Comune di Piombino

PIANO REGOLATORE PORTUALE DEL POLO DEL DIPORTISMO
ai sensi dell'art. 4.7 ter della L.R. 1/2005
(zona D14.2.a del PRG vigente)

INTEGRAZIONE RELAZIONE IDRAULICO-MARITTIMA

Elaborato n. G5 bis - INTEGRAZIONE

PORTO TURISTICO DELL'ARCIPELAGO

Il legale rappresentante

Dott.ssa Barbara Colcellini

I progettisti

Ipostudio architetti srl
arch. Lucia Celle

HydroSoil srl
ing. Massimo Tondello
dott. geologo Sergio Citran

marte marine
dott. Luca Coltro

ORYX SOLUTIONS

marte marine

ipostudio architetti srl

HydroSoil

INDICE

1 PREMESSA 4

2 LIVELLI PRESTAZIONALI DELLE OPERE DI DIFESA 5

2.1 CARATTERISTICHE DELLE SEZIONI TIPOLOGICHE DI CALCOLO 6

2.2 DETERMINAZIONE DELL'ONDA DI PROGETTO 9

2.3 CALCOLO DI RISALITA E TRACIMAZIONE 11

2.3.1 Calcolo della portata di tracimazione per strutture a parete verticale 11

2.3.2 Calcolo della risalita per scogliere 12

2.3.3 Calcolo della portata di tracimazione per scogliere 14

2.3.4 Distribuzione statistica delle altezze d'onda in basso fondale 15

2.3.5 Applicazione dei metodi di calcolo 17

2.3.6 Considerazioni sui livelli prestazionali delle opere 18

3 AGITAZIONE ONDOSA E VERIFICA DELLE CONDIZIONI DI COMFORT 20

3.1 DOMINIO DI CALCOLO 21

3.2 DATI DI INPUT 24

3.2.1 Mareggiate da eventi di moto ondoso 24

3.2.2 Mareggiate generate localmente da vento 25

3.2.2.1 Eventi anemologici analizzati 26

3.2.2.2 Piani d'onda e caratteristiche degli eventi generati 26

3.3 VERIFICA DELLE CONDIZIONI DI COMFORT 29

3.3.1 Agitazione interna TEST 13 – mareggiata di Scirocco – Frequenza 5gg/anno 30

3.3.2 Agitazione interna TEST 16 – mareggiata di Grecale da vento – Frequenza 5gg/anno 33

3.3.3 Agitazione interna TEST 17 – mareggiata di Scirocco da vento – Frequenza 5gg/anno 36

4 STUDIO DELLA RISONANZA DEL BACINO 39

4.1 CALCOLO DEI PERIODI DI RISONANZA 39

4.2 STUDIO SU MODELLO 42

4.2.1 Agitazione interna TEST 18 – periodo 7 s 44

4.2.2 Agitazione interna TEST 19 – periodo 8 s 46
4.2.3 Agitazione interna TEST 20 – periodo 9 s 48
4.2.4 Agitazione interna TEST 21 – periodo 10 s 50
4.2.5 Agitazione interna TEST 22 – periodo 11 s 52
4.2.6 Agitazione interna TEST 23 – periodo 12 s 54
4.2.7 Agitazione interna TEST 24 – periodo 13 s 56
4.2.8 Agitazione interna TEST 25 – periodo 14 s 58
4.2.9 Agitazione interna TEST 26 – periodo 15 s 60
4.2.10 Agitazione interna TEST 27 – periodo 16 s 62

5 VERIFICA DELLA RISPONDENZA DELLE CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL BACINO AI REQUISITI DEL MASTERPLAN 64

6 CONSIDERAZIONI SUGLI EFFETTI DI VENTI ESTREMI DI SCIROCCO 66

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 2.1 – Planimetria di riferimento e ubicazione delle sezioni di calcolo 6
Fig. 2.2 – Sezione 1 e Sezione 2 – Sezioni in cassoni - Molo di sopraflutto 7
Fig. 2.3 – Sezione 3 e Sezione 4 – Mantellata alla radice del molo di sopraflutto 8
Fig. 2.4 – TEST 4 - Caratteristiche mareggiata al largo: H_S = 5.95 m, T_P= 13.1 s, Dir = 160°N, T_R = 50 anni 9
Fig. 2.5 – Sicurezza dell'opera 19
Fig. 3.1 – Particolare della mesh in prossimità dell'imboccatura del nuovo porto 21
Fig. 3.2 – Coefficienti di riflessione e batimetria impiegati nello studio dell'agitazione interna 22
Fig. 3.3 – Rosa delle energie (a sinistra) e delle altezze massime (a destra) nel punto P 24
Fig. 3.4 – Curva di durata nel punto P 25
Fig. 3.5 – Curva di durata degli eventi anemologici al largo 25
Fig. 3.6 – TEST 14 - Caratteristiche al largo: v = 12.94 m/s, Dir = 60°N, Frequenza = 5 gg/anno 27
Fig. 3.7 – TEST 15 - Caratteristiche al largo: v = 9.86 m/s, Dir = 120°N, Frequenza = 5 gg/anno 27
Fig. 3.8 – TEST 13 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 30
Fig. 3.9 – TEST 13 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 31
Fig. 3.10 – TEST 13 – Verifica delle condizioni di comfort 31
Fig. 3.11 – TEST 16 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 33
Fig. 3.12 – TEST 16 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 34
Fig. 3.13 – TEST 16 – Verifica delle condizioni di comfort 34
Fig. 3.14 – TEST 17 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 36
Fig. 3.15 – TEST 17 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 37
Fig. 3.16 – TEST 17 – Verifica delle condizioni di comfort 37
Fig. 4.1 – Periodi di risonanza del bacino 40
Fig. 4.2 – Numero di registrazioni degli eventi ondosi al largo in funzione del periodo e periodi di risonanza del bacino 41
Fig. 4.3 – Energia degli eventi ondosi al largo in funzione del periodo e periodi di risonanza del bacino 41
Fig. 4.4 – Valori massimi delle altezze d'onda significative nelle diverse zone del porto 43
Fig. 4.5 – Individuazione delle zone del bacino portuale 43
Fig. 4.6 – TEST 18 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 44
Fig. 4.7 – TEST 18 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 44

Fig. 4.8 – TEST 19 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 46
Fig. 4.9 – TEST 19- Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 46
Fig. 4.10 – TEST 20 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 48
Fig. 4.11 – TEST 20 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 48
Fig. 4.12 – TEST 21 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 50
Fig. 4.13 – TEST 21 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 50
Fig. 4.14 – TEST 22 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 52
Fig. 4.15 – TEST 22 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 52
Fig. 4.16 – TEST 23 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 54
Fig. 4.17 – TEST 23 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 54
Fig. 4.18 – TEST 24 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 56
Fig. 4.19 – TEST 24 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 56
Fig. 4.20 – TEST 25 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 58
Fig. 4.21 – TEST 25 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 58
Fig. 4.22 – TEST 26 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 60
Fig. 4.23 – TEST 26- Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 60
Fig. 4.24 – TEST 27 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 62
Fig. 4.25 – TEST 27 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 62
Fig. 6.1 – TEST 8 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste) 67
Fig. 6.2 – TEST 8 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa) 67

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 2.1 – Parametri di progetto impiegati per il calcolo della risalita e della tracimazione 10
Tab. 2.2 – Risultati del della portata di tracimazione per strutture a parete verticale 17
Tab. 2.3 – Risultati del calcolo di runup e portata di tracimazione per scogliere in massi naturali 17
Tab. 3.1 – Coefficienti di riflessione degli elementi del contorno inshore 22
Tab. 3.2 – Caratteristiche della mareggiata impiegata nello studio della penetrazione 24
Tab. 3.3 – Caratteristiche fornite in input al codice STWAVE per la generazione del moto ondoso a partire dai dati di vento (punto C.N.R.) 26
Tab. 3.4 – Caratteristiche della mareggiata impiegata nello studio della penetrazione 26
Tab. 3.5 – Caratteristiche delle mareggiate considerate nello studio dell'agitazione ondosa 29
Tab. 3.6 – Sintesi dei risultati ottenuti in termini di altezza d'onda massima nella zona degli ormeggi 29
Tab. 4.1 – Mareggiate considerate per lo studio su modello della risonanza 42
Tab. 6.1 – Caratteristiche dell'evento anemologico e della mareggiata considerata nello studio 66

Elenco degli allegati:

Allegato A Descrizione dei codici di calcolo

1 PREMESSA

La presente relazione descrive le integrazioni agli studi idraulico-marittimi eseguiti a supporto della redazione del Piano Regolatore Portuale, redatte in conformità a quanto richiesto nel corso della Conferenza dei Servizi del 25/02/2013, tenutasi presso il Comune di Piombino.

Più precisamente, le integrazioni riguardano le osservazioni e le richieste formalizzate nel verbale della suddetta conferenza da parte dell'Ufficio Tecnico del Genio Civile di Area Vasta Grosseto-Siena e Opere marittime e dal competente Ufficio Circondariale Marittimo.

In particolare, nella presente relazione vengono discusse le seguenti osservazioni:

- definire i livelli prestazionali delle opere di difesa e le eventuali condizioni vincolanti conseguenti;
- completare lo studio di agitazione interna con particolare riferimento alla verifica delle condizioni di comfort e agli eventuali problemi di risonanza del bacino;
- verificare il rispetto dei requisiti previsti dal Masterplan per l'imboccatura e cerchio di evoluzione in relazione alla flotta tipo di progetto;
- considerare, ai fini dell'agitazione del bacino interno dell'opera portuale, eventuali effetti indotti da mareggiate straordinarie con venti forti da S-E nonché gli effetti che le stesse condizioni meteo marine possano arrecare allo specchio acqueo antistante l'imboccatura del porto stesso.

2 LIVELLI PRESTAZIONALI DELLE OPERE DI DIFESA

L'analisi dei livelli prestazionali delle opere di difesa del nuovo porto di Piombino è stata condotta con riferimento alle sezioni tipologiche di progetto e al clima ondoso del paraggio, le cui caratteristiche locali (in prossimità delle opere foranee) sono state determinate mediante la propagazione di una serie di mareggiate ritenute significative ed esaustive per il livello di progettazione richiesto. Il successivo sviluppo della progettazione potrà peraltro richiedere approfondimenti e/o modifiche prestazionali in relazione alle esigenze di dettaglio che potranno rendersi necessarie. In ogni caso le valutazioni condotte in questa fase verranno validate mediante prove condotte su modello fisico.

Il calcolo della portata di tracimazione per i cassoni del molo di sopraflutto (e anche del sottoflutto) è stato condotto con riferimento alla metodologia proposta nel Coastal Engineering Manual, edito dal Coastal Engineering Research Center, che a sua volta fa riferimento agli studi di Franco (Franco e Franco, 1999).
Per quanto riguarda, invece, la mantellata della radice del molo di sopraflutto, il calcolo della risalita e della tracimazione è stato condotto utilizzando la metodologia proposta nel Coastal Engineering Manual, edito dal Coastal Engineering Research Center, che in questo caso fa riferimento agli studi condotti da de Waal e van der Meer (de Waal & van der Meer, 1992).

Rispetto a quanto riportato nella "Relazione idraulico-marittima" facente parte degli "Studi specialistici a supporto della redazione del Piano Regolatore Portuale relativo al nuovo porto turistico antistante Poggio Batteria" (luglio 2012), nella presente relazione si riporta un approfondimento di analisi con particolare riferimento ai livelli prestazionali e alla sicurezza delle opere di difesa del molo foraneo di sopraflutto, che risulta maggiormente esposto all'attacco diretto del moto ondoso.
Infatti, per quanto riguarda il molo di sottoflutto, non si ravvisano particolari condizioni di rischio e/o pericolo, essendo la struttura in cassoni caratterizzata da valori di portata di tracimazione inferiori a 0.01 l/s/m.

I calcoli sono stati eseguiti con riferimento alle sezioni tipologiche di progetto, descritte in dettaglio nel successivo paragrafo 2.1 (sezione 1, sezione 2, sezione 3 e sezione 4 del molo di sopraflutto).

L'"onda di progetto" è stata determinata in funzione dei parametri richiesti dal metodo di calcolo impiegato per il calcolo della risalita e della portata di tracimazione.
In merito alla definizione dell'"onda di progetto", vale la pena sottolineare che il molo di sopraflutto verrà realizzato su profondità mediamente superiori ai 10 m (acque profonde); pertanto, l'altezza d'onda di progetto (ad eccezione del tratto di radice) non risulta limitata dal fondale. Di conseguenza, i valori di altezza d'onda sono stati estratti dalle simulazioni di propagazione locale delle mareggiate estreme condotte per mezzo del codice di calcolo STWAVE.

2.1 Caratteristiche delle sezioni tipologiche di calcolo

Le sezioni tipologiche sono state progettate e dimensionate con l'obiettivo principale di garantire la funzionalità, la sicurezza e l'integrità strutturale dell'opera in relazione alle condizioni di moto ondoso "estreme" caratteristiche del paraggio.
Di seguito, in Fig. 2.1 si riporta la planimetria di progetto con l'ubicazione delle sezioni di calcolo.

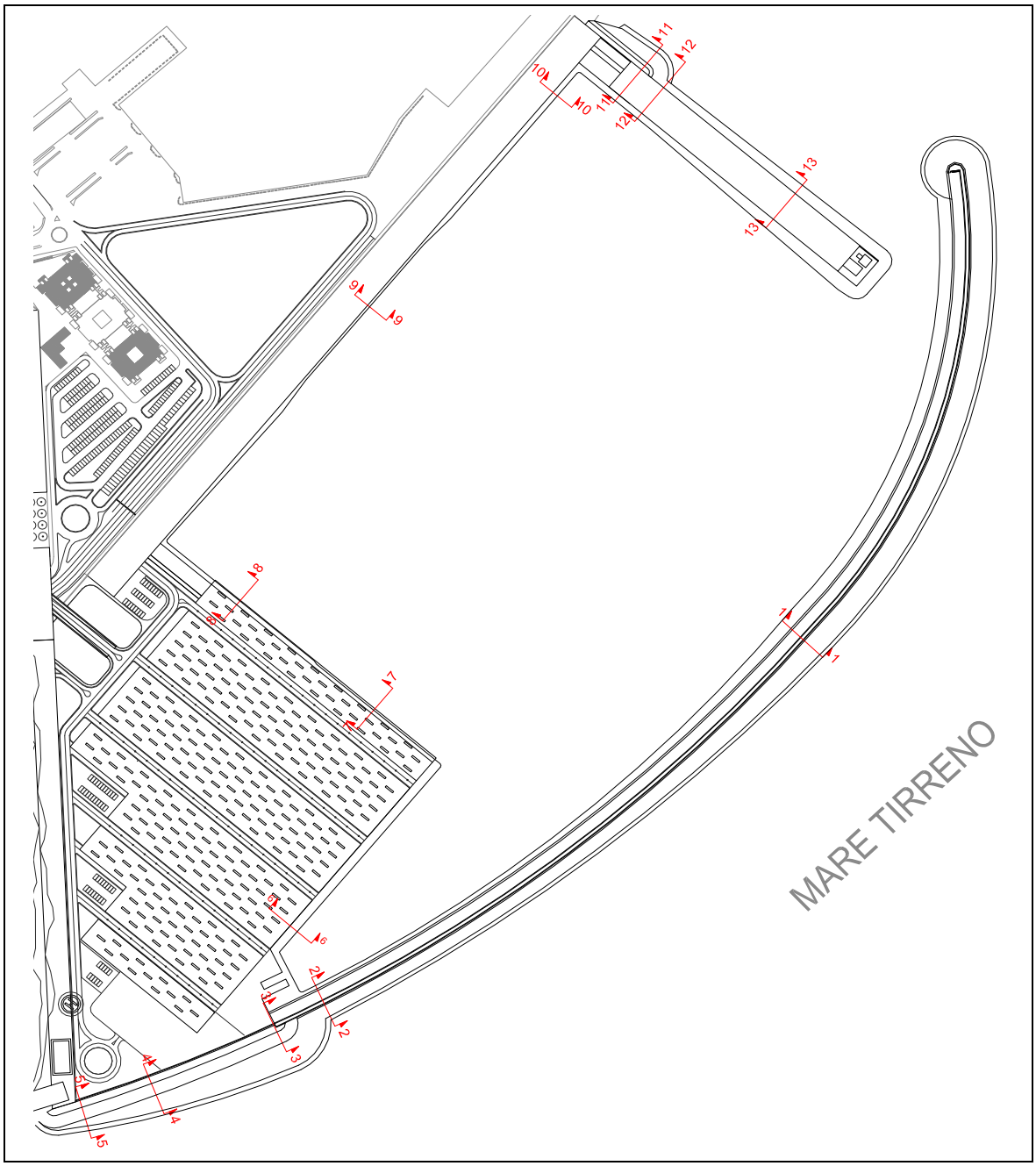

Fig. 2.1 – Planimetria di riferimento e ubicazione delle sezioni di calcolo

Per quanto riguarda il tratto in cassoni del molo di sopraflutto si è proceduto alla verifica delle sezioni 1 e 2 (Fig. 2.2). Visti gli elevati fondali presenti lungo il tracciato previsto per il molo di sopraflutto, si è optato per la realizzazione di una struttura non accostabile, per la quale è accettabile una maggiore portata di tracimazione, senza rischio né per le vite umane, né per le infrastrutture retrostanti, né per le imbarcazioni ormeggiate, né per la struttura stessa.
La quota di coronamento della sovrastruttura del cassone è stata così mantenuta a +5.5 m s.m.m..; si è inoltre scelto di sagomare il masso di coronamento con un dente deflettore in sommità per ridurre la tracimazione. Il cassone verrà poggiato su un imbasamento in scapolame che, per profondità maggiori di 12 m, poggia su una scogliera di massi naturali di I categoria, protetta sul lato mare da una mantellata in massi di IV categoria.

