



UNIONE EUROPEA



REPUBBLICA ITALIANA



REGIONE CALABRIA



CITTA' METROPOLITANA DI REGGIO CALABRIA

Settore 13 Difesa del Suolo e Salvaguardia delle Coste
Edilizia e Impiantistica Sportiva

PROGETTO DEFINITIVO - ESECUTIVO



LAZZARO



SALINE



TITOLO ELABORATO

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO PARAGGIO SALINE

SCALA:		SEZIONE		003 - B		ELABORATO N.		004	
REVISIONI	3								
	2								
	1								
	0	EMISSIONE	Settembre 2017						
N°	MODIFICA	DATA	FIRMA	DATA	FIRMA	DATA	FIRMA		
		DISEGNATO		CONTROLLATO		APPROVATO			

PROGETTAZIONE:

ing. Ezio Maria Giuseppe TRIPODI
via Nazionale, 104 89062 Motta San Giovanni - Lazzaro (RC)
e-mail trendss@libero.it
tel./fax 0965713367 cell.3331095009

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:

DOTT. ARCH. GIUSEPPE BENCIVINNI
CITTA' METROPOLITANA DI REGGIO CALABRIA
Settore 13 Difesa del Suolo e Salvaguardia delle Coste
Piazza Italia 89100 Reggio Calabria
P.I. 80000100802 fax 0965.895067 - 858519

RESPONSABILE DEL SETTORE:

DOTT. ING. PIETRO FOTI
CITTA' METROPOLITANA DI REGGIO CALABRIA
Settore 13 Difesa del Suolo e Salvaguardia delle Coste
Piazza Italia 89100 Reggio Calabria
P.I. 80000100802 fax 0965.895067 - 858519

**INTERVENTI DI DIFESA COSTIERA SUL TRATTO DI LITORALE DA
SALINE IONICHE DEL COMUNE DI MONTEBELLO IONICO A
LOCALITA' LAZZARO DEL COMUNE DI MOTTA SAN GIOVANNI.**

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO PARAGGIO SALINE

Settembre 2017

1 PREMESSA

In allegato si riporta lo "**Studio idraulico marittimo**" redatto dal prof. ing. Fabio Filianoti per conto della Provincia di Reggio Calabria per la redazione della progettazione di altre opere marittime insistenti nello stesso paraggio.



AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI REGGIO CALABRIA

**RELAZIONE IDRAULICO-MARITTIMA INTERVENTO DI DIFESA
COSTIERA IN LOCALITÀ RIACE DI SALINE JONICHE**

Gennaio 2013

INDICE

1	LE DIMENSIONI DELLE ONDE DAVANTI A RIACE IONICA	4
1.1	LE MODALITÀ DI ANALISI	6
1.2	LA $P(H_s > h)$ OMNIDIREZIONALE AL LARGO	6
1.3	IL PERIODO DI RITORNO $R(H_s > h)$	7
1.4	ANALISI DEL MOTO ONDOSO AL LARGO IN BASE ALLA DIREZIONE DI PROVENIENZA DELLE ONDE	9
1.4.1	<i>La probabilità direzionale $P(H_s > h; A_1 < A < A_2)$</i>	9
1.4.2	<i>Il periodo di ritorno $R(H_s > h; A_1 < A < A_2)$</i>	16
	2 PROPAGAZIONE DELLE ONDE DAL LARGO VERSO I BASSI FONDALI	21
2.1	L'ORIENTAMENTO DEL TRATTO COSTIERO DI RIACE	21
2.2	SHOALING – RIFRAZIONE DI UNO STATO DI MARE	23
2.3	CARATTERISTICHE DELLO STATO DI MARE AL FRANGIMENTO	24
2.4	LA PERSISTENZA $\bar{D}(h)$	30
3	VERIFICA DELLA CONGRUENZA CON I RILIEVI STRUMENTALI	32
3.1	ANALISI DEI DATI DELLA BOA ONDAMETRICA DI CAPO SPARTIVENTO	32
3.1.1	<i>La regressione periodi-altezze significative</i>	32
3.1.2	<i>Il flusso medio di energia</i>	33
4	LA PORTATA DI MATERIALE SOLIDO	36

PREMESSA

L'unità fisiografica che ricomprende il paraggio di Saline Joniche è caratterizzata da un trasporto litoraneo in direzione EST-OVEST decisamente preponderante rispetto al trasporto nella direzione opposta. Questo, perché le onde che investono il tratto costiero considerato sono essenzialmente di due tipi: onde da scirocco (SE), responsabili appunto del trasporto in direzione EST-OVEST, e onde da libeccio (SW) in grado di movimentare il sedime in direzione opposta. Le prime, vale a dire le onde da scirocco, sono prevalenti per frequenza e ampiezza. Per frequenza, in quanto da scirocco arrivano due famiglie di onde: onde in fase di generazione ed onde di mare lungo; mentre da libeccio arrivano solo le onde in fase di generazione. Quanto all'ampiezza, le mareggiate più forti risultano da scirocco in quanto il fetch geografico di scirocco (cioè il braccio di mare sul quale agisce il vento di scirocco) è molto maggiore del fetch di libeccio. Frangendo le onde esercitano una forza orizzontale sul fondo marino, la quale è in grado, in presenza di fondali sabbiosi, di far scorrere il materiale di fondo. Il molo di sopraflutto del porto della ex Liquichimica costituisce un'interruzione al naturale flusso delle sabbie, con il risultato che in trent'anni, la sabbia si è depositata prima lungo il molo di sopraflutto del porto, poi sull'imboccatura del porto stesso, ed infine, dopo averla ostruita del tutto, ha ripreso (almeno in parte) il percorso originario, cioè quello presente prima della realizzazione del porto.

Oggi la quantità di materiale solido accumulatosi in corrispondenza all'imboccatura portuale e lungo il molo di sopraflutto è dell'ordine dei milioni di metri cubi. A tale volume va aggiunto il volume relativo al materiale depositatosi a levante della radice del molo di sopraflutto, che ha comportato un vistosissimo avanzamento della linea di battigia. L'accumulo a levante del porto è anch'esso dell'ordine dei milioni di metri cubi. Una stima accurata di esso è peraltro impossibile causa la mancanza di precisi rilievi batimetrici nel periodo antecedente la costruzione del porto. Di conseguenza anche una stima della portata media di materiale solido sulla base dei rapporti volume accumulato/ tempo della costruzione del porto appare alquanto inesatta.

Quest'enorme quantità di sabbia costituisce il deficit patito negli ultimi decenni dai litorali posizionati a ovest dell'infrastruttura portuale, vale a dire Saline Joniche, Lazzaro e Pellaro. Di conseguenza il trasporto solido litoraneo nei sopra citati litorali è avvenuto quasi per intero a spese della sabbia presente in essi, causando arretramenti notevolissimi

della linea di costa.

Per porre rimedio, almeno in parte, al gravissimo fenomeno di erosione si è intervenuto con opere di difesa costiera che hanno mitigato l'impatto energetico delle onde sui litorali e sulle strutture e/o infrastrutture in fregio ad essi.

1 LE DIMENSIONI DELLE ONDE DAVANTI A RIACE IONICA

I dati ondometrici utilizzati per la stima del clima meteo marino davanti al paraggio di Saline Joniche sono quelli elaborati dal Istituto Meteorologico della Gran Bretagna. 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 Riace sono [37.8°N-15.5°E]. Si tratta di un punto situato davanti a Taormina, al di sotto dell'imboccatura Sud del Canale (v. Fig. 1.1).

La normale n (mare-terra) al tratto di costa che interessa il paraggio di Riace presso Saline Joniche forma un angolo di circa 10° con il NORD (v. Fig. 1.2). Il settore di traversia ha un'ampiezza di circa 150° ed è stato suddiviso in sotto-settori di 20° , centrati grossomodo sulla normale (che include le direzioni di provenienza comprese tra 170° e 190°) (v. Figura 1.2).

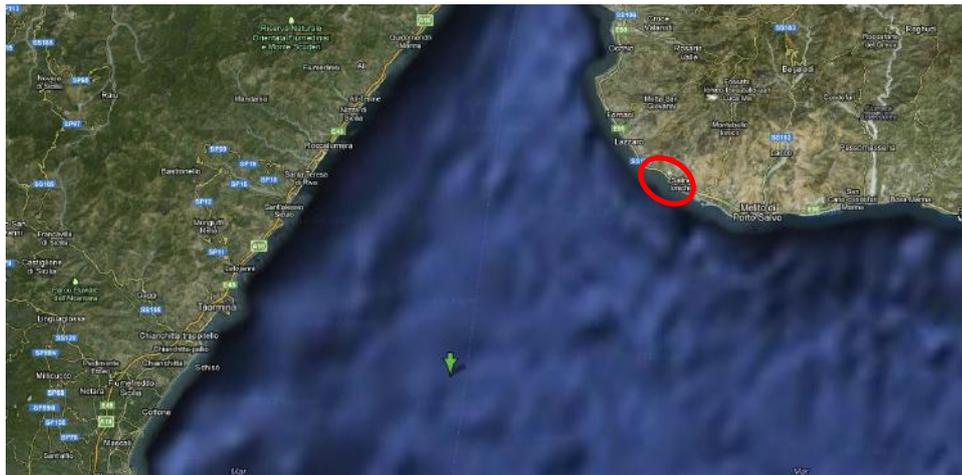


Fig. 1.1. Area sud dello Stretto. La freccia indica il punto di coordinate [37.8°N, 15.5° E]; l'ovale indica l'area di intervento.

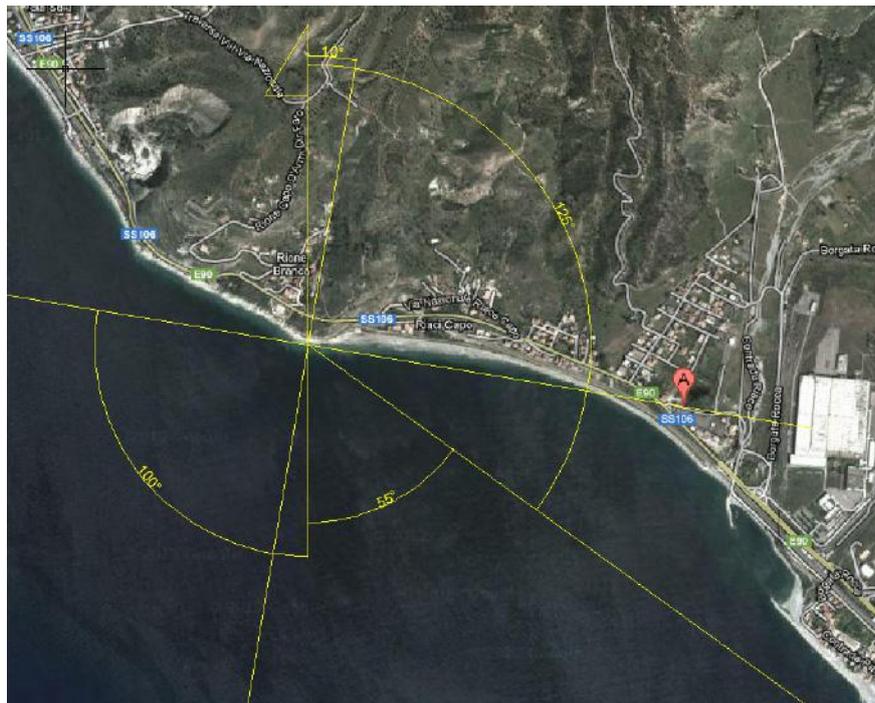


Fig. 1.2 Tratto di costa di Riace presso Saline Joniche, interessato dall'intervento di difesa costiera.

NOTA

Il nodo di coordinate [37.8°N-15.5°E] utilizzato per la stima del clima meteomarinico dista più di 50 Km dal tratto di costa in esame. È probabile che le direzioni d'onda in

prossimità alla costa (seppur su fondali relativamente profondi) siano significativamente diverse dalle direzioni nei nodi di rete. Questo perché le caratteristiche ondose nell'area Ionica a EST della Sicilia sono fortemente disomogenee. A causa di tale disomogeneità sarebbe necessario disporre di dati ondometrici registrati in prossimità di Saline Joniche, dati che consentirebbero di pervenire a stime più accurate.

1.1 Le modalità di analisi

Le elaborazioni che svolgeremo nel prosieguo del presente lavoro sono finalizzate alla definizione dei seguenti aspetti:

- la probabilità di superamento $P(H_s > h)$ dell'altezza significativa al largo;
- le frequenze dei livelli di altezza significativa per settore di propagazione;
- le probabilità di superamento dei livelli di altezza significativa per assegnata direzione di propagazione;
- le correlazioni altezza d'onda significativa – periodo;
- gli eventi estremi associati a valori fissati di tempi di ritorno.

