



COMUNE DI LOIRI PORTO SAN PAOLO

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA/ PROGETTO DEFINITIVO PER IL NUOVO ASSETTO DI PORTISTICO DEL LUNGOMARE DI PORTO SAN PAOLO

ELABORATO:

B

TITOLO:

STUDIO METEOMARINO

RIF. ELABORATO: 21-018

REVISIONI	DATA	OGGETTO	
	00	26-09-2022	
	01		
	02		
	03		

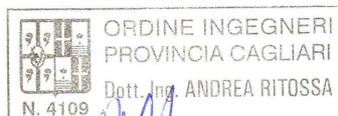
RED.: FP VER.: AR APPR.: FR

PROGETTISTI:

ING. ANDREA RITOSSA S.R.L.



Ing. Andrea RITOSSA



Andrea Ritossa

COMMITTENTE:

COMUNE DI LOIRI PORTO SAN PAOLO

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:

ING. SIMONA LEPORI



Il presente , o parte di esso, non può essere riprodotto in alcuna forma, in alcun modo e per nessuno scopo, senza autorizzazione.
Ogni infrazione sarà perseguita a termini di legge.

Sommario

1	PREMESSA.....	1
2	STUDIO METEO-MARINO.....	2
2.1	Introduzione.....	2
2.2	Caratteristiche di moto ondoso e determinazione delle onde estreme	2
2.2.1	Introduzione	2
2.2.2	Clima ondoso rilevato dalla Boa Ondametrica del Sistema R.O.N.	3
2.2.3	Dati Anemometrici e ricostruzione del moto ondoso generato dal vento.....	5
2.2.4	Ricostruzione del clima ondoso nel paraggio esterno.....	10
2.2.5	Ricostruzione del clima ondoso nel paraggio interno.....	12
	ALLEGATI	14
3	TRASFORMAZIONE DELL'ONDA A LARGO VERSO RIVA.....	22
3.1	Introduzione.....	22
3.2	Batimetria	22
3.3	I modelli numerici	24
3.3.1	DELFT3D Modelling System.....	24
3.3.2	Impostazioni modello SWAN.....	24
3.3.3	Simulazioni e risultati	28
4	VERIFICA DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO	33
5	Dimensionamento delle strutture	37
5.1	Valutazione della stabilità della mantellata esterna	37
5.2	Valutazione della stabilità del molo a giorno	41
6	Incidenza delle opere in progetto sul regime del litorale	43
6.1	Analisi diacronica delle linee di riva	46
6.2	Simulazione delle correnti.....	51
6.2.1	Calcolo dell'Onda Morfologicamente Equivalente	51

6.2.2 Risultati delle simulazioni.....55

1 PREMESSA

La presente relazione riassume il lavoro svolto dalla Martech S.r.l. relativo allo studio del moto ondoso sul lungomare di Porto San Paolo (SS) nell'ambito dello studio di fattibilità del nuovo assetto del lungomare.

Lo studio è stato suddiviso in più fasi.

Nella prima è stato determinato il clima ondoso a largo. Nella seconda parte sono state calcolate, attraverso l'applicazione del modello numerico (SWAN), le caratteristiche d'onda in corrispondenza del paraggio oggetto dello studio.

Lo studio del moto ondoso residuo in corrispondenza delle nuove opere è stato effettuato con l'ausilio del modello numerico PHAROS.

Infine sono state riportate alcune considerazioni sul regime del litorale e sull'efficacia delle opere foranee previste in progetto che dovranno essere approfondite e confermate nelle successive fasi progettuali.

2 STUDIO METEO-MARINO

2.1 Introduzione

Lo studio meteo-marino effettuato è finalizzato alla determinazione delle caratteristiche del moto ondoso che possono interessare lo specchio d'acqua del lungomare di Porto S. Paolo nel Comune di Liori. La sua ubicazione non permette di stabilire a priori quale sia il tipo di moto ondoso prevalente, se quello generato al largo e propagantesi all'interno del golfo fino al paraggio di interesse o quello generato all'interno del golfo stesso a seguito di fenomeni anemologici. Per tale motivo, si sono studiati entrambi i tipi di moto ondoso rinvenibili.

Nella prima parte dello studio meteo-marino si è proceduto alla determinazione del clima ondoso del paraggio in esame procedendo poi ad un'analisi statistica al fine di stabilire la frequenza con la quale si verificano gli eventi estremi e quale sia la loro entità.

Il clima ondoso che sarà qui determinato sarà poi utilizzato per ottenere le onde "a bocca di porto" attraverso i modelli matematici. Infatti, dallo studio meteo-marino si otterranno delle informazioni sul moto ondoso al largo, che in prossimità della costa sarà soggetto a fenomeni di rifrazione, diffrazione e shoaling di cui si terrà opportunamente conto nelle simulazioni numeriche.

2.2 Caratteristiche di moto ondoso e determinazione delle onde estreme

2.2.1 Introduzione

Lo studio meteo marino e la determinazione delle caratteristiche del moto ondoso necessita necessariamente di una vasta base di dati estesa ad un periodo sufficientemente lungo per essere rappresentativa. Tuttavia, a causa della mancanza di stazioni di registrazioni fisse, è spesso impossibile disporre di tali basi. Si ricorre allora ad un'opera di ricostruzione del clima ondoso a partire da una base di dati anemometrici in grado di garantire una base di dati ondometrica che consenta l'elaborazione statistica degli eventi estremi.

Nel presente caso si è sfatto ricorso ad un'azione combinata: ricerca di dati ondometrici a disposizione, ricostruzione del clima ondoso a partire da dati di vento e raccolta di ulteriori dati d'onda osservati (Marina militare e UKMO). Più in dettaglio, i paragrafi seguenti danno conto del clima ondoso registrato dalla boa ondometrica di Capo Comino del Sistema Ondametrico Nazionale, del clima ondoso a largo ricostruito sulla base dei dati di vento della stazione anemometrica di

Guardiavecchia, dei dati osservati dalle stazioni semaforiche della Marina Militare e dei dati osservati e raccolti dall'UKMO.

Ciò ha permesso di disporre di dati d'onda a largo effettivamente registrati, seppur per un breve periodo (01/01/2004÷12/09/2005), che sono in buon accordo con le risultanze ottenuti dai calcoli ottenuti dalla ricostruzione del clima ondoso a largo effettuata a partire dai dati di vento e da quelle osservate da M.M. e UKMO.

2.2.2 Clima ondoso rilevato dalla Boa Ondametrica del Sistema R.O.N.

La **Rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.)** è un sistema di misurazione ondametrico gestito dall'**Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale (I.S.P.R.A.)** costituito da una serie di boe posizionate lungo le coste italiane. Essa può fornire serie storiche di dati d'onda utili alla determinazione del clima ondoso a largo di un particolare paraggio. Tuttavia tale rete è di recente (1989) istituzione e solo da pochi anni ha raggiunto la sua conformazione attuale. In Sardegna la sola boa che ha registrato con continuità è quella di Alghero mentre le altre due, Cagliari e Capo Comino, che comunque sono state posizionate solo dopo il 2000, hanno funzionato solo per un periodo di tempo molto limitato. Nello specifico la stazione di Capo Comino è stata in funzione per un periodo di poco inferiore ai 2 anni (vedi Figura 2-1 e Figura 2-2) molto utili, se non per la determinazione univoca degli eventi estremi, per la comparazione e validazione di quelli ricostruiti grazie alle estese serie storiche anemometriche riportate nel paragrafo successivo.

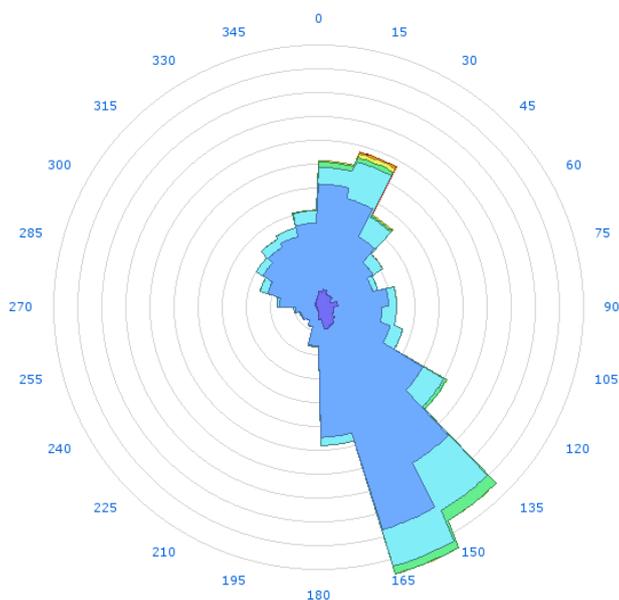


Figura 2-1: Clima ondoso rilevato dalla Boa onda metrica del Sistema R.O.N. di Capo Comino (periodo di rilevamento: 01/01/2004-12/09/2005) fonte: ISPRA.

'N	<=15	<=30	<=45	<=60	<=75	<=90	<=105	<=120	<=135	<=150	<=165	<=180	<=195	<=210	<=225	<=240	<=255	<=270	<=285	<=300	<=315	<=330	<=345	<=360	TOT		
>10																										0	
<=10																											0
<=9.5																											0
<=9																											0
<=8.5																											0
<=8																											0
<=7.5																											0
<=7																											0
<=6.5																											0
<=6		2	2																								4
<=5.5	1	9	1																								11
<=5		11		2																	1						14
<=4.5	2	18	2						1				1									1					25
<=4	12	22	10			1				2	5																54
<=3.5	18	5	8					2	4	34	23										1						97
<=3	36	41	11					2	28	90	58									1				2	1	3	273
<=2.5	51	173	75	17	4	12	32	24	63	168	162			1						4	5		7	19	26	843	
<=2	125	225	162	102	52	72	116	111	184	415	241	86	11	2	1	4	12	17	23	76	82	93	75	104	2391		
<=1.5	503	405	331	193	148	189	216	288	455	828	1196	668	184	99	77	98	93	137	235	320	402	427	403	429	8324		
<=1	600	558	341	294	292	320	267	299	580	823	971	564	182	96	70	80	82	84	142	189	226	253	300	367	7980		
<=0.5	182	212	177	174	149	222	182	185	227	256	261	136	42	20	21	15	14	14	22	32	29	45	62	85	2764		
TOT	1530	1681	1120	782	645	816	813	911	1542	2616	2917	1454	420	218	169	197	201	252	427	624	739	827	860	1019	22780		

Figura 2-2: Clima ondoso rilevato dalla Boa onda metrica del Sistema R.O.N. di Capo Comino (periodo di rilevamento: 01/01/2004-12/09/2005) fonte: ISPRA.

La Figura 2-1 mostra un clima ondoso registrato dalla boa è fortemente caratterizzato dagli eventi di scirocco e grecale. Appare chiaro che se gli eventi di scirocco sono più numerosi, gli eventi estremi ($H_s > 3.5$ m) sono provenienti per la maggior parte dal settore grecale.

E' inoltre importante notare che, a fronte di tempeste di vento di notevole intensità provenienti da W/NW (i.e. maestrale), non fa seguito la registrazione di eventi di mare elevati poiché essi risultano

“venti di terra” ossia non dispongono di fetch sufficienti per determinare, a largo, eventi di intensità paragonabile a quelli provenienti dal I e II quadrante.

2.2.3 Dati Anemometrici e ricostruzione del moto ondoso generato dal vento

Nel presente paragrafo si descrive l'applicazione del cosiddetto metodo S.M.B¹ rielaborato alla luce di nuovi rilievi del moto ondoso e delle relative stime spettrali (oggi comunemente noto con nome SPM84²), ulteriormente rivisitato da Hurdle e Stive nel 1989.

Il metodo fornisce, assegnati il fetch³, la durata dell'evento e la velocità del vento, il periodo di picco e l'altezza significativa d'onda (la direzione media del moto ondoso è assunta coincidente alla direzione del vento che l'ha generato).

Per la ricostruzione delle serie storiche delle altezze d'onda generate al largo si è fatto uso delle registrazioni effettuate dalla stazione dell'Aeronautica Militare di La Maddalena in località “Guardia vecchia” (vedi Figura 2-4) essendo questi dati stati utilizzati e testati in numerosi studi idrodinamici per paraggi vicini a quello in esame.

La scelta dei dati di La Maddalena per la ricostruzione del clima ondoso proveniente da largo è immediata e facilmente comprensibile poiché il clima ondoso che proviene da largo è generato da eventi anemometrici che insistono sulle distese di mare ad occidente della costa sarda e, quindi, la stazione di Guardia vecchia meglio le rappresenta, anche per la mancanza di formazioni orografiche che falserebbero i dati (la stazione è posta ad un'altezza di 168 m. s.l.m.).

Anche per la determinazione del clima ondoso all'interno del Golfo di Porto San Paolo si sono utilizzati i dati della stazione di La Maddalena a quelli dell'aeroporto di Olbia (mostrati in Figura 2-3) per due ordini di ragioni: una qualitativa ed una quantitativa. La ragione qualitativa è la seguente: procedendo ad un confronto tra il diagramma polare della distribuzione degli eventi per le due stazioni, si nota la quasi sovrapponibilità delle rose, indice di un pressoché identico regime statistico del vento. I due diagrammi risultano leggermente disassati e ruotati ma questo dipende, presumibilmente, dal maggior dettaglio della rosa di La Maddalena e dalle inevitabili differenze

¹ acronimo di Sverdrup, Munk, nomi degli ideatori del metodo proposto per la prima volta nel 1947 e Bretschneider, revisore del metodo.

² Shore Protection Manual, edizione 1984; U.S. Army Coastal Engineering Research Center.

³ Il Fetch (o area di generazione), è la lunghezza della regione dove il vento mantiene caratteristiche quasi costanti, ossia, convenzionalmente, con variazioni di velocità <5 nodi (~2.5 m/s) e di direzione <45° rispetto alla media.

legate alla collocazione del sito di rilevazione. I venti prevalenti sono quelli di ponente con una presenza rilevante di venti provenienti da levante.

La rosa di La Maddalena mette in evidenza una maggior frequenza di venti di scirocco e libeccio che per la morfologia del golfo di Olbia risultano essere eventi più probanti a causa dei maggiori fetch a disposizione per la generazione delle onde. La ragione quantitativa è che la mole di dati a disposizione per la stazione di Guardia vecchia è nettamente superiore. È apparso opportuno, quindi, utilizzare i dati di La Maddalena che, alla luce delle riflessioni suddette, forniscono dei risultati più attendibili e comunque a favore di sicurezza.

L'applicazione del modello richiede lo svolgimento d'alcune operazioni preliminari volte alla determinazione degli effettivi dati d'ingresso del modello. Una di queste è la trasformazione dei dati di vento a disposizione. Essi, infatti, sono riferiti a ristretti intervalli di tempo e registrati a quote differenti da quelle richieste in ingresso dal modello (~10 m s.l.m.), per questa ragione devono essere sottoposti ad una serie di trasformazioni di cui si dà conto nei paragrafi successivi.

Altra operazione preliminare necessaria è stata l'individuazione dei settori di traversia ed il calcolo dei fetch efficaci.

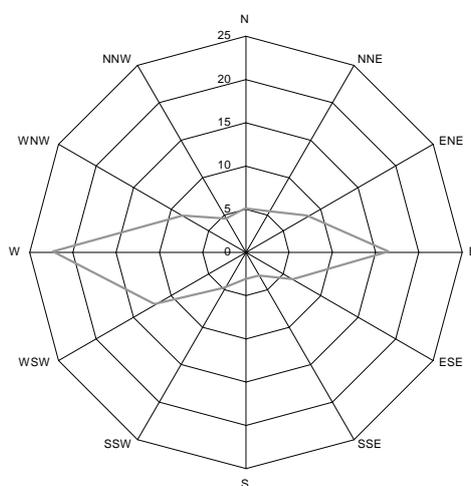


Figura 2-3: Rosa dei venti della stazione di Olbia (fonte European Wind Atlas, 1989); anni di rilevamento:1959-1968

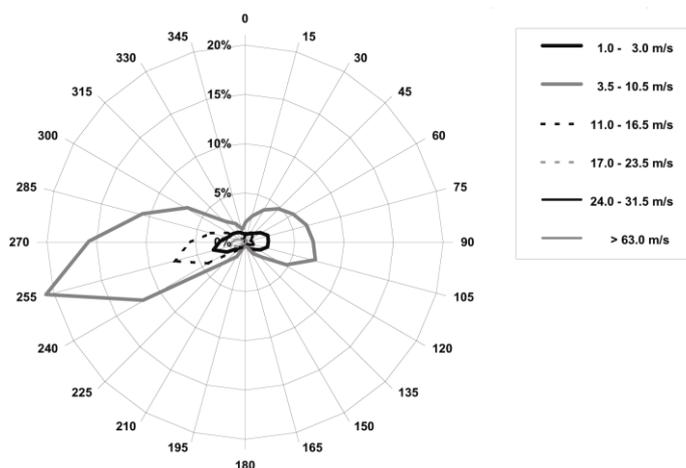


Figura 2-4: Rosa dei venti di La Maddalena (fonte: Università di Cagliari).

1.1.1.1 Individuazione settori di traversia e calcolo dei fetch efficaci nel paraggio esterno

Il paraggio esterno è soggetto alle agitazioni del primo quadrante, ed in particolare alla direzione est, est-nord est. All'interno del settore di traversia è stato calcolato il fetch efficace per le diverse direzioni di provenienza delle tempeste ventose.

Esso è stato calcolato secondo la nota procedura riportata ed adottata da diversi manuali tra cui lo Shore Protection Manual a cui si è fatto costantemente riferimento. Essa prevede la misura a partire da una direzione principale, di più fetch geografici distanziati l'un l'altro di 3°, con origine la base della direzione principale. Una volta note le lunghezze di fetch geografico e gli angoli che essi formano rispetto alla direzione di riferimento si procede alla determinazione di una media ponderale secondo la formula:

$$F_{eff} = \frac{\sum_{j=1}^n F_j \cdot \cos \alpha_j}{\sum_{j=1}^n \cos \alpha_j} \quad (1)$$

dove F_j sono i fetch geografici effettivamente misurati, α_j l'angolo esistente tra direzione centrale e fetch misurato ed n il numero delle direzioni che hanno concorso a formare la media. Il risultato così ottenuto è il cosiddetto fetch efficace assegnato alla direzione centrale cui si è fatto riferimento

Nella Figura 2-5, si individua il settore di traversia principale per il paraggio preso in esame.

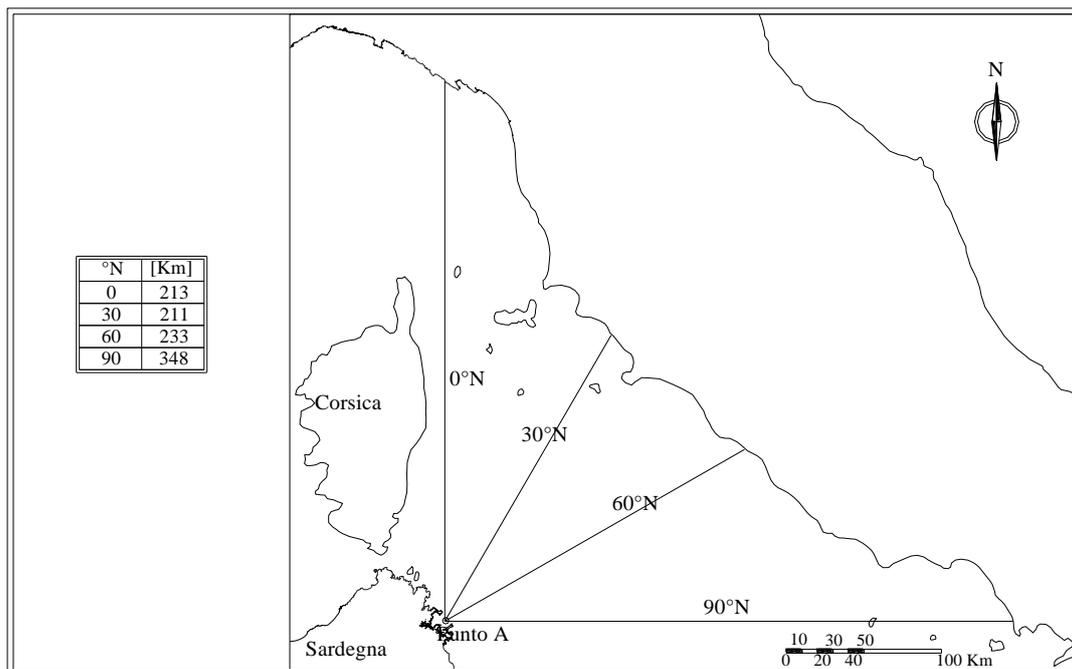


Figura 2-5: Fetch geografici ed efficaci per il settore di traversia esterno

Come si può notare, tale settore è compreso tra i 0°N ed i 90°N. Il fetch rilevato al suo interno varia tra i ~200 Km rilevati in direzione nord ed i ~350 Km rilevati in direzione est. La direzione media del settore di traversia concernente il paraggio è di 45°N.

