



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Analisi di fattibilità di impianti di tipo REWEC3 (o U-OWC)  
per la produzione di energia elettrica da moto ondoso  
in aree campione lungo le coste italiane

*Felice Arena, Alessandra Romolo,  
V. Laface, G. Malara, A. Viviano*



Università degli Studi  
Mediterranea  
di Reggio Calabria

ANALISI DI FATTIBILITÀ DI IMPIANTI DI TIPO REWEC3 (O U-OWC) PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA  
ELETTRICA DA MOTO ONDOSI IN AREE CAMPIONE LUNGO LE COSTE ITALIANE

F. Arena, A. Romolo, V. Laface, G. Malara, A. Viviano \*

Università Mediterranea di Reggio Calabria

(alle attività eseguite nel progetto hanno collaborato i proff. P. Boccotti, G. Barbaro e V. Fiamma

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino, ENEA

Si ringrazia la società WAVENERGY.IT s.r.l., Spin Off dell'Università Mediterranea, per avere fornito parte del materiale utilizzato nel presente rapporto.

## Indice

Sommario .....	5
Introduzione .....	6
1. Elaborazione dati di moto ondoso in aree campione al largo: mareggiate estreme e previsioni direzionali	7
1.1 Individuazione delle aree campione .....	7
1.2 Clima medio ad energia ondosa al largo .....	7
1.3 Mareggiate e livelli ondosi estremi di altezza significativa .....	14
1.3.1 Altezza d'onda massima attesa di una mareggiata (Borgman, 1970) .....	14
1.3.2 Modelli delle mareggiate equivalenti per l'analisi delle mareggiate .....	15
1.3.3 Modello della mareggiata triangolare equivalente .....	15
1.3.4 Modello della mareggiata di potenza equivalente (Equivalent Power Storm).....	19
1.4 Probabilità e Periodi di Ritorno .....	21
1.4.1 Probabilità omnidirezionale dell'altezza significativa .....	21
1.4.2 Significato fisico dei parametri $u$ e $w$ .....	23
1.4.3 Probabilità direzionale dell'altezza significativa.....	24
1.4.4 Stima dei parametri $w_\alpha$ e $w_\beta$ e condizione necessaria e sufficiente per l'esistenza della soluzione a partire da una coppia di parametri fissata.....	25
1.4.5 Periodo di ritorno omnidirezionale $R(H_s > h)$ (Boccotti 1986) .....	34
1.4.6 La persistenza media al di sopra di una fissata soglia .....	35
1.4.7 Periodo di ritorno direzionale $R(H_s > h; \Delta\theta)$ .....	38
2. Propagazione sotto costa dei dati di moto ondoso nelle aree campione e stima dell'energia ondosa .....	51
2.1 Propagazione del moto ondoso sottocosta .....	51
2.2 Risultati del modello SW .....	55
2.3 Stima dell'energia disponibile sottocosta .....	62
3. Dimensionamento di massima di un impianto Rewec3/3 a celle indipendenti .....	66
3.1 Descrizione generale di un cassone portuale in cemento armato (c.a.) modificato per la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica mediante un innovativo U-OWC .....	66
3.2 Dimensionamento delle Celle Attive dei Cassoni REWEC3/3 .....	70
3.2.1 'Periodo Proprio' di Oscillazione dell'Impianto e Condizioni di Risonanza .....	70
3.2.2 Idrodinamica del Moto dell'Acqua e dell'Aria all'interno dell'Impianto REWEC3 a Celle Indipendenti.....	72
3.3 Stabilità globale dei cassoni REWEC3 .....	74
3.3.1 Condizione di non-frangimento davanti alla struttura .....	74
3.3.2 Calcolo delle Azioni Instabilizzanti prodotte dall'Onda di Progetto in Fase di Cresta .....	75
3.3.3 Calcolo delle Azioni Stabilizzanti .....	78
3.3.3.1 Pesì Propri della Struttura e relativi Momenti .....	78

3.3.3.2 Risultante delle Forze Idrodinamiche all'interno delle parti attive dell'impianto REWEC3 .....	78
3.3.4 Verifica di Stabilità della Struttura .....	79
3.3.5 Stabilità globale dei cassone REWEC3 nelle località oggetto di studio .....	80
3.3.5.1 Porto Pischera in Sardegna .....	80
3.3.5.2 Pantelleria .....	83
3.3.5.3 Genova .....	85
4. Stime di massima della produzione di energia di un impianto Rewec3/3 a celle indipendenti .....	89
4.1 Stime di assorbimento di energia ondosa e produzione di energia elettrica .....	89
4.4.1 Frazione media-annua di energia ondosa assorbita.....	89
4.2 Produzione media-annua di energia elettrica prodotta.....	91
4.3 Efficienza.....	92
4.4 Stime di massima per un REWEC3 a celle comunicanti per le tre località oggetto di studio .....	92
Sintesi: Porto Pischera (Sardegna).....	96
Sintesi: Isola di Pantelleria.....	97
Sintesi: Genova .....	98
Conclusioni .....	98
Riferimenti bibliografici .....	99
Allegato A. Schemi progettuali dei sistemi REWEC 3 impiegati .....	101

## Sommario

Oggetto del presente progetto è l'analisi dei livelli di moto ondoso finalizzata alla realizzazione di impianti per la produzione di energia elettrica da onde di mare, in tre aree campione localizzate lungo le coste italiane. Nello specifico, sono state considerate le località di Porto Pischera (Sardegna sud-ovest), Pantelleria e Genova.

Per ciascuna località sono stati elaborati i dati di moto ondoso, sia al largo sia sotto costa, al fine di valutare sia le onde estreme sia l'energia associata al moto ondoso.

Le aree campione sono state individuate lungo tratti di costa che risultino di interesse per la realizzazione di cassoni portuali di tipo REWEC3. In ciascuna di tali aree sono stati elaborati dati di moto ondoso per intervalli temporali superiori ai 10 anni al fine di effettuare la stima dei livelli ondosi estremi, al largo. I dati di moto ondoso ed i livelli estremi sono stati poi propagati sotto costa, al fine di determinare i livelli di altezza significativa 'locali'.

I livelli estremi di moto ondoso sono stati, quindi, utilizzati per il predimensionamento di cassoni per la produzione di energia dal moto ondoso per i quali sono state condotte le verifiche di stabilità globale dei cassoni.

I livelli di moto ondoso 'locali', in termini di altezza significativa, periodi e direzione dominante delle onde, sono stati utilizzati per la stima dell'energia del moto ondoso incidente.

Infine si è stimato il potenziale energetico reale, in termini di produzione di energia ottenibile con una diga realizzata con cassoni di tipo REWEC3 nelle località assegnate.

## Introduzione

Nella parte del presente progetto di ricerca nazionale "Analisi dei Livelli di moto ondoso finalizzata alla Realizzazione di Impianti per la Produzione di Energia Elettrica da Onde di mare, in Aree Campione della costa italiana" sviluppato dall'Università Mediterranea (supervisore scientifico Prof. Felice Arena) ed ENEA, Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile, sono state individuate tre località di interesse lungo le coste italiane particolarmente idonee per la realizzazione degli innovativi impianti di tipo REWEC3 (*REsonant Wave Energy Converter 3*). Le località scelte sono: Porto Pischera (Sud-Ovest Sardegna), Pantelleria, Genova.

Al fine di effettuare le stime di produzione di massima degli impianti REWEC3 per le fissate località, è stato, innanzitutto, analizzato il clima ondoso a largo con riferimento ai dati del modello WAM (WAVE prediction Model, WAMDI-Group 1988) di terza generazione sviluppato dall'ENEA. Le analisi al largo hanno riguardato la stima degli eventi estremi, con analisi sia omnidirezionale che direzionale (per settori di traversia di propagazione), nonché il calcolo del clima medio ad energia ondosa al largo.

In termini di eventi estremi, per ciascuna delle tre aree campione sono state eseguite le seguenti analisi: elaborazione dati dei livelli di moto ondoso al largo, utilizzando il metodo delle mareggiate triangolari equivalenti e delle Equivalent Power Storms (EPSs). Tali metodi consentono di eseguire l'analisi degli eventi estremi elaborando le distribuzioni di probabilità dei livelli di altezza significativa omnidirezionale e direzionale. L'analisi delle serie temporali dei livelli di altezza significativa consente poi di determinare le mareggiate estreme nell'area in esame, e di associare a ciascuna mareggiata vera una EPS. È stato, quindi, possibile effettuare una stima dell'altezza d'onda massima attesa di una mareggiata e del periodo di ritorno omnidirezionale  $R(H_S > h)$  (Boccotti 1986) di una mareggiata che supera un'assegnata soglia  $h$ , e dell'analogo grandezza riferita ad un settore di traversia principale  $R(H_S > h; \Delta\theta)$ .

Le analisi direzionali hanno consentito, inoltre, di calcolare il clima medio e l'energia a largo.

È stato, quindi, possibile effettuare propagazione dei dati di moto ondoso sotto costa, sulla possibile profondità di posa in opera dei cassoni REWEC3 (10-20m). Lo studio della trasformazione del moto ondoso dal largo verso la costa è stato eseguito mediante l'utilizzo del codice di calcolo MIKE 21 SW, modello d'onda a griglia flessibile (Flexible Mesh).

I dati trasposti sotto costa sono stati, quindi, elaborati al fine della determinazione sia dei dati estremi, necessari al dimensionamento strutturale dei cassoni ed alle verifiche di sicurezza, sia alla determinazione dell'energia ondosa incidente. A partire dall'energia ondosa incidente è stato possibile effettuare una stima dell'energia disponibile sottocosta e, quindi, della determinazione del potenziale energetico nell'area campione. Tali valori rappresentano il primo passaggio nella determinazione dell'efficienza dei cassoni REWEC3 attraverso la stima della produzione di energia ondosa.

Per ciascuna area campione si è proceduto, innanzitutto, ad effettuare un dimensionamento degli impianti REWEC3 per le tre località tali da resistere agli eventi estremi assunti alla base della progettazione della struttura nelle tre località oggetto di studio.

Sono state, infine, dimensionate le parti attive del REWEC3 (condotto e camera di assorbimento), assumendo delle condizioni analoghe per le diverse località, tali da garantire adeguati standard di assorbimento di energia ondosa e di produzione di energia elettrica per il Mar Mediterraneo.

I dati di clima ondoso sotto costa sono stati infine utilizzati per determinare la produzione attesa di energia ondosa. Tale analisi richiede la stima della produzione di energia elettrica per diverse fasce di altezza significativa. La produzione media annua di energia è stata determinata a partire dalle frequenze dei dati di moto ondoso.

A chiusura del progetto è delineato un quadro di sintesi ogni località considerata (Porto Pischera, Pantelleria, Genova) in cui viene riportato il diagramma polare del clima ondoso sottocosta per la fissata area campione, l'andamento del flusso di energia sottocosta in funzione della direzione di provenienza delle onde per l'assegnata area campione, ed, infine, la stima di produzione di energia di un impianto REWEC3 realizzato nell'assegnata area.

Si conferma che la Sardegna occidentale è tra i paraggi italiani a maggior contenuto di energia ondosa disponibile per essere sfruttata con buona efficienza e resa energetica mediante un impianto REWEC3.

# 1. ELABORAZIONE DATI DI MOTO ONDOSO IN AREE CAMPIONE AL LARGO: MAREGGIATE ESTREME E PREVISIONI DIREZIONALI

## 1.1 Individuazione delle aree campione

L'energia del moto ondoso lungo le coste italiane è notoriamente più elevata nella parte occidentale del territorio peninsulare e delle isole maggiori (Sicilia e Sardegna). Questa peculiarità è stata presa in considerazione nella presente analisi al fine di individuare tre possibili siti in cui installare dei sistemi di sfruttamento dell'energia ondosa. In particolare, l'utilizzo del sistema REWEC ha il vantaggio di poter essere integrato nelle dighe marittime a protezione di porti. Per tale ragione si è cercato di individuare dei siti in cui le dighe marittime siano in parte già esistenti ed in cui si voglia migliorare la fruibilità dei corrispondenti porti.

Seguendo questa logica sono state individuate due aree campione per la installazione di tali sistemi, ovvero il porto di Genova ed il porto di Pantelleria. Il primo ha il vantaggio di avere un notevole sviluppo di dighe foranee a parete verticale su fondali aventi profondità di circa 20m. Il sito di Pantelleria, nonostante le ridotte dimensioni del porto, rappresenta una zona particolarmente soggetta al moto ondoso e dunque risulta molto interessante come caso studio per verificare la risposta energetica dei sistemi REWEC.

Infine un terzo sito è stato individuato lungo la costa arburese, a Nord di Capo Pecora (SO Sardegna). Tale area, chiamata Porto Pischera, è stata scelta indipendentemente dalla presenza di porti esistenti, in quanto localizzata lungo la costa occidentale della Sardegna, ovvero la zona in Italia in cui il moto ondoso è in assoluto più intenso e frequente.

La Figura 1.1 mostra la localizzazione dei punti al largo delle tre aree campione, in corrispondenza dei quali è stato estratto il moto ondoso fornito dal modello dell' ENEA, che è stato utilizzato come base per la successiva analisi finalizzata alla stima della energia ondosa disponibile.

## 1.2 Clima medio ad energia ondosa al largo

I dati di moto ondoso sono stati estratti al largo delle tre aree campione in corrispondenza dei punti aventi coordinate geografiche (Latitudine/Longitudine):

- 44,325°N, 8,875°E per Genova;
- 36,825°N, 11,875°E per Pantelleria;
- 39,5175°N, 8,312°E per Porto Pischera.

In tutti e tre i punti la profondità risulta essere maggiore di 130m in modo che il moto ondoso non risenta del fondale nemmeno in corrispondenza degli eventi estremi. Infatti l'ipotesi di profondità infinita, ovvero lunghezza d'onda minore del doppio della profondità, risulta essere sempre rispettata.

I dati triorari estratti nei tre punti, al fine della propagazione sotto costa, sono stati raggruppati in classi di altezza d'onda significativa, direzione di provenienza e periodo medio. Per ciascuna classe è stata determinata la frequenza di apparizione media, definita come il rapporto tra il numero di eventi ricadenti nella generica classe ed il numero totale di eventi disponibili.

Inoltre, considerando che il sistema REWEC può assorbire energia da onde provenienti da un settore di 180°, è stato definito per ciascun punto il settore di traversia delle onde ed è stato ipotizzato, in prima approssimazione, di posizionare le dighe con i REWEC in modo da massimizzare l'energia proveniente da tali settori, rappresentati dalle direzioni comprese tra:

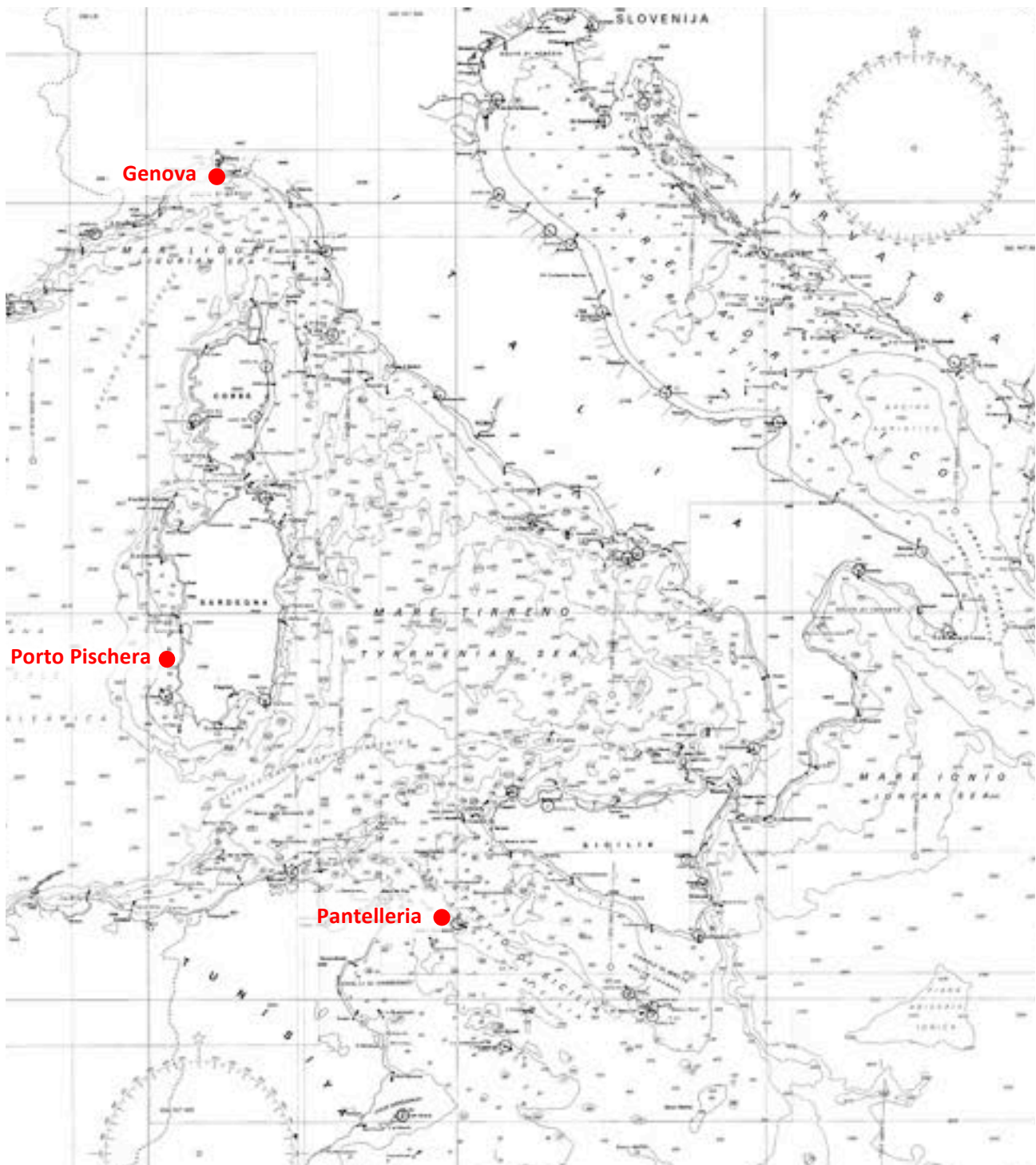
- 100 - 230°N (misurati in senso orario rispetto al Nord) per il sito di Genova;
- 200 - 360°N e 0 - 100°N per Pantelleria;
- 190 - 360°N e 0 - 10°N per Porto Pischera.

Di conseguenza sono state escluse dalle analisi finalizzate alla propagazione del moto ondoso sotto costa, tutte le onde provenienti da direzioni esterne ai settori di traversia così definiti, per i quali è stata assunta una altezza d'onda trascurabile. In sostanza, sono stati scartati tutti i dati per i quali la direzione di propagazione evidenziava onde provenienti da terra.

Sulla base di tali considerazioni è stato ottenuto, per ciascun punto al largo, il clima medio, mostrato dalla Figura 1.2 alla Figura 1.4 nella classica rappresentazione a rosa con intervalli direzionali di 10°. Da tali rappresentazioni del clima medio è possibile dedurre le principali caratteristiche del moto ondoso nei punti considerati in termini di direzioni di provenienza delle onde più frequenti e più intense.

A partire da tali risultati si nota che in tutti i casi considerati i settori con moto ondoso più intenso sono quelli occidentali. In particolare il sito di Genova riceve la maggior parte degli eventi ondosi da Sud-Ovest, invece negli altri due casi i settori direzionali più intensi sono quelli di Nord-Ovest.

Risulta inoltre interessante sottolineare che le altezze d'onda più elevate sono presenti nel sito posto al largo di Porto Pischera, con valori di altezza significativa che superano i 9,5m. Le massime altezze d'onda significative vanno a ridursi passando a valori dell'ordine di 7,5m a Pantelleria e di 6m a Genova.



**Figura 1.1** Carta nautica del Mediterraneo occidentale con indicazione dei punti al largo delle aree campione.

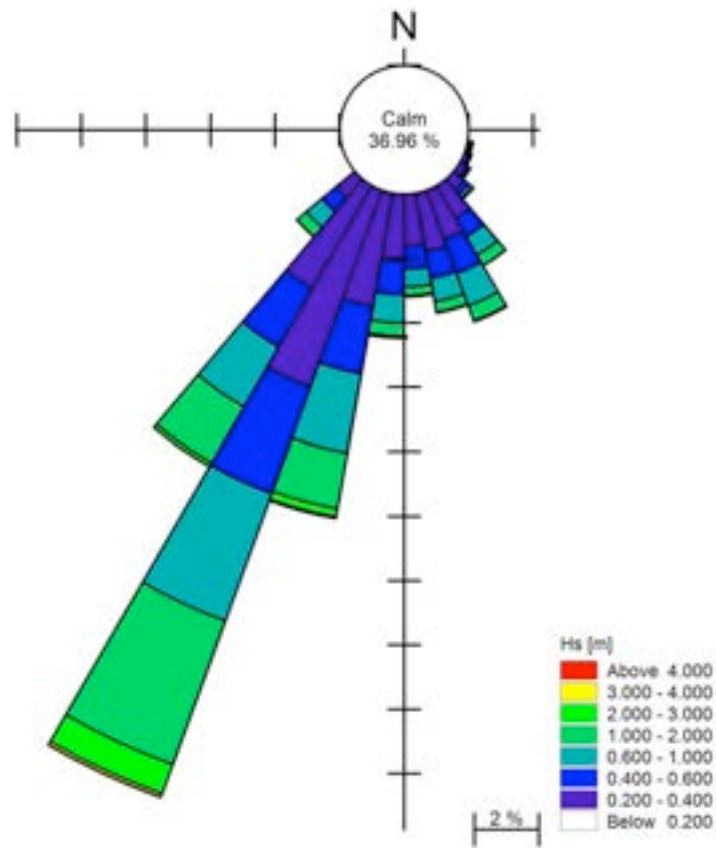


Figura 1.2 Rosa del clima ondoso nel punto al largo di Genova, avente coordinate geografiche 44,325°N, 8,875°E.

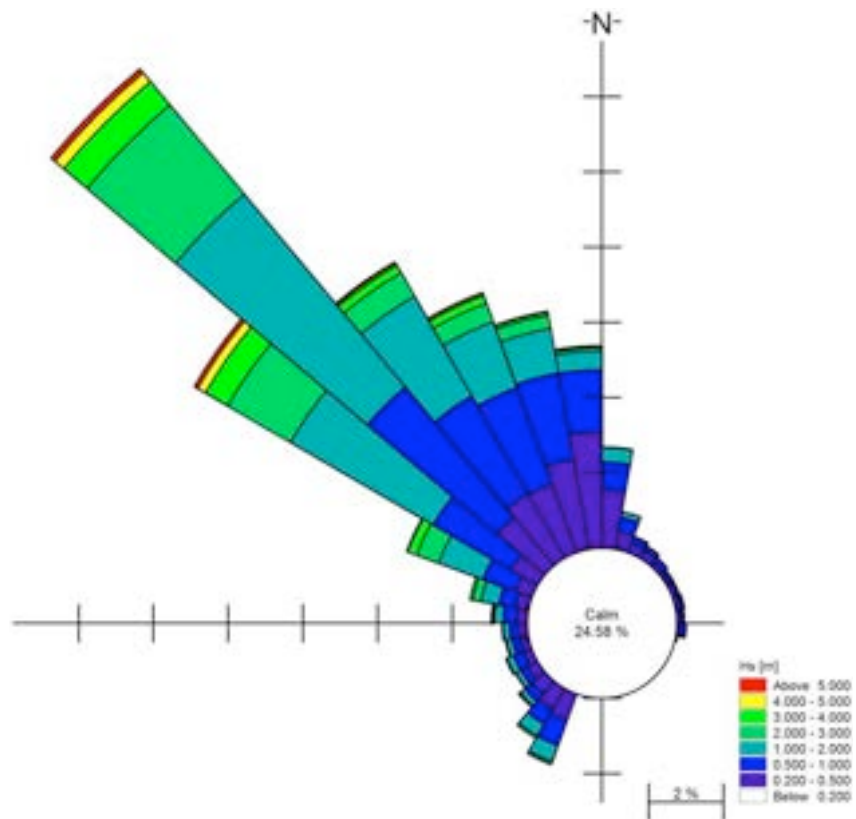
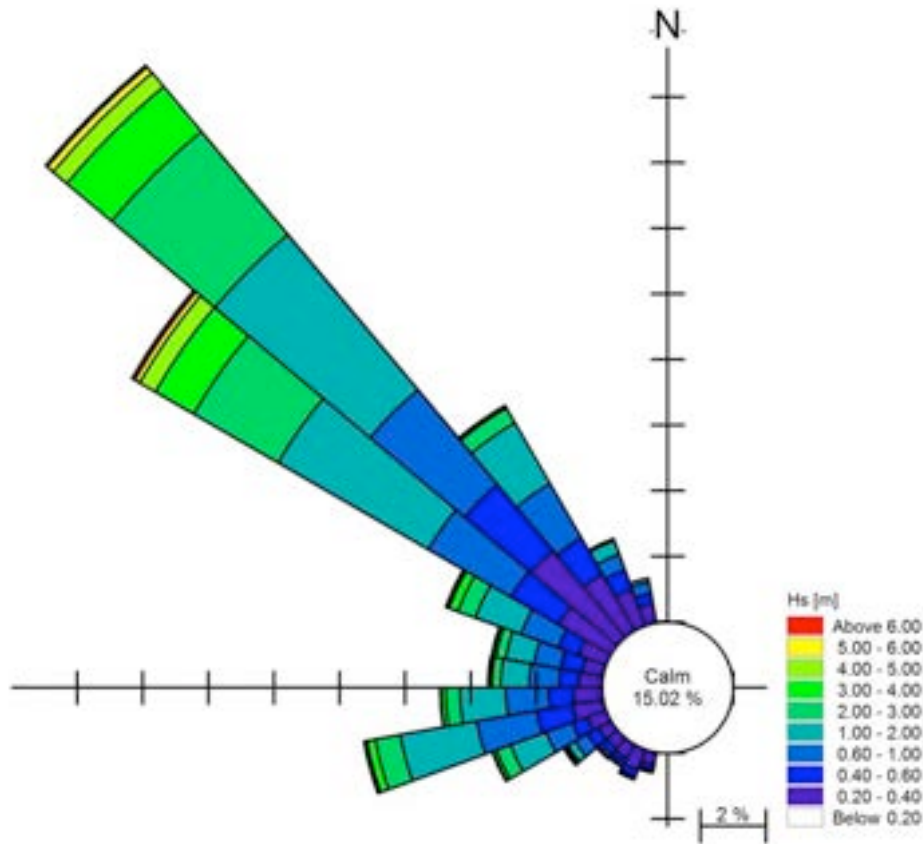


Figura 1.3 Rosa del clima ondoso nel punto al largo di Pantelleria, avente coordinate geografiche 36,825°N, 11,875°E.



**Figura 1.4** Rosa del clima ondoso nel punto al largo di Porto Pischera, di coordinate geografiche 39,5175°N, 8,312°E.

Dato che lo scopo del presente lavoro è di valutare la possibilità di sfruttare l'energia ondosa del mare, risulta opportuno procedere fin d'ora alla stima del flusso di energia legato al clima ondoso al largo delle aree campione individuate. A tale scopo, è stata utilizzata una formulazione che consente di calcolare la potenza energetica ( $P$ ) relativa a ciascuno stato di mare in funzione delle sue principali caratteristiche, ovvero l'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) ed il periodo medio ( $T_m$ ):

$$P = \frac{1.15 \rho g^2 H_s^2 T_m}{64\pi} \quad (1.1)$$

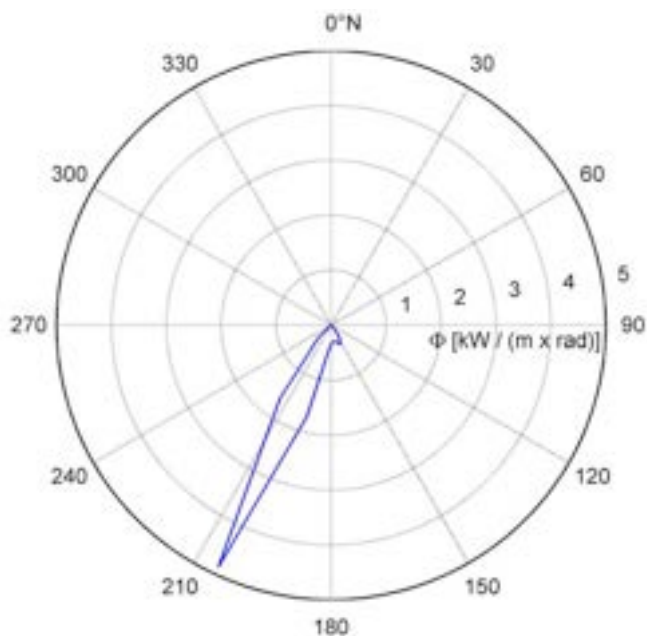
La potenza così definita è stata ricavata per ogni condizione ondosa del clima medio. Al fine di poter considerare il flusso di energia complessivo, legato all'intero clima medio, ciascun valore della potenza è stato moltiplicato per la corrispondente frequenza di apparizione allo scopo di ottenere il flusso di energia, ovvero l'energia media per unità di lunghezza, misurato in kW/m. Tale procedura è stata ripetuta separatamente per le classi di direzione di provenienza in cui è stato discretizzato il clima medio. Ciascun

flusso risultante è stato poi diviso per l'ampiezza del settore (in questo caso 10°) ed i risultati sono mostrati per le tre aree campione dalla Figura 1.5 alla Figura 1.7 sotto forma di grafici polari del flusso di energia.

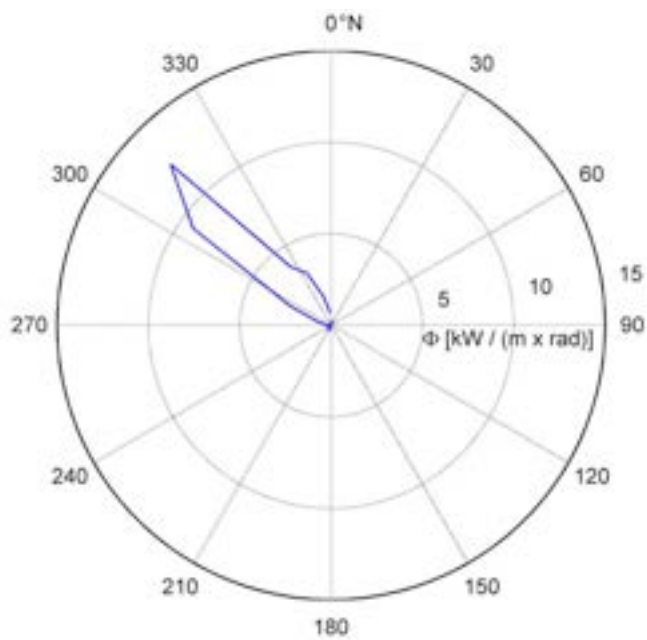
I risultati di tale procedura sono strettamente correlati alle rose del clima medio già analizzate. In particolare, la massima energia al largo si ha per il punto al largo di Porto Pischera con un valore del flusso di energia pari a 10,7 kW/m. Tale energia risulta essere correlata quasi esclusivamente a eventi con direzione di provenienza Nord-Ovest. Una analoga considerazione si può evincere dai risultati al largo Pantelleria, in cui però il flusso totale si riduce, portandosi ad un valore di 6,4 kW/m. Infine il flusso di energia al largo di Genova è ulteriormente ridotto rispetto ai precedenti (1,8 kW/m) e risulta essere concentrato nella direzione Sud-Ovest.

Tali risultati sono da considerarsi indicativi ed approssimati per eccesso rispetto all'effettiva energia disponibile nelle tre aree campione in quanto non tengono conto dell'effetto del fondo e dei conseguenti fenomeni di rifrazione ed irripidimento delle onde. Nella seguente parte del presente lavoro tale limitazione viene rimossa in modo da fornire valori più attendibili del flusso di energia disponibile.

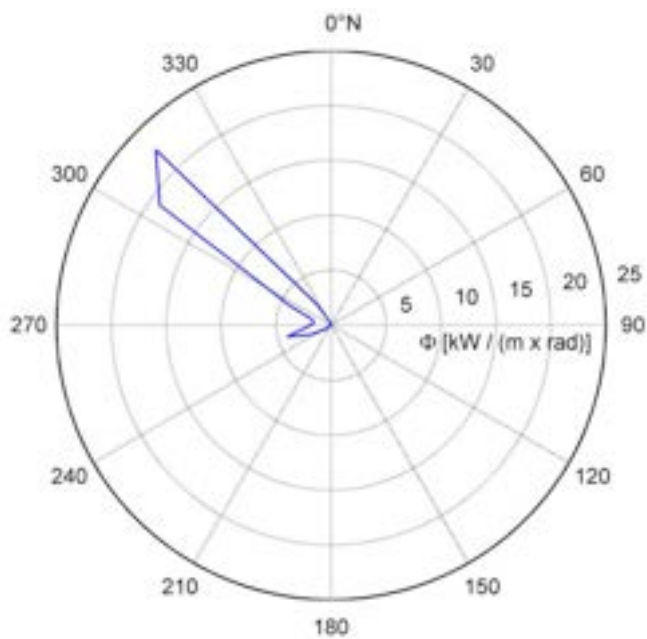
I dati di moto ondoso al largo sono stati elaborati per la determinazione dei livelli estremi di altezza significativa, sia omnidirezionali (a prescindere, cioè, dalla direzione di propagazione delle onde) sia direzionali. Tali elaborazioni sono riportate nella prossima sezione.



**Figura 1.5** Grafico polare del flusso di energia nel punto al largo di Genova.



**Figura 1.6** Grafico polare del flusso di energia nel punto al largo di Pantelleria.



**Figura 1.7** Grafico polare del flusso di energia nel punto al largo di Porto Pischera.

### 1.3 Mareggiate e livelli ondosi estremi di altezza significativa

Una mareggiata, in generale, è caratterizzata da livelli di altezza significativa che eccedono un assegnato livello di soglia, che dipende dalla località (un valore di 2 metri di altezza significativa può essere rappresentativo di una mareggiata nel Mare Mediterraneo; esso rappresenta, invece, un valore ‘normale’ in una località che si affaccia su un oceano, ad esempio le coste della California, USA). Seguendo la definizione di Boccotti (1997), si definisce mareggiata una successione di stati di mare nel corso della quale l’altezza significativa degli stati di mare stessi supera e si mantiene al di sopra di una soglia prefissata  $h_{crit}$ , detta soglia critica, e non scende al disotto di tale soglia per durate di tempo superiori a un intervallo di tempo prefissato  $\Delta t_{crit}$ , detto intervallo di tempo critico. Per il Mar Mediterraneo si possono assumere  $h_{crit} = 1,5\text{m}$  e  $\Delta t_{crit} = 12\text{ore}$ .

#### 1.3.1 Altezza d’onda massima attesa di una mareggiata (Borgman, 1970)

L’espressione dell’altezza d’onda massima attesa  $\overline{H_{max}}$  di una mareggiata si ottiene a partire dalla probabilità di superamento dell’altezza d’onda massima attesa.

La probabilità che l’onda massima nel corso della mareggiata sia più piccola di un’assegnata soglia  $H$  è uguale alla probabilità che tutte le onde della mareggiata siano più piccole di tale soglia. Si ha quindi:

$$P(H_{max} < H) = \prod_{i=1}^N [1 - P(H; H_s = h_i)]^{N_i} \quad (1.2)$$

con  $h_i$  =altezza significativa dell’i-esimo stato di mare,  $\Delta t$  = durata dello stato di mare,  $N_i$  = numero di onde dell’i-esimo stato di mare:

$$N_i = \frac{\Delta t}{T(h_i)}. \quad (1.3)$$

Dopo alcuni semplici passaggi, dall’Eq. (1.2) si ricava la probabilità che l’onda massima nel corso della mareggiata superi la soglia assegnata  $H$ :

$$P(H_{max} > H) = 1 - \exp \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{\Delta t}{T(h_i)} \ln [1 - P(H; H_s = h_i)] \right\} \quad (1.4)$$

L’espressione così ottenuta consente di calcolare la probabilità di superamento dell’onda massima al variare dell’altezza significativa, assegnata la funzione  $H_s(t)$  della mareggiata. I risultati non cambiano se si considera un  $\Delta t$  molto piccolo, anche più piccolo dello stesso periodo dell’onda. Una tale considerazione non ha significato dal punto di vista fisico, ma risulta utile da un punto di vista matematico, in quanto

consente di poter effettuare il passaggio dalla sommatoria all'integrale e quindi di poter riscrivere l'espressione (1.4) nella forma integrale (Borgman, 1970, 1973):

$$P(H_{max} > H) = 1 - \exp \left\{ \int_0^D \frac{1}{T(h(t))} \ln[1 - P(H; H_s = h(t))] dt \right\} \quad (1.5)$$

Si noti che  $H_{max}$  è una variabile aleatoria definita positiva. L'altezza dell'onda massima attesa nel corso della mareggiata  $\overline{H_{max}}$  definita uguale al valore medio dei valori di  $H_{max}$  in un numero molto grande (al limite pari ad infinito) delle realizzazioni del processo aleatorio mareggiata. Dal punto di vista matematico,  $\overline{H_{max}}$  si ottiene calcolando l'integrale da 0 a  $\infty$  della sua probabilità di superamento:

$$\overline{H_{max}} = \int_0^{\infty} 1 - \exp \left\{ \int_0^D \frac{1}{T(h(t))} \ln[1 - P(H; H_s = h(t))] dt \right\} dH \quad (1.6)$$

dove  $D$  è la durata della mareggiata.

### 1.3.2 Modelli delle mareggiate equivalenti per l'analisi delle mareggiate

Per poter individuare le singole mareggiate verificatesi in una data località occorre analizzare l'andamento dell'altezza significativa nel tempo nella località in esame. Individuate le singole mareggiate, al fine di poter semplificare il processo di analisi delle stesse e dei relativi periodi di ritorno, occorre scegliere un modello per il calcolo della mareggiata equivalente associata alla mareggiata vera. Tra i modelli presenti in letteratura vi sono:

- il modello della mareggiata triangolare equivalente (Boccotti, 2000; Arena & Pavone, 2006, 2009);
- il modello della mareggiata di potenza equivalente (Equivalent power storm), (Arena, Fedele, 2010).

### 1.3.3 Modello della mareggiata triangolare equivalente

Con il modello della mareggiata triangolare equivalente si associa alla mareggiata vera una mareggiata triangolare, ottenuta a partire da quella vera. La mareggiata triangolare equivalente è definita mediante due parametri:

- l'altezza  $a$  del triangolo, che deve essere posta pari all'altezza significativa massima nel corso della mareggiata vera;

- la base  $b$  del triangolo, che rappresenta la durata della mareggiata triangolare equivalente, si determina in maniera tale che l'altezza d'onda massima attesa della mareggiata triangolare equivalente risulti uguale all'altezza d'onda massima attesa della mareggiata vera.

La determinazione di  $a$  è diretta, mentre per la durata  $b$  si deve procedere iterativamente. Si calcola quindi l'altezza d'onda massima attesa della mareggiata vera e si impone l'uguaglianza con l'altezza d'onda massima attesa della mareggiata triangolare equivalente, la cui espressione analitica è funzione della durata  $b$  incognita:

$$\overline{H_{max\ m.t.s.}} = \int_0^{\infty} 1 - \exp \left\{ \frac{b}{a} \int_0^a \frac{1}{T(h)} \ln[1 - P(H; H_s = h)] dh \right\} dH \quad (1.7)$$

Si fissa quindi un valore di  $b$  di tentativo, in genere piccolo, e si procede iterativamente fino a soddisfare l'uguaglianza. Con le ipotesi fatte la mareggiata vera e la mareggiata triangolare equivalente hanno la stessa probabilità che l'onda massima superi una fissata soglia  $H$ , la stessa altezza significativa massima e pertanto sono assolutamente equivalenti in termini di rischio ondoso.

