEL CLIMA ONDOSI E DEL RISCHIO DI EVENTI ESTREMI	9
2.2	TIPOLOGIE DI DATI ONDOSI DISPONIBILI	13
<b>3</b>	<b>IL CLIMA ONDOSI DAVANTI A REGGIO CALABRIA</b>	<b>15</b>
3.1	ESPOSIZIONE AI MARI GENERATI FUORI DALLO STRETTO	15
3.2	ONDAZIONI GENERATE LOCALMENTE	16
<b>4</b>	<b>CARATTERISTICHE DELLE ONDE AL LARGO DI REGGIO CALABRIA</b>	<b>20</b>
4.1	PROBABILITÀ DI STATI DI MARE DI ASSEGNATE CARATTERISTICHE	20
4.2	I PERIODI DELLE ONDE	20
<b>5</b>	<b>L'ORIENTAMENTO DEL TRATTO COSTIERO A NORD DEL PORTO DI REGGIO CALABRIA</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>CLIMA ONDOSI IN ACQUE PROFONDE DAVANTI AL TRATTO COSTIERO DESTINATO ALL'APPRODO</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>DALLE ACQUE PROFONDE ALLE ACQUE BASSE</b>	<b>29</b>
7.1	IL PROBLEMA GENERALE DELLA RIFRAZIONE	29
7.2	LO SCHEMA BASE DI BATIMETRICHE RETTILINEE	30
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>32</b>

## SIMBOLI UTILIZZATI PER FIGURE E TABELLE

$a$ [m]	altezza della mareggiata triangolare
$b$ [m]	durata di mareggiata triangolare
$d$ [m]	profondità dell'acqua
$D$ [ore]	persistenza media
$D$ [ore]	durata media dello stato convenzionale di progetto
$F$	Fetch
$h$ [m]	soglia di altezza significativa
$H_s$ [m]	altezza d'onda significativa
$I$	numero di Irribarren
$L$ [m]	lunghezza d'onda
$P$	probabilità di superamento dell'altezza d'onda significativa
$R$ [anni]	periodo di ritorno
$R_U$ [m]	run-up delle onde sulla spiaggia
$S_U$ [m]	set-up del livello medio del mare
$u$	parametro probabilità di superamento omnidirezionale dell'altezza d'onda significativa
$w$ [m]	parametro probabilità di superamento omnidirezionale dell'altezza d'onda significativa
$w_\alpha$ [m]	parametro probabilità di superamento direzionale dell'altezza d'onda significativa
$w_\beta$ [m]	parametro probabilità di superamento direzionale dell'altezza d'onda significativa
$x$	asse orientato secondo l'allineamento della costa (positivo verso destra per chi guarda dal mare)
$X$	variabile ausiliaria legata all'altezza d'onda significativa (v. eq. 1)

$y$	asse perpendicolare all'allineamento di costa (orientato verso terra)
$Y$	variabile ausiliaria legata alla probabilità di superamento (v. eq. 1)
$A$ [gradi]	angolo della direzione di provenienza delle onde (orario rispetto al Nord)
$\theta$ [gradi]	angolo della direzione di propagazione delle onde, rispetto alla perpendicolare alla costa (positivo se le onde attaccano la costa da sinistra per chi guarda dal mare)
$T_m$ [s]	periodo medio delle onde di uno stato di mare

#### **PEDICI**

$0$	sta per "fondali profondi"
$b$	sta per "breaking" frangimento dell'onda
$p$	sta per "picco"

## PREMESSA

L'affidabilità e l'accuratezza dei dati ondametrici è tanto più importante per la buona progettazione (e di conseguenza la riuscita) di un intervento di difesa, quanto meno "rigido" è l'intervento da progettare. Infatti, quando si tratta di progettare la resistenza statica di una difesa costiera rigida (barriera o pennello che sia), e non si dispone di dati sufficientemente accurati per la zona d'intervento, è sufficiente arrivare a definire i valori massimi attesi dei parametri di progetto per "disuguaglianza" con una funzione "maggiorante", per il periodo di ritorno prescelto. Tale funzione può essere agevolmente ricavata a partire dalla conoscenza del clima ondoso in paraggi costieri attigui quello d'interesse, per confronto tra le relative traversie. Viceversa, nel caso degli interventi morbidi (i ripascimenti) la cui evoluzione non è governata dalle massime intensità bensì dalle alte frequenze di occorrenza, la definizione di una funzione maggiorante risulta assolutamente inefficace. Altrettanto inefficace risulta essere spesso la mera trasposizione tra i due paraggi delle altezze d'onda di assegnate frequenza di apparizione e direzione di provenienza. Infatti le piccole (ma frequenti) altezze d'onda risentono in maniera preponderante di cause "locali" sia perché possono essere loro stesse generate localmente, sia perché, anche se generate altrove, risentono della configurazione geometrica (batimetria, esposizione, ecc.) del paraggio.

Ad oggi, non sono disponibili misure dirette del moto ondoso nello Stretto di Messina, rilevate sistematicamente e per periodi sufficientemente lunghi, tali da consentire la definizione dei parametri medi del clima ondoso di comune impiego nel campo dell'ingegneria marittima. Pertanto, si svolgerà un'analisi dell'insieme di dati attualmente disponibili (a conoscenza di chi scrive) nell'intorno a nord e a sud dello Stretto di Messina, cercando attraverso essi di "pervenire" il clima ondoso nel paraggio di interesse.

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

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

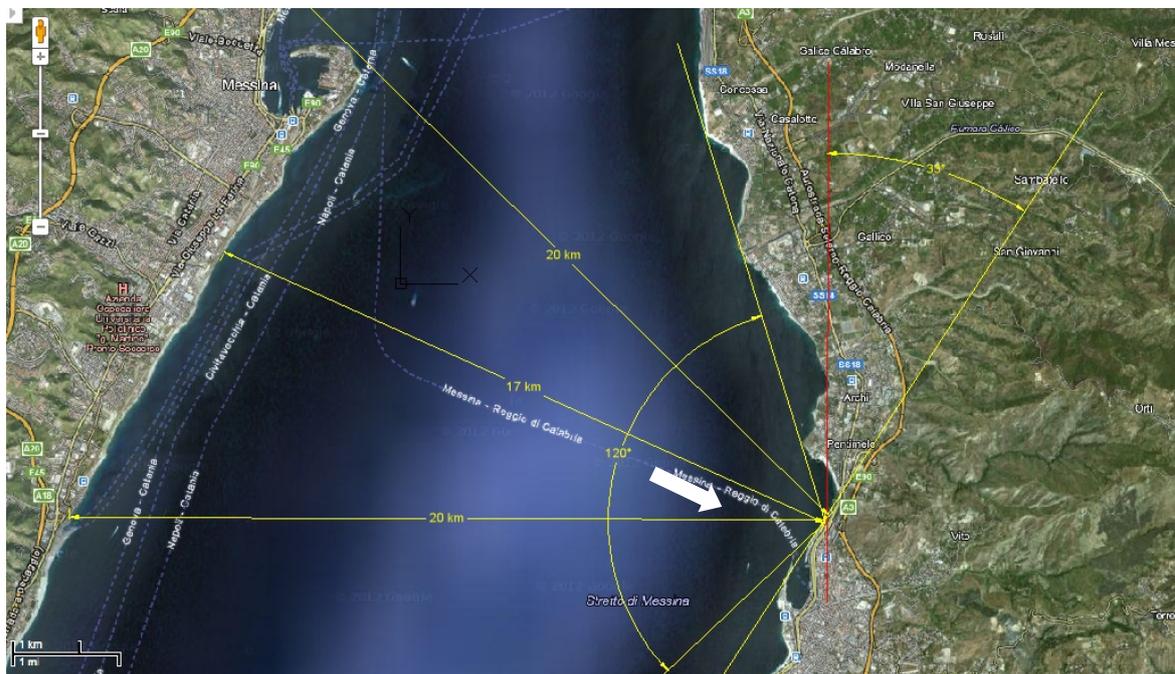
In entrambi i casi (calcolo dell'altezza significativa di progetto, valutazione del grado di stabilità di un ripascimento) la quantificazione degli errori di stima è possibile se si dispone per l'area in esame di misure dirette da usare per la taratura dei dati del modello.

