R.T.P.: Dott. Ing. Paolo Gaggero, HS marine S.r.l., Dott. Geol. Marcello Brancucci e Ing. Luca Rossi

Dott. Ing. Paolo Gaggero via Pia 130/r - 17100 Savona (SV) - tel. 019 829463 - e.mail: ing.gaggero@libero.it
HS marine S.r.l. via Panà 56/a - 35027 Noventa Padovana (PD) - tel.049 8945087 - e.mail: mail@hsmarinesrl.com
Dott. Geol. Marcello Brancucci via XX Settembre 5/5 - 17100 Savona (SV) - tel. 019/2216824 - e.mail: geologo@marcellobrancucci.it
Ing. Luca Rossi via Bertolotti 79/B -17014 Cairo Montenotte(SV)-tel. 328 9419041 - e.mail:luca87.rossi@hotmail.com

Committente:

PORTS of GENOA
VADO LIGURE ▪ SAVONA ▪ PRA' ▪ GENOVA

INTERVENTO STRUTTURALE A DIFESA DELLA COSTA DI VADO LIGURE PROGETTAZIONE DEFINITIVA

CIG. n. ZEE252A10E



Elaborato B.01	**RELAZIONE TECNICA E STUDI SPECIALISTICI**

Professionisti:

Ing. PAOLO GAGGERO
Ordine ingegneri della provincia di Savona n. 463

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

Collaborazione tecnica: **Ingg. N. SGUOTTI, S. BERIOTTO e L. ROSSI**

Commessa: HSM813-PD	REV: 00	Data: Luglio 2019

INDICE

1 PREMESSA 6

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO 7

3 CLIMA ONDOSO AL LARGO 10

3.1 DATI U.K.M.O. 10

3.2 Livelli del mare 15

3.2.1 Statistica degli eventi estremi di marea 16

4 CLIMA ONDOSO SOTTO COSTA 17

4.1 SETTORE DI TRAVERSIA 17

4.2 SETTAGGIO DEL MODELLO 18

4.2.1 Definizione della griglia di calcolo STWAVE 18

4.2.2 Dati di input 19

4.3 CLIMA ONDOSO LOCALE (PUNTO P) 21

5 CARATTERISTICHE SEDIMENTOLOGICHE 24

6 DINAMICA LITORANEA LOCALE IN CONFIGURAZIONE ATTUALE 27

6.1 SETTAGGIO DEI MODELLI 27

6.1.1 Condizioni ondametriche e anemometriche imposte nel modello 29

6.1.2 Condizioni anemometriche imposte nel modello 30

6.2 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTO COSTA 31

6.3 CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA COSTIERA 34

7 TRASPORTO SOLIDO LITORANEO ED EVOLUZIONE DEI FONDALI IN CONFIGURAZIONE ATTUALE 38

7.1 SETTAGGIO DEL MODELLO 38

7.1.1 Dati sedimentologici 38

7.2 TRASPORTO SOLIDO 39

7.3 EVOLUZIONE DEI FONDALI 43

8 EVOLUZIONE MORFOLOGICA DEL LITORALE IN CONFIGURAZIONE ATTUALE 47

8.1 RICOSTRUZIONE STORICA DELL'EVOLUZIONE MORFOLOGICA DEL LITORALE 48

8.2 PREMESSA ALLA MODELLAZIONE 50

8.3 PROFONDITÀ DI CHIUSURA E ALTEZZA DI SWASH 51

8.4 TARATURA DEL MODELLO (1993-2010) 52

8.4.1 Propagazione del moto ondoso sotto costa 52

8.4.2 Costruzione della griglia GENESIS 54

8.4.3 Risultati della simulazione di taratura 57

8.5 EVOLUZIONE MORFOLOGICA A 10 ANNI IN CONFIGURAZIONE ATTUALE 59

8.5.1 Propagazione del moto ondoso sotto costa 59

8.5.2 Parametri utilizzati nel modello 60

8.5.3 Evoluzione della linea di riva e trasporto litoraneo 61

9 DESCRIZIONE DELLA CONFIGURAZIONE DI PROGETTO 63

9.1 ANALISI DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI 63

9.2 CONFIGURAZIONE DI PROGETTO 67

10 DINAMICA LITORANEA LOCALE IN CONFIGURAZIONE DI PROGETTO 73

10.1 SETTAGGIO DEL MODELLO 73

10.2 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTO COSTA 73

10.3 CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA COSTIERA 76

11 TRASPORTO SOLIDO LITORANEO ED EVOLUZIONE DEI FONDALI IN CONFIGURAZIONE DI PROGETTO 80

11.1.1 Dati sedimentologici 80

11.2 TRASPORTO SOLIDO 81

11.3 EVOLUZIONE DEI FONDALI 85

12 EVOLUZIONE MORFOLOGICA DEL LITORALE IN CONFIGURAZIONE DI PROGETTO 89

12.1 COSTRUZIONE DELLA GRIGLIA GENESIS 89

12.2 EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA E TRASPORTO LITORANEO 90

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 2.1 - Inquadramento geografico del paraggio 7
Fig. 2.2 – Dettaglio area di intervento (foto aerea Google Earth) 8
Fig. 2.3 – Deattaglio terrapieno alla radice del pontile Tirreno Power (foto aerea Google Earth) 9
Fig. 2.4 – Deattaglio difesa radente e area di foce del Torrente Segno (foto aerea Google Earth) 9
Fig. 3.1 – UK Metereological Office European Wave Model – Punti di rilievo 10
Fig. 3.2 – Punto UKMO 8.73°E - 44.0°N 11
Fig. 3.3 – Rosa delle registrazioni relativa al punto U.K.M.O. (8.73° E - 44.0°N) 13
Fig. 3.4 – Rosa delle energie relativa al punto U.K.M.O. (8.73° E - 44.0°N) 13
Fig. 3.5 – Rosa delle altezze massime relativa al punto U.K.M.O. (8.73° E - 44.0°N) 14
Fig. 3.6 – Curva di durata relativa al punto U.K.M.O. (8.73° E - 44.0°N) 14
Fig. 4.1 – Individuazione del settore di traversia 17
Fig. 4.2 – Griglia di calcolo STWAVE per la propagazione del clima ondoso 18
Fig. 4.3 – Correlazioni H_S-T_z per i tre settori 50°÷90°N, 90°÷180°N e 180°÷210°N 20
Fig. 4.4 – Rosa delle registrazioni relativa al punto P 21
Fig. 4.5 – Rosa delle energie relativa al punto P 22
Fig. 4.6 – Rosa delle altezze massime relativa al punto P 22
Fig. 4.7 – Curva di durata relativa al punto P 23
Fig. 5.1 – Ubicazione dei punti di prelievo (campagna di idagini di febbraio-maggio 2010) 24
Fig. 6.1 – Dominio di calcolo dei modelli impiegati per lo studio della propagazione e della circolazione 28
Fig. 6.2 – Curva di durata relativa al punto P per i 3 settori individuati 29
Fig. 6.3 – TEST 1 – Caratteristiche mareggiata in P: H_S = 1.64 m, T_P= 6.50 s, Dir = 75°N 32
Fig. 6.4 – TEST 2 – Caratteristiche mareggiata in p: H_S = 1.93 m, T_P= 6.80 s, Dir = 145°N 32
Fig. 6.5 – TEST 3 – Caratteristiche mareggiata in P: H_S = 2.22 m, T_P= 7.80 s, Dir = 185°N 33
Fig. 6.6 – TEST 1 – Mareggiata di Levante - Circolazione idrodinamica 35
Fig. 6.7 – TEST 1 – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 35
Fig. 6.8 – TEST 2 – Mareggiata di Scirocco - Circolazione idrodinamica 36
Fig. 6.9 – TEST 2 – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 36
Fig. 6.10 – TEST 3 – Mareggiata di Mezzogiorno - Circolazione idrodinamica 37
Fig. 6.11 – TEST 3 – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 37
Fig. 7.1 – TEST 1 – Mareggiata di Levante - Trasporto solido 40
Fig. 7.2 – TEST 1 – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 40
Fig. 7.3 – TEST 2 – Mareggiata di Scirocco - Trasporto solido 41
Fig. 7.4 – TEST 2 – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 41
Fig. 7.5 – TEST 3 – Mareggiata di Mezzogiorno - Trasporto solido 42
Fig. 7.6 – TEST 3 – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 42
Fig. 7.7 – TEST 1 – Mareggiata di Levante - Evoluzione dei fondali 44
Fig. 7.8 – TEST 2 – Mareggiata di Scirocco - Evoluzione dei fondali 45
Fig. 7.9 – TEST 3 – Mareggiata di Mezzogiorno - Evoluzione dei fondali 46
Fig. 8.1 – Evoluzione storica della linea di riva dal 1944 al 2018 49
Fig. 8.2 – Individuazione $H_{0.12}$ – Curva di durata nel punto P 51
Fig. 8.3 –Griglie di calcolo STWAVE e GENESIS 52
Fig. 8.4 – Griglia di calcolo STWAVE – Simulazione di taratura 53
Fig. 8.5 – Griglia di calcolo genesis – Taratura 1993-2010 55
Fig. 8.6 – Individuazione della classe di sedimenti corrispondenti alle ghiaie medio-fini sulla base della curva granulometrica del campione di materiale prelevato alla foce del Torrente Segno 56
Fig. 8.7 – Taratura del modello (1993-2010) - Andamento trasporto solido longitudinale ed evoluzione della linea di riva 58
Fig. 8.8 – Griglia di calcolo STWAVE – Stato attuale 59
Fig. 8.9 – Griglia GENESIS in configurazione attuale 60
Fig. 8.10 – Evoluzione a 10 anni in configurazione attuale - Andamento trasporto solido longitudinale (in alto) ed evoluzione della linea di riva (in basso) 62
Fig. 9.1 – Alternative progettuali analizzate (scenario “a” in azzurro e “b” in rosso) 64
Fig. 9.2 – Risultati evoluzione morfologica della linea di costa a 10 anni con riferimento ai due scenari analizzati Analisi dell’efficienza delle opere rigide 65

Fig. 9.3 – Risultati evoluzione morfologica della linea di costa a 10 anni – Scenario "b" con e senza ripascimento Analisi dell'efficienza del ripascimento 66
Fig. 9.4 – Sezione tipologica ripascimento 68
Fig. 9.5 – Sezione tipologica secca semiaffiorante 68
Fig. 9.6 – Planimetria di progetto secche 69
Fig. 9.7 – Planimetria di progetto scogliera radente con risalti longitudinali 70
Fig. 9.8 – Sezioni tipologiche ripristino scogliera radente con risalti longitudinali 71
Fig. 9.9 – Planimetria pennello 72
Fig. 9.10 – Sezione trasversale tipologica 72
Fig. 10.1 – TEST 1 Progetto – Caratteristiche mareggiata in P: H_S = 1.64 m, T_P= 6.50 s, Dir = 75°N 74
Fig. 10.2 – TEST 1 – Confronto risultati propagazione in stato attuale e in configurazione di progetto 74
Fig. 10.3 – TEST 2 Progetto – Caratteristiche mareggiata in p: H_S = 1.93 m, T_P= 6.80 s, Dir = 145°N 75
Fig. 10.4 – TEST 3 Progetto – Caratteristiche mareggiata in P: H_S = 2.22 m, T_P= 7.80 s, Dir = 185°N 75
Fig. 10.5 – TEST 1 Progetto – Mareggiata di Levante - Circolazione idrodinamica 77
Fig. 10.6 – TEST 1 Progetto – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 77
Fig. 10.7 – TEST 2 Progetto – Mareggiata di Scirocco - Circolazione idrodinamica 78
Fig. 10.8 – TEST 2 Progetto – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 78
Fig. 10.9 – TEST 3 Progetto – Mareggiata di Mezzogiorno - Circolazione idrodinamica 79
Fig. 10.10 – TEST 3 Progetto – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 79
Fig. 11.1 – Schematizzazione della tessitura dei fondali nel dominio di calcolo, in configurazione di progetto, e particolare del fondale inerodibile (aree verdi) di fronte alla scogliera 80
Fig. 11.2 – TEST 1 Progetto – Mareggiata di Levante - Trasporto solido 82
Fig. 11.3 – TEST 1 Progetto – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 82
Fig. 11.4 – TEST 2 Progetto – Mareggiata di Scirocco - Trasporto solido 83
Fig. 11.5 – TEST 2 Progetto – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 83
Fig. 11.6 – TEST 3 Progetto – Mareggiata di Mezzogiorno - Trasporto solido 84
Fig. 11.7 – TEST 3 Progetto – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento 84
Fig. 11.8 – TEST 1 Progetto – Mareggiata di Levante – Evoluzione dei fondali 86
Fig. 11.9 – TEST 2 Progetto – Mareggiata di Scirocco - Evoluzione dei fondali 87
Fig. 11.10 – TEST 3 Progetto – Mareggiata di Mezzogiorno - Evoluzione dei fondali 88
Fig. 12.1 – Griglia GENESIS in configurazione di progetto 90
Fig. 12.2 – Evoluzione a 10 anni in configurazione di progetto - Andamento trasporto solido longitudinale (in alto) ed evoluzione della linea di riva (in basso) 91

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 3.1 – Registrazioni suddivise per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza Dati U.K.M.O. (Gen 1987 - Dic 2008) 12
Tab. 3.2 – Valori massimi annuali della marea meteorologica 15
Tab. 3.3 – Risultati dell'analisi statistica dei livelli estremi 16
Tab. 5.1 – Diametro medio dei grani - Campioni spiaggia sommersa 25
Tab. 5.2 – Diametro medio dei grani - Campioni spiaggia emersa 25
Tab. 6.1 – Mareggiate caratteristiche nel punto P 29
Tab. 6.2 – Condizioni di vento imposte nel modello di circolazione 30
Tab. 8.1 – Parametri impiegati nel modello GENESIS – Taratura 54

ALLEGATI

Allegato A – Descrizione codici di calcolo

1 PREMESSA

Il R.T.P., costituito dall'ing. Paolo Gaggero, dalla società HS marine S.r.l., dal Dott. Geol. Marcello Brancucci e dall'Ing. Luca Rossi, ha ricevuto dall'Autorità Portuale di Savona l'incarico per la redazione della progettazione definitiva dell'"intervento strutturale a difesa della costa di Vado Ligure" (CIG: ZEE252A10E).

La presente relazione tecnica riporta i risultati dello studio della dinamica litoranea, del trasporto solido e dell'evoluzione morfologica del litorale, finalizzati all'individuazione della soluzione progettuale.

In particolare, lo studio è stato articolato nelle seguenti fasi:

- inquadramento geografico;
- rianalisi dei dati meteomarini disponibili (al largo e sotto costa);
- analisi delle caratteristiche sedimentologiche della spiaggia attiva;
- studio su modello matematico della dinamica litoranea, del trasporto solido e dell'evoluzione dei fondali in configurazione attuale;
- ricostruzione dell'evoluzione storica più recente del litorale e simulazione su modello matematico dell'evoluzione morfologica del litorale in configurazione attuale;
- analisi su modello matematico (evoluzione morfologica) delle possibili alternative progettuali e scelta della soluzione di progetto:
- studio su modello matematico della dinamica litoranea, del trasporto solido e dell'evoluzione dei fondali in configurazione attuale;
- simulazione dell'evoluzione morfologica del litorale con riferimento alla configurazione di progetto prevista;

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area di interesse è situata sulla costa occidentale della Regione Liguria, in provincia di Savona, a Nord del Porto commerciale di Vado.
Più in dettaglio, il tratto di litorale oggetto di studio è compreso tra il pontile Tirreno Power posto a Sud della foce del T. Quiliano, a Nord-Est, e la foce del T. Segno, a Sud-Ovest (Fig. 2.1). che confina a sua volta con la nuova piattaforma del porto di Vado.



Fig. 2.1 - Inquadramento geografico del paraggio

Lo studio ha come oggetto l'analisi della dinamica litoranea del tratto di litorale a Nord del T. Segno, in termini di moto ondoso, circolazione idrodinamica, trasporto solido ed evoluzione della linea di riva.
L'area prioritaria di interesse è circoscritta a tale tratto di, tuttavia, al fine di condurre un'adeguata analisi modellistica tenendo in considerazione i principali fenomeni che agiscono sull'evoluzione e sulla dinamica del paraggio, l'area di studio è stata opportunamente estesa, comprendendo il tratto di costa a Nord-Est del Torrente Quiliano e il tratto di costa fino al Porto di Vado. Di seguito si riporta una breve descrizione dell'area di interesse (Fig. 2.2).
A Sud del T. Quiliano, in prossimità del pontile Tirreno Power, si trova un cantiere nautico e un terrapieno (Fig. 2.4), delimitato a mare da un scogliera radente in massi naturali (di seguito denominata "scogliera"). Il pontile Tirreno Power è interamente su pali e si estende verso il largo per un lunghezza di circa 400 m.



Fig. 2.2 – Dettaglio area di intervento (foto aerea Google Earth)

A Sud del pontile si estende il tratto di spiaggia oggetto di studio, per una lunghezza complessiva di circa 600 m, fino alla difesa radente che si trova a Nord della foce del Torrente Segno; quest'ultimo è attualmente privo di armature di foce e la sezione di sbocco risulta parzialmente ostruita (Fig. 2.4) dal trasporto solido litoraneo.
Più a Sud, si trovano due ulteriori pontili su pali: il pontile Vadoil e il pontile Esso. All'estremità meridionale dell'area di interesse si trova, infine, la piastra multifunzionale in corso di realizzazione e il porto commerciale di Vado Ligure, che allo stato attuale presenta un molo di sopraflutto con orientamento NNW, lungo circa 800 m.



Fig. 2.3 – Deattaglio terrapieno alla radice del pontile Tirreno Power (foto aerea Google Earth)



Fig. 2.4 – Deattaglio difesa radente e area di foce del Torrente Segno (foto aerea Google Earth)

3 CLIMA ONDOSO AL LARGO

Le caratteristiche del moto ondoso del paraggio, utilizzate nella modellazione idrodinamica e morfologica, sono state ricavate da studi pregressi; in particolare, si è fatto riferimento alla "Relazione tecnica" redatta nel Luglio 2014 dagli scriventi per conto dell'Autorità Portuale di Savona relativa allo "Studio idraulico marittimo relativo alla sistemazione idraulica del tratto terminale del Torrente Segno". Un breve riepilogo dei dati di moto ondoso al largo e sotto costa, ricavati da tale studio, è riportato nei paragrafi successivi.

3.1 Dati U.K.M.O.

Il clima ondoso al largo del paraggio di Vado Ligure è stato definito utilizzando i dati U.K.M.O., forniti dal centro meteorologico inglese "UK Meteorological Office". Il modello European Wave Model dell'U.K.M.O. ricostruisce lo stato del mare a partire dai dati meteorologici (carte bariche) e dal campo di moto. I modelli U.K.M.O. Global Wave Model e European Wave Model sono modelli della seconda generazione per la parametrizzazione non lineare dello spettro del moto ondoso. I dati ottenibili, con cadenza di 30 minuti, sono relativi ad ogni nodo della maglia.
Il modello UK Met Office Wave Model copre le acque europee con una griglia locale (European Wave Model) le cui maglie hanno lati di 25÷30 km (vedi Fig. 3.1). L'archivio del modello, che elabora con continuità i dati meteorologici, fornisce dati sequenziali di vento e moto ondoso a partire dall'ottobre 1986. Lo European Wave Model si annida all'interno del Global Wave Model (maglia di lato pari a 150 km), che elabora i dati su scala maggiore.

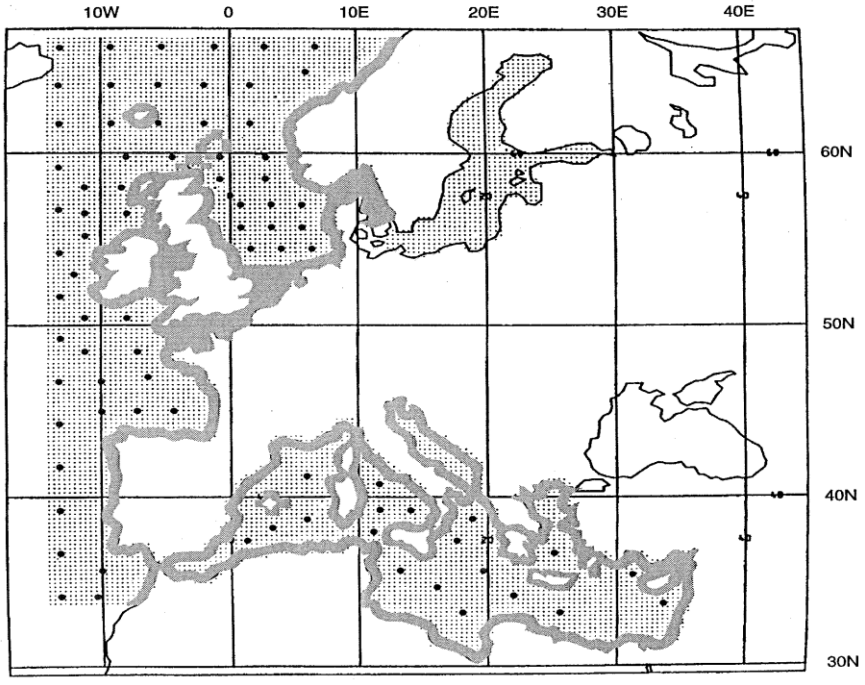


Fig. 3.1 – UK Metereological Office European Wave Model – Punti di rilievo

Con riferimento al paraggio di Savona-Vado è stato considerato il punto di coordinate geografiche (44.0°N, 8.73°E), situato nel Mar Ligure tra Imperia e Genova su un fondale di oltre 1000 m (Fig. 3.2).
I dati dell'UKMO si riferiscono al periodo di osservazione che va dal 1 gennaio 1987 al 31 dicembre 2008 e sono costituiti da registrazioni triorarie che sono state elaborate 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 con ampiezza 0.5 m (vedi successiva Tab. 3.1).
A partire dal clima ondoso al largo così ricostruito è stato possibile ricavare le rose delle registrazioni (Fig. 3.3), delle energie (Fig. 3.4) e delle altezze massime (Fig. 3.5).
Si può notare che gli eventi con percentuale di apparizione più elevata corrispondono a mareggiate provenienti da Libeccio (205°N), caratterizzate da altezze massime superiori ai 4 m. In termini di energia del moto ondoso, si evidenzia ancora un picco di energia in corrispondenza della medesima direzione (Libeccio 205°N).
É stato inoltre possibile ricostruire la curva di durata, che consente di mettere in relazione le caratteristiche di un evento con la sua durata media annuale. Il grafico relativo alla curva di durata viene riportato in Fig. 3.6; si può notare che eventi con altezza d'onda superiore ai 2 m si presentano mediamente per meno di 7÷8 giorni all'anno.

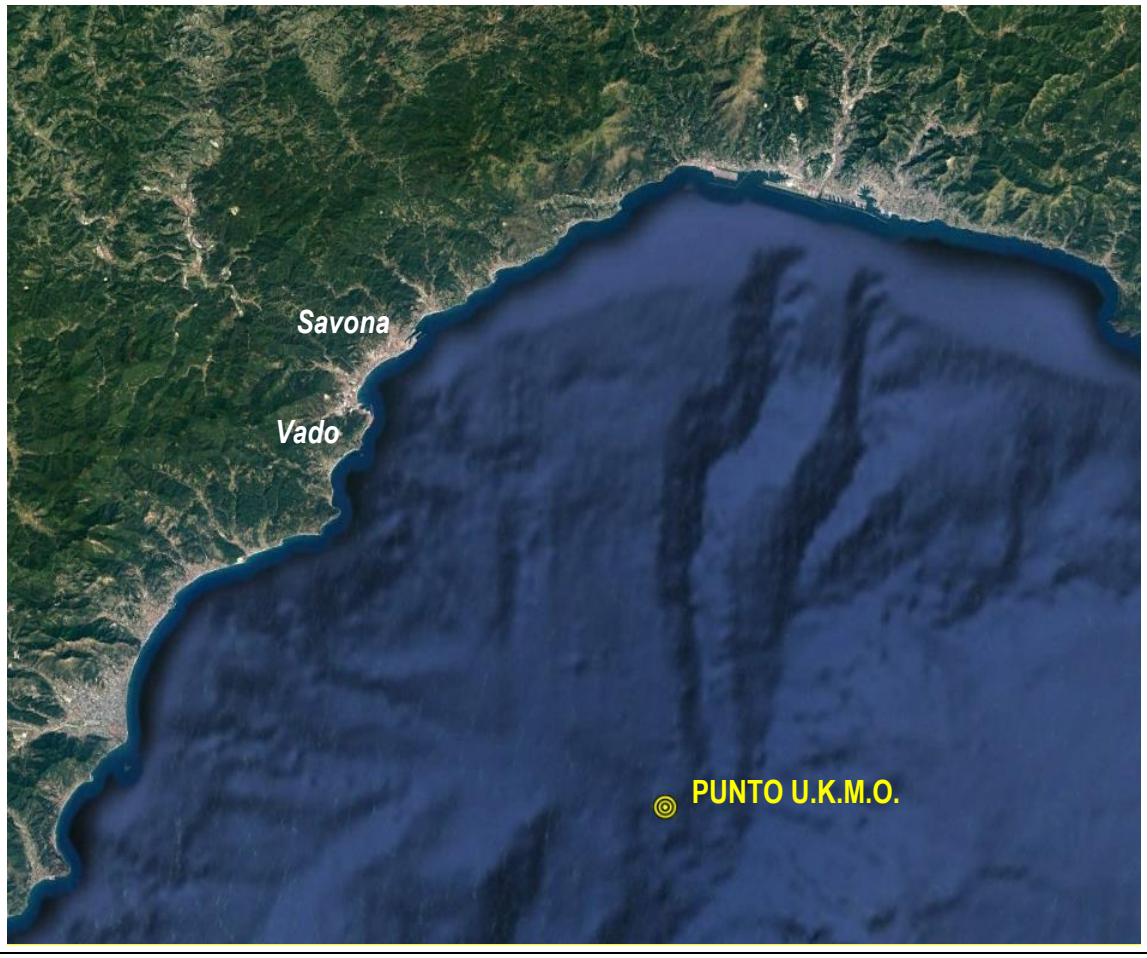


Fig. 3.2 – Punto UKMO 8.73°E - 44.0°N

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. 3.1 – Registrazioni suddivise per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza
Dati U.K.M.O. (Gen 1987 - Dic 2008)

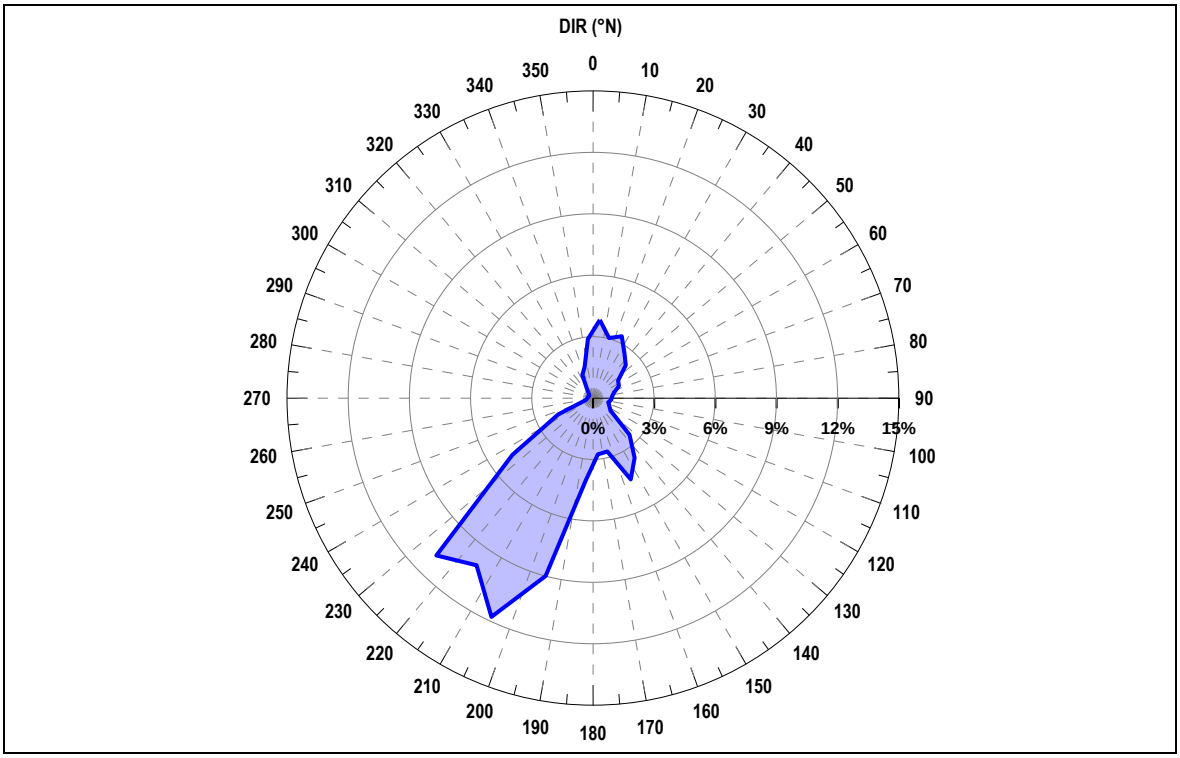


Fig. 3.3 – Rosa delle registrazioni relativa al punto U.K.M.O. (8.73° E - 44.0°N)

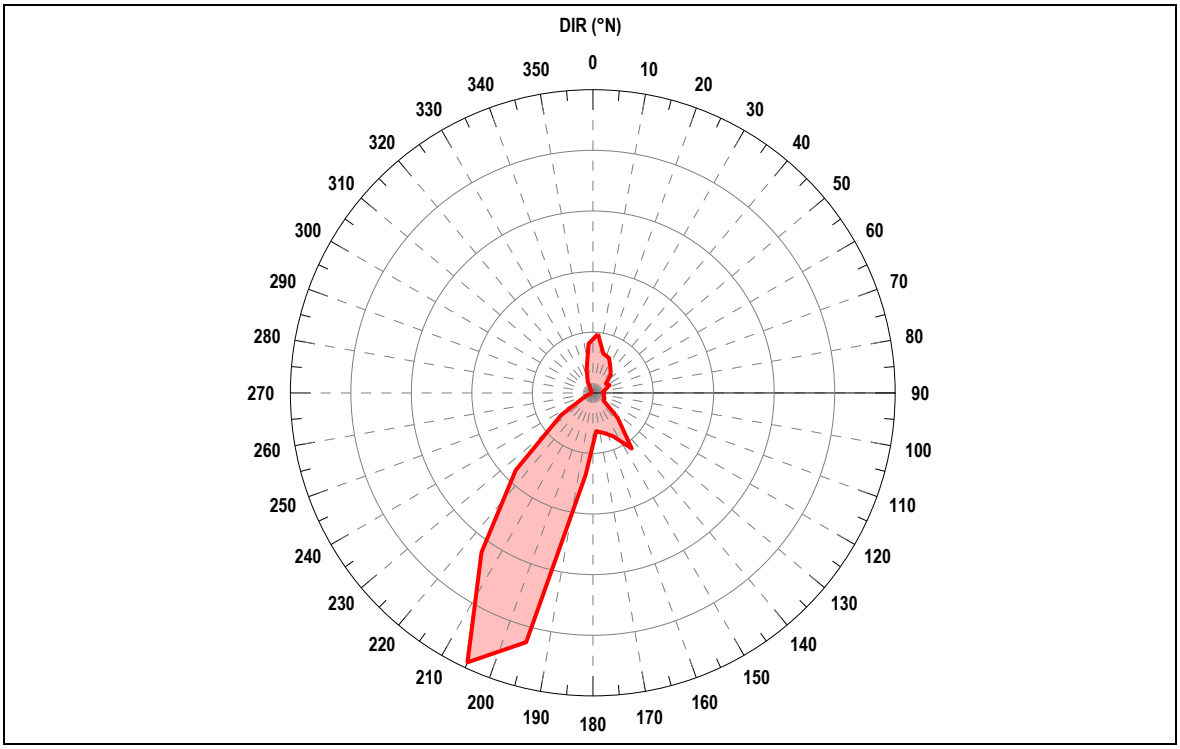


Fig. 3.4 – Rosa delle energie relativa al punto U.K.M.O. (8.73° E - 44.0°N)

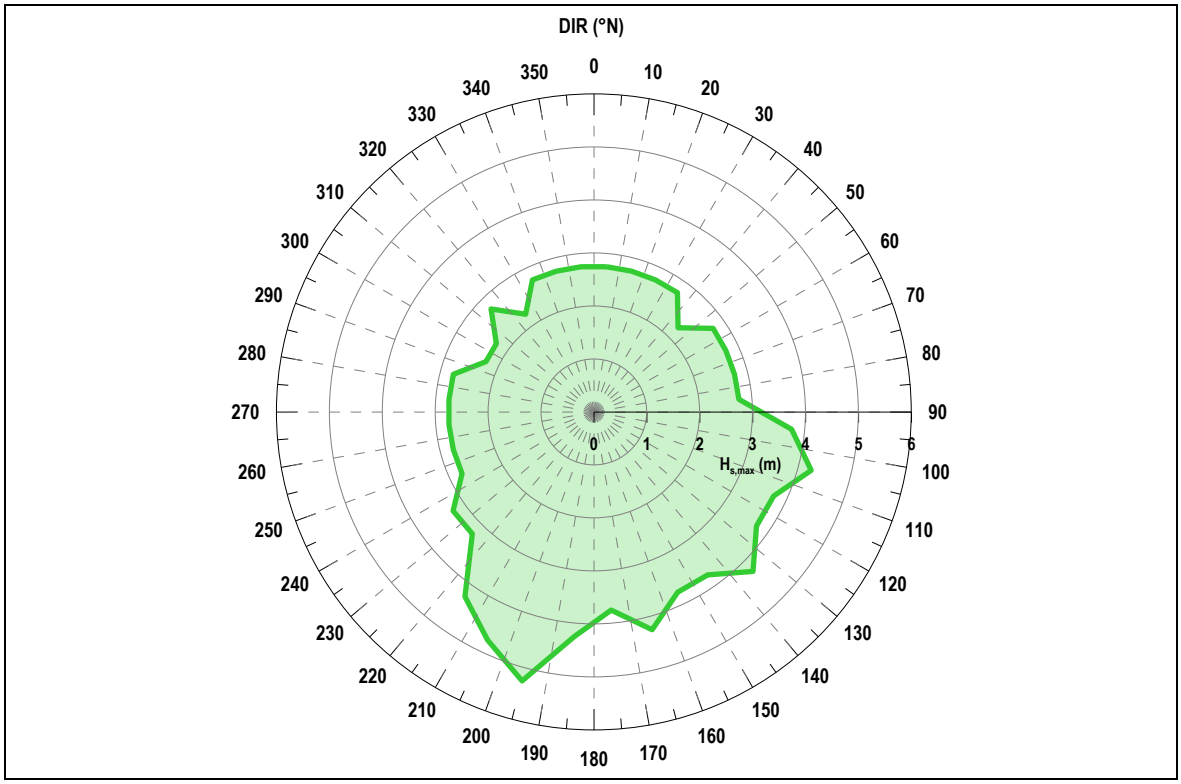


Fig. 3.5 – Rosa delle altezze massime relativa al punto U.K.M.O. (8.73° E - 44.0°N)

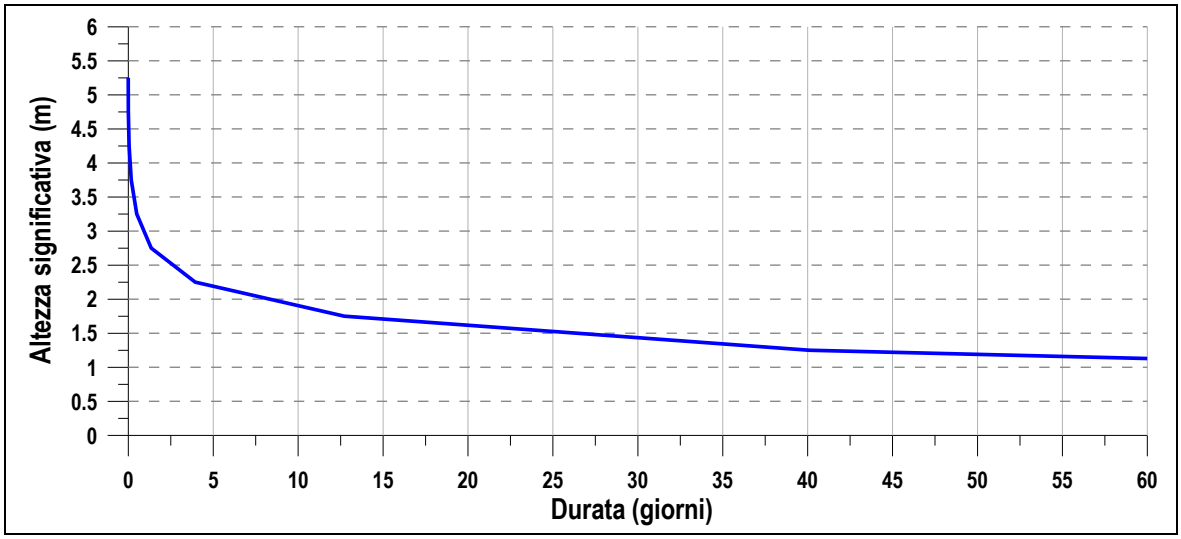


Fig. 3.6 – Curva di durata relativa al punto U.K.M.O. (8.73° E - 44.0°N)

3.2 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 al livello del medio mare 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. 3.2 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. 3.2 – Valori massimi annuali della marea meteorologica

3.2.1 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. 3.3, 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. 3.3.

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. 3.3 – Risultati dell'analisi statistica dei livelli estremi

4 CLIMA ONDOSO SOTTO COSTA

Nel presente paragrafo sono riportate le elaborazioni eseguite al fine di ricavare il clima ondoso sotto costa; le elaborazioni sono estratte dallo studio citato nel capitolo precedente.
Il clima ondoso al largo, descritto nel precedente capitolo, è stato propagato in corrispondenza di un punto posto di fronte al paraggio oggetto di studio (punto P).
Il moto ondoso in questo punto, più vicino a riva, è stato successivamente utilizzato per definire i dati di input per lo studio della propagazione locale, della circolazione idrodinamica e del trasporto litoraneo (codici di calcolo CMS-WAVE, CMS-FLOW), con riferimento ad alcune mareggiate ritenute significative, nonché per lo studio dell'evoluzione morfologica del litorale. La propagazione locale del clima ondoso è stata condotta per mezzo del codice di calcolo STWAVE descritto in dettaglio nell'allegato A.

4.1 Settore di traversia

Sulla base dell'analisi del moto ondoso al largo e sulla base della conformazione geografica e dell'ubicazione dell'area oggetto di studio, è stato possibile individuare il settore di traversia caratteristico del paraggio, che risulta compreso tra 50° e 210°N (Fig. 4.1).
Di conseguenza, le propagazioni del clima ondoso sotto costa, sono state condotte propagando gli eventi ondosi compresi all'interno del settore 50°÷210°N.

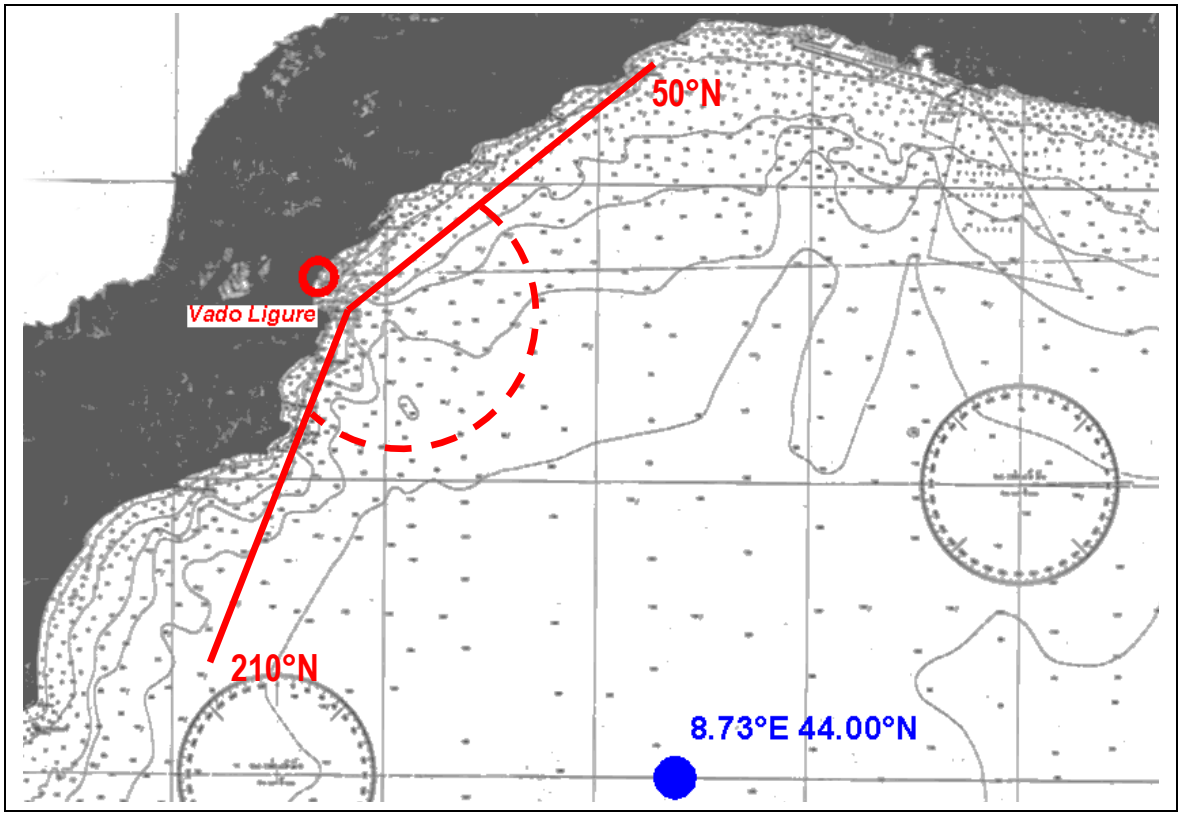


Fig. 4.1 – Individuazione del settore di traversia

4.2 Settaggio del modello

4.2.1 Definizione della griglia di calcolo STWAVE

Per la costruzione del dominio di calcolo del modello STWAVE sono stati impiegati i dati batimetrici a disposizione, ovvero le carte nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina e i più recenti rilievi locali disponibili. In particolare si è fatto riferimento al rilievo di agosto 2008, che copre il tratto che va dal Porto di Vado fino al terrapieno del campo da calcio (fino a profondità maggiori di -55 m s.m.m.), e al rilievo di aprile 2010, che copre il tratto di litorale compreso tra il pontile Esso e il pontile Chevron (fino a profondità comprese tra -6.5 e -9.0 m s.m.m.).
Il dominio di calcolo è stato discretizzato attraverso una griglia con maglia ortogonale a celle quadrate di passo 50 m, con lati paralleli agli assi cartesiani. La griglia ha origine nel punto di coordinate (1455250 m E; 4898770 m N) e dimensioni 10'000 x 10'600 m (Fig. 4.2).

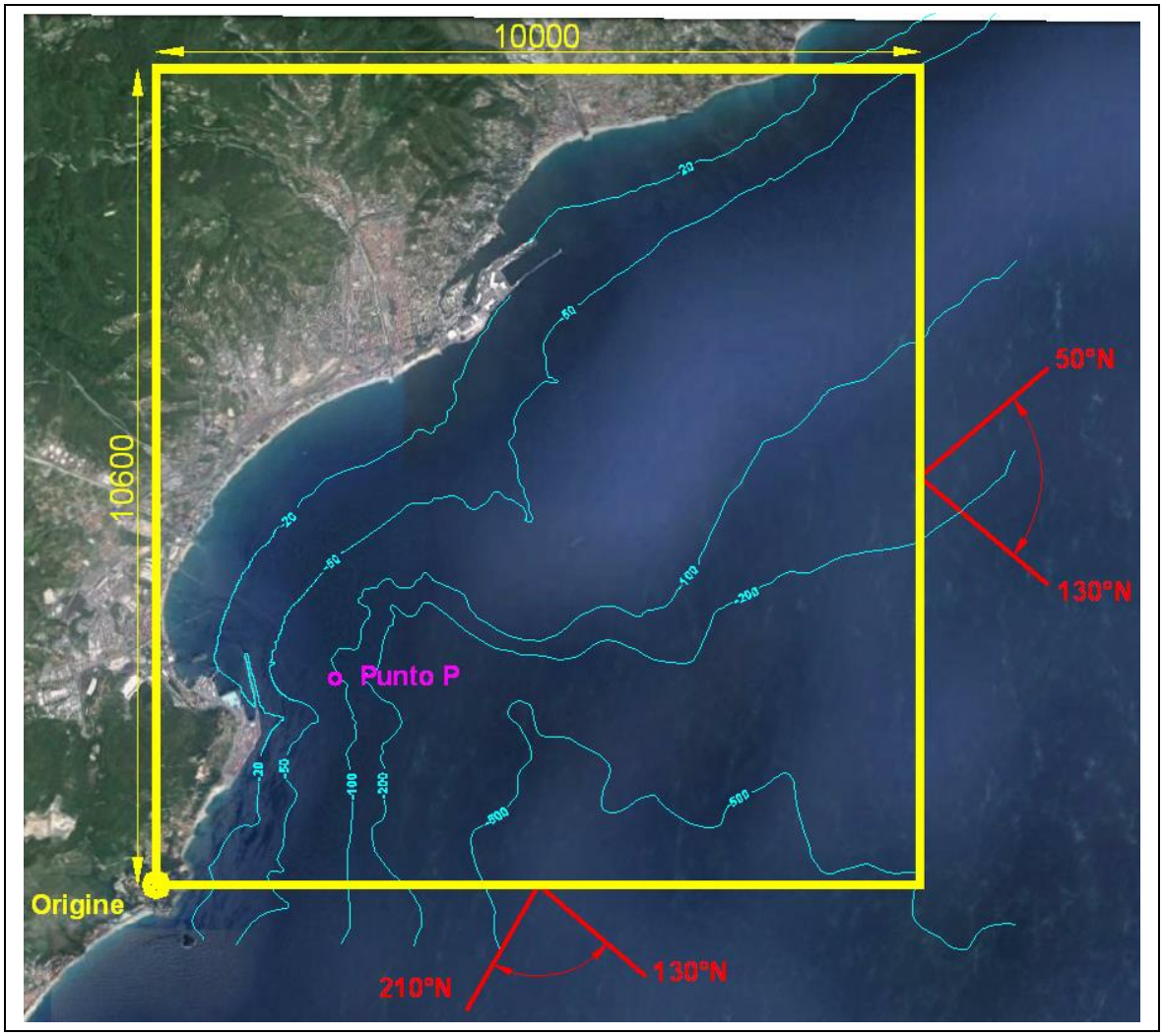


Fig. 4.2 – Griglia di calcolo STWAVE per la propagazione del clima ondoso

Con riferimento al clima ondoso relativo al punto UKMO al largo, sono stati propagati nel dominio di calcolo tutti gli eventi provenienti dal settore 50°÷210°N. In particolare le mareggiate provenienti da NE-E-SE (50°÷130°N) sono state propagate utilizzando come bordo offshore il lato Est della griglia e quelle provenienti da SE-S-SO (135°÷210°N) sono state propagate utilizzando come bordo offshore il lato Sud della griglia.
Il punto di output del clima locale (punto P - rappresentato in Fig. 4.2) si trova su un fondale di circa 100 m, in corrispondenza del punto di coordinate (1457590 m EST, 4901450 m NORD). Le coordinate del punto P e dell'origine della griglia di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento Gauss Boaga – Fuso Ovest.

