RegioneEmilia-Romagna

AGENZIA REGIONALE PER LA SICUREZZA TERRITORIALE E LA PROTEZIONE CIVILE
Servizio Area Reno e Po di Volano - Sede di Ferrara

PIANO NAZIONALE PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO
(DPCM 20 FEBBRAIO 2019)

Cod. 08IR456/G1 - Adeguamento altimetrico e planimetrico di alcuni tratti di scogliere del litorale Nord in comune di Comacchio a difesa dall'ingressione marina (I stralcio)

CUP: F53H19000360001

Importo: € 2.300.000,00

PROGETTO ESECUTIVO

--- I STRALCIO ---

ELABORATO:

RELAZIONE TECNICA IDRAULICA

IL PROGETTISTA	IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO	
Prof. Ing, Alessandro Mancinelli	Dott. Claudio Miccoli	TAV. N. ---
		ALL. N. 02
		SCALA: ------
		DATA:
		COMUNE: Comacchio (FE)

REVISIONE	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	APPROVATO	AUTORIZZATO

Sommario

1. PREMESSA 1

2. ANALISI METEOMARINE DEL PARAGGIO 2

2.1 Costruzione dei fetches efficaci 2

2.2 Determinazione delle onde estreme al largo del paraggio del litorale Ferrarese 8

2.3 Trasferimento delle onde dal largo alla profondità finita 10

2.4 Clima medio alla boa ondametrica 12

2.5 Livello medio marino 22

3. EVOLUZIONE MORFOLOGICA DEL LITORALE 25

4. PROGETTO DELLE OPERE 28

4.1 Ripristino scogliere foranee 28

4.1.1 Trasmissione delle onde nella zona protetta dalle scogliere foranee emerse 29

4.1.2 Tracimazione delle onde nella zona protetta dalle scogliere foranee emerse 30

4.1.3 Run up sulla spiaggia 32

4.2 Adeguamento dei varchi esistenti 33

4.3 Andamento della linea di costa nel lungo periodo 39

4.4 Conclusioni 41

1. Premessa

La presente Relazione descrive gli interventi progettuali sulla base di un'analisi delle variabili meteo oceanografiche del paraggio su ampia scala temporale. I dati storici relativi alla direzionalità del moto ondoso, all'intensità ed altezza delle onde, nonché l'innalzamento del livello medio mare, permettono di predisporre una modellizzazione efficace per identificare la scelta progettuale più corretta in relazione allo scopo dell'intervento previsto.

Gli interventi di difesa della costa previsti nel TRATTO 1 (Lido delle Nazioni) e TRATTO 2 (Lido di Pomposa) sono finalizzati a migliorare l'efficienza delle scogliere foranee esistenti in caso di acqua alta e mareggiate, stabilizzare la linea di costa in modo da ridurre gli apporti di sabbia con ripascimento, mantenere condizioni circolazione idrodinamica tali da garantire la balneabilità, ridurre il rischio di ingressione marina (v. TAV_03, 04.1 e 05.2).

Il sistema di difesa della costa, a nord dei moli di Porto Garibaldi, iniziato negli anni 1923-31 con tre scogliere foranee si estende oggi per 16 Km ed è formato da scogliere foranee emerse principalmente orientate perpendicolarmente alla direzione delle onde, provenienti da Est-SudEst sino al Lido delle Nazioni, nell'area delle Bocche del Bianco e della Pineta di Volano dove si è propagato il processo erosivo è stata realizzata una difesa radente e 16 pennelli in pali di legno.

Nei tratti più deteriorati i setti di scogliera foranee presentano dei varchi prodotti dal franamento dei massi, la quota di sommità della berma non è più continua, le strutture non riescono a contenere fenomeni sempre più intensi e frequenti di overtopping e quindi di allagamento della spiaggia emersa che oltre a produrre danni alle infrastrutture turistiche determinano forti correnti in uscita dai varchi e quindi erosione della spiaggia. Inoltre in corrispondenza dei varchi esistenti tra i setti di scogliera le onde in ingresso si propagano nell'area protetta poco attenuate dalla diffrazione a causa della dimensione eccessiva dei varchi stessi allagando ed erodendo la spiaggia emersa in corrispondenza dei varchi la linea di riva è maggiormente arretrata.

I fenomeni sopra descritti sono ovviamente aggravati in concomitanza di episodi di acqua alta a per effetto della subsidenza. Gli interventi strutturali finalizzati alla riduzione del rischio di allagamento ed erosione della spiaggia sono stati individuati nel Progetto di Fattibilità tecnico economica tra diverse alternative progettuali. L'intervento ritenuto più per ridurre il rischio allagamento-erosione è quello che prevede:

a) Ripristino delle condizioni di funzionalità e di efficacia delle barriere emerse. Il rifiorimento delle scogliere prevede l'innalzamento della quota di sommità della berma che condiziona la portata di overtopping e quindi dell'allagamento e dell'intensità delle correnti in uscita dai varchi.

b) Restringimento dei varchi, allungando i setti di scogliera si riducono le larghezze dei varchi e si abbatte maggiormente l'onda in ingresso per effetto della diffrazione. Sono stati calcolati i coefficienti di diffrazione $K_D=H_T/H_i$ (H_i è l'onda significativa incidente e H_T quella trasmessa) per le diverse direzioni di provenienza delle onde e per i diversi varchi. La larghezza e l'orientazione dei varchi rispetto alle onde provenienti dalla traversia principale, condizionano l'altezza d'onda residua sulla spiaggia emersa e quindi la quota di run-up e che determina a sua volta l'intensità della corrente di ritorno (undertow) e l'erosione nella zona di swash (battigia).

La planimetria degli interventi è riportata nelle TAV_03, 04.1 e 05.1.

A lido delle Nazioni saranno rifioriti i setti n. 62 e 61 e realizzati gli allungamenti per il restringimento dei varchi n. 62-61 e 61.60.

A lido di Pomposa saranno rifioriti i setti n. 43 e 42 e realizzati gli allungamenti per il restringimento dei varchi n. 44-43 e 43-42.

Con stralcio successivo saranno rifioriti i setti n.60 e n. 41 e realizzato l'allungamento per il varco 42-41, finanziamenti futuri consentiranno di completare a Lido delle Nazioni la sistemazione dei setti 58-59 e il restringimento dei varchi V_{60-59} e V_{59-58} e a Lido di Pomposa il rifiorimento dei setti 39-40 ed i varchi V_{41-40} e V_{40-39}.

2. Analisi meteomarine del paraggio

Per caratterizzare l'efficacia del sistema di difesa della costa sia in condizioni di ante che post operam è necessario conoscere l'onda significativa di progetto con assegnato tempo di ritorno, periodo e direzione di provenienza in prossimità della zona interessata dal progetto.

L'elaborazione statistica dei valori massimi delle altezze di moto ondoso è stata fatta sulla serie storica di dati misurati al largo dalla boa ondametrica della rete R.O.N. situata al largo di Ancona (il sito della stazione di misura è stato spostato alla fine del mese di Maggio 2000 su una profondità di circa 70m, in posizione di coordinate geografiche 43°50'30"N e 13°42'50"E, circa 15 miglia marine a NordNordEst del Porto di Ancona nei pressi dell'isola artificiale di Clara Ovest della società A.G.I.P.).

Attraverso il metodo dei fetches efficaci i dati ondosi sono stati trasferiti al largo del litorale di Ferrara e successivamente trasferiti con l'analisi della rifrazione shoaling e frangimento alla profondità di 4m davanti alle opere di difesa. Le onde trasferite alla profondità di -3.5m ÷ -4.0m l.m.m. sono quelle comprese nel settore di traversia del sito.

2.1 Costruzione dei fetches efficaci

L'area di intervento riguarda il litorale nord ferrarese in corrispondenza del lido delle Nazioni e lido di Pomposa, per una lunghezza di circa 4.0km.

La **figura 2.1/1** mostra il settore di traversia del paraggio in questione, di circa 70° delimitato a Nord dal delta del Po e a sud dal promontorio del m. Conero.

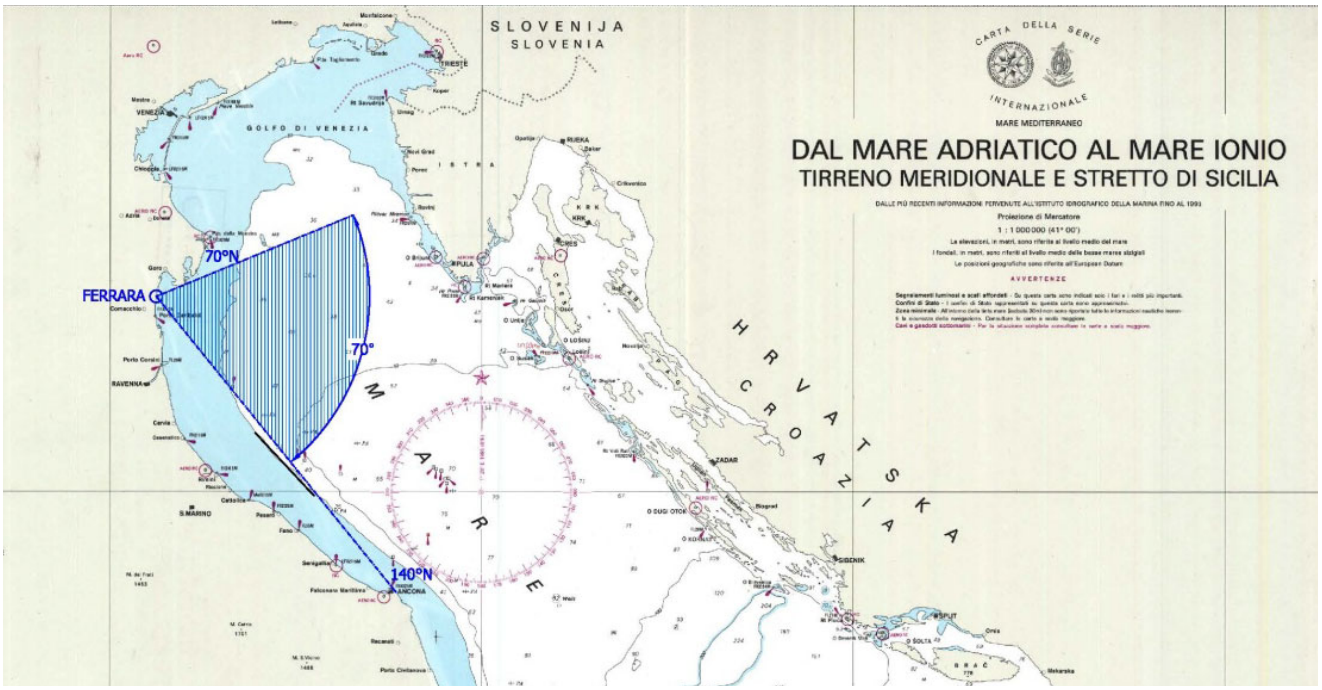


Figura 2.1/1 – Settore di traversia del paraggio (base carta IIM)

L'analisi dell'esposizione geografica di una stazione di misura del moto ondoso o di un sito costiero si basa sulla determinazione dei fetches geografici ed efficaci.

Il fetch geografico (F_w) indica la distesa di mare libero, ossia la distanza tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione.

Il fetch efficace o effettivo (F_e) invece denota l'estensione effettiva della porzione di mare sulla quale si esplica "effettivamente" l'azione di trasferimento energetico dal vento al moto ondoso. Il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione è funzione anche dell'estensione dei fetches geografici associati alle direzioni contigue; in questo modo i fetches efficaci tengono conto del fatto che alla generazione del moto ondoso contribuiscono, oltre alla superficie marina individuata nella direzione media lungo la quale spira il vento, anche le porzioni di mare calcolate dalle direzioni comprese in un settore di ampiezza fissata rispetto alla direzione media di azione del vento.

A partire dai diagrammi dei fetches geografici sono stati determinati quelli dei fetches efficaci. Fissata una direzione Φ_w, la lunghezza del corrispondente fetch efficace può essere valutata attraverso una media ponderata delle distanze geografiche relative alle direzioni comprese all'interno di un settore di ampiezza 90° (±45°) a cavallo di quella considerata:

$$F_e = \frac{\sum_i F_{w,i} \cdot \cos^3(\Phi_i - \Phi_w)}{\sum_i \cos^2(\Phi_i - \Phi_w)}$$

in cui:

$F_{w,i}$ = lunghezza del fetch geografico lungo la i-esima direzione Φ_i;

Φ_i = i-esima direzione, riferita al Nord geografico, compresa nel settore di ampiezza fissata, il cui relativo fetch geografico contribuisce alla determinazione di F_e;

Φ_w = direzione media all'interno del settore di ampiezza prefissata di provenienza del vento responsabile della generazione del moto ondoso e per la quale si vuole si vuole valutare il relativo fetch efficace.

Di seguito vengono riportati i fetches geografici ed efficaci nel paraggio dei Lidi Ferraresi.

Direzione F_w °N	F_w (km)	F_e (km)	Direzione F_w °N	F_w (km)	F_e (km)
0	118.44	98.26	180	85.73	130.12
5	120.07	99.24	185	81.06	111.98
10	130.36	99.51	190	79.04	97.90
15	130.78	98.43	195	78.70	86.08
20	138.02	96.85	200	75.75	76.51
25	110.50	94.89	205	72.37	69.71
30	99.76	92.80	210	71.26	66.89
35	92.54	91.41	215	69.19	64.48
40	84.61	90.12	220	67.81	62.48
45	80.07	88.79	225	66.67	60.80
50	79.51	88.10	230	64.91	59.42
55	79.03	88.07	235	62.38	58.24
60	80.05	88.78	240	59.99	57.20
65	80.04	90.70	245	58.64	56.27
70	78.68	94.10	250	58.63	55.25
75	82.85	101.90	255	57.57	54.29
80	119.63	111.12	260	56.58	53.38
85	118.09	126.05	265	55.55	52.55
90	108.19	143.45	270	55.98	51.80
95	127.21	160.83	275	58.57	51.13
100	136.82	179.00	280	59.73	51.48
105	152.16	197.38	285	60.14	52.35
110	173.67	214.44	290	60.18	53.70
115	207.31	227.14	295	48.95	55.44
120	332.43	237.54	300	47.77	57.57
125	318.10	244.99	305	47.91	60.13
130	500.00	248.57	310	49.26	63.11
135	500.00	248.96	315	50.95	66.53
140	402.83	246.24	320	52.21	70.23
145	381.14	239.95	325	93.81	74.33
150	354.68	230.63	330	101.40	78.60
155	288.10	218.54	335	105.21	83.16
160	126.57	204.10	340	105.35	87.15
165	116.12	187.77	345	106.79	90.90
170	103.21	168.70	350	109.04	94.09
175	92.96	150.51	355	113.04	96.56

Tab. 2.1/1 – Fetches geografici (Fw) ed efficaci (Fe) al largo Lidi Ferraresi per ogni direzione geografica

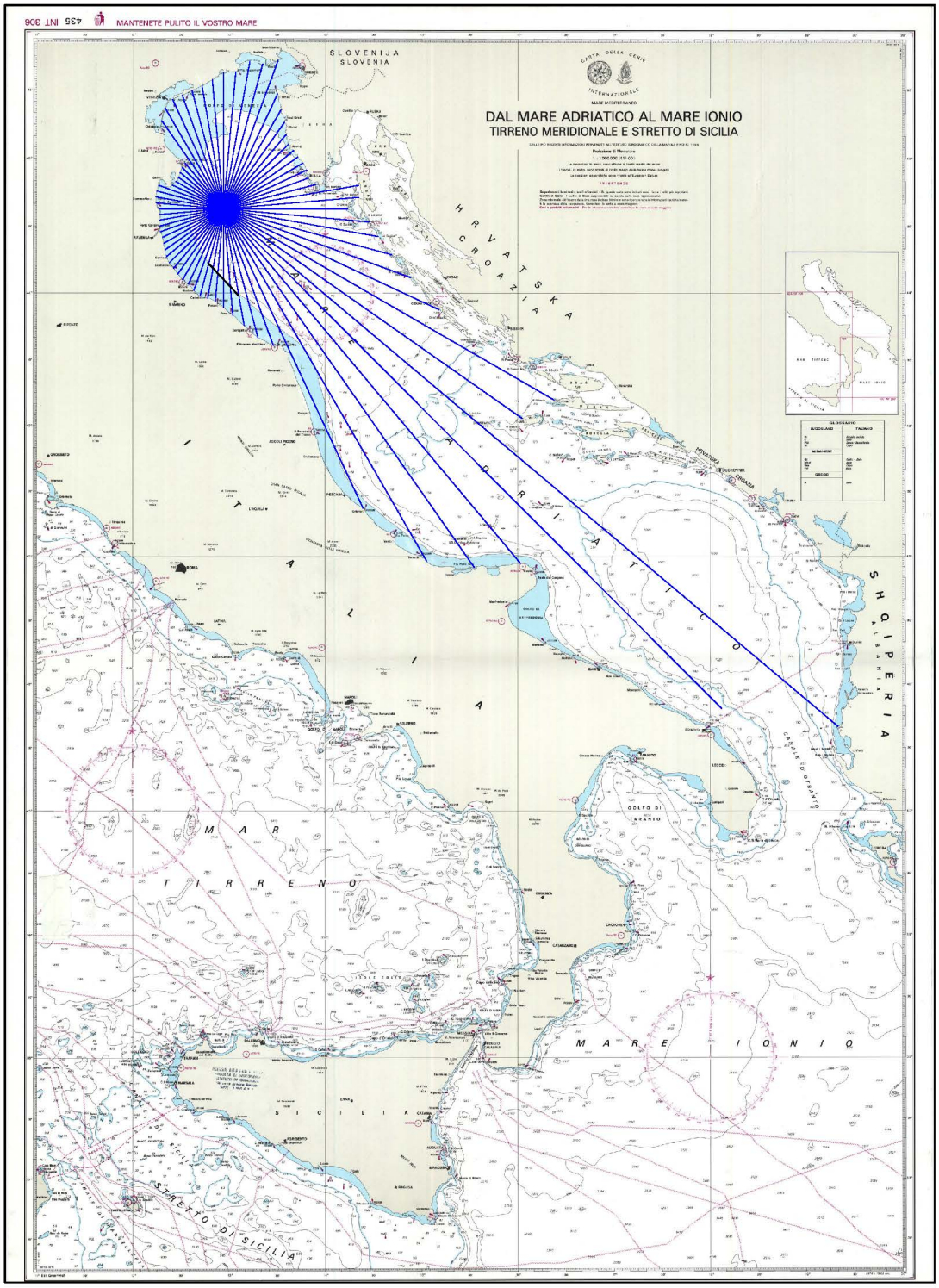


Figura 2.1/2 – Fetches geografici al largo dei Lidi Ferraresi riportati su Carta Nautica con scala 1:1000000