## 1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE E ESPOSIZIONE GEOGRAFICA

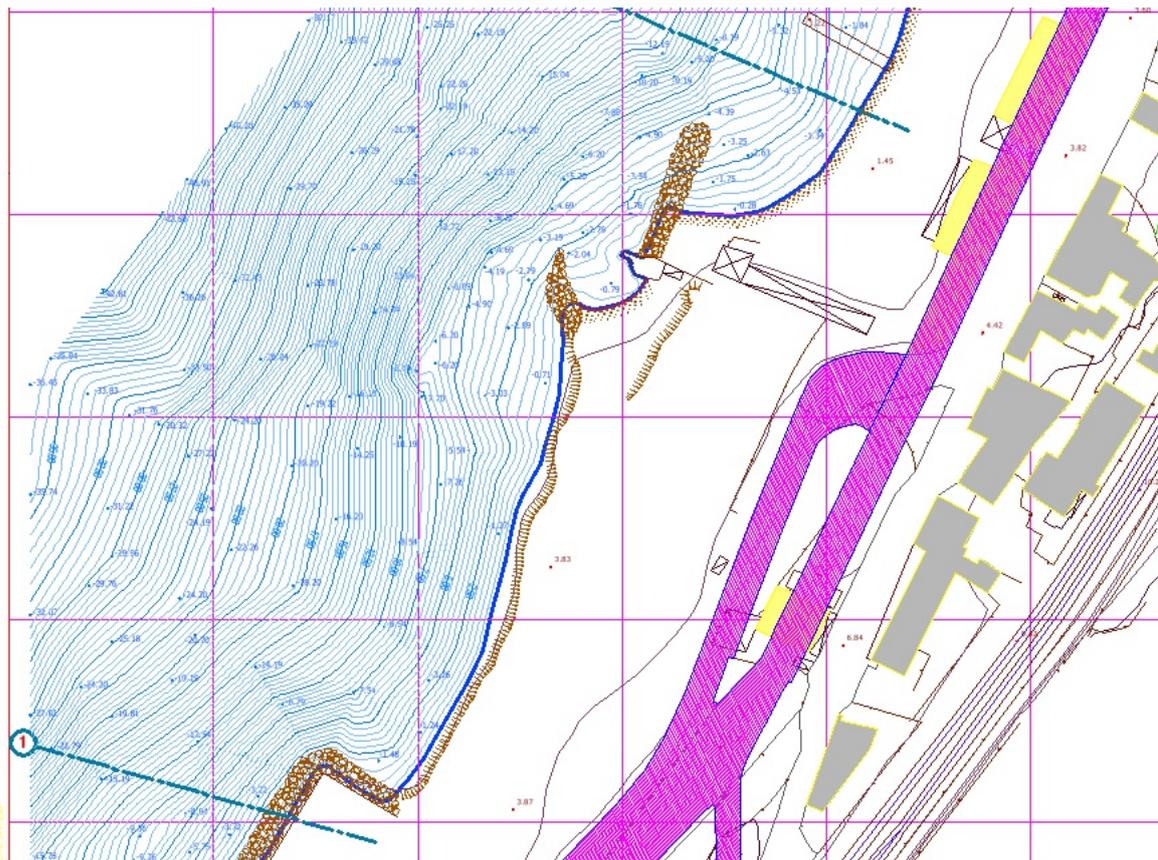
La città di Reggio Calabria si affaccia sulla sponda calabrese dello Stretto di Messina, in posizione baricentrica tra punta Pellaro a Sud e Punta Pezzo a nord. Il tratto costiero all'interno del quale ricade la zona oggetto dell'intervento di difesa, si trova immediatamente a nord del porto della città. Esso si presenta grossomodo rettilineo, allineato lungo la direzione sudovest-nordest, e presenta un angolo tra l'allineamento fondamentale e il Nord di  $32^\circ$  circa (v. Fig. 1.1). Con il termine "allineamento fondamentale" si intende l'allineamento che si ottiene rettificando piccole insenature o protuberanze costiere. La posizione dell'opera ricade al centro del predetto tratto, il quale risulta naturalmente protetto dalla sporgenza di punta Pellaro dall'azione delle onde provenienti da scirocco e da Mezzogiorno. Di conseguenza, il paraggio presenta la traversia principale esposta ai mari che sopraggiungono Ponente, i quali sono formati da onde generate localmente, le cui dimensioni sono pertanto limitate dall'estensione del fetch, che presenta ampiezze variabili da circa 20 km, in direzione est-ovest, a circa 17 km in direzione sudest-nordovest (lungo la direzione della normale alla costa).

L'ampiezza della traversia è di circa  $120^\circ$ , essendo limitata a sud dal molo di ponente del porto (direzione  $220^\circ$ N, traguadata dall'area di interesse) e a nord dall'estremità nord della rada di Pentimele (direzione  $340^\circ$ N, traguadata dall'area di interesse).

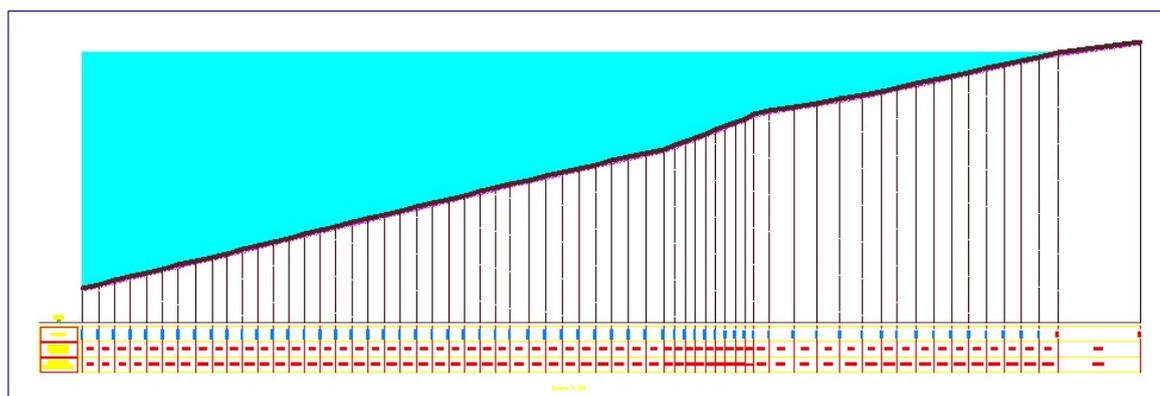
Il tratto di costa oggetto dell'intervento presenta batimetria regolare con andamento grossomodo rettilineo (v. Fig. 1.2). La pendenza media del fondale rispetto all'orizzontale è di  $13^\circ$  circa (v. Fig. 1.3). Il fondale è formato per lo più da ciottoli grossolani, frammisti a sabbie e ghiaie. Si tratta di materiale di riporto, essendoun tempo l'area sottoposta ad azioni di sversamento durante la realizzazione dell'autostrada A3.



**Fig. 1.1** – *Inquadramento geografico dell'area destinata alla realizzazione dell'approdo (indicata da una freccia), a nord del porto di Reggio Calabria . E' evidenziato inoltre il fetch geografico e l'angolo di esposizione del tratto costiero rispetto al nord.*



**Fig. 1.2** – Linee batimetriche davanti al paraggio costiero sede dell'intervento .



**Fig. 1.3** – Sezione trasversale ortogonale alla linea di riva, rilevata nell'area indicata nella Fig. 1.2 .

## 2 DATI DI MOTO ONDOSO E PARAMETRI METEOMARINI

### 2.1 Criteri di valutazione del clima ondoso e del rischio di eventi estremi

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

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

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

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

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

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

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

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

$$X \equiv 100 \ln(2.5h) \quad \text{con } h \text{ in metri,} \quad Y \equiv 100 \ln \ln \frac{1}{P}. \quad (2.1)$$

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

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

$$P(H_s > h) = \exp\left[-\left(\frac{h}{w}\right)^u\right], \quad (2.2)$$

con i parametri  $w$  e  $u$  che variano in generale da località a località. Nel piano delle variabili ausiliarie  $X,Y$  la (2.2) è rappresentata da una retta. La  $P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ , per  $P$  minore grossomodo di 0.01, è di solito ben rappresentata dall'espressione

$$P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2) = \exp\left[-\left(\frac{h}{w_\alpha}\right)^u\right] - \exp\left[-\left(\frac{h}{w_\beta}\right)^u\right], \quad (2.3)$$

dove il valore dell'esponente  $u$  è lo stesso dell'espressione (2.2), e  $w_\alpha$  e  $w_\beta$  variano in generale da settore a settore, oltreché da località a località.