Considerando l'insieme delle  $N$  mareggiate più forti verificatesi in una località assegnata durante un certo numero di anni  $n_{anni}$ , con:

$$N = 10 n_{anni} \quad (1.8)$$

Si possono calcolare i parametri caratteristici della località  $a_{10}$  e  $b_{10}$ , che rappresentano rispettivamente il valor medio delle altezze  $a$  e il valor medio delle basi  $b$  delle  $N$  mareggiate triangolari equivalenti costituenti l'insieme (il pedice 10 sta a indicare che la media è stata effettuata su numero di mareggiate pari a 10 per il numero di anni di registrazione):

$$a_{10} = \frac{\sum_{i=1}^N a_i}{N} \quad (1.9)$$

$$b_{10} = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{N} \quad (1.10)$$

Il legame tra i parametri  $a_{10}$  e  $b_{10}$  relativi a tutte le località in cui sono ubicate le boe ondometriche (Boccotti, 1997, 2000; Arena, 2004) è utile per determinare l'intensità e la durata delle mareggiate più intense che si realizzano in un paraggio. Essi possono essere poi utilizzati per formulare in forma adimensionale la funzione regressione basi-altezze delle mareggiate triangolari equivalenti. Per i mari italiani l'espressione di tale funzione è la seguente (Arena e Barbaro, 1999):

$$\bar{b}(a) = b_{10}(1,12 - 0,12a / a_{10}) \quad (1.11)$$

Essa rappresenta la retta interpolante dei minimi scarti quadratici della regressione basi altezze delle mareggiate triangolari equivalenti.

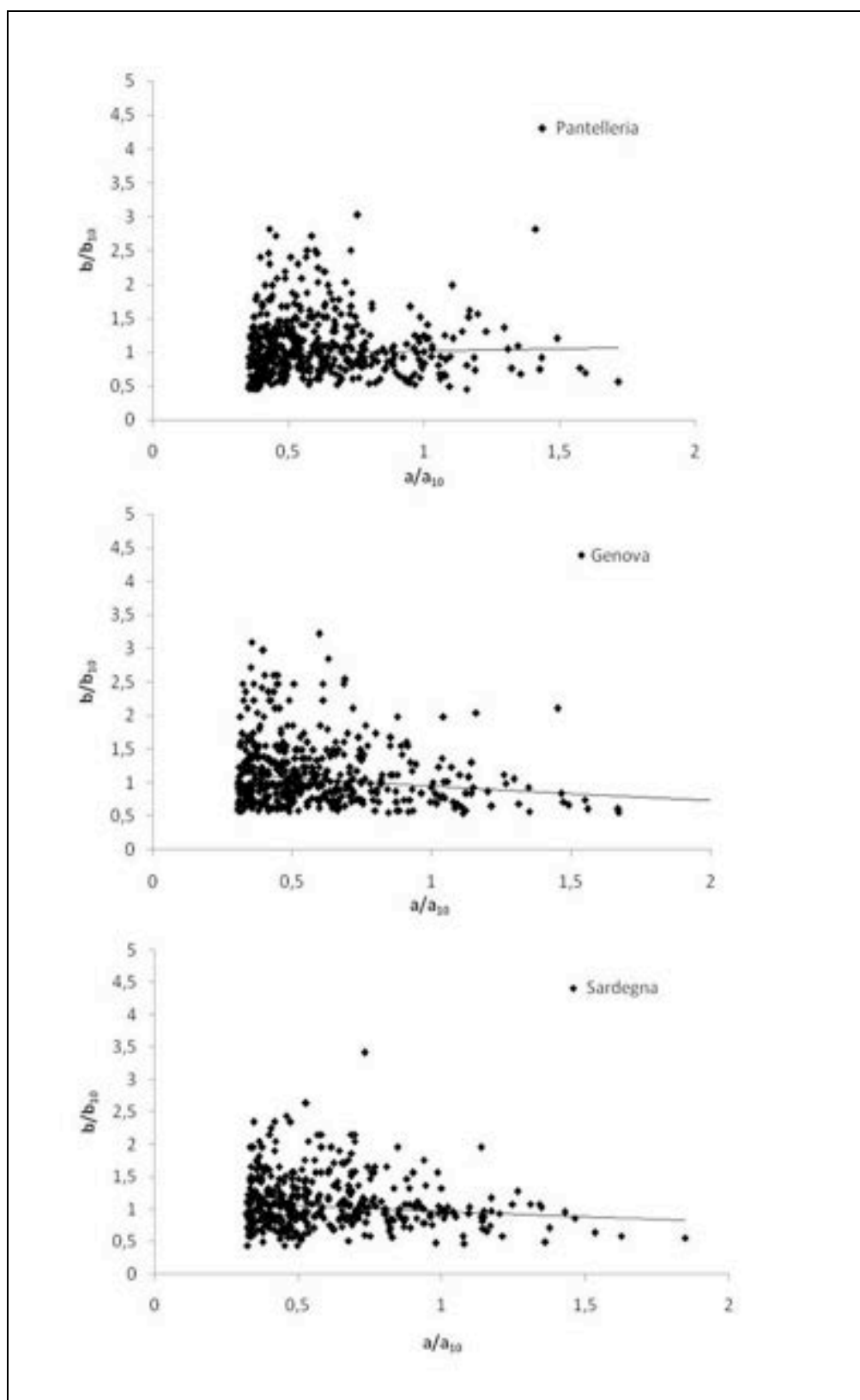


Figura 1.8 Regressione basi-altezze.

### 1.3.4 Modello della mareggiata di potenza equivalente (Equivalent Power Storm)

Il modello della mareggiata equivalente di potenza (Fedele e Arena, 2010) costituisce una generalizzazione del modello della mareggiata triangolare equivalente, finalizzata ad una schematizzazione più realistica delle mareggiate. L'altezza significativa nel tempo viene rappresentata mediante una legge di potenza di esponente  $\lambda > 0$ , che rappresenta il parametro di forma, del tipo:

$$h(t) = -\left(\frac{2}{b_\lambda}\right)^\lambda a \cdot t^\lambda + a \quad (1.12)$$

Scelto il valore del parametro di forma  $\lambda$  la mareggiata equivalente di potenza risulta definita mediante due parametri:

- l'intensità  $a$ , pari all'altezza significativa massima nel corso della mareggiata vera;
- la durata  $b_\lambda$ , determinata in maniera tale che l'altezza d'onda massima attesa della mareggiata di potenza equivalente risulti uguale all'altezza d'onda massima attesa della mareggiata vera.

La procedura da seguire per il calcolo della durata  $b_\lambda$  è analoga a quella per il calcolo della durata  $b$  della mareggiata triangolare equivalente. Si calcola l'altezza d'onda massima attesa della mareggiata vera e si impone l'uguaglianza con l'altezza d'onda massima attesa della mareggiata di potenza equivalente:

$$\overline{H_{max\ e.p.s}} = \int_0^\infty 1 - \exp\left\{-\int_0^a \frac{b_\lambda}{\lambda a} \frac{1}{T(h)} \ln[1 - P(H; H_s = h)] \left(1 - \frac{h}{a}\right)^{\frac{1-\lambda}{\lambda}} dh\right\} dH \quad (1.13)$$

Essendo quest'ultima funzione di  $b_\lambda$  occorre fissare un valore di  $b_\lambda$  di tentativo e procedere iterativamente fino a soddisfare l'uguaglianza.

Il modello risulta stabile per valori dell'esponente  $\lambda < 0,75$ , per valori maggiori si hanno delle durate eccessivamente grandi, prive di significato fisico. Per  $\lambda < 1$  si ha una buona approssimazione dei picchi delle mareggiate. In corrispondenza del valore critico del parametro di forma pari a 0,7, non si hanno sensibili variazioni delle durate. Per evitare stime non realistiche si deve assumere  $\lambda > 0,7$ ; infatti se il parametro di forma è minore di quello critico si hanno dei valori delle durate molto grandi e quindi non realistici. Il valore ottimale del parametro di forma è pari a 0,75 (Fedele, Arena, 2010).

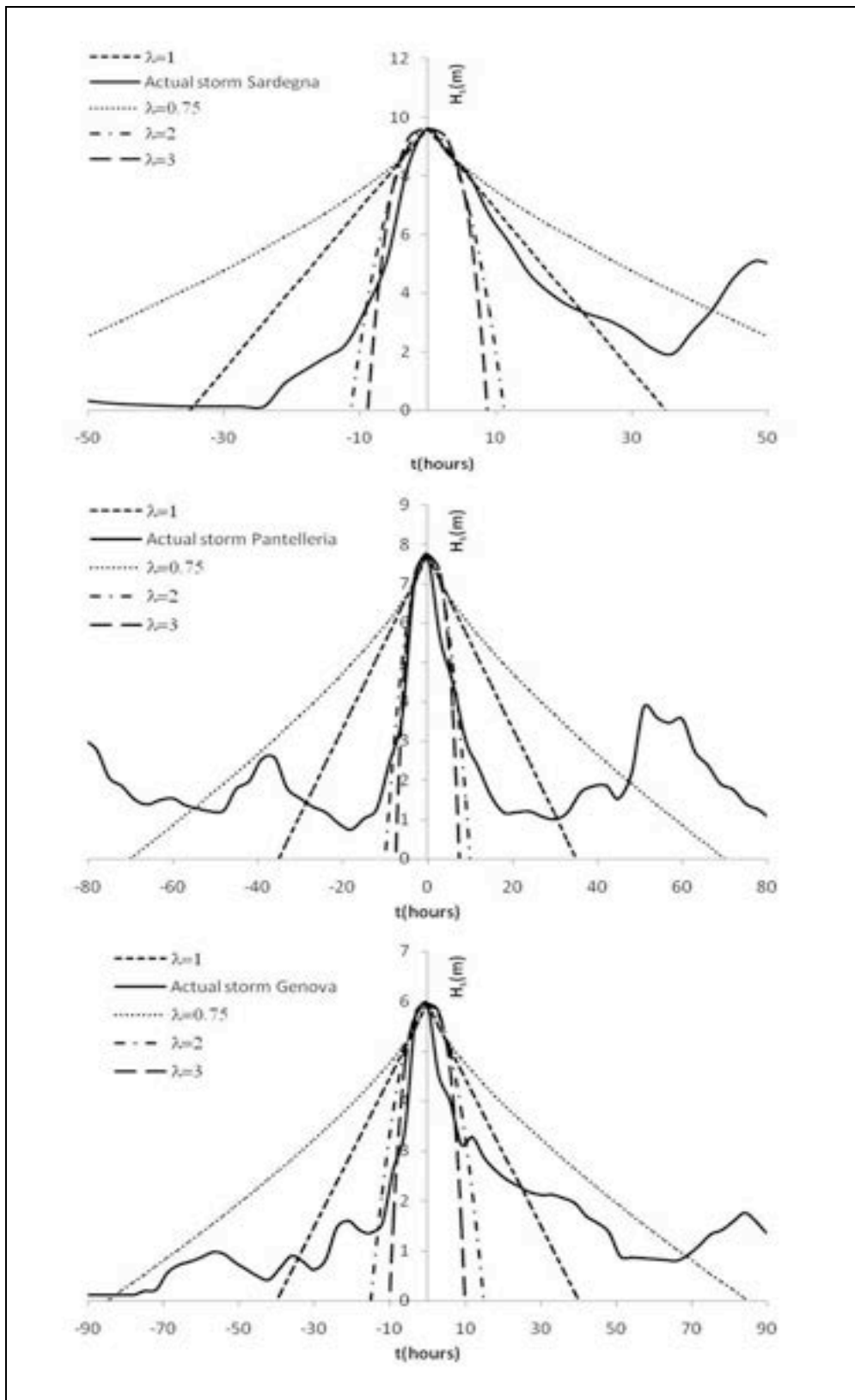


Figura 1.9 Mareggiate più forti registrate e relative Equivalent Power Storms.

## 1.4 Probabilità e Periodi di Ritorno

### 1.4.1 Probabilità omnidirezionale dell'altezza significativa

La probabilità di superamento omnidirezionale  $P(H_s > h)$  è la probabilità che l'altezza significativa  $H_s$ , in una data località, si mantenga al di sopra di un'assegnata soglia  $h$ , indipendentemente dalla direzione di provenienza del moto ondoso. Per stimare la probabilità di superamento non è necessario analizzare singolarmente le varie mareggiate verificatesi nel periodo delle misurazioni ma è sufficiente contare il numero di registrazioni in cui l'altezza significativa ha superato la soglia assegnata, dividendo poi tale numero per il numero totale delle registrazioni.

Nel dominio dei valori  $h$  maggiori della soglia  $h_{crit}$  la probabilità è in genere espressa nella forma :

$$P(H_s > h) = \exp\left[-\left(\frac{h}{w}\right)^u\right] \quad (1.14)$$

Si tratta di una probabilità tipo Weibull a due parametri,  $u$  e  $w$ , che dipendono dalla località in esame. Per rappresentare graficamente i dati conviene ricorrere a delle variabili ausiliarie del tipo  $X=100\ln(2.5h)$  e  $Y=100\ln \ln(1/P)$ . Le coppie di dati  $(X,Y)$  dovrebbero disporsi secondo una retta di equazione  $Y = b X + a$ , a parte naturalmente alcuni prevedibili scarti dovuti alla limitatezza del campione statistico. Una volta ricavati i parametri  $a$  e  $b$  della retta si possono ricavare direttamente i valori dei parametri  $u$  e  $w$  della  $P(H_s > H)$ , con le seguenti relazioni:

$$u = b \quad \text{e} \quad w = \frac{1}{2,5} \exp\left(-\frac{a}{100b}\right) \quad (1.15)$$

con  $w$  in metri, se  $h$  è in metri.

I valori dei parametri  $u$  e  $w$  della probabilità omnidirezionale per le varie località dove operano le boe ondamiche vengono riportati in Tabella 1.1.

**Tabella 1.1** Parametri  $u$  e  $w$  della probabilità omnidirezionale.

Località	$w(m)$	$u$
La spezia	0,731	1,023
Alghero	1,280	1,137
Ponza	0,874	1,200
Ponza	1,021	1,275
Mazara del Vallo	0,637	0,958
Monopoli	0,645	1,143
Pescara	0,625	1,018

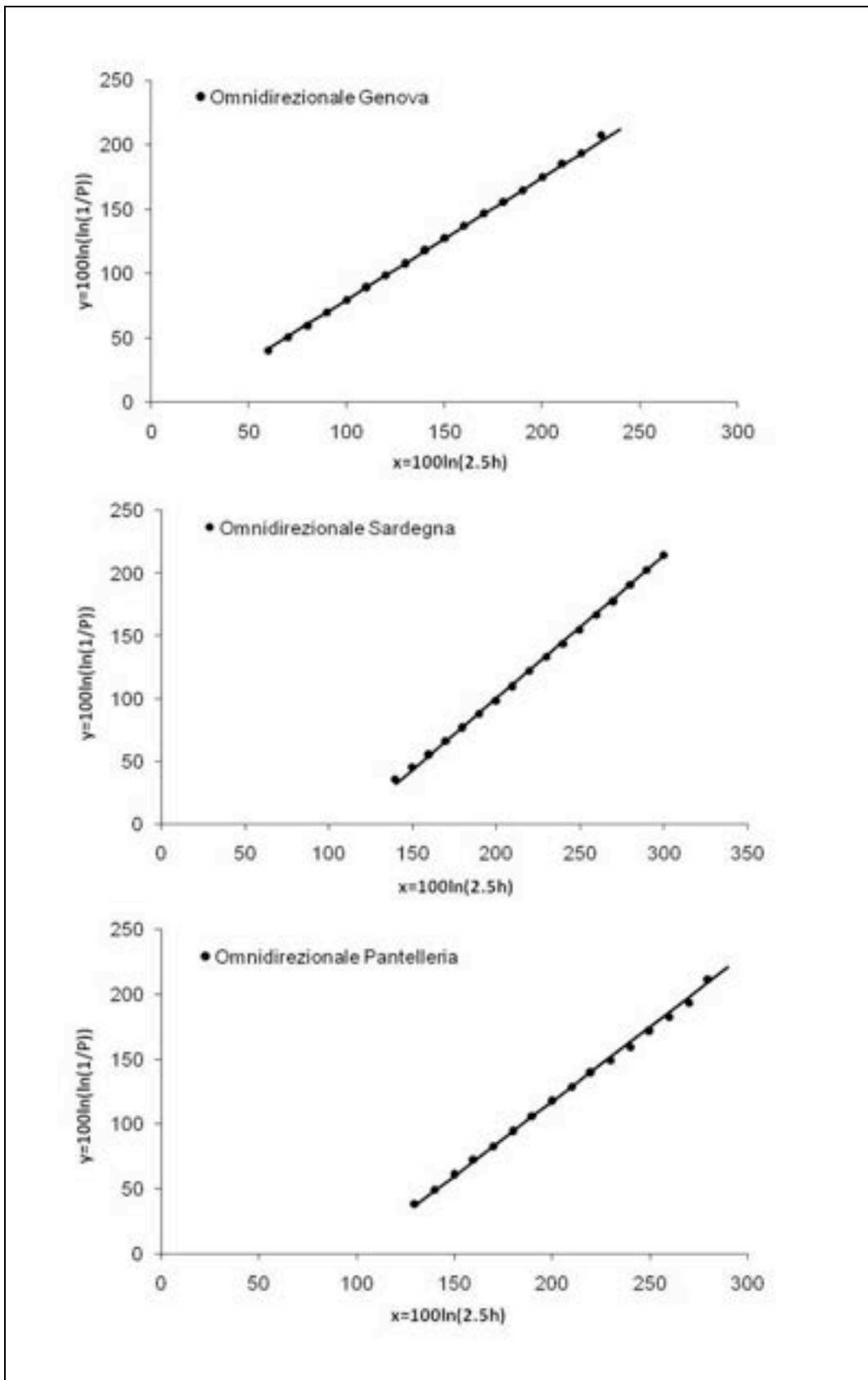


Figura 1.10 Probabilità omnidirezionale.

### 1.4.2 Significato fisico dei parametri $u$ e $w$

Per comprendere il significato fisico di  $u$  e  $w$ , conviene ragionare in termini di funzione inversa, ovvero della soglia  $h$  cui corrisponde una certa probabilità di superamento  $P$ :

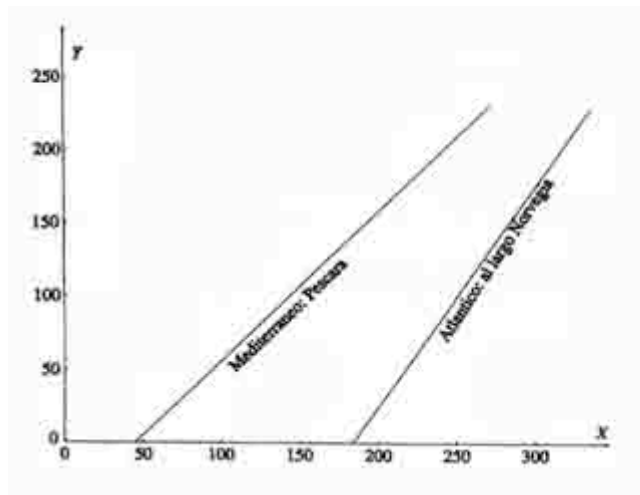
$$h(P) = w \left( \ln \frac{1}{P} \right)^{\frac{1}{u}} \quad (1.16)$$

Tale espressione mostra che, a parità di  $u$ , il valore dell'altezza significativa corrispondente ad un assegnato livello di probabilità  $P$  è proporzionale a  $w$ , che rappresenta quindi il fattore di scala. Se  $h$  si misura in m anche esso sarà espresso in m. Quanto al parametro  $u$ , esso regola i rapporti tra le altezze significative a diversi livelli di probabilità ed inoltre è un parametro adimensionale.

Se ad esempio consideriamo i livelli di probabilità  $P=1:1000$  e  $P=1:10$ :

$$\frac{h\left(\frac{1}{1000}\right)}{h\left(\frac{1}{10}\right)} = \left(\frac{\ln 1000}{\ln 10}\right)^{\frac{1}{u}} \quad (1.17)$$

Negli oceani sia  $w$  che  $u$  assumono valori maggiori che nel Mediterraneo. Il fatto che il  $w$  dell'oceano sia più grande del  $w$  del Mediterraneo implica che le altezze significative in oceano siano più grandi che in Mediterraneo. Il fatto che l' $u$  dell'oceano sia più grande di quello del Mediterraneo implica che il rapporto tra oceano e Mediterraneo, quanto ad altezza d'onda, è più grande a livello di onde comuni che a livello di onde rare. Quanto appena detto è facilmente visibile se si mettono a confronto la  $P(H_s > H)$  relativa ad una località del Mediterraneo e a una dell'Atlantico, rappresentandole nel piano delle variabili ausiliarie  $X, Y$  (fig. 1.11).



**Figura 1.11.** Confronto tra la  $P(H_s > H)$  relativa ad una località del Mediterraneo e a una dell'Atlantico

### 1.4.3 Probabilità direzionale dell'altezza significativa

La probabilità di superamento direzionale  $P(H_s > H; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  rappresenta la probabilità che l'altezza significativa in una data località si mantenga al di sopra di una certa soglia  $h$  e la direzione dominante di propagazione del moto ondoso si mantenga entro un assegnato settore  $\Delta\theta$ .

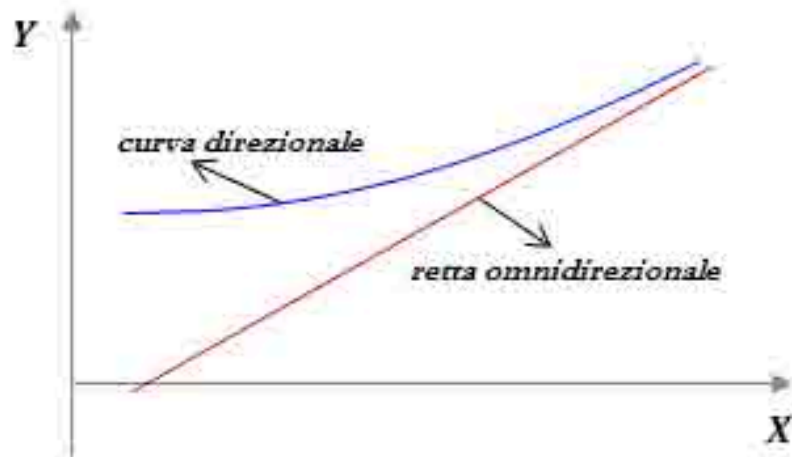
La probabilità di superamento direzionale ha espressione:

$$P(H_s > H; \theta_1 < \theta < \theta_2) = \exp \left[ -\left(\frac{h}{w_\alpha}\right)^u \right] - \exp \left[ -\left(\frac{h}{w_\beta}\right)^u \right] \quad (1.18)$$

con  $w_\alpha$  e  $w_\beta$  parametri caratteristici.

Si tratta della differenza di due probabilità di tipo Weibull, dove i parametri  $w_\alpha$  e  $w_\beta$  variano in generale da settore a settore, mentre  $u$  assume un valore costante pari a quello della probabilità omnidirezionale. Anche in questo caso, come per la probabilità direzionale, è utile utilizzare le variabili ausiliarie  $X=100\ln(2.5h)$  e  $Y=100\ln \ln(1/P)$ . La curva rappresentativa della probabilità direzionale viene detta curva direzionale e nel piano  $X,Y$  si disporrà a sinistra della curva omnidirezionale. Le due probabilità coincidono solo quando si considera il settore di traversia principale, ovvero quello da cui provengono le onde più forti. In questo caso la retta asintoto della curva direzionale coincide con la retta rappresentante la probabilità omnidirezionale. La probabilità direzionale deve sempre essere positiva e minore di quella omnidirezionale, pertanto deve sempre verificarsi che:

- $w_\alpha > w_\beta$  (affinché non si abbiano valori di  $P$  negativi);
- $w_\alpha \leq w_\beta$  (perché la probabilità direzionale deve essere sempre minore di quella omnidirezionale).



**Figura 1.12.** Andamento tipo della retta omnidirezionale e della curva direzionale nel piano X,Y.

#### 1.4.4 Stima dei parametri $w_\alpha$ e $w_\beta$ e condizione necessaria e sufficiente per l'esistenza della soluzione a partire da una coppia di parametri fissata.

Per ricavare i valori di  $w_\alpha$  e  $w_\beta$  del generico settore si fissano due coppie di punti  $(X_1, Y_1)$  e  $(X_2, Y_2)$  per i quali, a giudicare dai dati, si ritiene debba passare la curva direzionale. Poiché c'è un legame biunivoco tra  $h$  e  $X$  e tra  $P$  e  $Y$ , alla coppia  $(X_1, Y_1)$  corrisponde una coppia  $(h_1, P_1)$ , e alla coppia  $(X_2, Y_2)$  una coppia  $(h_2, P_2)$ . Assumiamo  $h_1 < h_2$  che implica  $P_1 > P_2$ . Dall'espressione della probabilità direzionale si ha:

$$P_1 = \exp \left[ -\left( \frac{h_1}{w_\alpha} \right)^u \right] - \exp \left[ -\left( \frac{h_1}{w_\beta} \right)^u \right] \quad (1.19)$$

$$P_2 = \exp \left[ -\left( \frac{h_2}{w_\alpha} \right)^u \right] - \exp \left[ -\left( \frac{h_2}{w_\beta} \right)^u \right] \quad (1.20)$$

A questo punto si introducono le variabili adimensionali  $\tilde{x}$ ,  $\tilde{y}$  così definite:

$$\tilde{x} = \frac{1}{w_\alpha^u} \quad \text{e} \quad \tilde{y} = \frac{1}{w_\beta^u} \quad (1.21)$$

Si ottiene in questo modo un sistema di due equazioni non lineari nelle due incognite  $\tilde{x}$  e  $\tilde{y}$ .

Si definiscono le due funzioni:

$$f_1(x) \equiv \exp(-h_1^u x) \quad \text{per } x \geq 0 \quad (1.22)$$

$$f_2(x) \equiv P_1 + [\exp(-h_2^u x) - P_2]^{P_1/P_2} \quad \text{per } 0 \leq x \leq x_{sup} \quad (1.23)$$

dove  $x_{sup} = \frac{1}{h_2^u}$  ed è il valore di  $x$  per cui  $[\exp(-h_2^u x) - P_2]$  si annulla.

Il valore di  $\tilde{x}$  che si vuole determinare dalla risoluzione del sistema, se esiste, è quello per cui  $f_1(\tilde{x}) = f_2(\tilde{x})$ .

Una volta noto il valore di  $\tilde{x}$  si calcolano  $w_\alpha$  e  $w_\beta$  come:

$$w_\alpha = \left(\frac{1}{\tilde{x}}\right)^{\frac{1}{u}} \quad (1.24)$$

$$w_\beta = h_1 \left\{ \ln \left[ \exp\left(-\frac{h_2^u}{w_\alpha^u}\right) - P_1 \right]^{-1} \right\}^{-\frac{1}{u}} \quad (1.25)$$

Avendo assunto  $h_1 < h_2$  e di conseguenza  $P_1 > P_2$  si ha che  $f_2(0) > f_1(0)$ .

Pertanto tenuto conto che sia  $f_1(x)$  che  $f_2(x)$  sono funzioni monotone decrescenti, e che  $f_2(x)$  è definita in  $[0, x_{sup}]$ , segue che  $\tilde{x}$  esiste ed è unico purché

$$f_2(x_{sup}) < f_1(x_{sup}) \quad (1.26)$$

Poiché  $f_1(x_{sup}) = P_2^{(h_1/h_2)^u}$  e  $f_2(x_{sup}) = P_1$  il valore di  $\tilde{x}$  esiste ed è unico se  $P_1 < P_2$  ovvero se

$$\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} < u \quad (1.27)$$

Pertanto, condizione necessaria e sufficiente affinché una curva di equazione

$$P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2) = \exp\left[-\left(\frac{h}{w_\alpha}\right)^u\right] - \exp\left[-\left(\frac{h}{w_\beta}\right)^u\right] \quad (1.28)$$

con un valore di  $u$  fissato, passi per i due punti  $(X_1, Y_1)$  e  $(X_2, Y_2)$  assegnati è che la retta congiungente quei punti abbia pendenza minore di  $u$ .

Stimando i valori di  $w_\alpha$  e  $w_\beta$  per ogni settore di traversia, si possono individuare il settore di traversia principale e secondario. Il settore di traversia principale è quello che fra tutti i settori possiede il  $w_\alpha$  maggiore. Se accade che due settori abbiano lo stesso valore di  $w_\alpha$ , il settore di traversia principale è quello corrispondente al valore di  $w_\beta$  minore, mentre quello col  $w_\beta$  maggiore è il settore di traversia secondario. Il settore di traversia principale è quindi quello la cui curva direzionale si trova più vicina all'omnidirezionale.

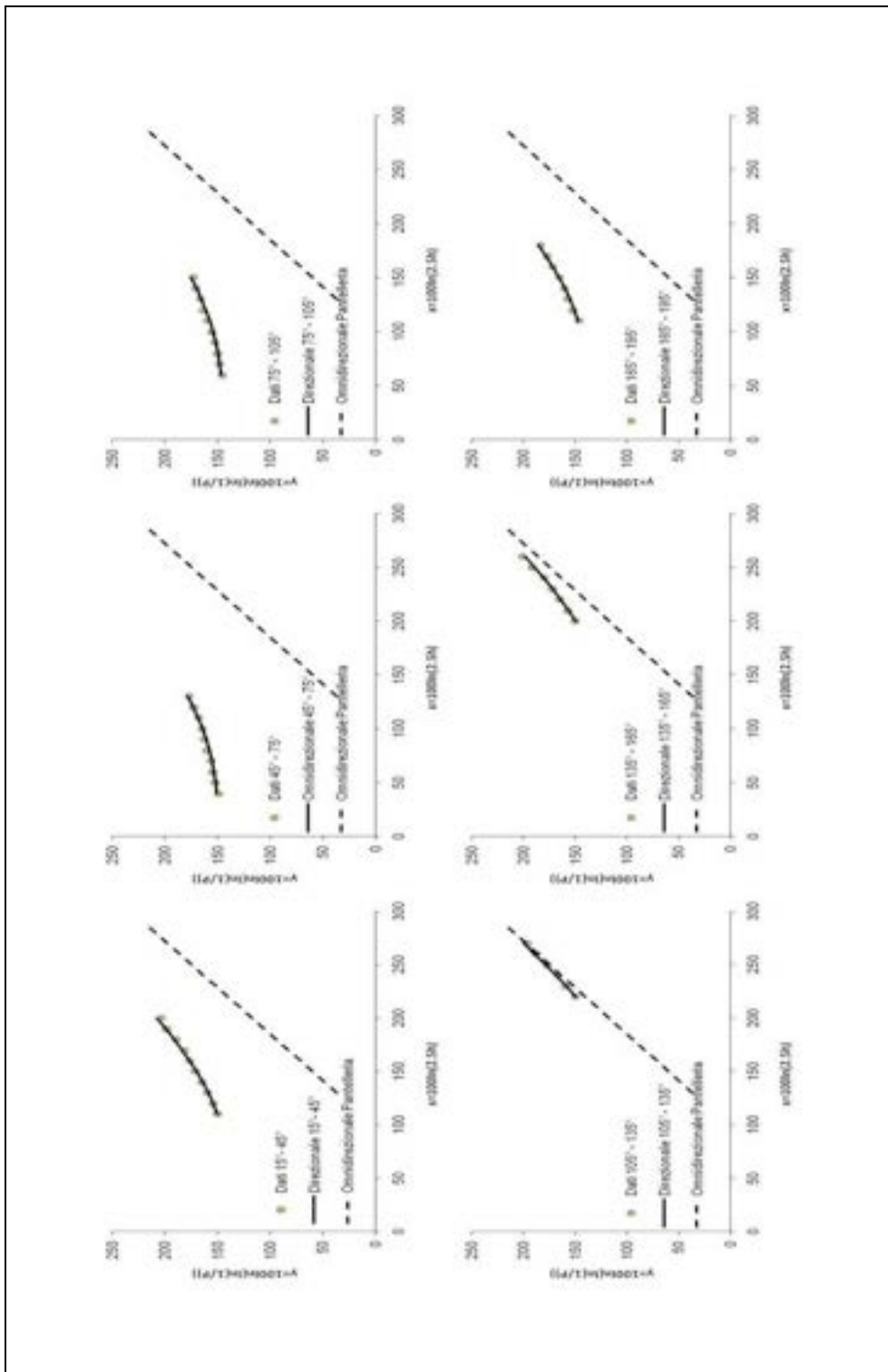


Figura 1.13 Probabilità di superamento direzionali: Pantelleria.

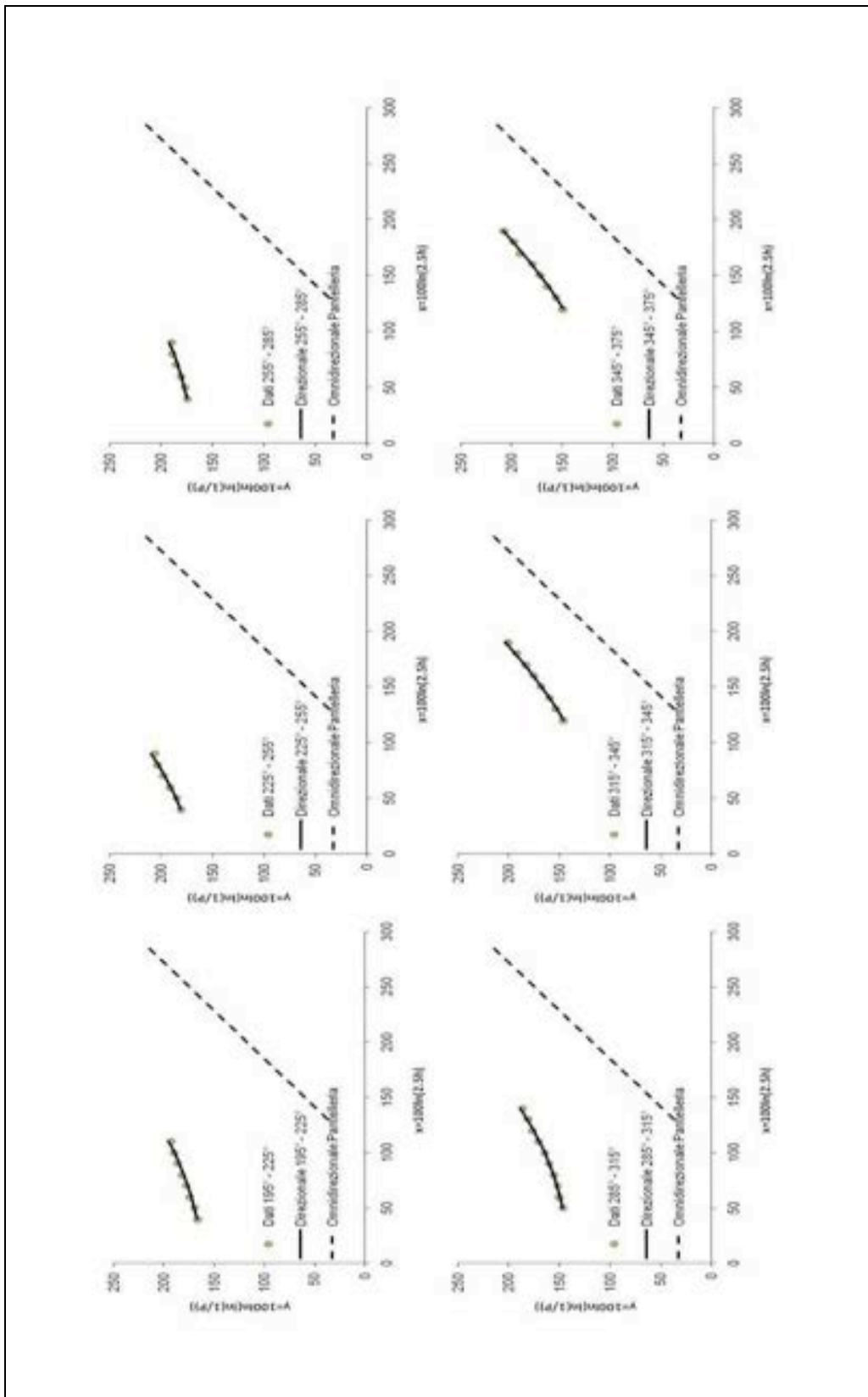


Figura 1.14 Probabilità di superamento direzionali: Pantelleria.