1.2 La $P(H_s > h)$ omnidirezionale al largo

Come si vede in Fig. 1.3 la probabilità omnidirezionale dell'altezza significativa è ben approssimata (coeff. di regressione 0.988) da una retta nel piano Weibull. Qui le variabili ausiliarie X e Y sono legate rispettivamente alla soglia h di altezza significativa e alla probabilità P dalle relazioni

$$X \equiv \ln(h) \quad \text{con } h \text{ in metri,} \quad Y \equiv \ln \ln \frac{1}{P}. \quad (1.1)$$

Pertanto la probabilità $P(H_s > h)$ può essere espressa nella forma

$$P(H_s > h) = \exp \left[- \left(\frac{h}{w} \right)^u \right]. \quad (1.2)$$

dove i parametri u e w dipendono dalla località in esame, e per il paraggio di Riace assumono i valori

$$u = 0.932, \quad w = 0.487 \text{ m.}$$

La densità di probabilità $p(H_s = h)$ è legata alla $P(H_s > h)$ dalla relazione

$$p(H_s = h) = -\frac{dP(H_s > h)}{dh}, \quad (1.3)$$

e pertanto assume la forma

$$p(H_s = h) = \frac{u}{w} \left(\frac{h}{w}\right)^{u-1} \exp\left[-\left(\frac{h}{w}\right)^u\right]. \quad (1.4)$$

1.3 Il periodo di ritorno $R(H_s > h)$

Il periodo di ritorno $R(H_s > h)$ di una mareggiata in cui l'altezza significativa supera un'assegnata soglia h può essere ricavato in maniera rigorosa ricorrendo al concetto di mareggiata triangolare equivalente (Boccotti, 1997). L'espressione generale del periodo di ritorno può essere espressa nella forma

$$R(H_s > h) = \frac{\bar{b}(h)}{h p(H_s = h) + P(H_s > h)} \quad (1.5)$$

dove $\bar{b}(h)$ è la durata media delle mareggiate di altezza significativa massima pari a h , e $p(H_s = h)$ è la funzione densità di probabilità della $P(H_s > h)$. La funzione $\bar{b}(h)$ può essere espressa nella forma (Boccotti, 1997)

$$\bar{b}(h) = b_{10} \left(1.11 - 0.11 \frac{h}{a_{10}}\right), \quad (1.6)$$

dove a_{10} è l'altezza media dell'insieme N (= numero di anni x 10) di mareggiate più forti

realizzatesi nel intervallo di tempo in considerazione, e b_{10} è la durata media di tale insieme.

La stima di a_{10} può essere eseguita avvalendosi di una proprietà generale del mar Mediterraneo secondo la quale la probabilità $P(H_s > a_{10})$ risulta praticamente costante quale che sia il paraggio costiero in esame. Il risultato è $a_{10} = 3.4$ m

Quanto a b_{10} , esso esercita una scarsa influenza sulla stima della H_s dello stato di mare di progetto. Conviene assumere $b_{10} = 82$ ore, tenuto conto le registrazioni ondametriche eseguite al largo di Catania e di Crotona hanno fornito entrambe tale valore.

La Fig. 1.4 mostra il periodo di ritorno $R(H_s > h)$ al largo di Riace. Essa è stata ottenuta sostituendo nell'eq. (1.5) le espressioni (1.2), (1.4) e (1.6) con i valori di u, w e a_{10}, b_{10} indicati sopra. Le soglie di altezza significativa e periodo dominante eguagliate o superate mediamente ogni R anni sono mostrate nella tabella 1.1.

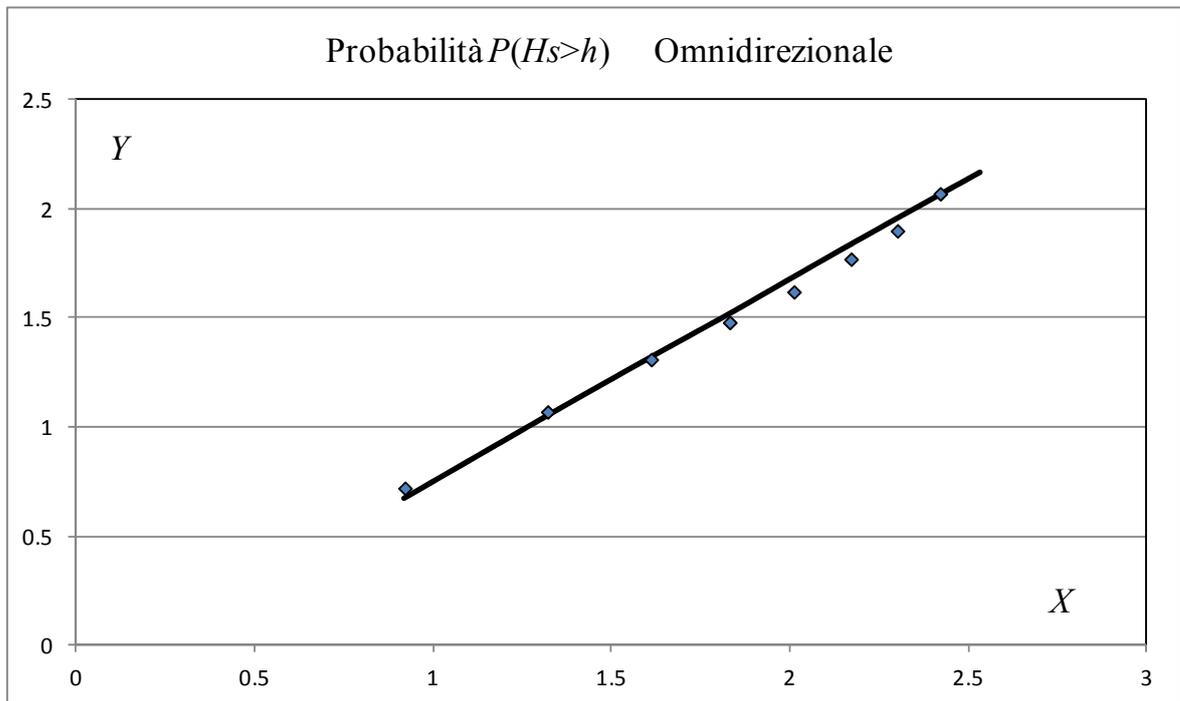


Fig. 1.3 La probabilità di superamento omnidirezionale dell'altezza significativa. Il piano di rappresentazione è semplicemente logaritmico in ascissa e due volte logaritmico in ordinata.

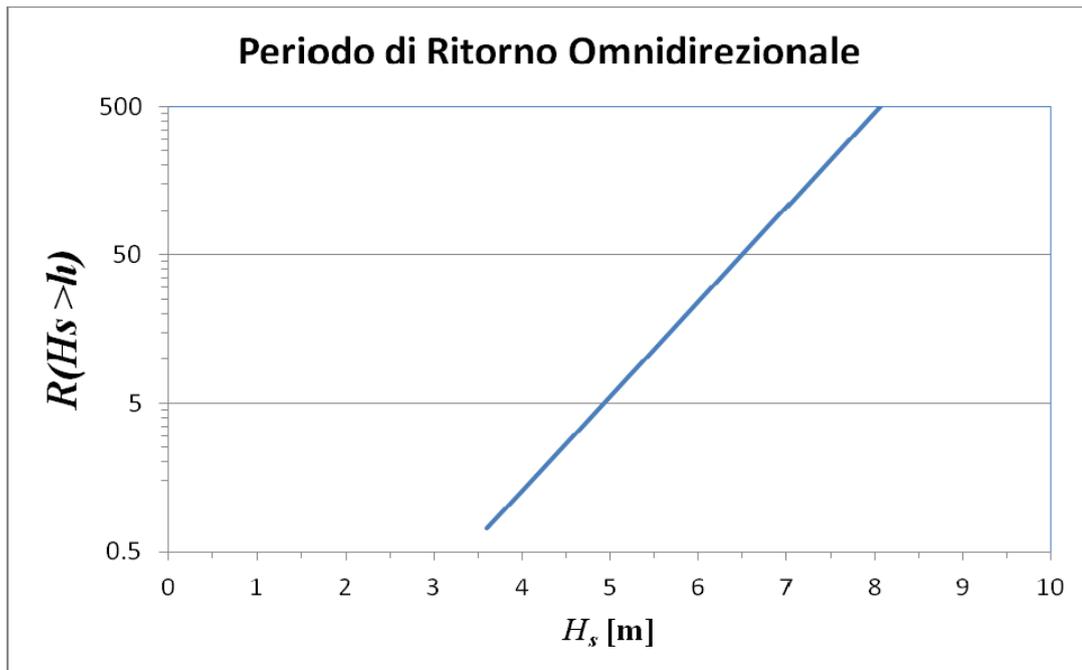


Fig. 1.4 Periodo di ritorno $R(H_s > h)$ al largo del paraggio di Riace.

Tab.1.1. Livelli di altezza significativa eguagliati o superati mediamente ogni R anni. Il periodo di picco relativo a ciascun livello è stato ricavato in ipotesi di spettro JONSWAP medio.

$R(H_s > H)$ [anni]	H_s [m]	T_p [s]
1	3.9	8.4
5	4.9	9.4
10	5.4	9.9
25	6.0	10.4
50	6.5	10.9

1.4 Analisi del moto ondoso al largo in base alla direzione di provenienza delle onde

1.4.1 La probabilità direzionale $P(H_s > h; A_1 < A < A_2)$

La probabilità $P(H_s > h; A_1 < A < A_2)$ che l'altezza significativa, in una località, superi un'assegnata soglia h e che la direzione dominante di propagazione delle onde sia compresa entro un assegnato settore (A_1, A_2) , può essere rappresentata dalla differenza di

due Weibull (Boccotti, 1997):

$$P(H_s > h; A_1 < A < A_2) = \exp\left[-\left(\frac{h}{w_\alpha}\right)^u\right] - \exp\left[-\left(\frac{h}{w_\beta}\right)^u\right], \quad (1.7)$$

dove i parametri w_α e w_β sono caratteristici del settore (A_1, A_2) ; il parametro u è quello della probabilità omnidirezionale. [A_i indica l'angolo orario che la direzione di provenienza delle onde forma con la direzione del Nord. Ad esempio $A_i = 90^\circ$ indica un moto ondoso che si propaga da Est verso Ovest.]

Si è quindi proceduto al calcolo dei parametri w_α e w_β per i settori di provenienza. Si noti che sia w_α sia w_β devono essere positivi; il parametro w_α deve essere inoltre maggiore di w_β , altrimenti la probabilità direzionale risulterebbe negativa.

Infine dal confronto tra le equazioni (1.2) e (1.7) si deduce che w_α deve essere minore o al massimo uguale al parametro w della probabilità omnidirezionale. Dovendo infatti risultare

$$P(H_s > h; A_1 < A < A_2) \leq P(H_s > h) \quad \forall h \text{ (con } h > 0), \quad (1.8)$$

ed essendo

$$P(H_s > h; A_1 < A < A_2) \rightarrow \exp\left[-\left(\frac{h}{w_\alpha}\right)^u\right] \quad \text{per } h \rightarrow \infty, \quad (1.9)$$

segue

$$w_\alpha \leq w. \quad (1.10)$$

La probabilità $P(H_s > h; A_1 < A < A_2)$, nel diagramma cartesiano X, Y (variabili ausiliarie definite dalle equazioni 1) è rappresentata da una curva. Tale curva si mantiene a sinistra della retta omnidirezionale, in accordo con la (1.8). Se non fosse verificata tale disuguaglianza, la probabilità relativa ad un generico settore (A_1, A_2) risulterebbe maggiore

della probabilità omnidirezionale.

Per la stima della probabilità $P(H_s > h; A_1 < A < A_2)$, ovvero dei parametri w_α e w_β relativi al generico settore (A_1, A_2) , si sono utilizzati i dati UKMO direzionali relativi al punto di coordinate [37.8°N-15.5°E].

Il settore di provenienza delle onde più alte (la traversia principale) è costituito dall'intervallo 100°-130°, si tratta del settore cui corrisponde il massimo w_α (eventualmente, a parità di w_α , il settore di traversia principale è il settore cui corrisponde il valore di w_β più piccolo).

Le Figure 1.5-1.12 mostrano le probabilità $P(H_s > h; A_1 < A < A_2)$ nel piano delle variabili X, Y (eq. 1.1). Nella tabella 1.2 sono riportati i valori di w_α e w_β per ciascun settore.

Tabella 1.2. I parametri w_α e w_β della probabilità $P(H_s > h)$ direzionale. Gli angoli di provenienza delle onde sono orari e riferiti alla direzione Nord.

settore di provenienza onde ΔA [deg]	w_α [m]	w_β [m]
131°-150°	0.466	0.43
151°-170°	0.324	0.278
171°-190°	0.245	0.22
191°-210°	0.212	0.203
211°-230°	0.229	0.224
231°-250°	0.249	0.243
251°-270°	0.249	0.237
271°-290°	0.31	0.296

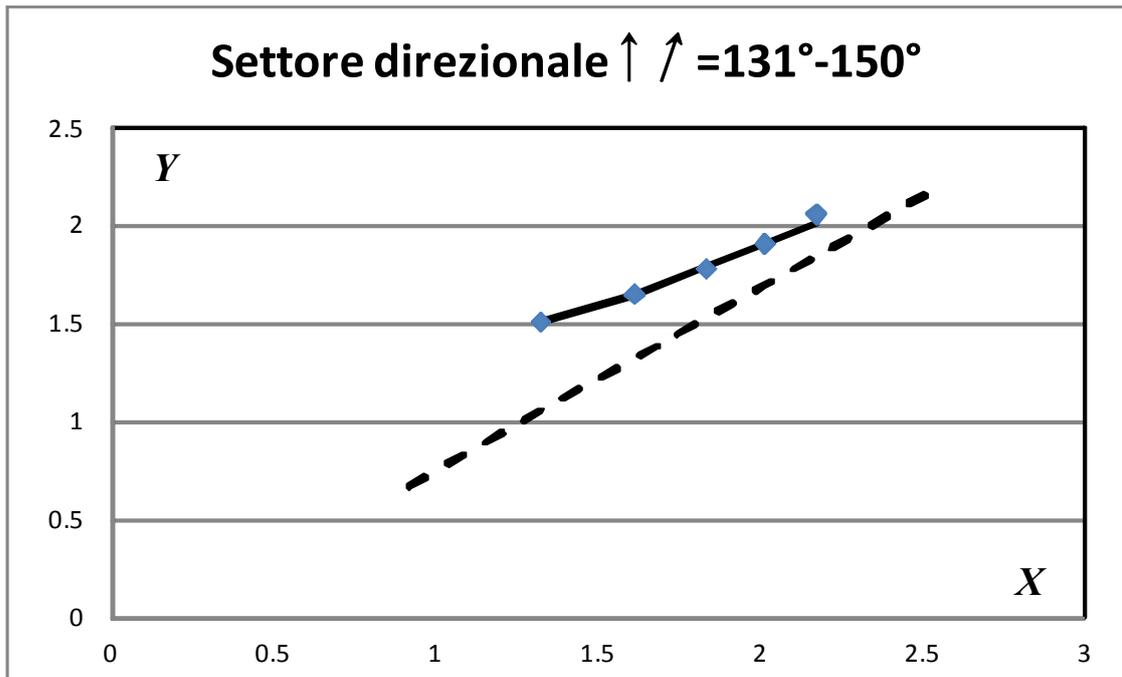


Fig. 1.5. La probabilità di superamento direzionale $P(H_s > H; \Delta A)$ nel piano nelle variabili ausiliarie X, Y . La linea tratteggiata rappresenta la probabilità omnidirezionale $P(H_s > H)$.

