HydroSoil S.r.l.
via Panà 56/a - 35027 Noventa Padovana (PD) - tel.049 8703933 fax 049 8707868 - e.mail: info@hydrosoil.com
C.F./P. I.V.A. 03349460281 - R.I. PD-1998-60718 - R.E.A. 305234 - cap. soc. € 15.600,00 int vers.

Committente:

AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

MODELLISTICA NUMERICA RELATIVA ALLA PROPAGAZIONE E RISALITA DEL MOTO ONDOSO NELL'INTORNO DELLA FOCE DEL TORRENTE QUILIANO



Elaborato UNICO

RELAZIONE TECNICA

Professionisti: **Ing. MASSIMO TONDELLO**
Ordine ingegneri della provincia di Padova n. 2771

Commessa: HS621-12	REV: 01	Data: Novembre 2012

INDICE

1 PREMESSA 3

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO 4

3 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO 6

4 CARATTERISTICHE METEOMARINE AL LARGO 7

4.1 CLIMA ONDOSO 7

4.1.1 Statistica degli eventi estremi di moto ondoso 11

4.2 LIVELLI DEL MARE 14

4.2.1 Statistica degli eventi estremi di marea 15

5 PROPAGAZIONE DELLE MAREGGIATE ESTREME 16

5.1 SETTAGGIO DEL MODELLO 16

5.2 CARATTERISTICHE DELLE MAREGGIATE ESTREME 18

5.3 RISULTATI DELLE PROPAGAZIONI SOTTOCOSTA DELLE MAREGGIATE ESTREME 19

6 RISALITA DEL MOTO ONDOSO 22

6.1 CONDIZIONI METEOMARINE ANALIZZATE 24

6.2 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DELLA RISALITA DEL MOTO ONDOSO 25

7 CONSIDERAZIONI SULLA MANUTENZIONE DEL LITORALE 27

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 2.1 - Inquadramento geografico del paraggio 4
Fig. 2.2 – Dettaglio area di intervento 5
Fig. 3.1 – Planimetria di progetto – Dettaglio area di intervento 6
Fig. 4.1 – Punto U.K.M.O. 44.0°N ; 8.73°E 7
Fig. 4.2 – Rosa delle registrazioni al largo del paraggio di Vado Ligure Dati U.K.M.O. (periodo 1987÷2008) 9
Fig. 4.3 – Distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso con H_s maggiore di 2 m Dati U.K.M.O. (periodo 1987÷2008) 10
Fig. 4.4 – Correlazione H_s-T_z, dati U.K.M.O. 1987÷2008 riferita al settore di traversia 100°÷150°N (soglia H_s = 1 m) 13
Fig. 4.5 – Elaborazione statistica delle onde estreme al largo del paraggio di Vado Ligure riferita al settore di traversia 100°÷150°N (soglia H_s = 1 m) 13
Fig. 5.1 – Dominio di calcolo STWAVE impiegato per lo studio della propagazione 17
Fig. 5.2 – Direzioni di provenienza degli eventi estremi 18
Fig. 5.3 – TEST 1: Onda con tempo di ritorno 1 anno, Caratteristiche al largo: H_S = 2.1 m, T_P = 7.0 s, Dir. = 135°N, Sovralzo = +0.38 m s.m.m. 20
Fig. 5.4 – TEST 2: Onda con tempo di ritorno 50 anni, Caratteristiche al largo: H_S = 4.6 m, T_P = 10.4 s, Dir. = 135°N, Sovralzo = +0.68 m s.m.m. 21
Fig. 6.1 – Planimetria con ubicazione del profilo di calcolo della risalita (sezione 20) 23
Fig. 6.2 – Profilo di calcolo (sezione 20) 23
Fig. 6.3 – TEST 1: Mareggiata di Scirocco caratterizzata da un tempo di ritorno di 1 anno (TEST 1) 25
Fig. 6.4 – TEST 2: Mareggiata di Scirocco caratterizzata da un tempo di ritorno di 50 anni (TEST 2) 26
Fig. 7.1 – Evoluzione morfologica del litorale in configurazione attuale (cfr. "*Studi su modello relativi al trasporto solido nell'intorno della foce del torrente Quiliano"*, ottobre 2011) 28

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 4.1 – Registrazioni suddivise per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza Dati U.K.M.O. (periodo 1987÷2008) 8
Tab. 4.2 – Risultati statistica degli eventi estremi per il settore di Scirocco (100°÷150°N) 12
Tab. 4.3 – Valori massimi annuali della marea metereologica 14
Tab. 4.4 – Risultati dell'analisi statistica dei livelli estremi 15
Tab. 5.1 – Caratteristiche delle mareggiate estreme propagate con il codice di calcolo STWAVE 19
Tab. 6.1 – Caratteristiche delle mareggiate analizzate al largo 24
Tab. 6.2 – Caratteristiche TEST 1 – Mareggiata caratterizzata da un tempo di ritorno di 1 anno 24
Tab. 6.3 – Caratteristiche TEST 2 – Mareggiata caratterizzata da un tempo di ritorno di 50 anni 24

Elenco degli allegati:

Allegato A Descrizione dei codici di calcolo

1 PREMESSA

La società Hydrosoil S.r.l. di Noventa Padovana ha ricevuto dall'Autorità Portuale di Savona l'incarico per la redazione di uno studio sulla "modellistica numerica relativa alla propagazione e risalita del moto ondoso nell'intorno della foce del torrente Quiliano".

Più in dettaglio sono state sviluppate le seguenti attività:

- studio su modello matematico della propagazione delle mareggiate estreme, caratterizzate da tempi di ritorno di 1 e 50 anni, nella rada di Vado;
- studio su modello matematico della risalita del moto ondoso sulla spiaggia in sinistra della foce del torrente Quiliano, durante mareggiate estreme (T_R 1 e 50 anni) e in concomitanza a livelli estremi di marea (caratterizzati dal medesimo tempo di ritorno);
- considerazioni sul trasporto solido nell'intorno dell'area di intervento, finalizzate alla definizione di un piano di ripascimento annuale o pluriennale per la manutenzione del litorale.

Lo studio è stato condotto con l'ausilio di idonei modelli matematici in grado di simulare la propagazione del moto ondoso (codice di calcolo STWAVE) e la risalita del moto ondoso (codice di calcolo SBEACH) nel tratto di costa interessato dall'intervento.

Le simulazioni sono state condotte considerando l'assetto attuale delle opere del porto di Vado; per quanto riguarda, invece, l'area oggetto di intervento sono state rappresentate le opere previste in progetto, il cui layout è stato fornito dal Committente. Nel caso specifico il progetto prevede l'ampliamento del terrapieno compreso tra la foce del torrente Quiliano e villa Gavotti e la realizzazione di un ripascimento strutturale dell'arenile compreso tra il nuovo terrapieno e la foce del torrente.
Per quanto riguarda, invece, la batimetria impiegata per la costruzione delle griglie di calcolo sono stati utilizzati la Carta Nautica dell'I.I.M. e un rilievo locale fornito dal Committente (eseguito nel marzo 2010); il rilievo copre il tratto di litorale compreso tra il pontile Vadoil (a SW) e villa Zanelli (a NE). La batimetria è stata opportunamente integrata con un rilievo antecedente (datato marzo 2003), eseguito nell'ambito di un precedente studio (cfr. "*Approfondimento dello studio su modello matematico del P.R.P. relativo alla spiaggia Foce Letimbro – Foce Quiliano"*, redatto dall'Università di Padova – Dipartimento IMAGE per conto dell'Autorità Portuale di Savona, marzo 2004).
Le caratteristiche delle mareggiate estreme considerate nelle analisi sono state ricavate da un precedente studio fornito dal Committente (cfr. "Relazione Meteomarina" relativa alla *"Progettazione definitiva ed esecutiva, esecuzione dei lavori della nuova piastra multifunzionale del Porto di Vado Ligure e gestione della parte relativa al terminal contenitori"* redatto da Technital S.p.A per conto dell'Autorità Portuale di Savona, nel giugno 2009).

Il presente studio fa seguito ad altre attività condotte per il medesimo Committente relativamente allo studio della dinamica litoranea locale e della rada di Vado, nel suo assetto attuale e in quelli conseguenti alla realizzazione totale o parziale delle opere previste dal vigente P.R.P.; va evidenziato che l'area di interesse è una di quelle che maggiormente risentiranno di tali interventi.

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il tratto di litorale oggetto di studio è situato sulla costa occidentale della Regione Liguria, in provincia di Savona, ed è compreso tra la foce del Torrente Letimbro, a Nord-Est, e il porto di Vado, a Sud-Ovest (Fig. 2.1). Più in dettaglio, l'area di interesse è ubicata nell'intorno della foce del torrente Quiliano.



Fig. 2.1 - Inquadramento geografico del paraggio

Il tratto di spiaggia oggetto di intervento si estende tra Villa Gavotti e il pontile Tirreno Power (Fig. 2.2). Tra Villa Gavotti e la foce del Torrente Quiliano è già presente un terrapieno, di cui si prevede appunto l'ampliamento. Il terrapieno è attualmente delimitato verso mare da una scogliera radente in massi naturali che versa in condizioni precarie, sia come sagoma che come caratteristiche dei massi della mantellata.

L'armatura di foce del torrente Quiliano è costituita da due pennelli; il pennello in destra idrografica è stato recentemente spostato verso Sud in seguito all'ampliamento dello sbocco a mare del torrente.
A Sud, a ridosso dell'armatura di foce, è presente un pontile su pali (pontile I.P.), recentemente accorciato.
Procedendo ancora verso Sud, in prossimità del pontile Tirreno Power, si trova un cantiere nautico e un secondo terrapieno, delimitato a mare da un scogliera radente in massi naturali.
Il pontile Tirreno Power, che si estende verso il largo per un lunghezza di circa 400 m, è su pali; in corrispondenza del tracciato del pontile, sul fondo, è presente uno scatolare.



Fig. 2.2 – Dettaglio area di intervento

3 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

Il progetto prevede la riqualificazione dell'area pubblica di Zinola, con la demolizione dei fabbricati preesistenti, la bonifica dell'arenile esistente e la riprofilatura dell'attuale linea di costa. Di seguito, nella Fig. 3.1, si riporta un dettaglio della planimetria degli interventi.
L'intervento di riprofilatura della costa consiste nella realizzazione di una nuova opera di difesa foranea con tipologia a gettata. La nuova scogliera sarà realizzata con un nucleo in tout-venant, sormontato da uno strato filtro in scogliera di seconda categoria e una mantellata in scogliera di terza categoria, su tutto lo sviluppo longitudinale, e di quarta categoria, in testata. L'opera sarà corredata di berma al piede, finalizzata al contenimento della tracimazione ondosa.
L'opera di difesa consentirà la creazione di un nuovo terrapieno delimitato dalla restante porzione di litorale da un pennello di chiusura in scogliera, sormontato da un muro di contenimento in elementi prefabbricati rinverdibili. Tale terrapieno sarà destinato ad accogliere attività ricreative ad uso pubblico già definite dal Comune di Savona.
É previsto infine un ripascimento strutturale dell'arenile compreso tra il nuovo terrapieno e la foce del torrente Quiliano; il ripascimento verrà realizzato con materiale analogo a quello presente in sito sulla spiaggia emersa, caratterizzato da un D_{50} pari a 4 mm. Va evidenziato che il ripascimento sarà realizzato con una granulometria più grossolana di quella attualmente presente nella spiaggia sommersa e che ne risulterà un profilo trasversale di spiaggia localmente più ripido.
La realizzazione del ripascimento consentirà sia di collegare le diverse quote che si verranno a creare con la realizzazione del terrapieno, sia di rendere il sistema stabile sotto il profilo del trasporto litoraneo, non intercettando il trasporto solido annuale proveniente dal Quiliano e mantenendo l'attuale bilancio dei sedimenti pressoché invariato.

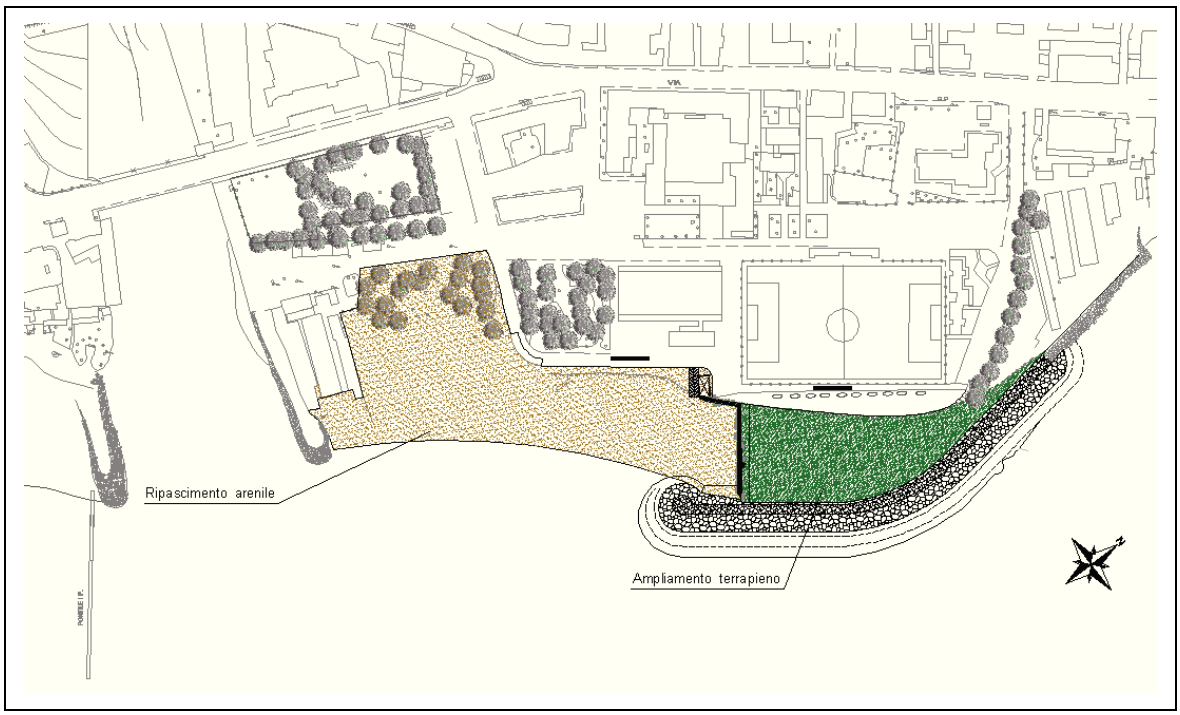


Fig. 3.1 – Planimetria di progetto – Dettaglio area di intervento

4 CARATTERISTICHE METEOMARINE AL LARGO

Come accennato in premessa le caratteristiche meteomarine del paraggio, utilizzate per la definizione delle mareggiate estreme, sono state ricavate da un precedente studio fornito dal Committente.
Nel caso specifico si è fatto riferimento ai contenuti della "Relazione Meteomarina" relativa alla *"Progettazione definitiva ed esecutiva, esecuzione dei lavori della nuova piastra multifunzionale del Porto di Vado Ligure e gestione della parte relativa al terminal contenitori"* (redatta da Technital S.p.A per conto dell'Autorità Portuale di Savona, nel giugno 2009).
Si riporta di seguito una breve descrizione del clima ondoso al largo e dei livelli di marea per il paraggio di Vado Ligure (estratti dalla "Relazione Meteomarina" di Technital S.p.A. di giugno 2009), con particolare riferimento alle analisi statistiche degli eventi estremi di marea e del moto ondoso.

4.1 Clima ondoso

Il clima ondoso al largo del paraggio oggetto di studio è stato definito utilizzando i dati dello U.K.M.O., ricostruiti con il modello European Wave Model nel punto di coordinate 44° N e 8.74° E, situato nel Mar Ligure tra Imperia e Genova su un fondale di oltre 1000 m (Fig. 4.1); tali dati, acquisiti dal Centro Meteorologico di Bracknell, si riferiscono al ventennio 1987÷2008.
I dati dello U.K.M.O., costituiti da registrazioni triorarie, sono stati opportunamente elaborati in modo da ottenere il clima delle onde in forma di tabelle delle frequenze, organizzate secondo classi di direzione intervallate di 10° e di altezza d'onda significativa con ampiezza di 0.5 m.