Fetch Efficace (settore di traversia 0÷90°N)				
0	30	60	90	[°N]
213	211	233	348	[Km]

Tabella 2.1: Valori efficaci dei fetch calcolati con la (1) per il paraggio esterno.

1.1.1.2 Preparazione dei dati di vento: determinazione di U_a

Una delle specifiche necessarie per l'utilizzo del modello è la velocità del vento. Tuttavia essa prima di poter essere effettivamente estratta dai dati forniti dalla stazione di La Maddalena, (dati riportati in allegato), ed immessa nel modello, necessita di alcune correzioni che tengono conto del luogo, altitudine e periodo di rilevamento.

La prima correzione che bisogna compiere sul dato di vento anemometrico è quella relativa alla quota di rilevamento: se la misura del vento è effettuata ad una quota diversa da 10 m (come nel caso in esame: la stazione "Guardia Vecchia" è posta a 168 m. s.l.m.), si riporta tutto all'altezza desiderata applicando la formula:

$$U(z) = 1 + \frac{C_{10}^{1/2}}{0.4} \cdot \ln\left(\frac{z}{10}\right) \quad (2)$$

dove $U(z)$ è la velocità del vento alla quota z ed il coefficiente C_{10} è legato alla velocità, media dei dieci minuti, del vento rilevata alla quota di dieci m dalla relazione empirica, ricavata da rilievi sul lago Lemano da Graf e Prost (1979):

$$C_{10} = [0.05 \cdot U(10) + 0.56] \times 10^{-3} \quad (3)$$

Come si può vedere la formula è implicita rispetto alla variabile d'interesse: è occorso, quindi, un calcolo iterativo per la determinazione di $U(10)$.

La successiva correzione è dovuta al fatto che le rilevazioni effettuate sono riferite ad una certa durata. Esse, infatti, sono rilevazioni triorarie, che registrano dati di vento che non sono altro che la media delle velocità nei dieci minuti primi precedenti l'ora. È necessario, quindi, riportare questa media alla durata effettiva del tempo trascorso tra una rilevazione ed un'altra per mezzo delle formule di Simiu e Scalan (1978):

$$\frac{U_t}{U_{3600}} = 1.277 + 0.296 \cdot \tanh\left\{0.9 \log_{10} \frac{45}{t}\right\}; \quad 1 < t < 3600 \text{ s} \quad (4)$$

$$\frac{U_t}{U_{3600}} = -0.15 \log_{10} t + 1.5334; \quad 3600 < t < 36000 \text{ s} \quad (5)$$

Un'ulteriore correzione è la cosiddetta correzione di stabilità: se la differenza tra aria ed acqua è negativa, lo strato limite è instabile ed il vento è più efficace nel produrre la crescita dell'onda; ovviamente il discorso risulta opposto in caso contrario. Si tiene conto di questi fenomeni introducendo il fattore correttivo R_T . La velocità del vento deve essere corretta quindi con la formula:

$$U = R_T U(10) \quad (6)$$

Nel caso in cui non sia possibile accertare sempre questa differenza di temperatura, si usa adottare $R_T = 1.1$. L'ultima correzione cui sono stati sottoposti i dati anemometrici a disposizione, è dovuta al

fatto che tutte le formule adottate nei modelli matematici di *hindcasting* (ricostruzione) sono espresse in funzione del coefficiente di trascinamento U_A . Si è quindi corretto tutti i dati ottenuti con la formula:

$$U_A = 0.71U^{1.23} \quad (7)$$

2.2.4 Ricostruzione del clima ondoso nel paraggio esterno

Per la ricostruzione del clima ondoso nel paraggio esterno si è fatto uso della serie storica disponibile relativa a 31 anni di osservazioni anemometriche della stazione A.M. di La Maddalena (1951-1981). Si è fatto riferimento a tale intervallo di osservazioni in quanto già ampiamente utilizzato in un notevole numero di studi effettuati nella zona in questione⁴.

Il campione di dati, composto da 19038 osservazioni triorarie, è da considerarsi rappresentativo del regime ondoso al largo del settore di traversia che investe il paraggio. Per la ricostruzione si è fatto uso, come già accennato, ad un modello matematico basato sulle formule⁵ del SPM84, relative alle acque profonde.

Dai risultati riportati nella Tabella 2.2, si nota che circa il 45% degli eventi, è inferiore al metro d'altezza e che la massima onda ottenuta è inferiore agli 11m. Le onde appartenenti alle tempeste eccezionali (quelle superiori ai 4m), costituiscono poco più del 6% del campione ricostruito. La direzione media di "attacco d'onda" è stata individuata in 45°N, come del resto confermano i dati osservati dalla stazione M.M. di Capo Figari (vedi Figura 2-6). I dati di Capo Figari⁶, occorre ricordarlo, riguardano 26 anni di osservazioni dirette del moto ondoso, effettuate nel periodo tra il 1930 ed il 1957.

anno	Classi di altezza [m]											TOT	%
	0÷1	1÷2	2÷3	3÷4	4÷5	5÷6	6÷7	0÷8	0÷9	0÷10	0÷11		
1951	156	173	61	20	5	9	7	5	1	2	2	441	2,28
1952	250	69	87	10	6	7	0	0	2	2	1	434	2,25
1953	354	108	26	24	14	4	0	3	0	0	1	534	2,77
1954	333	69	45	13	21	2	2	1	1	2	0	489	2,53
1955	313	103	129	57	8	2	4	0	2	1	1	620	3,21
1956	368	171	72	6	3	4	1	1	3	2	0	631	2,24
1957	211	88	50	25	38	11	4	1	3	2	0	433	3,27
1958	239	145	172	21	14	6	0	6	3	3	4	613	3,17
1959	238	193	132	64	23	12	3	1	1	0	2	669	3,46
1960	257	226	76	43	9	6	4	5	0	2	1	629	3,26

⁴ In particolare, si veda lo Studio Meteomarinario effettuato dal Prof.Ing. A. Atzeni nell'ambito del progetto per la costruzione dell'approdo turistico di Olbiamare (rada interna del Golfo di Olbia).

⁵ cfr allegato 3

⁶ *Tavole di marea e delle correnti di marea, Istituto Idrografico della Marina, Genova, 2001.*

1961	332	79	62	14	2	1	1	0	0	1	1	493	2,55
1962	383	265	89	88	17	5	6	3	2	0	1	859	4,45
1963	202	113	107	77	104	17	4	3	4	0	1	632	3,27
1964	224	252	129	81	44	21	6	4	6	4	4	775	4,01
1965	212	120	67	73	39	14	9	16	5	3	0	558	2,89
1966	204	91	92	69	6	6	5	1	0	2	2	478	2,48
1967	311	137	158	102	44	10	6	3	4	1	3	779	4,03
1968	268	166	131	59	14	6	1	5	1	1	0	652	3,38
1969	316	187	93	74	34	13	6	3	2	3	2	733	3,80
1970	181	173	168	23	14	5	5	2	3	3	2	579	3,00
1971	316	349	167	40	8	4	10	8	1	1	0	904	4,68
1972	446	146	101	19	7	4	2	0	2	0	2	729	3,78
1973	340	192	190	39	6	4	6	3	3	1	2	786	4,07
1974	228	134	65	69	13	7	2	1	3	2	2	526	2,72
1975	364	170	130	24	11	7	5	3	0	1	1	716	3,71
1976	316	219	153	42	15	10	5	5	3	5	1	774	4,01
1977	281	123	74	30	10	5	9	9	1	3	2	547	2,83
1978	161	110	122	34	5	6	7	6	2	5	1	459	2,38
1979	217	162	27	10	10	6	5	6	2	1	1	447	2,32
1980	268	194	72	24	27	6	2	5	2	5	1	606	3,14
1981	384	174	127	44	28	5	5	4	3	4	2	783	4,06
TOT	8673	4901	3174	1318	599	228	132	113	65	62	43	19308	
%	44,91	25,38	16,44	6,83	3,1	1,19	0,68	0,59	0,34	0,32	0,22		100

Tabella 2.2: Dati ricostruiti attraverso modello SPM84 del paraggio esterno

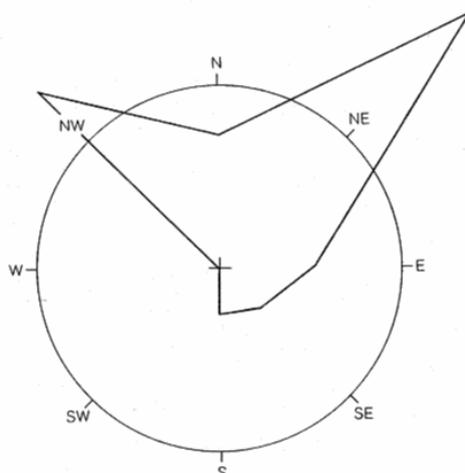


Figura 2-6: Direzione di provenienza delle mareggiate a Capo Figari (mare 6-8, scala Douglas)

2.2.4.1 Determinazione degli eventi estremi nel paraggio esterno

Il calcolo e la determinazione statistica delle onde estreme è stato effettuato utilizzando le serie esposte in allegato, ed interpretate dalla distribuzione di Weibul, nella forma adatta per il calcolo delle onde estreme:

$$P(H_s) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H_s - H_0}{H_c - H_0}\right)^\gamma\right) \quad (7)$$

dove $P(H_S)$ è la probabilità cumulata rappresenta la probabilità di accadimento degli eventi di magnitudine non superiore ad H_S ; H_0 rappresenta il limite inferiore delle altezze d'onda da inserire nella distribuzione; H_C e γ sono i parametri di scala e forma dipendenti dalla frequenza cumulata (attraverso il coefficiente di asimmetria), delle massime altezze d'onda relative alle diverse tempeste ricostruite. La stima dei parametri è avvenuta attraverso il metodo dei momenti. Una volta fatto ciò, si è proceduto alla determinazione delle H_S relative a diversi tempi di ritorno⁷. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per i paraggi presi in esame, riportando, oltre i valori di H_S anche i parametri della distribuzione stimati. Ciò appare in ottima accordo con quanto emerso dalle osservazioni compiute dall'UKMO, M.M e dai dati d'onda registrati.

Direzione media di provenienza:	45°N
H_0	3.90 m
H_C	4.93 m
γ	1.09

Tempo di ritorno [anni]	HS [m]
2	5.01
5	5.86
10	6.48
20	7.09
50	7.90
100	8.50

Tabella 2.3: altezze d'onda significative in relazione ai rispettivi tempi di ritorno

2.2.5 Ricostruzione del clima ondoso nel paraggio interno

La totale assenza di dati direttamente rilevati nel paraggio di Golfo di Porto San Paolo (di seguito chiamato “paraggio interno”), ha imposto la ricostruzione indiretta del moto ondoso avvenuta tramite modello matematico a partire dai dati di vento disponibili. In Tabella 2.4 sono riportate le statistiche di vento che evidenziano come le tempeste di vento superiori ai 24 m/s (~ 86 km/h) siano provenienti elusivamente dalla direttrice W-NW ed N-NE come già emerso nei paragrafi precedenti.

Più in dettaglio si osserva come tali eventi siano particolarmente significativi ed intensi per le direzioni riconducibile ai benti di Maestrale e Ponente ove, solo in due casi (su 110680 registrati) hanno raggiunto velocità superiori ai 63 nodi (~ 120 km/h ovvero 31.6 m/s). I dati mettono in evidenza come

⁷ Per tempo di ritorno di un evento si intende il periodo di tempo che trascorre, **in media**, tra un evento di una prefissata grandezza ed un altro della medesima classe, senza che questi vengano maggiorati ossia superati per entità.

le tempeste di vento(48-63 nodi) abbiano, mediamente, un'occorrenza di 5 eventi /anno di cui almeno uno si colloca nella scala dei 30 m/s.

direzione di provenienza [°N]	Intensità del vento [nodi]						TOTALI
	2 - 6	7 - 21	22 - 33	34 - 47	48 - 63	>63	
0 - 30°	749	2618	840	179	15		4401
30 - 60°	1127	4585	1051	154	8		6925
60 - 90°	2259	6222	590	47	2		9120
90 - 120°	2230	7150	872	37	3		10292
120 - 150°	1156	2210	237	9	3		3615
150 - 180°	576	590	29	1			1196
180 - 210°	388	514	44	12			958
210 - 240°	926	3013	1096	176	11		5222
240 - 270°	3321	20500	7300	1535	109	1	32766
270 - 300°	1743	10589	3500	970	89	1	16892
300 - 330°	1236	2787	203	68	6		4300
330 - 360°	780	1257	361	79	2		2479
Variabile	46	19					65
TOTALI	16537	62054	16123	3267	248	2	98231
							12449
							110680

Tabella 2.4: occorrenza degli eventi anemometrici registrati dalla stazione di Guardiavecchia . (Periodo di rilevazione: 1/01/1951 al 27/12/1997)

ALLEGATI

Allegato 1: Distribuzione direzionale anemometrica – Stazione di La Maddalena (Guardia vecchia)

Dati: 110680

Periodo di rilevazione: 1/01/1951 al 27/12/1997

direzione di provenienza [°N]	Intensità del vento [nodi]						TOTALI
	2 - 6	7 - 21	22 - 33	34 - 47	48 - 63	>63	
0 - 30°	749	2618	840	179	15		4401
30 - 60°	1127	4585	1051	154	8		6925
60 - 90°	2259	6222	590	47	2		9120
90 - 120°	2230	7150	872	37	3		10292
120 - 150°	1156	2210	237	9	3		3615
150 - 180°	576	590	29	1			1196
180 - 210°	388	514	44	12			958
210 - 240°	926	3013	1096	176	11		5222
240 - 270°	3321	20500	7300	1535	109	1	32766
270 - 300°	1743	10589	3500	970	89	1	16892
300 - 330°	1236	2787	203	68	6		4300
330 - 360°	780	1257	361	79	2		2479
Variabile	46	19					65
TOTALI	16537	62054	16123	3267	248	2	98231
							12449
							110680

CALME (0 - 1 nodi)

TOTALE

Allegato 2: Distribuzione direzionale del moto ondoso Dati relativi al settore: 40.5-41.5 °N ; 9.5-10.5 °E - Metereological Office-Bracknell

DIR (°N)	CLASSI D'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)							Totale
	0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	>6.0	
345 - 15	169	86	28	13	5			301
15 - 45	144	84	29	6	1	1	1	266
45 - 75	115	36	21	2	1			175
75 - 105	164	36	20	2	1	1		223
105 - 135	187	45	16	5	2			255
135 - 165	286	111	30	10				437
165 - 195	180	72	21	4	2			279
Totale	1246	470	165	42	11	2	1	1936
Tot. cum.	27,48	1800,71	1965,71	2007,41	2018,74	2020,56	2021,46	

Fonte: *Studio Meteomarinò effettuato da Modimar per Edilnord nell'ambito del progetto Costa Turchese (Golfo di Olbia)*

Allegato 3: Formule Shore Protection Manual per acque profonde (deep water) riviste e corrette da Hurdle e Stive - C.E.R.C. (U.S. Army Coastal Engineering Research Center)

$$\frac{gH_S}{U_A} = 0.25 \cdot \tanh \left[0.6 \cdot \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \cdot \tanh^{1/2} \left\{ \frac{4.3 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)}{\tanh^2 \left[0.76 \cdot \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right\}$$

$$\frac{gT_P}{U_A} = 8.3 \cdot \tanh \left[0.76 \cdot \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \cdot \tanh^{1/3} \left\{ \frac{4.1 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)}{\tanh^2 \left[0.76 \cdot \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right\}$$

$$\frac{t_{lim}g}{U_A} = 65.9 \cdot \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{2/3}$$

$$\frac{F'g}{U_A^2} = \left(\frac{\left(\frac{tg}{U_A} \right)}{65.9} \right)^{3/2} ; \quad \text{se } \frac{tg}{U_A} < \frac{t_{lim}g}{U_A}$$

Dove:

U_A è il coefficiente di trascinamento del vento espresso in m/s ;

H_S è l'altezza d'onda significativa espresso in m ;

T_P è il periodo di picco s ;

F è il fetch efficace espresso in m ;

t è il tempo dell'evento anemologico che genera l'onda espresso in s ;

t_{lim} è il tempo minimo necessario affinché si abbia il pieno sviluppo del moto ondoso per un determinato fetch espresso in s .

E' importante notare che tutte le grandezze sono rese adimensionali attraverso il fattori g/ U_A per i tempi e ; g/ U_A^2 per le lunghezze.

Allegato 4: Formule Shore Protection Manual per acque basse (shallow water) . C.E.R.C. (U.S. Army Coastal Engineering Research Center)

$$\frac{gH}{U_A^2} = 0.283 \cdot \tanh \left[0.530 \cdot \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{0.00565 \cdot \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[0.530 \cdot \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right\}$$

$$\frac{gT_s}{U_A} = 7.54 \cdot \tanh \left[0.833 \cdot \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{0.0379 \cdot \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[0.833 \cdot \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right\}$$

Dove:

U_A è il coefficiente di trascinamento del vento espresso in m/s ;

H_S è l'altezza d'onda significativa espresso in m ;

T_p è il periodo di picco s ;

F è il *fetch* efficace espresso in m ;

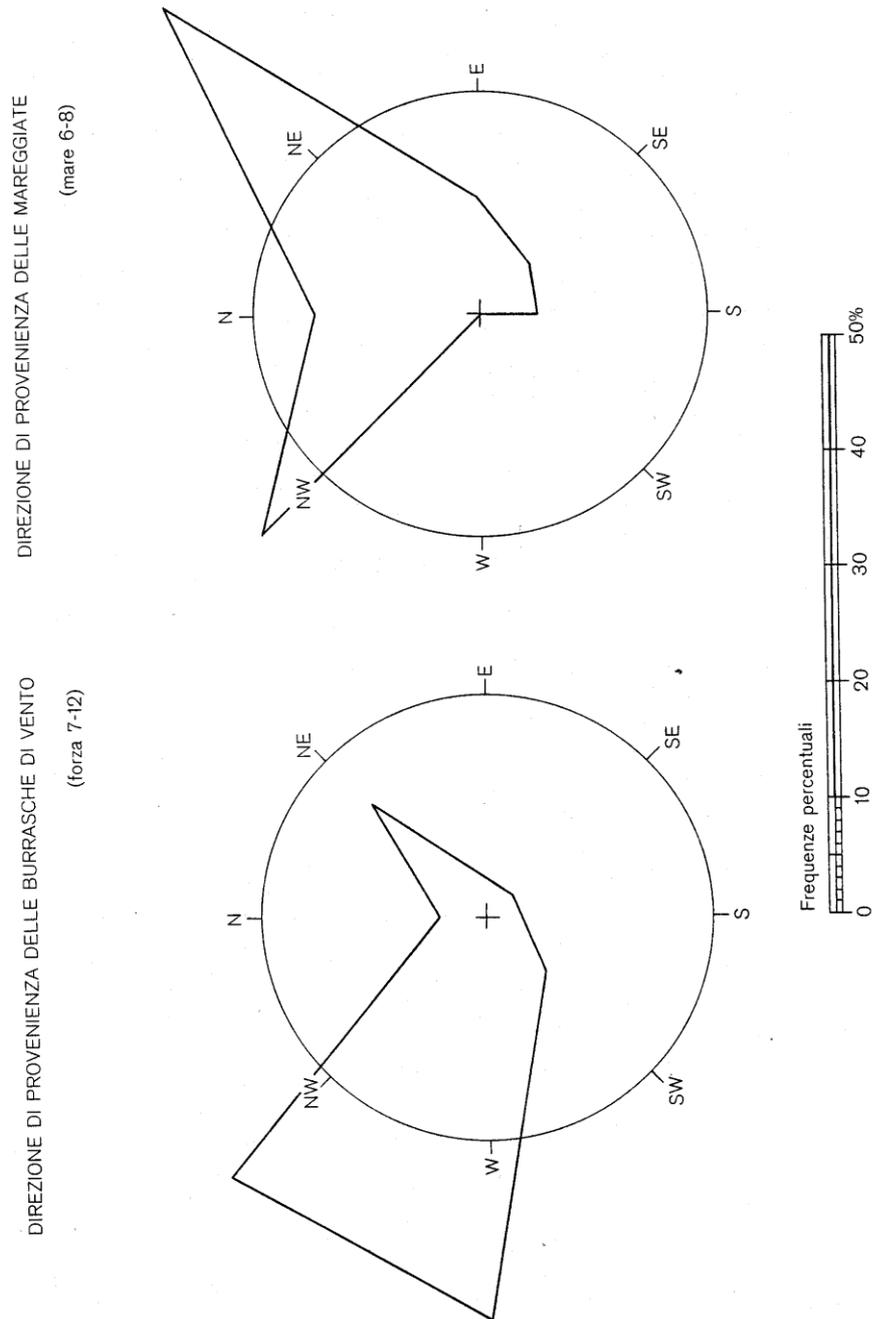
t è il tempo dell'evento anemologico che genera l'onda espresso in s ;

t_{lim} è il tempo minimo necessario affinché si abbia il pieno sviluppo del moto ondoso per un determinato *fetch* espresso in s .