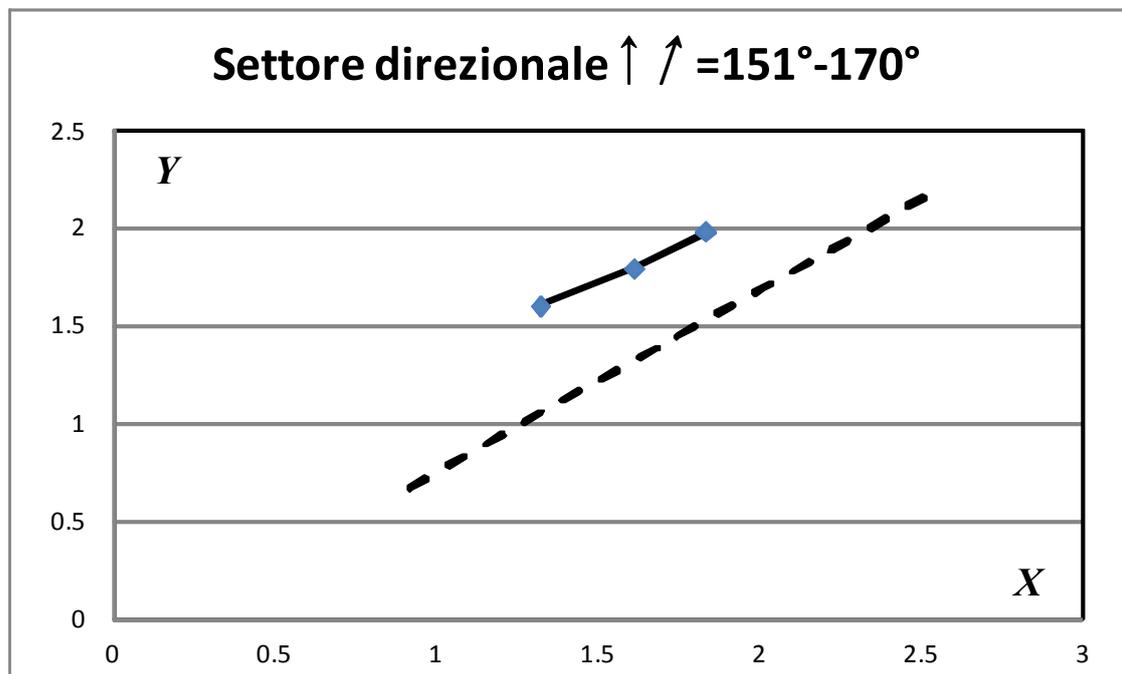


Fig. 1.6. La probabilità di superamento direzionale $P(H_s > H; \Delta A)$ nel piano nelle variabili ausiliarie X, Y . La linea tratteggiata rappresenta la probabilità omnidirezionale $P(H_s > H)$.

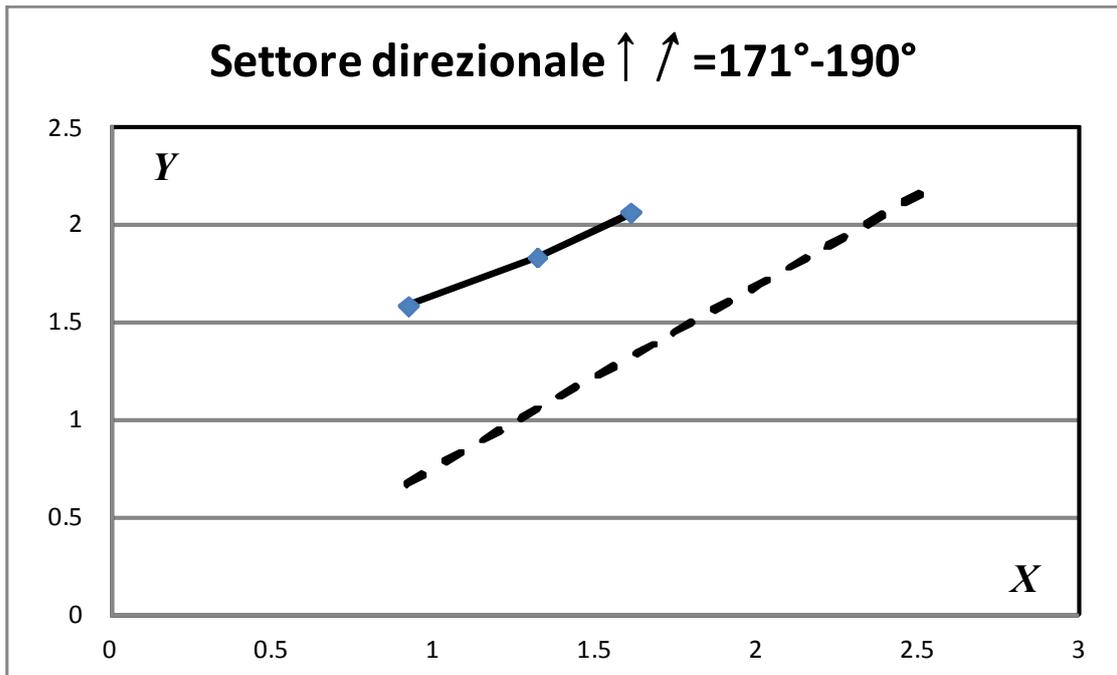


Fig. 1.7. La probabilità di superamento direzionale $P(H_s > H; \Delta A)$ nel piano nelle variabili ausiliarie X, Y . La linea tratteggiata rappresenta la probabilità omnidirezionale $P(H_s > H)$.

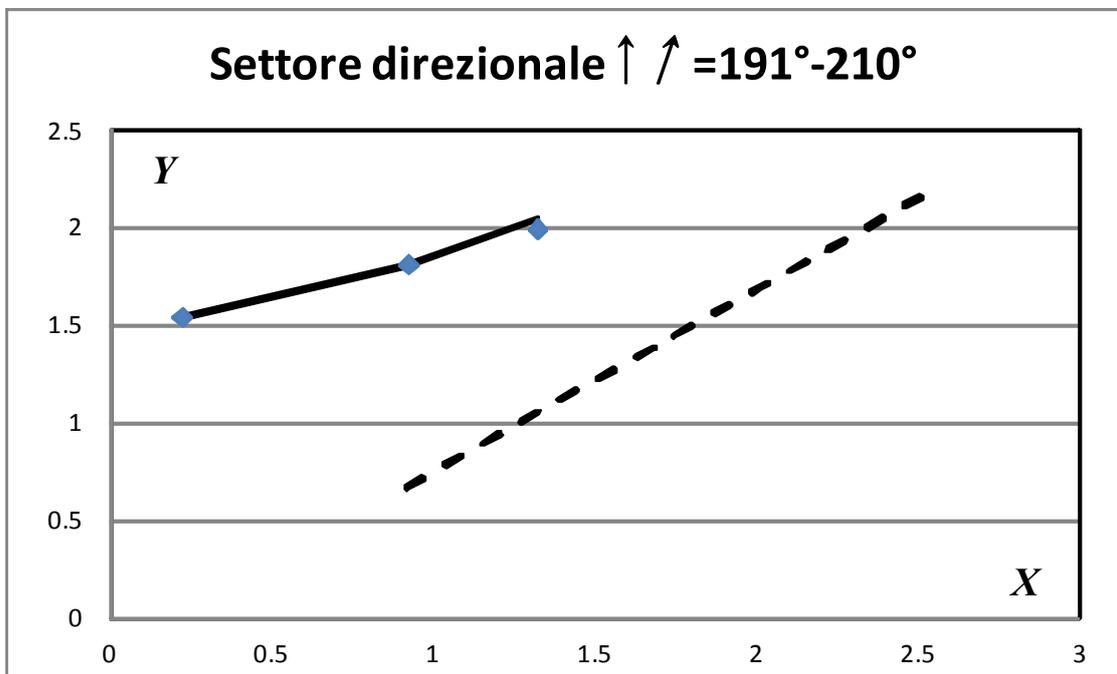


Fig. 1.8. La probabilità di superamento direzionale $P(H_s > H; \Delta A)$ nel piano nelle variabili ausiliarie X, Y . La linea tratteggiata rappresenta la probabilità omnidirezionale $P(H_s > H)$.

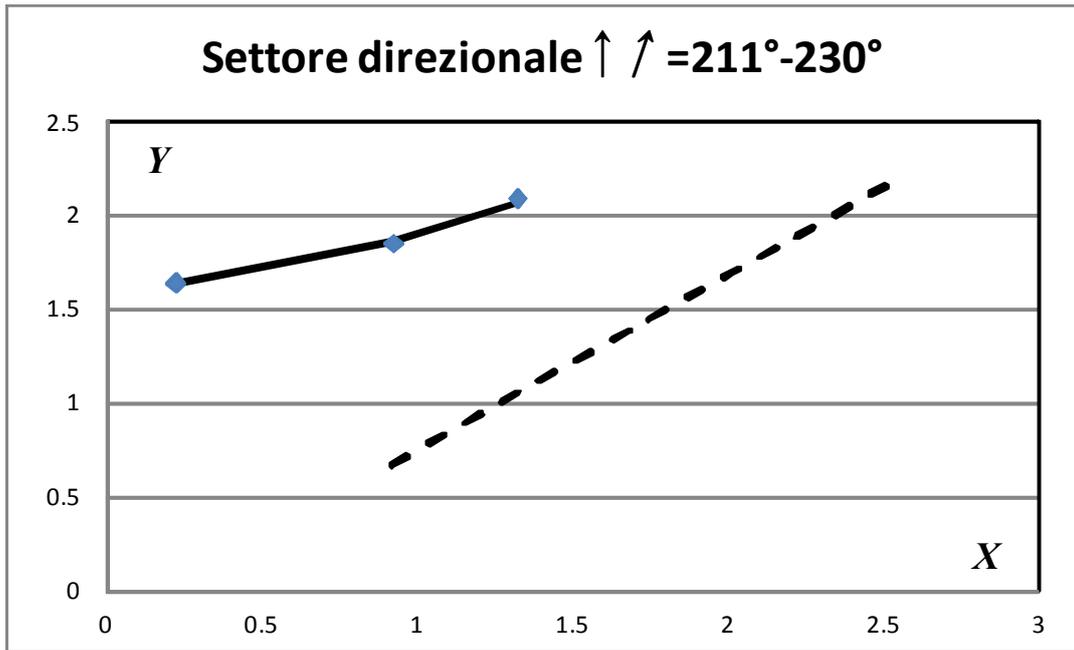


Fig. 1.9. La probabilità di superamento direzionale $P(H_s > H; \Delta A)$ nel piano nelle variabili ausiliarie X, Y . La linea tratteggiata rappresenta la probabilità omnidirezionale $P(H_s > H)$.

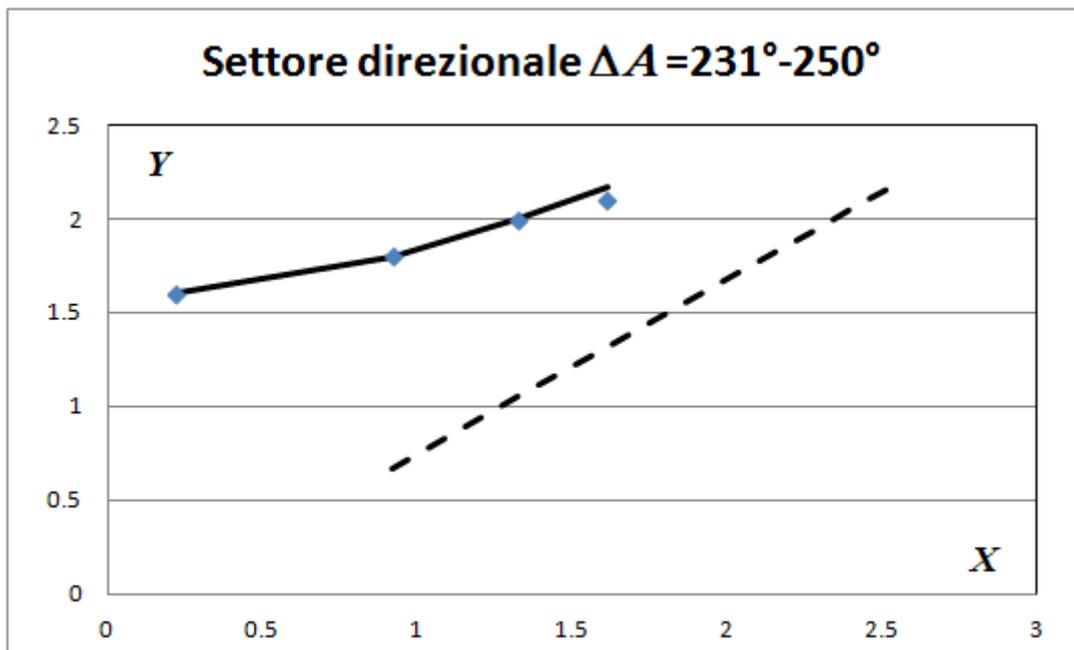


Fig. 1.10. La probabilità di superamento direzionale $P(H_s > H; \Delta A)$ nel piano nelle variabili ausiliarie X, Y . La linea tratteggiata rappresenta la probabilità omnidirezionale $P(H_s > H)$.