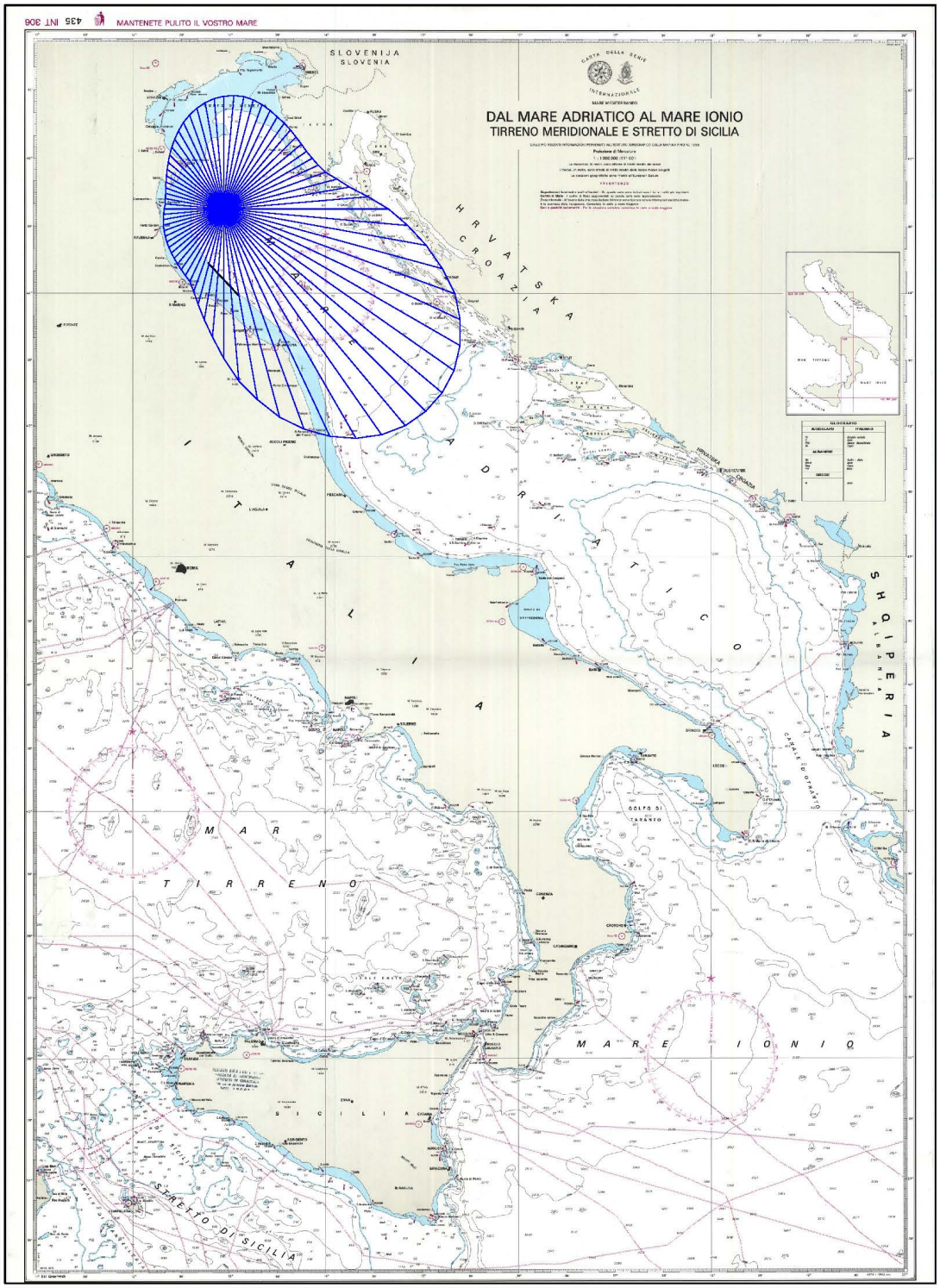


Figura 2.1/3 – Fetches efficaci al largo Lidi Ferraresi riportati su Carta Nautica con scala 1:1000000

Per caratterizzare il moto ondoso che investe il litorale dei Lidi Ferraresi si fa riferimento alle misure registrate dalla boa della R.O.N. posta al largo di Ancona, trasposte poi nel sito di interesse con il metodo di trasposizione geografica. Il punto di trasposizione al largo di Ferrara è stato scelto in corrispondenza di una profondità di -40 m, in modo da avere caratteristiche geografico-climatiche simili a quelle della stazione ondametrica di Ancona. Tale punto è collocato a 12° 56'E e

45° 22'N. L'ipotesi fondamentale alla base del metodo di trasposizione è che le stesse condizioni di vento (velocità e direzione) che hanno determinato le condizioni di moto ondoso registrate dall'ondametro di riferimento abbiano interessato anche l'area di generazione al largo del sito di interesse. Si suppone inoltre che la direzione del moto ondoso è correlata alla direzione del vento che lo ha generato. Il metodo stabilisce una corrispondenza tra le direzioni, le altezze ed i periodi del moto ondoso relative al sito di registrazione ed a quello oggetto di studio. Nel caso di fetch limitati le leggi che permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa spettrale H_s ed il relativo periodo di picco spettrale T_p in funzione della lunghezza del fetch considerato e della velocità del vento sono:

$$\frac{g \cdot H_s}{U_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{g \cdot F_e}{U_A^2}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad \frac{g \cdot T_p}{U_A^2} = 2.857 \cdot 10^{-1} \cdot \left(\frac{g \cdot F_e}{U_A^2}\right)^{\frac{1}{3}}$$

dove:

g = accelerazione di gravità;

U_A= *wind stress factor*, dipendente in modo non lineare dalla velocità del vento misurata alla quota di +10 m sul livello del mare;

F_e = lunghezza del fetch efficace relativo alla direzione prefissata.

Indicando con gli apici A e P rispettivamente le grandezze relative al punto di misura (Ancona) e al punto di trasposizione (Ferrara) e fissata una direzione geografica dalla quale si ritenga spiri il vento, le relazioni precedenti permettono di trovare la corrispondenza ricercata tra le altezze ed i periodi delle onde relative al punto A e al punto P:

$$K_H = \frac{H_{S,P}}{H_{S,A}} = \left(\frac{F_{e,P}}{F_{e,A}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$K_T = \frac{T_{P,P}}{T_{P,A}} = \left(\frac{F_{e,P}}{F_{e,A}}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Questi coefficienti di trasposizione geografica K_H e K_T sono stati ottenuti nell'ipotesi che il fattore di velocità del vento (U_A) sia lo stesso per i due punti in esame. Per ottenere H_s e T_p nel sito di interesse è sufficiente moltiplicare i dati registrati dalla stazione di misura per i valori di tali coefficienti relativi alla direzione a cui i dati si riferiscono. Per il calcolo del periodo significativo più probabile per i diversi settori direzionali di provenienza si sono ricavate delle relazioni funzionali che tengono conto delle altezze significative. Nelle tabelle che seguono viene riportato il clima ondoso di Ancona per differenti classi di direzione e altezza d'onda.

Distribuz. delle frequenze percentuali per classi di direzione e di altezza d'onda						
DMT	Classi di H_{M0} (m)					
(° N)	0-1	1-2	2-3	3-4	> 4	TOTALE
345-15	7.6965	2.3764	0.3625	0.0394	0	10.4748
15- 45	5.6946	4.1142	1.3872	0.1813	0.0275	11.4048
45- 75	3.7241	1.466	0.603	0.1143	0.0355	5.9429
75-105	5.2966	1.9468	0.2798	0.0433	0.0158	7.5823
105-135	13.5093	3.5113	0.8157	0.2128	0.0236	18.0727
135-165	10.735	0.599	0.0394	0.0118	0.0039	11.3891
165-195	3.2867	0.1497	0.0197	0	0	3.4561
195-225	1.8483	0.1852	0.0157	0	0	2.0492
225-255	2.7823	0.2758	0.0118	0	0	3.0699
255-285	4.3507	0.5005	0.0236	0	0	4.8748
285-315	9.2138	2.1872	0.1773	0.0118	0	11.5901
315-345	8.5872	1.4069	0.0906	0.0078	0	10.0925
TOTALE	76.7251	18.7192	3.8266	0.6227	0.1064	100

Tab. 2.1/2 – Distribuzione delle frequenze percentuali per classi di direzione e di altezza d'onda; località: Ancona; periodo: marzo 1999-novembre 2013

Periodi significativi (s) per i diversi settori direzionali e altezze d'onda					
DMT	Classi di H_{M0} (m)				
(° N)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
345-15	4.093	5.410	6.158	6.707	7.148
15- 45	4.350	5.568	6.240	6.725	7.111
45- 75	4.372	5.702	6.442	6.979	7.407
75-105	4.576	5.846	6.519	6.999	7.380
105-135	4.327	6.078	7.116	7.895	8.531
285-315	3.736	4.848	5.470	5.922	6.284
315-345	3.884	4.947	5.533	5.956	6.292

Tab. 2.1/3 – Periodi significativi (s) per i diversi settori direzionali e altezze d'onda

2.2 Determinazione delle onde estreme al largo del paraggio del litorale Ferrarese

Il metodo di trasposizione dei fetch efficaci è stato applicato anche ai valori estremi di H_{m0} e T_{m0} delle onde registrate dall'ondamentro di riferimento di Ancona, che sono state analizzati applicando la procedura di elaborazione P.O.T., determinando le altezze significative associate a diversi tempi di ritorno al largo del paraggio del litorale Ferrarese. L'elaborazione è stata condotta suddividendo i dati registrati nei seguenti settori direzionali di interesse, di ampiezza 30°:

- 285°N – 315°N;

- 315°N – 345°N;

- 345°N – 15°N;

- 15°N – 45°N;

- 45°N – 75°N;

- 75°N – 105°N;

- 105°N – 135°N.

La seguente tabella riassume le onde al largo del litorale Ferrarese.

15-45		
Tr	**$H_{Ferrara}$ (m)**	**$T_{Ferrara}$ (s)**
1	3.12	6.30
2	3.55	6.49
5	4.12	6.70
10	4.54	6.85
15	4.79	6.93
20	4.97	6.99
25	5.10	7.03
30	5.21	7.06
50	5.53	7.16
70	5.73	7.21
100	5.95	7.27
140	6.15	7.33
150	6.20	7.34
200	6.37	7.39
500	6.93	7.53
1000	7.36	7.63

45-75		
Tr	**$H_{Ferrara}$ (m)**	**$T_{Ferrara}$ (s)**
1	2.80	6.42
2	3.35	6.69
5	3.97	6.97
10	4.39	7.14
15	4.62	7.22
20	4.77	7.28
25	4.89	7.32
30	4.98	7.35
50	5.24	7.44
70	5.40	7.50
100	5.57	7.55
140	5.72	7.60
150	5.76	7.61
200	5.88	7.65
500	6.28	7.77
1000	6.56	7.85

75-105		
Tr	**$H_{Ferrara}$ (m)**	**$T_{Ferrara}$ (s)**
1	2.54	6.22
2	3.16	6.52
5	3.98	6.84
10	4.60	7.05
15	4.96	7.17
20	5.22	7.25
25	5.42	7.30
30	5.58	7.35
50	6.04	7.47
70	6.34	7.55
100	6.66	7.63
140	6.96	7.70
150	7.03	7.71
200	7.28	7.77
500	8.10	7.95
1000	8.73	8.07

105-135		
Tr	**$H_{Ferrara}$ (m)**	**$T_{Ferrara}$ (s)**
1	3.63	7.83
2	4.15	8.17
5	4.77	8.52
10	5.20	8.75
15	5.44	8.87
20	5.60	8.96
25	5.73	9.02
30	5.83	9.06
50	6.10	9.19
70	6.27	9.27
100	6.45	9.35
140	6.62	9.43
150	6.65	9.44
200	6.79	9.50
500	7.21	9.68
1000	7.52	9.81

135-165		
Tr	**$H_{Ferrara}$ (m)**	**$T_{Ferrara}$ (s)**
1	1.33	5.57
2	1.62	5.95
5	2.05	6.45
10	2.40	6.80
15	2.62	7.01
20	2.77	7.15
25	2.90	7.25
30	3.00	7.34
50	3.30	7.58
70	3.50	7.73
100	3.71	7.89
140	3.92	8.04
150	3.96	8.07
200	4.14	8.19
500	4.74	8.57
1000	5.20	8.85

285-315		
Tr	**$H_{Ferrara}$ (m)**	**$T_{Ferrara}$ (s)**
1	1.79	4.35
2	2.03	4.48
5	2.31	4.61
10	2.50	4.70
15	2.61	4.75
20	2.68	4.78
25	2.73	4.80
30	2.78	4.82
50	2.90	4.87
70	2.98	4.90
100	3.06	4.93
140	3.13	4.96
150	3.15	4.96
200	3.21	4.99
500	3.40	5.05
1000	3.53	5.10

315-345		
Tr	**$H_{Ferrara}$ (m)**	**$T_{Ferrara}$ (s)**
1	1.33	4.12
2	1.63	4.31
5	2.04	4.52
10	2.34	4.66
15	2.52	4.74
20	2.65	4.79
25	2.74	4.83
30	2.82	4.86
50	3.05	4.94
70	3.20	4.99
100	3.35	5.04
140	3.50	5.09
150	3.53	5.10
200	3.66	5.14
500	4.06	5.26
1000	4.36	5.34

345-15		
Tr	**$H_{Ferrara}$ (m)**	**$T_{Ferrara}$ (s)**
1	2.15	5.44
2	2.48	5.64
5	2.90	5.87
10	3.19	6.01
15	3.36	6.09
20	3.48	6.15
25	3.57	6.19
30	3.64	6.22
50	3.84	6.30
70	3.97	6.36
100	4.11	6.41
140	4.23	6.46
150	4.26	6.47
200	4.36	6.51
500	4.70	6.63
1000	4.94	6.72

Tab. 2.2/1 – Valori delle altezze significative e dei periodi delle onde al largo del litorale Ferrarese

2.3 Trasferimento delle onde dal largo alla profondità finita

Una volta ottenuti i valori delle caratteristiche ondose al largo si è proceduto al trasferimento a riva delle onde determinate, considerando i vari effetti che separatamente agiscono su di esse: rifrazione e shoaling, ovvero riduzione e rotazione del fronte d'onda, che provocano la variazione della celerità di propagazione e dell'altezza d'onda, a parità di contenuto energetico dalla situazione a largo a quella a profondità ridotte sino al limite del frangimento.

Nel nostro caso il trasferimento a riva viene eseguito con il procedimento numerico e grafico proposto da *Goda* ("*Random Seas and Design of Marittime Structures*").

Dalla conservazione del flusso di energia trasmesso da due raggi adiacenti (nell'ipotesi di effetti dissipativi trascurabili), otteniamo l'altezza d'onda alla profondità voluta prima del frangimento.

Poiché l'energia dell'onda è proporzionale al quadrato dell'altezza d'onda, la variazione dell'altezza d'onda dovuta alla rifrazione è data dalla seguente equazione:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{b_0}{b}} = K_r$$

dove b è la distanza fra i raggi d'onda nella zona di interesse, b_0 è la distanza fra gli stessi raggi in acque profonde, e K_r è il coefficiente di rifrazione dell'onda regolare con periodo costante ed unica direzione di propagazione.

Il coefficiente di rifrazione delle onde irregolari e la variazione della loro direzione predominante possono essere determinati mediante i grafici riportati nel testo di Goda.

Il coefficiente di rifrazione delle onde irregolari dipende dal parametro di dispersione s_{max} dello spettro direzionale, anche se l'errore commesso nel non considerare questo parametro risulta essere trascurabile (per onde da vento consideriamo il parametro di dispersione s_{max}=10).

L'analisi della trasformazione delle onde durante la fase di trasferimento verso riva può essere facilitata introducendo il concetto di altezza d'onda equivalente H'_0 :

$$H'_0 = K_d \cdot K_r \cdot H_0$$
$$T'_0 = T_0$$

H'_0 = altezza d'onda equivalente (corrispondente all'altezza significativa)

H_0 = altezza d'onda significativa in acque profonde

T_0 = periodo d'onda significativo in acque profonde

K_d = coefficiente di diffrazione

K_r = coefficiente di rifrazione

Il coefficiente di shoaling è stato ottenuto tramite la relazione:

$$K_s = \frac{H}{H'_0} = \sqrt{\frac{(C_G)_0}{C_G}} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)}\right] \cdot \tanh\frac{2\pi h}{L}}}$$

K_s = coefficiente di shoaling

C_G = celerità di gruppo

$(C_G)_0$ = celerità di gruppo in acque profonde.

Nelle seguenti tabelle sono rappresentati per onde aventi tempi di ritorno di 1 e 30anni i risultati del trasferimento a riva alla profondità di -4.0m l.m.m. necessarie per il dimensionamento delle opere di difesa nel tratto di litorale Ferrarese.