E' importante notare che tutte le grandezze sono rese adimensionali attraverso il fattori g/ U_A per i tempi e ; g/ U_A^2 per le lunghezze.

Fonte: *Shore Protection Manual*, ed. 1977/1984, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Kingman Building, Fort Belvoir, Virginia, U.S.A.

Allegato 5: Dati sintetici dello stato di mare e vento rilevato a Capo Figura da I.I.M.



Scala di rilevazione vento: scala rilevazione mare: Douglas

I dati sono ottenuti da osservazioni effettuate dalla stazione di Capo Figari per un periodo di ventisei anni compreso tra ~ 1930-1957. Fonte dati [5] : *Tavole di Marea e delle correnti di marea* , Istituto Idrografico della Marina.

Allegato 6: Dati sintetici dello stato di mare rilevato a Capo Figari da I.I.M

DURATA MASSIMA DELLE MAREGGIATE
(mare 6 ÷ 8)

Mese	Durata (ore)	Stato del mare	Direzione di provenienza
Dic.	62	6-7	NE
Nov.-Dic.	56	6-7	N
Ott.	54	6-7	N
Ott.	54	6-7	NE
Apr.	52	6-7	NE
Dic.	50	6-7	NE
Feb.	48	6-7	S
Mar.	48	6-7	E
Feb.	40	6-8	E
Nov.	40	6-8	NE
Gen.	38	6-8	N
Gen.	38	6-7	NE
Feb.	38	6-7	E
Nov.	38	6-8	N
Nov.-Dic.	38	6-7	NE
Dic.	38	6-8	E
Gen.	36	6-7	NE
Feb.	36	6-7	NE
Dic.	36	6-7	NE
Dic.	36	6	NW
Gen.	34	6	NE
Mar.	32	6-7	SE
Mar.	32	6	S
Nov.	32	6-8	NE
Dic.	32	6	E

MASSIMO MARE VERIFICATOSI NEI SINGOLI
MESI E RELATIVE FREQUENZE

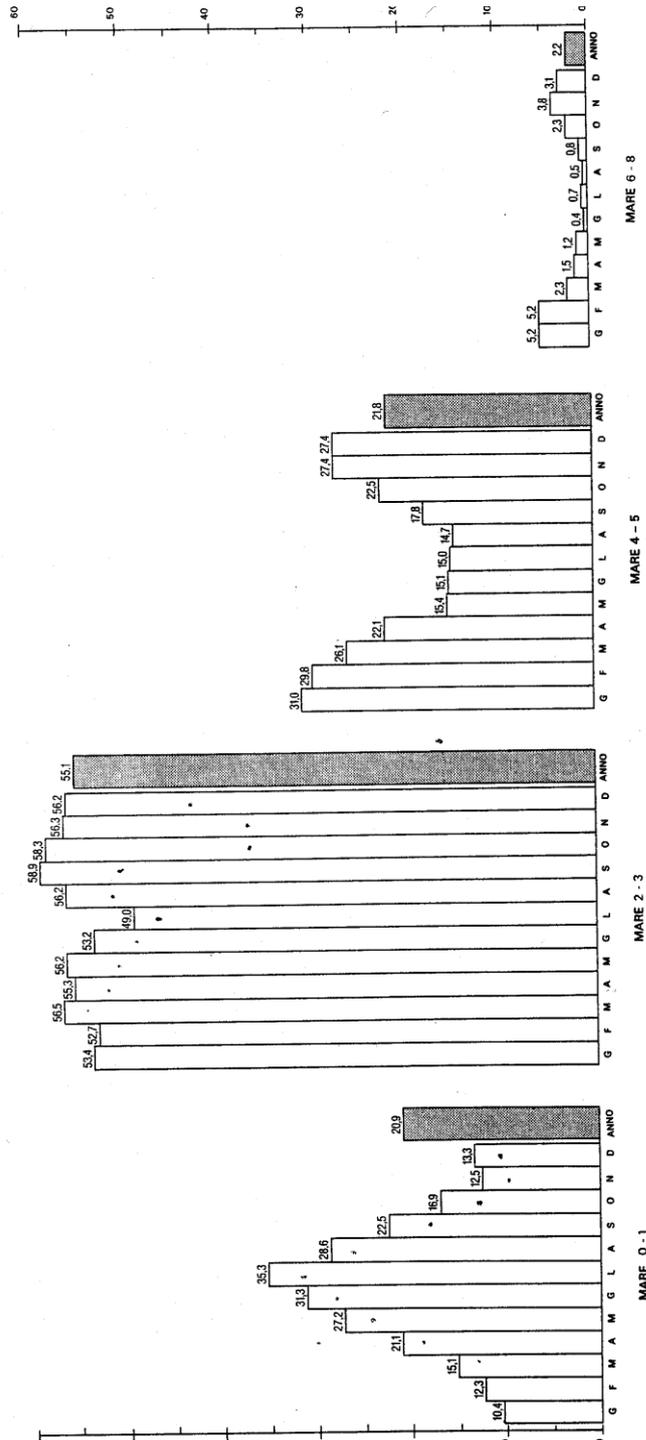
Mese	Stato del mare	Frequenza in giorni	Direzione di provenienza
Gen.	8	3	3 N
Feb.	8	1	E
Mar.	8	1	NW
Apr.	8	1	NE
Mag.	7	1	NE
Giù.	6	3	3 NW
Lug.	7	1	NW
Ago.	7	1	SE
Set.	7	3	1 N - 1 NE - 1 NW
Ott.	7	2	2 N
Nov.	8	4	1 N - 3 NE
Dic.	8	2	2 E

I dati sono ottenuti da osservazioni effettuate dalla stazione di Capo Figari per un periodo di ventisei anni compreso tra ~ 1930-1957. Fonte dati [5] : *Tavole di Marea e delle correnti di marea* , Istituto Idrografico della Marina.

Allegato 7: Dati sintetici dello stato di mare rilevato a Capo Figari da I.I.M

STATO DEL MARE

Frequenze medie in percento dedotte da tre osservazioni giornaliere relative a 28 anni



I dati sono ottenuti da osservazioni effettuate dalla stazione di Capo Figari per un periodo di ventisei anni compreso tra ~ 1930-1957. Fonte dati [5] : *Tavole di Marea e delle correnti di marea* , Istituto Idrografico della Marina.

3 TRASFORMAZIONE DELL'ONDA A LARGO VERSO RIVA

3.1 Introduzione

In questo capitolo sono esposti i risultati dello studio di modellazione numerica effettuato al fine di “trasportare” l’onda al largo ottenuta per il paraggio esterno dallo studio meteo-marino nell’area in esame, in modo da tenere conto degli effetti di shoaling, rifrazione e riflessione a cui è soggetta l’onda durante l’avvicinamento alla costa. Sempre attraverso il modello matematico è stato inoltre possibile ricostruire il moto ondoso dovuto al fetch interno a partire dai dati di vento.

3.2 Batimetria

La batimetria dell’area di studio, mostrata in Figura 3-1, è stata ottenuta sulla base delle carte a disposizione. Inoltre, per uno studio a larga scala nella zona di maggiore interesse, i dati delle carte a disposizione sono stati integrati con i dati provenienti da un rilievo batimetrico effettuato in prossimità di Cala Finanza (vedi Figura 3-3 e Figura 3-3).

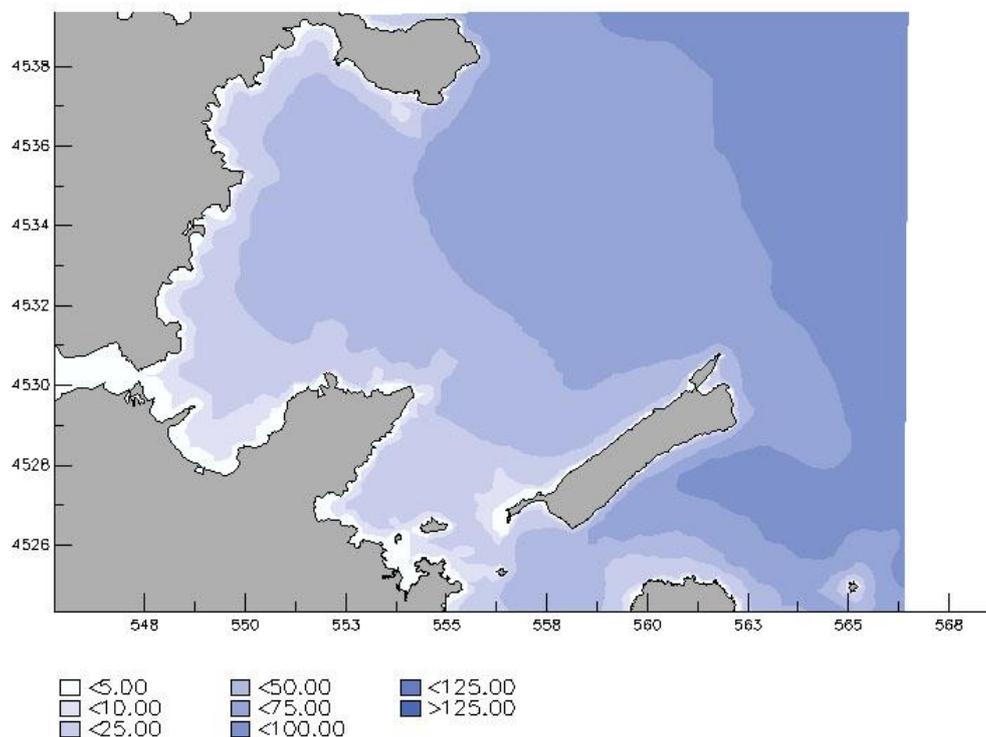


Figura 3-1: Batimetria della zona in esame

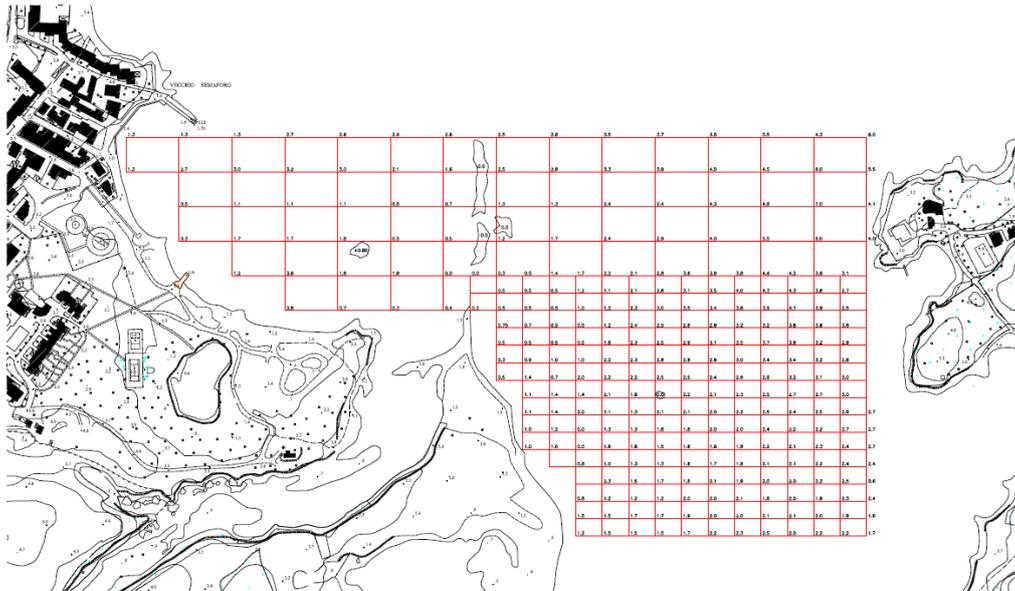


Figura 3-2: Rilievo batimetrico effettuato in prossimità di Cala Finanza

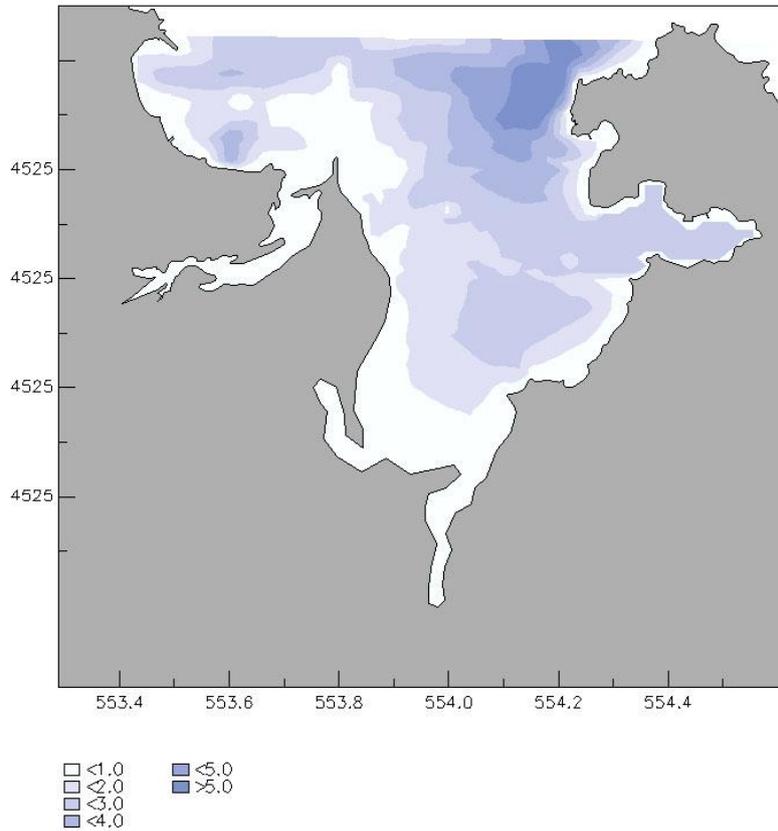


Figura 3-3: Batimetria in prossimità di Cala Finanza

3.3 I modelli numerici

Per il trasporto dell'onda a largo verso riva è stato utilizzato il Wave Model SWAN sviluppato dalla Technical University di Delft (Olanda) e contenuto nel pacchetto software Delft3D Modelling System, sviluppato dalla DELTARES.

3.3.1 DELFT3D Modelling System

Il modello numerico è un sistema multi modulare capace di simulare varie fenomenologie tra cui:

- I. Flussi dovuti a marea, correnti di densità e vento;
- II. Propagazione d'onde irregolari direzionalmente orientate su batimetrie irregolari;
- III. Onde che variano dinamicamente ("time varying");
- IV. Variazioni della morfologia bidimensionale;
- V. Qualità dell'acqua.

Esso comprende i seguenti moduli:

- a) *Grid*
- b) *Bathymetry*
- c) *Hydrodynamic*
- d) *Waves*
- e) *Morphology*
- f) *Particle Tracking*
- g) *Far field water quality.*

Ognuno di questi moduli ha a che fare con un particolare aspetto dello studio che si vuole affrontare. Alcuni moduli sono indispensabili per qualsiasi particolare aspetto si voglia studiare, essi, infatti, definiscono la griglia di calcolo e la batimetria entro cui i fenomeni devono essere studiati o la morfologia del fondo; altri, invece, si usano a seconda delle esigenze di studio. Nel caso in esame, sono stati utilizzati i moduli *Grid e Bathymetry*, che sono necessari rispettivamente per generare delle griglie di calcolo per il modello e per interpolare i dati batimetrici affinché possano essere utilizzati per effettuare i calcoli. Per trasportare l'onda da largo fino a riva è stato utilizzato il modulo *Waves*, che comprende il Wave Model SWAN.

3.3.2 Impostazioni modello SWAN

La prima indispensabile impostazione precipua a qualsiasi altra azione è stata quella di definire delle griglie rettangolari adattate alla batimetria ed alla linea di costa entro la quale il modello ha compiuto i calcoli. Sono state create tre diverse griglie con diverse dimensioni delle maglie. La prima griglia, mostrata in Figura 3-4, copre l'area che va da Golfo Aranci fino all'isola di Molara. La spaziatura massima delle maglie è di circa 120 m, per un totale di 15625 celle. La seconda griglia, di dimensioni minori, copre l'area di Golfo Di Porto San Paolo. E' formata da 15625 celle con una spaziatura che

va da 40 m nella direzione nord e 75 m nella direzione est (vedi Figura 3-5). La terza griglia copre un'area ancora inferiore nelle prossimità del lungomare, come si può vedere in Figura 3-6. Tale griglia è composta da maglie con spaziatura massima di 15 m, per un totale di 6561 celle.