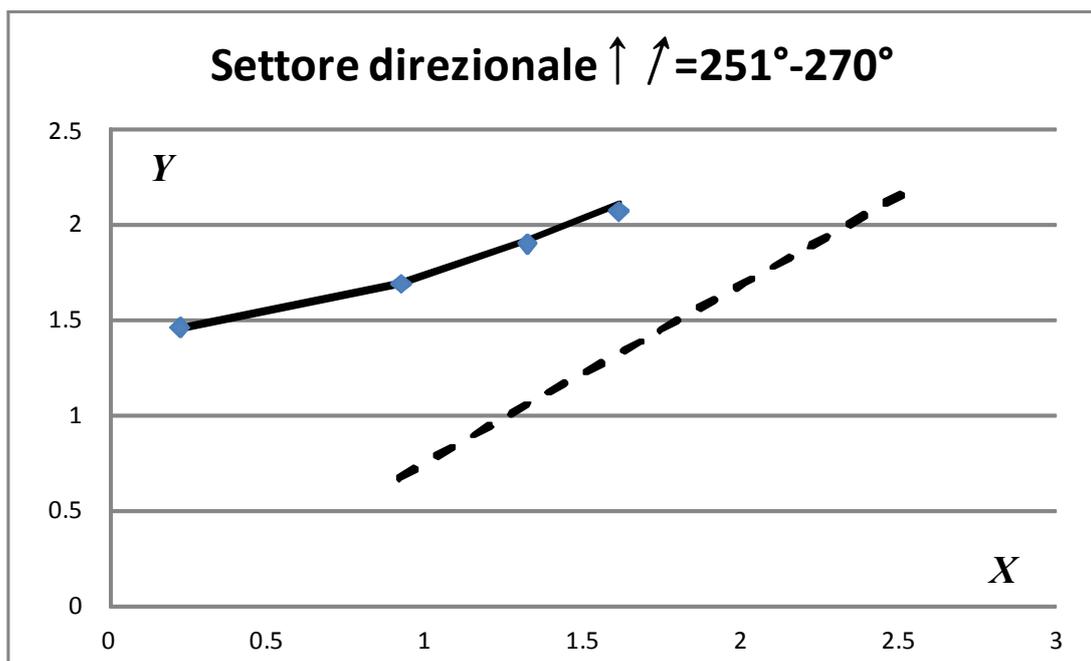


Fig. 1.11. La probabilità di superamento direzionale $P(H_s > H; \Delta A)$ nel piano nelle variabili ausiliarie X, Y . La linea tratteggiata rappresenta la probabilità omnidirezionale $P(H_s > H)$.

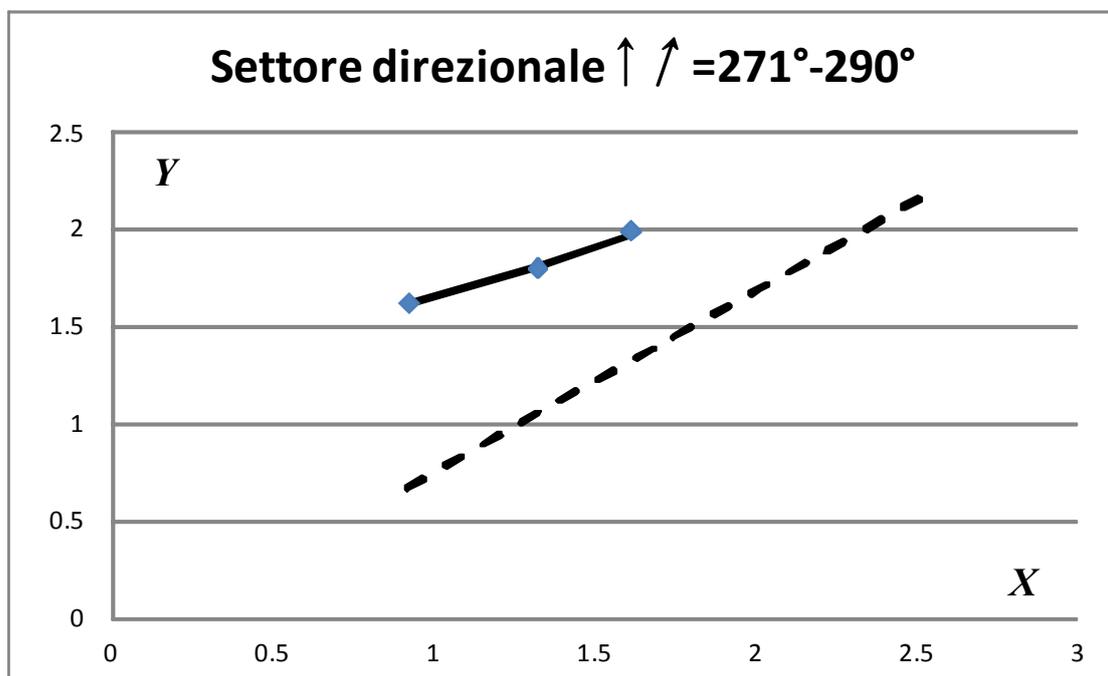


Fig. 1.12. La probabilità di superamento direzionale $P(H_s > H; \Delta A)$ nel piano nelle variabili ausiliarie X, Y . La linea tratteggiata rappresenta la probabilità omnidirezionale $P(H_s > H)$.

1.4.2 Il periodo di ritorno $R(H_s > h; A_1 < A < A_2)$

Il periodo di ritorno $R(H_s > h; A_1 < A < A_2)$ di una mareggiata in cui l'altezza significativa massima H_s supera la soglia assegnata h , con direzione dominante di propagazione compresa nell'intervallo (A_1, A_2) può essere calcolato mediante la relazione

$$\begin{aligned}
 R(H_s > h; A_1 < A < A_2) &= \\
 &= \frac{\bar{b}(h)}{\exp\left[-\left(\frac{h}{w_\alpha}\right)^u\right] \left[1 + u\left(\frac{h}{w_\alpha}\right)^u\right] - \exp\left[-\left(\frac{h}{w_\beta}\right)^u\right] \left[1 + u\left(\frac{h}{w_\beta}\right)^u\right]}. \quad (1.11)
 \end{aligned}$$

Tale espressione viene ricavata interpretando la $P(H_s > h; A_1 < A < A_2)$ come differenza di due Weibull (eq. 7).

Le Figure 1.13-1.20 mostrano i periodi di ritorno $R(H_s > h; A_1 < A < A_2)$ al largo di Riace per i settori di provenienza riportati in Tab. 1.2.

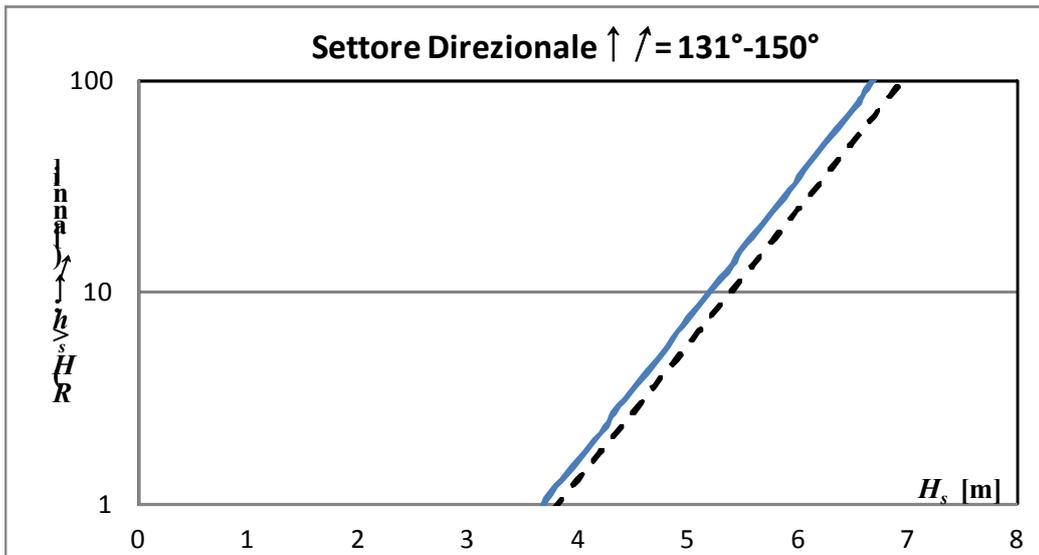


Fig. 1.13. Il periodo di ritorno direzionale $R(H_s > H; \Delta A)$, per il settore ΔA . La linea tratteggiata rappresenta il periodo di ritorno omnidirezionale $R(H_s > H)$.

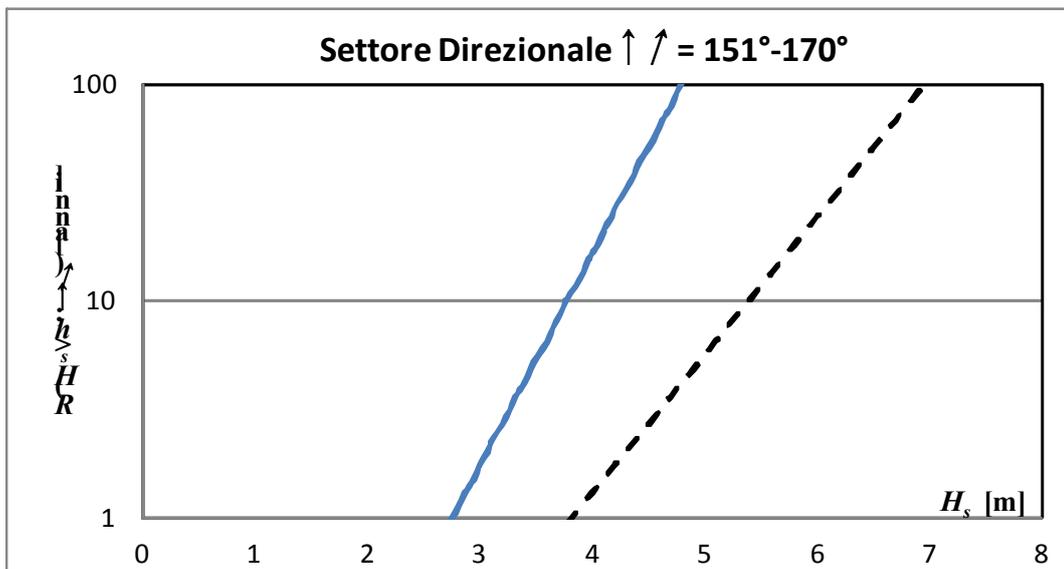


Fig. 1.14. Il periodo di ritorno direzionale $R(H_s > H; \Delta A)$, per il settore ΔA . La linea tratteggiata rappresenta il periodo di ritorno omnidirezionale $R(H_s > H)$.

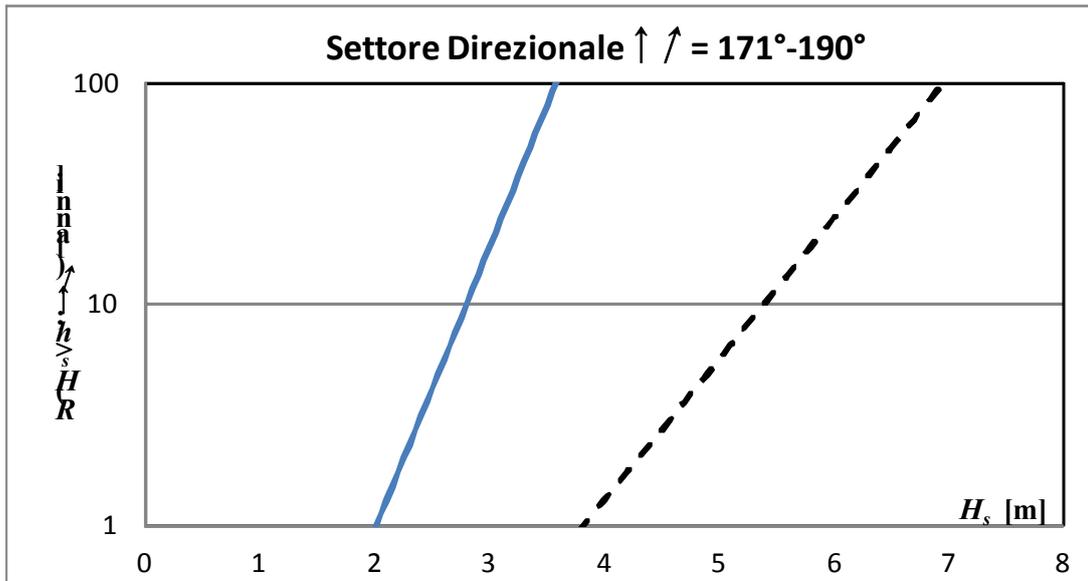


Fig. 1.15. Il periodo di ritorno direzionale $R(H_s > H; \Delta A)$, per il settore ΔA . La linea tratteggiata rappresenta il periodo di ritorno omnidirezionale $R(H_s > H)$.