	Θ_0 (°N)	H_s (m)	T_s (s)	L_0 (m)	α_0	h/L_0	K_r	H'_0 (m)	H'_0/L_0	K_s	Θ_h (°N)	$H_{1/3\ (progetto)}$ (m)	L_h (m)
Tr = 1 anno	0	2.15	5.44	46.19	80	0.09	0.8	1.72	0.037	0.949	65	1.58	31.39
	30	3.12	6.30	62.05	70	0.06	0.8	2.49	0.040	0.987	74	2.30	37.40
	60	2.80	6.42	64.30	40	0.06	0.88	2.47	0.038	0.992	80	2.27	38.18
	90	2.54	6.22	60.47	10	0.07	0.92	2.33	0.039	0.983	94	2.15	36.85
	120	3.63	7.83	95.86	20	0.04	0.94	3.41	0.036	1.062	109	2.46	47.67

	Θ_0 (°N)	H_s (m)	T_s (s)	L_0 (m)	α_0	h/L_0	K_r	H'_0 (m)	H'_0/L_0	K_s	Θ_h (°N)	$H_{1/3\ (progetto)}$ (m)	L_h (m)
Tr = 30 anni	0	3.64	6.22	60.38	80	0.07	0.8	2.91	0.048	0.983	61	2.37	36.82
	30	5.21	7.06	77.97	70	0.05	0.8	4.17	0.053	1.024	75	2.46	42.56
	60	4.98	7.35	84.49	40	0.05	0.87	4.34	0.051	1.038	82	2.48	44.50
	90	5.58	7.35	84.35	10	0.05	0.94	5.25	0.062	1.038	95	2.53	44.46
	120	5.83	9.06	128.34	20	0.03	0.92	5.36	0.042	1.123	108	2.61	55.72

Tab. 2.3/1 – Altezze d'onda di fronte alle profondità di -4.0m l.m.m.

La rifrazione delle onde più intense (Tr di 30 anni) produce fronti d'onda leggermente inclinati rispetto l'andamento della linea di riva del paraggio per le onde comprese tra 0°N e 30°N e per le onde da 120°N, mentre i fronti si dispongono praticamente paralleli alla costa per le altre direzioni del settore di traversia.

Figura 2.3/1 – Rotazione dei fronti d'onda dal largo alla batimetrica -4.0m – onde con Tr 30anni

2.4 Clima medio alla boa ondametrica

Il clima medio ondoso registrato alla boa R.O.N. di Ancona è di seguito ricostruito. In particolare, la serie di tabelle dalla 4.2.4/1 alla 4.2.4/3 contengono le raccolte della distribuzione di frequenza percentuale dei dati ondosi triorari per l'intero periodo di 11 anni delle due fasi di osservazione della stazione di misura (7 anni, dal 10 marzo 1999 al 9 marzo 2006, e 4 anni, dal 1 dicembre 2009 al 30 novembre 2013), rispettivamente suddivisi per classi di altezze d'onda significative e di periodi di picco, classi di altezze d'onda significative e di periodi medi, classi di altezze d'onda significative e di settori direzionali di provenienza. Infine, la Tabella 4.2.4/4 contiene la raccolta della distribuzione di frequenza percentuale dei flussi energetici relativamente ai dati ondosi triorari per l'intero periodo di 11 anni delle due fasi di osservazione, suddivisi per classi di altezze d'onda significative e di settori direzionali di provenienza.

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA												
TP	Classi di HM0 (metri)											
(sec)	0,0-0,5	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	4,5-5,0	> 5,0	TOTALE
< 2,0	0.6424	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6424
2,0 - 2,5	3.598	0.0512	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.6493
2,5 - 3,0	6.7389	0.7764	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.5153
3,0 - 3,5	7.2552	3.3103	0.0079	0	0	0	0	0	0	0	0	10.5734
3,5 - 4,0	5.4739	6.1202	0.197	0	0	0	0	0	0	0	0	11.7911
4,0 - 4,5	3.3143	7.4759	1.0877	0.0118	0	0	0	0	0	0	0	11.8897
4,5 - 5,0	1.7103	5.1232	2.0808	0.0788	0	0	0	0	0	0	0	8.9931
5,0 - 5,5	1.3951	3.7084	3.1094	0.6345	0.0158	0	0	0	0	0	0	8.8631
5,5 - 6,0	1.6709	1.8286	2.2975	1.135	0.1498	0.0039	0	0	0	0	0	7.0857
6,0 - 6,5	1.4384	1.0443	1.5488	1.3793	0.4847	0.0433	0	0	0	0	0	5.9389
6,5 - 7,0	1.3202	0.7291	1.1232	1.2217	0.8433	0.2286	0.0236	0.0039	0	0	0	5.4936
7,0 - 7,5	1.3163	0.469	0.5517	0.6739	0.5833	0.398	0.1143	0.0079	0	0	0	4.1143
7,5 - 8,0	0.5833	0.2443	0.1616	0.2325	0.1734	0.1576	0.0709	0.0118	0.0079	0	0	1.6433
8,0 - 8,5	1.131	0.4177	0.2246	0.2956	0.2365	0.2207	0.1222	0.0512	0.0158	0.0039	0	2.7192
8,5 - 9,0	1.2532	0.201	0.0906	0.0591	0.1103	0.0512	0.0788	0.0276	0.0118	0.0118	0	1.8956
9,0 - 9,5	1.8719	0.1773	0.1143	0.0276	0.0433	0.0276	0.0276	0.0315	0.0079	0.0158	0.0079	2.3527
9,5 -10,0	0.6187	0.1222	0.067	0.0276	0.0276	0.0197	0.0236	0.0118	0.0079	0	0	0.9261
>10,0	2.7665	0.8276	0.2286	0.0512	0.0039	0.0039	0.0079	0.0079	0	0.0158	0	3.9133
TOTALE	44.0985	32.6266	12.8906	5.8286	2.6719	1.1547	0.469	0.1537	0.0512	0.0473	0.0079	100

Tab. 2.4/1 – Distribuzione delle frequenze percentuali di Hm0-TP per i dati ondosi triorari (di numero 25375) degli 11 anni di osservazione dei periodi 1999-2006 e 2009-2013

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA												
TM	Classi di HM0 (metri)											
(sec)	0,0-0,5	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	4,5-5,0	> 5,0	TOTALE
< 2,0	0.0118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0118
2,0 - 2,5	4.666	0.0315	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.6975
2,5 - 3,0	11.464	4.2167	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15.6808
3,0 - 3,5	5.8246	8.5478	0.5005	0	0	0	0	0	0	0	0	14.8729
3,5 - 4,0	8.0434	7.4365	3.0069	0.0552	0	0	0	0	0	0	0	18.5419
4,0 - 4,5	5.7103	4.8946	3.4286	1.1704	0.0079	0	0	0	0	0	0	15.2118
4,5 - 5,0	2.7507	2.664	2.2581	1.5369	0.6108	0	0	0	0	0	0	9.8207
5,0 - 5,5	1.3596	2.0729	1.8877	1.2099	0.7015	0.2995	0	0	0	0	0	7.531
5,5 - 6,0	0.9025	1.2256	1.0601	1.1192	0.5951	0.2719	0.1379	0.0039	0	0	0	5.3163
6,0 - 6,5	0.6581	0.6778	0.4493	0.4729	0.465	0.268	0.0906	0.0552	0.0158	0	0	3.1527
6,5 - 7,0	0.5951	0.3704	0.1103	0.1773	0.1498	0.1537	0.1458	0.0394	0.0197	0.0315	0	1.7931
7,0 - 7,5	0.4099	0.1852	0.067	0.0512	0.1103	0.1143	0.0591	0.0355	0.0079	0.0079	0.0079	1.0562
7,5 - 8,0	0.3941	0.1103	0.0355	0.0197	0.0236	0.0276	0.0276	0.0118	0.0039	0.0039	0	0.6581
8,0 - 8,5	0.335	0.0315	0.0079	0.0039	0.0039	0.0079	0.0079	0.0039	0	0.0039	0	0.4059
8,5 - 9,0	0.1892	0.0355	0.0118	0	0	0.0079	0	0.0039	0.0039	0	0	0.2522
9,0 - 9,5	0.1813	0.0118	0.0079	0.0079	0	0	0	0	0	0	0	0.2089
9,5 -10,0	0.1498	0.0158	0.0039	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1695
>10,0	0.4532	0.0985	0.0552	0.0039	0.0039	0.0039	0	0	0	0	0	0.6187
TOTALE	44.0985	32.6266	12.8906	5.8286	2.6719	1.1547	0.469	0.1537	0.0512	0.0473	0.0079	100

Tab. 2.4/2 – Distribuzione delle frequenze percentuali di Hm0-TM per i dati ondosi triorari (di numero 25375) degli 11 anni di osservazione dei periodi 1999-2006 e 2009-2013

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI DIREZIONE E DI ALTEZZA D'ONDA												
DMT	Classi di HM0 (metri)											
(gradi Nord)	0,0-0,5	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	4,5-5,0	> 5,0	TOTALE
0	1.5527	1.0719	0.4926	0.1931	0.067	0.0158	0	0	0	0	0	3.3931
10	1.3005	1.2768	0.7527	0.3744	0.1655	0.067	0.0236	0.0158	0	0	0	3.9764
20	1.0167	1.2059	0.9064	0.6384	0.3547	0.13	0.0631	0.0276	0.0039	0	0.0039	4.3507
30	0.9813	0.997	0.7882	0.5951	0.335	0.1222	0.0591	0	0	0.0079	0	3.8857
40	0.6621	0.8315	0.6897	0.4966	0.3389	0.1064	0.0315	0	0	0.0118	0	3.1685
50	0.6581	0.6305	0.402	0.2916	0.1813	0.1064	0.0276	0.0079	0.0039	0	0	2.3094
60	0.6227	0.5714	0.2404	0.1419	0.1103	0.067	0.0276	0.0039	0.0118	0.0039	0	1.801
70	0.7645	0.4768	0.1931	0.197	0.0709	0.067	0.0315	0.0158	0.0118	0.0039	0	1.8325
80	0.7409	0.4847	0.3074	0.1537	0.0591	0.0236	0.0197	0.0118	0.0079	0	0	1.8089
90	0.8749	0.6936	0.2956	0.1537	0.0512	0.0118	0.0039	0.0039	0	0.0079	0	2.0966
100	1.2808	1.2217	0.7054	0.331	0.1064	0.0276	0	0.0039	0	0	0	3.6768
110	1.9074	2.2581	1.1232	0.5714	0.3547	0.1616	0.1025	0.0236	0.0079	0.0039	0	6.5143
120	2.3606	2.5182	0.8512	0.3547	0.13	0.0867	0.0512	0.0236	0	0.0079	0	6.3842
130	2.6365	1.8286	0.4335	0.1773	0.0394	0.0433	0.0039	0.0079	0	0	0.0039	5.1744
140	2.5773	1.6355	0.2877	0.0315	0.0039	0.0118	0.0079	0.0039	0.0039	0	0	4.5635
150	2.6483	1.3123	0.1616	0.0197	0.0158	0.0039	0	0	0	0	0	4.1616
160	1.667	0.8946	0.0828	0.0158	0.0039	0	0	0	0	0	0	2.664
170	1.1429	0.4611	0.0394	0.0079	0.0118	0	0	0	0	0	0	1.6631
180	0.6857	0.2483	0.0394	0.0039	0.0039	0	0	0	0	0	0	0.9813
190	0.5557	0.1931	0.0473	0.0118	0.0039	0	0	0	0	0	0	0.8118
200	0.465	0.1695	0.0631	0.0079	0.0079	0.0039	0	0	0	0	0	0.7172
210	0.3626	0.2404	0.0591	0.0118	0.0039	0	0	0	0	0	0	0.6778
220	0.3941	0.2167	0.0394	0.0039	0	0	0	0	0	0	0	0.6542
230	0.536	0.268	0.067	0.0079	0.0079	0	0	0	0	0	0	0.8867
240	0.6069	0.335	0.0788	0	0.0039	0	0	0	0	0	0	1.0246
250	0.7527	0.2837	0.1182	0.0039	0	0	0	0	0	0	0	1.1586
260	0.8591	0.3586	0.0709	0.0236	0	0.0039	0	0	0	0	0	1.3163
270	0.8552	0.4453	0.1064	0.0315	0.0039	0.0039	0	0	0	0	0	1.4463
280	1.1034	0.7291	0.2089	0.0591	0.0079	0.0039	0	0	0	0	0	2.1123
290	1.4227	1.0877	0.4729	0.1261	0.0315	0.0197	0.0039	0	0	0	0	3.1645
300	1.6039	1.5527	0.6975	0.2286	0.067	0.0197	0.0039	0	0	0	0	4.1734
310	1.8365	1.7103	0.5044	0.1576	0.0276	0.0118	0.0039	0	0	0	0	4.2522
320	1.7813	1.5133	0.4138	0.0788	0.0197	0	0.0039	0	0	0	0	3.8108
330	1.6512	1.0995	0.3507	0.0867	0.0079	0.0079	0	0.0039	0	0	0	3.2079
340	1.6315	0.9103	0.3704	0.1064	0.0433	0.0118	0	0	0	0	0	3.0739
350	1.6	0.8946	0.4296	0.134	0.0315	0.0158	0	0	0	0	0	3.1054
TOTALE	44.0985	32.6266	12.8906	5.8286	2.6719	1.1547	0.469	0.1537	0.0512	0.0473	0.0079	100

Tab. 2.4/3 – Distribuzione delle frequenze percentuali di Hm0-DMT per i dati ondosi triorari (di numero 25375) degli 11 anni di osservazione dei periodi 1999-2006 e 2009-2013

DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DEL FLUSSO ENERGETICO DELLE ONDE PER METRO DI LUNGHEZZA DI CRESTA (=cost*HM0^2*TM)(in Kgf/(s*m))												
DMT	Classi di HM0 (metri)											
(gradi Nord)	0,0-0,5	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	4,5-5,0	> 5,0	TOTALE
0	0.1487	0.4787	0.7043	0.6007	0.3783	0.1398	0	0	0	0	0	2.4505
10	0.1055	0.6318	1.111	1.1638	0.9372	0.5948	0.328	0.3116	0	0	0	5.1836
20	0.0876	0.6184	1.4277	2.0997	2.0785	1.2089	0.9019	0.4977	0.0914	0	0.1822	9.194
30	0.0822	0.5156	1.2504	2.0411	1.9963	1.188	0.8595	0	0	0.2399	0	8.1731
40	0.0493	0.4278	1.1201	1.7815	2.1047	1.0219	0.4528	0	0	0.4032	0	7.3613
50	0.0543	0.3236	0.5933	0.9864	1.0767	1.0719	0.4044	0.1573	0.0924	0	0	4.7604
60	0.0476	0.2864	0.4069	0.4656	0.7118	0.6769	0.4162	0.0949	0.3159	0.121	0	3.5432
70	0.0562	0.2602	0.3211	0.6901	0.4629	0.6501	0.4608	0.3339	0.3131	0.1171	0	3.6654
80	0.0541	0.2623	0.5067	0.5462	0.332	0.208	0.3126	0.2475	0.2278	0	0	2.6972
90	0.0722	0.352	0.4611	0.5505	0.3201	0.1371	0.0579	0.0896	0	0.2765	0	2.3171
100	0.116	0.6473	1.2164	1.1358	0.7284	0.2888	0	0.0717	0	0	0	4.2044
110	0.1946	1.185	2.0361	2.1119	2.3814	1.7529	1.6369	0.5027	0.2424	0.1769	0	12.2208
120	0.2367	1.2534	1.4384	1.348	0.9215	0.9136	0.7574	0.4992	0	0.2963	0	7.6645
130	0.2652	0.8348	0.6713	0.6282	0.2585	0.4339	0.0586	0.1647	0	0	0.169	3.4843
140	0.2576	0.6904	0.4462	0.0985	0.0356	0.1352	0.1455	0.0827	0.1152	0	0	2.0069
150	0.2442	0.519	0.2208	0.0855	0.0914	0.0481	0	0	0	0	0	1.209
160	0.1585	0.3487	0.1178	0.0571	0.0335	0	0	0	0	0	0	0.7156
170	0.0946	0.1866	0.0486	0.0278	0.0709	0	0	0	0	0	0	0.4285
180	0.0512	0.1178	0.046	0.0152	0.0214	0	0	0	0	0	0	0.2517
190	0.0446	0.096	0.0618	0.0409	0.031	0	0	0	0	0	0	0.2744
200	0.035	0.0933	0.1093	0.0229	0.049	0.0651	0	0	0	0	0	0.3745
210	0.0249	0.112	0.0869	0.037	0.0294	0	0	0	0	0	0	0.2901
220	0.0286	0.0966	0.0548	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.1901
230	0.0401	0.1057	0.0876	0.0235	0.0433	0	0	0	0	0	0	0.3003
240	0.0466	0.142	0.1087	0	0.0248	0	0	0	0	0	0	0.3221
250	0.0573	0.1224	0.1628	0.0121	0	0	0	0	0	0	0	0.3547
260	0.0695	0.1532	0.0936	0.0794	0	0.0459	0	0	0	0	0	0.4417
270	0.0722	0.2129	0.1264	0.1102	0.0217	0.0347	0	0	0	0	0	0.5781
280	0.1016	0.3216	0.2822	0.1769	0.0402	0.0439	0	0	0	0	0	0.9665
290	0.132	0.4495	0.6697	0.367	0.1545	0.1902	0.0584	0	0	0	0	2.0214
300	0.147	0.6636	0.9731	0.6595	0.3754	0.1817	0.0512	0	0	0	0	3.0514
310	0.1701	0.7104	0.6681	0.4835	0.1567	0.1208	0.045	0	0	0	0	2.3545
320	0.1681	0.6194	0.5739	0.2407	0.0959	0	0.0546	0	0	0	0	1.7526
330	0.1446	0.4538	0.497	0.2687	0.0458	0.0695	0	0.0928	0	0	0	1.5724
340	0.1383	0.3872	0.5142	0.3527	0.2413	0.1036	0	0	0	0	0	1.7374
350	0.1347	0.3981	0.598	0.4183	0.1786	0.1582	0	0	0	0	0	1.8859
TOTALE	3.9317	15.0777	19.8124	19.7371	16.4287	11.4835	7.0017	3.1464	1.3982	1.6309	0.3512	100

Tab. 2.4/4 – Distribuzione delle frequenze percentuali del flusso energetico, riferito ad un metro di lunghezza di cresta, per i dati ondosi triorari (di numero 25375) degli 11 anni di osservazione dei periodi 1999-2006 e 2009-2013

Graficamente, in **figura 2.4/1**, è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza percentuale del moto ondoso triorario rilevato dalla boa ondametrica posta al largo di Ancona negli 11 anni relativi alle due fasi di osservazione (i 7 anni, fra il 1999 ed il 2006, ed i 4 anni, fra il 2009 ed il 2013), secondo il dato direzionale di provenienza media suddiviso per intervalli di 10°. Nella **figura 2.4/2** è riportata la distribuzione direzionale delle frequenze percentuali del flusso energetico per metro di lunghezza di cresta delle stesse onde degli 11 anni complessivi dei due periodi (1999-2006 e 2009-2013), suddivise negli stessi settori direzionali di 10°.