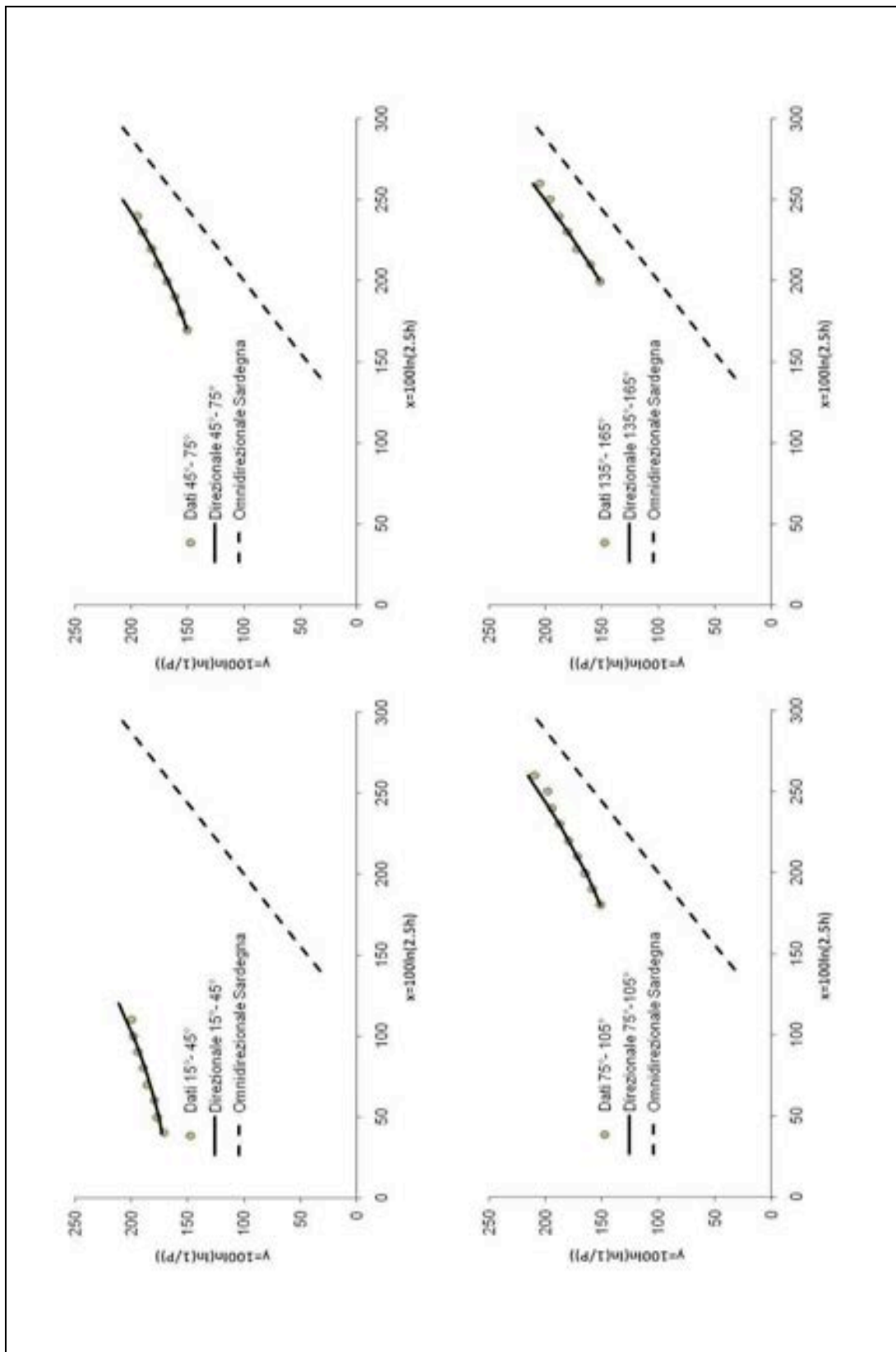
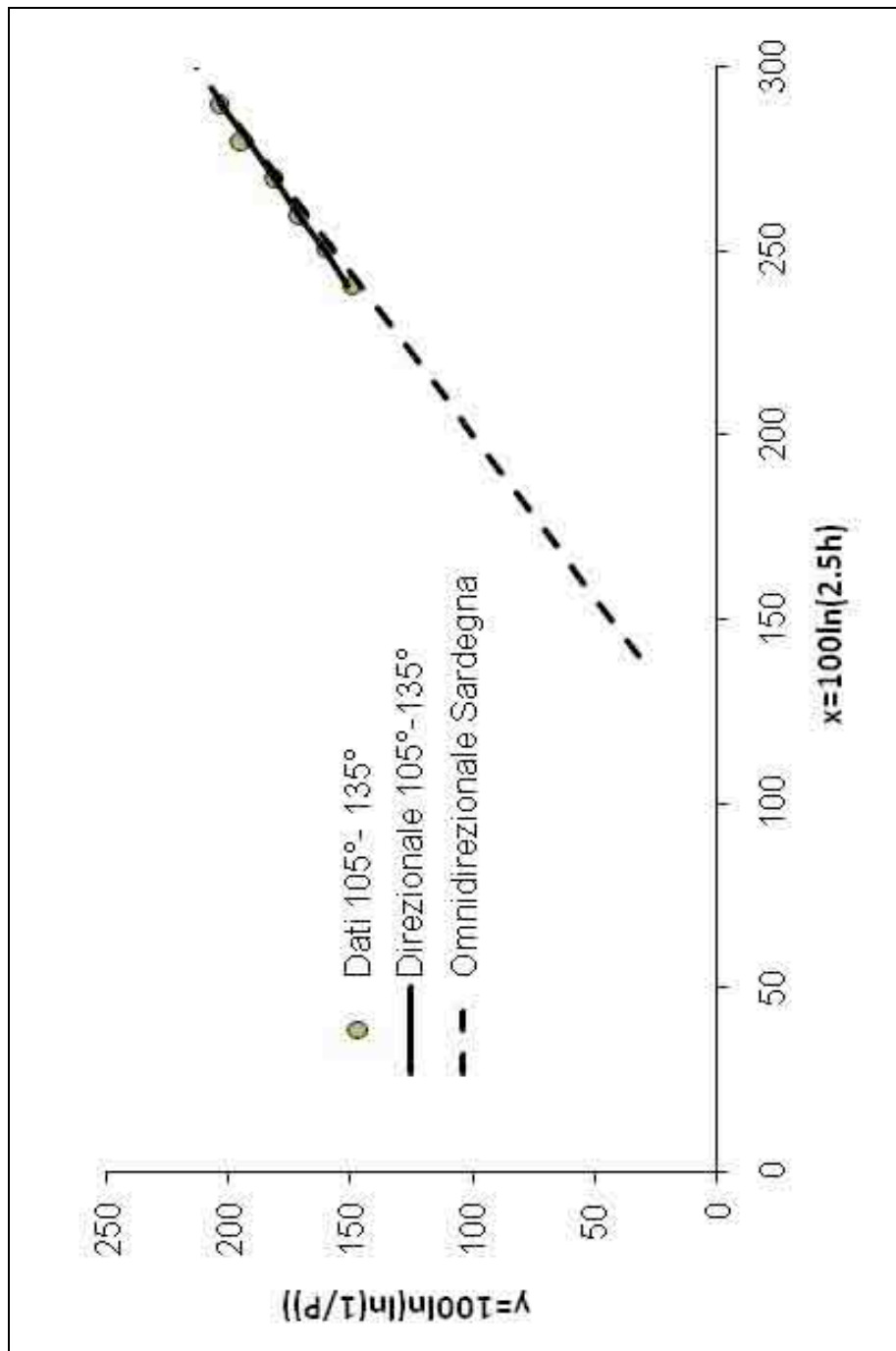


Figura 1.15 Probabilità di superamento direzionali: Sardegna.



**Figura 1.16** Probabilità di superamento direzionali: Sardegna, settore 105°-135°N.

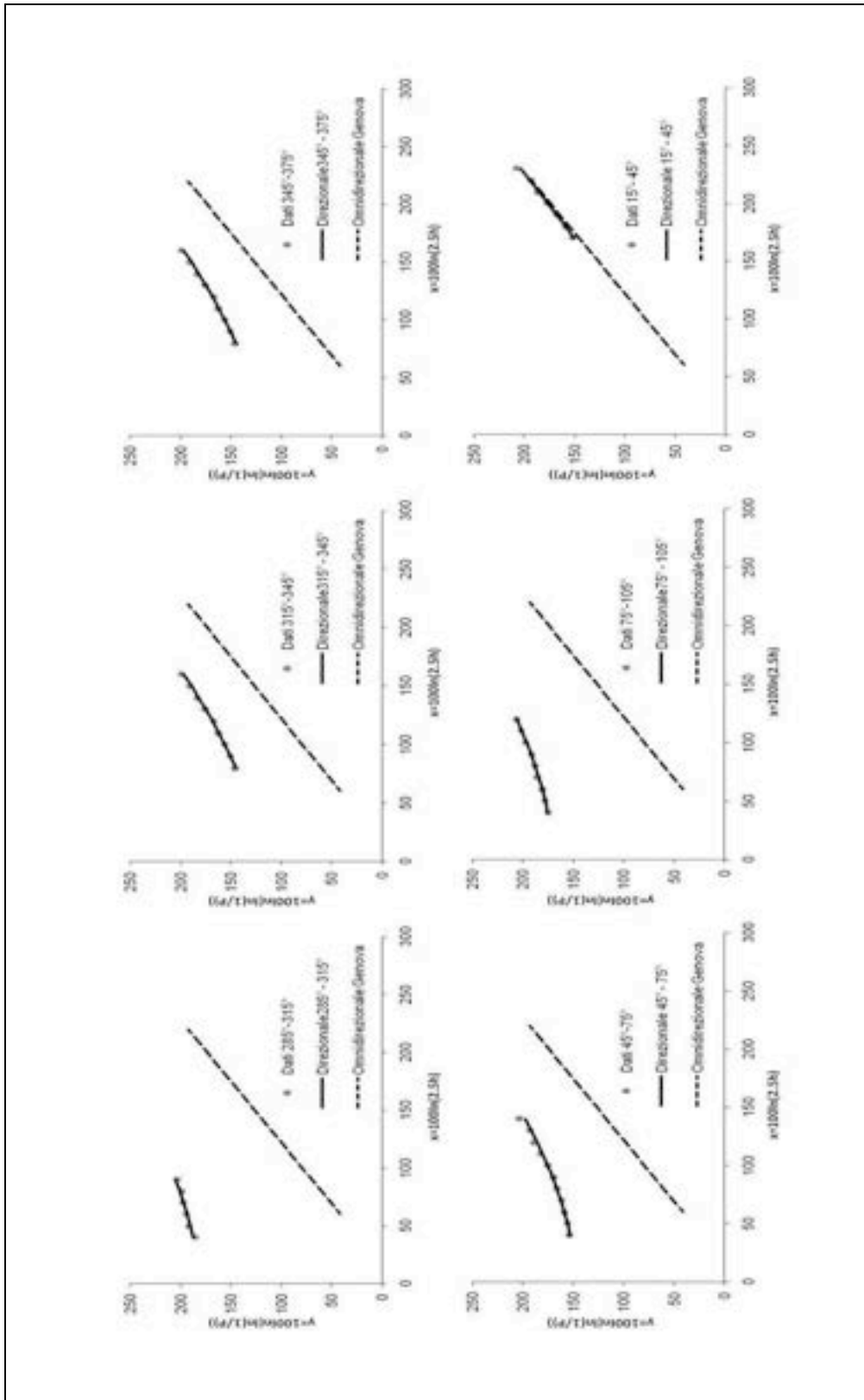


Figura 1.17 Probabilità di superamento direzionali: Genova.

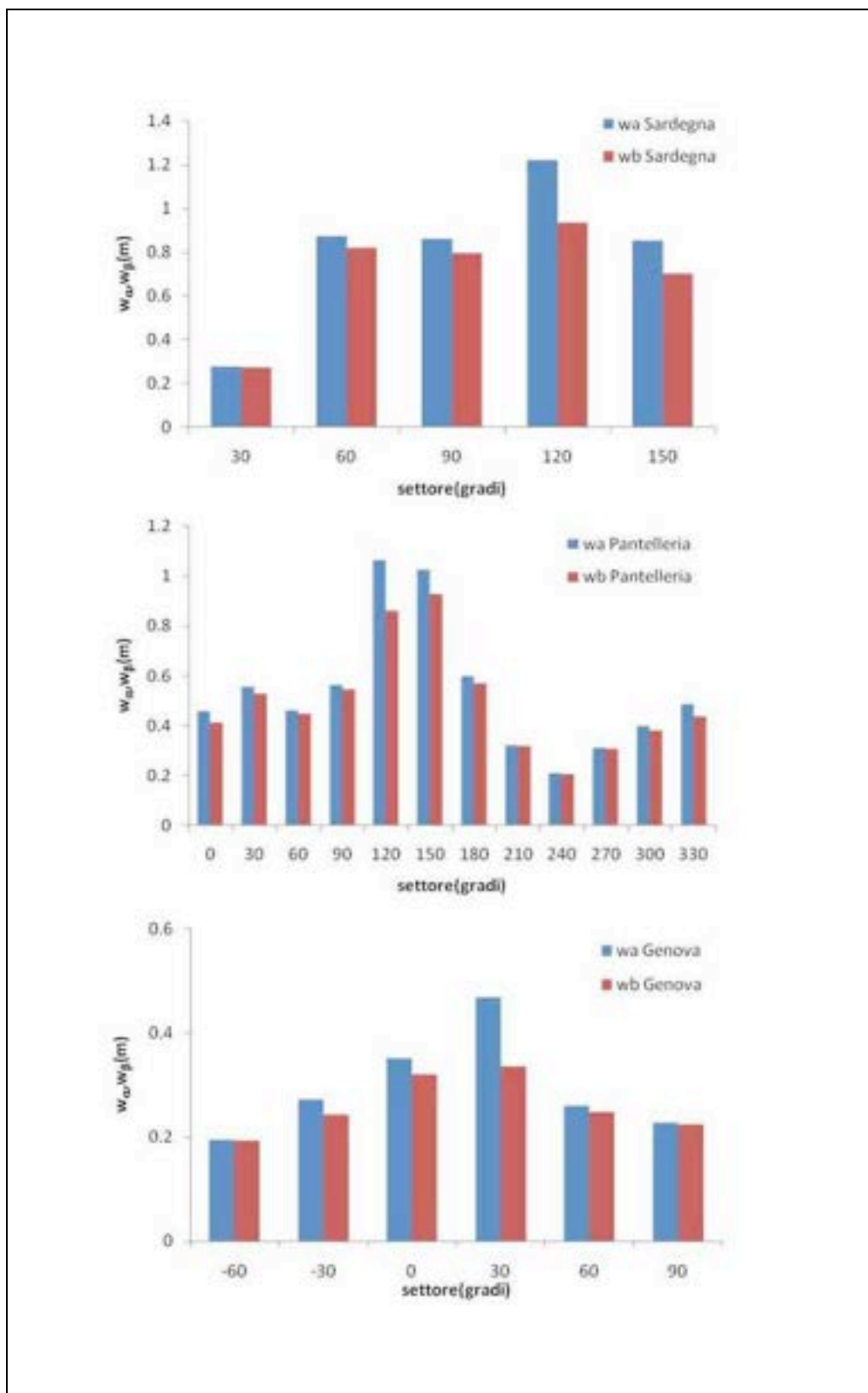


Figura 1.18 Parametri  $w_a$  e  $w_b$  della probabilità di superamento direzionali.

### 1.4.5 Periodo di ritorno omnidirezionale $R(H_s > h)$ (Boccotti 1986)

Il periodo di ritorno omnidirezionale  $R(H_s > h)$ , rappresenta il periodo di ritorno di una mareggiata in cui l'altezza significativa massima supera la soglia  $h$ , cioè l'intervallo di tempo medio tra due consecutivi triangoli con altezza maggiore di  $h$ . Tale periodo di ritorno è legato al numero di triangoli la cui altezza è maggiore di un'assegnata soglia  $h$  durante l'intervallo di tempo  $T$  molto grande,  $N(h, T)$ .  $R(H_s > h)$  sarà quindi pari a:

$$R(H_s > h) = \frac{T}{N(h, T)} = \frac{T}{N(T) \int_h^\infty p_A(a) da} \quad (1.29)$$

con

$p_A(a) \equiv$  densità di probabilità delle altezze dei triangoli

$$R(H_s > h) = \frac{1}{-\int_h^\infty \frac{a}{\bar{b}(a)} \frac{dp(H_s = a)}{da} da}$$

Tenuto conto che l'integrale a secondo membro converge molto rapidamente e che la funzione  $\bar{b}(a)$  varia invece molto gradualmente, si può assumere  $\bar{b}(a)$  costante nel campo di integrazione e quindi assumere

$$\bar{b}(a) = \bar{b}(h)$$

L'espressione di  $R(H_s > h)$  diventa:

$$R(H_s > h) = \frac{\bar{b}(h)}{-\int_h^\infty a \frac{dp(H_s = a)}{da} da}$$

da cui risolvendo l'integrale per parti e tenendo conto che

$$P(H_s = h) = -\frac{dP(H_s > H)}{dh}$$

$$\lim_{a \rightarrow \infty} ap(H_s=a) = 0$$

ne consegue che

$$R(H_s > h) = \frac{\bar{b}(h)}{hp(H_s=h) + P(H_s > h)} = \frac{\bar{b}(h)}{1 + u\left(\frac{h}{w}\right)^u} \exp\left(\frac{h}{w}\right)^u \quad (1.30)$$

#### 1.4.6 La persistenza media al di sopra di una fissata soglia

La persistenza media al di sopra della soglia  $\bar{D}(h)$  rappresenta la durata di tempo media in cui  $H_s$  si mantiene al di sopra della soglia  $h$ , nelle mareggiate dove tale soglia viene superata. La sua espressione è:

$$\bar{D}(h) = P(H_s > h) \cdot R(H_s > h)$$

Si ottiene facendo il rapporto tra:

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

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

Utilizzando le espressioni (1.14) della probabilità omnidirezionale e (1.30) del periodo di ritorno omnidirezionale, si ha:

$$\bar{D}(h) = \frac{b(h)}{1 + u\left(\frac{h}{w}\right)^u} \quad (1.31)$$

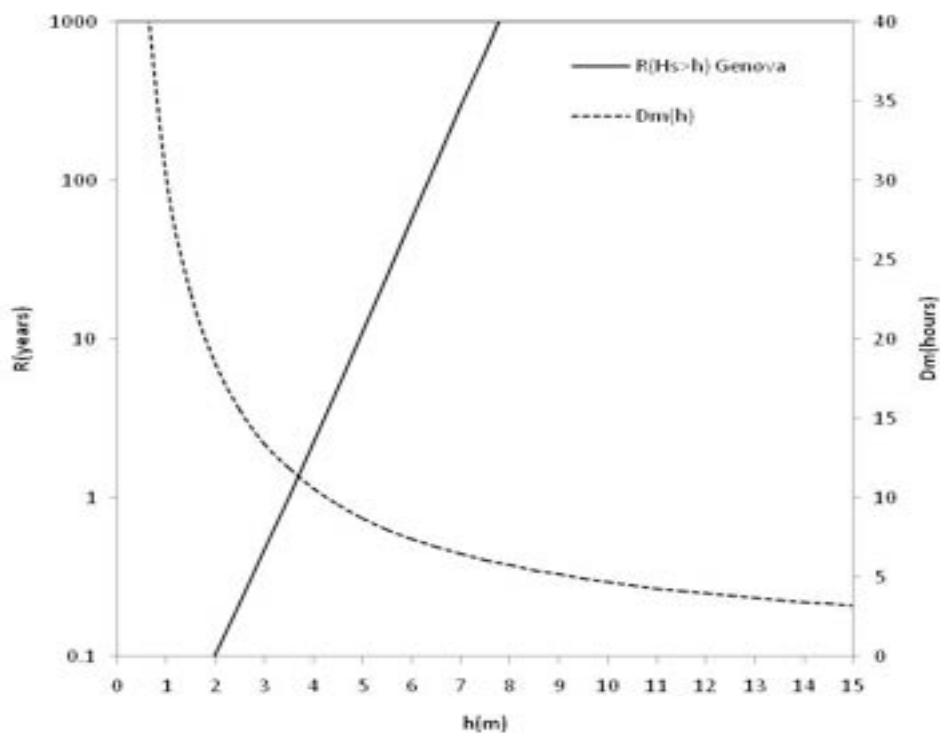


Figura 1.19 Periodo di ritorno omnidirezionale e persistenza: Genova.

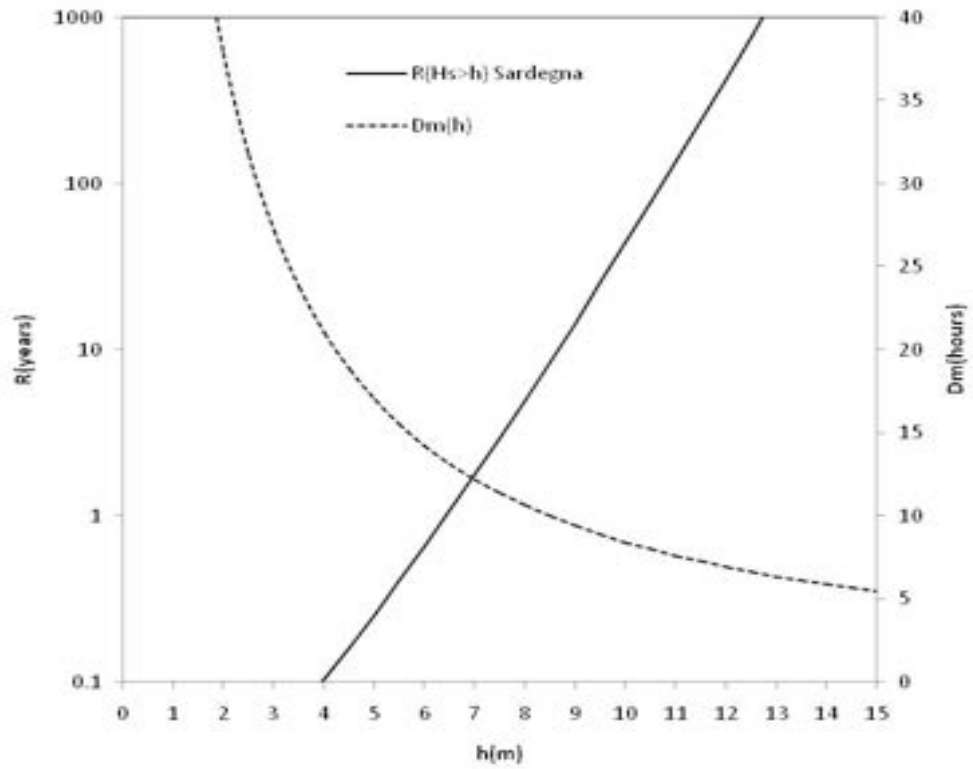


Figura 1.20 Periodo di ritorno omnidirezionale e persistenza: Sardegna.

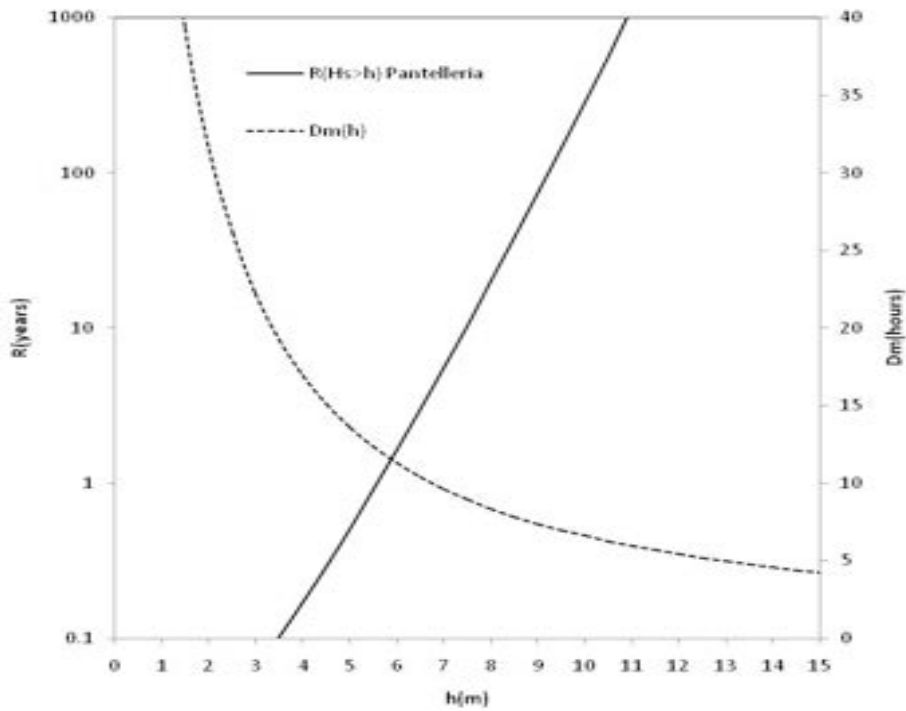
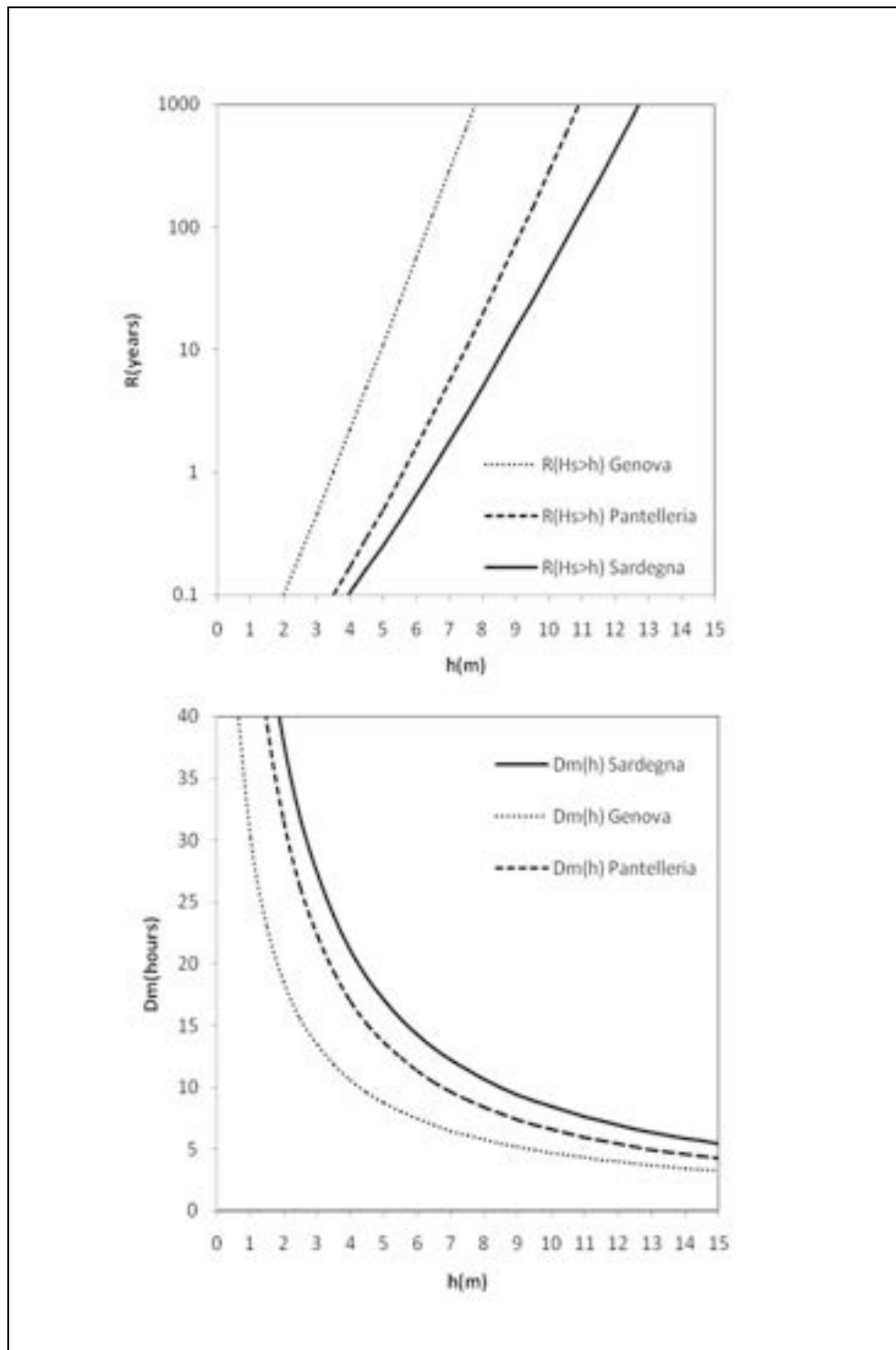


Figura 1.21 Periodo di ritorno omnidirezionale e persistenza: Pantelleria.



**Figura 1.22** Confronto tra i periodi di ritorno omnidirezionali e le persistenze: Sardegna, Pantelleria e Genova.

### 1.4.7 Periodo di ritorno direzionale $R(H_s > h; \Delta\theta)$

Il periodo di ritorno direzionale  $R(H_s > h; \Delta\theta)$  è il periodo di ritorno di una mareggiata in cui l'altezza significativa massima supera la soglia  $h$ , e la direzione di propagazione del moto ondoso si mantiene entro un assegnato settore  $\Delta\theta$ . Si ottiene come rapporto tra l'intervallo di tempo  $T$  di riferimento, e il numero di triangoli che in tale intervallo hanno altezza maggiore dell'assegnata soglia  $h$  e direzione di propagazione che si mantiene entro un prefissato settore  $\Delta\theta$ :

$$R(H_s > h; \Delta\theta) = \frac{T}{N(T, h, \Delta\theta)}$$

con

$$N(T, h, \Delta\theta) = N(T) \int_h^\infty \frac{T}{N(T)} \frac{a}{\bar{b}(a, \Delta\theta)} \frac{dp(H_s = h)}{dh} da$$

Allora possiamo scrivere

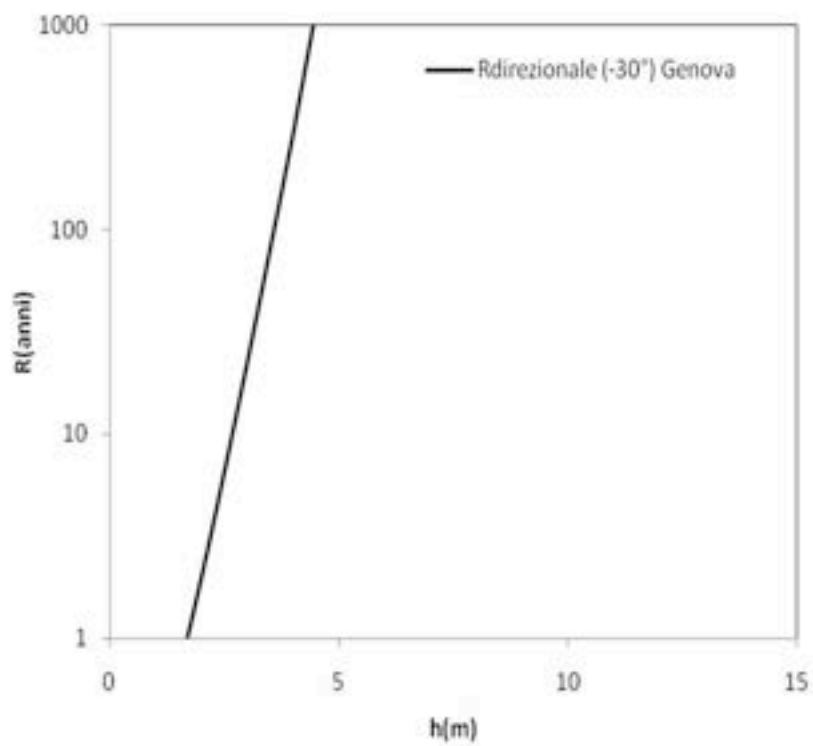
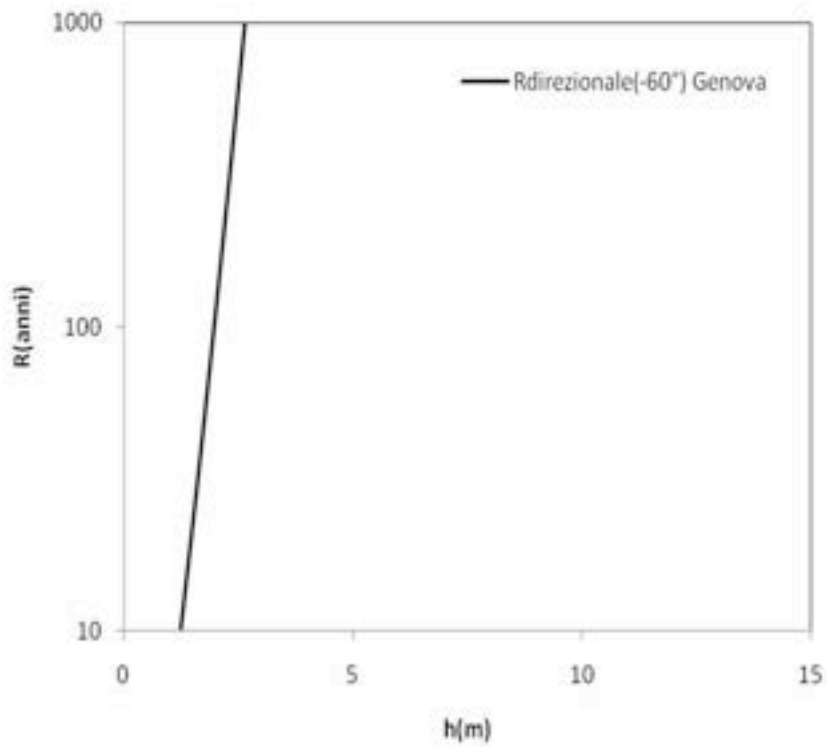
$$R(H_s > h; \Delta\theta) = - \left[ \int_h^\infty \frac{a}{\bar{b}(a, \Delta\theta)} \frac{dp(H_s = h, \Delta\theta)}{dh} da \right]^{-1}$$

e risolvendo per parti si ottiene

$$R(H_s > h; \Delta\theta) = \frac{\bar{b}(a, \Delta\theta)}{p(H_s = h, \Delta\theta)h + P(H_s > h; \Delta\theta)}$$

da cui segue

$$R(H_s > h; \Delta\theta) = \frac{b_{10} \left( 1,12 - 0,12 \frac{h}{a_{10}} \right)}{\exp \left[ - \left( \frac{h}{w_\alpha} \right)^u \right] \left[ 1 + u \left( \frac{h}{w_\alpha} \right)^u \right] - \exp \left[ - \left( \frac{h}{w_\beta} \right)^u \right] \left[ 1 + u \left( \frac{h}{w_\beta} \right)^u \right]} \quad (1.32)$$



**Figura 1.23a** Periodo di ritorno direzionale (-60 e -30°N): Genova.

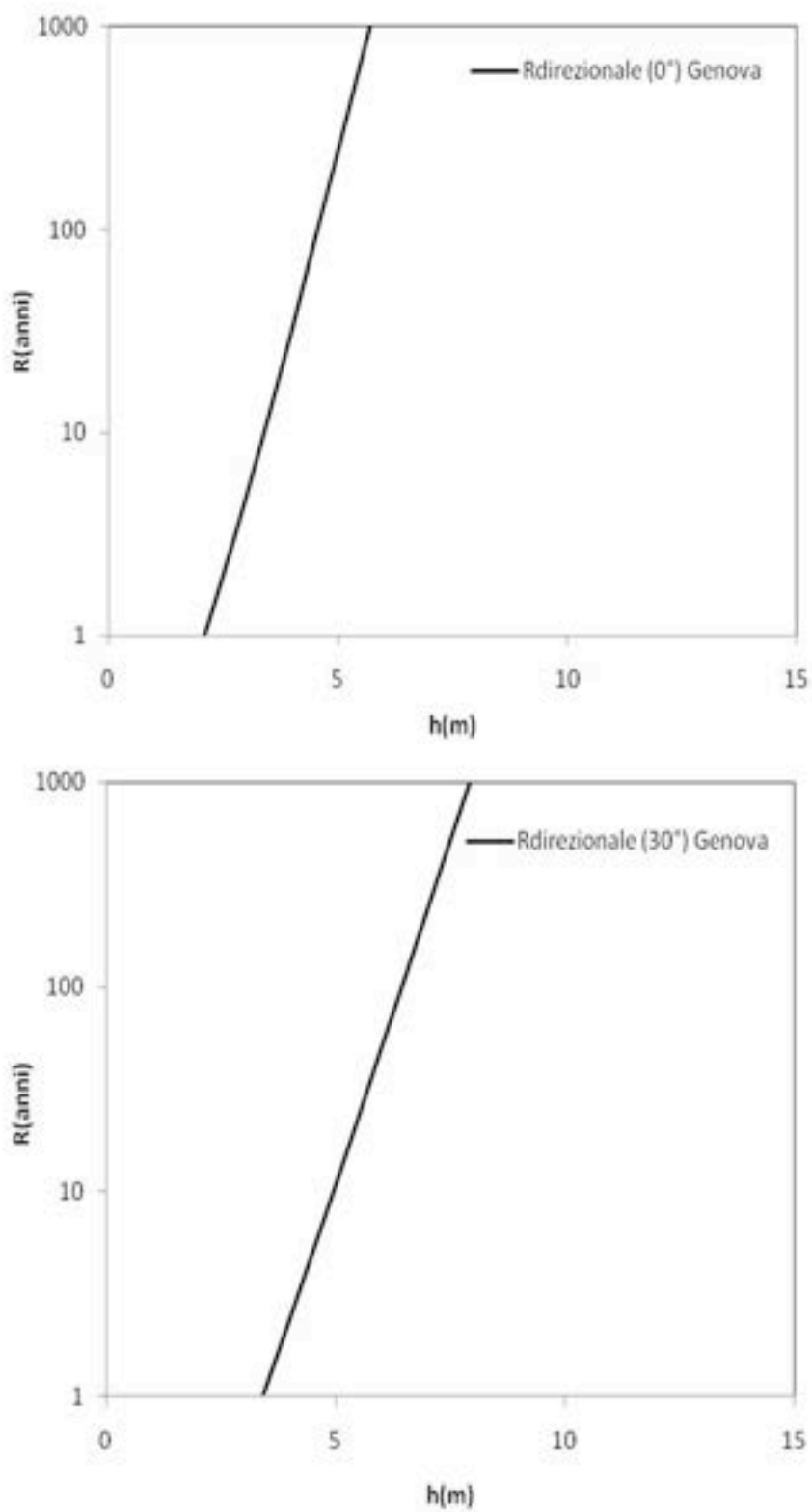
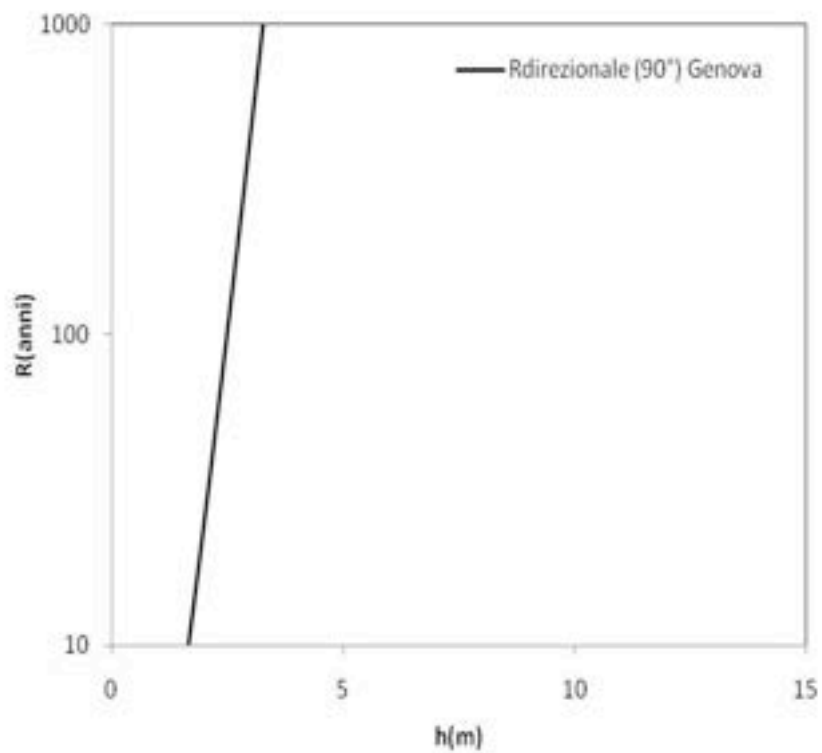
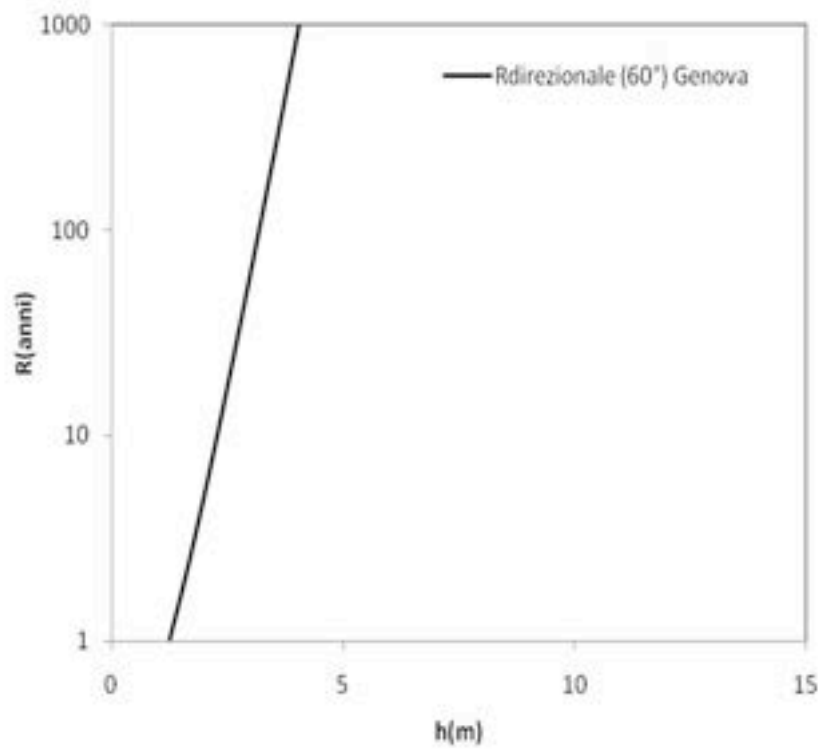


Figura 1.23b Periodo di ritorno direzionale ( $0^\circ$  e  $30^\circ$ N): Genova.