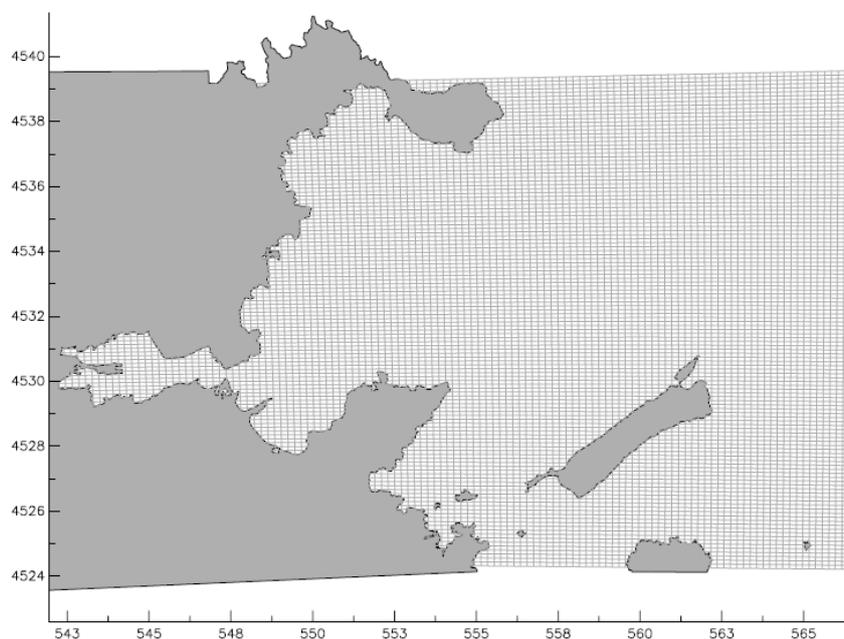


Figura 3-4: Visualizzazione della Griglia 1

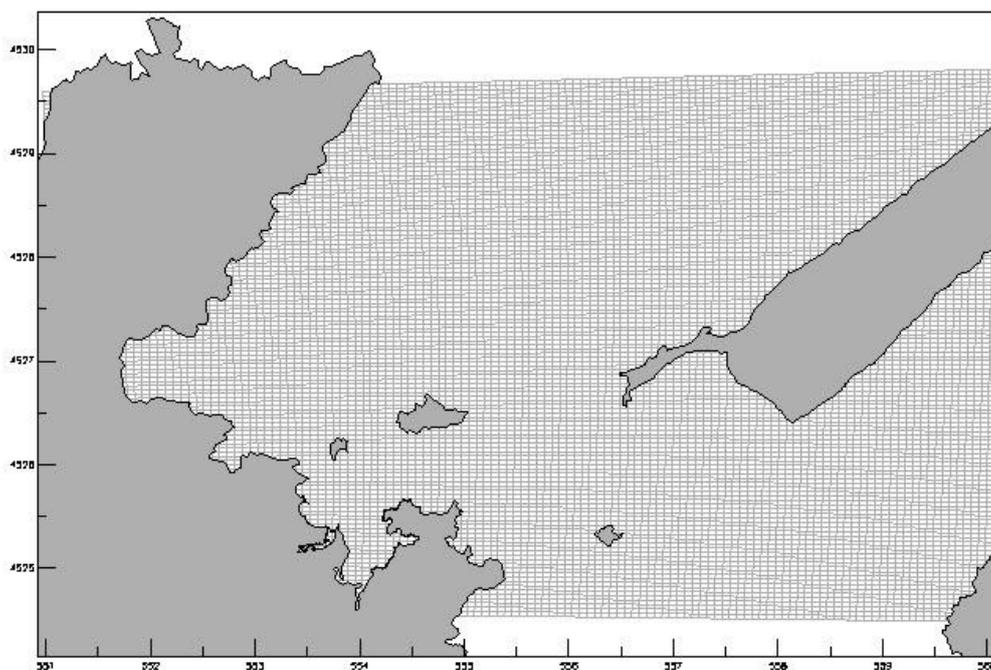


Figura 3-5: Visualizzazione della Griglia 2

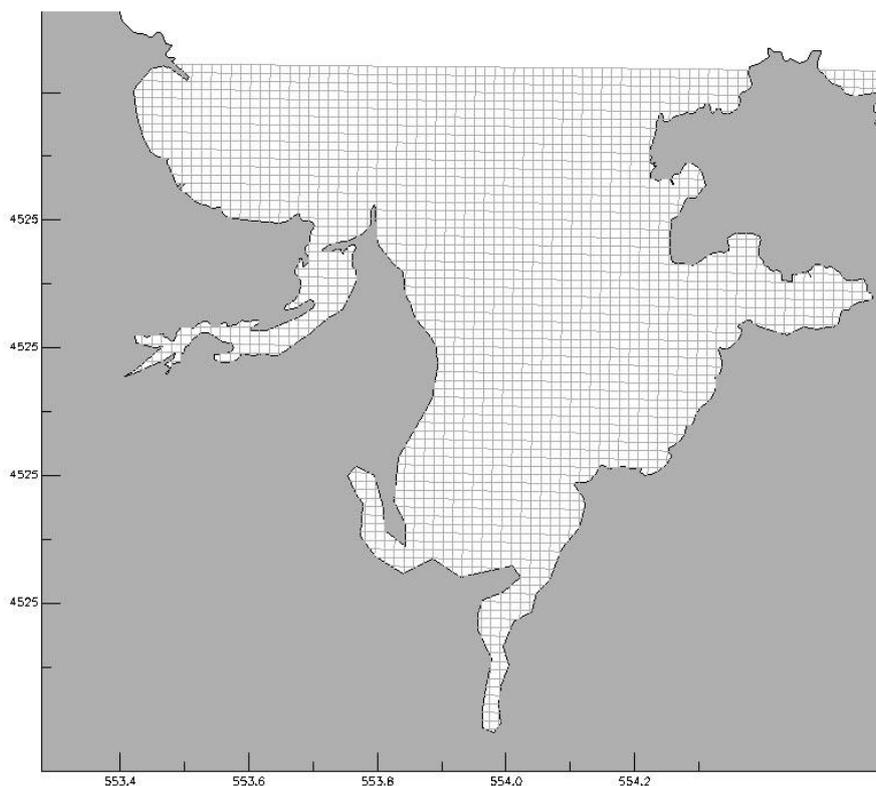


Figura 3-6: Visualizzazione della Griglia 3

Per eseguire le simulazioni si è utilizzata una procedura chiamata “nesting”. Tale procedura consiste nel svolgere i calcoli al largo su una griglia che copre una vasta area e con una spaziatura tra le maglie larga, e di utilizzare poi i risultati ottenuti con tale simulazione come condizioni al contorno su una griglia di dimensioni minori e con una spaziatura tra celle inferiore, in modo da ottenere dei risultati più accurati nell’area in esame. Tale procedimento è stato utilizzato sia nel caso della calcolo dell’onda dovuta al fetch esterno sia in quello dovuto al fetch interno. Nel caso in cui si sia considerato il fetch esterno, il nesting è stato fatto tra la griglia 1 e la griglia 3, mentre nel caso del calcolo del fetch interno si sono considerate la griglia 2 e la griglia 3. La scelta delle griglie è dovuta al fatto che l’area da considerare relativa al paraggio interno è di dimensioni inferiori rispetto a quella del paraggio esterno, per cui è stato possibile utilizzare una griglia con una dimensione delle maglie minore che permettesse una maggiore accuratezza nei calcoli anche al largo.

3.3.2.1 Parametri fisici e numerici

I parametri fisici e numerici assegnati di input al modello sono mostrati in Tabella 3.1.

Parametri	Valori
Gravity	9.81 m/s ²
Water density	1025 kg/m ³
Generation of formulations	Third generation
Bottom friction	Jonswap formulation, coefficient 0.067
Depth-induced breaking	B&J model, $\alpha=1$, $\gamma=0.73$
Non-linear triad interactions	LTA, $\alpha=0.1$, $\beta=2.2$
Bottom friction	JONSWAP, coeff=0.067
Diffraction	Coef. 0.2 - steps=5
Wind growth	Activated
White-capping	Activated
Quadruplets	Activated
Refraction	Activated
Frequency shift	Activated
Directional space	0.5
Frequency space	0.5

Tabella 3.1: Parametri fisici e numerici considerati nelle simulazioni con il modello SWAN

3.3.2.2 Scelta dei dati delle forzanti d'onda

Al fine di ottenere informazioni del campo d'onda nelle vicinanze del lungomare sono state considerate numerose condizioni in termini d'altezze, periodi e direzioni d'onda per un totale di 6 simulazioni elencate in Tabella 3.2.

La scelta delle condizioni del moto ondoso e del vento per effettuare le simulazioni è scaturito dalla studio meteo-marino effettuato. Infatti, le prime tre simulazioni considerano degli eventi estremi con elevato periodo di ritorno (100 anni) nel paraggio esterno dell'area in esame, mentre le ultime quattro simulazioni ricreano il moto ondoso nel paraggio interno a partire dai dati di vento. Sulla base dello studio probabilistico dei dati di vento si sono infatti individuati gli eventi anemometrici sia estremi (con velocità di 30 m/s) sia eventi con intensità minore ma che si verificano con una maggiore frequenza.

Run	Hs(m)	Tp(s)	Dir.(°N)	Wind speed (m/s)	Wind dir.(°N)
1	8.4	12.0	0	No wind	
2	8.4	12.0	45	No wind	
3	8.4	12.0	90	No wind	
4	No swell			30	315
5	No swell			30	270
6	No swell			20	315

Tabella 3.2: Caratteristiche di onda e di vento per le simulazioni effettuate

In tutte le simulazioni eseguite, le condizioni di marea sono state considerate trascurabili. Come è noto, il mare Mediterraneo presenta infatti delle escursioni di marea di circa 30 cm, con degli effetti trascurabili sul moto ondoso.

3.3.3 Simulazioni e risultati

Come si può vedere dalle figure dalla 3.8 alla 3.13 , Per tutte le direzioni di provenienza del moto ondoso si registrano altezze d'onda che si attestano sui 0,6 metri e che pertanto superano le condizioni limite di riferimento di altezza dell'onda significativa all'interno dei porto raccomandati dall'AIPCN-PIANC PIANC (Associazione Internazionale di Navigazione *Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*, Febbraio 2002) riportati di seguito:

Condizioni di “comfort”

Hs=0.15m Massima frequenza complessiva non superiore a 5 giorni/anno;

Condizioni di “sicurezza”

Hs=0.30 m Eventi con tempo di ritorno non inferiore a 5 anni;

Condizioni “limite”

Hs=0.50 m Eventi con periodo di ritorno non inferiore a 50 anni.

Le onde provenienti dal 1° quadrante considerando il fetch interno si mantengono invece al di sotto dei valori limite.

Seppure l'altezza d'onda in prossimità del paraggio risulta comunque modesta l'alto valore del periodo della stessa, essendo onde provenienti da largo, non consente l'utilizzo di moli frangionde galleggianti.

Per tale motivo la scelta progettuale è stata indirizzata verso opere di tipo fisso che consentano di realizzare un bacino protetto durante tutti i mesi dell'anno.