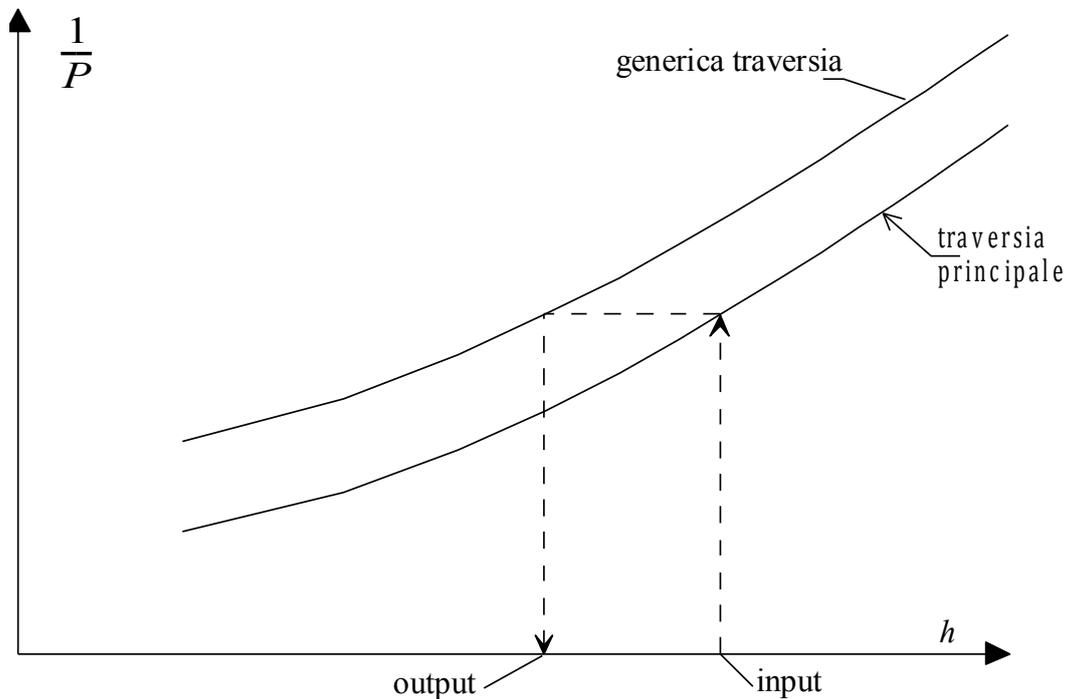
Per tutti i mari del pianeta  $\bar{b}(a)$  è ben espressa da un'esponenziale:

$$\bar{b}(a) = K_1 b_{10} \exp\left(K_2 \frac{a}{a_{10}}\right). \quad (2.4)$$

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

Per il periodo di ritorno  $R(H_s > h)$  vale la soluzione analitica (2.5)

$$R(H_s > h) = \frac{\bar{b}(h)}{hp(H_s = h) + P(H_s > h)}, \quad (2.5)$$



**Fig. 2.1** – Si entra in ascisse con il valore di altezza significativa della traversia principale, si segue il flusso indicato dalle frecce e si esce con il corrispondente valore di altezza significativa per il generico settore direzionale.

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

$$p(H_s = h) = -\frac{dP(H_s > h)}{dh}. \quad (2.6)$$

Infine il periodo di ritorno  $R(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  si può ricavare seguendo la logica proposta da Boccotti (1997). Per il settore di traversia principale si può assumere che  $R(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  coincida con  $R(H_s > h)$ . Per gli altri settori si può operare la costruzione grafica indicata nella Fig. 2.1. Si entra (input) con l'altezza  $h$  corrispondente ad un assegnato valore  $R$  del periodo di ritorno  $R(H_s > h)$ . Si ricava la probabilità

corrispondente a tale valore di  $h$  in base alla  $P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  del settore di traversia principale. Si ricava il valore di  $h$  (output) corrispondente a tale valore di  $P$ , attraverso la probabilità  $P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  del generico settore di interesse. Tale valore di  $h$  (output) rappresenta la soglia di altezza significativa superata con periodo di ritorno  $R$  nel generico settore direzionale di interesse.

NOTA

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

## 2.2 Tipologie di dati ondosi disponibili

Come accennato, non sono disponibili, a conoscenza di chi scrive, rilievi strumentali sistematici del moto ondoso nello Stretto di Messina. Pertanto l'analisi del clima ondoso al largo di Bocale viene effettuata a partire dai dati di moto ondoso reperibili presso il Centro Meteorologico Inglese Met-Office (UKMO). L'altezza significativa ( $H_s$ ), il periodo medio ( $T_m$ ) e la direzione dominante ( $\theta_m$ ) vengono stimati in prefissati punti del bacino per mezzo di modelli matematici. I dati di input sono i valori della velocità del vento ricavati con i modelli di previsione meteorologica.

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

Il Met office utilizza il modello europeo EWM che elabora le previsioni ondose sui nodi di una griglia di 25-30 km di lato. Le simulazioni vengono lanciate due volte al giorno e forniscono previsioni per un intervallo temporale di 48 ore, 12 delle quali precedono l'istante T considerato (wave hindcasting), le rimanenti 36 ore seguono l'istante T (wave forecasting). I dati relativi all'intervallo [T-12 ore, T] vengono archiviati, i dati relativi all'intervallo [T, T+36] vengono diffusi come previsione.

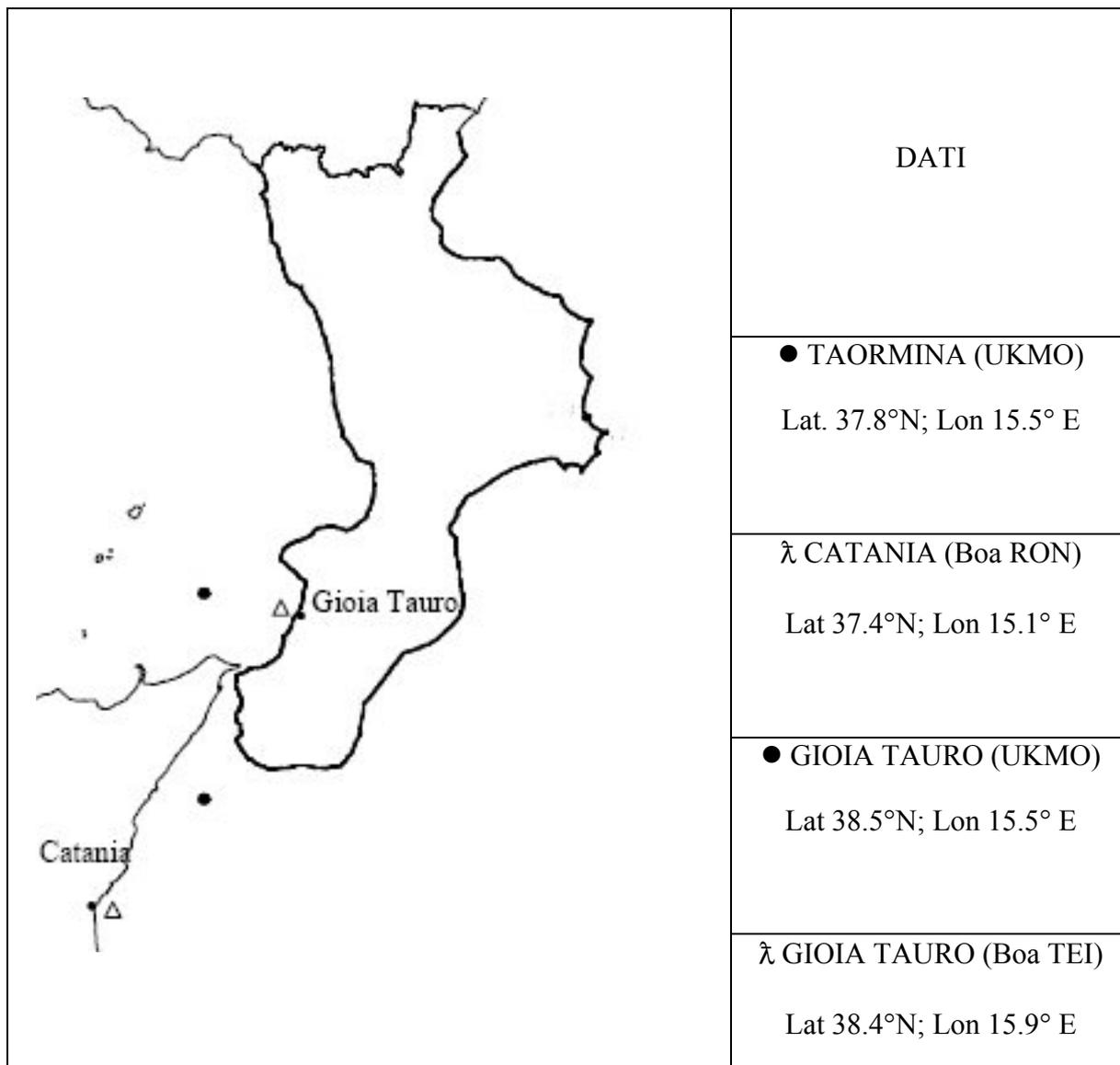
L'archivio del Met-Office dispone attualmente di osservazioni a partire da gennaio 1990. I valori di altezza significativa, periodo medio (Rice) e direzione dominante sono registrati ad intervalli di 6 ore.