**Figura 1.23c** Periodo di ritorno direzionale (60 e 90°N): Genova.

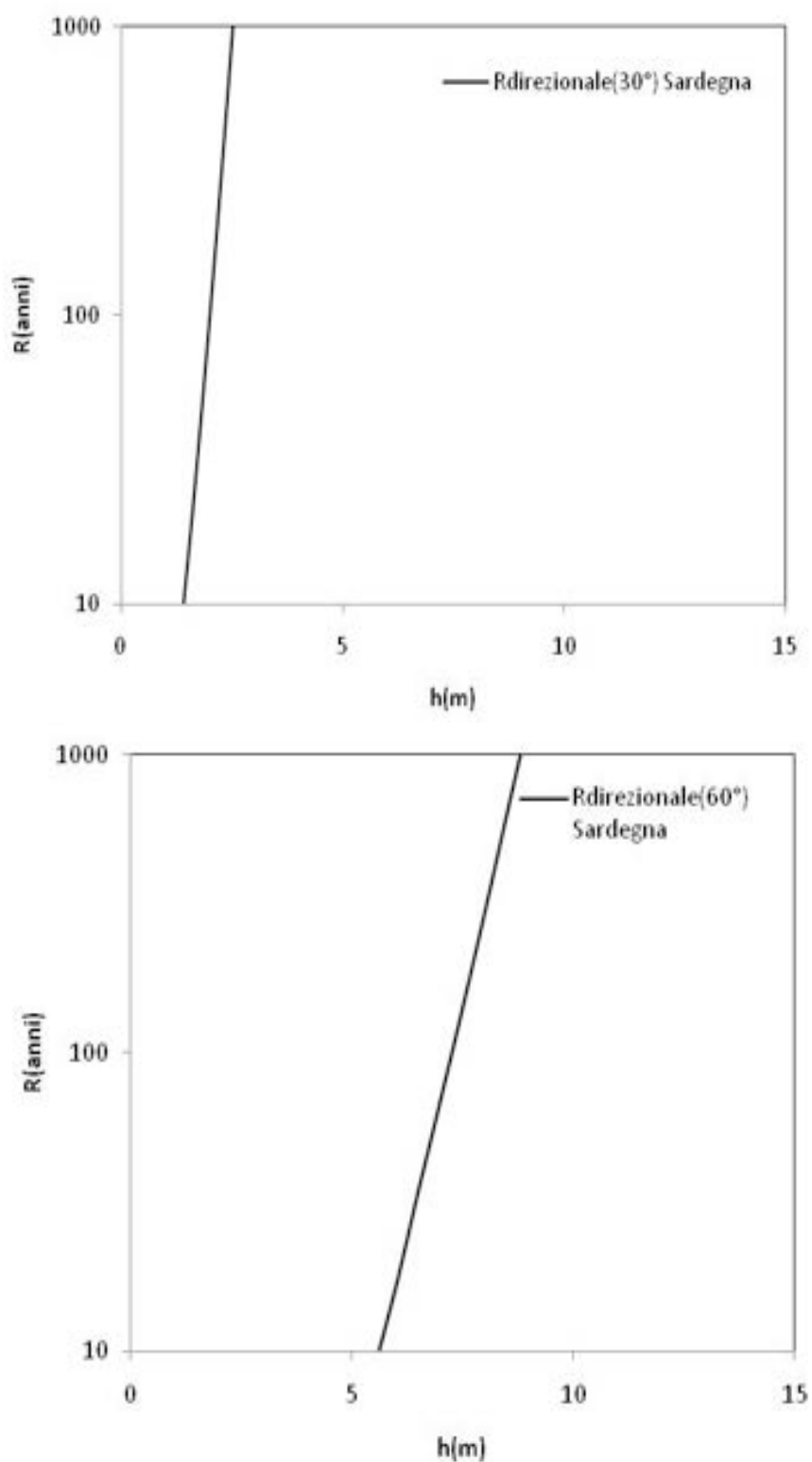
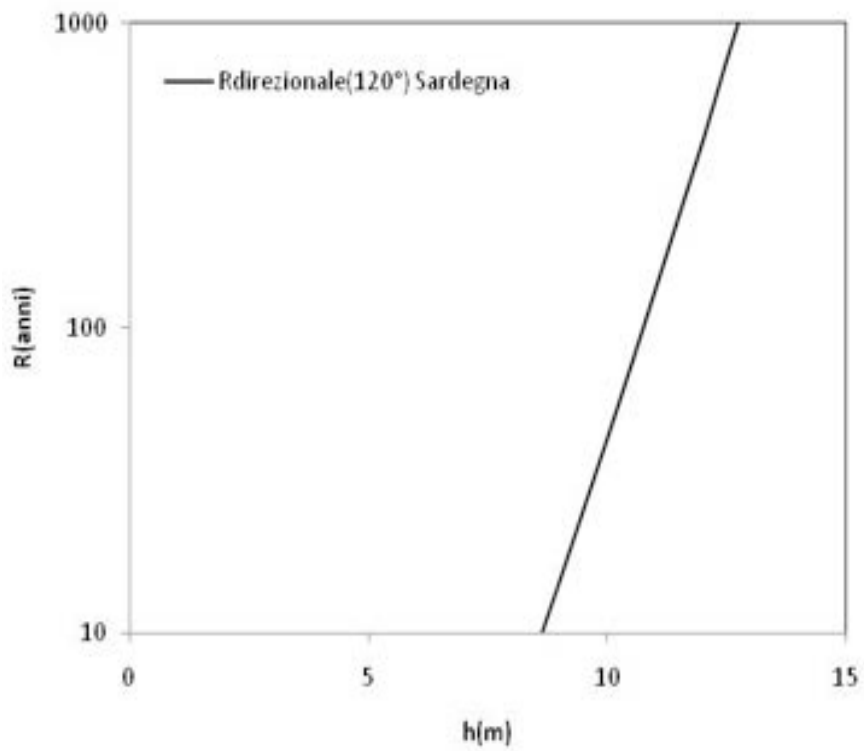
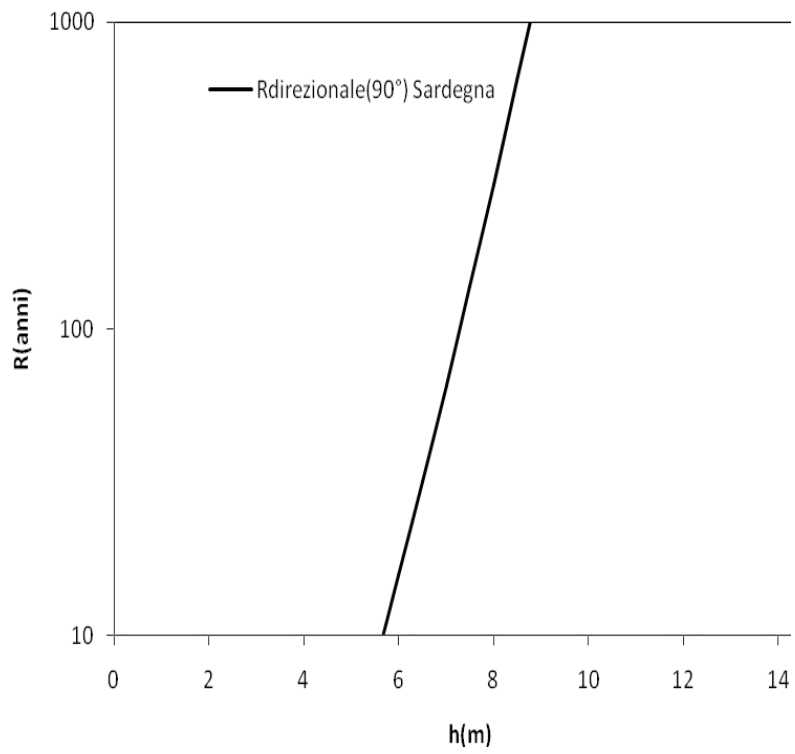


Figura 1.24a Periodo di ritorno direzionale (30 e 60°N): Sardegna.



**Figura 1.24b** Periodo di ritorno direzionale (90 e 120°N): Sardegnna.

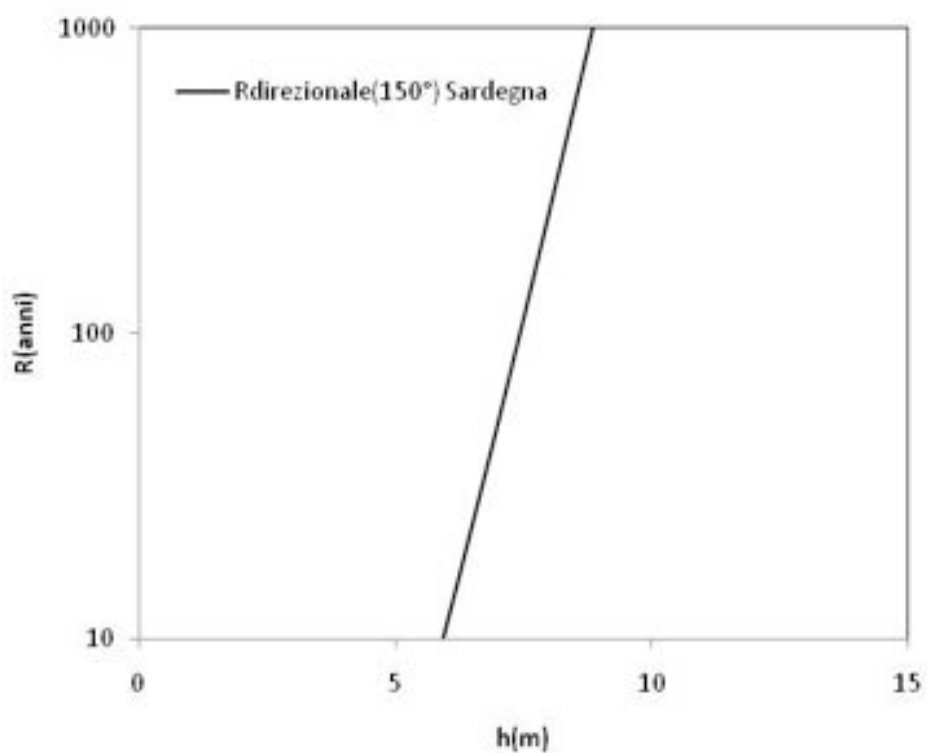


Figura 1.24c Periodo di ritorno direzionale (150°N): Sardegn.

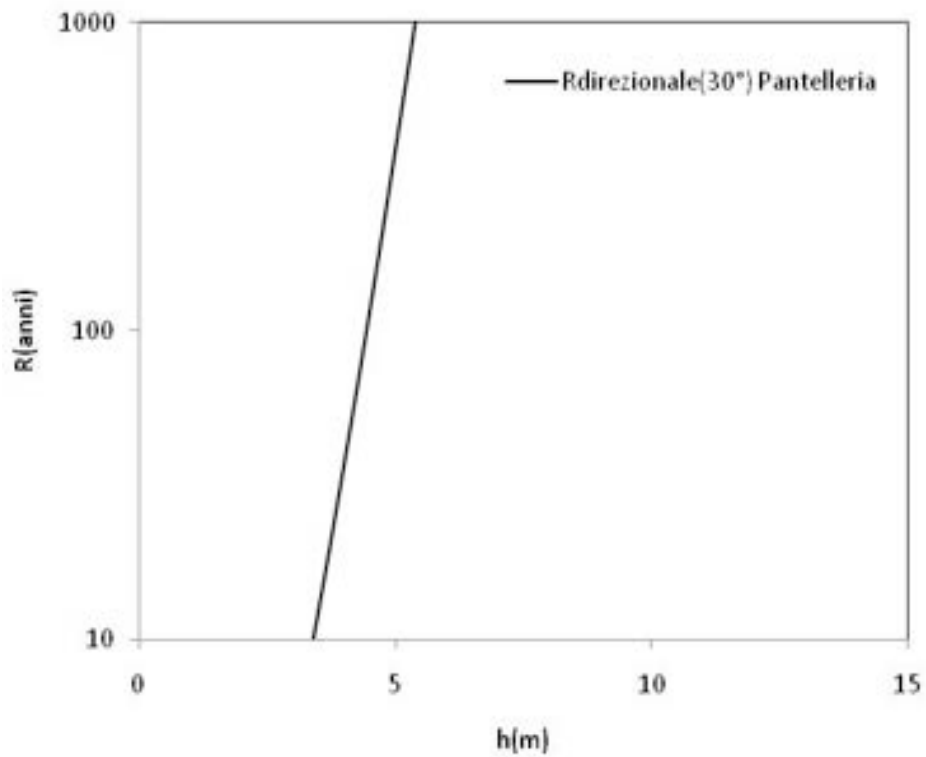
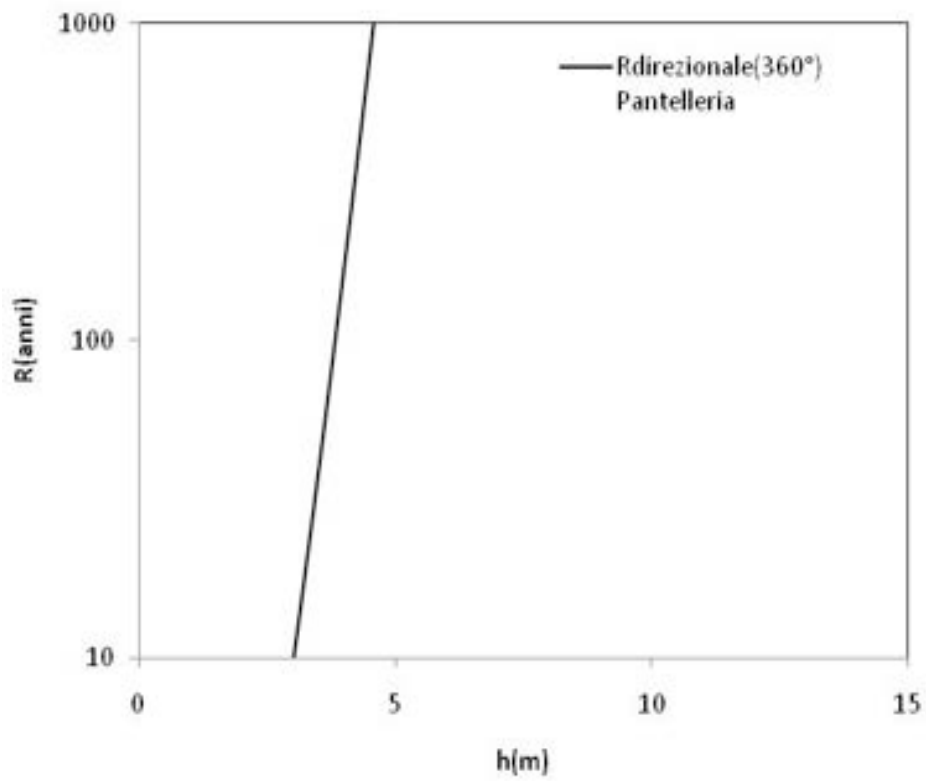


Figura 1.25a Periodo di ritorno direzionale (360 e 30°N): Pantelleria.

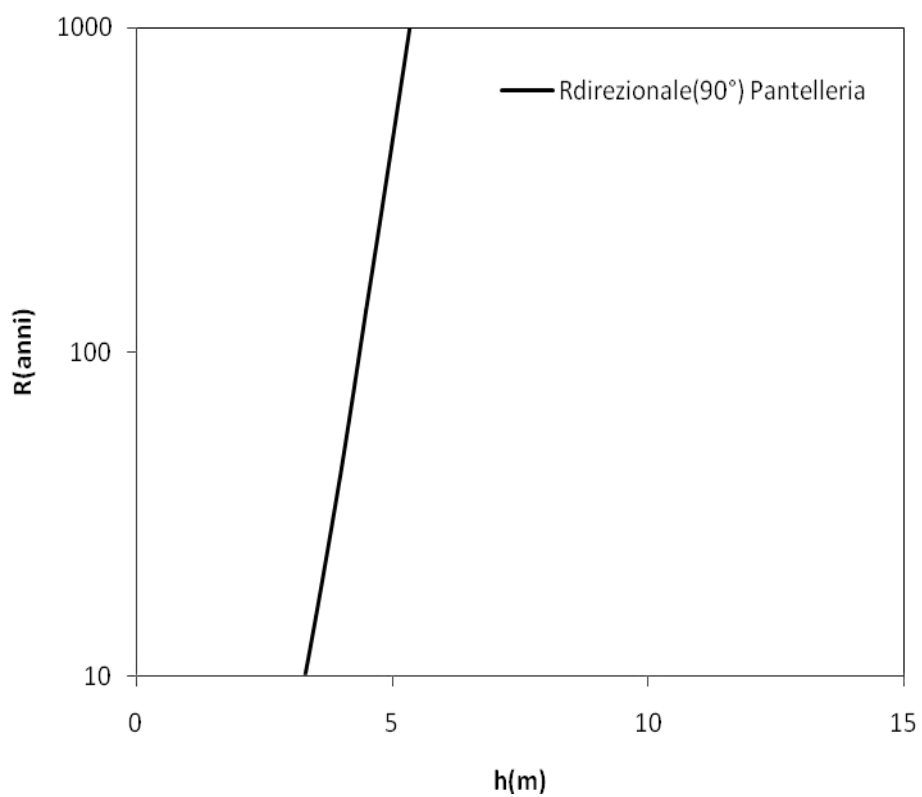
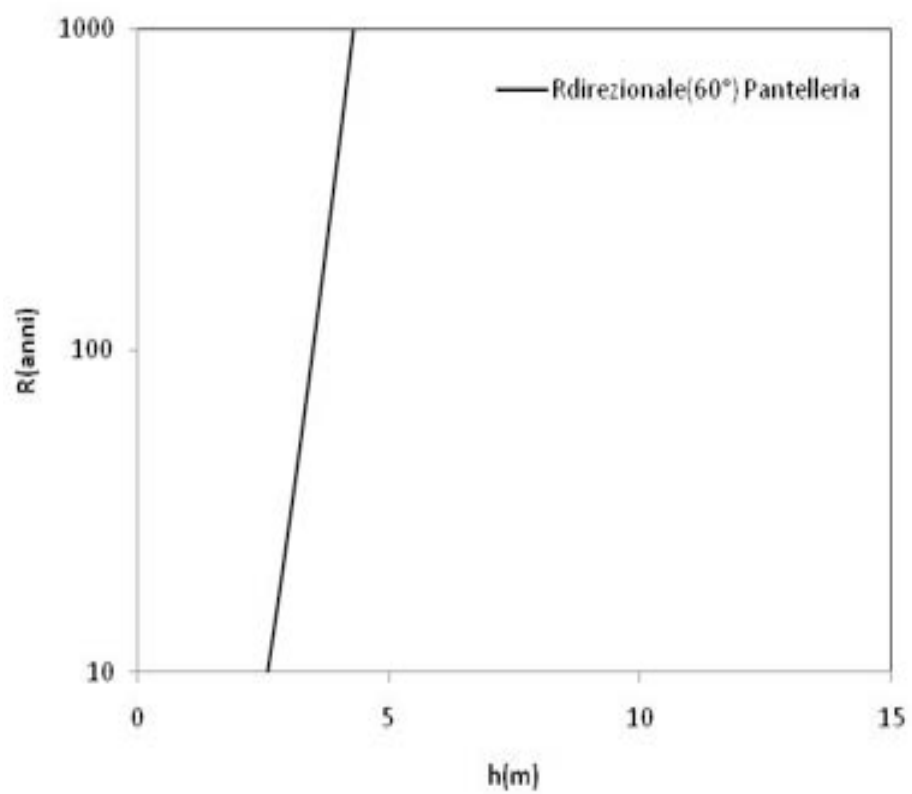


Figura 1.25b Periodo di ritorno direzionale (60 e 90°N): Pantelleria.

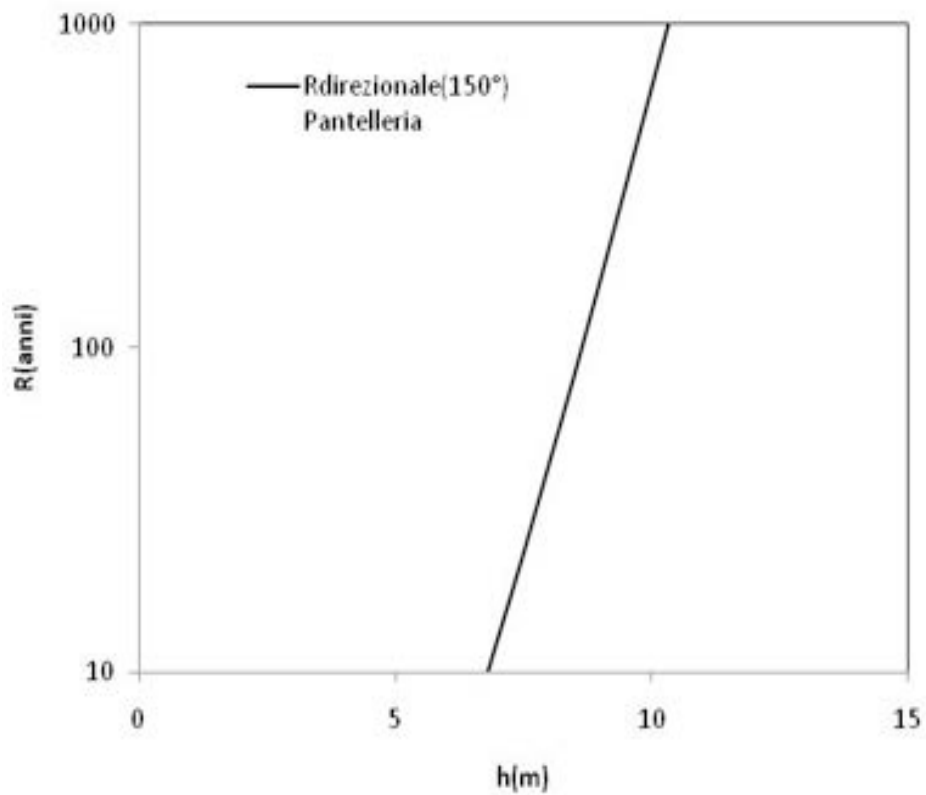
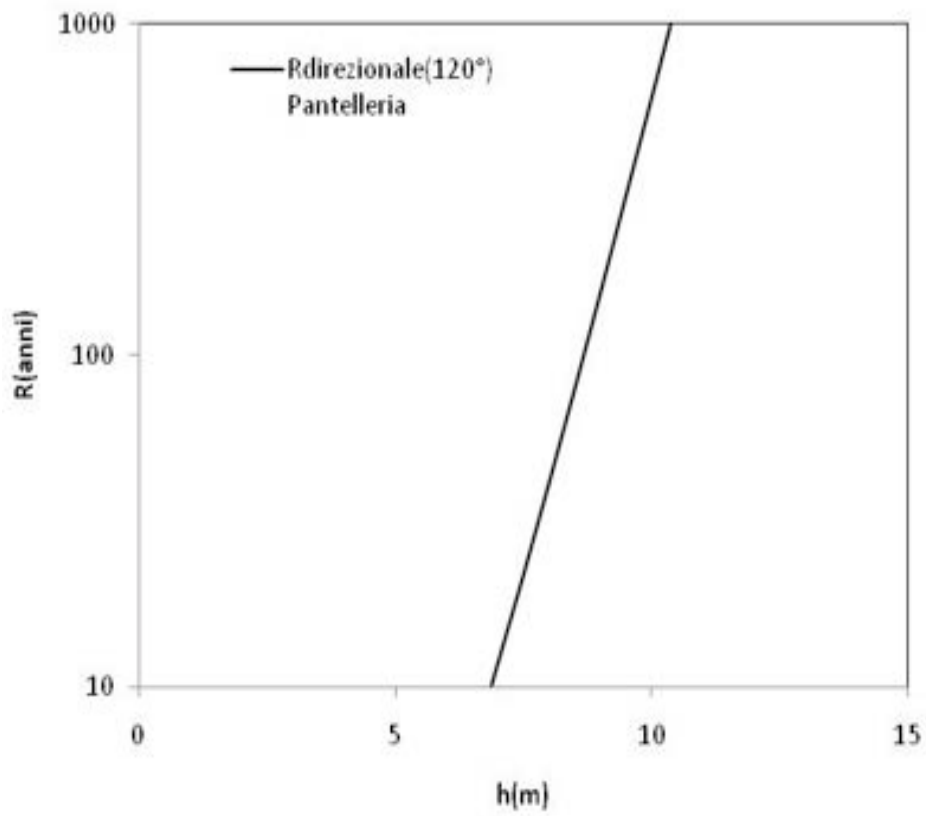


Figura 1.25c Periodo di ritorno direzionale (120 e 150°N): Pantelleria.

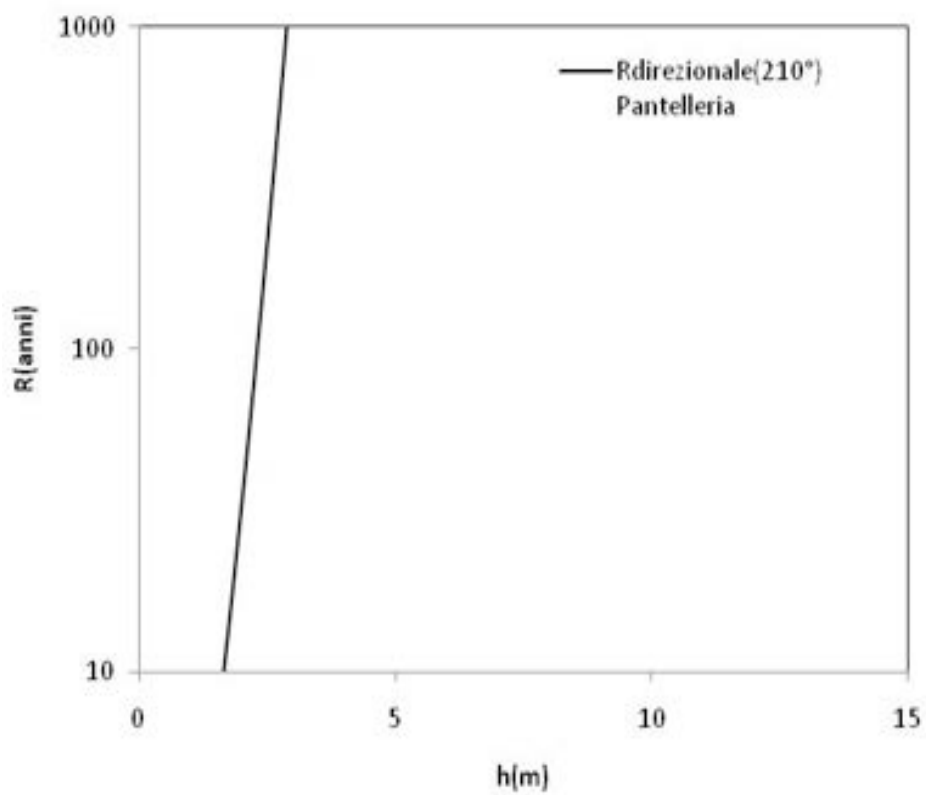
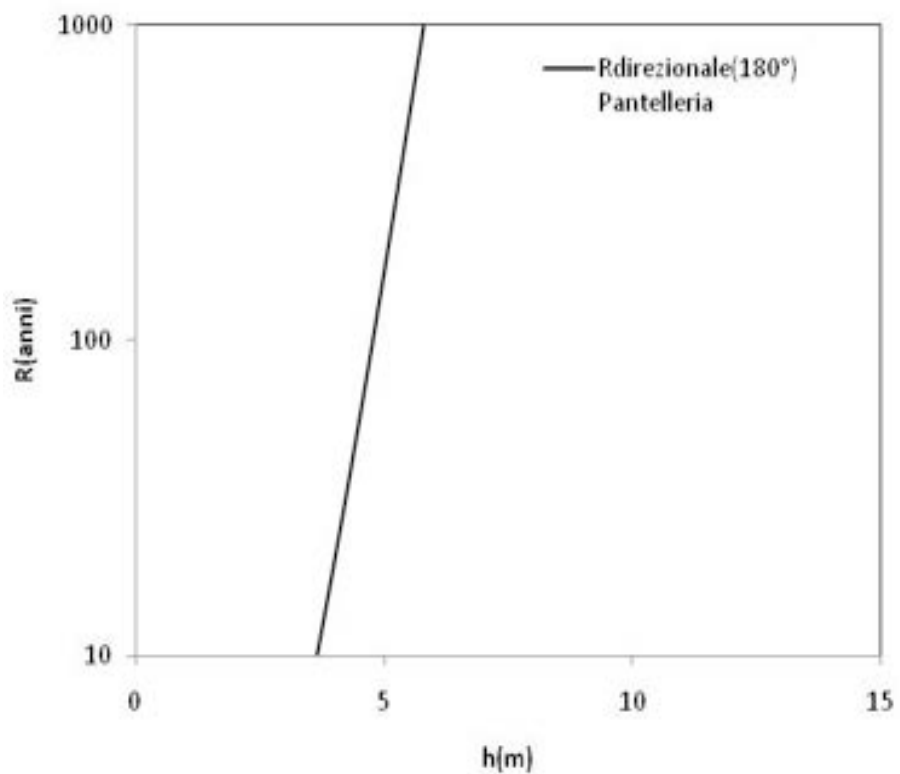


Figura 1.25d Periodo di ritorno direzionale (180 e 210°N): Pantelleria.

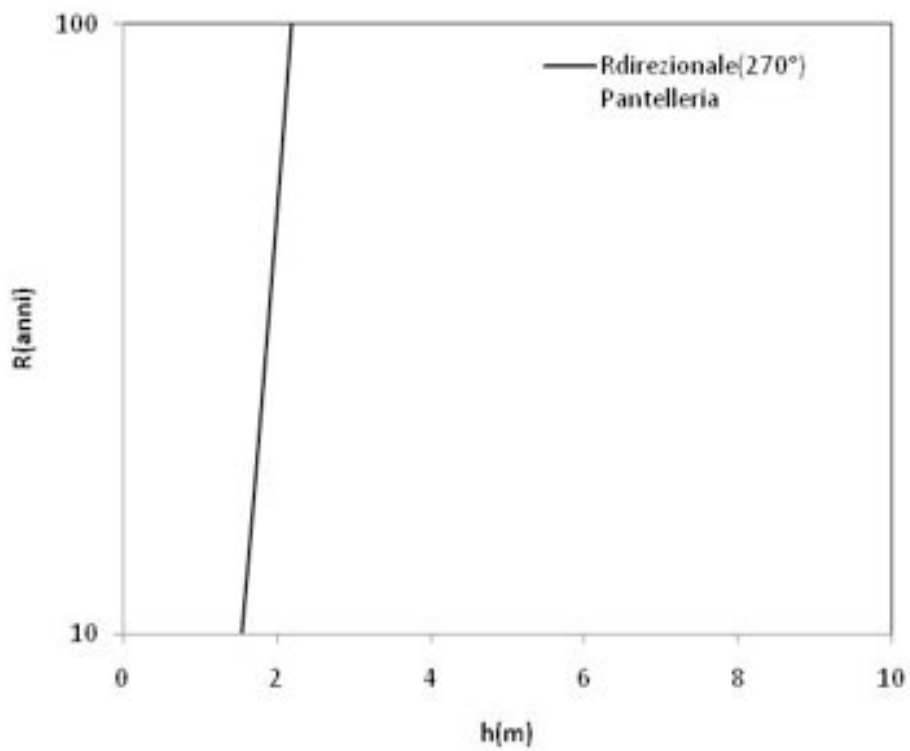
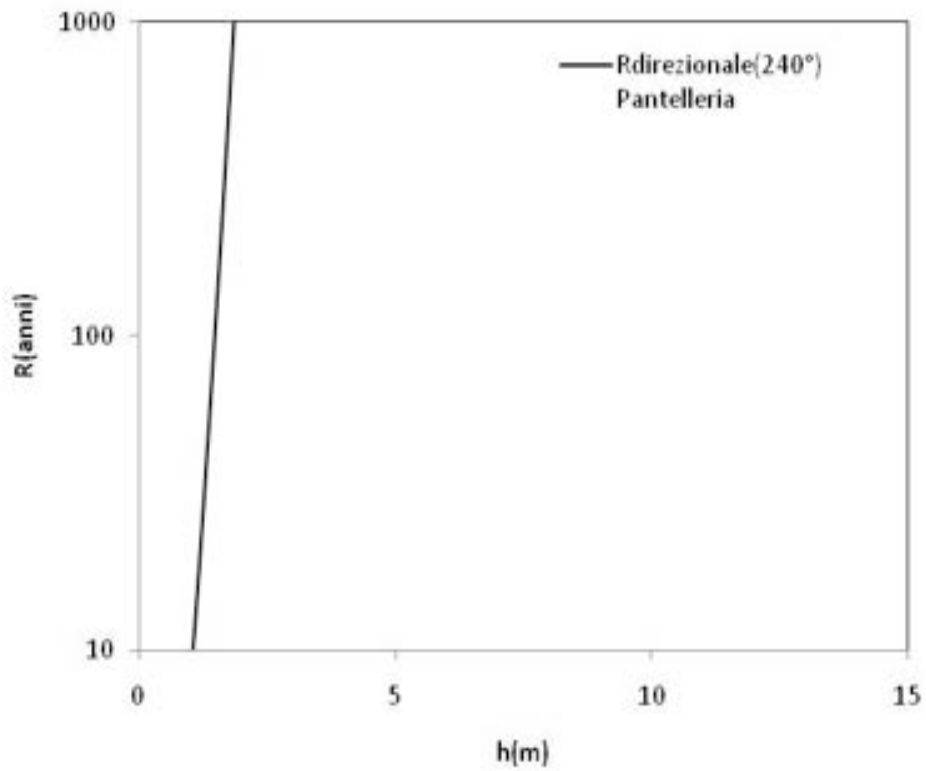


Figura 1.25e Periodo di ritorno direzionale (240 e 270°N): Pantelleria.

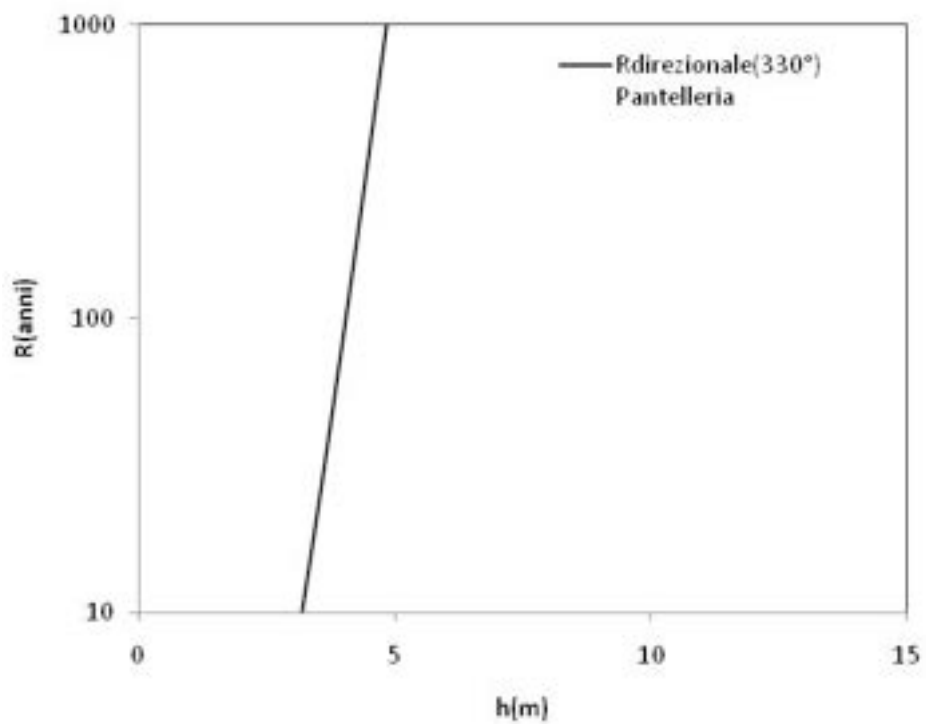


Figura 1.25f Periodo di ritorno direzionale (330°N): Pantelleria..

## 2. PROPAGAZIONE SOTTO COSTA DEI DATI DI MOTO ONDOSO NELLE AREE CAMPIONE E STIMA DELL'ENERGIA ONDOSA

### 2.1 Propagazione del moto ondosso sottocosta

I dati di moto ondosso forniti dal modello dell'ENEA, o derivati sulla base di essi, sono attendibili fino a profondità elevate, dove il moto ondosso non risulta essere influenzato dal fondo. I principali fenomeni che bisogna prendere in considerazione per la stima della propagazione delle onde sottocosta, in zone poco ridossate, sono la rifrazione, l'irripidimento (shoaling) ed il frangimento. Nel presente studio inoltre le profondità di estrazione dei dati sono sempre maggiori di 15 m (profondità intermedia) e dunque è possibile escludere anche l'effetto del frangimento sulla propagazione delle onde.

Lo studio della trasformazione del moto ondosso verso la costa è stato eseguito mediante l'utilizzo del codice di calcolo MIKE 21 SW, modello d'onda a griglia flessibile (Flexible Mesh). Tale modello simula la crescita, il decadimento e la trasformazione di onde generate dal vento e di onde lunghe (swell) sia al largo che sottocosta. In particolare, è stata utilizzata la formulazione parametrica disaccoppiata, che è basata su una parametrizzazione della equazione di conservazione della azione ondosso. La parametrizzazione è eseguita nel dominio delle frequenze mediante l'introduzione dei momenti di ordine zero e uno dello spettro delle onde come variabili dipendenti, come proposto da Holthuijsen et al. (1989).

Il modello adottato include i principali fenomeni interessati nella propagazione delle onde, ovvero: i) interazione non lineare tra le onde; ii) dissipazione dovuta al frangimento al largo di tipo "white capping"; iii) dissipazione dovuta alla scabrezza del fondo; iv) dissipazione dovuta al frangimento indotto dalla profondità; v) rifrazione e irripidimento causati dalle variazioni di profondità; vi) interazione onde-correnti. La discretizzazione della equazione di base del modello nel dominio geografico ed in quello spettrale è eseguita mediante il metodo dei volumi finiti, centrato nelle celle. Nel dominio geografico è usata una tecnica a maglia non strutturata.

Le griglie di calcolo utilizzate nelle tre aree campione sono mostrate dalla Figura 2.1 alla Figura 2.3, nelle quali vengono riportate le batimetrie di input dei tre modelli con la rappresentazione degli elementi triangolari tipici della "Flexible Mesh". Come si può osservare, la risoluzione delle maglie è stata notevolmente incrementata nelle zone di maggior interesse: quelle antistanti le tre aree campione, mostrate nel dettaglio dalla Figura 2.4 alla Figura 2.6.

Per tutti e tre i modelli sono state utilizzate delle griglie molto ampie, comprendenti anche i tratti di costa al di fuori della area campione in modo da consentire la propagazione di onde dall'intero settore di traversia considerato per ciascun sito di interesse. Le informazioni relative alla linea di costa e alle quote di fondo sono state ricavate dalle carte nautiche fornite dall'Istituto Geografico Militare.

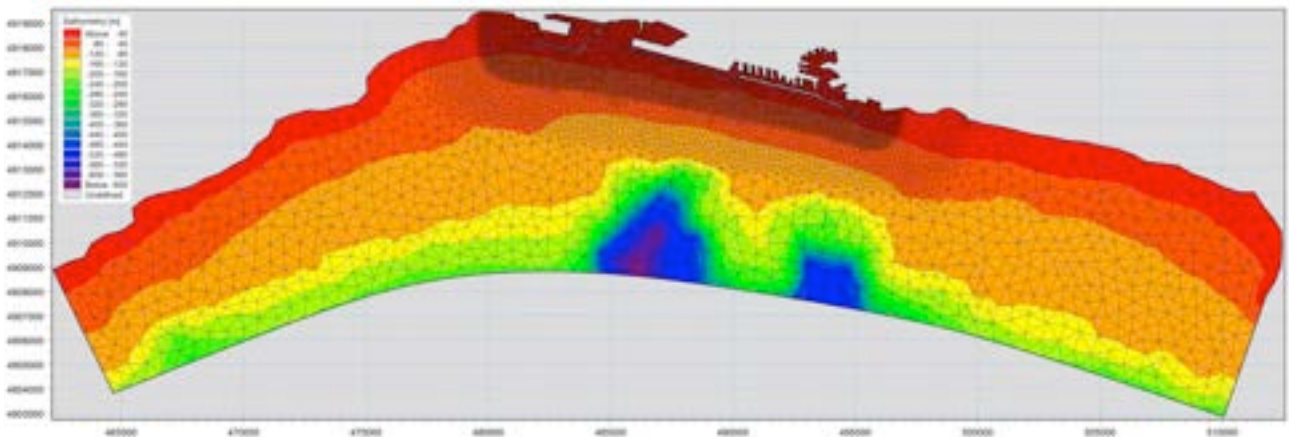


Figura 2.1 Rappresentazione della batimetria utilizzata per il modello di trasformazione dell'onda nell'area campione di Genova.