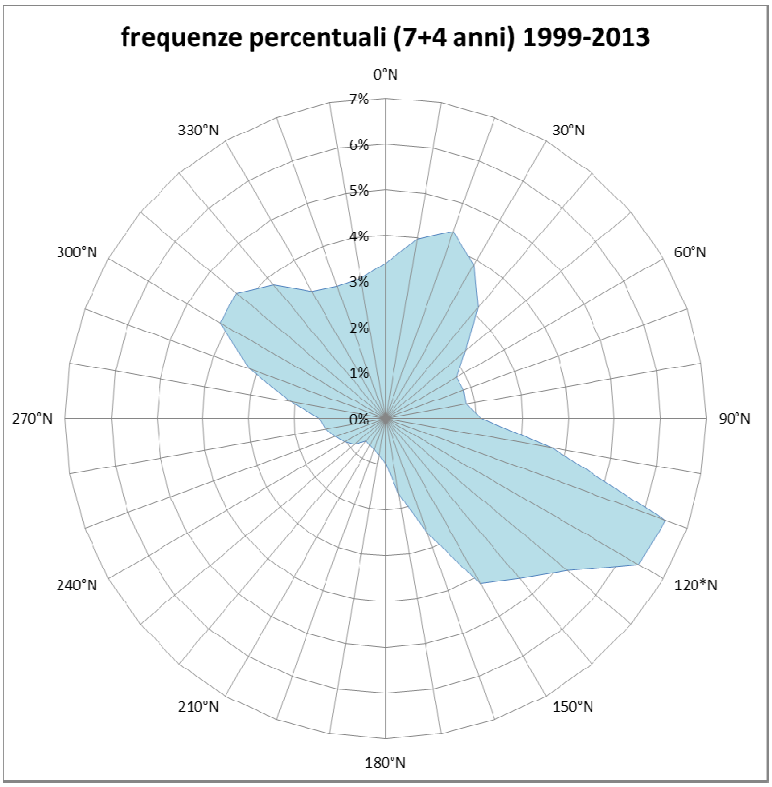


Figura 2.4/1 – Distribuzione direzionale delle frequenze percentuali dei dati ondosi triorari registrati dalla stazione della RON al largo di Ancona negli 11 anni dei periodi 1999-2006 e 2009-2013

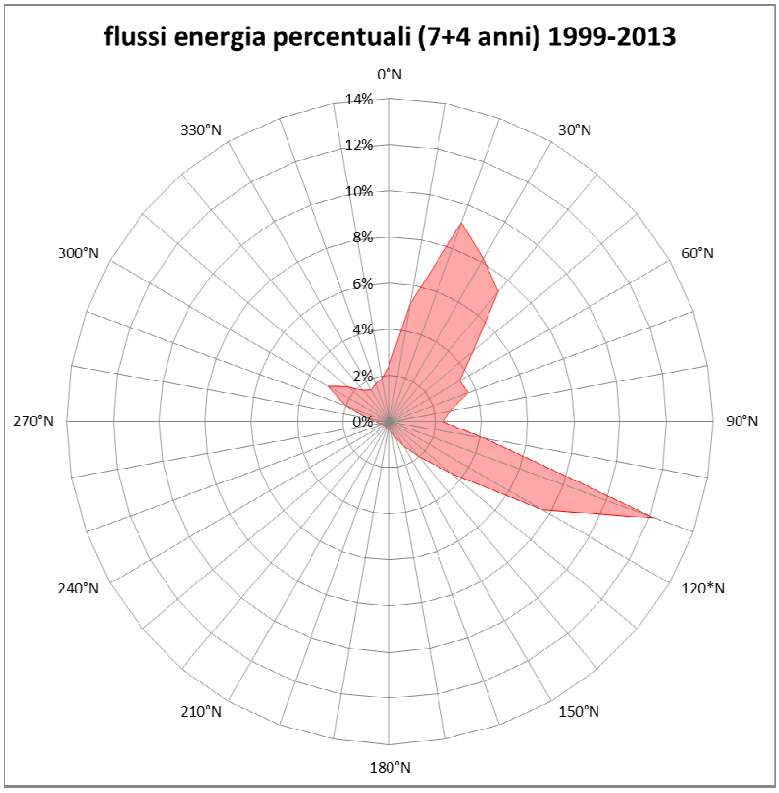


Figura 2.4/2 – Distribuzione direzionale delle frequenze percentuali dei flussi energetici per metro di lunghezza di cresta dei dati ondosi triorari rilevati al largo di Ancona in 11 anni nel periodo '99-'13

In **figura 2.4/3** è riportato il grafico di confronto delle suddette distribuzioni direzionali delle frequenze e del flusso energetico per metro di lunghezza di cresta delle serie triorarie dei dati di entrambe le fasi di osservazione di 11 anni (7 anni, fra il 1999 ed il 2006 e 4 anni, fra il 2009 ed il 2013).

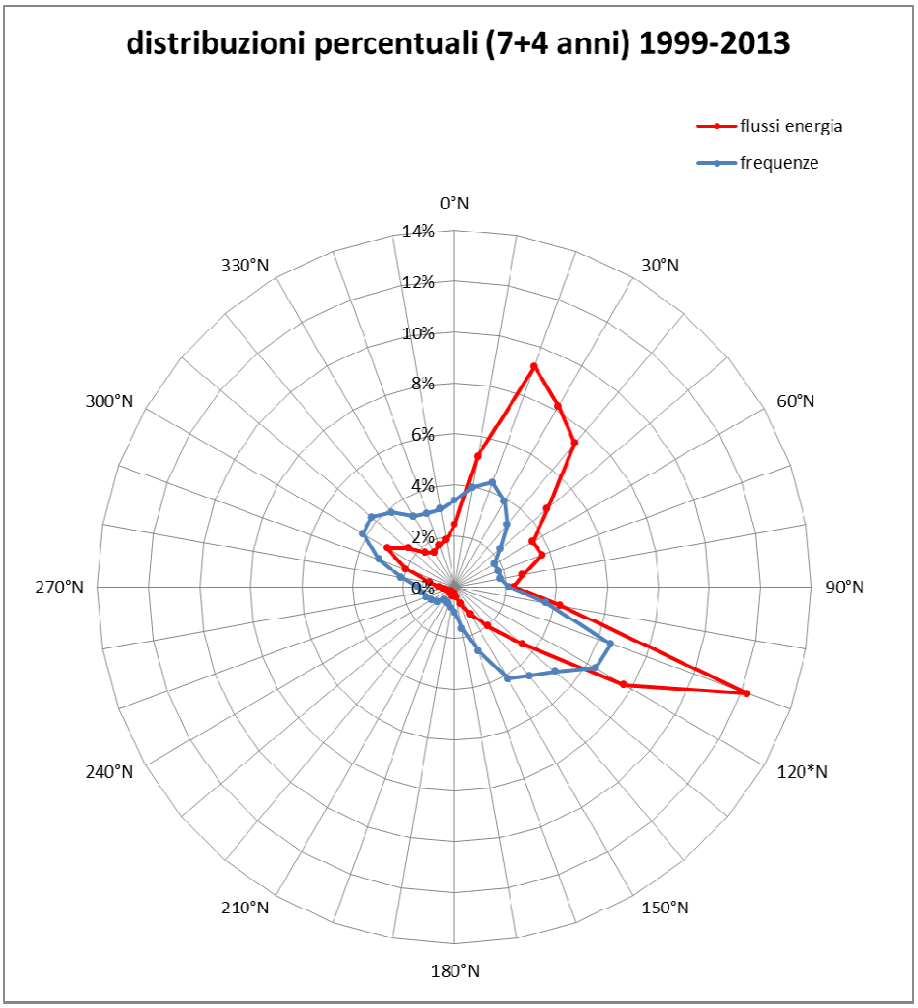


Figura 2.4/3 – Distribuzione direzionale percentuale di confronto fra la frequenza ed il flusso di energia per metro di lunghezza di cresta delle onde registrate dalla stazione di misura ondametrica della RON al largo di Ancona negli 11 anni di osservazioni dei due periodi 1999-2006 e 2009-2013

Il clima ondoso del medio Adriatico è caratterizzato da due direzioni prevalenti (10°N-40°N e 110°N-120°N) con una prevalenza nel flusso di energia per le onde del II quadrante. Le onde sono la conseguenza dei due venti caratteristici dell'Adriatico, vento di Bora con intensità notevoli ma con fetches ridotti e vento di Scirocco che ha intensità minore ma fetches praticamene illimitati.

La boa NAUSICAA è situata a 8km al largo di Cesenatico su un fondale di profondità di 10m alle coordinate 44.2155°N, 12.4766°E (WGS 84) è funzionante dal 2007.

Alla profondità di 10m le onde più alte hanno già subito un processo di rifrazione e shoaling e quindi, date le caratteristiche dei fondali romagnoli, i fronti d'onda tendono a disporsi parallelamente alla riva e le direzioni principali si concentrano nel settore 20°N-115°N.

Nella **figura 2.4/4** è riportato il clima delle onde elaborato da ArpaE ServizioIdroMeteoClima nel periodo maggio 2007 – marzo 2008 nell'ambito della 3ªCampagna di monitoraggio per il Comune di Rimini.

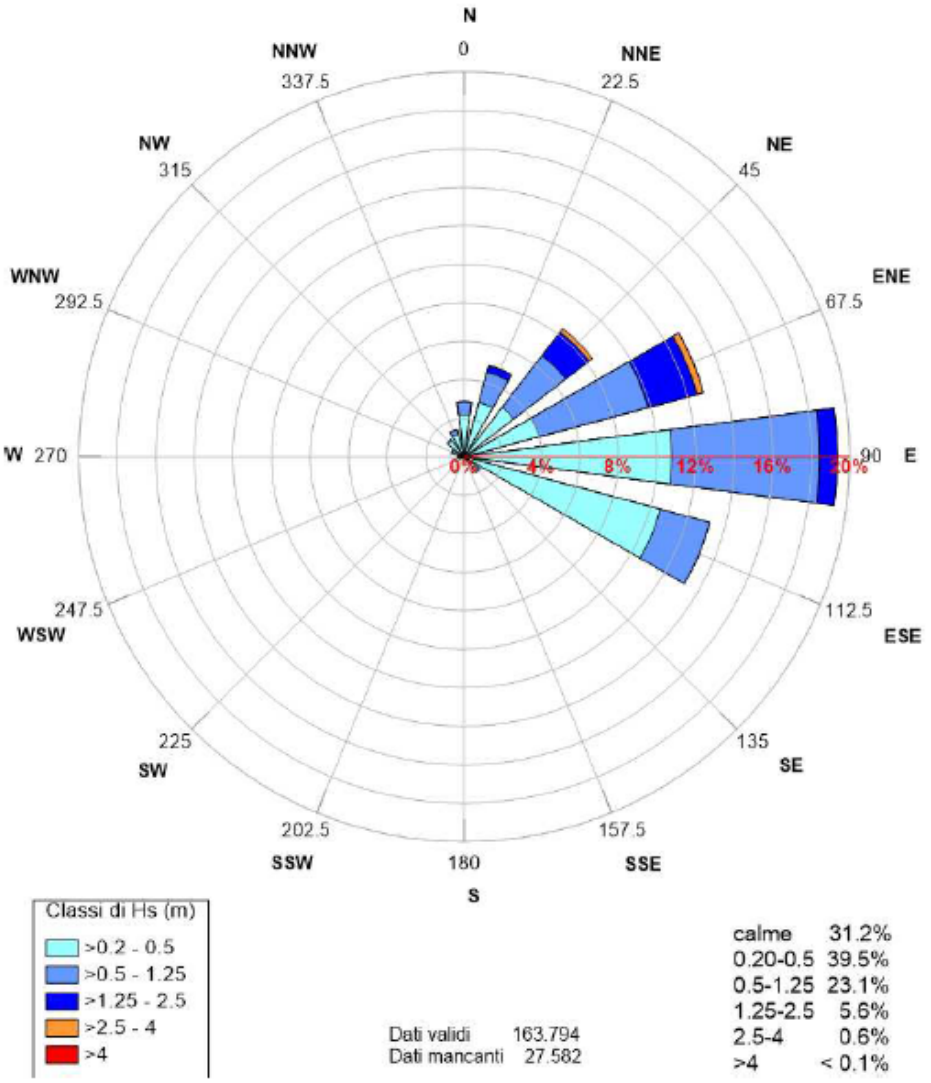


Figura 2.4/4 – Clima medio annuo del moto ondoso. Rosa delle onde ricavata dall'intera serie storica dei dati ondamentrici rilevati dalla boa Nausicaa (maggio 2007 – marzo 2018) – Elaborazione di ArpaE ServizIdro MeteoClima 3ªCampagna di monitoraggio Comune di Rimini

Dal confronto dei dati rilevati alla boa di Ancona e di Cesenatico si può notare come entrambi evidenziano il clima dell'Adriatico con le direzioni prevalenti di EstSudEst e NordEst; la boa di Cesenatico situata su fondali a minore profondità presenta una concentrazione delle onde nel settore compreso tra 45° e 112° prodotto appunto dalla rifrazione e shoaling dal largo a riva.

Nelle elaborazioni fatte da ARPAE ("Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012 ArpaE") per il periodo 2007-2012 è risultato che il settore da cui è pervenuto il maggior numero di onde, circa il

18% del totale è stato quello di E, seguito dal settore ESE, 112.5°N con il 14% dal settore ENE (67.5°N) con il 13% degli eventi.

Dal settore ENE è pervenuto il maggiore numero di onde più alte con H_S>1.25m (5.7%) seguito da settore ENE con il 3%. Le onde da bora 45°N hanno avuto una frequenza del 1.5%. Nel periodo considerato non vi sono state mareggiate con H_S>4.5m.

Le 65 mareggiate verificatesi nel periodo di registrazione hanno un settore di provenienza compreso tra 26°N e 91°N (c'è stato un unico caso di direzione maggiore di 90°) ed un valore di altezza significativa tra 1.6 e 3.2 ed in due casi si sono registrati valori massimi a 3.92m.

Nella collana i quaderni di Arpa, 2011, "Le mareggiate e gli impatti sulla costa in Emilia-Romagna 1946-2010" sono state censite attraverso una ricerca di archivio e su banche dati gli eventi meteo marini che hanno prodotto, nel periodo 1946-2010, danni ingenti sulla costa. I valori di riferimento per la compilazione del catalogo sono stati di H=3.00m per la componente ondosa, il valore di 0.8m per il livello del mare per la combinazione dei due eventi H=2.00m e livello del mare superiore a 0.70m. Sono stati censiti 50 eventi su tutta la costa Emiliano – Romagnola e sono state predisposte delle schede dettagliate, per 10 eventi esistono analisi delle condizioni metereologiche e dei danni prodotti. Nei 10 eventi riportati i litorali di Lido di Pomposa e Lido delle Nazioni subiscono sempre notevoli danni, in particolare sono tutti caratterizzati da sopraelevazione del livello medio mare da +0.80m (eventi meno gravosi) sino a +1.56m rilevato a Porto Corsini nell'evento eccezionale del 4 Novembre 1966.

La protezione civile regionale ha analizzato la mareggiata eccezionale e l'ingressione marina verificatasi nei giorni 5-6 febbraio 2015 "…*Già nelle prime ore del mattino del 5 febbraio il livello di marea registrato al mareografo di Porto Corsini ha superato, per alcune ore, la quota di 1 m s.l.m. Contestualmente l'intensità dell'onda è aumentata e, alla boa ondametrica Nausica (posta al largo di Cesenatico), si sono registrati valori di altezza d'onda superiori ai 3 metri. In serata, a partire dalle ore 22, entrambe i fenomeni si sono via via intensificati, in funzione dell'intensità del vento che ha raggiunto valori di 80-100 km/h. Il dato più rilevante è la durata della fase di alta marea che si è protratta per ben 12 ore. Le misurazioni del livello del mare disponibili in Emilia-Romagna hanno registrato un picco pari a 1,18 metri a Porto Garibaldi e di 1,21 metri a Ravenna - Porto Corsini"; "La boa ondametrica installata a Cesenatico ha registrato un'altezza significativa di onda massima pari a 4,66 metri alle ore 08 UTC del 06 febbraio".*

Figura 10: Altezza significativa dell'onda registrata nel periodo 05-07 febbraio 2015 dalla boa dell'Emilia-Romagna Nausicaa ed installata al largo di Cesenatico. Si noti il massimo dell'onda pari a 4.66 metri il 06 febbraio ore 08 UTC

Figura 2.4/5 – Altezza significativa della mareggiata estrema registrata alla boa Nausicaa (estratta da "Esercitazione di Protezione Civile – Costa 2019 Rischio idraulico e costiero 20-21set2019 Transnational Network Conference")

"Un'onda di 4,66 metri come quella registrata il 6 febbraio 2015 mattina non si era mai verificata prima.
L'eccezionalità dell'evento sta soprattutto nella concomitanza tra i due segnali di livello del mare e di altezza d'onda. Le due grandezze si sono mantenute entrambe sopra la soglia di criticità individuata per l'emissione dell'allerta per criticità costiera (altezza onda superiore a 2 metri e livello del mare superiore a 0,7 metri) per un arco temporale totale di 21 ore in 3 giorni (evidenziate in colore azzurro in Figura 11), con un'ampia finestra centrale di circa 14 ore".