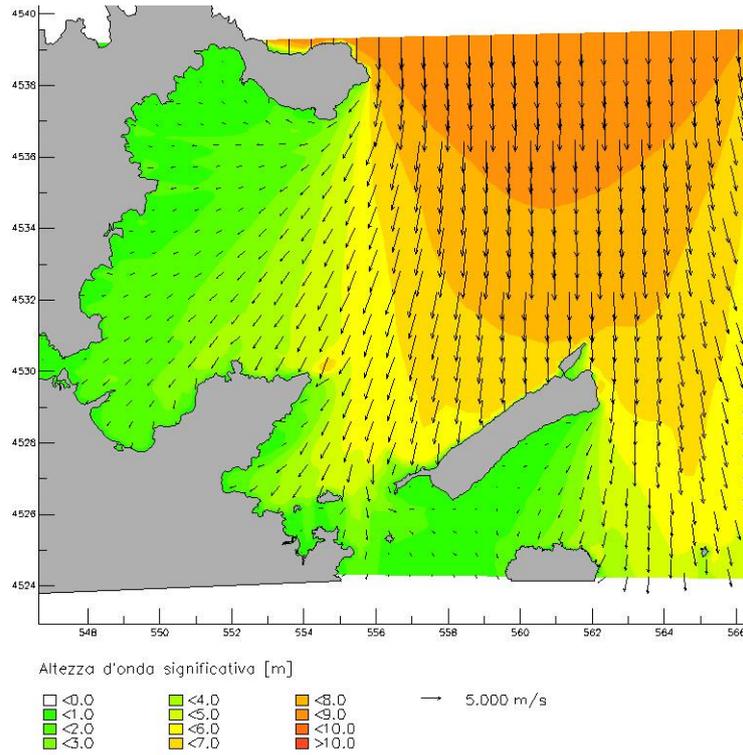


Figura 3-7: Run 1 – Hs=8.4 Tp=12s Direzione=0° - Grid 1

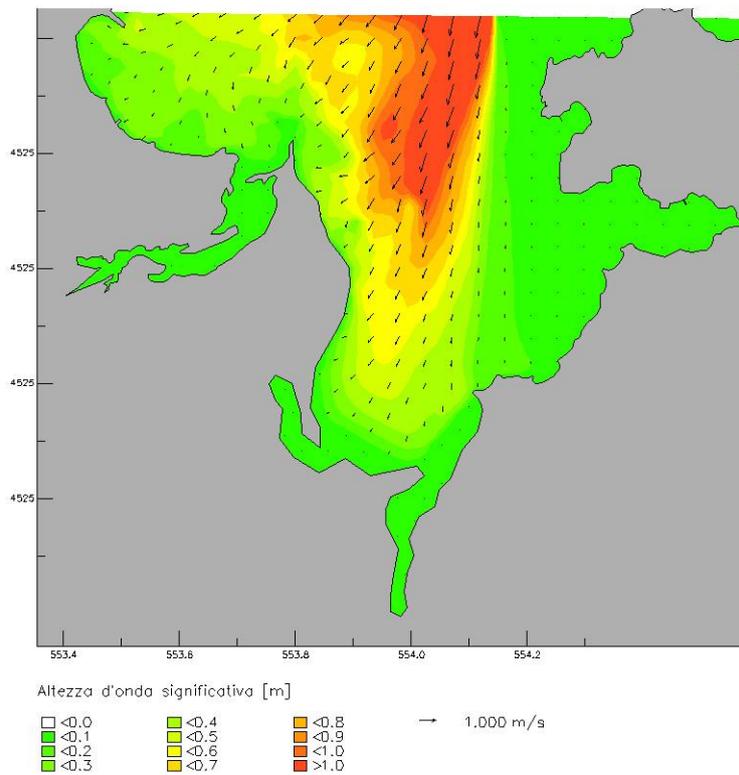


Figura 3-8: Run 1 – Hs=8.4 Tp=12s Direzione=0° - Grid 3

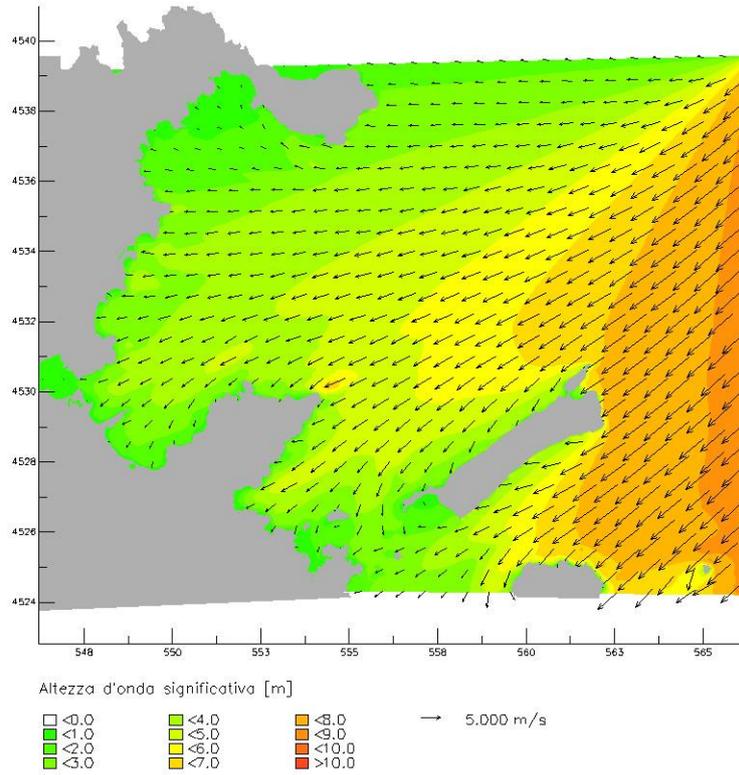


Figura 3-9: Run 2 – Hs=8.4 Tp=12s Direzione=45° - Grid 1

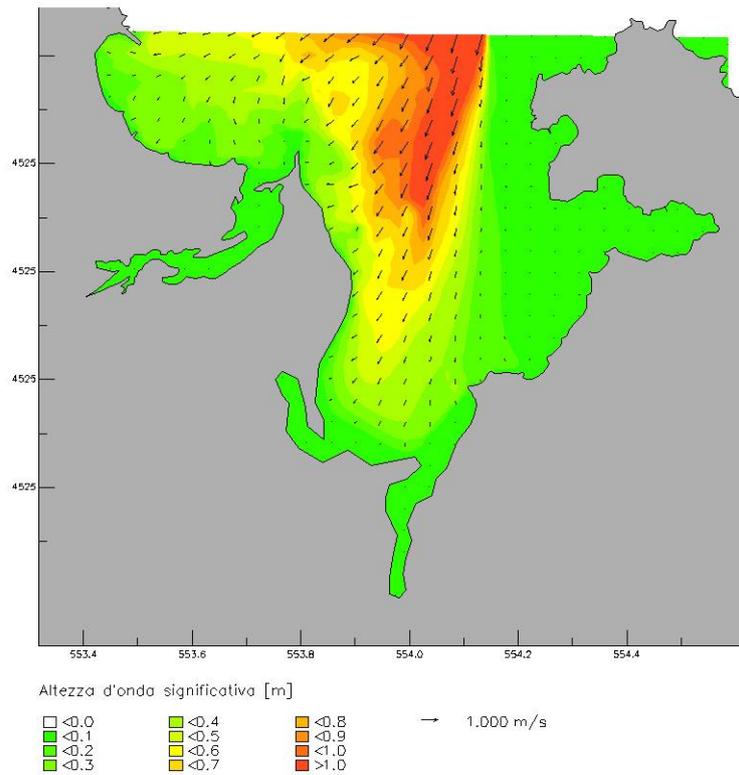


Figura 3-10: Run 2 – Hs=8.4 Tp=12s Direzione=45° - Grid 3

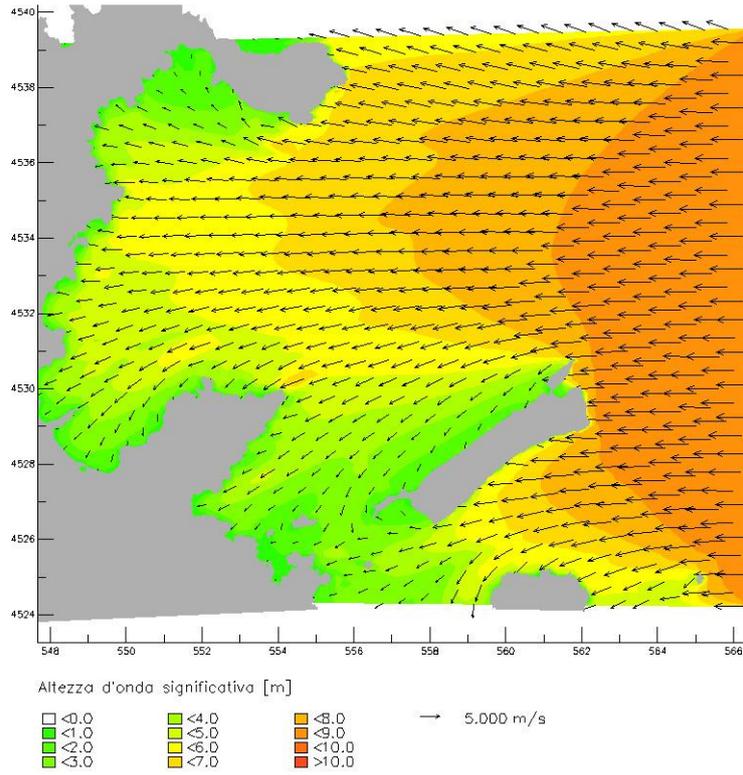


Figura 3-11: Run 3 – Hs=8.4 Tp=12s Direzione=90° - Grid 1

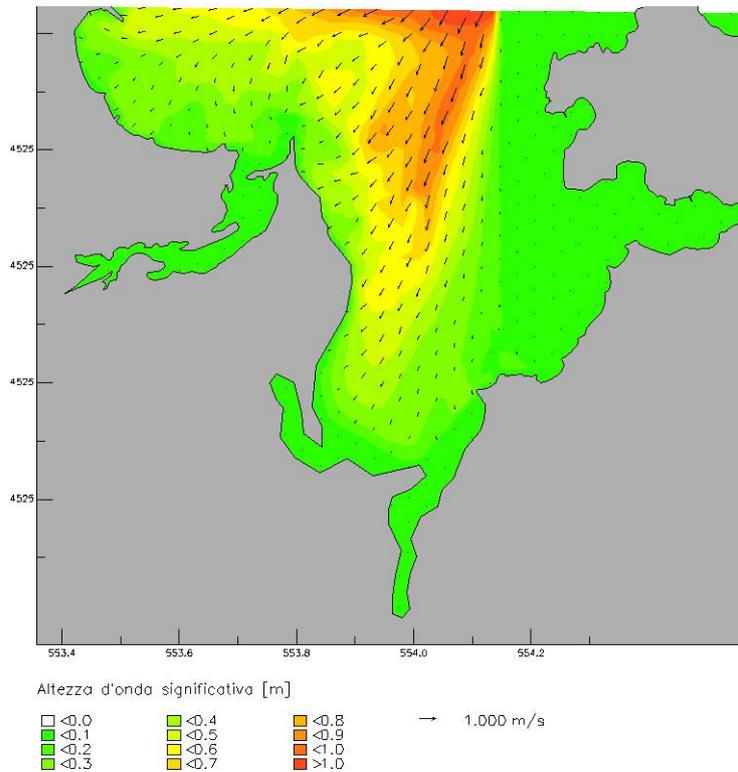


Figura 3-12: Run 3 – Hs=8.4 Tp=12s Direzione=90° - Grid 3

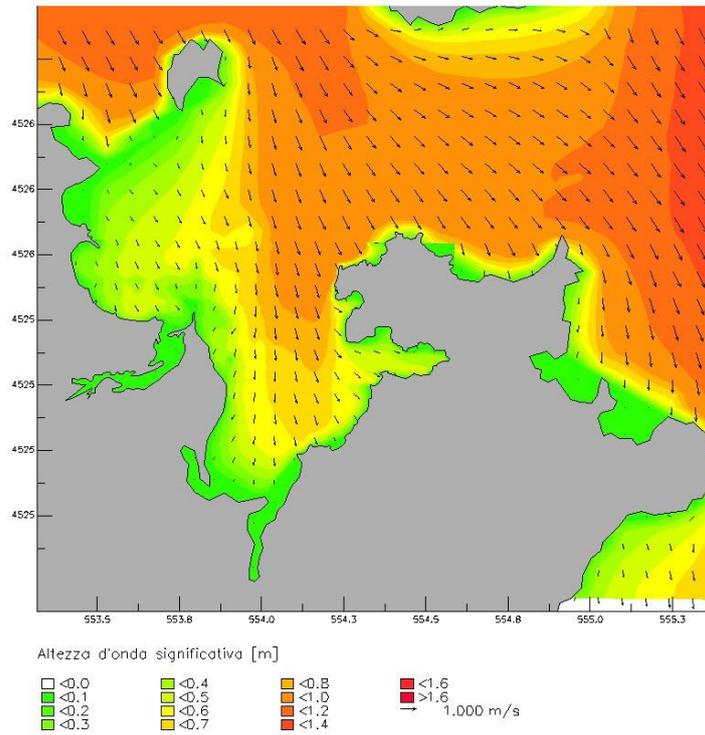


Figura 3-13: Run 4 – Velocità vento 30 m/s, direzione 315°

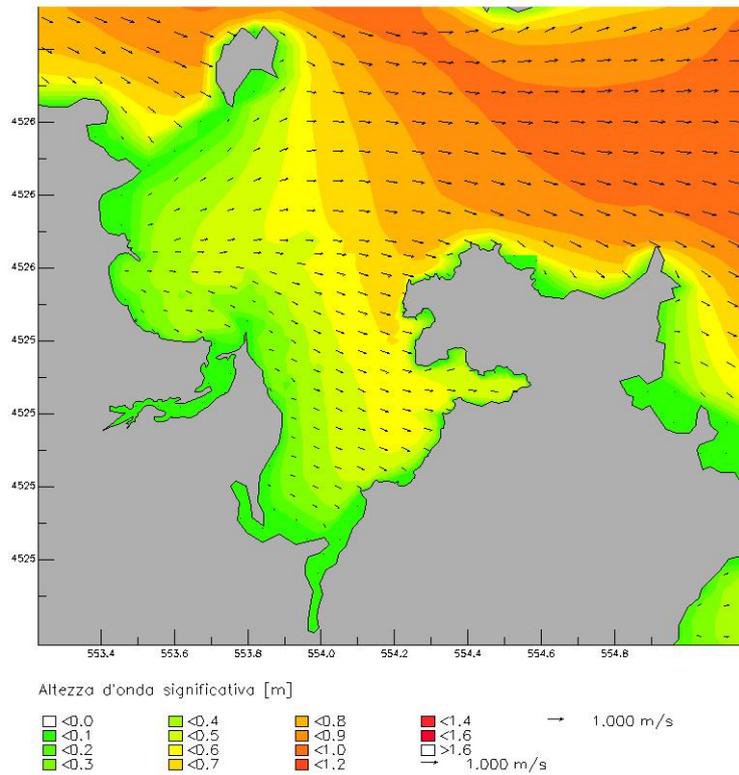


Figura 3-14: Run 5 – Velocità vento 30 m/s, direzione 270°

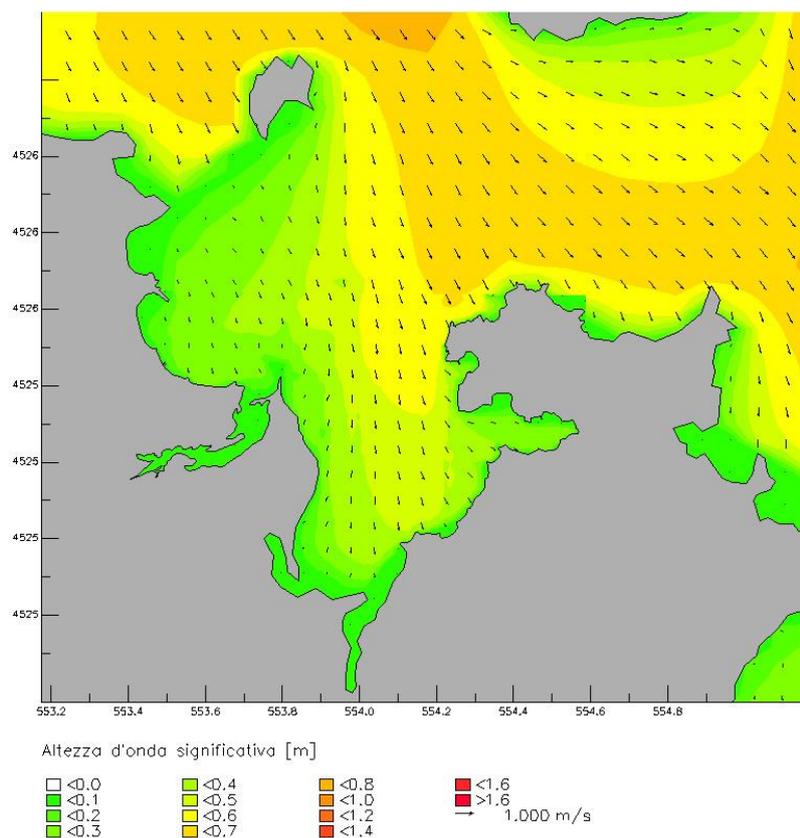


Figura 3-15: Run 6 – Velocità vento 20 m/s, direzione 315°

4 VERIFICA DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSONO

Per la verifica del moto ondoso residuo interno al bacino portuale è stato utilizzato il modello di idraulica marittima PHAROS, sistema integrato per la modellazione della propagazione delle onde all'interno dei porti e nell'intorno delle strutture costiere. Il programma utilizza delle griglie agli elementi finiti per computare gli effetti combinati di rifrazione e diffrazione in funzione dei layout di progettazione delle strutture portuali e della variabilità dei fondali in termini batimetrici.

Il programma risolve in modo completo l'equazione temporale armonica per lievi pendenze, localmente estesa con termini per rifrazione e dissipazione indotti dal frangimento del moto ondoso. Le condizioni al contorno tengono conto di molteplici fattori, come la parziale riflessione e gli effetti combinati di riflessione e diffrazione.

La riflessione del moto ondoso è determinata dalle caratteristiche dell'onda e dalla presenza di strutture. I coefficienti di riflessione dei contorni del dominio sono stati ricavati sulla base delle strutture presenti e da realizzare, previste con cella antirisacca, e della tipologia di litorale.

Dalle simulazioni riportate nel precedente capitolo si evince chiaramente che la direzione dell'onda più gravosa incidente nell'ambito di interesse ha una direzione di circa 45°.

Per contrastare il moto ondoso ma nello stesso tempo apportare minime modifiche alle correnti locali è stato deciso di dividere l'opera foranea in due parti, una consistente nel prolungamento del molo militare esistente ed un'altra costituita da una scogliera con conformazione di antemurale.

La struttura di entrambe le opere risulta essere inoltre permeabile alle correnti in quanto l'antemurale non è dotato di nucleo ed il molo è costituito da una sezione ad acqua passante.

L'antemurale è stato orientato per costituire una difesa dal moto ondoso proveniente da 45° così come si orienta a seguito dei fenomeni di rifrazione e shoaling.

La sovrapposizione tra il molo e l'antemurale, nonché l'estensione di quest'ultimo, risultano sufficienti a costituire un efficace protezione dal moto ondoso proveniente da 45° e si è però valutata la sua efficacia per gli eventi provenienti da Nord in quanto la decisione di "aprire" la struttura per un miglior inserimento paesaggistico e minimizzare l'impatto morfologico delle opere potrebbe comportare la permanenza di un moto ondoso residuo proveniente da Nord

L'onda residua nel bacino portuale è stata verificata pertanto per un'onda proveniente da Nord avente $H_s=8.4$ $T_p=12s$ Direzione=0° (maestrale/tramontana evento estremo con periodo di ritorno pari a 100 anni)) che raggiunge il sito di interesse passando attraverso l'Isola Piana e l'Isola Cavalli.

Il modello ha mostrato (vedi immagini che seguono) che l'onda residua in corrispondenza delle nuove opere ha un'altezza inferiore a 50 cm e pertanto compresa all'interno delle condizioni limite suggerite dall' AIPCN-PIANC (Associazione Internazionale di Navigazione *Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*, Febbraio 2002).

Per un maggiore confort e sicurezza delle imbarcazioni si suggerisce comunque di non utilizzare la parte più esposta del bacino durante i mesi invernali.

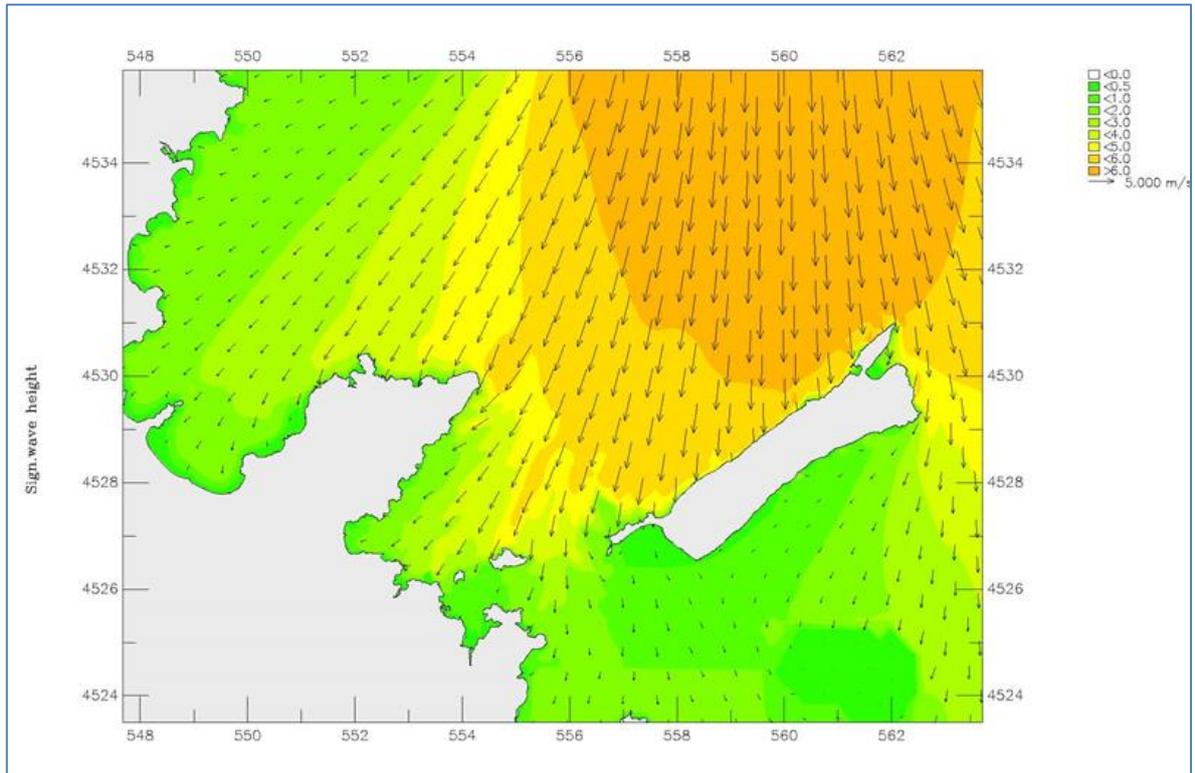


Figura 16 Onda a largo

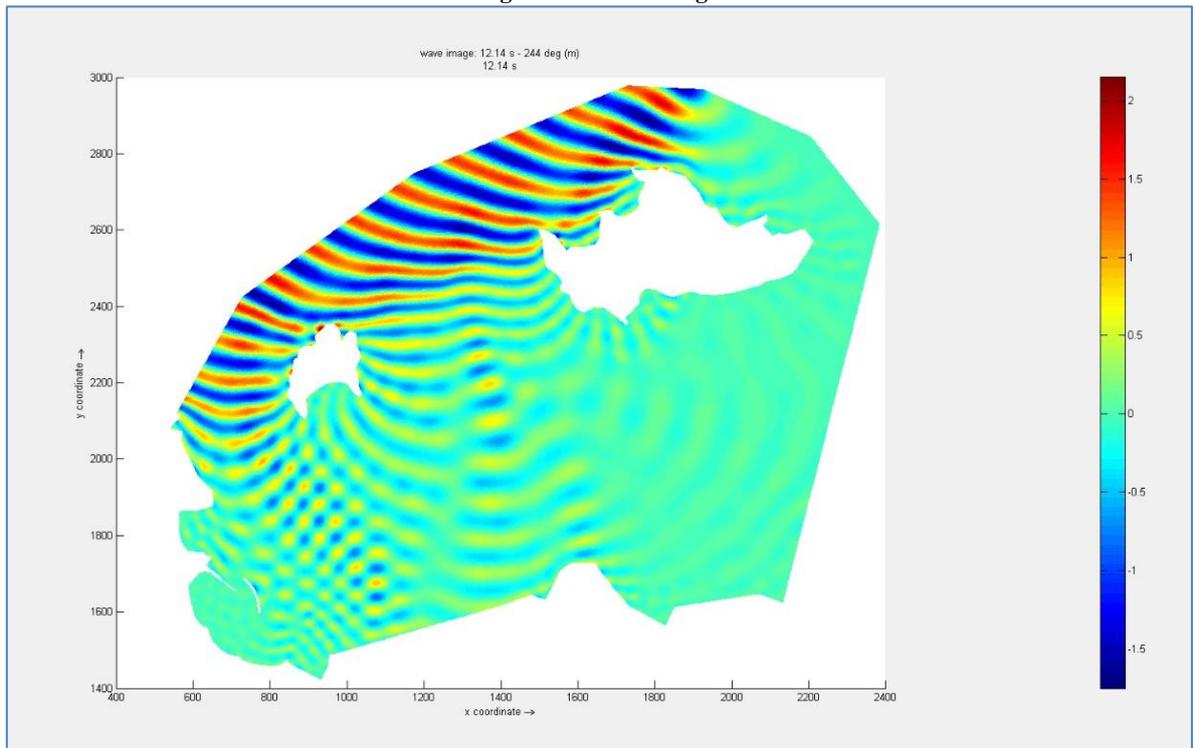


Figura 17 Fronti d'onda in corrispondenza dell'Isola Piana e Cavalli

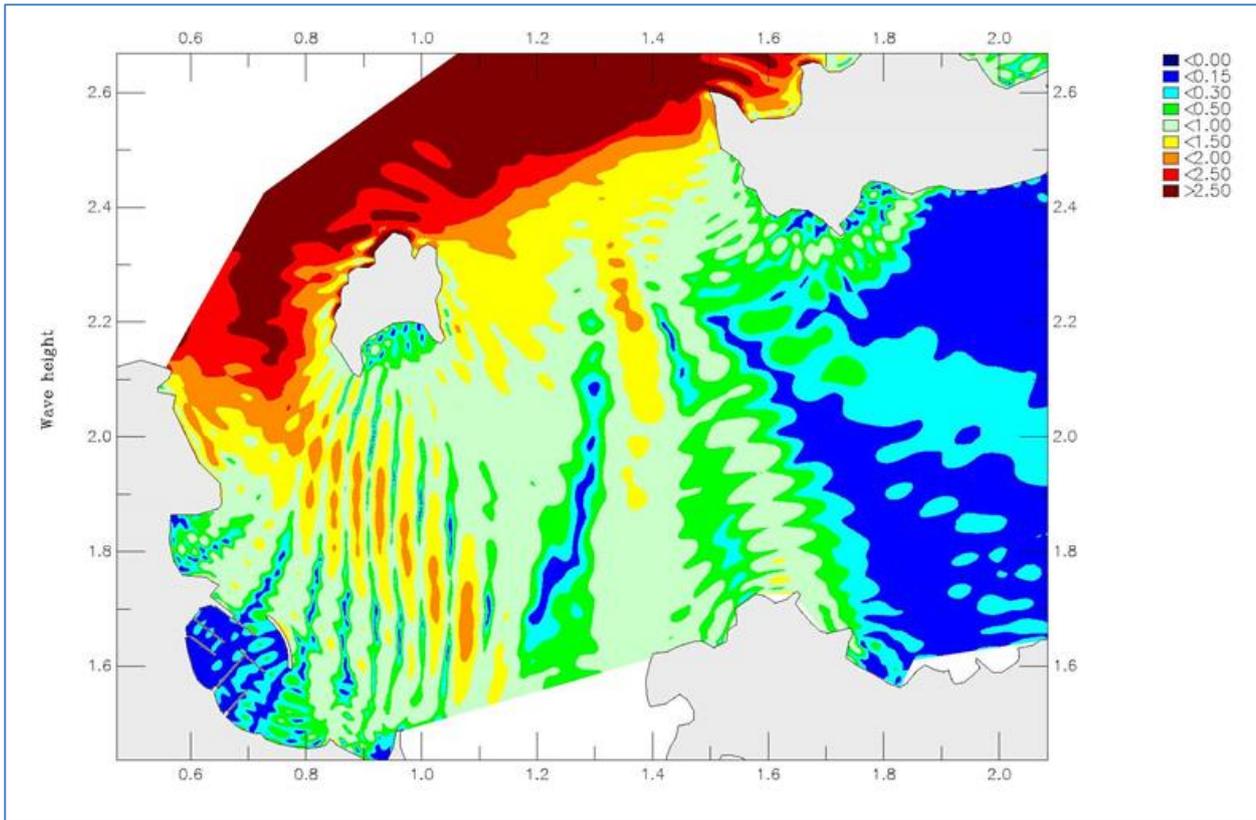


Figura 18 Moto ondoso nella rada di Porto San Paolo

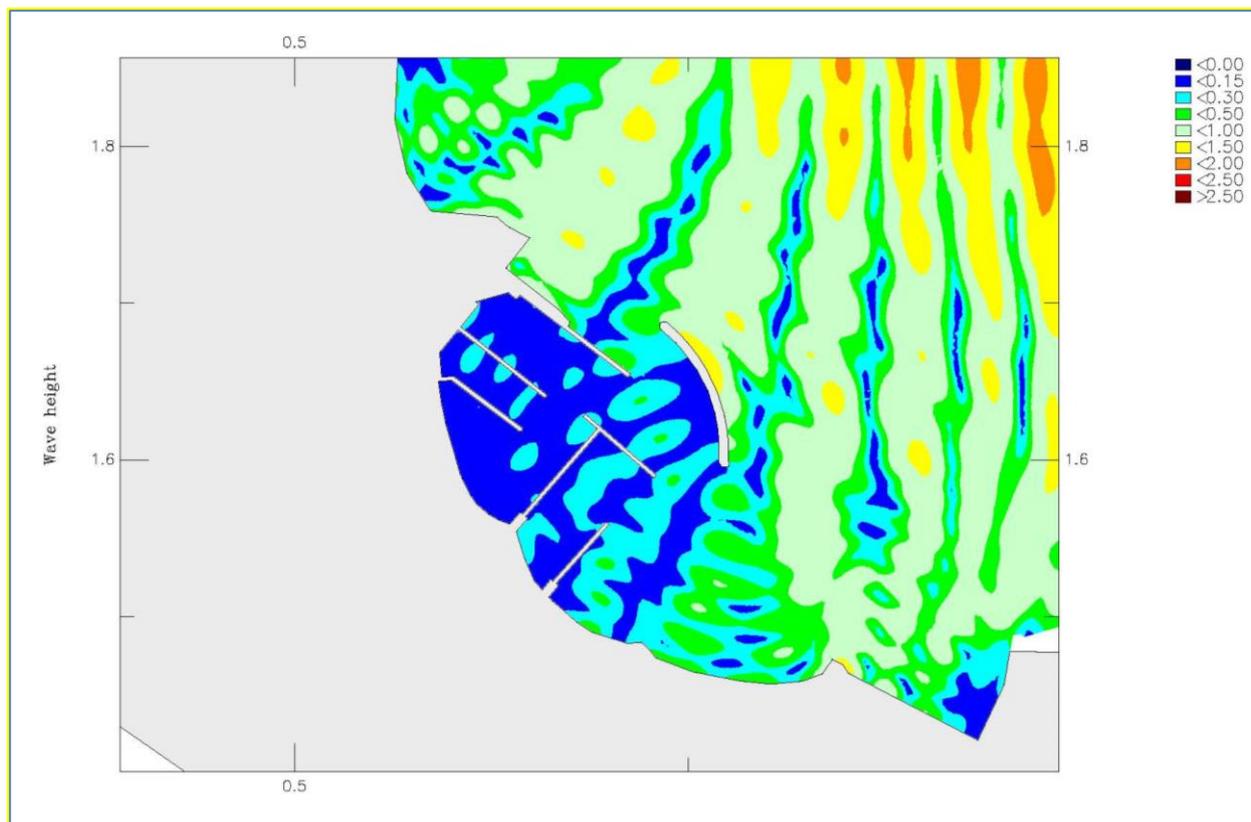


Figura 19 Moto ondoso in corrispondenza delle nuove strutture

5 Dimensionamento delle strutture

Nel presente paragrafo verrà effettuata la verifica del peso dei massi che andranno a costituire l'antemurale e che saranno utilizzati anche per il rifiorimento del molo esistente.

