



Comune di Messina

IMPRESA APPALTATRICE



30015 Chioggia (VE)  
Banchina F - Val da Rio  
www.coedmar.it

Tel. +39 041 4967 925  
Fax +39 041 4967 914  
contratti@coedmar.it

COOPTATA



40132 Bologna  
Via M. E. Lepido, 182/2  
www.consorziointegra.it

Tel. +39 051 3161 300  
integra@consorziointegra.it

PROGETTAZIONE



30035 Mirano (VE)  
Viale Belvedere, 8/10  
www.fm-ingegneria-com

Tel. +39 041 5785 711  
Fax +39 041 4355 933  
tremestieri@fm-ingegneria.com



20148 Milano  
Via Caccialepori, 27

Tel. +39 02 8942 2685  
Fax +39 02 8942 5133  
mail@idrotec-ingegneria.it

Ing. Vincenzo Iacopino

Viale Regina Elena, 125 - Messina

Studio Tecnico Falzea

Via 1° Settembre, 37 - Messina

Arch. Claudio Lucchesi

Via Roma, 117 - Pace del Mela (ME)

Ing. Manlio Marino

Via Placida, 6 - Messina

Dott. Geol. Sergio Dolfin

Via Marina, 4 - Torre Faro (ME)

PROGETTO

**COMUNE DI MESSINA  
LAVORI DI COSTRUZIONE DELLA PIATTAFORMA  
LOGISTICA INTERMODALE TREMESTIERI CON ANNESSO  
SCALO PORTUALE - PRIMO STRALCIO FUNZIONALE**

EMISSIONE

**PROGETTO ESECUTIVO**

TITOLO

**A – PARTE GENERALE**

Relazione Idraulico-Marittima

REV.	DATA	FILE	OGGETTO	DIS.	APPR.
1					
2					
3					
4					
5					

ELABORATO N.

**A009**

DATA: Ottobre 2017	SCALA: -	FILE: 1044_A009_0.doc	J.N. 1044
PROGETTO P, Atzeni	DISEGNO S. Beriotto	VERIFICA M. Tondello	APPROVAZIONE T. Tassi



## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE E CONTENUTI DELLA RELAZIONE.....</b>	<b>5</b>
1.1	PREMESSA.....	5
<b>2</b>	<b>CONTENUTI DEL PRESENTE ELABORATO.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>CARATTERISTICHE DEI VENTI.....</b>	<b>6</b>
3.1	REGIME ANEMOMETRICO ANNUALE .....	6
3.2	ECCEDENZE DELLA VELOCITÀ DEL VENTO E VENTI ESTREMI.....	6
3.3	ANDAMENTO MENSILE.....	6
<b>4</b>	<b>LIVELLO DEL MARE.....</b>	<b>11</b>
4.1	LIVELLO DI RIFERIMENTO PER IL PROGETTO – MAREA ASTRONOMICA .....	11
4.2	ESCURSIONI MASSIME .....	11
<b>5</b>	<b>CORRENTI.....</b>	<b>12</b>
5.1	CARATTERISTICHE LOCALI DELLE CORRENTI.....	12
<b>6</b>	<b>MOTO ONDOSI AL LARGO .....</b>	<b>13</b>
6.1	CLIMA AL LARGO .....	13
<b>7</b>	<b>CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSI IN PROSSIMITÀ DELLA COSTA – EVENTI</b>	
<b>ESTREMI</b>	<b>14</b>	
7.1	GENERALITÀ.....	14
7.2	CLIMI LOCALI SOTTO COSTA .....	14
7.3	ONDE ESTREME IN PROSSIMITÀ DELLA COSTA .....	14
<b>8</b>	<b>AGGIORNAMENTO DELLE CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSI – EVENTI</b>	
<b>ESTREMI</b>	<b>19</b>	
8.1	GENERALITÀ.....	19
8.2	CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSI AL LARGO .....	19
8.3	ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO.....	24
8.4	CORRELAZIONE ALTEZZA-PERiodo PER GLI EVENTI ESTREMI .....	26
8.5	PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA DELLE MAREGGIATE ESTREME .....	27
8.5.1	Definizione del dominio di calcolo STWAVE.....	27
8.5.2	Dati di input.....	28
8.5.3	Descrizione del codice di calcolo STWAVE .....	29
8.5.4	Risultati della propagazione sottocosta degli eventi estremi.....	32
<b>9</b>	<b>ONDE DI PROGETTO PER LE OPERE .....</b>	<b>35</b>
9.1	GENERALITÀ.....	35
9.2	INDIVIDUAZIONE DELLE DIVERSE OPERE IN PROGETTO.....	35
9.3	OPERA A – SCOGLIERE IN MASSI NATURALI (TRAPPOLA SUD E FOCE FAROTA-CANNETO)	
	37	
9.3.1	Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento .....	37
9.3.2	Opera A - onda di progetto.....	37
9.4	OPERA B – PENNELLO DI CONTENIMENTO TRAPPOLA SUD (COFFERDAM).....	38
9.4.1	Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento .....	38

9.4.2	Opera B - .onda di progetto .....	38
9.5	OPERA C – SCOGLIERA IN MASSI ARTIFICIALI ACCROPODE™ NELLA ZONA SUD DEL PORTO .....	39
9.5.1	Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento .....	39
9.5.2	Opera C - onde di progetto .....	39
9.6	OPERA D – DIGA FORANEA A PARETE VERTICALE .....	40
9.6.1	Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento .....	40
9.6.2	Opera D - onde di progetto .....	40
9.7	OPERA E – SCOGLIERA IN MASSI ARTIFICIALI ACCROPODE™ NEL TRATTO TRA IL NUOVO PORTO E IL PORTO ESISTENTE.....	41
9.7.1	Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento .....	41
9.7.2	Opera E - onde di progetto .....	41
9.8	OPERA F – OPERE DI CONTENIMENTO DEL RIPASCIMENTO PROTETTO .....	42
9.8.1	Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento .....	42
9.8.2	Opera F - onde di progetto .....	42
<b>10</b>	<b>EVOLUZIONE STORICA DELLA LINEA DI RIVA.....</b>	<b>43</b>
10.1	EVOLUZIONE STORICA DEL LITORALE (DA PROGETTO PRELIMINARE) .....	43
10.1.1	Confronto linee di riva 1976 – 1985 (Figura 26).....	43
10.1.2	Confronto linee di riva 1985 – 1998 (Figura 26).....	43
10.1.3	Confronto linee di riva 1998 – 2002 (Figura 27).....	43
10.1.4	Confronto linee di riva 2002 – 2007 (Figura 27).....	44
10.2	EVOLUZIONE RECENTE DEL LITORALE (2008-2017, FIGURA 28) .....	44
<b>11</b>	<b>STUDIO DEL TRASPORTO SOLIDO LITORANEO.....</b>	<b>48</b>
11.1	PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA .....	49
11.2	PREMESSA ALLA MODELLAZIONE .....	49
11.3	DATI SEDIMENTOLOGICI .....	50
11.4	PROFONDITÀ DI CHIUSURA E ALTEZZA DI SWASH.....	50
11.5	TARATURA DEL MODELLO ED EVOLUZIONE IN CONFIGURAZIONE ATTUALE.....	51
11.6	CONSIDERAZIONI SULLA FUNZIONALITÀ DELLA TRAPPOLA SUD.....	55

## Indice delle Figure

Figura 1 – Elaborazione dei dati anemometrici alla Stazione di Messina – 1978-1997 (dallo Studio Idraulico Marittimo del Progetto Preliminare) .....	7
Figura 2 – Eccedenze della velocità del vento – Dati omnidirezionali.....	8
Figura 3 – Estrapolazione ai valori estremi della velocità del vento. Adattamento con distribuzione tipo Weibull a 3 parametri.....	9
Figura 4 – Andamenti mensili dei dati anemometrici.....	10
Figura 5 – Livello di riferimento del Progetto ed escursioni del livello del mare.....	11
Figura 6 – Rilievi correntometrici locali .....	12
Figura 7 – Clima ondoso al largo .....	13
Figura 8 – Punti in cui sono stati ottenuti i sottoclimi ondosi in prossimità della costa (dallo Studio Idraulico Marittimo del Progetto Preliminare) .....	15
Figura 9 – Sottoclimate costiero nel Punto 2 .....	16
Figura 10 – Valori estremi di altezza d’onda .....	17
Figura 11 – Analisi delle onde dal 1° quadrante (dalla Relazione Idraulico Marittima del Progetto Preliminare) .....	18
Figura 12 – Dominio del modello di generazione tipo WavewatchIII per l’area del mediterraneo..	20
Figura 13 – Posizione del punto (UNIGE, 15.55°E, 37.95°N) cui si riferiscono i dati di moto ondoso dell’Università di Genova (in giallo, per confronto, la posizione del punto UKMO utilizzato nel progetto preliminare).....	20
Registrazioni ordinate per altezza significativa e direzione di provenienza (in parti per 311155) Punto al largo (15.55°E, 37.95°N).....	21
Figura 14 – Rosa delle registrazioni nel punto al largo .....	22
Figura 15 – Rosa delle energie nel punto al largo .....	23
Figura 16 – Rosa delle altezze massime nel punto al largo .....	23
Figura 17 – Distribuzione degli eventi estremi considerati nell’analisi di Gumbel .....	25
Risultati statistica degli estremi .....	25
Figura 18 – Statistica degli estremi (interpolazione dei dati).....	25
Eventi estremi al largo .....	26
Figura 19 – Correlazione HS – TP per gli eventi estremi.....	26
Figura 20 – Griglia di calcolo e ubicazione del punto UNIGE .....	27
Figura 21 – Spettro monodimensionale .....	30
Figura 22 – Input e Output STWAVE .....	31
Figura 23 – Piano d’onda di una mareggiata estrema.....	32
Figura 24 – Ubicazione dei punti di output.....	33

Figura 25 – Individuazione delle diverse opere che compongono il progetto .....	36
Figura 26 – Confronto linee di riva 1976-1985 e 1985-1998.....	45
Figura 27 – Confronto linee di riva 1998-2002 e 2002-2007.....	46
Figura 28 – Confronto linee di riva 2008-2017 .....	47
Figura 29 – Individuazione $H_{0,12}$ – Curva di durata relativa al clima ondoso caratteristico del paraggio.....	51
Figura 30 – Volumi di dragaggio manutentivo del porto di Tremestieri (misure in metri cubi) .....	51
Figura 31 – Griglia di calcolo GENESIS .....	52
Figura 32 – Risultati della simulazione in configurazione attuale .....	54
Figura 33 – Portate solide in grado di bypassare la testata del pennello di contenimento della trappola Sud in assenza di manutenzione (misure in metri cubi).....	55
Figura 34 – Risultati della simulazione in configurazione di esercizio, con trappola Sud .....	56

## **1 INTRODUZIONE E CONTENUTI DELLA RELAZIONE**

### **1.1 PREMESSA**

Nel presente elaborato vengono riportati i dati di base e le informazioni relativi agli aspetti idraulico marittimi, che sono stati impiegati nei calcoli e nelle verifiche eseguite nell'ambito del presente Progetto Esecutivo.

## **2 CONTENUTI DEL PRESENTE ELABORATO**

Il presente rapporto sviluppa i seguenti argomenti:

- Capitolo 3: Anemologia
- Capitolo 4: Livello del mare
- Capitolo 5: Correnti di marea
- Capitolo 6: Moto ondoso al largo
- Capitolo 7: Moto ondoso sottocosta
- Capitolo 8: Aggiornamento moto ondoso sottocosta
- Capitolo 9: Definizione delle onde di progetto
- Capitolo 10: Evoluzione storica della linea di riva
- Capitolo 11: Dinamica litoranea

### **3 CARATTERISTICHE DEI VENTI**

#### **3.1 REGIME ANEMOMETRICO ANNUALE**

Le percentuali di occorrenza annuali per intervalli di velocità e direzione del vento sono riportate nella Figura 1 in forma di tabella e rosa. I dati sono quelli osservati nella stazione di Messina nel periodo 1978-1997 con cadenza trioraria.

La stazione, gestita dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica è ubicata nel punto di coordinate 38°12'N – 15°33'E e si trova a quota 51 m s.m.m..

Il settore SSW (centrato su 210°N) è quello caratterizzato dalla maggiore frequenza di eventi annuale e dalla maggiore frequenza di eventi con  $V > 20$  nodi.

Con frequenze complessive paragonabili si presentano anche gli eventi dei settori 330°N e 30°N.

#### **3.2 ECCEDENZE DELLA VELOCITÀ DEL VENTO E VENTI ESTREMI**

La Figura 2 presenta un'elaborazione dei dati sopra citati per ricavare le ore ed i giorni di eccedenza medi annui dei diversi livelli di velocità del vento.

Considerando tutte le direzioni di provenienza si hanno nelle località venti con  $V > 21$  nodi per 33 ore/anno circa, corrispondenti a 1,36 giorni/anno.

È stato effettuato un adattamento delle percentuali di non eccedenza con una distribuzione del tipo Weibull a 3 parametri.

I risultati sono riportati in Figura 3. La funzione adattata porta a stimare i seguenti valori estremi:

Eccedenza 1ora/anno             $V = 39,4$  nodi = 20,27 m/s

Eccedenza 1ora/10 anni         $V = 54,6$  nodi = 28 m/s

Eccedenza 1ora/50 anni         $V = 67$  nodi = 35 m/s

#### **3.3 ANDAMENTO MENSILE**

La Fig. 2.4 mostra le eccedenze della velocità  $V = 21$  nodi nei diversi mesi, nonché i settori di direzione caratterizzati dalla maggiore frequenza di occorrenza.

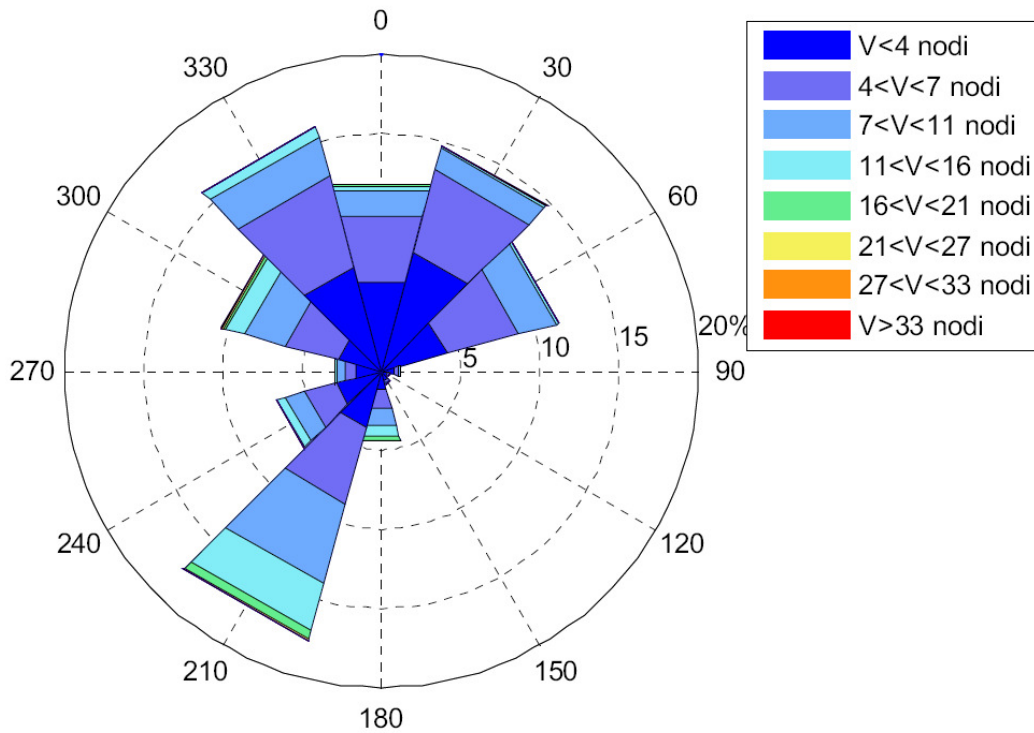
I periodi con venti più intensi sono Marzo-Aprile e Dicembre-Gennaio.

Le direzioni dominanti in questi mesi sono 210° e 330°N. Nel periodo estivo sono frequenti i venti dai settori 30-60°N, ma le eccedenze della velocità  $V = 21$  nodi sono inferiori da 1 ora/mese.

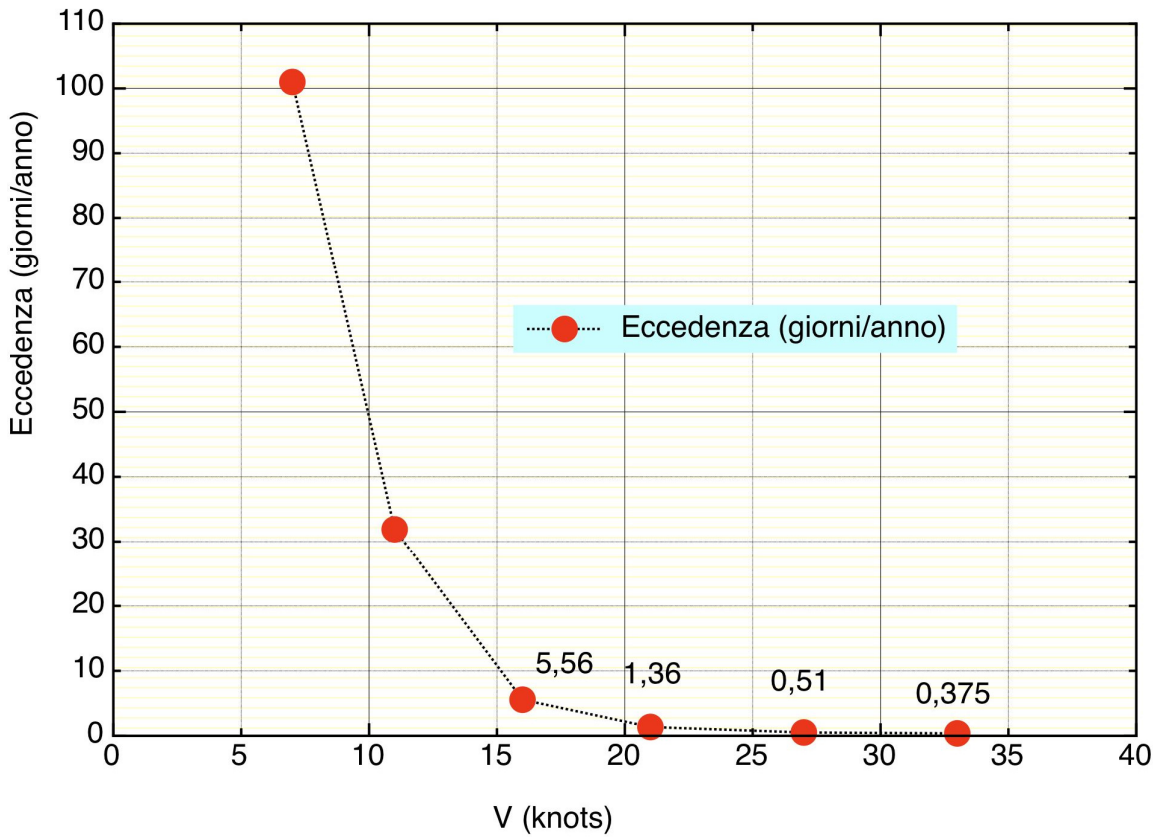


COMUNE DI MESSINA - LAVORI DI COSTRUZIONE DELLA PIATTAFORMA LOGISTICA  
INTERMODALE TREMESTIERI CON ANNESSO SCALO PORTUALE - PRIMO STRALCIO FUNZIONALE  
PROGETTO ESECUTIVO

V [nodi]	P(v>vinf)	Direzione di Provenienza [°N]											
		-15 15	15 45	45 75	75 105	105 135	135 165	165 195	195 225	225 255	255 285	285 315	315 345
0-4	100.000%	5.743%	7.740%	4.291%	0.791%	0.451%	0.612%	1.182%	3.650%	2.984%	1.622%	2.819%	6.784%
4-7	61.330%	4.405%	5.422%	4.696%	0.344%	0.067%	0.183%	1.213%	5.022%	2.037%	0.800%	3.424%	5.973%
7-11	27.744%	1.675%	1.403%	2.428%	0.096%	0.016%	0.036%	1.117%	5.287%	1.260%	0.447%	2.696%	2.549%
11-16	8.734%	0.324%	0.185%	0.203%	0.011%	0.004%	0.013%	0.806%	3.049%	0.516%	0.208%	1.226%	0.634%
16-21	1.553%	0.031%	0.013%	0.004%	0.000%	0.000%	0.002%	0.156%	0.581%	0.063%	0.051%	0.197%	0.080%
21-27	0.373%	0.011%	0.009%	0.000%	0.000%	0.000%	0.002%	0.049%	0.087%	0.016%	0.004%	0.047%	0.007%
27-33	0.141%	0.009%	0.004%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.013%	0.009%	0.000%	0.000%	0.000%	0.002%
>33	0.103%	0.051%	0.025%	0.002%	0.004%	0.000%	0.002%	0.000%	0.004%	0.004%	0.000%	0.009%	0.000%
Calme	22.8%												