4.2.2 Dati di input

I dati forniti in input al modello sono stati ricavati dal clima al largo, discretizzato per classi di altezza significativa e direzione di provenienza con riferimento al settore 50°÷210°N.
A ciascun evento ondoso al largo (caratterizzato da una determinata altezza d'onda significativa e direzione di provenienza) è stato associato un valore del periodo, ricavato a partire dall'elaborazione dei periodi di tutti gli eventi ricadenti nel periodo di osservazione (gennaio 1987 – dicembre 2008).
Nel dettaglio, sulla base delle caratteristiche del clima ondoso al largo, sono stati individuati tre differenti settori (50°÷90°N, 90°÷180°N e 180°÷210°N), per ciascuno dei quali è stata ricavata una curva di interpolazione tra altezza d'onda significativa e periodo (H_S – $Tz_)$.

Nelle successive figure sono riportate le 3 curve di interpolazione ricavate per i differenti settori. Utilizzando le correlazioni ricavate dall'interpolazione dei dati di base è stato possibile associare a ciascun evento ondoso il corrispondente periodo T_z in funzione dell'altezza significativa per i tre settori considerati.

Applicando poi le note relazioni tra T_z, T_s e T_p:

- $T_z=0.78*T_p$ (Carter et al.);
- $T_z=0.83*T_s$ (Sapkaya),

si ricava che $T_p= 1.28*T_z$.

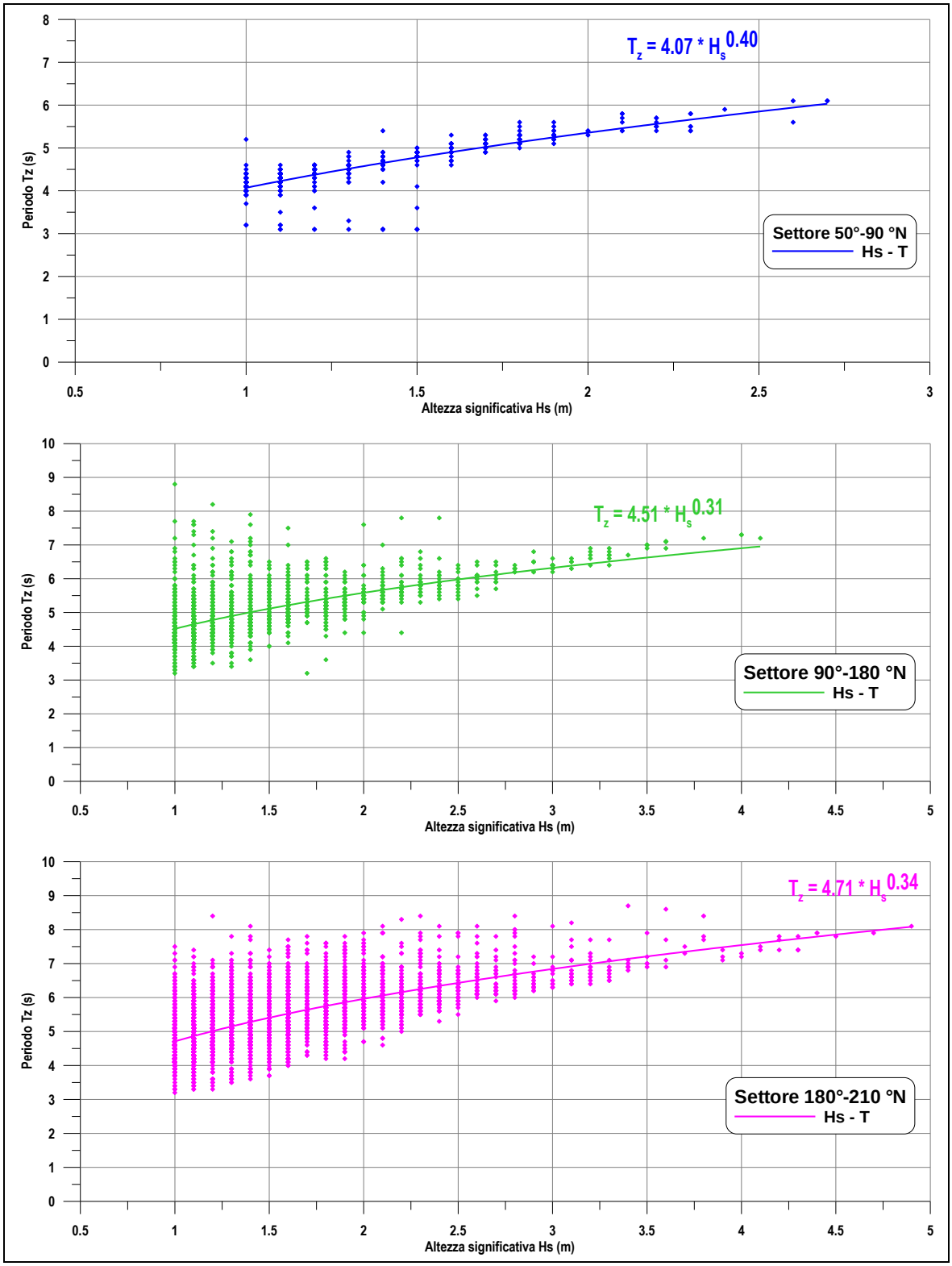


Fig. 4.3 – Correlazioni H_S-T_z per i tre settori 50°÷90°N, 90°÷180°N e 180°÷210°N

4.3 Clima ondoso locale (punto P)

Il clima ondoso locale è stato ricostruito ordinando i risultati delle propagazioni dal largo verso riva, per classi di altezza significativa e di direzione locale dell'onda. Utilizzando le corrispondenze tra i risultati delle simulazioni (clima locale) e la tabella delle registrazioni relative al clima nel punto al largo (Tab. 3.1), è stato possibile associare a ciascun evento nel punto P una percentuale di apparizione e, quindi, ricostruire le rose delle registrazioni e delle energie sotto costa.
Di seguito, si riportano graficamente i risultati delle elaborazioni della climatologia locale; in particolare sono state rappresentate le rose delle registrazioni (Fig. 4.4), delle energie (Fig. 4.5) e delle altezze massime (Fig. 4.6).
Dall'analisi della rosa delle registrazioni e di quella delle energie, si osserva che nella propagazione verso costa il clima ondoso subisce una sensibile rotazione, per effetto della conformazione locale del paraggio, rientrando nel settore di traversia locale 60°÷190°N.
Si osserva che l'energia è concentrata nel settore di Mezzogiorno (con picco a 185°N), con un picco secondario nel settore di Scirocco (a 145°N); per il settore di Grecale si osserva infine un picco caratterizzato da energia piuttosto contenuta in corrispondenza della direzione 75°N.
Le mareggiate con i valori massimi di altezza significativa (compresi tra 3.5 e 4 m) provengono dai settori di Levante-Scirocco e Mezzogiorno; mentre per il settore di Grecale si presentano mareggiate con altezza significativa inferiore a 2.5 m.
É stata infine ricostruita la curva di durata nel punto P che consente di mettere in relazione le caratteristiche di un evento con la sua durata media annuale (Fig. 4.7). Si può osservare come l'altezza significativa di 2 m, che nel punto al largo veniva superata mediamente per 7÷8 giorni all'anno, nel punto P venga superata per circa 3 giorni all'anno.

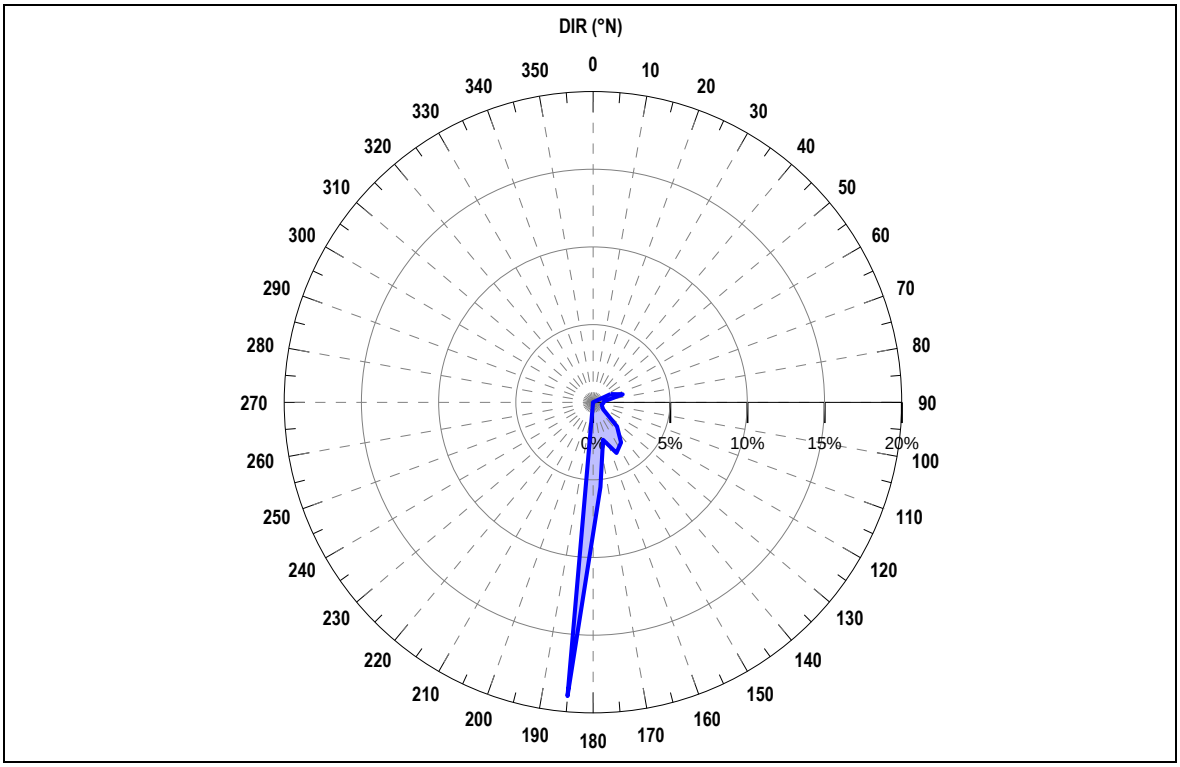


Fig. 4.4 – Rosa delle registrazioni relativa al punto P

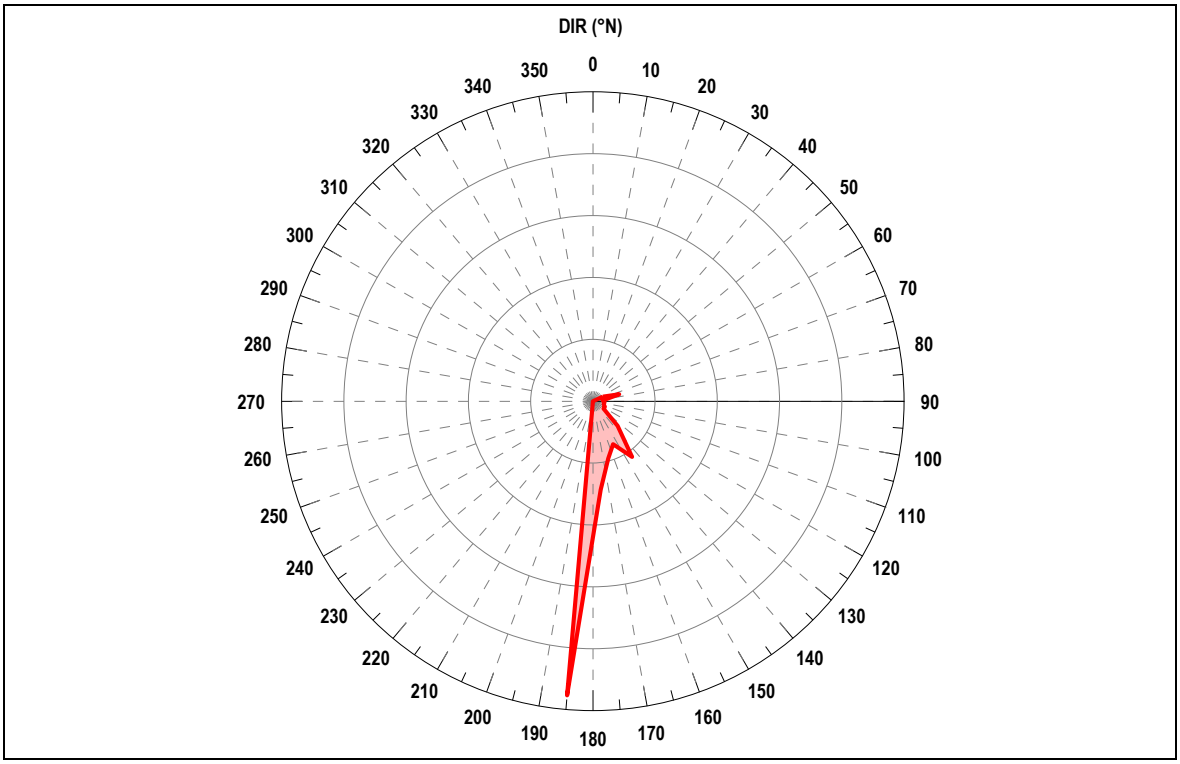


Fig. 4.5 – Rosa delle energie relativa al punto P

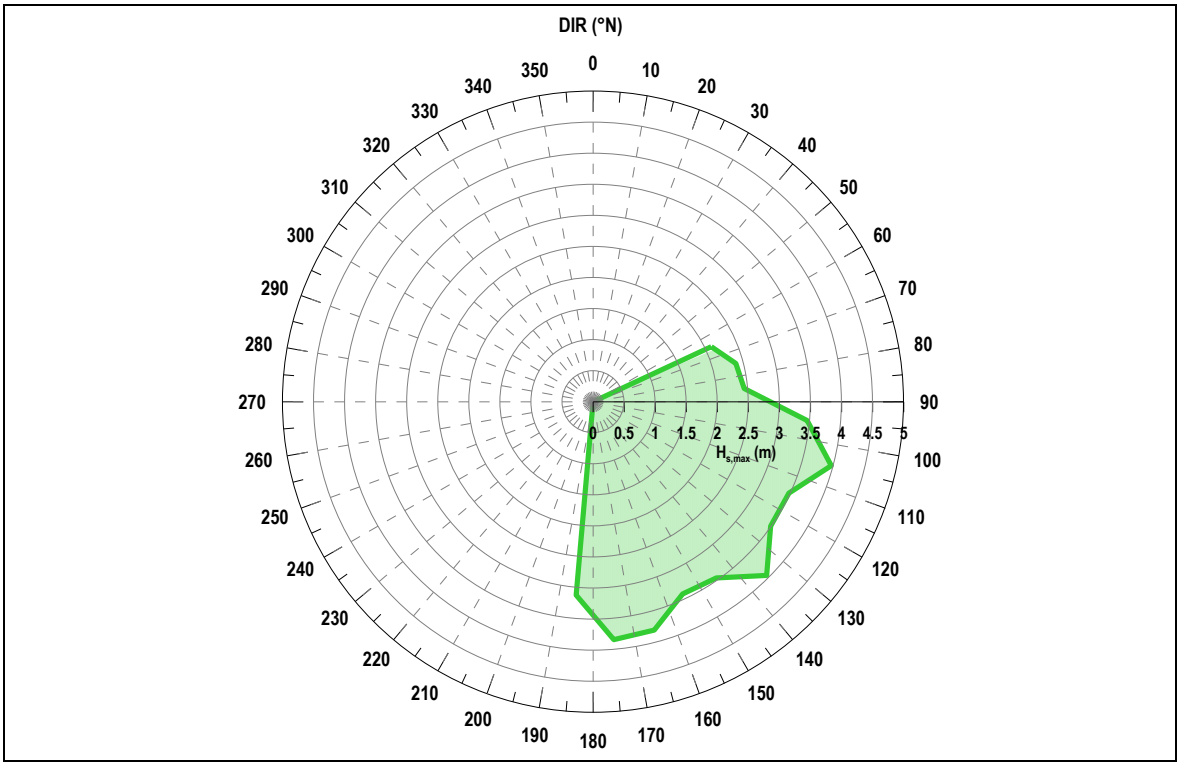


Fig. 4.6 – Rosa delle altezze massime relativa al punto P

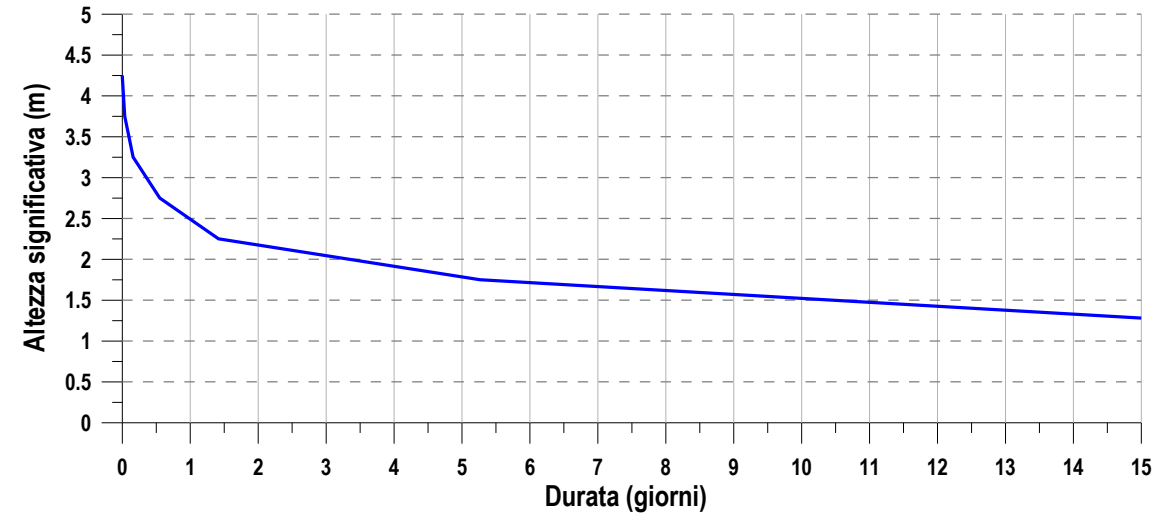


Fig. 4.7 – Curva di durata relativa al punto P

5 CARATTERISTICHE SEDIMENTOLOGICHE

Le caratteristiche sedimentologiche del materiale presente sulla fascia attiva del litorale sono state ricavate sulla base dei risultati della campagna di indagini eseguita tra febbraio e maggio 2010, i cui risultati sono descritti in dettaglio nell'elaborato "Analisi sedimentologiche dei prelievi di campione eseguiti sulla spiaggia emersa e sommersa compresa tra il Torrente Segno e il Rio 4 Stagioni ad integrazione del progetto definitivo 'Piastra multifunzionale' del porto di Vado Ligure – Savona", redatto da Drafinsub Survey S.r.l. (maggio 2010).
Ai fini dello studio di cui in oggetto sono state considerate le caratteristiche dei campioni prelevati all'interno dell'area di interesse, compresa tra la foce del torrente Quiliano e la foce del torrente Segno (Fig. 5.1).
Nelle successive Tab. 5.1 e Tab. 5.2 si riportano i valori del diametro medio dei grani per i campioni prelevati sulla spiaggia sommersa ed emersa, all'interno del tratto di litorale oggetto del presente studio. Sulla base dei risultati delle indagini eseguite, si evince che la spiaggia sommersa fino alla profondità di circa -5 m s.m.m. (ovvero all'interno della fascia attiva) è costituita da sabbia medio-fine con diametro medio dei grani compreso tra 0.1 e 0.3 mm. La spiaggia emersa risulta, invece, costituita da ghiaia fine con diametro medio dei grani compreso tra 2 e 6 mm.

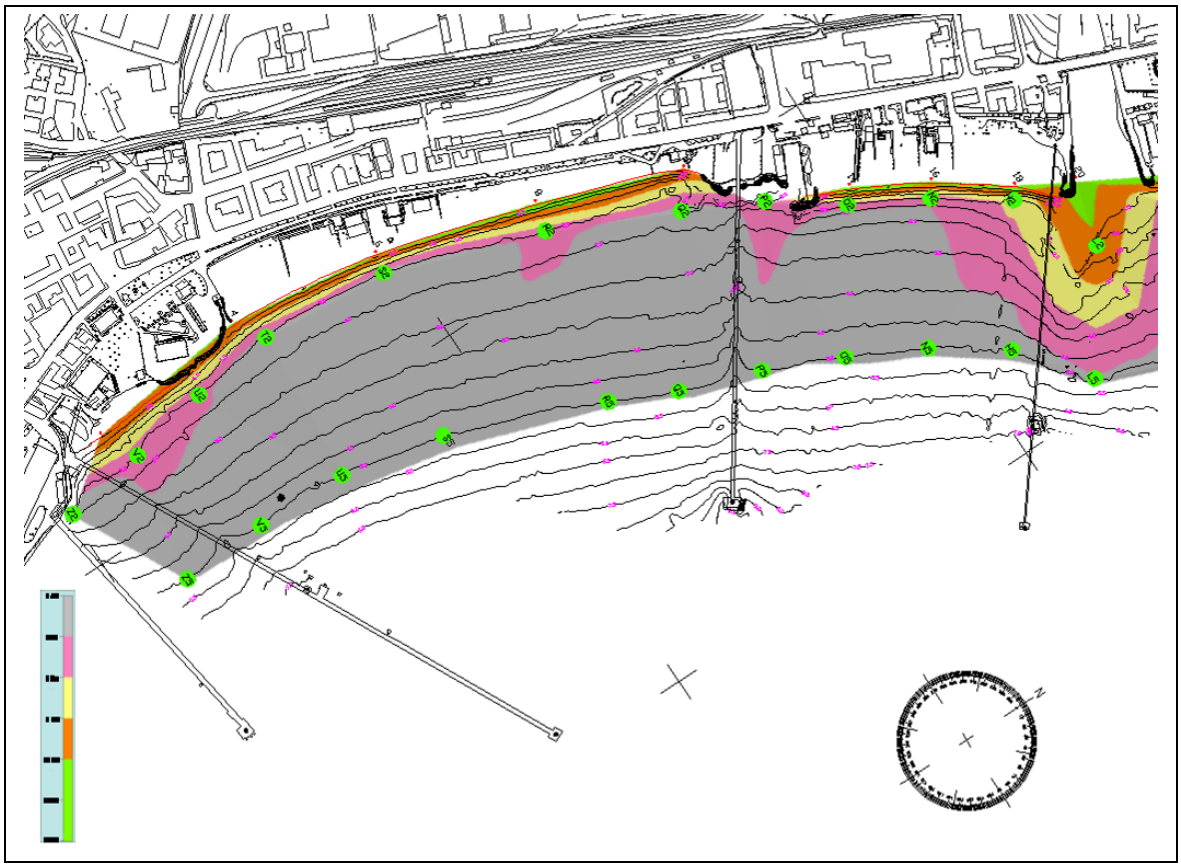


Fig. 5.1 – Ubicazione dei punti di prelievo (campagna di idagini di febbraio-maggio 2010)

Campione	Profondità (m s.m.m.)	D_{50} (mm)
H2	-2	0.276
H5	-5	0.304
N2	-2	0.213
N5	-5	0.132
O2	-2	0.216
O5	-5	0.129
P2	-2	0.318
P5	-5	0.191
Q2	-2	0.166
Q5	-5	0.199
R2	-2	0.303
R5	-5	0.136
S2	-2	0.137
S5	-5	0.159
T2	-2	0.157
U2	-2	0.289
U5	-5	0.157
V2	-2	0.318
V5	-5	0.154
Z2	-2	0.118
Z5	-5	0.162

Tab. 5.1 – Diametro medio dei grani - Campioni spiaggia sommersa

Campione	Profondità (m s.m.m.)	D_{50} (mm)
0	battigia	1.867
4	battigia	2.405
6	battigia	2.735
8	battigia	4.273
10	battigia	2.990
14	battigia	6.408
16	battigia	3.362
18	battigia	4.353

Tab. 5.2 – Diametro medio dei grani - Campioni spiaggia emersa

Vista la differente classazione del materiale tra spiaggia emersa e sommersa, si è scelto di procedere con l'analisi modellistica dell'evoluzione morfologica e della dinamica del litorale come di seguito specificato.

Ai fini dello studio della circolazione e del trasporto solido dei sedimenti che costituiscono il profilo sommerso del litorale (analisi condotta per mezzo di codici di calcolo CMS-WAVE e CMS-FLOW) sono state fornite in input al modello le caratteristiche granulometriche ricavate sulla base dell'analisi delle curve granulometriche dei campioni prelevati sulla spiaggia sommersa. Nel caso specifico si ottiene un valore medio del D_{50} (diametro medio dei grani) pari a 0.20 mm (Tab. 5.1).

Per quanto riguarda, invece, l'evoluzione della linea di riva e lo studio del trasporto solido longitudinale (analisi condotta per mezzo di codici di calcolo STWAVE e GENESIS), si è scelto di fornire in input al modello le caratteristiche granulometriche ricavate sulla base dell'analisi delle curve granulometriche dei campioni prelevati sulla battigia.
Il codice di calcolo GENESIS, infatti, consente di inserire un unico valore del diametro medio dei grani per rappresentare i sedimenti della fascia attiva del litorale e, quindi, non permette di distinguere tra zona sommersa ed emersa. Poiché nel caso specifico l'evoluzione della linea di riva risulta maggiormente influenzata dal materiale che costituisce la spiaggia emersa, nella modellazione è stato considerato un valore medio del D_{50} pari a 3.55 mm (Tab. 5.2).

6 DINAMICA LITORANEA LOCALE IN CONFIGURAZIONE ATTUALE

Lo studio della dinamica litoranea che si instaura nei fondali del litorale di Vado e in prossimità della foce del T. Segno a seguito della persistenza di determinate mareggiate (cioè a regime, in condizioni stazionarie), è stato condotto mediante l'utilizzo del codice di calcolo CMS-Flow, accoppiato al codice di calcolo CMS-Wave. Una descrizione dettagliata dei codici viene riportata nell'allegato "A".
Per lo studio delle correnti costiere sono state considerate come forzanti principali il moto ondoso e il vento. Il campo di moto ondoso sotto costa (forzante del modello idrodinamico) è stato ricavato per mezzo del codice di calcolo CMS-Wave, a partire dalle condizioni meteomarine nel punto di output "P" (cfr. paragrafo 4). CMS-Wave si interfaccia con il codice di calcolo CMS-Flow, fornendogli i valori dei radiation stress che generano le correnti litoranee.
In particolare, sono state individuate alcune mareggiate ritenute significative per la dinamica litoranea locale e che corrispondono rispettivamente a condizioni di moto ondoso relativamente severe (ma non estreme), caratterizzate da una frequenza media di accadimento pari a 1g/anno.

Lo studio è stato condotto in 2 fasi successive:

- prima fase (descritta nel presente e nel successivo capitolo: analisi della configurazione attuale del litorale;
- seconda fase (descritta nei capitoli 10 e 11): analisi della configurazione di progetto.

6.1 Settaggio dei modelli

Per la costruzione del dominio del modello matematico sono stati impiegati i dati batimetrici a disposizione, cioè le carte nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina e i rilievi locali disponibili (rilievi agosto 2008 e aprile 2010) e le informazioni desumibili dalla foto aerea di Google (conformazione recente della linea di riva).

Per lo studio della propagazione locale del moto ondoso, mediante il codice di calcolo CMS-Wave, è stato definito un dominio di calcolo incentrato nell'area oggetto di studio avente origine nel punto di coordinate (1460450 m E; 4904090 m N) e ruotato di 138.5° rispetto alla direzione Est.
Il dominio ha dimensioni 3'249 x 6'900 m ed è stato discretizzato con una griglia a maglia ortogonale a celle quadrate di passo 3 m; il bordo offshore della griglia è posto su una profondità variabile con valore massimo pari a 200 m e passa in prossimità del punto P.
Nella Fig. 6.1 si riporta il dominio di calcolo impiegato per lo studio della propagazione e della circolazione, nella configurazione attuale. Il dominio è stato definito inserendo l'attuale configurazione del porto di Vado e la costruenda piastra multifunzionale nella sua configurazione finale prevista nell'ultima variante.
Le coordinate delle origini delle griglie di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento Gauss Boaga – Fuso Ovest.

Lo studio della circolazione e del trasporto è stato condotto mediante il codice di calcolo CMS-Flow, impiegando un dominio costituito da una griglia sovrapposta alla precedente ma caratterizzata da una maglia ortogonale a passo variabile (da 2.5 m sotto costa a 80 m verso il largo).

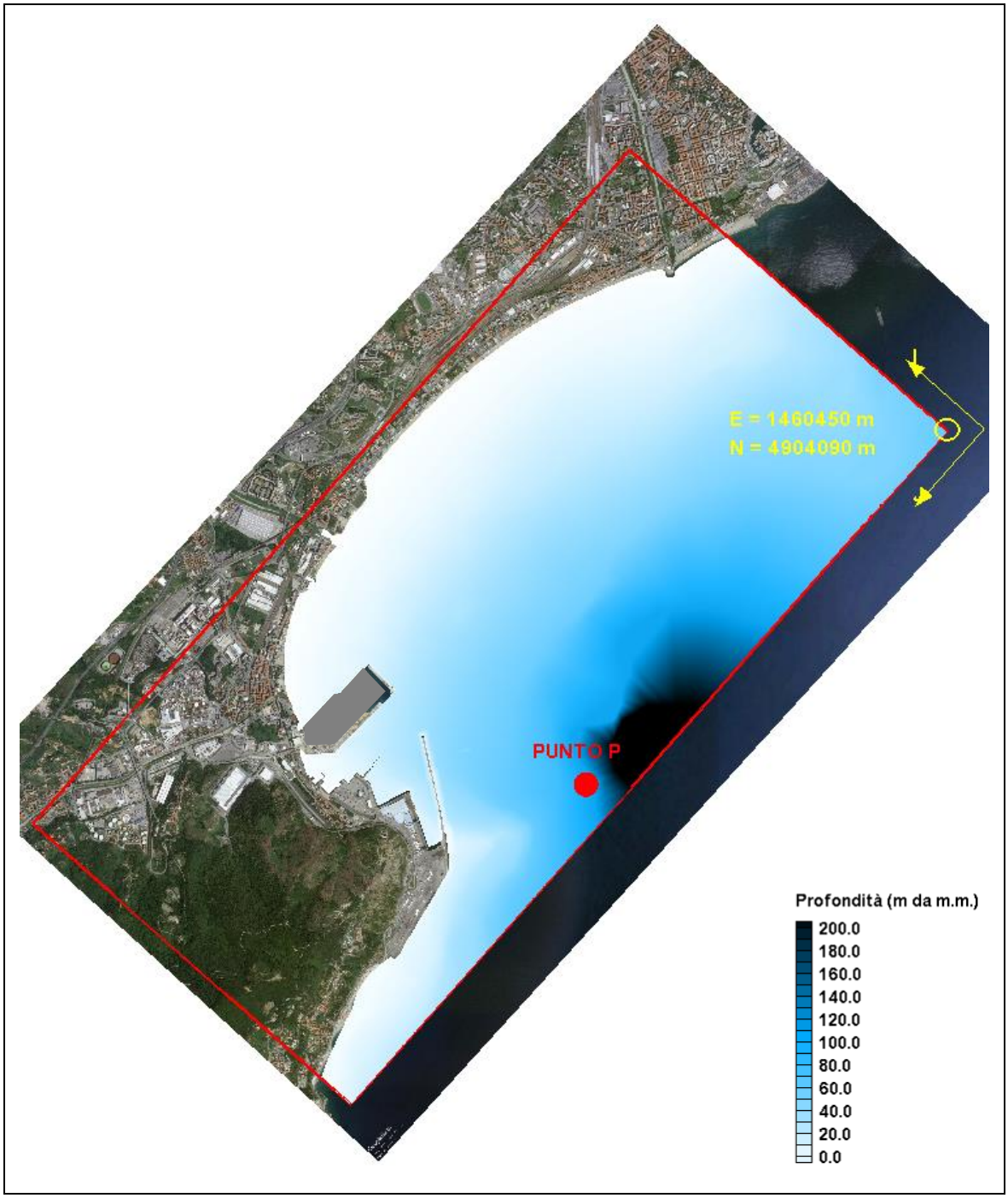


Fig. 6.1 – Dominio di calcolo dei modelli impiegati per lo studio della propagazione e della circolazione

6.1.1 Condizioni ondametriche e anemometriche imposte nel modello

La climatologia disponibile nel punto P, ricavata dalle propagazioni dal largo verso riva (cfr. paragrafo 4.3), è stata impiegata per definire alcune mareggiate caratteristiche che sono state impiegate nello studio delle circolazioni costiere e del trasporto solido.
In particolare, sono state individuate alcune mareggiate ritenute significative per la dinamica litoranea locale e che corrispondono a condizioni di moto ondoso relativamente severe (ma non estreme), caratterizzate da persistenza pari a 1g/anno.
L'analisi è stata condotta con riferimento a 3 differenti settori, individuati a partire dalla distribuzione delle energie del clima ondoso locale (Fig. 4.5): Greco-Levante (60°÷120°N), Scirocco (120°-160°N) e Mezzogiorno (160°÷190°N). I valori di altezza d'onda significativa, per le mareggiate individuate, sono stati ricavati dalla curva di durata nel punto P ricostruita per i 3 settori di Greco-Levante, Scirocco e Libeccio, per la suddetta frequenza di 1 g/anno (Fig. 6.2).
Sempre con riferimento alla distribuzione locale dell'energia (Fig. 4.5), sono state individuate 3 direzioni principali di provenienza (75°N per il settore di Greco-Levante, 145°N per il settore di Scirocco e 185°N per quello di Mezzogiorno), rappresentative dei picchi di energia.
I valori del periodo di picco da associare a ciascuna mareggiata sono stati ricavati in funzione delle caratteristiche locali dell'evento ondoso sulla base delle corrispondenze tra clima locale e clima al largo ottenuto attraverso le propagazioni. Le mareggiate caratteristiche così individuate, considerate come input per lo studio della propagazione locale e, successivamente, della dinamica litoranea e del trasporto solido, sono riportate nella successiva Tab. 6.1.

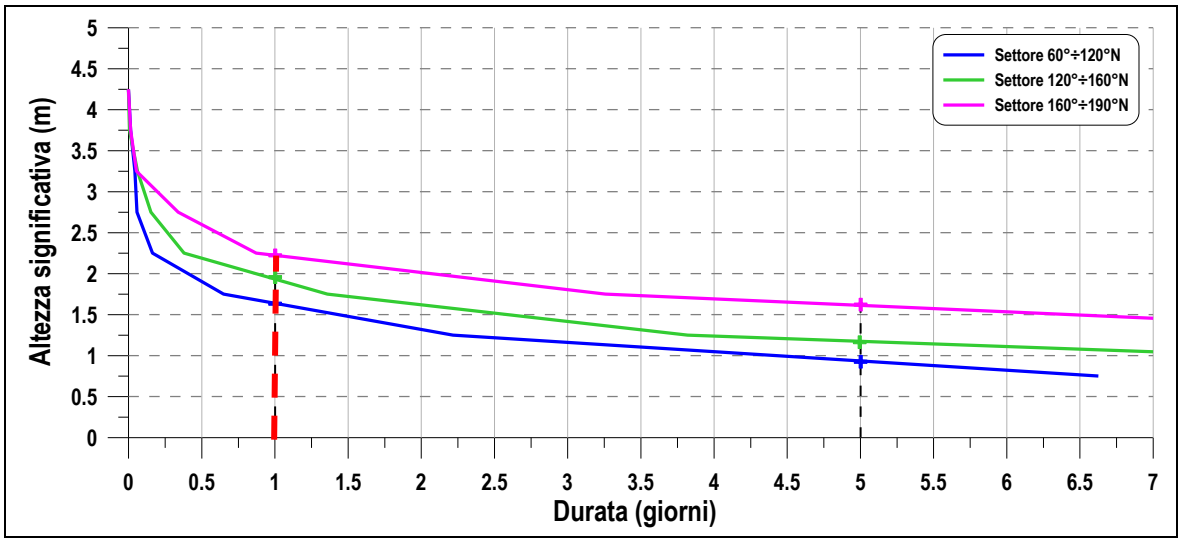


Fig. 6.2 – Curva di durata relativa al punto P per i 3 settori individuati

Mareggiate	Frequenza (gg/anno)	H_S (m)	T_P (s)	Dir (°N)
Levante	1	1.64	6.5	75
Scirocco	1	1.93	6.8	145
Mezzogiorno	1	2.22	7.8	185

Tab. 6.1 – Mareggiate caratteristiche nel punto P

6.1.2 Condizioni anemometriche imposte nel modello

Le condizioni anemometriche, imposte come condizione di input nel modello idrodinamico, sono state individuate ricavando per ciascuna delle mareggiate analizzate una condizione anemometrica congrua con i valori di altezza d'onda e periodo di picco. In particolare, per la stima del vento congruo relativo a ciascuna mareggiata è stata utilizzata la correlazione proposta da Svedrup, Munk e Bretschneider (nota come "metodo SMB") che, nell'ipotesi di condizione di mare completamente sviluppato, associa i parametri della mareggiata (H_S,T_P) alla velocità del vento (U_A):

$$U_A = H_S^2 \times 929.5/T_p^3.$$

Le condizioni anemometriche sono state individuate considerando la velocità del vento a 10 m dal suolo (U), dove:

$$U = U_A^{(1/1.23)}/0.71.$$

La direzione di provenienza del vento è stata assegnata pari quella di provenienza delle mareggiate al largo. I valori delle velocità del vento, corrispondenti alle diverse mareggiate, sono riportati in Tab. 6.2.

Mareggiate	Frequenza (gg/anno)	Velocità (m/s)	Dir (°N)
Levante	1	8.7	75
Scirocco	1	9.4	145
Mezzogiorno	1	11.8	195

Tab. 6.2 – Condizioni di vento imposte nel modello di circolazione

6.2 Propagazione del moto ondoso sotto costa

I risultati ottenuti dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso sotto costa in stato attuale, applicando il codice di calcolo CMS-Wave, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine seguenti (da Fig. 6.3 a Fig. 6.5). Le figure rappresentano le altezze d'onda significativa, in termini di gradazione cromatica, mentre le direzioni locali dell'onda sono indicate con vettori il cui modulo è proporzionale all'altezza d'onda significativa.

I risultati delle propagazioni sotto costa mostrano come, nella configurazione attuale il campo di moto ondoso risulti principalmente influenzato dalla presenza del molo del Porto di Vado e della piastra multifunzionale, che determina un notevole abbattimento dell'onda, per effetto della diffrazione, nel tratto di litorale oggetto di intervento, in particolare per le mareggiate di Scirocco e Mezzogiorno.
Tale effetto è particolarmente evidente nel tratto centro-meridionale del litorale dove l'energia del moto ondoso risulta notevolmente abbattuta, per tutte le mareggiate analizzate

Nel dettaglio, le mareggiate di Levante (TEST 1) caratterizzate da una direzione di provenienza piuttosto inclinata rispetto alla normale al litorale, giungono sotto costa sensibilmente abbattute per effetto della rifrazione (rotazione della mareggiata verso la normale al litorale con conseguente abbattimento dell'altezza d'onda). Il tratto settentrionale del litorale risulta interessato da altezze d'onda sensibilmente maggiori mentre nel tratto meridionale risulta evidente l'effetto di protezione offerto dalla nuova piastra multifunzionale che risulta comunque limitato al tratto di litorale prossimo alla foce del T. Segno.

Le mareggiate di Scirocco (TEST 2), caratterizzate da direzioni poco inclinate rispetto alla normale al litorale, giungono sotto costa subendo una minore rotazione, mentre risulta più evidente l'effetto di protezione offerto dalla piastra multifunzionale e del molo del porto di Vado che, per effetto della diffrazione, abbatte notevolmente le altezze d'onda in quasi tutto il litorale.

Le mareggiate di Mezzogiorno (TEST3) sono caratterizzate da direzione di provenienza quasi parallela al litorale; conseguentemente, le mareggiate giungono in prossimità della riva con altezza d'onda notevolmente abbattuta. Per queste mareggiate risulta evidente l'effetto della diffrazione dovuta al molo del porto di Vado. Il molo abbatte infatti l'altezza d'onda significativa fino a valori praticamente nulli in quasi tutto il litorale oggetto di studio.

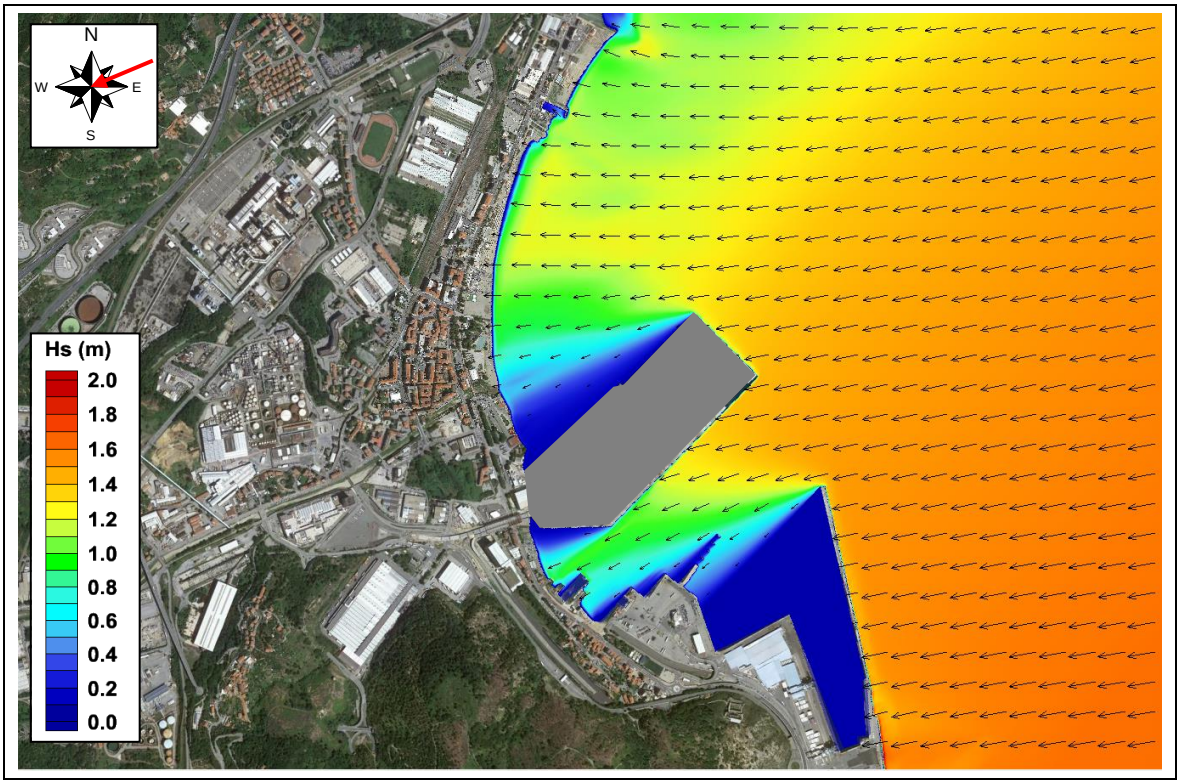


Fig. 6.3 – TEST 1 – Caratteristiche mareggiata in P: H_S = 1.64 m, T_P= 6.50 s, Dir = 75°N

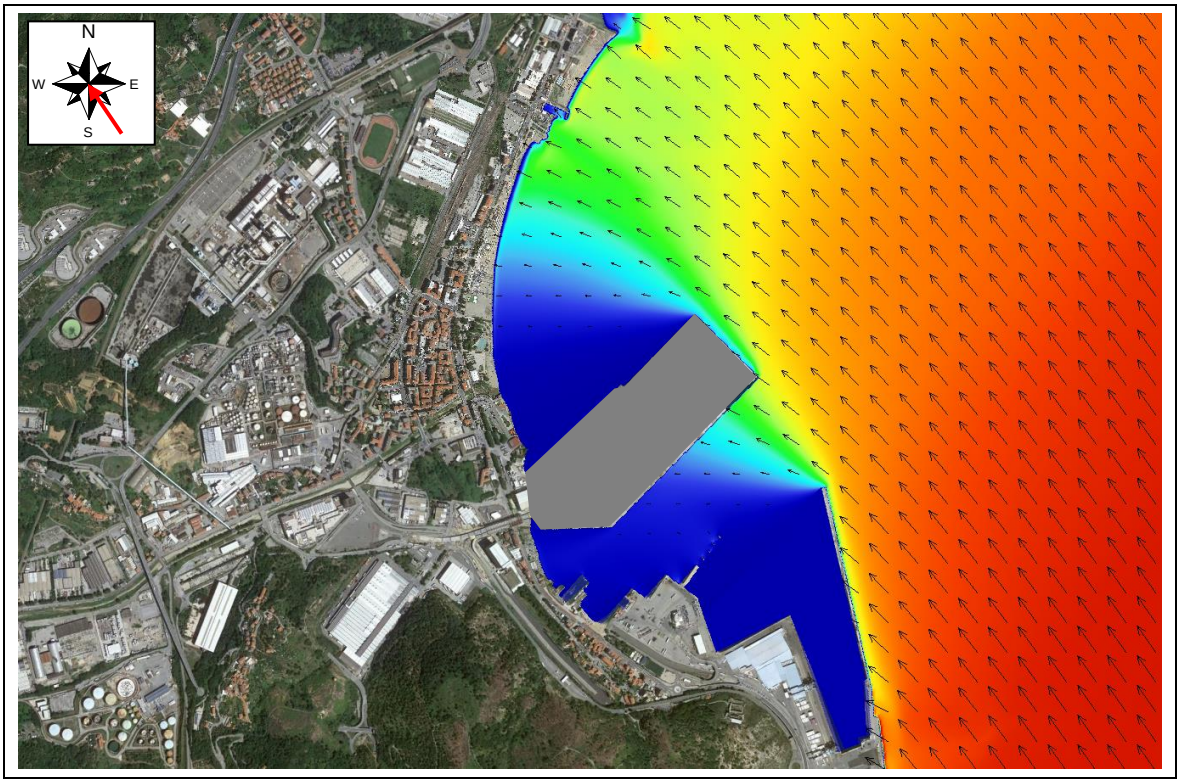


Fig. 6.4 – TEST 2 – Caratteristiche mareggiata in p: H_S = 1.93 m, T_P= 6.80 s, Dir = 145°N

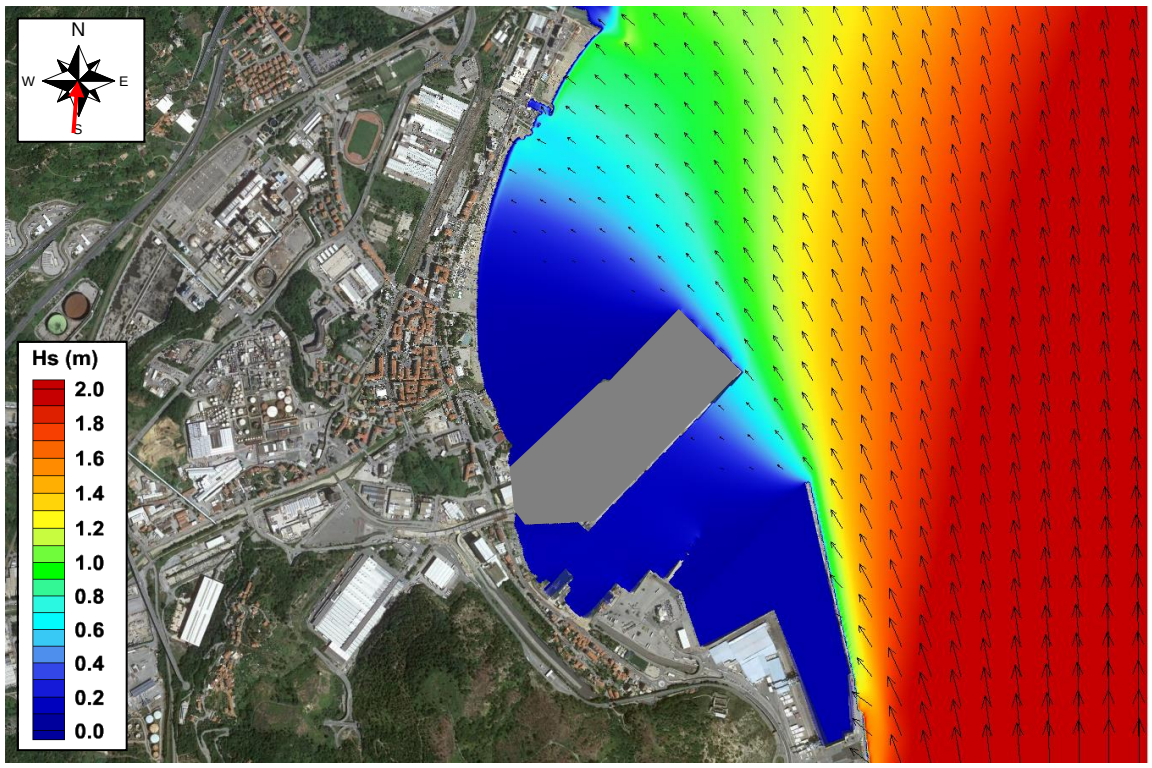


Fig. 6.5 – TEST 3 – Caratteristiche mareggiata in P: H_S = 2.22 m, T_P= 7.80 s, Dir = 185°N

6.3 Circolazione idrodinamica costiera

I risultati dello studio della circolazione idrodinamica litoranea in stato attuale, condotto per mezzo del codice di calcolo CMS-Flow interfacciato con il codice di calcolo CMS-Wave appena descritto, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine successive (da Fig. 6.6 a Fig. 6.11).
Nel dettaglio, le figure rappresentano le velocità medie della corrente generata dalle mareggiate (mediate sul profilo verticale): le velocità sono rappresentate in termini di gradazioni cromatiche, mentre la direzione locale della corrente viene indicata mediante vettori il cui modulo è proporzionale alla velocità stessa. I risultati sono riportati nel tratto di costa compreso tra il T. Quiliano e la piattaforma multifunzionale (figure sopra, Fig. 6.6, Fig. 6.8 e Fig. 6.10) e in dettaglio nella zona interessata dagli interventi, in prossimità della scogliera (figure sotto, Fig. 6.7, Fig. 6.9 e Fig. 6.11).