Verrà poi effettuata una verifica di stabilità del prolungamento del molo esistente.

5.1 Valutazione della stabilità della mantellata esterna

La valutazione della stabilità del masso delle scogliere è stata effettuata utilizzando la formula di Van der Meer (1988), che permette di valutare statisticamente le condizioni di stabilità della mantellata in condizioni di onde random. IL calcolo è stato effettuato con l'ausilio del software Breakwat.

Le condizioni di applicazione di tale formula sono:

- Scogliera con strato di copertura superficiale composto da roccia;

- Portata di tracimazione ridotta o assente (10-15% dell'onda);
- Pendenza della mantellata uniforme

Il danno che può essere causato alla struttura viene valutato in termini di livello di danneggiamento adimensionale S , considerando l'area di erosione in prossimità del livello di mare calmo. S è indipendente da altezza e angolo di inclinazione della struttura, e può essere considerato come il numero di rocce con lato pari a $Dn50$ che vengono erose in una striscia della struttura larga $Dn50$. Il numero di pietre erose all'interno di tale striscia può essere maggiore o minore di S , in funzione della porosità, della dimensione e dalla forma dei massi. In genere, il numero di rocce erose nella striscia delle dimensioni considerate è compresa pari a $0.7 \div 1 \cdot S$. I limiti di S dipendono principalmente dall'inclinazione della mantellata, e sono indicati in Tabella 7. In tale tabella, con il termine "Danno iniziale" si intende un danneggiamento della mantellata compreso tra 0 e 5%, mentre "Cedimento" indica l'esposizione dello strato filtrante

Tabella 3 Valori di S per una mantellata composta da una mantellata con spessore pari a due diametri – Fonte: Breakwat Technical Manual

Inclinazione	Danno iniziale	Danno intermedio	Cedimento
1:1.5	2	3-5	8
1:2	2	4-6	8
1:3	2	6-9	12
1:4 – 1:6	3	8-12	17

I parametri in ingresso richiesti da Breakwat per la risoluzione della formula di Van der Meer (1988) per la valutazione di S sono indicati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

La valutazione della stabilità della mantellata esterna è stata fatta considerando gli eventi estremi con un'onda pari a 1,5 metri e T_m 9,16

$\cot(\alpha)$	Angolo di inclinazione della mantellata	-
P	Fattore di permeabilità	-
P_a	Densità della roccia	kg/m ³
P_w	Densità dell'acqua	kg/m ³
N	Numero di onde incidenti	-
T_m	Periodo medio dell'onda	s
$H_{2\%}/H_s$	Rapporto di altezza d'onda	-
H_s	Altezza d'onda significativa	m
M_{50}	Massa roccia	kg

È stato innanzitutto convertito il periodo di picco ricavato con il software SWAN mediante l'utilizzo della Formula di Pierson Moskowitz come tabella di calcolo sotto riportata:

Tabella 4 Trasformazione da TP a Tm

P 1-Breakwat # 1	
Structure type	Calculator
Response factor	Periods and wave steepness
Formula	Pierson Moskowitz
Output parameter	(Tm) Mean wave period
INPUT	
(Hs) Significant wave height	1.50 (m)
(Tp) Peak wave period	12.0 (s)
OUTPUT (-)	
(Tm) Mean wave period	9.16 (s)
(Tm-1;0) Spectral wave period	10.28 (s)
(Tm;min) Minimum mean period	8.52 (s)
(Tm;max) Maximum mean period	9.84 (s)
(Tp;min) Minimum peak wave period	12.0 (s)
(Tp;max) Maximum mean period	12.0 (s)
(sp) Local wave steepness	0.006672 (-)
(sp;min) Wave steepness	0.006672 (-)
(sp;max) Wave steepness	0.006672 (-)
(sm) Wave steepness	0.0114 (-)
(sm;min) Wave steepness	0.009922 (-)
(sm;max) Wave steepness	0.01323 (-)
(sm-1;0) (Spectral) wave steepness	0.00009 (-)

Tabella 5 Risultati calcolo dimensione masso della scogliera

P 1-Breakwat # 1	
Structure type	1. Rubble mound structure, 1.1 Conventional breakwater
Response factor	2. Structural response, 2.1 Rock armour
Formula	Van der Meer (1988)
Output parameter	(S) Damage level
	INPUT
(cot(α)) Slope angle	1.50 (-)
(P) Notional Permeability factor	0.400 (-)
(Dn50-core/Dn50) Ratio rock sizes	(-)
(ρ_a) Armour density	2650 (kg/m ³)
(ρ_w) Water density	1025 (kg/m ³)
(KD) Stability coefficient	(-)
(N) Number of incident waves	3000 (-)
(Tm) Mean wave period	9.16 (s)
(Tm-1;0) Spectral wave period	(s)
(H2%/Hs) Wave height ratio	1.40 (-)
(α Hs) Wave height factor	(-)
(Conf) Confidence bands	check to use (-)
(Prob.) Input table	(-)
(y) Number of years	(year)
(SEQ_STORMS) Cumulative damage input table	(-)
(Hs) Significant wave height	1.50 (m)
(M50) Armour mass	2000.0 (kg)
	OUTPUT (-)
(S) Damage level	0.342 (-)
(δ) Relative buoyant density	1.59 (-)
(Dn50) Nominal rock size	0.910 (m)
(ξ m) Breaker parameter	6.230 (-)
(ξ s;-1) (Spectral) breaker parameter	(-)
(sm) Wave steepness	0.0115 (-)
(sm-1;0) (Spectral) wave steepness	(-)
(Hs/ δ Dn50) Stability number	1.039 (-)
(Plunging) Output table for Plunging waves	(-)
(Surging) Output table for Surging waves	(-)
(Breaker) Output table for Breaker parameter	(-)
(β) Reliability Table	(-)

Dall'analisi del risultato di cui alla Tabella 9 si può vedere come la stabilità della mantellata sia garantita per massi di categoria 1000-3000 D50 2000 Kg in quanto si avrebbe un danneggiamento con S pari a 2. Il valore di 0,342 consente di avere ampi margini di sicurezza.

Tale assunto vale anche per i blocchi di granito che costituiranno il banchinamento che avrenno un peso di circa 4,8 ton.

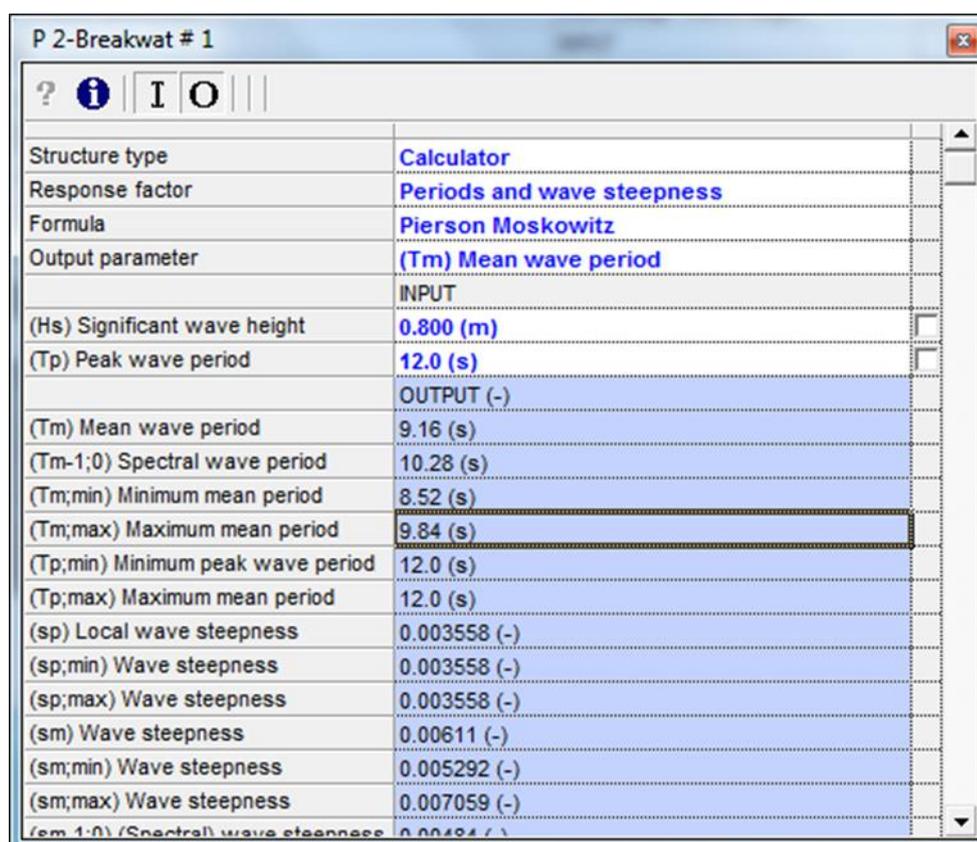
5.2 Valutazione della stabilità del molo a giorno

Il prolungamento del molo esistente verrà realizzato con un molo a giorno ad acqua passante all'interno delle cui celle verranno posizionati dei massi per smorzare il moto ondoso.

La verifica allo scorrimento ed al ribaltamento viene effettuata con l'utilizzo della formula di Goda con l'ausilio del software Breakwat.

L'altezza dell'onda incidente viene ricavata dal modello Pharos e viene assunta pari a $H_s = 0,8$ metri.

La formula richiede il periodo massimo che viene calcolato mediante la formula di Pierson Moskowitz



The screenshot shows the 'P 2-Breakwat # 1' software window. It features a toolbar with a question mark, an information icon, and 'I' and 'O' buttons. Below the toolbar is a table with two columns: parameter names and their corresponding values. The table is divided into 'INPUT' and 'OUTPUT (-)' sections. The 'INPUT' section includes (Hs) Significant wave height (0.800 m) and (Tp) Peak wave period (12.0 s). The 'OUTPUT (-)' section includes (Tm) Mean wave period (9.16 s), (Tm-1;0) Spectral wave period (10.28 s), (Tm,min) Minimum mean period (8.52 s), (Tm,max) Maximum mean period (9.84 s), (Tp,min) Minimum peak wave period (12.0 s), (Tp,max) Maximum mean period (12.0 s), (sp) Local wave steepness (0.003558 -), (sp,min) Wave steepness (0.003558 -), (sp,max) Wave steepness (0.003558 -), (sm) Wave steepness (0.00611 -), (sm,min) Wave steepness (0.005292 -), and (sm,max) Wave steepness (0.007059 -). The row for (Tm,max) Maximum mean period is highlighted with a thick border.

Parameter	Value
Structure type	Calculator
Response factor	Periods and wave steepness
Formula	Pierson Moskowitz
Output parameter	(Tm) Mean wave period
INPUT	
(Hs) Significant wave height	0.800 (m)
(Tp) Peak wave period	12.0 (s)
OUTPUT (-)	
(Tm) Mean wave period	9.16 (s)
(Tm-1;0) Spectral wave period	10.28 (s)
(Tm,min) Minimum mean period	8.52 (s)
(Tm,max) Maximum mean period	9.84 (s)
(Tp,min) Minimum peak wave period	12.0 (s)
(Tp,max) Maximum mean period	12.0 (s)
(sp) Local wave steepness	0.003558 (-)
(sp,min) Wave steepness	0.003558 (-)
(sp,max) Wave steepness	0.003558 (-)
(sm) Wave steepness	0.00611 (-)
(sm,min) Wave steepness	0.005292 (-)
(sm,max) Wave steepness	0.007059 (-)
(sm-1;0) (Spectral) wave steepness	0.00494 (-)

Vengono poi inseriti i seguenti parametri della struttura nel software

P 1-Breakwat # 1	
<input type="button" value="?"/> <input type="button" value="i"/> <input type="button" value="I"/> <input type="button" value="O"/>	
Structure type	2. Vertical (caisson), 2.1
Response factor	2. Structural response, 2.1 Pressures, Forces and Safety factors
Formula	Goda
Output parameter	(HD) Design wave height
INPUT	
(B1) Berm width	1.00 (m)
(Bup) Width of upright section	3.00 (m)
(Hs0) Significant wave height at deep water	0.800 (m)
(hs) Water depth at site	2.00 (m)
(Tmax) Max. wave period	9.84 (s)
(db) Depth of berm below SWL	1.80 (m)
(h') Distance from SWL to caisson base	6.00 (m)
(Rc) Crest freeboard	1.50 (m)
(tup/Bup) Relative horiz. dist. from c.gravity and heel	0.500 (-)
(cot(av)) Foreshore slope	50.0 (-)
(β) Wave angle	0 (deg)
(μf) Coefficient of friction	0.700 (-)
(ρf) Mass density of fill	2400 (kg/m3)
(ρc) Density of concrete cap	2400 (kg/m3)
(ρw) Water density	1025 (kg/m3)
OUTPUT (-)	
(HD) Design wave height	1.51 (m)
(Hs0/hs) Relative depth	0.400 (-)
(h5Hsi) Depth 5*Hsi seaward from toe	2.08 (m)
(Hsi) Incoming significant wave height	0.840 (m)
(η*) Elevation to which wave pressure is exerted	2.2680 (m)
(L) Local wave length	42.98 (m)
(p1) wave pressure	16.4010 (kN/m2)
(pe) Bearing pressure at heel	803.762 (kN/m2)
(pu) Uplift pressure	13.943 (kN/m2)
(Fh) Total horizontal wave force	108.78 (kN/m)
(Fu) Total uplift force	20.915 (kN/m)
(Wup) Caisson weight per m length	348.746 (kN/m)
(Mh) Moment of Fh about heel	392.15 (kNm/m)
(Mu) Moment of Fu about heel	41.83037 (kNm/m)
(FSs) Factor of safety against sliding	2.1096 (-)
(FS0) Factor of safety against overturning	1.2273 (-)

6 Incidenza delle opere in progetto sul regime del litorale

Con riferimento alle possibili interazioni delle opere con la limitrofa spiaggia si ritiene con ragionevole certezza che le stesse non provocheranno apprezzabili modifiche alla stessa.

Tale considerazione scaturisce dall'esame delle foto aree storiche dalle quali si evince che dal 1954 ad oggi, pure a seguito della realizzazione dei moli esistenti e dell'antropizzazione del territorio, non si sono registrate sostanziali modifiche del litorale.

Tale situazione è dovuta al fatto che le due spiagge di porto San Paolo sono due “pocket beach” ossia spiagge confinate che non hanno sostanziali apporti di sedimento da tratti di arenile limitrofo e quindi non sono soggette a trasporto significativo di sedimenti.

Tale condizione morfologica risulta essere una garanzia della stabilità del litorale a che a seguito delle modeste modifiche alle correnti che l'intervento comporterà, modifiche che, come già riferito, data la tipologia delle opere, saranno minime.

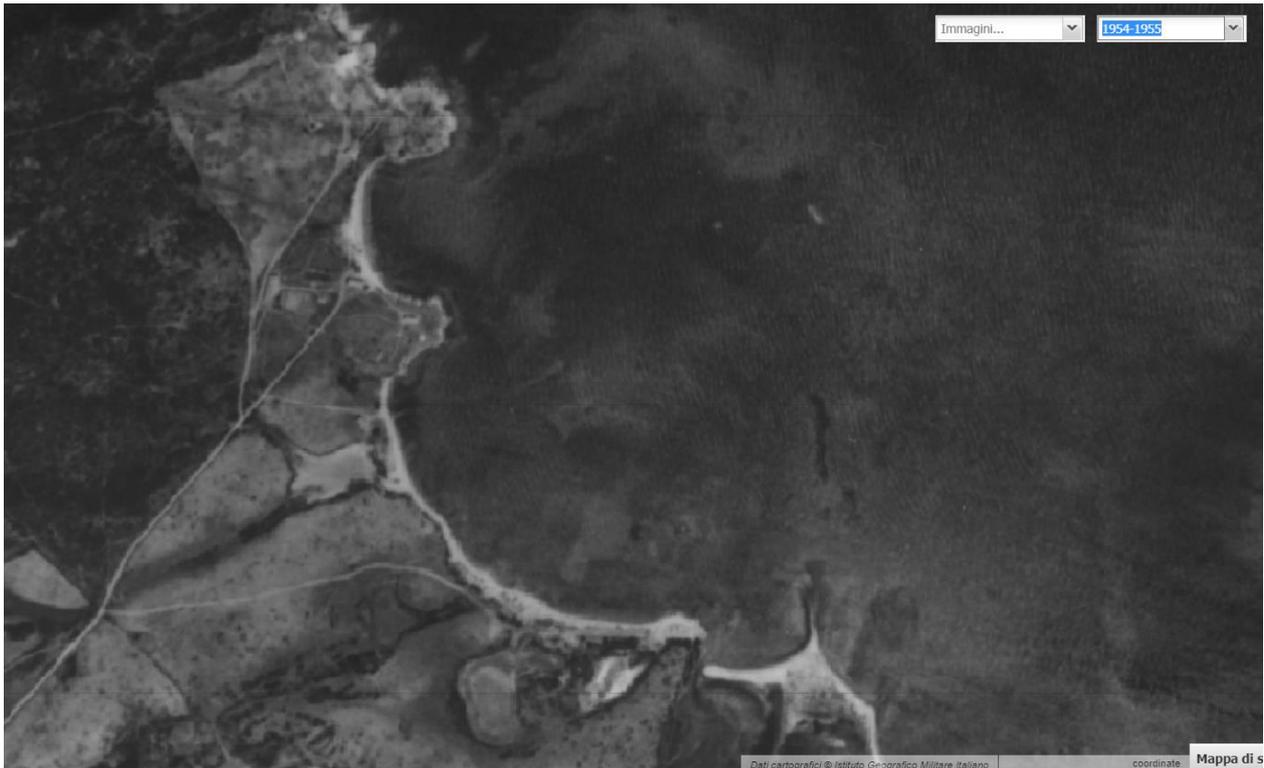


Figura 20 foto litorale 1954-55

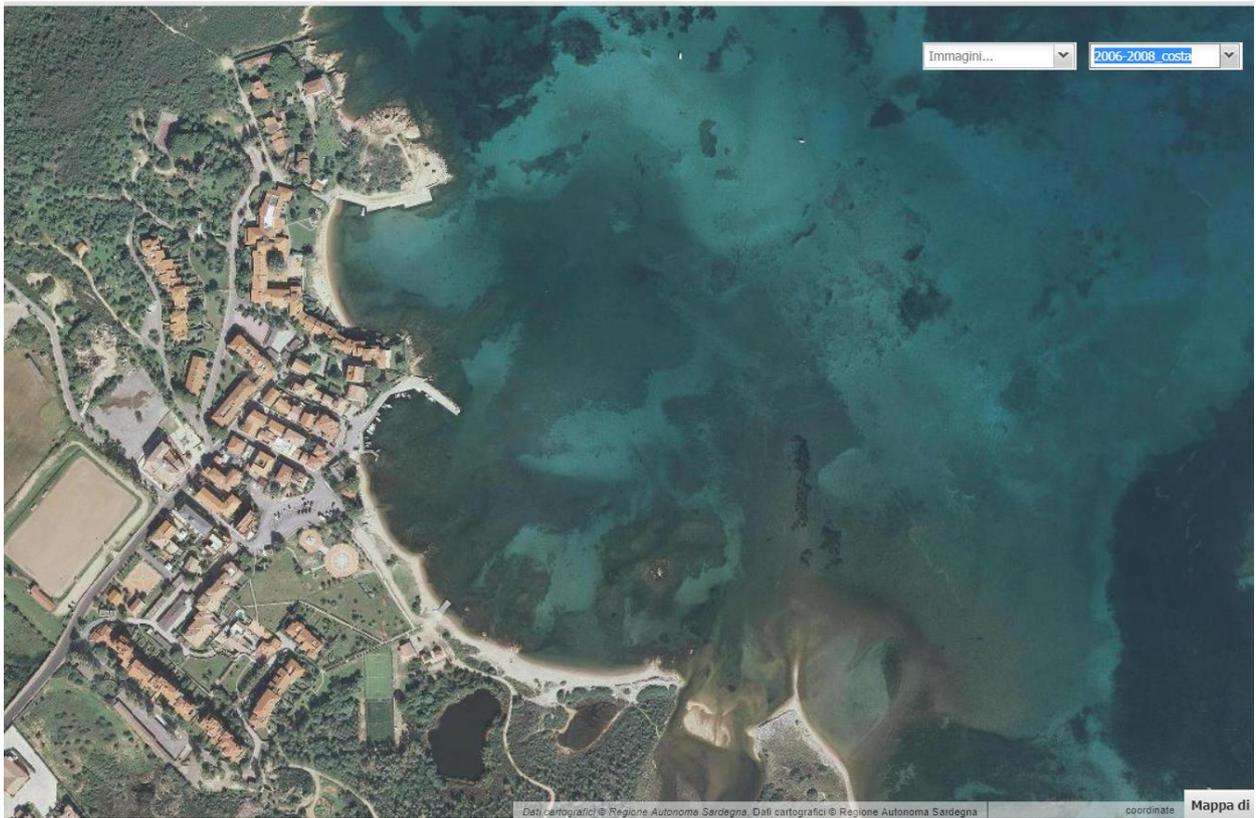


Figura 21 Foto litorale 2006-08

6.1 Analisi diacronica delle linee di riva

Attraverso il webgis sardegna fotoaeree, sono state raccolte le ortofoto storiche ed estratte le relative linee di riva.