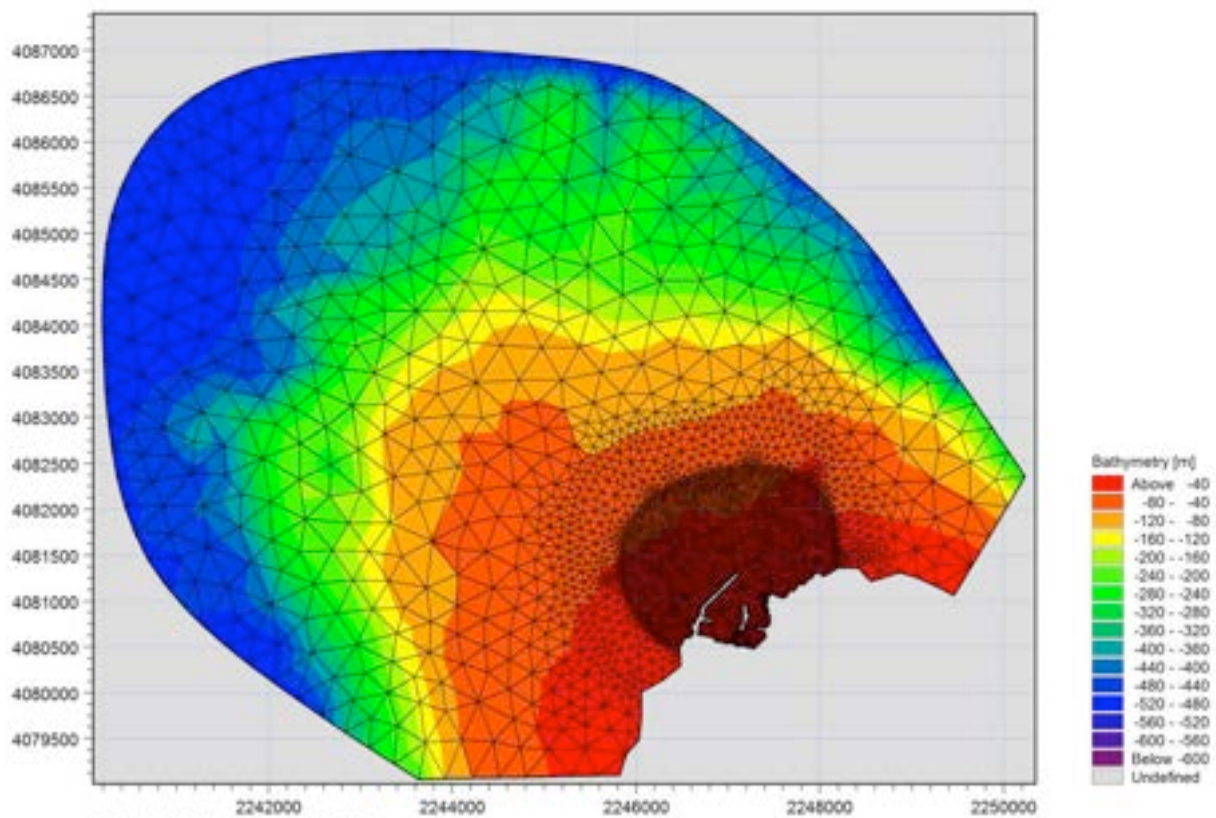
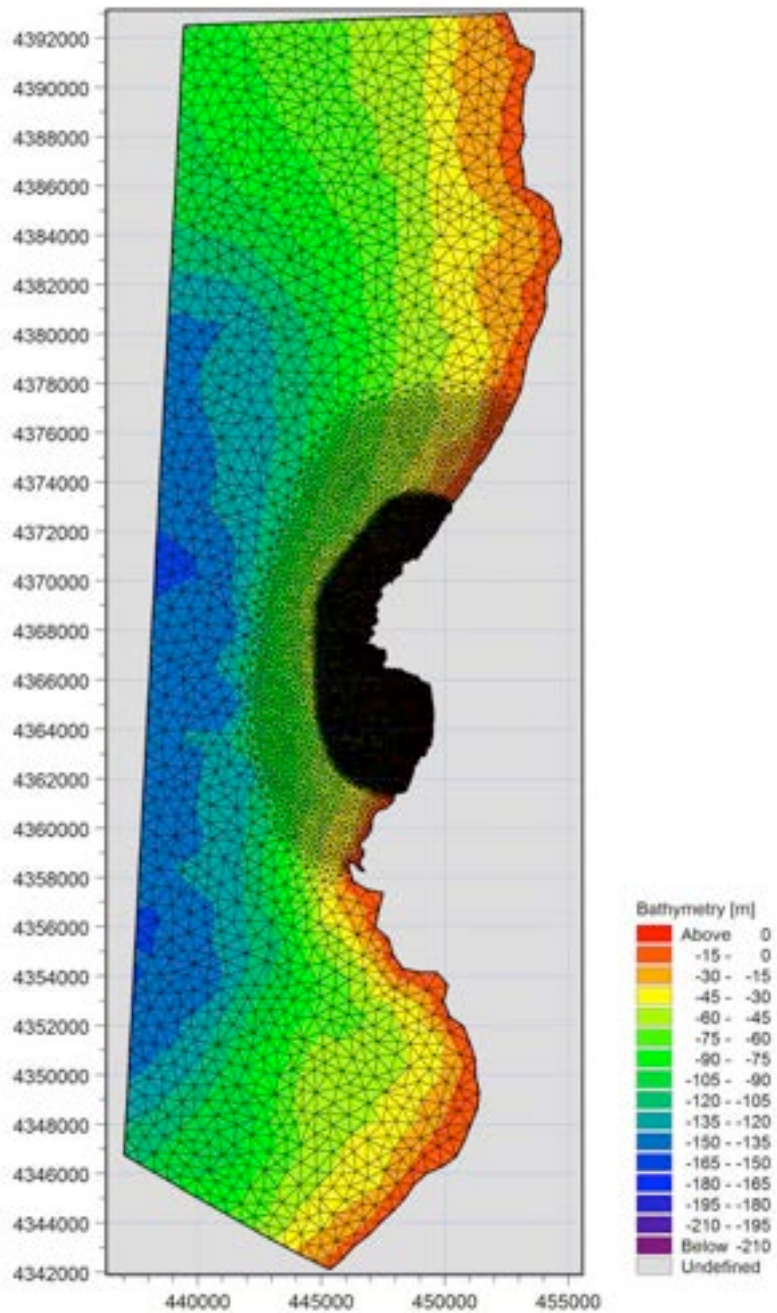
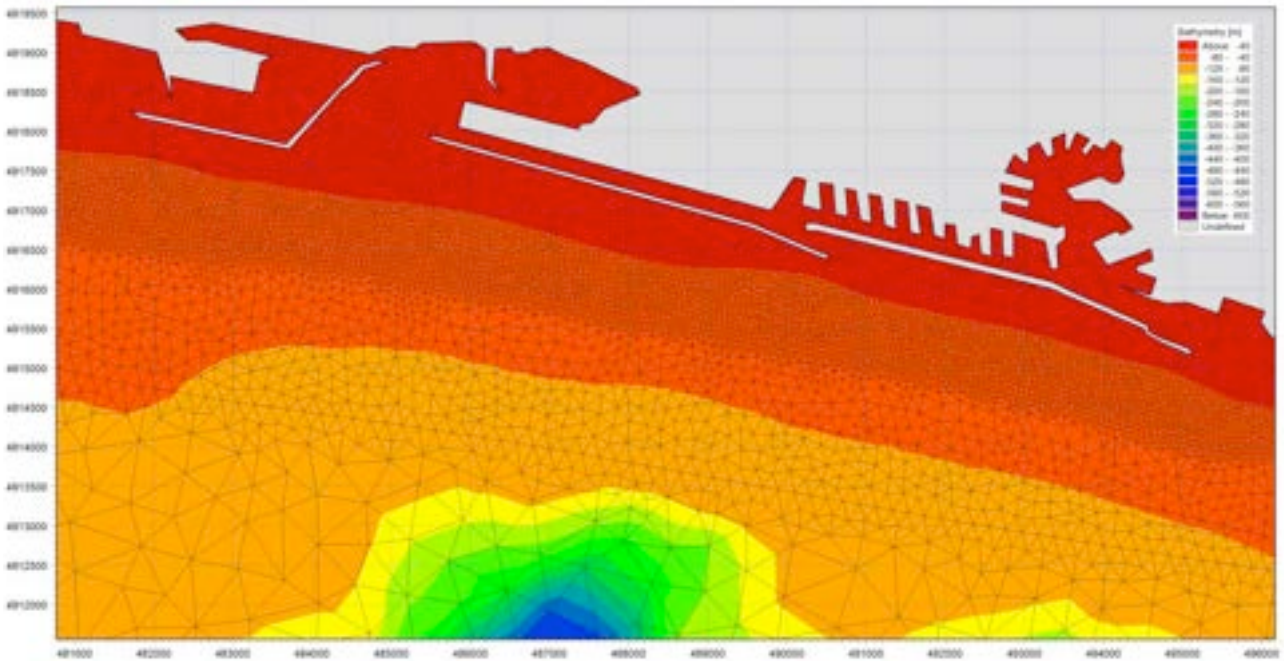


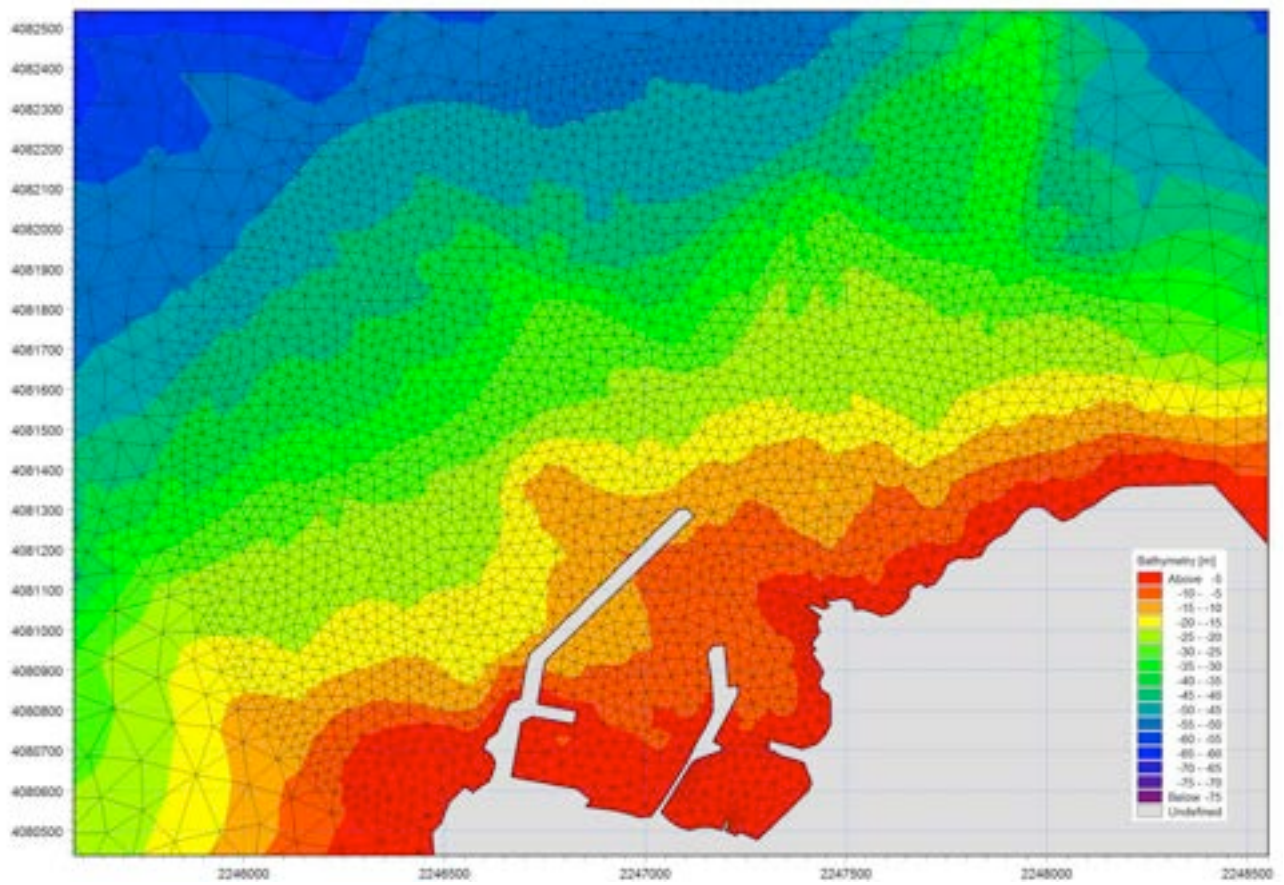
Figura 2.2 Rappresentazione della batimetria utilizzata per il modello di trasformazione dell'onda nell'area campione di Pantelleria.



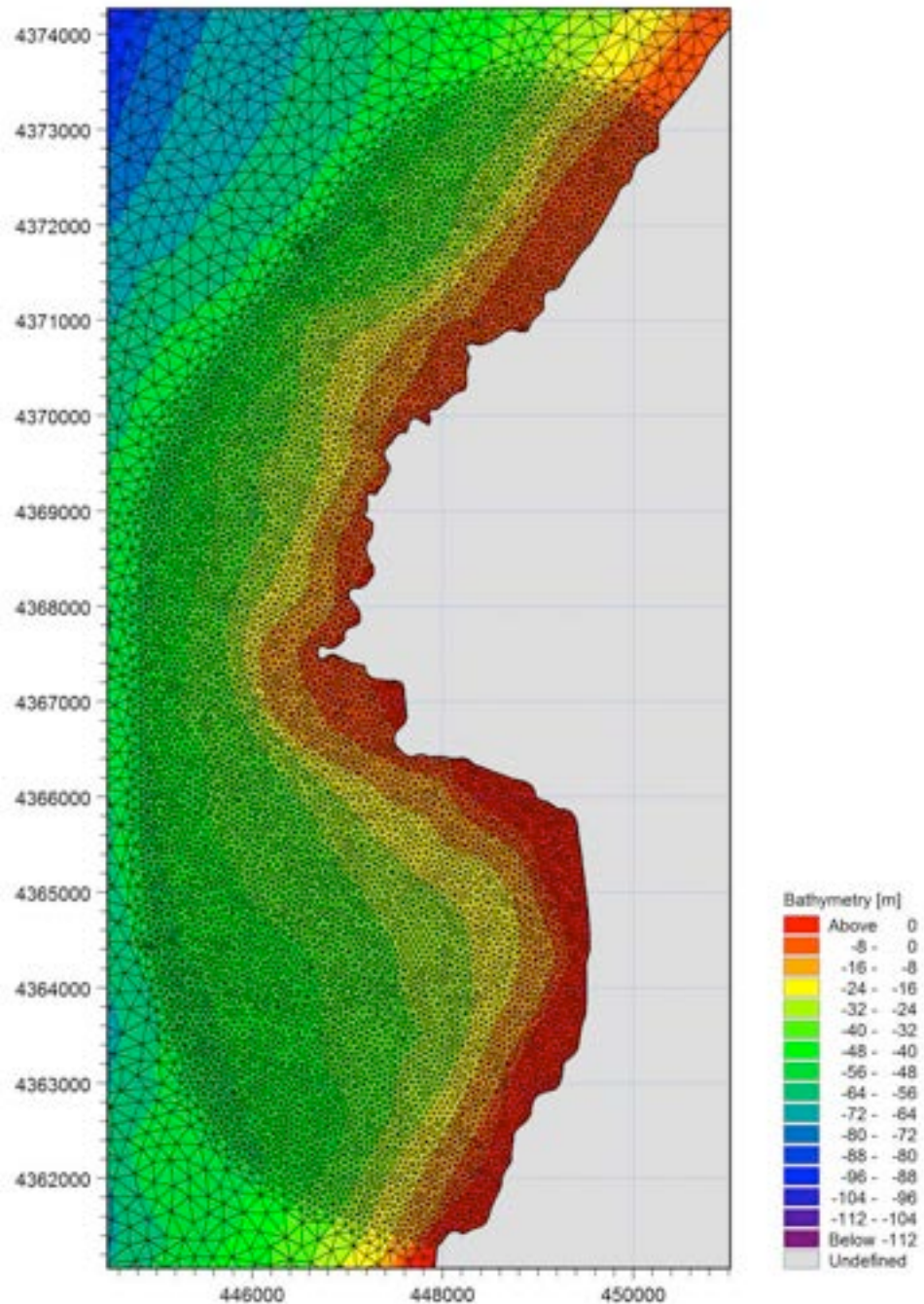
**Figura 2.3** Rappresentazione della batimetria utilizzata per il modello di trasformazione dell'onda nell'area campione di Porto Pischera.



**Figura 2.4** Griglia utilizzata per il modello di trasformazione dell'onda nell'area campione di Genova. Rappresentazione del tratto di maggiore interesse per lo studio.



**Figura 2.5** Griglia utilizzata per il modello di trasformazione dell'onda nell'area campione di Pantelleria. Rappresentazione del tratto di maggiore interesse per lo studio.



**Figura 2.6** Griglia utilizzata per il modello di trasformazione dell'onda nell'area campione di Porto Pischera.

Rappresentazione del tratto di maggiore interesse per lo studio.

## 2.2 Risultati del modello SW

Per ogni condizione ondosa considerata, afferente al clima medio o agli eventi estremi al largo, il modello utilizzato fornisce la distribuzione planimetrica delle principali caratteristiche del moto ondoso, ovvero altezza d'onda significativa e direzione di provenienza, il periodo delle onde è infatti ipotizzato uniforme su tutto il dominio di calcolo. A titolo di esempio viene mostrata la distribuzione della altezza

d'onda significativa per un'onda tipo per ciascun caso di studio, dalla Figura 2.7 alla Figura 2.9. In particolare, sono state scelte delle onde tipo con direzione di provenienza al largo particolarmente inclinate rispetto alla linea di costa al fine di evidenziare il fenomeno di rifrazione.

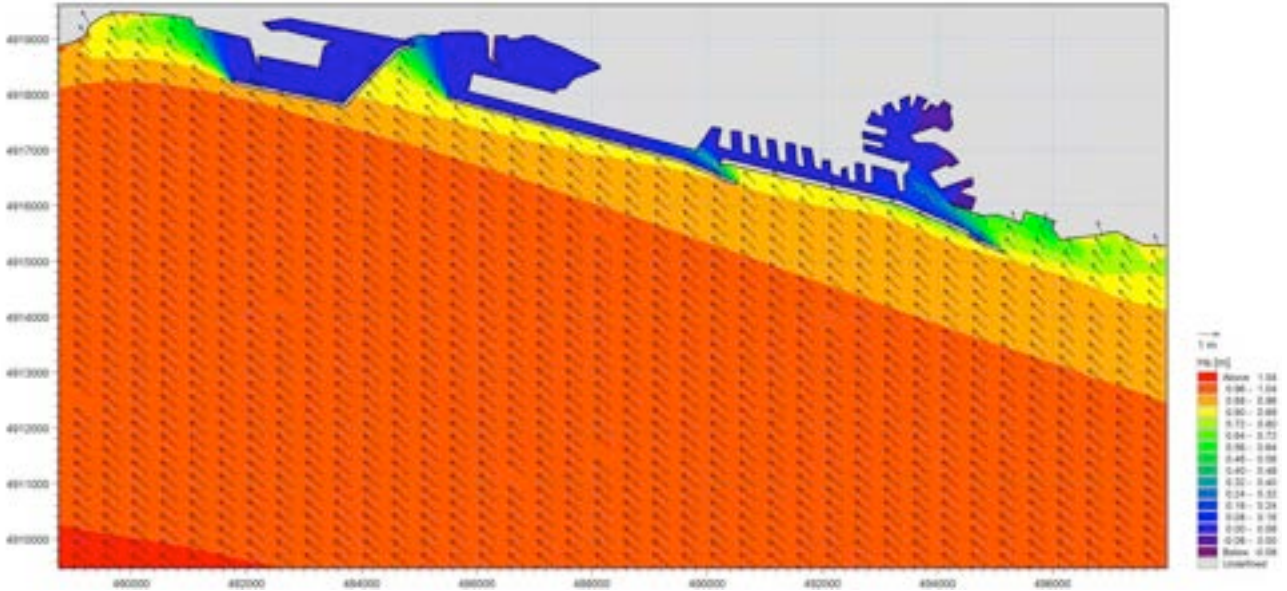
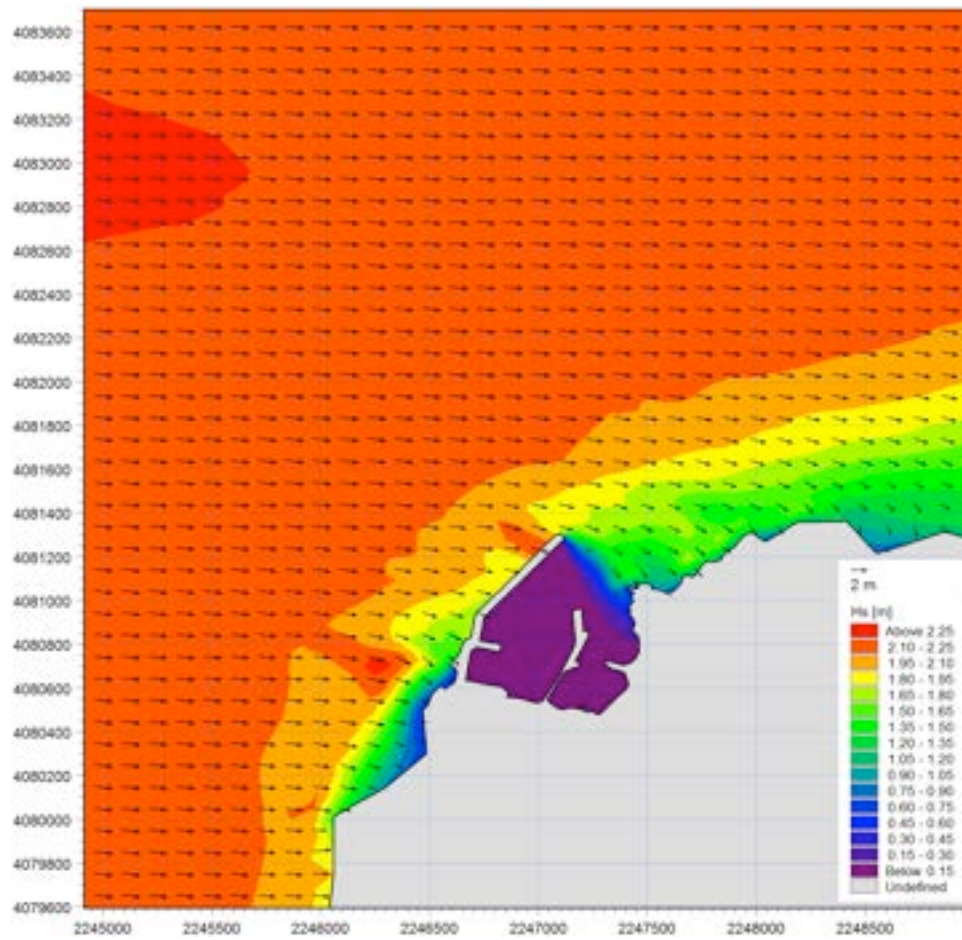
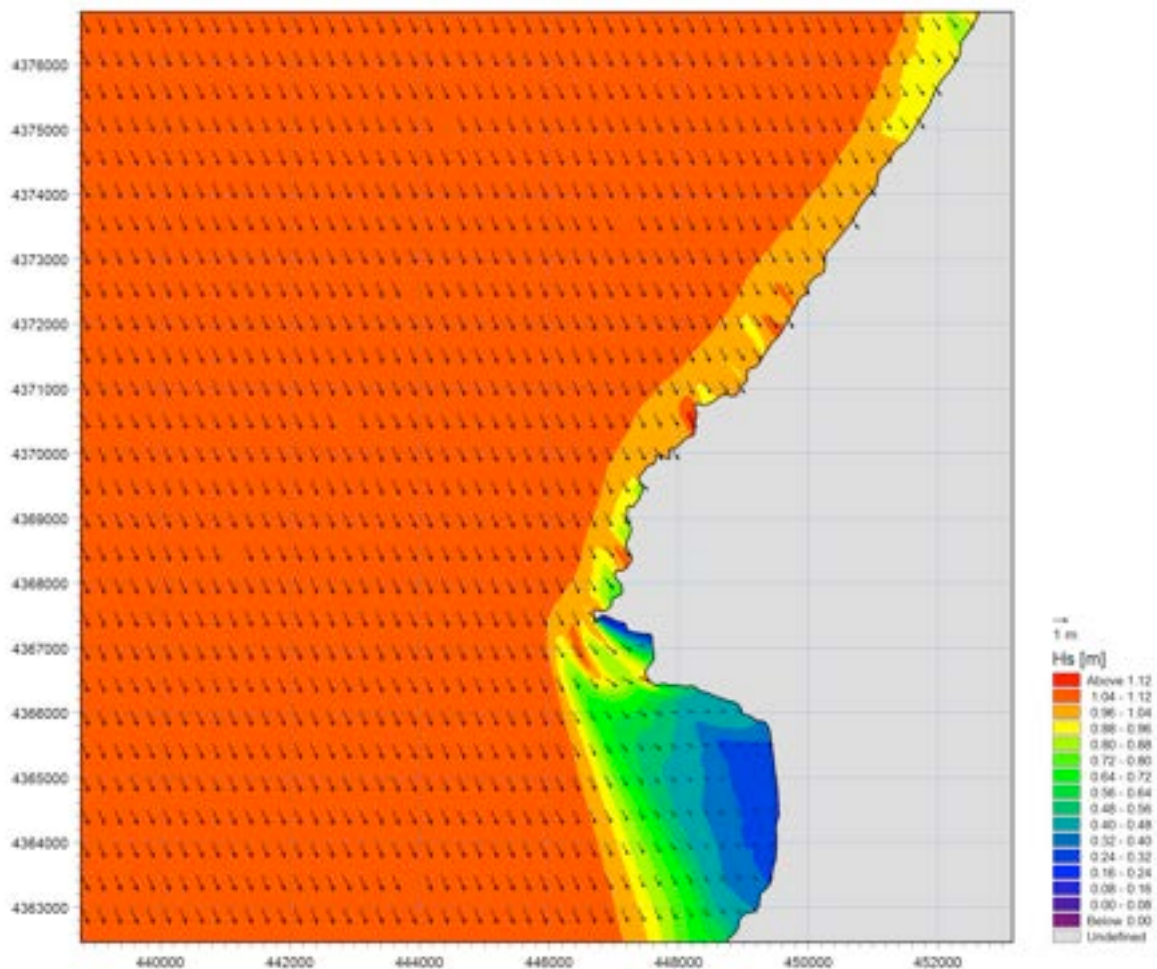


Figura 2.7 Distribuzione planimetrica della altezza d'onda per un evento ondoso tipo. Area campione di Genova.



**Figura 2.8** Distribuzione planimetrica della altezza d'onda per un evento ondoso tipo. Area campione di Pantelleria.

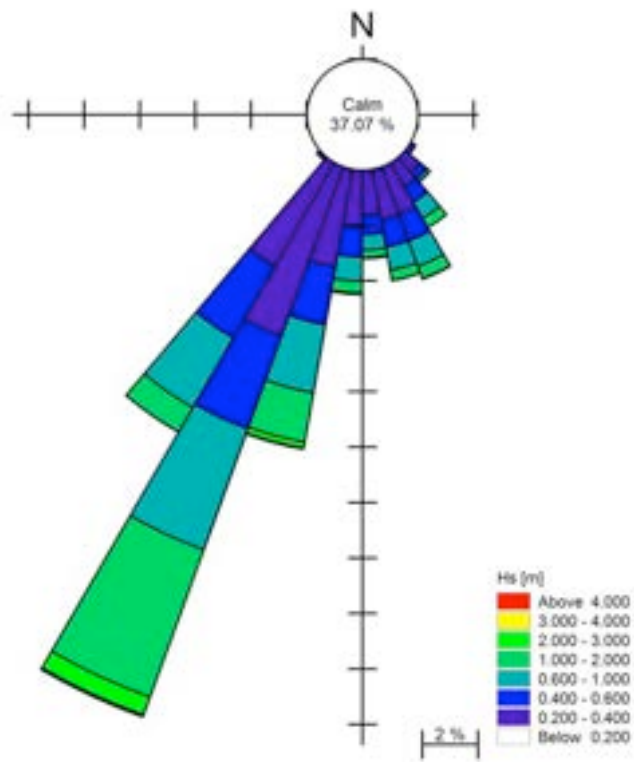


**Figura 2.9** Distribuzione planimetrica della altezza d’onda per un evento ondoso tipo. Area campione di Porto Pischera.

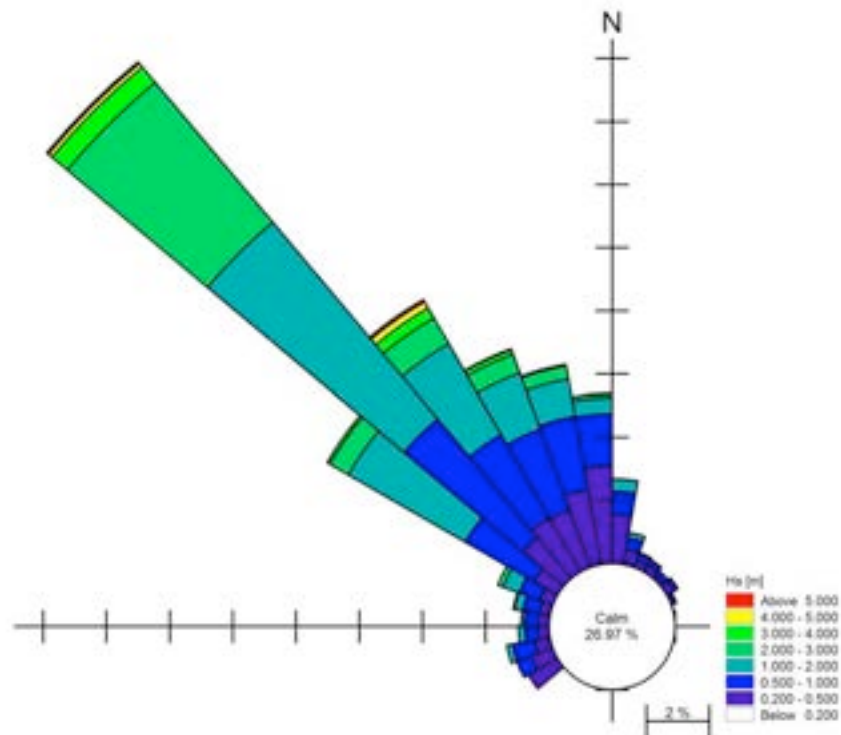
I risultati sono stati estratti in corrispondenza di un punto all’interno di ciascuna area campione posto su profondità intermedia, in cui il moto ondoso non risente dell’effetto del frangimento. Le coordinate e profondità di tali punti di estrazione sono i seguenti:

- Genova, punto di coordinate (UTM 32) 487.968E, 4.917.138N e profondità 20m;
- Pantelleria, punto di coordinate (Gauss-Boaga) 2.247.171E, 4.081.437N e profondità 15,5m;
- Porto Pischera, punto di coordinate (UTM 32) 448.401E, 4.371.867N e profondità 20m.

Dalla Figura 2.10 alla Figura 2.12 vengono riportate le rose del clima ondoso caratteristico trasferito sottocosta per i tre punti considerati. Dalla comparazione con i corrispondenti dati al largo si evidenzia in tutti e tre i casi una riduzione delle altezze d’onda, in modo particolare per le onde aventi direzione di provenienza maggiormente inclinata rispetto alla costa, ovvero quelle poste ai limiti del settore di traversia.



**Figura 2.10** Clima ondoso sottocosta per l'area campione di Genova.



**Figura 2.11** Clima ondoso sottocosta per l'area campione di Pantelleria.

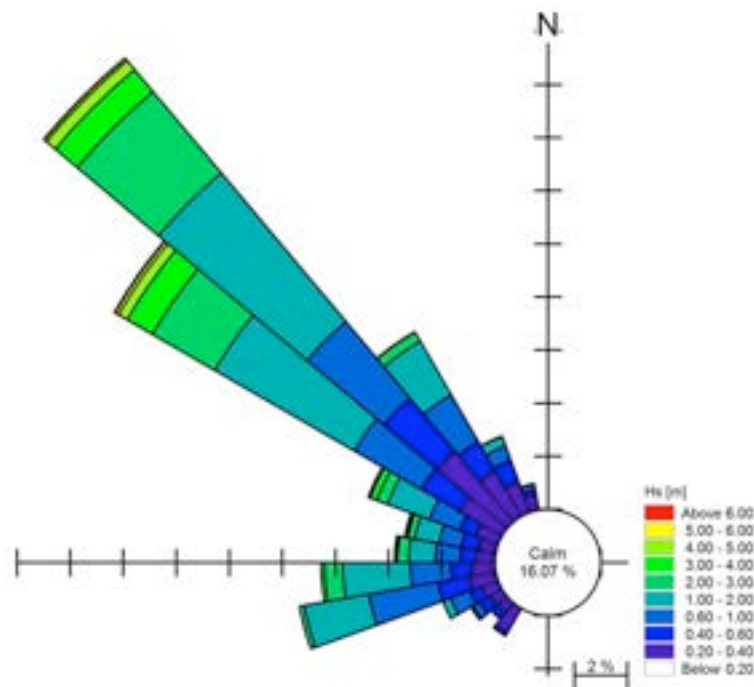


Figura 2.12 Clima ondoso sottocosta per l’area campione di Porto Pischera.

Per ciascuna area campione sono stati trasposti sottocosta anche gli eventi estremi ricadenti all’interno dei rispettivi settori di traversia. I risultati, estratti nei punti individuati in precedenza, vengono riportati dalla Tabella 2.1 alla Tabella 2.3. Tali dati risultano necessari per procedere alla successiva fase di dimensionamento strutturale dei cassoni e per le verifiche di sicurezza.

Tabella 2.1. Caratteristiche delle onde estreme sottocosta in termini di altezza d’onda (Hs), periodo di picco (Tp) e direzione di provenienza (Dir), al variare del periodo di ritorno e del settore di provenienza delle onde al largo. Area campione di Genova.

Direzione di provenienza al largo [°N]	R = 5 anni			R = 10 anni			R = 50 anni			R = 100 anni		
	Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]	Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]	Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]	Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]
120	0,77	4,2	130	0,96	4,6	130	1,32	5,5	131	1,46	5,8	131
150	2,14	6,4	152	2,34	6,7	152	2,78	7,4	154	2,96	7,7	154
180	2,68	7,2	180	2,96	7,6	181	3,58	8,4	181	3,84	8,7	181
210	3,78	8,7	207	4,12	9,1	207	4,91	10,0	206	5,26	10,3	206
240	1,43	5,8	227	1,61	6,2	227	1,98	7,0	227	2,13	7,3	226
<b>Omni-direzionale</b>										5,69	10,7	205

**Tabella 2.2** Caratteristiche delle onde estreme sottocosta in termini di altezza d'onda ( $H_s$ ), periodo di picco ( $T_p$ ) e direzione di provenienza ( $Dir$ ), al variare del periodo di ritorno e del settore di provenienza delle onde al largo. Area campione di Pantelleria.

Direzione di provenienza al largo [ $^{\circ}N$ ]	$R = 5$ anni			$R = 10$ anni			$R = 50$ anni			$R = 100$ anni		
	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$Dir$ [ $^{\circ}N$ ]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$Dir$ [ $^{\circ}N$ ]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$Dir$ [ $^{\circ}N$ ]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$Dir$ [ $^{\circ}N$ ]
0	2,98	7,7	358	3,29	8,1	358	3,98	9,0	358	4,27	9,3	357
30	1,40	5,1	29	1,61	5,5	29	2,00	6,2	28	2,15	6,5	27
60	0,86	4,1	56	0,99	4,4	56	1,23	5,0	55	1,32	5,2	54
90	0,76	4,9	69	0,85	5,3	68	1,01	6,0	64	1,07	6,3	63
210	1,25	7,4	260	1,45	7,9	262	1,91	8,7	267	2,09	9,0	268
240	1,58	6,5	261	1,75	6,9	263	2,13	7,7	267	2,27	8,0	269
270	2,34	7,3	282	2,56	7,7	284	3,06	8,6	288	3,28	8,9	290
300	6,17	11,1	314	6,68	11,6	314	7,65	12,5	316	7,99	12,9	316
330	5,52	10,6	332	6,03	11,1	333	7,09	12,1	333	7,48	12,5	334
<b>Omni-direzionale</b>										8,02	12,9	316

**Tabella 2.3.** Caratteristiche delle onde estreme sottocosta in termini di altezza d'onda ( $H_s$ ), periodo di picco ( $T_p$ ) e direzione di provenienza ( $Dir$ ), al variare del periodo di ritorno e del settore di provenienza delle onde al largo. Area campione di Porto Pischera.

Direzione di provenienza al largo [ $^{\circ}N$ ]	$R = 5$ anni			$R = 10$ anni			$R = 50$ anni			$R = 100$ anni		
	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$Dir$ [ $^{\circ}N$ ]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$Dir$ [ $^{\circ}N$ ]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$Dir$ [ $^{\circ}N$ ]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$Dir$ [ $^{\circ}N$ ]
0	2,04	10,0	340	2,13	10,4	338	2,31	11,3	335	2,39	11,6	334
210	0,76	4,7	217	0,83	5,1	219	0,95	5,8	223	0,99	6,0	225
240	3,25	9,6	257	3,53	10,1	259	4,19	11,1	262	4,47	11,5	263
270	4,40	9,7	275	4,80	10,2	276	5,70	11,1	278	6,09	11,5	278
300	7,32	12,0	300	7,94	12,5	300	9,25	13,6	299	9,75	14,0	299
330	4,84	10,0	325	5,23	10,4	324	6,08	11,3	323	6,43	11,6	322
<b>Omni-direzionale</b>										9,73	14,0	299

## 2.3 Stima dell'energia disponibile sottocosta

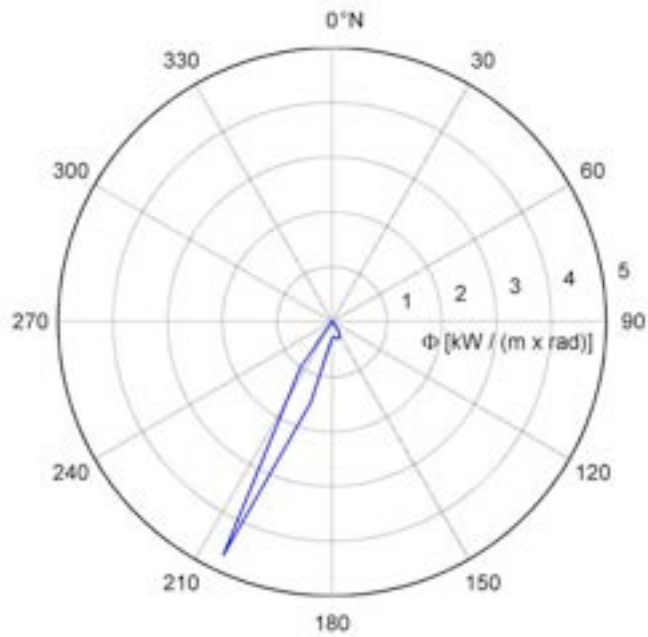
L'analisi delle caratteristiche del moto ondoso sottocosta ha evidenziato una riduzione più o meno intensa delle altezze d'onda al variare delle direzioni di propagazione. In modo analogo ci si aspetta una corrispondente riduzione della energia del moto ondoso.

La procedura seguita per il calcolo del flusso di energia disponibile sottocosta nelle aree campione è uguale a quella utilizzata a partire dai dati al largo: i dati di altezza d'onda significativa e periodo medio di ciascun evento rappresentativo del clima ondoso trasposto è stato utilizzato per stimare la potenza mediante la eq. (1.1); i valori di potenza così ottenuti sono stati moltiplicati per le corrispondenti frequenze di apparizione e la somma di tali valori rappresenta il flusso medio di energia per unità di lunghezza, espresso in kW/m.