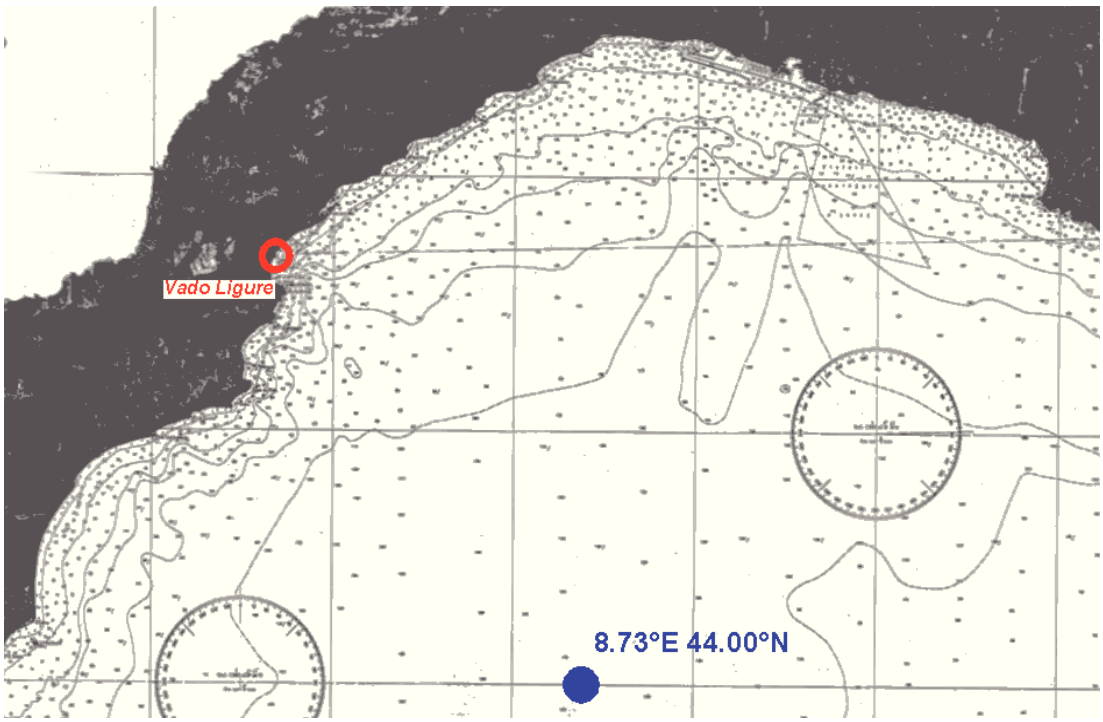


Fig. 4.1 – Punto U.K.M.O. 44.0°N ; 8.73°E

Dalla conformazione geografica del paraggio si evince che la rada di Vado ed il litorale compreso tra il Porto di Vado e il Porto di Savona sono interessati dalle onde provenienti dal I e II quadrante (settore 50°÷190°N), mentre le mareggiate provenienti da III quadrante risultano schermate dalla diga foranea del porto di Vado.

Nella successiva Tab. 4.1 sono riportate le caratteristiche delle onde "al largo" (punto U.K.M.O.), ordinate per classi di direzione di provenienza e altezza d'onda significativa.

Hs (m)	≥ 0	≥ 0.25	≥ 0.75	≥ 1.25	≥ 1.75	≥ 2.25	≥ 2.75	≥ 3.25	≥ 3.75	≥ 4.25	≥ 4.75	Tot.
DIREZIONE °N	< 0.25	< 0.75	< 1.25	< 1.75	< 2.25	< 2.75	< 3.25	< 3.75	< 4.25	< 4.75	< 5.25	
5	0.694	1.614	1.092	0.345	0.065	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.832
15	0.415	1.495	0.860	0.223	0.039	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.036
25	0.424	1.843	0.836	0.193	0.033	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.331
35	0.328	1.479	0.704	0.154	0.019	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.686
45	0.303	1.319	0.506	0.100	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.271
55	0.252	0.866	0.289	0.068	0.019	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.500
65	0.251	0.729	0.282	0.098	0.037	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.398
75	0.228	0.568	0.163	0.084	0.018	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.065
85	0.226	0.522	0.121	0.046	0.019	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.939
95	0.235	0.482	0.109	0.042	0.019	0.011	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.899
105	0.196	0.417	0.112	0.033	0.007	0.002	0.002	0.002	0.004	0.000	0.000	0.774
115	0.224	0.445	0.131	0.039	0.028	0.004	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.876
125	0.240	0.559	0.159	0.056	0.026	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	1.044
135	0.336	1.463	0.505	0.161	0.046	0.016	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	2.530
145	0.401	1.861	0.818	0.289	0.138	0.030	0.016	0.004	0.000	0.000	0.000	3.557
155	0.776	2.681	0.661	0.168	0.058	0.014	0.009	0.007	0.000	0.000	0.000	4.373
165	0.440	1.510	0.501	0.166	0.040	0.019	0.019	0.002	0.002	0.000	0.000	2.700
175	0.489	1.526	0.503	0.154	0.044	0.030	0.007	0.002	0.000	0.000	0.000	2.754
185	0.606	1.959	0.887	0.370	0.105	0.063	0.018	0.011	0.002	0.000	0.000	4.019
195	0.878	3.736	2.376	1.263	0.494	0.159	0.054	0.012	0.011	0.007	0.002	8.992
205	0.890	5.770	2.945	1.344	0.552	0.175	0.067	0.025	0.011	0.005	0.000	11.783
215	0.836	5.158	2.541	0.986	0.310	0.077	0.035	0.014	0.002	0.000	0.000	9.959
225	1.458	6.464	2.358	0.499	0.063	0.014	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	10.858
235	0.647	3.163	0.866	0.112	0.026	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	4.817
245	0.566	1.207	0.098	0.012	0.007	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.894
255	0.217	0.119	0.014	0.009	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.364
265	0.170	0.100	0.016	0.007	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.294
275	0.165	0.077	0.016	0.005	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.266
285	0.144	0.070	0.011	0.002	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.231
295	0.156	0.065	0.012	0.012	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.249
305	0.126	0.063	0.026	0.004	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.224
315	0.121	0.109	0.023	0.014	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.273
325	0.186	0.233	0.060	0.011	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.491
335	0.223	0.760	0.189	0.047	0.018	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.240
345	0.258	0.711	0.454	0.109	0.044	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.582
355	0.315	1.276	0.957	0.272	0.061	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.896
Tot.	14.418	52.416	22.199	7.497	2.400	0.706	0.231	0.086	0.032	0.012	0.002	100.00

Tab. 4.1 – Registrazioni suddivise per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza Dati U.K.M.O. (periodo 1987÷2008)

In Fig. 4.2 è riportata la rosa delle registrazioni ricostruita elaborando il ventennio di dati disponibile; nel grafico è stato rappresentato anche il settore di traversia di interesse (50 °÷190°N), in modo tale da evidenziare le direzioni di provenienza delle onde di interesse per il paraggio di Vado Ligure. Si osserva che le mareggiate più frequenti provengono da Tramontana-Grecale (0°÷30°N) e da Libeccio (210°N); tali direzioni sono comunque esterne al settore di interesse. All'interno del settore di traversia del paraggio, invece, le mareggiate più frequenti provengono da Scirocco (120°÷150°N).

Per evidenziare le caratteristiche degli eventi di moto ondoso più significativi occorsi nel ventennio è stato ricostruito il diagramma polare degli eventi di moto ondoso triorari caratterizzati da altezza superiore a 2 m (Fig. 4.3).
All'interno del settore d'interesse, ed in particolare quello delimitato da 50°÷150°N (essendo le direzioni d'onda da 150° a 190°N schermate dalla diga foranea del porto di Vado), si possono individuare 3 mareggiate significative con H_s al colmo superiore a 2.5 m:

- Mareggiata dell' 1 marzo 1993 – $H_{s,colmo}$ = 4.1 m e DIR = 105°N
- Mareggiata del 23 dicembre 1994 – $H_{s,colmo}$ = 2.7 m e DIR = 54°N
- Mareggiata del 14 dicembre 2001 – $H_{s,colmo}$ = 3.6 m e DIR = 135°N

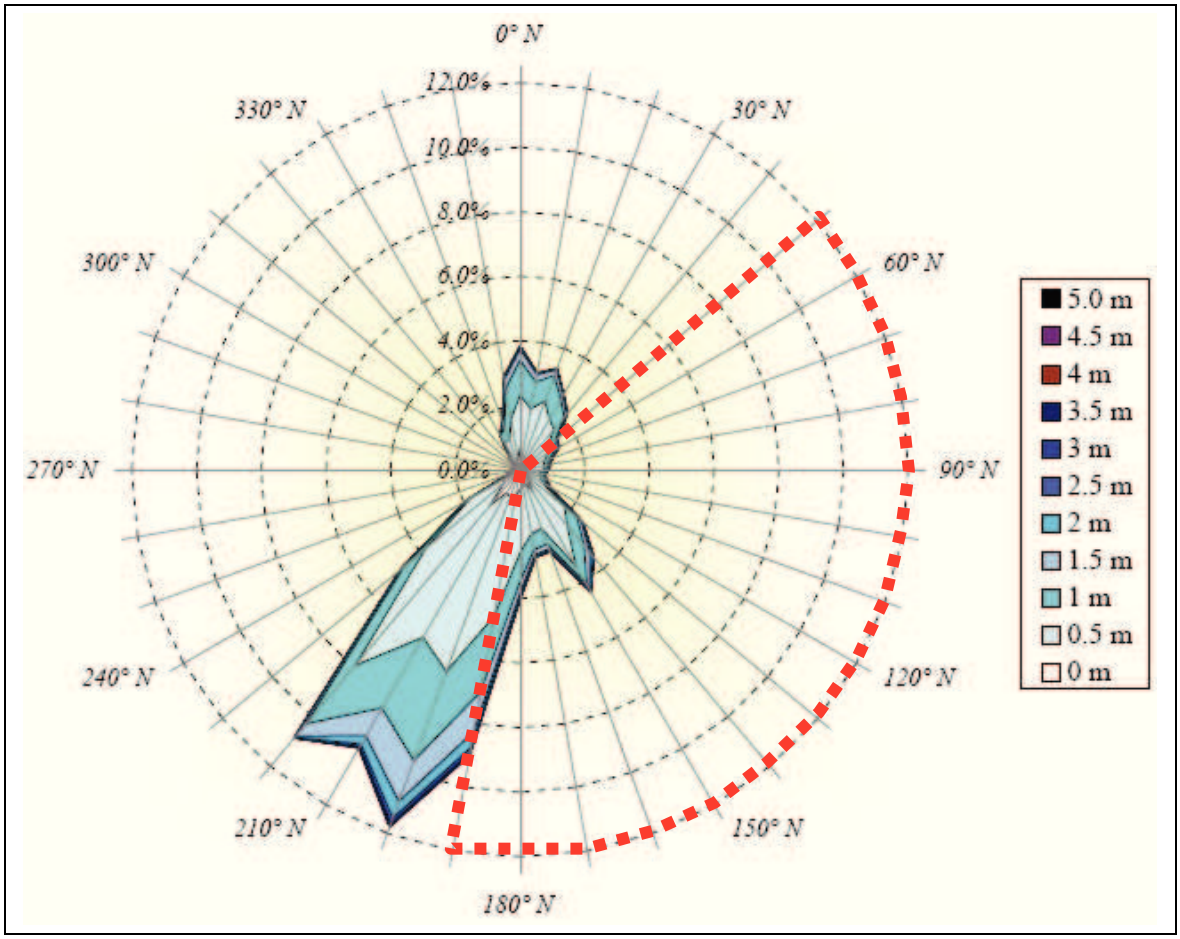


Fig. 4.2 – Rosa delle registrazioni al largo del paraggio di Vado Ligure
Dati U.K.M.O. (periodo 1987÷2008)

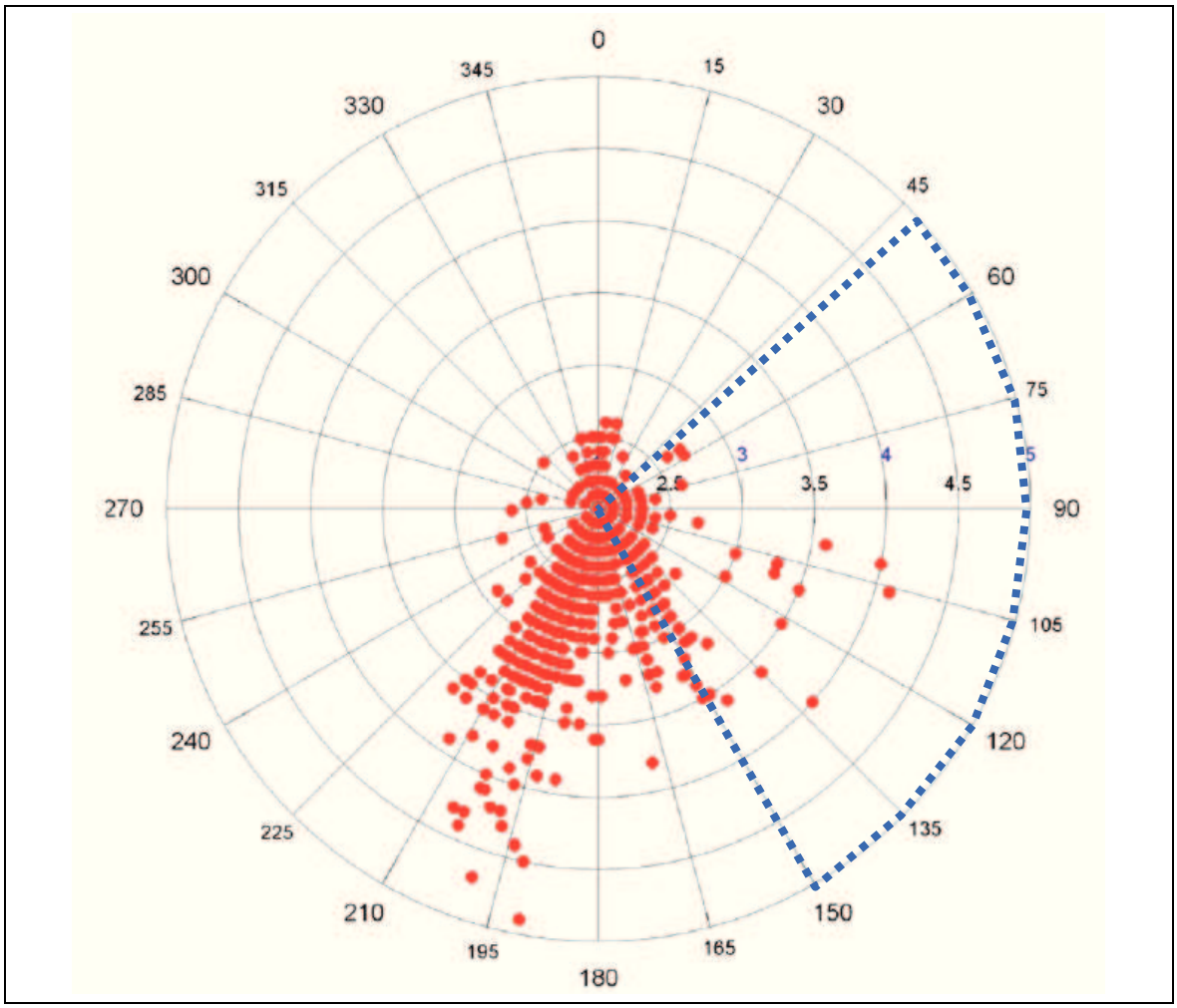


Fig. 4.3 – Distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso con H_s maggiore di 2 m
Dati U.K.M.O. (periodo 1987÷2008)

4.1.1 Statistica degli eventi estremi di moto ondoso

Per ricavare le caratteristiche degli eventi estremi di moto ondoso è stata presa in considerazione la serie storica dei dati dell'U.K.M.O., costituita da una sequenza di registrazioni triorarie, riferite al punto di coordinate 44°N; 8,73°E, relativa al periodo 1989÷2008 (cfr. precedente paragrafo 4.1). I primi 2 anni del campione (1987 e 1988 con cadenza diversa esaoraria) presentano ampi periodi di dati mancanti e, pertanto, non sono stati considerati per l'analisi degli estremi.

Il settore di traversia di interesse è individuato dalle direzioni 50°÷190°N. Esso è stato a sua volta suddiviso in 3 sottosettori, caratterizzati da caratteristiche di esposizione, quindi da caratteristiche ondametriche simili: 50°÷100°N (Greco-Levante), 100°÷150°N (Scirocco) e 150°÷190°N (Mezzogiorno).
Ai fini dello studio in oggetto sono state considerate le sole mareggiate provenienti dal settore di Scirocco (100°÷150°N), dal quale provengono gli eventi ondosi caratterizzati da direzione pressoché normale alla linea di costa.