Dai risultati ottenuti si può osservare come la circolazione idrodinamica risulti influenzata dalle diverse orientazioni della linea di riva e dalla presenza della piattaforma multifunzionale e del molo del porto di Vado. Si osserva inoltre che, solo in occasione delle mareggiate di Levante (caratterizzate peraltro da una bassissima energia e frequenza di apparizione), è in grado di svilupparsi una significativa circolazione idrodinamica, mentre per le mareggiate di Scirocco e di Mezzogiorno le correnti risultano poco significative; le prime sono infatti caratterizzate da direzione pressoché ortogonale alla costa e le seconde da direzione praticamente parallela, ma con moto ondoso locale trascurabile.

La corrente che si sviluppa a seguito della mareggiata di Levante (TEST 1) genera, nel tratto settentrionale del litorale di interesse (immediatamente a Sud del T. Quiliano), una circolazione idrodinamica rilevante, diretta verso Sud-Ovest e con velocità massime superiori a 80 cm/s. Procedendo verso Sud, oltre il cantiere nautico, la corrente subisce lungo la spiaggia un sensibile smorzamento, sia per effetto della diversa orientazione del litorale che per la presenza della piastra multifunzionale; proseguendo verso Sud, la corrente giunge nel tratto più meridionale delle spiaggia con velocità dell'ordine dei 40 cm/s e, in prossimità della foce del T. Segno, subisce un importante rallentamento e distacco della costa.

L'idrodinamica che si sviluppa seguito della mareggiata di Scirocco (TEST 2) genera una circolazione molto meno intensa rispetto a quella di Levante, caratterizzata in prossimità del cantiere nautico da due correnti distinte: una più ridossata al litorale, diretta dal cantiere verso il T. Quiliano, e una diretta verso Sud, che subisce immediatamente a valle della scogliera un distacco che la porta verso il largo. Le correnti risultano comunque caratterizzate da velocità piuttosto ridotte dell'ordine dei 30 cm/s. Più a Sud, nel tratto centrale del litorale la corrente tende a riformarsi in un tratto limitato e con velocità comunque ridotte.

Il campo di correnti che si osserva per la mareggiata di Mezzogiorno (TEST 3) risulta generato principalmente dall'azione del vento, in quanto, come osservato nel paragrafo precedente, la mareggiata giunge in prossimità del litorale con altezza d'onda praticamente nulla e non è in grado di forzare la circolazione idrodinamica. La corrente che si sviluppa a partire dalla foce del T. Segno è diretta verso Nord-Est e risulta piuttosto debole.

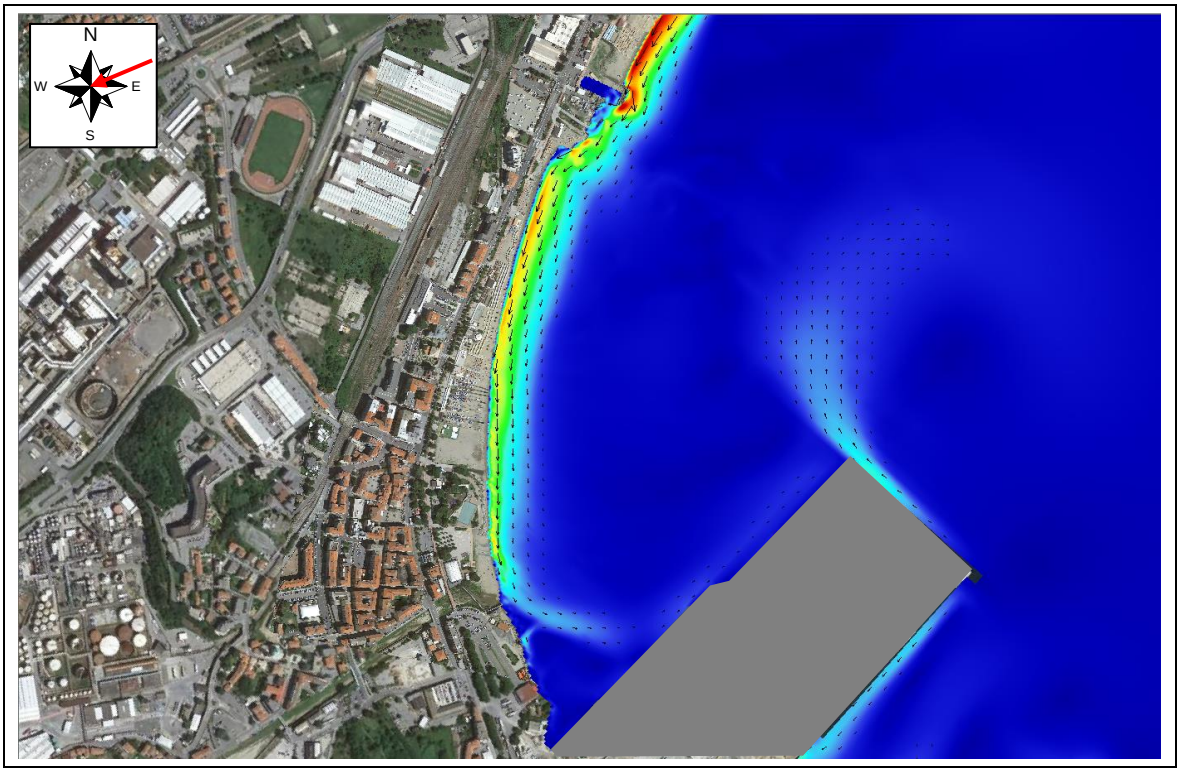


Fig. 6.6 – TEST 1 – Mareggiata di Levante - Circolazione idrodinamica

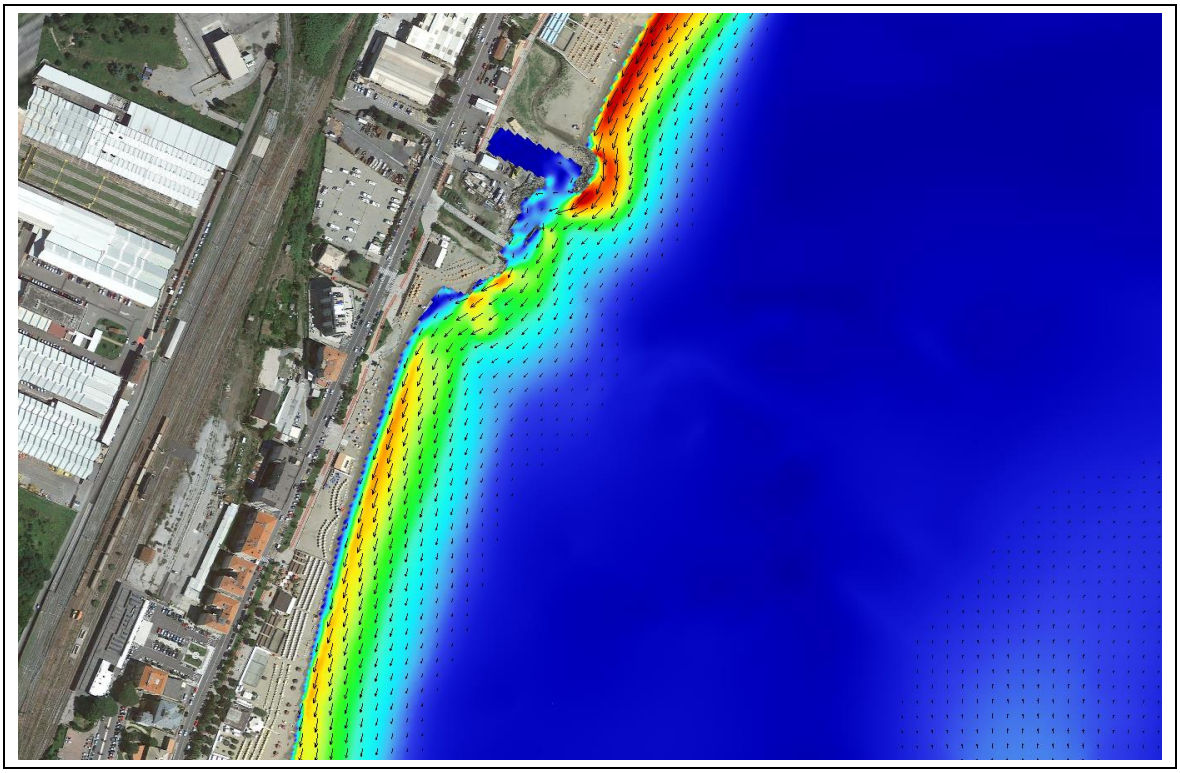


Fig. 6.7 – TEST 1 – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento

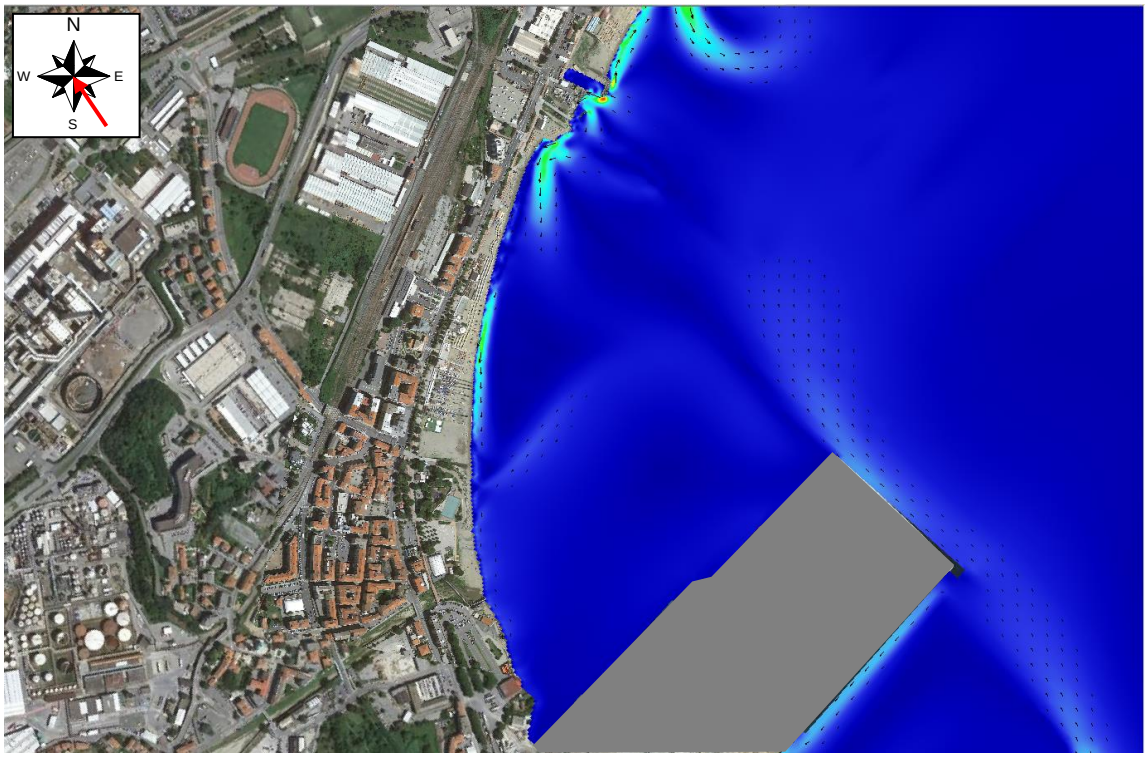


Fig. 6.8 – TEST 2 – Mareggiata di Scirocco - Circolazione idrodinamica

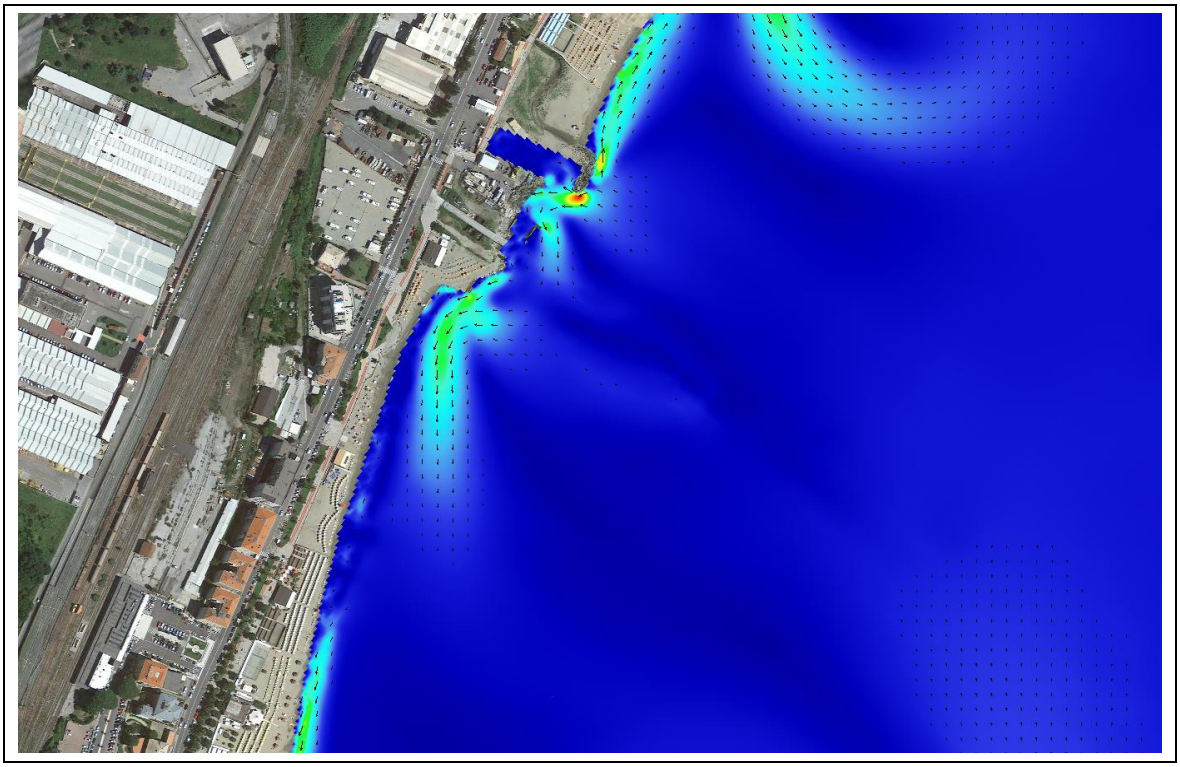


Fig. 6.9 – TEST 2 – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento

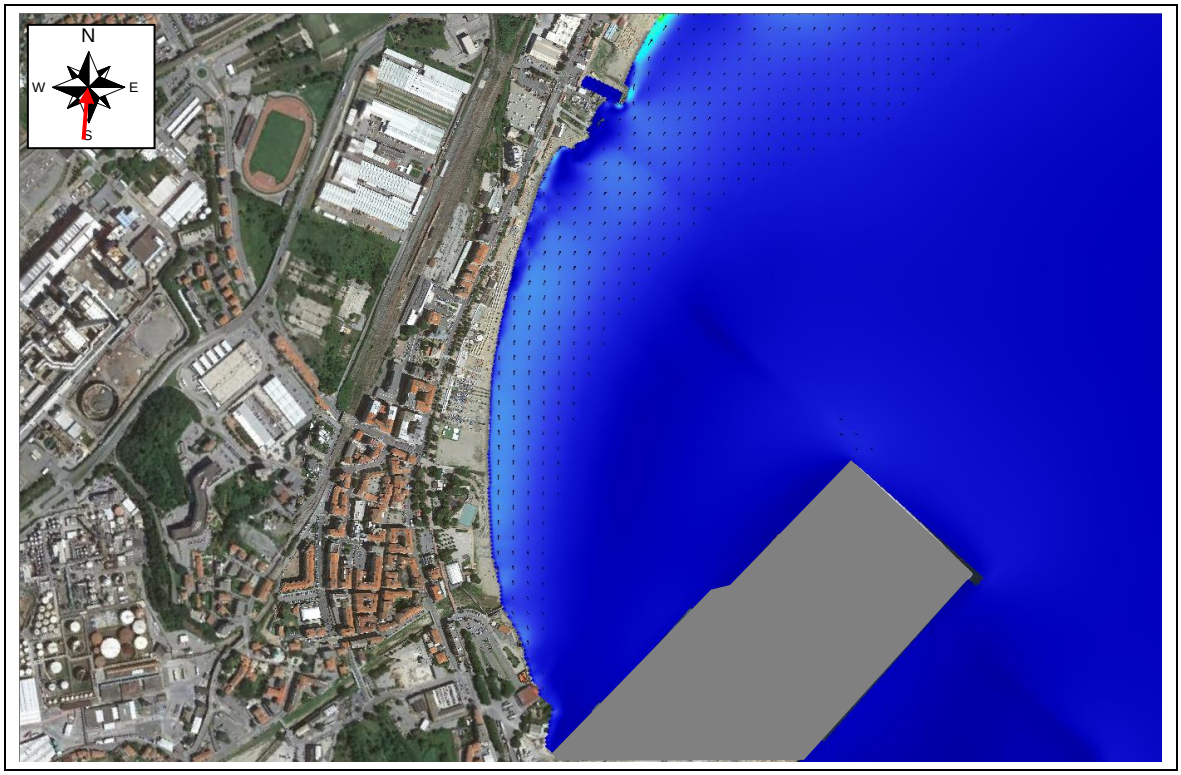


Fig. 6.10 – TEST 3 – Mareggiata di Mezzogiorno - Circolazione idrodinamica

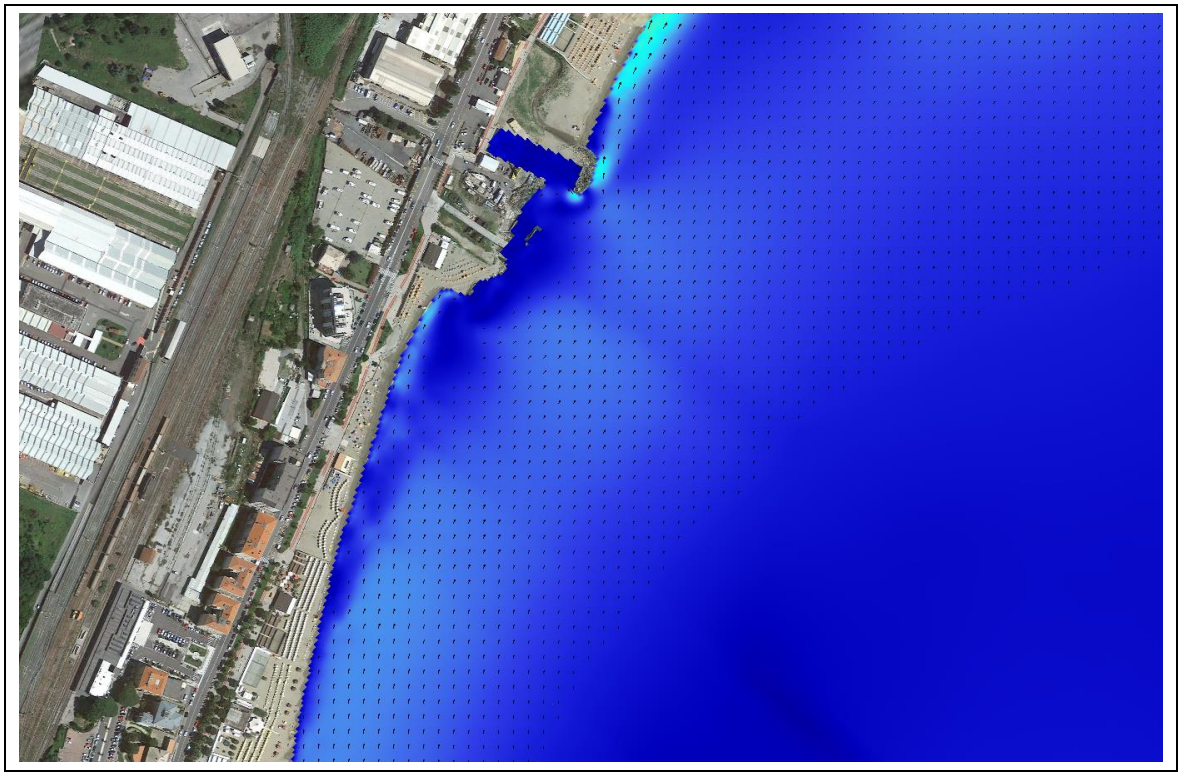


Fig. 6.11 – TEST 3 – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento

7 TRASPORTO SOLIDO LITORANEO ED EVOLUZIONE DEI FONDALI IN CONFIGURAZIONE ATTUALE

Lo studio del trasporto solido e della tendenza evolutiva dei fondali nel tratto di litorale in esame e in prossimità della foce del T. Segno a seguito della persistenza di determinate mareggiate (cioè a regime, in condizioni stazionarie) è stato condotto mediante l'impiego del codice di calcolo CMS-Flow, accoppiato al codice di calcolo CMS-Wave.
Il codice di calcolo CMS-Flow consente di interpretare correttamente i fenomeni responsabili del trasporto dei sedimenti e dell'evoluzione dei fondali, anche se la mancanza di un monitoraggio approfondito dei fenomeni caratteristici del sito oggetto di studio non consente di arrivare ad una stima quantitativa ragionevolmente precisa della dinamica sedimentaria; le simulazioni hanno comunque permesso di evidenziare, seppur qualitativamente, le aree potenzialmente attive dal punto di vista del trasporto solido e le aree di erosione e deposizione generate dall'azione combinata di onde e correnti.
Per lo studio del trasporto solido sono state considerate come forzanti principali il campo di moto ondoso (CMS-Wave) e il campo di velocità e di livelli generato dal moto ondoso e dall'evento di piena (risultati del modello CMS-Flow). In particolare, sono stati utilizzati i risultati riportati nel precedente paragrafo 6.3, ottenuti dallo studio della circolazione idrodinamica.

7.1 Settaggio del modello

Il modello matematico sfrutta completamente geometria, dominio di calcolo e batimetria del modello definito precedentemente per lo studio della circolazione idrodinamica. Conseguentemente, lo studio del trasporto litoraneo è stato condotto impiegando il dominio definito nel precedente paragrafo 6.1.

7.1.1 Dati sedimentologici

Come anticipato, il modello è in grado di simulare i fenomeni di trasporto che interessano la fascia di spiaggia attiva sommersa e quindi i fenomeni di mobilitazione del materiale che compone il fondale, risultanti dalla combinazione degli effetti delle velocità orbitali indotte dal moto ondoso e della circolazione idrodinamica.
Conseguentemente, ai fini dello studio della circolazione litoranea e del trasporto solido dei sedimenti sono state fornite in input al modello le caratteristiche granulometriche ricavate sulla base dell'analisi delle curve granulometriche dei campioni prelevati sulla spiaggia sommersa (cfr. precedente capitolo 5).
Nel caso specifico si è ottenuto un valore medio del D_{50} (diametro medio dei grani) pari a 0.20 mm (Tab. 5.1).

7.2 Trasporto solido

I risultati delle simulazioni, ottenuti per mezzo del codice di calcolo CMS-Flow, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine successive (da Fig. 7.1 a Fig. 7.6).
Nel dettaglio, le figure rappresentano, in termini di gradazioni cromatiche, l'andamento del trasporto e la quantità dei sedimenti mobilitati (concentrazione dei sedimenti messi in sospensione). I risultati sono riportati nel tratto di costa compreso tra il T. Quiliano e la piattaforma multifunzionale (figure sopra, Fig. 7.1, Fig. 7.3 e Fig. 7.5) e in dettaglio nella zona interessata dagli interventi, in prossimità della scogliera (figure sotto, Fig. 7.2, Fig. 7.4 e Fig. 7.6).
Dall'analisi dei risultati si osserva come la zona più attiva dal punto di vista della movimentazione dei sedimenti risulti essere quella più settentrionale del litorale, mentre risulta piuttosto ridotta la mobilitazione dei sedimenti nel tratto centrale e meridionale. Si può inoltre osservare come, coerentemente con i risultati delle circolazioni idrodinamiche, la movimentazione dei sedimenti risulti essere significativa solo in occasione delle mareggiate di Levante, mentre risulta molto più contenuta per le mareggiate di Scirocco e di Mezzogiorno.

La mareggiata di Levante (TEST 1) genera nel tratto più a Nord, fino al cantiere nautico, un significativo trasporto solido, diretto verso Sud-Ovest. Procedendo verso Sud, si osserva una progressiva riduzione della mobilitazione dei sedimenti per effetto della riduzione delle velocità della corrente. Nella zona di foce del Segno la mobilitazione di sedimenti tende ad annullarsi, e trascurabile resta pure nel tratto più a Sud.

La mareggiata di Scirocco (TEST 2) genera un trasporto solido piuttosto ridotto, ad eccezione dell'area a Nord del cantiere nautico. A Sud della scogliera, il trasporto risulta caratterizzato da intensità molto ridotta ed è diretto da Nord verso Sud.
Nel complesso, si osserva che, nel tratto di spiaggia più settentrionale, il trasporto solido è modesto e interessa una fascia di spiaggia sommersa piuttosto ampia, mentre nel tratto centrale è caratterizzato da una intensità sensibilmente maggiore, ma interessa una fascia di spiaggia sommersa molto ridossata alla riva. Nel tratto di litorale più a Sud si osserva la totale assenza di trasporto di sedimenti.

Per la mareggiata di Mezzogiorno (TEST 3) si può osservare che, praticamente lungo tutto il tratto di litorale oggetto di interesse, non si genera una significativa mobilitazione dei sedimenti. Solo nel tratto più meridionale del litorale si osserva una modesta mobilitazione da Sud verso Nord.

In sintesi, i risultati hanno mostrato che le mareggiate di Levante e Scirocco, pur se caratterizzate da minor energia e frequenza, sono in grado di movimentare i sedimenti, trasportandoli verso Sud, fino alla foce del T. Segno. Le mareggiate di Mezzogiorno, caratterizzate da maggiore frequenza ed energia, generano un trasporto solido diretto da Sud verso Nord, che risulta però di modesta entità e interessa solo marginalmente il tratto di interesse.

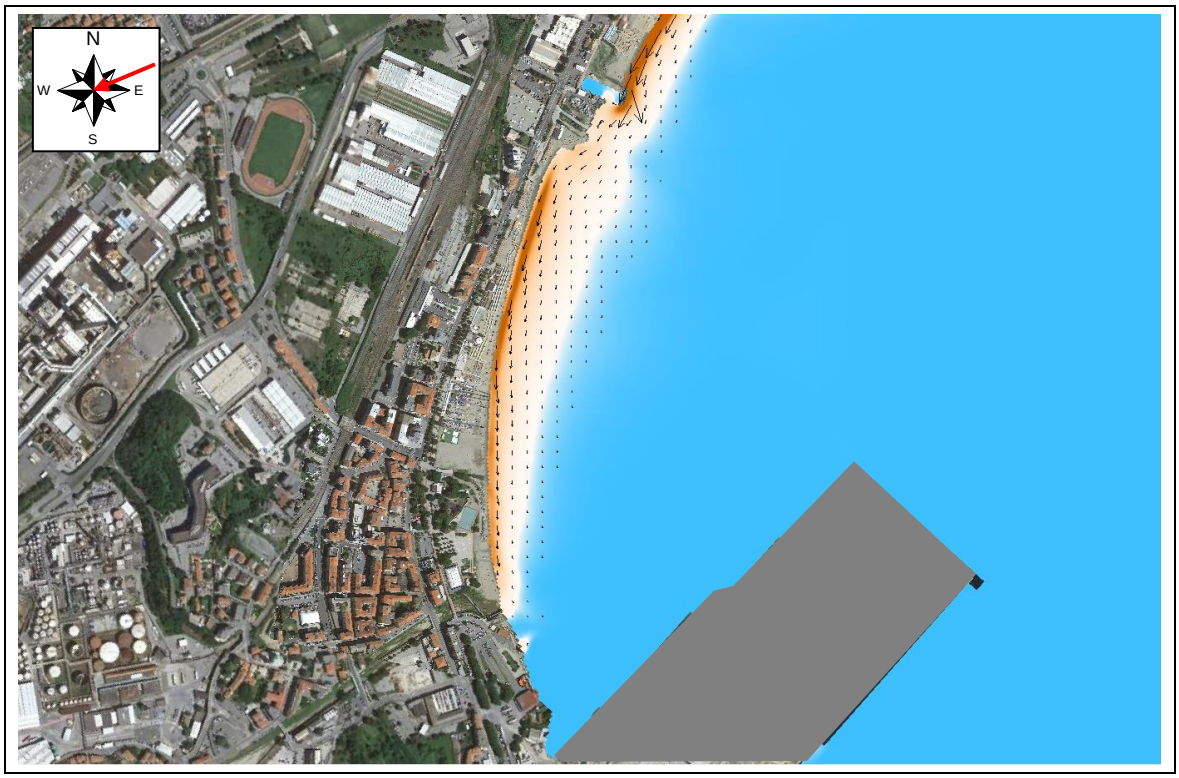


Fig. 7.1 – TEST 1 – Mareggiata di Levante - Trasporto solido

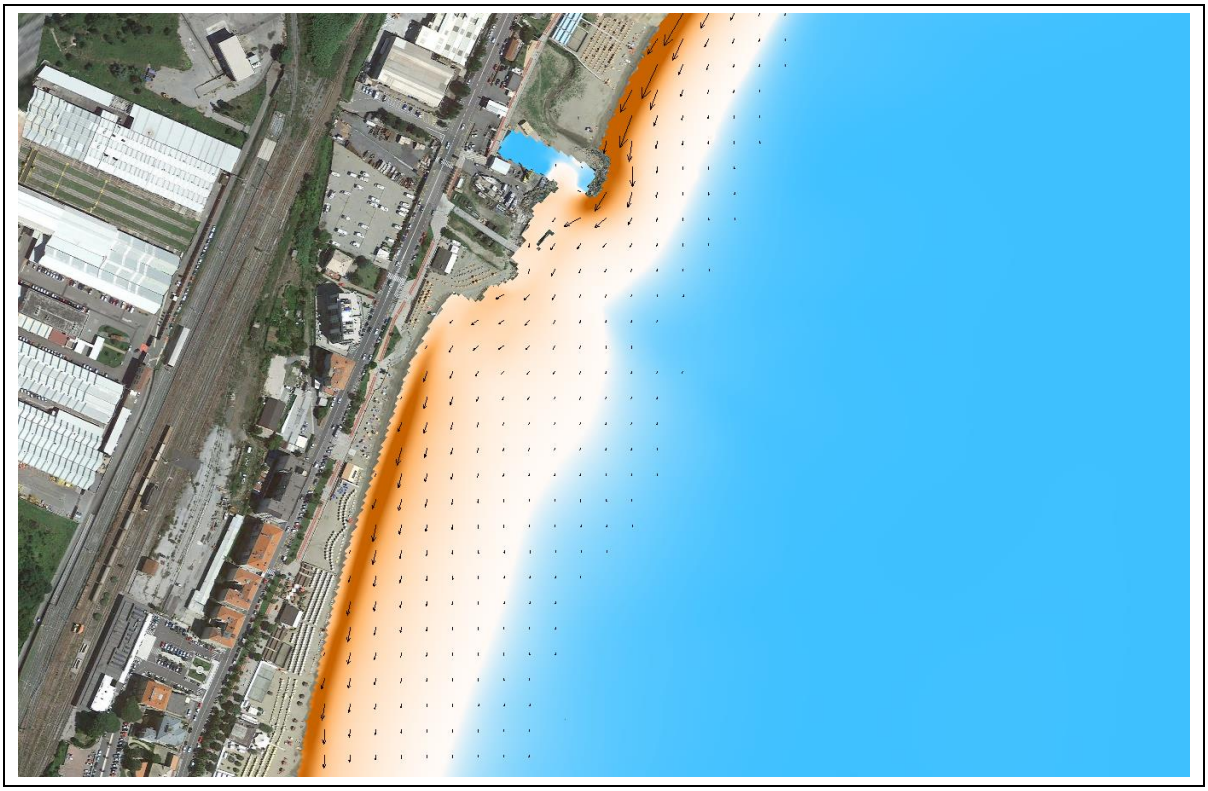


Fig. 7.2 – TEST 1 – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento

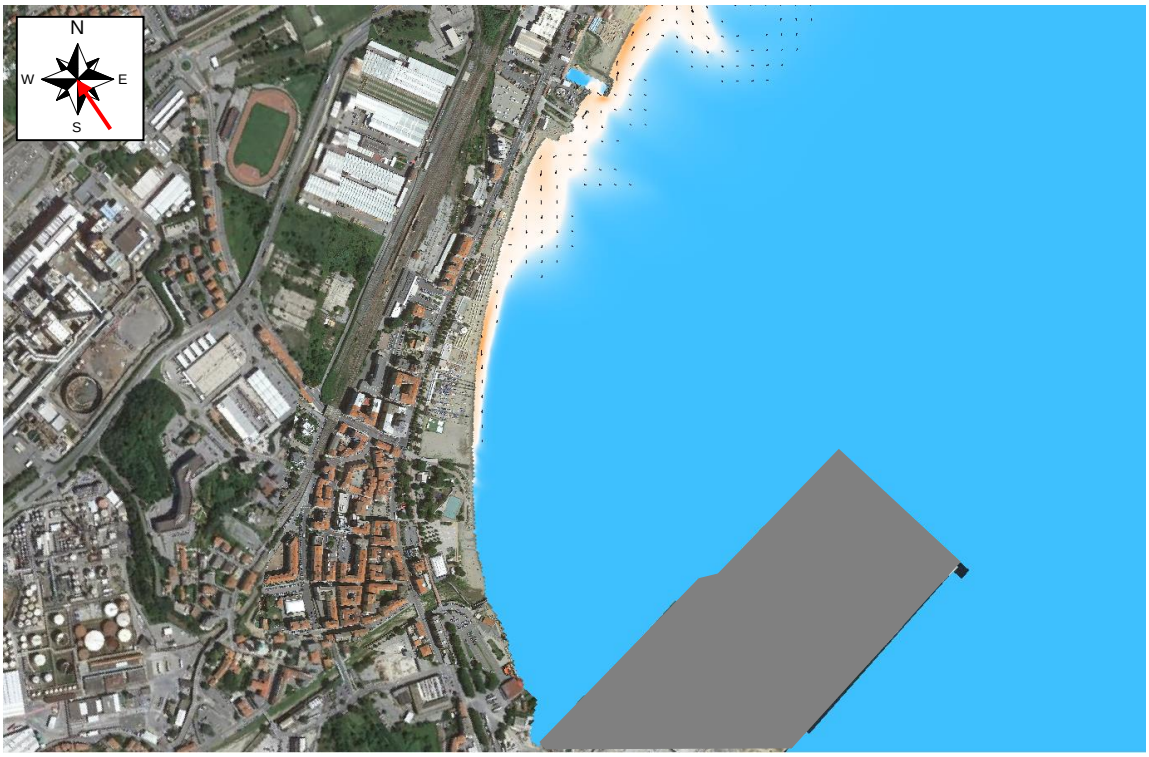


Fig. 7.3 – TEST 2 – Mareggiata di Scirocco - Trasporto solido

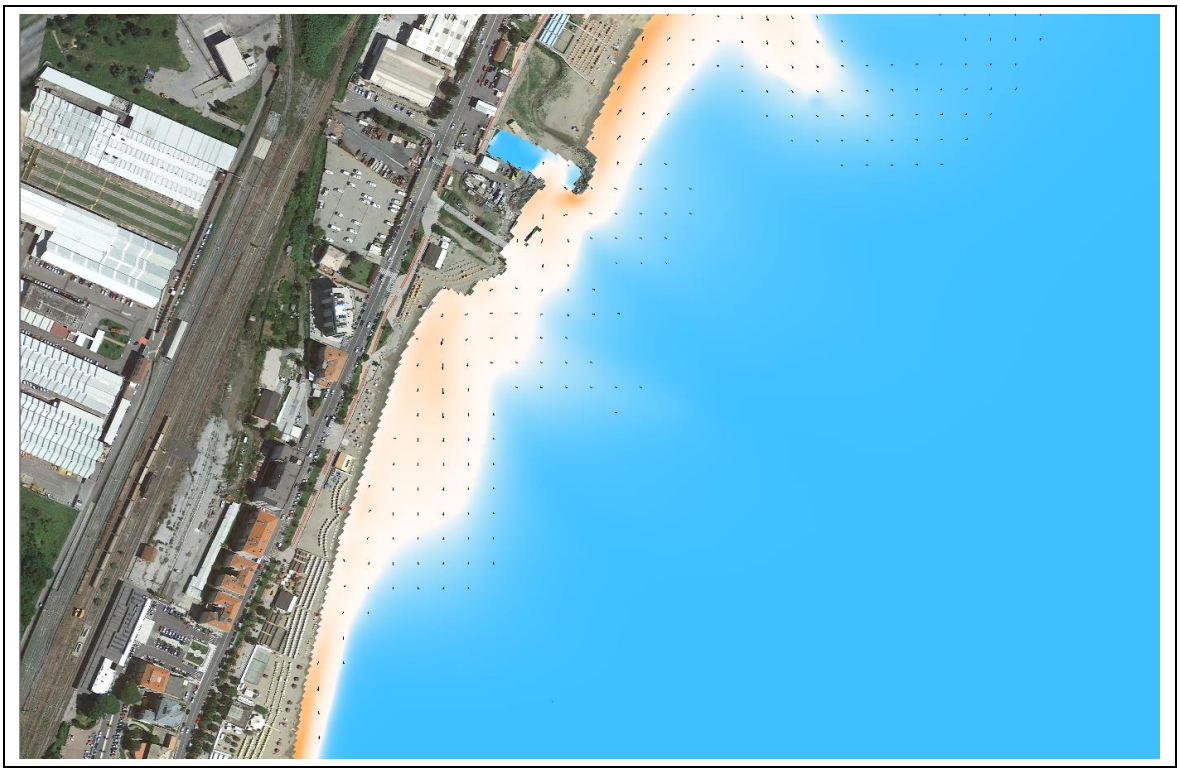


Fig. 7.4 – TEST 2 – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento



Fig. 7.5 – TEST 3 – Mareggiata di Mezzogiorno - Trasporto solido



Fig. 7.6 – TEST 3 – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento

7.3 Evoluzione dei fondali

I risultati delle simulazioni, condotte utilizzando il codice di calcolo CMS-Flow, sono rappresentati nelle figure riportate nei successivi paragrafi (da Fig. 7.7 a Fig. 7.9). Nel dettaglio, i risultati sono riportati sull'intero tratto di litorale compreso tra il cantiere nautico alla radice del pontile Tirreno Power e la foce del T. segno.
Per ciascuna delle mareggiate analizzate sono stati riportati i risultati, in termini di gradazioni cromatiche, che rappresentano la tendenza evolutiva del fondale nello stato attuale. I risultati dell'evoluzione del fondale forniscono la tendenza alla sedimentazione (valori positivi) ovvero all'erosione (valori negativi); i risultati si riferiscono alle tendenze sviluppate dalla persistenza delle mareggiate per una durata pari a 12 ore, in condizioni stazionarie.

I risultati in termini di trasporto solido in configurazione attuale, analizzati nel paragrafo precedente, hanno sostanzialmente evidenziato la generale tendenza ad una mobilitazione di sedimenti da Nord verso Sud. In termini di tendenza evolutiva dei fondali, questo di traduce in una migrazione dei sedimenti dalla zona Nord (in erosione) verso la zona Sud (accrescimento).

Per la mareggiata di Levante (TEST 1), i risultati ottenuti confermano l'attuale tendenza evolutiva della spiaggia; si osserva infatti che, nel tratto Nord della spiaggia, sono prevalentemente presenti aree soggette ad erosione, mentre nel tratto Sud si osserva la prevalenza di aree soggette a deposizione. In prossimità della foce del Segno, si rilevano significative aree di deposizione in corrispondenza delle attuali aree di occlusione della foce.

Per la mareggiata di Scirocco (TEST 2), si osserva, in misura molto più ridotta, la tendenza all'erosione del tratto di spiaggia a Nord, a favore in questo caso della zona centrale del tratto di interesse.

Per la Mareggiata di Mezzogiorno (TEST 3) non si rilevano variazioni rilevanti del fondale, ad eccezione di una debolissima tendenza all'erosione nel tratto settentrionale del litorale a favore del tratto più a Nord, a ridosso della scogliera.