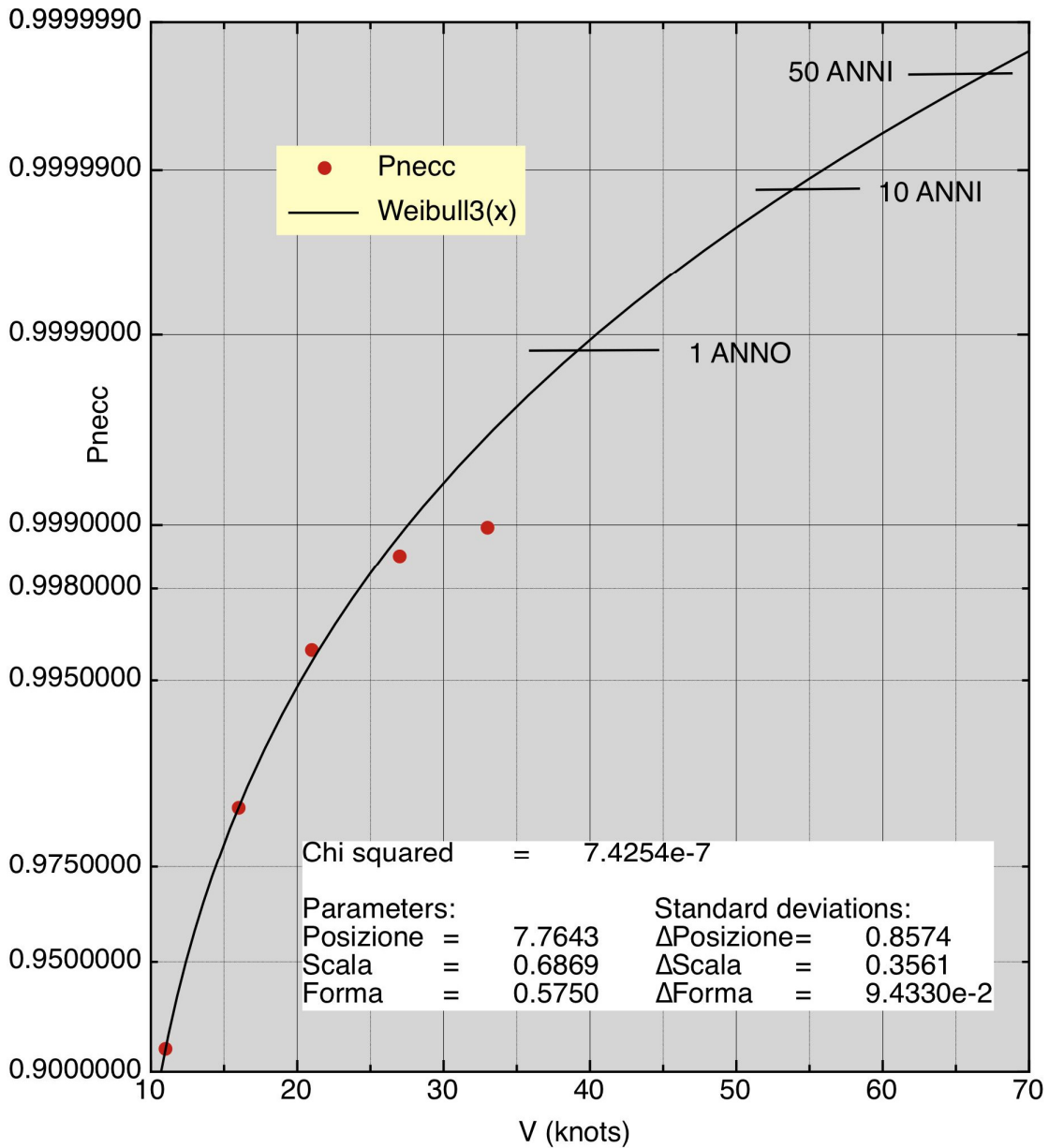


**Figura 1 – Elaborazione dei dati anemometrici alla Stazione di Messina – 1978-1997  
(dallo Studio Idraulico Marittimo del Progetto Preliminare)**

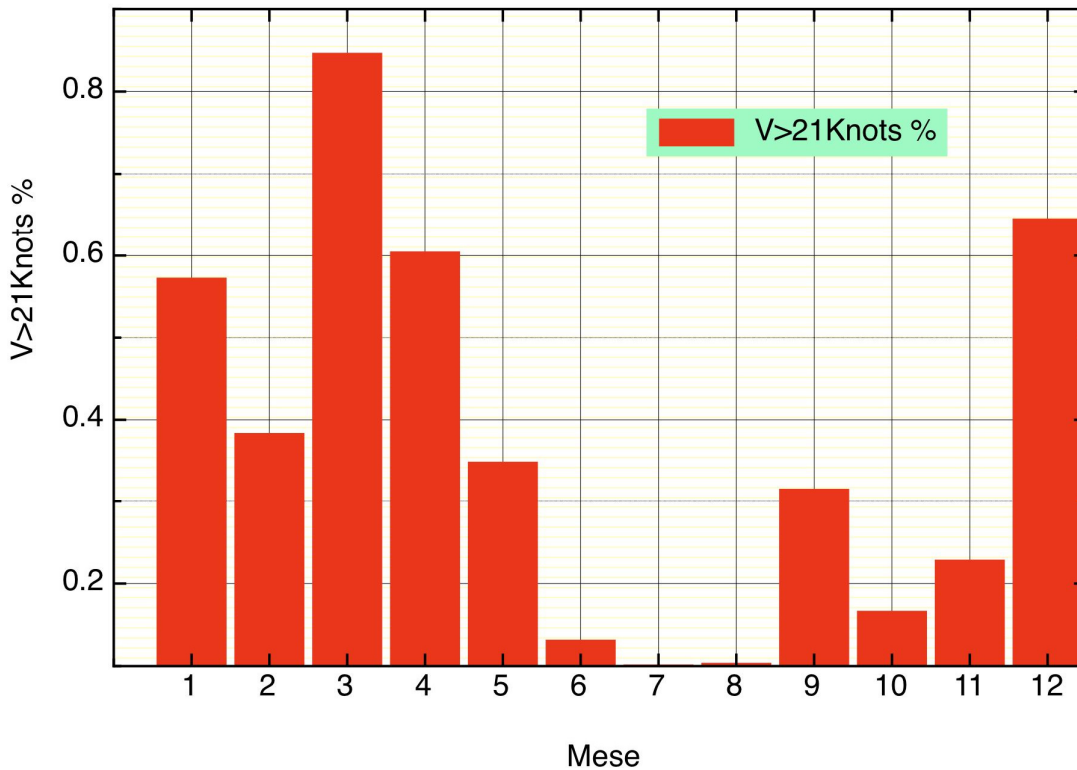


V (knots)	Eccedenza (ore/anno)	Eccedenza (giorni/anno)	Pnecc
33.00000	9.00000	0.37500	0.99897
27.00000	12.35000	0.51400	0.99859
21.00000	32.70000	1.36000	0.99627
16.00000	136.00000	5.56000	0.98447
11.00000	765.00000	31.90000	0.91266
7.00000	2430.0000	101.0000	0.72256

Figura 2 – Eccedenze della velocità del vento – Dati omnidirezionali



**Figura 3 – Estrapolazione ai valori estremi della velocità del vento.  
 Adattamento con distribuzione tipo Weibull a 3 parametri**



	Mese	V>21 Knots %	Direzione massima frequenza °N
1	1	0.57300	330 (210)
2	2	0.38400	210 (330)
3	3	0.84700	210 (330)
4	4	0.60500	210 (330)
5	5	0.34900	30 (210)
6	6	0.13200	60
7	7	0.10200	30-60
8	8	0.10400	30-60
9	9	0.31600	210
10	10	0.16700	210
11	11	0.22900	210
12	12	0.64600	210 (330)

Figura 4 – Andamenti mensili dei dati anemometrici

## 4 LIVELLO DEL MARE

### 4.1 LIVELLO DI RIFERIMENTO PER IL PROGETTO – MAREA ASTRONOMICA

Lo 0.0 livello medio mare rappresenta il livello di riferimento adottato nei rilievi topografici e batimetrici degli studi specialistici eseguiti nell'ambito del Progetto Preliminare.

Tale livello costituisce quindi il riferimento del presente Progetto Esecutivo.

La marea astronomica localmente è di tipo semidiurno, con due alte maree e due basse maree al giorno. L'ampiezza dell'escursione di marea astronomica è limitata a circa 20 cm (Figura 5).

### 4.2 ESCURSIONI MASSIME

Tenendo conto degli effetti meteorologici si hanno i seguenti valori massimi di variazione del livello rispetto al medio mare (Fig. 3.1):

- Massimo innalzamento +0.34 m l.m.m.
- Massimo abbassamento -0.35 m l.m.m.

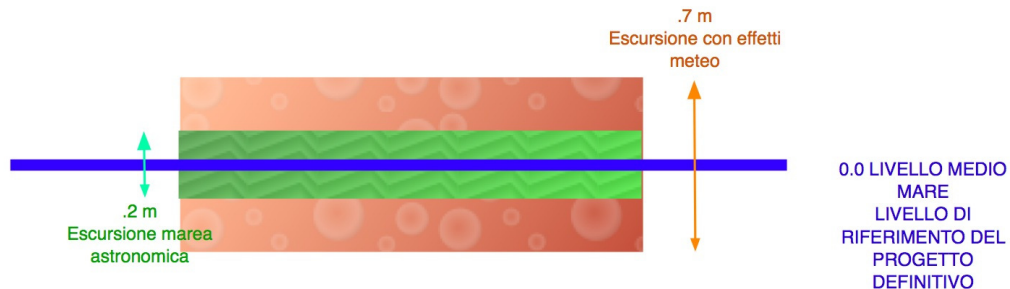


Figura 5 – Livello di riferimento del Progetto ed escursioni del livello del mare

## 5 CORRENTI

### 5.1 CARATTERISTICHE LOCALI DELLE CORRENTI

L'analisi è basata su dati di letteratura e rilievi eseguiti nell'ambito di altri progetti (Figura 6):

- il fattore predominante è la marea (responsabile per circa il 70%);
- le correnti locali sono parallele alla costa e cambiano verso con la marea;
- le correnti dirette verso Sud hanno velocità massime superiori a 1 m/s e durata di 2-4 ore;
- le correnti dirette verso Nord hanno velocità inferiori (0.3-0.4 m/s) e durata superiore (5-8 ore).

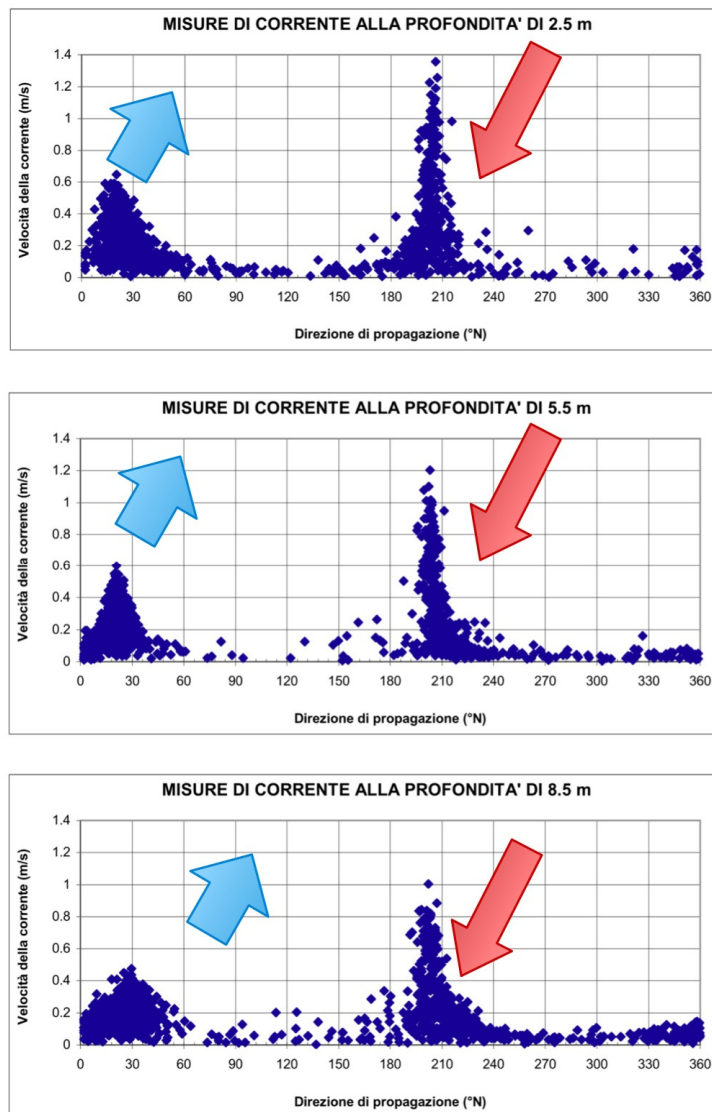


Figura 6 – Rilievi correntometrici locali

## 6 MOTO ONDOSO AL LARGO

### 6.1 CLIMA AL LARGO

La Figura 7 riporta le percentuali di occorrenza del moto ondoso al largo (in acque profonde di fronte al paraggio, n.d.r.) per intervalli di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza. Il settore di traversia principale è quello compreso tra 150° e 180°N. Il settore secondario 0°N-30°N è caratterizzato da moti ondosi sensibilmente inferiori sia come frequenza che come altezze significative.

Dir[°N]	Hs[m]								
	0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5
0	5.230	0.678	0.002	-	-	-	-	-	-
10	5.091	0.703	0.023	-	-	-	-	-	-
20	7.407	0.698	0.016	0.016	-	-	-	-	-
30	6.517	0.539	0.002	-	-	-	-	-	-
40	4.425	0.139	-	-	-	-	-	-	-
50	3.908	0.061	-	-	-	-	-	-	-
60	2.657	0.023	-	0.002	-	-	-	-	-
70	1.973	0.002	0.002	-	-	-	-	-	-
80	1.404	0.005	-	-	-	-	-	-	-
90	1.243	-	-	-	-	-	-	-	-
100	0.945	0.009	0.007	-	-	-	-	-	-
110	0.688	0.007	0.011	-	-	0.002	-	-	-
120	0.726	0.032	0.032	0.009	0.007	0.005	-	-	-
130	0.681	0.039	0.023	0.025	0.027	0.009	0.002	-	-
140	0.679	0.055	0.032	0.018	0.020	0.020	0.007	-	-
150	2.183	1.418	0.849	0.398	0.239	0.057	0.011	0.011	0.004
160	3.469	2.051	0.667	0.315	0.091	0.027	0.011	-	0.004
170	3.431	2.180	0.595	0.171	0.027	0.004	0.004	-	-
180	3.912	1.528	0.398	0.080	0.015	0.004	-	0.004	0.004
190	2.331	0.588	0.102	0.053	0.004	0.008	-	0.004	-
200	1.581	0.428	0.091	0.027	0.004	0.004	-	-	-
210	1.365	0.334	0.102	0.015	0.004	-	0.004	0.004	-
220	0.414	0.081	0.033	0.005	0.001	-	0.001	-	-
230	1.850	0.748	0.246	0.025	0.002	-	0.002	-	-

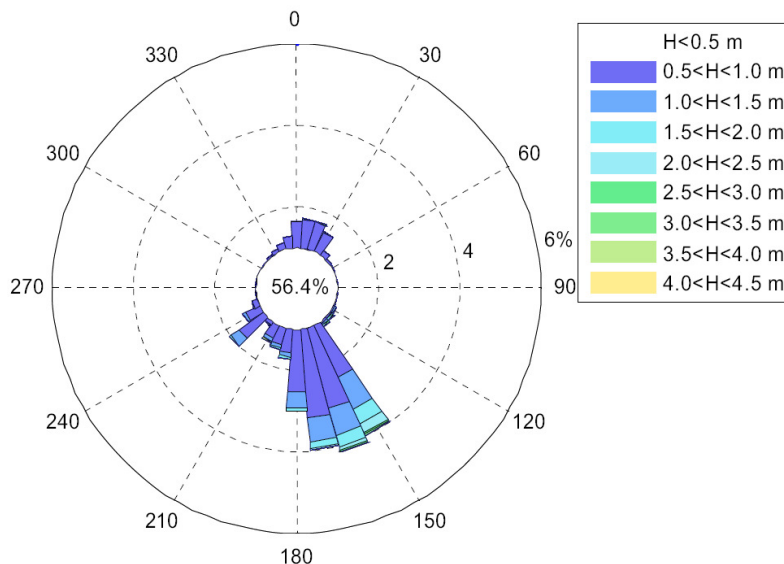


Figura 7 – Clima ondoso al largo

## **7 CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO IN PROSSIMITÀ DELLA COSTA – EVENTI ESTREMI**

### **7.1 GENERALITÀ**

Nella Relazione dello Studio Idraulico Marittimo del Progetto Preliminare è stata eseguita una modellazione, con il codice di calcolo MIKE 21 SW (DHI), della propagazione del moto ondoso dal largo fino ad una serie di punti significativi per la progettazione posti lungo costa.

I punti in cui sono stati ottenuti i climi locali sotto costa sono individuati nella Figura 8. Le profondità in corrispondenza di questi punti sono generalmente superiori a 10 m, per cui gli effetti di frangimento sono limitati.

### **7.2 CLIMI LOCALI SOTTO COSTA**

Nella Figura 9 si riporta il clima locale ricavato nel punto 2, ubicato nell'area antistante l'imboccatura del nuovo porto.

Come si può notare, si mantiene il ruolo dominante del settore 150°N-180°N presente nel clima al largo. Le onde di maggiore altezza hanno direzione di provenienza compresa nel settore 140°N-160°N, con altezze significative massime nel campo 3,5-4,0 m.

Per le onde del primo quadrante è significativa la sola direzione di 50°N (Grecale) con onde significative massime di 1 m.

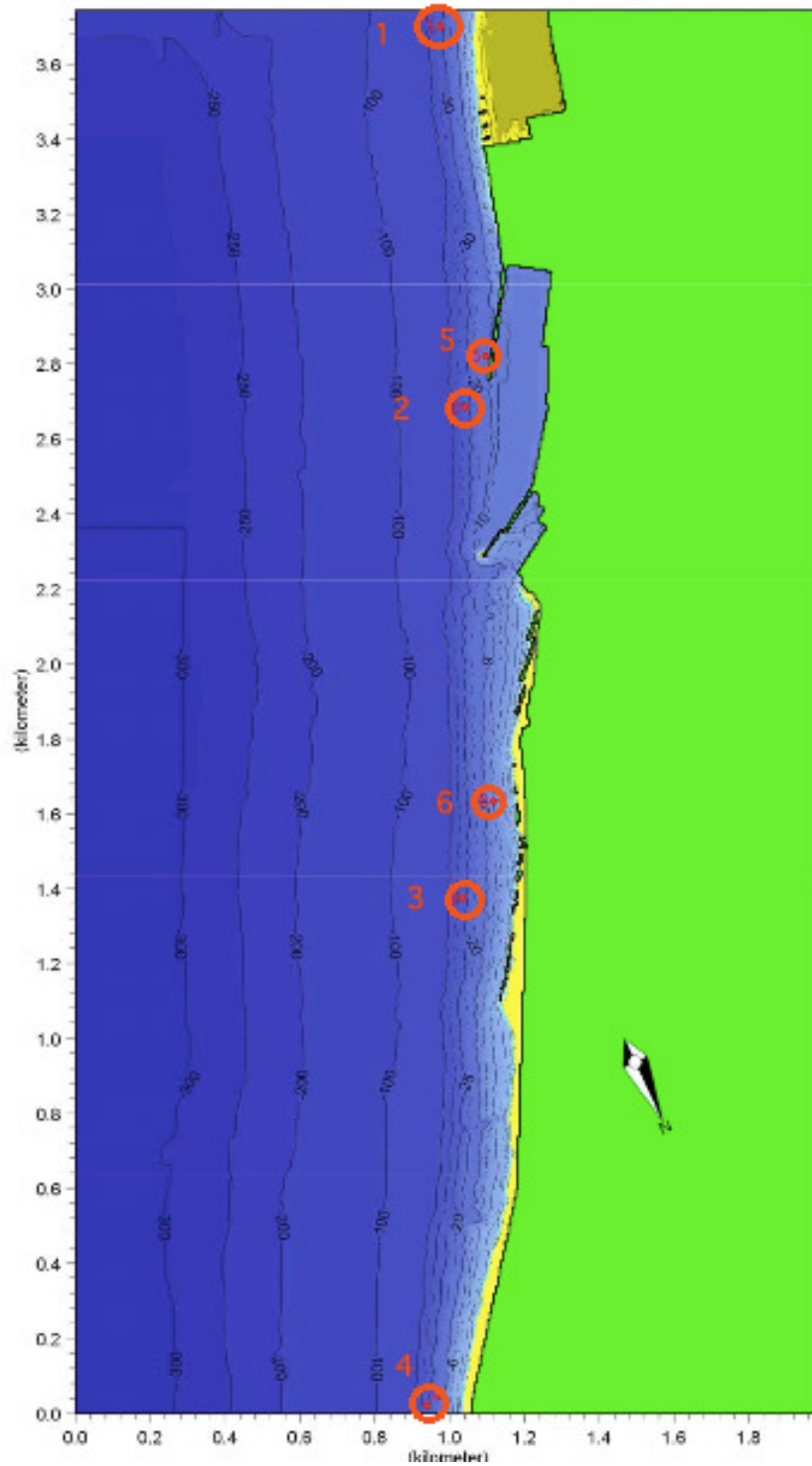
### **7.3 ONDE ESTREME IN PROSSIMITÀ DELLA COSTA**

I risultati presentati nella Relazione Idraulico Marittima del Progetto Preliminare sono stati integrati con le risposte al quesito n. 10. Nelle risposte sono state fornite le tabelle riportate nella Figura 10, relative al settore di traversia principale.