Lo stesso Istituto fornisce inoltre le frequenze di apparizione per svariati livelli di altezza significativa e periodo medio raggruppati per settore di provenienza. I settori hanno ampiezza  $\Delta\alpha_0 = 10^\circ$ , gli intervalli di altezza significativa sono di 0.5 m e gli intervalli di periodo medio sono di 1 s.

A causa delle notevoli imprecisioni nella previsione del moto ondoso che si verificano in prossimità alle coste, le coordinate geografiche del nodo della griglia di calcolo del modello EWM più vicino a Reggio Calabria sono [37.8° N-15.5° E]. Si tratta di un punto al disotto dell'imboccatura Sud dello Stretto, situato grossomodo alla stessa latitudine di Taormina (v. Fig. 2.2).

Nel presente studio la taratura dei dati è stata effettuata utilizzando i dati ondometrici della boa della Rete Ondametrica Nazionale (RON) acquisiti nel periodo 1989 –1999 al

largo di Catania.



**Fig. 2.2** – Localizzazione dei punti in prossimità dello Stretto per i quali si dispone di dati di moto ondoso sia di origine strumentale sia di origine modellistica.

#### 3.1 Esposizione ai mari generati fuori dallo Stretto

Il clima ondoso nello Stretto di Messina è determinato dalla sovrapposizione di famiglie di onde aventi differenti origini: quelle generate al di fuori dello Stretto e che vi accedono dalla imboccatura Nord e dalla imboccatura Sud, e quelle generate localmente dai venti di canale. I dati UKMO relativi ai due punti indicati nella Fig. 2.2 possono rappresentare piuttosto dettagliatamente le prime. Nel seguito li indicheremo semplicemente come punto 37.8° N e punto 38.5° N. Il punto 37.8° N è posizionato 20 km circa al largo di Taormina (CT), mentre il punto 38.5° N è posizionato 20 km circa al largo di Spartà (ME). Rispetto alle onde presenti nel punto 37.8° N, la costa della città di Reggio Calabria risente dell'ombra geografica di punta Pellaro. Mentre, rispetto alle ondate nel punto 39.3° N, Reggio Cal. risente dello schermo dell'estremità nord-orientale della Sicilia.

La Fig. 3.1 mostra la  $P(H_s > h)$  (nel piano delle variabili ausiliarie  $X, Y$ ) per i due punti, il 37.8° N e il 38.5° N. I dati relativi al punto 37.8° N si dispongono alla sinistra dei dati relativi al punto 398.5° N, segno che l'altezza delle onde è minore nel punto 37.8° N. La differenza massima tra le ascisse  $X$ , a parità di ordinata  $Y$ , è pari a 13 che implica una differenza di altezza  $h$  del 13% a parità di probabilità di superamento. Tale differenza va via via riducendosi all'aumentare dell'altezza significativa (al diminuire della probabilità di superamento).

Le Figg. 3.2 e 3.3 mostrano il flusso medio di energia ondosa (su base annua) dalle varie direzioni di provenienza. La Fig. 3.2 si riferisce al punto 38.5° N, la Fig. 3.3 al punto 37.8° N. Come si vede, la maggior parte dell'energia ondosa nel punto 38.5° N proviene dai 290° e nel punto 37.8° N proviene dai 110° N. Questo significa che la maggior parte dell'energia ondosa a Sud dello Stretto (mar Jonio) è veicolata dalle onde di scirocco e levante, mentre a Nord (Tirreno meridionale) è veicolata dalle onde di ponente e maestrale. Le onde di scirocco sono le uniche che riescono a penetrare nello Stretto dall'imboccatura Sud, e solo le frange più esterne dello spettro direzionale riescono a raggiungere la costa di Reggio Calabria, dopo aver subito una notevolissima attenuazione dell'altezza d'onda a seguito della rifrazione. In conclusione, l'azione di tale onde (quelle provenienti dall'imboccatura Sud) non esercitano alcuna azione sensibile sul tratto costiero in questione. Pertanto riterremo significativo soltanto il clima nel punto 38.5°N, seppure con le limitazioni esposte nel prossimo paragrafo.

### 3.2 Ondazioni generate localmente

L'area Nord dello Stretto è frequentemente battuta da venti locali provenienti da Ovest – Nord-Ovest. Il fetch lungo il quale spirano questi venti davanti alla costa di Reggio Calabria è alquanto modesto, avendo appena 17 km di estensione in direzione ortogonale alla costa (cfr. Fig. 1.1) e aumentando via via che dalla normale ruotiamo sia in direzione antioraria sia in direzione oraria fino a raggiungere un massimo di lunghezza efficace pari a circa 20 km. Sebbene il vento di canale raggiunga intensità davvero notevoli, l'altezza delle onde formate da tali venti risulta limitata dalla relativamente piccola ampiezza del fetch. Vediamo un esempio. Calcoliamo l'altezza delle onde prodotte da un vento che soffi stabilmente a 150 km/ora da Ovest verso Est, sul fetch massimo pari a 20 km. Secondo i ricercatori del progetto JONSWAP (Hasselmann e al., 1973), il valore di altezza significativa  $H_s$  nella fase stazionaria dipende dal fetch  $F$  e dalla velocità  $u$  del vento attraverso la relazione

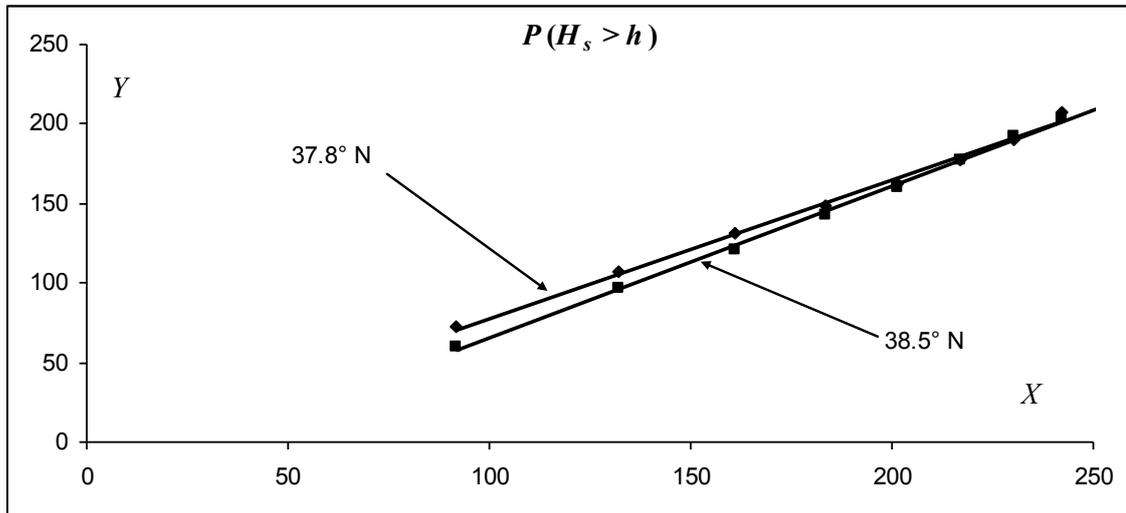
$$\frac{gH_s}{u^2} = 1.26 \cdot 10^{-3} \left( \frac{gF}{u^2} \right)^{0.55}, \quad (3.1)$$

che porta ad un valore di  $H_s$  pari a 3.0 m. Quindi, considerare che al largo di Reggio Calabria le onde abbiano la stessa altezza che hanno nel punto 38.5°N equivale a sovrastimare l'altezza delle onde. Tale sovrastima risulta particolarmente accentuata per le mareggiate provenienti dal settore 270°-310°, essendo questo il settore da cui proviene la maggior parte dell'energia ondosa nel punto 38.5°N (cfr. Fig. 3.2). Le ipotesi di lavoro che facciamo e che verranno utilizzate nel prosieguo dello studio sono