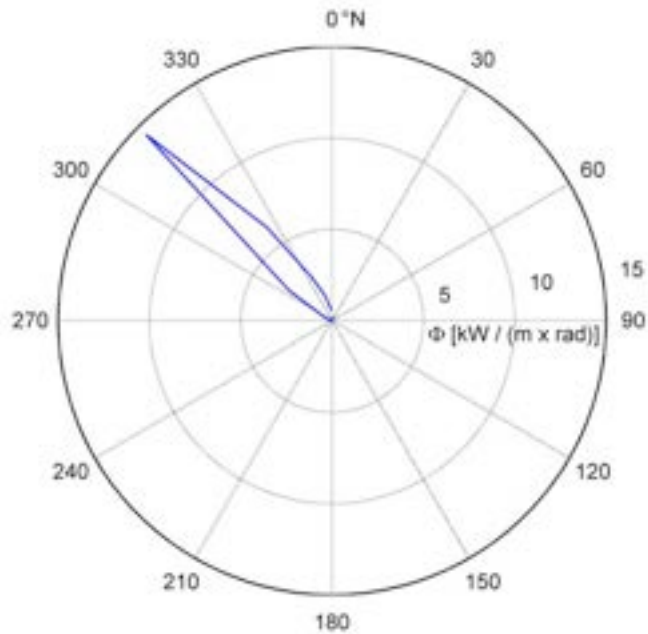
Tali valori si sono ridotti, rispetto ai corrispondenti dati al largo, di circa il 15% per tutti i casi considerati. In particolare, i flussi di energia totali sottocosta sono risultati pari a:

- 1,5 kW/m per Genova;
- 5,2 kW/m per Pantelleria;
- 8,6 kW/m per Porto Pischera.

Il set di dati così derivati, ovvero il flusso di energia associato ad ogni evento rappresentativo del clima medio, consente inoltre di analizzare l'andamento del flusso di energia in relazione alle principali caratteristiche del moto ondoso, ovvero la direzione di provenienza e l'altezza d'onda. Tali analisi sono di fondamentale importanza nelle fasi di scelta e progettazione dei sistemi di sfruttamento dell'energia ondosa. In particolare, dalla Figura 2.13 alla Figura 2.15 vengono mostrate le analisi direzionali del flusso di energia, mentre dalla Figura 2.16 alla Figura 2.18 sono presenti i grafici del flusso di energia in funzione della altezza d'onda significativa. In quest'ultima serie di grafici è inoltre presente l'andamento della potenza, in modo da fornire una diretta cognizione della energia disponibile associata alle varie condizioni ondose tipo e contemporaneamente delle possibili caratteristiche progettuali dell'impianto di sfruttamento dell'energia ondosa.



**Figura 2.13** Andamento del flusso di energia sottocosta in funzione della direzione di provenienza delle onde per l'area campione di Genova.



**Figura 2.14** Andamento del flusso di energia sottocosta in funzione della direzione di provenienza delle onde per l'area campione di Pantelleria.

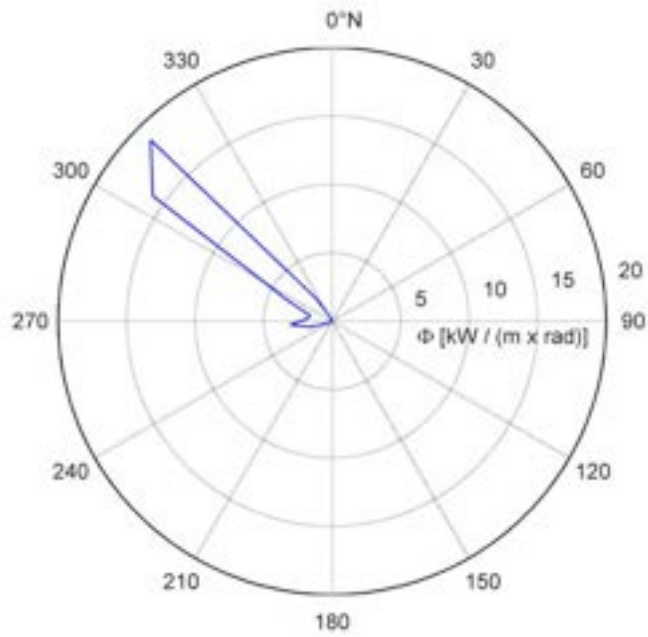


Figura 2.15 Andamento del flusso di energia sottocosta in funzione della direzione di provenienza delle onde per l'area campione di Porto Pischera.

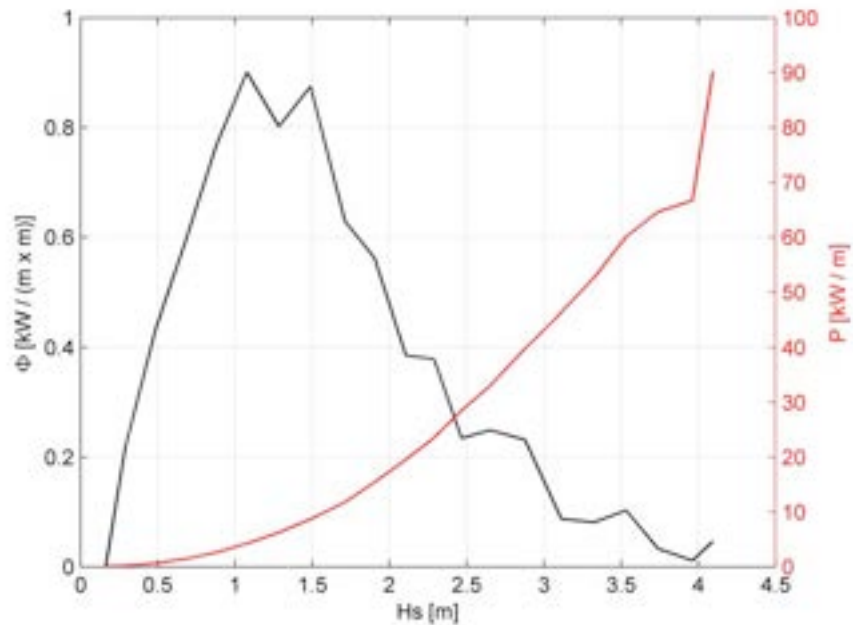
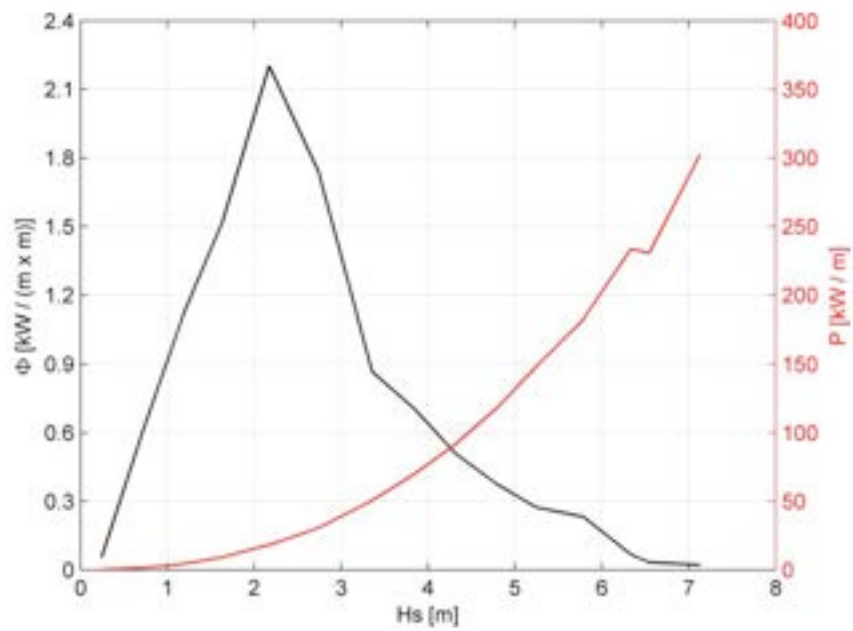
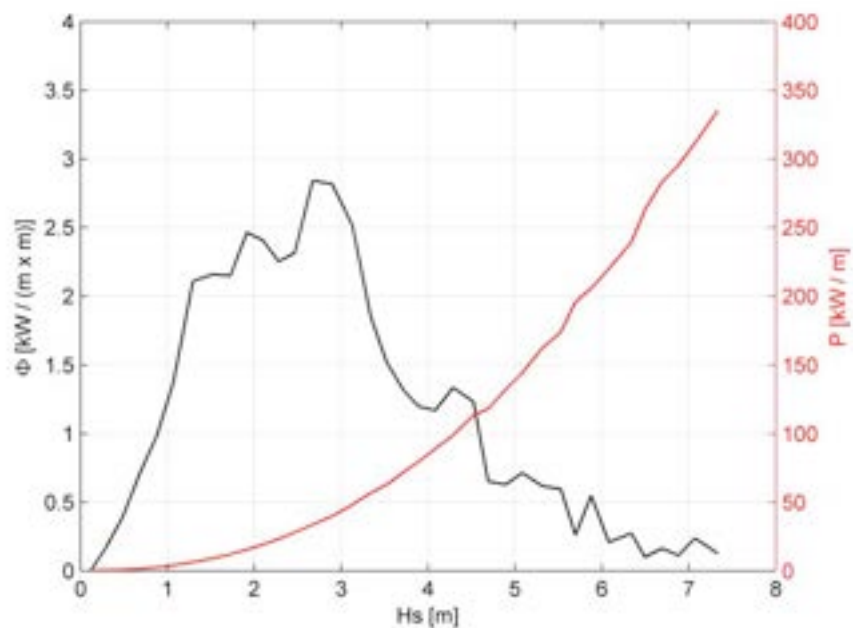


Figura 2.16 Andamento del flusso di energia sottocosta e della potenza in funzione della altezza significativa delle onde per l'area campione di Genova.



**Figura 2.17** Andamento del flusso di energia sottocosta e della potenza in funzione della altezza significativa delle onde per l'area campione di Pantelleria.



**Figura 2.18** Andamento del flusso di energia sottocosta e della potenza in funzione della altezza significativa delle onde per l'area campione di Porto Pischera.

## 3. DIMENSIONAMENTO DI MASSIMA DI UN IMPIANTO REWEC3/3 A CELLE INDIPENDENTI

### 3.1 *Descrizione generale di un cassone portuale in cemento armato (c.a.) modificato per la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica mediante un innovativo U-OWC*

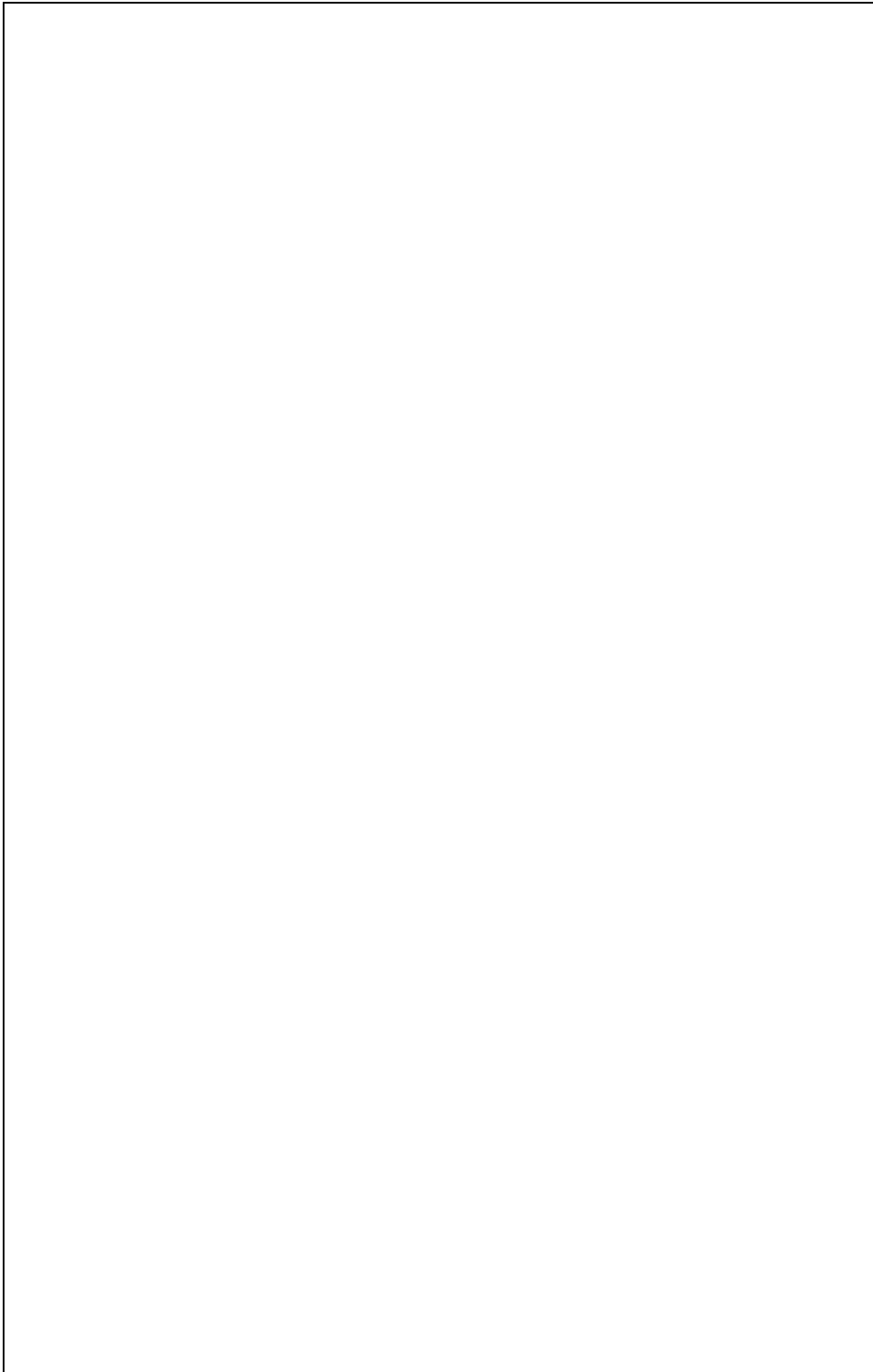
I cassoni cellulari in c.a a parete verticale sono tra le tipologie costruttive più largamente diffuse per la costruzione di bacini portuali. E' possibile modificare opportunamente tali strutture, con l'introduzione nella porzione lato mare di sistemi per la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica, quali i tradizionali Oscillating Water Column (OWC) o gli innovativi U-OWC (REWEC3). Lo schema costruttivo di siffatte strutture è rappresentato rispettivamente in Figura 3.1 e 3.2.

Un convertitore di tipo OWC (*Oscillating Water Column*) può essere localizzato nella parte lato mare di un cassone portuale in c.a. secondo lo schema di Figura 3.1. Il dispositivo è costituito da una camera pneumatica (1) in cui viene praticata un'ampia apertura sulla parete verticale lato-mare, attraverso cui viene consentita l'interazione della struttura con l'azione delle onde di mare.

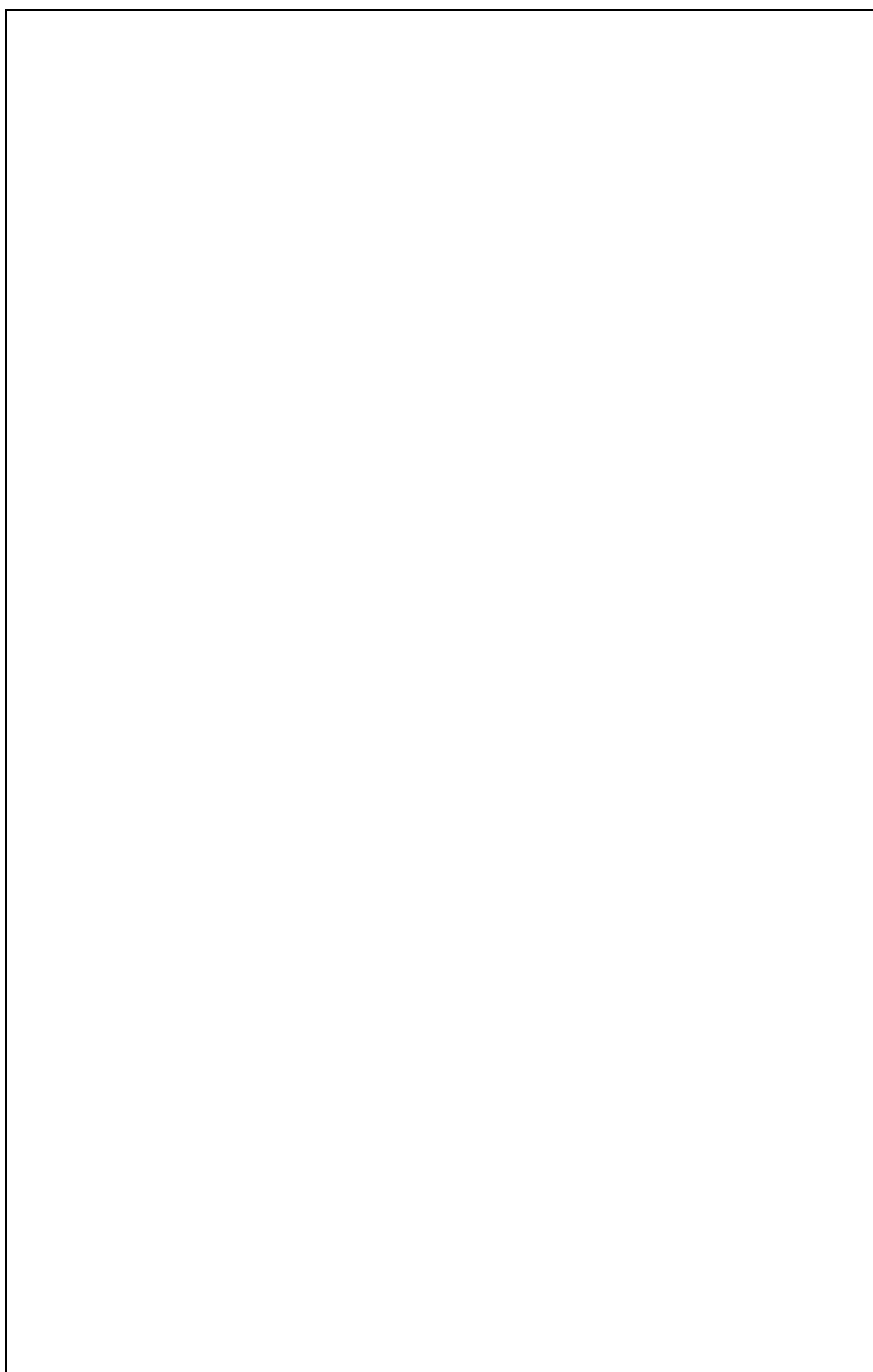
Le onde determinano, infatti, attraverso l'apertura inferiore, l'oscillazione della colonna d'acqua (1a) e quindi dell'aria (1b) contenute entrambe all'interno della camera, rispettivamente, nella sua parte inferiore ed in quella superiore. L'aria viene, pertanto, forzata all'interno ed all'esterno della camera attraverso un condotto (2) posizionato nella parte superiore della stessa, generando una corrente d'aria alternata. L'installazione di una turbina self-rectifying (3) e del relativo generatore elettrico nel condotto (2) permettono di sfruttare il flusso d'aria per generare corrente elettrica.

Lo schema costruttivo di un impianto di tipo REWEC3 (*REsonant Wave Energy Converter*) per la conversione di energia ondosa in energia elettrica, collocato nella parte lato mare di un tradizionale cassone portuale cellulare, è riportato in Figura 3.2. Il cassone modificato è costituito da un condotto verticale (4) nella parte anteriore interagente con il moto ondoso incidente attraverso un'imboccatura superiore (5). Tale condotto è, poi, collegato ad una camera di assorbimento (1) attraverso una luce di fondo (6). La camera (1) è posta in contatto con l'atmosfera mediante un condotto (2) nel quale è alloggiata una turbina self-rectifying (3). La camera di assorbimento (1) è inoltre dotata di uno sfiato, mediante un ulteriore condotto che collega detta camera all'atmosfera, il quale consente la sicurezza ed il corretto funzionamento dell'impianto anche senza turbina, o con turbina non attiva. All'interno della camera di assorbimento è contenuta una massa d'acqua (1a) nella parte inferiore ed aria (1b) nella parte superiore.

Per effetto del campo di moto ondoso interagente con la struttura, si instaurano sull'imboccatura del condotto verticale (5) delle fluttuazioni di pressione, che determinano delle oscillazioni all'interno della



**Figura 3.1** Schema costruttivo di un cassone modificato con tecnologia OWC a celle indipendenti per la conversione di energia ondosa in energia elettrica.



**Figura 3.2** Schema costruttivo di un cassone modificato con tecnologia REWEC3 (U-OWC/3) a celle indipendenti per la conversione di energia ondosa in energia elettrica.

massa d'acqua contenuta nel condotto e nella camera di assorbimento, corrispondenti alle fasi di cresta e di cavo d'onda. Conseguentemente, la sacca d'aria all'interno della predetta camera (1b) viene alternativamente compressa ed espansa, generando una corrente alterna all'interno del condotto (2) che collega la camera con l'atmosfera, capace di mettere in funzione la turbina self-rectifying (3).

Rispetto ad un tradizionale OWC, un impianto REWEC3 risulta costituito dall'addizionale condotto verticale [elemento (4) di Figura 3.2] che è collegato alla camera di assorbimento mediante un tubo ad U nella parte anteriore della diga lato mare. Per questo motivo, tali impianti possono essere considerati degli U-OWC. La differente configurazione strutturale determina delle significative differenze nell'idrodinamica che si instaura all'interno della struttura e, quindi, modifica sostanzialmente, in termini di resa e di efficienza, i risultati prodotti dai due diversi tipi di impianti.

Infatti, negli U-OWC (REWEC3), rispetto agli OWC, le onde non entrano all'interno della struttura, ma agiscono da forzante per instaurare il moto di compressione e decompressione della sacca d'aria all'interno dell'impianto.

Tali impianti innovativi REWEC3 sono stati brevettati dal Prof. Paolo Boccotti sia in ambito Nazionale (Brevetto Italiano N. 1332519) che Europeo (European Patent N. EP1518052B1).

Le stime di produzione di energia elettrica, a parità di condizioni ondose e di tipologia di turbina/generatore, sono migliori per gli impianti REWEC3 rispetto ai classici OWC (Boccotti 2007a-b-c). Un confronto tra i tradizionali OWC e gli U-OWC ha, infatti, mostrato come gli ultimi consentono di assorbire una quantità di energia ondosa molto maggiore di quella dei classici OWC, sia per gli stati di mare più intensi interagenti con la struttura, che per quelli più deboli (per dettagli, si rimanda a Boccotti, 2007c).

L'introduzione del condotto ad U consente, infatti, la regolazione del periodo proprio di oscillazione dell'impianto, al fine di dimensionare lo stesso in fase di progettazione in maniera tale che il periodo proprio di oscillazione coincida con il periodo di picco degli stati di mare cui è associata la maggiore quantità di energia ondosa (ricavata considerando intensità e frequenza del moto ondoso) che investe la diga nell'arco di un anno.

Ciò consente di garantire il naturale verificarsi delle condizioni di risonanza in corrispondenza delle migliori condizioni ondose per lo sfruttamento dell'energia, ottimizzando le performance dell'impianto. Nei tradizionali OWC, invece, il realizzarsi delle condizioni di risonanza richiede l'attuazione di sistemi tecnologicamente complessi per il controllo di fase di ogni singola onda, capaci di determinare una risonanza forzata del sistema (Sarmiento et al. 1985, Korde 1991).

Da un punto di vista tecnologico tali impianti U-OWC non presentano addizionali e significative complessità costruttive rispetto a quelle di una classica diga foranea a parete verticale. La struttura dell'impianto, infatti, è essenzialmente simile. La funzione di muro paraonde viene espletata dalla parte superiore della camera di assorbimento che viene portata alla stessa quota del muro paraonde di una diga

foranea tradizionale. La vera innovazione tecnologica è costituita dal condotto verticale e dalla camera di assorbimento, collegata all'atmosfera, che formano il tubo ad U in calcestruzzo armato.

In aggiunta, rispetto ad una classica diga a cassoni, i sistemi U-OWC dovrebbero assicurare una maggiore efficienza tecnica riducendo gli effetti di tracimazione dovuti al fenomeno classico della riflessione delle onde davanti ad una struttura a parete verticale, che determina il raddoppio delle onde sulla parete rispetto alla condizione di moto ondoso incidente. Nei cassoni modificati con tecnologia U-OWC tale effetto, nel corso di mareggiate, è fortemente ridotto, in quanto la dinamica che si instaura all'interno del tubo ad U davanti alla classica struttura determina un assorbimento del flusso di energia associato al moto ondoso incidente sia quando l'impianto è attivo per la produzione di energia elettrica sia quando l'impianto è fermo. Di conseguenza il coefficiente di riflessione, nel corso di stati di mare di onde di vento, risulta essere minore del valore teorico pari a due (riflessione ideale).

Il dimensionamento dell'impianto viene effettuato considerando due differenti configurazioni (Boccotti, 2004):

1. *Impianto Attivo*, ovvero con le turbine funzionanti, e, pertanto, in fase di produzione. Tale configurazione è analizzata con riferimento agli stati di mare che, per la località in esame, convogliano la maggior parte di energia durante l'anno;
2. *Impianto Fermo*, con turbine ferme e sfiati aperti. Tale condizione è valutata in corrispondenza degli eventi estremi che si possono realizzare nella località in esame.

La prima delle due configurazioni consente di determinare l'efficienza e la resa energetica dell'impianto; la seconda deve essere considerata per garantire la stabilità della struttura.

## 3.2 Dimensionamento delle Celle Attive dei Cassoni REWEC3/3

### 3.2.1 'Periodo Proprio' di Oscillazione dell'Impianto e Condizioni di Risonanza

Per la progettazione degli impianti REWEC3/3 (U-OWC/3) è di fondamentale importanza la definizione del *periodo proprio di oscillazione dell'impianto* -  $T_e$  - in quanto sulla base di tale grandezza è possibile dimensionare, in maniera ottimale, tutte le parti attive dell'impianto stesso [condotto verticale, camera di assorbimento e condotto di alloggiamento della turbina (condizione di impianto attivo) e condotto di sfiato (condizione di impianto fermo)] al fine di avere la massima resa di produzione energia elettrica ad impianto attivo, che come già osservato si realizza quando l'impianto entra in condizioni di risonanza.

Tale grandezza, infatti, è strettamente connessa con le dimensioni geometriche dell'impianto. Si osserva (Boccotti 2004) che il *periodo proprio di oscillazione dell'impianto REWEC3/3* è influenzato dalla geometria delle parti attive dell'impianto REWEC3 (la lunghezza del condotto verticale; la larghezza della camera di assorbimento; la larghezza del condotto verticale; l'altezza della camera di assorbimento; il

diametro del condotto di collegamento tra il polmone d'aria all'interno della camera di assorbimento e l'atmosfera).

Tale *periodo proprio* è un parametro che viene fissato in fase di progettazione, sulla base di valutazioni che saranno evidenziate di seguito, affinché risulti quanto più prossimo al periodo di picco  $T_p$  [ $\equiv \omega_p/2\pi$ , essendo  $\omega_p$  la frequenza di picco dello spettro delle onde incidenti] degli stati di mare che, per la località in esame, convogliano la maggior parte di energia durante l'anno.

Si osserva che considerare, ad esempio, stati di mare con altezza significativa  $H_s=1.5\div 2.0\text{m}$ , significa esaminare, nel caso di pure onde di vento, periodi di picco che variano all'interno del range  $T_p=5\div 6\text{s}$ , essendo le due grandezze,  $H_s$  e  $T_p$ , legate dalla nota relazione  $T_p = 8.5\pi\sqrt{H_s/(4g)}$  valida nel caso di onde di vento per spettro di frequenza JONSWAP medio (Boccotti 2000).

Per comprendere se ci si trovi in condizione di risonanza, ovvero tale che il periodo di picco dello stato di mare agente sia circa uguale al periodo proprio,  $T_e$ , di oscillazione dell'impianto, è utile definire l'*indice di risonanza*,  $R$ . Tale indice  $R$  è definito mediante la seguente relazione

$$R = 4 \frac{T^*}{T_p} \quad (3.2.1)$$

essendo  $T_p$  il periodo di picco dello spettro delle fluttuazioni di pressione  $\Delta p$  sull'imboccatura del condotto verticale (che è quello assunto alla base del progetto sulla base dell'analisi delle condizioni ondose nella località in esame) e  $T^*$  definito uguale all'ascissa del primo massimo della seguente funzione di cross-correlazione:

$$\Psi(T) \equiv \langle \Delta p(t) \cdot Q_p(t+T) \rangle, \quad (3.2.2)$$

che è la media temporale, riferita alla durata di uno stato di mare, del prodotto tra la fluttuazione di pressione  $\Delta p$  sull'imboccatura del condotto verticale al generico istante  $t$  e la portata entrante/uscente nel condotto verticale all'istante  $t+T$  (Boccotti 2007).

In dettaglio, per quanto concerne l'azione del campo di moto incidente, e, quindi, la fluttuazione di pressione  $\Delta p$  sull'imboccatura del condotto verticale, è stata considerata la teoria lineare di Quasi-Determinismo sui gruppi di onde di mare generate da onde alte (Boccotti 1981, 1989, 1997, 2000); per quanto riguarda, invece, lo studio dell'idrodinamica che instaura all'interno dell'impianto si rimanda alla sezione successiva.

Tenuto conto di quanto scritto sopra,  $R$  risulta essere compreso tra  $[-1,1]$  ed assume valori negativi quando il periodo proprio dell'impianto è minore del periodo di picco dello stato di mare agente, mentre assume valori positivi quando tale periodo è maggiore di quello di picco dello stato di mare agente. Le condizioni ideali per l'assorbimento dell'energia ondosa si realizzano quando l'*indice di risonanza* assume valore nullo,  $R=0$ .

### 3.2.2 Idrodinamica del Moto dell'Acqua e dell'Aria all'interno dell'Impianto REWEC3 a Celle Indipendenti

L'idrodinamica del moto dell'acqua all'interno della singola cella di un impianto di tipo REWEC3 a celle indipendenti (U-OWC/3), è analizzata mediante la seguente espressione semplificata (Boccotti 2004, 2007)

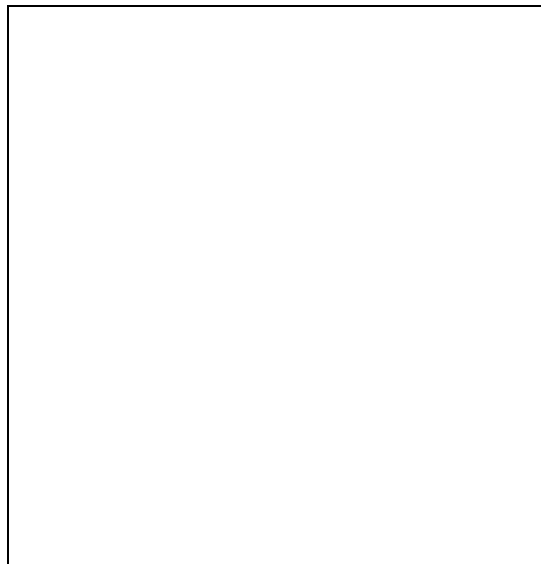
$$h' - h'' - \Delta h_w = \frac{l'}{g} \frac{du}{dt} + \frac{(l'' - \xi)}{g} \frac{d^2 \xi}{dt^2} \quad (3.2.3)$$

in cui tutte le grandezze geometriche sono riportate in Figura 3.3.

Inoltre:

- $u=u(t)$  è la velocità dell'acqua nel condotto verticale. Varia in funzione del tempo ed è definita positiva se è uscente dall'imboccatura;
- $\xi=\xi(t)$  è la quota istantanea dell'aria all'interno del polmone della camera di assorbimento, definita positiva se rivolta verso il basso.

Tali grandezze,  $u$  e  $\xi$ , sono mutuamente legate mediante l'equazione di continuità.



**Figura 3.3** Grandezze geometriche di riferimento del cassone U-OWC/3.

Nell'equazione (3.2.3),  $\Delta h_w$ , sono le perdite di carico nel condotto verticale valutate secondo la seguente relazione:

$$\Delta h_w = \left( \frac{\lambda_w}{4R} l + k_w \right) \frac{u^2}{2g} \frac{u}{|u|} \quad (3.2.4)$$

nella quale  $l$  è la lunghezza del percorso considerato,  $R$  è il raggio idraulico del condotto verticale,  $k_w$  sono le perdite di carico concentrate, ed, infine,  $\lambda_w$  sono le perdite di carico distribuite.

$h'$  ed  $h''$  sono i carichi idraulici (energia per unità di peso), riferiti al livello di medio mare, relativi rispettivamente all'imboccatura del condotto superiore e alla quota di interfaccia acqua/aria nella camera di assorbimento. Sono stimati rispettivamente mediante le seguenti relazioni:

$$h' = (\xi_0 - \xi) + \frac{1}{2g} \left( \frac{d\xi}{dt} \right)^2 + \frac{(p_a - p_{atm})}{\rho_w g} \quad (3.2.5)$$

in cui

- $\xi_0$  quota dell'acqua nella camera in condizioni di quiete;
- $p_{atm}$  pressione atmosferica;
- $p_a$  pressione dell'aria all'interno del polmone di aria della camera di assorbimento al generico istante  $t$ ;
- $d\xi/dt$  velocità dell'acqua nella camera di assorbimento;
- $\rho_w$  densità della massa d'acqua all'interno dell'impianto;
- $g$  accelerazione di gravità;

e

$$h'' = \frac{\Delta p}{\rho_w g}, \quad (3.2.6)$$

essendo  $\Delta p$  è la fluttuazione dell'onda sull'impianto alla quota dell'imboccatura del condotto verticale ( $z = a$ , con riferimento a Figura 3.3), calcolata mediante teoria lineare di Quasi-Determinismo sui gruppi di onde di mare generate da onde alte (Boccotti 1981, 1989, 1997, 2000).

Per quanto concerne le grandezze relative al polmone di aria all'interno della camera di assorbimento – ovvero la pressione,  $p_a$ , e la densità,  $\rho_a$ , dell'aria – queste sono valutate come di seguito esplicitato.

La densità dell'aria,  $\rho_a$ , all'interno del polmone d'aria è legata alla variazione della massa d'aria,  $M_a$ , all'interno del polmone e alla quota dell'acqua nella camera di assorbimento,  $\xi$ , secondo la seguente espressione

$$\rho_a = \frac{M_a}{b S'' \xi}, \quad (3.2.7)$$

essendo  $b$  la larghezza longitudinale della singola cella attiva dell'impianto non comunicante con le altre.

La pressione dell'aria,  $p_a$ , all'interno del polmone d'aria è legata alla densità dell'aria,  $\rho_a$ , mediante l'equazione di stato, secondo cui

$$\frac{p_a}{\rho_a^k} = \frac{p_{atm}}{\rho_{atm}^k} \quad (3.2.8)$$

dove  $k = 1$  se si assume la trasformazione isoterma,  $k = 1.4$  se si assume adiabatica. In generale,  $1.0 \leq k \leq 1.4$ .

Un'altra grandezza fondamentale per la determinazione dell'idrodinamica all'interno dell'impianto è la velocità dell'aria,  $u_a$ , all'interno del condotto che connette il polmone d'aria della camera di assorbimento con l'atmosfera. Tale grandezza è direttamente connessa alla pressione dell'aria,  $p_a$ , all'interno del polmone della camera attraverso la seguente relazione

$$k_a \frac{u_a^2}{2} \frac{u_a}{|u_a|} = \frac{p_{atm}}{\rho_{atm}} \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_a}{p_{atm}} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (3.2.9)$$

Note la velocità dell'aria,  $u_a$ , e la pressione,  $p_a$ , è possibile valutare la variazione della massa d'aria del polmone all'interno della camera di assorbimento, che è ricavabile mediante la condizione

$$\frac{dM_a}{dt} = -\frac{1}{2} (\rho_a + \rho_{atm}) \frac{\pi(D^2 - D_{in}^2)}{4} u_a \quad (3.2.10)$$

essendo  $D_{in}$  il diametro del mozzo rotante della turbina e  $D$  il diametro esterno della turbina.

Tutte le grandezze idrodinamiche istantanee in gioco sono determinate per integrazione numerica delle equazioni differenziali (3.2.3) e (3.2.10) essendo nota, come input iniziale, la fluttuazioni di pressione prodotta dalle onde all'imboccatura del condotto verticale ed assumendo per alcune grandezze i seguenti valori iniziali (istante  $t=0$ )

$$\frac{d\xi}{dt} = 0, \quad \xi = \xi_0, \quad M_a = \rho_{atm} b S'' \xi_0 \quad (3.2.11)$$

Il procedimento di calcolo sviluppato segue le indicazioni proposte da Boccotti (2004, 2007).

### 3.3 Stabilità globale dei cassoni REWEC3

Per le tre località analizzate (Porto Pischera in Sardegna, Pantelleria, Genova) si è proceduto a dimensionare i cassoni REWEC3 affinché sia verificata la loro stabilità globale sotto l'azione degli eventi massimi che si possono realizzare nei singoli siti di interesse.

#### 3.3.1 Condizione di non-frangimento davanti alla struttura

Considerando le *Istruzioni Tecniche per la Progettazione delle Dighe Marittime* (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 1995), per un corretto dimensionamento della struttura è necessario, innanzitutto, effettuare la verifica di non-frangimento dell'onda di progetto in fase di cresta. In dettaglio, qualora la seguente relazione

$$d > 1.5H \quad (3.3.1)$$

risulta soddisfatta, la struttura risulta non soggetta all'azione di onde frangenti e le sollecitazioni dovute alle pressioni prodotte dall'onda possono essere computate mediante lo schema di Saintflou (1928). Qualora, invece, la relazione (3.1) non risultasse verificata, per un corretto dimensionamento è opportuno fare riferimento allo schema di Goda (1974, 1999; vedi anche Boccotti 2000 – Sezione 13.5.1) per il calcolo delle pressioni agenti sulla struttura.

Nella relazione (3.1),  $d$  è la quota di imbasamento della struttura riferita al *l.m.m.* ed  $H$  è il valore  $H_{\max}$  atteso una sola volta in un lasso di tempo doppio della vita presunta dell'opera (v. *Istruzioni Tecniche per la Progettazione delle Dighe Marittime*, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 1995). Per una verifica *preliminare* di non-frangimento la norma prescrive di assumere un valore di  $H$  pari ad  $H_{1/100} = 1.67 H_s$ , con  $H_s$  altezza significativa dello stato di mare di progetto riferito alla vita di progetto  $L$  della struttura.

Per un corretta verifica di stabilità della struttura, a vantaggio di sicurezza, le sollecitazioni instabilizzanti prodotte dall'onda verranno computate facendo riferimento allo schema di Goda.

### 3.3.2 Calcolo delle Azioni Instabilizzanti prodotte dall'Onda di Progetto in Fase di Cresta

Lo schema delle distribuzioni delle pressioni prodotte dal campo di moto ondoso incidente, proposto da Goda, è riportato in Figura 3.4 e prevede che la massima elevazione della superficie libera,  $\eta_{\max}$ , sia pari a

$$\eta_{\max} = \frac{3}{4}(1 + \cos \theta)H \quad (3.3.2)$$

e che le massime pressioni prodotte dall'onda in corrispondenza della fase di cresta d'onda relativamente al livello di medio mare e alla profondità di imbasamento della struttura (vedi schema di Figura 3.4) siano, rispettivamente, uguali a

$$p_{wl}^{(+)} = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta)(\alpha' + \alpha'' \cos^2 \theta)\gamma_a H, \quad (3.3.3)$$

e

$$p_w^{(+)} = \alpha''' p_{wl}^{(+)}, \quad (3.3.4)$$

e il valore della sottospinta prodotta dall'onda, dal lato battuto dall'onda, sia fornita dalla seguente relazione



**Figura 3.4** Schema di calcolo della distribuzione delle pressioni prodotte dall'onda in fase di cresta, proposto da Goda (1974, 1999).

$$p_{w2}^{(+)} = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta)\alpha' \alpha'' \gamma_a H. \quad (3.3.5)$$

essendo  $\gamma_a$  il peso specifico dell'acqua del mare.