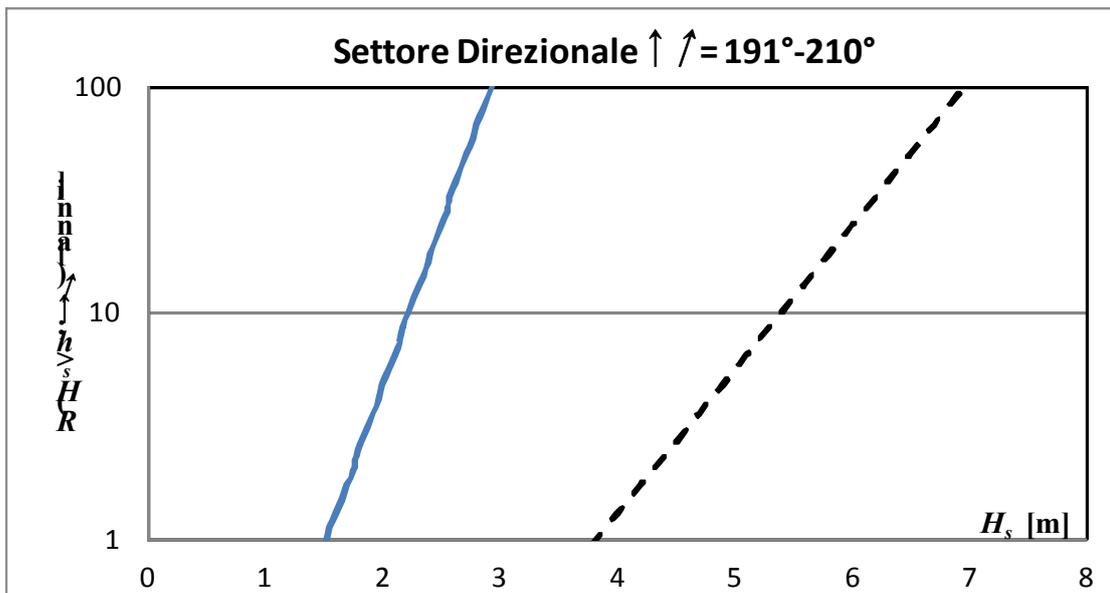


Fig. 1.16. Il periodo di ritorno direzionale $R(H_s > H; \Delta A)$, per il settore ΔA . La linea tratteggiata rappresenta il periodo di ritorno omnidirezionale $R(H_s > H)$.

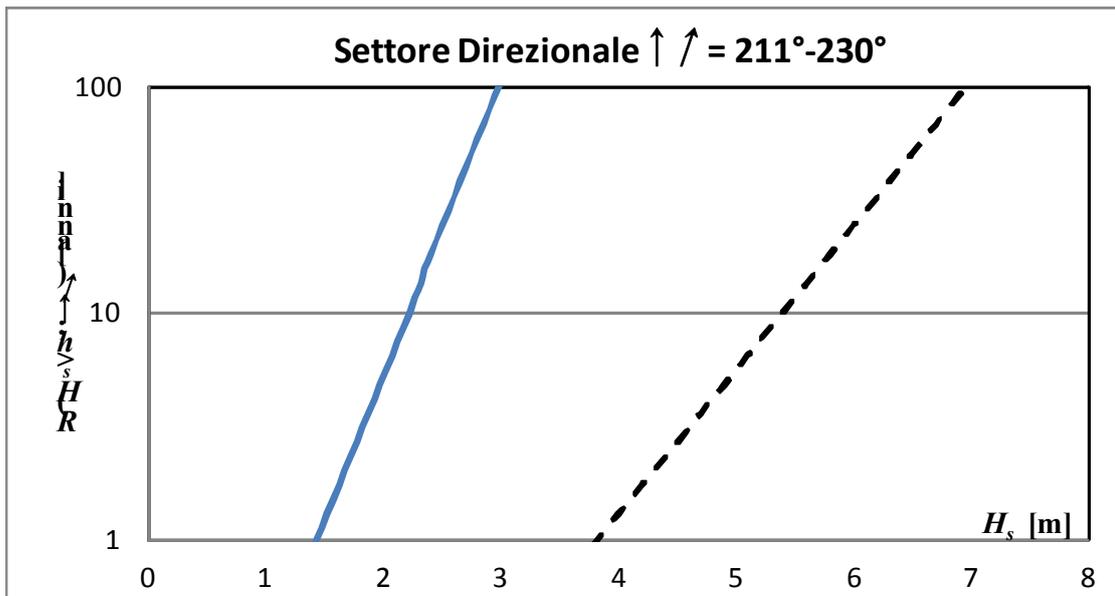


Fig. 1.17. Il periodo di ritorno direzionale $R(H_s > H; \Delta A)$, per il settore ΔA . La linea tratteggiata rappresenta il periodo di ritorno omnidirezionale $R(H_s > H)$.

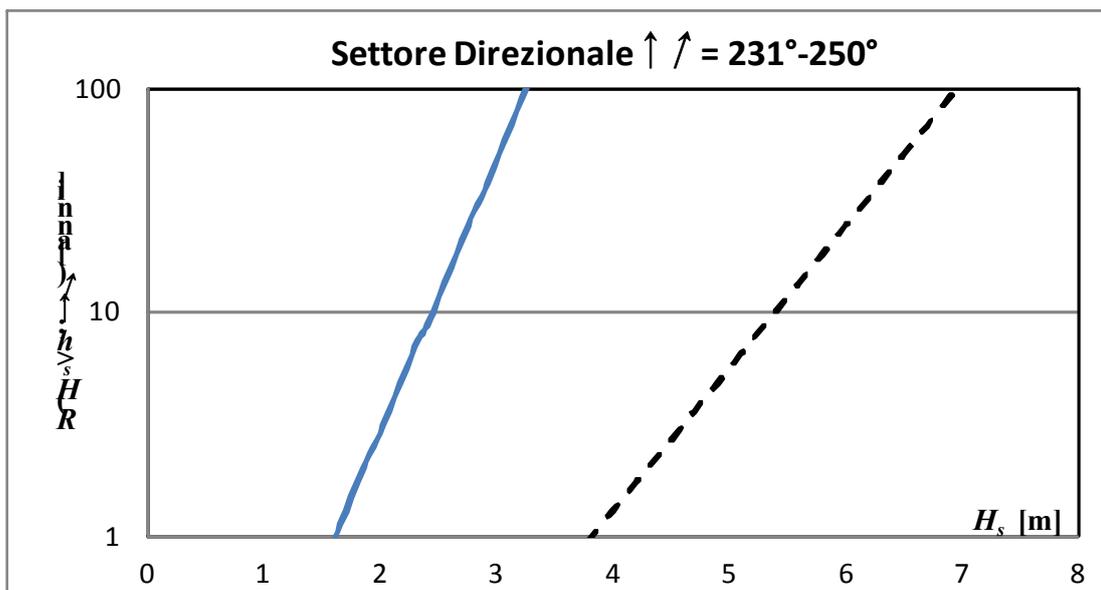


Fig. 1.18. Il periodo di ritorno direzionale $R(H_s > H; \Delta A)$, per il settore ΔA . La linea tratteggiata rappresenta il periodo di ritorno omnidirezionale $R(H_s > H)$.

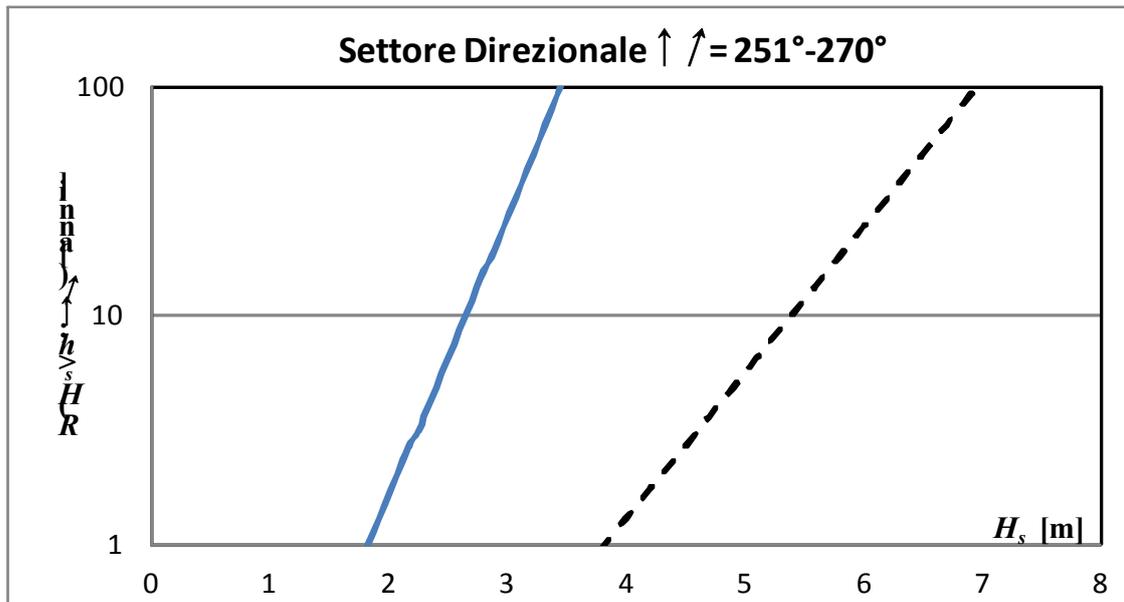


Fig. 1.19. Il periodo di ritorno direzionale $R(H_s > H; \Delta A)$, per il settore ΔA . La linea tratteggiata rappresenta il periodo di ritorno omnidirezionale $R(H_s > H)$.

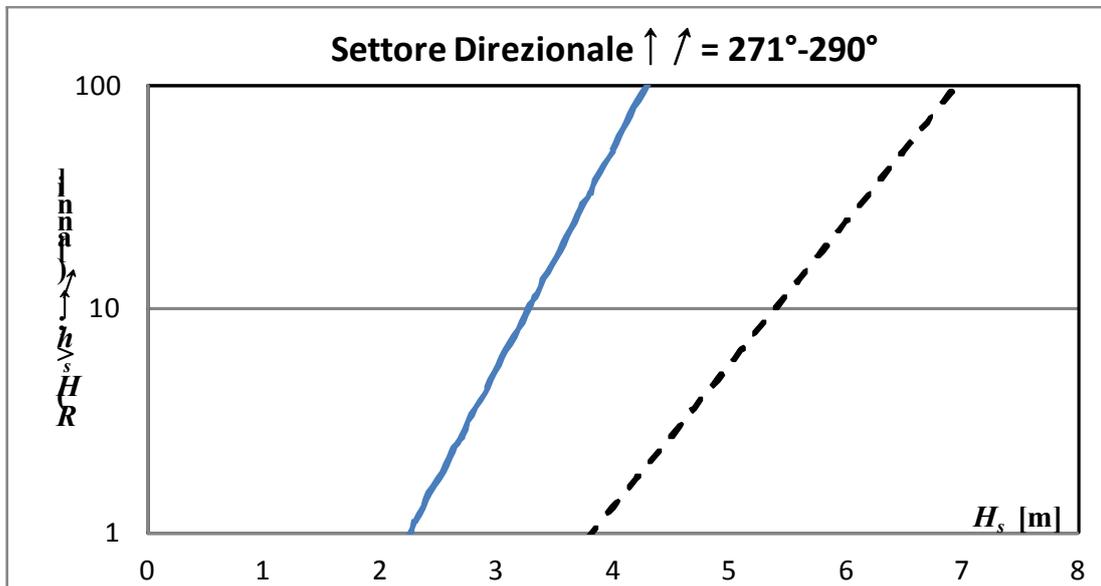


Fig. 1.20. Il periodo di ritorno direzionale $R(H_s > H; \Delta A)$, per il settore ΔA . La linea tratteggiata rappresenta il periodo di ritorno omnidirezionale $R(H_s > H)$.

2 PROPAGAZIONE DELLE ONDE DAL LARGO VERSO I BASSI FONDALI

2.1 L'orientamento del tratto costiero di Riace

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 θ 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. 2.1).

La relazione tra l'angolo A cui fa riferimento l'UK Met Office e l'angolo θ che utilizzeremo per descrivere il clima ondoso sulla spiaggia di Riace è

$$\theta = A - 180^\circ - A_y. \quad (2.1)$$

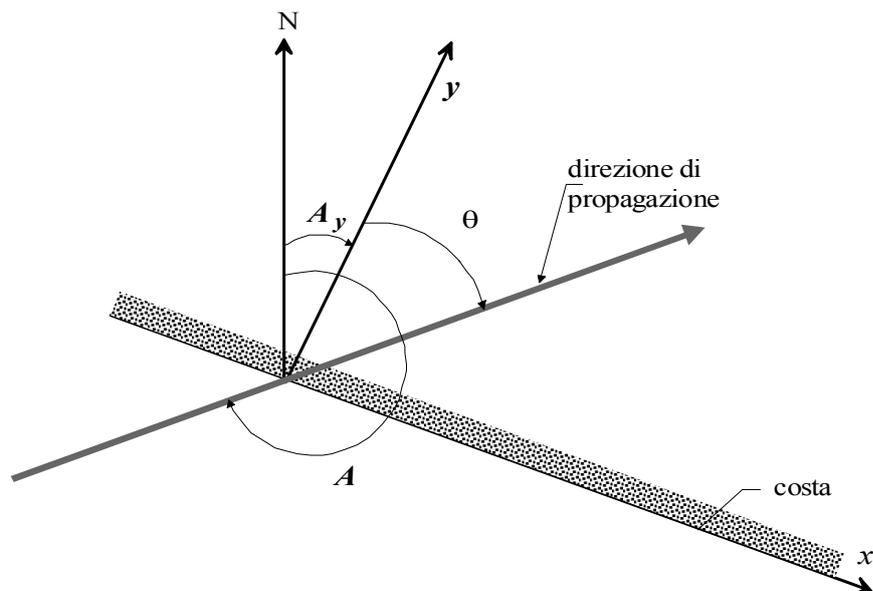


Fig. 2.1. Schema di riferimento per la conversione tra direzione azimutale A di provenienza delle onde e direzione locale θ di propagazione.

L'allineamento per il tratto costiero in esame è indicato nella Fig. 2.2: come si vede $A_y = 30^\circ$. Tenuto conto che la rosa dei venti è suddivisa dall'UK Met Office nel modo seguente

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

avremo la conversione di tab. 2.1.