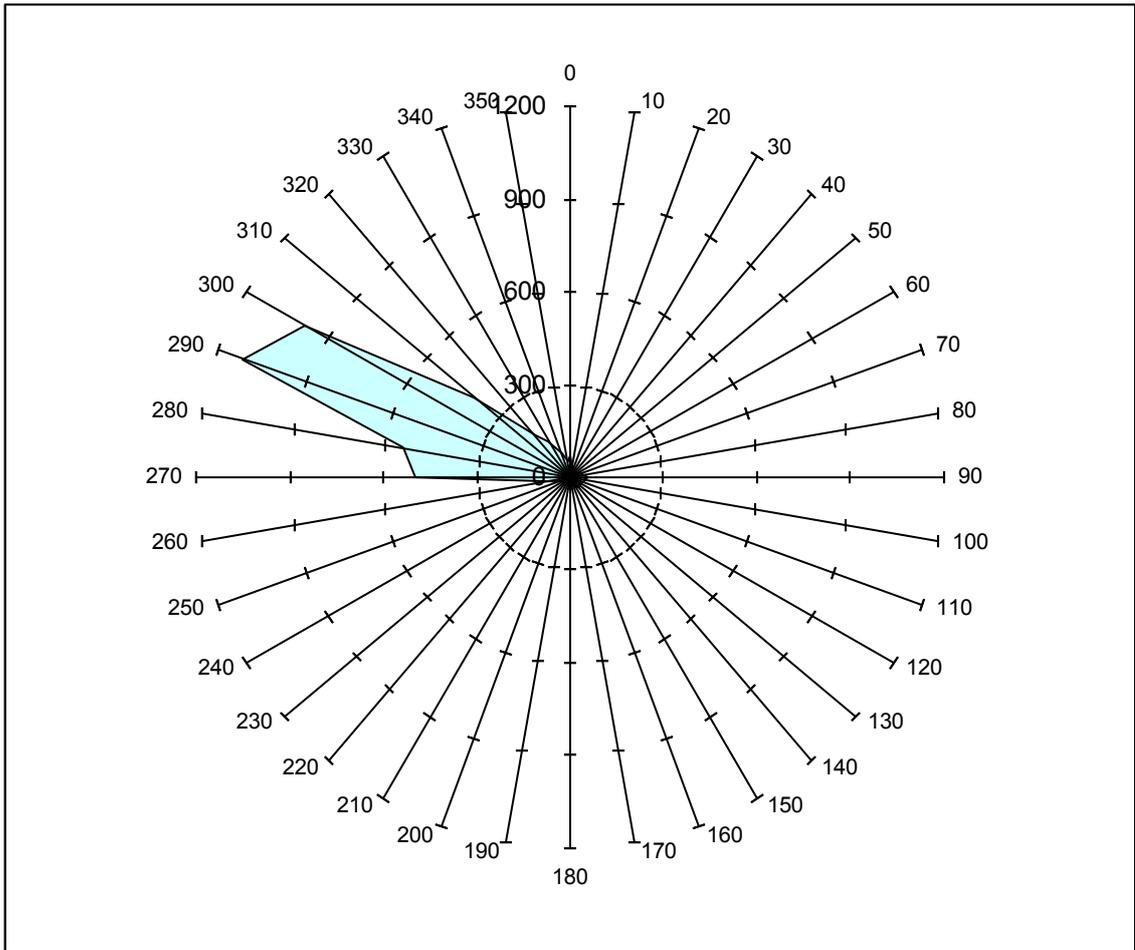
- i) assumere prudenzialmente il valore di 3.0 m risultante dall'applicazione della (3.1), per quel che attiene le previsioni del clima ondoso nel lungo periodo, vale a dire per quel che attiene il dimensionamento delle strutture;
- ii) assumere che la frequenza di apparizione delle onde per le direzioni di provenienza che risultano schermate dall'estremità nord-orientale della Sicilia sia uguale a quella che si ha nel punto 38.5°N per le medesime direzioni, salvo limitare l'altezza significativa massima degli stati di mare da tali settori ad un valore limite convenzionale, il quale prudentemente potrebbe essere assunto pari ai predetti 3.0 m.

L'ipotesi (i) comporta che il dimensionamento di eventuali strutture a difesa della costa non sia eccessivamente oneroso, quale sarebbe altrimenti se assumessimo a tal fine lo stesso rischio ondoso presente nel punto 38.5°N.

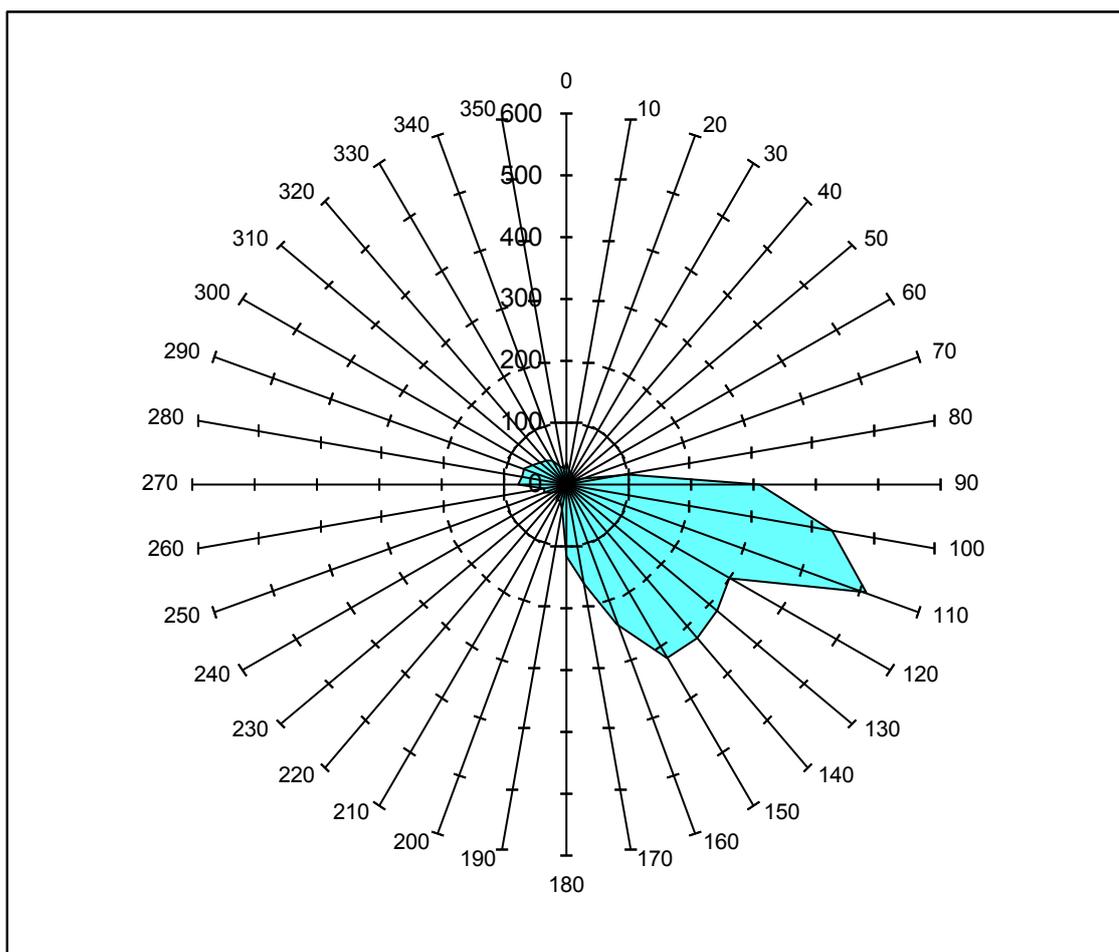
L'ipotesi (ii) comporta che le stime circa l'evoluzione di eventuali ripascimenti della costa non siano eccessivamente falsate.