Le relazioni (3.2)÷(3.5) sono di natura empirica, ed in esse i coefficienti  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  e  $\alpha'''$  sono definiti come segue

$$\alpha' = 0.6 + \frac{1}{2} \left[ \frac{2kd_n}{\sinh(2kd_n)} \right]^2, \quad (3.3.6)$$

$$\alpha'' = \text{Min} \left[ \left( \frac{d'_n - d'}{3d'_n} \right) \left( \frac{H}{d'} \right)^2, 2 \frac{d'}{H} \right], \quad (3.3.7)$$

$$\alpha''' = 1 - \frac{d}{d_n} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(kd_n)} \right]. \quad (3.3.8)$$

essendo le profondità  $d$ ,  $d'$  e  $d_n$  chiaramente evidenziate nello schema di Figura 3.4 e  $d'_n$  definita come la profondità del fondo naturale ad una distanza di  $5H_s$  dalla diga.

Le relazioni (3.3.2)÷(3.3.5) sono definite quando sono verificate le seguenti condizioni:

$$\frac{d_n}{H_{S0}} \geq 2.4 \quad \text{e} \quad \frac{d_n}{L_0} \geq 0.12, \quad (3.3.9)$$

Qualora, invece, le relazioni (3.3.9) non fossero soddisfatte è necessario tenere conto di un termine aggiuntivo di pressione impulsiva. Di tale valore, mediante lo schema di Goda (1999), si tiene conto nel termine di pressione  $p_{w1}^{(+)}$ , che viene riscritto come segue

$$p_{w1}^{(+)} = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta)(\alpha' + \alpha'' \cos^2 \theta) \gamma_a H, \quad (3.3.10)$$

in cui

$$\alpha^* = \text{Max}\{\alpha'', \alpha_I\}, \quad (3.3.11)$$

essendo il coefficiente  $\alpha''$  definito dalla relazione (3.3.8) e il coefficiente  $\alpha_I$  definito dalla relazione

$$\alpha_I = \alpha_{IH} \alpha_{IB}, \quad (3.3.12)$$

nella quale

$$\alpha_{IH} = \min\left\{\frac{H}{d'}, 2.0\right\}, \quad (3.3.13)$$

$$\alpha_{IB} = \begin{cases} \frac{\cos \delta_2}{\cosh \delta_1} & : \delta_2 \leq 0; \\ \frac{1}{\cosh \delta_1 \cosh^{1/2} \delta_2} & : \delta_2 > 0. \end{cases}, \quad (3.3.14)$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 20 \delta_{11} & : \delta_{11} \leq 0; \\ 15 \delta_{11} & : \delta_{11} > 0. \end{cases}, \quad (3.3.15)$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 4.9 \delta_{22} & : \delta_{22} \leq 0; \\ 3.0 \delta_{22} & : \delta_{22} > 0. \end{cases}, \quad (3.3.16)$$

$$\delta_{11} = 0.93 \left( \frac{B_M}{L} - 0.12 \right) + 0.36 \left( 0.4 - \frac{d'}{d_n} \right), \quad (3.3.17)$$

$$\delta_{22} = -0.36 \left( \frac{B_M}{L} - 0.12 \right) + 0.93 \left( 0.4 - \frac{d'}{d_n} \right), \quad (3.3.18)$$

$B_M$  è la lunghezza tra il piede della diga e la testata della berma di fondazione ed  $L$  la lunghezza dell'onda di progetto.

Le grandezze  $H$ ,  $T$  e  $\theta$  nelle sopradette relazioni (3.3.2)-(3.3.5) e (3.3.10), rappresentano i valori rispettivamente dell'altezza, del periodo e della direzione di propagazione dell'onda di progetto, che secondo quanto previsto dal metodo di Goda sono calcolate come segue:

- $\theta$  è la direzione di propagazione forma con la perpendicolare alla diga; lo schema prevede di assumere  $\theta=0$  se il modulo dell'angolo vero è minore o uguale a  $15^\circ$ , altrimenti tale che  $|\theta| = |\text{angolo vero}| - 15^\circ$ ;
- $T$  è prescritto pari a  $T_{1/3}$ , che è definito come il periodo medio della terza parte di onde più alte dello stato di mare; tale periodo può assumersi, commettendo un errore ammissibile (Boccotti 2000 – Sezione 13.5.1), pari al periodo delle onde più alte (Boccotti 2000 – Sezione 5.7.2),  $T_h$ , che per pure onde di vento con spettro di frequenza di tipo JONSWAP medio (Hasselmann *et al.* 1973) può essere definito come

$$T_h = 0.92T_p, \quad (3.3.19)$$

essendo  $T_p$  il periodo di picco di progetto definito nello Studio Meteomarinio;

- per quanto concerne  $H$  è l'onda di progetto, che nel caso dello schema di Goda (Goda, 1974), è pari a:

$$H = 1.8H_s, \quad (3.3.20)$$

essendo  $H_s$  l'altezza significativa di progetto alla profondità di imbasamento della struttura.

### 3.3.3 Calcolo delle Azioni Stabilizzanti

#### 3.3.3.1 Pesi Propri della Struttura e relativi Momenti

I pesi della struttura e i momenti da essi prodotti sono, infatti, le azioni stabilizzanti che devono garantire gli opportuni coefficienti di sicurezza imposti dalla normativa.

I pesi specifici di riferimento per le diverse parti struttura di cui è composta l'opera sono i seguenti: calcestruzzo  $2.4 \text{ t/m}^3$ ; calcestruzzo armato  $2.5 \text{ t/m}^3$ ; materiale di riempimento singola cella del cassone  $2.2 \text{ t/m}^3$ . Il peso specifico dell'acqua di mare è  $1.03 \text{ t/m}^3$ .

#### 3.3.3.2 Risultante delle Forze Idrodinamiche all'interno delle parti attive dell'impianto REWEC3

Rispetto alle verifiche di stabilità per una classica diga portuale a parete verticale, l'impianto U-OWC impone di considerare anche tutte le forze verticali che si instaurano all'interno del tubo ad U [=condotto verticale+camera di assorbimento], generate per effetto della complessa idrodinamica che si instaura all'interno dell'impianto. Mediante la teoria di Quasi-Determinismo (Boccotti 1981, 1989, 1997, 2000) è, infatti, possibile determinare l'azione sull'impianto dei gruppi di onde di mare più alti, corrispondenti alla formazione di una cresta d'onda o di un'altezza d'onda eccezionalmente alta sulla struttura. Si è assunto che la massima altezza d'onda dei gruppi di onde sia uguale a  $1.8H_s$ , in cui  $H_s$  è l'altezza significativa di progetto alla profondità di imbasamento della struttura.

L'idrodinamica che si innesca all'interno del tubo ad U dell'impianto determina una variazione  $\Delta R_v$  della reazione  $R_v$  del terreno, il cui modulo e verso, a differenza delle normali dighe a parete verticale, può cambiare al variare del tempo poiché l'acqua entra ed esce dall'impianto. Tale variazione della reazione verticale del terreno è prodotta dalle seguenti forze idrodinamiche che si generano all'interno dell'impianto: la portata di quantità di moto attraverso l'imboccatura superiore del condotto verticale, la pressione dinamica agente su tale imbocco, l'inerzia della massa d'acqua all'interno del tubo ad U [definito dal condotto verticale e dalla camera di assorbimento] e la variazione di peso di tale massa.

Il valore massimo della variazione della reazione verticale,  $\Delta R_v$ , si realizza all'incirca in corrispondenza dell'istante in cui avviene l'impatto con la diga della cresta dell'onda più alta del gruppo di onde alte nello stato di mare di progetto. In particolare, a tale istante, che corrisponde alla formazione di una cresta d'onda, la massima  $\Delta R_v$  è positiva e determina perciò un aumento della risultante delle azioni verticali,  $\Delta R_v$ , prodotta da un accumulo di acqua all'interno del tubo ad U e, quindi, da un aumento di peso del cassone. Tale forza, perciò, contribuisce ad aumentare la stabilità globale della struttura.

### 3.3.4 Verifica di Stabilità della Struttura

E', quindi, possibile effettuare le verifiche di stabilità della struttura, che sono eseguite in ipotesi statiche, ovvero si considera che le forze agenti sulla struttura siano di natura statica. A partire da tale presupposto si procede all'analisi delle classiche verifiche di stabilità globale (*Istruzioni Tecniche per la Progettazione delle Dighe Marittime* emanate dal Consiglio Superiore LL.PP., 1995) in cui si tiene conto, per il cassone REWEC3 rispetto ad un tradizionale cassone in c.a, dell'addizionale forza stabilizzante  $\Delta R_v$ .

Le verifiche di stabilità della struttura risultano, perciò, essere:

- Verifica a Scorrimento, secondo cui si deve verificare che il coefficiente di sicurezza a scorrimento della struttura progettata

$$C_S = \frac{\mu (R_V + \Delta R_V)}{|R_0|} = \frac{\mu (Peso + \Delta R_V - S_w^{(+)})}{|F_w^{(+)}|} \quad (3.3.21)$$

sia maggiore di un valore minimo fissato dalla normativa italiana pari a :

$$C_{S,\min} = 1.4 \quad (3.3.22)$$

Nella relazione (3.21),  $\mu$  è il coefficiente di attrito cassone-imbasamento, assunto uguale a 0.6 come prescritto dalle Istruzioni Tecniche (1995),  $R_V$  è la risultante delle forze verticali, uguale alla differenza tra il peso totale della struttura e la sottospinta instabilizzante prodotta dall'onda, ed  $R_0$  è la risultante delle forze orizzontali, uguale alla risultante della forza di pressione prodotta dall'onda.

- Verifica a Ribaltamento, secondo cui si deve verificare che il coefficiente di sicurezza a ribaltamento della struttura progettata

$$C_R = \frac{M_{STAB}}{M_{RIB}} = \frac{M_{Peso} + M_{\Delta R_V}}{(M_{F_w^{(+)}} + M_{S_w^{(+)}})} \quad (3.3.23)$$

sia maggiore di un valore minimo fissato dalla normativa italiana pari a :

$$C_{R,\min} = 1.5 \quad (3.3.24)$$

Nella relazione (3.23),  $M_{STAB}$  è il momento stabilizzante totale che agisce sulla struttura, prodotto dalla forza peso e dalla variazione  $\Delta R_V$  dovuta alle forze idrodinamiche che si instaurano all'interno dell'impianto REWEC3;  $M_{RIB}$  è il momento ribaltante totale, prodotto dalle forze instabilizzanti dovute all'onda.

- Verifica a Schiacciamento, consiste nella verifica che la pressione massima sull'imbasamento,  $q_{max}$ , sia inferiore al carico di sicurezza,  $q_{amm}$ , fissato dalla normativa italiana pari a

$$q_{amm} = 50 \div 55 t / m^2. \quad (3.3.25)$$

Per calcolare la pressione massima sull'imbasamento, si deve calcolare l'eccentricità,  $e$ , della risultante delle forze verticali, ovvero la distanza tra il punto d'applicazione della risultante delle forze verticali sulla base e il polo di rotazione, e determinare se questa è esterna o interna al nocciolo centrale d'inerzia della sezione di base.

Essendo l'eccentricità,  $e$ , della risultante delle forze verticali definita come:

$$e = \frac{M_{STAB} - M_{RIB}}{(R_V + \Delta R_V)} = \frac{[M_{Peso} + M_{\Delta R_V}] - [M_{F_w^{(+)}} + M_{S_w^{(+)}}]}{(R_V + \Delta R_V)}, \quad (3.3.26)$$

si ha che, qualora la risultante delle forze verticali cade fuori dal terzo medio della base ( $e < B/3$ ) la sezione è parzializzata e

$$q_{max} = \frac{2(R_V + \Delta R_V)}{3e B_x}. \quad (3.3.27)$$

in cui  $B_x$  è la lunghezza longitudinale della base della struttura.

### 3.3.5 Stabilità globale dei cassone REWEC3 nelle località oggetto di studio

Per tutte e tre le località: Porto Pischera in Sardegna, Pantelleria, Genova, oggetto di studio, è stata considerata una configurazione standard della porzione attiva della struttura, avente larghezza del condotto verticale di 2m, larghezza della camera di assorbimento di 4m, altezza della luce di collegamento condotto verticale/camera di assorbimento di 3m, affondamento della quota superiore del condotto verticale di 2m. Tale geometria è tale da garantire soddisfacenti rese di conversione di moto ondoso incidente per il Mare Mediterraneo. La parte tradizionale del cassone REWEC3 è stata, invece, dimensionata, affinché la struttura nel complesso assolvere al requisito della stabilità globale sotto l'azione degli eventi massimi.

#### 3.3.5.1 Porto Pischera in Sardegna

Per la località di Porto Pischera lungo la costa Sud-Ovest della Sardegna, l'onda di progetto alla profondità di progetto della struttura,  $d=18m$ , è stata assunta pari a

$$T = T_h = 11.8s, \quad (3.3.28a)$$

$$H_S = 8.3m, \quad (3.3.28b)$$

$$H = 14.9m, \quad (3.3.28c)$$

$$\eta_{\max} = 22.4m. \quad (3.3.28d)$$

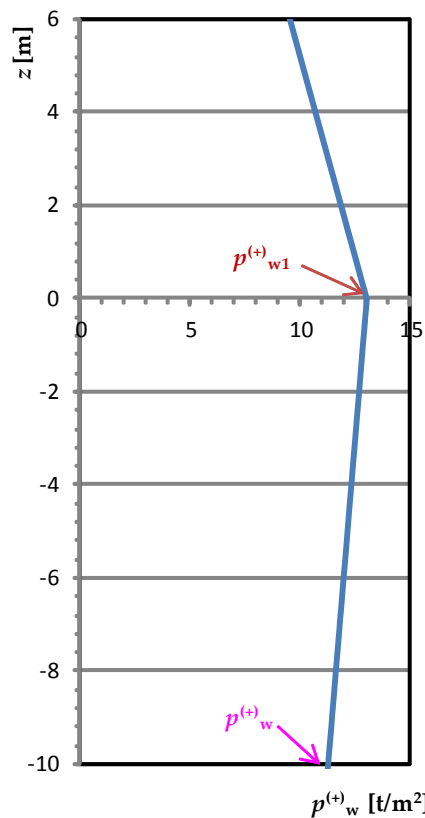
Tutte le grandezze sono state ricavate facendo riferimento allo schema di Goda. Esse sono tali per cui le condizioni (3.3.9) risultano soddisfatte.

Il diagramma della distribuzione delle pressioni in fase di cresta, agenti per unità di lunghezza della struttura, ottenuto applicando il metodo di Goda, è riportato in Figura 3.6, in cui

$$p_{w1}^{(+)} = 13.02 t/m^2, \quad (3.3.29a)$$

$$p_w^{(+)} = 9.86 t/m^2, \quad (3.3.29b)$$

$$p_{w2}^{(+)} = 8.88 t/m^2. \quad (3.3.29c)$$



**Figura 3.6** Distribuzione delle pressioni prodotte dall'onda in fase di cresta, calcolata secondo lo schema di Goda (1974, 1999, 2000), per stato di mare di progetto per la località di Porto Pischera (Sardegna).

Le relative forze instabilizzanti, dovute alla sovrappressione prodotta dall'onda massima in fase di cresta ed agenti sull'intera struttura, sono:

- forza orizzontale:  $F_w^{(+)} = 5.829,00 t,$  (3.3.30)

- sottospinta:  $S_w^{(+)} = 2.844,00 t.$  (3.3.31)

I rispettivi momenti instabilizzanti sono:

- momento della forza orizzontale:  $M_{Fw}^{(+)} = 75.928,00 tm,$  (3.3.32)

- momento della sottospinta:  $M_{Sw}^{(+)} = 62.570,00 tm.$  (3.3.33)

Per la località di Porto Pischera la parte tradizionale del cassone REWEC3 sulla profondità di progetto d=18m, sarà definito da una larghezza complessiva secondo la direzione longitudinale parallela alla direzione di propagazione delle onde di 34m e da una larghezza complessiva secondo la direzione trasversale al moto ondoso incidente di 20m. Secondo la direzione longitudinale sarà costituito da 4 celle e secondo quella trasversale da 5 celle. Le dimensioni della struttura sono riportate in Figura A.1 dell' Allegato A, incluso alla fine del presente rapporto.

**Tabella 3.1** Pesì e Momenti stabilizzanti per la configurazione del REWEC3 di Figura A.1 dimensionata per la località di Porto Pischera (Sardegna).

<b>COMPUTO DEI PESI e dei MOMENTI STABILIZZANTI in Fase di Cresta d'Onda</b>			
1	Peso Alleggerito Piastrone di base in c.a.	t	752.64
2	Peso Alleggerito Mensolotti di base in c.a.	t	47.04
3	Peso Complessivo n.15 Celle Cassone Tradizionale riempite con Materiale avente peso specif. 2.2t/mc	t	9,673.44
4	Peso Complessivo Setti Trasversali e Longitudinali in c.a.	t	3,005.26
5	Peso Complessivo Setti di raccordo in c.a.	t	38.79
6	Peso Copertura in c.a. Camera di Assorbimento	t	113.63
7	Peso Sovrastruttura in c.a. sopra l.m.m.	t	1,833.75
9	Peso magrone in cemento nella parte attiva	t	1,282.32
<b>PESO TOTALE</b>			<b>t 16,746.86</b>
1	Momento Complessivo Setti Trasversali e Longitudinali in c.a.	tm	57,470.52
2	Momento Mensolotti	tm	823.20
3	Momento Complessivo n.15 Celle Cassone Tradizionale riempite con Materiale avente peso specif. 2.2t/mc	tm	76,405.03
4	Momento magrone nella parte modificata	tm	33,382.00
5	Momento sovrastruttura in c.a. sopra l.m.m	tm	28,074.66
6	Momento alleggerito piastrone di base	tm	12,794.88
<b>MOMENTO STABILIZZANTE TOTALE</b>			<b>tm 208,950.28</b>

Il singolo cassone cellulare di progetto di tipo REWEC3 per la località di Porto Pischera risulta soddisfare le verifiche di stabilità menzionate con i seguenti coefficienti

- *coefficiente a scorrimento*:  $C_{S-\text{cass REWEC3}} = 1,43$ ; (3.3.34a)

- *coefficiente a ribaltamento*:  $C_{R-\text{cass REWEC3}} = 1,51$ . (3.3.34b)

- *pressione massima*:  $q_{\text{max-cass REWEC3}} = 57,00t/m^2$  con sezione di carico parzializzata. (3.3.34c)

La struttura risulta, in definitiva, ben verificata a stabilità globale.

### 3.3.5.2 Pantelleria

Per la località di Pantelleria, l'onda di progetto alla profondità di progetto della struttura,  $d=18m$ , è stata assunta pari a

$$T = T_h = 10.96s, \quad (3.3.35a)$$

$$H_S = 7.14m, \quad (3.3.35b)$$

$$H = 12.86m, \quad (3.3.35c)$$

$$\eta_{\text{max}} = 19.29m. \quad (3.3.35d)$$

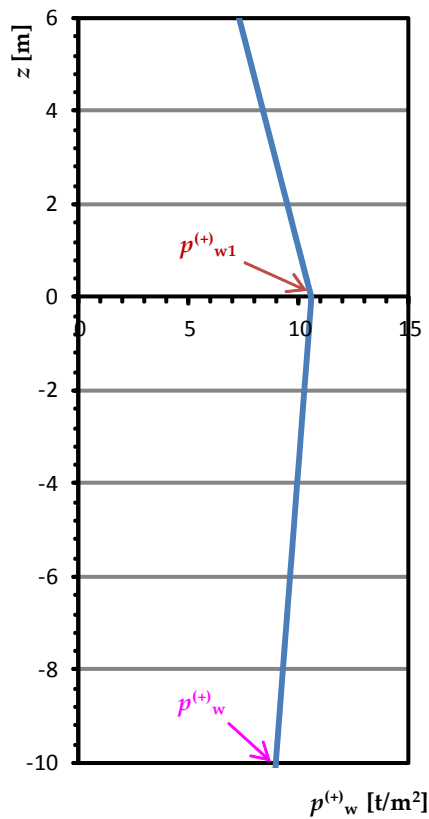
Tutte le grandezze sono state ricavate facendo riferimento allo schema di Goda. Esse sono tali per cui le condizioni (3.3.9) risultano soddisfatte.

Il diagramma della distribuzione delle pressioni in fase di cresta, agenti per unità di lunghezza della struttura, ottenuto applicando il metodo di Goda, è riportato in Figura 3.7, in cui

$$p_{w1}^{(+)} = 10.52t/m^2, \quad (3.3.36a)$$

$$p_w^{(+)} = 7.61t/m^2, \quad (3.3.36b)$$

$$p_{w2}^{(+)} = 7.02t/m^2. \quad (3.3.36c)$$



**Figura 3.7** Distribuzione delle pressioni prodotte dall’onda in fase di cresta, calcolata secondo lo schema di Goda (1974, 1999, 2000), per stato di mare di progetto per Pantelleria.

Le relative forze instabilizzanti, dovute alla sovrappressione prodotta dall’onda massima in fase di cresta ed agenti sull’intera struttura, sono:

- *forza orizzontale:*  $F_w^{(+)} = 4.597,00 t,$  (3.3.37)

- *sottospinta:*  $S_w^{(+)} = 1.721,00 t.$  (3.3.38)

I rispettivi momenti instabilizzanti sono:

- *momento della forza orizzontale:*  $M_{F_w}^{(+)} = 59.819,00 tm,$  (3.3.39)

- *momento della sottospinta:*  $M_{S_w}^{(+)} = 29.266,00 tm.$  (3.3.40)

Per Pantelleria la parte tradizionale del cassone REWEC3 sulla profondità di progetto  $d=18m$ , sarà definito da una larghezza complessiva secondo la direzione longitudinale parallela alla direzione di propagazione delle onde di 26.5m e da una larghezza complessiva secondo la direzione trasversale al moto ondoso incidente di 20m. Secondo la direzione longitudinale sarà costituito da 3 celle e secondo quella

trasversale da 5 celle. Le dimensioni della struttura sono riportate in Figura A.2 dell' Allegato A, incluso alla fine del presente rapporto.

**Tabella 3.2** Pesì e Momenti stabilizzanti per la configurazione del REWEC3 di Figura A.2 dimensionata per Pantelleria.

<b>COMPUTO DEI PESI e dei MOMENTI STABILIZZANTI in Fase di Cresta d'Onda</b>			
1	Peso Alleggerito Piastrone di base in c.a.	t	576.24
2	Peso Alleggerito Mensolotti di base in c.a.	t	47.04
3	Peso Complessivo n.15 Celle Cassone Tradizionale riempite con Materiale avente peso specif. 2.2t/m <sup>3</sup>	t	6,674.88
4	Peso Complessivo Setti Trasversali e Longitudinali in c.a.	t	2,569.61
5	Peso Complessivo Setti di raccordo in c.a.	t	38.79
6	Peso Copertura in c.a. Camera di Assorbimento	t	113.63
7	Peso Sovrastruttura in c.a. sopra l.m.m.	t	1,271.25
9	Peso magrone in cemento nella parte attiva	t	1,282.32
<b>PESO TOTALE</b>			<b>t 12,573.75</b>
1	Momento Complessivo Setti Trasversali e Longitudinali in c.a.	tm	39,630.19
2	Momento Mensolotti	tm	646.80
3	Momento Complessivo n.15 Celle Cassone Tradizionale riempite con Materiale avente peso specif. 2.2t/m <sup>3</sup>	tm	65,580.66
4	Momento magrone nella parte modificata	tm	24,822.51
5	Momento sovrastruttura in c.a. sopra l.m.m	tm	14,819.34
6	Momento alleggerito piastrone di base	tm	7,635.18
<b>MOMENTO STABILIZZANTE TOTALE</b>			<b>tm 153,134.68</b>

Il singolo cassone cellulare di progetto di tipo REWEC3 per Pantelleria risulta soddisfare le verifiche di stabilità menzionate con i seguenti coefficienti

- *coefficiente a scorrimento*:  $C_{S-cass\ REWEC3} = 1,42;$  (3.3.41a)

- *coefficiente a ribaltamento*:  $C_{R-cass\ REWEC3} = 1,72.$  (3.3.41b)

- *pressione massima*:  $q_{max-cass\ REWEC3} = 60,00t / m^2$  con sezione di carico parzializzata.(3.3.41c)

La struttura risulta, in definitiva, ben verificata a stabilità globale.

### 3.3.5.3 Genova

Per la località di Genova, l'onda di progetto alla profondità di progetto della struttura,  $d=18m$ , è stata assunta pari a

$$T = T_h = 9.88s, \quad (3.3.42a)$$

$$H_S = 5.80m, \quad (3.3.42b)$$

$$H = 10.44m, \quad (3.3.42c)$$

$$\eta_{\max} = 15.65m. \quad (3.3.42d)$$

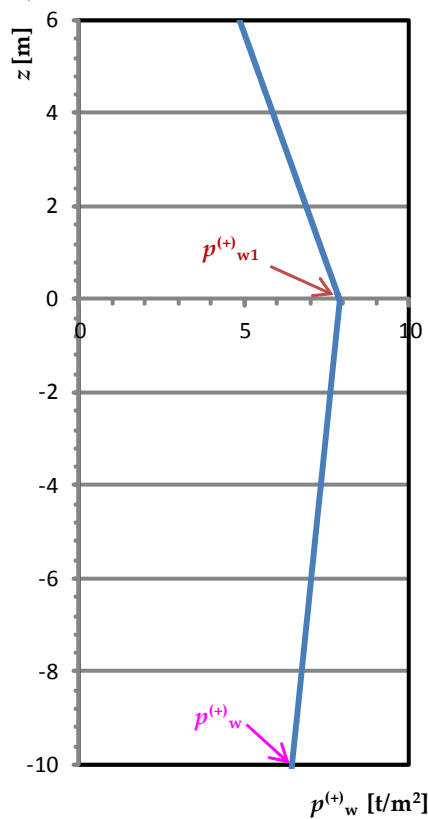
Tutte le grandezze sono state ricavate facendo riferimento allo schema di Goda. Esse sono tali per cui le condizioni (3.3.9) risultano soddisfatte.

Il diagramma della distribuzione delle pressioni in fase di cresta, agenti per unità di lunghezza della struttura, ottenuto applicando il metodo di Goda, è riportato in Figura 3.8, in cui

$$p_{w1}^{(+)} = 7.87 t / m^2, \quad (3.3.43a)$$

$$p_w^{(+)} = 5.27 t / m^2, \quad (3.3.43b)$$

$$p_{w2}^{(+)} = 4.97 t / m^2. \quad (3.3.43c)$$



**Figura 3.8** Distribuzione delle pressioni prodotte dall'onda in fase di cresta, calcolata secondo lo schema di Goda (1974, 1999, 2000), per stato di mare di progetto per la località di Genova.

Le relative forze instabilizzanti, dovute alla sovrappressione prodotta dall'onda massima in fase di cresta ed agenti sull'intera struttura, sono:

- *forza orizzontale:*  $F_w^{(+)} = 2.475,00 t,$  (3.3.44)

- *sottospinta:*  $S_w^{(+)} = 673,00 t.$  (3.3.45)

I rispettivi momenti instabilizzanti sono:

- *momento della forza orizzontale:*  $M_{Fw}^{(+)} = 32.147,00 tm,$  (3.3.46)

- *momento della sottospinta:*  $M_{Sw}^{(+)} = 8.525,00 tm.$  (3.3.47)

Per la località di Genova la parte tradizionale del cassone REWEC3 sulla profondità di progetto  $d=18m$ , sarà definito da una larghezza complessiva secondo la direzione longitudinale parallela alla direzione di propagazione delle onde di 20m e da una larghezza complessiva secondo la direzione trasversale al moto ondoso incidente di 15m. Secondo la direzione longitudinale sarà costituito da 3 celle e secondo quella trasversale da 5 celle. Le dimensioni della struttura sono riportate in Figura A.3 dell'Allegato A, incluso alla fine del presente rapporto.

**Tabella 3.3** Pesì e Momenti stabilizzanti per la configurazione del REWEC3 di Figura A.3 dimensionata per la località di Genova.

<b>COMPUTO DEI PESI e dei MOMENTI STABILIZZANTI in Fase di Cresta d'Onda</b>			
1	Peso Alleggerito Piastrone di base in c.a.	t	317.52
2	Peso Alleggerito Mensolotti di base in c.a.	t	35.28
3	Peso Complessivo n.15 Celle Cassone Tradizionale riempite con Materiale avente peso specif. 2.2t/mc	t	2,916.63
4	Peso Complessivo Setti Trasversali e Longitudinali in c.a.	t	1,933.20
5	Peso Complessivo Setti di raccordo in c.a.	t	38.79
6	Peso Copertura in c.a. Camera di Assorbimento	t	85.22
7	Peso Sovrastruttura in c.a. sopra l.m.m.	t	587.81
9	Peso magrone in cemento nella parte attiva	t	961.74
<b>PESO TOTALE</b>			<b>t 6,876.19</b>
1	Momento Complessivo Setti Trasversali e Longitudinali in c.a.	tm	21,859.97
2	Momento Mensolotti	tm	370.44
3	Momento Complessivo n.15 Celle Cassone Tradizionale riempite con Materiale avente peso specif. 2.2t/mc	tm	19,176.85
4	Momento magrone nella parte modificata	tm	12,515.44
5	Momento sovrastruttura in c.a. sopra l.m.m	tm	5,057.93
6	Momento alleggerito piastrone di base	tm	3,175.20
<b>MOMENTO STABILIZZANTE TOTALE</b>			<b>tm 62,155.83</b>

Il singolo cassone cellulare di progetto di tipo REWEC3 per la località di Genova risulta soddisfare le verifiche di stabilità menzionate con i seguenti coefficienti

- *coefficiente a scorrimento*:  $C_{S\text{-cass REWEC3}} = 1,50$ ; (3.3.48a)

- *coefficiente a ribaltamento*:  $C_{R\text{-cass REWEC3}} = 1,53$ . (3.3.48b)

- *pressione massima*:  $q_{\text{max-cass REWEC3}} = 52,00t / m^2$  con sezione di carico parzializzata.(3.3.48c)

La struttura risulta, in definitiva, ben verificata a stabilità globale.

## 4. STIME DI MASSIMA DELLA PRODUZIONE DI ENERGIA DI UN IMPIANTO REWEC3/3 A CELLE INDIPENDENTI

### 4.1 Stime di assorbimento di energia ondosa e produzione di energia elettrica

#### 4.4.1 Frazione media-annua di energia ondosa assorbita

La frazione media-annua di energia ondosa assorbita, in un'assegnata località, è definita dalla seguente relazione

$$\bar{C}_a = \frac{\sum_i \sum_j \sum_k N[H_{S_{0(i)}}, T_{p(j)}, \bar{\theta}_{0(k)}] C_a[H_{S_{(i,j,k)}}, T_{p(j)}, \bar{\theta}_{(j,k)}] \bar{\Phi}_{in}[H_{S_{(i,j,k)}}, T_{p(j)}, \bar{\theta}_{(j,k)}]}{\sum_i \sum_j \sum_k N[H_{S_{0(i)}}, T_{p(j)}, \bar{\theta}_{0(k)}] \bar{\Phi}_{in}[H_{S_{(i,j,k)}}, T_{p(j)}, \bar{\theta}_{(j,k)}]} \quad (4.1.1)$$

in cui

- $N$  è il numero di registrazioni in cui gli stati di mare, nella località in esame, hanno, su alti fondali, altezza significativa  $H_{S0}$  compresa nel seguente intervallo  $H_{S_{0(i)}} - \Delta H_S / 2 < H_{S_0} < H_{S_{0(i)}} + \Delta H_S / 2$ , periodo di picco  $T_p$  definito nell'intervallo  $T_{p(j)} - \Delta T_p / 2 < T_p < T_{p(j)} + \Delta T_p / 2$ , e direzione dominante di propagazione del moto ondoso riferita al Nord  $\bar{\theta}_0$  appartenente al seguente range  $\bar{\theta}_{0(k)} - \Delta \bar{\theta} / 2 < \bar{\theta}_0 < \bar{\theta}_{0(k)} + \Delta \bar{\theta} / 2$ ;
- $C_a$  è il coefficiente di assorbimento relativo agli stati di mare con altezza significativa  $H_S$  compresa nell'intervallo  $H_{S_{(i)}} - \Delta H_S / 2 < H_S < H_{S_{(i)}} + \Delta H_S / 2$ , periodo di picco  $T_p$  definito nell'intervallo  $T_{p(j)} - \Delta T_p / 2 < T_p < T_{p(j)} + \Delta T_p / 2$ , e direzione dominante di propagazione del moto ondoso riferita al Nord  $\bar{\theta}$  appartenente al seguente range  $\bar{\theta}_{(k)} - \Delta \bar{\theta} / 2 < \bar{\theta} < \bar{\theta}_{(k)} + \Delta \bar{\theta} / 2$ . Tutte le grandezze sono relative alla profondità di imbasamento della diga – sul calcolo di tale coefficiente sarà discusso di seguito;
- $\bar{\Phi}_{in}$  è il flusso medio delle onde incidenti in un anno relativo allo stato di mare con altezza significativa  $H_S$  compresa nell'intervallo  $H_{S_{(i)}} - \Delta H_S / 2 < H_S < H_{S_{(i)}} + \Delta H_S / 2$ , periodo di picco  $T_p$  definito nell'intervallo  $T_{p(j)} - \Delta T_p / 2 < T_p < T_{p(j)} + \Delta T_p / 2$ , e direzione dominante di propagazione del moto ondoso riferita al Nord  $\bar{\theta}$  appartenente al seguente range  $\bar{\theta}_{(k)} - \Delta \bar{\theta} / 2 < \bar{\theta} < \bar{\theta}_{(k)} + \Delta \bar{\theta} / 2$ . Tutte le grandezze sono relative alla profondità di imbasamento della diga.

La relazione (3.3.49) consente di computare la frazione di energia assorbita relativa sia a pure onde di vento che a onde di mare lungo che interagiscono con l'impianto.

Per quanto riguarda il coefficiente di assorbimento  $C_a$ , questo è definito uguale alla frazione di energia assorbita dall'impianto rispetto all'energia associata al moto ondoso incidente

$$C_a = \frac{\text{energia assorbita dall'impianto}}{\text{energia che investe la singola cella dall'impianto}} = \frac{P_{pl}}{\Phi_{in}} \quad (4.1.2)$$

essendo  $\Phi_{in}$  il flusso associato al moto ondoso incidente e relativo alla singola cella e  $P_{pl}$  la potenza istantanea assorbita dall'impianto, che è valutata mediante la seguente espressione

$$P_{pl} = Q_p \cdot \Delta p \quad (4.1.3)$$

in cui  $\Delta p$  è la fluttuazione di pressione all'imboccatura del condotto verticale e  $Q_p$  è la portata istantanea d'acqua all'interno dell'impianto, che è uguale nel condotto verticale e nella camera di assorbimento, e, quindi, attraverso l'equazione di continuità può essere valutata mediante la seguente relazione

$$Q_p = -S'' \frac{d\xi}{dt} \quad (4.1.4)$$

in cui  $S''$  è l'area della camera di assorbimento,  $\xi$  è la quota istantanea dell'aria all'interno del polmone d'aria della camera di assorbimento ed il segno negativo deriva dal fatto che la portata è definita positiva se entrante dall'imboccatura superiore del condotto verticale mentre il livello del polmone d'aria è definito positivo quando il livello dell'acqua scende essendo il sistema di riferimento posto al contrario.

Per potere stimare il coefficiente di assorbimento  $C_a$  si è utilizza una procedura iterativa, che è una schematizzazione del ingegneristica verificatasi efficace. Alla prima iterazione si può fissare il coefficiente assorbimenti nullo -  $C_a=0$  – tale condizione equivale a considerare l'impianto come una tradizionale diga davanti alla quale si instaura una riflessione totale del moto ondoso incidente (coefficiente di riflessione unitario,  $C_R = 1$ ). A tale configurazione sono associate le massime ampiezze delle fluttuazioni di pressione che si possono realizzare sull'imboccatura del condotto verticale, a cui corrisponde la massima energia assorbita dall'impianto a parità di periodo. Si rende noto così il valore della fluttuazione del carico di pressione,  $\Delta p$ , all'imboccatura superiore del condotto verticale a partire da cui integrando l'equazione differenziale (3.2.3) del moto all'interno del condotto ad U dell'impianto è possibile calcolare la portata d'acqua all'interno dell'impianto,  $Q_p(t)$ , conoscendo così la risposta completa dell'impianto. A partire da tale valore è possibile stimare un nuovo valore del coefficiente di assorbimento  $C_a$ , mediante la relazione (3.3.49) e ripetere il ragionamento, fino a quando si ha la convergenza del processo innescato.

Le fluttuazioni del carico di pressione,  $\Delta p$ , all'imboccatura superiore del condotto verticale sono simulate numericamente assumendo un processo aleatorio, stazionario e Gaussiano e adottando la procedura numerica di Phillips (1967) e Borgman (1969).

## 4.2 Produzione media-annua di energia elettrica prodotta

La produzione media annua di energia elettrica, ottenuta mediante conversione di energia associata al moto ondoso incidente, è determinata mediante la relazione

$$\mathcal{E} = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{N[H_{S_{0(i)}}, T_{p(j)}, \bar{\theta}_{0(k)}]}{N_{TOT}} \Delta t_{\text{anno}} \mathcal{P}[H_{S(i,j,k)}, T_{p(j)}, \bar{\theta}_{(j,k)}] \quad (4.1.5)$$

in cui

- $N$  è il numero di registrazioni in cui gli stati di mare, nella località in esame, hanno, su alti fondali, altezza significativa  $H_{S0}$  compresa nel seguente intervallo  $H_{S_{0(i)}} - \Delta H_S / 2 < H_{S_0} < H_{S_{0(i)}} + \Delta H_S / 2$ , periodo di picco  $T_p$  definito nell'intervallo  $T_{p(j)} - \Delta T_p / 2 < T_p < T_{p(j)} + \Delta T_p / 2$ , e direzione dominante di propagazione del moto ondoso riferita al Nord  $\bar{\theta}_0$  appartenente al seguente range  $\bar{\theta}_{0(k)} - \Delta \bar{\theta} / 2 < \bar{\theta}_0 < \bar{\theta}_{0(k)} + \Delta \bar{\theta} / 2$ ;
- $N_{TOT}$  è il numero di registrazioni totali;
- $\Delta t_{\text{anno}}$  è la durata di tempo in un anno;
- $\mathcal{P}[H_{S(i,j,k)}, T_{p(j)}, \bar{\theta}_{(j,k)}]$  è la potenza elettrica media prodotta da uno stato di mare avente altezza significativa  $H_S$  compresa nell'intervallo  $H_{S(i)} - \Delta H_S / 2 < H_S < H_{S(i)} + \Delta H_S / 2$ , periodo di picco  $T_p$  definito nell'intervallo  $T_{p(j)} - \Delta T_p / 2 < T_p < T_{p(j)} + \Delta T_p / 2$ , e direzione dominante di propagazione del moto ondoso riferita al Nord  $\bar{\theta}$  appartenente al seguente range  $\bar{\theta}_{(k)} - \Delta \bar{\theta} / 2 < \bar{\theta} < \bar{\theta}_{(k)} + \Delta \bar{\theta} / 2$ .  
Tutte le grandezze sono relative alla profondità di imbasamento della diga.