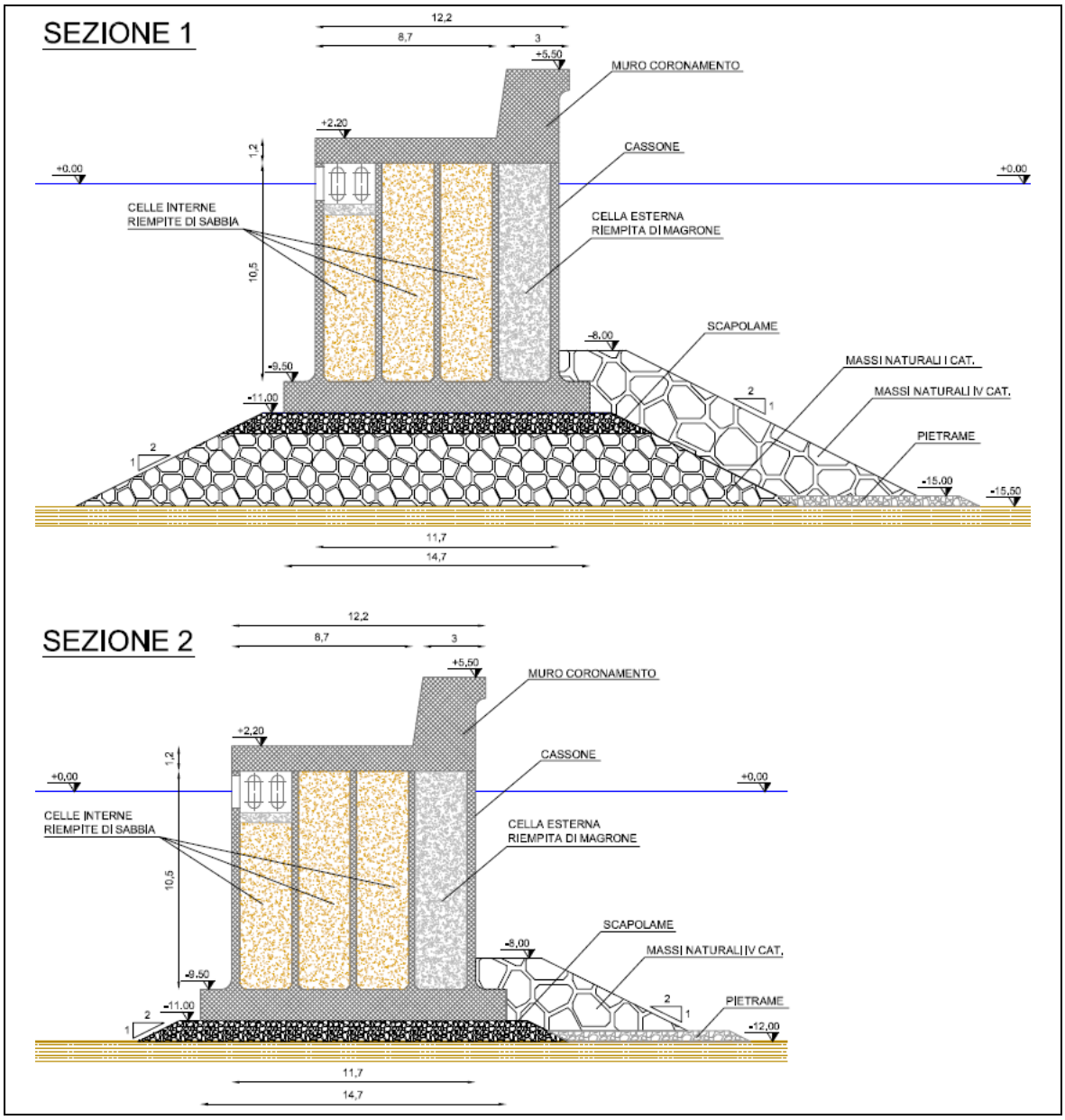

Fig. 2.2 – Sezione 1 e Sezione 2 – Sezioni in cassoni - Molo di sopraflutto

La radice del sopraflutto verrà invece realizzata secondo lo schema tipologico rappresentato in Fig. 2.3 (sezioni 3 e 4). La sezione è costituita da una mantellata in massi naturali di IV categoria con pendenza 1:2 e quota di coronamento di +5.0 m s.m.m; la profondità massima al piede dell'opera è di circa -12.0 m s.m.m..
Il masso di coronamento verrà realizzato con quota di coronamento di +5.5 m s.m.m., per garantire un'adeguata protezione ai piazzali retrostanti e per mantenere la continuità con la sezione in cassoni.

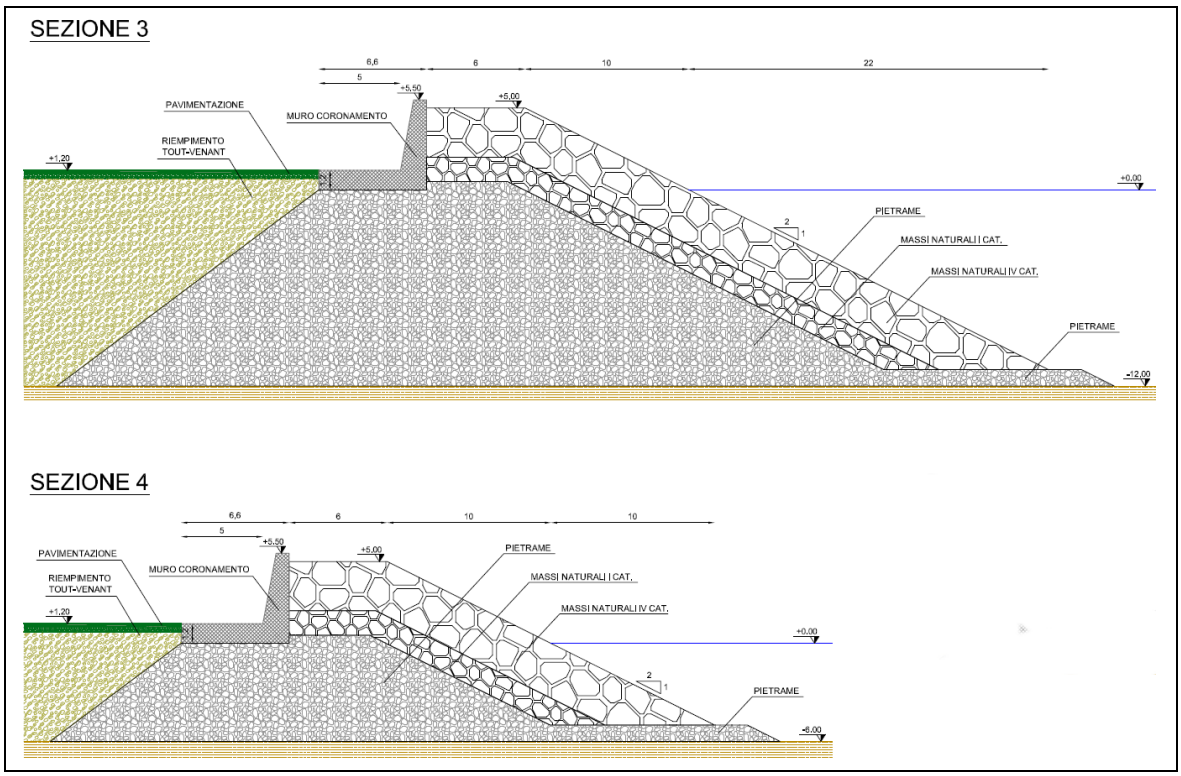

Fig. 2.3 – Sezione 3 e Sezione 4 – Mantellata alla radice del molo di sopraflutto

2.2 Determinazione dell'onda di progetto

I dimensionamenti delle strutture del sopraflutto e il calcolo della risalita e della tracimazione (sezioni 1, 2, 3 e 4) sono stati condotti con riferimento alle altezze significative massime ($H_{s,max}$), ricavate sulla base dei risultati delle simulazioni numeriche di propagazione del moto ondoso sottocosta (codice di calcolo STWAVE).

In particolare, la simulazione più gravosa ai fini del dimensionamento delle opere è rappresentata dalla mareggiata estrema caratterizzata da un tempo di ritorno 50 anni proveniente da Mezzogiorno (Fig. 2.4).
Si osserva come in corrispondenza del molo di sopraflutto del nuovo porto turistico si raggiungano valori di altezza significativa massimi di circa 3.9 m; nel tratto di radice l'altezza significativa comincia ad essere modulata dal fondale (acque basse) per cui si ottengono valori inferiori. Anche in corrispondenza della sezione 2 (che si trova comunque su fondali elevati dell'ordine dei 12 m) si osserva una riduzione dell'altezza significativa (si passa da 3.9 m a circa 3.5 m); in questo caso la riduzione è dovuta alla conformazione batimetrica.

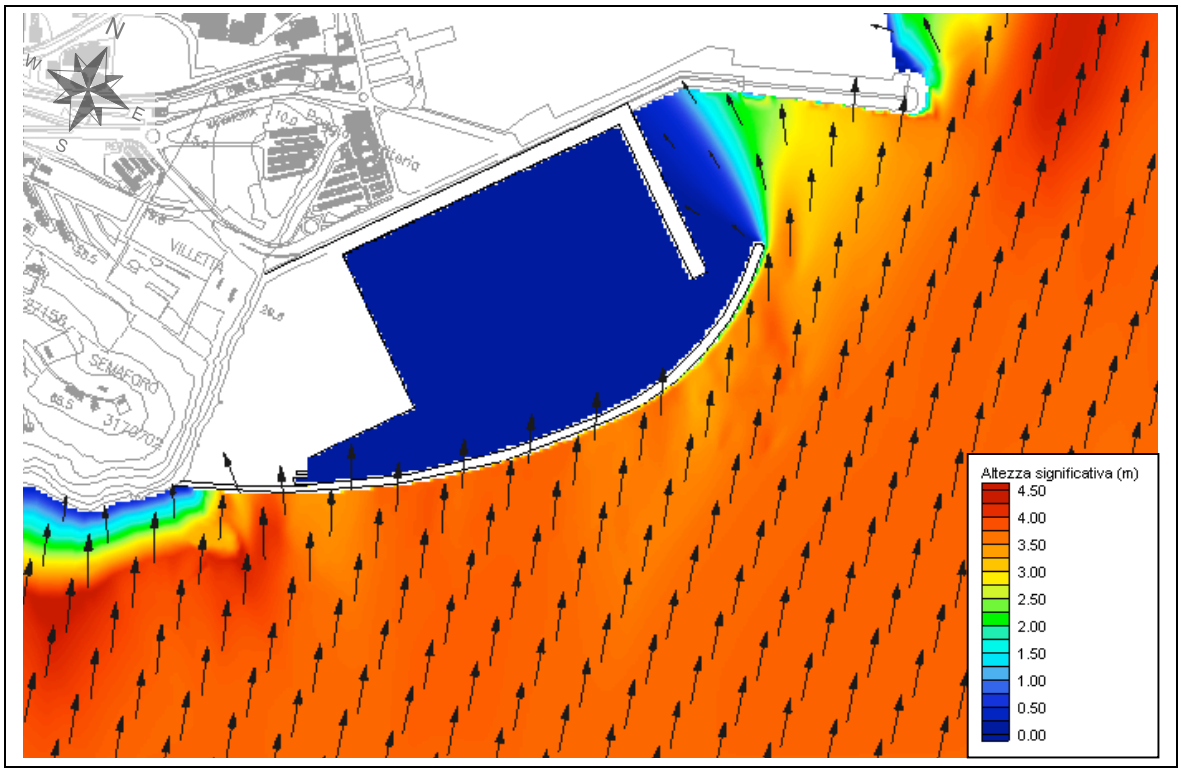

Fig. 2.4 – TEST 4 - Caratteristiche mareggiata al largo:
H_S = 5.95 m, T_P= 13.1 s, Dir = 160°N, T_R = 50 anni

I valori dell'altezza d'onda di progetto utilizzati per le verifiche dei livelli prestazionali delle opere foranee del molo di sopraflutto sono riportati nella successiva Tab. 2.1. I valori dei periodi medio e di picco, associati alle onde di progetto, sono stati assunti con riferimento alla corrispondente mareggiata estrema (T_R 50 anni).

Sez.	Descrizione	Approccio di calcolo	$H_{s,max}$ (m)
1	Molo Sopraflutto - Struttura a cassoni	Franco (1999)	3.90
2	Molo Sopraflutto - Struttura a cassoni	Franco (1999)	3.50
3	Molo Sopraflutto - Scogliera in massi naturali	de Waal & van der Meer (1992)	3.90
4	Molo Sopraflutto - Scogliera in massi naturali	de Waal & van der Meer (1992)	3.65

Tab. 2.1 – Parametri di progetto impiegati per il calcolo della risalita e della tracimazione

2.3 Calcolo di risalita e tracimazione

2.3.1 Calcolo della portata di tracimazione per strutture a parete verticale

Il calcolo della portata di tracimazione per strutture a parete verticale (sezioni 1 e 2 del molo di sopraflutto) è stato condotto con riferimento alla metodologia proposta nel Coastal Engineering Manual edito dal Coastal Engineering Research Center, che fa riferimento agli studi condotti da Franco (Franco e Franco, 1999).
La metodologia utilizzata consente di valutare la portata media di tracimazione in funzione dei parametri caratteristici dell'onda incidente, del tipo di paramento (liscio o forato); in particolare, vengono considerati:

- quota del coronamento rispetto al livello del mare incrementato del setup (R_C);
- profondità al piede dell'opera (d);
- altezza d'onda significativa al piede dell'opera (H_S);
- incidenza dell'onda rispetto alla normale al paramento (β).

La portata media di tracimazione, espressa in metri cubi al secondo per metro di sviluppo del coronamento, è data dalle seguenti espressioni:

$$\frac{q}{\sqrt{g\,H_S^3}} = 0.82\exp\left(-3.0\frac{R_C}{H_S}\frac{1}{\gamma_\beta\,\gamma_s}\right)$$

valida per valori dell'angolo di incidenza β compresi tra 0° e 60°.
Il coefficiente γ_s, che tiene conto del tipo di paramento, assume i seguenti valori:

- 1.00 per muri lisci impermeabili;
- 0.78 per muri lisci impermeabili con parapetto ricurvo;
- tra 0.72 e 0.79 per muri forati (20% di vuoti) con coronamento coperto;
- tra 0.58 per muri forati (20% di vuoti) con coronamento aperto.

I cassoni del molo di sopraflutto sono costituiti da paramento con parapetto ricurvo per ridurre i valori della portata di tracimazione; pertanto, γ_s è stato assunto pari a 0.78.

Il coefficiente γ_β tiene conto dell'incidenza della direzione media di propagazione rispetto alla normale al paramento. In particolare:

$$\gamma_\beta = \begin{cases} \cos\beta & per \quad 0° \le \beta \le 37° \\ 0.79 & per \quad \beta > 37° \end{cases} \qquad \text{per onde lunghe}$$

$$\gamma_\beta = \begin{cases} 0.83 & per \quad 0° \le \beta \le 20° \\ 0.83\cos(20° - \beta) & per \quad \beta > 20° \end{cases} \qquad \text{per onde corte}$$

2.3.2 *Calcolo della risalita per scogliere*

Il calcolo della risalita, o runup, per scogliere emerse (sezioni 3 e 4 della radice del molo di sopraflutto) è stato condotto con riferimento alla metodologia proposta nel Coastal Engineering Manual edito dal Coastal Engineering Research Center, che fa riferimento agli studi condotti da de Waal e van der Meer (de Waal & van der Meer, 1992).

La metodologia utilizzata consente di valutare il runup in funzione dei parametri caratteristici dell'onda incidente, della tipologia e della geometria della mantellata; in particolare, vengono considerati:

- pendenza del profilo batimetrico;
- pendenza della mantellata (tan α);
- tipo e disposizione degli elementi utilizzati per la mantellata;
- profondità al piede dell'opera (d);
- periodo di picco (TP);
- altezza significativa al piede dell'opera (HS);
- incidenza dell'onda rispetto alla normale al paramento (β);
- stato del mare (swell o mare vivo).

Il valore di risalita, o runup, rispetto al livello del mare durante la mareggiata è espresso dalla relazione:

$$\frac{R_{U2\%}}{H_S} = 1.5\ \xi_{OP}\ \gamma_r\ \gamma_b\ \gamma_h\ \gamma_\beta = 1.5\ \xi_{eq}\ \gamma_r\ \gamma_h\ \gamma_\beta \qquad \text{per } 0.5 < \xi_{eq} \le 2,$$

$$\frac{R_{U2\%}}{H_S} = 3.0\ \gamma_r\ \gamma_h\ \gamma_\beta \qquad \text{per } \xi_{eq} > 2,$$

$$\xi_{OP} = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s_{OP}}}; \quad \xi_{eq} = \frac{\tan\alpha_{eq}}{\sqrt{s_{OP}}} = \gamma_b\ \xi_{OP},$$

dove:

- $R_{U2\%}$ rappresenta la quota di risalita che viene superata dal 2% delle onde della mareggiata;
- s_{OP} il rapporto tra altezza significativa locale e lunghezza d'onda al largo (ricavata in base al periodo di picco);
- α_{eq} la pendenza media della mantellata nel tratto compreso tra la quota di $-H_S$ e $+H_S$ (variabile, in particolare, per l'eventuale presenza di una berma);
- i coefficienti $\gamma_r, \gamma_b, \gamma_h, \gamma_\beta$ tengono conto rispettivamente della scabrezza della mantellata, della presenza di eventuali berme sommerse o semi sommerse poste a profondità comprese tra la metà dell'altezza significativa al piede dell'opera e il livello del mare, della distribuzione statistica delle altezze d'onda in basso fondale (limitata, nel caso in oggetto, dal frangimento) e dell'incidenza della direzione media di propagazione rispetto alla normale al paramento (con coefficiente differenziato per condizioni di mare vivo o di swell).

Il valore di γ_r è tabulato in funzione delle caratteristiche degli elementi della mantellata, mentre i restanti coefficienti sono dati dalle seguenti relazioni:

$$\gamma_b = \frac{\xi_{eq}}{\xi_{OP}},$$

$$\gamma_h = \frac{H_{2\%}}{1.4 H_S},$$

dove le altezze d'onda indicate tengono conto del fatto che la distribuzione statistica delle altezze in acque basse differisce da quella di Rayleigh (si veda al proposito il paragrafo 2.3.4);

$$\gamma_\beta = \begin{cases} 1.0 & \text{per} \quad 0° \le \beta \le 10° \\ \cos(\beta - 10°) & \text{per} \quad 10° < \beta \le 63° \\ 0.6 & \text{per} \quad \beta > 63° \end{cases} \qquad \text{in condizioni di swell,}$$

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0022\,\beta \qquad \text{in condizioni di mare vivo.}$$

Il valore di γ_r è assunto pari a 0.5, considerando che la mantellata è costituita da massi naturali.

2.3.3 *Calcolo della portata di tracimazione per scogliere*

Il calcolo della portata di tracimazione per scogliere emerse è stato condotto con riferimento alla metodologia proposta nel Coastal Engineering Manual edito dal Coastal Engineering Research Center, che a sua volta fa riferimento agli studi condotti da van der Meer e Janssen (van der Meer & Janssen, 1995).