Per quanto riguarda le onde provenienti dal primo quadrante, nell'ambito del Progetto Preliminare è stata condotta un'apposita analisi, con l'impiego del codice di calcolo SWAN.

I risultati di questa analisi, pure condivisi, sono riportati nella Figura 11.

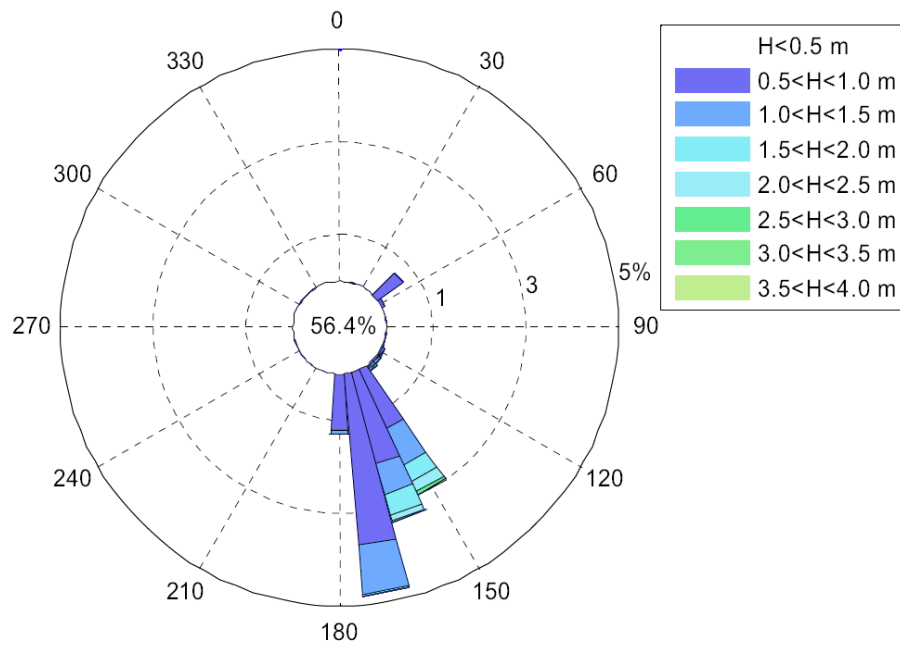




**Figura 8 – Punti in cui sono stati ottenuti i sottoclimi ondosi in prossimità della costa  
(dallo Studio Idraulico Marittimo del Progetto Preliminare)**

COMUNE DI MESSINA - LAVORI DI COSTRUZIONE DELLA PIATTAFORMA LOGISTICA  
 INTERMODALE TREMESTIERI CON ANNESSO SCALO PORTUALE - PRIMO STRALCIO FUNZIONALE  
 PROGETTO ESECUTIVO

Dir[°N]	Hs[m]							
	0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0
50	10.950	0.676	-	-	-	-	-	-
60	3.912	0.083	-	-	-	-	-	-
70	4.633	-	-	-	-	-	-	-
80	2.648	0.003	-	-	-	-	-	-
90	0.944	-	-	-	-	-	-	-
100	-	0.008	0.005	-	-	-	-	-
110	0.688	0.005	0.010	-	-	-	-	-
120	0.726	0.030	0.030	0.008	0.005	0.003	-	-
130	0.681	0.038	0.023	0.025	0.025	0.008	-	-
140	0.678	0.053	0.030	0.018	0.020	0.020	0.005	-
150	5.657	1.419	0.848	0.398	0.238	0.065	0.020	0.005
160	3.434	2.052	0.666	0.483	0.118	0.028	0.003	-
170	6.247	3.709	0.994	0.103	0.003	0.005	-	-
180	1.582	1.206	0.080	0.003	-	-	-	-



**Figura 9 – Sottoclimate costiero nel Punto 2**

Tabella 9.VIa Valutazione dell'altezza d'onda per fissati tempi di ritorno:

Punto 2 - Direzione di provenienza 145-215°N.

Tr	P	Hs	Dir	T <sub>m</sub>	T <sub>p</sub>
[anni]		[m]	[°N]	[s]	[s]
1	0.714	3.24	146.29	6.18	7.92
2	0.857	3.53	145.92	6.46	8.28
5	0.943	3.86	145.33	6.78	8.70
10	0.971	4.10	144.89	7.00	8.98
50	0.994	4.59	143.96	7.46	9.57
100	0.997	4.80	143.58	7.64	9.80
120	0.998	4.84	143.46	7.69	9.85
150	0.998	4.91	143.34	7.74	9.92
200	0.999	4.99	143.20	7.81	10.01
250	0.999	5.05	143.08	7.86	10.08

Tabella 9.VIb Valutazione dell'altezza d'onda per fissati tempi di ritorno:

Punto 5 - Direzione di provenienza 145-215°N.

Tr	P	Hs	Dir	T <sub>m</sub>	T <sub>p</sub>
[anni]		[m]	[°N]	[s]	[s]
1	0.714	3.06	140.86	6.18	7.92
2	0.857	3.34	140.15	6.46	8.28
5	0.943	3.66	139.27	6.78	8.70
10	0.971	3.89	138.69	7.00	8.98
50	0.994	4.38	137.53	7.46	9.57
100	0.997	4.58	137.10	7.64	9.8.0
120	0.998	4.63	136.99	7.69	9.85
150	0.998	4.70	136.86	7.74	9.92
200	0.999	4.78	136.70	7.81	10.01
250	0.999	4.83	136.58	7.86	10.08

Tabella 9.VIc Valutazione dell'altezza d'onda per fissati tempi di ritorno:

Punto 6 - Direzione di provenienza 145-215°N.

Tr	P	Hs	Dir	T <sub>m</sub>	T <sub>p</sub>
[anni]		[m]	[°N]	[s]	[s]
1	0.714	2.97	135.08	6.18	7.92
2	0.857	3.23	134.33	6.46	8.28
5	0.943	3.53	133.46	6.78	8.70
10	0.971	3.73	132.92	7.00	8.98
50	0.994	4.16	131.89	7.46	9.57
100	0.997	4.34	131.52	7.64	9.80
120	0.998	4.38	131.43	7.69	9.85
150	0.998	4.43	131.33	7.74	9.92
200	0.999	4.50	131.19	7.81	10.01
250	0.999	4.54	131.09	7.86	10.08

**Figura 10 – Valori estremi di altezza d'onda**



N	X <sub>p</sub> [m]	Y <sub>p</sub> [m]	T <sub>r</sub> [anni]	V [m/s]	Dir Vento [°N]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m</sub> [sec]	Dir [°N]
1	2566090	4220640	1	15	10	0.70	2.7	68
2	2566180	4220640	1	15	10	0.91	2.9	53
3	2565910	4220190	1	15	10	0.88	2.8	56
4	2566090	4220370	1	15	10	0.98	2.9	50
1	2566090	4220640	1	15	20	0.76	2.7	70
2	2566180	4220640	1	15	20	0.98	2.9	55
3	2565910	4220190	1	15	20	0.95	2.9	58
4	2566090	4220370	1	15	20	1.06	3.0	51
1	2566090	4220640	2	17	10	0.81	2.9	70
2	2566180	4220640	2	17	10	1.06	3.0	53
3	2565910	4220190	2	17	10	1.02	3.0	57
4	2566090	4220370	2	17	10	1.16	3.1	50

Figura 11 – Analisi delle onde dal 1° quadrante (dalla Relazione Idraulico Marittima del Progetto Preliminare)

## **8 AGGIORNAMENTO DELLA CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSI – EVENTI ESTREMI**

### **8.1 GENERALITÀ**

In fase di adeguamento del Progetto Definitivo sono stati acquisiti dati meteorologici di maggiore accuratezza ed affidabilità rispetto a quelli utilizzati nel Progetto Preliminare. I dati sono ricavati con la procedura del “wave hindcasting” (ricostruzione dello stato del mare sulla base di dati meteorologici, mediante l’utilizzo di modelli numerici). In particolare, per l’approfondimento relativo al sito di Tremestieri, sono stati presi in considerazione i dati risultanti da un’attività di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell’Università di Genova. I dati (<http://www.dicca.unige.it>) sono ottenuti da una reanalisi delle condizioni meteorologiche estesa da gennaio 1979 a giugno 2014. Sulla base di tali dati si è proceduto ad un aggiornamento delle caratteristiche del moto ondoso per il paraggio di Tremestieri. Lo studio è stato focalizzato sull’analisi degli eventi estremi, in particolare di quelli utilizzati per il dimensionamento delle opere, e ha condotto a stime allineate con quelle degli studi a base di gara per quanto riguarda le altezze d’onda, mentre, per quanto riguarda i periodi caratteristici delle mareggiate, le stime sono risultate più elevate.

Di seguito si riporta una sintesi dei dati di moto ondoso al largo forniti dall’Università di Genova e delle elaborazioni eseguite al fine di aggiornare le condizioni di moto ondoso estreme impiegate per il dimensionamento delle opere.

### **8.2 CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSI AL LARGO**

I dati forniti dal DICCA dell’Università di Genova derivano da una reanalisi condotta impiegando i dati meteorologici NOAA (<http://cfs.ncep.noaa.gov>), rielaborati attraverso il modello WRF-ARW versione 3.3.1 (Skamarock et al., 2008) per ottenere i campi di vento a 10 m di quota con risoluzione di circa 10 km.

Le condizioni di moto ondoso sono state ricavate attraverso l’impiego di un modello di generazione tipo WavewatchIII, versione 3.14 (Komen et al., 1994; Tolman, 2009), anch’esso con risoluzione spaziale di 10 km e temporale di 1 ora (Figura 12).

Rispetto ai dati UKMO, riportati nel progetto preliminare e precedentemente utilizzati, è stata considerevolmente estesa la dimensione del campione (da 11 a 35 anni) e migliorata la qualità del dato e la significatività del punto di riferimento (cfr. Figura 13); quest’ultima circostanza è resa possibile dalla maggiore risoluzione impiegata nei modelli.

I dati di moto ondoso forniti dall’Università di Genova si riferiscono al punto (“UNIGE”) di coordinate 15.55°E, 37.95°N.

In termini di altezza d’onda, i dati al largo sono risultati essere significativamente superiori a quelli UKMO adottati nella redazione del Progetto Preliminare, soprattutto per quanto riguarda i periodi delle mareggiate di Scirocco.

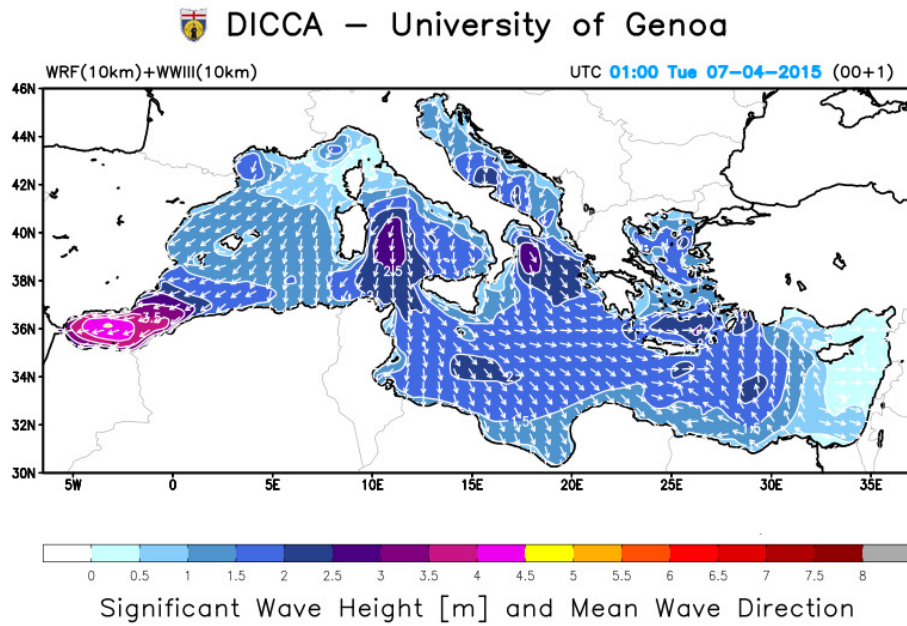


Figura 12 – Dominio del modello di generazione tipo WavewatchIII per l'area del mediterraneo



Figura 13 – Posizione del punto (UNIGE, 15.55°E, 37.95°N) cui si riferiscono i dati di moto ondoso dell'Università di Genova (in giallo, per confronto, la posizione del punto UKMO utilizzato nel progetto preliminare)

COMUNE DI MESSINA - LAVORI DI COSTRUZIONE DELLA PIATTAFORMA LOGISTICA  
INTERMODALE TREMESTIERI CON ANNESSO SCALO PORTUALE - PRIMO STRALCIO FUNZIONALE  
PROGETTO ESECUTIVO

Nella sottostante tabella sono riportate le caratteristiche delle onde “al largo”; i dati del clima ondoso al largo sono stati ordinati per classi di altezza significativa e direzione media di provenienza. Il numero di registrazioni si riferisce al totale della “registrazioni” (311'155) nel periodo di analisi (da gennaio 1979 a giugno 2014).

		Hs (m)												
DIR		0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
(°N)		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
0	10	4466	5388	817	214	28	3	3	0	0	0	0	0	0
10	20	5093	3380	389	75	8	3	3	0	0	0	0	0	0
20	30	5122	1326	132	20	9	3	1	0	0	0	0	0	0
30	40	2586	787	82	13	1	0	2	0	0	0	0	0	0
40	50	1884	602	72	16	1	0	0	0	0	0	0	0	0
50	60	1572	566	84	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0
60	70	1468	585	99	14	2	0	0	0	0	0	0	0	0
70	80	1524	600	100	29	1	0	0	0	0	0	0	0	0
80	90	1596	676	107	20	8	5	0	0	0	0	0	0	0
90	100	1873	785	227	73	32	15	3	0	0	0	0	0	0
100	110	2869	1686	728	249	64	20	15	10	5	1	3	4	0
110	120	9495	4858	1241	437	183	62	24	15	11	0	0	0	0
120	130	10377	4940	2240	767	314	150	104	29	17	3	1	0	0
130	140	8081	5381	2467	805	368	229	93	39	16	3	0	0	0
140	150	7777	6403	3011	1091	362	215	82	30	13	4	0	0	0
150	160	8410	8171	3746	1296	427	134	40	33	12	6	0	0	0
160	170	10667	10231	3384	865	300	106	16	9	4	2	0	0	0
170	180	14176	8222	1881	441	102	36	12	9	4	0	1	0	2
180	190	8736	3535	1185	266	77	19	6	0	1	1	1	0	0
190	200	3501	2073	721	200	40	5	0	0	0	0	0	0	0
200	210	1690	1077	322	92	13	3	0	0	0	0	0	0	0
210	220	1148	693	179	28	3	2	0	0	0	0	0	0	0
220	230	935	502	164	25	7	2	0	0	0	0	0	0	0
230	240	763	503	157	16	4	1	1	0	0	0	0	0	0
240	250	669	508	148	23	3	0	1	0	0	0	0	0	0
250	260	666	509	151	24	3	0	1	0	0	0	0	0	0
260	270	660	550	207	48	6	2	0	0	0	0	0	0	0
270	280	751	650	253	53	26	6	0	0	0	0	0	0	0
280	290	935	851	387	147	55	19	2	0	0	0	0	0	0
290	300	1243	1164	619	215	87	28	3	2	1	0	0	0	0
300	310	1907	1955	998	270	76	27	10	5	1	0	0	0	0
310	320	3515	3491	1513	326	79	28	10	0	0	0	0	0	0
320	330	5657	6394	1888	358	70	28	5	0	0	0	0	0	0
330	340	6228	9675	2126	307	112	31	7	2	0	0	0	0	0
340	350	5254	8558	1566	304	100	11	13	1	0	0	0	0	0
350	360	4639	7003	1022	339	114	21	0	0	0	0	0	0	0

**Registrazioni ordinate per altezza significativa e direzione di provenienza (in parti per 311155)  
Punto al largo (15.55°E, 37.95°N)**

Di seguito, in Figura 14, Figura 15 e Figura 16 vengono riportate rispettivamente le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze significative massime al largo.

Si può notare che gli eventi con percentuale di apparizione più elevata appartengono al settore di Scirocco-Mezzogiorno e sono compresi tra 110 e 190°N.

Anche gli eventi caratterizzati da maggiori energia sono quelli compresi nel settore 110÷190°N e presentano un picco di energia in corrispondenza della direzione di provenienza 155°N.

Le mareggiate caratterizzate dai valori massimi di altezza significativa sono quelle provenienti da Mezzogiorno (175°N), per le quali si raggiungono valori di  $H_s$  superiori ai 6 m; per i settori di Scirocco si osservano comunque valori massimi di altezza significativa prossimi o superiori a 5 m.