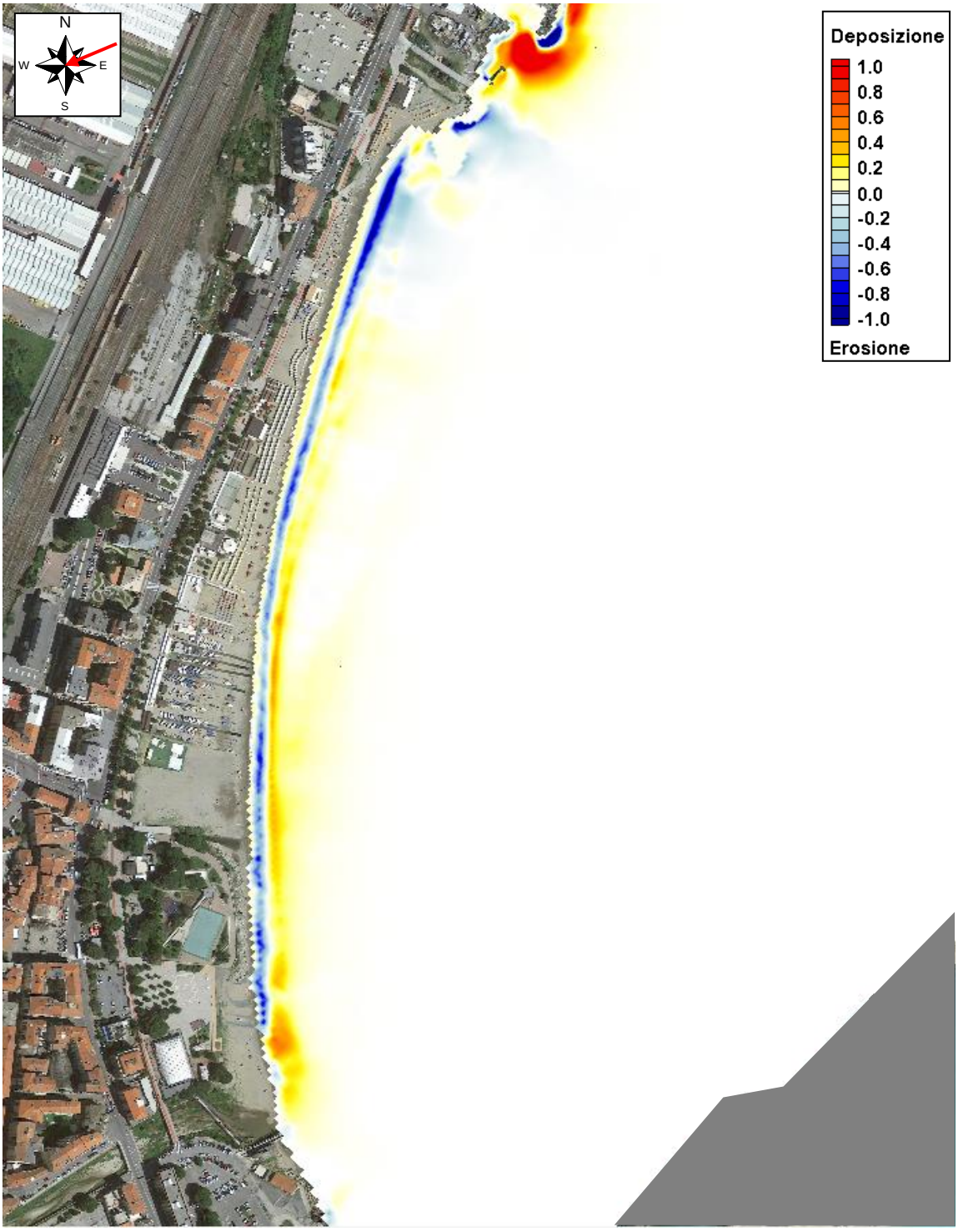


Fig. 7.7 – TEST 1 – Mareggiata di Levante - Evoluzione dei fondali

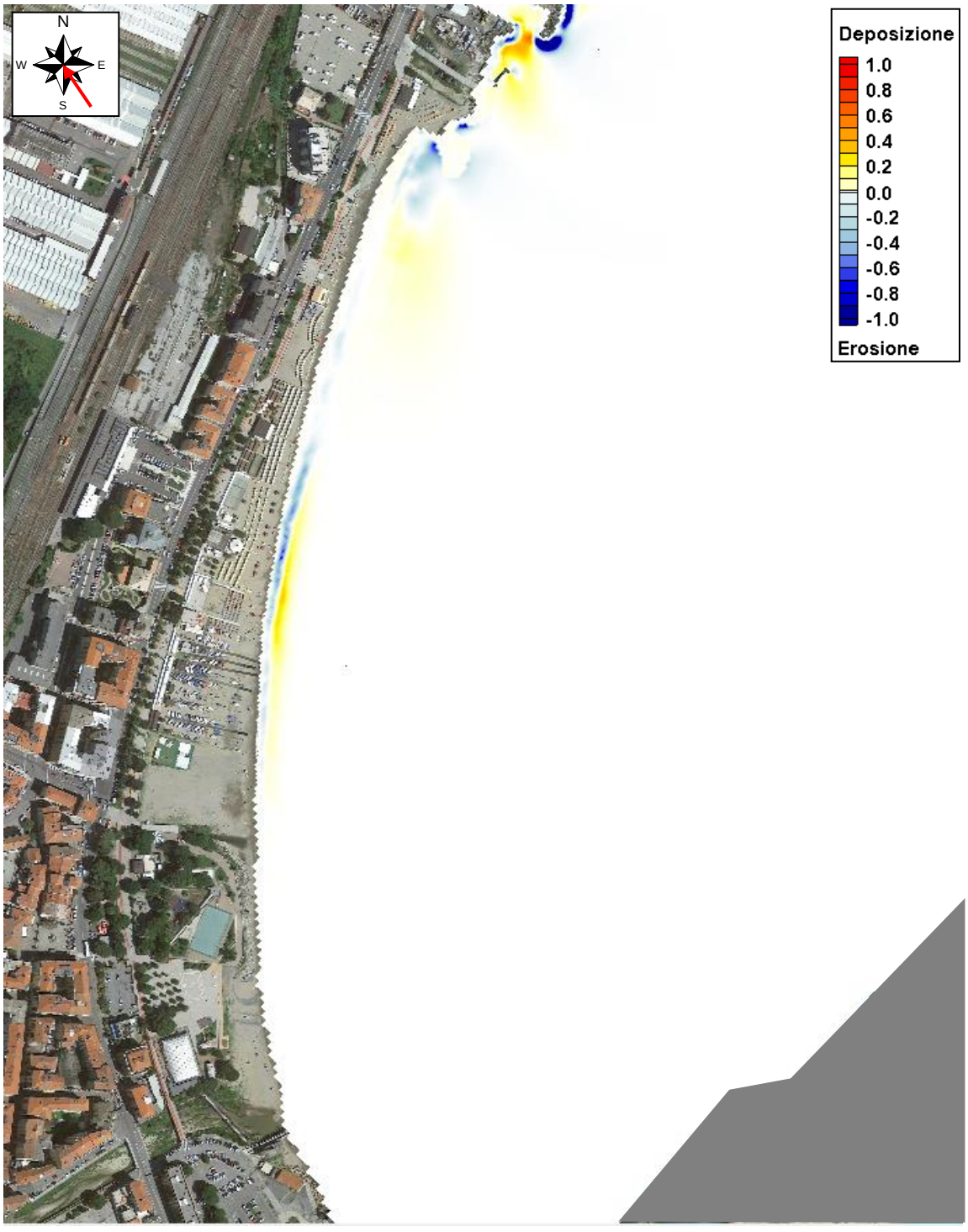


Fig. 7.8 – TEST 2 – Mareggiata di Scirocco - Evoluzione dei fondali

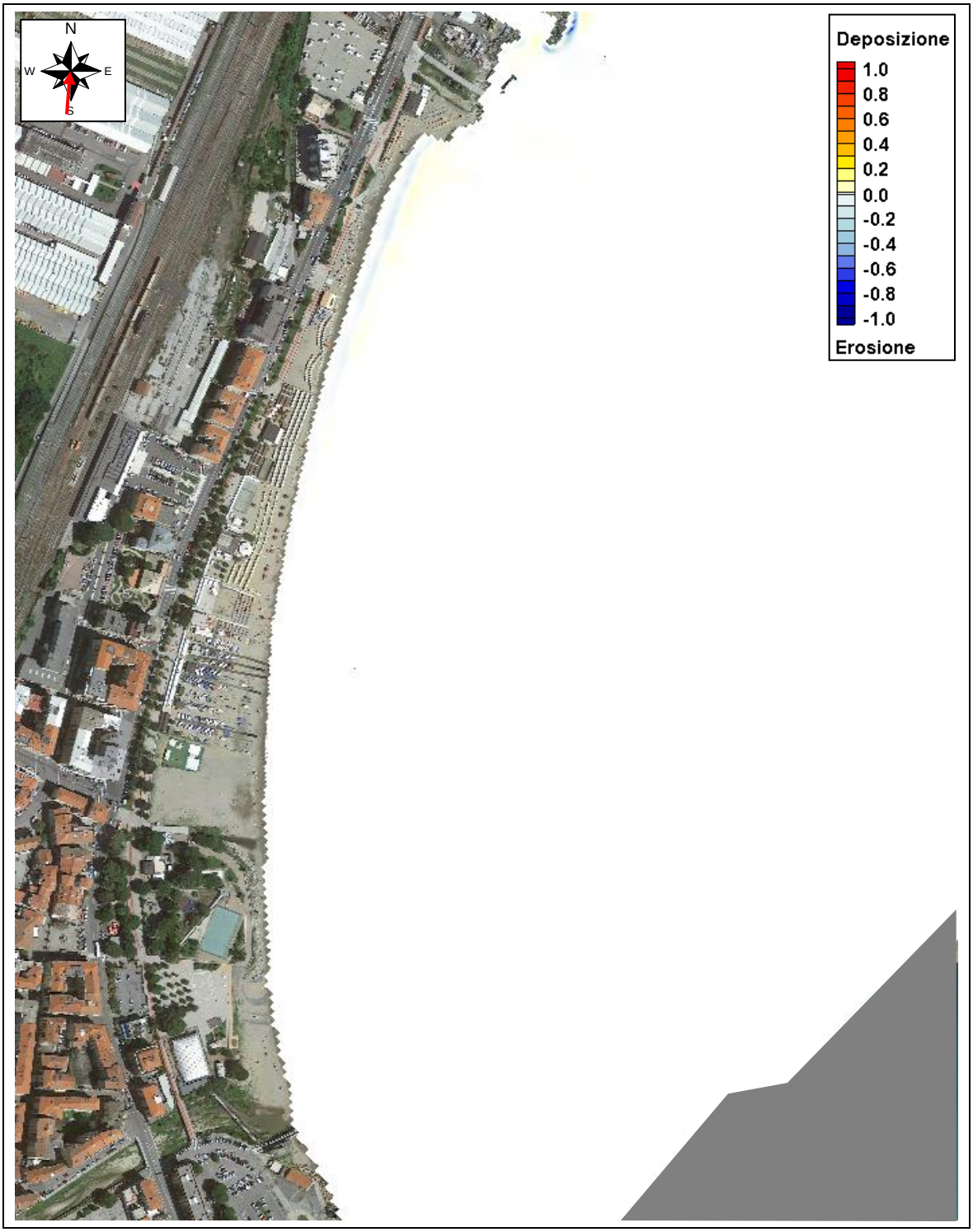


Fig. 7.9 – TEST 3 – Mareggiata di Mezzogiorno - Evoluzione dei fondali

8 EVOLUZIONE MORFOLOGICA DEL LITORALE IN CONFIGURAZIONE ATTUALE

Lo studio morfologico dell'evoluzione del litorale di Vado Ligure è stato condotto mediante l'utilizzo del codice di calcolo GENESIS (sviluppato dal Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers).
Per la definizione del dominio di calcolo sono stati utilizzati come base i più recenti rilievi locali disponibili: rilievo di agosto 2008, che copre il tratto che va dal Porto di Vado fino al terrapieno del campo da calcio (fino a profondità maggiori di -55 m s.m.m.), e rilievo di aprile 2010, che copre il tratto di litorale compreso tra il pontile Esso e il pontile Chevron (fino a profondità comprese tra -6.5 e -9.0 m s.m.m.).

La finalità dello studio è quella di confrontare la prevedibile evoluzione del litorale in assenza di interventi con quella risultante dalla realizzazione degli interventi previsti nell'ambito del presente progetto (realizzazione del ripascimento protetto dalle secche sommerse e del pennello alla foce del torrente Segno).

In linea generale, si procede con una prima fase di taratura che permette di adattare il modello matematico alla situazione del paraggio oggetto di studio (il modello, infatti, interpreta la realtà fisica in maniera semplificata), tenendo conto qualitativamente dei principali fenomeni che governano l'evoluzione morfologica della costa. L'operazione di taratura consente, pertanto, di tenere conto in maniera implicita di tutti i fattori non direttamente esplicitabili sotto la forma di relazioni causa-effetto. Il principale obiettivo della taratura è la determinazione dei coefficienti k_1 e k_2, che correggono la formula del CERC (1984), esprimente la relazione tra trasporto solido e flusso di energia in direzione parallela alla riva. Una volta individuati i valori più idonei per le costanti di taratura (k_1 e k_2), sono state eseguite le simulazioni di evoluzione in stato attuale e in configurazione di progetto.

Ai fini della modellazione matematica, è stato individuato un dominio di calcolo idoneo per lo studio del sito in esame, individuando le condizioni al contorno e schematizzando opportunamente (come in seguito specificato) le singolarità presenti.

8.1 Ricostruzione storica dell'evoluzione morfologica del litorale

La ricostruzione storica dell'evoluzione del litorale di Vado Ligure, tra Villa Gavotti e il porto di Vado, è stata condotta sulla base dei dati disponibili e, in particolare, sulla base del confronto tra le seguenti linee di riva (Fig. 8.1)

- linea di riva 1944;
- linea di riva 1973;
- linea di riva 1983;
- linea di riva 1993;
- linea di riva 2003
- linea di riva rilievo di aprile 2010;
- linea di riva Google-Earth di luglio 2018.

L'analisi dell'evoluzione storica della linea di costa è stata condotta con particolare riferimento al tratto di litorale compreso tra la foce del torrente Quiliano e la foce del torrente Segno, oggetto del presente studio.
La linea di riva del 1944 si presenta notevolmente arretrata rispetto a quelle degli ultimi 50 anni (dal 1973 al 2018), in parte perché le opere foranee del porto di Vado nel 1944 non raggiungevano i fondali attuali e in parte perché non erano ancora stati realizzati i terrapieni e le armature di foce del Torrente Quiliano.
Per quanto riguarda il tratto di litorale oggetto di intervento (tra la foce del torrente Quiliano e la foce del Segno), si osserva un riorientamento della linea di riva piuttosto evidente dal 1973 al 1993, con arretramento a Nord e avanzamento a Sud a ridosso della scogliera radente. Questo fenomeno va sicuramente attribuito al completamento delle opere foranee del porto di Vado e, principalmente, all'allungamento del molo di sopraflutto.
Questa tendenza diminuisce nel corso del decennio successivo (dal 1993 al 2003); dal 2003 al 2010 (e probabilmente anche oltre), nel quale si riscontra una sostanziale stabilità della linea di riva, non essendo stati eseguiti interventi di rilevanza lungo il litorale e modifiche sostanziali all'assetto delle opere foranee.
Nel corso degli ultimi anni, in seguito alla costruzione del terrapieno della nuova piastra multifunzionale, si evidenzia un ulteriore riorientamento della linea di riva, con un avanzamento piuttosto evidente nel tratto a Sud e un corrispondente arretramento a Nord (a ridosso della scogliera radente alla radice del pontile Tirreno Power). Si fa presente che tale tratto di litorale si trova in condizioni critiche già dal 1993: la parte emersa della spiaggia è ridotta a poco più di una decina di metri e sono state costruite difese radenti e opere di difesa provvisorie per far fronte alle mareggiate più intense che hanno colpito il litorale, provocando danni alle infrastrutture presenti sulla spiaggia e alla retrostante passeggiata litoranea.

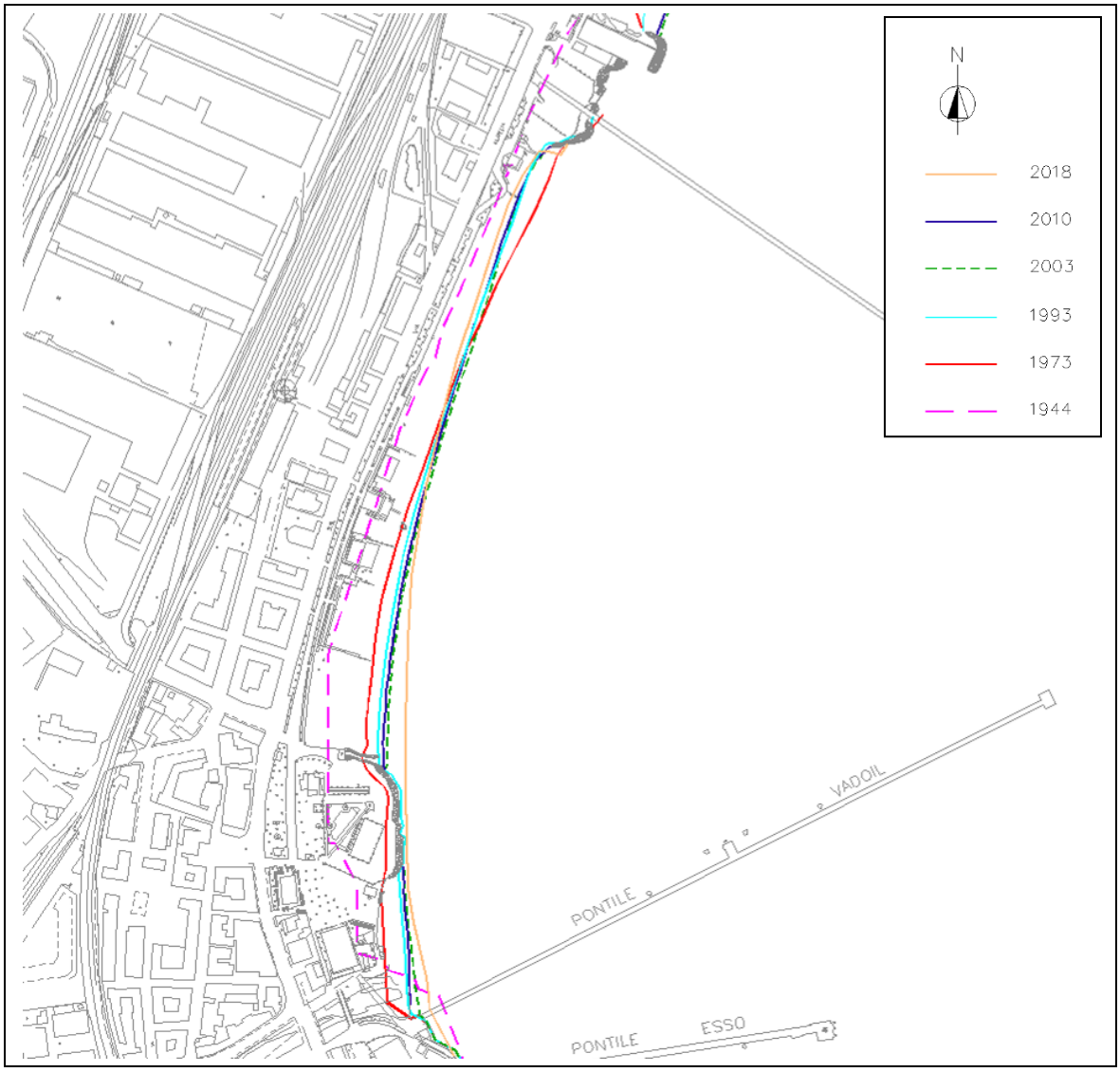


Fig. 8.1 – Evoluzione storica della linea di riva dal 1944 al 2018

8.2 Premessa alla modellazione

I modelli matematici costituiscono un valido strumento per l'analisi e la previsione dell'evoluzione della morfologia costiera. Il principale vantaggio dei modelli matematici risiede nella possibilità, una volta implementati, di studiare in tempi ragionevolmente brevi diverse soluzioni progettuali, ovvero l'effetto di forzanti di natura diversa (mareggiate eccezionali, variazioni del clima, ecc.).
La modellazione dell'evoluzione morfologica di un litorale coinvolge fenomeni di natura diversa quali il moto ondoso incidente il litorale stesso, la presenza di correnti costiere, il trasporto solido longitudinale (in direzione parallela alla linea di riva), il trasporto solido trasversale (perpendicolare alla linea di riva), l'influenza di strutture collocate all'interno della zona attiva della spiaggia (quella cioè interessata da fenomeni di migrazione dei sedimenti per azione del moto ondoso) e di eventuali interventi di dragaggio o ripascimento artificiale.
In primo luogo, è fondamentale la determinazione delle forzanti del sistema, cioè del clima meteomarino locale. Sulla base di questi dati è possibile quindi valutare il trasporto solido nelle diverse direzioni nelle diverse celle che compongono il modello matematico. Una volta determinate le forzanti, si passa quindi alla valutazione del trasporto solido nelle diverse direzioni, valutazione che si basa su criteri semiempirici che legano le caratteristiche del moto ondoso alla geometria della spiaggia ed alle caratteristiche dei sedimenti che la costituiscono.
Va quindi analizzata l'influenza delle strutture collocate all'interno della zona attiva, sia in termini di modificazione della propagazione locale del moto ondoso che di interazione con il regime di trasporto solido, cioè di valutazione della variazione indotta localmente sulle forzanti del sistema dalla presenza di opere e della capacità di queste ultime di intercettare, totalmente o in una parte da quantificare, il trasporto solido. Alla stregua delle opere in zona attiva vanno considerati gli interventi di dragaggio e ripascimento, che modificano localmente il campo di moto delle onde incidenti e alterano in alcune zone il budget di sedimenti passibile di migrazione per effetto delle forzanti già determinate.
Si rimanda all'allegato A per una descrizione del codice di calcolo GENESIS.

8.3 Profondità di chiusura e altezza di swash

La profondità di chiusura rappresenta la profondità limite al di sotto della quale il profilo trasversale non subisce cambiamenti significativi, nell'intervallo di tempo per cui si esegue la simulazione. La valutazione corretta della profondità di chiusura per un dato sito è normalmente condotta sulla base dell'analisi di dati storici che documentino l'evoluzione del tempo del profilo trasversale in sezioni significative del sito in oggetto.
Qualora tali dati non siano disponibili, è possibile valutare la profondità tramite la relazione di Hallermeier (1983):

$$h_c = 1.6 \cdot H_{0,12}\,.$$

dove $H_{0.12}$ rappresenta il valore dell'altezza significativa superata in media per 12 ore all'anno.
Utilizzando la tabella del clima ondoso medio ricostruito nel punto P (descritto in dettaglio al precedente paragrafo 4.3) è stato possibile ricostruire la curva di durata e determinare il valore di $H_{0,12}$. In Fig. 8.2 è rappresentata la curva di durata per il calcolo della $H_{0,12}$.
Sulla base della frequenza annua è stata valutata un'altezza d'onda $H_{0,12}$ pari a 2.8 m. La profondità di chiusura h_c è risultata di conseguenza pari a circa 4.5 m; l'altezza di swash D_B è stata stimata in 1.5 m. L'altezza complessiva della fascia attiva risulta di 6.0 m.

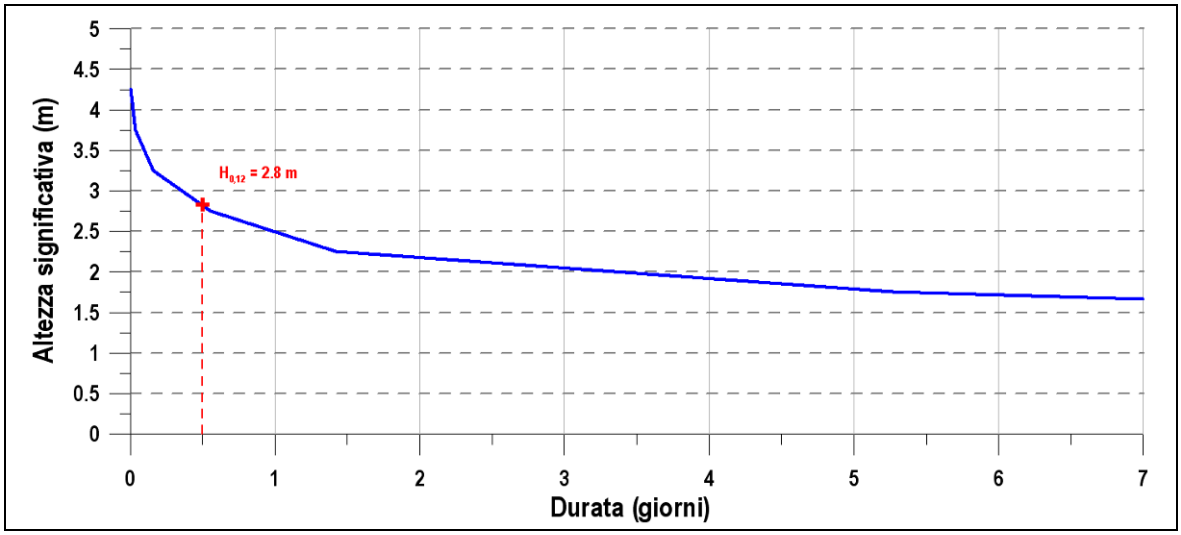


Fig. 8.2 – Individuazione $H_{0.12}$ – Curva di durata nel punto P

8.4 Taratura del modello (1993-2010)

La taratura è stata condotta con riferimento alle linee di riva disponibili (cfr. precedente paragrafo 8.1); in particolare, si è scelto di tarare il modello con riferimento all'evoluzione del litorale avvenuta nel periodo che va dal 1993 al 2010. La fase di taratura del modello consiste sostanzialmente nel variare i parametri di calibrazione del codice di calcolo fino ad ottenere dal modello la ricostruzione più fedele possibile dell'evoluzione della linea di costa misurata nell'intervallo temporale 1993-2010.

8.4.1 Propagazione del moto ondoso sotto costa

La fase iniziale della taratura del modello di evoluzione morfologica è consistita nel trasferimento sotto costa, al limite esterno della fascia attiva, delle caratteristiche del clima ondoso precedentemente determinate nel punto P, posto su un fondale di -100 m s.m.m. (cfr. precedente paragrafo 4.3). Il trasferimento del clima ondoso dal punto P al limite della fascia attiva è stato condotto mediante il codice di calcolo STWAVE. Sono state scelte una serie di stazioni (in pratica una serie di boe virtuali), poste lungo il litorale in corrispondenza della batimetrica –10 m s.m.m. e posizionate ad una distanza di 40 m tra loro; tali stazioni sono state utilizzate per rappresentare le differenti condizioni di moto ondoso presenti lungo il litorale (Fig. 8.4).

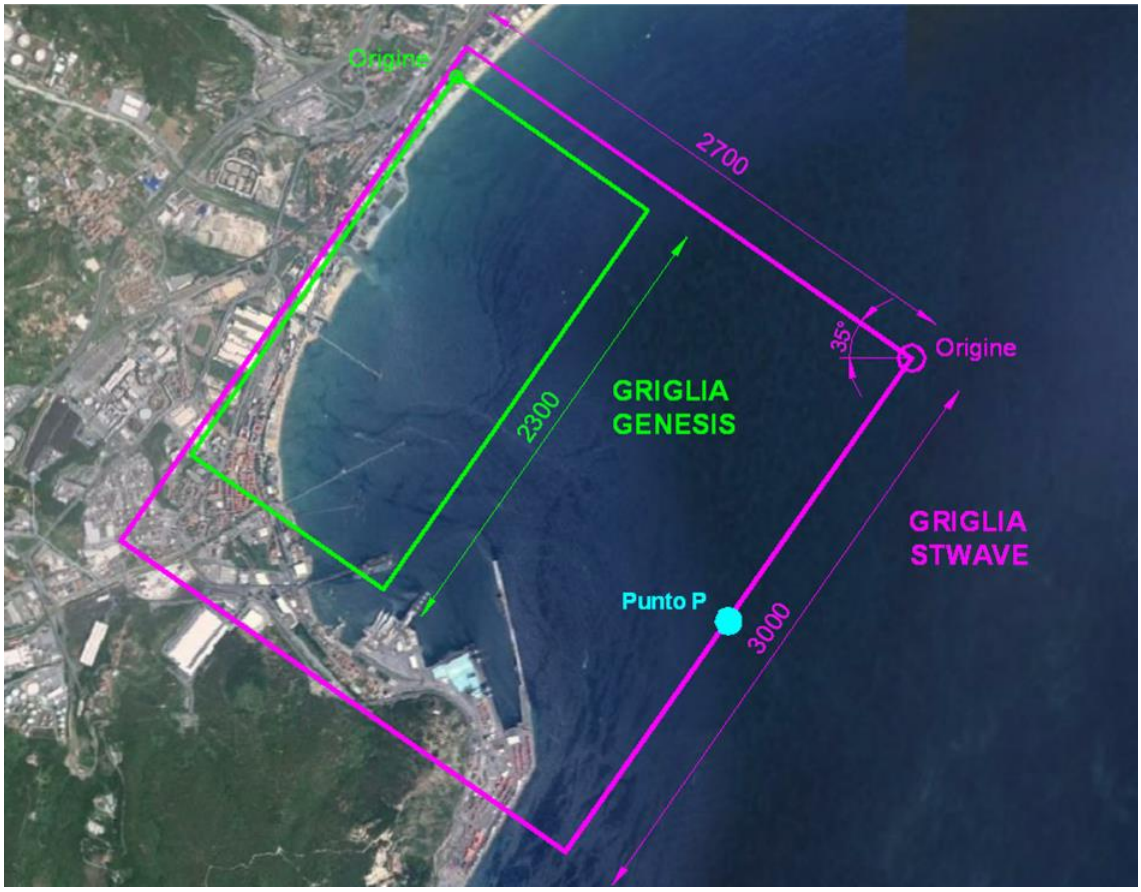


Fig. 8.3 –Griglie di calcolo STWAVE e GENESIS

La griglia di calcolo STWAVE, rappresentata in Fig. 8.3, ha origine nel punto di coordinate 1458500 m EST e 4902760 m NORD (vertice in alto a destra), dimensioni 2700x3000 m, maglia quadrata con passo 20 m, inclinata di 35° rispetto alla direzione EW. Le coordinate dell'origine della griglia di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento Gauss Boaga Fuso Ovest.
In linea generale, relativamente alle opere presenti sul litorale e schematizzate nelle simulazioni, si fa presente che il porto di Vado è stato inserito solamente nel modello di propagazione STWAVE, mentre nel dominio di calcolo GENESIS sono state rappresentate solamente le opere presenti più sotto costa. In particolare nella simulazione di taratura (che simula l'evoluzione del litorale nel periodo 2003-2010) non è stata rappresentata la nuova piastra multifunzionale, la cui realizzazione è iniziata dopo il 2010.
Il file di input che descrive il moto ondoso nelle simulazioni condotte con il modello GENESIS è stato ricavato creando una sequenza di eventi casualmente ordinata, sulla base del clima ondoso nel punto P. Una volta fissato l'intervallo temporale di calcolo (pari a 3 ore, nel caso in esame), l'andamento del clima meteomarino dell'anno medio risulta descritto da un numero di eventi pari al numero di intervalli di calcolo compresi nell'anno. Il codice di calcolo associa a ciascuno degli intervalli temporali una serie di valori di altezza significativa, periodo e direzione media di provenienza, tale per cui l'andamento globale del clima ottenibile dalla sequenza ricostruita rappresenta efficacemente il clima vero. Gli eventi caratterizzati da altezza significativa inferiore a 0.25 m, nel punto U.K.M.O. al largo, sono stati considerati come calme.

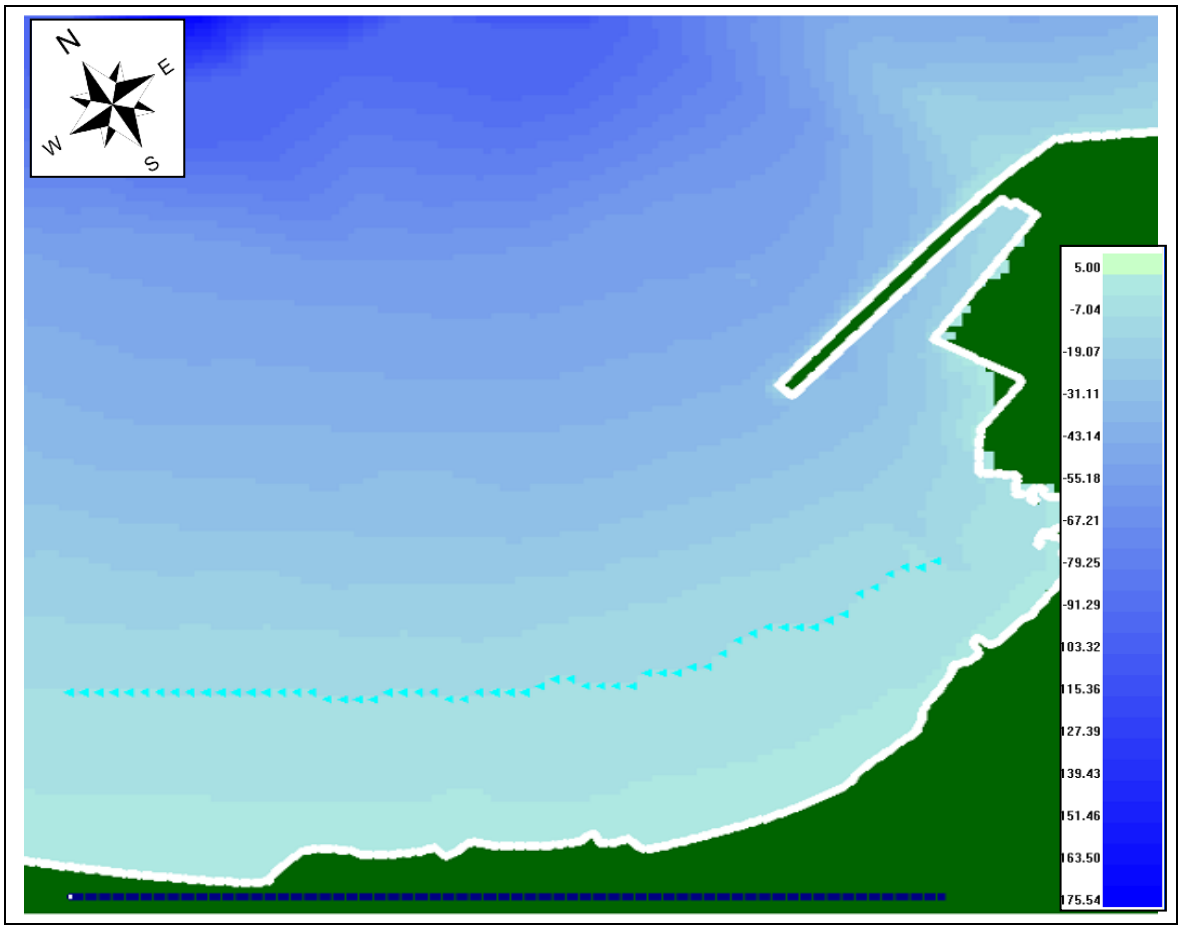


Fig. 8.4 – Griglia di calcolo STWAVE – Simulazione di taratura

8.4.2 Costruzione della griglia GENESIS

Il dominio di calcolo GENESIS, che comprende il tratto di costa tra la spiaggia di Zinola (circa 500 m a Nord-Est del terrapieno del campo da calcio) e il pontile Esso, è stato costruito suddividendo il litorale in 460 celle della lunghezza di 5 m ciascuna, per un totale di 2300 m (cfr. Fig. 8.3).
La griglia GENESIS ha i lati paralleli a quelli della griglia STWAVE e origine nel punto di coordinate (1456235.0 m EST; 4904162.8 m NORD – vertice in alto a sinistra); le coordinate dell'origine della griglia di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Ovest.
L'estensione del dominio di calcolo è stata determinata in base alla conformazione del litorale e delle opere presenti, che ha consentito di porre gli estremi in corrispondenza di punti notevoli dove fissare univocamente le condizioni al contorno. L'estremo sinistro del dominio di calcolo è stato fissato in corrispondenza del litorale di Zinola, mentre l'estremo destro della griglia si trova in prossimità del pontile Esso. Di seguito, procedendo da Nord verso Sud, si riporta una breve descrizione delle opere presenti litorale e rappresentate nel modello GENESIS.
Come precedentemente accennato, nella simulazione di taratura si è provveduto ad inserire nel dominio STWAVE il molo del porto di Vado nella configurazione attuale (Fig. 8.4), mentre nella griglia GENESIS sono state opportunamente schematizzate solamente le opere sotto costa presenti nel periodo di taratura (1993-2010). I parametri impiegati nel modello sono riassunti nella seguente Tab. 8.1. In particolare, si riportano i valori dei coefficienti di taratura K_1 e K_2, le caratteristiche della griglia di calcolo (dimensioni e spaziatura), il periodo individuato per la simulazione, lo step temporale di calcolo, le caratteristiche della climatologia fornita in input al modello (profondità della fascia attiva, ubicazione delle "stations") e le condizioni al contorno.

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Coefficiente di calibrazione K_1	0.03	
Coefficiente di calibrazione K_2	0.01	
Numero di celle totali	460	
Dimensioni di ogni cella	5	m
Data inizio simulazione	01/04/1993	
Data di fine simulazione	01/04/2010	
Dimensione step temporale di calcolo	3	h
Profondità a cui sono ubicate le stations	-710.0	m
Profondità di chiusura	-4.5	m
Altezza di swash	+1.5	m
Estremo destro	Aperto (Pinned Beach)	
Estremo sinistro	Aperto (Pinned Beach)	

Tab. 8.1 – Parametri impiegati nel modello GENESIS – Taratura

Il terrapieno esistente tra Villa Gavotti e il torrente Quiliano (terrapieno del campo da calcio) è stato rappresentato avanzando la linea inerodibile in corrispondenza della scogliera radente.
La foce del Quiliano è stata schematizzata con due pennelli di tipo "non diffracting", con una lunghezza idonea e permeabilità nulla.
La zona del cantiere nautico e il terrapieno adiacente sono stati schematizzati avanzando la linea

inerodibile in corrispondenza della difesa radente presente lato mare.
Il pontile Tirreno Power e i pontili Vadoil e Esso (posti più a Sud in prossimità della foce del Segno), essendo su pali, non sono stati rappresentati nel modello in quanto completamente permeabili in relazione al moto ondoso e al flusso di sedimenti.
La linea di riva iniziale è quella del 1993; i sedimenti presenti all'interno della fascia attiva sono stati rappresentati con un valore del diametro mediano dei grani pari a 3.5 mm (valore rappresentativo dei campioni prelevati sulla spiaggia emersa - cfr. precedente paragrafo 5).
Per quanto riguarda i ripascimenti eseguiti sul litorale oggetto di studio nell'arco dell'ultimo ventennio (dal 1993 al 2010), si fa presente che non è stato possibile reperire un elenco completo di tutti gli interventi. Pertanto, secondo le indicazioni fornite dal Committente, sono stati inseriti nel modello GENESIS solamente due interventi:

- Ripascimento del 2005: versamento di 19'000 m^3 di materiale nel tratto di litorale a Nord-Est del terrapieno da calcio fino alla foce del torrente Letimbro, eseguito con sabbia e ghiaia proveniente dalle attività di scavo per la costruzione del complesso della Torre nella vecchia darsena del porto di Savona;
- Ripascimento di marzo-aprile 2009: versamento di 2'800 m^3 di materiale nella spiaggia a Nord-Est del terrapieno da calcio (per un tratto di circa 500 m), eseguito con ghiaia naturale proveniente da cava.

Di seguito, in Fig. 8.5, si riporta il dominio di calcolo GENESIS utilizzato per la simulazione di taratura.

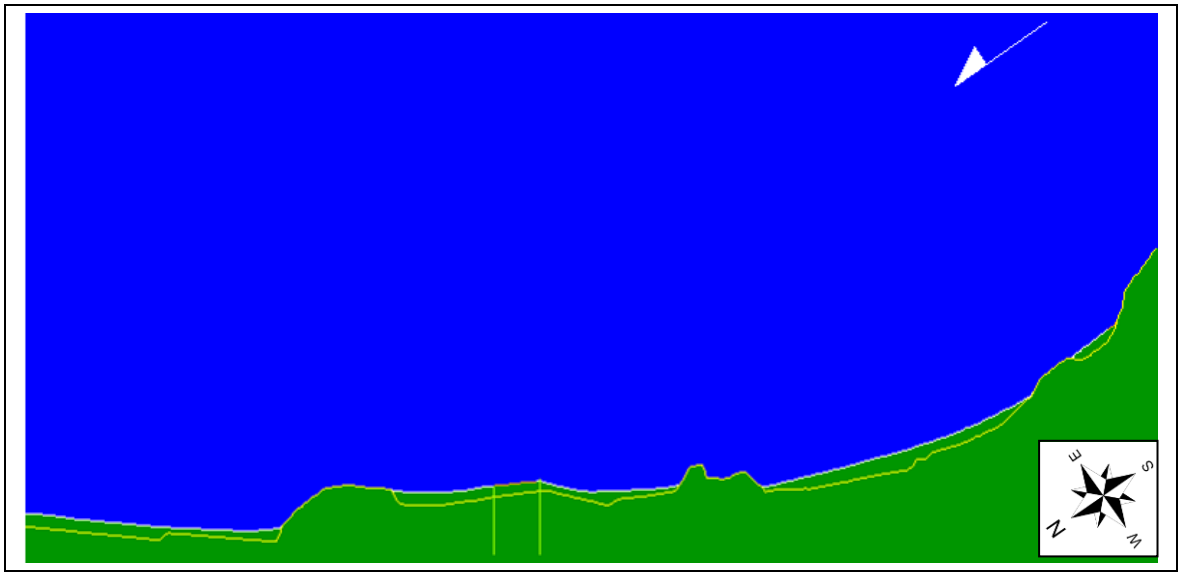


Fig. 8.5 – Griglia di calcolo genesis – Taratura 1993-2010

Tutte le simulazioni condotte con GENESIS, sia quella di taratura che quelle in configurazione attuale e di progetto, sono state eseguite considerando l'immissione di sedimenti da parte del torrente Quiliano. L'immissione di sedimenti è stata schematizzata con un ripascimento localizzato in corrispondenza della foce, che è stato qualitativamente stimato in circa 2000 m^3/anno.
Per quanto riguarda, invece, l'immissione di sedimenti da parte del torrente Segno, posto in

corrispondenza dell'estremo destro del dominio di calcolo, nella fase di taratura è stata condotta un'analisi per valutare l'influenza dei sedimenti provenienti dal Segno sul trasporto solido locale. Di conseguenza, sono state condotte due simulazioni: la prima senza immissione di sedimenti e la seconda considerando un valore di portata solida del torrente stimato sulla base dei risultati degli studi idraulici condotti da Hydrosoil S.r.l. nel luglio 2014 nell'ambito del progetto preliminare della sistemazione del torrente Segno (cfr. "Studio idraulico-marittimo relativo alla sistemazione idraulica del tratto terminale del torrente Segno", redatto per conto dell'Autorità portuale di Savona).
Per la stima della portata solida del torrente Segno da inserire nella simulazione GENESIS si è fatto riferimento al valore massimo del trasporto medio annuo in grado di essere generato dal torrente e di raggiungere la foce, pari a circa 8600 m^3/anno. Considerando che le simulazioni GENESIS sono state condotte facendo riferimento alle caratteristiche sedimentologiche del materiale della spiaggia emersa (costituito da ghiaia medio-fine), sulla base della curva granulometrica del materiale prelevato alla foce del Segno è stata individuata la percentuale di sedimenti corrispondente alla granulometria considerata (Fig. 8.6). Ne consegue che la portata solida del torrente Segno relativa alla classe di sedimenti compresa tra 2 e 20 mm (ghiaia medio-fine), risulta pari a circa il 40% del totale, ovvero circa 3400 m^3/anno.

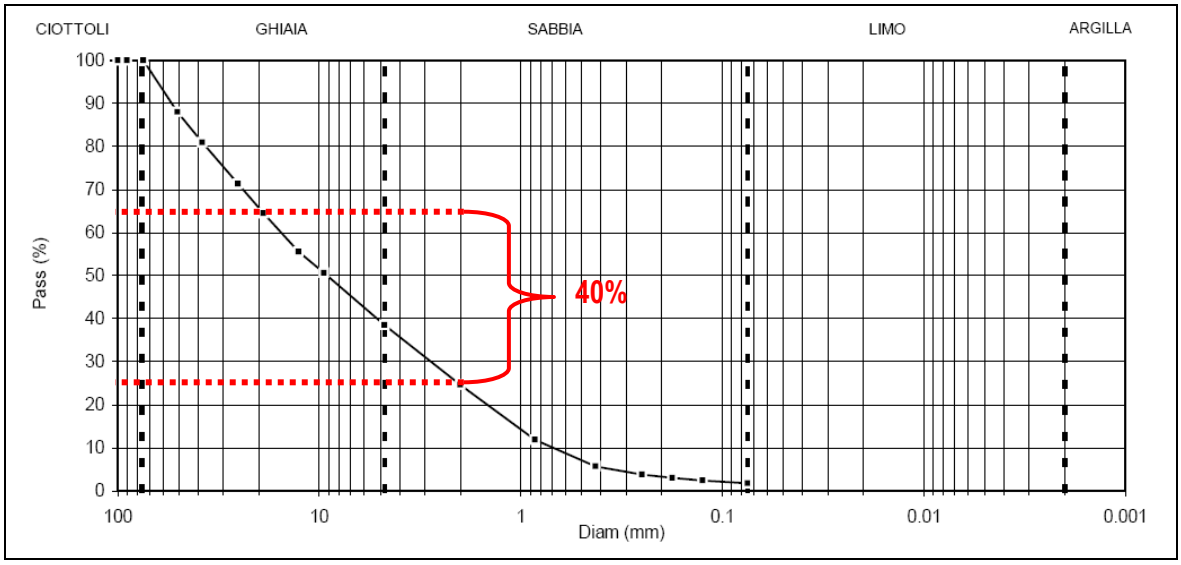


Fig. 8.6 – Individuazione della classe di sedimenti corrispondenti alle ghiaie medio-fini sulla base della curva granulometrica del campione di materiale prelevato alla foce del Torrente Segno

8.4.3 Risultati della simulazione di taratura

Nel presente paragrafo si riportano i risultati della simulazione di taratura relativa al periodo 1993-2010, condotta per mezzo del codice di calcolo GENESIS. I risultati sono rappresentati nella successiva Fig. 8.7 sia in termini di trasporto solido che di evoluzione della linea di riva, con riferimento all'intera griglia di calcolo.
Il modello, opportunamente tarato, è in grado di riprodurre con discreta approssimazione l'evoluzione della linea di riva per il tratto di litorale analizzato. In particolare, una buona corrispondenza tra la linea di riva stimata dal modello e quella rilevata a marzo 2010 si riscontra nel tratto di litorale a Nord-Est del terrapieno del campo da calcio (spiaggia di Zinola), per il quale è stato possibile reperire informazioni più accurate relativamente ai ripascimenti eseguiti nel periodo di taratura.
Per quanto riguarda, invece, la spiaggia tra la foce del Quiliano e il cantiere nautico, il modello non riproduce fedelmente l'evoluzione avvenuta nel periodo 1993-2010; si ritiene sia possibile che siano stati eseguiti interventi (ad esempio modifiche dell'armatura di foce del Quiliano e/o ripascimenti e movimentazioni di materiale) le cui informazioni non sono pervenute.
Procedendo verso Sud, il modello è in grado di riprodurre con buona approssimazione la tendenza evolutiva del litorale; la linea di riva, nel periodo 1993-2010, ha infatti subito una sensibile rotazione con arretramento a Nord (in corrispondenza del pontile Tirreno Power) e un avanzamento a Sud (a ridosso della difesa radente in prossimità della foce del torrente Segno).
Per quanto riguarda il trasporto solido, i risultati sono presentati sia considerando l'apporto solido del Torrente Segno che in assenza di immissione di sedimenti. Si osserva che il trasporto risulta praticamente coincidente nei due casi; la variazione è limitata alla zona di foce e, in particolare, al tratto di spiaggia compreso tra la difesa radente e la foce del Torrente Segno (circa 200 m). I sedimenti uscenti dalla foce vanno ad alimentare in parte i litorali a Nord e, in parte minore, quelli a Sud; tuttavia la loro influenza è appunto limitata alla zona di foce.
Ne consegue che il contributo dei sedimenti immessi dal Torrente Segno alla dinamica delle spiagge poste più a Nord risulta trascurabile; tale affermazione è stata confermata anche da quanto emerso dagli studi di dettaglio del trasporto solido (cfr. studi del 2014).
In linea generale, il trasporto è diretto verso Nord-Est (ovvero verso il porto di Savona) nel tratto di litorale a Nord della foce del Torrente Quiliano, mentre la zona compresa tra il Quiliano e il cantiere nautico è, invece, caratterizzata da trasporto pressoché nullo. Procedendo verso Sud si osserva un'inversione nel verso del trasporto che, nell'arcata litoranea compresa tra il cantiere nautico e la difesa radente, risulta diretto verso Sud (ovvero verso il Porto di Vado). Il trasporto, infine, si annulla in corrispondenza della difesa radente, per poi cambiare nuovamente verso.