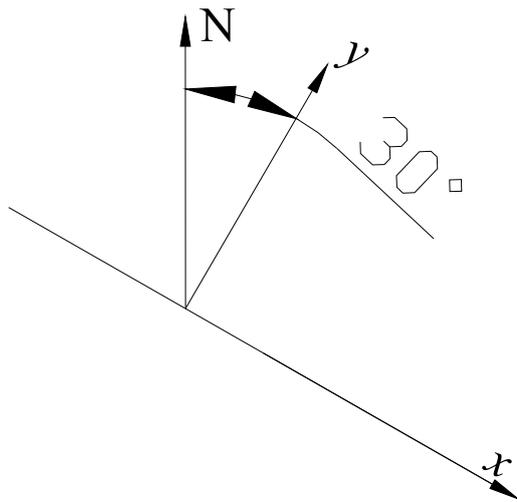


Fig. 2.2. Sistema di riferimento x-y locale al tratto di costa di Riace. L'asse x è orientato lungo costa.

Tab. 2.1 – Conversione $A \rightarrow \theta$ per il tratto di costa in esame.

A	θ
110°, 130°	-80°, -60°
130°, 150°	-60°, -40°
150°, 170°	-40°, -20°
170°, 190°	-20°, 0
190°, 210°	0, 20°
210°, 230°	20°, 40°
230°, 250°	40°, 60°
250°, 270°	60°, 80°

2.2 Shoaling – rifrazione di uno stato di mare

Il modello utilizzato per rappresentare l'evoluzione del moto ondoso sottocosta si basa sullo shoaling - rifrazione delle onde random tridimensionali.

In dettaglio, schematizzando uno stato di mare come somma di un numero molto grande di componenti periodiche, ed assumendo un sistema di riferimento con asse y ortogonale alla linea di battigia ed asse x parallelo ad essa, si ricava l'altezza significativa su profondità finita d ($< 0.5L_{p0}$, essendo $L_{p0} = gT_p^2 / (2\pi)$ la lunghezza d'onda dominante su profondità infinita) in funzione dell'altezza significativa di largo e della direzione dominante di propagazione al largo. La relazione che lega l'altezza d'onda significativa H_s su profondità d all'altezza d'onda significativa al largo H_{s0} ed alla direzione dominante al largo β_{d0} risulta

$$H_s = K_S K_R H_{s0} \quad (2.2)$$

dove K_S è il coefficiente di shoaling e K_R è il coefficiente di rifrazione. Tali coefficienti risultano (Boccotti, 1997)

$$K_S K_R = \sqrt{\frac{\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi S(\omega, \beta) \frac{\sinh(2kd)}{\tanh(kd)[\sinh(2kd) + 2kd]} \frac{\cos \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \tanh^2(kd)}} d\beta d\omega}{\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi S(\omega, \beta) d\beta d\omega}}, \quad (2.3)$$

dove β è l'angolo che la direzione dominante di propagazione forma al largo con l'asse y e dove il numero d'onda k su profondità d è legato alla frequenza angolare ω dalla nota relazione di dispersione lineare

$$k \tanh(kd) = \omega^2 / g. \quad (2.4)$$

2.3 Caratteristiche dello stato di mare al frangimento

Le condizioni di frangimento vengono definite dalle note relazioni:

$$\frac{H_{sb}}{d_b} = 0.8 \quad (2.5)$$

e

$$\frac{H_{sb}}{L_{p0}} = 0.14 \tanh^2 \left(\frac{2\pi d_b}{L_p} \right). \quad (2.6)$$

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

$$\frac{H_s}{H_{s0}} < \frac{0.8}{H_{s0}/L_{p0}} \frac{d}{L_{p0}}, \quad (2.7)$$

$$\frac{H_s}{H_{s0}} < \frac{0.14}{H_{s0}/L_{p0}} \tanh^2 \left(\frac{2\pi d}{L_p} \right) \quad (2.8)$$

le quali derivano rispettivamente dalla (2.5) e dalla (2.6).

La tabella 2.2 riporta le caratteristiche al frangimento di stati di mare con assegnati direzione di propagazione al largo e periodo di ritorno. Sono indicate nell'ordine

- il settore della direzione di propagazione in acque profonde (θ_0', θ_0''),
- il periodo di ritorno R ,
- l'altezza d'onda significativa in acque profonde (H_{s0}),
- la profondità al frangimento (d_b),
- l'altezza d'onda significativa al frangimento (H_{sb}),
- l'angolo che la direzione di propagazione forma con l'asse y al frangimento (θ_b).

La tabella fornisce un'indicazione delle caratteristiche medie (lungo-costa) delle onde al frangimento. Per un tratto di costa sensibilmente rettilinei come il tratto in questione tali

caratteristiche medie sono pressoché coincidenti con le caratteristiche attuali in tutti i punti.

Tab. 2.2 Caratteristiche al frangimento di stati di mare con assegnati direzione di propagazione al largo e periodo di ritorno.

Settore $\Delta\theta_0$ [deg]	R [anni]	H_{s0} [m]	d_b [m]	H_s [m]	θ_b [deg]
(-80°, -60°)	1	3.83	3.3	2.63	-23°
	2	4.3	3.7	2.95	
	5	4.93	4.2	3.38	
	10	5.4	4.6	3.7	
	20	5.87	5	4.03	
	50	6.5	5.6	4.46	
	100	6.97	6	4.78	
(-60°, -40°)	1	3.83	4.3	3.4	-21°
	2	4.3	4.8	3.82	
	5	4.93	5.5	4.38	
	10	5.4	6	4.79	
	20	5.87	6.5	5.21	
	50	6.5	7.2	5.77	
	100	6.97	7.7	6.19	

Settore $\Delta\theta_0$ [deg]	R [anni]	H_{s0} [m]	d_b [m]	H_s [m]	θ_b [deg]
(-40°, -20°)	1	3.08	3.8	3.05	-14°
	2	3.37	4.2	3.34	
	5	3.77	4.7	3.73	
	10	4.06	5	4.02	
	20	4.36	5.4	4.32	
	50	4.76	5.9	4.71	
	100	5.06	6.3	5.01	
(-20°, 0)	1	2.26	2.9	2.33	-5°
	2	2.48	3.2	2.56	
	5	2.79	3.6	2.88	
	10	3.02	3.9	3.12	
	20	3.25	4.2	3.36	
	50	3.55	4.6	3.67	
	100	3.78	4.9	3.9	

Settore $\Delta\theta_0$ [deg]	R [anni]	H_{s0} [m]	d_b [m]	H_s [m]	θ_b [deg]
(0, 20°)	1	1.74	2.3	1.8	5°
	2	1.95	2.5	2.01	
	5	2.22	2.9	2.29	
	10	2.42	3.1	2.5	
	20	2.62	3.4	2.71	
	50	2.9	3.8	3	
	100	3.1	4	3.2	
(20°, 40°)	1	1.68	2.1	1.66	14°
	2	1.9	2.4	1.88	
	5	2.2	2.7	2.18	
	10	2.43	3	2.41	
	20	2.65	3.3	2.62	
	50	2.95	3.7	2.92	
	100	3.17	3.9	3.14	

Settore $\Delta\theta_0$ [deg]	R [anni]	H_{s0} [m]	d_b [m]	H_s [m]	θ_b [deg]
(40°, 60°)	1	1.86	2.1	1.65	21°
	2	2.1	2.3	1.86	
	5	2.43	2.7	2.16	
	10	2.67	3	2.37	
	20	2.91	3.2	2.58	
	50	3.23	3.6	2.87	
	100	3.48	3.9	3.09	
(60°, 80°)	1	2.09	1.8	1.43	23°
	2	2.32	2	1.59	
	5	2.64	2.3	1.81	
	10	2.88	2.5	1.98	
	20	3.12	2.7	2.14	
	50	3.44	3	2.36	
	100	3.68	3.2	2.52	

2.4 La persistenza $\bar{D}(h)$

Un parametro di fondamentale importanza nella progettazione di opere di difesa di tipo flessibile, come le scogliere di massi, è rappresentato dalla durata dell'azione delle onde sull'opera. La durata $\bar{D}(h)$ in cui la H_s si mantiene al di sopra della soglia h , nelle mareggiate dove tale soglia viene superata, viene chiamata “persistenza al di sopra della soglia” o semplicemente “persistenza”, e la sua espressione si ottiene dividendo la durata di tempo

$$P(H_s > h) \mathcal{T} = \text{durata di tempo in cui } H_s > h, \text{ nel grande intervallo } \mathcal{T},$$

per il numero

$$\mathcal{T}/R(H_s > h) = \text{numero di mareggiate in cui } H_s \text{ supera la soglia } h, \text{ durante } \mathcal{T}.$$

Il risultato è

$$\bar{D}(h) = P(H_s > h) R(H_s > h), \quad (2.9)$$

ovvero, con le espressioni (1.2) e (1.5) rispettivamente di $P(H_s > h)$ e di $R(H_s > h)$,

$$\bar{D}(h) = \frac{\bar{b}(h)}{1 + u \left(\frac{h}{w} \right)^u}. \quad (2.10)$$

Nelle mareggiate dove la soglia h viene superata, l'altezza significativa si mantiene sulla soglia h mediamente per un tempo \mathcal{D} pari a $2\bar{D}$. La Fig. 2.3 riporta le durate convenzionali \mathcal{D} , degli stati di mare al variare della soglia di altezza significativa considerata.

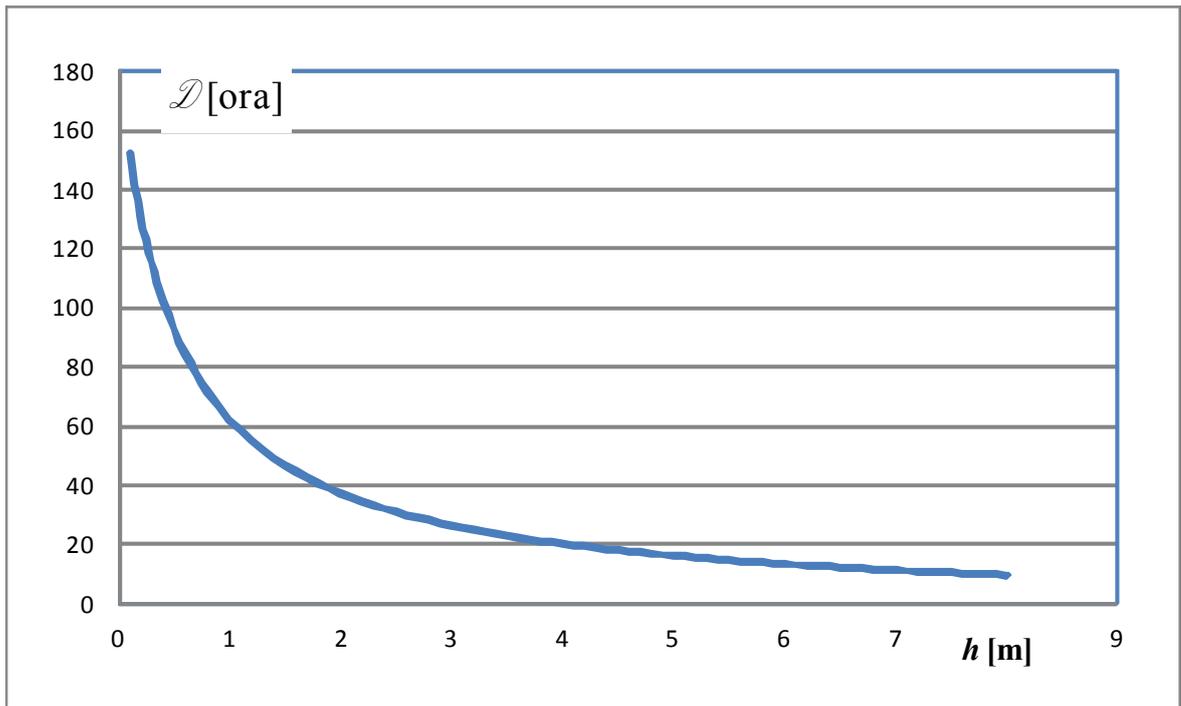


Fig. 2.3. Durata media \mathcal{D} , dell'altezza significativa h .

3 VERIFICA DELLA CONGRUENZA CON I RILIEVI STRUMENTALI

3.1 Analisi dei dati della boa ondometrica di Capo Spartivento

L'altezza significativa massima registrata nel periodo di osservazione è stata di 5 m, e si è verificata nel corso della mareggiata del 26 dicembre 2004 (v. Fig. 3.1). Le onde del nucleo centrale della mareggiata provenivano da un ventaglio di direzioni di circa 40° di ampiezza centrato sul mezzogiorno ($-50^\circ < \theta < 30^\circ$). Si tratta di direzioni ricomprese nella traversia principale anche secondo le stime prodotte con i dati del MET Office relativi al punto di coordinate $[37.8^\circ\text{N}, 15.5^\circ\text{E}]$ utilizzati per le stime elaborate nelle Sezioni precedenti.

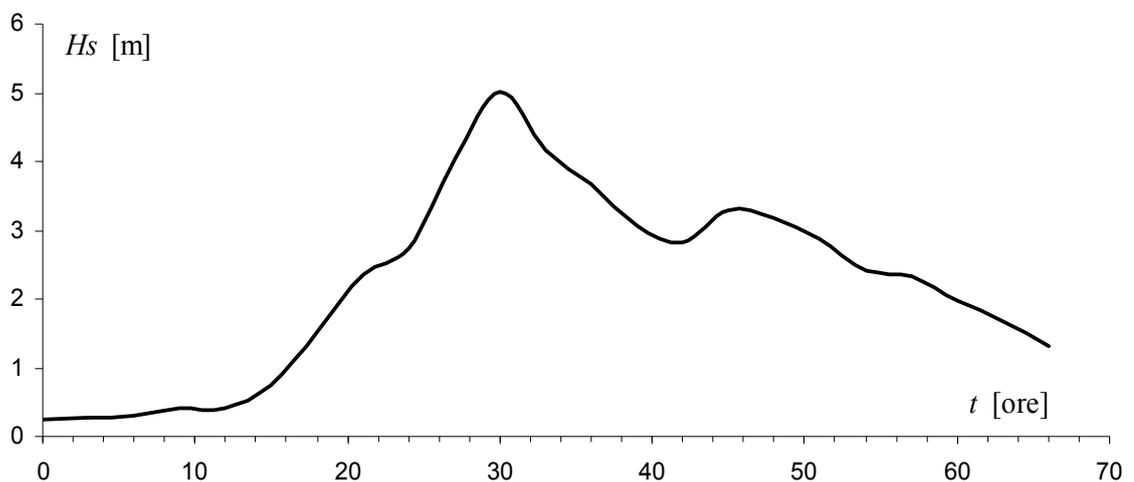


Fig. 3.1. La mareggiata più forte registrata durante il periodo si è verificata il 26/12/2004, e ha prodotto notevoli dissesti in svariate località litoranee del basso Jonio reggino.