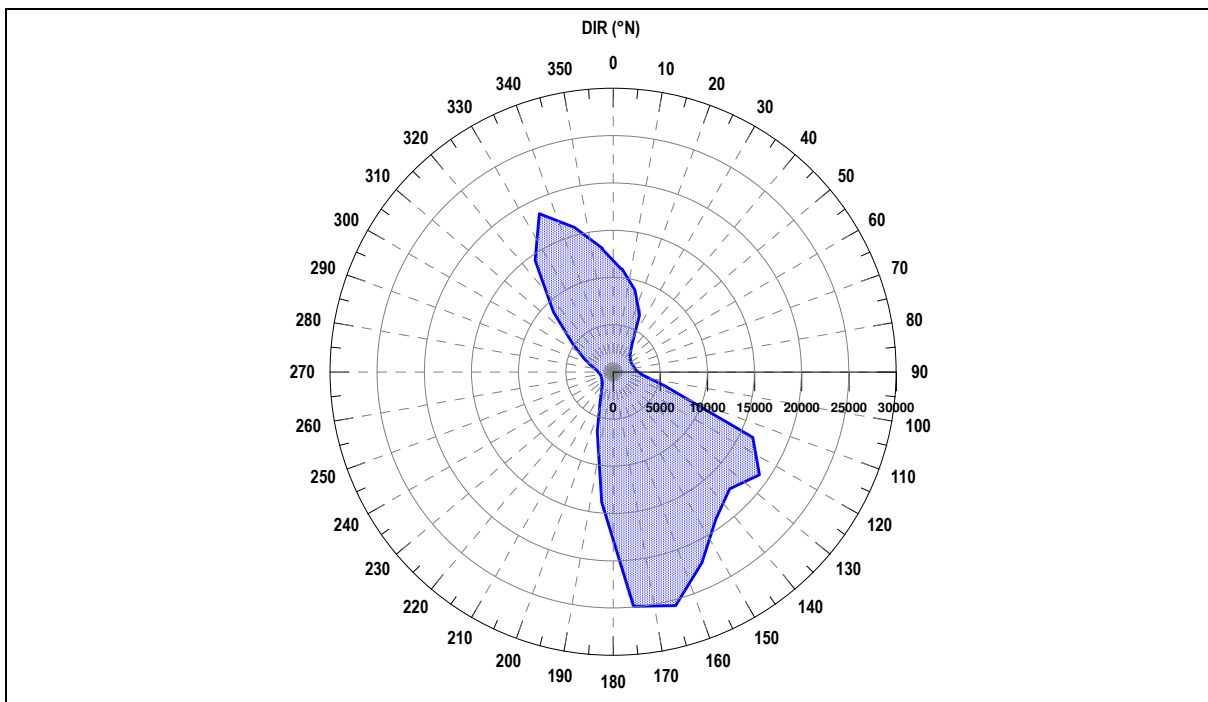


Figura 14 – Rosa delle registrazioni nel punto al largo



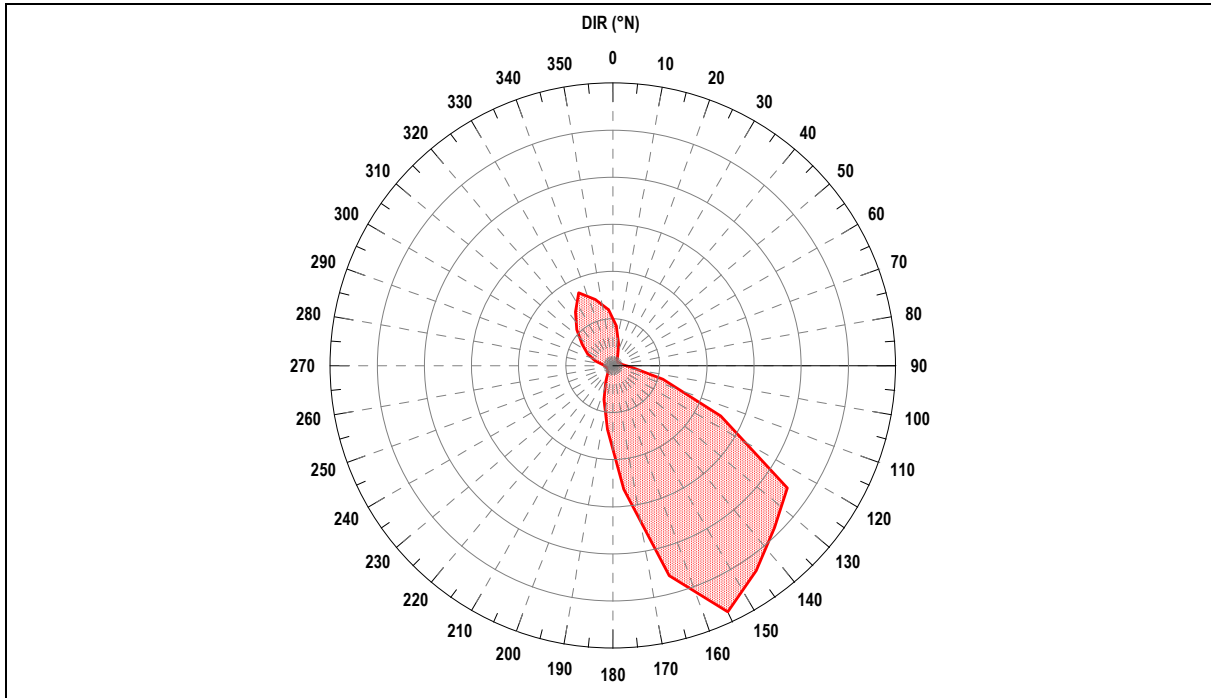


Figura 15 – Rosa delle energie nel punto al largo

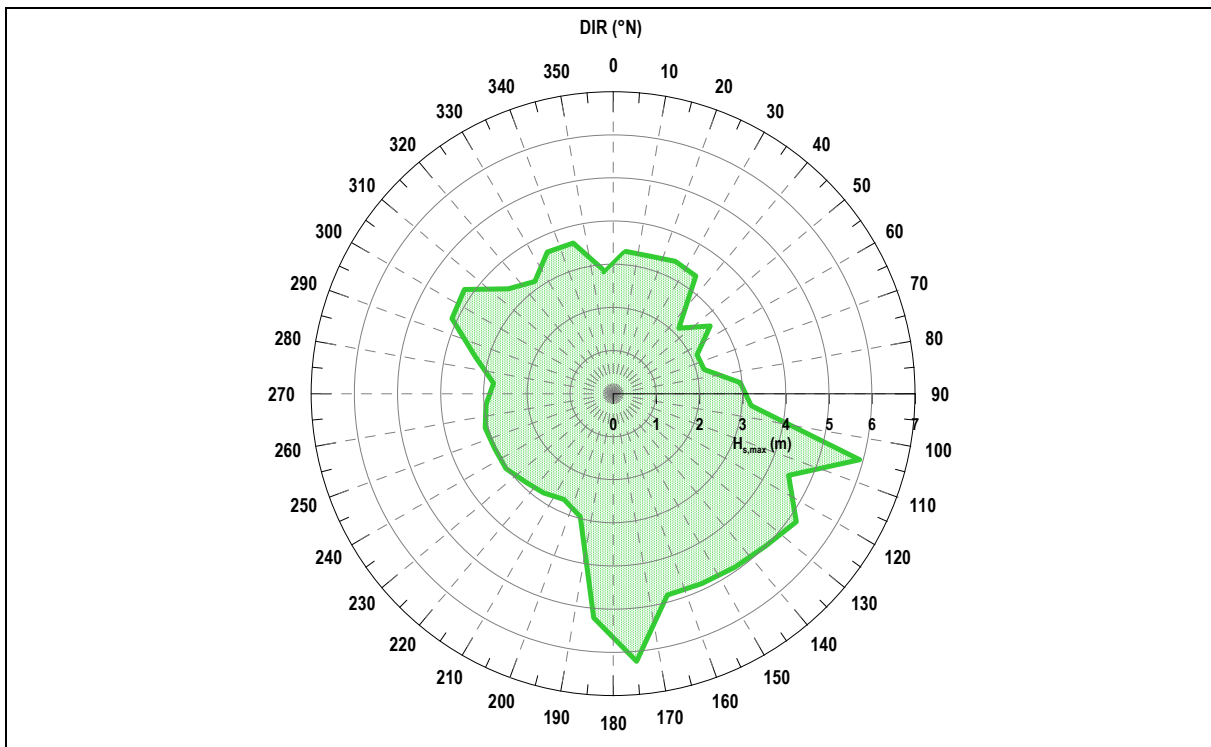


Figura 16 – Rosa delle altezze massime nel punto al largo

### 8.3 ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO

Utilizzando i dati relativi al punto UNIGE al largo, è stata condotta una statistica degli eventi estremi “al largo” (nel punto UNIGE, n.d.r.) per il periodo da gennaio 1979 a giugno 2014.

Considerate le caratteristiche del moto ondoso al largo (eventi caratterizzati da maggior energia compresi nel settore  $110^{\circ}\div 190^{\circ}\text{N}$ ) e la conformazione geografica del paraggio di Tremestieri (settore di traversia principale locale, compreso tra  $120^{\circ}$  e  $150^{\circ}\text{N}$ ), l’elaborazione statistica delle mareggiate estreme è stata condotta con riferimento al settore  $120^{\circ}\div 190^{\circ}\text{N}$ .

L’analisi statistica è stata condotta utilizzando il metodo suggerito da Gumbel, considerando le altezze significative massime relative a ciascun anno di osservazione. Nella successiva tabella si riportano gli eventi massimi annuali considerati nell’analisi statistica, e in Figura 17, si riporta graficamente la distribuzione di tali eventi in funzione della direzione di provenienza.

ANNO	Settore $120^{\circ}\div 190^{\circ}\text{N}$					
	Mese	Giorno	Ora	Hs (m)	Tp (s)	DIR ( $^{\circ}\text{N}$ )
1979	12	22	4	4.49	10.30	156.10
1980	1	15	4	4.37	9.20	135.90
1981	3	31	13	3.20	9.10	125.40
1982	2	18	0	3.85	10.00	137.40
1983	3	30	23	2.99	10.20	128.80
1984	12	29	22	4.91	11.10	145.70
1985	1	17	0	4.22	10.70	121.40
1986	3	1	21	3.80	9.90	160.70
1987	1	11	15	3.32	9.30	183.30
1988	9	21	16	3.11	9.40	154.80
1989	12	3	0	3.51	11.10	124.20
1990	1	5	15	3.93	11.30	133.80
1991	11	24	6	6.22	10.00	177.30
1992	3	26	10	3.65	9.20	166.60
1993	3	1	7	5.17	10.40	129.50
1994	2	6	17	4.09	9.40	161.00
1995	3	13	9	3.71	9.30	120.60
1996	2	28	11	4.60	10.60	126.70
1997	11	23	6	3.14	8.30	157.20
1998	11	19	11	2.70	7.60	166.20
1999	1	1	16	2.78	7.80	129.80
2000	1	13	14	3.00	8.00	139.80
2001	11	11	13	3.34	9.70	164.90
2002	5	8	13	3.16	10.20	137.20
2003	12	12	7	3.91	10.50	132.80
2004	12	26	11	4.28	9.40	175.30
2005	12	14	3	3.58	11.20	126.50
2006	1	30	14	3.90	9.10	141.10
2007	9	25	21	2.98	8.50	147.80
2008	12	11	12	4.85	10.00	154.70
2009	1	13	14	4.59	11.30	137.00
2010	1	27	5	4.02	10.7	147.9
2011	2	1	18	4.44	10.1	132.9
2012	3	10	14	3.88	11.6	129.8
2013	3	6	13	4.16	9.9	152.7
2014	1	31	13	3.92	10.1	153.2

Nella Figura 18 sono riportati i risultati delle elaborazioni statistiche, ottenuti utilizzando il metodo di Gumbel, per i tre settori considerati, mentre nella successiva tabella si riportano i valori di altezza significativa ricavati dall'analisi statistica degli eventi estremi in funzione del tempo di ritorno.

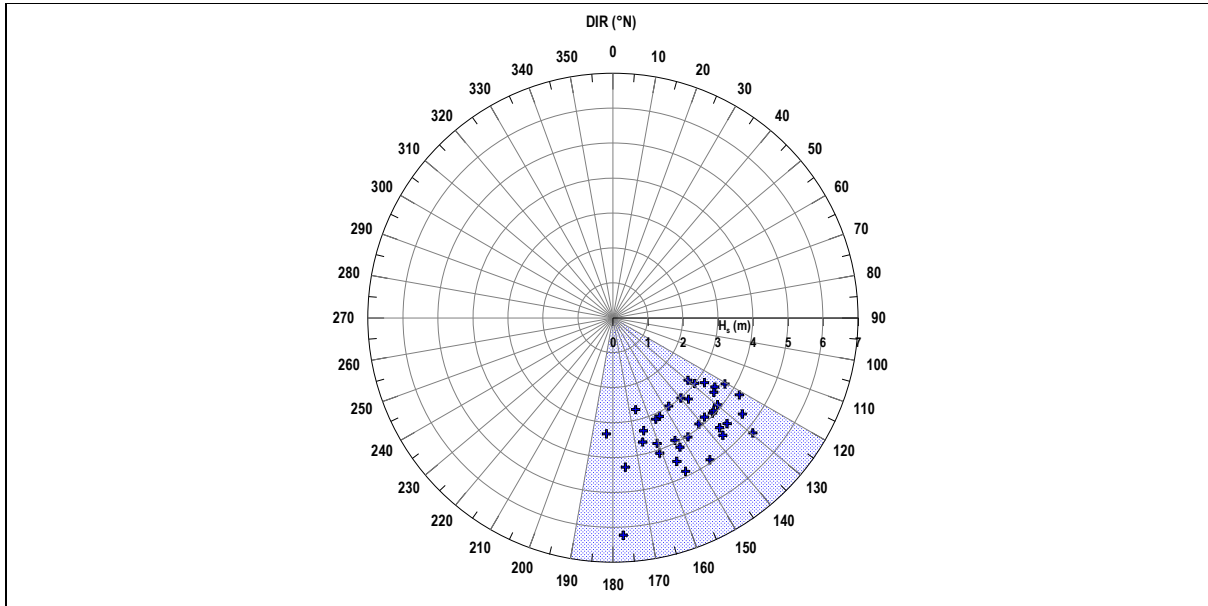


Figura 17 – Distribuzione degli eventi estremi considerati nell'analisi di Gumbel

$T_R$ (anni)	Settore 120°÷190°N
	$H_s$ (m)
10	5.00
50	6.07
100	6.53
150	6.79

Risultati statistica degli estremi

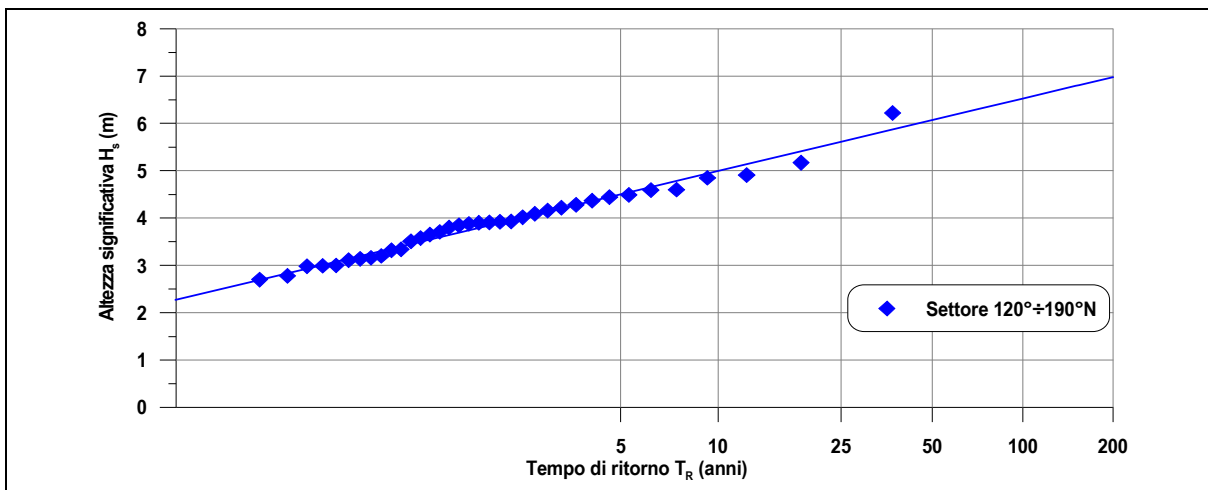


Figura 18 – Statistica degli estremi (interpolazione dei dati)

#### 8.4 CORRELAZIONE ALTEZZA-PERIODO PER GLI EVENTI ESTREMI

Al fine di associare a ciascun evento estremo al largo (caratterizzato da una determinata altezza d'onda significativa) il corrispondente periodo di picco, è stata eseguita un'analisi della correlazione tra periodo e altezza significativa per gli eventi massimi annuali considerati nell'analisi statistica degli estremi (gennaio 1979 - giugno 2014).

Nel dettaglio, è stata ricavata una curva di interpolazione dei dati di altezza d'onda significativa in funzione del periodo ( $H_S - T_P$ ), del tipo  $T_P = A+B \cdot H_S^C$ ; la curva ottenuta da tale analisi è riportata nella successiva Figura 19.

Utilizzando le correlazioni ricavate dall'interpolazione dei dati di base, è stato possibile associare a ciascun evento estremo il corrispondente periodo di picco  $T_P$ .

$T_R$ (anni)	Settore 120°÷190°N	
	$H_s$ (m)	$T_P$ (s)
10	5.00	10.64
50	6.07	11.30
100	6.53	11.56
150	6.79	11.71

Eventi estremi al largo

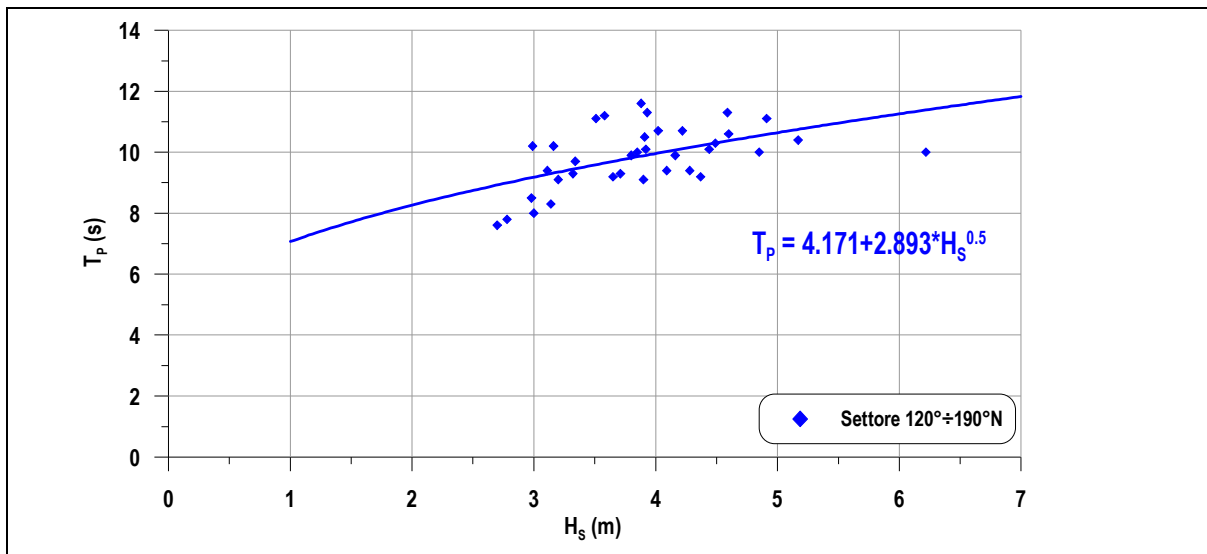


Figura 19 – Correlazione HS – TP per gli eventi estremi

## 8.5 PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA DELLE MAREGGIATE ESTREME

Le condizioni di moto ondoso, in termini di parametri caratteristici delle mareggiate estreme di fronte alle opere in progetto, sono state ricavate mediante lo studio della propagazione locale con il codice di calcolo STWAVE (descritto in dettaglio nel successivo paragrafo 8.5.3).

### 8.5.1 Definizione del dominio di calcolo STWAVE

Per la costruzione del dominio di calcolo del modello STWAVE sono stati impiegati i dati batimetrici a disposizione, ovvero le carte nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina e i più recenti rilievi locali disponibili durante la fase di redazione del progetto definitivo (rilievo batimetrico eseguito dall'A.T.I. nel 2014)

Il dominio di calcolo è stato discretizzato attraverso una griglia con maglia ortogonale a celle quadrate di passo 25 m, con lati paralleli agli assi cartesiani. La griglia ha origine nel punto di coordinate (532100.0 m E; 4200300.0 m N) e dimensioni 28'000 m x 30'000 m (Figura 20).

Le coordinate dell'origine sono espresse nel sistema di riferimento UTM33. Il bordo offshore della griglia è posto su una profondità media superiore a 500 m e passa in corrispondenza del punto UNIGE.

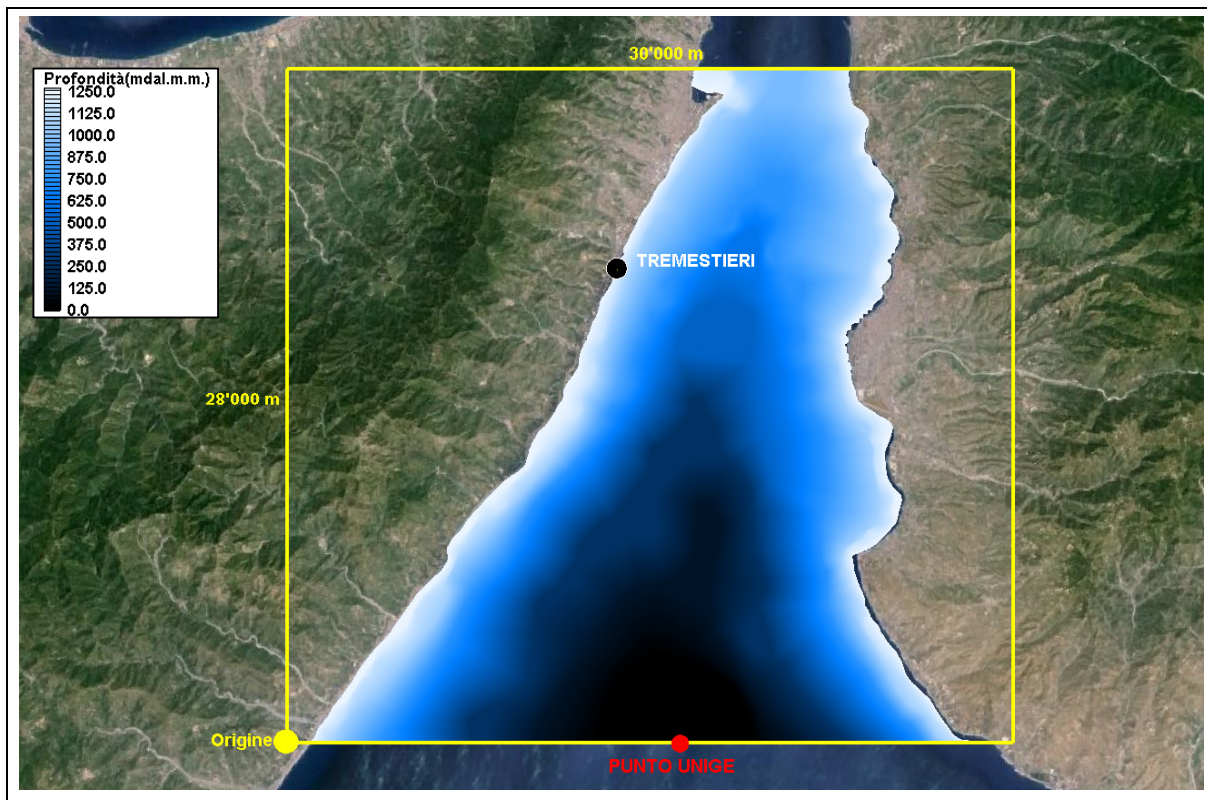


Figura 20 – Griglia di calcolo e ubicazione del punto UNIGE

### 8.5.2 Dati di input

I dati forniti in input al modello sono stati ricavati dai risultati ottenuti dall'analisi degli eventi estremi e dalla correlazione tra altezza significativa e periodo di picco riportate rispettivamente nei precedenti paragrafi 8.3 e 8.4.