La metodologia utilizzata consente di valutare la portata media di tracimazione in funzione dei parametri caratteristici dell'onda incidente, della tipologia e della geometria della mantellata; in particolare, vengono considerati:

- pendenza del profilo batimetrico;
- pendenza della mantellata (tan α);
- tipo e disposizione degli elementi utilizzati per la mantellata;
- quota del coronamento rispetto al livello del mare incrementato del setup (R_C);
- profondità al piede dell'opera (d);
- periodo di picco (T_P);
- altezza significativa al piede dell'opera (H_S);
- incidenza dell'onda rispetto alla normale al paramento (β);
- stato del mare (swell o mare vivo).

La portata media di tracimazione, espressa in metri cubi al secondo per metro di sviluppo del coronamento, è data dalle seguenti espressioni:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_S^3}}\sqrt{\frac{s_{OP}}{\tan\alpha}} = 0.06\exp\left(-5.2\frac{R_C}{H_S}\frac{\sqrt{s_{OP}}}{\tan\alpha}\frac{1}{\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta}\right) \qquad \text{per } \xi_{OP} < 2,$$

valida per $0.3 < \frac{R_C}{H_S}\frac{\sqrt{s_{OP}}}{\tan\alpha}\frac{1}{\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta} < 2$,

$$\frac{q}{\sqrt{gH_S^3}} = 0.2\exp\left(-2.6\frac{R_C}{H_S}\frac{1}{\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta}\right) \qquad \text{per } \xi_{OP} > 2$$

$$\xi_{OP} = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s_{OP}}},$$

dove:

- x_{OP} rappresenta il rapporto tra altezza significativa locale e lunghezza d'onda al largo (ricavata in base al periodo di picco);
- i coefficienti $\gamma_r, \gamma_b, \gamma_h, \gamma_\beta$, già descritti nel precedente paragrafo, tengono conto rispettivamente della scabrezza della mantellata, della presenza di eventuali berme sommerse poste a profondità comprese tra la metà dell'altezza significativa al piede dell'opera e il livello del mare, della distribuzione statistica delle altezze d'onda in basso fondale (limitata nel caso in oggetto dal frangimento) e dell'incidenza della direzione media di propagazione rispetto alla normale al paramento (con coefficiente differenziato per condizioni di mare vivo o di swell).

2.3.4 Distribuzione statistica delle altezze d'onda in basso fondale

Le caratteristiche dell'onda in acque basse sono generalmente ricavate utilizzando un modello di propagazione dell'energia dell'onda a partire dai dati al largo. La maggior parte dei modelli a disposizione fornisce come risultato l'energia locale dell'onda (e, a seconda del modello selezionato, la sua distribuzione spettrale), ma non la distribuzione delle altezze d'onda, sebbene queste grandezze rivestano un ruolo molto importante nel progetto delle strutture marittime.

In acque profonde, il comportamento approssimativamente lineare delle onde permette di considerare un andamento gaussiano dei valori istantanei del livello del mare, che porta ad una distribuzione di Rayleigh delle altezze d'onda, univocamente determinata dal valore locale dell'energia.
La distribuzione statistica delle altezze d'onda in basso fondale non è invece rappresentabile con la distribuzione di Rayleigh; in particolare, nella zona in cui cominciano a frangere le onde più alte della mareggiata, la distribuzione delle altezze subisce sensibili variazioni.
Queste variazioni rivestono particolare importanza nello studio statistico del runup e della tracimazione di opere poste in basso fondale, come quelle in oggetto. In particolare, l'eliminazione progressiva (verso la riva) delle onde più alte comporta una riduzione sensibile del runup e della tracimazione (riferiti al percentile 2%), della quale viene tenuto conto attraverso un opportuno coefficiente di riduzione (γ_h) da applicare a runup e tracimazione.

L'approccio seguito per la valutazione della distribuzione statistica delle altezze d'onda all'interno della singola mareggiata è quello proposto da Battjes e Groenendijk (Battjes & Groenendijk, 2000).
Il metodo di calcolo proposto da Battjes e Groenendijk si basa sull'analisi e sulla parametrizzazione di dati di laboratorio relativi a studi condotti in canaletta. Tale parametrizzazione parte dall'ipotesi di considerare fenomeni in lenta evoluzione (batimetria con variazioni graduali), in maniera tale che la distribuzione delle altezze dipenda solamente da fattori locali. In questo modo si ottiene quello che viene comunemente chiamato "point model", la cui applicazione trova il suo campo di validità in acque poco profonde con topografia del fondale relativamente semplice (batimetria regolare e profili trasversali a debole pendenza).
La parametrizzazione dei dati utilizza una combinazione di due distribuzioni di Weibull, calibrate e validate con i dati di laboratorio. Come risultato si ottiene un modello di previsione in grado di fornire la distribuzione locale dell'altezza d'onda, utilizzando come dati di input l'energia locale dell'onda, la profondità e la pendenza del fondale.
L'equazione base del modello appena proposto si basa appunto sulla combinazione di due distribuzioni di Weibull, la cui espressione è riportata di seguito:

$$F(H) \equiv \Pr\{H \le H\} = \begin{cases} F_1(H) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{H}{H_1}\right)^{k_1}\right] & H \le H_{tr} \\ F_2(H) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{H}{H_2}\right)^{k_2}\right] & H \ge H_{tr} \end{cases},$$

dove H_{tr} rappresenta l'altezza d'onda di transizione, gli esponenti k_1 e k_2 sono dei parametri di forma correlati alla curvatura della distribuzione, H_1 e H_2 sono dei parametri di scala.

I parametri H_1 e H_2 sono parametri di scala privi di un significato fisico particolare e possono pertanto essere considerati alla stregua di costanti: uno dei due viene infatti considerato come parametro indipendente e l'altro viene sostituito dal valore dell'altezza quadratica media H_{rms}.

Al fine di risolvere l'equazione e calcolare il valore dei parametri appena descritti, si procede imponendo la continuità dell'equazione in corrispondenza dell'altezza di transizione H_{tr}. In prima analisi si determina il valore dei due parametri di forma, quindi si normalizzano tutte le altezze d'onda riportate nell'equazione rispetto all'altezza quadratica media H_{rms} ottenendo così il valore dell'altezza di transizione.
Successivamente, viene stabilita una relazione tra i parametri della distribuzione e i parametri caratteristici della batimetria e della mareggiata, quali la profondità (d), la pendenza locale del fondale e le caratteristiche dello spettro dell'energia. A tale scopo viene introdotto il coefficiente adimensionale $\psi \equiv \sqrt{m_0}/d$, il quale misura l'intensità relativa dell'onda. Il parametro m_0 rappresenta il momento di ordine zero dello spettro.
Il coefficiente ψ interviene direttamente nella formulazione dell'altezza quadratica media H_{rms}, la quale può essere espressa come:

$$H_{rms} \equiv (2.69 + \beta_{rms}\psi)\sqrt{m_0},$$

dove β_{rms}, in base al fit dei dati di laboratorio, può essere assunto pari a 3.24.
Per quanto riguarda l'altezza d'onda di transizione, essa assume espressioni differenti in relazione al valore del parametro ψ. In particolare, nel caso oggetto del presente studio, il valore di ψ risulta maggiore di 0.06; pertanto l'espressione proposta da Battjes e Groenendijk è la seguente:

$$H_{tr} \equiv (c_1 + c_2 \tan\alpha)d$$

dove c_1 e c_2, ricavati dal best fit dei dati di laboratorio, sono rispettivamente pari a 0.35 e 5.8, mentre $\tan\alpha$ rappresenta la pendenza del fondale.
Implementando le formule proposte si ottiene la tabella riportata nell'articolo di Battjes e Groenendijk (Coastal Engineering 40-2000 161-182, Tabella 2). Entrando in tabella con il valore dell'altezza di transizione normalizzata $\bar{H}_{tr} \equiv H_{tr}/H_{rms}$, si ottengono i corrispondenti valori di $H_{1/3}$, $H_{1/10}$, $H_{2\%}$, $H_{1\%}$ e $H_{0.1\%}$, sempre normalizzati in funzione di H_{rms}.
Nel caso in esame, volendo valutare il rapporto tra $H_{2\%}$ e $H_{1/3}$ per calcolare il coefficiente γ_h che tiene conto della distribuzione statistica delle altezze d'onda in basso fondale, i valori di input sono:

- profondità locale;
- pendenza locale del fondale ($\tan\alpha$);
- altezza significativa H_S (assunta corrispondente ad H_{m0}).

I valori del coefficiente di riduzione γ_h legato alla distribuzione statistica delle altezze d'onda in fondale risulta pari a 0.864.

2.3.5 Applicazione dei metodi di calcolo

Per quanto riguarda le opere a parete verticale (cassoni – sezioni 1 e 2), il calcolo della portata di tracimazione q è riportato in Tab. 2.2; mentre il calcolo della risalita e della tracimazione per la sezione in massi naturali (sezioni 3 e 4) è riportato in Tab. 2.3.

SEZIONE	$H_{coronamento}$ (m s.m.m.)	Sovralzo (m s.m.m.)	$H_{s,max}$ (m)	Incidenza β (°)	ONDA	γ_β	γ_s	q (l/s/m)
1	+5.5	+0.5	3.90	25	Lunga	0.91	0.78	8.5760
2	+5.5	+0.5	3.50	0	Lunga	1.00	0.78	6.9092

Tab. 2.2 – Risultati del della portata di tracimazione per strutture a parete verticale

SEZIONE	$H_{coronamento}$ (m s.m.m.)	Pendenza	Profondità (m s.m.m.)	Sovralzo (m s.m.m.)	$H_{s,max}$ (m)	T_p (s)	CONDIZIONI	$R_{2\%}$ (m s.m.m.)	q (l/s/m)
3	+5.5	1:2	-12.0	+0.5	3.90	13.1	swell	+5.55	2.15
							mare vivo	+5.48	1.91
4	+5.5	1:2	-6.0	+0.5	3.65	13.1	swell	+5.23	1.15
							mare vivo	+5.23	1.15

Tab. 2.3 – Risultati del calcolo di runup e portata di tracimazione per scogliere in massi naturali

2.3.6 Considerazioni sui livelli prestazionali delle opere

Per quanto riguarda il tratto in cassoni del molo di sopraflutto (sezioni 1 e 2), si ottengono valori di portata piuttosto elevati (pari rispettivamente a circa 8.6 e 6.9 l/s/m). Ne consegue che in condizioni estreme l'opera risulta insicura, sia con riferimento al transito di pedoni o veicoli che in relazione alla presenza di costruzioni o edifici a tergo del coronamento.
Pertanto come accennato al precedente paragrafo 2.1, si è optato per realizzare una struttura non accostabile, per la quale è accettabile una maggiore portata di tracimazione, senza rischio né per le vite umane, né per le infrastrutture retrostanti.
Vale comunque la pena di sottolineare che valori di tracimazione di questo ordine di grandezza non sono comunque in grado di determinare una trasmissione del moto ondoso oltre l'opera e, secondo approcci meno conservativi quali quelli del manuale EUROTOP (UK Environment Agency et al., 2007 e s.m.i.), potrebbero essere addirittura al limite della compatibilà con la presenza di ormeggi per grandi yacht, che, in base all'esperienza, si è preferito comunque evitare.

Per quanto riguarda, invece, il tratto di radice del molo di sopraflutto costituito da un scogliera con muro paraonde (sezioni 3 e 4), si ottengono valori di portata di tracimazione decisamente inferiori (pari rispettivamente a circa 2.0 e 1.2 l/s/m). Pertanto, dal punto di vista strutturale l'opera risulta sicura anche grazie alla presenza del masso di coronamento posto a protezione dei piazzali retrostanti; dal punto di vista funzionale, l'opera non risulta sicura in relazione al transito di pedoni e veicoli. Ne consegue che è necessario interdire il transito in prossimità del paramento nel caso di mareggiate eccezionali, ma si tratta in ogni caso di aree riservate al personale di cantiere.
Va tuttavia evidenziato che le condizioni di sicurezza per il transito dei pedoni, che vengono garantite per portate di tracimazione inferiori ad 1 l/s/m (nel caso di opere a scarpata), sono soddisfatte in tutto il tratto terminale della radice del molo (dalla sezione 4 verso costa, dove la frequentazione non è limitata), ovvero per profondità al piede dell'opera inferiori ai 6 m. Non è inoltre da escludere che tali livelli di sicurezza (portate di tracimazione inferiori a 1 l/s/m possano essere raggiunti anche per profondità maggiori; a tal proposito sarà di fondamentale importanza, in fase di progettazione definitivo-esecutiva, procedere con la verifica dei livelli prestazionali delle strutture di difesa attraverso prove su modello fisico.

Infine, per quanto concerne le infrastrutture presenti sui piazzali (ad es. l'area cantiere), non si riscontrano particolari problemi di sicurezza dal momento che le costruzioni verranno realizzate ad una adeguata distanza dal coronamento esterno della scogliera.

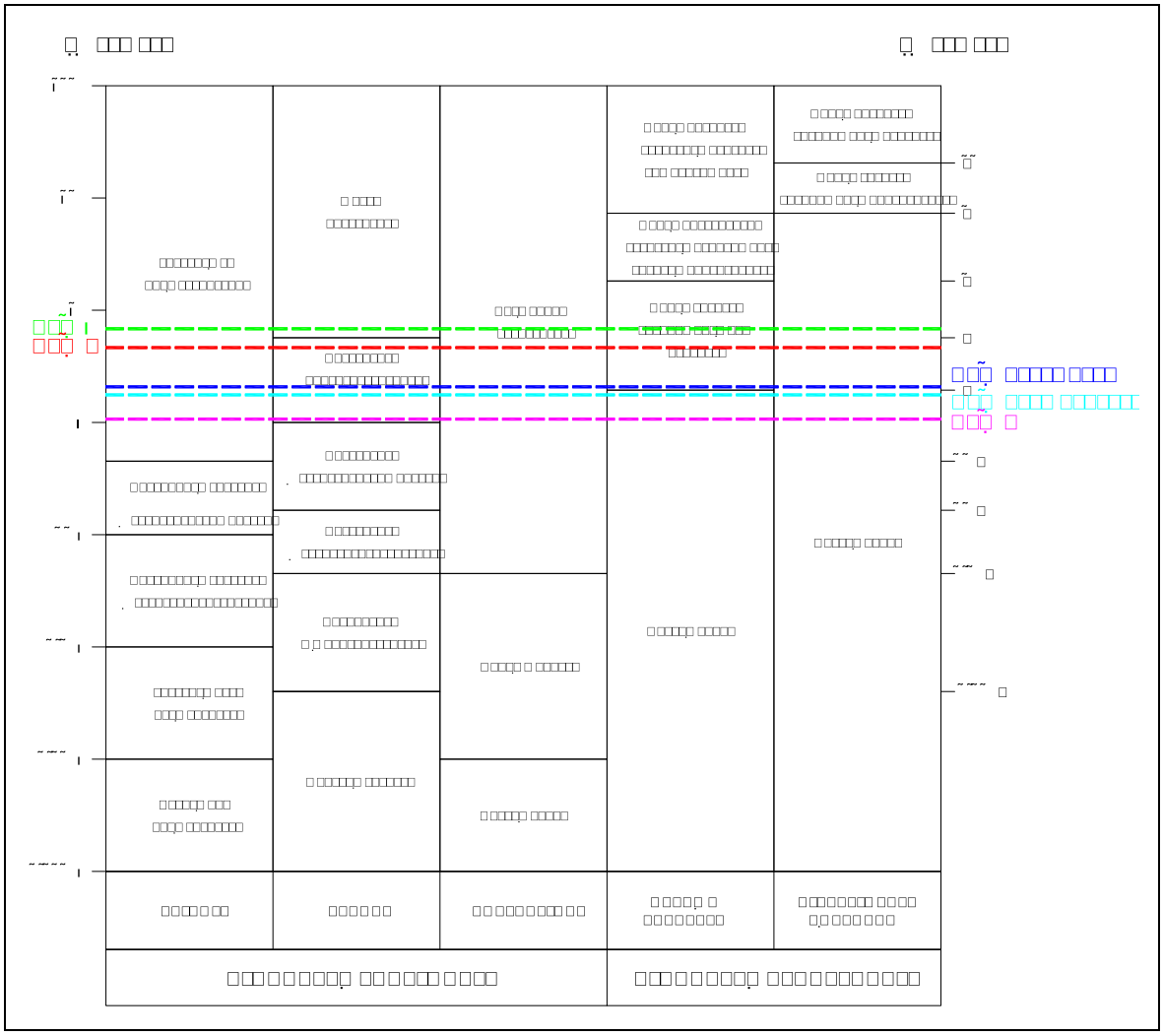

Fig. 2.5 – Sicurezza dell'opera

3 AGITAZIONE ONDOSA E VERIFICA DELLE CONDIZIONI DI COMFORT

Lo studio dell'agitazione interna al nuovo porto turistico è finalizzato alla stima delle altezze d'onda residue in seguito ad attacchi ondosi di una prefissata durata media annua e di determinati periodi di ritorno (cfr. "*Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*", A.I.P.C.N.-2002), e ha lo scopo di valutare il rispetto delle condizioni di sicurezza e di comfort per le imbarcazioni ormeggiate all'interno del porto stesso.

La verifica delle condizioni di agitazione residua nel bacino portuale per le condizioni più gravose per la sicurezza delle imbarcazioni ormeggiate è stata eseguita nella precedente "Relazione idraulico-marittima" (con riferimento alle condizioni "limite" e "di sicurezza" secondo le raccomandazioni AIPCN). Nel presente elaborato si è invece proceduto alla verifica delle condizioni di "comfort", che raccomanda valori di H_S inferiori a 0.15 m per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 gg/anno.

Lo studio è stato svolto considerando le mareggiate relative agli eventi ondosi con frequenza massima complessiva pari a 5 gg/anno ritenuti significativi per il clima locale del paraggio: in particolare (cfr. successivo paragrafo 3.2) sono stati studiati un evento di moto ondoso di Scirocco-Mezzogiorno caratterizzato, nel punto P, da frequenza pari a 5 gg/anno e da eventi di Grecale e Scirocco generati da eventi anemologici caratterizzati da frequenze pari a 5 gg/anno.

Lo studio è stato condotto tramite il modello matematico "CGWAVE" messo a punto dall'Università del Maine per l'U.S. Army Corps of Engineers e descritto in dettaglio nell'allegato "A".

3.1 Dominio di calcolo

Il dominio di calcolo è stato definito impiegando un contorno offshore di tipo semicircolare, che si estende verso il largo fino a profondità dell'ordine dei -25 m s.m.m., e un contorno inshore, che riproduce la configurazione della costa, delle opere presenti e del layout di progetto del nuovo porto.