3.1.1 La regressione periodi-altezze significative

La nuvola di punti H_s, T_m della Fig. 3.2 è ricavata dalle registrazioni ondometriche. Come si vede, i periodi medi T_m delle onde nello stato di mare presentano una variabilità, a

parità di H_s , via via decrescente al crescere dell'altezza significativa H_s , e tendono grossomodo al valore tipico delle onde di vento (curva tratteggiata). Un'interpretazione analitica del legame H_s, T_m davanti alle coste del basso Jonio Reggino può essere espressa nella forma

$$T_m = -0.172H_s^2 + 1.783H_s + 2.898 \quad (3.1)$$

la quale è stata ottenuta mediante una regressione ai minimi quadrati in forma polinomiale dei dati ondametrici (curva continua in Fig. 3.2). Per confronto, è stata riportata a tratteggio la tipica relazione $T_m - H_s$.

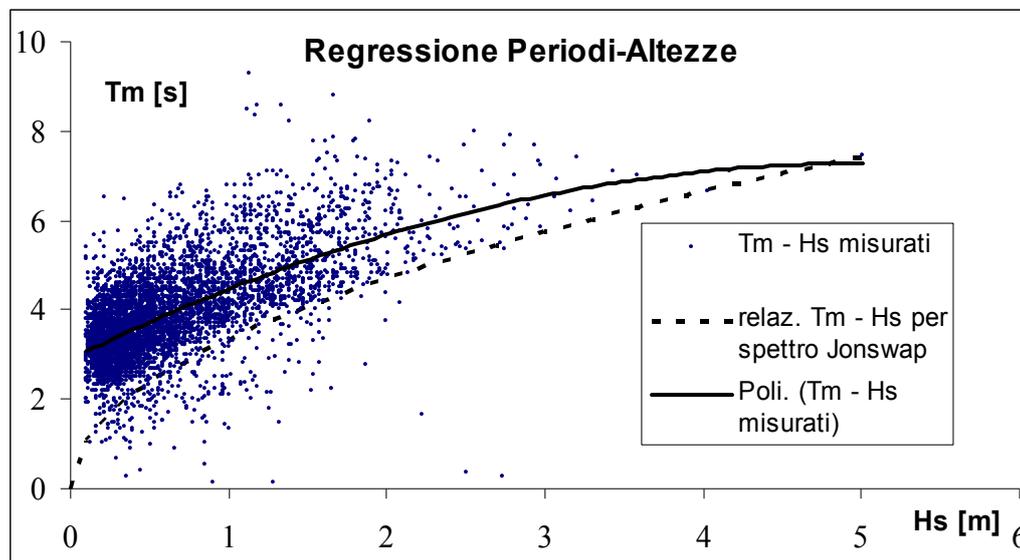


Fig. 3.2 La nuvola di punti H_s, T_m (periodi medi-altezze significative) degli stati di mare registrati davanti a Capo Spartivento.

3.1.2 Il flusso medio di energia

Il flusso medio di energia che investe le coste del basso Jonio Reggino nel corso di un anno può essere stimato a partire dalle frequenze di moto ondoso ricavate dalle 5600 registrazioni di stati di mare rilevati davanti a Capo Spartivento e dall'espressione 3.1 mediante la relazione (Filianoti, 2000)

$$\Phi = 1.09 \frac{1}{64\pi} \rho g^2 H_s^2 T_m, \quad (3.2)$$

I risultati sono rappresentati nella Fig. 3.3. Come si vede, praticamente tutta l'energia ondosa proviene dal settore [55°, 215°], e presenta un massimo in corrispondenza della direzione 125° N. Questo risultato è congruente con i risultati ottenuti elaborando i dati della griglia UKMO relativi al punto di coordinate [37.8°N, 15.5°E], mostrati nella Fig. 3.4. Come si vede l'intero flusso di energia ondosa passante per questo punto proviene da un ventaglio di direzioni compreso tra 80° N e 180° N. Il picco di energia ondosa che si abbatte su Capo Spartivento presenta quindi una rotazione oraria rispetto al picco di energia del punto [37.8°N, 15.5°E] mediamente pari a circa 15°. Il valore del picco è il 10% inferiore alla boa rispetto al sopra citato punto. Anche questo risultato è congruente, se si tiene conto che la boa, per quanto al largo, è molto più vicino alla costa rispetto al punto [37.8°N, 15.5°E].

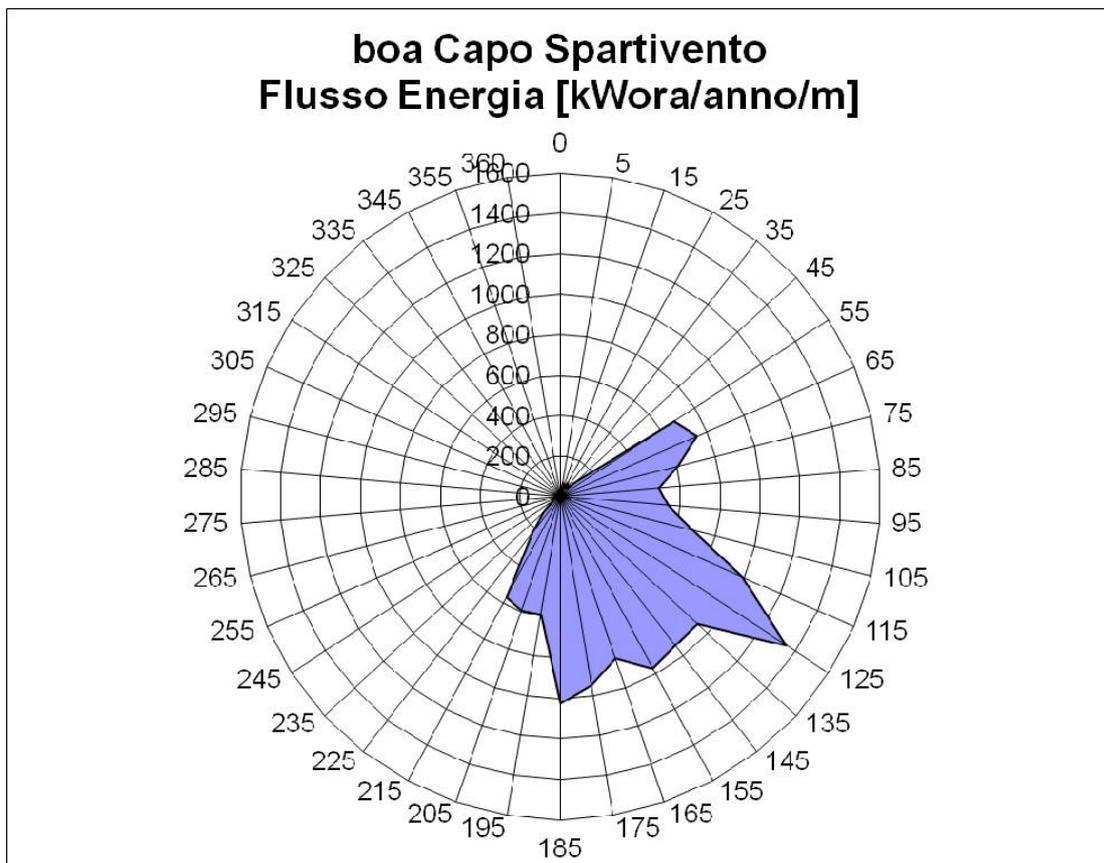


Fig. 3.3. Flusso medio di energia calcolato con i dati della boa posta davanti a Capo Spartivento.

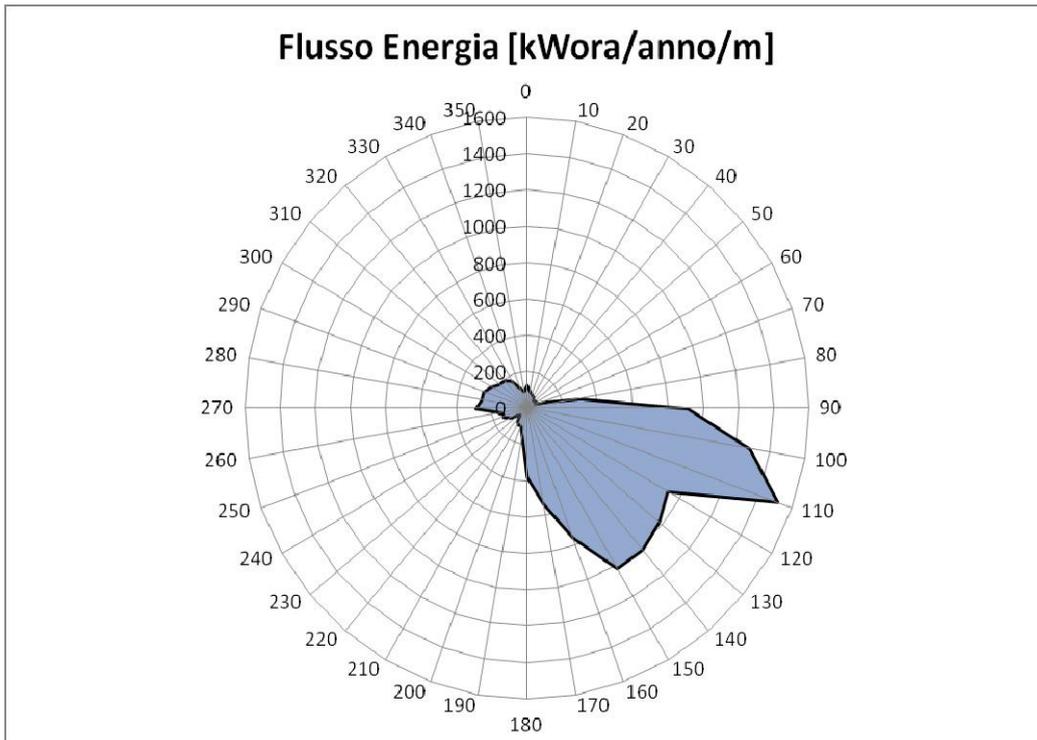


Fig. 3.4. Flusso medio di energia calcolato con i dati della griglia UKMO nel punto [37.8°N, 15.5°E].

4 LA PORTATA DI MATERIALE SOLIDO

Le variazioni stagionali della linea di riva possono ascriversi a un movimento del sedime “essenzialmente” trasversale (cross-shore) alla linea di costa. Tale movimento è dovuto all’azione delle mareggiate (generalmente invernali), le quali sovente causano la formazione di una barra sommersa nella zona dei frangenti, prelevando dalla battigia la sabbia che costituisce la barra, con il conseguente arretramento della linea di riva. Il profilo di riva tende a riassumere la configurazione iniziale (quella cioè esistente prima dell’azione della mareggiata) grazie all’azione esplicata dalle onde di mare lungo che ripascono naturalmente il litorale disfacendo la barra. E’ generalmente accettato che tali movimenti siano ciclici, e pertanto non influenti sull’evoluzione a lungo termine del litorale, evoluzione che invece viene ascritta al trasporto solido lungo costa. Per il calcolo della portata di materiale solido Q_s si fa riferimento alla formula sviluppata dal CERC (Coastal Engineering Research Center)

$$Q_s = \frac{1}{16} \rho_w K I \frac{H_{sb}^2 C_{gb} \sin(2\alpha_{bs})}{(\rho_s - \rho_w)(1-p)}, \quad (4.1)$$

dove:

H_{sb} è l’altezza significativa dell’onda frangente;

α_{bs} è l’angolo compreso tra il fronte dell’onda frangente e la linea di riva;

ρ_s è il peso specifico a secco del sedimento (2.6 t/m^3);

ρ_w è il peso specifico dell’acqua marina (1.03 t/m^3);

p è la porosità della spiaggia (0.4);

C_{gb} è la celerità di gruppo al frangimento;

KI è la costante di taratura.

Nel caso le onde si propagano su un campo di moto disomogeneo, quale è quello causato dalla presenza di manufatti costieri (ad es. Il molo di sopraflutto del porto di Saline), è necessario considerare per il calcolo di Q_s anche il gradiente di variazione dell'altezza d'onda lungo la spiaggia.

Di comune impiego è la relazione introdotta da Brampton e Ozasa e convalidata sperimentalmente da Hanson e Kraus:

$$Q_s = \frac{H_{sb}^2 C_{gb}}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) (1-p)} \left[KI \sin(2\alpha_{bs}) - 2K2 \frac{\cos(2\alpha_{bs})}{m_b} \frac{\partial H}{\partial s} \right], \quad (4.2)$$

dove

m_b è la pendenza del profilo trasversale in corrispondenza del punto di frangimento;

$\partial H / \partial s$ è il gradiente di altezza d'onda lungo la fascia costiera;

KI e $K2$ sono le costanti di taratura.

Per la definizione dei parametri adimensionali KI e $K2$, fondamentali per la corretta taratura del modello, si è soliti fare riferimento a un range di valori, basati su misure di campo e modelli fisici e validati da applicazioni pratiche. In generale si osserva che la costante base KI dipende dalle caratteristiche di frangimento (indice di frangimento $\gamma = H_{sb}/d_b$; numero di Iribarren $\xi = m_b \cdot (H_0/L_0)^{-0,5}$), della densità ρ_s e porosità p della spiaggia. La costante $K2$ è legata ai complessi fenomeni di circolazione idrodinamica che si instaurano, ad esempio, a ridosso dei manufatti costieri.