**Fig. 3.1** – Confronto tra le probabilità di superamento della  $H_s$  nel punto 37.8° N e nel punto 38.5° N.



**Fig. 3.2** – Punto [38.5°N-15.5°E]: *diagramma polare della distribuzione dell'energia media annua associata al moto ondoso. [I valori dell'energia sono in N/s, in quanto rappresentano il flusso di energia per unità di lunghezza.]*



**Fig. 3.3** – Punto 37.8°N: diagramma polare della distribuzione dell'energia media annua associata al moto ondoso. [I valori dell'energia sono in N/s, in quanto rappresentano il flusso di energia per unità di lunghezza.]

## 4 CARATTERISTICHE DELLE ONDE AL LARGO DI REGGIO CALABRIA

### 4.1 Probabilità di stati di mare di assegnate caratteristiche

Come già detto, la forma (2.2) per la probabilità di superamento omnidirezionale e la forma (2.3) per la probabilità di superamento direzionale sono asintotiche, sono valide, cioè, per  $P$  minore di una certa soglia. Tale soglia è pari circa a 0.2 per la probabilità di superamento omnidirezionale, ed è pari circa a 0.01 per le probabilità di superamento direzionali. Le espressioni asintotiche (2.2) e (2.3) consentono di estrapolare fino a bassi livelli della probabilità di superamento, dimostrandosi così essenziali per la stima degli eventi estremi, cioè per il calcolo dei periodi di ritorno di forti mareggiate. Ovviamente la stima degli eventi estremi è cruciale per la progettazione di qualsiasi opera di difesa, ovvero di qualsiasi impianto interagente col mare.

Ci sono però alcuni calcoli di ingegneria (esempio il calcolo del tempo di disfacimento di un ripascimento; ovvero il calcolo del trasporto litoraneo di materiale solido, e l'eventuale conseguente dimensionamento di un impianto di by-pass) per i quali è importante conoscere la frequenza di manifestazione anche dei mari più deboli. Infatti anche i mari deboli, se si prolungano molto nel tempo, concorrono in modo importante alla modellazione delle coste. Per questa finalità (calcolo della frequenza di apparizione di qualsiasi stato di mare ancorché debole) sono utili tabelle come la tab. 1, la quale fornisce la percentuale di tempo di stati di mare con  $H_s$  compresa entro assegnati intervalli e  $A$  compresa entro assegnati settori. La tabella è stata ricavata direttamente dall'insieme di dati UKMO.

### 4.2 I periodi delle onde

Gli stati di mare estremi sono sempre formati da onde di vento, cioè da onde sottoposte all'azione del vento (la probabilità che uno stato di mare estremo sia formato da onde di mare-lungo è assolutamente trascurabile). Una relazione piuttosto ben efficace per il legame tra  $T_p$  (periodo di picco dello spettro) e  $H_s$  per onde di vento su fetch sufficientemente estesi è

$$T_p = 8.5\pi \sqrt{\frac{H_s}{4g}}. \quad (4.1)$$

(cfr. Boccotti, 1997 cap. 4). Tale relazione può essere applicata efficacemente per la stima degli eventi estremi.

Però, come si è detto nel § 3.4, la stima degli eventi estremi non è sufficiente in ingegneria marittima. Per il calcolo dei processi costieri è utile la tab. 4.2 la quale indica il periodo medio delle onde per stati di mare entro assegnati intervalli di  $H_s$  e  $A$ . La tabella è stata ottenuta dall'insieme dei dati UKMO e va utilizzata assieme alla tab. 4.1. Come detto, quello indicato è il periodo medio. Assumendo uno spettro caratteristico delle onde di mare come è lo spettro JONSWAP, si può risalire direttamente dal periodo medio  $T_m$  al periodo di picco  $T_p$ . Basta semplicemente moltiplicare  $T_m$  per 1.28.

**Tab. 4.1** – Punto 38.5° N: frequenze (percentuali) di apparizione di stati di mare con  $H_s$  compresa entro intervalli di 0.5 m e  $A$  compresa entro settori di 10°.

$H_s \backslash A$	225°, 235°	235°, 245°	245°, 255°	255°, 265°	265°, 275°	275°, 285°
<b>0, 0.5</b>	0.697%	0.806%	0.935%	0.308%	3.182%	1.161%
<b>0.5, 1.0</b>	0.238%	0.279%	0.367%	0.437%	6.638%	2.964%
<b>1.0, 1.5</b>	0.150%	0.150%	0.294%	0.328%	2.381%	2.417%
<b>1.5, 2.0</b>	0.005%	0.026%	0.057%	0.210%	0.883%	1.404%

$H_s \backslash A$	285°, 295°	295°, 305°	305°, 315°	315°, 325°	325°, 335°	335°, 345°
<b>0, 0.5</b>	1.703%	2.126%	2.170%	1.751%	1.068%	0.668%
<b>0.5, 1.0</b>	4.317%	4.063%	2.949%	1.693%	0.882%	0.512%
<b>1.0, 1.5</b>	3.693%	3.177%	1.421%	0.613%	0.443%	0.371%
<b>1.5, 2.0</b>	2.944%	2.178%	0.740%	0.278%	0.278%	0.126%
<b>2.0, 2.5</b>				–	–	–
<b>2.5, 3.0</b>				–	–	–

**Tab. 4.2** – Punto 38.5° N: periodi medi ( $T_m$ ) delle onde per stati di mare con  $H_s$  compresa entro intervalli di 0.5 m e  $A$  compresa entro settori di 10°.

$H_s \backslash A$	225°, 235°	235°, 245°	245°, 255°	255°, 265°	265°, 275°	275°, 285°
0, 0.5	3.58	3.59	3.58	3.57	4.43	3.88
0.5, 1.0	3.85	3.75	3.85	3.88	4.97	4.38
1.0, 1.5	4.41	3.96	4.36	4.34	5.30	4.83
1.5, 2.0	4.55	4.95	4.91	5.15	5.71	5.39

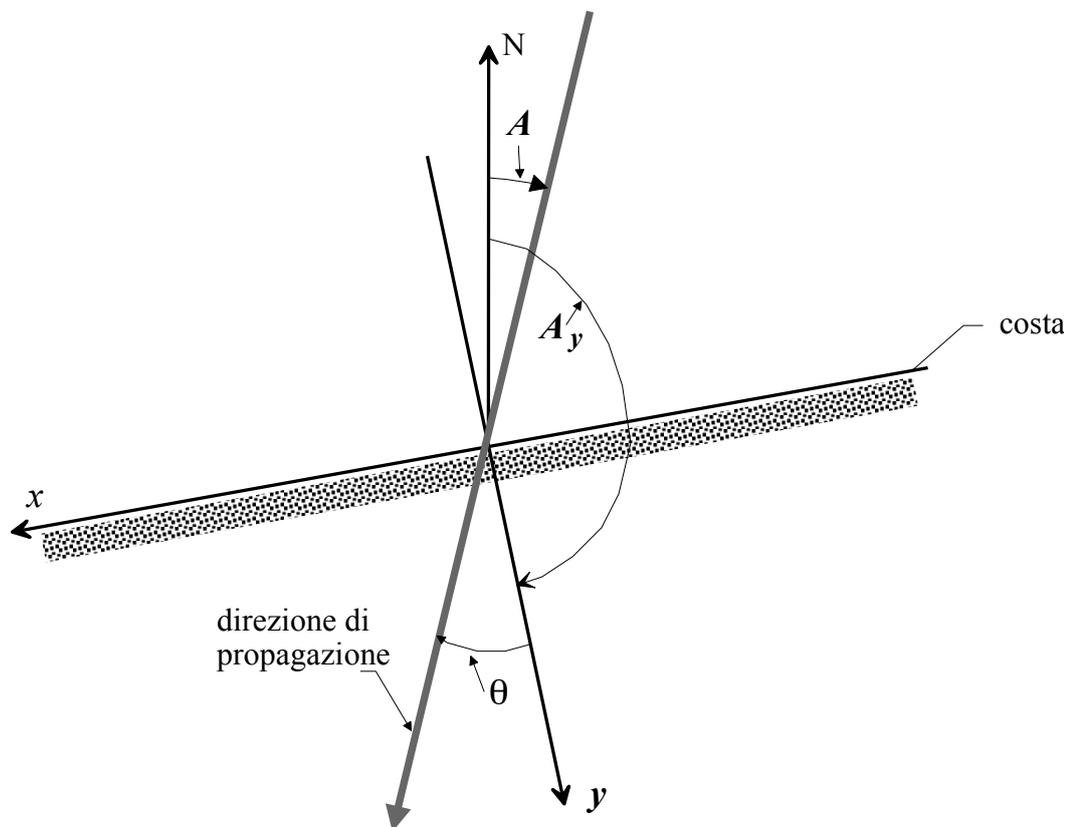
$H_s \backslash A$	285°, 295°	295°, 305°	305°, 315°	315°, 325°	325°, 335°	335°, 345°
0, 0.5	3.79	3.70	3.62	3.58	3.57	3.58
0.5, 1.0	4.23	4.01	3.83	3.76	3.81	3.75
1.0, 1.5	4.76	4.59	4.56	4.52	4.42	4.55
1.5, 2.0	5.30	5.23	4.96	5.12	5.20	5.19
2.0, 2.5				5.48	5.55	5.55
2.5, 3.0				6.33	6.44	6.55