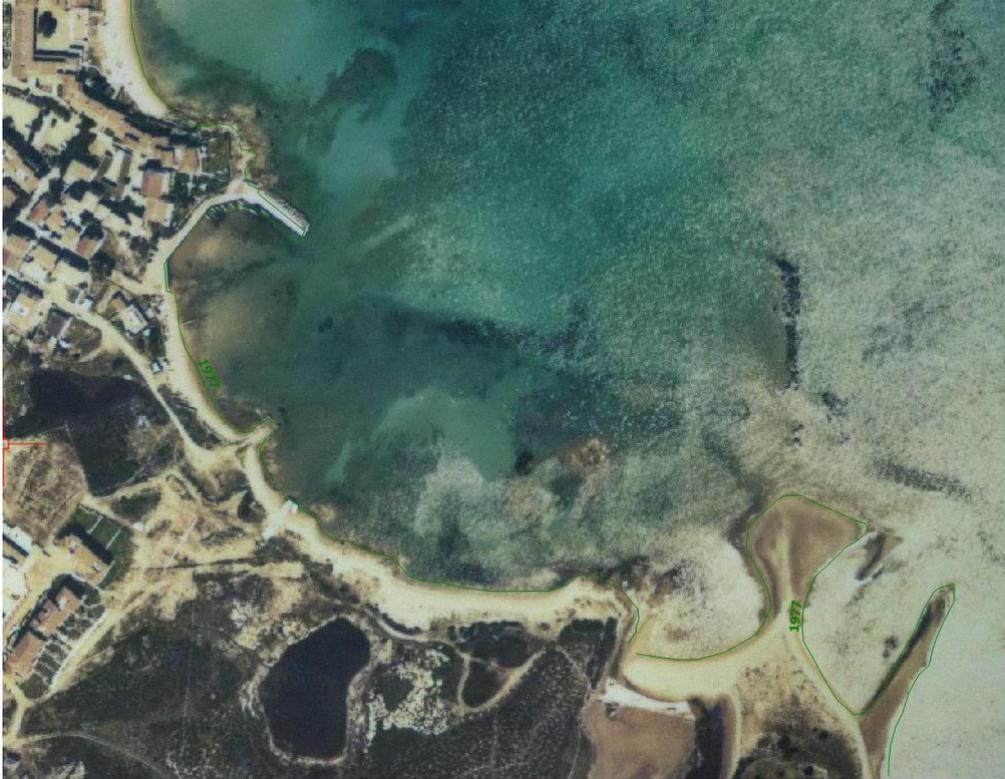


Figura 22 Ortofoto 1977



Figura 23 Ortofoto 1997

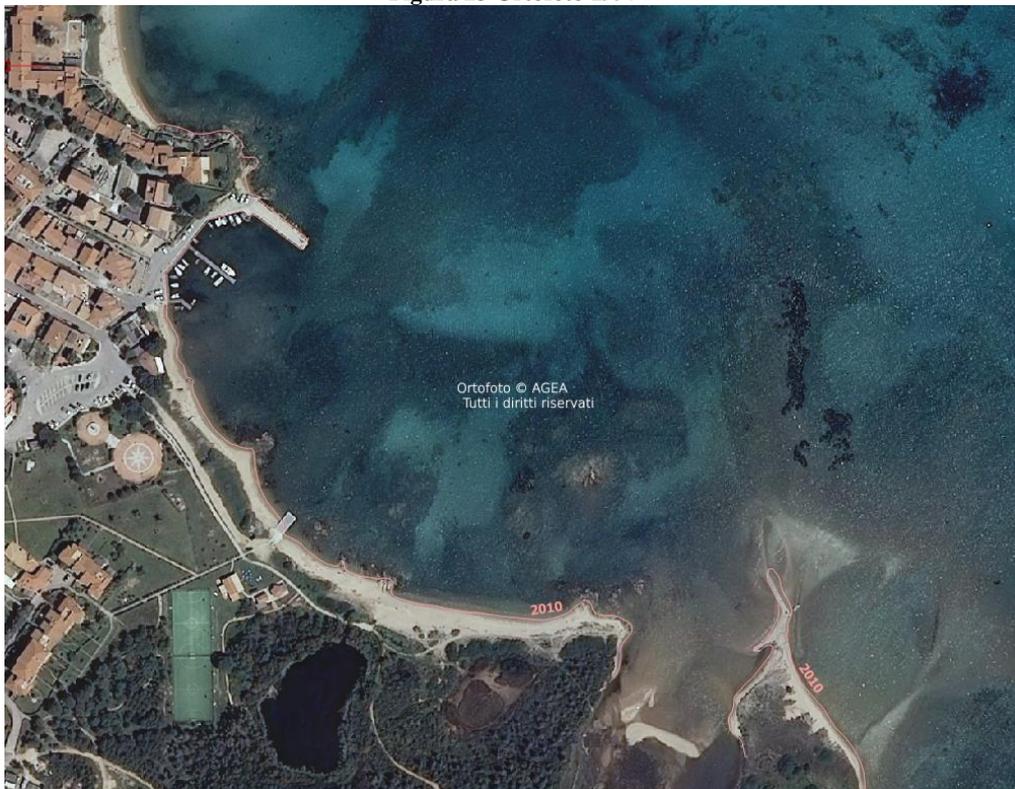


Figura 24 Ortofoto 2010

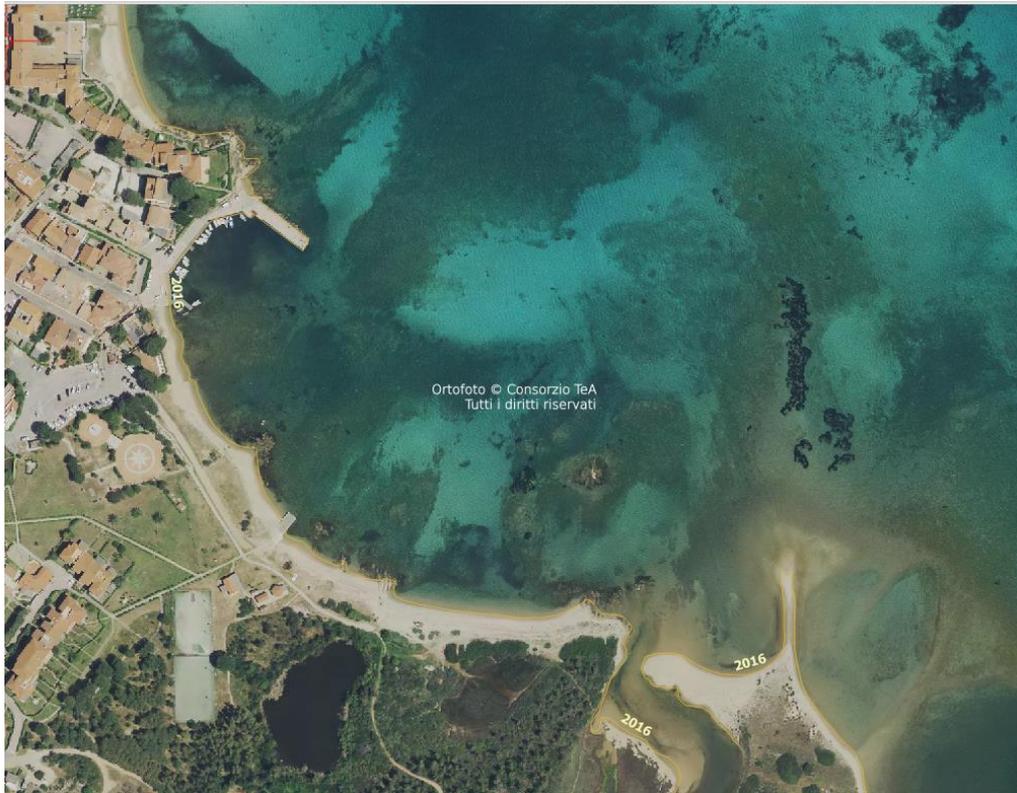


Figura 25 Ortofoto 2016

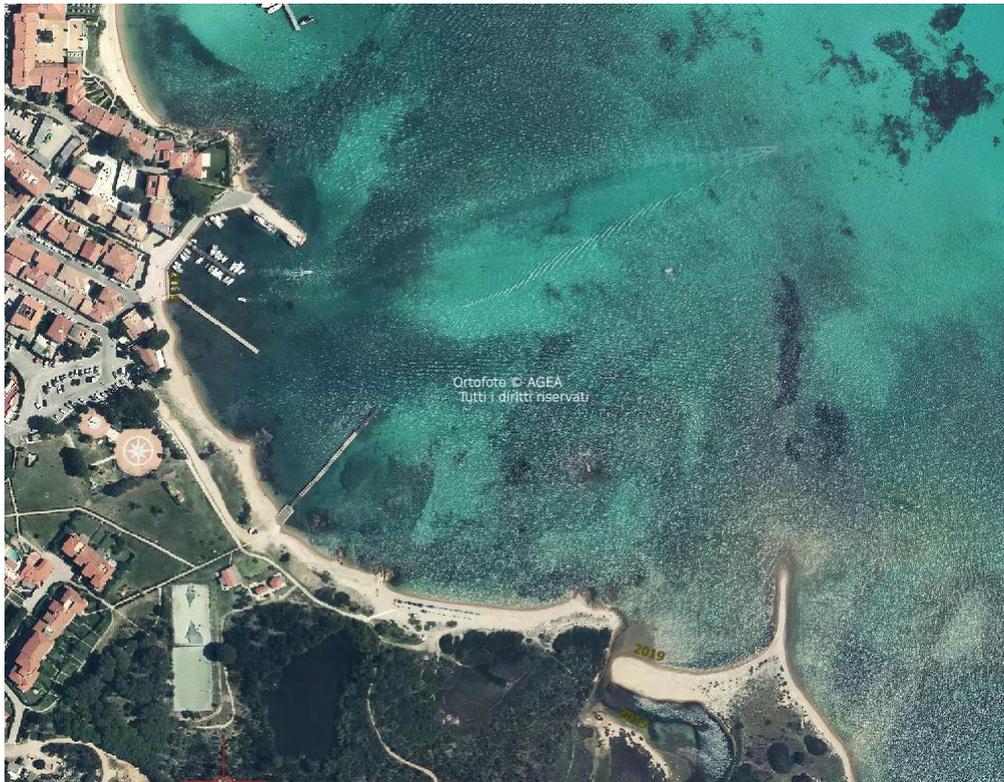


Figura 26 Ortofoto 2019

- ldr1997
- ldr2019
- ldr2016
- ldr2010
- ldr2008
- ldr1977

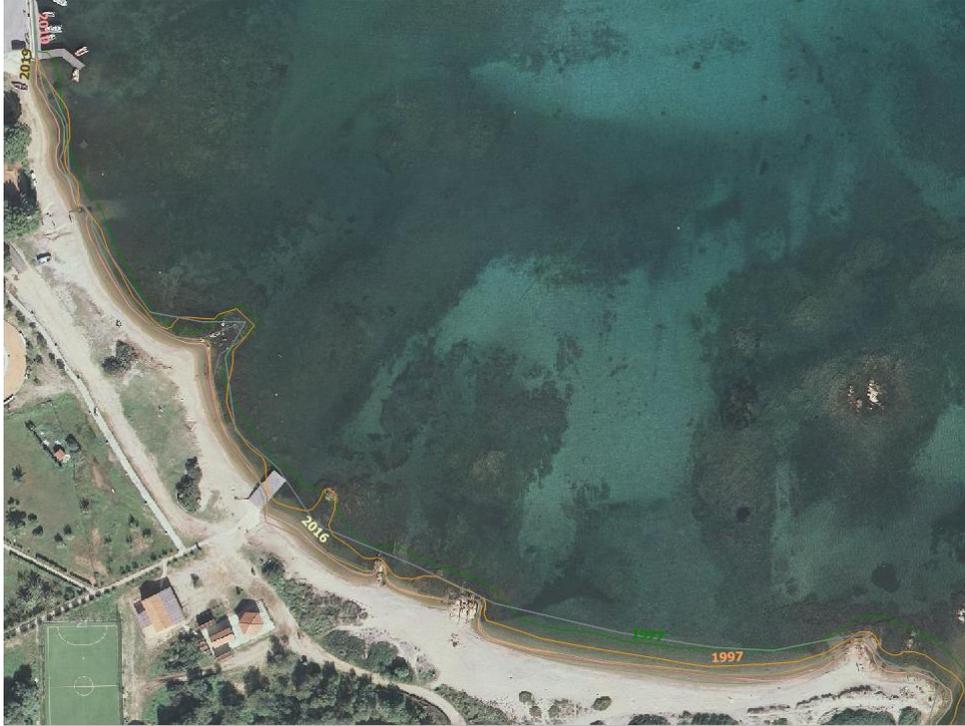
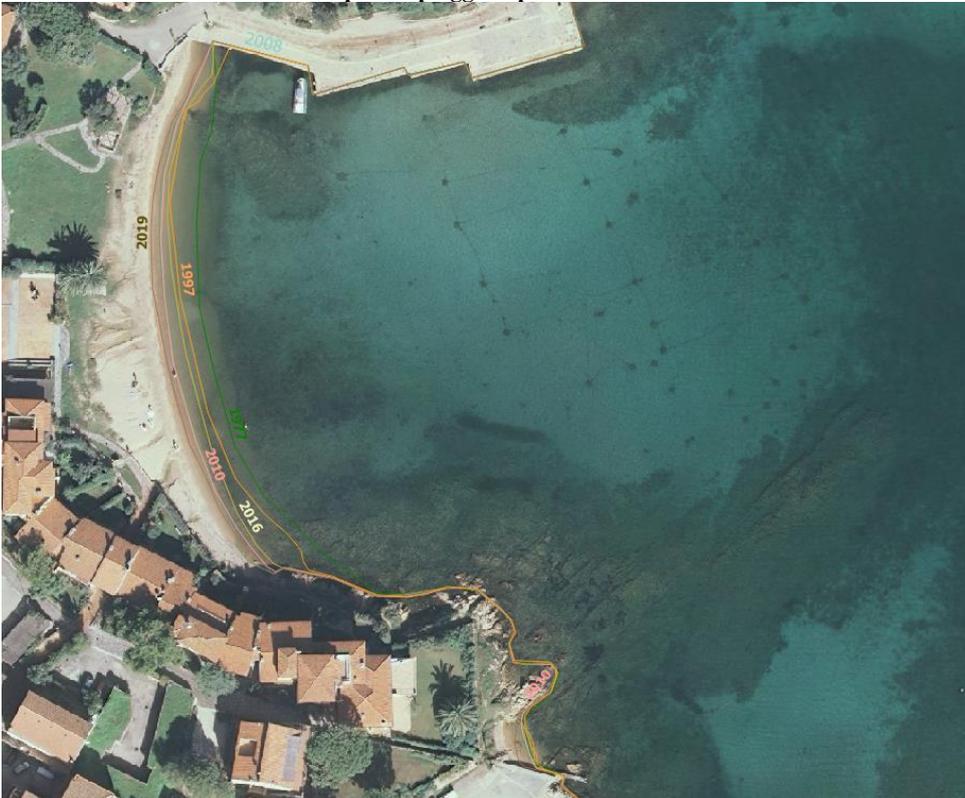


Figura 33 Confronto fra le linee di riva per le spiagge rispettivamente a sud e a nord dell'area di intervento



Da un esame qualitativo delle linee di riva così ricavate, è possibile osservare come tra la linea di riva più avanzata, del 1977, e quelle più arretrate, del 2008 e 2019, sussista una distanza massima di circa 9/10 m: tale distanza può essere considerata rientrante nelle fluttuazioni a scala stagionale e annuale del trasporto solido trasversale, dovuto agli eventi di mareggiate, mentre, di contro, non è possibile osservare una tendenza di evoluzione della spiaggia dovuta alla deriva longitudinale dei sedimenti, caratterizzata dal movimento di sedimento netto lungo una direzione preferenziale, che erodendo e ridepositandosi, causa, globalmente, a scale decennali, una rotazione della linea di riva: difatti, le linee di riva rilevate per il 2010 ed il 2016 risultano più avanzate sia della precedente relativa al 2008, sia della successiva relativa al 2019; la linea di riva del 2016 risulta avere minime variazioni rispetto a quella del 1997.

6.2 Simulazione delle correnti

Lo studio è completato da un'analisi dell'influenza delle opere rigide in progetto sul regime locale delle correnti. A questo scopo, a partire dai dati di moto ondoso, si è calcolata l'*onda morfologicamente equivalente* (OME), definibile come lo stato di mare che, dal punto di vista morfologico, sintetizza l'effetto indotto in un anno climatico medio dal clima ondoso. Uno studio delle correnti indotte utilizzando l'OME come forzante risulta pertanto rappresentativo delle correnti alla base dei regimi morfodinamici del sito in esame.

Le simulazioni sono state eseguite attraverso il modello CMS-FLOW dello US Army Corps of Engineers (USACE). Il modello sfrutta una formulazione equazioni di continuità e conservazione della quantità di moto per fluido incomprimibile in due dimensioni (Philipps 1977, Mei 1983, Svendsen 2006), e può essere utilizzato in accoppiamento a dati di moto ondoso come forzante.