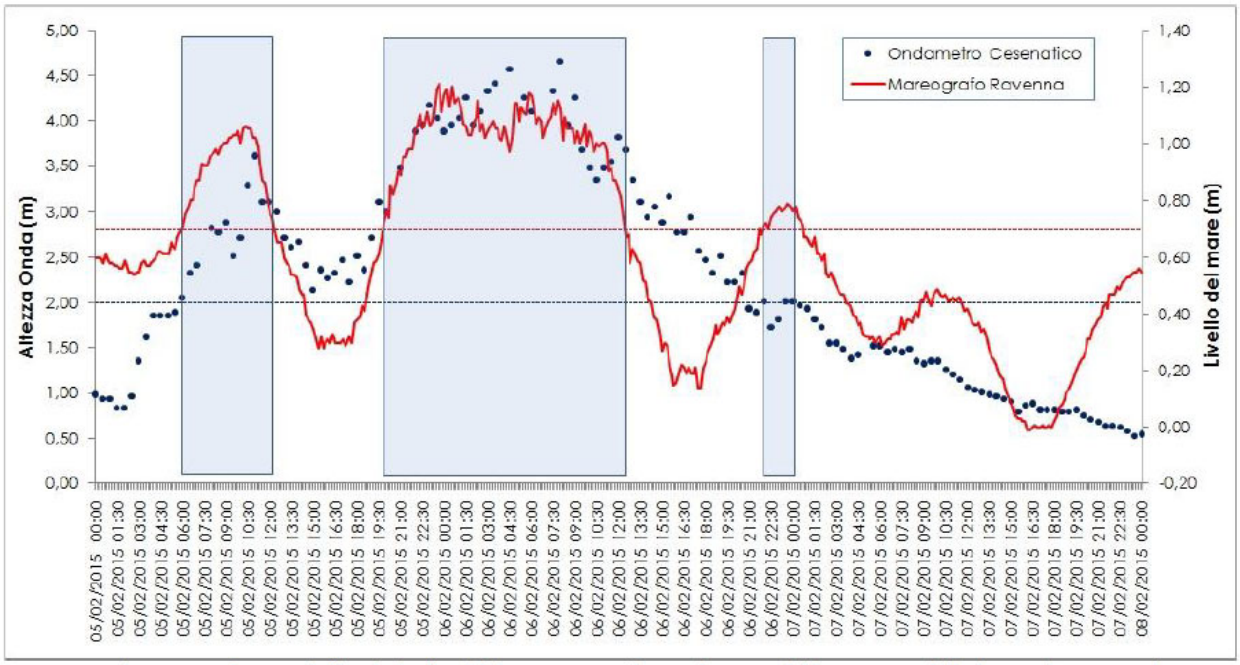


Figura 11: Altezza significativa dell'onda (pallini blu) registrata nel periodo 05-07 febbraio 2015 dalla boa ondametrica di Cesenatico e livello del mare (linea rossa) registrato dal mareografo di Porto Corsini RA.

Figura 2.4/6 – Altezza significativa della mareggiata e livello del mare (estratta da "Esercitazione di Protezione Civile – Costa 2019 Rischio idraulico e costiero 20-21set2019 Transnational Network Conference")

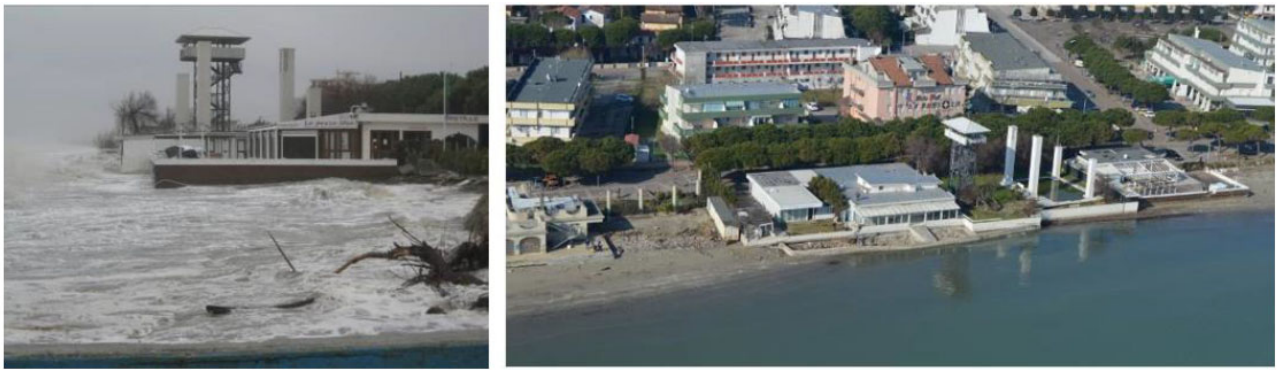


*Figura 25: **Lido delle Nazioni**. Durante la mareggiata e dopo la mareggiata: l'esigua spiaggia tra infrastrutture turistiche e mare è stata asportata.*

Figura 2.4/7 – Immagini del litorale di Lido delle Nazioni durante e dopo la mareggiata estrema del 5-6feb2015 (estratta da "Esercitazione di Protezione

Le mareggiate nel periodo 2012-2019 sono state analizzate nei rapporti annuali "RAPPORTO IDROMETEOCLIMA EMILIA-ROMAGNA" dell'ArpaE, nessuna mareggiata ha superato quella del 2015 a cui può essere associato un periodo di ritorno superiore a 50anni.

2.5 Livello medio marino

I litorali Ferraresi per la loro collocazione geografica sono soggetti a intensi fenomeni di "acqua alta" che riducono l'efficacia delle opere di difesa dei litorali allagando gran parte della spiaggia emersa, le infrastrutture viarie ed il territorio retrostante situato a livelli inferiori al livello medio del mare.

L'innalzamento del livello medio marino, S_T, è la somma della componente massima di marea astronomica, S_M, e della componente di storme surge dovuta alle componenti metereologiche per stress da vento S_W, dalla componente dovuta alla pressione atmosferica, S_p, ed infine alle oscillazioni del livello del bacino Adriatico, onde stazionarie chiamate sesse S_{SS}.

L'"acqua alta" è quindi la somma di quattro termini periodici o reversibili $S_T=S_M+S_W+S_p+S_{SS}$.

L'ultimo episodio di acqua alta (Nov. 2019) ha prodotto a Venezia un valore di +1.82m sul l.m.m. secondo solo al valore massimo di +1.94m sul l.m.m. misurato nell'alluvione del 1966.

Nei litorali il livello medio marino nella zona di swash dipende dal termine S_T a cui si deve aggiungere, in presenza di mareggiate, il livello di setup S_{up} prodotto dalle onde frangenti ed un eventuale aumento per la riflessione delle onde in spiagge molto pendenti (1/8 – 1/10). Sul livello S_T+S_{up}, trascurando la riflessione, si propagano le onde tipo "bore" determinando il massimo livello di Run-up sulla spiaggia emersa.

L'effetto del Run-up termina una volta finita la mareggiata ma il trasporto verso il largo dei sedimenti, prodotto dalle correnti di ritorno (undertow) innescate dall'alto livello sulla riva, può modificare completamento il profilo della spiaggia emersa e sommersa in modo irreversibile creando un erosione recuperabile solo con interventi di ripascimento.

La presenza di infrastrutture dove le onde di "bora" vengono riflesse amplifica ulteriormente il fenomeno erosivo e i danni alle infrastrutture stesse.

Alle componenti S_T, S_{up} si dovrà inoltre sommare l'innalzamento So dovuto ai cambiamenti climatici (sea level rise) e valutato in alcuni modelli previsionali di circa 20cm al 2030. Il PGRA dell'Emilia Romagna prevede, al variare del tempo di ritorno i seguenti valori del sovralzo S_T: T_R=10 anni, S_T=+1.50m, T_R=100 anni, S_T=+1.80m, T_R>100 anni, S_T=+2.50m

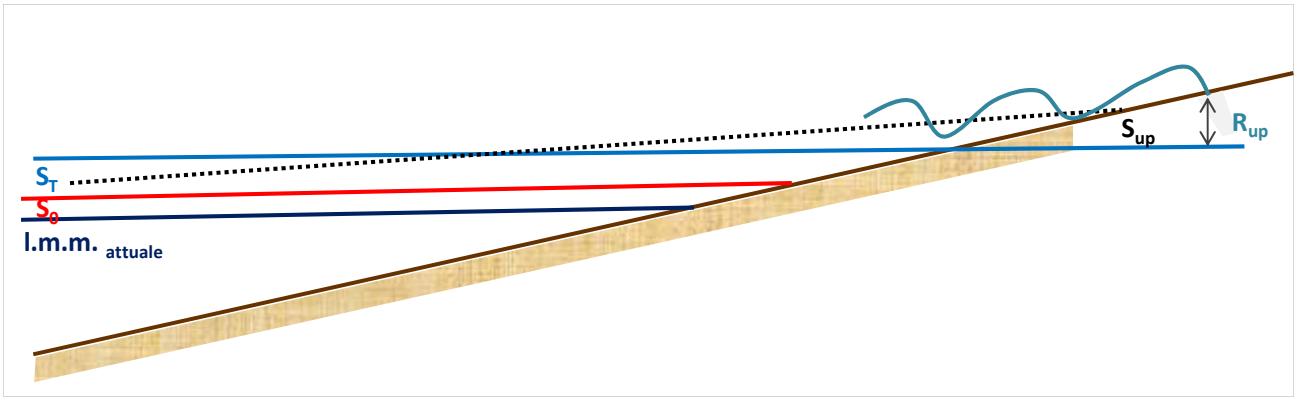


Figura 2.5/1 – Livello medio mare attuale con sopraelevazione S_0 (cambiamenti climatici in rosso), storme surge S_T (linea azzurra), set-down e set-up S_{up} durante la mareggiata (linea tratteggiata) e massimo livello raggiunto sulla spiaggia emersa dalle onde R_{up}

A Porto Garibaldi è funzionante dal 2009 una stazione mareografica integrata, in cui il mareografo è collegato con una stazione permanente GPS inquadrata in Reti Geodetiche Nazionali ed in grado di fornire e separare i movimenti verticali del livello marino dai movimenti verticali del territorio (subsidenza).

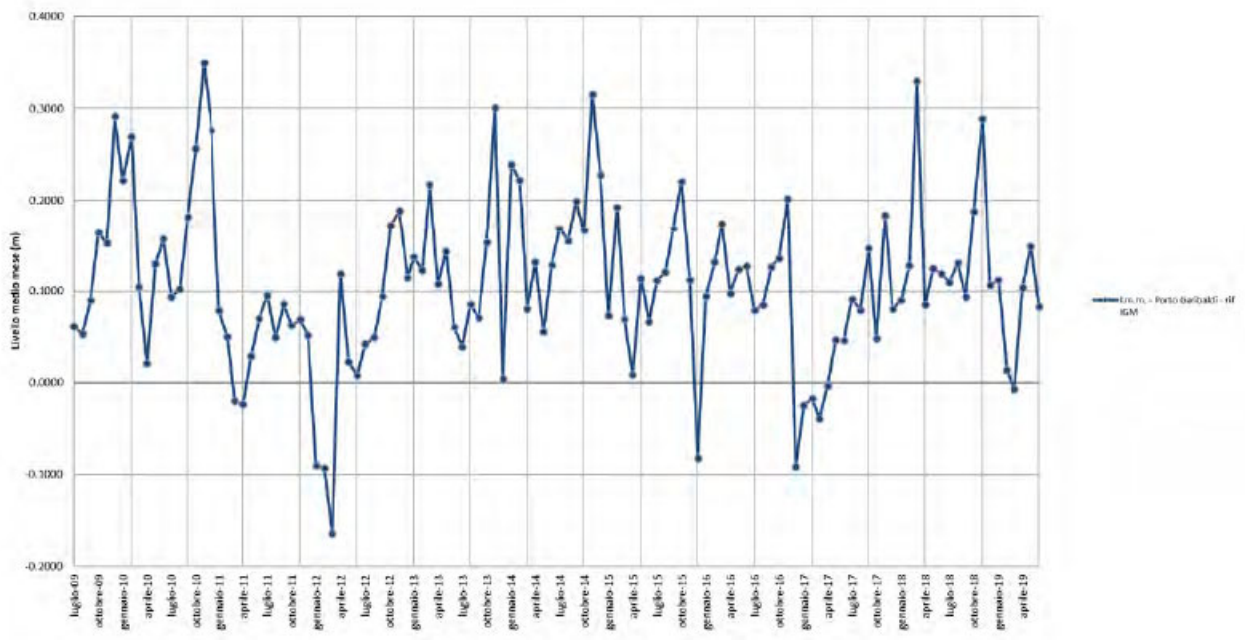


Figura 2.5/2 – Andamento del livello medio mare mensile misurato a porto Garibaldi nel decennio lug2009-lug2019 (Elaborazioni Ing. Alberto Pellegrinelli Univ Ferrara)

Dall'elaborazione effettuata dall'Ing. Pellegrinelli, per definire un livello medio mare dell'Adriatico Settentrinale di riferimento, risulta che il livello medio mare a Porto Garibaldi nel decennio 2009-2019 è +0.107m rispetto al livello medio mare di Genova 1942 (sono in corso verifiche sul risultato ottenuto).

Nei mesi novembre dicembre 2019 si sono susseguiti numerosi episodi di acque alte in tutta l'area dell'Adriatico Settentrionale, di seguito sono riportate le registrazioni effettuate dai mareografi Ispra di Venezia Lido, Ravenna Porto Corsini, e Porto Garibaldi.

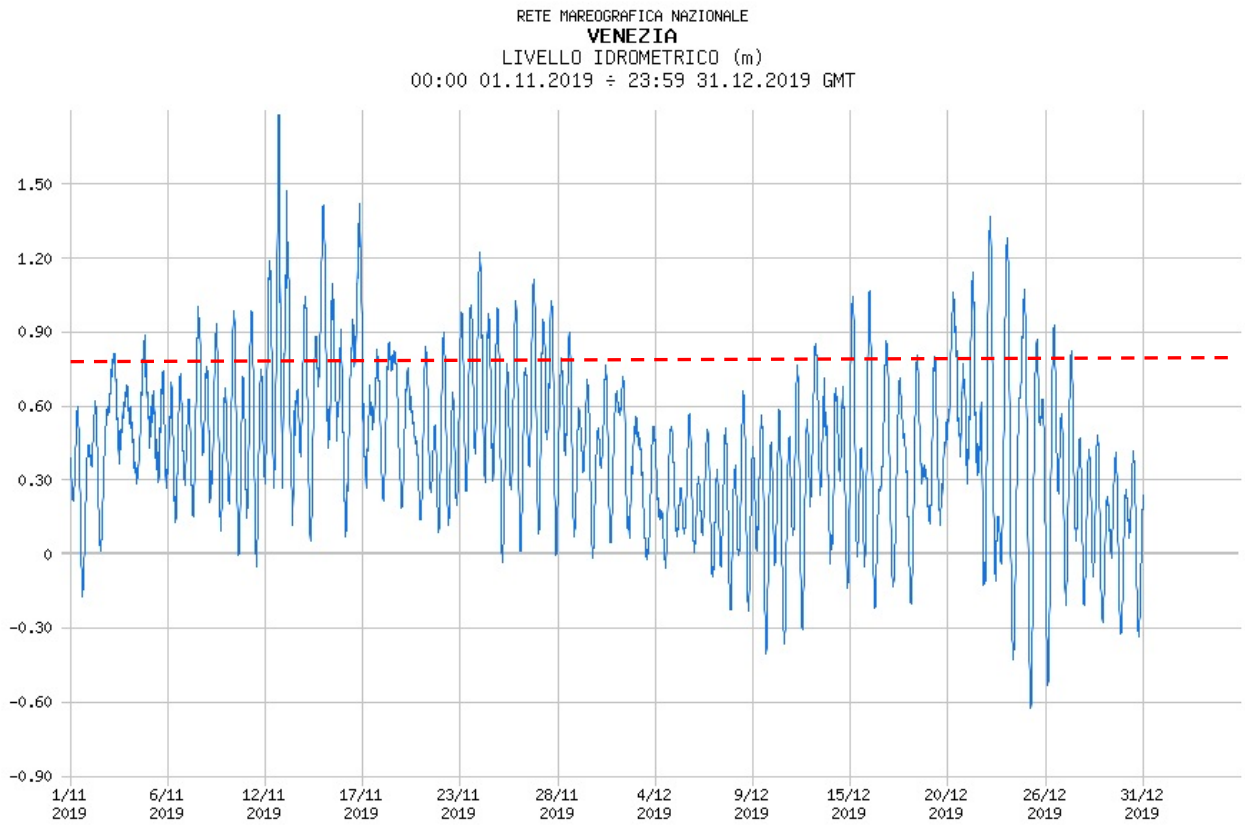


Figura 2.5/2 – Livello idrometrico a Venezia Lido con evidenziato in tratteggio rosso +0.80m

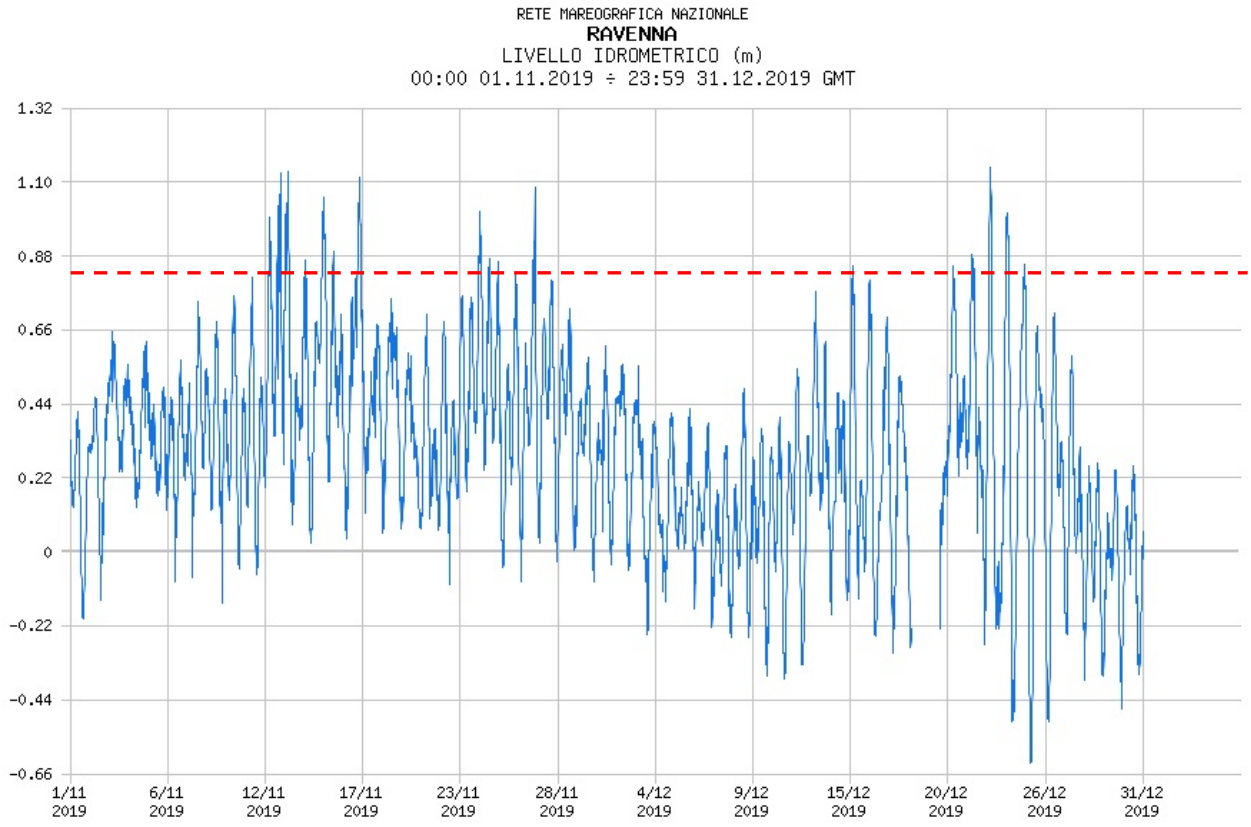


Figura 2.5/3 – Livello idrometrico a Porto Corsini con evidenziato in tratteggio rosso +0.80m