Il dominio così definito è stato ricoperto con una mesh a maglie triangolari formata da elementi di dimensioni variabili dai 30 m, sul contorno offshore, ai 1.5 m, sul contorno inshore in prossimità e all'interno del porto (Fig. 3.1).

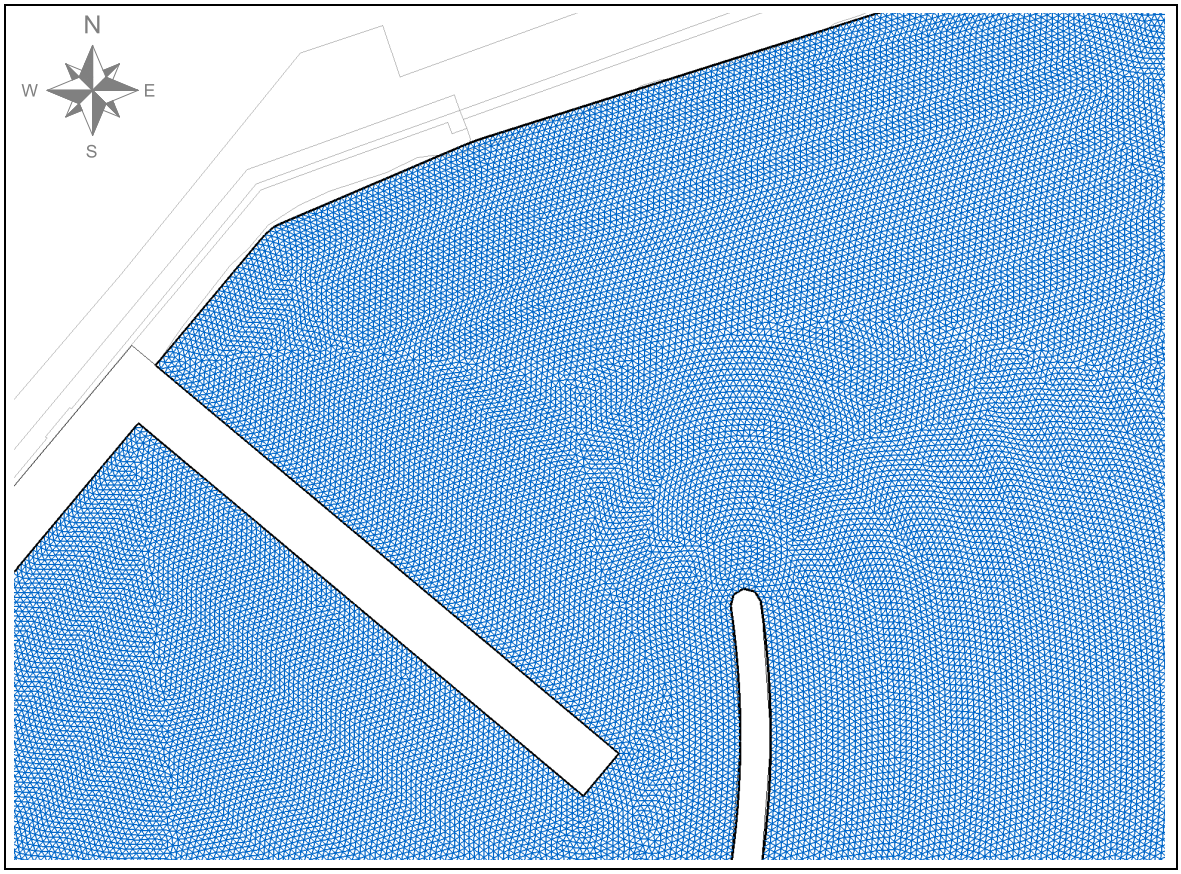

Fig. 3.1 – Particolare della mesh in prossimità dell'imboccatura del nuovo porto

I valori del coefficiente di riflessione, per ciascuna tipologia di elemento considerata all'interno del dominio di calcolo, sono riportati nella successiva Tab. 3.1 e nella Fig. 3.2.
I coefficienti di riflessione sono stimati in base a dati di letteratura e all'esperienza condotta su modello fisico nell'ambito dello studio di sezioni e condizioni di moto ondoso paragonabili. Per tipologie eventualmente non conformi a quelle esaustivamente documentate in letteratura, i valori della tabella sottostante vanno intesi come livelli prestazionali minimi.

Caratteristiche tratto	Coefficiente di riflessione
Scogliera in massi	0.40
Banchina antiriflettente	0.50
Banchina molo in cassoni antiriflettenti	0.60
Banchina molo in cassoni forati	0.75
Strutture a parete verticale/banchina	0.90

Tab. 3.1 – Coefficienti di riflessione degli elementi del contorno inshore

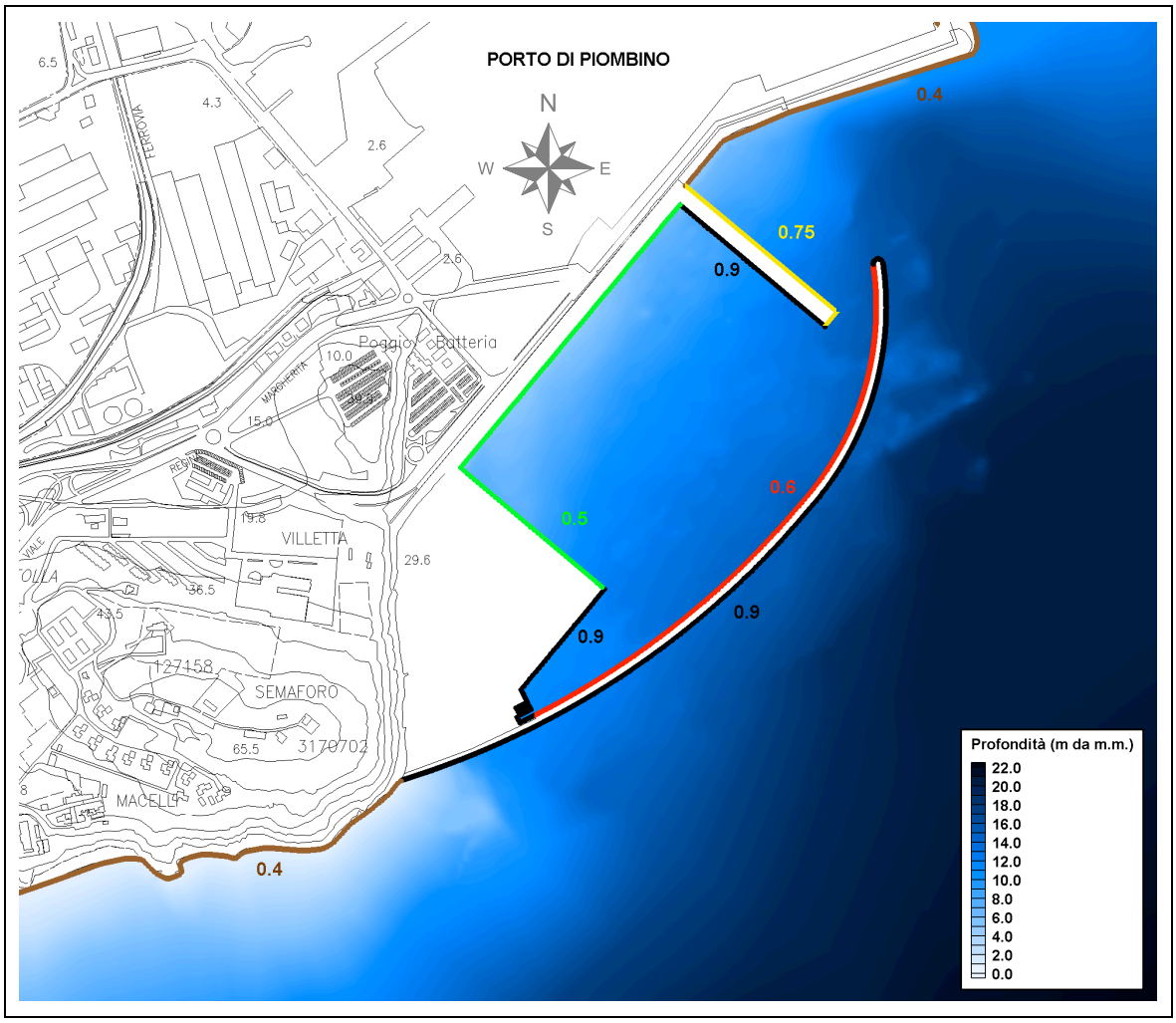

Fig. 3.2 – Coefficienti di riflessione e batimetria impiegati nello studio dell'agitazione interna

3.2 Dati di input

Lo studio della penetrazione è stato svolto con riferimento alle mareggiate associate ad eventi con frequenza annua pari 5gg/anno. Nei successivi paragrafi si riportano le caratteristiche delle mareggiate analizzate.

3.2.1 Mareggiate da eventi di moto ondoso

Le caratteristiche del clima locale del moto ondoso sono state ricavate nella precedente "Relazione idraulico-marittima" mediante la propagazione, con modello matematico, del clima dal largo al punto P. Di seguito si riportano le rose delle energie (Fig. 4.3), delle altezze massime (Fig. 3.3) e la curva di durata (Fig. 3.4) nel punto P sottocosta.
A partire dalla curva di durata è stato possibile ricavare l'altezza d'onda significativa caratterizzata da una frequenza pari a 5 gg/anno mentre dall'osservazione delle rose delle energie e delle altezze massime è stata individuata la direzione ritenuta più gravosa per lo studio dell'agitazione interna (direzione di Scirocco-Mezzogiorno). Il periodo da associare alla mareggiata così individuata è stato ricavato a partire dalle caratteristiche delle mareggiate nel punto P; per lo studio di tale mareggiata è stato, infine, assunto un valore di sovralzo nullo.
Di seguito nella successiva Tab. 3.2 si riportano le caratteristiche della mareggiata individuata.

TEST	Caratteristiche mareggiata	Setup (m s.m.m.)	H_S (m)	T_{01} (s)	Dir (°N)
13	Freq. = 5 gg/ anno	+0.00	**1.66**	8.0	165

Tab. 3.2 – Caratteristiche della mareggiata impiegata nello studio della penetrazione

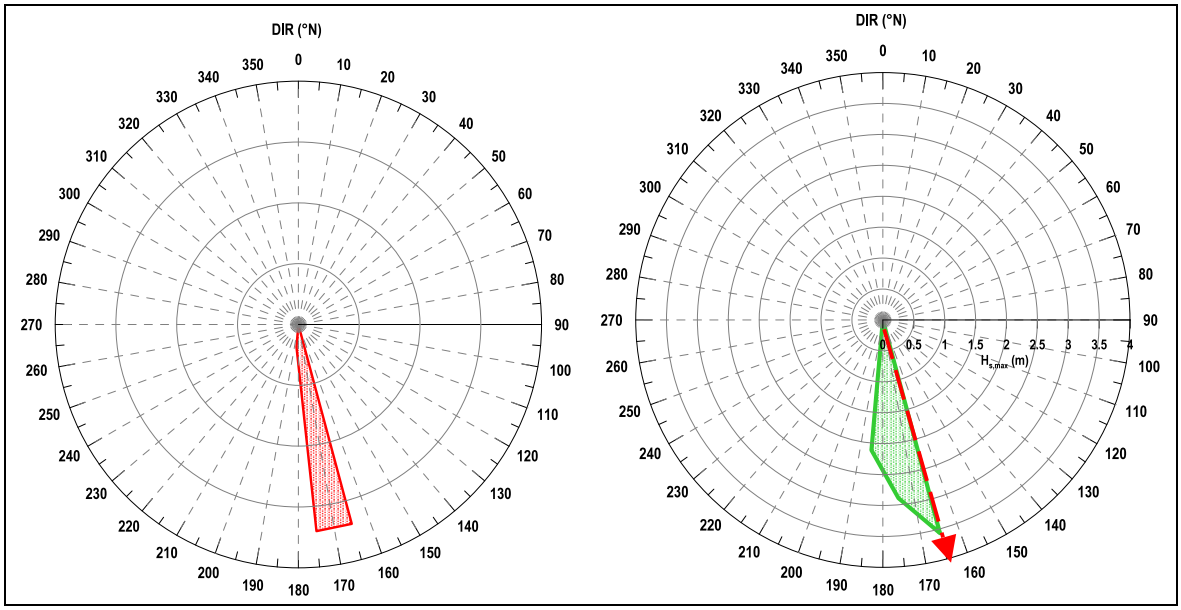

Fig. 3.3 – Rosa delle energie (a sinistra) e delle altezze massime (a destra) nel punto P

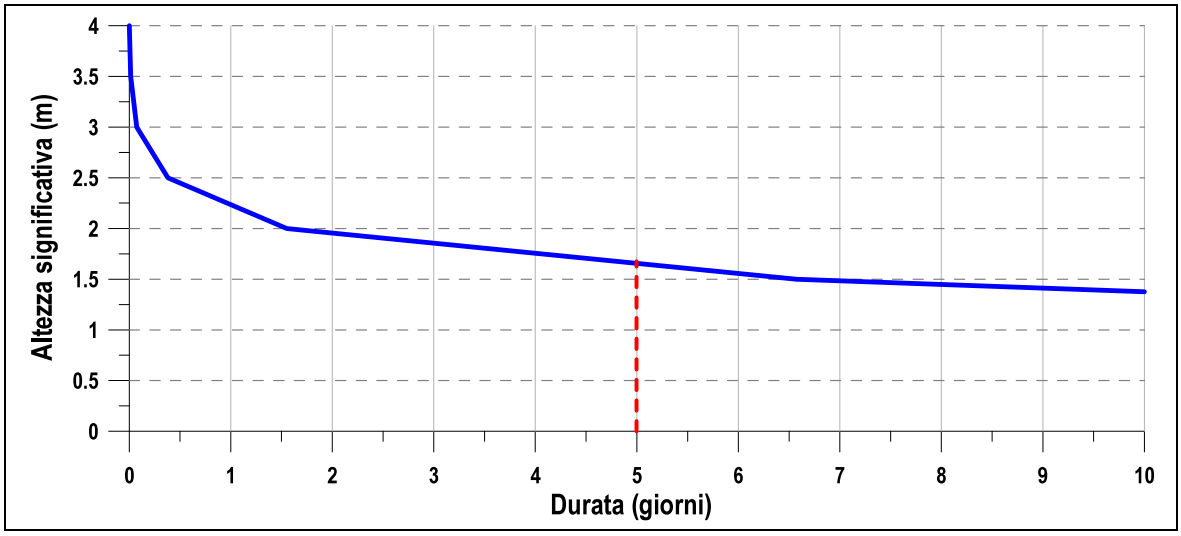

Fig. 3.4 – Curva di durata nel punto P

3.2.2 Mareggiate generate localmente da vento

Le caratteristiche delle mareggiate generate da eventi anemologici caratterizzati da una frequenza pari a 5 gg/anno sono state ricavate mediante studio su modello matematico. Nel dettaglio, a partire dai dati di vento disponibili (vedi paragrafo 5 della precedente "Relazione idraulico-marittima"), è stata ricavata la curva di durata al largo (Fig. 3.5) per i due settori caratteristici del paraggio e successivamente si è proceduto allo studio della generazione del moto ondoso da vento mediante il modello STWAVE.

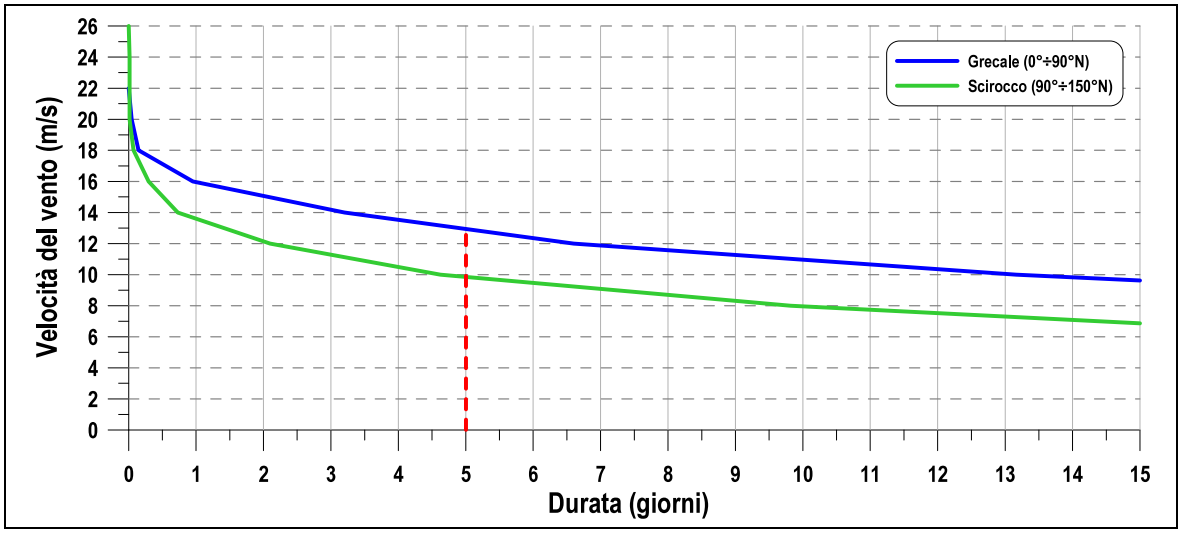

Fig. 3.5 – Curva di durata degli eventi anemologici al largo

3.2.2.1 Eventi anemologici analizzati

La generazione del moto ondoso, a partire dai dati di vento, mediante il modello matematico STWAVE è stata condotta utilizzando come dominio la griglia impiegata nello studio di generazione della precedente "Relazione idraulico-marittima", ricostruendo le mareggiate in grado di generarsi all'interno del Golfo di Follonica.
Analogamente a quanto svolto nel precedente studio le direzioni associate alle mareggiate sono state scelte in base all'esposizione del paraggio (lunghezze dei fetch) e alla posizione del nuovo approdo: 60°N rappresentativa del settore di Grecale (0°÷90°N) e 120°N rappresentativa del settore di Levante-Scirocco (90°÷150°N). Nella successiva (Tab. 3.3) si riportano le caratteristiche degli eventi anemologici analizzati.

TEST	Caratteristiche mareggiata	Settore di provenienza	v (m/s)	Dir (°N)
14	Freq. = 5 gg/anno	0°-90°N	12.94	60
15	Freq. = 5 gg/anno	90°-150°N	9.86	120

Tab. 3.3 – Caratteristiche fornite in input al codice STWAVE per la generazione del moto ondoso a partire dai dati di vento (punto C.N.R.)