Gli eventi ondosi estremi al largo (caratterizzati da altezza d'onda significativa e periodo di picco), sono stati propagati sottocosta per diverse direzioni di provenienza all'interno del settore 120°÷190°N. In particolare, a ciascun evento estremo caratterizzato da un determinato tempo di ritorno (compreso tra 10 e 150 anni), sono state associate 5 diverse direzioni di provenienza (135°, 145°, 155° e 165°N), per un totale di 20 TEST.

Di seguito, nella successiva tabella, si riportano le caratteristiche dei TEST eseguiti.

TEST	T <sub>R</sub> (anni)	Caratteristiche eventi estremi ondosi al largo		
		H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	Dir (°N)
1A	10	5.00	10.64	135
2A	50	6.07	11.30	135
3A	100	6.53	11.56	135
4A	150	6.79	11.71	135
1B	10	5.00	10.64	145
2B	50	6.07	11.30	145
3B	100	6.53	11.56	145
4B	150	6.79	11.71	145
1C	10	5.00	10.64	155
2C	50	6.07	11.30	155
3C	100	6.53	11.56	155
4C	150	6.79	11.71	155
1D	10	5.00	10.64	165
2D	50	6.07	11.30	165
3D	100	6.53	11.56	165
4D	150	6.79	11.71	165
1E	10	5.00	10.64	175
2E	50	6.07	11.30	175
3E	100	6.53	11.56	175
4E	150	6.79	11.71	175

### 8.5.3 Descrizione del codice di calcolo STWAVE

Il modello matematico STWAVE (Steady-state spectral WAVE model) (Resio 1987, 1988; Davis 1992; Smith, Resio, Zundel 1999) è un modello stazionario spettrale alle differenze finite basato sull'equazione di conservazione dell'azione.

Il modello descrive il cambiamento dei parametri caratteristici della mareggiata (altezza significativa, periodo, direzione media di propagazione, forma dello spettro di frequenza e spreading direzionale) dalle acque profonde, dove il campo d'onda è relativamente omogeneo su scala chilometrica e le zone sottocosta (le onde in tali zone sono fortemente influenzate dalle variazioni della batimetria, dal livello del mare, dalle correnti locali), dove i parametri caratteristici variano significativamente su scala dell'ordine della decina di metri.

Il modello STWAVE simula la rifrazione e lo shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, il frangimento, la diffrazione, l'interazione tra onde e il fenomeno di whitecapping.

Uno spettro d'onda è una rappresentazione statistica di stato del mare. Essenzialmente, uno spettro è rappresentato da una sovrapposizione lineare di onde monocromatiche e descrive la distribuzione dell'energia del moto ondoso come una funzione della frequenza (spettro monodimensionale di frequenza) o della frequenza e direzione (spettro bidimensionale). Un esempio di spettro monodimensionale è rappresentato in Figura 21.

Il periodo di picco dello spettro è dato dal reciproco della frequenza corrispondente al picco dello spettro. L'altezza d'onda significativa è pari a 4 volte la radice quadrata dell'area sottostante lo spettro (momento di ordine 0 dello spettro).

STWAVE è basato sulle seguenti assunzioni:

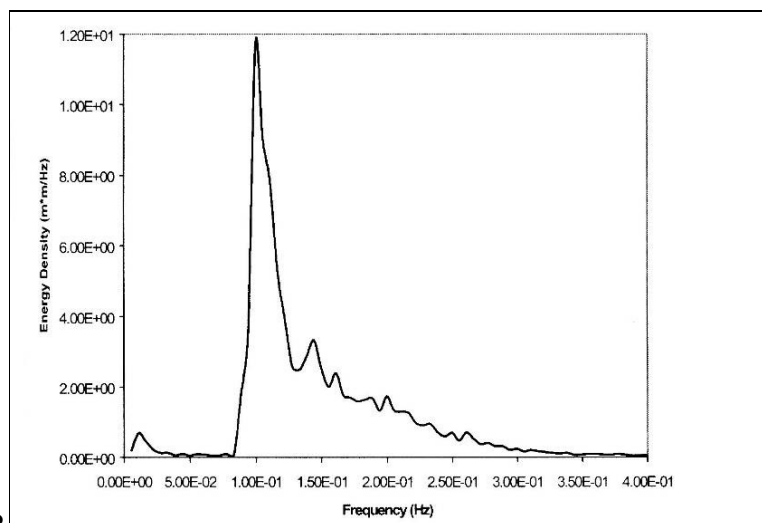
- è un modello semi-piano, ovvero l'energia del moto ondoso può propagarsi soltanto dal largo verso riva ( $\pm 87.5^\circ$  rispetto all'asse X della griglia di calcolo, che è tipicamente la direzione approssimata della normale al litorale). Le onde riflesse dalla spiaggia e dal fondale si muovono in direzioni al di fuori di questo semipiano e sono, pertanto, trascurate;
- la variazione dello spettro d'onda lungo il bordo più "al largo" del dominio di calcolo è generalmente poco rilevante (lo è senz'altro nel caso in oggetto, dato che tale bordo è lungo circa 3 km e disposto lungo batimetriche regolari). Pertanto lo spettro di input in STWAVE è costante lungo tale limite;
- è un modello stazionario: ciò riduce il tempo di calcolo ed è appropriato per condizioni ondose che variano più lentamente del tempo impiegato dalle onde per "attraversare" la griglia di calcolo;
- tiene conto soltanto di rifrazione e shoaling lineare e non rappresenta l'asimmetria dell'onda;
- l'interazione onda-corrente è basata su una corrente con velocità costante attraverso la colonna d'acqua: se si verificano forti gradienti verticali nella corrente, la loro variazione per rifrazione e shoaling non è rappresentata nel modello;
- l'attrito sul fondo viene trascurato;
- il radiation stress è calcolato sulla base della teoria d'onda lineare.

STWAVE è un modello numerico alle differenze finite, basato su una griglia cartesiana ortogonale. Le celle della griglia sono assunte quadrate ( $\Delta x = \Delta y$ ). Si possono ottenere griglie a diversa risoluzione andando a costruire griglie annidate. Ciò può essere ottenuto facendo “girare” il modello a una risoluzione più grossolana, salvando uno spettro per un punto più a riva. Questo spettro può quindi essere utilizzato come una condizione al contorno per una griglia di risoluzione maggiore. STWAVE opera in un sistema di coordinate locali, con l’asse X orientato in direzione perpendicolare alla spiaggia (con origine al largo) e asse Y orientato parallelamente alla costa, formando un sistema di coordinate che rispettano la regola della mano destra. L’orientazione dell’asse X ( $\pm 87.5^\circ$ ) definisce il semipiano che è rappresentato nel modello. L’asse Y è generalmente allineato con le batimetriche al largo. Gli angoli di provenienza delle onde sono computati in senso antiorario dall’asse X. I confini laterali nel modello possono essere specificati come terra o mare indicando la profondità delle celle come positiva (mare) o negativa (terra). Si riassume alla seguente Figura 22 gli input e gli output forniti dal modello. Per generare uno spettro occorre specificare i seguenti parametri:

- periodo di picco ( $T_p$ );
- altezza d’onda;
- profondità;
- parametro di appuntimento dello spettro ( $\gamma$ ).

Il parametro di appuntimento controlla la larghezza dello spettro in frequenza (numeri bassi forniscono picchi “larghi”, ovvero condizioni di mare vivo, numeri elevati picchi “ristretti”, ovvero condizioni di mare di swell). La distribuzione direzionale dello spettro è invece specificata mediante una direzione media e un coefficiente di spreading direzionale ( $nn$ ).

L’energia nello spettro di frequenza è proporzionale a  $\cos^m(\alpha - \alpha_m)$ , dove  $\alpha$  è la direzione della componente spettrale e  $\alpha_m$  è la direzione media di propagazione dell’onda. Una guida per la scelta di  $\gamma$  e  $nn$  è fornita nella successiva tabella. Gli spettri con periodi di picco elevati sono generalmente ristretti sia in frequenza che in direzione. Per piccoli periodi di picco gli spettri sono tipicamente allargati sia in frequenza che in direzione.



**Figura 21 – Spettro monodimensionale**



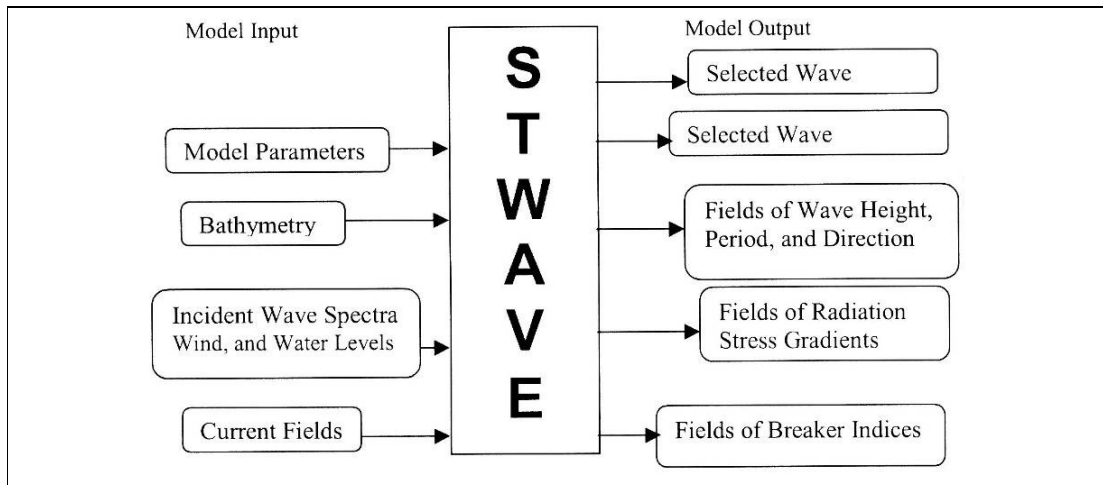


Figura 22 – Input e Output STWAVE

Correlazione tra parametri spettrali (Thompson et al., 1996)

<b><math>T_p</math> (s)</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b><math>nn</math></b>
$\leq 10$	3.3	4 (JONSWAP)
11	4	8
12	4	10
13	5	12
14	5	16
15	6	18
16	6	20
17	7	22
18	7	26
19	8	28
20	8	30

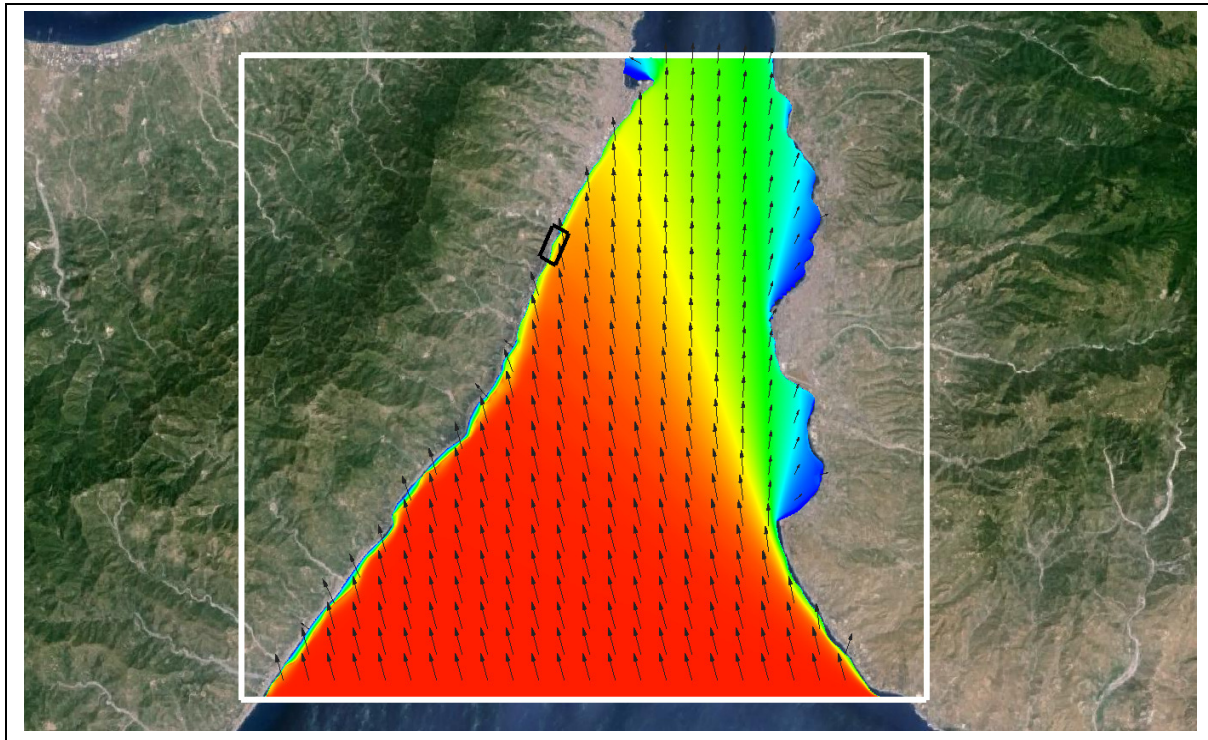
#### 8.5.4 Risultati della propagazione sottocosta degli eventi estremi

Le propagazioni eseguite mediante il codice di calcolo STWAVE hanno permesso di determinare le caratteristiche degli eventi estremi sottocosta in prossimità del paraggio di Tremestieri. A titolo di esempio, in Figura 23, si riporta il piano d'onda di una delle mareggiate estreme analizzate.

I risultati delle propagazioni sono stati estratti in una serie di punti posti di fronte alle diverse parti delle opere a mare previste dal presente Progetto Esecutivo.

Nella successiva Figura 24 sono riportati i punti di output delle propagazioni, mentre nella seguente tabella si riporta la posizione di ciascun punto e la parte di opera a cui si riferisce.

Punto Output	X (m)	Y (m)	Opera
10	545649.98	4219520.03	Cofferdam - Trappola Sud Scogliere in massi naturali - Trappola Sud e Scarico Canneto-Farota
11	545646.76	4219567.94	Scogliera in Accropode zona Sud
12	545729.42	4219856.33	
13	545733.03	4219908.72	Diga foranea
14	545894.28	4220161.70	
15	545958.06	4220401.55	Scogliera in Accropode zona Nord (in adiacenza al porto esistente)
16	546267.28	4221034.60	Scogliere in massi naturali a protezione del ripascimento
17	546377.17	4221227.95	



**Figura 23 – Piano d'onda di una mareggiata estrema**

In linea generale, i risultati ottenuti dallo studio hanno mostrato che la propagazione locale del moto ondoso all'interno dello Stretto abbatte considerevolmente le altezze d'onda, che si riportano a valori confrontabili con quelli degli studi precedenti.

Si è inoltre osservato che le mareggiate che giungono sottocosta con i valori di altezza d'onda significativa più elevati, sono quelle caratterizzate da direzione di provenienza al largo pari a  $165^\circ\text{N}$ .

I risultati delle propagazioni, estratti nei punti di output, sono riportati nelle tabelle alle pagine seguenti; sono stati riportati solo i risultati relativi alle mareggiate con direzione di provenienza al largo pari a  $165^\circ$ , in quanto rappresentano la più gravosa condizione di progetto.



**Figura 24 – Ubicazione dei punti di output**

**Caratteristiche mareggiate estreme sottocosta nel punto10**

TEST	T <sub>R</sub> (anni)	Caratteristiche al largo			PUNTO 10		
		Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)
1D	10	5.00	10.64	165	3.18	10.64	153.6
2D	50	6.07	11.30	165	4.23	11.30	151.3
3D	100	6.53	11.56	165	4.54	11.56	150.4
4D	150	6.79	11.71	165	4.72	11.71	150.3

**Caratteristiche mareggiate estreme sottocosta nei punti 11 e 12**

TEST	T <sub>R</sub> (anni)	Caratteristiche al largo			PUNTO 11			PUNTO 12		
		Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)
1D	10	5.00	10.64	165	3.20	10.64	143.2	3.08	10.64	146.8
2D	50	6.07	11.30	165	4.30	11.30	140.9	4.18	11.30	144.5
3D	100	6.53	11.56	165	4.60	11.56	140.1	4.50	11.56	143.8
4D	150	6.79	11.71	165	4.77	11.71	139.9	4.68	11.71	143.5

**Caratteristiche mareggiate estreme sottocosta nei punti 13 e 14**

TEST	T <sub>R</sub> (anni)	Caratteristiche al largo			PUNTO 13			PUNTO 14		
		Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)
1D	10	5.00	10.64	165	3.09	10.64	142.6	3.21	10.64	157.4
2D	50	6.07	11.30	165	4.22	11.30	140.5	4.27	11.30	155.4
3D	100	6.53	11.56	165	4.54	11.56	139.7	4.57	11.56	154.4
4D	150	6.79	11.71	165	4.71	11.71	139.5	4.74	11.71	154.4

**Caratteristiche mareggiate estreme sottocosta nel punto 15**

TEST	T <sub>R</sub> (anni)	Caratteristiche al largo			PUNTO 15		
		Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)
1D	10	5.00	10.64	165	3.18	10.64	144.5
2D	50	6.07	11.30	165	4.20	11.30	142.2
3D	100	6.53	11.56	165	4.49	11.56	141.3
4D	150	6.79	11.71	165	4.66	11.71	141.2

**Caratteristiche mareggiate estreme sottocosta nei punti 16 e 17**

TEST	T <sub>R</sub> (anni)	Caratteristiche al largo			PUNTO 16			PUNTO 17		
		Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Dir (°N)
1D	10	5.00	10.64	165	3.36	10.64	147.7	3.10	10.64	155.6
2D	50	6.07	11.30	165	4.58	11.30	144.8	4.15	11.30	153.4
3D	100	6.53	11.56	165	4.92	11.56	144.6	4.45	11.56	152.6
4D	150	6.79	11.71	165	4.96	11.71	143.9	4.62	11.71	152.4

## 9 ONDE DI PROGETTO PER LE OPERE

### 9.1 GENERALITÀ

Nel presente capitolo vengono definite le caratteristiche del moto ondoso assunte per il dimensionamento delle diverse parti delle opere a mare del presente Progetto Esecutivo.

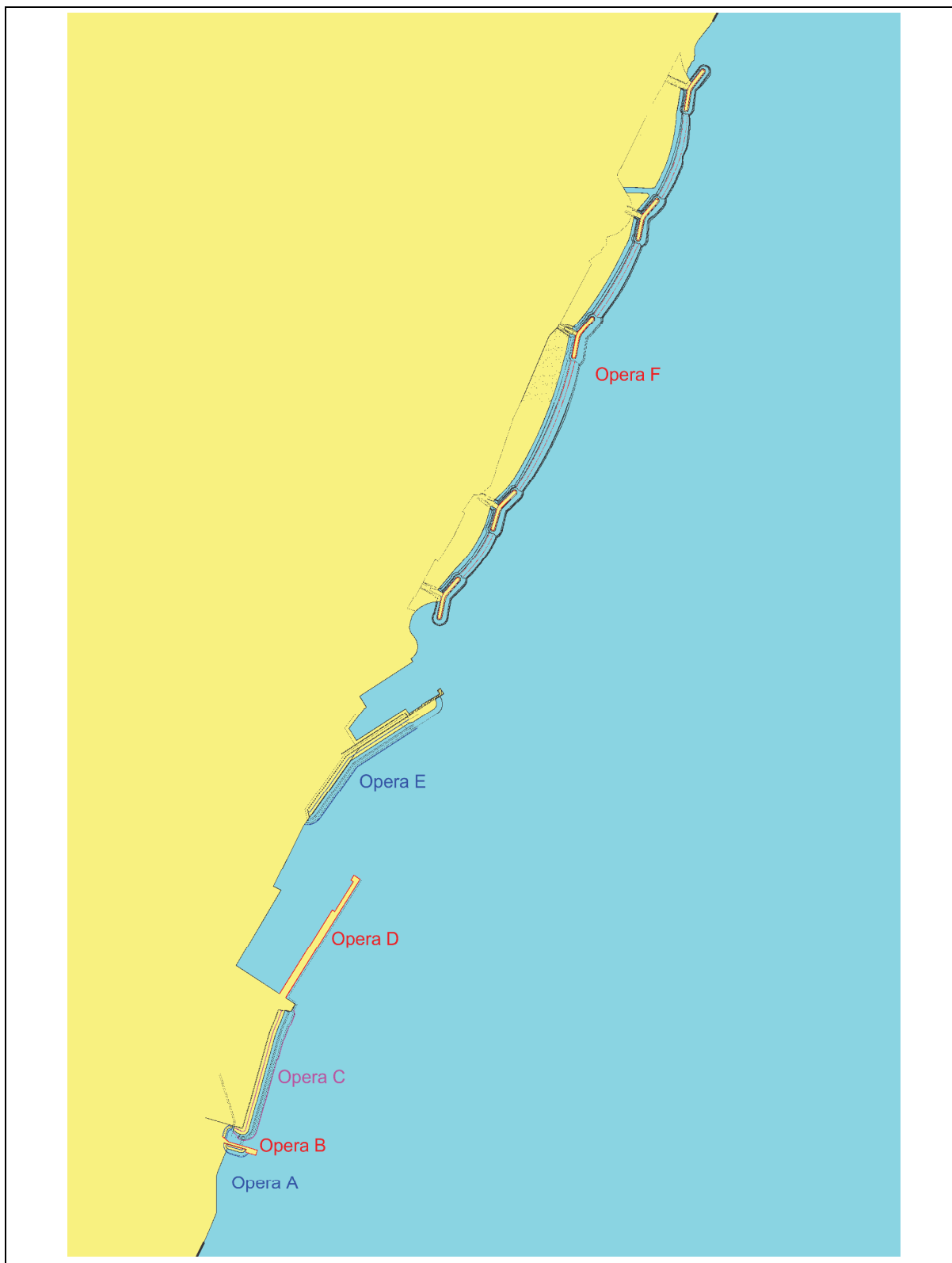
Per procedere alla definizione delle caratteristiche delle onde di progetto si è proceduto come segue:

- individuazione delle diverse opere che compongono il Progetto Esecutivo
- individuazione, per la singola opera, degli aspetti progettuali da esaminare (stabilità al moto ondoso, dimensionamento strutturale, tracimazione, etc.)
- scelta del periodo di ritorno degli eventi da considerare per i diversi aspetti;
- individuazione dei punti di output significativi per l'individuazione delle onde di progetto;
- valutazione delle caratteristiche del moto ondoso per i periodi di ritorno considerati.