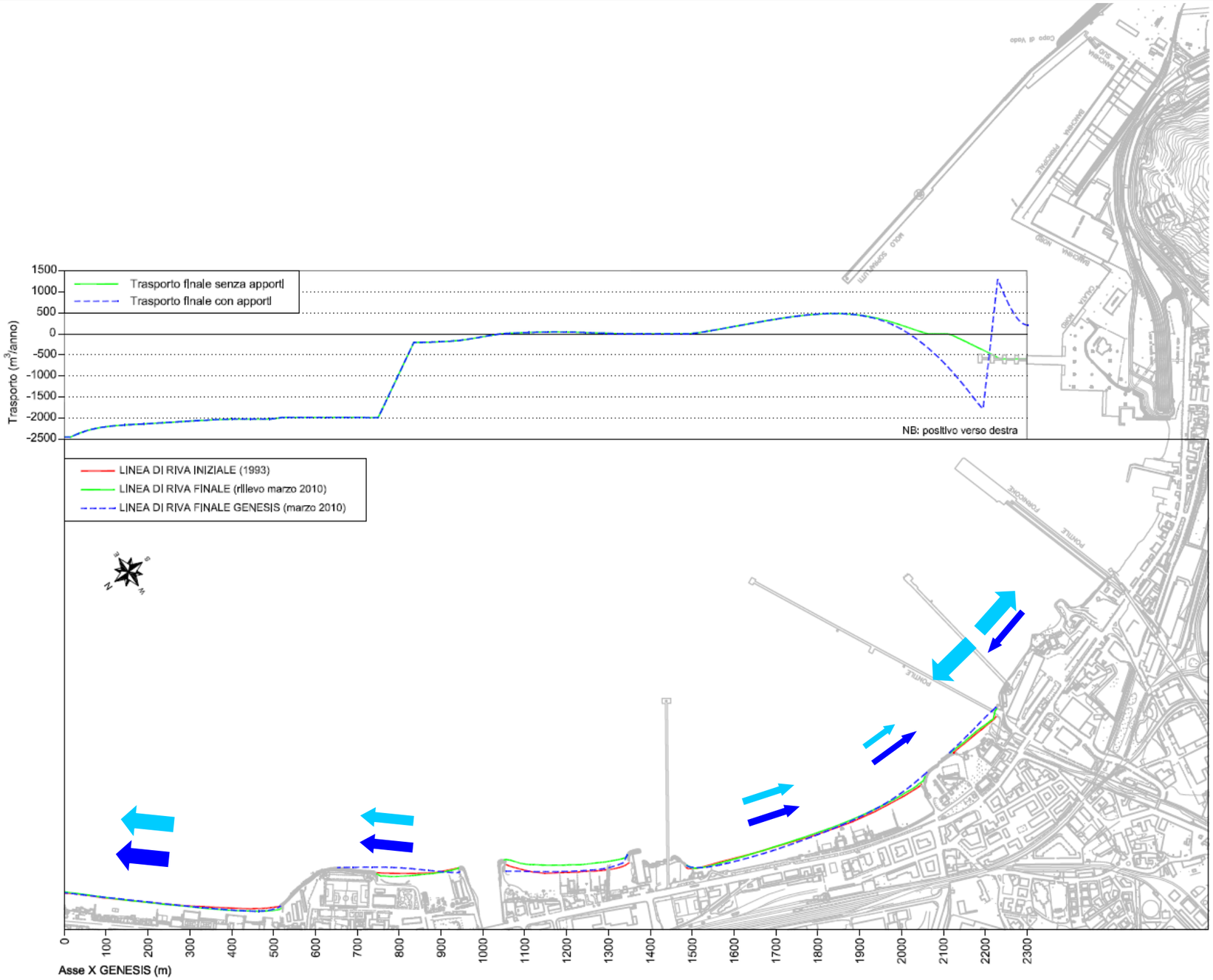


Fig. 8.7 – Taratura del modello (1993-2010) - Andamento trasporto solido longitudinale ed evoluzione della linea di riva

8.5 Evoluzione morfologica a 10 anni in configurazione attuale

Il modello di evoluzione morfologica, con i parametri definiti in fase di taratura (cfr. precedente paragrafo 8.4.2), è stato impiegato per la previsione dell'evoluzione della linea di riva in assenza di interventi (configurazione attuale) e ipotizzando che vengano realizzate le opere previste in progetto (cfr. successivo paragrafo 12). Per stimare la tendenza evolutiva del litorale in assenza di interventi e confrontarla con quella relativa alla simulazione di progetto, è stata condotta una simulazione dell'evoluzione della linea di riva a 10 anni. Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle simulazioni relative all'evoluzione morfologica del litorale in configurazione attuale.

8.5.1 Propagazione del moto ondoso sotto costa

Rispetto alla simulazione di taratura la griglia di calcolo STWAVE è stata modificata inserendo la nuova piastra multifunzionale, ad oggi in corso di esecuzione, ma sostanzialmente completata per quanto riguarda il contorno a mare delle opere. La propagazione del moto ondoso sottocosta, propedeutica all'analisi dell'evoluzione morfologica del litorale, è stata condotta inserendo il terrapieno della piastra multimodale e spostando le "stazioni di output" più sotto costa, ovvero posizionandole nella fascia di fondale compresa tra il limite della spiaggia attiva e la zona di influenza della piastra. Il trasferimento del clima ondoso dal punto P (posto su un fondale di -100 m s.m.m.) al limite della fascia attiva è stato condotto mediante il codice di calcolo STWAVE.

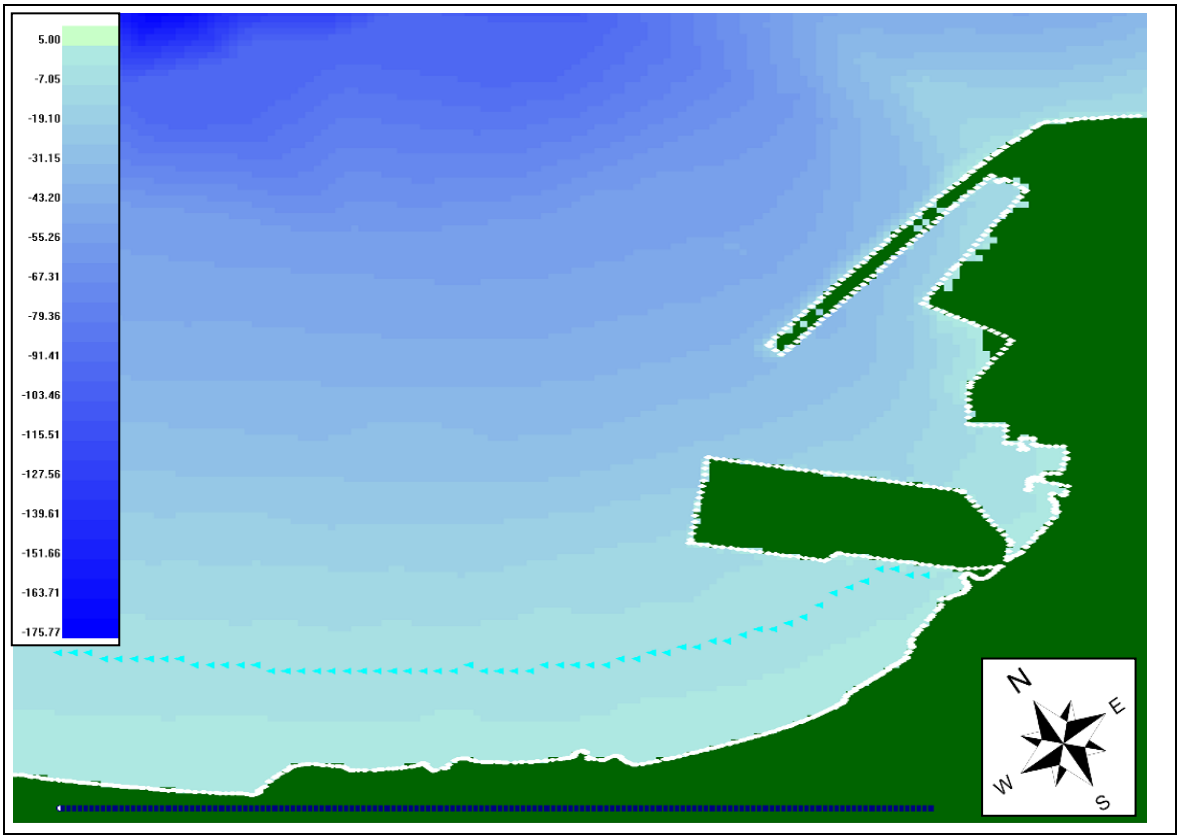


Fig. 8.8 – Griglia di calcolo STWAVE – Stato attuale

In maniera analoga alla fase di taratura, sono state quindi scelte una serie di stazioni (in pratica una serie di boe virtuali), poste lungo il litorale in corrispondenza della batimetrica –7 m s.m.m. e posizionate ad una distanza di 40 m tra loro; tali stazioni sono state utilizzate per rappresentare le differenti condizioni di moto ondoso presenti lungo il litorale (Fig. 8.8).
Il clima nel modello STWAVE è stato rappresentato adottando lo stesso approccio impiegato in fase di taratura (cfr. precedente paragrafo 8.4.1.

8.5.2 Parametri utilizzati nel modello

Le opere rigide attualmente presenti nel tratto di litorale compreso tra la spiaggia di Zinola e il porto di Vado sono state opportunamente schematizzate nel modello GENESIS. Si tratta sostanzialmente delle stesse opere presenti nella simulazione di taratura e descritte nel precedente paragrafo 8.4.2.
In mancanza di rilievi di dettaglio dell'area oggetto di intervento (l'ultimo rilievo fornito dal Committente risale ad aprile 2010), la linea di riva iniziale è stata aggiornata sulla base dell'ortofoto più recente scaricabile da Google-Earth (luglio 2018; cfr. analisi storica di cui al paragrafo 8.1).
I sedimenti presenti all'interno della fascia attiva sono stati rappresentati con un valore del diametro mediano dei grani pari a 3.5 mm (come per la simulazione di taratura).
La simulazione è stata condotta considerando l'immissione di sedimenti da parte del torrente Quiliano; mentre, per quanto riguarda il Torrente Segno, il suo contributo alla dinamica litoranea è stato considerato trascurabile (cfr. precedente paragrafo 8.4.3).
Di seguito, in Fig. 8.9 si riporta la griglia di calcolo GENESIS con le opere presenti in configurazione attuale.

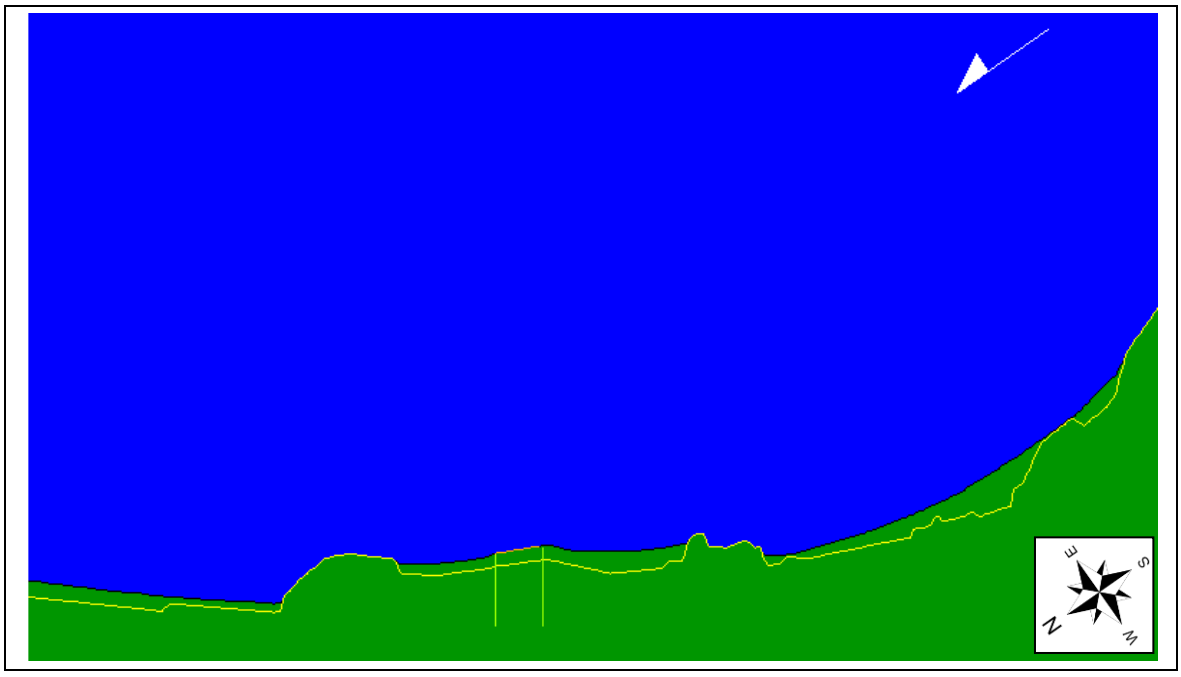


Fig. 8.9 – Griglia GENESIS in configurazione attuale

8.5.3 Evoluzione della linea di riva e trasporto litoraneo

Nel presente paragrafo si riportano i risultati della simulazione di evoluzione morfologica a 10 anni in configurazione attuale, condotta ipotizzando che non vengano realizzati gli interventi previsti in progetto. I risultati sono rappresentati nella successiva Fig. 8.10 sia in termini di trasporto solido, che di evoluzione della linea di riva, con riferimento all'intera griglia di calcolo.
Per quanto riguarda il verso e l'andamento del trasporto solido valgono le stesse considerazioni formulate per la simulazione di taratura.
Il trasporto solido longitudinale a Nord del terrapieno del campo da calcio (spiaggia di Zinola), risulta diretto verso Nord-Est, quindi verso Savona. Procedendo verso la foce del Torrente Quiliano, il trasporto si riduce di entità, fino ad annullarsi nel tratto di litorale compreso tra la foce e il cantiere nautico. Nel tratto di litorale a Sud del cantiere nautico si osserva un'inversione nel verso del trasporto che risulta quindi diretto verso Sud (verso il Porto di Vado), per annullarsi infine in corrispondenza della difesa radente.
A differenza della simulazione di taratura (che si riferisce al periodo 1993-2010, antecedente alla realizzazione della piastra multifunzionale), il trasporto solido a Sud del torrente Segno risulta sostanzialmente nullo per effetto della nuova piattaforma, che garantisce una schermatura totale delle mareggiate provenienti dal II e III quadrante.
In termini di evoluzione della linea di costa, si riscontra una tendenza all'arretramento della linea di riva nella spiaggia di Zinola, a ridosso del terrapieno del campo da calcio, per un tratto di circa 200 m. Per quanto riguarda invece il tratto di litorale compreso tra il terrapieno e la foce del Quiliano, si osserva una tendenza all'avanzamento della linea di riva, con una zona di accumulo alla radice della difesa radente del terrapieno. Il trasporto, in accordo con l'andamento della linea di riva, risulta infatti ancora diretto verso Nord-Est (verso il terrapieno), per poi annullarsi a Sud del Quiliano.
Dalla foce del Quiliano, procedendo verso Sud, fino al cantiere nautico alla radice del pontile Tirreno Power, la linea di riva risulta sostanzialmente stabile.
A Sud del terrapieno del pontile Tirreno Power si osserva un riorientamento della linea di riva, con una tendenza all'arretramento in corrispondenza della scogliera radente. Procedendo verso Sud, da una distanza di circa 200 m dal pontile Tirreno Power fino al torrente Segno (e oltre), la linea di costa risulta sostanzialmente stabile, per effetto della presenza del nuovo terrapieno della piastra.

EVOLUZIONE a 10 ANNI - STATO ATTUALE

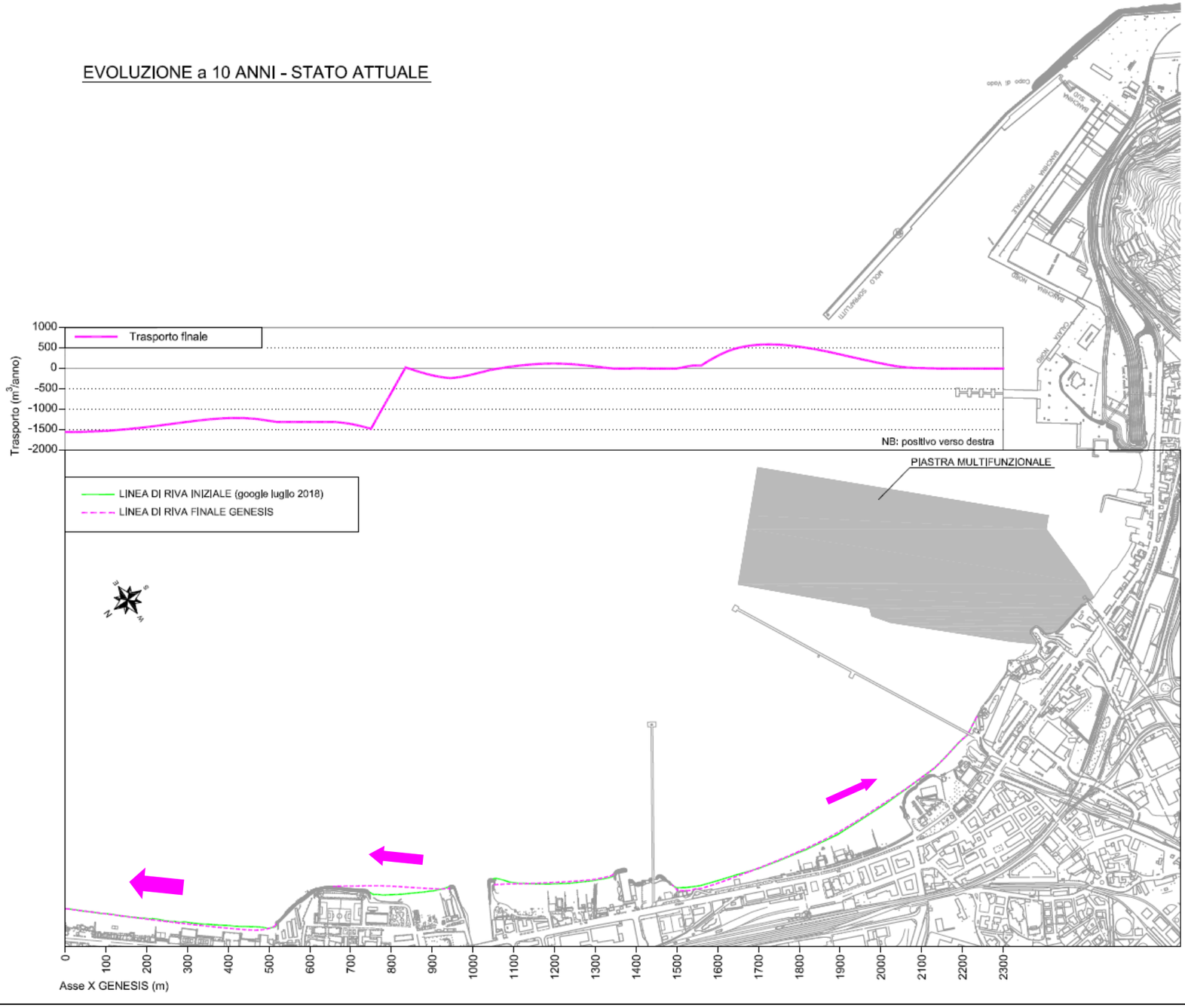


Fig. 8.10 – Evoluzione a 10 anni in configurazione attuale - Andamento trasporto solido longitudinale (in alto) ed evoluzione della linea di riva (in basso)

9 DESCRIZIONE DELLA CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

9.1 Analisi delle alternative progettuali

Alla luce delle analisi condotte e considerando le criticità del tratto di litorale oggetto di intervento, sono state analizzate le possibili alternative progettuali. L'analisi delle alternative progettuali e della loro efficacia è stata condotta al fine di individuare la soluzione ottimale per la soluzione delle criticità riscontrate, con particolare riferimento agli squilibri legati al nuovo assetto delle strutture portuali.
Si è quindi cercato di individuare la soluzione più idonea per migliorare la stabilità del tratto di litorale a Sud del pontile Tirreno Power, che mostra una netta tendenza all'arretramento, con evidenti fenomeni erosivi che nel recente passato hanno provocato danni alla spiaggia e al lungomare.
L'efficacia delle soluzioni progettuali analizzate nel presente paragrafo è stata valutata utilizzando il modello di evoluzione della linea di costa. Questo approccio ha consentito di analizzare in maniera speditiva le diverse alternative progettuali, ottimizzando la geometria delle opere rigide proposte e la loro ubicazione planimetrica, in funzione delle specifiche esigenze manifestate dal Committente e dagli operatori locali.

Le principali considerazioni propedeutiche alla progettazione degli interventi a difesa della costa di Vado Ligure sono le seguenti:

1. il ripascimento artificiale è comunque una pratica necessaria per ottenere la stabilità della spiaggia in presenza di trasporto solido in direzione parallela alla costa;
2. il ripascimento ha una durata tanto più limitata, quanto maggiore è la facilità con cui questo materiale viene messo in movimento dalla dinamica litoranea; pertanto si prevede di utilizzare materiale di granulometria grossolana, analogo a quello nativo presente sulla spiaggia emersa (ghiaia fine);
3. la zona più critica è quella immediatamente a Sud della difesa radente alla radice del pontile Tirreno Power, dove una serie di fattori concorrono a determinare sia una tendenza erosiva che un'elevata variabilità legata alle dinamiche forzate dalle diverse mareggiate.

Alla luce di quanto appena esposto, le soluzioni sottoposte ad analisi consistono sostanzialmente in un ripascimento protetto da opere rigide. A completamento dell'intervento, si prevede inoltre la sistemazione della scogliera radente alla radice del pontile Tirreno Power con ricalibratura/riconfigurazione del fronte lato mare dell'opera e la realizzazione del pennello in foce del torrente Segno (opera già prevista secondo prescrizione della VIA di cui alla DGR 254/2015).
Fermi restando gli interventi di completamento descritti (sistemazione difesa radente e pennello del Segno), si è quindi proceduto a valutare l'efficacia delle opere rigide e, una volta individuata la loro configurazione ottimale, è stata analizzata l'efficacia dell'intervento di ripascimento.
Per quanto riguarda la tipologia di opere rigide per la difesa del litorale, si ritiene che la soluzione più idonea sia quella di realizzare barriere in massi naturali parallele alla linea di costa, che, in relazione alle problematiche specifiche del litorale risultano più efficienti e meno impattanti rispetto alle opere trasversali (pennelli).

Il primo scenario analizzato (scenario "a") prevede la realizzazione di una sola barriera ("secca semiaffiorante") di dimensioni al coronamento pari a 20 x 50 m, con quota di sommità coincidente con il livello medio mare. Le dimensioni dell'opera sono state scelte sulla base di un'analisi costi/benefici, con riferimento a casi analoghi già analizzati dagli scriventi.
L'analisi preliminare su modello matematico, eseguita con riferimento a questo scenario, mostra come la singola secca non riesca a garantire un'adeguata protezione del tratto di costa oggetto di intervento; l'effetto localizzato non consente di proteggere sia la zona a ridosso della difesa radente che le infrastrutture più a Sud (stabilimenti balneari).
Si è quindi proceduto ad analizzare un secondo scenario (scenario "b"), che prevede la realizzazione di due secche di dimensioni più contenute rispetto alla precedente (dimensioni al coronamento pari a 15 x 40 m). La posizione delle secche è stata ottimizzata per tentativi successivi in modo tale da garantire una adeguata protezione sia della spiaggia a ridosso della difesa radente che del tratto più sottoflutto.
Nella successiva Fig. 9.1 si riporta la planimetria dell'area di intervento con una rappresentazione schematica dei due scenari analizzati. In Fig. 9.2 si riportano i risultati dell'evoluzione della linea dei costa a 10 anni, con riferimento ai due scenari "a" e "b"; per quanto riguarda lo scenario "b" sono rappresentati risultati già ottimizzati (posizione ottimale delle secche).
Per quanto riguarda il dettaglio della schematizzazione delle opere nel modello GENESIS, si rimanda al successivo paragrafo 12.1.



Fig. 9.1 – Alternative progettuali analizzate (scenario "a" in azzurro e "b" in rosso)

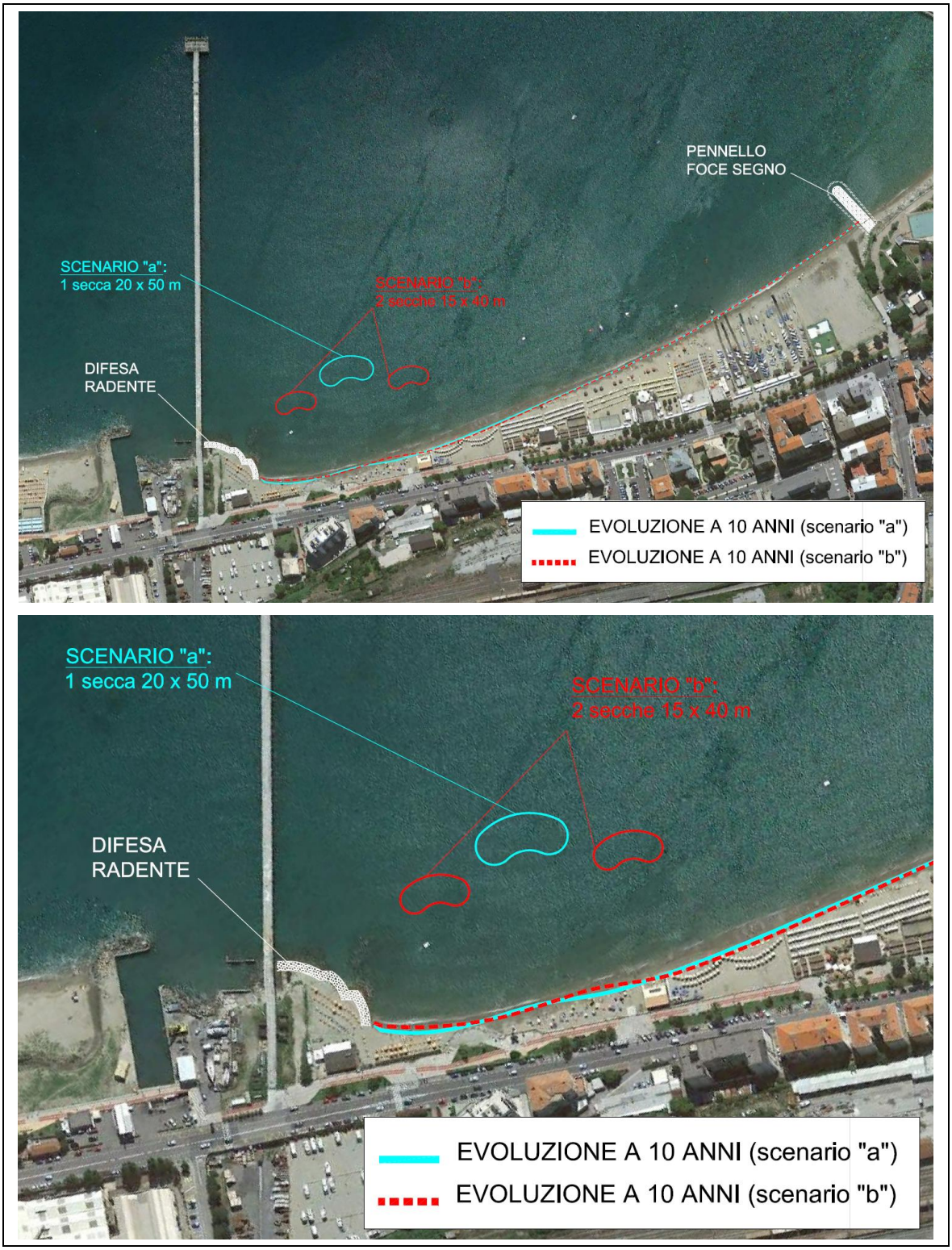


Fig. 9.2 – Risultati evoluzione morfologica della linea di costa a 10 anni con riferimento ai due scenari analizzati
Analisi dell'efficienza delle opere rigide

Infine, una volta individuata la configurazione ottimale delle opere rigide, sono state condotte una serie di simulazioni per "tarare" il quantitativo di materiale da versare a ripascimento e la lunghezza del tratto oggetto di intervento. Sulla base delle analisi condotte si ritiene che siano sufficienti circa 15'000 m^3 di materiale (ghiaia fine) per garantire un'adeguata ampiezza della spiaggia emersa, sia nel breve che nel medio-lungo termine. L'intervento di ripascimento dovrà essere esteso oltre la fascia direttamente protetta dalle secche, per mitigare eventuali arretramenti dovuti alla formazione del saliente a tergo delle barriere.
Nella successiva Fig. 9.3 si riportano i risultati dell'evoluzione della linea dei costa a 10 anni con riferimento allo scenario "b", con e senza ripascimento; per quanto riguarda lo scenario con ripascimento, sono rappresentati i risultati già ottimizzati in termini di volumi e tratto di versamento).



Fig. 9.3 – Risultati evoluzione morfologica della linea di costa a 10 anni – Scenario "b" con e senza ripascimento
Analisi dell'efficienza del ripascimento

9.2 Configurazione di progetto

Il progetto si pone come obiettivo la mitigazione dei fenomeni erosivi locali e la stabilizzazione di un equilibrio dinamico idoneo a mantenere dimensioni di spiaggia utili alla conservazione delle opere urbane.
Il tema è stato affrontato con caratteristiche di intervento di moderata artificializzazione, con privilegio di sistemi aperti di stimolo di equilibri naturali.
Pertanto sono state scartate soluzioni di lunghe dighe emerse o sviluppate, che certamente potrebbe risolvere il tema locale, con conseguenti esigenze di manutenzione del sistema, incapace di risolvere problemi erosivi eventualmente indotti dalle mareggiate.
Si è pertanto optato per una soluzione mista, costituita da:

- un impianto di ripascimento di granulometria opportunamente valutata
- un sistema di opere di contenimento e stabilizzazione costituito da due secche isolate in massi, capaci di indurre la tendenza morfologica di tomboli nella zona in ombra della loro estensione.

Indubbiamente la novità introdotta dal progetto sul litorale è l'elemento “secca”, che non compare in tutto il tratto compreso tra il porto di Vado-Bergeggi e le spiagge di Albissola Mare, ancora di competenza dell'Autorità di Sistema.
Abbiamo avuto occasione di testare gli effetti delle secche su diversi litorali liguri; ne è emersa una valutazione molto positiva, ovviamente rapportata alle condizioni locali. Nel caso in esame le profondità della spiaggia sommersa sono molto adatte alla realizzazione, poiché relativamente modeste; l'onda frangente delle mareggiate più violente incontra l'ostacolo della secca e perde energia.
La presenza della secca induce comunque una avanzamento della linea di riva nella zona in ombra dell'opera; peraltro lo stesso avanzamento coinvolge importanti volumi di materiali sciolti (sabbie e ghiaie) che il sistema trova nell'intorno. Se non si provvede ad idonei proporzionati versamenti di sabbie, ai bordi del sistema viene indotto un forte processo erosivo, necessario a fornire il materiale per l'avanzamento del “tombolo”. È quindi necessario provvedere ad idonei massivi ripascimenti contemporanei alla realizzazione della secca.
Il tema può essere visto anche con un ordine rovesciato. Sul lido in erosione si prevede di intervenire con importanti ripascimenti; il sistema peraltro tende a spostare anche le nuove sabbie verso le aree di positiva rotazione della falcatura. Si introducono allora opere che tendono a conservare in sito i versamenti: le secche.
Quindi l'intervento può essere definito:
A) realizzazione secche con idoneo ripascimento
B) ripascimento con realizzazione di secche di stabilizzazione.
Proponiamo la seconda versione, che descrive il percorso storico degli interventi, iniziati con reiterati quanto sfuggenti ripascimenti e conclusi con il presente progetto che ha lo scopo di mantenere in sito i versamenti di sabbia.

Le opere previste pertanto sono:

- ripascimento di circa 15.000 mc di materiale di granulometria D_{50} = 3,5 mm ben classata, per un tratto di circa 300 ml a Sud-Ovest del pontile Tirreno Power

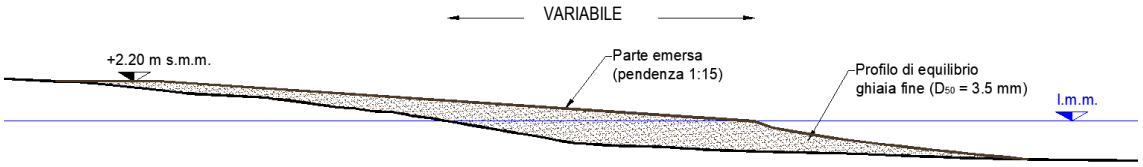


Fig. 9.4 – Sezione tipologica ripascimento

- realizzazione di due secche, in materiale lapideo, con berma a quota 0,00 l.m.m. e dimensione al coronamento ml 15.0 x ml 40.0 . Le pendenze delle scarpate sono:
  - esterna 2/1
  - interna 2/1
  - testate 2/1.

  Le mantellate sono previste in massi di III° categoria, appoggiate direttamente su uno strato di pietrame da 50 a 500 kg; tra lo scanno di imbasamento ed il fondale è previsto il posizionamento di un geocomposito, al fine di garantire un adeguato filtro, ripartire i carichi sovrastanti e pertanto evitare cedimenti del terreno di fondazione.

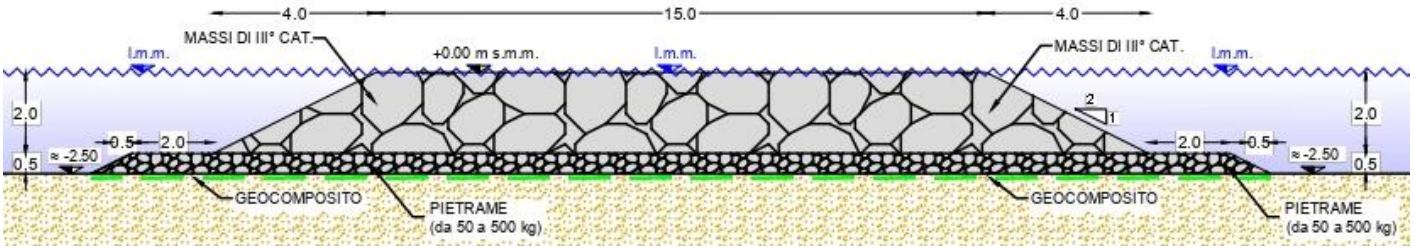


Fig. 9.5 – Sezione tipologica secca semiaffiorante

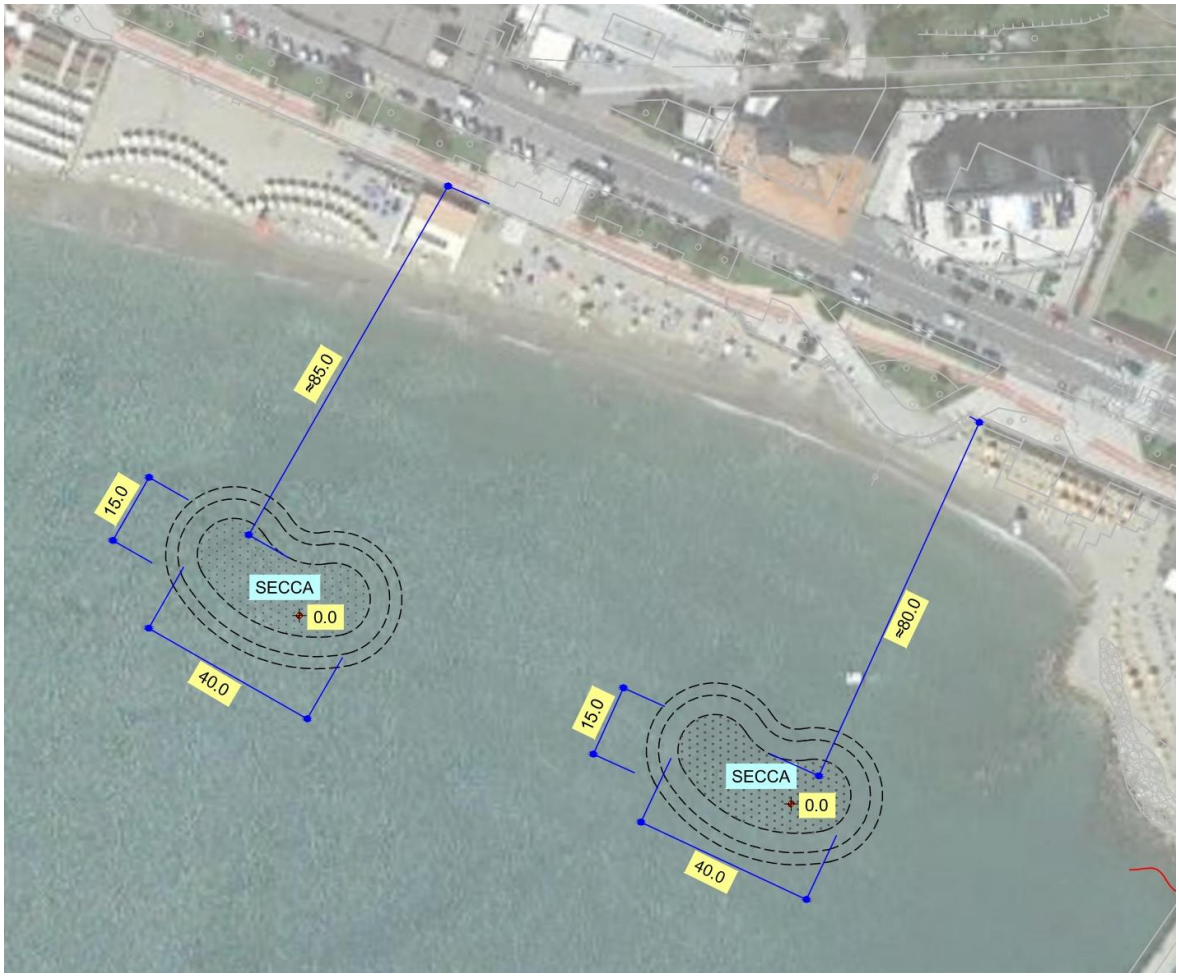


Fig. 9.6 – Planimetria di progetto secche

- modellazioni della scarpata di contenimento del terrapieno a sud della radice del pontile Tirreno Power, con formazione di due risalti perimetrali per la limitazione della velocità della corrente aderente e della conseguente erosione locale

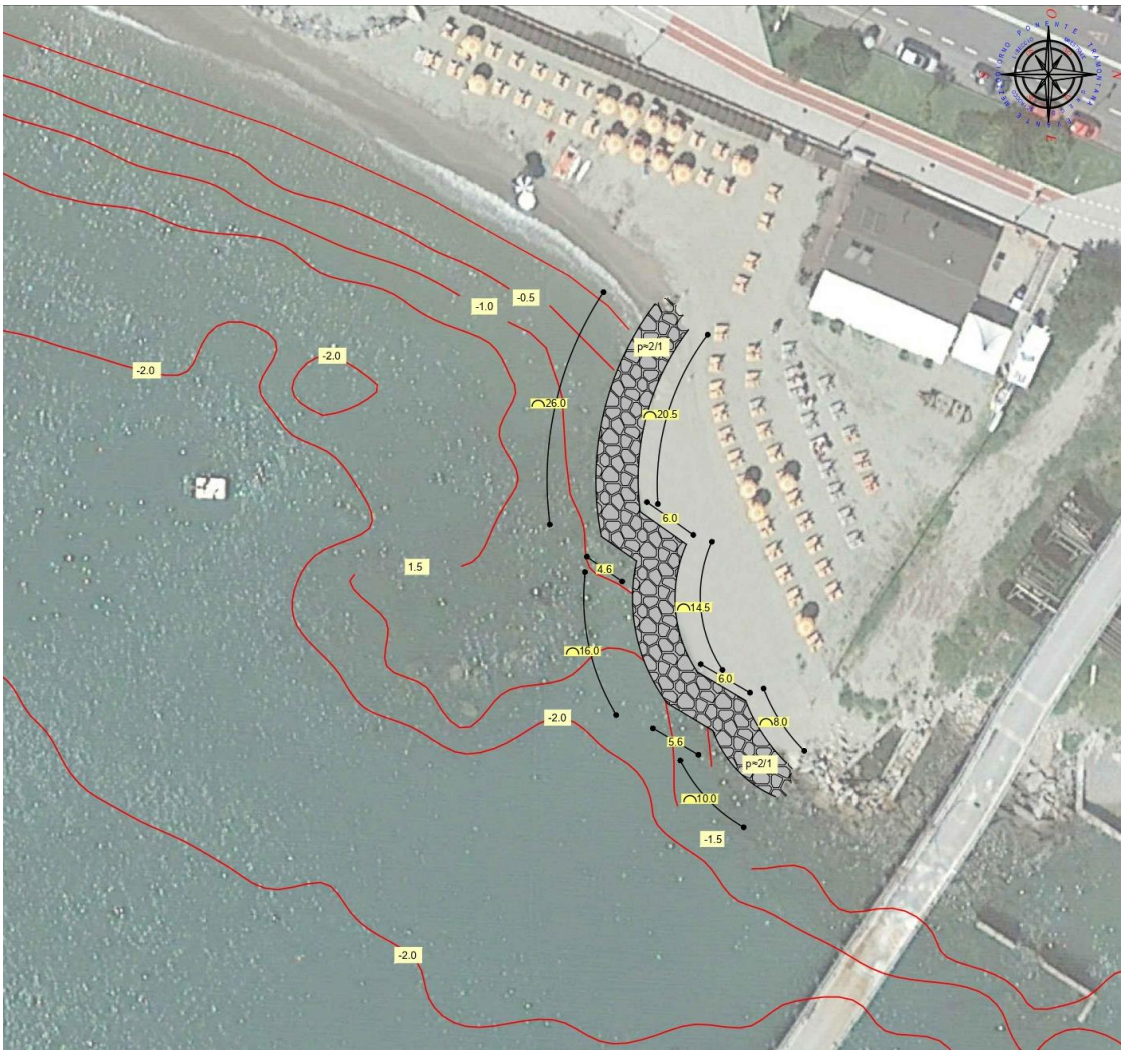
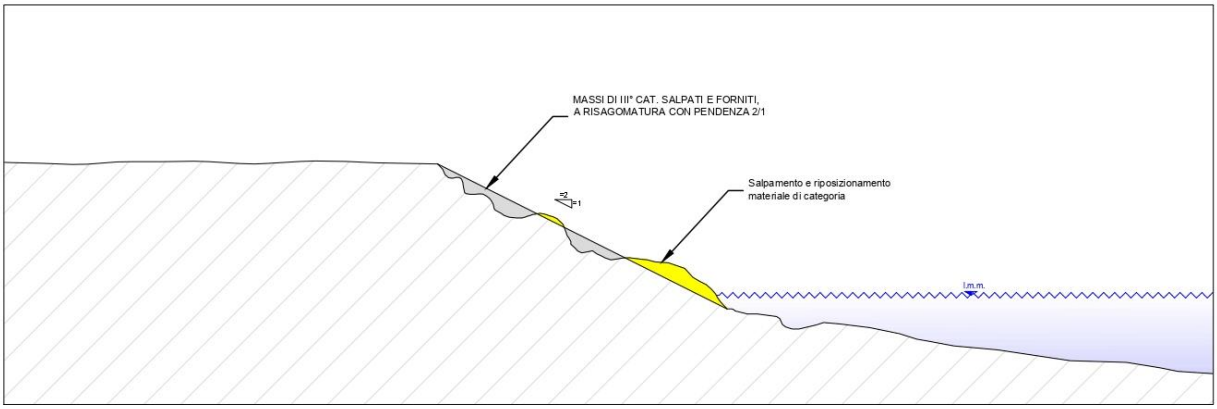


Fig. 9.7 – Planimetria di progetto scogliera radente con risalti longitudinali

SEZIONE TIPOLOGICA RIPRISTINO SCOGLIERA
Scala 1:100



SEZIONE TIPOLOGICA AVANZAMENTO TERRAPIENO
Scala 1:100

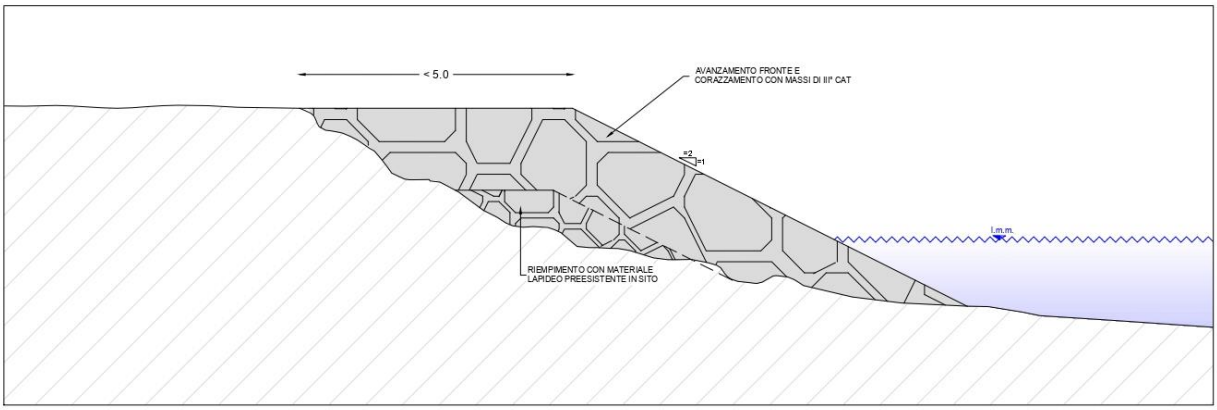


Fig. 9.8 – Sezioni tipologiche ripristino scogliera radente con risalti longitudinali

- il progetto contiene anche la realizzazione del pennello a sud della foce del rio Valletta, già facente parte del progetto di sistemazione del torrente Segno e per il quale sono stata proposte alcune migliorie (vedi paragrafo 6.2 della Relazione di calcolo).
  Le caratteristiche del pennello sono:
  - lunghezza circa 50.0 ml
  - quota berma + 1.50 ml sul l.m.m.
  - ampiezza berma 5.00 ml
  - pendenza scarpate3/2.