6.2.1 Calcolo dell'Onda Morfologicamente Equivalente

Il calcolo dell'OME può effettuarsi a partire dalla conoscenza del flusso longitudinale di energia del moto ondoso di ciascun settore direzionale. L'onda morfologicamente equivalente di ciascun sottosettore si calcola mediando le singole altezze d'onda, appartenenti al medesimo settore, pesate col relativo valore di flusso di energia longitudinale, calcolato come:

$$P_{lbs} = 0.0038e\pi\rho H_{s0}^2 T_p \sqrt{|\cos\alpha_0|} \operatorname{sen}2\alpha_0$$

Dove:

- H_{s0} è l'altezza significativa al largo;
- T_p è il periodo di picco. Nell'ipotesi che lo spettro del moto ondoso sia ben rappresentabile dallo spettro JONSWAP medio ($\gamma = 3.3$) vale la relazione $T_p = 1.05 \sqrt{\frac{H_{0s}}{0.049}}$;
- α_0 è l'angolo che la cresta dell'onda forma con la linea di riva
- e è il coefficiente riduttivo rappresentativo della quota parte di energia che arriva sulla costa. Parte dell'energia del moto ondoso al largo infatti si perde durante la propagazione verso la zona dei frangenti, per vari motivi: resistenze tangenziali al fondo e nel fluido, frangimento parziale, ma soprattutto per l'apertura del settore che delimita la propagazione delle onde verso la costa. Si assume in questo caso $e = 1$ in quanto l'OME viene calcolato al largo e poi propagata.

A partire quindi dalla tabella bivariata di frequenza per i settori di esposizione della spiaggia:

Frequenze (%)		Intervalli Hs																					
Settore	Dir Media	[0, 0.5]	[0.5, 1]	[1, 1.5]	[1.5, 2]	[2, 2.5]	[2.5, 3]	[3, 3.5]	[3.5, 4]	[4, 4.5]	[4.5, 5]	[5, 5.5]	[5.5, 6]	[6, 6.5]	[6.5, 7]	[7, 7.5]	[7.5, 8]	[8, 8.5]	[8.5, 9]	[9, 9.5]	[9.5, 10]	[10.5, 11]	
		0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75	8.25	8.75	9.25	9.75	10.25	10.75	
[0, 15]	7,5	0,008	0,026	0,022	0,005	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[15, 30]	22,5	0,009	0,024	0,018	0,010	0,008	0,002	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[30, 45]	37,5	0,008	0,015	0,015	0,007	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[45, 60]	52,5	0,008	0,013	0,008	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[60, 75]	67,5	0,007	0,013	0,006	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[75, 90]	82,5	0,010	0,014	0,008	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[90, 105]	97,5	0,008	0,012	0,009	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[105, 120]	112,5	0,008	0,013	0,013	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[120, 135]	127,5	0,010	0,025	0,020	0,008	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[135, 150]	142,5	0,011	0,036	0,036	0,018	0,007	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[150, 135]	157,5	0,011	0,043	0,053	0,011	0,007	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[165, 180]	172,5	0,006	0,025	0,029	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[180, 195]	187,5	0,002	0,008	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[195, 210]	202,5	0,001	0,004	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[210, 225]	217,5	0,001	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[225, 240]	232,5	0,001	0,004	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[240, 255]	247,5	0,001	0,004	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[255, 270]	262,5	0,001	0,004	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[270, 285]	277,5	0,001	0,006	0,010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[285, 300]	292,5	0,001	0,008	0,014	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[300, 315]	307,5	0,001	0,010	0,018	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[315, 330]	322,5	0,002	0,011	0,019	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[330, 345]	337,5	0,003	0,013	0,018	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
[345, 360]	352,5	0,004	0,016	0,019	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Si calcola una nuova tabella contenente il fattore di flusso longitudinale di ciascun settore per ciascuna classe d'onda, adottando la direzione di esposizione della spiaggia pari a 55°N; i contributi così ricavati si sommano nei due settori parziali di provenienza (SSTi):

Progetto definitivo per il nuovo assetto diportistico del lungomare di Porto San Paolo

FATTORE DI FLUSSO LONGITUDINALE															PME1	0,00696		Pmei	
															PME2	-0,00066			
3,19E-05	0,000377	0,000732	0,000341	0,00023	0,000246	0,000176191	0,000161	3,54E-05	0	2,85E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002359
3,77E-05	0,000356	0,000599	0,000624	0,000793	0,000285	4,9749E-05	0,000299	0,000323	0,000254	0,000261	7,14E-05	0	0	0	0	0	0	0	0,003954
2,12E-05	0,000146	0,00033	0,000302	0,000231	5,15E-05	5,35692E-05	9,16E-05	2,42E-05	2,4E-07	1,95E-05	4,8E-05	0	0	0	0	0	0	0	0,00132
3,24E-06	1,96E-05	2,99E-05	2,96E-05	8,15E-06	0	0	0	0	4,83E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,54E-05
-1,3E-05	-9,4E-05	-0,00011	-7,2E-05	-9,2E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,0003
-3,7E-05	-0,00019	-0,00026	-0,00019	-5,1E-05	0	0	0	-1,3E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,00073
-3,3E-05	-0,00018	-0,00033	-0,00033	-0,00015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,00102
-2,6E-05	-0,00015	-0,00034	-0,00025	-8,8E-05	-1,1E-05	-1,58832E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,00088
-1,5E-05	-0,00014	-0,00025	-0,00019	-0,00011	-7,4E-05	-1,504E-05	0	-6,8E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,00081
-1E-06	-1,1E-05	-2,7E-05	-2,5E-05	-1,7E-05	-1,4E-05	-7,39842E-06	-6E-07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,0001
1,1E-05	0,000146	0,000418	0,000158	0,000175	9,53E-05	5,40591E-05	1,61E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001074
1,62E-05	0,000241	0,000661	0,00016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001078
7,35E-06	0,000114	0,000268	3E-05	0	0	0	0	1,77E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000437
3,56E-06	6,13E-05	0,000147	5,55E-06	4,58E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000222
2,52E-06	3,01E-05	7,67E-05	1,87E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000111
2,79E-07	5,34E-06	1,52E-05	1,16E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,2E-05
-1,3E-06	-2,6E-05	-6,9E-05	-1,7E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,00011
-2,3E-06	-5E-05	-0,00019	-4,4E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,00028
-4E-06	-9,3E-05	-0,00036	-6,6E-05	-1,9E-05	-7,2E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,00055
-4,5E-06	-9,6E-05	-0,00038	-0,00017	-1,8E-05	0	-7,94161E-06	5,17E-08	-1,8E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,00069
-2E-06	-5,5E-05	-0,00022	-8,6E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,00037
-1,8E-07	-3,5E-06	-1,4E-05	-5,6E-06	-7E-07	-3E-07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2,4E-05
2,61E-06	4,52E-05	0,000141	4,92E-05	2,06E-05	1,64E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00026
1,01E-05	0,000157	0,000425	0,000193	7,97E-05	1,4E-05	1,33083E-05	1,82E-05	1,2E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000922

$$P_M = (\sqrt{e}H_{0s})^{5/2} \sqrt{|\cos(DirN - Dir0)|} \text{sen}\{2(DirN - Dir0)\}$$

$$P_{Mei} = \sum_{j \in SSti} H_{0s}^{5/2} \sqrt{|\cos(DirN - Dir0j)|} \text{sen}\{2(DirN - Dir0j)\} f_j$$

I due contributi di flusso nei due settori parziali sono quindi utilizzati come pesi nel calcolo dell'altezza e della direzione dell'onda morfologicamente equivalente nei due settori di provenienza:

$$H_{s0ei} = \frac{\sum_{j \in SSti} H_{0s}^{7/2} \sqrt{|\cos(DirN - Dir0j)|} \text{sen}\{2(DirN - Dir0j)\} f_j}{P_{Mei}}$$

$$DirN - Dir_{ei} = \frac{\sum_{j \in SSti} (DirN - Dir_{ei}) H_{0s}^{5/2} \sqrt{|\cos(DirN - Dir0j)|} \text{sen}\{2(DirN - Dir0j)\} f_j}{P_{Mei}}$$

ONDE MORFOLOGICAMENTE EQUIVALENTI															H0sE1	2,941384 m			
															H0sE2	2,188977 m			
2,39E-05	0,000471	0,001282	0,000768	0,000632	0,000801	0,000660715	0,000683	0,000168	0	0,000164	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,83E-05	0,000445	0,001049	0,001405	0,00218	0,000927	0,000186559	0,001272	0,001536	0,001333	0,001499	0,000446	0	0	0	0	0	0	0	0
1,59E-05	0,000183	0,000577	0,000681	0,000636	0,000167	0,000200885	0,000389	0,000115	1,26E-06	0,000112	0,0003	0	0	0	0	0	0	0	0
2,43E-06	2,46E-05	5,23E-05	6,66E-05	2,24E-05	0	0	0	0	2,54E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1E-05	-0,00012	-0,00019	-0,00016	-2,5E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2,7E-05	-0,00024	-0,00045	-0,00042	-0,00014	0	0	0	-5,4E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2,5E-05	-0,00022	-0,00058	-0,00074	-0,00041	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2E-05	-0,00019	-0,0006	-0,00055	-0,00024	-3,6E-05	-5,95621E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,1E-05	-0,00017	-0,00045	-0,00043	-0,0003	-0,00024	-5,63998E-05	0	-3,2E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-7,5E-07	-1,4E-05	-4,7E-05	-5,7E-05	-4,6E-05	-4,5E-05	-2,7441E-05	-2,5E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8,23E-06	0,000183	0,000732	0,000355	0,000482	0,00031	0,000202722	6,83E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,21E-05	0,000301	0,001157	0,000359	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,52E-06	0,000143	0,000469	6,76E-05	0	0	0	0	8,4E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,67E-06	7,66E-05	0,000256	1,25E-05	1,26E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,89E-06	3,76E-05	0,000134	4,2E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,1E-07	6,68E-06	2,66E-05	2,61E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-9,4E-07	-3,3E-05	-0,00012	-3,8E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,7E-06	-6,2E-05	-0,00033	-9,8E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3E-06	-0,00012	-0,00063	-0,00015	-5,2E-05	-2,3E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,4E-06	-0,00012	-0,00066	-0,00038	-5E-05	0	-2,9781E-05	2,2E-07	0	-9,7E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,5E-06	-6,8E-05	-0,00039	-0,00019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,3E-07	-4,4E-06	-2,4E-05	-1,3E-05	-1,9E-06	-9,9E-07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,96E-06	5,65E-05	0,000247	0,000111	5,66E-05	5,34E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,59E-06	0,000196	0,000743	0,000434	0,000219	4,54E-05	4,9906E-05	7,73E-05	5,71E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

6.2.2 Risultati delle simulazioni

Sono state effettuate simulazioni delle correnti sullo stato attuale e sullo stato di progetto (con le sole opere rigide) utilizzando sia il solo input mareale, sia utilizzando l'OME come forzante ondosa (caratteristiche dell'onda, frangimento, radiation stress).

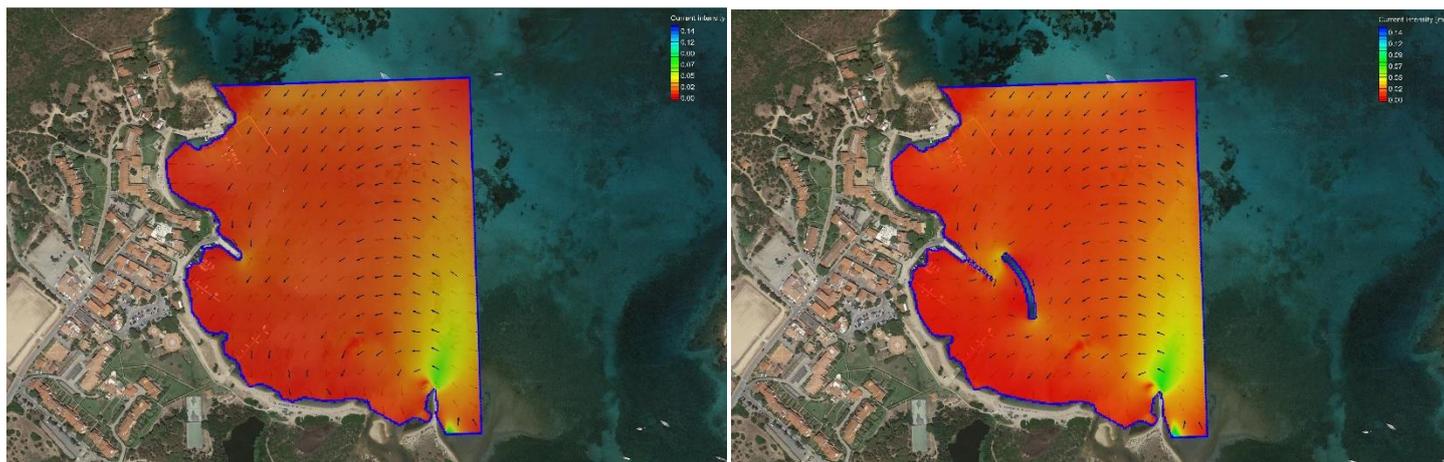


Figura 34 Simulazione correnti di marea Ante e Post

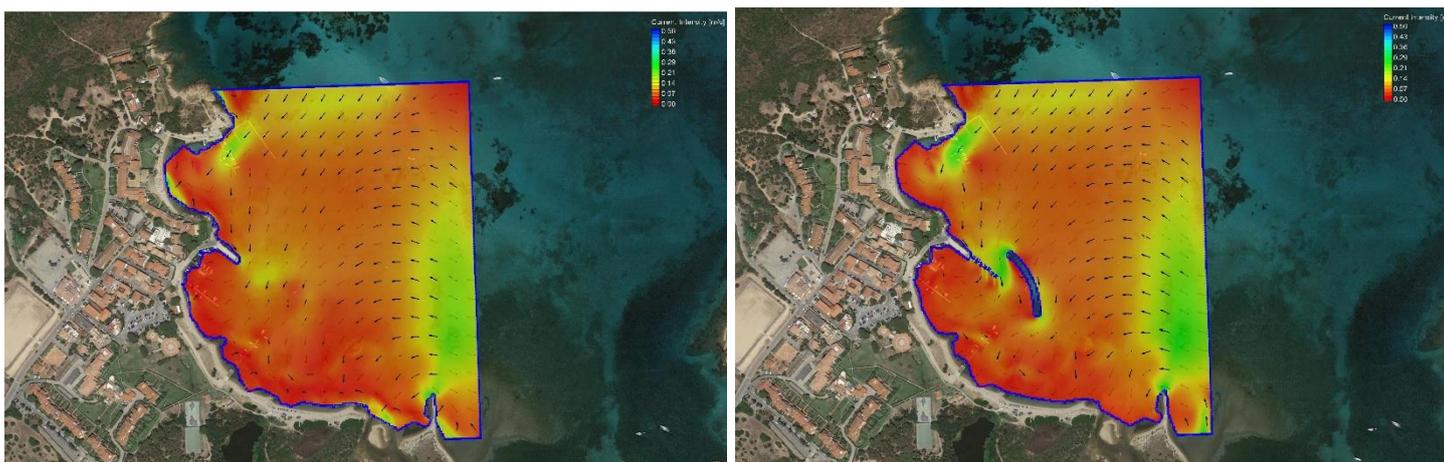


Figura 35 Simulazione correnti forzate da OME Ante e Post

Dalle mappature delle correnti risultanti dalle simulazioni è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Nel caso delle correnti di marea, considerata anche la modesta entità delle stesse, le opere in progetto non causano alcuna differenza sensibile rispetto allo stato attuale, ad eccezione delle variazioni di moto locali strettamente necessarie al superamento degli ostacoli;
- Dalle simulazioni forzate dall'*Onda Morfologicamente Equivalente* è possibile osservare come le correnti longitudinali lungo la spiaggia siano di entità estremamente modesta e, come osservato dall'analisi diacronica delle linee di riva, si possa considerare estremamente limitata o pressoché nulla una movimentazione longitudinale netta di sedimenti, da cui le principali variazioni nella linea di riva rilevata da assolvere prevalentemente a fluttuazioni di tipo stagionale;
- L'effetto sulle correnti delle opere rigide in progetto (antemurale e molo a giorno) è pressoché trascurabile sul litorale; si crea tuttavia un'accelerazione delle stesse ai bordi dell'antemurale, in particolare nel bordo tra lo stesso e il molo. Tale accelerazione di corrente non potrà avere significativi effetti sui fondali in quanto tale fenomeno viene localizzato su un fondale costituito da ciottoli e sabbia grossolana, semmai potrà contribuire ad evitare l'imbonimento dell'imboccatura del bacino protetto.
- In relazione alla presenza della foce del Riu Scalamala, che con il suo apporto solido costituisce un serbatoio di sedimenti che, trasportati dalle correnti, mantengono in equilibrio le spiagge circostanti, si può constatare che l'assenza di variazioni di queste, se non a scala strettamente localizzata in prossimità dell'antemurale, non interferisca con l'equilibrio della movimentazione di tali sedimenti. In relazione al grafico riportato in Figura 36, i valori di corrente di intensità circa pari a 0.2 m/s sono potenzialmente in grado di movimentare granelli di sabbia grossolani, fino ad un diametro di circa 0.9 mm. Procedendo verso costa, si riscontrano valori inferiori delle correnti, nell'ordine di grandezza inferiore ai 0.1 m/s che consentono la movimentazione di una frazione di sabbie più fine, approssimativamente pari a 0.5 mm, che è quella che tendenzialmente si deposita nelle spiagge garantendone l'equilibrio morfodinamico.
- Non è possibile identificare, se non riconducibile a particolari eventi di mareggiate intense, un regime di correnti in grado di movimentare i sedimenti verso nord oltre il promontorio che chiude la baia di Porto San Paolo, pertanto si può ritenere pressoché nullo il flusso netto di sedimenti annualmente in uscita in direttrice nord.

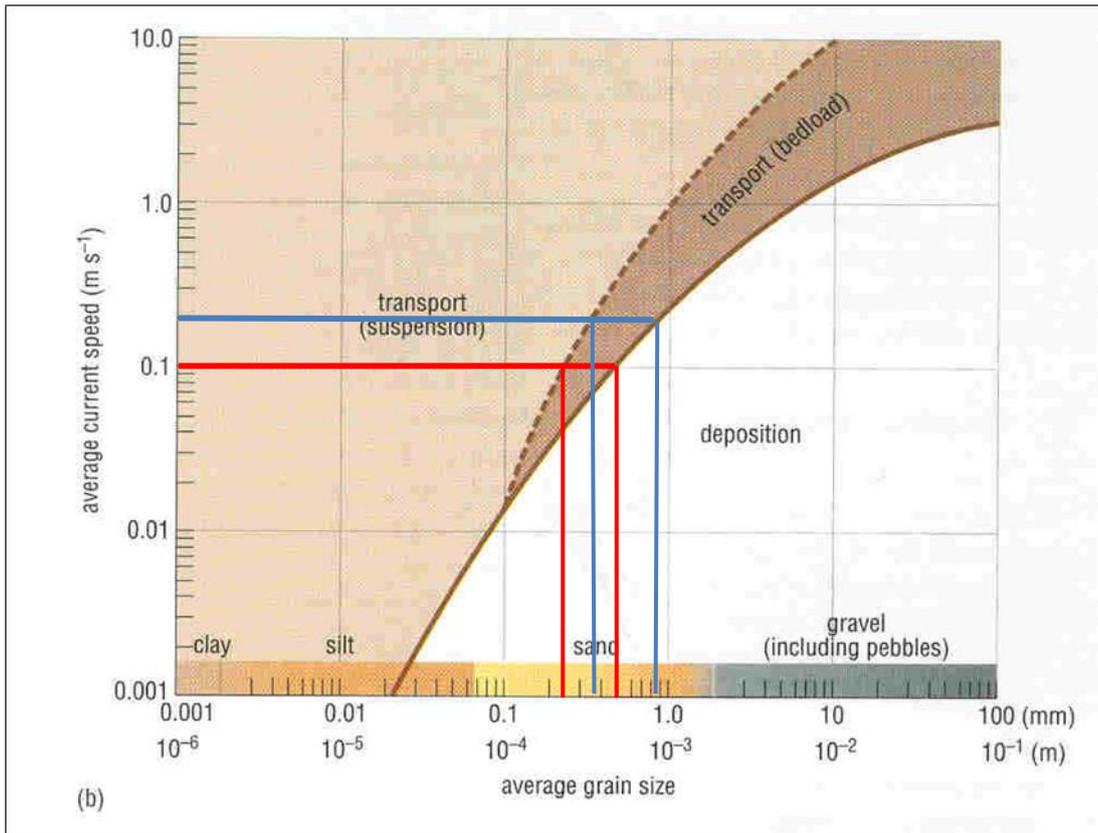


Figura 30 Trasporto dei sedimenti in funzione della velocità media della corrente