La potenza elettrica associata ad ogni stato di mare è valutata mediante la seguente relazione

$$\mathcal{P} = \mathcal{R}(u_*) \frac{1}{2} (\rho_a + \rho_{\text{atm}}) g \frac{\pi(D^2 - D_{in}^2)}{4} u_a \Delta h_T \quad (4.1.6)$$

in cui figurano

- il rendimento della turbina,  $\mathcal{R}(u_*)$ ;
- la perdita di carico,  $\Delta h_T$ , della turbina self-rectifying di tipo Wells, che si valuta mediante la relazione

$$\Delta h_T = \mathcal{N}(u_*) \frac{(\omega R)^2}{2g} \frac{u_a}{|u_a|} \quad (4.1.7)$$

dove:

- $\omega$  è la velocità angolare della turbina;
- $R$  è il raggio della turbina;

- $u_a$  (positiva se esce) è la velocità dell'aria nel condotto che collega la camera di assorbimento alle turbine;
- $\mathcal{N}(u_*)$  è una funzione monotona crescente nel campo considerato ed i valori che essa assume, così come per il rendimento della turbina  $\mathcal{R}(u_*)$ , sono tabellati in alcuni abachi (vedi Curran e Gato, 1997) in funzione di  $u_*$  che una grandezza definita come segue

$$u_* = \frac{u_a}{\omega R} \quad (4.1.8)$$

Gli abachi a cui si è fatto riferimento sono relativi a condizioni stazionarie, questo perché è molto difficile generare in laboratorio le correnti alterne che si generano in questi impianti; correnti che si attenuano con il periodo di oscillazione delle onde.

### 4.3 Efficienza

E' possibile, infine, stimare l'efficienza dell'impianto come

$$A_p = \frac{\text{potenza elettrica prodotta dall'impianto}}{\text{flusso di energia delle onde incidenti}} \quad (4.1.9)$$

### 4.4 Stime di massima per un REWEC3 a celle comunicanti per le tre località oggetto di studio

Nella sezione precedente si è proceduto al dimensionamento di massima di un cassone REWEC3 per le località di Porto Pischera in Sardegna (Figure 3.7a-b), di Pantelleria (Figure 3.9a-b) e di Genova (Figure 3.11a-b). Nella presente sezione, invece, si effettueranno per le località considerate le stime di produzione di energia di massima degli impianti. Si ritiene opportuno ricordare che per tutte le località è stata considerata una configurazione standard della porzione attiva della struttura, definita da una larghezza del condotto verticale di 2m, da una larghezza della camera di assorbimento di 4m, da un'altezza della luce di collegamento condotto verticale/camera di assorbimento di 3m e da un'affondamento della quota superiore del condotto verticale di 2m. Tale geometria è tale da garantire soddisfacenti rese di conversione di moto ondoso incidente per il Mare Mediterraneo.

Nello specifico si considereranno le stime di produzione per le tre configurazioni di REWEC3 analizzate, aventi le celle di assorbimento comunicanti tra di loro, in maniera tale che si assume che una turbina di tipo Wells è messa in comunicazione con 3 celle adiacenti. Le caratteristiche della turbina monopiana sono: un diametro di 1.5m e una velocità angolare di 3.000giri/minuto.

Con queste caratteristiche le rese energetiche dell'impianto REWEC3 in termini di energia assorbita (Eq. 4.1.1) ed efficienza energetica (Eq. 4.1.9) sono riportate in Tabella 4.1 per il caso di onde di vento e in Tabella 4.2 per il caso di onde di mare lungo (swells). Gli andamenti sono riportati in Figura 4.1 e 4.2. Si

tratta di dati estratti dal lavoro proposto da Boccotti (2007), sul confronto tra un REWEC3 e un OWC tradizionale.

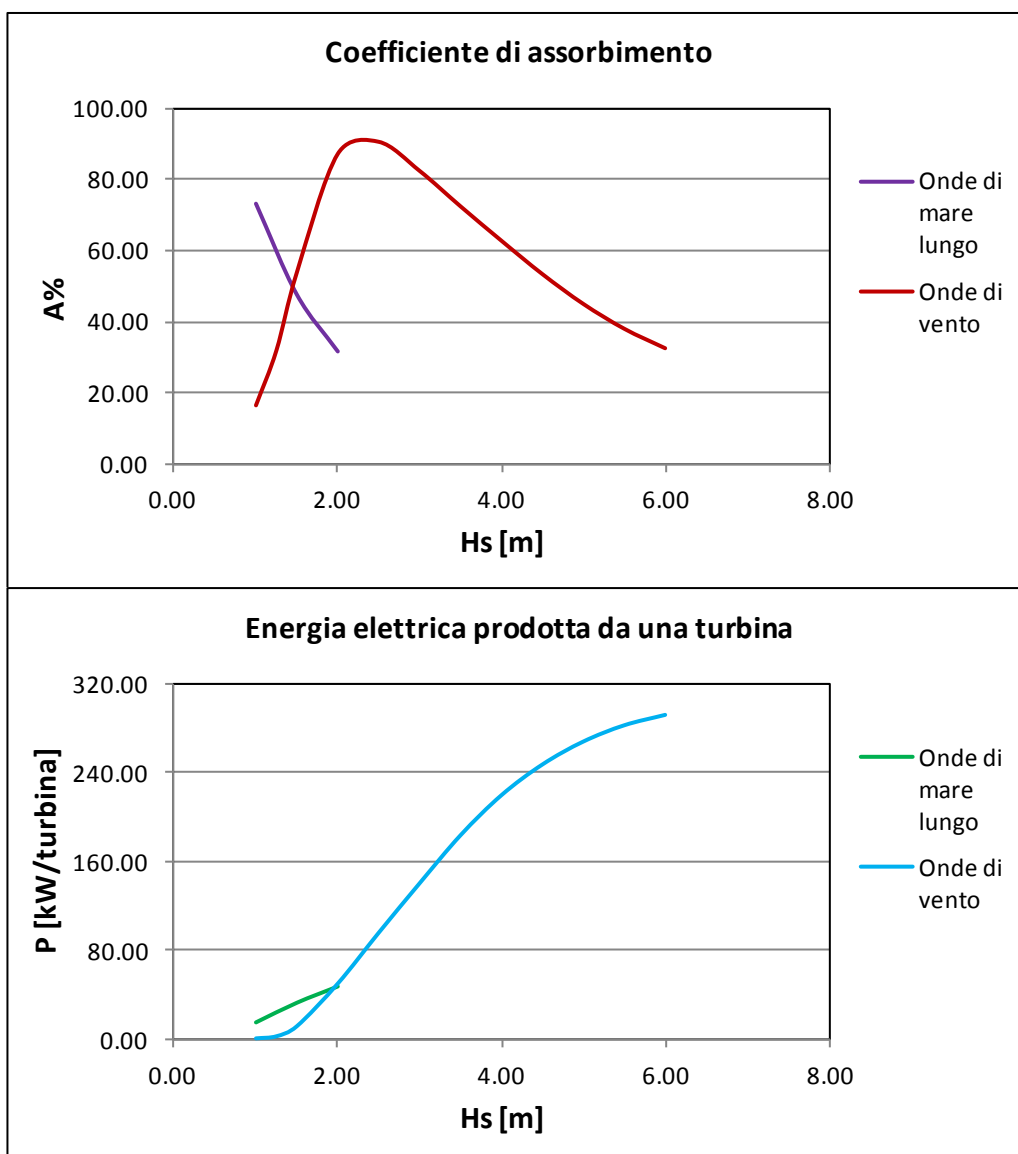
**Tabella 4.1** Rese energetiche di un REWEC3 a celle comunicanti nel caso di pure onde di vento.

	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$A\%$	$P$ [kW/turbina]	$A_p\%$
U-OWC	1.00	4.05	16.40	0.00	0.10
	1.25	4.53	31.90	1.90	4.10
	1.50	4.97	53.90	11.00	14.90
	2.00	5.74	87.30	49.50	31.90
	2.50	6.41	90.70	95.40	34.10
	3.00	7.02	82.50	140.10	30.80
	3.50	7.58	72.50	183.50	26.70
	4.00	8.11	62.80	219.70	22.50
	4.50	8.60	53.40	247.40	18.70
	5.00	9.06	45.00	268.10	15.40
	5.50	9.51	38.00	282.80	12.80
	6.00	9.93	32.50	292.20	10.70

**Tabella 4.2** Rese energetiche di un REWEC3 a celle comunicanti nel caso di onde di mare lungo.

	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$A\%$	$P$ [kW/turbina]	$A_p\%$
U-OWC	1.00	7.54	73.10	14.40	23.80
	1.50	9.24	47.50	32.70	19.40
	2.00	10.70	31.50	47.90	14.10

Il REWEC3 risulta molto efficiente sotto l'azione delle onde di mare lungo. Per le basse soglie di altezza significativa l'assorbimento e la produzione di energia aumenta rispetto a quelle delle pure onde di vento. Per  $H_s=1\text{m}$  possono aumentare anche di 4,5 volte.



**Figura 4.1** Rese energetiche di un REWEC3 a celle comunicanti nel caso di onde di vento e di onde di mare lungo.

A seguito delle analisi svolte fin qui, è possibile associare a ciascuna onda rappresentativa del clima medio sottocosta, per i tre siti in esame, la corrispondente componente di produzione di energia con il sistema U-OWC. In particolare, ad ogni valore di altezza d’onda (Hs) corrisponde un valore di potenza sviluppata (P). L’energia prodotta, relativa a ciascuna componente del clima medio, si ottiene moltiplicando la potenza per la frequenza di apparizione dell’onda considerata. La somma della energia prodotta da tutte le componenti rappresentative del clima fornisce la stima della produzione media annua.

Risulta opportuno specificare che i risultati così ottenuti sono relativi alla produzione di energia della singola turbina. Data la configurazione del sistema U-OWC qui considerato, ovvero una turbina ogni 3 celle,

la stima della energia prodotta per unità di lunghezza può essere eseguita dividendo il valore della produzione media per la distanza tra le turbine, ovvero circa 13m.

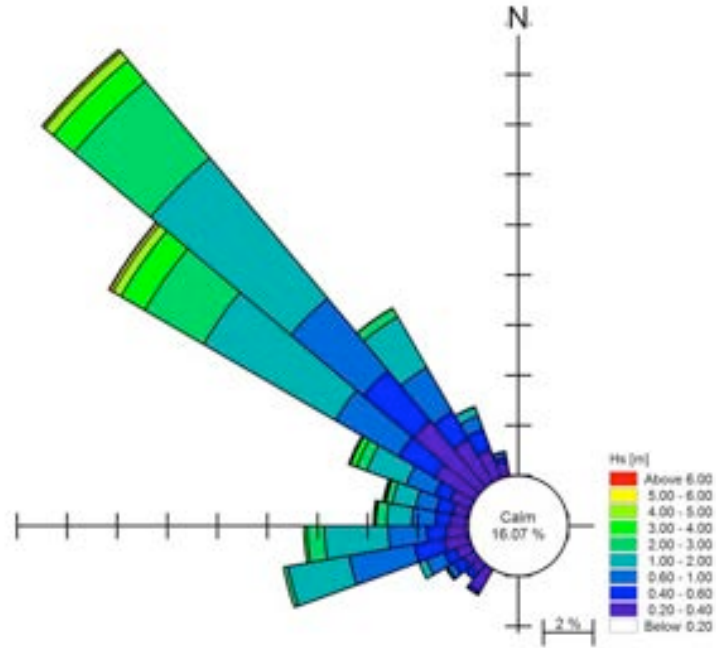
I risultati della procedura descritta per i tre siti in esame, mostrati nella Tabella 4.3, evidenziano che sia il sito di Porto Pischera che quello di Pantelleria garantiscono una elevata produzione di energia. Al contrario il sito di Genova fornisce valori di produzione tra 4 e 5 volte più bassi rispetto a quelli degli altri siti considerati.

**Tabella 4.3.** Stima della energia prodotta dal sistema U-OWC per i tre siti in esame in termini di produzione annua per turbina e di energia media per unità di lunghezza della diga.

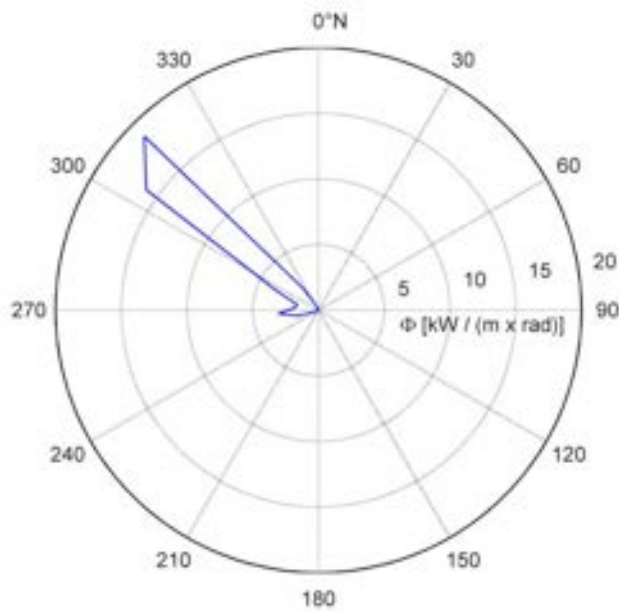
	<b>Produzione</b> <b>[kWh/anno/turbina]</b>	<b><math>E_{med}</math></b> <b>[kW/m]</b>
<b>Genova</b>	41.621	0,37
<b>Porto Pischera</b>	210.339	1,85
<b>Pantelleria</b>	149.240	1,31

Di seguito è riportato, a conclusione del rapporto, un breve riepilogo relativo alle tre località campione analizzate nel rapporto.

**SINTESI CONCLUSIVA: Porto Pischera (Sardegna)**



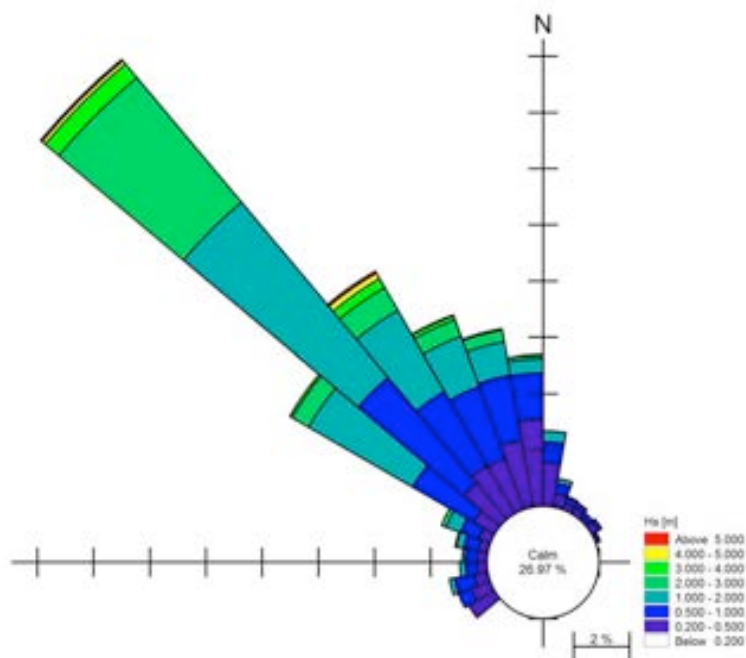
Clima ondoso sottocosta per l'area campione di Porto Pischera.



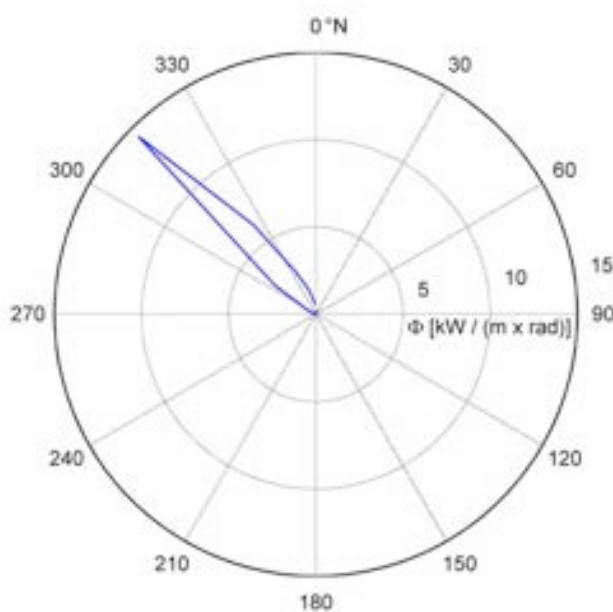
Andamento del flusso di energia sottocosta in funzione della direzione di provenienza delle onde per l'area campione di Porto Pischera.

	<b>Produzione</b> <b>[kWh/anno/turbina]</b>	<b><math>E_{med}</math></b> <b>[MW/km]</b>
<b>Porto Pischera</b>	210.339	1,85

**SINTESI CONCLUSIVA: Isola di Pantelleria**



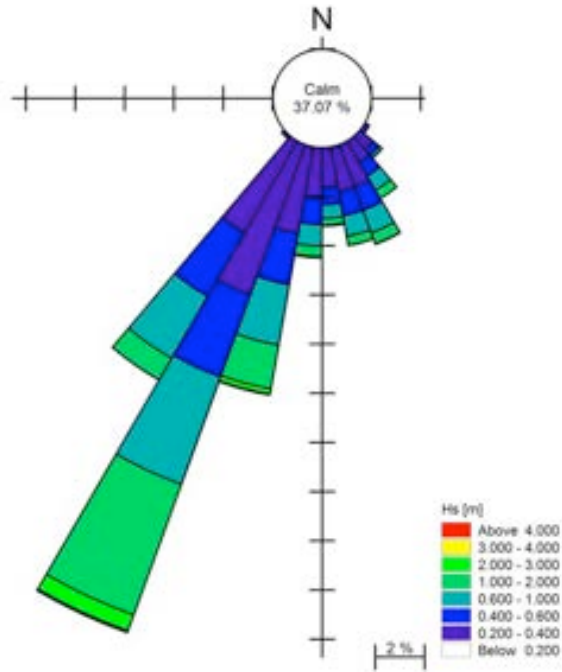
Clima ondoso sottocosta per l'area campione di Pantelleria.



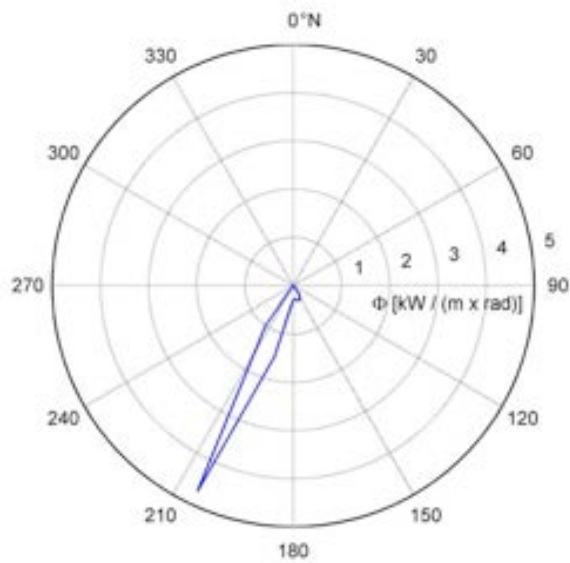
Andamento del flusso di energia sottocosta in funzione della direzione di provenienza delle onde per l'area campione di Pantelleria.

	<b>Produzione</b> <b>[kWh/anno/turbina]</b>	<b><math>E_{med}</math></b> <b>[MW/km]</b>
<b>Pantelleria</b>	149.240	1,31

**SINTESI CONCLUSIVA: Genova**



Clima ondoso sottocosta per l'area campione di Genova.



Andamento del flusso di energia sottocosta in funzione della direzione di provenienza delle onde per l'area campione di Genova.

	<b>Produzione</b> <b>[kWh/anno/turbina]</b>	<b><math>E_{med}</math></b> <b>[MW/km]</b>
<b>Genova</b>	41.621	0,37

## Riferimenti bibliografici essenziali

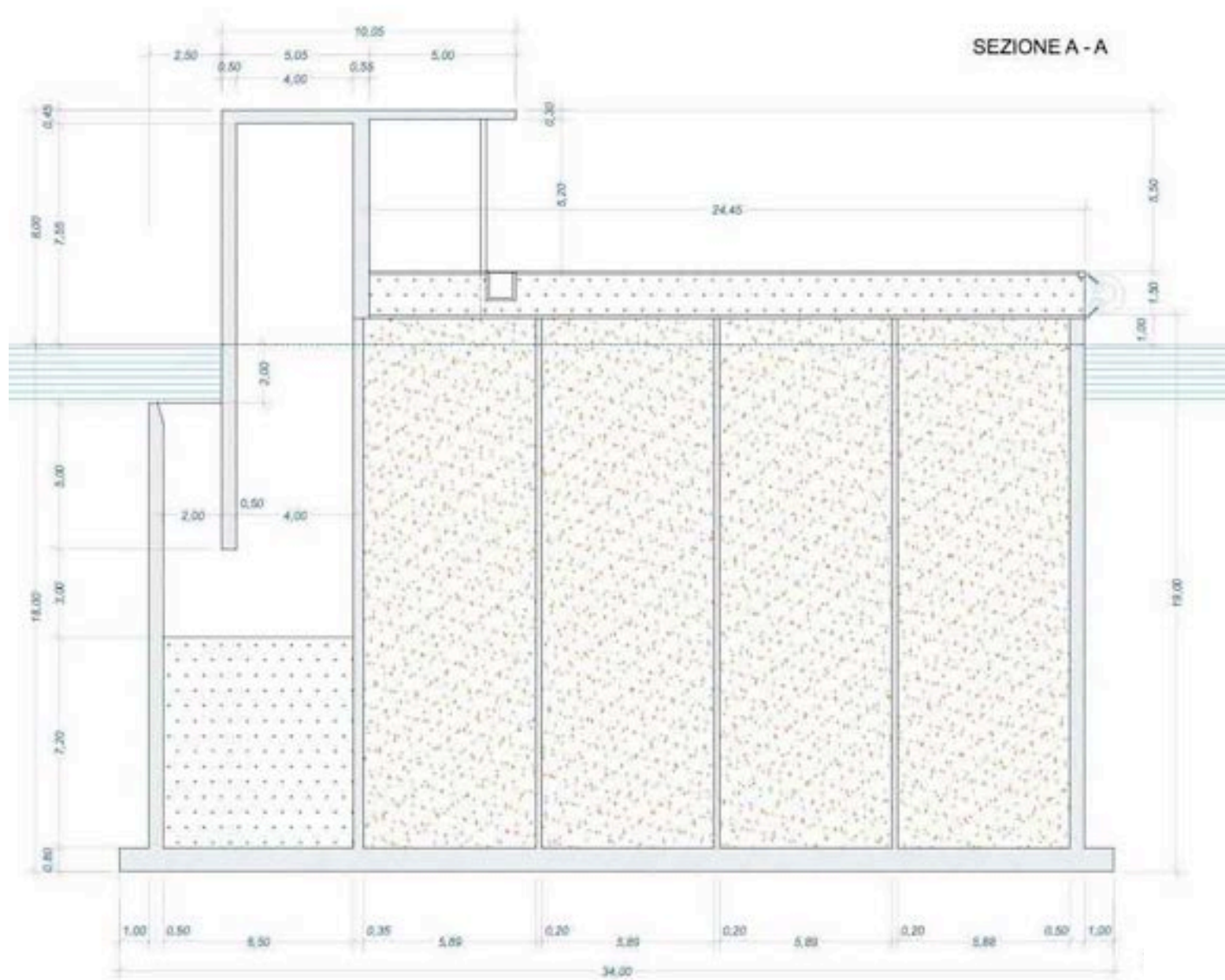
- Arena, F. (2004) On the prediction of extreme sea waves, Chapter 10 of the book *Environmental Sciences and Environmental Computing'*, Vol II (EnviroComp Institute, Fremont, California, USA), pp. 1-50.
- Arena, F., 2011. Il mare come fonte di energia, *Atti Convegno Acqua ed Energia, XI Giornata Mondiale dell'Acqua, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, 22 marzo*, pp. 1-19.
- Arena, F. e Barbaro, G. (1999) "Il rischio ondoso nei mari italiani", pubbl. CNR-GNDCI num. 1965, Editoriale BIOS, Cosenza, pp. 1-136
- Arena, F., Filianoti, P, 2003. A new kind of breakwater for converting wave energy into electric power, *Proc.of the Fifth European Wave Energy Conference EWEC*, University College Cork, Ireland, 277-291.
- Arena, F., Filianoti, P, 2007. A small field experiment on a submerged breakwater for absorbing wave energy. *ASCE J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 133, 161-167.
- Arena, F. & Pavone, D. (2006) The return period of non-linear high wave crests, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, No. C8, paper C08004, doi: 10.1029/2005JC003407
- Arena, F. & Pavone, D. (2009) A generalized approach for the long-term modelling of extreme sea waves, *Ocean Modelling*, Vol. 26, Issue 4, pp. 217-225. doi:10.1016/j.ocemod.2008.10.003
- Arena, F., Romolo, A., Ascanelli, A., Ferrante, A., Ghiretti, S., Valentino, E. (2012) Green ports: an Italian experience, Proc. of the 2nd Mediterranean Days of Coastal and Port Engineering MEDDAYS 2012, 23rd - 25th May, 2012 Valencia (Spain), pp. 391-405.
- Boccotti P. (1981) On the Highest Waves in a Stationary Gaussian Process. *Trans. National Ligure Academy of Science and Literature, Genoa*, 38, 271-302.
- Boccotti P. (1989) On Mechanics of Irregular Gravity Waves. *Trans. Nat. Acc. Lincei, Memorie*, 19, 111-170.
- Boccotti P. (1997) A General Theory of Three-Dimensional Wave Groups. Part I: The Formal Derivation; Part II: Interaction with a Breakwater. *Ocean Engineering*, 24, 265-300.
- Boccotti, P. (2000) *Wave Mechanics for Ocean Engineering*, Elsevier Science, Oxford.
- Boccotti, P. (2002) Diga a Cassoni in Grado di Assorbire l'Energia Ondosa e Trasformarla in Energia Elettrica.
- Boccotti, P., 2002. Diga a cassoni in grado di assorbire l'energia ondosa e trasformarla in energia elettrica. Brevetto Italiano N. 1332519; European Patent N. EP1518052B1.
- Boccotti, P., 2003. On a new wave energy absorber. *Ocean Engineering* 30,1191.
- Boccotti, P. (2004) Gli impianti REWEC. ISBN: 88-7740-375-6. (pubbl. GNDCI n. 2856). Cosenza: Edit. BIOS. 1-120.
- Boccotti, P. (2007a) Caisson Breakwaters Embodying an OWC with a Small Opening. Part I: Theory. *Ocean Engineering* 34, 806-819.

- Boccotti, P. (2007c) Comparison between a U-OWC and a Conventional OWC. *Ocean Engineering* 34, pp. 799-805.
- Boccotti P., Filianoti P., Fiamma, V. & Arena, F. 2007. Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening. Part II: a small scale field experiment. *Ocean Engineering* 34, 820-841.
- Boccotti, P., 2012. Design of breakwater for conversion of wave energy into electrical energy. *Ocean Engineering* 51, 106-118.
- Borgman L.E, (1969). Ocean wave simulation for engineering design. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 557.
- Evans, D.V., 1982. Wave-power absorption by system of oscillating surface pressure distributions. *Journal of Fluid Mechanics* 114, 481.
- Falcão, A.F., Justino, P.A., 1999. OWC wave energy device with air flow control. *Ocean Engineering*, 26, 1275.
- Falcão A.F. de O., 2000. The shoreline OWC wave power plant at the Azores. Proc. of the Fourth European Wave Energy Conf., Aalborg, Denmark.
- Fedele, F. & Arena, F. (2010) The equivalent power storm model for long-term predictions of extreme wave events, *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 4, pp. 1106-1117.
- Holthuijsen, L.H., N. Booij, T.H.T Herbers, A prediction model for stationary, short crested waves in shallow water with ambient currents, *Coastal Engineering*, 13 (1989), 23-54.
- Korde U. A. 1991, On the Control of Wave Energy Devices in Multi-Frequency Waves. *Applied Ocean Research* 13, 132-144.
- Phillips O.M., (1967) The theory of wind-generated waves. *Advances in Hydrosience* 4, 119.
- Sarmiento A. J. and Falcão A. F. de O., (1985) Wave Generation by an Oscillating Surface Pressure and its Application in Wave-Energy Extraction. *Journal of Fluid Mechanics* 150, 467 - 485.

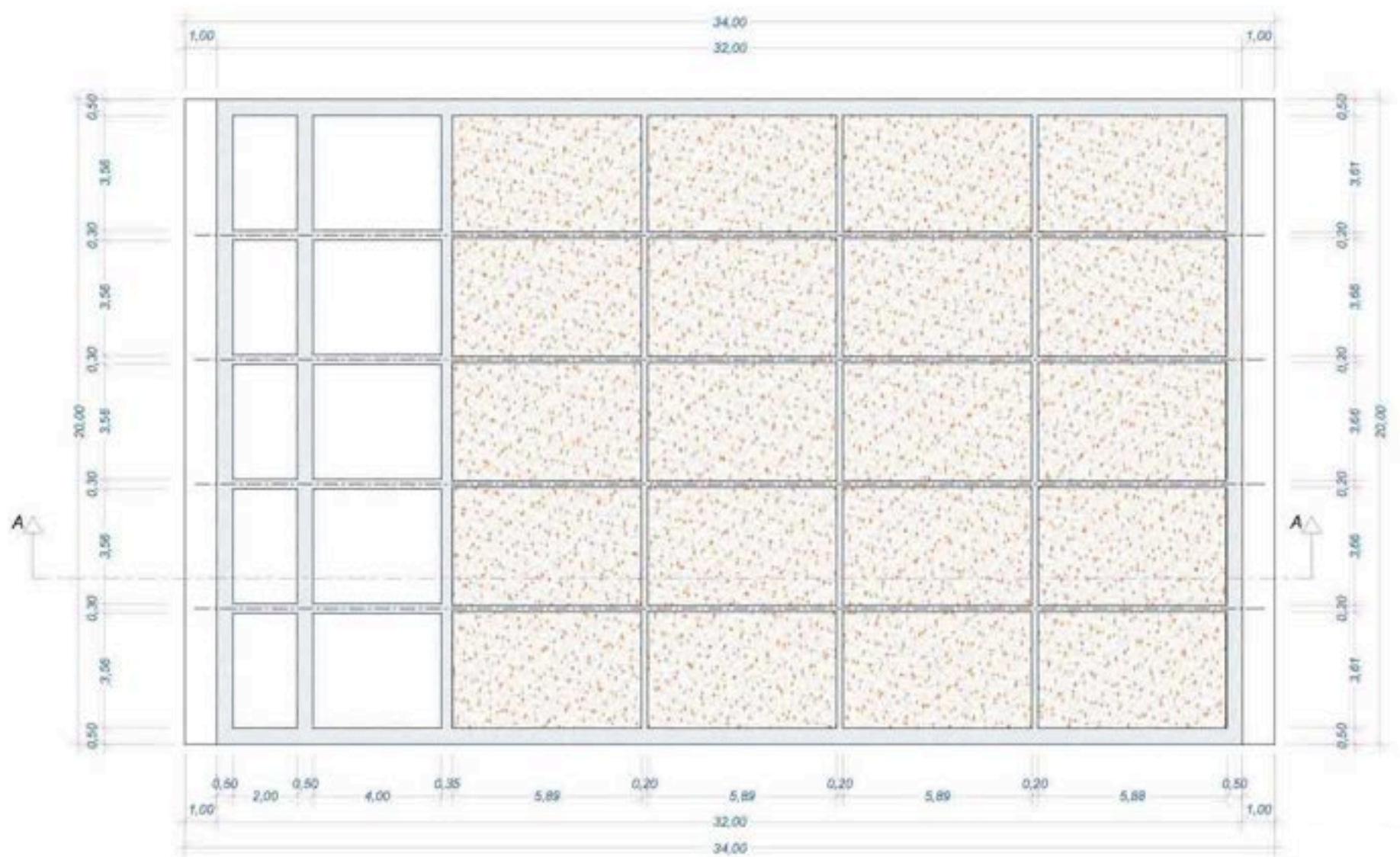
Si allega un breve **curriculum scientifico del responsabile del gruppo di lavoro** impegnato nell'attività.

## Allegato A. Schemi progettuali dei sistemi REWEC 3 impiegati

Di seguito vengono riportati le sezioni e le piante derivanti dal dimensionamento eseguito per gli impianti REWEC3 nei tre casi di studio: Porto Pischera (Sardegna), Pantelleria (Sicilia) e Genova (Liguria).



**Figura A.1a** Sezione del REWEC3 per la località di Porto Pischera (Sardegna).



**Figura A.1b** Pianta del REWEC3 per la località di Porto Pischera (Sardegna).





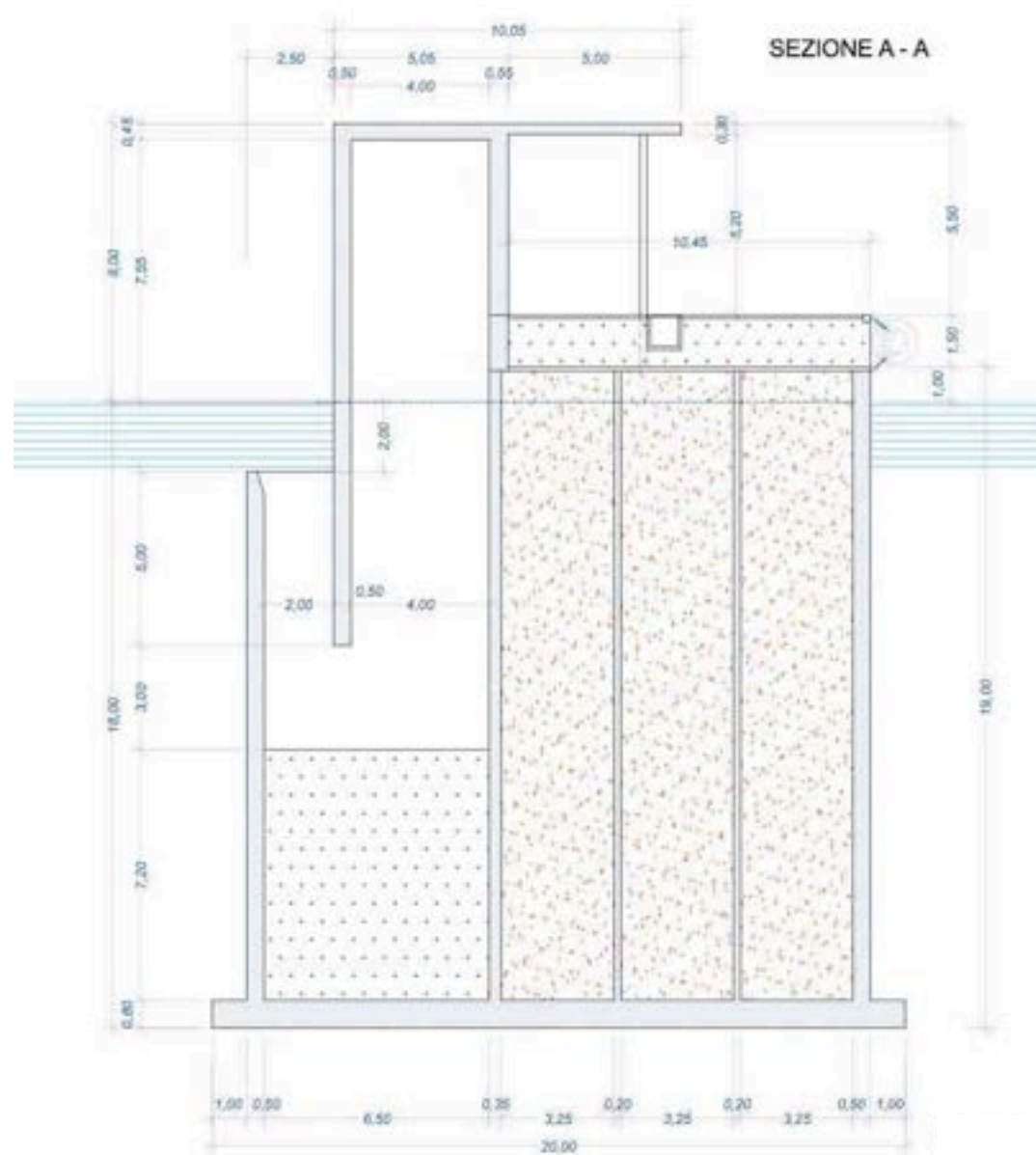
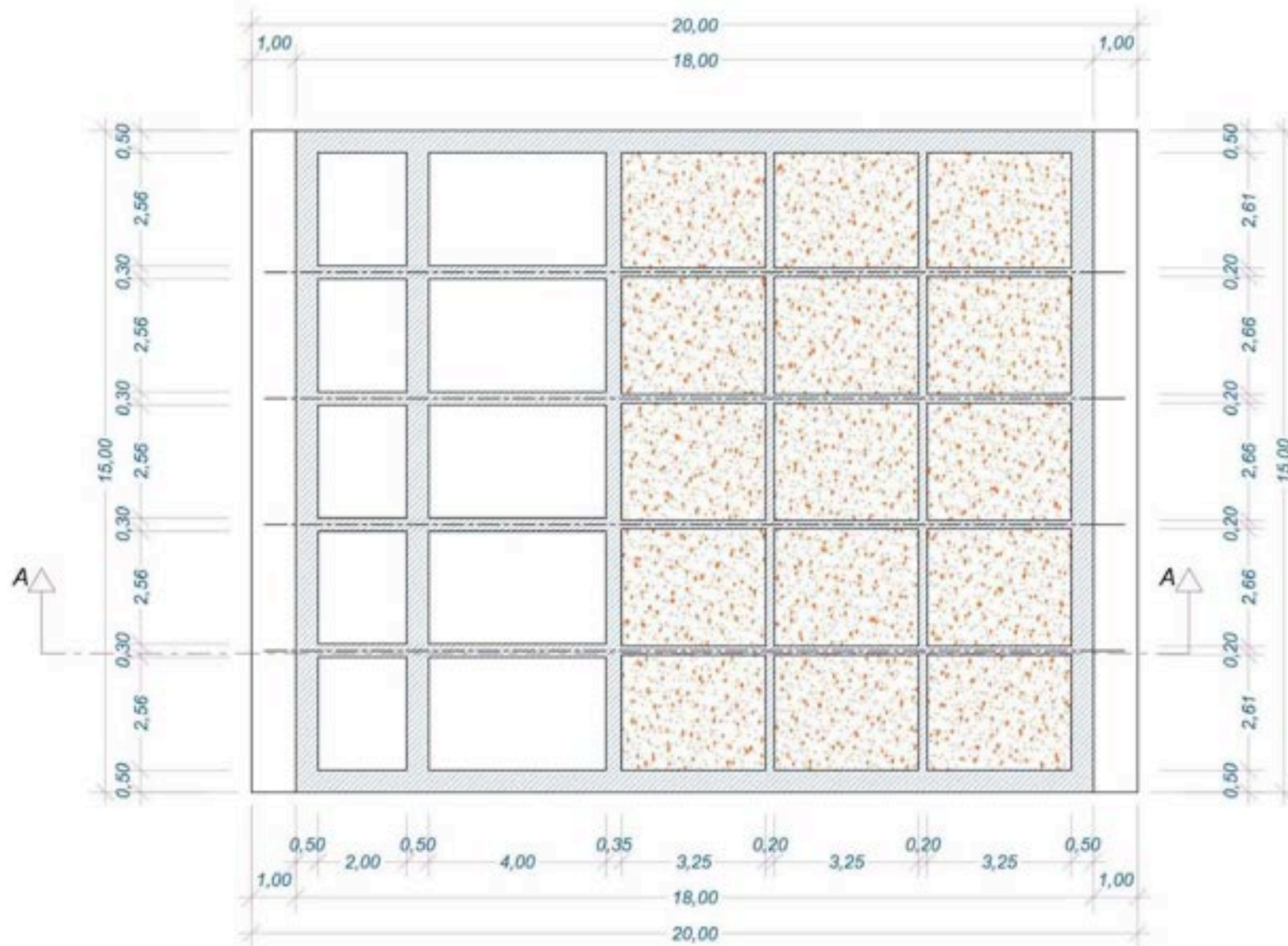


Figura A.3a Sezione del REWEC3 per la località di Genova.



**Figura A.3b** Pianta del REWEC3 per la località di Genova.