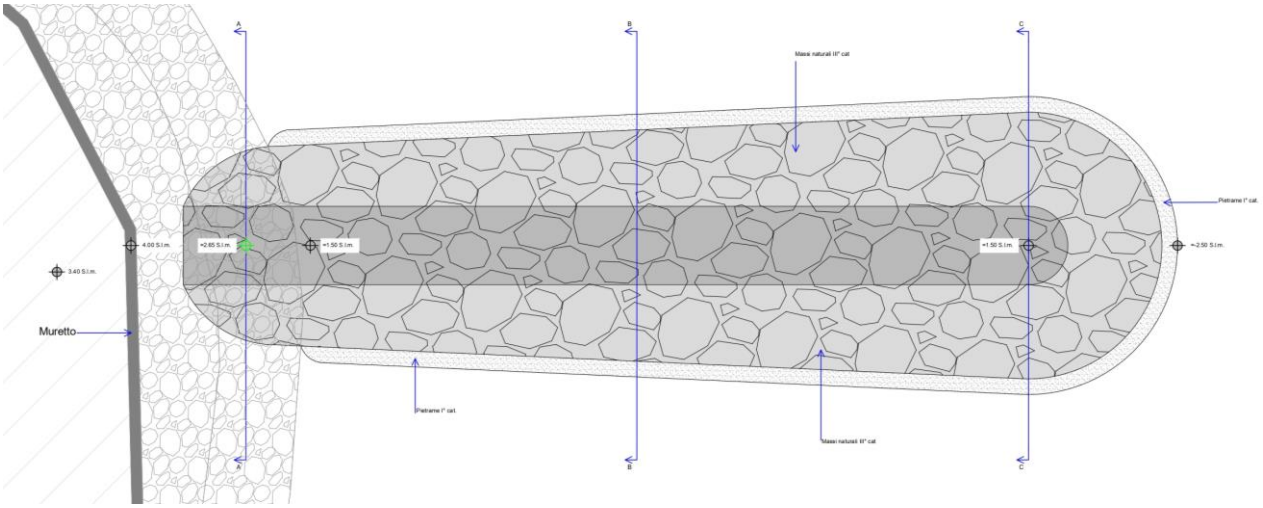


Fig. 9.9 – Planimetria pennello

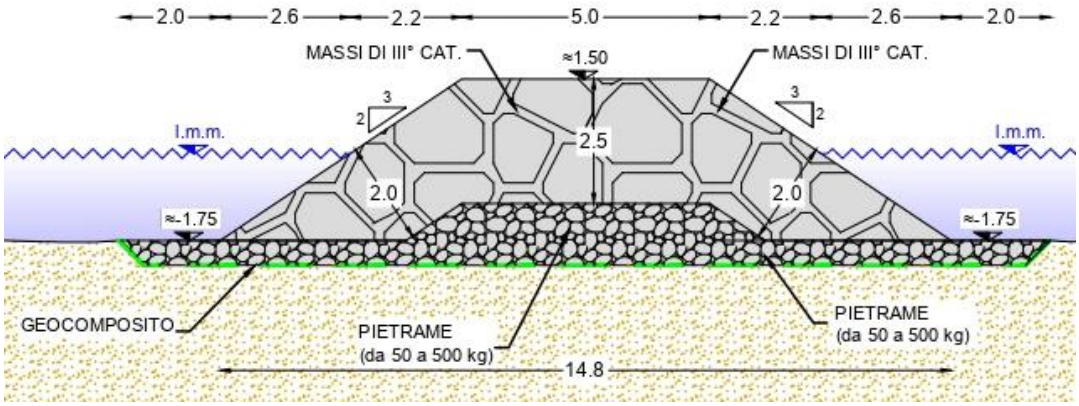


Fig. 9.10 – Sezione trasversale tipologica

10 DINAMICA LITORANEA LOCALE IN CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Nella seconda parte dello studio si è proceduto all'analisi della configurazione di progetto ottimale, individuate in base alle analisi di cui al precedente paragrafo 9.1.

10.1 Settaggio del modello

Lo studio è stato condotto impiegando il dominio definito nel precedente paragrafo 6.1, modificato per tenere conto delle variazioni introdotte dalla configurazione di progetto, cioè la sistemazione della scogliera alla radice del pontile Tirreno Power, la realizzazione della due nuove secche, del ripascimento e del pennello in prossimità della foce del Segno.
Le mareggiate analizzate sono le stesse impiegate nello studio della configurazione attuale.

10.2 Propagazione del moto ondoso sotto costa

I risultati ottenuti dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso sotto costa in configurazione di progetto, applicando il codice di calcolo CMS-Wave, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine seguenti (da Fig. 10.1 a Fig. 10.4). Le figure rappresentano le altezze d'onda significativa, in termini di gradazione cromatica, mentre le direzioni locali dell'onda sono indicate con vettori il cui modulo è proporzionale all'altezza d'onda significativa.
I risultati delle propagazioni sotto costa mostrano come, nella configurazione di progetto, il campo di moto ondoso risulti modificato solo nella fascia di litorale compresa tra le secche e la spiaggia. Si osserva infatti, per tutte le mareggiate analizzate, come le presenza delle secche determini un locale abbattimento delle altezze d'onda, determinando la formazione di una zona a minore energia tra le secche e la linea di riva. A titolo di esempio si riporta, per il TEST 1, il confronto tra il campo di moto ondoso in configurazione attuale e di progetto (Fig. 10.2).

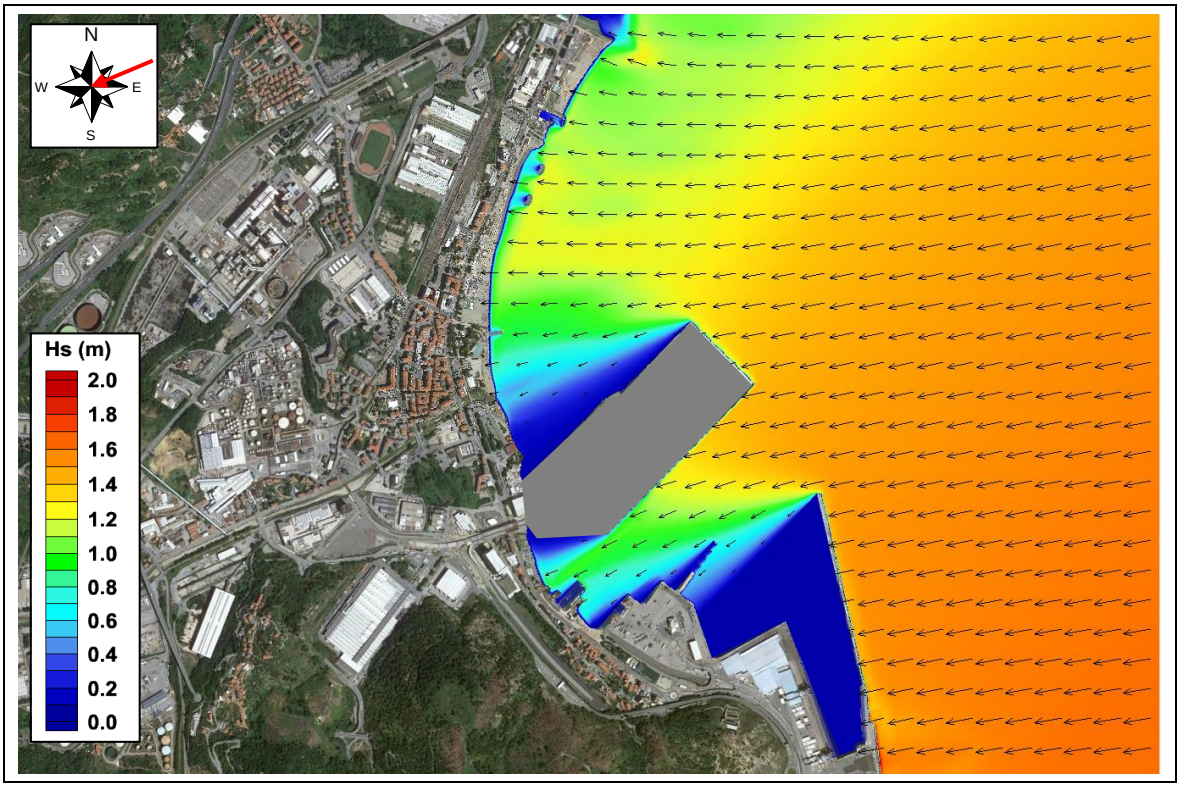


Fig. 10.1 – TEST 1 Progetto – Caratteristiche mareggiata in P: H_S = 1.64 m, T_P= 6.50 s, Dir = 75°N

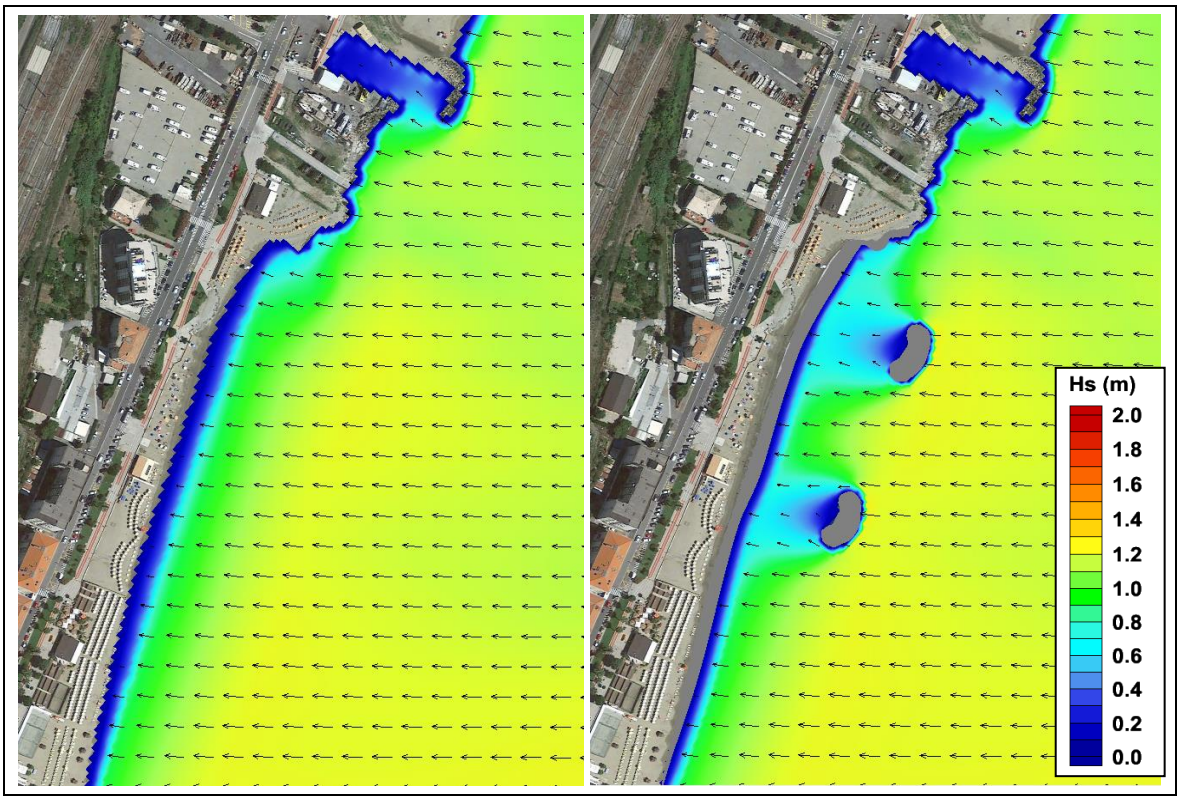


Fig. 10.2 – TEST 1 – Confronto risultati propagazione in stato attuale e in configurazione di progetto

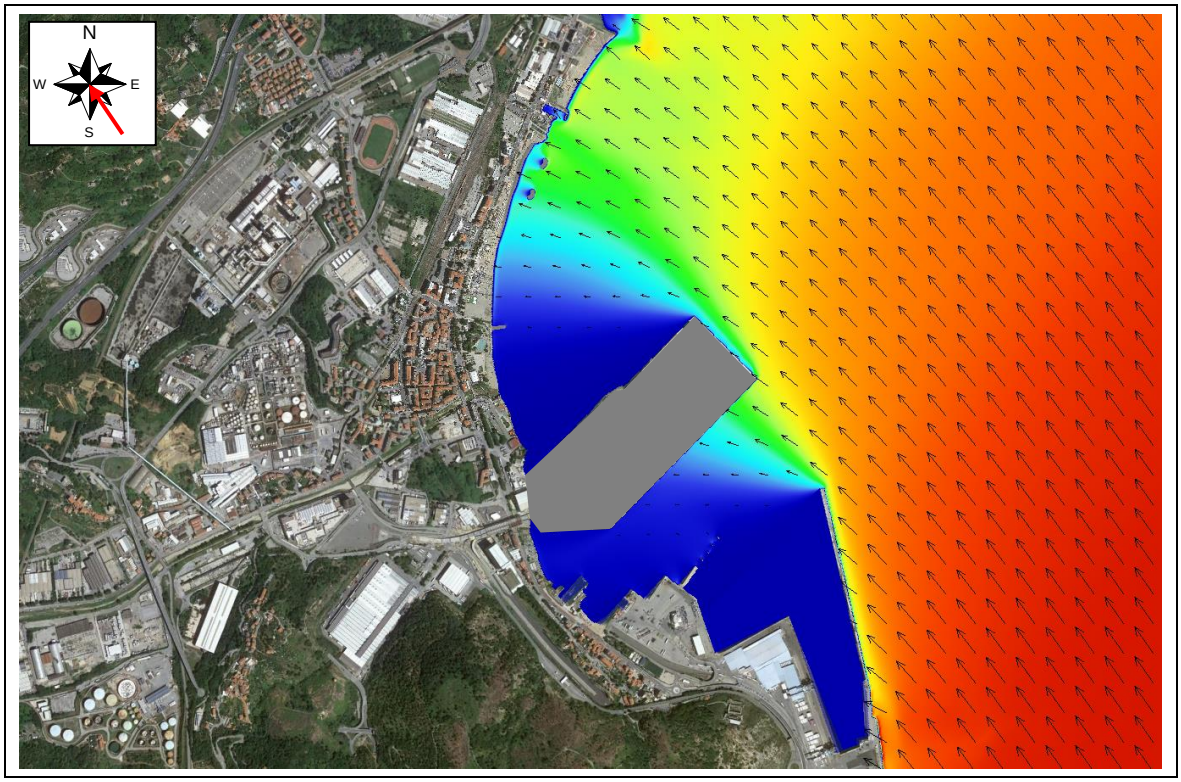


Fig. 10.3 – TEST 2 Progetto – Caratteristiche mareggiata in p: H_S = 1.93 m, T_P= 6.80 s, Dir = 145°N

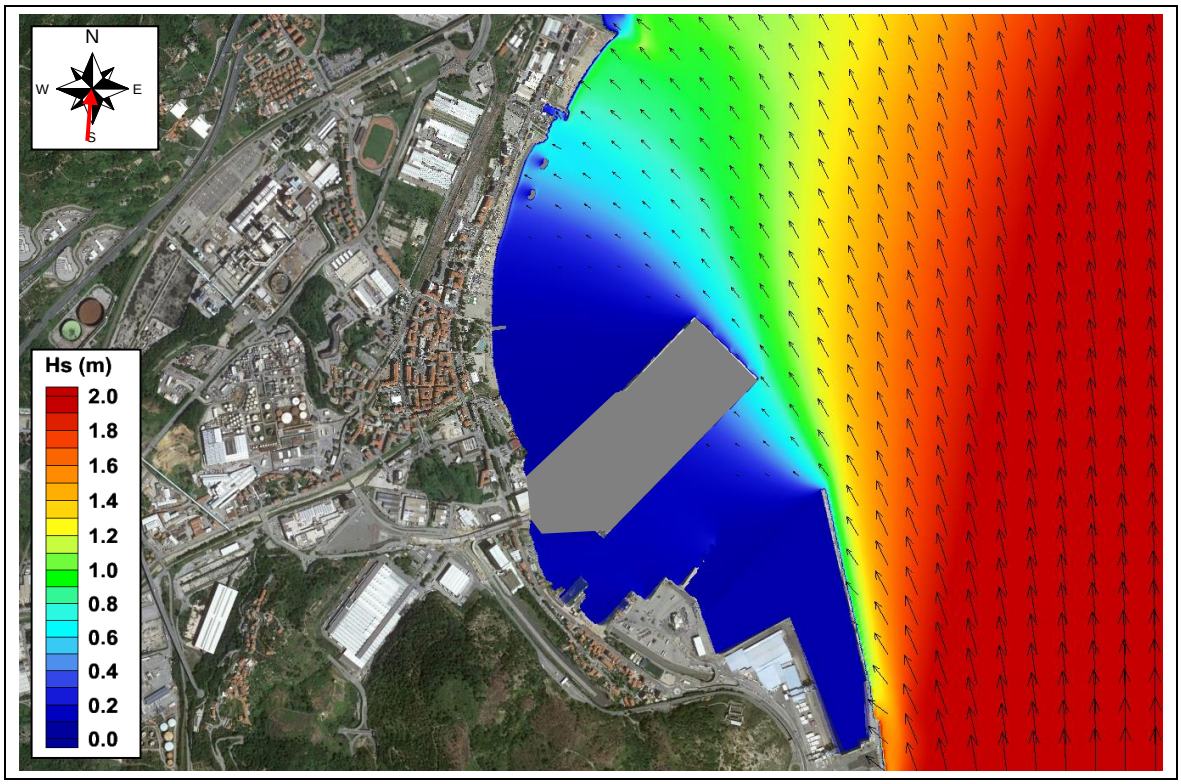


Fig. 10.4 – TEST 3 Progetto – Caratteristiche mareggiata in P: H_S = 2.22 m, T_P= 7.80 s, Dir = 185°N

10.3 Circolazione idrodinamica costiera

I risultati dello studio della circolazione idrodinamica litoranea in configurazione di progetto, condotto per mezzo del codice di calcolo CMS-Flow interfacciato con il codice di calcolo CMS-Wave, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine successive (da Fig. 10.5 a Fig. 10.10).
In ciascuna figura sono riportate le velocità medie della corrente generata dalle mareggiate (mediate sul profilo verticale) nello stato attuale (a sinistra) e nella configurazione di progetto (a destra): le velocità sono rappresentate in termini di gradazioni cromatiche, mentre la direzione locale della corrente viene indicata mediante vettori il cui modulo è proporzionale alla velocità stessa.
Dai risultati ottenuti si può osservare che le opere in progetto determinano sensibili variazioni nel campo di corrente, in particolare a ridosso delle secche e in prossimità del pennello.
L'effetto della presenza delle secche si traduce, per effetto del restringimento della sezione di flusso della corrente, in un leggero incremento delle velocità tra la secca e la linea di riva e, per la mareggiata di Scirocco, nella formazione di una corrente diretta da Sud verso Nord, immediatamente a Sud delle secche.
Il pennello a Sud genera un significativo effetto solo per la mareggiata di Levante e, coerentemente con la sua funzione, determina un parziale arresto e una deviazione della corrente carica di sedimenti che procede da Nord verso Sud.

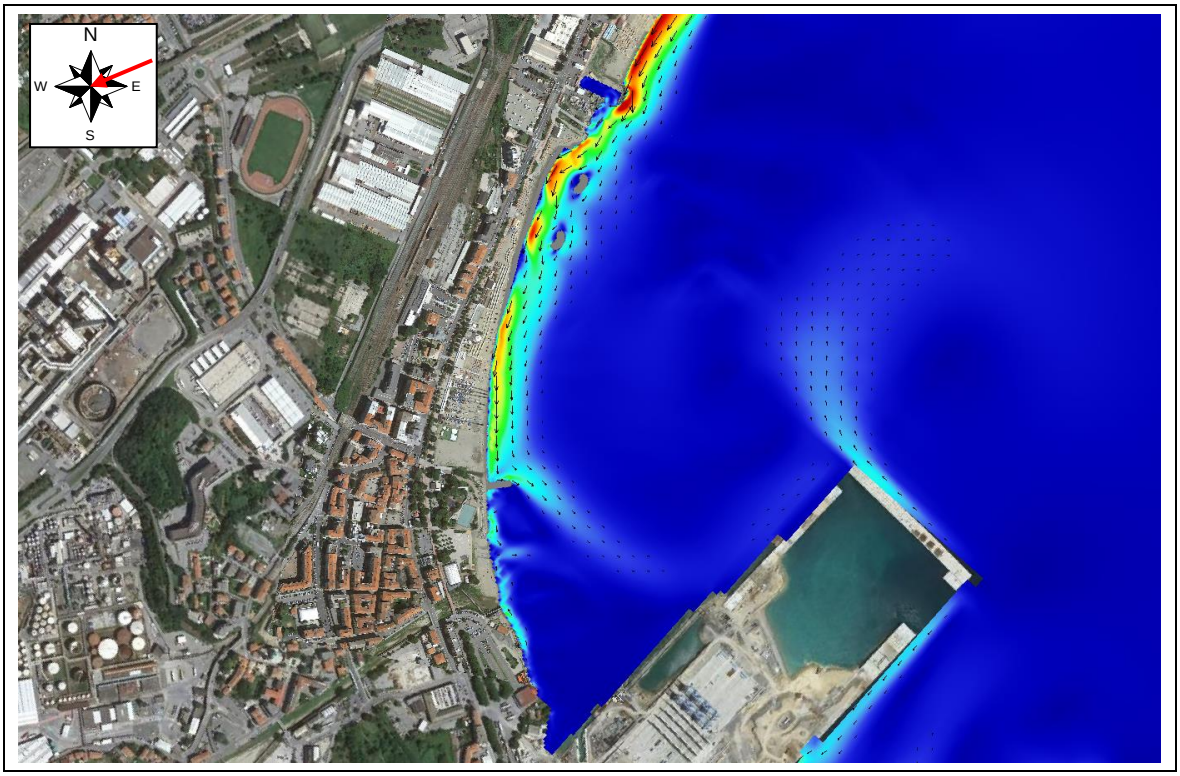


Fig. 10.5 – TEST 1 Progetto – Mareggiata di Levante - Circolazione idrodinamica

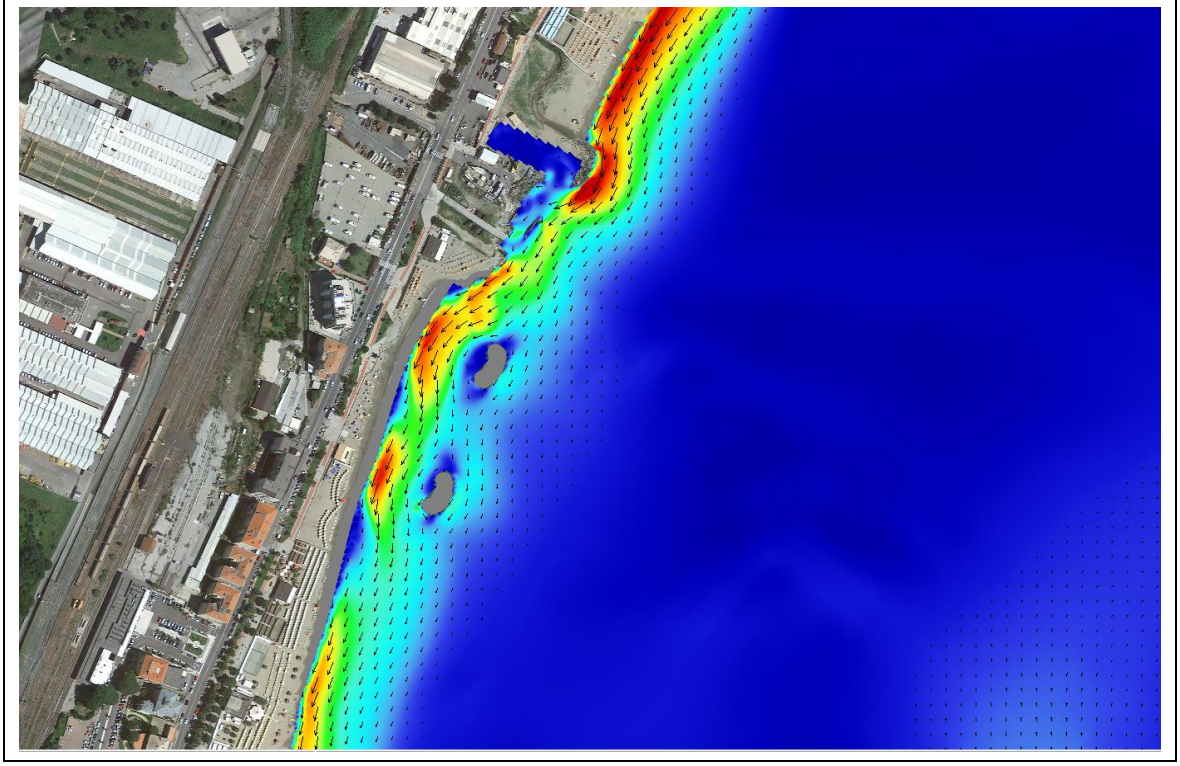


Fig. 10.6 – TEST 1 Progetto – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento

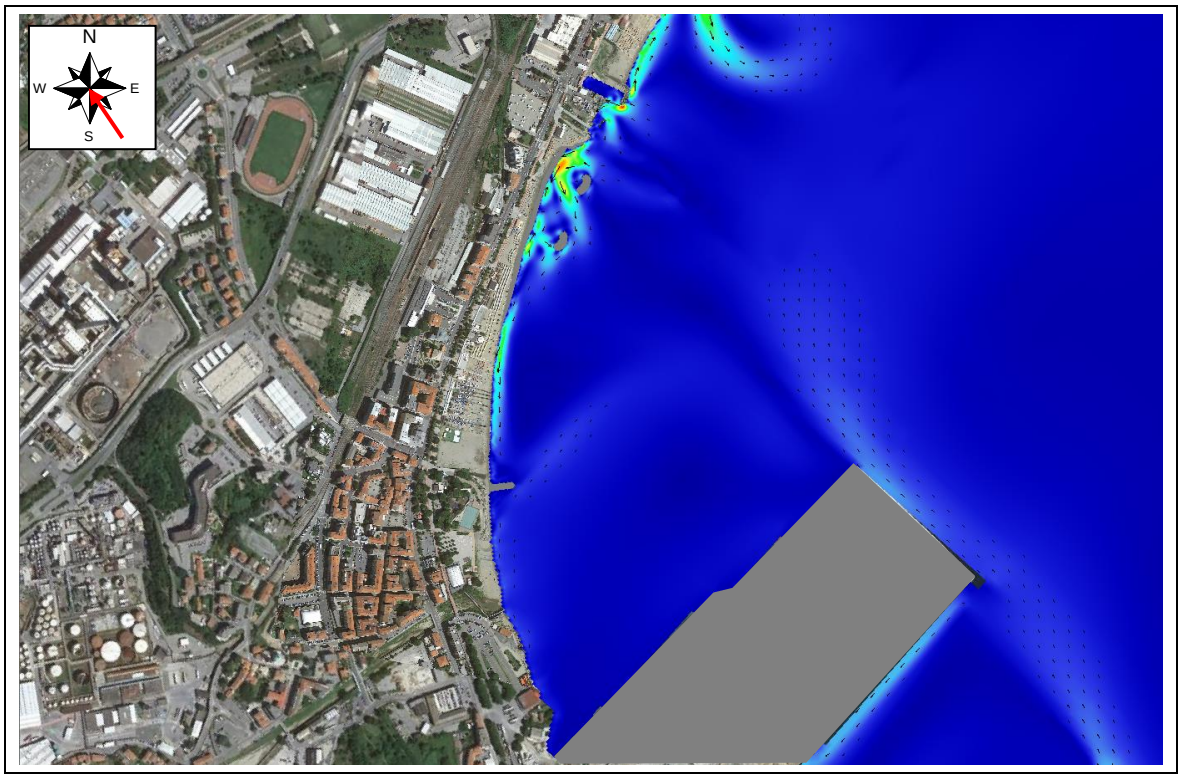


Fig. 10.7 – TEST 2 Progetto – Mareggiata di Scirocco - Circolazione idrodinamica

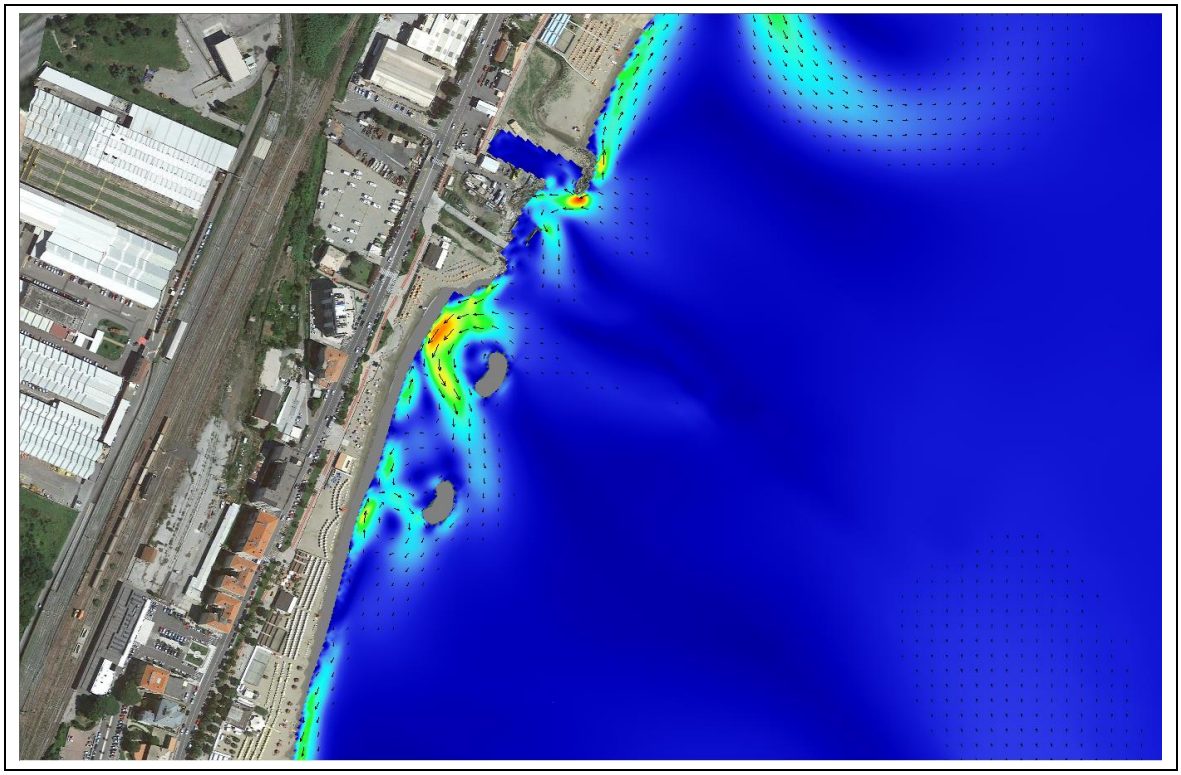


Fig. 10.8 – TEST 2 Progetto – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento

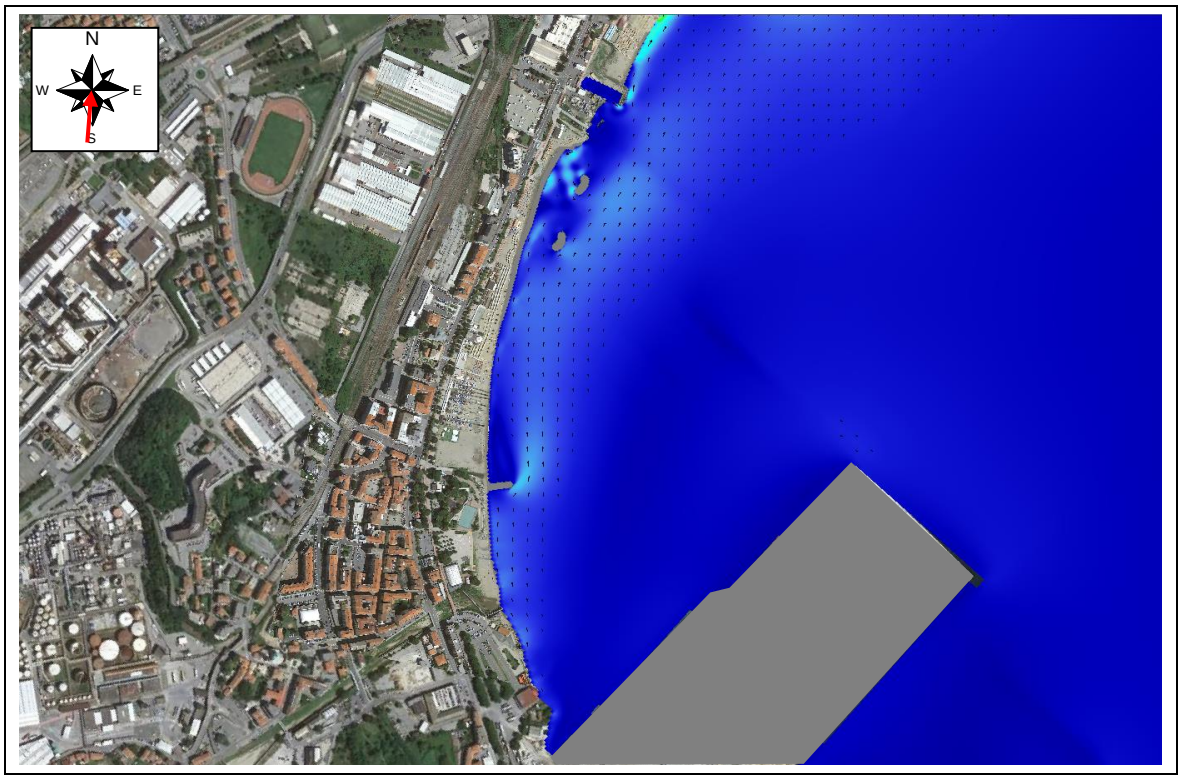


Fig. 10.9 – TEST 3 Progetto – Mareggiata di Mezzogiorno - Circolazione idrodinamica

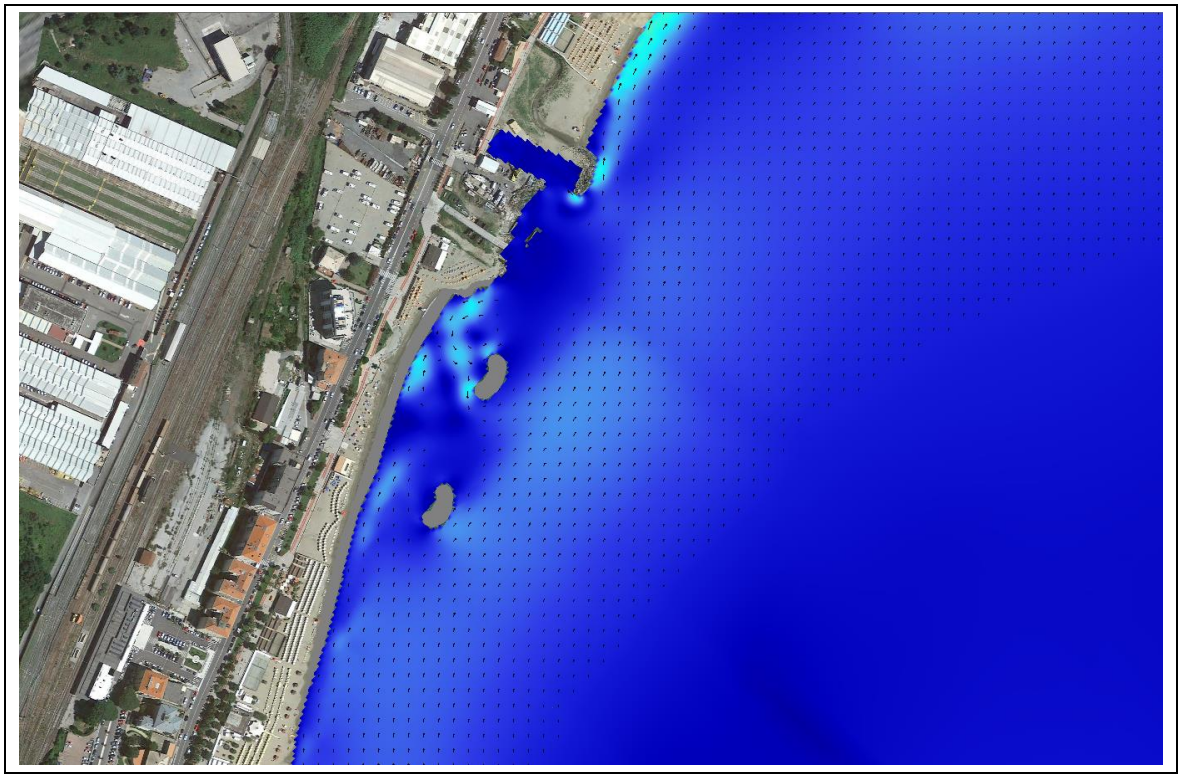


Fig. 10.10 – TEST 3 Progetto – Particolare circolazioni nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento

11 TRASPORTO SOLIDO LITORANEO ED EVOLUZIONE DEI FONDALI IN CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

I risultati dello studio del trasporto solido e della tendenza evolutiva dei fondali in configurazione di progetto, condotti mediante l'impiego del codice di calcolo CMS-Flow, accoppiato al codice di calcolo CMS-Wave, sono riportati nel presente paragrafo.

11.1.1 Dati sedimentologici

Per la definizione delle caratteristiche sedimentologiche nella configurazione di progetto si è scelto di individuare la fascia di spiaggia sommersa interessata dal versamento del materiale di ripascimento. All'area così individuata è stato assegnato un valore medio del D_{50} (diametro medio dei grani) pari a quello del materiale che si prevede di utilizzare per il ripascimento: 3.50 mm (vedi successiva).

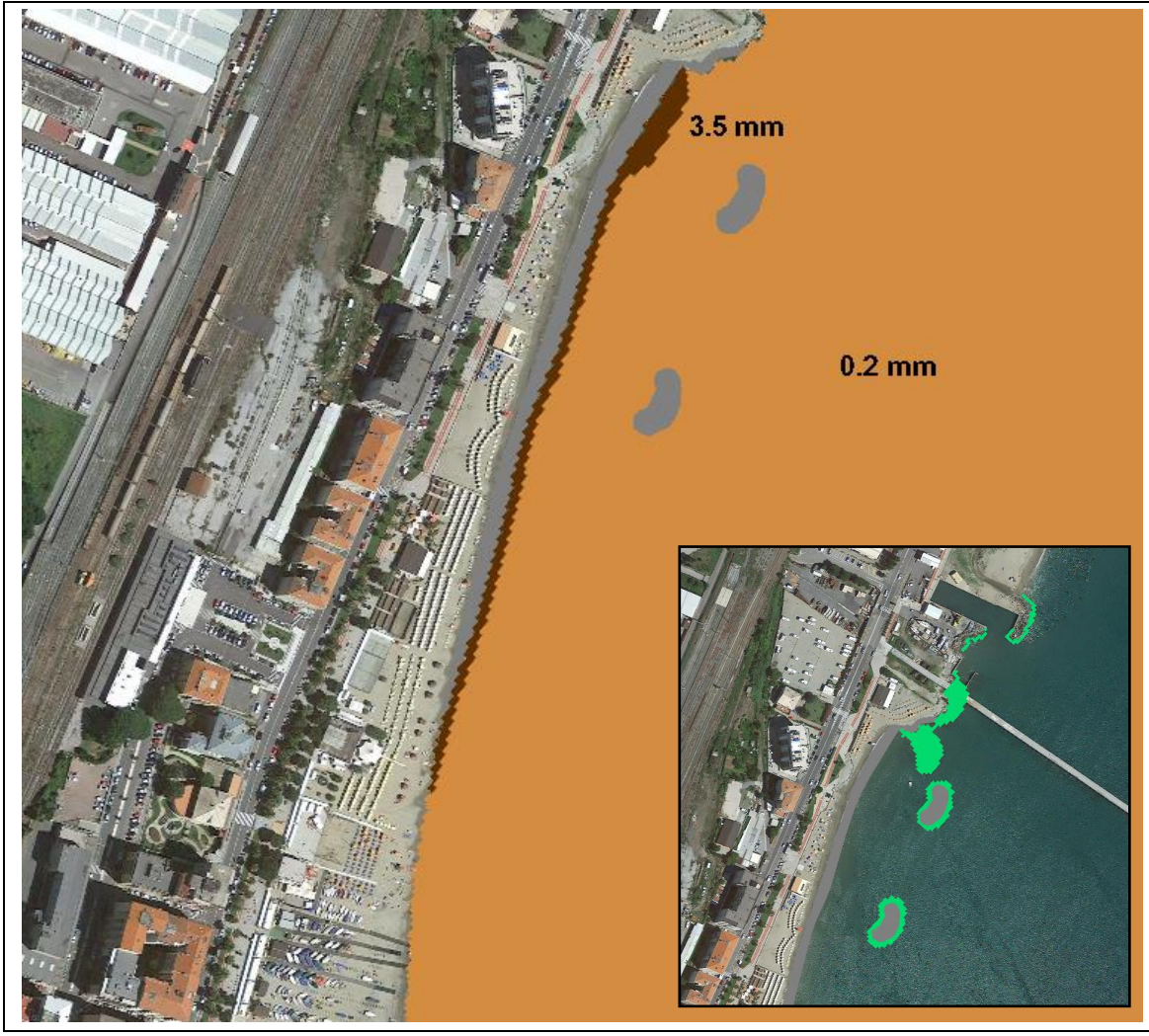


Fig. 11.1 – Schematizzazione della tessitura dei fondali nel dominio di calcolo, in configurazione di progetto, e particolare del fondale inerodibile (aree verdi) di fronte alla scogliera

11.2 Trasporto solido

I risultati delle simulazioni, ottenuti per mezzo del codice di calcolo CMS-Flow, sono rappresentati nelle figure riportate nelle pagine successive (da Fig. 11.2 a Fig. 11.7). Per ciascuna delle mareggiate analizzate sono stati riportati i risultati che rappresentano, in termini di gradazioni cromatiche, l'andamento del trasporto e la quantità dei sedimenti mobilitati (concentrazione dei sedimenti messi in sospensione).
Dai risultati ottenuti si può osservare che l'effetto della presenza delle secche si traduce, in linea generale, in una sensibile riduzione della movimentazione dei sedimenti nel tratto di litorale a Nord, risultando particolarmente evidente per la mareggiata di Levante. Risulta anche particolarmente evidente che la realizzazione del pennello alla foce del T. Segno determina l'arresto del trasporto solido oltre il pennello stesso, confinando il materiale di spiaggia entro l'ambito della spiaggia stessa e impedendone una ulteriore deriva verso Sud.

Si osserva inoltre che la dinamica dei sedimenti a ridosso delle secche, in particolare per le mareggiate di Scirocco, evidenzia la tendenza alla formazione di tomboli tra le secche e la riva.

Per la mareggiata di Mezzogiorno si osserva una debole tendenza alla riduzione della movimentazione dei sedimenti, nel tratto settentrionale, che tende a portare i sedimenti a Nord oltre la scogliera.

In conclusione, i risultati ottenuti hanno mostrato come la configurazione di progetto determini una riduzione del trasporto di sedimenti da Nord verso Sud, favorendo una maggiore stabilità del materiale versato a ripascimento e, in linea generale, di tutto il litorale, riducendo il trasporto solido diretto verso la foce del T. Segno.