3.2.2.2 Piani d'onda e caratteristiche degli eventi generati

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati delle simulazioni di generazione del moto ondoso a partire da dati di vento per i settori di Grecale e Levante-Scirocco (TEST 14 - Fig. 3.6 e TEST 15 - Fig. 3.7). Le figure rappresentano, in termini di contour colorati, le altezze d'onda significativa, mentre le direzioni locali dell'onda sono indicate mediante vettori il cui modulo è proporzionale all'altezza d'onda significativa. Per ciascun TEST si riportano i risultati con riferimento ad un dettaglio della griglia di calcolo, centrato sul golfo di Follonica.

Dai risultati si osserva che le mareggiate provenienti da Scirocco (120°N), in ragione dei maggiori fetch (rispetto a quelle di Grecale – 60°N), arrivano di fronte al paraggio con altezze significative maggiori. In particolare, di fronte all'opera, le massime altezze d'onda significativa risultano dell'ordine di 0.5 m per la mareggiata da 60°N e inferiori al metro per quella da 120°N.
A partire da tali risultati è stato possibile ricavare le caratteristiche delle mareggiate, in corrispondenza del contorno del modello CGWAVE, impiegate successivamente nello studio della penetrazione del moto ondoso per la verifica delle condizioni di "*comfort*" (Tab. 3.4).

TEST	Caratteristiche mareggiata	Setup (m s.m.m.)	H_S (m)	T_{01} (s)	Dir (°N)
16	Freq. = 5 gg/ anno	+0.00	**0.53**	3.1	67
17	Freq. = 5 gg/ anno	+0.00	**0.85**	3.1	120

Tab. 3.4 – Caratteristiche della mareggiata impiegata nello studio della penetrazione

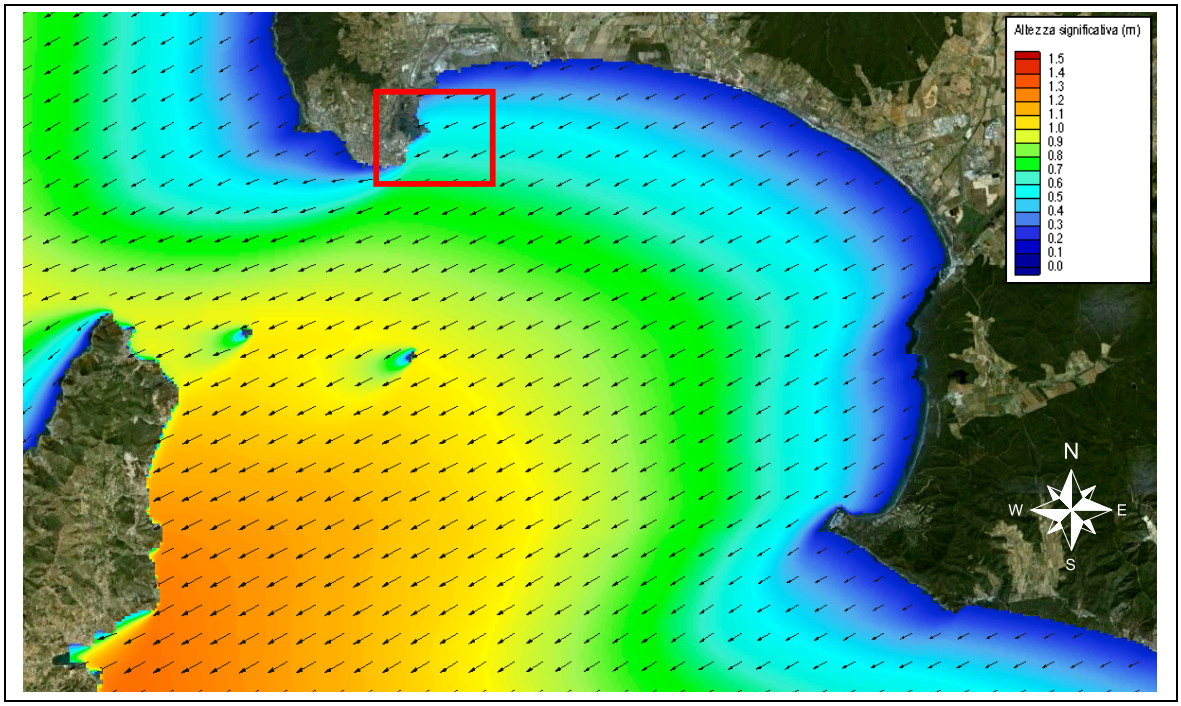

Fig. 3.6 – TEST 14 - Caratteristiche al largo:
v = 12.94 m/s, Dir = 60°N, Frequenza = 5 gg/anno

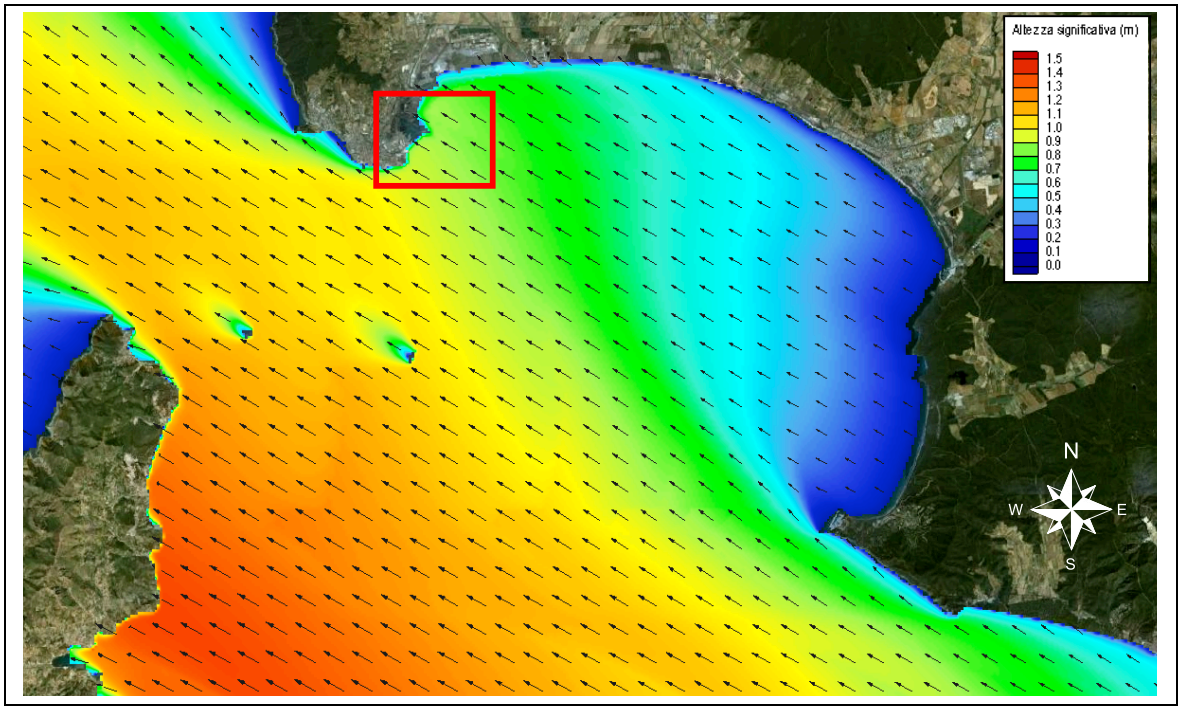

Fig. 3.7 – TEST 15 - Caratteristiche al largo:
v = 9.86 m/s, Dir = 120°N, Frequenza = 5 gg/anno

3.3 Verifica delle condizioni di comfort

Lo studio della penetrazione mediante CGWAVE è stato svolto, con riferimento alle mareggiate ricavate nei precedenti paragrafi, al fine di valutare l'agitazione ondosa all'interno del porto, in termini di altezza d'onda significativa, verificando che le altezze d'onda residue all'interno del bacino portuale fossero ammissibili in relazione alle condizioni di "comfort" raccomandate dall'A.I.P.C.N. (H_S < 0.15 m). Le caratteristiche delle mareggiate impiegate nello studio sono riportate nella Tab. 3.5.
I risultati ottenuti dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso, in termini di agitazione ondosa all'interno del bacino portuale, sono riportati nelle figure alle pagine seguenti.
Le figure rappresentano mediante gradazioni cromatiche le caratteristiche locali della mareggiata: in Fig. 3.8, Fig. 3.11 e in Fig. 3.14 è riportato l'andamento delle creste, mentre in Fig. 3.9, Fig. 3.12, e in Fig. 3.15 sono riportate le altezze d'onda significativa nei pressi del costruendo porto e all'interno del bacino portuale. Si sottolinea che la scala cromatica dell'altezza d'onda significativa adottata per la mareggiata caratterizzata da altezze maggiori (TEST 13) è stata impostata ad un valore massimo pari a 3 m, mentre per le altre mareggiate (TEST 16 e TEST17) la scala cromatica è stata impostata ad un valore massimo pari a 1.3 m.
La verifica del rispetto delle condizioni di sicurezza è stata svolta riportando i risultati in funzione del valore d'altezza d'onda raccomandato da AIPCN, impostando la scala cromatica ad un valore massimo pari a 15 cm, vedi Fig. 3.10, Fig. 3.13 e Fig. 3.16: le zone in rosso corrispondono a punti nei quali l'altezza significativa eccede i valori consigliati. I risultati sono stati sintetizzati nella successiva in termini di altezza d'onda significativa residua massima all'interno del bacino portuale. Non è stata considerata la generazione all'interno del bacino, in quanto si ritiene che, in esercizio, la presenza di pontili e imbarcazioni non permetta la generazione di moto ondoso di entità significativa.

Le simulazioni hanno evidenziato la sostanziale efficacia della configurazione delle opere foranee nella protezione degli specchi acquei interni: l'agitazione residua all'interno del bacino portuale, nelle aree destinate agli ormeggi, risulta ovunque accettabile in relazione ai valori consigliati dall'A.I.P.C.N. per le condizioni di comfort, con valori massimi dell'ordine dei 12 cm. Si può infine notare che valori di altezza d'onda prossimi al valore limite sono raggiunti solo in prossimità dell'imboccatura portuale dove non sono previsti ormeggi.

TEST	Caratteristiche TEST	Sovralzo (m s.m.m.)	H_S (m)	T_{01} (s)	Dir (°)
13	Scirocco, Freq. = 5 gg/ anno	+0.00	**1.66**	8.0	165
16	Grecale da vento, Freq. = 5 gg/ anno	+0.00	**0.53**	3.1	67
17	Scirocco da vento, Freq. = 5 gg/ anno	+0.00	**0.85**	3.1	120

Tab. 3.5 – Caratteristiche delle mareggiate considerate nello studio dell'agitazione ondosa

TEST	H_S max [m]
13	0.12
16	0.08
17	0.09

Tab. 3.6 – Sintesi dei risultati ottenuti in termini di altezza d'onda massima nella zona degli ormeggi