## 5 L'ORIENTAMENTO DEL TRATTO COSTIERO A NORD DEL PORTO DI REGGIO CALABRIA

Assumeremo l'asse  $x$  orientato secondo la linea di costa positivo verso destra per chi guarda dal mare, e l'asse  $y$  perpendicolare alla linea di costa ed orientato verso terra. Indicheremo con  $A$  l'azimut della direzione di *provenienza* delle onde, ed indicheremo con  $\theta$  l'angolo tra la direzione di *propagazione* e l'asse  $y$ . Infine indicheremo con  $A_y$  l'azimut dell'asse  $y$  (cfr. la schema di Fig. 5.1).

La relazione tra l'angolo  $A$  cui fa riferimento l'UK Met Office e l'angolo  $\theta$  che utilizzeremo per descrivere il clima ondoso davanti all'area di interesse è

$$\theta = A - 180^\circ - A_y . \quad (5.1)$$



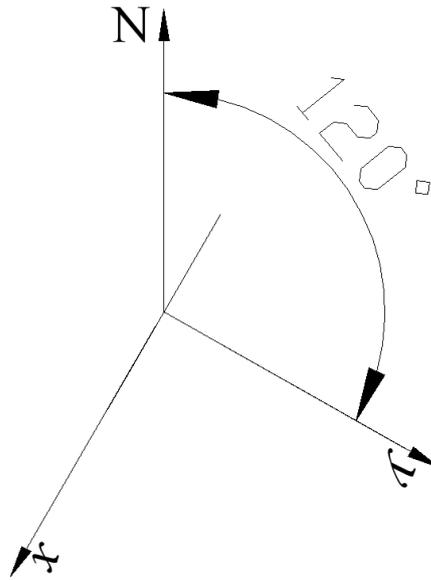
**Fig. 5.1** – Schema di riferimento per la conversione tra direzione azimutale  $A$  di provenienza delle onde e direzione locale  $\theta$  di propagazione.

L'allineamento per il tratto costiero in esame è indicato nella Fig. 1.1 e riportato nella Fig.

5.2: come si vede  $A_y = 122^\circ$ . Tenuto conto che la rosa dei venti è suddivisa dall'UK Met Office nel modo seguente

$$A_1, A_2 = 355^\circ, 5^\circ; A_2, A_3 = 5^\circ, 15^\circ, \dots$$

avremo la conversione di Tab. 5 (per semplicità di riferimento si è assunto  $A_y = 120^\circ$  in luogo di  $122^\circ$ ).



**Fig. 5.1** – Sistema di riferimento x-y locale al tratto di costa nord del porto di Reggio Calabria. L'asse x è orientato lungo-costa.

**Tab. 5.1** – Conversione  $A \rightarrow \theta$  per il tratto di costa a nord del porto di Reggio Calabria.

$A$	$\theta$	$A$	$\theta$
225°, 235°	-75°, -65°	305°, 315°	5°, 15°
235°, 245°	-65°, -55°	315°, 325°	15°, 25°
245°, 255°	-55°, -45°	325°, 335°	25°, 35°
255°, 265°	-45°, -35°	335°, 345°	35°, 45°
265°, 275°	-35°, -25°		
275°, 285°	-25°, -15°		
285°, 295°	-15°, -5°		
295°, 305°	-5°, 5°		

## 6 CLIMA ONDOSO IN ACQUE PROFONDE DAVANTI AL TRATTO COSTIERO DESTINATO ALL'APPRODO

La tabella 6.1 indica la percentuale di tempo di varie condizioni del mare. La tabella 6.3 indica il periodo medio delle onde per i vari intervalli di  $H_s$  e  $\theta$ .

**Tab. 6.1** – Frequenze (percentuali) di apparizione di stati di mare con  $H_s$  compresa entro intervalli di 0.5 m e  $\theta$  compreso entro settori di  $10^\circ$ .

$H_s \backslash A$	-75°, -65°	-65°, -55°	-55°, -45°	-45°, -35°	-35°, -25°	-25°, -15°
<b>0, 0.5</b>	0.697%	0.806%	0.935%	0.308%	3.182%	1.161%
<b>0.5, 1.0</b>	0.238%	0.279%	0.367%	0.437%	6.638%	2.964%
<b>1.0, 1.5</b>	0.150%	0.150%	0.294%	0.328%	2.381%	2.417%
<b>1.5, 2.0</b>	0.005%	0.026%	0.057%	0.210%	0.883%	1.404%

$H_s \backslash A$	-15°, -5°	-5°, 5°	5°, 15°	15°, 25°	25°, 35°	35°, 45°
<b>0, 0.5</b>	1.703%	2.126%	2.170%	1.751%	1.068%	0.668%
<b>0.5, 1.0</b>	4.317%	4.063%	2.949%	1.693%	0.882%	0.512%
<b>1.0, 1.5</b>	3.693%	3.177%	1.421%	0.613%	0.443%	0.371%
<b>1.5, 2.0</b>	2.944%	2.178%	0.740%	0.278%	0.278%	0.126%
<b>2.0, 2.5</b>				—	—	—
<b>2.5, 3.0</b>				—	—	—

**Tab. 6.2** - Periodi medi ( $T_m$ ) delle onde per stati di mare con  $H_s$  compresa entro intervalli di 0.5 m e  $\theta$  compreso entro settori di  $10^\circ$ .

$H_s \backslash A$	-75°, -65°	-65°, -55°	-55°, -45°	-45°, -35°	-35°, -25°	-25°, -15°
<b>0, 0.5</b>	3.58	3.59	3.58	3.57	4.43	3.88
<b>0.5, 1.0</b>	3.85	3.75	3.85	3.88	4.97	4.38
<b>1.0, 1.5</b>	4.41	3.96	4.36	4.34	5.30	4.83
<b>1.5, 2.0</b>	4.55	4.95	4.91	5.15	5.71	5.39

$H_s \backslash A$	-15°, -5°	-5°, 5°	5°, 15°	15°, 25°	25°, 35°	35°, 45°
<b>0, 0.5</b>	3.79	3.70	3.62	3.58	3.57	3.58
<b>0.5, 1.0</b>	4.23	4.01	3.83	3.76	3.81	3.75
<b>1.0, 1.5</b>	4.76	4.59	4.56	4.52	4.42	4.55
<b>1.5, 2.0</b>	5.30	5.23	4.96	5.12	5.20	5.19
<b>2.0, 2.5</b>				5.48	5.55	5.55
<b>2.5, 3.0</b>				6.33	6.44	6.55

## 7 DALLE ACQUE PROFONDE ALLE ACQUE BASSE

### 7.1 Il problema generale della rifrazione

Dalle caratteristiche  $(H_{s0}, T_p, \theta_0)$  delle onde sugli alti fondali (cioè dalle caratteristiche illustrate nei §§ 6 e 7) è possibile ricavare le caratteristiche  $(H_s, T_p, \theta)$  sulla generica profondità  $d$  davanti al generico tratto di costa. [Finora abbiamo considerato solo onde in acque profonde. Di qui in avanti trattiamo le trasformazioni delle onde dalle acque profonde alle acque basse, e dunque usiamo simboli distinti:  $H_{s0}, \theta_0$  per le acque profonde  $H_s, \theta$  per la generica profondità  $d$ . Quanto a  $T_p$ , esso si conserva dalle acque profonde alle acque basse (a meno di piccole variazioni dovute alla deformazione dello spettro)].