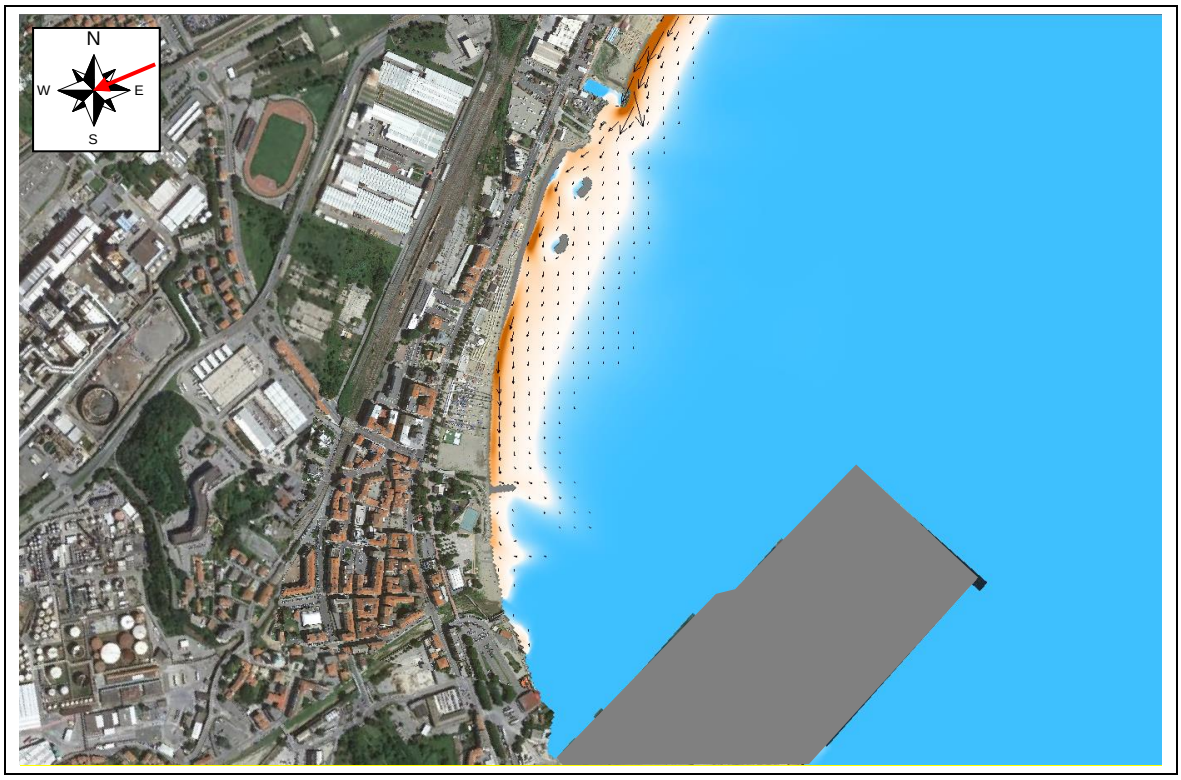


Fig. 11.2 – TEST 1 Progetto – Mareggiata di Levante - Trasporto solido

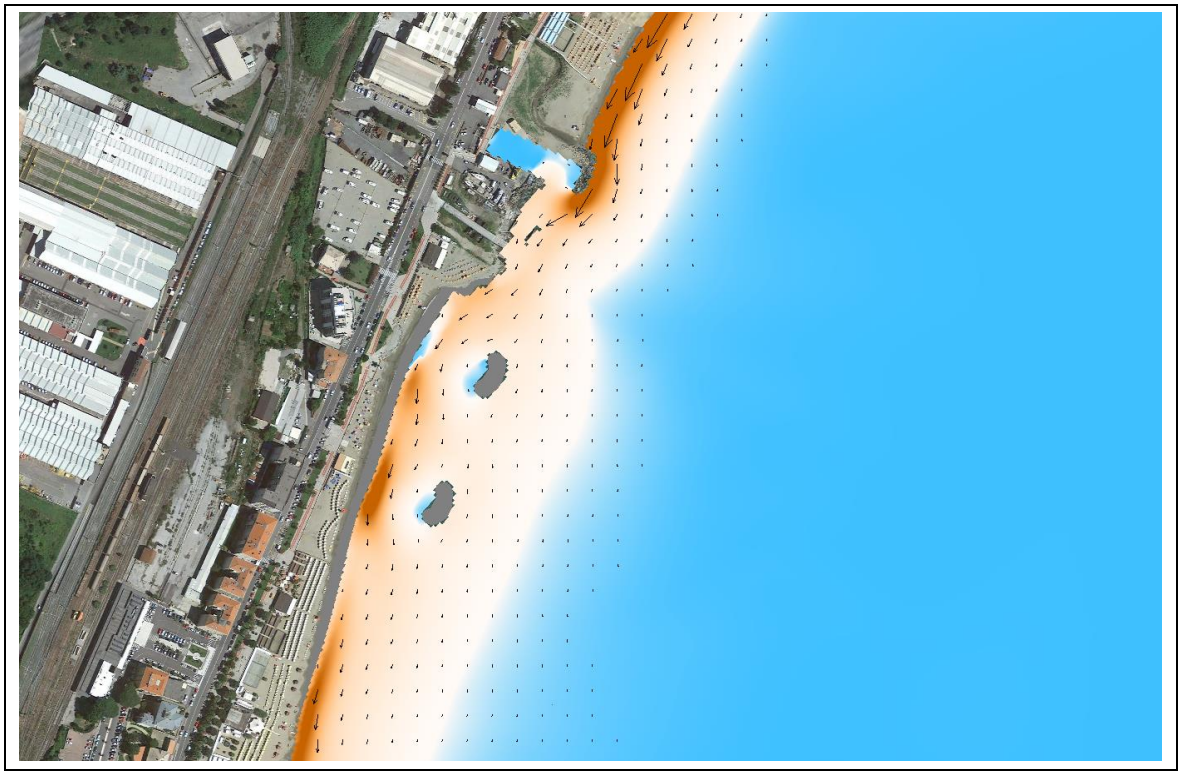


Fig. 11.3 – TEST 1 Progetto – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento

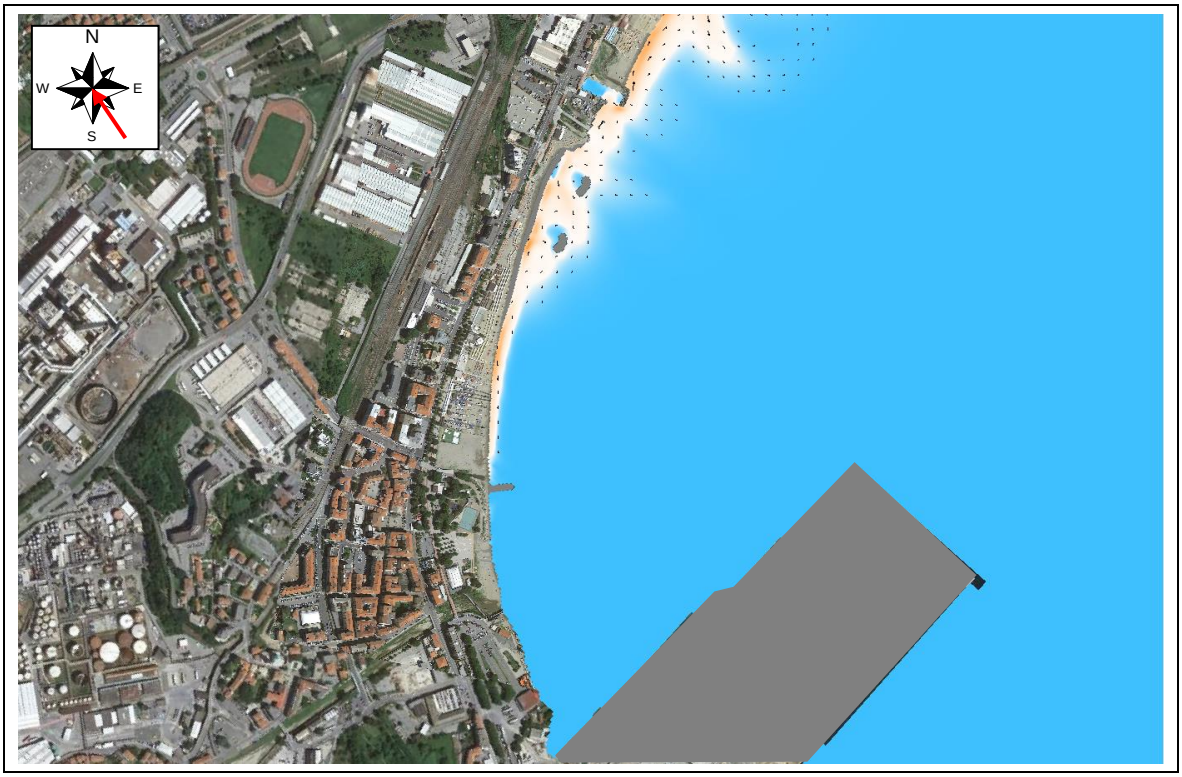


Fig. 11.4 – TEST 2 Progetto – Mareggiata di Scirocco - Trasporto solido

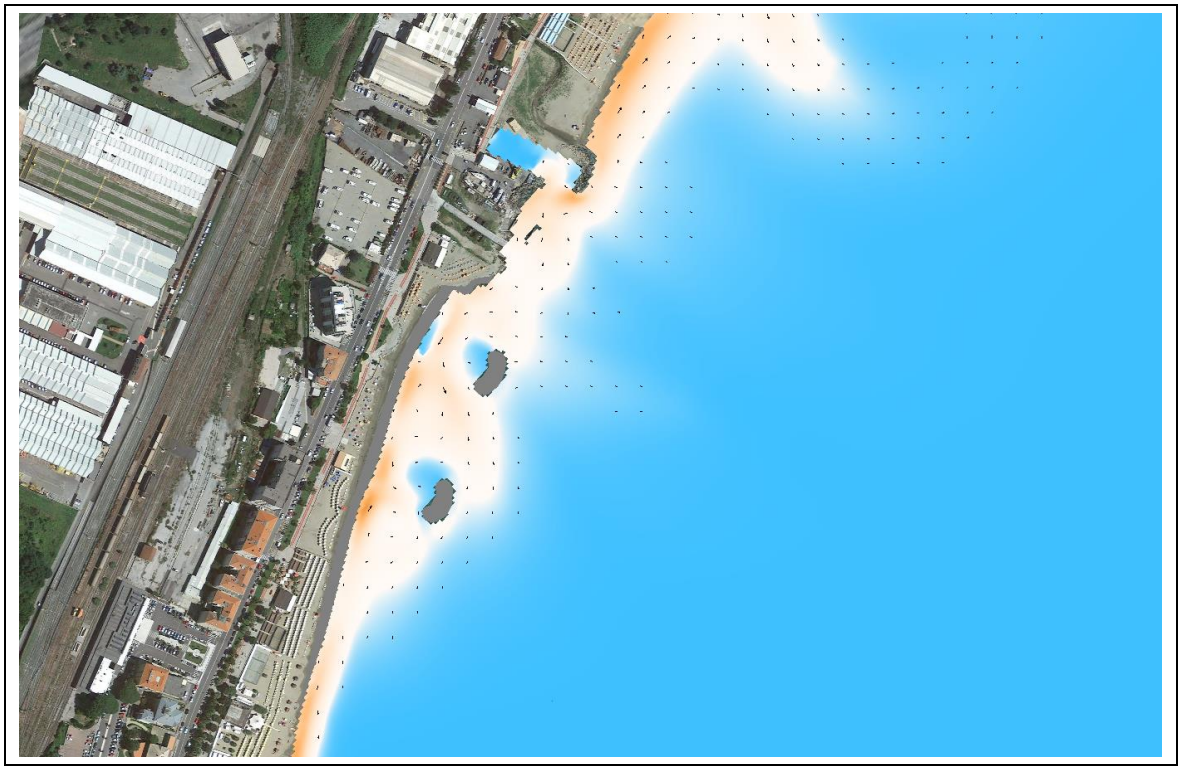


Fig. 11.5 – TEST 2 Progetto – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento



Fig. 11.6 – TEST 3 Progetto – Mareggiata di Mezzogiorno - Trasporto solido



Fig. 11.7 – TEST 3 Progetto – Dettaglio trasporto solido nel tratto settentrionale del litorale oggetto di intervento

11.3 Evoluzione dei fondali

I risultati delle simulazioni, condotte utilizzando il codice di calcolo CMS-Flow, sono rappresentati nelle figure riportate di seguito (da Fig. 11.8 a Fig. 11.10). Per ciascuna delle mareggiate analizzate sono stati riportati i risultati, in termini di gradazioni cromatiche, che rappresentano la tendenza evolutiva del fondale in configurazione di progetto.
I risultati dell'evoluzione del fondale forniscono la tendenza alla sedimentazione (valori positivi) ovvero all'erosione (valori negativi); i risultati si riferiscono alle tendenze sviluppate dalla persistenza delle mareggiate per una durata pari a 12 ore, in condizioni stazionarie.
Dai risultati ottenuti si può osservare come la realizzazione delle secche determini un generale aumento della tendenza alla deposizione nel tratto più settentrionale dell'area di interesse (cioè in prossimità della radice del pontile Tirreno Power), contribuendo a ridurre l'erosione attualmente in atto.
Nel tratto centrale del litorale, immediatamente a Sud delle secche, si rileva un leggero incremento della tendenza all'erosione, che dovrà essere contrastata con periodici interventi di movimentazione del materiale in eccesso eventualmente presente a tergo delle secche. Si sottolinea comunque che, a seguito dell'intervento di ripascimento, il materiale grossolano versato andrà via via a sostituire i sedimenti presenti sul fondale, riducendone la mobilità e i fenomeni evolutivi.
Si osserva infine che la presenza del nuovo pennello favorisce la deposizione del materiale mobilitato sopraflutto al pennello, diminuendo conseguentemente la quantità di materiale in grado di perdersi oltre la foce del Segno.

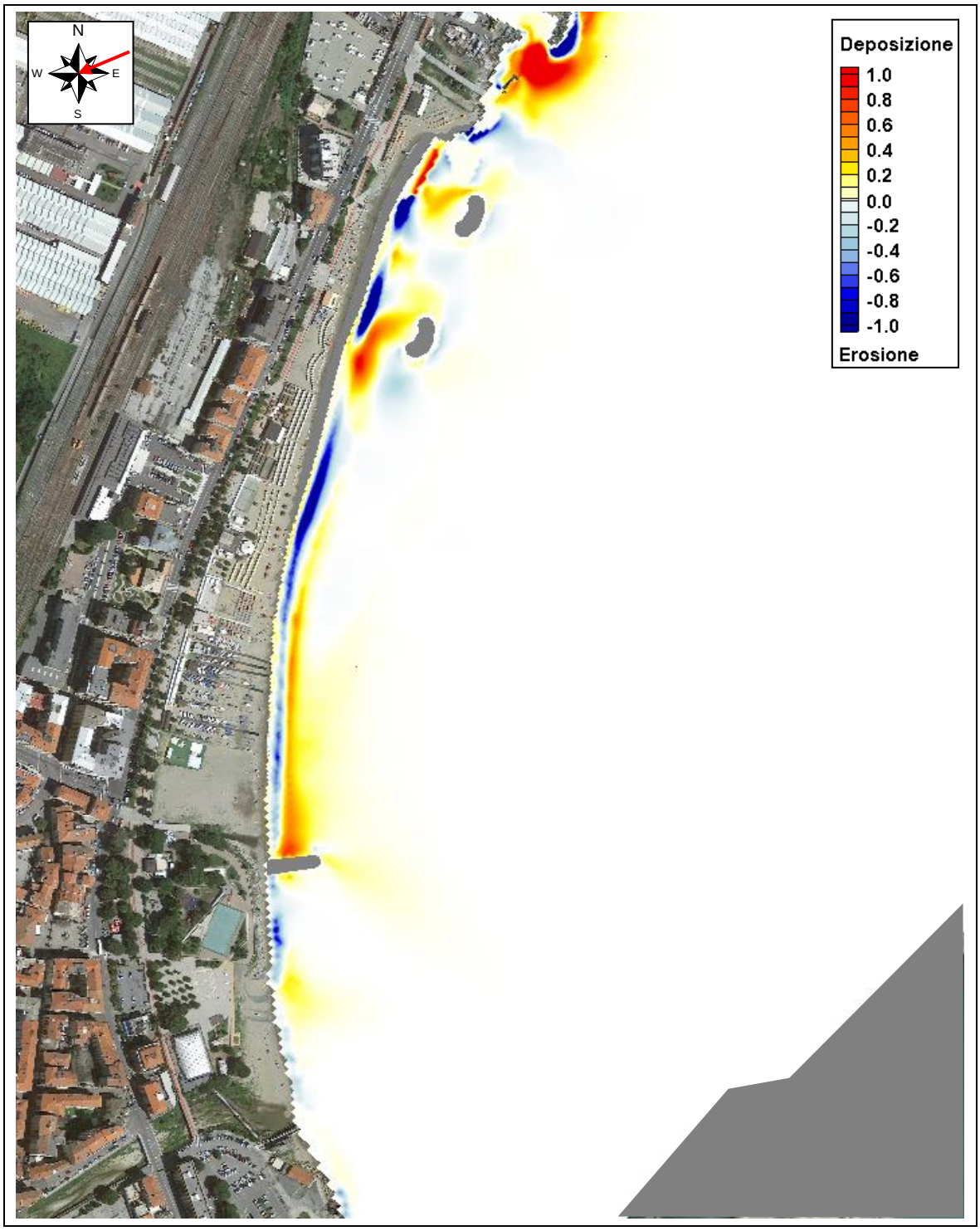


Fig. 11.8 – TEST 1 Progetto – Mareggiata di Levante – Evoluzione dei fondali

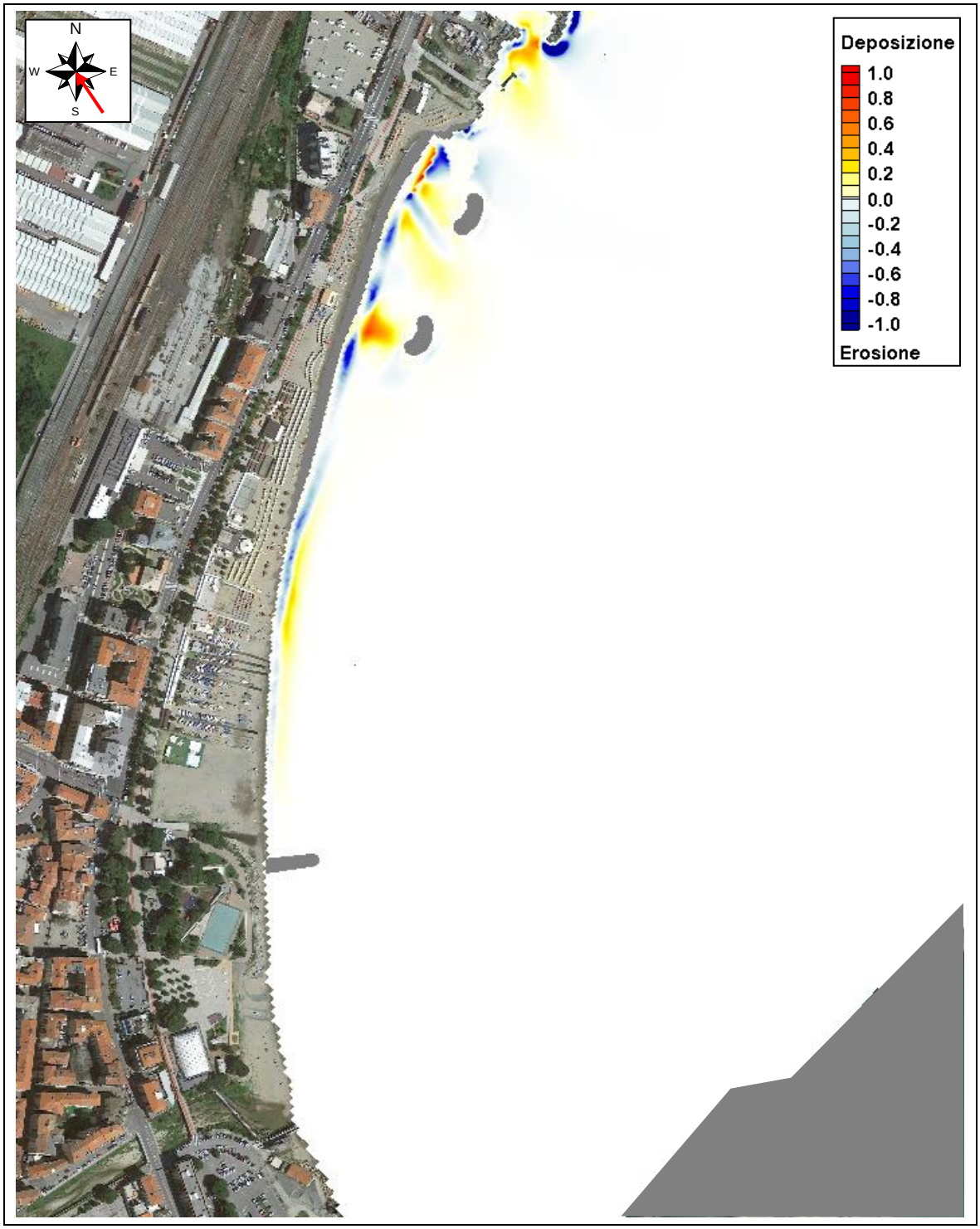


Fig. 11.9 – TEST 2 Progetto – Mareggiata di Scirocco - Evoluzione dei fondali

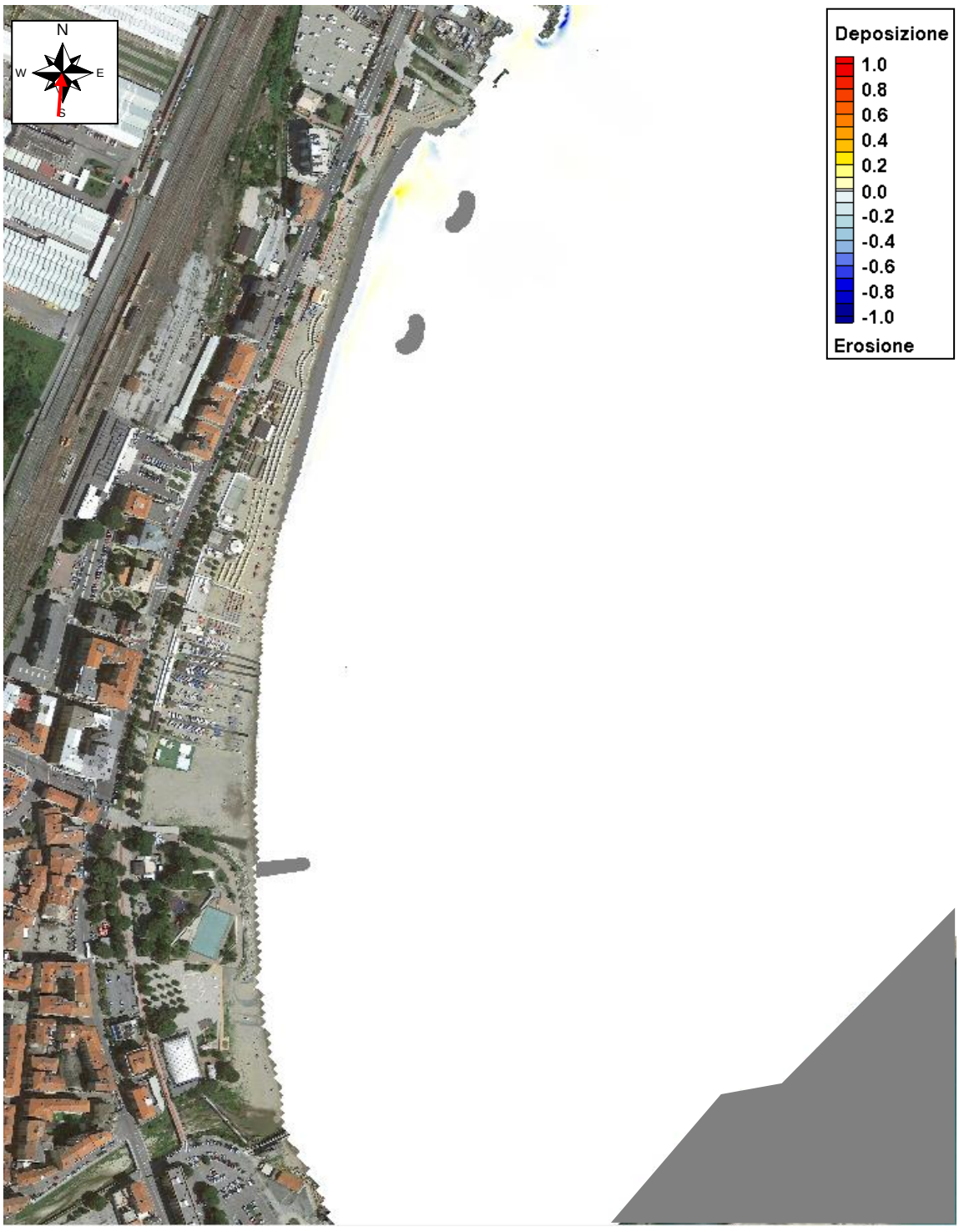


Fig. 11.10 – TEST 3 Progetto – Mareggiata di Mezzogiorno - Evoluzione dei fondali

12 EVOLUZIONE MORFOLOGICA DEL LITORALE IN CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

L'evoluzione morfologica del litorale di Vado Ligure in configurazione di progetto è stata studiata utilizzando il codice di calcolo GENESIS.
Il modello di evoluzione morfologica, opportunamente tarato, è stato impiegato al fine di valutare l'efficacia degli interventi proposti. In particolare, è stata definita e studiata, in accordo con il Committente, una soluzione progettuale in grado di salvaguardare il tratto di costa oggetto di intervento, facendo fronte alle criticità presenti, in primis l'erosione della spiaggia a ridosso della scogliera radente alla radice del pontile Tirreno Power.
La soluzione progettuale consiste nell'esecuzione di un ripascimento in ghiaia, di pezzatura analoga a quella del materiale nativo, protetto da due secche semiaffioranti. A completamento dell'intervento si prevede la risagomatura/ricalibratura della scogliera radente alla radice del pontile Tirreno Power e la realizzazione di un pennello in corrispondenza della foce del torrente Segno.

12.1 Costruzione della griglia GENESIS

Il dominio di calcolo, le condizioni al contorno (boundary) del modello e le caratteristiche granulometriche dei sedimenti della spiaggia attiva sono stati mantenuti invariati rispetto alle simulazioni di evoluzione in configurazione attuale (cfr. precedente paragrafo 8.5.2). Anche in questo caso, la simulazione è stata condotta considerando l'apporto solido del torrente Quiliano.
Rispetto alla simulazione in configurazione attuale, sono state introdotte nel dominio di calcolo le opere previste in progetto. In particolare, la riconfigurazione della difesa radente alla radice del pontile Tirreno Power è stata rappresentata avanzando la linea inerodibile (opportunamente riconfigurata) in corrispondenza del perimetro lato mare dell'opera.
Le due secche sono state rappresentate nel modello come due barriere parallele a costa, con larghezza al coronamento di 15 m, lunghezza pari a 40 m, quota di sommità coincidente con il livello medio mare. Per il calcolo del coefficiente di trasmissione è stato utilizzato l'approccio proposto da Ahrens, descritto in dettaglio nell'allegato A.
Il ripascimento a tergo delle secche, per un tratto di circa 300 m a Sud del pontile Tirreno Power, è stato rappresentato inserendo nel modello un avanzamento della linea di riva corrispondente al versamento di circa 15'000 m^3 di ripascimento. Trattandosi di un modello ad 1-linea, l'avanzamento è stato calcolato suddividendo il volume per l'altezza della fascia attiva (cfr. precedente paragrafo 8.3) e per la lunghezza del tratto di intervento.
Il pennello in corrispondenza della foce del torrente Segno è stato invece rappresentato come una struttura "non diffracting" impermeabile, avente lunghezza pari a quella prevista negli elaborati progettuali (circa 50 m).
La linea di riva iniziale inserita nel modello è la stessa riportata nella simulazione in configurazione attuale (foto aerea di Google™ Earth di luglio 2018), opportunamente modificata nel tratto in cui si prevede di eseguire il ripascimento.
Di seguito, in Fig. 12.1, si riporta la griglia di calcolo GENESIS in configurazione di progetto.

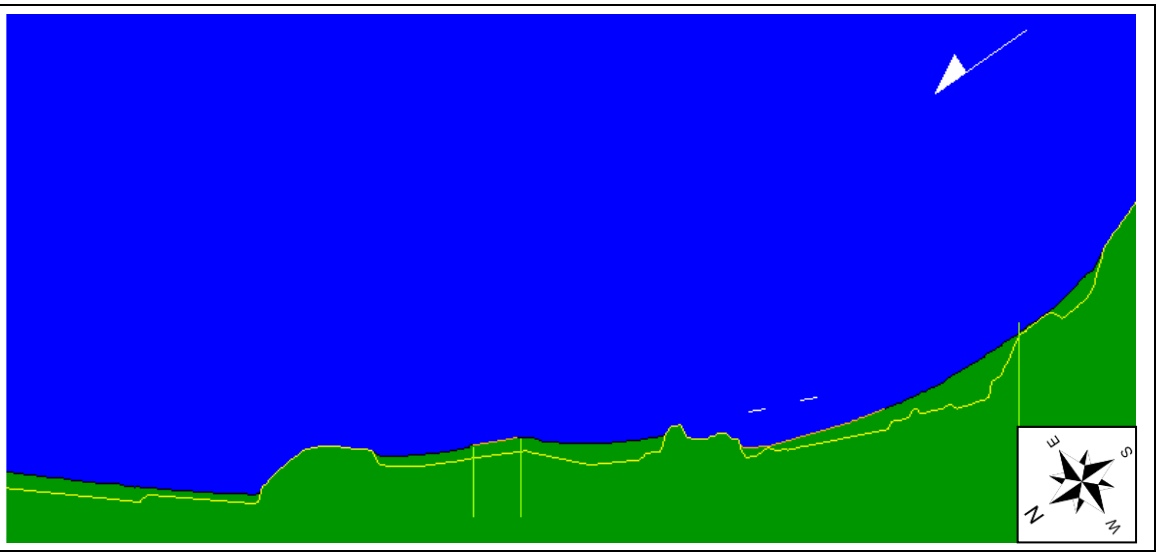


Fig. 12.1 – Griglia GENESIS in configurazione di progetto

12.2 Evoluzione della linea di riva e trasporto litoraneo

Nel presente paragrafo si riportano i risultati della simulazione di evoluzione morfologica a 10 anni in configurazione di progetto, condotta inserendo le opere in progetto.
I risultati, per l'intera griglia di calcolo, sono rappresentati nella successiva Fig. 12.2, sia in termini di trasporto solido che di evoluzione della linea di riva. Per maggiore chiarezza, in Fig. 12.2, si riportano a confronto i risultati della configurazione attuale con quella di progetto.
Per quanto riguarda il verso e l'andamento del trasporto solido, non si osservano evidenti variazioni rispetto alla configurazione attuale. L'unica differenza si riscontra nel tratto in cui verrà eseguito il ripascimento e immediatamente sottoflutto: il trasporto si riduce sensibilmente nel tratto protetto dalle secche per aumentare (anche se in maniera poco significativa) nel tratto più a Sud (tra le secche e il nuovo pennello).
L'inserimento del nuovo pennello alla foce del torrente Segno non influisce sull'evoluzione della linea di riva, in ragione del trascurabile trasporto longitudinale; va tuttavia segnalato che questo modello è stato impiegato con riferimento alla sola frazione grossolana della spiaggia, mentre per il comportamento del sedimento va fatto riferimento al precedente paragrafo 11.2.

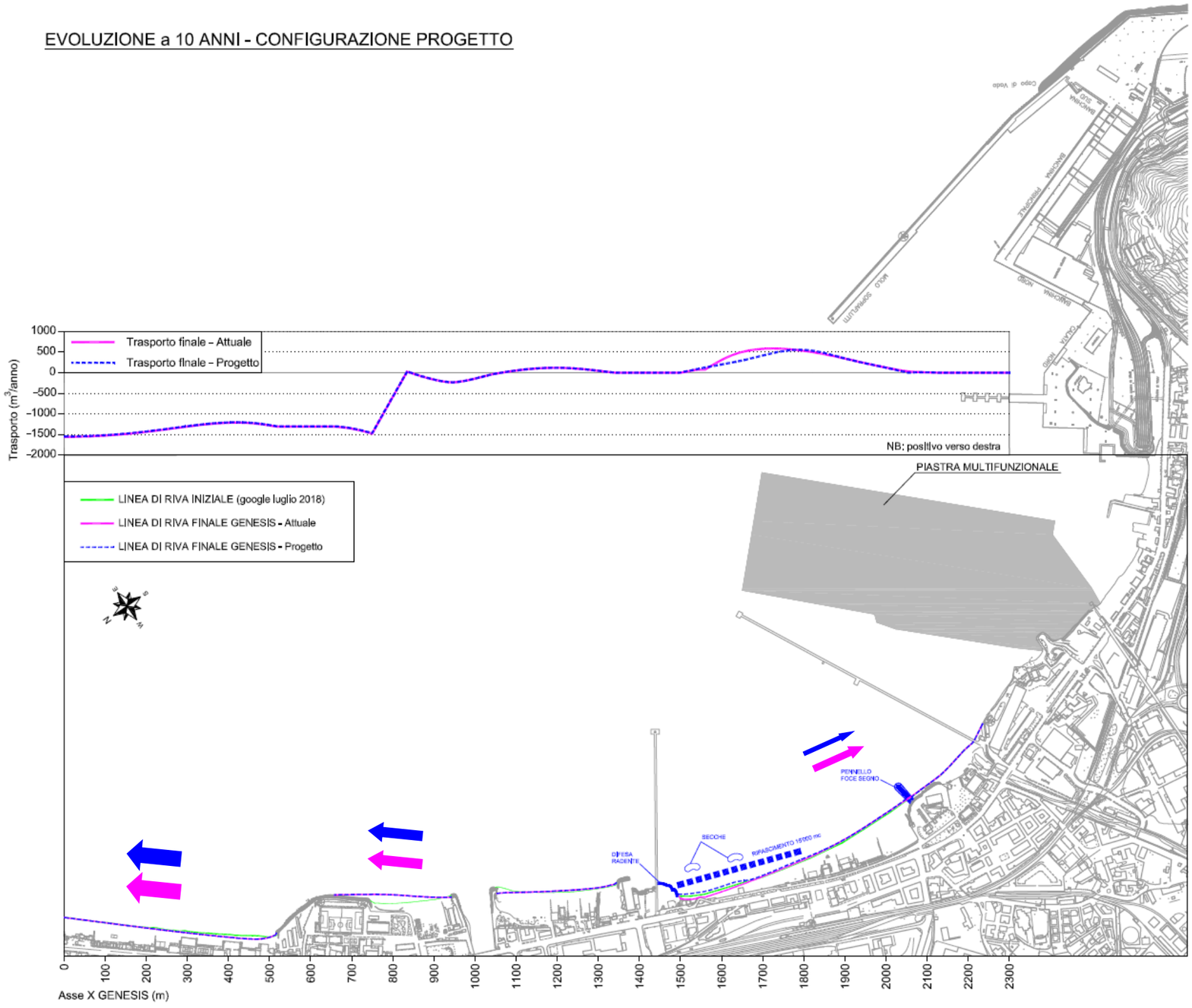


Fig. 12.2 – Evoluzione a 10 anni in configurazione di progetto - Andamento trasporto solido longitudinale (in alto) ed evoluzione della linea di riva (in basso)

ALLEGATO A

DESCRIZIONE CODICI DI CALCOLO

INDICE

1 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO CMS-WAVE 3

1.1 EQUAZIONE DI CONSERVAZIONE DELL'AZIONE CON DIFFRAZIONE 3

Interazione onda-correnti 4

Diffrazione dell'onda 4

Riflessione dell'onda 4

Frangimento dell'onda 5

Trasferimento di energia dal vento 5

Dissipazione di energia dovuta al whitecapping 6

Dissipazione per attrito al fondo 6

2 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO CMS-FLOW 8

2.1 PROBLEMA IDRODINAMICO - EQUAZIONI DEL MOTO 8

Sforzi al fondo 9

Sforzi sulla superficie libera 9

Sforzi dovuti alle onde 10

Coefficiente di diffusione 10

2.2 PROBLEMA DEL TRASPORTO SOLIDO - EQUAZIONI DEL TRASPORTO E DI CONTINUITÀ DEI SEDIMENTI 10

Coefficienti di attrito e di scabrezza del fondo 11

Trasporto al fondo 11

Trasporto in sospensione 12

Evoluzione morfologica del fondale 12

3 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO STWAVE 13

4 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO GENESIS 17

4.1 ANDAMENTO DEL TRASPORTO SOLIDO LONGITUDINALE E VALUTAZIONE DEL BYPASS 20

4.2 PROFILO TRASVERSALE DEL LITORALE 21

4.3 PROFONDITÀ DI CHIUSURA E ALTEZZA DI SWASH 21

4.4 DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL FRANGIMENTO 22

4.5 SCHEMATIZZAZIONE DELLE BARRIERE FRANGIFLUTTI 23

4.5.1 D'Angremond e al. (1996) 24

4.5.2 Seabrook e Hall (1998) 24

4.5.3 Ahrens (2001) 25

5 BIBLIOGRAFIA ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 3.1 – Spettro monodimensionale 13
Fig. 3.2 – Convenzioni griglia STWAVE 15
Fig. 3.3 – Input e Output STWAVE 15
Fig. 4.1 – Schematizzazione del litorale 17
Fig. 4.2 – Notazione utilizzata 23

1 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO CMS-WAVE

Il modello matematico CMS-Wave (Lin L., H. Mase, F. Yamada e Z. Demirbilek, 2006; Demirbilek Z., L. Lin e A. Zundel 2007), precedentemente chiamato WABED (Wave-Action Balance Equation Diffraction), è un modello bidimensionale stazionario spettrale basato sull'equazione di conservazione dell'azione integrata per tener conto della riflessione e della diffrazione dell'onda (Mase H., H. Amamori e T. Takayama, 2005). Il modello è stato sviluppato all'interno del progetto Coastal Modeling System (CMS), nell'ambito del programma di ricerca statunitense Coastal Inlets Research Program (C.I.R.P.) condotto nel Coastal and Hydraulic Laboratory (C.H.L.) del U.S. Army Engineer Research and Development Center (E.R.D.C.).

CMS-Wave è in grado di simulare la trasformazione spettrale dell'onda, anche in presenza di correnti litoranee, tenendo conto dei processi di rifrazione (dovuta al fondale, alle strutture e ai gradienti di corrente), di shoaling (dovuto al fondale e a gradienti di corrente), di riflessione (dovuta alla linea di costa e alle strutture) e di blocking (dovuto alle correnti). Sono inoltre considerati dal modello diversi processi di generazione e dissipazione dell'onda, tra i quali la generazione da vento, l'attrito al fondo, frangimento, la ridistribuzione dell'energia sullo spettro, il whitecapping e le interazioni non lineari tra onde.

1.1 Equazione di conservazione dell'azione con diffrazione

CMS-Wave è basato sulla equazione di conservazione dell'azione dell'onda, e non della densità dell'energia, in quanto lo spettro della densità d'azione è conservativo anche in presenza di correnti (Bretherton e Garret 1968; Whitham 1974):

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x}+\frac{\partial(C_y N)}{\partial y}+\frac{\partial(C_\theta N)}{\partial x}=\frac{\kappa}{2\sigma}\left[\left(CC_g\cos^2\theta N_y\right)_y-\frac{CC_g}{2}\cos^2\theta N_{yy}\right]-\varepsilon_b N-S$$

dove:

$N=\frac{E(\sigma,\theta)}{\sigma}$ è la densità di azione dell'onda (funzione della frequenza σ e della direzione θ) e si ottiene dividendo la densità di energia E per la frequenza;

C e C_g sono le celerità d'onda e di gruppo;

C_x, C_y e C_θ sono le velocità caratteristiche della corrente rispetto x, y e θ;

x e y sono le coordinate del piano orizzontale;

N_y e N_{yy} sono le derivate del primo e del secondo ordine della densità di azione.

Nell'equazione sono implementate sia la diffrazione dell'onda, integrata con un termine derivato dall'approssimazione parabolica, che la dispersione dell'energia: κ è un parametro empirico che rappresenta l'intensità dell'effetto di diffrazione, ε_b è la parametrizzazione della dissipazione energetica dovuta al frangimento ed S (composto da S_{in} e S_{ds}) indica eventuali sorgenti o perdite addizionali (forzante da vento, attrito al fondo, interazione non lineare delle onde).

Interazione onda-correnti

Le velocità caratteristiche C_x,C_y e C_θ nel primo membro dell'equazione di conservazione dell'azione possono essere espresse come:

$$C_x = C_g \cos\theta + U$$

$$C_y = C_g \sin\theta + V$$

$$C_\theta = \frac{\sigma}{\sinh 2kh}\left(\sinh\theta\frac{\partial h}{\partial x} - \cosh\theta\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \cos\theta\sin\theta\frac{\partial U}{\partial x} - \cos^2\theta\frac{\partial U}{\partial x} + \sin^2\theta\frac{\partial V}{\partial x} - \sin\theta\cos\theta\frac{\partial V}{\partial x}$$

dove U e V le componenti della velocità della corrente, mediate sulla profondità, lungo le due direzioni del piano x e y, k è il numero d'onda e h è la profondità. La dispersione dell'azione dell'onda dovuta alla presenza di correnti può essere ricavata a partire dalla relazione tra la frequenza relativa σ, la frequenza assoluta ω, il vettore del numero d'onda $\vec{k}$ e la velocità della corrente $\vec{Q} = \vec{U} + \vec{V}$ (Johnsson 1990):

$$\sigma = \omega - \vec{k}\cdot\vec{Q} \qquad \text{e} \qquad \sigma^2 = g\,k\,\tanh(kh)$$

dove:

$\vec{k}\cdot\vec{Q}$ è il termine che indica la variazione di frequenza (effetto Doppler);

g è l'accelerazione di gravità;

Impiegando la precedente formulazione è quindi possibile valutare la dispersione di azione dell'onda dovuta alla presenza di correnti e quindi la variazione di frequenza. Con tale formulazione non vi è alcuna soluzione per la condizione di wave blocking, cioè nel caso di un treno d'onde che incontra una corrente la cui velocità è superiore alla celerità di gruppo (Smith et al. 1998; Larson e Kraus 2002):

$$C_g = \frac{\partial\sigma}{\partial k} < \frac{\vec{k}\cdot\vec{Q}}{k}$$

In condizioni di wave blocking l'onda non è in grado di propagarsi oltre la corrente e l'energia viene in parte riflessa (o trasformata con componenti a frequenza inferiore) e in parte dissipata per frangimento. In CMS-Wave in condizioni di wave blocking l'azione dell'onda è posta pari a zero.

Diffrazione dell'onda

Il termine κ, nel primo termine al secondo membro dell'equazione di conservazione dell'azione dell'onda, è il parametro che rappresenta la diffrazione dell'onda, formulato a partire dalla teoria dell'approssimazione parabolica (Mase, 2001). Questo termine può variare tra 0 (il modello non considera diffrazione dell'onda) e 4 (massimo effetto di diffrazione) e necessita, nell'applicazione del modello, di una valutazione e di una calibrazione applicata al caso specifico.

Riflessione dell'onda

L'energia dell'onda riflessa (da una struttura o dalla linea di costa) viene valutata nell'assunzione che l'angolo di incidenza e quello riflesso, rispetto alla normale all'ostacolo, siano uguali e che l'energia riflessa sia una frazione di quella incidente. In particolare si assume che l'azione d'onda riflessa N_r

sia linearmente proporzionale a quella dell'onda incidente N_i (cfr. secondo termine a secondo membro dell'equazione di conservazione dell'azione dell'onda):

$$N_r = K_r^2 N_i$$

dove K_r è il coefficiente di riflessione (0 nessuna riflessione e 1 riflessione totale) definito come il rapporto tra l'altezza d'onda riflessa e quella incidente (Dean e Dalrymple 1984).

Frangimento dell'onda

In CMS-Wave la dissipazione dovuta al frangimento può essere valutata attraverso 4 differenti espressioni: formulazione perfezionata di Goda (Sakai et al., 1989), formulazione perfezionata di Miche (Battjes, 1972; Mase et al. 2005 b), formulazione di Battjes e Janssen (Battjes e Janssen, 1978) e formulazione di Chawla e Kirby (2002). Queste espressioni, considerate più accurate per valutare il frangimento in presenza di correnti rispetto ad altre formulazioni esistenti in letteratura, possono essere suddivise in due distinte categorie:

- formulazioni che valutano la dissipazione di energia troncando la coda della distribuzione dell'altezza d'onda di Rayleigh (Goda e Miche);
- formulazioni che valutano la dissipazione come perdita totale di energia nello spettro mutuando l'approccio utilizzato per la modellazione del risalto idraulico – "salto di Bidone" - (Battjes-Janssen e Chawla-Kirby).

Il modello consente di scegliere l'espressione per il calcolo della dissipazione di energia, ma limita comunque l'altezza d'onda significativa frangente (H_b) a valori inferiori a quelli che si ottengono applicando il criterio di frangimento in funzione della profondità h (Smith et al. 1999):

$$\frac{H_b}{h} \leq 0.64$$

e il criterio più generale, che dipende anche dalla ripidità del fondale:

$$H_b = \frac{0.64}{k_p} \tanh(k_p h)$$

dove k_p è il numero d'onda corrispondente al picco dello spettro.

Trasferimento di energia dal vento

Il termine S_{in}, componente generativa del terzo termine a secondo membro dell'equazione di conservazione dell'azione dell'onda, è il parametro che rappresenta l'incremento di energia dovuto al vento. Questo termine viene espresso in funzione del rapporto tra la celerità dell'onda C e la velocità del vento W, del rapporto tra la celerità di gruppo C_g e la velocità del vento, della differenza tra la velocità del vento e la celerità dell'onda e della differenza tra la direzione del vento θ_w e la direzione dell'onda θ (Lin e Lin 2006b).

$$S_{in} = \frac{a_1 \sigma}{g} F_1(\vec{W} - \vec{C}_g) F_2\left(\frac{C_g}{W}\right) E^*_{PM}(\sigma\sigma) \Phi(\theta + \frac{a_2 \sigma^2}{g} F_1(\vec{W} - \vec{C}_g) F_2\left(\frac{C_g}{W}\right) F_3\left(\frac{C_g}{W}\right) N$$

dove

$$E^{*}_{PM}(\sigma\sigma = g/\sigma^{2}\exp(-0.74\sigma_{0}^{4}/\sigma^{4})$$

è l'espressione dello spettro nella forma di Pierson-Moskowitz (PM), con σ0=g/W costante di Phillips;

$$\Phi(\theta) = 8/3\pi\ \cos^{4}(\theta-\theta_{wind}) \qquad per\ \ |\theta-\theta_{wind}| \le \pi/2$$

è lo spreading direzionale normalizzato;

$$F_1(\vec{W}-\vec{C}_g) = \begin{cases} W\cos(\theta_{wind}-\theta)-C_g \\ 0 \end{cases} \qquad F_2(\frac{C_g}{W}) = \begin{cases} (\frac{C_g}{W})^{1.15} \\ 1 \end{cases} \qquad F_3(\frac{C_g}{W}) = \begin{cases} \log_{10}[(\frac{C_g}{W})^{-1}] & \text{se } C_g < W \\ 0 & \text{se } C_g \ge W \end{cases}$$

sono le funzioni che tengono conto: F_1 della forzante del vento, F_2 dell'effetto dei meccanismi di risonanza di Phillips (Phillips 1957) e F3 dell'"invecchiamento" dell'onda.

Dissipazione di energia dovuta al whitecapping

La perdita di energia dovuta al fenomeno del whitecapping è rappresentata nella componente dissipativa (S_{ds}) del terzo termine del secondo membro dell'equazione di conservazione dell'azione dell'onda; questo termine può essere espresso, tenendo conto della presenza di correnti e degli effetti turbolenti come segue:

$$S_{ds} = -c_{ds}(a_e k)^{1.5}\sigma^{2}/g\ C_g(\sigma\sigma,\theta)\ {}_4(\vec{W},\vec{Q},\vec{C}_g)\ F_5(kh)\ N$$

dove

$$F_4(\vec{W},\vec{Q},\vec{C}_g) = \frac{v+W}{|\vec{W}+\vec{Q}+\vec{C}_g|} \qquad \text{e} \qquad F_5(kh) = \frac{1}{\tanh(kh)}$$

con c_{ds} coefficiente di proporzionalità, $a_e = \sqrt{E(\sigma,\theta)d\sigma d\theta}$ l'ampiezza dell'onda e v il coefficiente di dissipazione turbolenta.

Dissipazione per attrito al fondo

La dissipazione energetica dovuta alle interazioni con il fondo è rappresentata nella componente dissipativa (S_{ds}) del terzo termine del secondo membro dell'equazione di conservazione dell'azione dell'onda; può essere causata dall'attrito sul fondo o da movimenti del materiale del fondo e può essere rappresentata con la seguente espressione (Collins 1972):

$$S_{ds} = -c_f \frac{\sigma^2}{g}\frac{\langle u_b\rangle}{\sinh^2(kh)}N$$

dove $\langle u_b\rangle = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{g}{h}E_{total}}$

rappresenta la media dei moduli delle velocità orbitali al fondo ed E_{total} è la densità di energia totale.

Infine, c_f è il coefficiente di attrito di Darcy-Weisbach che può assumere, per fondali sabbiosi, valori

compresi tra 0.004 e 0.007 (Hasselmann et al. 1973; Bouws e Komen 1983), mentre per fondali rocciosi o corallini può assumere valori tra 0.05 e 0.40 (Hardy 1993; Hearn 1999; Lowe et al. 2005). Conseguentemente, nell'applicazione del modello, tale coefficiente necessita di una valutazione e, possibilmente, di una calibrazione applicata al caso specifico.

2 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO CMS-FLOW

Il modello matematico CMS-Flow (Militello et al., 2004) è un codice alle differenze finite in grado di simulare la circolazione idrodinamica e il trasporto solido indotti da forzanti quali moto ondoso, marea e vento. Il codice è stato sviluppato nell'ambito del progetto Coastal Modeling System (CMS), sviluppato a sua volta nel contesto del programma di ricerca statunitense Coastal Inlets Research Program (C.I.R.P.) condotto nel Coastal and Hydraulic Laboratory (C.H.L.) dello U.S. Army Engineer Research and Development Center (E.R.D.C.).

CMS-Flow risolve in un dominio bidimensionale le equazioni di continuità e della quantità di moto della fluidodinamica, integrate sulla verticale, attraverso una approssimazione ai volumi finiti. Il codice implementa inoltre le equazioni di avvezione-diffusione e di continuità dei sedimenti per risolvere il problema del trasporto e dell'evoluzione del fondale.
Il dominio di calcolo bidimensionale viene discretizzato con una griglia ortogonale con maglia di elementi quadrati di dimensioni variabili: il modello implementa la funzione di "telescoping grid" che permette la costruzione di un dominio con elementi le cui dimensioni possono essere variate in funzione delle caratteristiche locali del fondale e della complessità delle opere presenti.
Il codice risolve in una prima fase le equazioni della quantità di moto attraverso una discretizzazione nel tempo e successivamente procede alla soluzione dell'equazione di continuità con le velocità aggiornate con i valori ottenuti dalla soluzione della quantità di moto. Il calcolo del trasporto viene condotto sui valori aggiornati di sovralzo e velocità indotte dalle correnti, nonché dall'azione delle onde se incluse nella simulazione.