3.3.1 Agitazione interna TEST 13 – mareggiata di Scirocco – Frequenza 5gg/anno

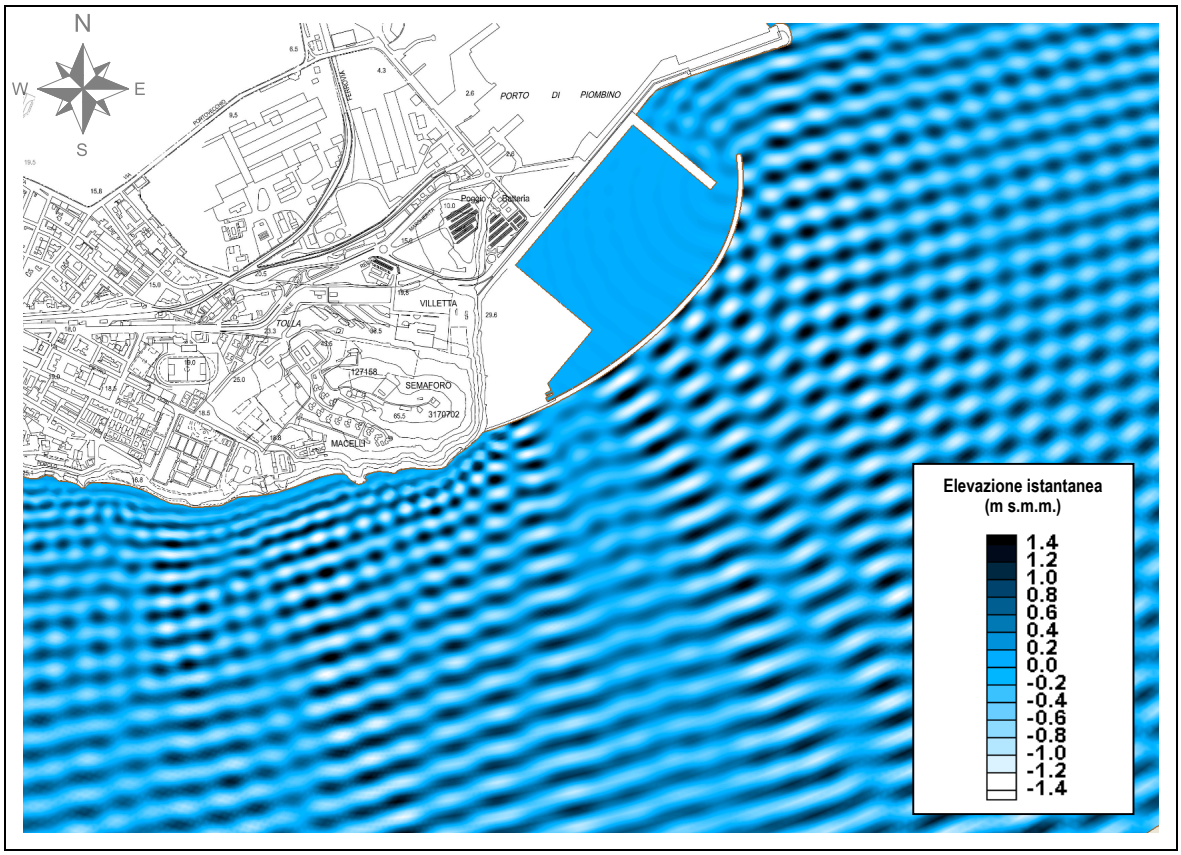

Fig. 3.8 – TEST 13 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

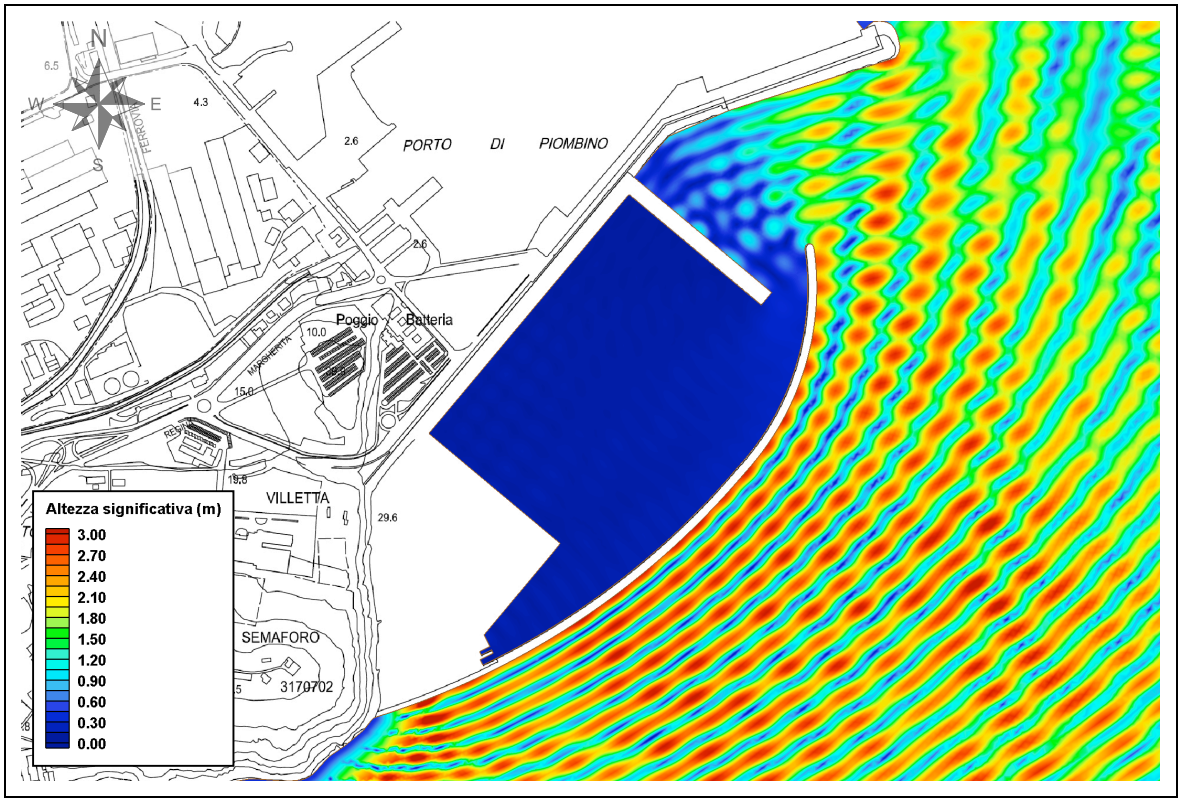

Fig. 3.9 – TEST 13 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

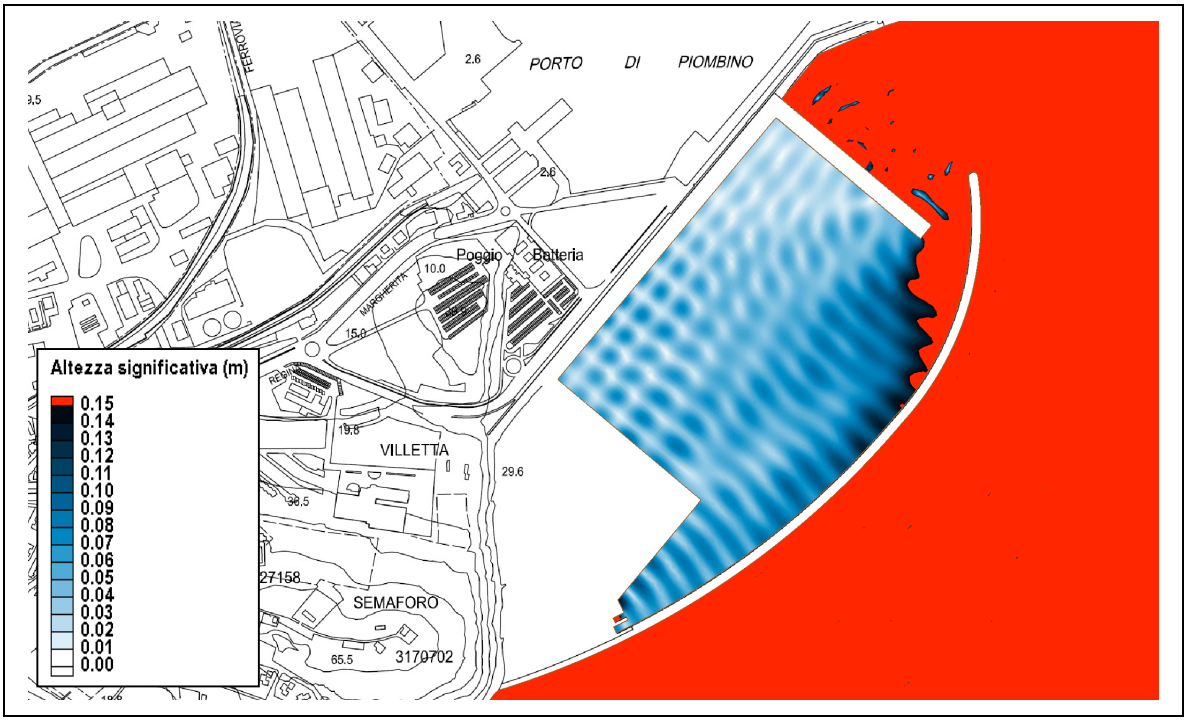

Fig. 3.10 – TEST 13 – Verifica delle condizioni di comfort

3.3.2 Agitazione interna TEST 16 – mareggiata di Grecale da vento – Frequenza 5gg/anno

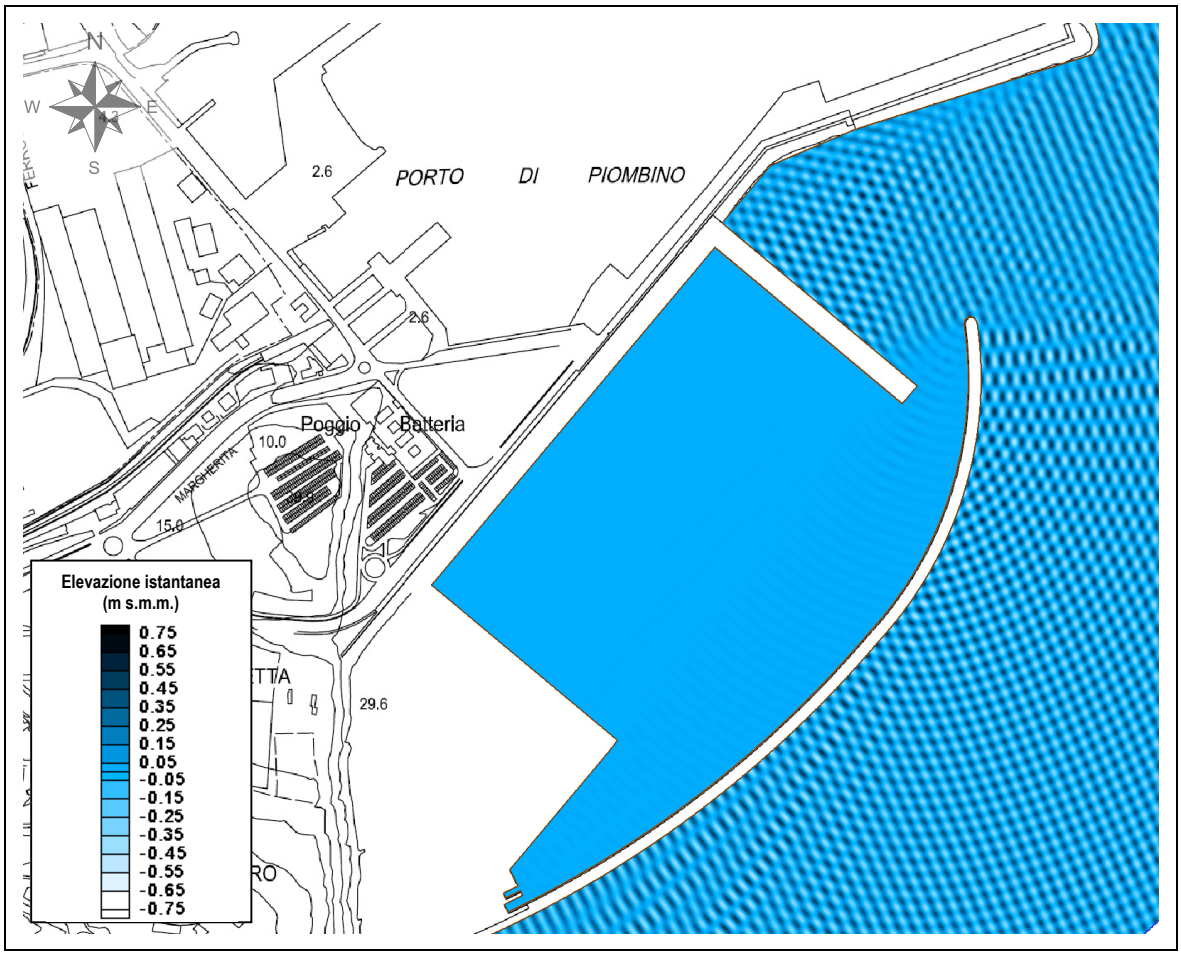

Fig. 3.11 – TEST 16 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

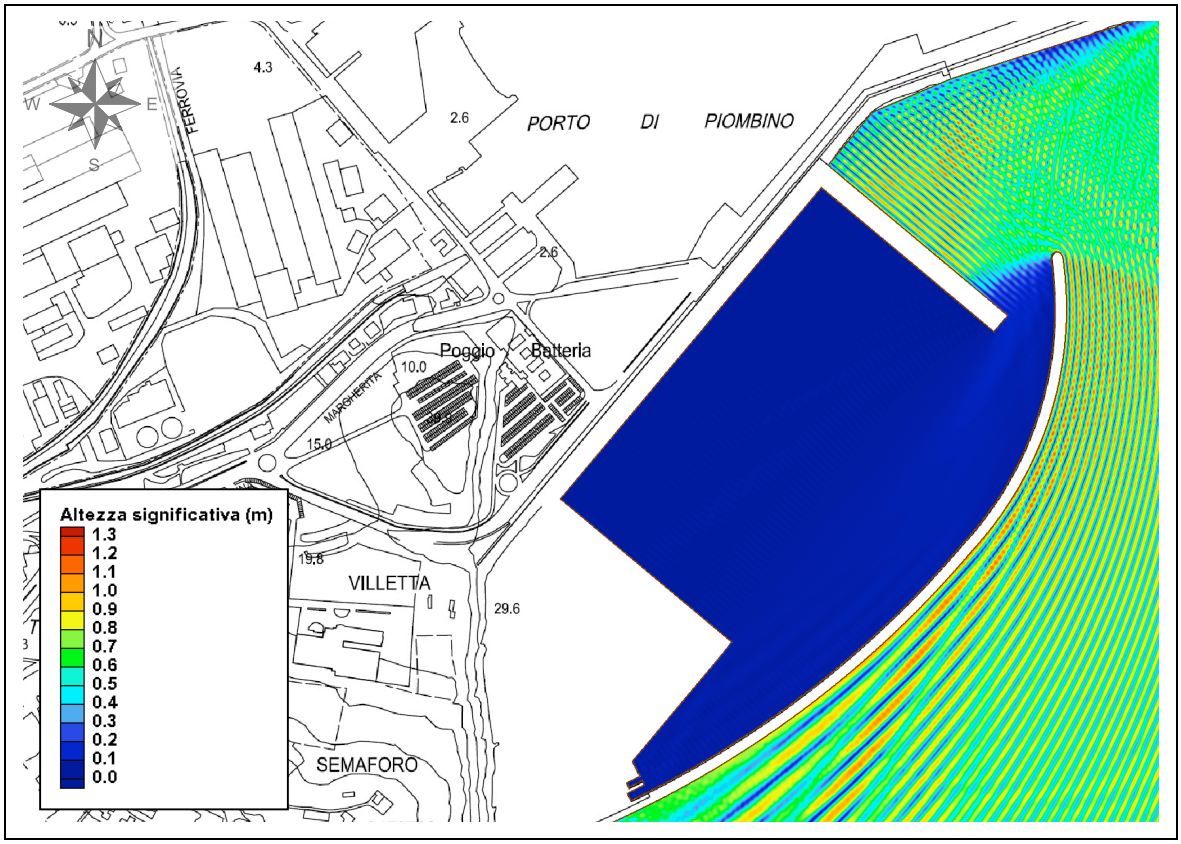

Fig. 3.12 – TEST 16 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

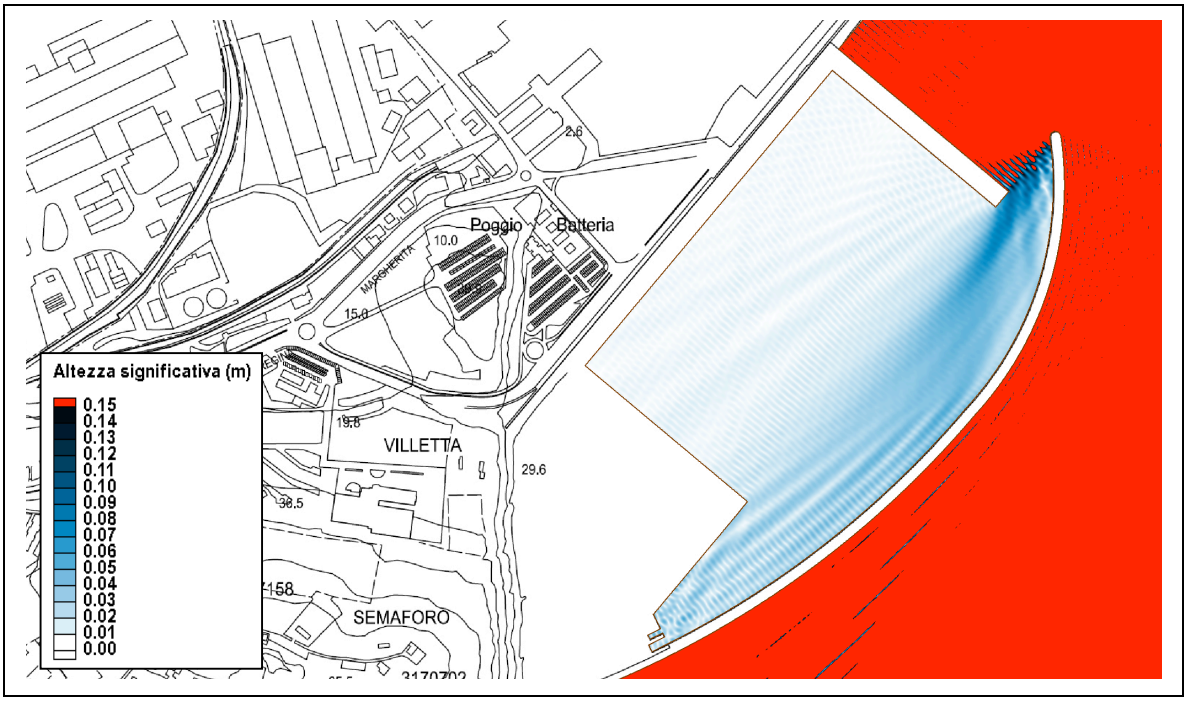

Fig. 3.13 – TEST 16 – Verifica delle condizioni di comfort

3.3.3 Agitazione interna TEST 17 – mareggiata di Scirocco da vento – Frequenza 5gg/anno

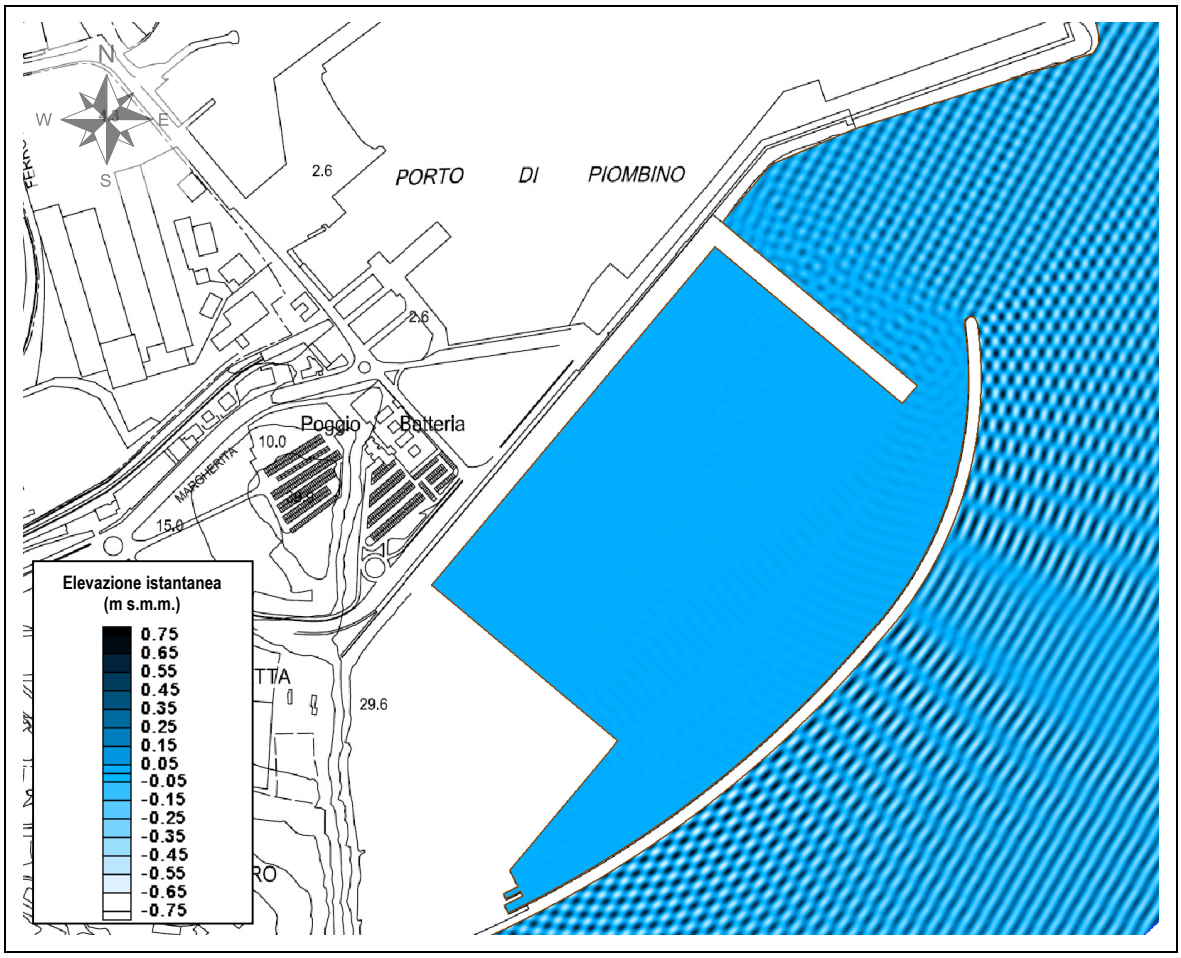

Fig. 3.14 – TEST 17 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

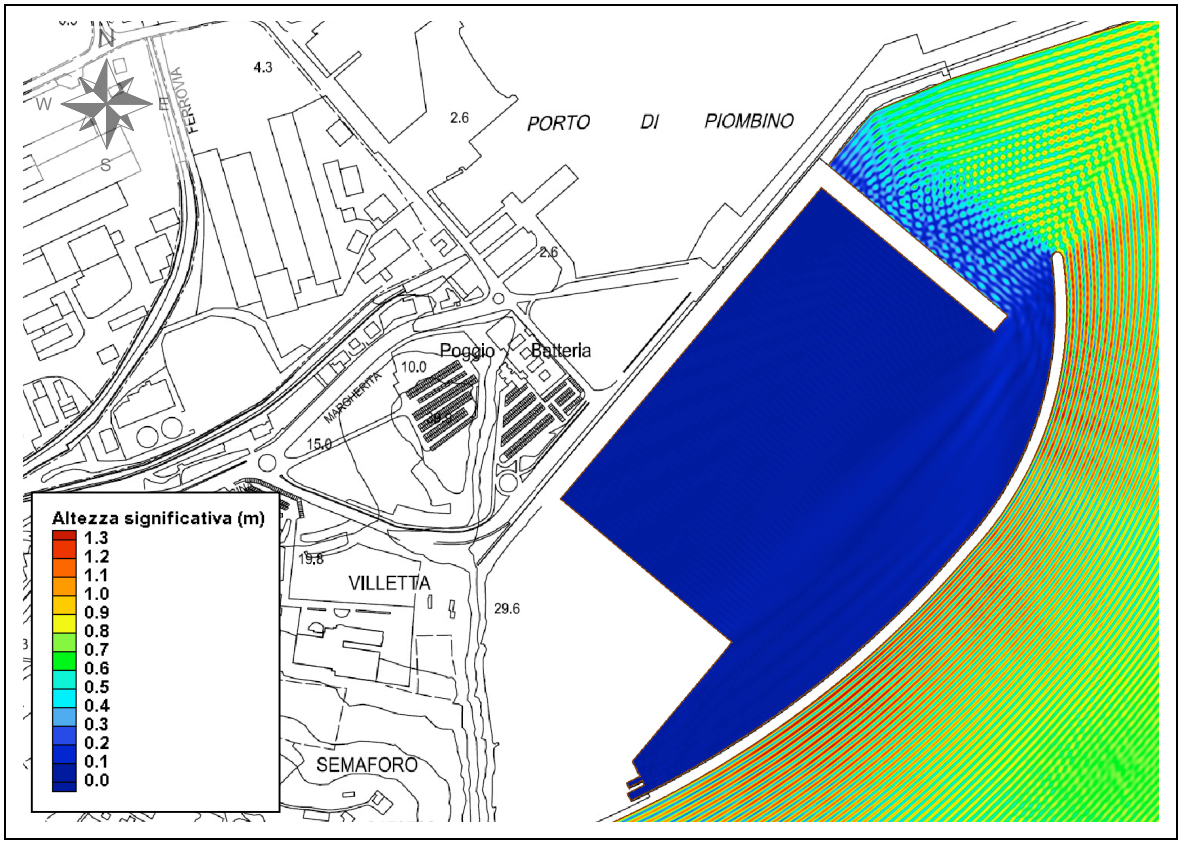

Fig. 3.15 – TEST 17 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

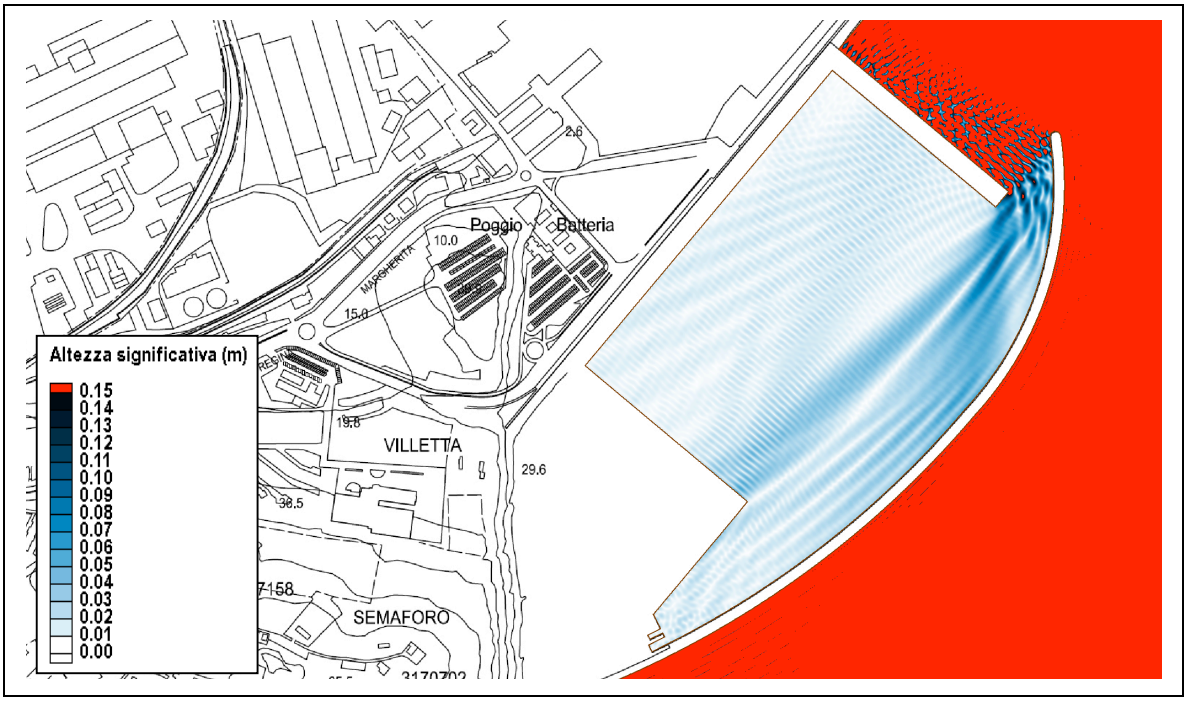

Fig. 3.16 – TEST 17 – Verifica delle condizioni di comfort

4 STUDIO DELLA RISONANZA DEL BACINO

Lo studio della risonanza è stato svolto dapprima individuando, attraverso formulazioni teoriche, i periodi in grado di mettere in risonanza il bacino e successivamente valutando con un modello matematico, nel campo delle onde da vento, quali di questi periodi potessero risultare critici per il bacino in questione.
Lo studio è stato infatti approfondito attraverso l'applicazione del modello matematico *CGWAVE* (basato sull'approssimazione ellittica della mild slope equation, ed in grado di tenere conto di rifrazione, diffrazione e riflessione), indagando i periodi di risonanza più significativi, al fine di evidenziare eventuali comportamenti singolari del bacino.

4.1 Calcolo dei periodi di risonanza

Il fenomeno della risonanza all'interno di una bacino è legato alla formazione di onde stazionarie; le possibili oscillazioni di risonanza possono esser individuate ponendo due pareti verticali agli antinodi. Questo tipo di onde possono generalmente essere originate da terremoti, azioni impulsive del vento sulla superficie marina o in seguito all'ingresso di onde all'interno del bacino. I vari modi in cui il bacino può entrare in risonanza dipendono sostanzialmente dalla naturale frequenza di risposta del bacino, ovvero dalla sua geometria.

Uno degli approcci più utilizzati per calcolare il periodo di risonanza di un bacino è quello di schematizzare il bacino stesso come una struttura rettangolare (di larghezza infinita) caratterizzata da una lunghezza L_B e da una profondità h. Per un porto chiuso di forma approssimativamente rettangolare le onde che entrano attraverso un'apertura o una bocca nei frangiflutti con periodo pari a quello di risonanza possono causare significative agitazioni qualora non esista un efficace meccanismo di dissipazione dell'energia (in questa analisi trascurato in ragione della conservatività dei risultati).
L'approccio di calcolo si basa sull'assunzione che il bacino sia caratterizzato da contorni verticali; va tuttavia evidenziato che anche contorni non verticali (come spiagge o scogliere) possono dar luogo ad importati fenomeni di riflessione se le onde incidenti sono estremamente lunghe.

Il periodo di risonanza è determinato individuando il corretto valore della lunghezza d'onda caratteristico del bacino per quella determinata profondità, utilizzando la teoria lineare dell'onda. L'espressione utilizzata per il calcolo del periodo di risonanza è la seguente:

$$T = \frac{2L_B}{nc},$$

dove *n* rappresenta il numero dei modi di oscillazione del bacino e *c* è la celerità dell'onda.
In generale, nei bacini naturali, la complessa geometria e la profondità variabile rendono difficoltosa l'applicazione di tale approccio, anche se esso è comunque utile per ottenere indicazioni di prima approssimazione.

Nel caso specifico, poiché il nuovo bacino portuale è caratterizzato da una forma regolare (pressoché rettangolare), l'approccio di calcolo sopra descritto ben si presta a determinare i periodi di risonanza caratteristici dei principali modi di oscillazione del bacino.
Considerando che l'opera verrà realizzata su fondali di una certa rilevanza (profondità medie di 10 m), per il calcolo della celerità dell'onda sono state utilizzate le formule proposte in letteratura per acque intermedie (valide per rapporti h/L tra profondità bacino e lunghezza d'onda compresi tra 0.04 e 0.5).