La trasformazione delle onde dalle acque profonde alle acque basse è dovuta al fenomeno di rifrazione. La rifrazione delle onde periodiche è trattata nei §§ 2.6 e 2.8 di Boccotti (1997, 2000). La rifrazione delle onde irregolari generate dal vento è trattata nel § 8.4 di Boccotti (1997, 2000). Una conclusione pratica è: calcolare la rifrazione delle onde irregolari generate dal vento con le espressioni valide per le onde periodiche e assumere  $T_p$  (il periodo di picco dello spettro) come periodo delle onde periodiche.

Il lavoro fatto nei §§ 6 e 7 della presente relazione consente di effettuare il calcolo della rifrazione delle onde davanti all'area di approdo. Per il calcolo della rifrazione è infatti necessario conoscere le caratteristiche ondose in acque profonde con le direzioni di propagazione riferite a una coppia di assi coordinati, uno dei quali orientato secondo l'allineamento fondamentale della costa (in modo che la direzione di propagazione risulti sempre compresa nel primo o nel secondo quadrante). Come detto al § 1.1, per "allineamento fondamentale" si intende l'allineamento che si ottiene rettificando piccole insenature o protuberanze costiere. L'allineamento fondamentale del tratto costiero considerato è indicato nella Fig. 5.2.

Per cogliere le caratteristiche medie lungo-costa del moto ondoso in acque basse davanti ai tratti di costa considerato, conviene ragionare dapprima come se le batimetriche fossero rettilinee e parallele all'allineamento fondamentale di quel tratto di costa; ed è quello che faremo nei due paragrafi seguenti. Se si desidera ricavare le caratteristiche di dettaglio all'interno di una specifica insenatura o davanti ad una piccola protuberanza costiera, bisogna

ricorrere al calcolo delle ortogonali d'onda mediante integrazione numerica delle equazioni del § 2.8.3 di Boccotti (1997, 2000). Tale integrazione presuppone la disponibilità di rilievi batimetrici di dettaglio.

## 7.2 Lo schema base di batimetriche rettilinee

Recentemente Janssen e Battjes (Coastal Engineering 54, 2007) hanno proposto un modello matematico per valutare le dissipazioni di energia, e quindi l'altezza delle onde, nella "surf-zone" a valle delle condizioni di frangimento, le quali sono definite dalle note relazioni:

$$\frac{H_{sb}}{d_b} = 0.78 \quad (7.1)$$

e

$$\frac{H_{sb}}{L_{p0}} = 0.14 \tanh^2 \left( \frac{2\pi d_b}{L_p} \right). \quad (7.2)$$

In altri termini non si ha frangimento finché vengono verificate le due relazioni:

$$\frac{H_s}{H_{s0}} < \frac{0.8}{H_{s0}/L_{p0}} \frac{d}{L_{p0}}, \quad (7.3)$$

$$\frac{H_s}{H_{s0}} < \frac{0.14}{H_{s0}/L_{p0}} \tanh^2 \left( \frac{2\pi d}{L_p} \right) \quad (7.4)$$

I risultati del modello sono mostrati nella Fig. 7.1 per lo stato di mare da 3.0 m di  $H_s$ . Come si vede dalla figura l'altezza significativa sulla profondità di 5.5 m (profondità di posa dei cassoni di banchina) rimane praticamente inalterata rispetto alla profondità di largo, in quanto il fenomeno del frangimento non si manifesta, essendo la profondità considerata sufficiente a garantire le condizioni di stabilità dell'onda previste dalle (7.1) e (7.2).

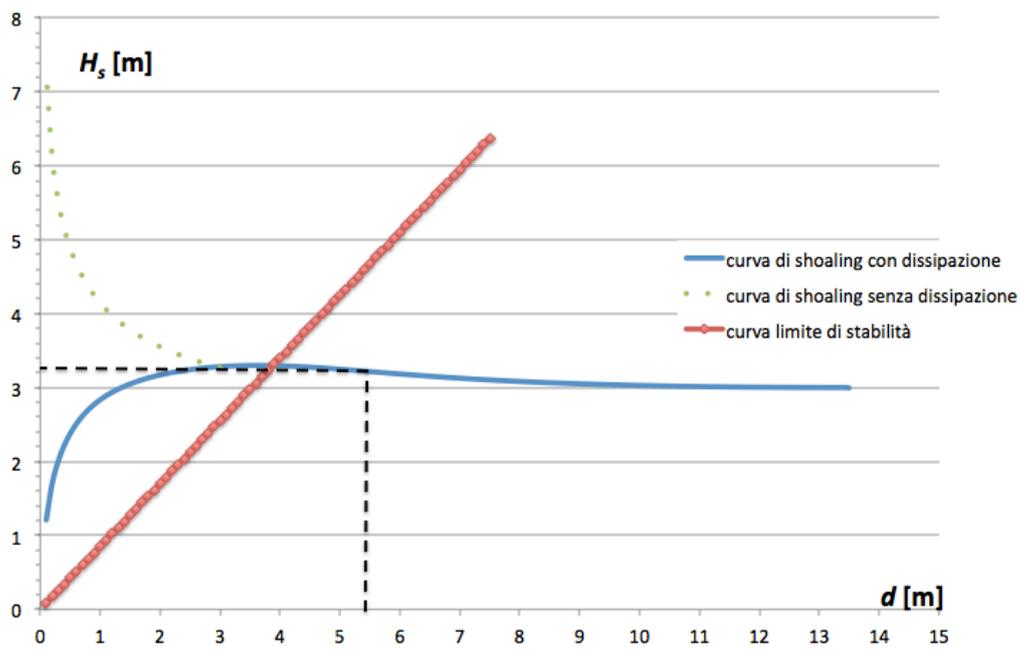


Fig. 7.1 – Curva di shoaling di Janssen e Battjes (2007) che tiene conto dei fenomeni dissipativi dovuti al frangimento nella “surf zone”.

## 8 CONCLUSIONI

Il paraggio costiero immediatamente a nord dell'imboccatura del porto di Reggio Calabria risulta naturalmente protetto, grazie alla presenza di punta Pellaro, dalle onde da sud e da sud-ovest provenienti dall'imboccatura sud dello Stretto di Messina. Pertanto il clima ondoso è caratterizzato dalle ondazioni generate localmente da un vento che spira frequentemente dalla Sicilia verso la Calabria, principalmente in direzione da nordovest-sudest e secondariamente da ovest verso est. Il braccio di mare (fetch) lungo il quale spira questo vento ha un'estensione di una ventina di chilometri. In prima approssimazione, l'altezza d'onda massima per il dimensionamento dell'opera d'accosto è stata determinata utilizzando le relazioni del progetto JONSWAP che legano l'altezza d'onda alle condizioni di generazione, assumendo cautelativamente un valore della velocità del vento alquanto sostenuta. Nelle fasi successive della progettazione il calcolo potrà essere affinato avvalendosi di rilievi delle condizioni anemologiche in aree quanto più possibile prossime a quella considerata, purché tali rilievi siano operati con sistematicità e coprano un intervallo di tempo sufficientemente lungo da consentire di ricavare le soglie di velocità del vento corrispondenti ai tempi di ritorno prescritti dalle norme.

I medesimi rilievi saranno altresì utili a migliorare le stime mostrate nella tab. 6.1 circa le frequenze di apparizione di assegnate soglie di altezza significativa per fissate direzioni di provenienza delle onde. Per il momento, in base a tali stime, si può affermare che i mari più frequenti sono quelli provenienti dal IV quadrante, e più precisamente quelli che attaccano la costa da un ventaglio di direzioni di circa  $30^\circ$  di ampiezza ( $-30^\circ < \theta < 0$ ), ovvero da un ventaglio delimitato dalle direttrici ovest-est e nordovest-sudest.

In definitiva l'area a nord del porto di Reggio Calabria presenta condizioni ondose favorevoli per l'insediamento dell'approdo, perché favorevole è l'esposizione geografica del paraggio, che è attaccato da mari con modesti valori di altezze d'onda significativa. Ciò

comporta minore (o addirittura nulla) necessità di opere a mare a protezione dell'approdo, in considerazione anche del fatto che ci troviamo a ridosso di una struttura portuale di cui all'occorrenza si può fare uso. Si prevede inoltre che i giorni di interruzione annuale del servizio, a causa di avverse condizioni meteomarine, saranno in numero alquanto limitato.