Per tutti i settori l'analisi statistica degli estremi è stata svolta assumendo varie soglie di altezza d'onda H_0 pari a 1.0, 1.5 e 1.75 m. A riguardo si fa notare che la soglia di 1 m scelta per filtrare le altezze d'onda da inserire nell'analisi è suggerita da diversi autori per definire l'evento "mareggiata", quindi per creare un campione di dati che siano descrittivi del fenomeno e al tempo stesso indipendenti (Cfr. "Atlante delle onde nei mari Italiani", APAT- Università degli Studi di Roma Tre). L'uso di una soglia più alta determina normalmente una sottostima dei valori estremi di altezza d'onda. Anche nel caso specifico la soglia di 1 m è risultata più cautelativa.

Di seguito si riporta una breve descrizione della metodologia utilizzata per l'analisi statistica degli eventi estremi. La statistica è stata effettuata utilizzando un codice di calcolo che permette di elaborare la serie dei dati di moto ondoso al largo e di analizzare opportunamente gli eventi statisticamente più significativi.
La metodologia in uso, attualmente ritenuta lo schema di analisi più efficiente ed accurato a disposizione (proposta da Goda nel 1988), è quella detta della serie di durata parziale sopra soglia o, seguendo la terminologia anglosassone, del metodo P.O.T. (Peaks Over Treshold).
Questo metodo consente di estrarre dalla serie temporale dei dati di moto ondoso quei valori che siano, contemporaneamente, descrittivi del fenomeno fisico e mutuamente indipendenti. L'individuazione di questi eventi indipendenti, definiti "mareggiate", eseguita in base a opportuni criteri di scelta, consente di poterli analizzare dal punto di vista statistico come un processo di variabili aleatorie equidistribuite ed indipendenti, la realizzazione delle quali è governata da un contatore casuale. Si può così ipotizzare che il numero atteso di eventi che rispondono ai criteri fissati sia rappresentabile statisticamente mediante una distribuzione di Poisson esponenziale. Se risulta applicabile questo schema, si può dimostrare che la valutazione delle condizioni estreme equivale ad ipotizzare una distribuzione del primo tipo, più nota come distribuzione di Gumbel, o una distribuzione di Weibull a 3 parametri, cioè in altri termini è possibile per via analitica individuare la legge statistica che descrive la distribuzione degli estremi d'onda.
Il primo passo nella P.O.T analysis è dunque l'individuazione dell'evento indipendente "mareggiata"; successivamente vengono individuati i parametri incogniti che permettono di adattare le distribuzioni teoriche prescelte ai dati sperimentali.

Sia Goda (1988) che Mathiesen (1994) consigliano di utilizzare come funzioni di distribuzione la funzione di Gumbel o la distribuzione Weibull a tre parametri.

I valori delle altezze d'onda estreme corrispondenti ad assegnati periodi di ritorno ottenuti utilizzando le equazioni di Gumbel e Weibull presentano ancora incertezze legate alla scelta della distribuzione. Il programma utilizzato per l'analisi degli estremi fornisce i valori dell'altezza d'onda corrispondente ad un assegnato periodo di ritorno, per ciascuna distribuzione, già depurati da questo errore. Il metodo seguito per effettuare questa correzione è quello proposto da Goda (2000), che fornisce una formulazione empirica per calcolare l'errore sulla stima della variabile x, dovuto al fatto che non se ne conosce la vera distribuzione.

Dopo aver calcolato il valore di H_s corrispondente ad un assegnato tempo di ritorno, occorre associare a tale onda un valore del periodo, espresso dal periodo di zero crossing T_z. In generale è consigliabile non effettuare un'analisi diretta sui periodi e quindi associare i valori H_s-T_z corrispondenti allo stesso T ma ricavare tramite i dati sperimentali il valore ottimale dei parametri a e b da inserire in una formula del tipo (Mathiesen et al., 1994): $T_z = a \cdot H_s^{\,b}$.

I risultati dell'analisi statistica relativa agli eventi estremi compresi nel settore 100°÷150°N (Scirocco) sono riportati nella seguente Tab. 4.2. La correlazione H_s-T_z, ricavata con la metodologia precedentemente descritta è espressa dalla seguente equazione (Fig. 4.4): $T_z = 3.8 \cdot H_s^{\,0.5}$.
La curva che meglio rappresenta la distribuzione probabilistica degli eventi estremi del settore di Scirocco è quella di Weibull con k=1.0, che, a parità di coefficiente di correlazione r, fornisce i valori più cautelativi (Fig. 4.5).

Tr (anni)	Hs (m)	Tz (s)	Tp (s)
1	2,1	5,5	7,0
2	2,5	6,0	7,7
5	3,1	6,7	8,6
10	3,5	7,1	9,1
15	3,8	7,4	9,5
20	4,0	7,6	9,7
25	4,1	7,7	9,9
50	4,6	8,2	10,4
100	5,0	8,5	10,9
150	5,3	8,7	11,2
250	5,7	9,1	11,6
500	6,1	9,4	12,0
1000	6,6	9,8	12,5

Tab. 4.2 – Risultati statistica degli eventi estremi per il settore di Scirocco (100°÷150°N)

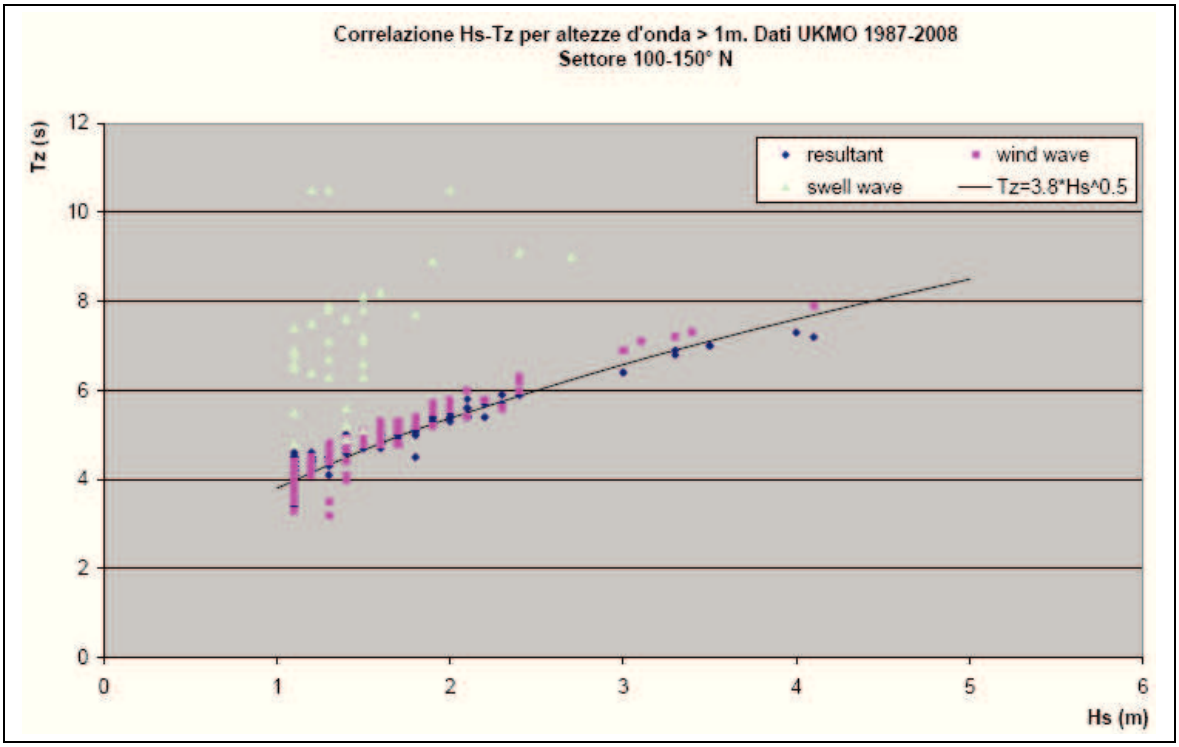


Fig. 4.4 – Correlazione H_s-T_z, dati U.K.M.O. 1987÷2008 riferita al settore di traversia 100°÷150°N (soglia H_s = 1 m)

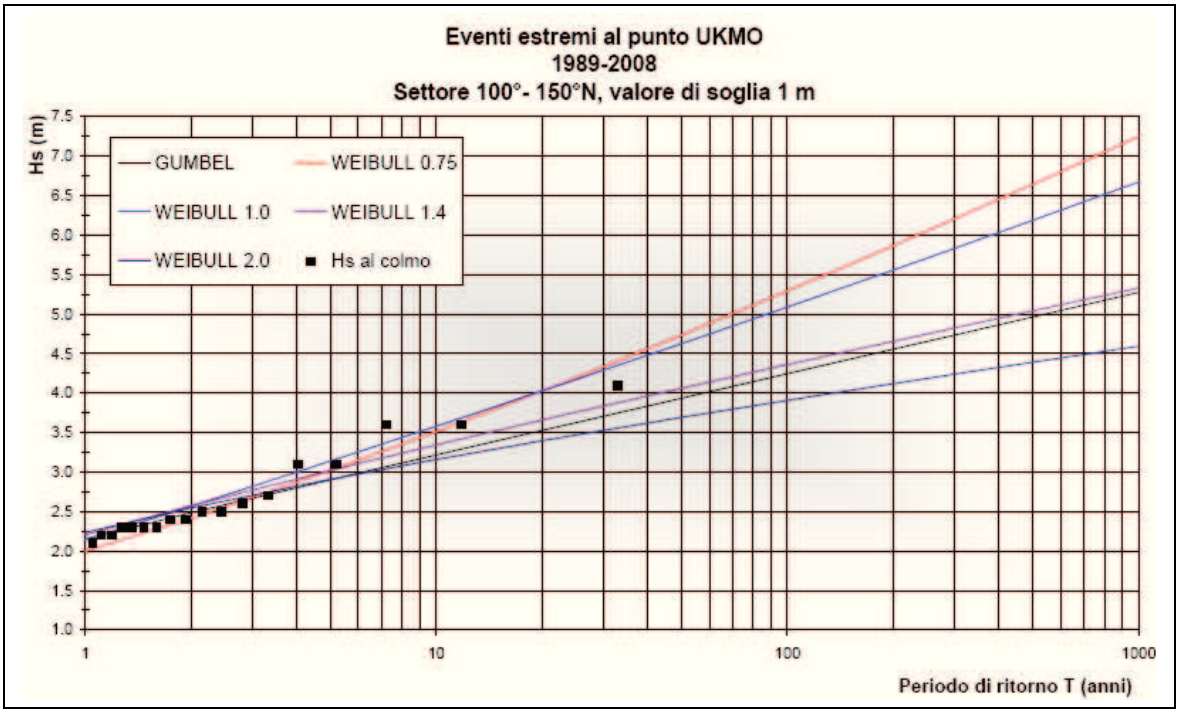


Fig. 4.5 – Elaborazione statistica delle onde estreme al largo del paraggio di Vado Ligure riferita al settore di traversia 100°÷150°N (soglia H_s = 1 m)

4.2 Livelli del mare

I livelli di marea utilizzati ai fini del presente studio si riferiscono ai dati mareografici della stazione di Genova forniti dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale dei Servizi Tecnici Nazionali, confluiti nell'APAT (Agenzia per l'Ambiente ed il Territorio) e ora nell'I.S.P.R.A., per il periodo 1998÷2008. I dati hanno formato orario e sono riferiti allo "0" I.G.M..

Le variazioni del livello marino definiscono un segnale complesso, che può considerarsi il risultato delle interazioni tra due componenti fondamentali: la marea astronomica, di natura periodica e causata dalle forze di attrazione combinate della luna e del sole, e la cosiddetta componente meteorologica, aleatoria e dovuta agli effetti indotti sulla superficie marina dalle variazioni delle condizioni atmosferiche.
Per poter eseguire un'analisi statistica della componente meteorologica del segnale di marea, e fare quindi previsioni di livello legate al tempo di ritorno, le registrazioni di marea sono state elaborate al fine di separare le due componenti astronomica e meteorologica.

La marea meteorologica, $\eta_m(t)$, può essere determinata eliminando dal segnale registrato, $\eta(t)$, le oscillazioni dovute alle componenti di frequenza tipiche della banda diurna della marea astronomica, $\eta_a(t)$. Gli effetti meteorologici, infatti, influenzano largamente le componenti armoniche sub-mareali dello spettro di frequenza del livello marino comprese nella banda limitata dalle componenti mareali diurna e mensile. Pertanto la componente meteorologica $\eta_m(t)$ è stata determinata applicando al mareogramma rilevato $\eta(t)$ un opportuno filtro orario passa-basso, in grado di trattenere le componenti semidiurna e diurna della marea lasciando passare i contributi associabili a frequenze più basse.
La marea astronomica è, quindi, data dalla differenza tra il mareogramma registrato e quello residuo ottenuto applicando il filtro passa-basso, ovvero il mareogramma meteorologico.

Nella successiva Tab. 4.3 sono riportati, per i diversi anni di registrazione considerati, i valori massimi della componente meteorologica della marea.

Anno	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
$\eta_{m,max}$ **(m)**	0,27	0,33	0,40	0,30	0,46	0,44	0,37	0,29	0,33	0,32	0,28

Tab. 4.3 – Valori massimi annuali della marea metereologica

4.2.1 Statistica degli eventi estremi di marea

L'analisi statistica dei livelli estremi di marea è stata effettuata utilizzando la distribuzione di probabilità di Gumbel e la distribuzione Tipo III di Pearson. I risultati dell'elaborazione sono riportati nella successiva Tab. 4.4, con riferimento a valori del tempo di ritorno di 1, 5, 10, 20, 50 e 100 anni.

Per determinare il livello estremo complessivo, occorre sommare al valore massimo stimato del contributo meteorologico un valore rappresentativo delle più elevate altezze di marea astronomica. A tale proposito sono stati individuati, per l'intero periodo 1998÷2008 e relativamente a ciascun giorno mareale, i valori delle più elevate alte maree astronomiche.
Facendo la media di tali dati si è stimata la marea astronomica di riferimento per il calcolo dei livelli estremi complessivi, che è risultata pari a +0.12 m.

I valori estremi complessivi del livello marino sono indicati anch'essi nella successiva Tab. 4.4.

T_r	M. Meteorologica (m)		M. Astronomica	Livello marino
(anni)	Pearson (tipo III)	Gumbel	(m)	(m)
1	0,26	0,26	0,12	0,38 / 0,38
5	0,40	0,41	0,12	0,52 / 0,53
10	0,43	0,46	0,12	0,55 / 0,58
20	0,46	0,50	0,12	0,58 / 0,62
50	0,50	0,56	0,12	0,62 / 0,68
100	0,53	0,61	0,12	0,65 / 0,73

Tab. 4.4 – Risultati dell'analisi statistica dei livelli estremi

5 PROPAGAZIONE DELLE MAREGGIATE ESTREME

La propagazione locale delle mareggiate estreme caratterizzate da tempi di ritorno di 1 e 50 anni è stata condotta utilizzando il modello numerico STWAVE (Steady-state Spectral Wave Model), descritto in dettaglio nell'allegato A. Le simulazioni sono finalizzate alla determinazione delle caratteristiche locali degli eventi estremi, utilizzate successivamente per lo studio della risalita del moto ondoso.
Per la costruzione del dominio del modello matematico sono stati impiegati i dati batimetrici a disposizione, cioè la base cartografica dell'Istituto Idrografico della Marina e due rilievi locali (marzo 2003 e marzo 2010).

5.1 Settaggio del modello

Per lo studio della propagazione locale del moto ondoso, mediante il codice di calcolo STWAVE, è stata impiegata una griglia costruita con direzione pressoché parallela al litorale oggetto di studio e maglia ortogonale a celle quadrate.
La griglia ha dimensioni 3700 m x 6130 m ed è costituita da celle quadrate di lato pari a 5 m, ha origine nel punto di coordinate (vertice in alto a destra: 1460745.5 m E, 4903549.5 m N) ed ha l'asse x ruotato di 135° rispetto alla direzione Est. Le coordinate dell'origine sono espresse nel sistema di riferimento Gauss-Boaga - Fuso Ovest.

Il bordo offshore della griglia è posto su una profondità piuttosto elevata (pari a circa 100 m); pertanto, è stato ragionevolmente assunto che le mareggiate estreme non subiscano "variazioni" dal punto U.K.M.O. al bordo della griglia. Di conseguenza sono state fornite in input al modello di propagazione le caratteristiche delle mareggiate estreme al largo (punto U.K.M.O.).