Di conseguenza il calcolo del periodo di risonanza è stato condotto per via iterativa utilizzando la seguente espressione per il calcolo della celerità dell'onda:

$$c = \frac{g\,T}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi\,h}{L}\right).$$

I risultati sono rappresentati graficamente nella successiva Fig. 4.1

Alcuni dei periodi individuati risultano al di fuori del range di periodi significativi per il paraggio in questione (ovvero di quelli potenzialmente ottenuti dalla generazione da vento). Dall'analisi del clima ondoso al largo del paraggio si può infatti ricavare che per periodi superiori ai 15/16 s la frequenza degli eventi ondosi (cfr. successiva Fig. 4.2) risulta essere pressoché nulla; analogamente si può ricavare che a periodi superiori ai 15/16 s l'energia associata agli eventi ondosi risulta bassa o nulla (cfr. successiva Fig. 4.3).

I periodi di risonanza significativi per il bacino e il paraggio in questione risultano quindi essere quelli inferiori ai 16 s; conseguentemente lo studio su modello è stato svolto limitatamente ai periodi compresi tra i 16 s e i 7 s (cfr. periodi indagati, indicati nelle Fig. 4.2 e Fig. 4.3)

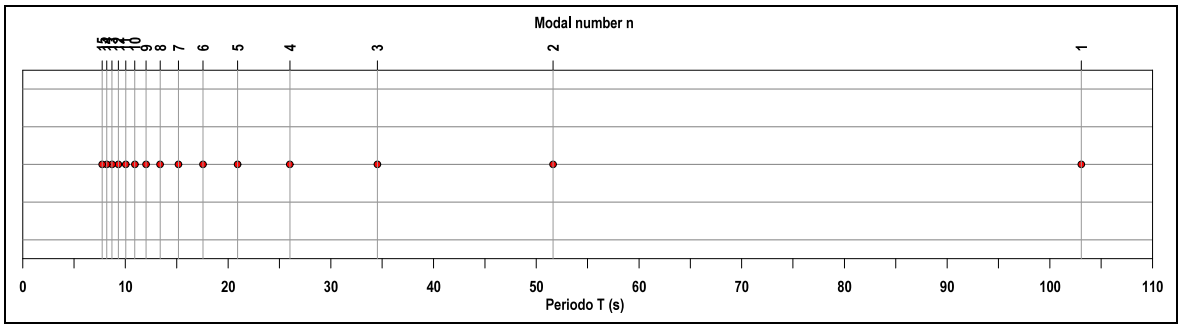

Fig. 4.1 – Periodi di risonanza del bacino

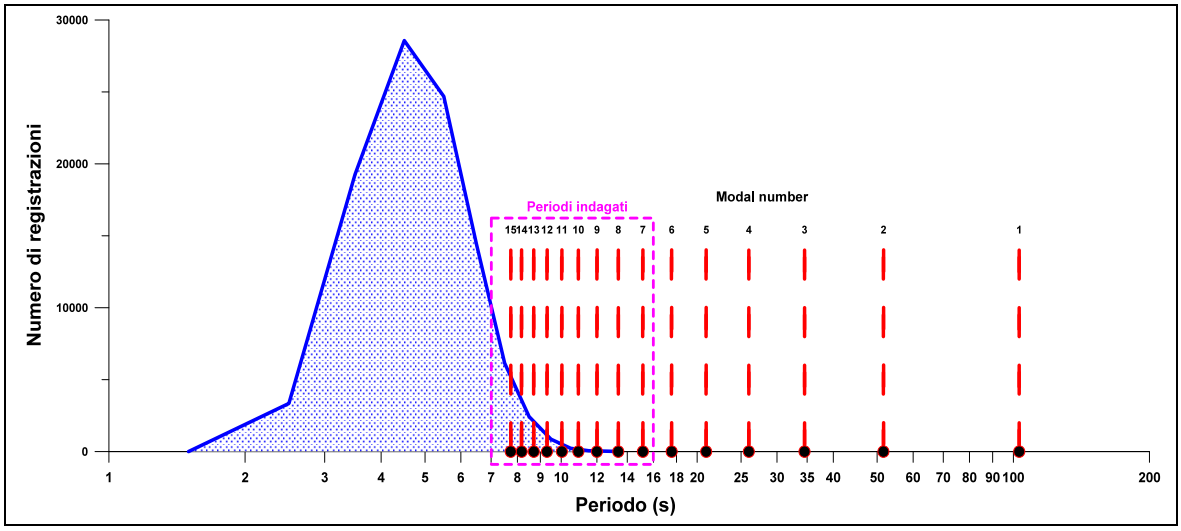

Fig. 4.2 – Numero di registrazioni degli eventi ondosi al largo in funzione del periodo e periodi di risonanza del bacino

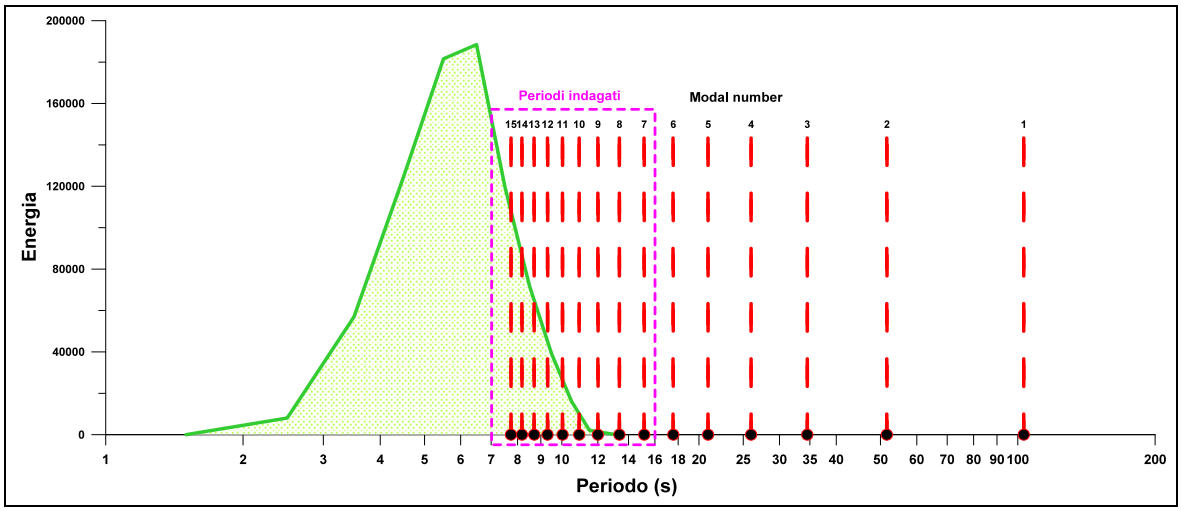

Fig. 4.3 – Energia degli eventi ondosi al largo in funzione del periodo e periodi di risonanza del bacino

4.2 Studio su modello

Lo studio è stato condotto tramite il modello matematico "CGWAVE" messo a punto dall'Università del Maine per l'U.S. Army Corps of Engineers e descritto in dettaglio nell'allegato "A".

Lo studio è stato svolto valutando la penetrazione del moto ondoso di mareggiate di altezza d'onda unitaria (H_S = 1 m) per diversi periodi compresi nel range dai 7 s ai 16 s individuato nel paragrafo precedente. La direzione di provenienza della mareggiata è stata individuata, a partire dalle caratteristiche locali del clima meteomarino (frequenza e energia), considerando la direzione più sfavorevole per la penetrazione del moto ondoso. Nella successiva Tab. 4.1 si riportano le caratteristiche delle mareggiate considerate per lo studio su modello della risonanza.
Il dominio di calcolo impiegato è quello definito nella precedente "Relazione idraulico-marittima" e richiamato nel precedente paragrafo 3.1.

I risultati ottenuti dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso, in termini di agitazione ondosa all'interno del bacino portuale, sono riportati nelle figure alle pagine seguenti.
Le figure rappresentano mediante gradazioni cromatiche le caratteristiche locali della mareggiata: nella Fig. 4.6, Fig. 4.8, Fig. 4.10, Fig. 4.12, Fig. 4.14, Fig. 4.16, Fig. 4.18, Fig. 4.20, Fig. 4.22 e Fig. 4.24 è riportato l'andamento delle creste, mentre nella Fig. 4.7, Fig. 4.9, Fig. 4.11, Fig. 4.13, Fig. 4.15, Fig. 4.17, Fig. 4.19, Fig. 4.21, Fig. 4.23 e Fig. 4.25 sono riportate le altezze d'onda significativa nei pressi del costruendo porto e all'interno del bacino portuale.
Si ricorda che lo studio è stato svolto considerando mareggiate con altezza significativa unitaria (e direzione di provenienza pari a 160°N, corrispondente approssimativamente al picco energetico del clima locale), conseguentemente i valori di altezza riportati nelle figure possono essere interpretati come rapporto tra l'altezza d'onda risultante H e l'altezza d'onda incidente Hi all'esterno (H/Hi).

Per una miglior lettura i risultati delle simulazioni sono stati sintetizzati in termini di valori di altezza massima rilevata (cfr. successiva Fig. 4.4) in tre diverse zone del bacino portuale (cfr. successiva Fig. 4.5); nel grafico sono stati riportati anche i periodi di risonanza ricavati nel precedente paragrafo.
Si sottolinea che dalla valutazione sono stati esclusi i due bacini dei travel lift (nella darsena tecnica) dove, a causa delle riflessioni multiple causate dalla singolare conformazione, si evidenziano alcune singolarità
I risultati ottenuti non evidenziano singolarità rilevanti in termini di agitazioni ondosa all'interno del bacino portuale; per il periodo di 14 s, e in parte per quello di 9 s, si osserva un incremento della penetrazione del moto ondoso e di conseguenza delle altezze significative all'interno del bacino portuale, che tuttavia risultano assai limitate.