Per lo studio delle correnti costiere e del trasporto generato vengono normalmente considerate come forzanti principali il moto ondoso e il vento. Il campo di moto ondoso sottocosta (forzante del modello idrodinamico) è normalmente ricavato per mezzo del codice di calcolo CMS-Wave, che si interfaccia con il codice di calcolo CMS-Flow, fornendogli i valori dei radiation stress che generano le correnti litoranee.

2.1 Problema idrodinamico - Equazioni del moto

Per la soluzione del problema idrodinamico, CMS-Flow risolve le equazioni che governano il problema idrodinamico (equazione di continuità e di conservazione della quantità di moto) in un dominio bidimensionale applicando il metodo dei volumi finiti.
Le equazioni che governano il moto sono:

$$\frac{\partial(h-\eta)}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}=0 \qquad \text{(FL1)}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t}+\frac{\partial u q_x}{\partial x}+\frac{\partial v q_x}{\partial y}+\frac{1}{2}g\frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial q_x}{\partial y}+fq_x-\tau_{bx}+\tau_{wx}+\tau_{Sx} \qquad \text{(FL2)}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t}+\frac{\partial u q_y}{\partial x}+\frac{\partial v q_y}{\partial y}+\frac{1}{2}g\frac{\partial (h+\eta)^2}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial q_y}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial q_y}{\partial y}+fq_y-\tau_{by}+\tau_{wy}+\tau_{Sy} \qquad \text{(FL3)}$$

dove:

h	profondità del fondale
η	elevazione libera della superficie del mare
q_x q_y	flussi per unità di larghezza parallelo alle direzioni x e y
u v	velocità della corrente integrate sulla verticale parallela alle direzioni x e y
D_x D_y	termini di diffusione per le direzioni x e y
f	parametro di Coriolis
τ_{bx} τ_{by}	sforzi al fondo paralleli alle direzioni x e y
τ_{wx} τ_{wy}	sforzi sulla superficie libera del mare paralleli alle direzioni x e y (vento)
τ_{Sx} τ_{Sy}	sforzi dovuti alle onde paralleli alle direzioni x e y

Sforzi al fondo

In presenza di onde, gli sforzi al fondo derivano dalla combinazione degli effetti delle correnti (generate da vento, oscillazioni di marea, moto ondoso) e della velocità orbitale delle onde. Per il calcolo di tali sforzi il modello impiega la sequente espressione approssimata, mediata sul tempo, (Nishimura 1988):

$$\tau_{bx}=C_b\left\{\left(U_{wc}+\frac{\omega_b^2}{U_{wc}}\cos^2\alpha\right)u+\left(\frac{\omega_b^2}{U_{wc}}\cos\alpha\sin\alpha\right)v\right\} \qquad \text{(FL4)}$$

$$\tau_{by}=C_b\left\{\left(\frac{\omega_b^2}{U_{wc}}\cos\alpha\sin\alpha\right)u+\left(U_{wc}+\frac{\omega_b^2}{U_{wc}}\sin^2\alpha\right)v\right\} \qquad \text{(FL5)}$$

dove

C_b è il coefficiente di attrito al fondo ed è dato $C_b=g/C^2$ con $C=R^{1/6}/n$ coefficiente di Chezy, α è l'angolo rispetto l'asse x, e U_{wc} e ω_b sono dati da:

$$U_{wc}=\frac{1}{2}\left\{\sqrt{\left|u^2+v^2+\omega_b^2+2(u\cos\alpha+v\sin\alpha)\omega_b\right|}+\sqrt{\left|u^2+v^2+\omega_b^2+2(u\cos\alpha+v\sin\alpha)\omega_b\right|}\right\}$$

$$\omega_b=\frac{\sigma H}{\pi\sinh\left[k(h+\eta)\right]}$$

dove σ è la frequenza, H è l'altezza d'onda e k è il numero d'onda.

Sforzi sulla superficie libera

Gli sforzi sulla superficie libera del mare dovuti al vento sono dati dalle seguenti espressioni:

$$\tau_{bx}=C_d\frac{\rho_a}{\rho_w}W^2\sin(\theta) \qquad \text{e} \qquad \tau_{by}=C_d\frac{\rho_a}{\rho_w}W^2\cos(\theta) \qquad \text{(FL6)}$$

dove C_d è il coefficiente di attrito del vento, ρ_a e ρ_w sono le densità dell'aria e dell'acqua, W e θ sono la velocità e la direzione del vento.

Sforzi dovuti alle onde

Gli sforzi dovuti alle onde sono calcolati a partire dai gradienti dei radiation stress:

$$\tau_{Sx} = -\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right) \qquad \text{e} \qquad \tau_{Sy} = -\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right) \qquad \text{(FL7)}$$

dove *Sxx*, *Sxy* e *Syy* sono i radiation stress indotti dal moto ondoso e forniti in input dal modello di propagazione del moto ondoso (CMS-Wave).

Coefficiente di diffusione

Il coefficiente di diffusione laterale D è fortemente influenzato dal fenomeno del mescolamento verticale della colonna d'acqua, che varia in funzione dei processi coinvolti. Dove il contributo del moto ondoso può essere trascurato (alto fondale), il coefficiente può essere espresso in funzione della colonna d'acqua, delle velocità delle correnti e della scabrezza del fondale (Falconer, 1980):

$$D_0 = \frac{1}{2}\left[1.156 g (h+\eta)\frac{|U|}{C^2}\right] \qquad \text{(FL8)}$$

Dove invece il contributo del moto ondoso risulta importante, come nella surf zone, il coefficiente può essere espresso come segue (Smith, Larson e Kraus, 1993; Kraus e Larson, 1991):

$$D_w = \varepsilon_L \qquad \text{con} \qquad \varepsilon_L = \Lambda u_m H \qquad \text{e} \qquad u_m = \frac{gHT}{\left[2\lambda \cosh\left(\frac{2\pi(h+\eta)}{\lambda}\right)\right]} \qquad \text{(FL9)}$$

dove Λ è un coefficiente empirico che dipende dalla forza di miscelazione laterale e u_m è l'ampiezza della componente orizzontale della velocità orbitale al fondo.

2.2 Problema del trasporto solido - equazioni del trasporto e di continuità dei sedimenti

Per la soluzione del problema del trasporto solido, CMS-Flow implementa l'equazione del trasporto secondo la formulazione Lund-CIRP (Camenen e Larson, 2005 e 2006), che tiene conto sia del trasporto in sospensione che del trasporto al fondo. I valori di trasporto solido, ottenuti applicando l'equazione del trasporto, vengono successivamente impiegati per la valutazione dell'evoluzione dei fondali, calcolata applicando l'espressione di continuità dei sedimenti.
In CMS-Flow l'evoluzione morfologica del fondale è controllata da due vincoli principali: (a) il fondo fisso e (b) l"avalanching". Il primo permette di definire all'interno del dominio aree che non possono essere erose, e sono quindi soggette solo fenomeni di deposizione (es. substrato roccioso), mentre il secondo interviene, nelle aree a fondo mobile, quando la pendenza del fondale supera un prefissato angolo critico: oltre questo angolo, il modello induce un franamento di materiale verso il basso fino al ripristino di una pendenza inferiore a quella critica.
Di seguito si riporta una breve trattazione delle espressioni implementate da CMS-Flow per la risoluzione del problema del trasporto solido e dell'evoluzione morfologica dei fondali; si rimanda ai manuali del codice (*ERDC/CHL TR-06-9, Agosto 2006*) per una più esaustiva trattazione.

Coefficienti di attrito e di scabrezza del fondo

Il coefficiente di scabrezza k_s, assunto costante nel modello, è costituito da tre termini:

$$k_s = k_{sd} + k_{sf} + k_{ss} \qquad \text{(FL10)}$$

Il termine k_{sd} è la scabrezza legata alla dimensione (d_{50}) del materiale: $k_{sd} = 2.5 d_{50}$.
Il termine k_{sf} è la scabrezza legata al trascinamento del materiale, funzione delle caratteristiche dei ripple (Soulsby 1997): $k_{sf} = 7.5 H_r^2 / L_r$ con H_r e L_r: rispettivamente altezza e lunghezza del ripple.
Le caratteristiche del ripple dipendono essenzialmente (Soulsby 1997) dalla dimensione del sedimento in presenza di sola corrente, mentre dipendono dalla mobilità delle particelle (van Rijn 1993) in presenza di onde.
Il termine k_{ss} è la scabrezza legata alla mobilità (d_{50}) del materiale (Wilson 1966,1989): $k_{ss} = 5 d_{50} \theta_i$ dove θ_i indica genericamente il parametro di Shields, per correnti θ_c e per onde θ_w :

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{\rho(s-1)g d_{50}} \qquad \text{e} \qquad \theta_w = \frac{\tau_c}{\rho(s-1)g d_{50}} \qquad \text{(FL11)}$$

dove s è il rapporto tra le densità dei materiali (ρ_s/ρ_w). Le espressioni FL11 dipende essenzialmente dalle tensioni tangenziali al fondo dovute alla corrente τ_c e al moto ondoso τ_{wc} :

$$\tau_c = \frac{1}{2}\rho_w f_c U_c^2 \qquad \text{e} \qquad \tau_{wc} = 0.5\tau_w = 0.5 \cdot \frac{1}{2}\rho_w f_w U_w^2 \qquad \text{(FL12)}$$

dove ρ_w è la densità dell'acqua, U_c e U_w sono la velocità della corrente e la velocità orbitale, e f_c e f_w sono i coefficienti di attrito per correnti (Soulsby 1997) e onde (Swart 1974) che dipendono principalmente dal coefficiente di scabrezza k_s; conseguentemente le equazioni FL11 e FL12 vengono risolte iterativamente per successive approssimazioni.

Trasporto al fondo

Una espressione generale per il calcolo del trasporto generato dalla combinazione di onde e correnti è stato sviluppato da Camenen e Larson (2005):

$$\frac{q_{bw}}{\sqrt{(s-1)g d_{50}^3}} = a_w \sqrt{\theta_{net}}\,\theta_{cw,m} \exp\left(-b\frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right)$$
$$\frac{q_{bm}}{\sqrt{(s-1)g d_{50}^3}} = a_n \sqrt{\theta_{cn}}\,\theta_{cw,m} \exp\left(-b\frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right) \qquad \text{(FL13)}$$

dove i pedici w e n si riferiscono, rispettivamente, alle componenti in direzione parallela e normale alla direzione dell'onda, a e b sono dei coefficienti di derivazione sperimentale, θ_{cr} è il parametro critico di Shield, $\theta_{cw,m}$ e θ_{cw} sono i parametri di Shields massimo e medio in presenza di onde e correnti, e $\theta_{cw,m}$ e θ_{cw} sono i contributi netti delle tensioni tangenziali durante un ciclo dell'onda, rispettivamente in direzione parallela e normale all'onda. I parametri $\theta_{cw,m}$,θ_{cw} ,$\theta_{cw,m}$ e θ_{cw} dipendono principalmente dai coefficienti di attrito e dalle velocità della corrente e orbitali. I coefficienti di derivazione sperimentale assumono i seguenti valori: a_n = 12, b = 4.5 e (Camenen e Larson 2005) a_w = 6 + 6 X_t con $X_t = \theta_c/(\theta_c - \theta_w)$ si ricava dai parametri di Shield θ_c e θ_w.

Trasporto in sospensione

Il trasporto in sospensione viene calcolato assumendo che la concentrazione dei sedimenti abbia un profilo esponenziale lungo la colonna d'acqua e la velocità sia costante (Camenen e Larson 2006):

$$q_s = U_c c_r \frac{\varepsilon}{w_s}\left(1-\exp\left(\frac{w_f d}{\varepsilon}\right)\right) \qquad \text{(FL13)}$$

dove:

w_s è la velocità di caduta dei sedimenti;

c_r è la concentrazione di riferimento $c_r = 3.5\cdot 10^{-3}\exp(-0.3d_*)\theta_{cw,m}\exp(-b\theta_{cr}/\theta_{cw})$ con $d_* = ((s-1)g/\nu^2)^{1/3} d_{50}$ che è la dimensione del grano adimensionalizzata;

ε è la diffusività dei sedimenti (coefficiente di mescolamento), correlata alla perdita di energia (Battjes 1975): $\varepsilon = (D_e/\rho)^{1/3} d$.

Il termine D_e rappresenta il coefficiente di dissipazione totale ed è pari a:

$$D_e = k_c^3 D_{ec} + k_w^3 D_{ew} + k_b^3 D_{eb} \quad \text{con} \quad \begin{matrix} D_{ec} = \tau_c u_{c*} = \sqrt{\tau_c/\rho_w} \\ D_{ew} = \tau_w u_{w*} = \sqrt{\tau_w/\rho_w} \end{matrix} \quad \text{e} \quad \begin{matrix} k_c = 1/6\sigma_c\kappa \\ k_w = 1/6\sigma_w\kappa \end{matrix}$$

dove σ_i è il numero di Schmidt e κ è la costante di Von Karman (assunta pari a 0.4). Il termine D_{eb} è fornito direttamente dal modello di propagazione, mentre il termine k_b è assunto pari a 0.017.

Evoluzione morfologica del fondale

Le variazioni di quota del fondale vengono valutate applicando l'equazione di continuità dei sedimenti, nella quale vengono utilizzate le portate solide medie (mediate nel tempo). Con questo tipo di approccio, nel modello sono impostati un intervallo temporale dt_{sed}, per il calcolo delle portate istananee $q_{tot,x}$ e $q_{tot,y}$, e un intervallo temporale dt_{morph}, per il calcolo delle portate medie $\underline{q}_{tot,x}$ e $\underline{q}_{tot,y}$ e delle variazioni di fondale. Per tenere conto delle variazioni di portata solida indotte dalla componente diffusiva (che tende ad incrementare il trasporto verso le zone di fondale più depresse e viceversa ridurre quello diretto verso le zone più elevate) le portate medie vengono calcolate secondo le formule (Watanabe, 1987):

$$\begin{aligned} \underline{q}^*_{tot,x} &= \underline{q}_{tot,x} + D_s\left|\underline{q}_{tot}\right|\frac{\partial h}{\partial x} \\ \underline{q}^*_{tot,y} &= \underline{q}_{tot,x} + D_s\left|\underline{q}_{tot}\right|\frac{\partial h}{\partial y} \end{aligned} \qquad \text{(FL14)}$$

dove D_s è un coefficiente empirico (variabile tipicamente nel range 5-30).

In conclusione, l'equazione di continuità dei sedimenti viene risolta calcolando le variazioni di quota del fondale nell'intervallo temporale dt_{morph} :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \left(\frac{1}{1-p}\right)\left(\frac{\partial \underline{q}^*_{tot,x}}{\partial x} + \frac{\partial \underline{q}^*_{tot,y}}{\partial y}\right) \qquad \text{(FL15)}$$

3 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO STWAVE

Il modello matematico STWAVE (Steady-state spectral WAVE model) (Resio 1987, 1988; Davis 1992; Smith, Resio, Zundel 1999) è un modello stazionario spettrale alle differenze finite basato sull'equazione di conservazione dell'azione.
Il modello descrive il cambiamento dei parametri caratteristici della mareggiata (altezza significativa, periodo, direzione media di propagazione, forma dello spettro di frequenza e spreading direzionale) dalle acque profonde, dove il campo d'onda è relativamente omogeneo su scala chilometrica e le zone sottocosta (le onde in tali zone sono fortemente influenzate dalle variazioni della batimetria, dal livello del mare, dalle correnti locali), dove i parametri caratteristici variano significativamente su scala dell'ordine della decina di metri.
Il modello STWAVE simula la rifrazione e lo shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, il frangimento, la diffrazione, l'interazione tra onde e il fenomeno di whitecapping.
Uno spettro d'onda è una rappresentazione statistica di stato del mare. Essenzialmente, uno spettro è rappresentato da una sovrapposizione lineare di onde monocromatiche e descrive la distribuzione dell'energia del moto ondoso come una funzione della frequenza (spettro monodimensionale di frequenza) o della frequenza e direzione (spettro bidimensionale). Un esempio di spettro monodimensionale è rappresentato in Fig. 3.1.

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).

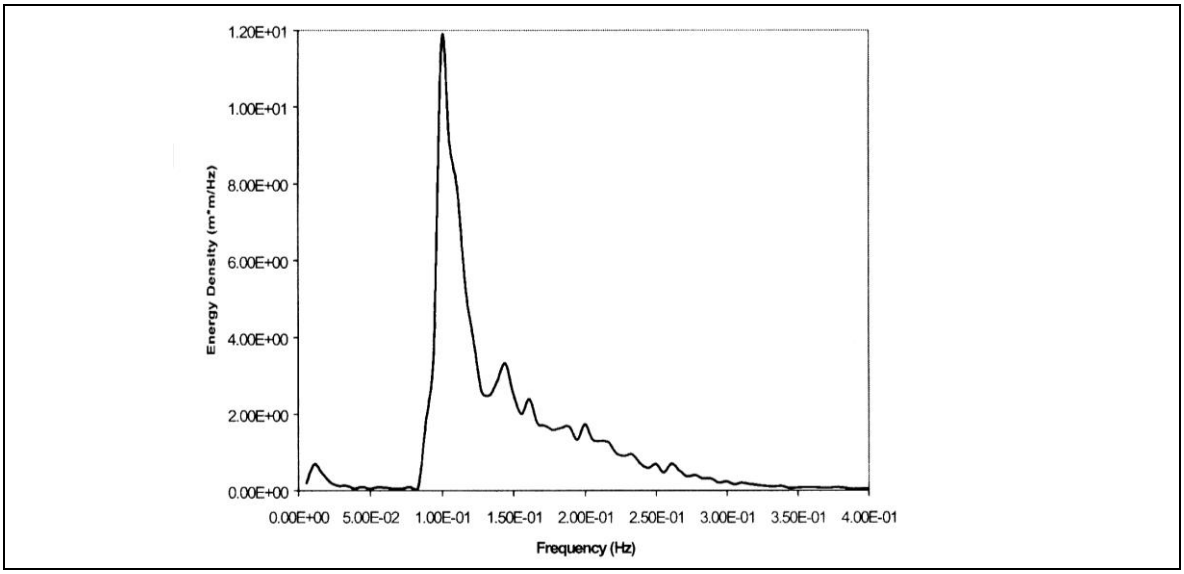


Fig. 3.1 – Spettro monodimensionale

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. 3.2.
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. 3.3 gli input e gli output forniti dal modello.

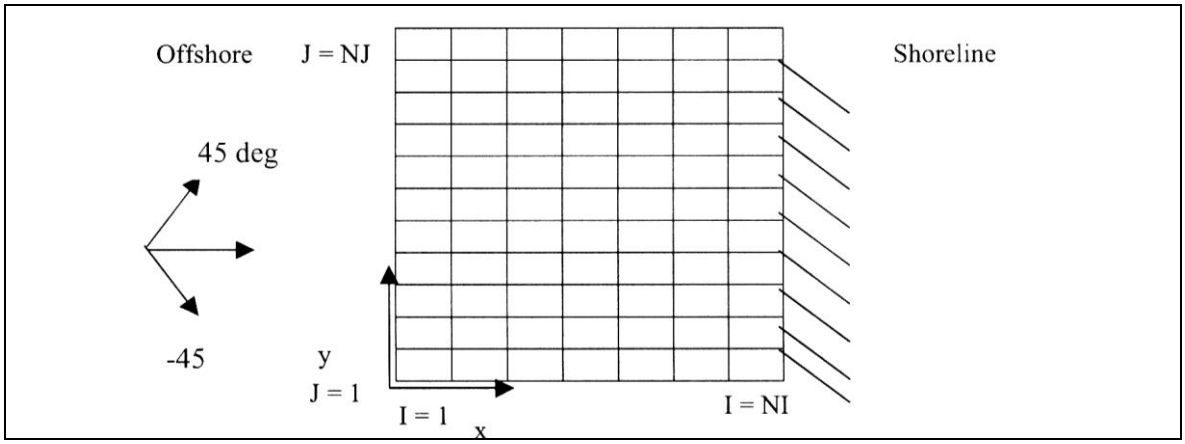


Fig. 3.2 – Convenzioni griglia STWAVE

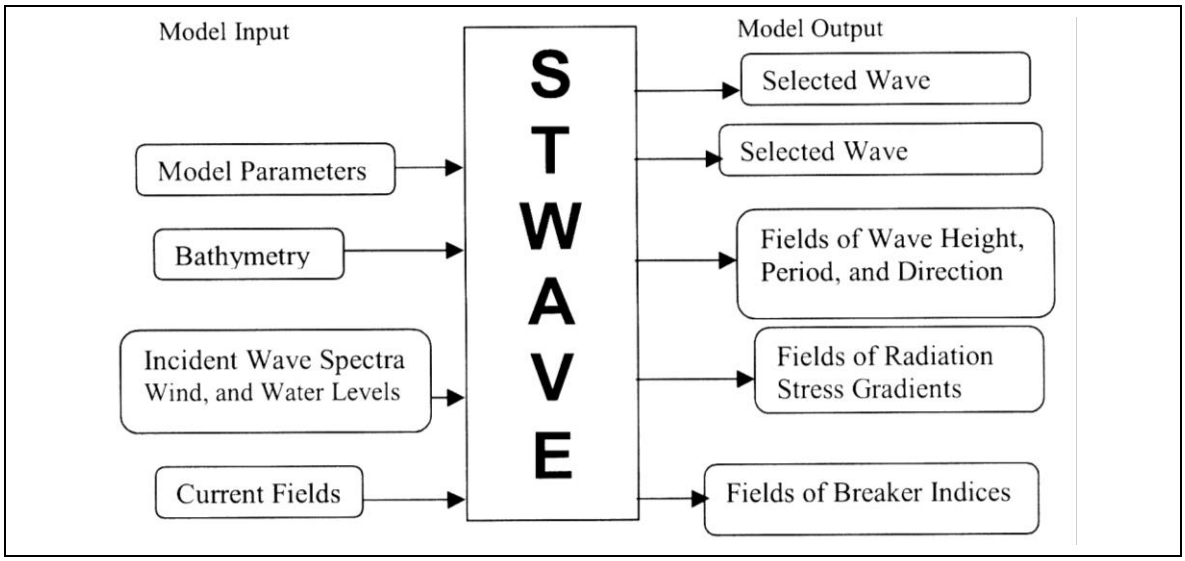


Fig. 3.3 – Input e Output STWAVE

Per generare uno spettro occorre specificare i seguenti parametri:

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

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. 3.1. 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. 3.1 – Correlazione tra parametri spettrali (Thompson et al., 1996)

4 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO GENESIS

Il modello matematico "GENESIS" (GENEralized model for SImulating Shoreline change), impiegato per lo studio dell'evoluzione morfologica del litorale in oggetto, è in grado di calcolare le modificazioni subite dalla linea di riva in conseguenza di variazioni nello spazio o nel tempo del trasporto solido litoraneo in direzione parallela alla linea di riva indotto dall'azione del moto ondoso.
L'estensione costiera che può essere convenientemente modellata può variare da meno di un chilometro a qualche decina di chilometri, mentre gli intervalli di calcolo delle variazioni della posizione della linea di riva variano in genere da alcuni mesi alle decine di anni.

Il modulo di calcolo che determina lo spostamento della linea di riva in funzione del trasporto solido e della sua variazione nello spazio, è basato sulla teoria dei modelli a una linea: tale teoria assume che il profilo trasversale della spiaggia (in direzione quindi perpendicolare alla linea di riva) si mantenga costante nel tempo, traslando semplicemente verso il largo o verso terra (Fig. 4.1).

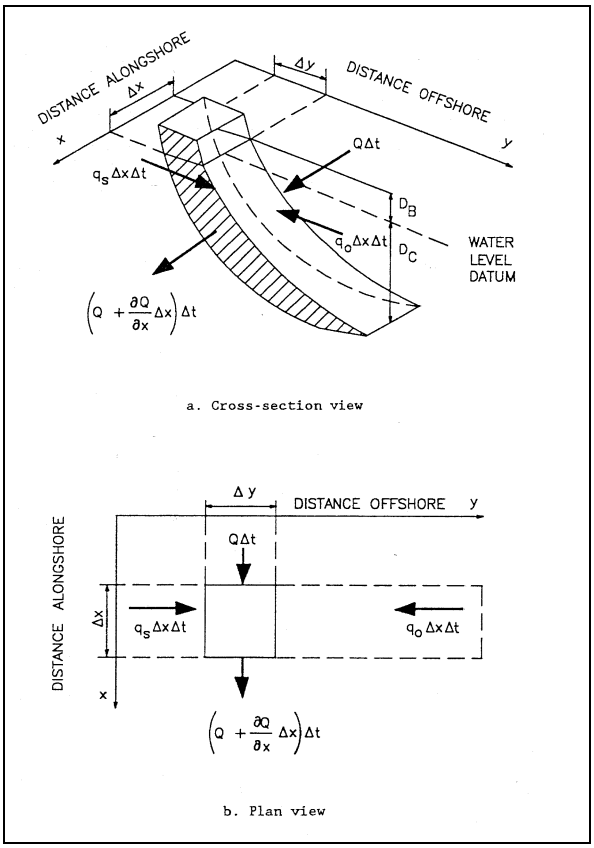


Fig. 4.1 – Schematizzazione del litorale

In questo modo, l'evoluzione del profilo completo della spiaggia può essere descritta attraverso la traslazione orizzontale di un unico punto appartenente al profilo stesso.
Nelle suddette ipotesi, è quindi possibile descrivere l'evoluzione del litorale attraverso una unica linea: a tale scopo appare conveniente scegliere come riferimento la linea cui appartengono tutti i punti che si trovano alla quota del medio mare (cioè la linea di riva), che risulta sempre un indicatore di primaria importanza negli studi di idraulica marittima.
Una seconda ipotesi geometrica fondamentale assunta dal modello è che il trasporto solido indotto dal moto ondoso avvenga tra due quote fissate all'interno del profilo trasversale: si assume cioè che la zona "attiva" della spiaggia, ossia quella interessata dal trasporto solido longitudinale, e dalle modificazioni ad essa connesse, sia solamente quella compresa tra la massima quota D_B della spiaggia attiva emersa (di solito assunta pari alla quota di massima risalita) e la cosiddetta "profondità di chiusura" D_C, al disotto della quale il fondale si mantiene sensibilmente costante nel tempo (nel medio termine). Come accennato in precedenza questi ultimi valori sono determinabili in funzione delle caratteristiche del moto ondoso incidente.
L'equazione di continuità dei sedimenti in una generica sezione, con riferimento al significato dei simboli indicato in Fig. 4.1, può essere scritta nella forma seguente:

$$\frac{\partial y}{\partial t}+\frac{1}{(D_B+D_C)}\left(\frac{\partial Q}{\partial x}-q\right)=0 \qquad (1)$$

dove Q rappresenta il trasporto solido longitudinale e q la quantità di materiale eventualmente apportato (ripascimenti o apporti fluviali) o asportato (dragaggi) dalla generica sezione.
Il trasporto solido longitudinale viene determinato in funzione delle caratteristiche dell'onda al largo e della conseguente onda frangente (altezza e direzione), della granulometria dei sedimenti e dell'eventuale presenza di opere costiere.
Viene altresì tenuto conto di due coefficienti di calibrazione K_1 e K_2, da determinarsi con un procedimento di "taratura" per il particolare sito oggetto di studio, che consentono di calcolare correttamente il valore del trasporto dovuto rispettivamente all'azione diretta del moto ondoso (proporzionale a $H^{2.5}$) ed alla variazione dell'altezza lungo la costa (cioè $\partial H/\partial x$, se con x viene indicato un asse localmente parallelo alla linea di riva).
La formula empirica impiegata per il calcolo del trasporto solido longitudinale è la seguente:

$$Q=\left(H_b^2 c_{gb}\right)\left[a_1\,\mathrm{sen}(2\theta_{bs})-a_2\cos(\theta_{bs})\frac{\partial H_b}{\partial x}\right] \qquad (2)$$

dove il pedice b è riferito alla condizione di frangimento, H è l'altezza significativa dell'onda incidente, θ l'angolo di incidenza rispetto alla normale al litorale nella sezione e c_g la celerità di gruppo.
I coefficienti a_1 e a_2 sono così definiti:

$$a_1=\frac{K_1}{16(s-1)(1-n)(1.416)^{2.5}} \qquad (3.1)$$

$$a_2=\frac{K_2}{8(s-1)(1-n)(\tan\beta)(1.416)^{2.5}} \qquad (3.2)$$

dove s indica il rapporto tra il peso specifico del costituente solido del sedimento caratteristico della spiaggia ed il peso specifico dell'acqua marina, n la porosità del sedimento in sito e β la pendenza media del profilo trasversale della spiaggia dalla linea di riva alla profondità di chiusura.
L'angolo β viene calcolato per ciascuna mareggiata simulata nel modello, essendo funzione delle caratteristiche dell'onda incidente ed è ottenuto dalla seguente relazione:

$$\tan\beta = \left(\frac{A^3}{D_{LT0}}\right) \qquad (4)$$

dove A è il parametro semiempirico di Dean (1977) e D_{LT0} è la massima profondità interessata dal trasporto solido longitudinale, definita dalla relazione di Hallermaier (1983):

$$D_{LT0} = (2.3 - 10.9\,H_S)\frac{H_S}{L_0} \qquad (5)$$

dove L_0 rappresenta la lunghezza d'onda ed H_S l'altezza significativa in acque profonde.
Il trasporto solido viene calcolato sezione per sezione, tenendo conto della direzione e dell'altezza d'onda al frangimento in ciascuna delle sezioni; tali grandezze vengono determinate attraverso moduli di calcolo interni a GENESIS, che tengono conto degli effetti di shoaling, rifrazione e diffrazione.
Il modello è altresì in grado di descrivere il comportamento del litorale in presenza di opere rigide quali protezioni di sponda, pennelli, dighe foranee e difese staccate (per queste ultime tre categorie di opere il modello è anche in grado di valutare l'interazione tra queste ed il moto ondoso incidente), oppure di interventi morbidi quali by-pass o ripascimenti.
Le condizioni al contorno imponibili agli estremi dell'area modellata possono essere di varia natura; in particolare, è possibile fissare lo spostamento nel tempo della linea di riva nelle sezioni di estremità, ovvero porre in queste un pennello di varia lunghezza e controllare così il trasporto solido nelle stesse.

4.1 Andamento del trasporto solido longitudinale e valutazione del bypass

La larghezza della zona interessata dal trasporto solido longitudinale è necessaria alla determinazione della quantità di materiale che supera l'estremità delle strutture perpendicolari alla riva, quali pennelli o moli foranei, durante una mareggiata. Dal momento che la massima concentrazione del trasporto solido avviene nella zona dei frangenti, tale larghezza è legata all'altezza dell'onda frangente.
L'algoritmo di calcolo del bypass implementato nel modello GENESIS richiede la determinazione di una grandezza chiamata "profondità del trasporto attivo longitudinale" D_{LT}, pari alla profondità di frangimento della $H_{1/10}$ (media del decimo di onde più alte). Nelle ipotesi di validità della distribuzione di Rayleigh per le altezze d'onda ed avendo assunto un indice di frangimento γ pari a 0.78 (rapporto tra altezza d'onda e profondità al frangimento), si ottiene:

$$D_{LT} = \frac{1.27}{\gamma}\left(H_S\right)_b \approx 1.6\left(H_S\right)_b \qquad (6)$$

Va osservato che la profondità del trasporto attivo è minore della profondità di chiusura D_C, salvo il caso delle mareggiate estreme.
Per la valutazione del bypass, nel caso di strutture impermeabili al trasporto solido longitudinale, viene introdotto un fattore di bypass F_{BYP}, definito come segue:

$$F_{BYP} = 1 - \frac{D_G}{D_{LT}} \qquad \text{se } D_G \leq D_{LT} \qquad (7.1)$$

$$F_{BYP} = 0 \qquad \text{se } D_G \geq D_{LT} \qquad (7.2)$$

dove D_G rappresenta la profondità della testata del molo foraneo o del pennello.

F_{BYP} rappresenta la frazione di trasporto solido longitudinale nella cella sopraflutto adiacente alla struttura trasversale che è in grado di superare la struttura stessa.
D_{LT} e F_{BYP} vengono calcolati in corrispondenza di ciascuna opera trasversale, per ciascuna mareggiata simulata dal modello.

4.2 Profilo trasversale del litorale

Lo studio del profilo trasversale è necessario per la valutazione dell'andamento trasversale del trasporto solido longitudinale e quindi del bypass.
Si assume che la forma del profilo trasversale sia esprimibile tramite la semplice relazione proposta da Bruun (1954) e Dean (1977), che lega la profondità d alla distanza dalla linea di riva y:

$$d = A y^{2/3} \qquad (8)$$

dove A rappresenta un parametro semiempirico, definito da Moore (1982), funzione del diametro caratteristico d_{50} (espresso in mm e corrispondente al diametro del vaglio che trattiene il 50% in peso del materiale) del sedimento che costituisce la spiaggia attiva.
Di seguito, si riportano le formule proposte da Larson e Kraus nel 1992 (CERC 1995) per il calcolo del parametro A, in funzione del diametro medio dei grani:

$A = 0.2665(d_{50})^{0.614}$ se $d_{50} \leq 0.26$ mm (9.1)

$A = 0.2275(d_{50})^{0.496}$ se $0.26 < d_{50} \leq 0.47$ mm (9.2)

$A = 0.2143(d_{50})^{0.4161}$ se $0.47 < d_{50} \leq 0.70$ mm (9.3)

$A = 0.2101(d_{50})^{0.361}$ se $0.70 < d_{50} \leq 1.00$ mm (9.4)

$A = 0.21(d_{50})^{0.48}$ se $1.00 < d_{50} \leq 1.77$ mm (9.5)

$A = 0.23(d_{50})^{0.32}$ se $1.77 < d_{50} < 10.0$ mm (9.6)

$A = 0.263(d_{50})^{0.261}$ se $10.0 \leq d_{50} < 40.0$ mm (9.7)

$A = 0.46(d_{50})^{0.11}$ se $d_{50} \geq 40.0$ mm. (9.8)

4.3 Profondità di chiusura e altezza di swash

La profondità di chiusura rappresenta la profondità limite al di sotto della quale il profilo trasversale non subisce cambiamenti significativi, nell'intervallo di tempo per cui si esegue la simulazione.
La valutazione corretta della profondità di chiusura per un dato sito è condotta sulla base dell'analisi di dati storici che documentino l'evoluzione del tempo del profilo trasversale in sezioni significative del sito in oggetto.
Qualora tali dati non siano disponibili, è possibile valutare la profondità tramite la relazione proposta da Hallermeier:

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

dove $H_{0,12}$ rappresenta il valore dell'altezza significativa superata in media per 12 ore all'anno e T il periodo ad essa associato.

4.4 Determinazione delle caratteristiche dell'onda al frangimento

Le caratteristiche dell'onda al frangimento da impiegare nelle formule 2 e 6 sono calcolate per mezzo di un modulo interno al modello GENESIS; tale modello propaga le onde a partire dalle acque profonde fino alla profondità di frangimento, senza tenere conto dell'eventuale effetto di diffrazione di opere presenti lungo il litorale. Tale effetto viene considerato in una fase successiva, correggendo i risultati di questo primo calcolo.
L'altezza d'onda al frangimento $(H_S)_b$ è calcolata attraverso la seguente relazioni:

$$\left(H_S\right)_b = K_R\, K_S\, H_{S0} \qquad (10)$$

dove K_R e K_S sono rispettivamente i coefficienti di rifrazione e di shoaling, ed H_{S0} l'altezza d'onda significativa in acque profonde.
I valori di K_R e K_S sono determinati nelle ipotesi di batimetriche parallele, di costanza del flusso di energia all'interno di ciascun tubo di flusso e di validità della legge di Snell. Nelle medesime ipotesi è possibile determinare anche la direzione di propagazione al frangimento θ_b; le relazioni che esprimono le grandezze finora citate sono le seguenti:

$$K_R = \left(\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_b}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (11)$$

$$K_S = \left(\frac{c_{g0}}{c_{gb}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (12)$$

$$\theta_b = \operatorname{arcsen}\left(\frac{L_b \operatorname{sen}\theta_0}{L_0}\right) \qquad (13)$$

dove θ_0 è l'angolo di incidenza dell'onda al largo (rispetto ad una batimetrica di riferimento, il cui orientamento è ottenuto dallo smoothing e dalla traslazione della linea di riva esistente durante lo step temporale di calcolo), c_{g0} e c_{gb} rispettivamente la celerità di gruppo del treno d'onde al largo ed al frangimento, L_b ed L_0 la lunghezza d'onda al frangimento ed in acque profonde.

4.5 Schematizzazione delle barriere frangiflutti

Il coefficiente di trasmissione delle onde attraverso una barriera frangiflutti è un parametro fondamentale per determinare la variazione della linea di riva. Il fenomeno della trasmissione è stato ampiamente studiato mediante modelli fisici bidimensionali, soprattutto per barriere di tipo emerso.
Va ricordato, in particolare, il lavoro di Tanaka (1976), che ha condotto esperimenti su modelli fisici di barriere sia sommerse che emerse, considerando differenti larghezze di coronamento. Sulla base dei risultati ottenuti, Tanaka ha ricavato delle curve di progetto che forniscono il valore del coefficiente di trasmissione dell'onda $K_t = H_t/H_0$ (Ht: altezza dell'onda trasmessa, H_0: altezza d'onda significativa incidente) in funzione della sommergenza relativa (R/H_0, dove R = quota di coronamento della struttura) e della larghezza relativa del coronamento (B/L_0, dove B è la larghezza del coronamento e L_0 la lunghezza d'onda in acque profonde). In Fig. 4.2 si riporta uno schema con le grandezze significative che interessano la trasmissione attraverso una barriera frangiflutti.

In GENESIS è possibile schematizzare le barriere frangiflutti considerando tre differenti approcci: d'Angremond e al. (1996), Seabrook e Hall (1998) e Ahrens (2001). Tali approcci vengono descritti in dettaglio nei successivi paragrafi.

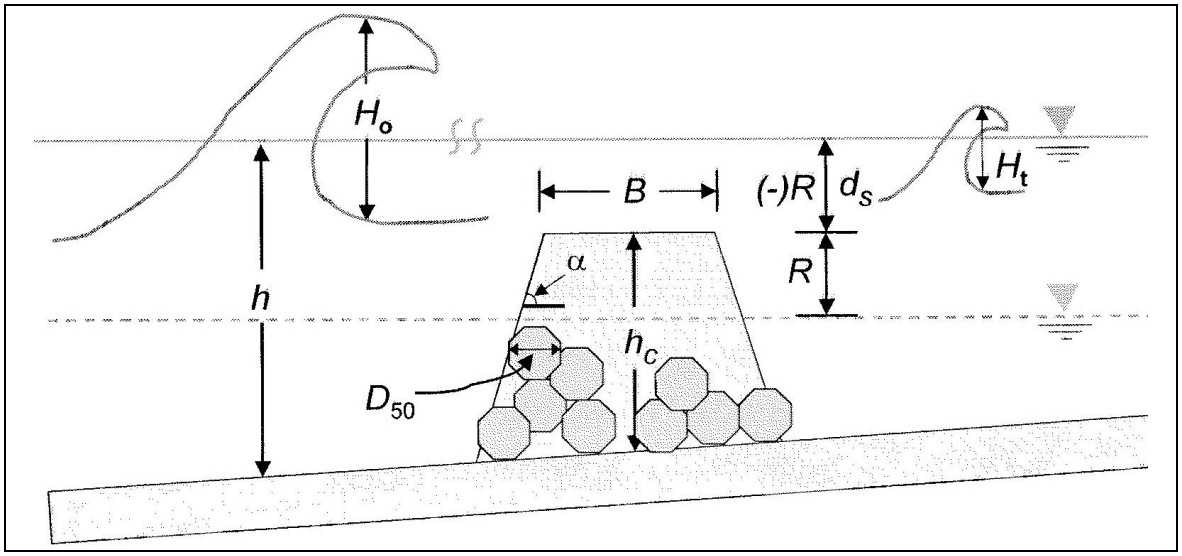


Fig. 4.2 – Notazione utilizzata

4.5.1 D'Angremond e al. (1996)

D'Angremond e al. (1996) hanno sviluppato una formula per calcolare il coefficiente di trasmissione di strutture caratterizzate da bassa permeabilità e aventi coronamento prossimo al livello medio mare (ad esempio: barriere in calcestruzzo, cassoni, ecc…). In base agli studi condotti da d'Angremond (il quale a sua volta aveva proseguito degli studi cominciati da Daemen nel 1991), il coefficiente di trasmissione dipende principalmente dalla sagoma della struttura.
Le formulazioni proposte sono le seguenti:

$$K_t = -0.4\frac{R}{H_s} + \left(\frac{B}{H_s}\right)^{-0.31}\left(1-e^{-0.5\xi}\right)0.64\,,\ \text{valida per strutture permeabili;} \qquad (14.1)$$

e

$$K_t = -0.4\frac{R}{H_s} + \left(\frac{B}{H_s}\right)^{-0.31}\left(1-e^{-0.5\xi}\right)0.80\,,\ \text{valida per strutture impermeabili;} \qquad (14.2)$$

dove:
$\xi = \tan\alpha / \sqrt{H_s / L_0}$ è il parametro di Iribarren e $\tan\alpha$ rappresenta la pendenza della struttura lato mare.

Le equazioni proposte forniscono un valore del coefficiente di trasmissione variabile tra 0.075 e 0.8.

4.5.2 Seabrook e Hall (1998)

Seabrook e Hall hanno condotto dei test su modello fisico con particolare riferimento a strutture sommerse aventi larghezza di coronamento piuttosto estesa.
I test condotti hanno dimostrato che il coefficiente di trasmissione risulta essere sensibile sia al valore della sommergenza relativa (R/H_0) che al valore della larghezza relativa del coronamento (B/L_0).
Seabrook e Hall hanno proposto la seguente espressione per il coefficiente di trasmissione:

$$K_t = 1 - \left[e^{-065\left(\frac{d_s}{H_s}\right)-1.09\left(\frac{H_s}{B}\right)} + 0.047\left(\frac{Bd_s}{LD_{50}}\right) - 0.067\left(\frac{d_s H_s}{BD_{50}}\right)\right], \qquad (15)$$

dove:
d_s rappresenta la profondità del coronamento (sommergenza) e L la lunghezza d'onda locale associata all'onda incidente.

Tale equazione fornisce valori attendibili all'interno del seguente campo di applicazione:

$$0 \le \frac{Bd_s}{LD_{50}} \le 7.08 \qquad \text{e} \qquad 0 \le \frac{d_s H_s}{BD_{50}} \le 2.14\,.$$

Il primo parametro adimensionale rappresenta l'energia persa in seguito al flusso dell'onda attraverso la struttura, mentre il secondo parametro rappresenta l'energia dissipata durante il passaggio dell'onda sopra la struttura (tale energia si dissipa in seguito all'attrito sulla superficie della struttura).

4.5.3 Ahrens (2001)

Basandosi su dati di onde irregolari, Ahrens ha sviluppato un'equazione di previsione della trasmissione dell'onda, approccio noto come "dominant-mode". Ahrens ha individuato tre modi fondamentali di trasmissione dell'onda:

- trasmissione "attraverso" la barriera;
- trasmissione per overtopping;
- trasmissione sopra la cresta.

Ahrens definisce il coefficiente di trasmissione totale come:

$$K_t = \sqrt{(K_t)_{over}^2 + (K_t)_{thru}^2}\ , \tag{16}$$

dove $(K_t)_{over}$ rappresenta il coefficiente di trasmissione associato alla tracimazione al di sopra del coronamento della struttura e $(K_t)_{thru}$, invece, rappresenta il coefficiente associato all'energia di trasmessa attraverso la struttura.

Per strutture molto emergenti, definite da Ahrens con sommergenza relativa $(R/H_s) > 2$, la trasmissione avviene principalmente attraverso la barriera. Ahrens, attraverso una back-analysis dei dati relativi a strutture emerse, ha sviluppato la seguente relazione:

$$(K_t)_{thru} = 1.0/(1.0 + f_{thru})\,. \tag{17}$$

Il coefficiente f_{thru} viene calcolato utilizzando la seguente equazione:

$$f_{thru} = \left(\frac{H_s}{D_{50}}\right)^{0.982} \cdot \exp\left[0.433 + 2.35 \cdot \left(\frac{A_t}{L_0 \cdot h_c}\right)\right], \tag{18}$$

dove A_t rappresenta l'area trasversale locale della barriera e h_c l'altezza di coronamento della barriera.

L'equazione proposta fitta bene i dati raccolti da Ahrens presso più fonti (Seelig 1980; van der Meer 1988; Daemen 1991; Allsop 1983; Powell e Allsop 1985; Ahrens 1987), con un coefficiente di correlazione pari a 0.978. Si può osservare come il coefficiente A_t/h_c rappresenti l'influenza della larghezza relativa del coronamento all'interno dell'espressione.

Se $R/H_s < 2$, deve essere calcolata anche la trasmissione al di sopra della struttura. L'espressione proposta da Ahrens per $(K_t)_{over}$ è la seguente:

$$(K_t)_{over} = 1.0/(1.0 + f_{over}). \qquad (19)$$

L'espressione del coefficiente f_{over} dipende dal valore del rapporto R/H_s..

Se $0 \leq R/H_s \leq 2$ (strutture emerse), la trasmissione avviene principalmente grazie alla risalita dell'onda (run up) e alla tracimazione della struttura. L'equazione ricavata per f_{over} è la seguente:

$$f_{over} = \exp\left[0.465 + 12.7\frac{R}{\sqrt{(H_s \cdot L_0)}} - \frac{17.4}{\left(\frac{A_t}{h_c \cdot D_{50}}\right)} + \frac{0.00118}{\left(\frac{H_s}{L_0}\right)}\right]. \qquad (20)$$

L'equazione proposta per il coefficiente di trasmissione dovuto al superamento della struttura fitta bene i dati raccolti da Ahrens, con un coefficiente di correlazione pari a 0.930.

Se R/Hs < 0 (strutture sommerse), il fenomeno dominante è quello di trasmissione sopra il coronamento.
Una regressione dei dati considerando l'energia rimanente ha condotto alla seguente equazione di f_{over} per strutture sommerse:

$$f_{over} = \exp\left[-0.646 + 0.631 \cdot \frac{R}{H_s} + 0.00137 \cdot \frac{A_t}{D_{50}^2}\right]. \qquad (21)$$

Il coefficiente di correlazione per la trasmissione sopra una struttura sommersa è pari 0.73; tale valore indica la moderata capacità di previsione per questo tipo di trasmissione. Si osserva che l'equazione proposta non utilizza la larghezza del coronamento della struttura; ciò può contribuire a giustificare la relativamente scarsa correlazione dei dati.

Sebbene lo studio di Ahrens sia stato condotto utilizzando dati relativi a barriere tipo reef (prive di nucleo), sono state testate anche strutture costituite da due strati assegnando un diametro equivalente. I risultati ottenuti suggeriscono che le strutture costituite da due strati possono essere trattate in modo simile alle barriere tipo reef utilizzando un diametro equivalente dei massi.