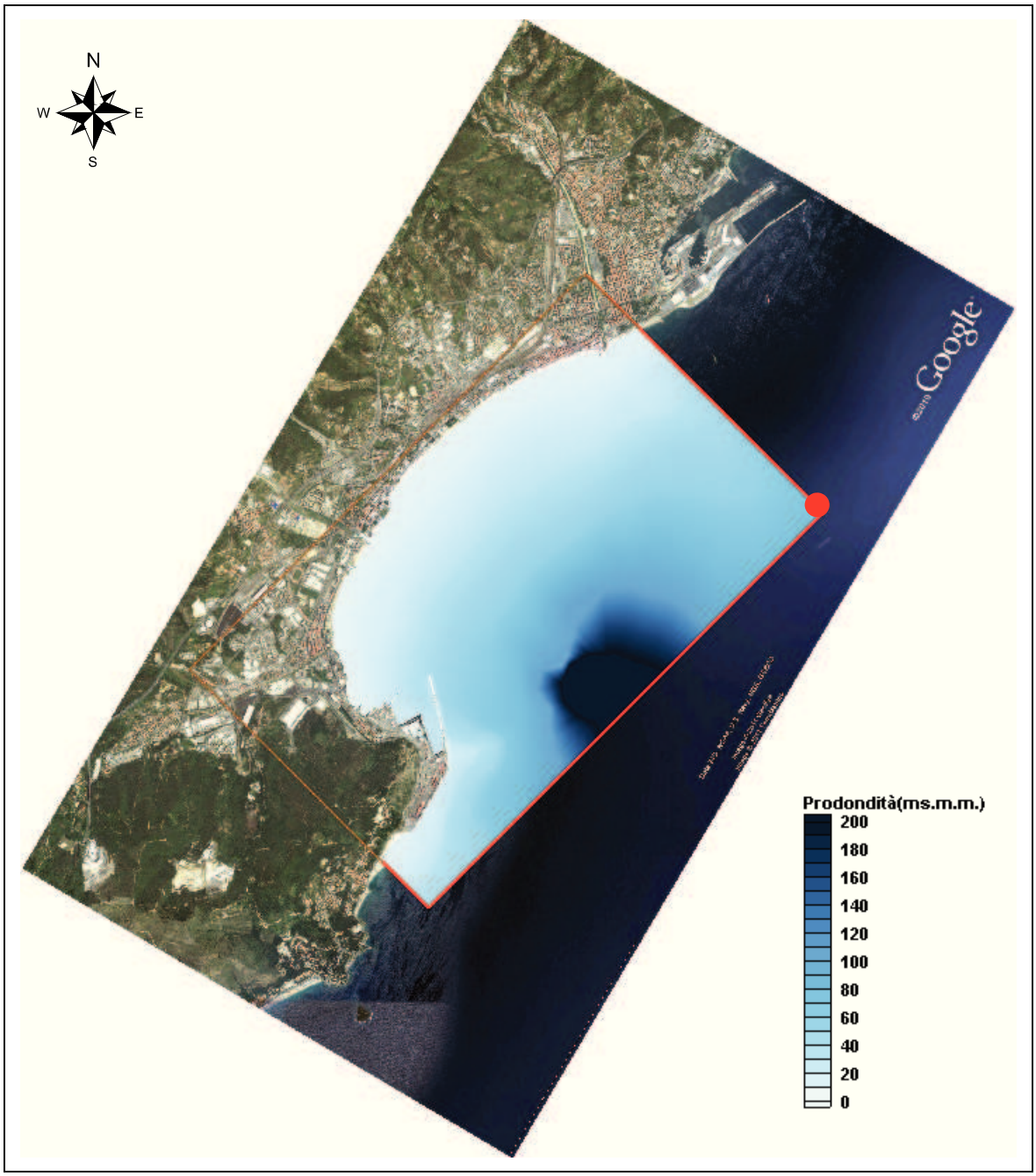


Fig. 5.1 – Dominio di calcolo STWAVE impiegato per lo studio della propagazione

5.2 Caratteristiche delle mareggiate estreme

Nelle simulazioni sono state propagate le mareggiate caratterizzate da un tempo di ritorno di 1 e 50 anni provenienti dal settore di Scirocco (100°÷150°N). Tale settore, considerata l'esposizione del tratto di litorale oggetto di intervento, è stato ritenuto maggiormente significativo ai fini dello studio.

Le caratteristiche delle mareggiate estreme (altezza significativa e periodo di picco) per il settore considerato sono state ricavate dall'analisi statistica descritta nel precedente paragrafo 4.1.1.

La direzione di provenienza delle mareggiate estreme per il settore considerato è stata individuata con riferimento alla rosa degli eventi di moto ondoso caratterizzati da altezze significative maggiori di 2 m (Fig. 5.2). Si osserva che, per il settore di Scirocco, le mareggiate più intense provengono da 105°N e 135°N. Data l'esposizione del litorale è stata considerata "potenzialmente più pericolosa" la mareggiata proveniente da 135°N, che presenta direzione di provenienza pressoché normale alla linea di riva nel tratto di litorale interessato dall'intervento.

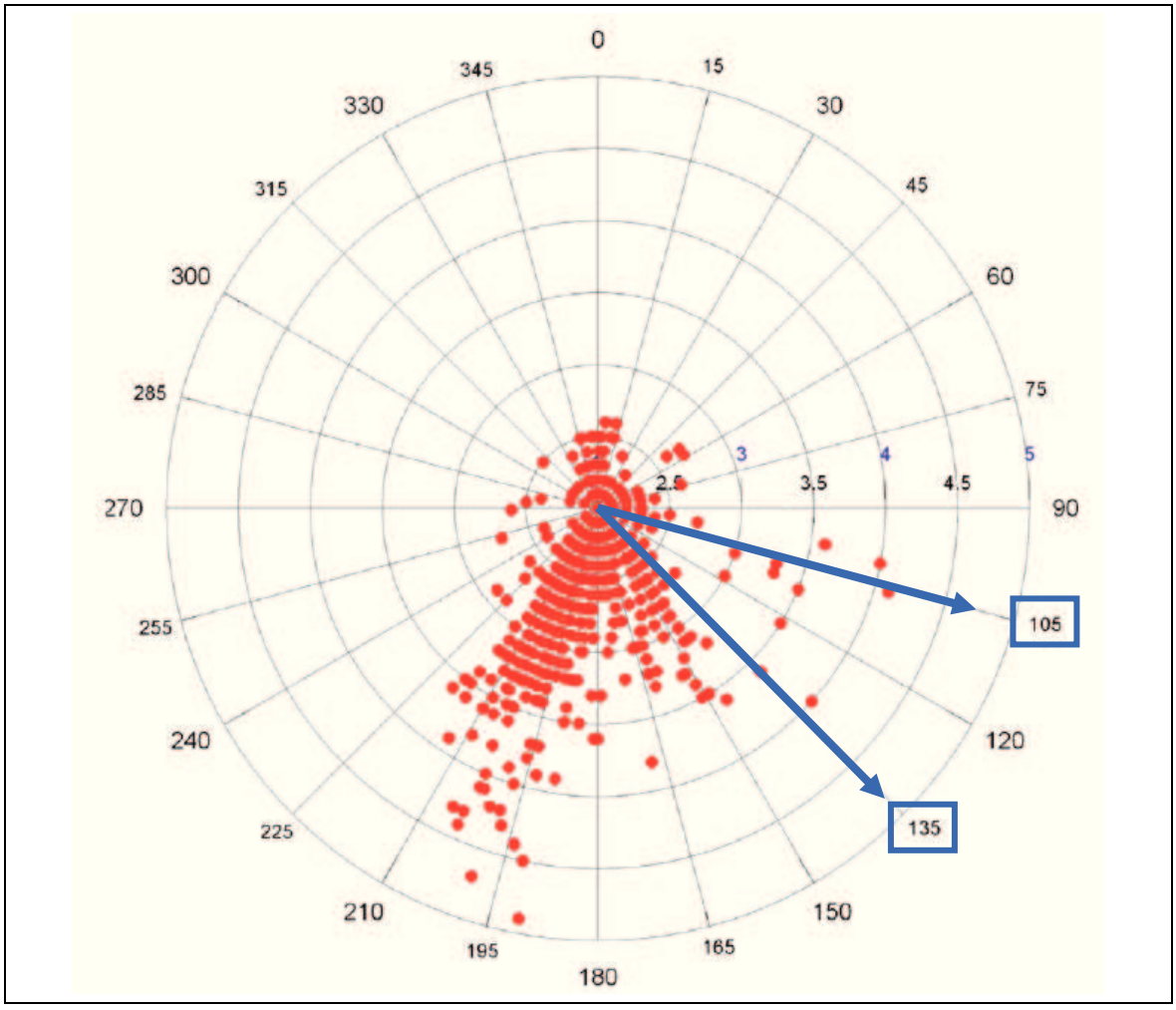


Fig. 5.2 – Direzioni di provenienza degli eventi estremi

Agli eventi estremi è stato associato nelle propagazioni un sovralzo del livello medio mare ricavato dall'analisi statistica dei livelli di marea descritta nel precedente paragrafo 4.2.1.

Nella successiva Tab. 5.1 sono riportate, con riferimento al numero di TEST, le caratteristiche delle mareggiate estreme propagate e i corrispondenti valori del sovralzo del livello medio del mare.

TEST	Caratteristiche mareggiata	Setup (m s.m.m.)	Settore di provenienza	H_S (m)	T_p (s)	Dir (°N)
1	T_R = 1 anno	+0.38	100°÷150°N	2.1	7.0	135
2	T_R = 50 anni	+0.68		4.6	10.4	135

Tab. 5.1 – Caratteristiche delle mareggiate estreme propagate con il codice di calcolo STWAVE

5.3 Risultati delle propagazioni sottocosta delle mareggiate estreme

I risultati ottenuti dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso sottocosta in configurazione di progetto, utilizzando il codice di calcolo STWAVE, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine seguenti (Fig. 5.3 e Fig. 5.4).
Le figure rappresentano le altezze d'onda significativa, in termini di gradazione cromatica, mentre le direzioni locali dell'onda sono indicate mediante vettori il cui modulo è proporzionale all'altezza d'onda significativa.

Le propagazioni sottocosta hanno evidenziato che il campo di moto ondoso risulta influenzato principalmente da due aspetti: in primo luogo, la presenza del molo di sopraflutto del porto di Vado, che offre al tratto di litorale oggetto di studio un certo grado di protezione dalle mareggiate di Scirocco; in secondo luogo, la presenza della cuspide fociva del Torrente Quiliano e le differenti pendenze del fondale nei diversi tratti del litorale favoriscono la formazione di locali concentrazioni e dispersioni di energia.

Le mareggiate estreme di Scirocco (TEST 1 e TEST 2), caratterizzate da direzioni poco inclinate rispetto alla normale al litorale, mostrano un ridotto abbattimento dell'altezza d'onda; si può notare (in particolare per il TEST 2) l'effetto di protezione offerto dal molo di sopraflutto del porto di Vado che, per effetto della diffrazione, abbatte sensibilmente le altezze d'onda nel tratto di litorale tra il Torrente Quiliano e il terrapieno.

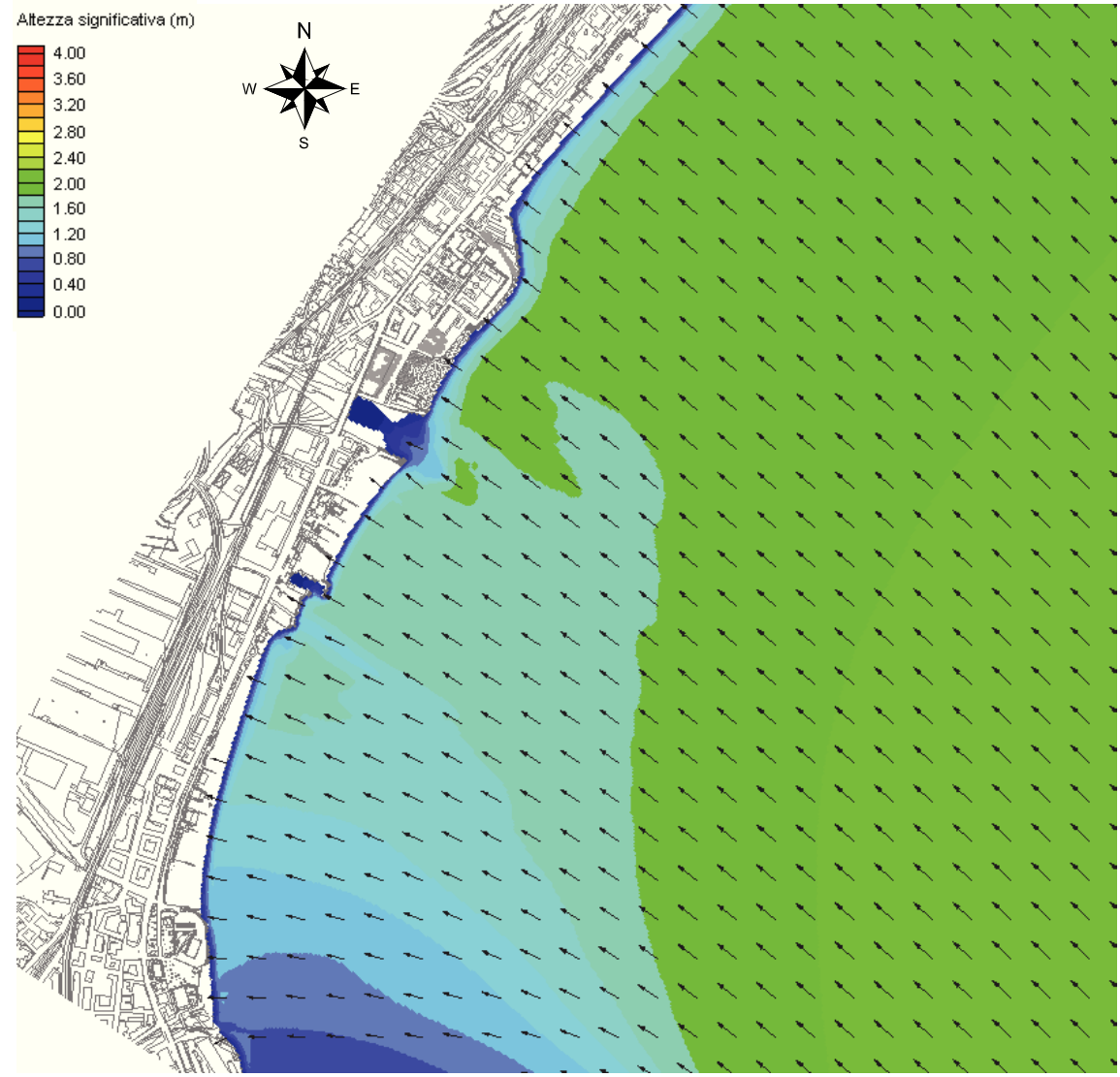


Fig. 5.3 – TEST 1: Onda con tempo di ritorno 1 anno,
Caratteristiche al largo: H_S = 2.1 m, T_P = 7.0 s, Dir. = 135°N, Sovralzo = +0.38 m s.m.m.