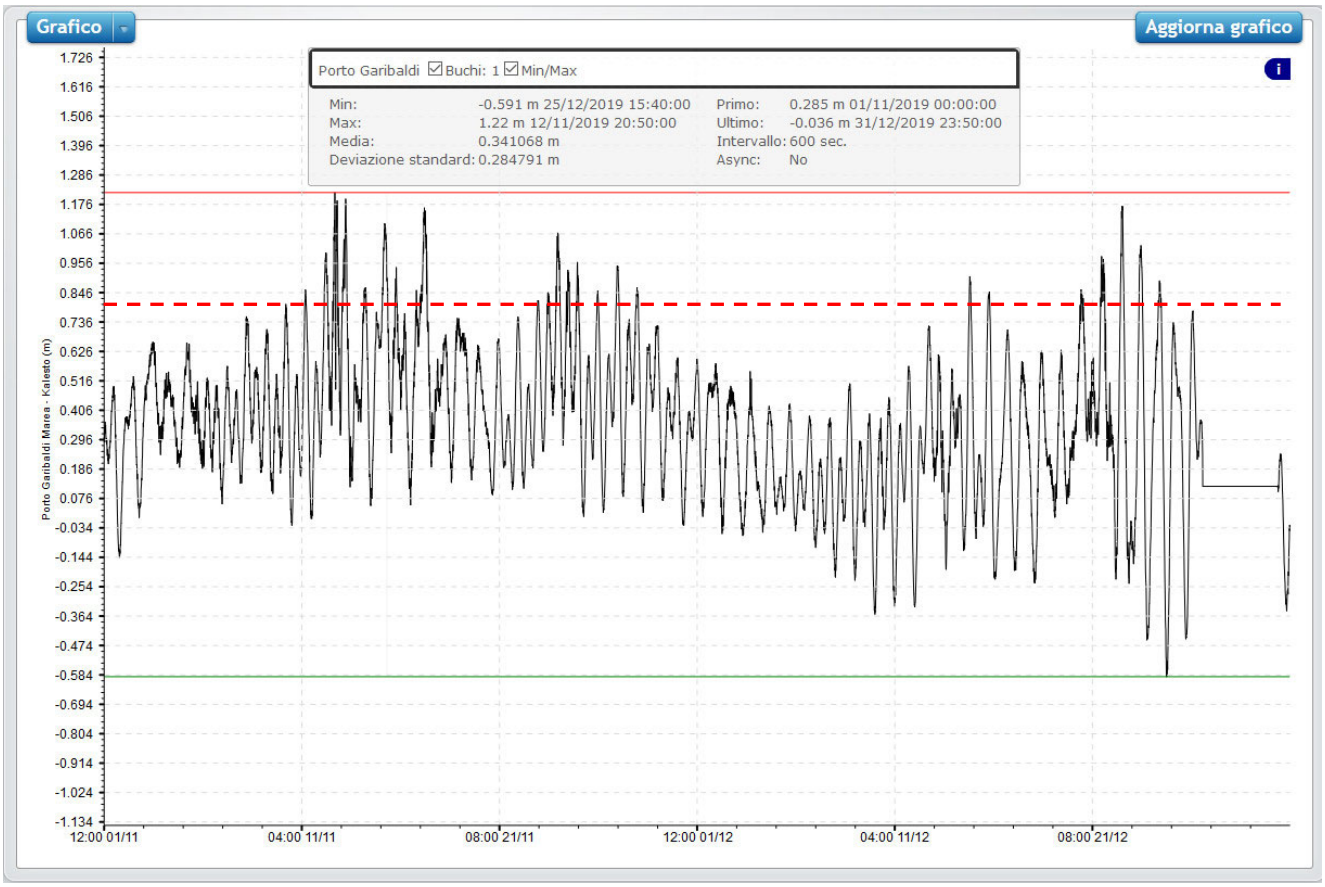


Figura 2.5/4 – Livello idrometrico a Porto Garibaldi con evidenziato in tratteggio rosso +0.80m

Come evidenziato nell'analisi delle mareggiate del passato la sopraelevazione del livello medio è il fattore fondamentale nel funzionamento delle opere foranee come sarà di seguito esposto e gli episodi di acqua alta negli ultimi 2 mesi ne evidenziano la frequenza di accadimento.

3. Evoluzione morfologica del litorale

La parte nord dell'Adriatico ha profondità <100m con pendenza dei fondali molto basse. Il bacino Adriatico ha una lunghezza di circa 800 km ed una larghezza di circa 200 km con una superficie di A=160.000km^2, gli scambi con il Mediterraneo avvengono attraverso il canale di Taranto.

La morfologia dei fondali, a nord della latitudine 43.5°N, è dominata dagli apporti solidi del fiume Po e del fiume Reno e di altri fiumi secondari.

Nella parte sommersa del delta del Po (il 92% dei sedimenti più fini, trasportati dal Po, deposita entro 20km dalla foce e solo in parte vengono sollevati dalla tensione tangenziale prodotta dalle onde e trasportate verso sud dalla corrente di circolazione generale dell'Adriatico (Western Adriatic Coastal Current, W. A. C. C.) che lambisce la costa italiana in direzione sud.

La velocità della corrente viene intensificata dai venti di Bora mentre viene contrastata dalle onde generate dal vento di Scirocco.

I sedimenti dei fondali possono essere suddivisi secondo Brambati in due classi, sabbie con diametro 50÷200µm e materiali fini con diametro pari a 2÷50µm. Nel volume ArpaE "Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012" è riportata nella pag. 176 la mappa del diametro medio dei sedimenti sino alla profondità di circa -5m. Nella zona protetta dalle scogliere risulta un diametro medio dei fondali compreso nella classe 0.125-0.250mm sabbia fine, mentre a ridosso delle scogliere fino alla profondità di -5m, a partire dal Lido degli Scacchi verso Nord, i diametri medi diminuiscono con prevalenza di silt (0.02-0.063mm) e sabbia molto fine (0.063-0.125mm). La percentuale delle peliti rilevata nel 2012 nel Lido di Pomposa e Lido di Volano raggiunge il 25%; a Volano il fango raggiunge il 90% con il 10% di argilla.

La morfologia del litorale Ferrarese è poco influenzata dalla corrente di circolazione generale, è determinante l'azione diretta del moto ondoso che nella zona dei frangenti sviluppa correnti longitudinali e trasversali alla costa in grado di trasportare grandi quantità di sedimenti.

Figura 3/1 – Immagine satellitare (GoogleEarth) della costa Ferrarese

L'erosione di un tratto di spiaggia avviene, nel lungo periodo, quando, per motivi diversi, si determina un gradiente delle portata solida longitudinale. Lo squilibrio della portata solida longitudinale può essere dovuto alla diminuzione degli apporti solidi fluviali, alla costruzione di opere portuali e costiere alla curvatura della costa ecc.. Il trasporto trasversale è invece la causa delle oscillazioni della linea di riva nel breve periodo, durante una o più mareggiate.

Nella pubblicazione ARPAE "Stato del litorale Emiliano-Romagnolo al 2012 - Erosione e interventi di difesa – sono riportati le analisi i monitoraggi e le osservazioni sulla dinamica dei litorali regionali. L'intero litorale è stato suddiviso in celle ed il tratto Porto Garibaldi – Volano è individuato come Macrocella 6. Viene evidenziato che l'evoluzione di questo tratto di litorale è condizionato dalla presenza dei moli di Porto Garibaldi dall'escavo del canale sub lagunare di atterraggio al porto di Goro dall'apporto solido del Po di Goro e da quelli del fiume Reno. L'allungamento dei moli di porto Garibaldi di circa 300m avvenuto nel 1958 ha accentuato l'erosione a nord del porto. La costruzione di nuovi setti di barriere emerse avvenuta negli anni 60-70 ha spostato l'erosione sottoflutto, a nord, e le difese foranee hanno raggiunto la lunghezza di 9km.

Per bloccare l'erosione progressiva verso nord verso l'area delle Bocche del Bianco e della Pineta di Volano è stata realizzata una scogliera radente e successivamente, nel 2003 una serie di pennelli in pali di legno.

Allo stato attuale il litorale da Porto Garibaldi a Lido delle Nazioni è totalmente difeso da scogliere parallele emerse, la spiaggia è pressoché rettilinea con larghezza maggiore a ridosso di Porto Garibaldi (120-140m) e si assottiglia verso Lido delle Nazioni dove la larghezza della spiaggia emersa è di 10-20m, dei salient si sono formati nelle aree lontane dai varchi.

La scarsità di apporti solidi naturali (l'immissione di sabbia nella zona protetta è avvenuta principalmente tramite ripascimenti, circa 60.000m^3 sono stati versati negli ultimi 20 anni), non ha consentito la formazione dei tomboli, strutture morfologiche caratteristiche delle aree protette da scogliere foranee.

L'allineamento delle scogliere che come già detto sono orientate perpendicolarmente alla direzione delle onde provenienti da Est-SudEst, la dimensione dei varchi e lo stato di degrado delle scogliere insieme alla scarsità di apporti solidi ha determinato l'attuale andamento della linea di riva. Anche la batimetria al largo della scogliera evidenza lo stato di maggior pericolosità spostandosi verso Lido delle Nazioni, la linea batimetrica -3.50m è posizionata a circa 300m al largo delle scogliere nella zona a ridosso dei moli di Porto Garibaldi mentre a partire da Lido degli Scacchi tende a posizionarsi a ridosso delle scogliere; i fondali dissipano minore energia delle onde, la dissipazione per frangimento avviene in uno spazio più ristretto e quindi con maggiore intensità.

La maggiore dimensione della spiaggia di Porto Garibaldi, ma anche l'effetto del pennello costruito a Lido delle Nazioni con avanzamento della spiaggia nel lato nord del pennello stesso sembrano dimostrare che all'interno delle scogliere è prevalente un trasporto solido verso sud che risulterebbe opposto al trasporto solido longitudinale prevalentemente diretto verso nord come dimostrato dagli effetti prodotti da Moli di Porto Garibaldi e con l'erosione che si è verificata su tutto il tratto sino alla Pineta di Volano: i moli del porto hanno intercettato e deviato al largo gli apporti solidi del fiume Reno che contribuivano all'equilibrio di questo tratto di costa.

Il trasporto verso sud nell'area protetta dalle scogliere si può giustificare con l'orientazione dei varchi esistenti che permettono quasi esclusivamente l'ingresso delle ondazioni di 20°-60°N che favoriscono la creazione di correnti in grado di trasportare sedimenti verso sud.

Per ridurre il processo erosivo è necessario ripristinare e migliorare la funzionalità delle scogliere contrastando l'overtopping durante gli episodi, sempre più frequenti di acqua alta e ridurre il run-up delle onde sulla spiaggia emersa soprattutto in corrispondenza dei varchi.

4. Progetto delle opere

Il presente Progetto Esecutivo prevede:

a) l'adeguamento delle scogliere foranee esistenti ricaricando con massi naturali le sezioni correnti e portando la quota di sommità della berma a +2.50m l.m.m. con larghezza di 3.0m;
b) il prolungamento delle testate dei setti esistenti per ridurre l'ingresso, nell'area protetta, delle onde incidenti.

Gli interventi sono previsti al Lido delle Nazioni e al Lido di Pomposa e sono riportati nelle TAV.04-05.

Nella fase di Progettazione Definitiva si è prevista la realizzazione del rifiorimento delle scogliere lato mare per migliorare la stabilità della mantellata esterna delle opere e per evitare la movimentazione delle sabbie prodotta dall'elica del pontone e dal posizionamento dei massi nella parte interna, riducendo l'impatto ambientale dei lavori nell'area protetta.

4.1 Ripristino scogliere foranee

Le scogliere emerse hanno lo scopo di dissipare l'energia delle onde incidenti attraverso la riflessione ed il frangimento. L'altezza dell'onda trasmessa (calcolata attraverso il coefficiente di trasmissione $K_t=H_t/H_i$ rapporto tra l'altezza dell'onda trasmessa e di quella incidente) dipende dalla quota di sommità e dalla larghezza della berma. Aumentando la quota di sommità della berma si riduce l'overtopping delle onde incidenti e quindi l'altezza dell'onda trasmessa che raggiungerà il litorale. E' logico che aumentando la quota di sommità si produce un impatto visivo maggiore e si riduce la circolazione idrodinamica prodotta nell'area protetta dai volumi d'acqua tracimati per overtopping. L'efficacia della scogliera foranea si riduce quando le mareggiate più intense sono accompagnate da sovralzo del livello medio mare in concomitanza di alte maree, set-up prodotti dalle onde e dal vento.

L'effetto del sovralzo è quello di ridurre la quota di sommità della berma aumentando l'altezza dell'onda trasmessa e la portata di tracimazione. Considerando un aumento del livello medio comprensivo dell'abbassamento per subsidenza di +2.5cm/anno si comprende come la quota di +2.50m l.m.m. possa tornare alle condizioni attuali in un tempo stimato di 30anni.

4.1.1 Trasmissione delle onde nella zona protetta dalle scogliere foranee emerse

Nella zona protetta dalle scogliere foranee si sommano, vettorialmente, le altezze d'onda entranti dai varchi esistenti e ridotte dalla diffrazione e le onde che si riformano in seguito alla tracimazione, (overtopping). La filtrazione attraverso la struttura contribuisce all'innalzamento del livello medio marino della zona protetta che determina le correnti di ritorno in uscita dai varchi.

Nel processo di tracimazione lo spettro del moto ondoso trasmesso nell'area protetta trasferisce energie alle alte frequenze, il periodo medio dello spettro si riduce di circa 0.4÷1.0 anche se il periodo di picco T_P rimane circa lo stesso. Non esistono molte ricerche sperimentali che consentono una parametrizzazione efficace del fenomeno, alcuni ricercatori hanno stimato che circa il 60% dell'area dello spettro trasmesso è concentrata nell'intervallo 0÷1.5 f_P ed il 40% sempre dell'area dello spettro trasmesso è concentrata tra 1.5f_P ÷ 3.5f_P. Si creano un numero maggiore di onde di alte frequenze (minor periodo). Il fenomeno può influire, attenuando i valori del run-up delle onde sulla spiaggia emersa.

Per valutare l'altezza d'onda trasmessa si determina il coefficiente di trasmissione, $K_T=H_T/H_i$, in funzione di B e R_c, larghezza e quota di sommità della scogliera e del parametro di Iribarren

$$\xi_m = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{H_i 2\pi}{g T_m^2}}}$$

dove $\tan\alpha$ è la pendenza della mantellata, H_i l'altezza dell'onda incidente e T_m il periodo medio ottenibile dal periodo di picco T_p dalla relazione T_p/T_m=1.1÷1.25.

Il K_T e l'altezza d'onda trasmessa, H_T sono state calcolate nello stato attuale e nella condizione di progetto con R_c=+2.50m. Si sono inoltre utilizzati due livelli di storme surge pari a +0.80m s.l.m.m. e +1.50m s.l.m.m.

La trasmissione è stata valutata stimando il coefficiente di trasmissione K_t con le formule di Van der Meer et al. (2005). Per B/H_i<8 si ha:

$$K_t = -0.4 \cdot \frac{R_c}{H_i} + 0.64 \cdot \left(\frac{B}{H_i}\right)^{-0.31} \cdot \left(1 - e^{-0.5\cdot\xi}\right)$$

dove B è la larghezza della cresta, H_i l'altezza dell'onda incidente, R_c la sommergenza della struttura, positiva per le barriere emerse, e ξ il parametro di Iribarren che, in questa formula, contiene il periodo di picco T_p invece del periodo medio. Stimato il coefficiente di trasmissione è possibile calcolare l'altezza d'onda trasmessa a tergo della struttura ($H_t = K_t \cdot H_i$).

Nell'analisi della trasmissione delle opere si sceglie, a favore di sicurezza, l'onda più intensa, con altezza e periodo d'onda più grandi.

		K_t			H_t (m)		
		senza S.S.	Storme Surge		senza S.S.	Storme Surge	
			S.S.=0.80m	S.S.=1.50m		S.S.=0.80m	S.S.=1.50m
S.A.	L. Nazioni	0.31	0.46	0.57	0.73	1.20	1.80
	L. Pomposa	0.41	0.55	0.66	0.95	1.44	2.07
S.P.	R_c=+2.50m	0.07	0.25	0.39	0.17	0.64	1.22

Tab. 4.1.1/1 – Confronto dei risultati di trasmissione ondosa (per l'onda trentennale più intensa – 120°N) nelle varie ipotesi progettuali – S.A. = stato attuale, S.P.$_e$ = stato di progetto emerse, S.P.$_{(soglie)}$ = stato di progetto soglie, R_c = sommergenza, B = larghezza berma – le barriere emerse hanno una larghezza di berma di 3.0m

Nella **tabella 4.1.1/1** sono riportate le analisi degli effetti prodotti dalle opere previste in progetto con onda incidente con tempo di ritorno 30 anni di altezza significativa alla profondità di imbasamento delle opere (-3.5m l.m.m.) pari a 2.35m (che diventa 3.14m nel caso di sovralzo massimo). Con la quota di sommità della berma della scogliera posta a +2.50m ed i sovralzi sino a +1.50÷1.80m si garantirebbe una emersione della berma di +0.70÷1.00m.