### 9.2 INDIVIDUAZIONE DELLE DIVERSE OPERE IN PROGETTO

Con riferimento allo schema grafico di Figura 25, sono state individuate le seguenti opere:

- Opera A** – Scogliere in massi naturali a ridosso del pennello di contenimento della Trappola Sud e scogliere in massi naturali a protezione della foce Farota-Canneto.
- Opera B** – Pennello di contenimento della Trappola Sud, con struttura tipo Cofferdam.
- Opera C** – Scogliera in massi artificiali Accropode™ a protezione del piazzale Sud del porto.
- Opera D** – Diga foranea a parete verticale.
- Opera E** – Scogliera in massi artificiali Accropode™ a protezione della riva nel tratto tra il nuovo porto e il porto esistente.
- Opera F** – Opere di contenimento del ripascimento protetto a Nord del porto esistente.



**Figura 25 – Individuazione delle diverse opere che compongono il progetto**

### 9.3 OPERA A – SCOGLIERE IN MASSI NATURALI (TRAPPOLA SUD E FOCE FAROTA-CANNETO)

#### 9.3.1 Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento

Gli aspetti principali da considerare riguardano il dimensionamento degli elementi della mantellata.

Per definire il periodo di ritorno degli eventi da considerare si sono seguite le “Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe marittime” del Consiglio Superiore LL.PP., con le seguenti ipotesi.

Parametro	Valore prescelto	Rif. Istruz. Tecniche C.S.LL.PP.
Tipo dell'opera	Infrastrutture per uso specifico	
Livello di sicurezza richiesto	2	
Durata minima di vita	$T_R = 25$ anni	Tab. 1
Condizione di danneggiamento	Incipiente	
Rischio per la vita umana	Limitato	
Ripercussione economica	Media	
Max probabilità di danno ammissibile	$P_f = 0,30$	Tab. 2

Il periodo di ritorno di progetto risulta quindi:

$$T_{rp} = T_v / [-\ln(1-P_f)]$$

$$T_{rp} = 25 / [-\ln(0,70)] = 70 \text{ anni}$$

Si considera a favore di sicurezza  $T_{rp} = 100$  anni.

#### 9.3.2 Opera A - onda di progetto

Si prendono come riferimento le caratteristiche delle onde estreme estratte in corrispondenza del punto 10 (Cap. 7 – Tabella “Caratteristiche mareggiate estreme sottocosta nel punto 10”).

Per il dimensionamento si è quindi assunta le seguente onda di progetto.

Stabilità	$T_R = 100$ anni	$H_S = 4.54$ m	$T_P = 11.56$ s	Dir = 150.4°N
-----------	------------------	----------------	-----------------	---------------

## 9.4 OPERA B – PENNELLO DI CONTENIMENTO TRAPPOLA SUD (COFFERDAM)

### 9.4.1 Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento

Gli aspetti principali da considerare riguardano le azioni delle onde sulla parete verticale.

Per definire il periodo di ritorno degli eventi da considerare si sono seguite le “Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe marittime” del Consiglio Superiore LL.PP., con le seguenti ipotesi.

Parametro	Valore prescelto	Rif. Istruz. Tecniche C.C.LL.PP.
Tipo dell'opera	Infrastrutture per uso specifico	
Livello di sicurezza richiesto	1	
Durata minima di vita	$T_R = 15$ anni	Tab. 1
Condizione di danneggiamento	Totale	
Rischio per la vita umana	Limitato	
Ripercussione economica	Media	
Max probabilità di danno ammissibile	$P_f = 0,15$	Tab. 2

Il periodo di ritorno da considerare risulta quindi:

$$T_{rp} = T_v / [-\ln(1-P_f)]$$

$$T_{rp} = 15 / [-\ln(0,85)] = 92 \text{ anni}$$

Si considera a favore di sicurezza  $T_{rp} = 100$  anni.

### 9.4.2 Opera B - .onda di progetto

Si prendono come riferimento le caratteristiche delle onde estreme estratte in corrispondenza del punto 10 (Cap. 7 – Tabella “Caratteristiche mareggiate estreme sottocosta nel punto 10”).

Per il dimensionamento si è quindi assunta la seguente onda di progetto.

Stabilità	$T_R = 100$ anni	$H_S = 4.54$ m	$T_P = 11.56$ s	Dir = 150.4°N
-----------	------------------	----------------	-----------------	---------------



## 9.5 OPERA C – SCOGLIERA IN MASSI ARTIFICIALI ACCROPODE™ NELLA ZONA SUD DEL PORTO

### 9.5.1 Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento

Gli aspetti principali da considerare riguardano:

- dimensionamento degli elementi della mantellata;
- tracimazione del moto ondoso.

Per definire il periodo di ritorno degli eventi da considerare si sono seguite le “Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe marittime” del Consiglio Superiore LL.PP., con le seguenti ipotesi.

Parametro	Valore prescelto	Rif. Istruz. Tecniche C.S.LL.PP.
Tipo dell'opera	Infrastrutture per uso specifico	
Livello di sicurezza richiesto	2	
Durata minima di vita	$T_R = 25$ anni	Tab. 1
Condizione di danneggiamento	Incipiente	
Rischio per la vita umana	Limitato	
Ripercussione economica	Media	
Max probabilità di danno ammissibile	$P_f = 0,30$	Tab. 2

Il periodo di ritorno da considerare risulta quindi:

$$T_{rp} = T_v / [-\ln(1-P_f)]$$

$$T_{rp} = 25 / [-\ln(0,70)] = 70 \text{ anni}$$

Si considera a favore di sicurezza  $T_{rp} = 100$  anni.

Per quanto riguarda le verifiche di tracimazione si sono considerati i periodi di ritorno  $T_R = 10$  anni e  $T_R = 50$  anni.

### 9.5.2 Opera C - onde di progetto

Si prendono come riferimento le caratteristiche delle onde estreme estratte in corrispondenza dei punti 11 e 12 (Cap. 7 – Tabella “Caratteristiche mareggiate estreme sottocosta nei punti 11 e 12”).

Per il dimensionamento si sono quindi assunte le seguenti onde di progetto.

Stabilità	$T_R = 100$ anni	$H_S = 4.60$ m	$T_P = 11.56$ s	Dir = 140.1°N
Tracimazione	$T_R = 10$ anni	$H_S = 3.20$ m	$T_P = 10.64$ s	Dir = 143.2°N
	$T_R = 50$ anni	$H_S = 4.30$ m	$T_P = 11.30$ s	Dir = 140.9°N

## 9.6 OPERA D – DIGA FORANEA A PARETE VERTICALE

### 9.6.1 Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento

Gli aspetti principali per cui questo punto risulta significativo sono:

- azioni delle onde sulla parete verticale del tratto terminale del molo foraneo che, essendo imbasato su fondali più profondi, è soggetto ai maggiori carichi
- tracimazione del muro paraonde.

Per definire il periodo di ritorno degli eventi da considerare si sono seguite le “Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe marittime” del Consiglio Superiore LL.PP., con le seguenti ipotesi.

Parametro	Valore prescelto	Rif. Istruz. Tecniche C.S.LL.PP.
Tipo dell'opera	Infrastrutture per uso specifico	
Livello di sicurezza richiesto	2	
Durata minima di vita	$T_R = 25$ anni	Tab. 1
Condizione di danneggiamento	Totale	
Rischio per la vita umana	Limitato	
Ripercussione economica	Media	
Max probabilità di danno ammissibile	$P_f = 0,15$	Tab. 2

Il periodo di ritorno da considerare risulta quindi:

$$T_{rp} = T_v / [-\ln(1-P_f)]$$

$$T_{rp} = 25 / [-\ln(0,85)] \approx 150 \text{ anni}$$

Per quanto riguarda le verifiche di tracimazione si sono considerati i periodi di ritorno  $T_R = 10$  anni e  $T_R = 50$  anni.

### 9.6.2 Opera D - onde di progetto

Si prendono come riferimento le caratteristiche delle onde estreme estratte in corrispondenza del punto 14 (Cap. 7 – Tabella “Caratteristiche mareggiate estreme sottocosta nei punti 13 e 14”).

Per il dimensionamento si sono quindi assunte le seguenti onde di progetto:

Stabilità	$T_R = 150$ anni	$H_S = 4.74$ m	$T_P = 11.71$ s	Dir = 154.4°N
Tracimazione	$T_R = 10$ anni	$H_S = 3.21$ m	$T_P = 10.64$ s	Dir = 157.4°N
	$T_R = 50$ anni	$H_S = 4.27$ m	$T_P = 11.30$ s	Dir = 155.4°N

## 9.7 OPERA E – SCOGLIERA IN MASSI ARTIFICIALI ACCROPODE™ NEL TRATTO TRA IL NUOVO PORTO E IL PORTO ESISTENTE

### 9.7.1 Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento

Gli aspetti principali da considerare riguardano:

- dimensionamento degli elementi della mantellata;
- tracimazione del moto ondoso.

Per definire il periodo di ritorno degli eventi da considerare si sono seguite le “Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe marittime” del Consiglio Superiore LL.PP., con le seguenti ipotesi.

Parametro	Valore prescelto	Rif. Istruz. Tecniche C.S.LL.PP.
Tipo dell'opera	Infrastrutture per uso specifico	
Livello di sicurezza richiesto	2	
Durata minima di vita	$T_R = 25$ anni	Tab. 1
Condizione di danneggiamento	Incipiente	
Rischio per la vita umana	Limitato	
Ripercussione economica	Media	
Max probabilità di danno ammissibile	$P_f = 0,30$	Tab. 2

Il periodo di ritorno da considerare risulta quindi:

$$T_{rp} = T_v / [-\ln(1-P_f)]$$

$$T_{rp} = 25 / [-\ln(0,70)] = 70 \text{ anni}$$

Si considera a favore di sicurezza  $T_{rp} = 100$  anni.

Per quanto riguarda le verifiche di tracimazione si sono considerati i periodi di ritorno  $T_R = 1$  anno,  $T_R = 10$  anni e  $T_R = 50$  anni.

### 9.7.2 Opera E - onde di progetto

Si prendono come riferimento le caratteristiche delle onde estreme estratte in corrispondenza del punto 15 (Cap. 7 – Tabella “Caratteristiche mareggiate estreme sottocosta nel punto 15”).

Per il dimensionamento si sono quindi assunte le seguenti onde di progetto:

Stabilità	$T_R = 100$ anni	$H_S = 4.49$ m	$T_P = 11.56$ s	Dir = 141.3°N
Tracimazione	$T_R = 10$ anni	$H_S = 3.18$ m	$T_P = 10.64$ s	Dir = 144.5°N
	$T_R = 50$ anni	$H_S = 4.20$ m	$T_P = 11.30$ s	Dir = 142.2°N

## 9.8 OPERA F – OPERE DI CONTENIMENTO DEL RIPASCIMENTO PROTETTO

### 9.8.1 Aspetti da esaminare e periodi di ritorno di riferimento

Gli aspetti principali da considerare riguardano il dimensionamento degli elementi della mantellata delle scogliere emerse e sommerse poste a protezione del ripascimento.

Per definire il periodo di ritorno degli eventi da considerare si sono seguite le “Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe marittime” del Consiglio Superiore LL.PP., con le seguenti ipotesi.

Parametro	Valore prescelto	Rif. Istruz. Tecniche C.S.LL.PP.
Tipo dell'opera	Infrastrutture per uso generale	
Livello di sicurezza richiesto	1	
Durata minima di vita	$T_R = 25$ anni	Tab. 1
Condizione di danneggiamento	Incipiente	
Rischio per la vita umana	Limitato	
Ripercussione economica	Bassa	
Max probabilità di danno ammissibile	$P_f = 0,50$	Tab. 2

Il periodo di ritorno da considerare risulta quindi:

$$T_{rp} = T_v / [-\ln(1-P_f)]$$

$$T_{rp} = 25 / [-\ln(0,50)] = 36 \text{ anni}$$

Si considera a favore di sicurezza  $T_{rp} = 50$  anni.

### 9.8.2 Opera F - onde di progetto

Si prendono come riferimento le caratteristiche delle onde estreme estratte in corrispondenza dei punti 16 e 17 (Cap. 8 – Tabella “Caratteristiche mareggiate estreme sottocosta nei punti 16 e 17”).

Per il dimensionamento si sono quindi assunte le seguenti onde di progetto:

Stabilità scogliere emerse (punto 16)	$T_R = 50$ anni	$H_S = 4.58$ m	$T_P = 11.30$ s	Dir = 144.9°N
Stabilità scogliere sommerse (punto 17)	$T_R = 50$ anni	$H_S = 4.15$ m	$T_P = 11.30$ s	Dir = 153.4°N

## **10 EVOLUZIONE STORICA DELLA LINEA DI RIVA**

Di seguito si riporta l'analisi dell'evoluzione storica del litorale di Tremestieri estratta dal Progetto Preliminare, riferita ad un periodo di circa 30 anni (dal 1976 al 2007).

Nel successivo paragrafo 10.2 si riporta un confronto tra le linee di riva più recenti (dal 2008 al 2014), estratto dagli studi condotti in fase di redazione del progetto definitivo. In questo caso il confronto è stato condotto solamente con riferimento al tratto in cui verrà realizzata la nuova piattaforma intermodale (sostanzialmente il tratto B dell'analisi riportata nel Progetto Preliminare).

### **10.1 EVOLUZIONE STORICA DEL LITORALE (DA PROGETTO PRELIMINARE)**

Il litorale in oggetto, compreso tra la località di Mili Marina a Sud e la località Lardereria a Nord, è stato suddiviso in tre tratti (A, B e C procedendo da Sud verso Nord), per rendere più comprensibile e contestualizzato il confronto tra le linee di riva.

#### **10.1.1 Confronto linee di riva 1976 – 1985 (Figura 26)**

In generale, tra il 1976 ed il 1985 si è verificato un diffuso fenomeno di accumulo di materiale, maggiormente significativo nella zona Nord del litorale in oggetto; nello specifico:

- il tratto A presenta discreti fenomeni di avanzamento della linea di costa che raggiungono i 25 m nel punto di maggiore accumulo. Complessivamente, il fenomeno interessa una superficie pari a circa 4'700 m<sup>2</sup>;
- il tratto B presenta fenomeni di accumulo significativi, localizzati particolarmente nella zona appena a Sud del vallone Guidari. L'avanzamento della linea di riva raggiunge i 35 m e la superficie di spiaggia aumenta di circa 7'300 m<sup>2</sup>;
- nel tratto C l'avanzamento del litorale è dello stesso ordine di grandezza dei tratti precedenti (20-30 m), ma ha un carattere più regolare ed interessa quindi superfici maggiori, pari circa a 15'200 m<sup>2</sup>.

#### **10.1.2 Confronto linee di riva 1985 – 1998 (Figura 26)**

Tra il 1985 ed il 1998 si registra una inversione di tendenza nel tratto più a Nord, che passa appunto da una decisa tendenza all'avanzamento ad una tendenza all'erosione. Nel tratto centrale si verifica un significativo accumulo, mentre nel tratto più a Sud si ha una sostanziale situazione di equilibrio; nello specifico:

- nel tratto A non si osservano significative variazioni della posizione della linea di costa;
- nel tratto B, sempre in prossimità del vallone Guidari l'accumulo diviene rilevante, generando una superficie di accrescimento della spiaggia pari a circa 21'700 m<sup>2</sup>. L'avanzamento raggiunge il valore di 75 m, cioè in media ben 25 m all'anno;
- il tratto C presenta una generale tendenza erosiva, con un arretramento medio pari a circa 15 m ed una perdita di superficie di spiaggia pari a circa 8'200 m<sup>2</sup>.

#### **10.1.3 Confronto linee di riva 1998 – 2002 (Figura 27)**

In questa finestra temporale (di soli 4 anni) la costa non manifesta particolari tendenze di accumulo o erosione del materiale. Prevala una certa tendenza all'arretramento della linea di riva, con valori però sempre mediamente inferiori ai 10 metri.

#### **10.1.4 Confronto linee di riva 2002 – 2007 (Figura 27)**

Pur trattandosi di un periodo di soli 5 anni, sono evidenti gli effetti della costruzione del nuovo porto di Tremestieri nei tratti di costa B (a Sud del porto) e C (a Nord del porto). In particolare:

- nel tratto A non si osservano significative variazioni della posizione della linea di riva;
- nel tratto B si possono osservare due zone a comportamento opposto: nella prima, a Sud del vallone Guidari, si ha una tendenza all'erosione del litorale con arretramento medio della linea di riva pari a circa 20 m e una perdita di superficie di spiaggia pari a  $8'100 \text{ m}^2$ ; nella seconda si ha una marcata tendenza all'accumulo di materiale, a ridosso del molo di sopraflutto del nuovo porto. L'ordine di grandezza di questo avanzamento è di 40 m e corrisponde ad un incremento della superficie di spiaggia pari a circa  $12'800 \text{ m}^2$ ;
- nel tratto C, a Nord del nuovo porto, le opere rigide (scogliere) poste a protezione dei centri abitati impediscono che i fenomeni erosivi possano svilupparsi ulteriormente, ma è evidente che la tendenza evolutiva della spiaggia resta fortemente erosiva.

#### **10.2 EVOLUZIONE RECENTE DEL LITORALE (2008-2017, FIGURA 28)**

Il confronto delle linee di riva rilevate nel corso degli ultimi 10 anni mostra una sostanziale stabilità del tratto di litorale sopraflutto all'attuale approdo di Tremestieri. Ciò è dovuto al fatto che la linea di riva già nel 2007 aveva raggiunto la testata del molo foraneo (cfr. Figura 27); pertanto, partendo da una condizione di "saturazione", è evidente che il materiale proveniente da Sud di fatto transita interamente oltre il molo, contribuendo all'insabbiamento del porto.

Per quanto riguarda invece il litorale più a Sud, si osserva una variabilità dell'andamento della linea di riva nel tratto di costa in cui verranno realizzati il nuovo bacino portuale e la radice del nuovo molo di sopraflutto della piattaforma logistica intermodale. Con particolare riferimento all'ultimo triennio (dal 2014 al 2017), si osserva un'alternanza marcata nell'andamento della linea di costa con un accumulo nel tratto più a Nord (dove verrà realizzato il bacino) e arretramento nel tratto più a Sud (in corrispondenza del futuro tratto di radice del molo foraneo). Questa variabilità trova riscontro anche nel confronto tra i rilievi dei fondali che mostrano, alternativamente, approfondimenti e innalzamenti della batimetria.

Procedendo verso Sud, dallo sbocco del Farota-Canneto in poi, la linea di riva ritorna ad essere sostanzialmente stabile.