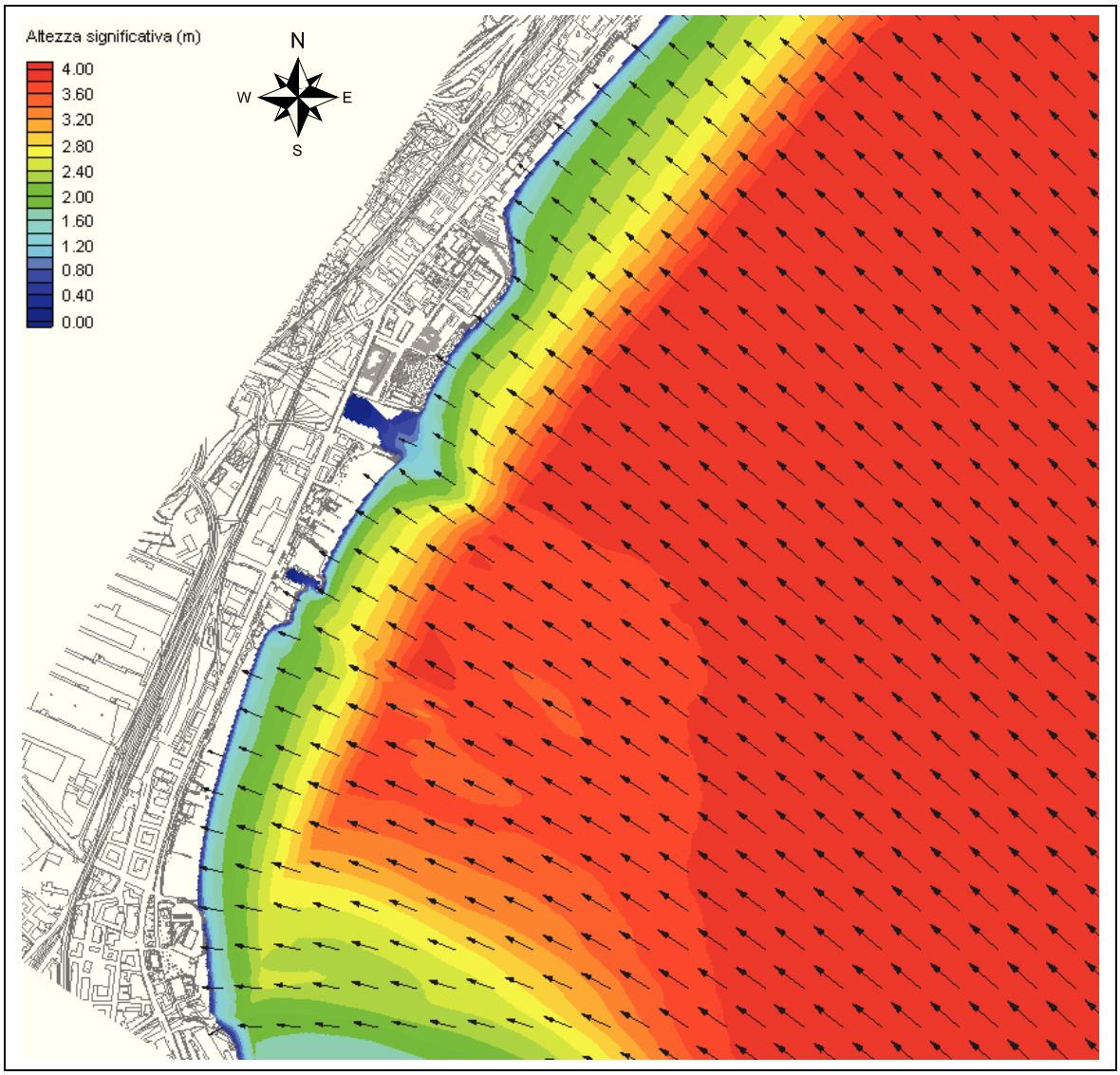


Fig. 5.4 – TEST 2: Onda con tempo di ritorno 50 anni,
Caratteristiche al largo: H_S = 4.6 m, T_P = 10.4 s, Dir. = 135°N, Sovralzo = +0.68 m s.m.m.

6 RISALITA DEL MOTO ONDOSO

Nel presente paragrafo si riportano i risultati dello studio della risalita del moto ondoso sulla spiaggia in sinistra della foce del torrente Quiliano; lo studio è stato condotto con riferimento a condizioni meteomarine (onda e marea) estreme, caratterizzate da tempi di ritorno di 1 anno e 50 anni.
Nel caso specifico, l'analisi è stata condotta con riferimento ad un unico profilo trasversale del litorale, estratto in mezzeria del tratto di spiaggia compreso tra la foce del torrente Quiliano e il terrapieno di cui si prevede l'ampliamento (Fig. 6.1).

La risalita è stata valutata con riferimento alla configurazione di progetto del litorale (ripascimento con materiale caratterizzato da un valore di D_{50} di 4 mm). Gli interventi di riqualificazione dell'area pubblica di Zinola prevedono, infatti, la ricostruzione del litorale, la demolizione dei fabbricati preesistenti, la bonifica dell'arenile esistente e la riprofilatura del litorale.

L'analisi è stata condotta attraverso l'implementazione del codice di calcolo SBEACH, sviluppato dallo U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station; la descrizione dettagliata del modello SBEACH è riportata nell'allegato A. Il codice di calcolo SBEACH necessita dei seguenti dati di input: dati meteomarini, dati morfologici e dati sedimentologici.

Per quanto riguarda i dati meteomarini, si rimanda al successivo paragrafo 6.1 per una descrizione dettagliata degli eventi ondosi schematizzati nel modello.

Le caratteristiche geometriche del profilo trasversale di calcolo (sezione 20 delle tavole progettuali), invece, sono state fornite dal Committente; il profilo è stato adeguatamente esteso verso il largo fino alla profondità prescelta come input per il codice SBEACH (-10 m s.m.m.).

Infine, per quanto concerne la sedimentologia, sulla base delle analisi disponibili (analisi eseguite nel marzo 2003 in concomitanza con i rilievi topo-batimetrici), risulta che la spiaggia emersa e la zona prossima alla battigia sono costituite prevalentemente da sabbia grossa, mentre procedendo verso il largo il materiale risulta via via più fine (da sabbia media a sabbia fine).
Il materiale utilizzato per il ripascimento dell'arenile è affine a quello nativo (con particolare riferimento al materiale presente sulla battigia e nella swash zone); si tratta infatti di sabbia grossa e ghiaia fine, caratterizzata da un valore del diametro mediano D_{50} dei grani pari a 4 mm. Tale granulometria verrà impiegata per l'intero ripascimento, sia nella spiaggia emersa che in quella sommersa, che risulterà quindi localmente più ripida.

Poiché il codice di calcolo SBEACH consente di simulare correttamente l'evoluzione morfologica e la risalita su profili di spiaggia caratterizzati da granulometria medio-fine (con diametro medio dei grani D_{50} minore o uguale a 1 mm), nel caso specifico si è scelto di assumere che il profilo, in ragione delle caratteristiche granulometriche del materiale nativo e di apporto, sia "inerodibile" (ovvero che non venga modificato dall'azione del moto ondoso incidente).

Pertanto, in relazione alle semplificazioni introdotte nel modello per quanto riguarda le caratteristiche granulometriche dei sedimenti, si ritiene comunque corretto il risultato del codice di calcolo SBEACH in relazione alla risalita dell'onda.

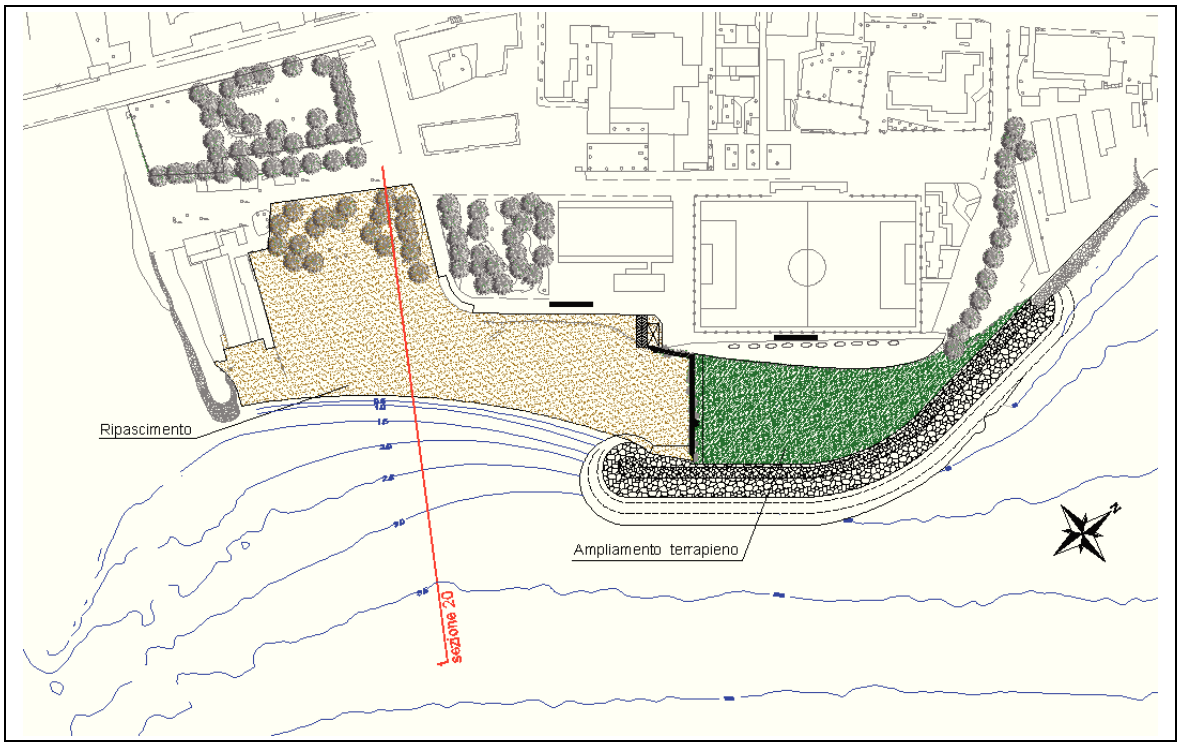


Fig. 6.1 – Planimetria con ubicazione del profilo di calcolo della risalita (sezione 20)

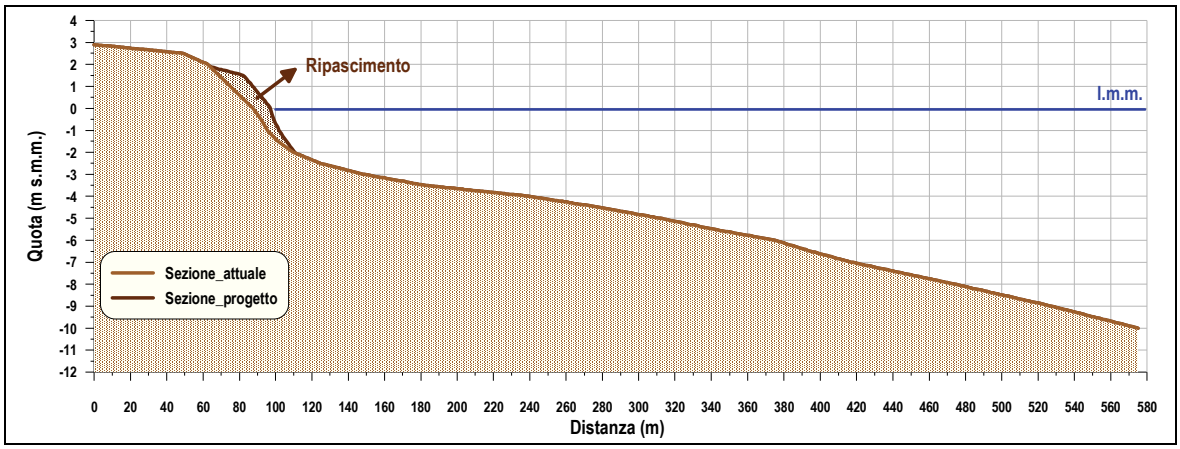


Fig. 6.2 – Profilo di calcolo (sezione 20)

6.1 Condizioni meteomarine analizzate

Il calcolo della risalita è stato eseguito con riferimento alle due mareggiate estreme descritte nel precedente paragrafo 5.2:

- TEST 1: mareggiata estrema caratterizzata da un tempo di ritorno di 1 anno;
- TEST 2: mareggiata estrema caratterizzata da un tempo di ritorno di 50 anni.

Ai fini di una corretta gestione e manutenzione della spiaggia oggetto di intervento, si ritiene infatti significativo valutare la sicurezza e la fruibilità del litorale sia con riferimento a condizioni meteomarine "estreme" (T_R 50 anni, ma in realtà maggiore in quanto è stato utilizzato l'evento caratterizzato da onda e livello – statistica non combinata - con tale tempo di ritorno) che a condizioni più frequenti (T_R 1 anno).
Di seguito, in Tab. 6.1, si riportano le caratteristiche delle mareggiate al largo. Le caratteristiche delle mareggiate alla -10.0 m (profondità in corrispondenza della quale è stato fissato il bordo offshore del dominio di calcolo SBEACH) sono state estratte dalle propagazioni locali condotte per mezzo del codice di calcolo STWAVE (paragrafo 5.3).
Entrambe le mareggiate sono state schematizzate con una durata di 24 ore. L'altezza significativa, il periodo di picco e il livello del mare sono stati schematizzati ipotizzando un andamento triangolare. Tutti gli altri parametri sono stati assunti costanti. Le caratteristiche delle mareggiate fornite in input al codice di calcolo SBEACH sono riportate nelle successive Tab. 6.2 e Tab. 6.3.

TEST	Caratteristiche mareggiate	Hs (m)	DIR (°N)	Tp (s)	Sovralzo (m s.m.m.)
1	T_R = 1 anno	2.1	135	7.0	+0.38
2	T_R = 50 anni	4.6	135	10.4	+0.68

Tab. 6.1 – Caratteristiche delle mareggiate analizzate al largo

CARATTERISTICHE alla -10.0 m		
	Inizio mareggiata	***Al colmo***
Hs (m)	0.75	1.79
Tp (s)	4.2	7.0
DIR onda (°N) *costante*	129	129
Liv (m s.m.m.)	0.00	0.38

Tab. 6.2 – Caratteristiche TEST 1 – Mareggiata caratterizzata da un tempo di ritorno di 1 anno

CARATTERISTICHE alla -10 m		
	Inizio mareggiata	***Al colmo***
Hs (m)	2.00	3.91
Tp (s)	6.9	10.4
DIR onda (°N) *costante*	129	129
Liv (m s.m.m.) *costante*	0.00	0.68

Tab. 6.3 – Caratteristiche TEST 2 – Mareggiata caratterizzata da un tempo di ritorno di 50 anni

6.2 Risultati delle simulazioni della risalita del moto ondoso

Il presente paragrafo riporta i risultati delle simulazioni condotte per mezzo del codice di calcolo SBEACH.

La simulazione relativa alla mareggiata estrema caratterizzata da un tempo di ritorno di 1 anno (TEST 1, Fig. 6.3) fornisce valori di risalita di circa 1.4 m, mentre per l'evento estremo caratterizzato da un tempo di ritorno di 50 anni (TEST 2, Fig. 6.4) si ottengono valori di risalita maggiori, comunque di poco superiori ai 2 m.
Nel caso della mareggiata più frequente (TEST 1, T_R 1 anno) la risalita dell'onda interessa una fascia di litorale (compresa tra la linea di riva e la quota di massima risalita) di circa 14 m.
Per la mareggiata estrema caratterizzata da un tempo di ritorno di 50 anni (TEST 2), la fascia di risalita è invece di circa 35 m.