Come si evince dai risultati in tabella in occasione di storm surge massimo l'onda trasmessa è di 1.22m che frangerà in prossimità della battigia.

Poiché le scogliere sono posizionate, sia per l'intervento al Lido delle Nazioni che a quello di Pomposa, ad una distanza di circa 150÷170m dalla linea di riva e la quota di sommità della spiaggia emersa è pari a +2.00m per il Lido delle Nazioni e +2.50m per Pomposa, la quota di sommità a +2.50m riduce il rischio di allagamento della strada e delle strutture turistiche esistenti rispetto allo stato attuale.

Per entrambi gli interventi (Lido delle Nazioni e di Pomposa) il ripristino delle sezioni delle scogliere è previsto con una quota di sommità di +2.50m una berma di 3.00m, l'adeguamento è fatto lato mare delle opere con pendenza del paramento 1/2.

4.1.2 Tracimazione delle onde nella zona protetta dalle scogliere foranee emerse

Il processo di overtopping si attiva quando la quota di Run-up, R_{up}, supera R_c, quota di sommità della berma, che è stata prevista a +2.50m l.m.m. Lo storm surge riduce R_c e quindi aumentano sia sia la portata tracimata che l'onda trasmessa.

Per strutture permeabili, quali le scogliere foranee, il run-up con probabilità di superamento del 2% viene definito da:

$$\frac{R_{up2\%}}{H_s} = \begin{cases} A\xi_{0m} \ per \ 1 < \xi_{0m} \leq 1.5 \\ B(\xi_{0m})^C \ per \ 1.5 < \xi_{0m} \leq 3.1 \\ D \ per \ 3.1 \leq \xi_{0m} < 7.5 \end{cases}$$

con A=0.96, B=1.17, C=0.46 e D=1.97.

ξ_{0m} è calcolata con l'onda al piede e T_m=T_p/1.15-1.2.

Poiché ξ_{0m} è maggiore di 1.5 ma minore di 3.1 si utilizza:

$$\frac{R_{up}}{H_s} = b(\xi_m)^c$$

I risultati con e senza storm surge sono riportati nella **Tab. 4.1.2/1**.

		Onda di progetto T_r=30anni Θ_0=120°N		
		$R_{up2\%}$(m)		
		senza S.S.	Storm Surge	
			S.S.=0.80m	S.S.=1.50m
S.A.	L. Nazioni	4.63	5.14	6.18
	L. Pomposa	4.63	5.14	6.18
S.P.	R_c=+2.50m	4.61	5.76	5.00

Tab. 4.1.2/1 – Run up dell'onda sul paramento della scogliera

L'entità della tracimazione ondosa a tergo delle scogliere è stata valutata tramite la formula di van der Meer e Janssen, 1995:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}\sqrt{\frac{s_{0p}}{\tan\alpha}} = 0.06\exp\left(-5.2\frac{R_c}{H_s}\frac{\sqrt{s_{0p}}}{\tan\alpha}\frac{1}{\gamma_r\,\gamma_b\,\gamma_h\,\gamma_\beta}\right) \text{ per } \xi_{0p} < 2$$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.2\exp\left(-2.6\frac{R_c}{H_s}\frac{1}{\gamma_r\,\gamma_b\,\gamma_h\,\gamma_\beta}\right) \text{ per } \xi_{0p} > 2$$

con γ fattori correttivi che tengono conto rispettivamente della scabrezza del paramento della scogliera, dell'eventuale presenza di berma al piede, delle condizioni di acque basse e dell'inclinazione dell'attacco ondoso. Tutti i γ sono assunti pari a 1 tranne il γ_r che rappresenta la scabrezza della scogliera ed è assunto pari a 0.55.

		Onda di progetto T_r=30anni Θ_0=120°N		
		$q_{overtopping}$ (l/sm)		
		senza S.S.	Storme Surge	
			S.S.=0.80m	S.S.=1.50m
S.A.	L. Nazioni	246.05	1535.73	
	L. Pomposa	450.14	2596.02	
S.P.$_e$	R_c=+2.50m	14.68	121.80	772.23

Tab. 4.1.2/2 – Confronto dei risultati della tracimazione ondosa dietro le scogliere

La risalita dell'onda non è ridotta nella condizione di progetto per l'invarianza della pendenza del paramento lato esterno (1:2) ma l'entità della tracimazione è fortemente influenzata dall'altezza della berma rispetto al livello medio mare. Nello stato attuale con sovralzo massimo le scogliere diventano sommerse.

4.1.3 Run up sulla spiaggia

Per stimare l'effetto che le onde trasmesse a tergo della scogliera producono viene valutata la propagazione delle onde estreme durante la mareggiata sulla spiaggia emersa. Tale fenomeno viene chiamato "wave run-up" e rappresenta la distanza verticale, misurata dal livello medio mare, della risalita massima dell'onda. Il fenomeno, studiato in laboratorio e in campo, viene schematizzato attraverso formule empiriche che, data la complessità del fenomeno, presentano un certo grado di incertezza sui coefficienti da utilizzare in situazioni reali soprattutto quando il fenomeno avviene nell'area protetta da scogliere foranee. Le formule sono state ricavate in laboratorio con pendenza del fondo costante e parametri del moto ondoso calcolati al largo.

Ad esempio la formula, ottenuta con sperimentazione con onde regolari, più utilizzata è quella di Hunt (1959), modificata in forma adimensionale da Battjes (1974) :

$$\frac{R_{up}}{H_0} = \xi_0 \quad 0.1 < \xi_0 < 2.3$$

valida per un fondo uniforme liscio con H_0 altezza d'onda al largo e $\xi_0 = \frac{tan\alpha}{\sqrt{H_0/L_0}}$ con $tan\alpha$ pendenza del fondo e L_0 lunghezza d'onda al largo.

Mase nel 1989 ha esteso e calcolato il run-up per onde irregolari su fondo impermeabile in canaletta ottenendo i seguenti risultati:

$$R_{up2\%} = 1.86\xi^{0.71}H_0$$

$$R_{upmax} = 2.32\xi^{0.77}H_0$$

I valori delle formule di Mase sovrastimano i valori reali poiché sono stati ottenuti come curve inviluppo di valori sperimentali.

In presenza di scogliere foranee l'altezza d'onda incidente viene fortemente ridotta così come vengono modificati i periodi dell'onda. Il run up è inoltre molto variabile lungo la spiaggia, in corrispondenza dei varchi si hanno i valori massimi.

Si potrebbe avere quindi una stima di larga massima introducendo nelle formule l'altezza dell'onda trasmessa e un periodo ridotto rispetto a quello incidente, in questo modo considerando la pendenza della spiaggia a tergo delle scogliere si ottengono i valori di risalita riportati nella tabella 4.1.3/1.

I valori della pendenza utilizzati per il calcolo del parametro ξ sono quelli della parte sommersa, rispettivamente assunti pari a i=0.025 (1/40) e i=0.0124 (1/81) per Lido delle Nazioni, rispettivamente a sud e a nord del pennello e i=0.012 (1/81) per Lido di Pomposa.

		Onda di progetto T_r=30anni Θ_0=120°N					
		$R_{up2\%}$(m)			R_{max}(m)		
		senza S.S.	Storm Surge S.S.=0.80m	Storm Surge S.S.=1.50m	senza S.S.	Storm Surge S.S.=0.80m	Storm Surge S.S.=1.50m
S.A.	L. Nazioni_nord	0.18	0.28	0.36	0.19	0.29	0.37
	L. Nazioni_sud	0.31	0.47	0.61	0.34	0.51	0.66
	L. Pomposa	0.22	0.31	0.40	0.23	0.33	0.41
S.P.	L. Nazioni_nord	0.07	0.19	0.28	0.08	0.20	0.29
	L. Nazioni_sud	0.12	0.31	0.47	0.14	0.35	0.52
	L. Pomposa	0.07	0.19	0.28	0.08	0.20	0.29

Tab. 4.1.2/3 – Confronto dei risultati della risalita ondosa sulla spiaggia emersa.

I valori del run-up sono stati calcolati tenendo conto della pendenza media della spiaggia sommersa dedotta dal rilievo 2017 in 3 transetti rappresentativi delle aree di intervento.

4.2 Adeguamento dei varchi esistenti

Il sistema di difese foranee emerse esistenti nel tratto Porto Garibaldi-Volano è formato da 70 setti di scogliere in massi naturali di cui 59 disposti planimetricamente non paralleli alla costa ma con inclinazione N-NE÷S-SO per contrastare le mareggiate dominanti di E-SE. Questa disposizione planimetrica, scelta negli anni 60-70 del secolo scorso, lascia i varchi tra i setti aperti alla traversia di N-NE. I cambiamenti ciclici del clima delle onde dell'Adriatico ha prodotto negli anni 2000÷2014 una intensificazione sia in frequenza sia in intensità delle mareggiate provenienti dal I° quadrante.

A conferma di tale analisi si ricordano ad esempio i danni avuti nel porto canale di Rimini aperto a questa traversia tanto da costringere il Comune a costruire un frangiflutto per evitare l'ingresso delle onde nel porto canale.

Tali mareggiate hanno prodotto nel tratto a nord di Porto Garibaldi la perdita del materiale di ripascimento e l'arretramento delle spiagge poste soprattutto in direzione del varco.

Per contrastare questo fenomeno si sono confrontate nel Progetto di Fattibilità diverse soluzioni progettuali. La più efficace è quella che prevede la riduzione della dimensione dei varchi in modo da abbattere con la diffrazione l'onda trasmessa verso la spiaggia.

Nelle figure 4.1/1 e 4.1/2 e nelle TAV. 04.1 e 05.1 sono riportati gli interventi di adeguamento delle scogliere e la riduzione dei varchi previsti nel presente progetto per la zona Lido delle Nazioni e per quella del Lido di Pomposa.

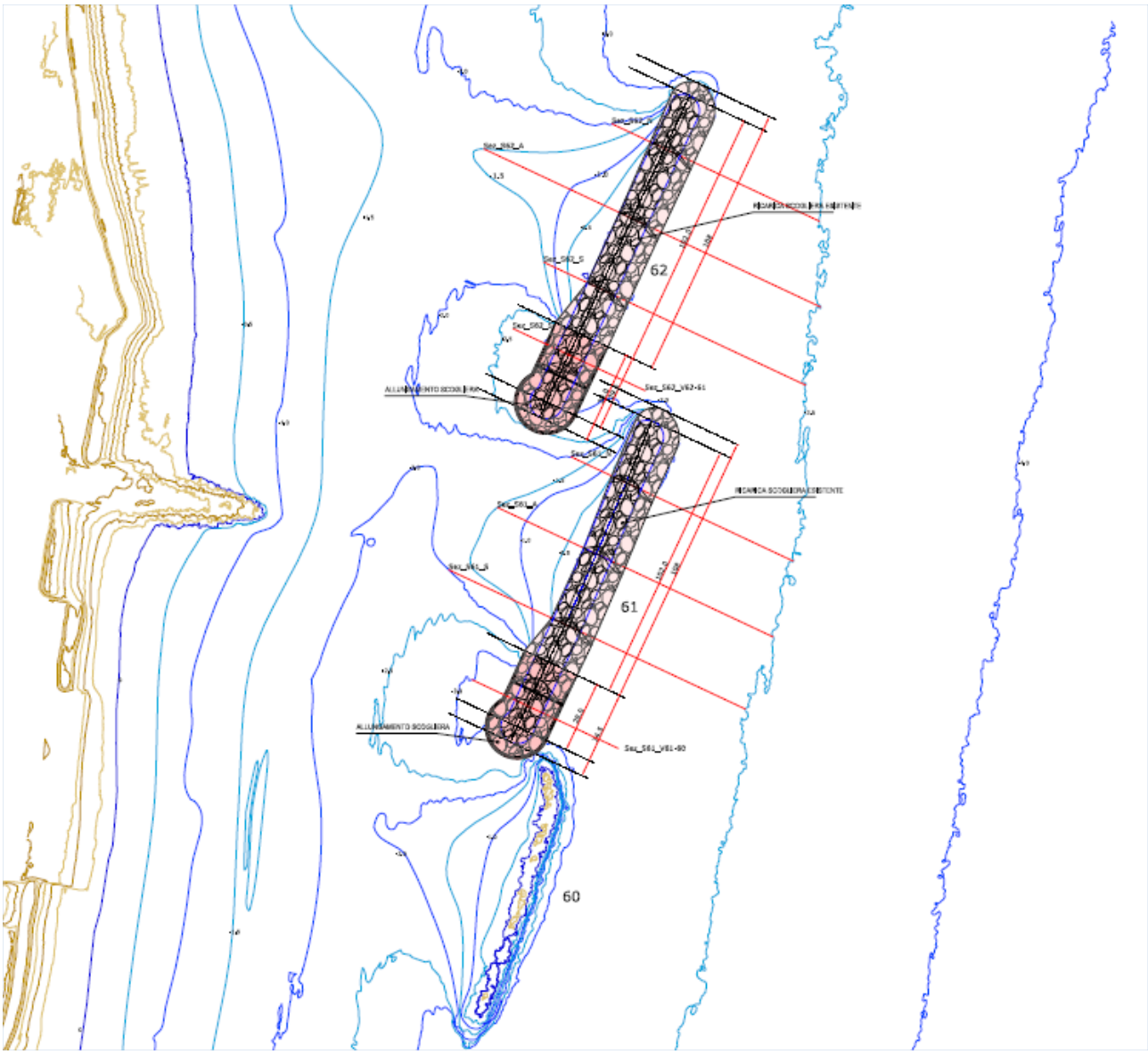


Figura 4.2/1 – Stralcio Tav.04.1 – Lido delle Nazioni

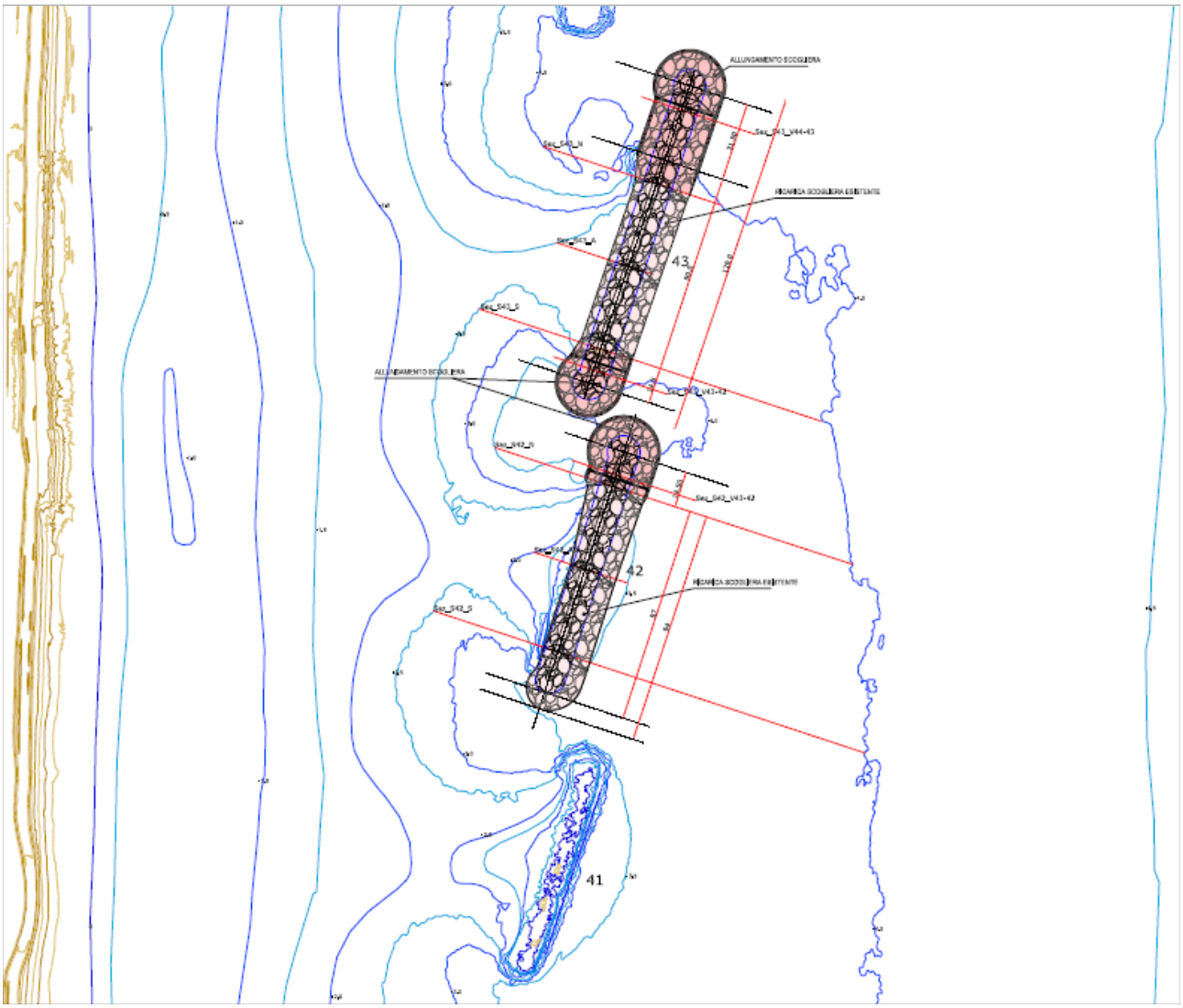


Figura 4.2/2 – Stralcio Tav.05.1 – Lido di Pomposa

Il criterio adottato è stato quello di schermare i varchi rispetto alla direzione ondosa dominante che è quella delle onde provenienti dal settore est-sudest. Ovviamente con i prolungamenti previsti si modificano le larghezze di ingresso anche per le altre direzioni di provenienza del moto ondoso. Nella diffrazione l'onda trasmessa nella zona protetta, H_D, si abbatte in funzione del parametro B/L, (B larghezza del varco nella direzione perpendicolare del moto ondoso misurata sul livello del medio mare, L lunghezza dell'onda incidente) e della distanza Y/L misurata dall'imboccatura), come riportato nella **figura 4.2/3** .