In prima approssimazione si può fare riferimento ai valori riportati dalla letteratura specializzata definiti in funzione delle caratteristiche del sedimento movimentato dalla corrente longitudinale (granulometria, porosità, peso specifico), della morfologia trasversale del fondale, nonché della tipologia del frangente:

$$K1 = 0,1 \div 0,8 \quad K2 = 0,05 \div 0,8$$

Studi recenti (Schoonees and Theron 1993, 1996) hanno riesaminato le 46 più attendibili misure di campo, su un totale di circa 240 misure disponibili, e hanno proposto un valore di $K1$ pari circa a 0.2.

Per il calcolo della portata di sedimento movimentata mediamente nel corso di un anno, è necessario conoscere il numero medio di ore all'anno in cui un mare di assegnata altezza significativa attacca la costa, secondo un ventaglio di direzioni di ampiezza fissata. Per ricavare questo dato si è fatto riferimento sia ai dati misurati dalla boa ondometrica di Capo Spartivento, sia ai dati UKMO. Le frequenze di apparizione per direzione di propagazione delle onde registrate dalla boa di Capo Spartivento sono mostrate nella Fig. 3.5. Le frequenze di apparizione per direzione di propagazione delle onde stimate nel punto $[37.8^\circ\text{N}, 15.5^\circ\text{E}]$ sono mostrate nella Fig. 3.6. Dal confronto tra le due predette figure emerge con evidenza la differenza costituita dalla presenza di onde provenienti da maestrale nel punto $[37.8^\circ\text{N}, 15.5^\circ\text{E}]$, non presenti invece nella registrazione della boa ondometrica. Come detto, la boa si trova a ridosso della costa e pertanto non è soggetta alle onde provenienti da maestrale per via della presenza della costa jonica calabrese (cfr. Fig. 3.7). Quindi solo le onde provenienti dal ventaglio direzionale $[55^\circ, 220^\circ]$ possono raggiungere la posizione di quest'ultima. Viceversa, il punto $[37.8^\circ\text{N}, 15.5^\circ\text{E}]$ trovandosi in mare aperto, ad una distanza minima dalla costa più vicina pari a 19 km (cfr. Fig. 3.7) è soggetto ad ondate provenienti da tutti i settori.

L'applicazione dell'espressione (3.1) con i dati di frequenza mostrati nella Fig. 3.5 (e nella Figura 3.6) conduce ai valori di capacità di trasporto solido mostrati nella Fig. 3.8. Ciascuna barra rappresenta la portata solida che il moto ondoso, che si propaga nella direzione considerata, è in grado di movimentare nel corso di un anno, per metro di costa. L'angolo riportato in ascissa è quello formato dalla direzione di propagazione delle onde con la normale locale alla linea di costa. L'angolo tra "l'allineamento fondamentale" del tratto di costa oggetto dell'intervento, considerato positivo nel verso Ovest-Est, e il Nord è di circa 30° (cfr. Fig. 2.2). Per "allineamento fondamentale" si intende l'allineamento che

si ottiene rettificando piccole insenature o protuberanze costiere.

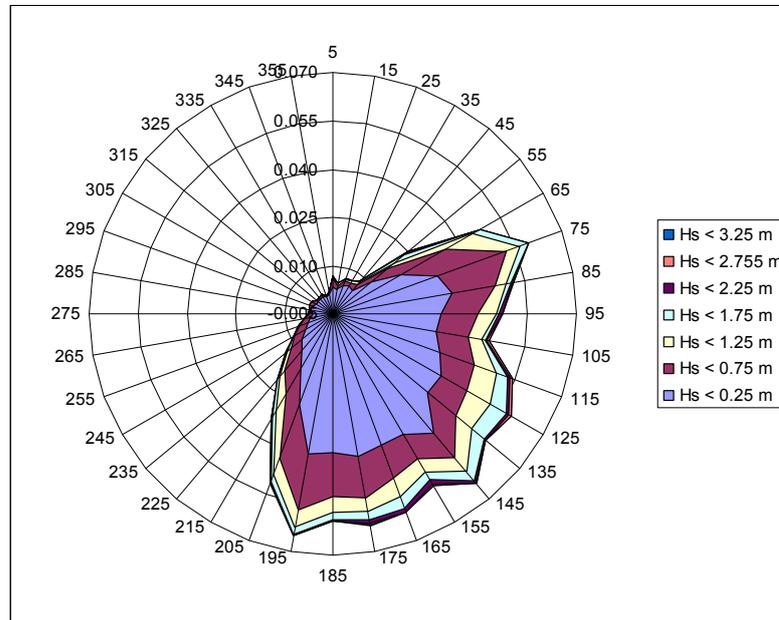


Fig. 3.5. *Boa posta davanti a Capo Spartivento nel triennio 2003-2005. Frequenze cumulate di apparizione di assegnate soglie di altezza significativa, per diverse direzioni di propagazione delle onde.*

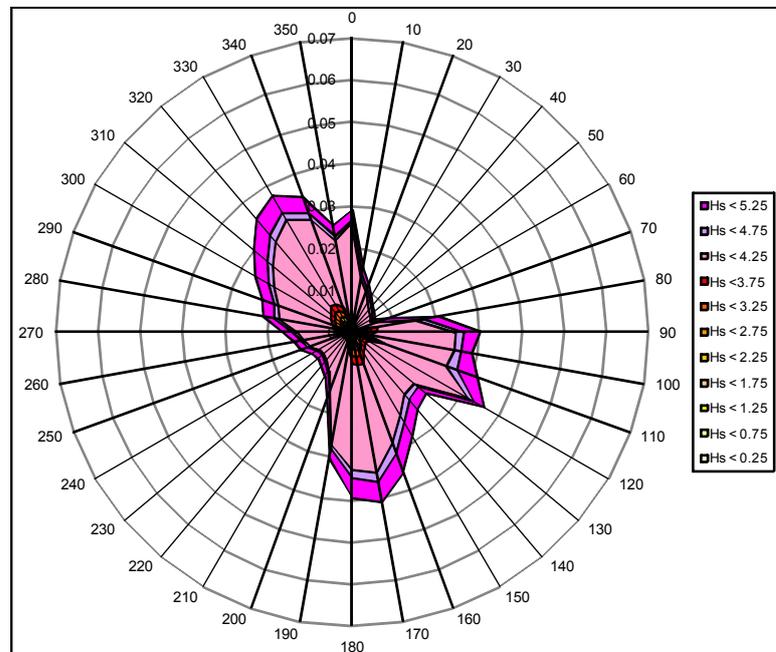


Fig. 3.6 *Dati ondametrici stimati dall'UKMO nel punto [37.8°N, 15.5°E]. Frequenze cumulate di apparizione di assegnate soglie di altezza significativa, per diverse direzioni di propagazione delle onde.*

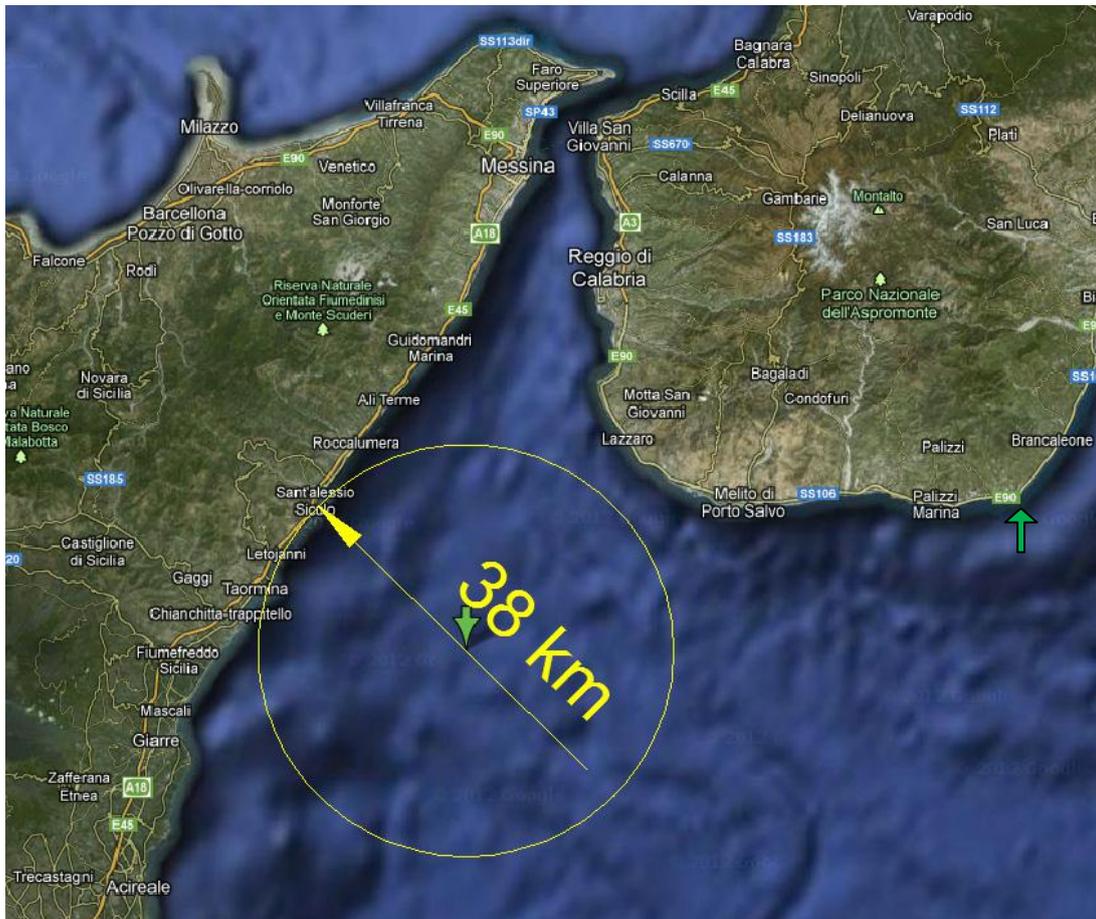


Fig. 3.7. Le frecce indicano la posizione del punto di coordinate $[37.8^{\circ}N, 15.5^{\circ}E]$ appartenente alla griglia di calcolo UKMO e la posizione della boa ondamentrica che ha operato davanti a Capo Spartivento nel triennio 2003-2005.

Come si vede, risulta prettamente dominante il trasporto in direzione Est-Ovest, sia considerando i dati della boa sia considerando i dati UKMO. Questo accade perché le onde capaci di movimentare la sabbia in tale direzione risultano sia più alte sia più frequenti delle onde capaci di movimentare la sabbia nella direzione opposta (Ovest-Est). La tab. 3.1 riporta la somma algebrica delle ordinate degli istogrammi. Considerando i dati della boa, si ottiene come risultato un flusso solido potenziale pari a circa $71000 \text{ m}^3/\text{anno}$ per metro di costa. La durata media delle onde responsabili di tale flusso è di quasi 2700 ore/anno. Con i dati UKMO il flusso stimato è il 30% più grande, ovvero pari a $91000 \text{ m}^3/\text{anno}$, e l'azione delle onde è esercitata per circa 1700 ore l'anno. Tenuto conto della notevole distanza tra i due punti (la posizione della boa e il punto della griglia UKMO), i risultati

sono congruenti tra di loro in maniera soddisfacente.

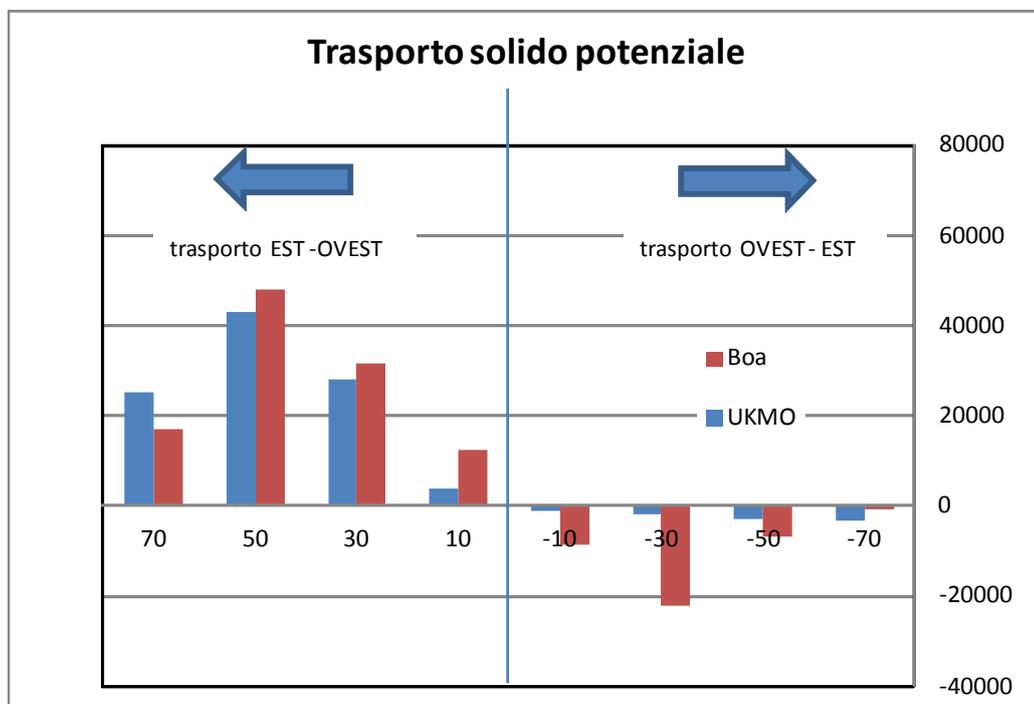


Fig. 3.8. Capacità di trasporto solido lungo-costa per direzione di propagazione delle onde.