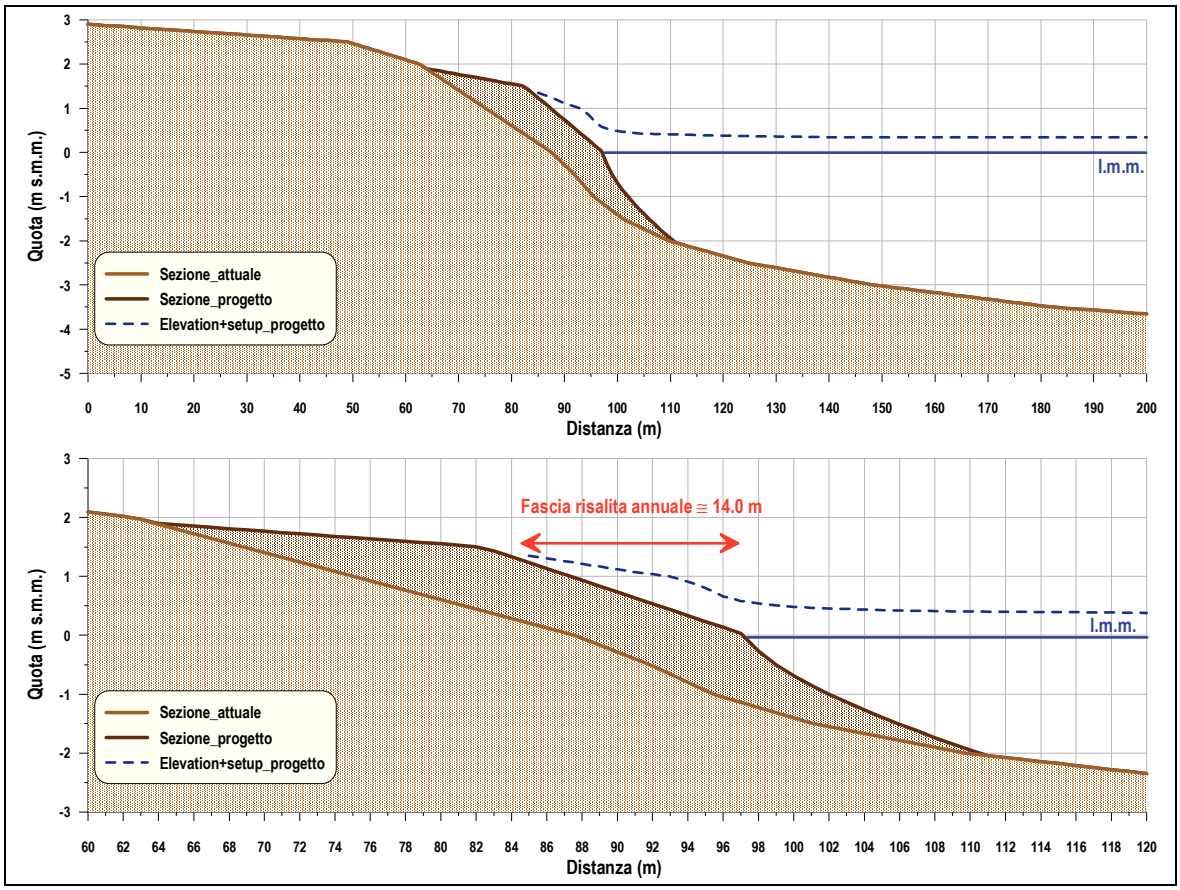


Fig. 6.3 – TEST 1: Mareggiata di Scirocco caratterizzata da un tempo di ritorno di 1 anno (TEST 1)

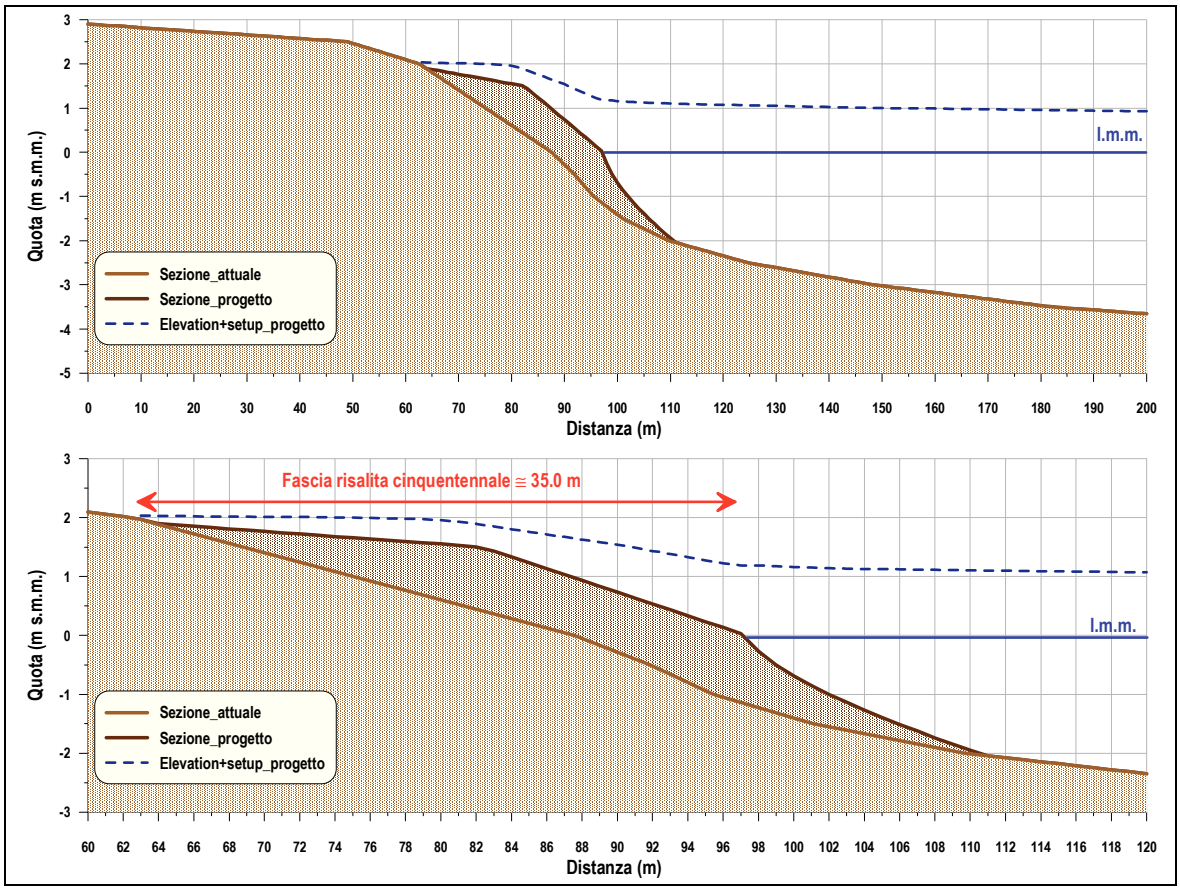


Fig. 6.4 – TEST 2: Mareggiata di Scirocco caratterizzata da un tempo di ritorno di 50 anni (TEST 2)

7 CONSIDERAZIONI SULLA MANUTENZIONE DEL LITORALE

Per quanto riguarda la manutenzione del materiale ed il potenziale aggravio degli oneri di manutenzione del litorale di Villa Gavotti, vanno premesse alcune considerazioni, legate allo sviluppo del porto e del litorale di Vado in conformità alle previsioni di P.R.P.; sono infatti previste importanti modifiche delle opere forane del porto, che potranno comportare locali variazioni del regime del trasporto solido e, in particolare, uno spostamento del punto di inversione del trasporto netto, che si trova proprio in prossimità della zona di intervento.

Il presente studio è stato sviluppato ipotizzando che le opere foranee del porto di Vado rimangano nel loro assetto attuale, e tale scelta è stata dettata dalla volontà di giungere a risultati cautelativi in termini di valutazione dell'impatto delle nuove opere sul regime della dinamica litoranea dei sedimenti. Nell'assetto attuale, infatti, il punto di divergenza del trasporto solido netto si colloca proprio sulla cuspide fociva del torrente Quiliano, il cui apporto solido va ad alimentare sia le spiagge verso Villa Gavotti che quelle verso il porto di Vado. Nell'assetto di progetto, con il prolungamento del molo foraneo, il punto di divergenza andrà prevedibilmente a collocarsi più a Nord-Est, riducendo quindi sostanzialmente la possibilità che l'apporto solido del Quiliano possa alimentare le spiagge verso Villa Gavotti (cfr. *"Studio della prevedibile evoluzione morfologica del litorale di Vado Ligure in prossimità del torrente Quiliano con riferimento all'ipotesi di inserimento di nuovi terrapieni"*, redatto dagli scriventi nel luglio 2009 per conto dell'Ing. Gaggero e dell'Autorità Portuale di Savona) e, di conseguenza, annullando qualsiasi potenziale impatto dell'ampliamento del terrapieno sulle medesime spiagge.

Nell'assetto attuale del porto di Vado, nell'ottobre 2011 sono stati sviluppati dagli scriventi per conto dell'Autorità Portuale di Savona gli "*Studi su modello relativi al trasporto solido nell'intorno della foce del torrente Quiliano"*; in tali studi, utilizzando idonei modelli numerici, è stato analizzato nel dettaglio il trasporto solido, sia con un modello di evoluzione della linea di riva che con un modello bidimensionale a fondo mobile. Per la stima delle eventuali esigenze di manutenzione del litorale, si è ritenuto corretto fare riferimento alle stime del trasporto solido ricavate dal modello di evoluzione della linea di riva.
Il modello ipotizza due diversi scenari, corrispondenti alla presenza ed alla mancanza di apporti solidi da parte del torrente Quiliano; il valore massimo del trasporto solido netto nella zona di interesse, diretto dalla foce del torrente verso Villa Gavotti, risulta rispettivamente di 1350 e 600 metri cubi (Fig. 7.1). Si ritiene quindi che l'eventuale maggiore onere di manutenzione della spiaggia di Villa Gavotti, legato all'ampliamento del terrapieno, non possa essere superiore a tali valori.
La valutazione corrisponde infatti alla ipotetica situazione futura in cui l'accrescimento della spiaggia prodotto dall'apporto solido del torrente Quiliano avrebbe reso di fatto ininfluente la presenza del terrapieno, consentendo a tutto il materiale potenzialmente mobile in sinistra della foce (i quantitativi evidenziati al capoverso precedente, per l'appunto) di raggiungere la spiaggia di Villa Gavotti.

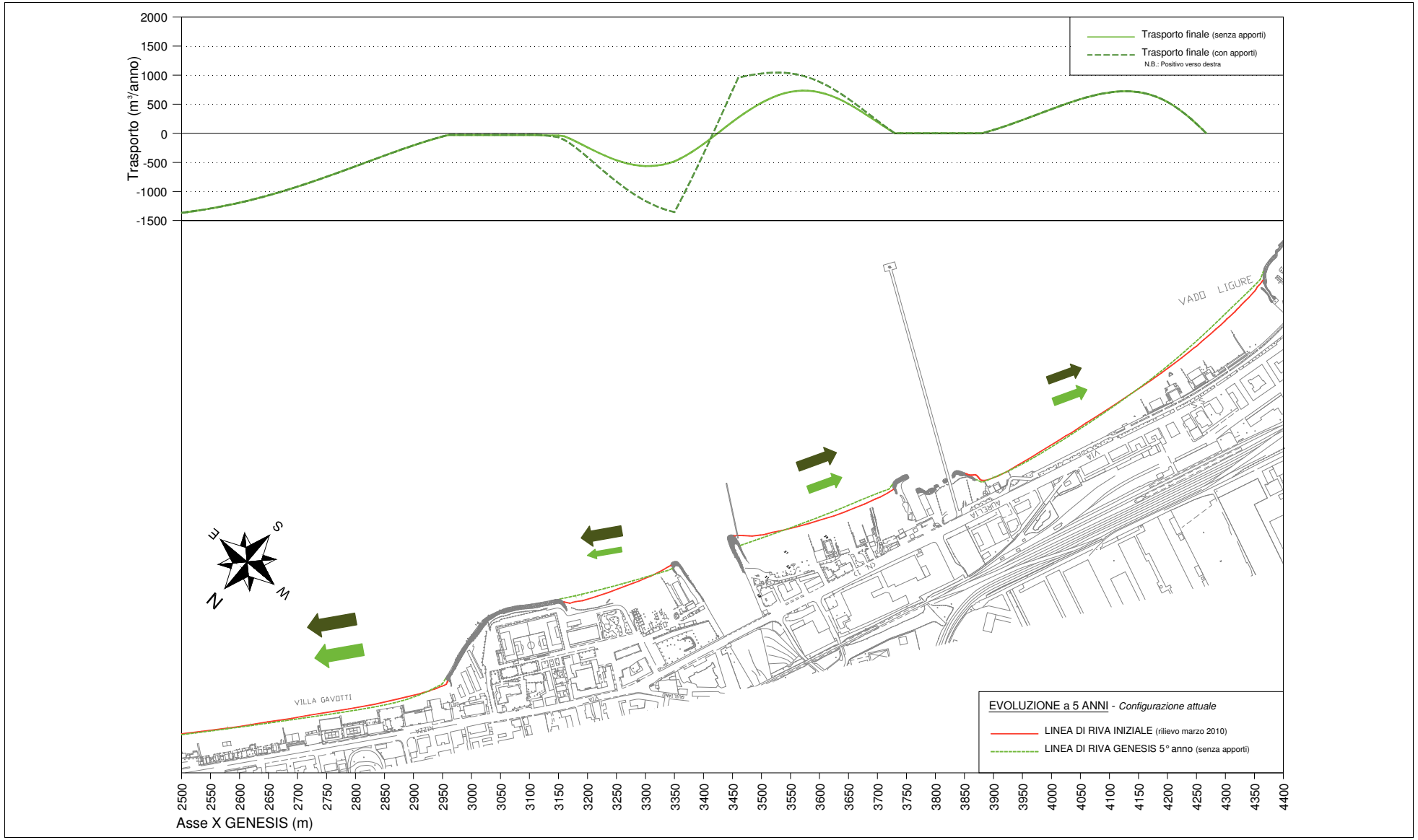


Fig. 7.1 – Evoluzione morfologica del litorale in configurazione attuale (cfr. "*Studi su modello relativi al trasporto solido nell'intorno della foce del torrente Quiliano*", ottobre 2011)

ALLEGATO A

DESCRIZIONE CODICI DI CALCOLO

INDICE

1 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO STWAVE 2

2 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO SBEACH 6

2.1 METODOLOGIA 6

2.2 MODELLO ADOTTATO PER LE ONDE 7

2.2.1 Criterio di frangimento e altezza frangente 7

2.2.2 Modello di decadimento dell'onda frangente 8

2.3 EQUAZIONI DEL TRASPORTO LUNGO IL PROFILO DI SPIAGGIA E VERSO DEL TRASPORTO 10

2.4 MODELLO DI VARIAZIONE DEL PROFILO 13

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1.1 – Spettro monodimensionale 2
Fig. 1.2 – Convenzioni griglia STWAVE 4
Fig. 1.3 – Input e Output STWAVE 4
Fig. 4.1 – Confronto tra il rapporto di frangimento misurato e calcolato con l'equazione (S1) 8
Fig. 4.2 – Altezze d'onda misurate e calcolate 10
Fig. 4.3 – Rappresentazione schematica delle 4 zone di trasporto 10

1 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO STWAVE

Il modello matematico STWAVE (Steady-state spectral WAVE model) (Resio 1987, 1988; Davis 1992; Smith, Resio, Zundel 1999) è un modello stazionario spettrale alle differenze finite basato sull'equazione di conservazione dell'azione.
Il modello descrive il cambiamento dei parametri caratteristici della mareggiata (altezza significativa, periodo, direzione media di propagazione, forma dello spettro di frequenza e spreading direzionale) dalle acque profonde, dove il campo d'onda è relativamente omogeneo su scala chilometrica e le zone sottocosta (le onde in tali zone sono fortemente influenzate dalle variazioni della batimetria, dal livello del mare, dalle correnti locali), dove i parametri caratteristici variano significativamente su scala dell'ordine della decina di metri.

Il modello STWAVE simula la rifrazione e lo shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, il frangimento, la diffrazione, l'interazione tra onde e il fenomeno di whitecapping.
Uno spettro d'onda è una rappresentazione statistica di stato del mare. Essenzialmente, uno spettro è rappresentato da una sovrapposizione lineare di onde monocromatiche e descrive la distribuzione dell'energia del moto ondoso come una funzione della frequenza (spettro monodimensionale di frequenza) o della frequenza e direzione (spettro bidimensionale). Un esempio di spettro monodimensionale è rappresentato in Fig. 1.1.