Figura 26 – Confronto linee di riva 1976-1985 e 1985-1998

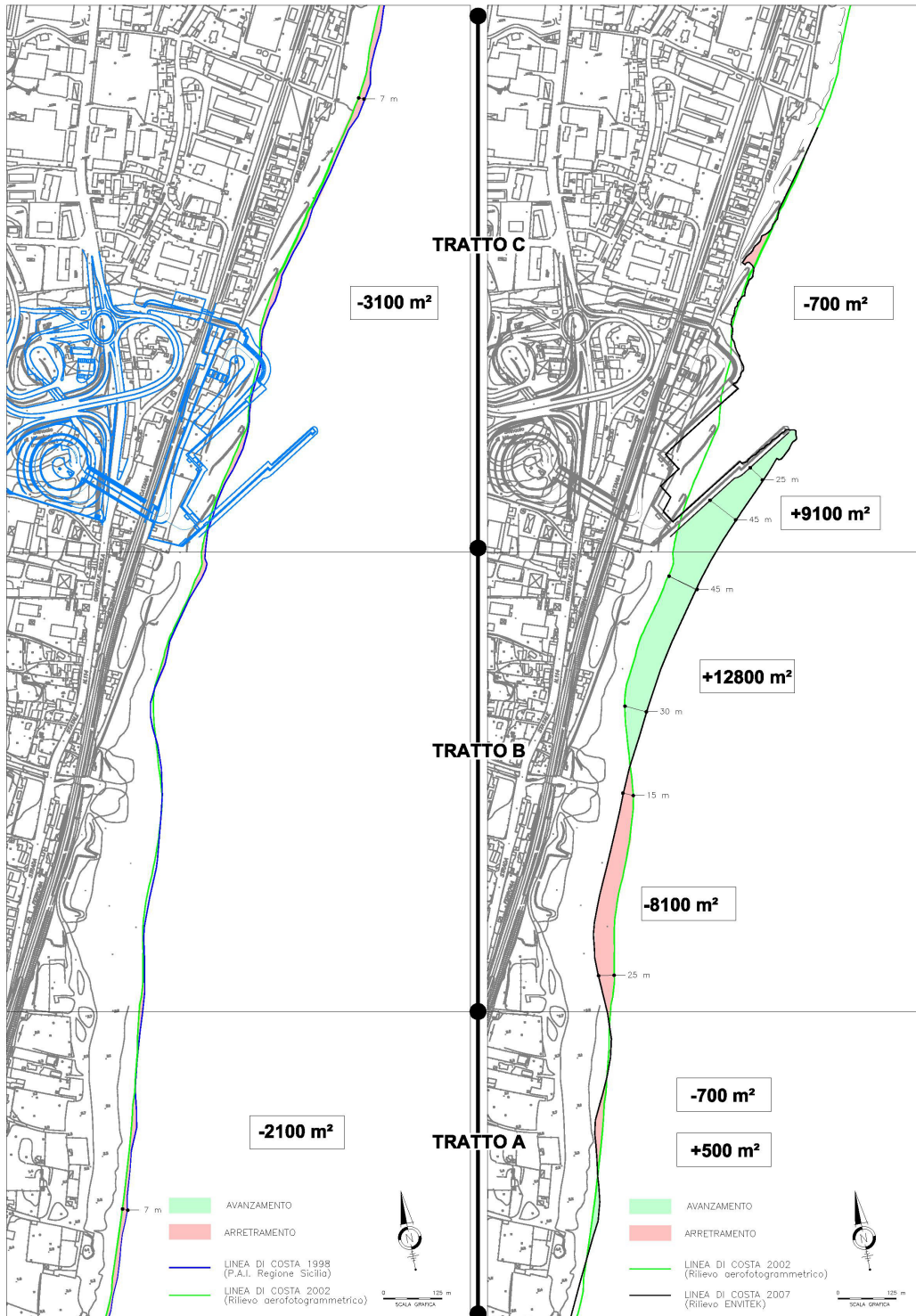
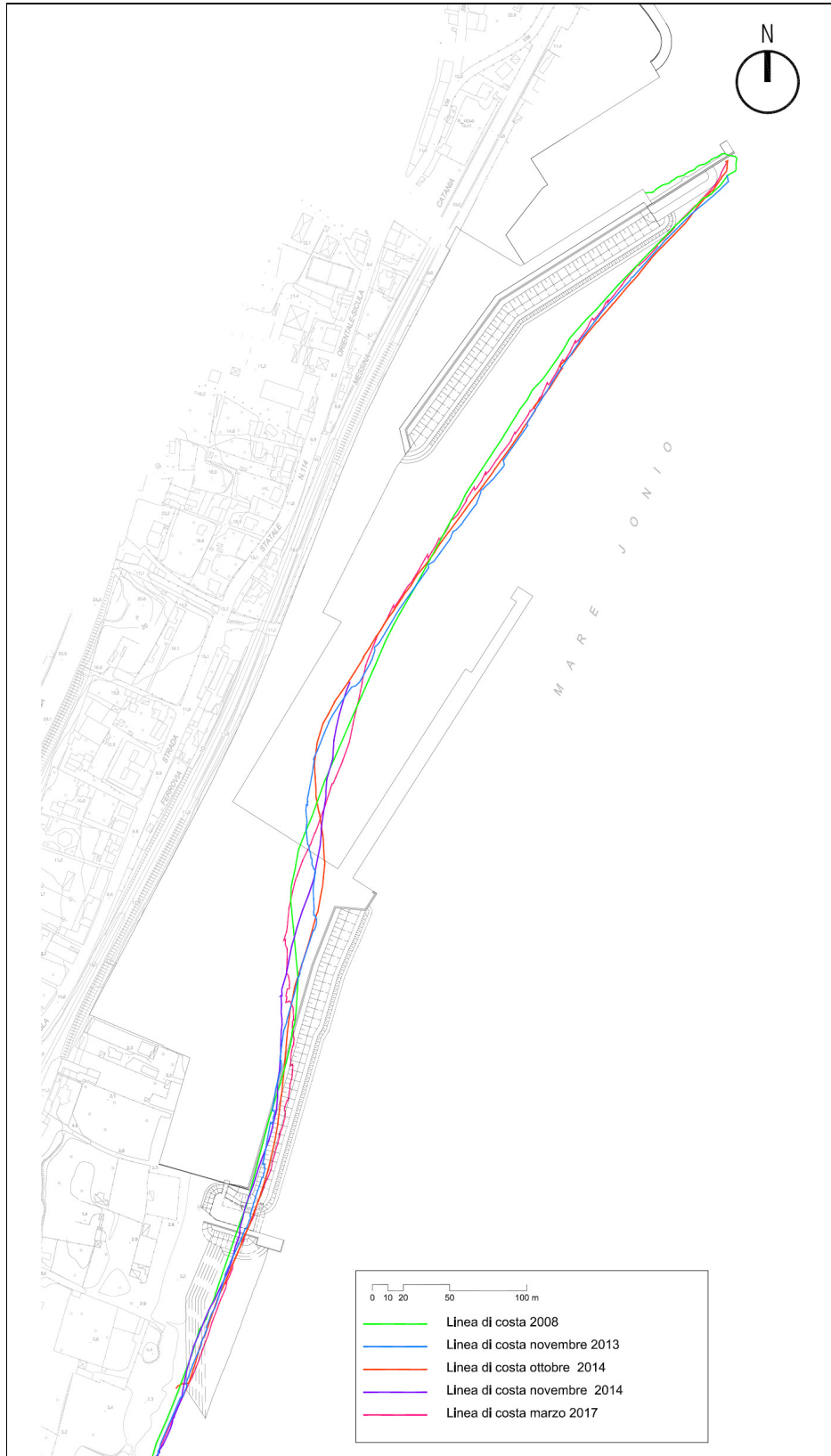


Figura 27 – Confronto linee di riva 1998-2002 e 2002-2007





**Figura 28 – Confronto linee di riva 2008-2017**

## 11 STUDIO DEL TRASPORTO SOLIDO LITORANEO

In fase di redazione del progetto definitivo è stato eseguito uno studio di dettaglio mediante modellazione matematica dell'evoluzione della linea di riva e del trasporto solido, opportunamente tarato sui dati disponibili, in configurazione attuale e in fase di esercizio.

Con riferimento alla gestione dello scalo portuale in fase di esercizio (ovvero una volta terminata la costruzione della nuova piattaforma logistica intermodale), si è optato per la realizzazione di una "trappola per sedimenti" posta immediatamente a Sud del pennello previsto in corrispondenza dello sfocio Farota-Canneto. I risultati dell'analisi del trasporto solido in presenza della prevista "trappola Sud" sono riportati nel successivo paragrafo 11.6.

Lo studio morfologico dell'evoluzione del litorale di Tremestieri è stato condotto mediante l'utilizzo del codice di calcolo GENESIS, sviluppato dal centro di ricerca americano C.E.R.C. (U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center), utilizzando come base le batimetrie ricavate dalle carte nautiche dell'I.I.M. e da un rilievo locale (eseguito nell'ottobre 2014).

Inizialmente è stata svolta una fase di taratura del modello e successivamente, una volta individuati i valori più idonei per le costanti di taratura ( $K_1$  e  $K_2$ ), sono state eseguite le simulazioni di evoluzione in stato attuale e in configurazione di progetto.

La fase di taratura permette di adattare il modello matematico alla situazione del paraggio oggetto di studio: il modello, infatti, interpreta la realtà fisica in maniera semplificata, tenendo conto qualitativamente dei principali fenomeni che governano l'evoluzione morfologica della costa.

L'operazione di taratura consente, in maniera implicita, di tenere conto di tutti i fattori non direttamente esplicitabili sotto la forma di relazioni causa-effetto. Il principale obiettivo di questa fase è la determinazione dei coefficienti  $K_1$  e  $K_2$ , che correggono la formula del C.E.R.C. (1984), esprime la relazione tra trasporto solido e flusso di energia in direzione parallela alla riva.

Ai fini della modellazione matematica, è stato individuato un dominio di calcolo idoneo per il sito in esame, schematizzando opportunamente (come in seguito specificato) le singolarità presenti.

## 11.1 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA

La fase iniziale dello studio di evoluzione morfologica consiste nel trasferimento sottocosta delle caratteristiche del clima ondoso. Il trasferimento può essere eseguito utilizzando due differenti approcci: usando un modello interno di propagazione semplificato oppure utilizzando un modello esterno (codice di calcolo STWAVE).

Il modello interno di propagazione può essere applicato a domini di calcolo caratterizzati da batimetriche regolari pressoché parallele alla linea di riva; le caratteristiche delle onde al frangimento (altezza e direzione) sono calcolate per ciascun punto della griglia di calcolo a partire dalle caratteristiche delle onde fornite in input al modello.

Il codice di calcolo STWAVE (modello di trasformazione esterno) è invece in grado di eseguire la trasformazione delle onde anche nel caso di batimetria irregolare, poiché tiene conto anche del fenomeno della diffrazione. La propagazione con STWAVE permette di calcolare le caratteristiche delle onde in corrispondenza di una serie di stazioni poste convenzionalmente sottocosta, al limite della fascia attiva. I risultati della propagazione vengono salvati in un file e forniti in input al codice di calcolo GENESIS che, per la propagazione dalle stazioni alla profondità di frangimento, si avvale del modello di propagazione interna.

Viste le potenzialità del modello, generalmente si preferisce utilizzare per la trasformazione delle onde dal largo verso costa il codice di calcolo STWAVE, il quale, tenendo in considerazione anche la diffrazione, fornisce risultati più verosimili rispetto al modello semplificato (“Internal wave model”). Nel caso in esame però, l’elevata pendenza delle batimetriche nelle acque basse e di transizione non permette di rappresentare con un’adeguata precisione le stazioni nel modello STWAVE (soprattutto in termini di profondità). Di conseguenza, in base alle considerazioni appena esposte e considerando che la batimetria del paraggio risulta abbastanza regolare, si è scelto di utilizzare l’“internal wave model” per la trasformazione delle onde.

## 11.2 PREMESSA ALLA MODELLAZIONE

I modelli matematici costituiscono un valido strumento per l’analisi e la previsione dell’evoluzione della morfologia costiera. Il principale vantaggio dei modelli matematici risiede nella possibilità, una volta implementati, di studiare in tempi ragionevolmente brevi diverse soluzioni progettuali ovvero l’effetto di forzanti di natura diversa (mareggiate eccezionali, variazioni del clima, ecc.).

La modellazione dell’evoluzione morfologica di un litorale coinvolge fenomeni di natura diversa quali il moto ondoso incidente il litorale stesso, la presenza di correnti costiere, il trasporto solido longitudinale (in direzione parallela alla linea di riva), il trasporto solido trasversale (perpendicolare alla linea di riva), l’influenza di strutture collocate all’interno della zona attiva della spiaggia (quella cioè interessata da fenomeni di migrazione dei sedimenti per azione del moto ondoso) e di eventuali interventi di dragaggio o ripascimento artificiale.

In primo luogo è fondamentale la determinazione delle forzanti del sistema, cioè del clima meteomarinico locale. Sulla base di questi dati è possibile quindi valutare il trasporto solido nelle diverse direzioni nelle diverse celle che compongono il modello matematico. Una volta determinate le forzanti, si passa quindi alla valutazione del trasporto solido nelle diverse direzioni, valutazione che si basa su criteri semiempirici che legano le caratteristiche del moto ondoso alla geometria della spiaggia ed alle caratteristiche dei sedimenti che la costituiscono.

Va quindi analizzata l’influenza delle strutture collocate all’interno della zona attiva, sia in termini di modificazione della propagazione locale del moto ondoso che di interazione con il regime di trasporto solido, cioè di valutazione della variazione indotta localmente sulle forzanti del sistema

dalla presenza di opere e della capacità di queste ultime di intercettare, totalmente o in una parte da quantificare, il trasporto solido. Alla stregua delle opere in zona attiva vanno considerati gli interventi di dragaggio e ripascimento, che modificano localmente il campo di moto delle onde incidenti e alterano in alcune zone il budget di sedimenti passibile di migrazione per effetto delle forzanti già determinate.

### 11.3 DATI SEDIMENTOLOGICI

Per quanto riguarda le caratteristiche granulometriche dei sedimenti che costituiscono la fascia attiva del litorale, si è fatto riferimento alle analisi granulometriche condotte sui campioni prelevati lungo il litorale (cfr. elaborato “SS-GS – Relazione geomorfologica-sedimentologica” relativo al Progetto Preliminare dei “Lavori di costruzione della piattaforma logistica intermodale Tremestieri con annesso scalo portuale”, redatto dal Prof. G. Randazzo nel 2008).

Tenendo presente la peculiarità dell’area di interesse dello studio specifico, si è tuttavia preferito dare maggiore peso alla forma del profilo che ai dati granulometrici disponibili, utilizzando come diametro rappresentativo della spiaggia attiva quello risultante dal best fit dei profili trasversali di spiaggia nella zona di interesse, nella fattispecie in prossimità della radice del molo esistente e dell’estremità meridionale dell’area di intervento della nuova Piattaforma Logistica Intermodale, dove andrà realizzato il pennello di contenimento dei sedimenti e, auspicabilmente, anche una specifica trappola che, in esercizio, costituirà il punto di prelievo dei sedimenti che altrimenti andrebbero ad insabbiare il porto.

Il diametro rappresentativo del profilo trasversale di spiaggia nelle zone di interesse è di 25 mm.

### 11.4 PROFONDITÀ DI CHIUSURA E ALTEZZA DI SWASH

La profondità di chiusura rappresenta la profondità limite al di sotto della quale il profilo trasversale non subisce cambiamenti significativi, nell’intervallo di tempo per cui si esegue la simulazione.

La valutazione corretta della profondità di chiusura per un dato sito è normalmente condotta sulla base dell’analisi di dati storici che documentino l’evoluzione del tempo del profilo trasversale in sezioni significative del sito in oggetto.

Qualora tali dati non siano disponibili, è possibile valutare la profondità tramite la relazione proposta da Hallermeier:

$$h_c = 2.28 \cdot H_{0,12} - 68.5 \cdot \left( \frac{H_{0,12}^2}{g \cdot T^2} \right),$$

dove  $H_{0,12}$  rappresenta il valore dell’altezza significativa superata in media per 12 ore all’anno e  $T$  il periodo ad essa associato. Si fa presente che la correlazione tra altezze e periodi è stata rivalutata rispetto alle ipotesi contenute nel progetto preliminare.

Utilizzando la tabella del clima ondoso medio ricostruito al largo del paraggio è stato possibile ricostruire la curva di durata e determinare il valore di  $H_{0,12}$ . In Figura 28 è rappresentata la curva di durata per il calcolo della  $H_{0,12}$ . Sulla base della frequenza annua è stata valutata un’altezza d’onda  $H_{0,12}$  pari a 2.79 m, alla quale è associato un periodo di circa 9 s.

La profondità di chiusura  $h_c$  è risultata di conseguenza pari a circa 5.7 m; l’altezza di swash  $D_B$  è stata stimata in 3.0 m sulla base del rilievo delle zone di massima risalita delle onde (valore medio nell’intorno dell’area di interesse). Di conseguenza l’altezza della fascia attiva risulta pari a 8.7 m.

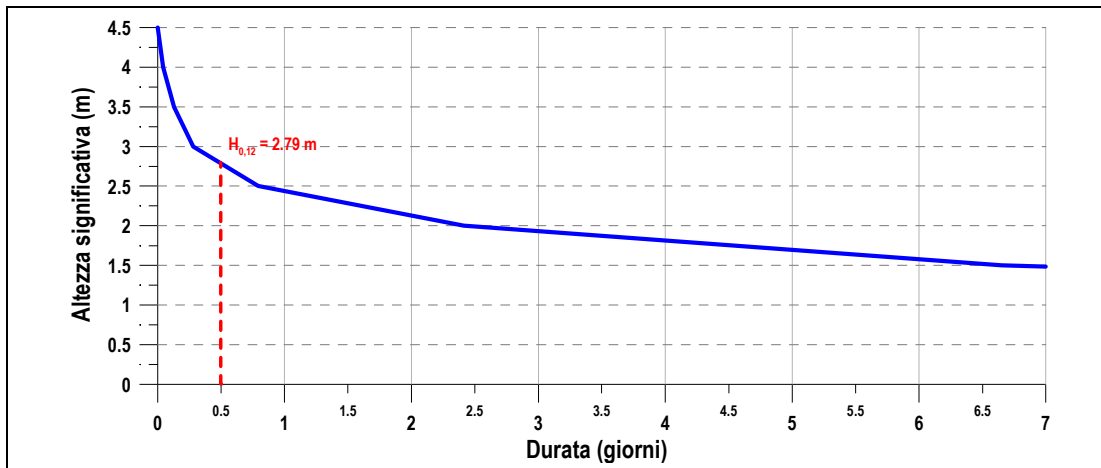


Figura 29 – Individuazione  $H_{0,12}$  – Curva di durata relativa al clima ondoso caratteristico del paraggio

### 11.5 TARATURA DEL MODELLO ED EVOLUZIONE IN CONFIGURAZIONE ATTUALE

La fase di taratura consente di adattare il modello matematico alla situazione del paraggio oggetto di studio: il modello, infatti, interpreta necessariamente la realtà fisica in maniera semplificata, tenendo conto qualitativamente dei principali fenomeni che governano l'evoluzione morfologica della costa.

I fenomeni responsabili dell'evoluzione, tuttavia, sono molteplici e la loro influenza non può essere sempre valutata con metodi deterministici in termini quantitativi. L'operazione di taratura consente, in maniera implicita, di tenere conto di tutti i fattori non direttamente esplicitabili sotto la forma di relazioni causa-effetto. Il principale obiettivo della taratura è la determinazione dei coefficienti  $K_1$  e  $K_2$ , che servono appunto per "tarare" la formula del CERC (1984), esprime la relazione tra trasporto solido e flusso di energia in direzione parallela alla riva.

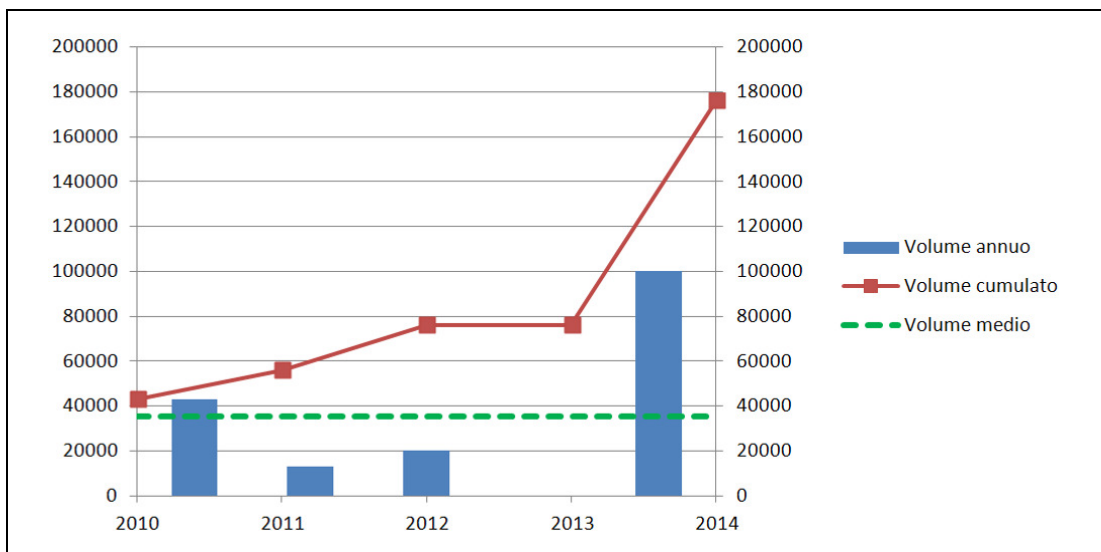


Figura 30 – Volumi di dragaggio manutentivo del porto di Tremestieri (misure in metri cubi)

Per la taratura del modello di evoluzione morfologica sono stati utilizzati i volumi di dragaggio degli interventi manutentivi eseguiti dal 2010 ad oggi (Figura 30); i valori sono stati approssimati per eccesso, fissando in 35'000 m<sup>3</sup>/anno il volume target per la taratura del modello (bypass medio annuo oltre la testata del molo esistente). La griglia di calcolo GENESIS, comprendente il tratto di costa tra Santa Margherita Marina (a Sud) e il porto di Messina (a Nord), è stata costruita suddividendo il litorale in 276 celle della lunghezza di 50 m ciascuna, per un totale di 13'800 m.