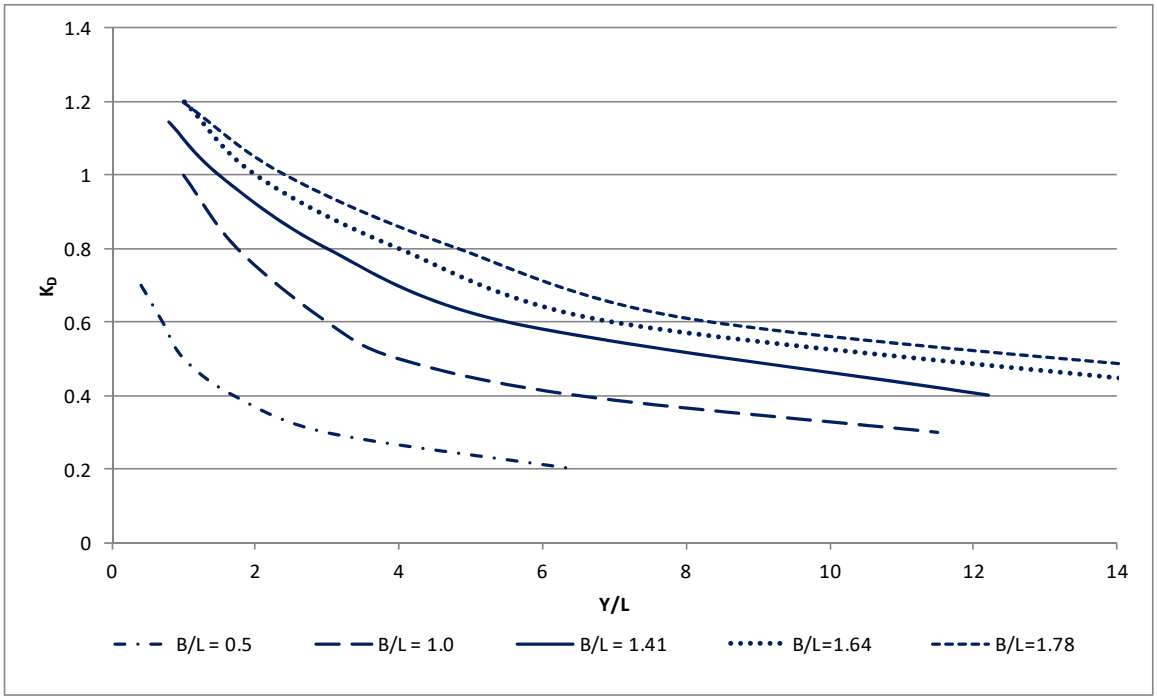


Figura 4.2/3 – Coefficiente di diffrazione al variare dell'ampiezza del varco (in asse al varco)

Dal grafico riportato in **figura 4.2/3** ad una distanza pari a 3 volte la lunghezza d'onda e quindi in prossimità della battigia, il coefficiente di diffrazione è K_D=0.6 per cui l'onda trasmessa è pari a H_T=0.6 H_i nell'ipotesi di B/L=1.

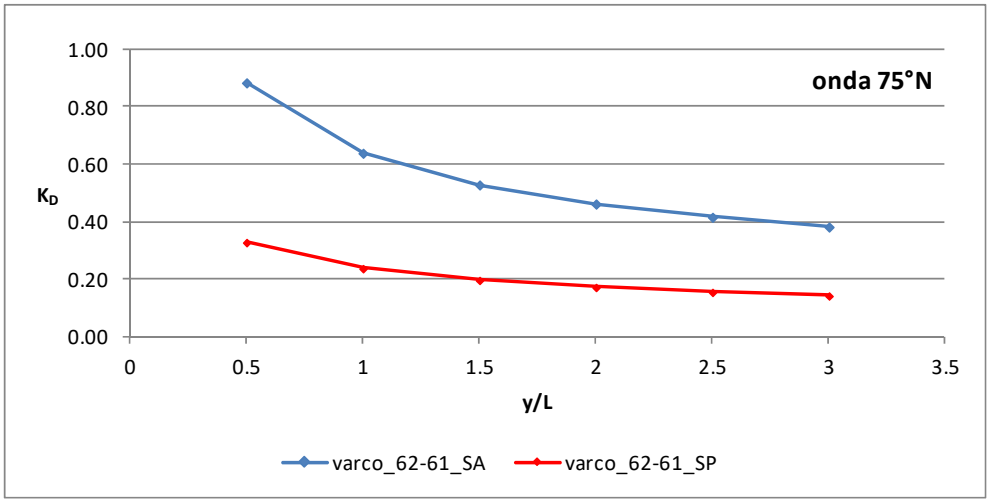
La sopraelevazione del livello medio durante un evento con storme surge aumenterebbe le profondità e la lunghezza d'onda e quindi l'onda trasmessa alla distanza di 3L si avvicinerebbe alla battigia.

Le dimensioni dei varchi ottenute nell'intervento di progetto e nello stralcio successivo, sia per Lido delle Nazioni e Lido di Pomposa, e per direzione delle onde incidenti alla profondità di 4m, sono confrontati con lo stato attuale nella tabella seguente.

		B_{varco} (m)							
		varco $_{L.Nazioni}$				varco $_{L.Pomposa}$			
		62-61		61-60		43-42		42-41	
onda °N	$L_{-4.0m}$ (m)	SA	SP	SA	SP	SA	SP	SA	SP
75	42.56	37	10	37	18	41	17	42.5	16
82	44.50	35	6	39	17	41	16	42.5	14.5
95	44.46	30.5	0	38	13.5	39	13	39	10
108	55.72	22	0	38.5	8.4	37	9	29	5

Tab. 4.2/1 – Dimensioni dei varchi

Nella direzione dell'onda dominante 108°N la propagazione dell'onda all'interno dell'area protetta o è nulla poiché B=0 o è molto attenuata dal restringimento del varco. Per le altre direzioni principali esaminate la riduzione dell'altezza dell'onda diffratta nell'asse dell'imboccatura è di circa il 40%. Le figure seguenti rappresentano il confronto dei coefficienti di diffrazione tra stato attuale e stato di progetto per l'onda rifratta a 75°N.



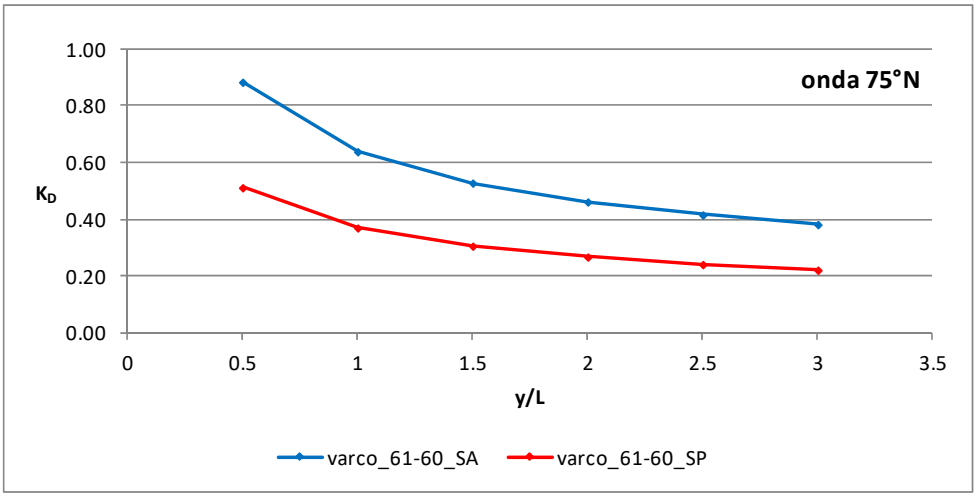


Figura 4.2/4 – Coefficiente di diffrazione per l'onda con direzione a -4.0m l.m.m.75°N – Lido delle Nazioni

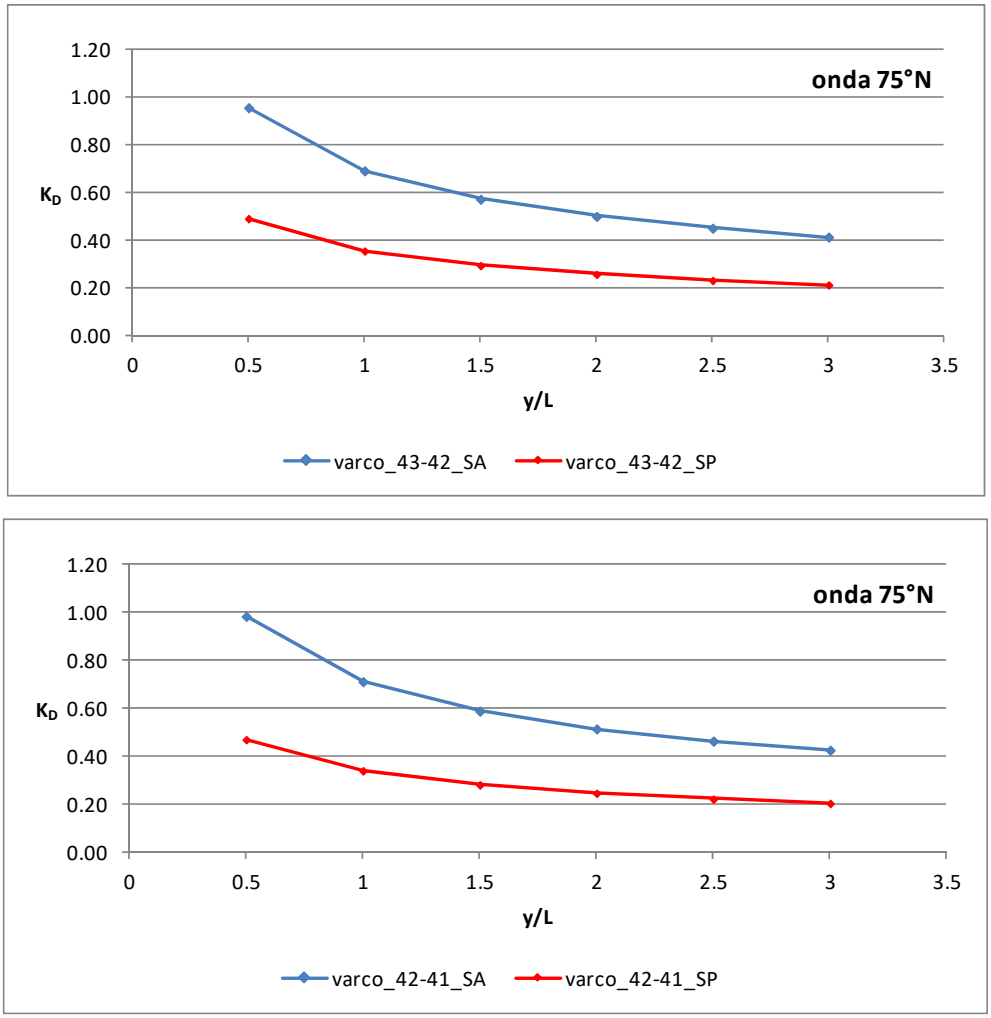


Figura 4.2/5 – Coefficiente di diffrazione per l'onda con direzione a -4.0m l.m.m.75°N – Lido di Pomposa

I varchi rimangono con asse orientato nella direzione 0°N-20°N dove il Fetch è di 5-10km trovando in quella direzione lo scanno di Goro e quindi con generazione di onde con altezza e periodo molto bassi.

4.3 Andamento della linea di costa nel lungo periodo

Nello stato attuale l'arretramento della linea di riva e le perdite di eventuali ripascimenti nella zona protetta dalle scogliere sono dovute a:

- correnti di ritorno attraverso i varchi causate dai volumi di tracimazione particolarmente elevati per la bassa quota di sommità delle opere;
- fenomeno della diffrazione delle onde attraverso i varchi che tende ad accumulare materiale sabbioso a ridosso delle parti centrali dei setti di scogliera.

Nelle condizioni di progetto innalzando la quota della berma a +2.50m l.m.m. si riducono notevolmente i volumi di tracimazione e conseguentemente le correnti di ritorno. La riduzione della larghezza dei varchi attenua la diffrazione delle onde più intense e quindi lo spostamento del materiale. La linea di costa viene quindi stabilizzata dall'intervento di progetto.

Per stimare la posizione della linea di costa nel lungo periodo si può far riferimento al metodo del profilo di equilibrio applicato alle aree protette da strutture foranee nell'ipotesi di ripascimento.

Il profilo di equilibrio che la spiaggia raggiunge nel lungo periodo con il materiale versato ha una forma dipendente dalla granulometria (D_{50} della spiaggia sommersa). Dietro le barriere è necessario determinare la quota di partenza del profilo, a riguardo alcuni studi hanno ipotizzato che, nel caso di strutture in cui il fenomeno fondamentale nell'interazione onde-strutture sia quello della riflessione verso il largo delle onde incidenti, la profondità interna h_i si può determinare attraverso una relazione:

$$h_i = h_e \; K_t^n$$

dove h_i è la profondità dietro le strutture, h_e è la profondità verso mare e K_t è il coefficiente di trasmissione dell'opera.

Si assume la relazione esponenziale con l'esponente n pari a 4/5.

$$h_i = h_e \; K_t^{4/5}$$

La profondità h_i nella condizione di progetto con storm surge sarebbe pari a 1.65m, da cui dovrebbe essere tracciato il profilo di equilibrio che dipende soltanto dalla granulometria del materiale utilizzato.

Per quanto riguarda il profilo di equilibrio, che rappresenta la condizione di equilibrio dinamico raggiunta, nel lungo periodo, dal profilo costiero sotto l'azione delle onde in assenza di gradienti longitudinali della portata solida, questo può essere descritto analiticamente attraverso una curva della seguente forma $h = A\,y^n$ dove A e n sono funzioni del materiale di cui è costituita la spiaggia (o del materiale di ripascimento, se si analizzano ripascimenti protetti) e delle caratteristiche dell'onda incidente; h e y sono, rispettivamente, la profondità dell'acqua rispetto al livello del mare e la distanza verso mare dalla linea di riva. Bruun (1954) ricavò un'espressione teorica per i profili di equilibrio delle coste sabbiose del tipo $h(y) = A\,y^{2/3}$; successivamente, Dean (1977), utilizzando la teoria d'onda lineare ad un semplice modello di frangimento, ottenne che il profilo di equilibrio potesse essere rappresentato dalla precedente espressione di Bruun

$h(y) = A\,y^{2/3}$ dove A è detto parametro di scala dei sedimenti ed ha le dimensioni di una lunghezza alla 1/3 ($m^{1/3}$).

Hanson e Kraus (1989) propose un espressione di A basata sul diametro medio dei sedimenti D_{50} (corrispondente al 50% del passante di una curva granulometrica) con le seguenti forme:

$A = 0.41(D_{50})^{0.94}$ per $D_{50} < 0.41\,mm$

$A = 0.23(D_{50})^{0.32}$ per $0.4 < D_{50} < 10\,mm$

$A = 0.23(D_{50})^{0.28}$ per $10 < D_{50} < 40\,mm$

$A = 0.46(D_{50})^{0.11}$ per $D_{50} > 40\,mm$

Nell'ipotesi di diametro uniforme, assumendo un $D_{50} = 0.20mm$, il profilo di equilibrio assume la forma seguente:

$A = 0.41(0.20)^{0.94} = 0.0903m^{1/3}$

y (m)	10	20	50	80	100	120	150
h (m)	0.42	0.67	1.25	1.68	1.95	2.20	2.55

La differenza tra il profilo esistente al momento del ripascimento e quello di equilibrio può consentire il calcolo del materiale necessario per stabilizzare la spiaggia nel lungo periodo.

Nel breve periodo il monitoraggio morfologico che eseguirà ArpaE, nel biennio successivo alla fine dei lavori, permetterà di valutare la stabilizzazione della linea di riva a seguito degli interventi di progetto.

4.4 Conclusioni

L'esame delle condizioni ondose nello stato attuale e con le previsioni progettuali evidenzia quanto segue.

- Il rifiorimento delle scogliere esistenti, per ripristinare le sezioni trasversali, nei due tratti di costa individuati è indispensabile per ridurre l'altezza dell'onda trasmessa sulla spiaggia emersa. Ipotizzando uno storme surge di +1.50m (secondo le previsioni del P.G.R.A. questo evento ha un tempo di ritorno di 10 anni) con la quota della berma della scogliera a +2.50m la riduzione dell'altezza dell'onda trasmessa rispetto allo stato attuale sopra le opere è del 32% a Lido delle Nazioni e 41% a Lido di Pomposa. Senza sovralzo l'abbattimento dell'altezza d'onda incidente sarebbe del 77% per Lido delle Nazioni e 82% per Lido di Pomposa. Con il sovralzo del livello medio mare di +0.80m l'onda trasmessa sopra la struttura sarebbe abbattuta del 47% a Lido delle Nazioni e del 55% a Lido di Pomposa.

Tenendo conto dell'ipotesi di ulteriore innalzamento del livello marino dovuto a cambiamenti climatici e della subsidenza l'ipotesi della berma a +2.50m è la più cautelativa.

- Per dissipare l'energia delle onde trasmesse attraverso i varchi sono previsti allungamenti dei setti di scogliera a parziale chiusura dei varchi stessi.

Con il prolungamento dei setti esistenti di scogliere foranee si può bloccare l'ingresso diretto nell'area protetta dell'onda dominante proveniente da est-sud est e quello dalle varie direzioni principali del settore di traversia al largo, riducendo l'erosione della spiaggia e le perdite degli eventuali ripascimenti.

La soluzione del restringimento dei varchi permette comunque il transito dei natanti e mantiene la circolazione idrodinamica con le onde secondarie.

Con il presente progetto si realizzano a Lido delle Nazioni la sistemazione dei setti 61 e 62 e il restringimento dei varchi V_{61-60} e V_{62-61}; in un secondo stralcio si sistemerà il setto n. 60 e con ulteriori finanziamenti si completerà la sistemazione dei setti 58-59 e il restringimento dei varchi V_{60-59} e V_{59-58}.

A Lido di Pomposa con il presente progetto si rifioriscono i setti 42 e 43 e si restringono i varchi V_{44-43},V_{43-42}; in un secondo stralcio si sistemerà il setto n. 41 e si restringerà il varco V_{42-41}, con ulteriori finanziamenti si completerà il rifiorimento dei setti 39-40 ed i varchi V_{41-40} e V_{40-39}. La realizzazione in più fasi distinte non comporta impatti negativi e le opere possono realizzarsi in successione.