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

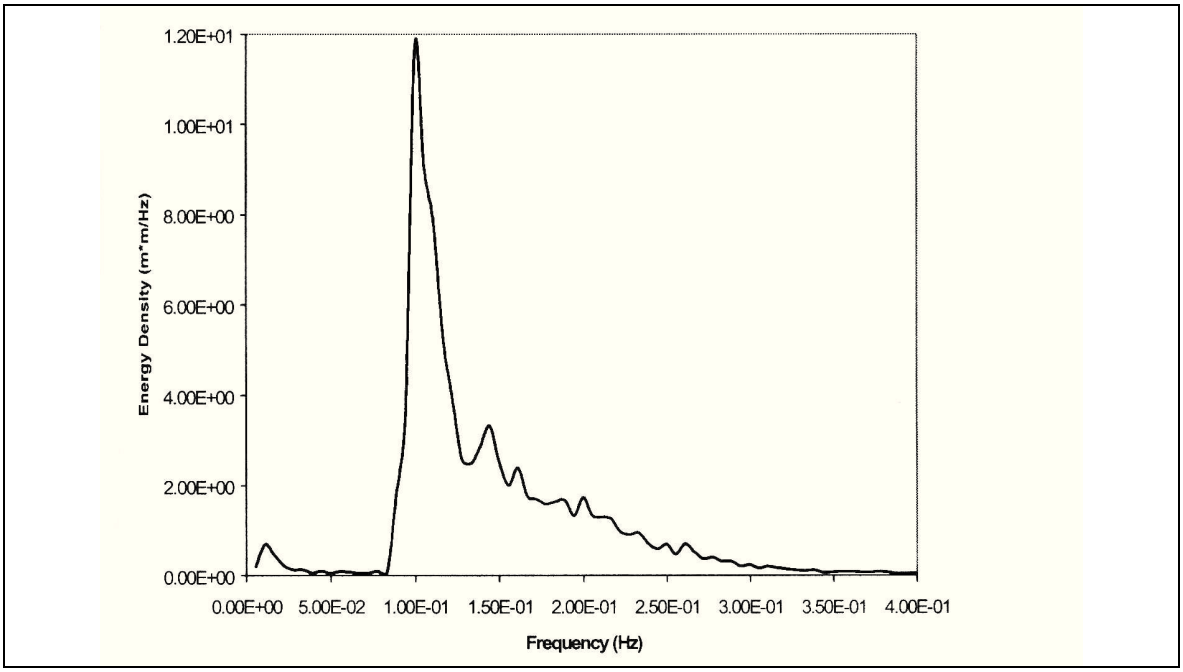


Fig. 1.1 – Spettro monodimensionale

STWAVE è basato sulle seguenti assunzioni:

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

STWAVE è un modello numerico alle differenze finite, basato su una griglia cartesiana ortogonale. Le celle della griglia sono assunte quadrate ($\Delta x = \Delta y$). Si possono ottenere griglie a diversa risoluzione andando a costruire griglie annidate. Ciò può essere ottenuto facendo "girare" il modello a una risoluzione più grossolana, salvando uno spettro per un punto più a riva. Questo spettro può quindi essere utilizzato come una condizione al contorno per una griglia di risoluzione maggiore. Una griglia schematica è rappresentata nella Fig. 1.2.
STWAVE opera in un sistema di coordinate locali, con l'asse X orientato in direzione perpendicolare alla spiaggia (con origine al largo) e asse Y orientato parallelamente alla costa, formando un sistema di coordinate che rispettano la regola della mano destra. L'orientazione dell'asse X (±87.5°) definisce il semipiano che è rappresentato nel modello. L'asse Y è generalmente allineato con le batimetriche al largo. Gli angoli di provenienza delle onde sono computati in senso antiorario dall'asse X. I confini laterali nel modello possono essere specificati come terra o mare indicando la profondità delle celle come positiva (mare) o negativa (terra). Si riassume alla seguente Fig. 1.3 gli input e gli output forniti dal modello.

Per generare uno spettro occorre specificare i seguenti parametri:

- periodo di picco (T_p);
- altezza d'onda;
- profondità;
- parametro di appuntimento dello spettro (γ).

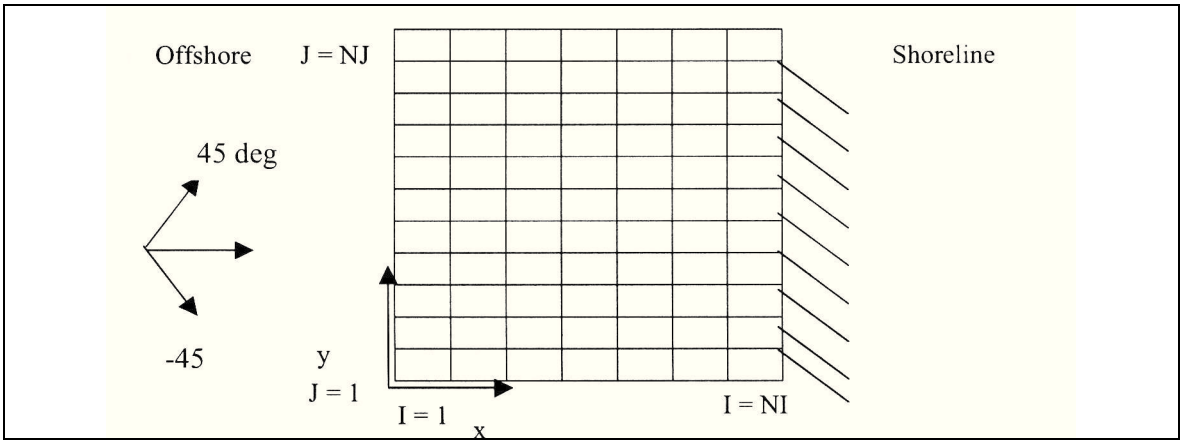


Fig. 1.2 – Convenzioni griglia STWAVE

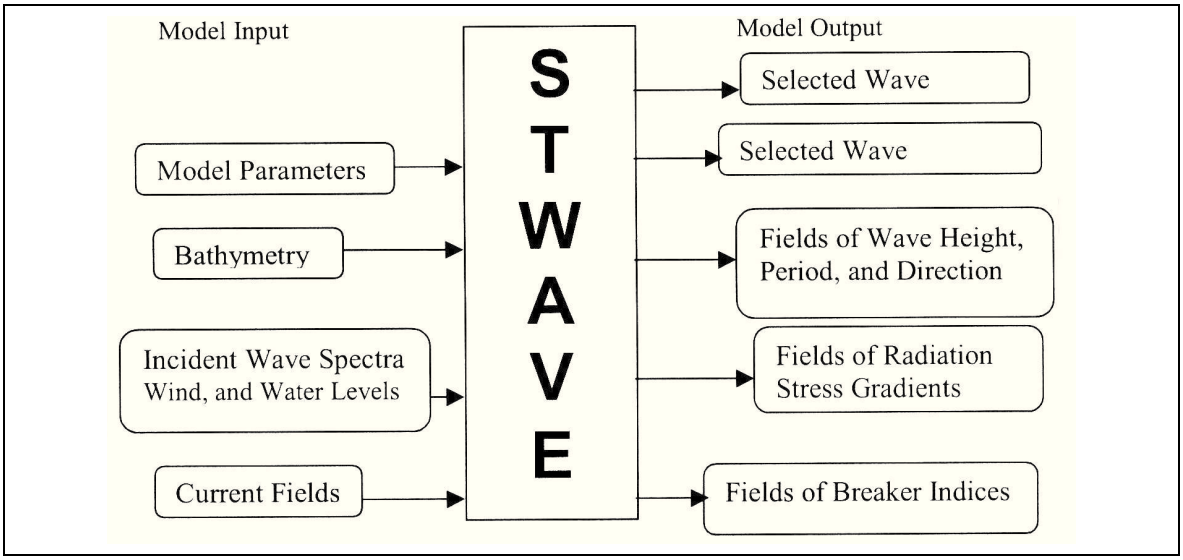


Fig. 1.3 – Input e Output STWAVE

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

L'energia nello spettro di frequenza è proporzionale a $\cos^{nn}(\alpha - \alpha_m)$, dove α è la direzione della componente spettrale e α_m è la direzione media di propagazione dell'onda. Una guida per la scelta di γ e *nn* è fornita nella Tab. 1.1. Gli spettri con periodi di picco elevati sono generalmente ristretti sia in frequenza che in direzione. Per piccoli periodi di picco gli spettri sono tipicamente allargati sia in frequenza che in direzione.

Tp (sec)	γ	*nn*
≤ 10	3.3	4 (JONSWAP)
11	4	8
12	4	10
13	5	12
14	5	16
15	6	18
16	6	20
17	7	22
18	7	26
19	8	28
20	8	30

Tab. 1.1 – Correlazione tra parametri spettrali (Thompson et al., 1996)

2 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO SBEACH

Il modello di simulazione numerica SBEACH (Storm-induced BEAch Change) è stato sviluppato dal US Army Engineer Waterways Experiment Station (Coastal Engineering Center) al fine di valutare e quantificare l'erosione del profilo del litorale sotto l'effetto di particolari mareggiate. Il modello originale è stato poi modificato e testato negli anni.

La previsione quantitativa della variazione del profilo del litorale in seguito all'azione delle onde e alle variazioni del livello del mare è uno dei maggiori problemi dell'ingegneria marittima. Il presente modello numerico (SBEACH) rappresenta un efficace strumento per valutare tali effetti a livello macroscopico, trascurando fenomeni su piccola scala come increspature del livello del mare ed evitando di addentrarsi in complesse formulazioni riguardanti flusso e concentrazione dei sedimenti. Uno dei vantaggi offerti dal modello è quello di riprodurre le principali caratteristiche morfologiche del profilo, in particolare ostacoli, barriere e berme.

Il modello è formalmente basato sull'equazione di conservazione della massa, la cui formulazione richiede un'espressione matematica per quanto concerne il trasporto attraverso il litorale. In questo caso, dal momento che il modello risulta, per quanto affermato in precedenza, piuttosto generale e flessibile, è sufficiente adottare una qualsiasi formula per il trasporto litoraneo, teorica o anche empirica.

2.1 Metodologia

Allo stato attuale, risulta chiaro come un qualsiasi modello numerico che si prefigga lo scopo di valutare i cambiamenti del profilo di una spiaggia debba basarsi su relazioni semi-empiriche derivate da misurazioni. Il modello presentato in questo contesto è stato sviluppato usando dati ricavati da esperimenti condotti anche su prototipi in scala (LWT).

Si assume che i principali cambiamenti nella forma del profilo della spiaggia siano provocati dalle onde che frangono sulla riva: perciò, il trasporto litoraneo è determinato dalle caratteristiche dell'onda locale, del livello del mare e della geometria del profilo. L'equazione che esprime la conservazione del materiale è formulata in maniera tale da valutare la variazione del profilo in funzione del tempo.

La distribuzione dell'altezza d'onda attraverso la riva è calcolata applicando la teoria dell'onda di piccola ampiezza (small-amplitude wave) a partire dal punto di frangimento dell'onda; successivamente il modello di decadimento dell'onda frangente, sviluppato da Dally (1980), viene applicato per prevedere l'altezza d'onda nelle zone di frangimento. Il profilo viene suddiviso in specifiche regioni in relazione alle caratteristiche dell'onda, relative ad un dato intervallo temporale.

La distribuzione percentuale del trasporto del materiale lungo la spiaggia viene quindi calcolata attraverso relazioni semi-empiriche valide nelle differenti regioni di trasporto. Nel tratto finale del profilo, verso riva, il limite di risalita costituisce un confine attraverso il quale non può esserci trasporto di materiale, mentre il confine verso mare è rappresentato dalla profondità in corrispondenza della quale non si verificano più movimenti del materiale. Una volta nota la distribuzione del trasporto lungo il profilo, le variazioni geometriche del profilo stesso vengono calcolate attraverso l'equazione di conservazione della massa. La procedura appena descritta è condotta ad ogni intervallo temporale seguendo lo schema risolutivo tipico dei metodi alle differenze finite, usando le condizioni dell'onda corrente incidente sulla spiaggia e il livello del mare, e aggiornando di volta in volta la geometria del profilo.

2.2 Modello adottato per le onde

Mentre le onde si avvicinano alla riva lungo un fondale leggeremente inclinato, aumentano in altezza e diminuiscono in lunghezza; questo fenomeno è dovuto allo shoaling. Può, pertanto, essere assunto che le onde incidano normalmente la costa, così da poter trascurare la rifrazione.

L'onda continua a crescere in altezza finchè non si arriva ad un valore critico per quanto riguarda il rapporto tra altezza dell'onda e profondità del fondale: a quel punto l'onda frange. La distribuzione dell'altezza d'onda attraverso il litorale è calcolata secondo la teoria lineare.

2.2.1 Criterio di frangimento e altezza frangente

Il rapporto tra l'altezza d'onda e la profondità del litorale nel punto di frangimento (chiamato "breaker index") è stato sviluppato utilizzando i dati di CRIEPI. Alcune osservazioni, effettuate a partire dall'analisi dei dati a disposizione, hanno evidenziato come l'indice di frangimento dipenda principalmente dall'inclinazione del fondale prima del frangimento e dalla pendenza dell'onda (Galvin 1969, Weggel 1972, Singamsetti e Wind 1980, Sunamura 1981). L'indice di frangimento aumenta all'aumentare dell'inclinazione del fondale e diminuisce all'aumentare della pendenza dell'onda.

Un'analisi regressiva mostra come la pendenza del profilo della spiaggia e l'inclinazione dell'onda possano essere inglobate assieme in un'unica equazione:

$$\frac{H_b}{h_b} = 1.14\left(\frac{\tan\beta}{\sqrt{H_0 / L_0}}\right)^{0.21} \qquad \text{(S1)}$$

dove tanβ rappresenta la pendenza locale del litorale verso mare nel punto di frangimento.

In Fig. 2.1, i dati degli esperimenti di CRIEPI sono stati riportati assieme alla retta di equazione (S1). Il modello adottato per le onde al fine di prevedere le condizioni di frangimento utilizza l'equazione appena descritta.

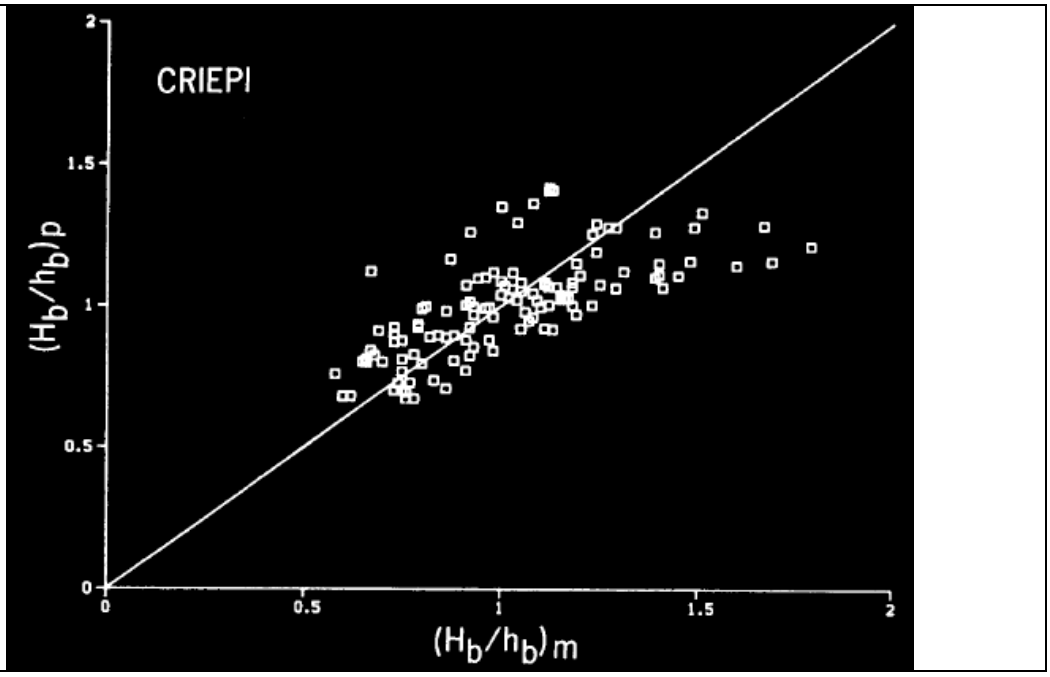


Fig. 2.1 – Confronto tra il rapporto di frangimento misurato e calcolato con l'equazione (S1)

2.2.2 Modello di decadimento dell'onda frangente

La maggior parte dei modelli utilizzati per descrivere il decadimento dell'altezza d'onda nella zona di frangimento contengono parametri empirici, i cui valori devono essere stimati attraverso una fase di calibrazione utilizzando dati misurati. Il modello per le onde, utilizzato in questo contesto, è stato proposto da Dally (1980); esso è stato verificato sia con dati di laboratorio (Dally 1980), sia con dati misurati in situ (Ebersole 1987).
L'equazione che governa il modello di decadimento dell'onda nella regione di frangimento può essere scritta, nella sua forma più generale, come:

$$\frac{dF}{dx} = -\frac{k}{h}\left(F - F_s\right) \qquad \text{(S2)},$$

dove k rappresenta il coefficiente empirico del decadimento dell'onda ed F_s il flusso di energia dell'onda stabile. Nell'equazione (S2), la coordinata x ha origine nel punto di frangimento ed è positiva verso mare.

L'ipotesi assunta nel formulare l'equazione (S2) è che la dissipazione di energia per unità di area sia proporzionale alla differenza tra il flusso di energia esistente e il flusso di energia stabile (l'onda che possiede tale valore di energia non frange).