L'estensione del dominio di calcolo è stata determinata in base alla conformazione del litorale e delle opere presenti, che ha consentito di porre gli estremi in corrispondenza di punti notevoli dove fissare univocamente le condizioni al contorno. L'estremo Sud del dominio di calcolo è stato fissato in corrispondenza della barriera soffolta posta a Sud di Ponte S. Stefano, mentre l'estremo Nord è stato fissato a Nord del porto di Messina. Il porto di Tremestieri e le difese radenti sul litorale a Nord sono stati schematizzati avanzando la linea inerodibile in corrispondenza del perimetro esterno delle opere.

Per quanto riguarda il contributo al trasporto solido dei bacini presenti all'interno dell'unità fisiografica analizzata sono stati introdotti nel modello i quantitativi riportati nell'elaborato "SS-SIM – Studio Idraulico Marittimo", redatto dal Prof. Enrico Foti e dall'Ing. Carla Faraci nel novembre del 2008. In particolare, procedendo da Nord verso Sud, sono stati considerati i seguenti apporti solidi:

- S. Filippo 9400 m<sup>3</sup>/anno,
- Zafferia 4650 m<sup>3</sup>/anno,
- Larderìa 16050 m<sup>3</sup>/anno,
- Mili 10070 m<sup>3</sup>/anno.

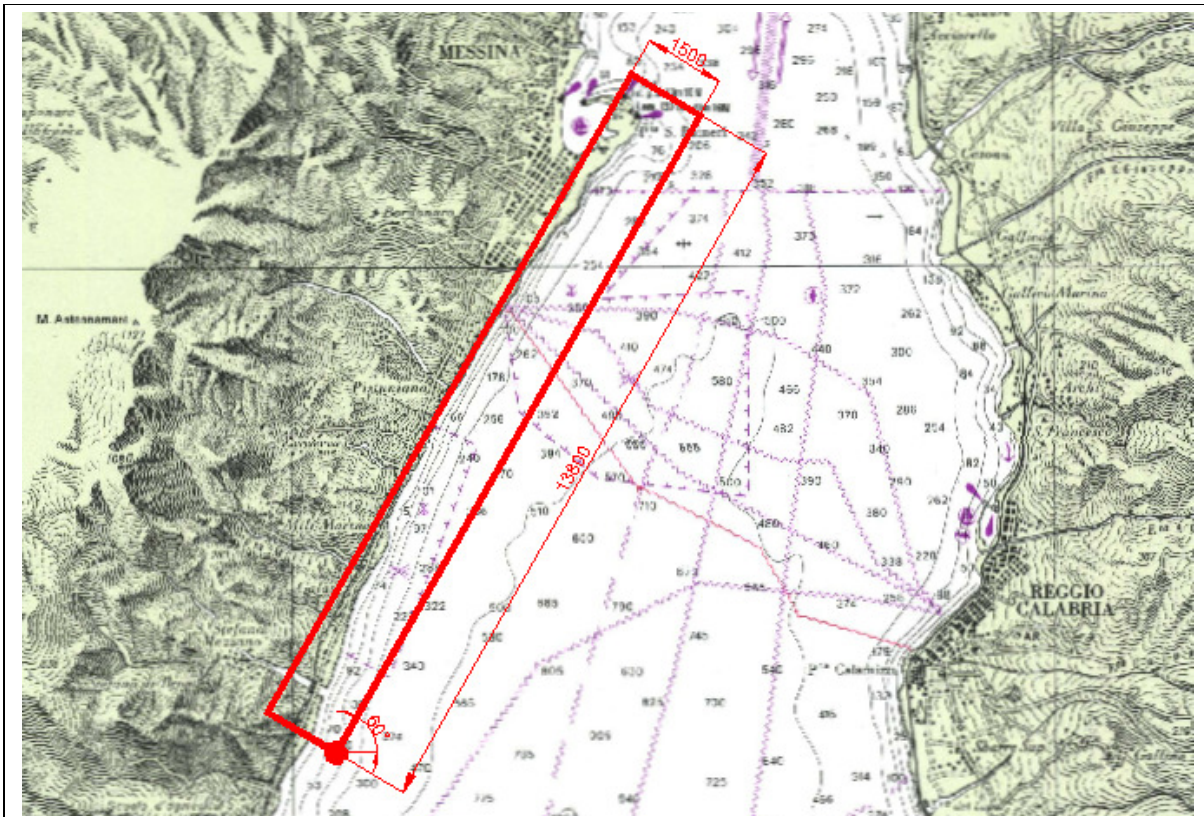


Figura 31 – Griglia di calcolo GENESIS

Sono stati trascurati i contributi degli altri corsi d'acqua (Palummari, Guidari, Giglio e Canneto), in quanto inferiori a 500 m<sup>3</sup>/anno. Considerando che non tutto il materiale proveniente dai corsi d'acqua contribuisce al trasporto solido longitudinale e che l'elevata pendenza dei fondali determina la perdita in alto fondale di buona parte dei sedimenti, si è ipotizzato che solamente il 50% dei sedimenti contribuisca attivamente alla dinamica litoranea longshore.

Il modello di evoluzione morfologica, opportunamente tarato, è stato impiegato per la previsione dell'evoluzione della linea di riva in configurazione attuale, ossia in assenza di interventi.

La modellazione è servita per stimare il trasporto solido litoraneo e sviluppare quindi un predimensionamento delle strutture rigide di supporto alla gestione dei sedimenti ed un'ipotesi preliminare degli interventi di dragaggio manutentivo.

Per stimare la tendenza evolutiva del litorale in assenza di interventi è stata condotta una simulazione dell'evoluzione della linea di riva a 3 anni in configurazione attuale (Figura 31).

La griglia di calcolo, le condizioni al contorno del modello, l'apporto dei bacini e le caratteristiche granulometriche dei sedimenti che costituiscono la fascia attiva sono state mantenute invariate rispetto a quelle della simulazione di taratura. La linea di riva iniziale è quella rilevata a ottobre 2014.

I risultati della simulazione sono riportati in figura in termini di evoluzione della linea di riva e di trasporto solido netto; si fa presente che il trasporto solido diretto da Nord verso Sud è trascurabile nell'area di interesse. L'anno medio che rappresenta la forzante meteo marina nel modello è composto da una combinazione casuale degli eventi che mediamente si verificano in un anno: è quindi possibile che la persistenza di una determinata mareggiata possa comportare un temporaneo scostamento del trasporto solido e dell'evoluzione della linea di riva rispetto alle tendenze medie rappresentate.

Si può osservare che il trasporto solido a Sud dell'area di intervento si attesta intorno ai 45'000 m<sup>3</sup>/anno, approssimativamente fino al limite di batteria meridionale del nuovo intervento; avvicinandosi alla radice del molo esistente, la rotazione della linea di riva determinata dal profilo di accumulo determina una riduzione della portata solida, che si attesta sull'ordine dei 35'000 m<sup>3</sup>/anno, continuando quindi ad alimentare l'accumulo sopraflutto al molo.

A regime, il bypass dei sedimenti oltre la testata del molo è pressoché totale; in effetti, lo è già allo stato attuale, visto che al bypass si associa anche la portata solida di tracimazione, non schematizzabile dal modello numerico utilizzato.

In prospettiva, considerate l'ubicazione e le geometrie del molo attuale e quelle del nuovo molo in progetto (sostanzialmente parallelo alla linea di riva attuale), la potenziale portata solida da gestire passa da 35'000 a 45'000 m<sup>3</sup>/anno.

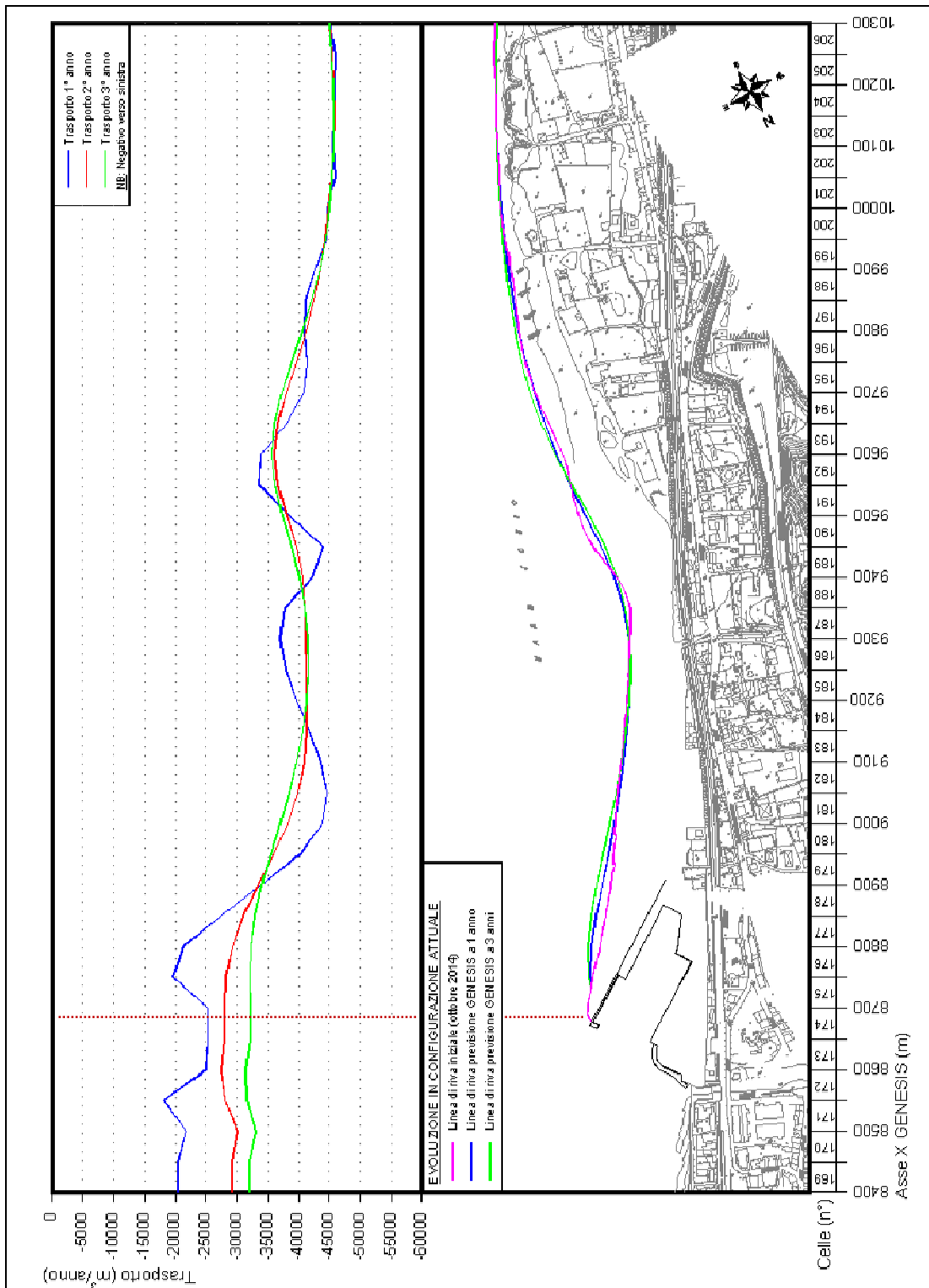


Figura 32 – Risultati della simulazione in configurazione attuale



## 11.6 CONSIDERAZIONI SULLA FUNZIONALITÀ DELLA TRAPPOLA SUD

Come premesso nell'analisi della configurazione attuale, il limite di batteria meridionale del nuovo intervento si colloca in un tratto di litorale caratterizzato da una portata solida leggermente superiore a quella caratteristica della radice del molo attuale; il valore medio della portata solida è stimato in circa 45'000 m<sup>3</sup>/anno.

Diversamente dal molo attuale, che è stato costruito con significativo aggetto rispetto alla linea di riva, il molo in progetto si sviluppa parallelamente alla linea di riva e non produrrà quindi alcun profilo di accumulo sul litorale sopraflutto; di conseguenza, a meno di variazioni delle condizioni al contorno (nella fattispecie, opere e versamenti realizzati a Sud), è lecito attendersi che la portata solida media non vari nel tempo.

Le simulazioni hanno contemplato la presenza di un pennello di contenimento in grado di raggiungere la profondità di 12 m s.l.m.m. e lo scavo di una trappola, per complessivi 25'000 m<sup>3</sup>, ricavata nel modesto spazio a disposizione sbancando l'area sopraflutto al pennello fino a profondità variabili tra 3.0 e 6.0 m s.l.m.m..

La trappola sarà realizzata e mantenuta con cadenza quanto meno annuale. In Figura 33 sono rappresentati l'andamento del trasporto solido in tre anni di esercizio dopo la costruzione della trappola e dopo il primo dragaggio di 25'000 m<sup>3</sup>. Si può osservare che, a fronte di un bypass iniziale oltre il pennello di contenimento dell'ordine di meno di 2'000 m<sup>3</sup> nel primo anno, il volume di bypass arrivi a 18'000 m<sup>3</sup> nel secondo anno, sfiorando i 27'000 nel terzo (Figura 33). Il volume a regime rappresenta la portata solida annuale in assenza di opere di contenimento.

In altri termini, e prescindendo da accadimenti che sfuggano all'andamento stagionale medio, la manutenzione della trappola dovrà avere cadenza annuale. In ogni caso, non si potrà prescindere dal prelievo del deposito determinato dal bypass o dall'eventuale spianamento di quest'ultimo per garantire le profondità richieste. La limitata capacità della trappola, la flessibilità degli interventi e l'esecuzione degli stessi subordinata al monitoraggio globale dei fondali antistanti l'infrastruttura, garantiscono anche rispetto alla possibilità di determinare indesiderati approfondimenti dei fondali che potrebbero ridurre la stabilità della struttura.

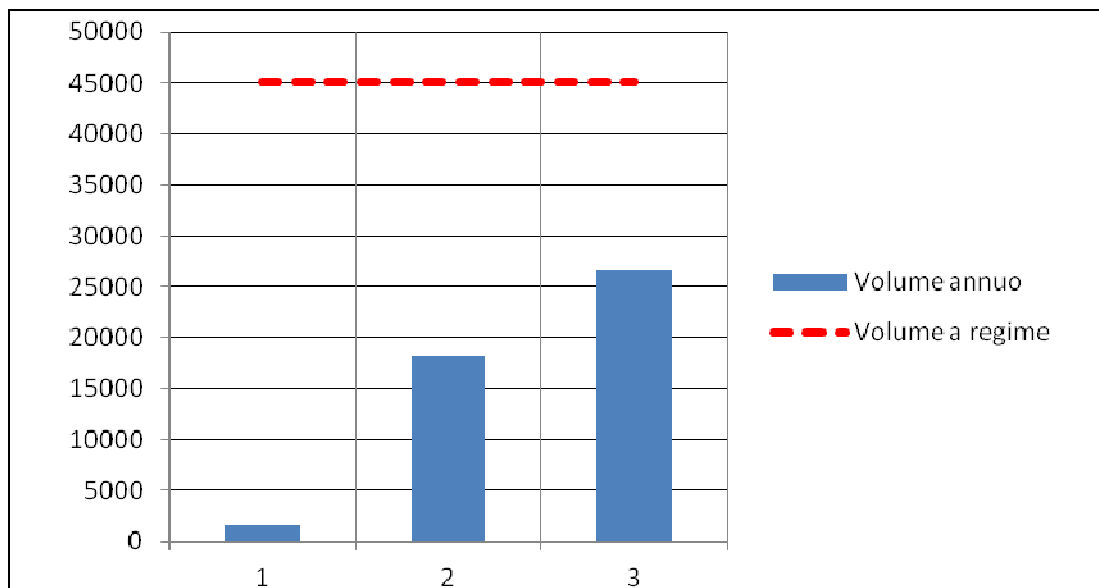


Figura 33 – Portate solide in grado di bypassare la testata del pennello di contenimento della trappola Sud in assenza di manutenzione (misure in metri cubi)

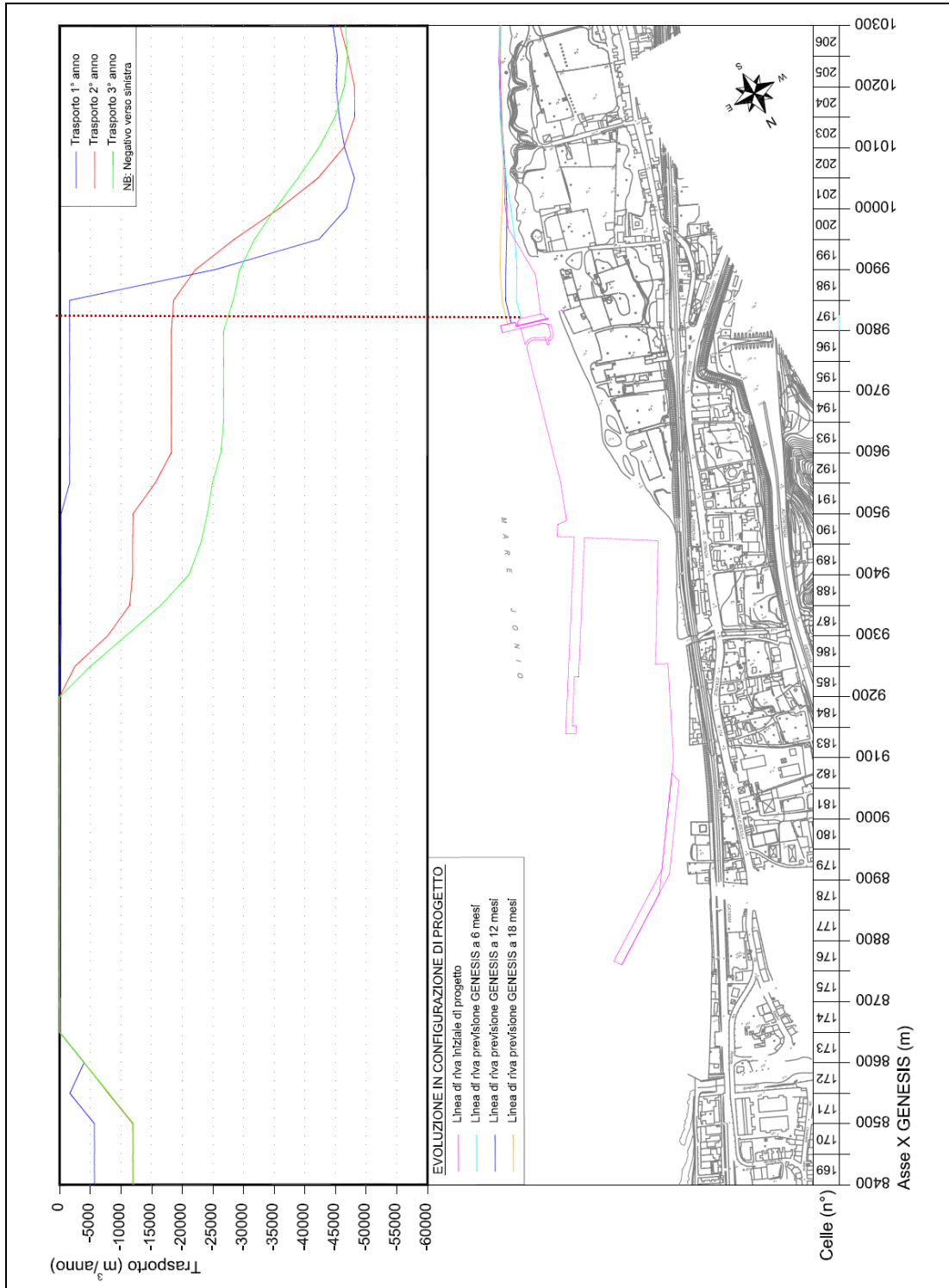


Figura 34 – Risultati della simulazione in configurazione di esercizio, con trappola Sud