Utilizzando la teoria lineare, il flusso dell'energia in un fondale poco profondo risulta:

$$F = \frac{1}{8}\rho g H^2 \sqrt{gh} \qquad \text{(S3)}.$$

Il flusso di energia stabile è generalmente una funzione della profondità del mare, ed, in particolare, un coefficiente Γ viene usato per esprimere il rapporto tra l'altezza locale dell'onda e la profondità del mare in corrispondenza delle condizioni di stabilità:

$$H_s = \Gamma h \qquad \text{(S4)}.$$

I valori misurati da CRIEPI della distribuzione dell'altezza d'onda sono stati usati per valutare l'efficienza del modello proposto e per stimare, quindi, il valore dei due parametri empirici k e Γ.
L'espressione dell'equazione (S2) per un profilo con forma qualsiasi, applicando la teoria lineare, risulta:

$$H = \left[\frac{1}{\sqrt{h}} \left(H_b^2 \sqrt{h_b}\, e^{-k\int_0^x \frac{dx}{h}} + e^{-k\int_0^x \frac{dx}{h}} k\Gamma^2 \int_0^x h\sqrt{h} e^{k\int_0^x \frac{dx}{h}} dx \right) \right]^{1/2} \qquad \text{(S5)},$$

dove, come accennato in precedenza, la coordinata x ha origine nel punto di frangimento.

La Fig. 2.2 mostra un confronto tra le altezze d'onda misurate, in diversi intervalli temporali, nella zona di frangimento e le relative curve derivanti dall'equazione (S5).

Il calcolo del setup e del setdown è inglobato nel calcolo dell'altezza d'onda; i valori di tali grandezze vengono determinati risolvendo la seguente equazione differenziale assieme all'equazione (S2):

$$\frac{dS_{xx}}{dx} = -\rho g (h+\eta) \frac{d\eta}{dx} \qquad \text{(6)},$$

dove S_{xx} rappresenta la componente del radiation stress diretta verso terra e η il setup.

Il radiation stress, utilizzando le approssimazioni per fondali poco profondi, risulta:

$$S_{xx} = \frac{3}{16} \rho g H^2 \qquad \text{(S7)}.$$

Il valore del setup nella prima cella di calcolo è fornito dalla soluzione analitica dell'equazione (S6), assumendo che non vi siano perdite di energia:

$$\eta = \frac{-\pi H^2}{4L \sinh\left(\frac{4\pi h}{L}\right)} \qquad \text{(S8)}.$$

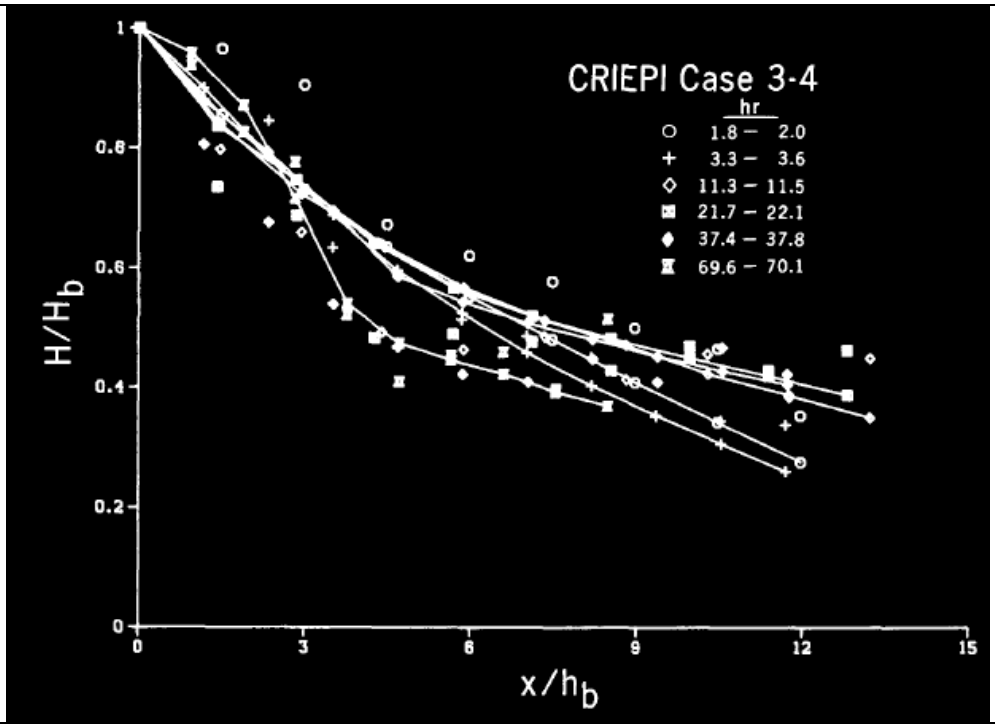


Fig. 2.2 – Altezze d'onda misurate e calcolate

2.3 Equazioni del trasporto lungo il profilo di spiaggia e verso del trasporto

La distribuzione del trasporto lungo il profilo di spiaggia (cross-shore) è stata calcolata utilizzando alcune relazioni, che si differenziano a seconda della zona del profilo di spiaggia in cui si va ad operare; il profilo, infatti, può essere suddiviso in 4 zone (Fig. 2.3).

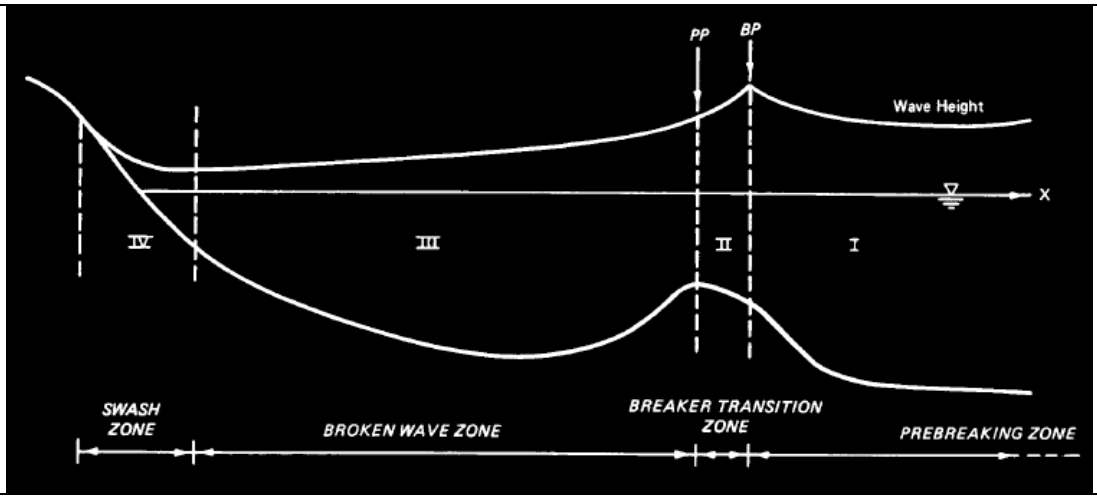


Fig. 2.3 – Rappresentazione schematica delle 4 zone di trasporto

Nella zona di frangimento (zona III) la distribuzione percentuale del trasporto è funzione della dissipazione di energia per unità di volume; sia verso mare che verso terra, rispetto alla zona di frangimento, vengono applicate relazioni semi-empiriche per il trasporto ricavate da esperimenti di laboratorio. L'entità del trasporto in tutte e quattro le zone è governata da quello calcolato nella zona di frangimento, dove prevalgono le onde frangenti.

Il ***verso del trasporto*** è determinato utilizzando un criterio basato sulla ripidità dell'onda al largo e sulla velocità di caduta dei sedimenti adimensionalizzata; è stato dimostrato che tale criterio, originariamente utilizzato per prevedere la formazione di berme e barre, risulta valido anche per la valutazione del verso del trasporto associato a tali fenomeni. Nel caso di formazione di una berma, infatti, il trasporto predominante ortogonale alla riva è diretto verso terra, nel caso di una barra è invece diretto verso il largo.
In base al criterio descritto il trasporto cross-shore è simultaneamente diretto o verso terra o verso mare; nel caso in cui il profilo di spiaggia sia prossimo a quello di equilibrio corrispondente all'onda incidente (situazione in cui il trasporto non è simultaneamente diretto verso terra o verso il largo, ma può presentare inversioni) il modello non è in grado di descrivere correttamente l'evoluzione del profilo.

Sia Moore (1982) che Kriebel (1982) hanno utilizzato per il trasporto solido cross-shore nella zona di frangimento formule basate sulla dissipazione di energia ed, in particolare, sulla differenza tra il valore della dissipazione ed un valore di riferimento D_{eq}, tale da non alterare significativamente la morfologia del profilo. Il profilo di spiaggia di Dean (1977), espresso dalla nota relazione tra profondità e distanza da riva, corrisponde ad un profilo di equilibrio derivato dal concetto di dissipazione di energia per unità di volume costante dal frangimento alla riva.
Nel presente modello adottato per la variazione del profilo viene utilizzata una relazione per il ***trasporto solido*** (q) simile a quella utilizzata da Moore e Kriebel (1982); tale relazione viene applicata interamente nella zona di frangimento (zona III) e presenta un termine aggiuntivo che tiene conto localmente dell'effetto dell'inclinazione:

$$q = \begin{cases} K\left(D - D_{eq} + \dfrac{\varepsilon}{K}\dfrac{dh}{dx} \right) & \Leftarrow D > D_{eq} - \dfrac{\varepsilon}{K}\dfrac{dh}{dx} \\ 0 & \Leftarrow D < D_{eq} - \dfrac{\varepsilon}{K}\dfrac{dh}{dx} \end{cases} \qquad \text{(S9)},$$

dove K rappresenta il coefficiente empirico della percentuale di trasporto, D l'energia di dissipazione dell'onda per unità di volume, D_{eq} l'energia di dissipazione di equilibrio per unità di volume ed ε il coefficiente di trasporto per il termine dipendente dall'inclinazione.

L'energia dissipata per unità di volume è data dalla variazione del flusso di energia F dell'onda:

$$D = \frac{1}{h}\frac{dF}{dx} \qquad \text{(S10)}.$$

L'equazione (S9) mostra come non vi sia trasporto nel caso in cui D diventi inferiore a D_{eq}, corretto dal termine che dipende dall'inclinazione del profilo; questo può accadere in seguito ad una variazione del livello del mare.

Fisicamente, la dissipazione dell'energia D_{eq} rappresenta uno stato in cui il trasporto netto, mediato nel tempo attraverso ciascuna sezione del profilo della spiaggia, risulta nullo. Tale valore di dissipazione dell'energia può essere espresso in funzione di un parametro geometrico del profilo A:

$$D_{eq} = \frac{5}{24}\rho g^{3/2}\gamma^2 A^{3/2} \qquad \text{(S11)},$$

dove γ rappresenta il rapporto tra l'altezza d'onda e la profondità nel punto di frangimento (indice di frangimento, H_b/h_b).

Dall'equazione (S10) si può dedurre che la dissipazione D contiene implicitamente un termine proporzionale alla pendenza del profilo di spiaggia; l'analisi dei dati sperimentali ha dimostrato come vi sia effettivamente una relazione tra tale pendenza e il trasporto solido. La pendenza del profilo è stata quindi inserita esplicitamente nella relazione (S9) che esprime il trasporto solido; Dean (1984) ha ulteriormente modificato tale relazione facendo dipendere D_{eq} dal rapporto tra il valore della pendenza e la pendenza critica per la stabilità del profilo.
I valori del coefficiente K ottenuti da prove di laboratorio, anche se da esperimenti non completamente affini, sono nel range di 1.1÷8.7 10^{-6} m^4/N, mentre il coefficiente ε, analogamente determinato, risulta dell'ordine di 0.0006 m^2/s.

In ogni caso, negli studi condotti per lo sviluppo del presente modello, la maggiore compatibilità di risultati tra le simulazioni effettuate con il modello e le variazioni di profilo misurate effettivamente, è stata ottenuta utilizzando il valore di D_{eq} calcolato con i coefficiente proposti da Moore (1982) e Kriebel (1982) [K = 2.2 10^{-6} m^4/N e ε = 0.0006 m^2/s] e successivamente ridotto del 25%.

L'equazione del profilo di equilibrio, tenendo in considerazione anche il termine dipendente dalla pendenza del profilo, può essere scritta come segue:

$$h\sqrt{h} + \frac{\varepsilon}{K}\frac{24}{5\rho g^{3/2}\gamma^2} = A^{3/2}x \qquad \text{(S12)}.$$

Nell'equazione (S12) la profondità del fondale è una funzione implicita della distanza dalla riva; inoltre si può osservare come verso mare il profilo risulti pressochè coincidente con il profilo di Dean.
Nel modello numerico, le regioni di frangimento vengono individuate ad ogni intervallo temporale e il trasporto litoraneo viene determinato attraverso l'equazione (S9). Le onde vengono considerate totalmente frangenti a partire dal punto di collasso dell'onda posto al confine verso riva della zona di frangimento o a partire dal punto in cui l'onda si riforma. La posizione del punto di collasso viene definita con riferimento al punto di frangimento e alla "lunghezza del frangimento" (ampiezza della breaker transition zone in Fig. 2.3). Galvin (1969) ha stimato che la lunghezza di frangimento l_p sia almeno pari a quattro volte l'altezza di frangimento dell'onda, mostrando perciò una legame con l'inclinazione della spiaggia tanβ; l'equazione di Galvin è la seguente:

$$\frac{l_p}{H_b} = 4.0 - 9.25\tan\beta \qquad \text{(S13)}.$$

L'equazione (S13) è stata testata per prevedere la lunghezza di frangimento, ma fornisce distanze non confrontabili con quelle realmente misurate; pertanto, nel presente modello numerico è stato adottato un valore pari a tre volte l'altezza d'onda di frangimento.

Per la regione posta verso il largo rispetto al punto di frangimento, il trasporto solido cross-shore decresce con andamento esponenziale in funzione della distanza verso il largo; il coefficiente di decadimento, per il trasporto diretto verso il largo, dipende dall'altezza d'onda al frangimento e dal D_{50} dei sedimenti, mentre per quello diretto verso riva è costante.
Per la zona II, interessata dal frangimento, viene ancora usato un andamento esponenziale, ma con un coefficiente di decadimento pari al 20% di quello impiegato per la regione più al largo.
L'andamento del trasporto nella regione III e IV, verso riva, è lineare e si annulla nel punto di massima risalita dell'onda; il trasporto in questa regione tende ad annullarsi con l'avvicinarsi, nella zona II di frangimento, del profilo a quello di equilibrio.
Nella zona IV, in prossimità della linea di riva, tendono a svilupparsi pendenze molto elevate, limitate dall'instabilità della scarpata (dipendente dall'angolo di attrito di picco e residuo del materiale, rispettivamente 28° e 18° nei test di laboratorio effettuati).

2.4 Modello di variazione del profilo

Le variazioni del profilo sono calcolate ad ogni intervallo temporale attraverso l'equazione della distribuzione del trasporto solido lungo il litorale e l'equazione di conservazione della massa.
L'equazione di conservazione della massa può essere scritta come segue:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial t} \qquad \text{(S14)}.$$

Le condizioni al contorno standard applicate nel modello assumono che non vi sia trasporto (verso riva) oltre il limite di massima risalita dell'onda, definito da una relazione empirica, e (verso mare) a profondità superiori a quella per la quale la relazione di decadimento esponenziale fornisce valori di trasporto inferiori ad una data soglia.
Nel calcolo della distribuzione dell'altezza d'onda attraverso la riva ad un determinato intervallo temporale, viene utilizzato il profilo della spiaggia calcolato nel precedente step temporale e le percentuali di trasporto lungo il litorale vengono calcolate esplicitamente. La conservazione della massa viene riportata in forma differenziale come:

$$\frac{h_i^{k+1} - h_i^k}{\Delta t} = \frac{1}{2}\left[\frac{q_{i+1}^{k+1} - q_i^{k+1}}{\Delta x} + \frac{q_{i+1}^{k} - q_i^{k}}{\Delta x}\right] \qquad \text{(S15)},$$

dove k rappresenta il livello temporale e *i* il numero della cella considerata.

L'equazione della massa viene discretizzata su due livelli temporali utilizzando i valori di trasporto solido, calcolati facendo riferimento al livello temporale corrente e a quello precedente.
Il modello numerico, presentato in questo contesto, risulta essere stabile sotto un ampia gamma di condizioni, anche con batimetrie particolarmente irregolari.
Nel caso di un profilo di spiaggia esposto a mareggiate con condizioni di onda e di livello del mare costanti, la geometria del profilo, derivante dalla simulazione con il presente modello, si avvicina notevolmente ad una situazione quasi-stazionaria, rappresentata da un profilo di equilibrio. L'avvicinamento ad una condizione di equilibrio è controllato dalla velocità con cui la dissipazione dell'energia nella zona di frangimento si avvicina al valore di equilibrio D_{eq}. All'equilibrio, il punto di frangimento è stazionario e la dissipazione dell'energia per unità di volume dell'acqua è costante attraverso tutta la zona di frangimento, risultando all'incirca pari a D_{eq}, corretto dal termine dipendente dall'inclinazione del profilo.