TEST	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
H_S (m)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
T_{01} (s)	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0
Dir (°)	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160

Tab. 4.1 – Mareggiate considerate per lo studio su modello della risonanza

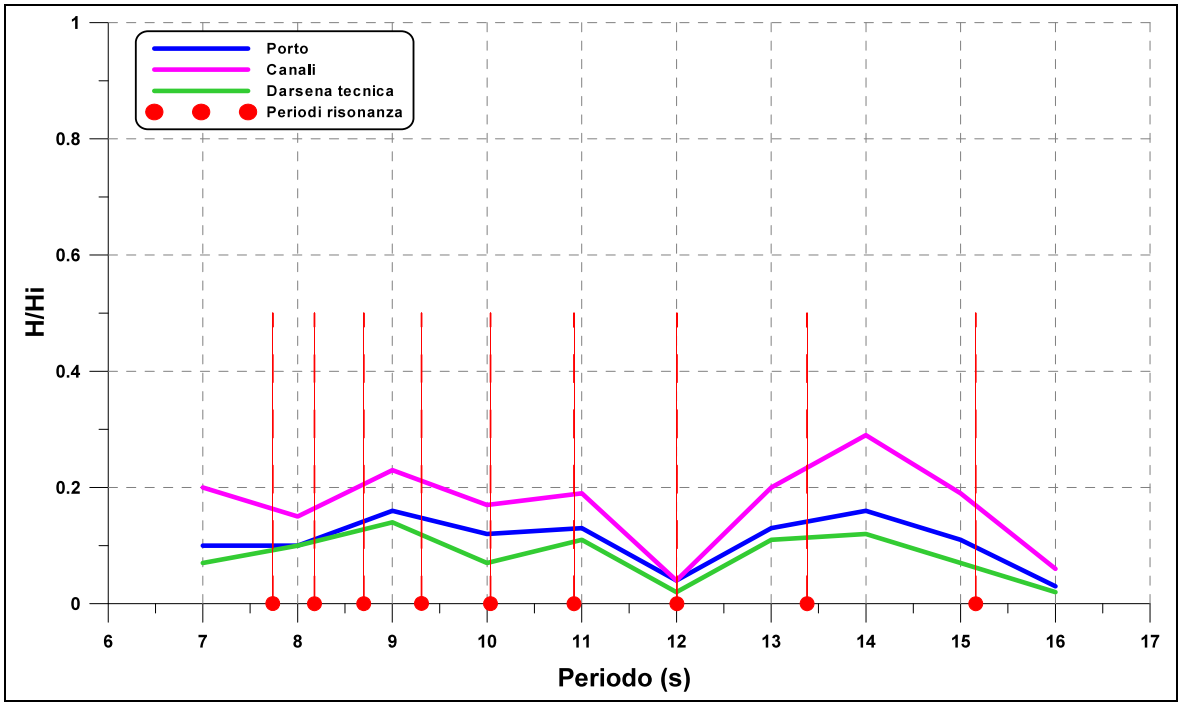

Fig. 4.4 – Valori massimi delle altezze d'onda significative nelle diverse zone del porto

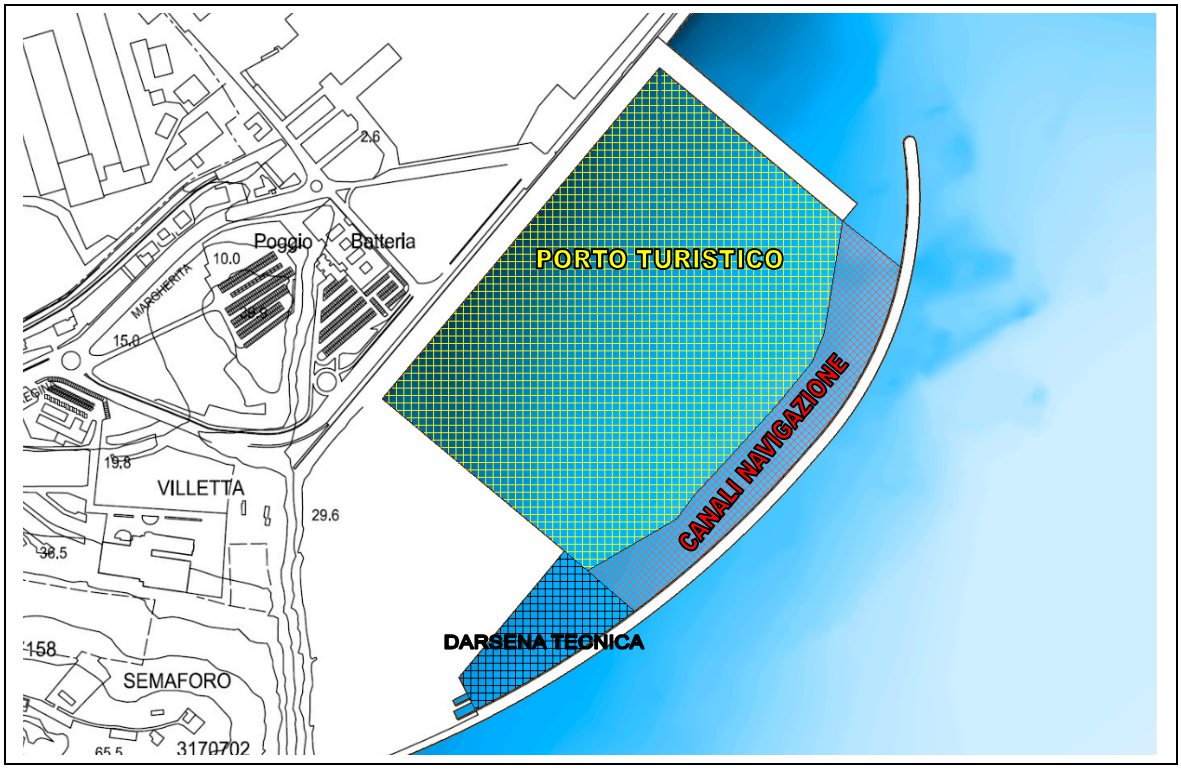

Fig. 4.5 – Individuazione delle zone del bacino portuale

4.2.1 Agitazione interna TEST 18 – periodo 7 s

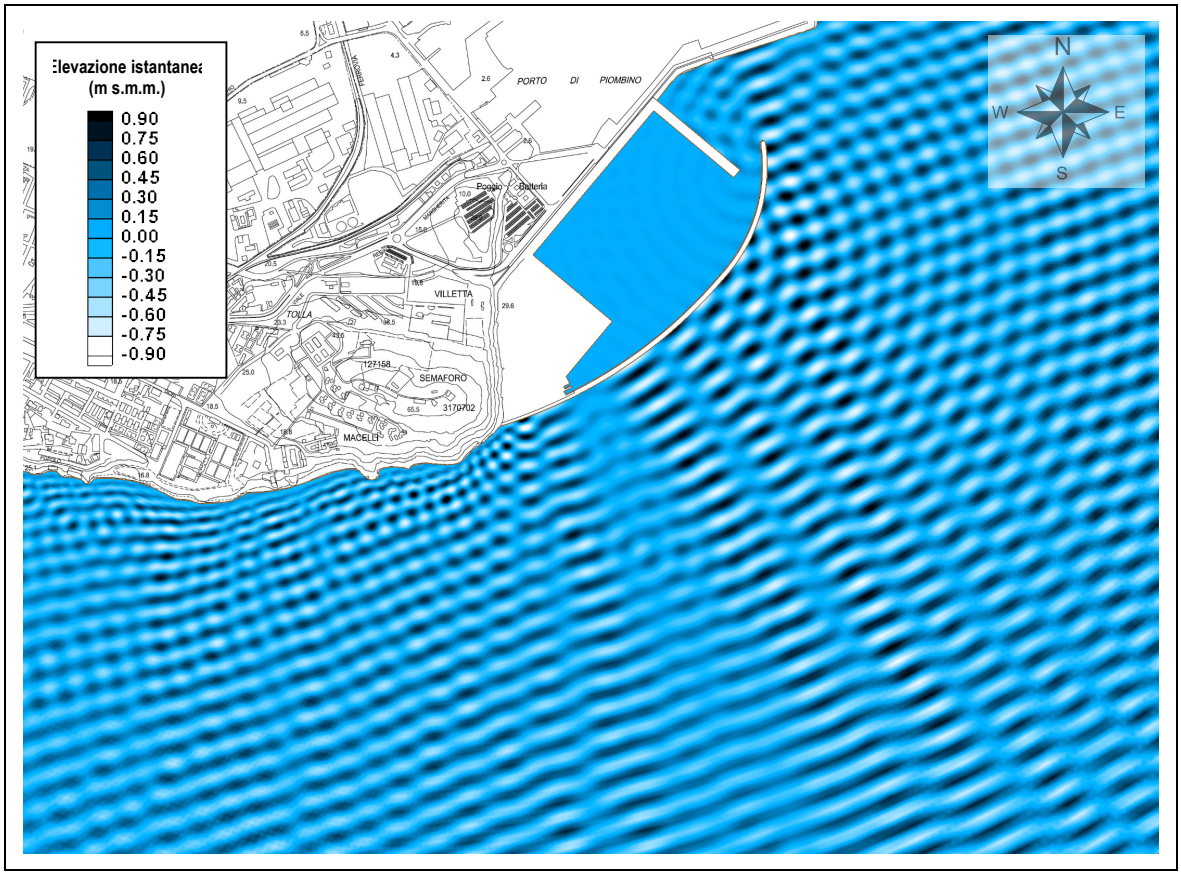

Fig. 4.6 – TEST 18 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

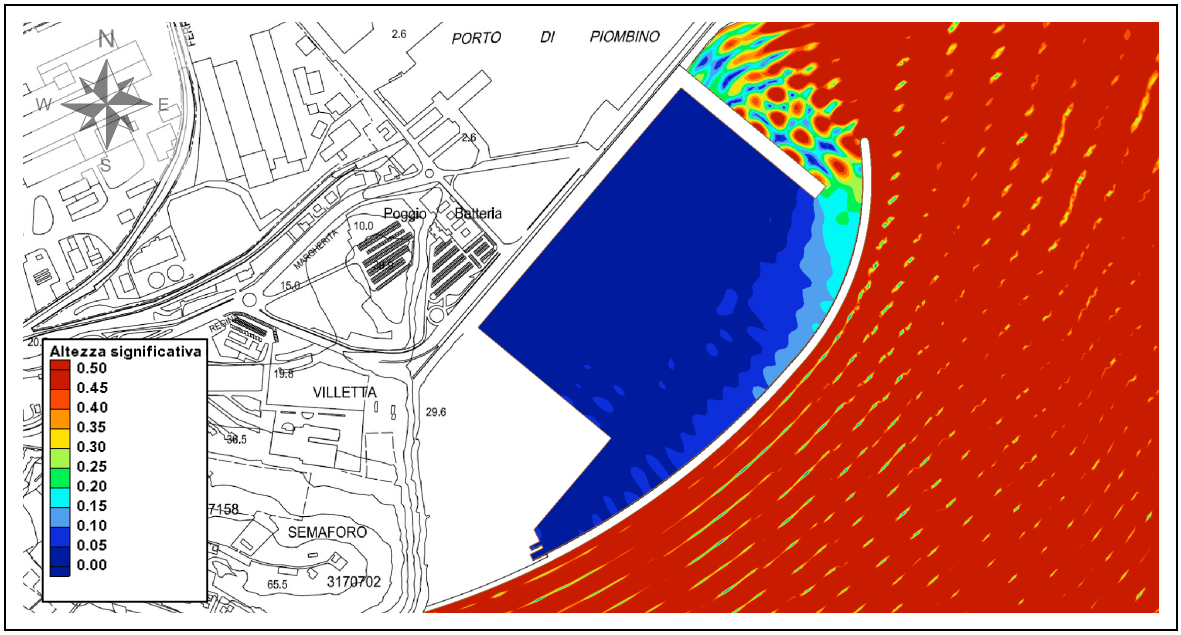

Fig. 4.7 – TEST 18 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

4.2.2 *Agitazione interna TEST 19 – periodo 8 s*

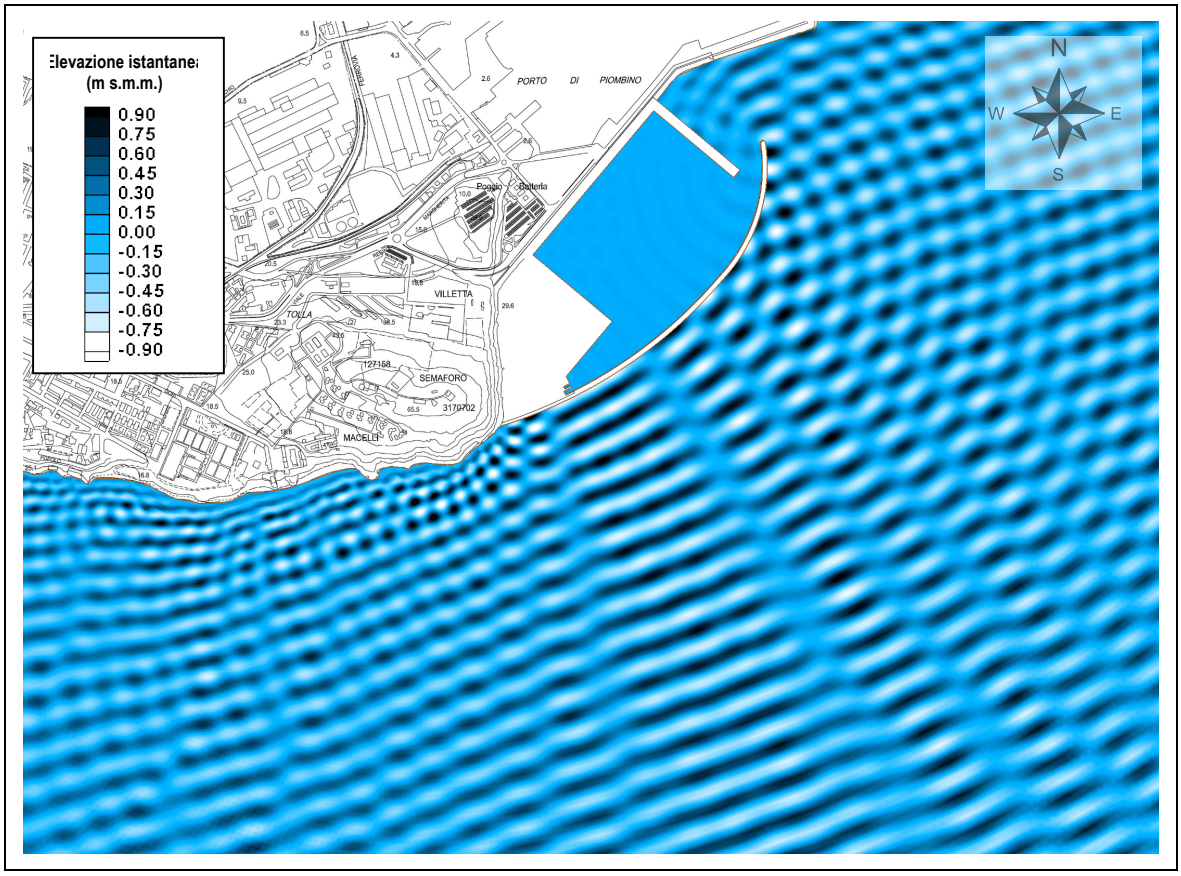

Fig. 4.8 – TEST 19 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

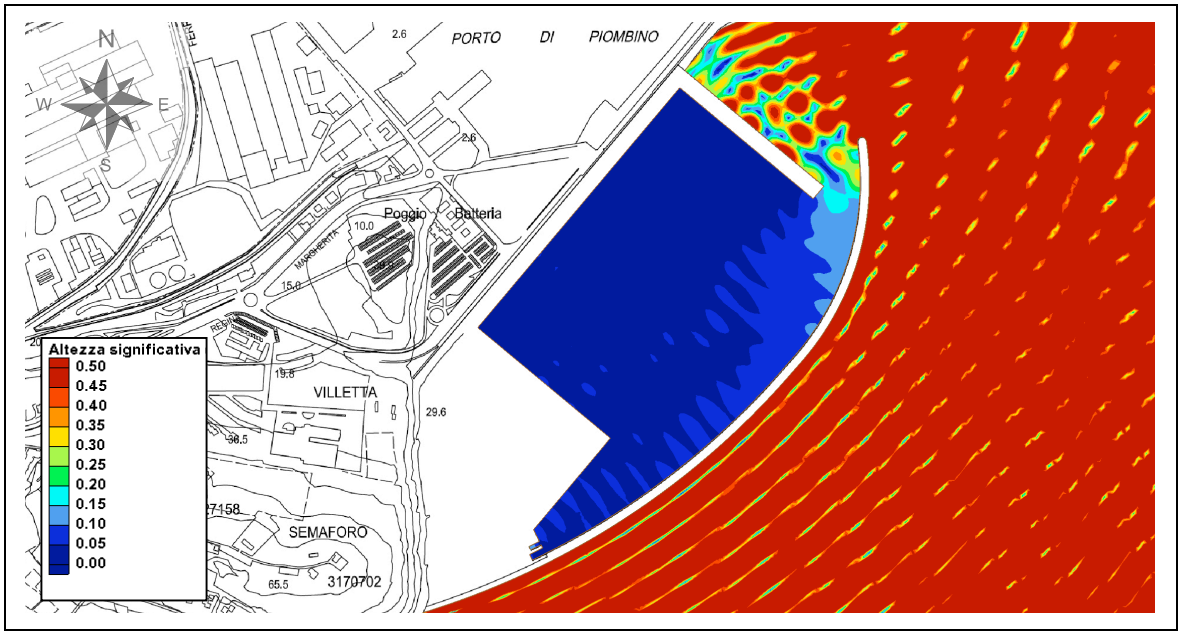

Fig. 4.9 – TEST 19- Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

4.2.3 *Agitazione interna TEST 20 – periodo 9 s*

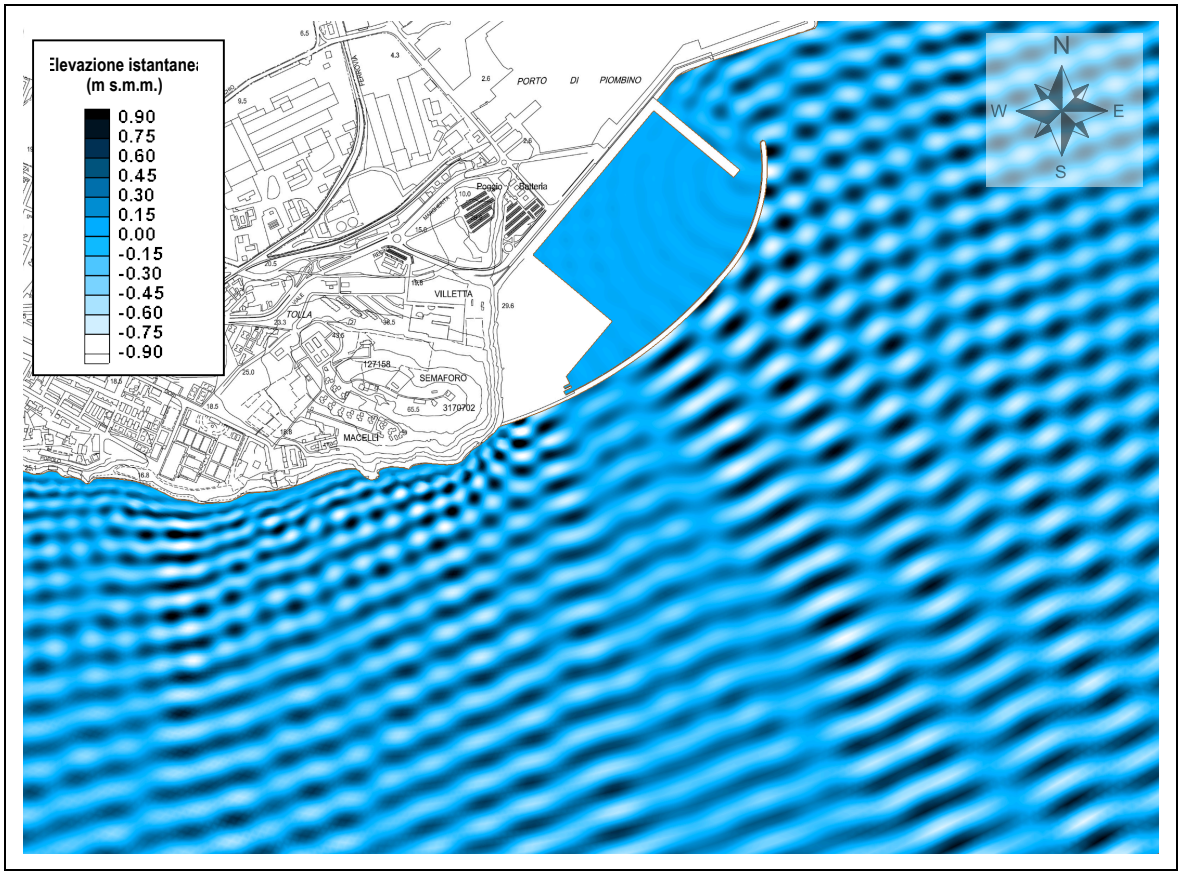

Fig. 4.10 – TEST 20 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

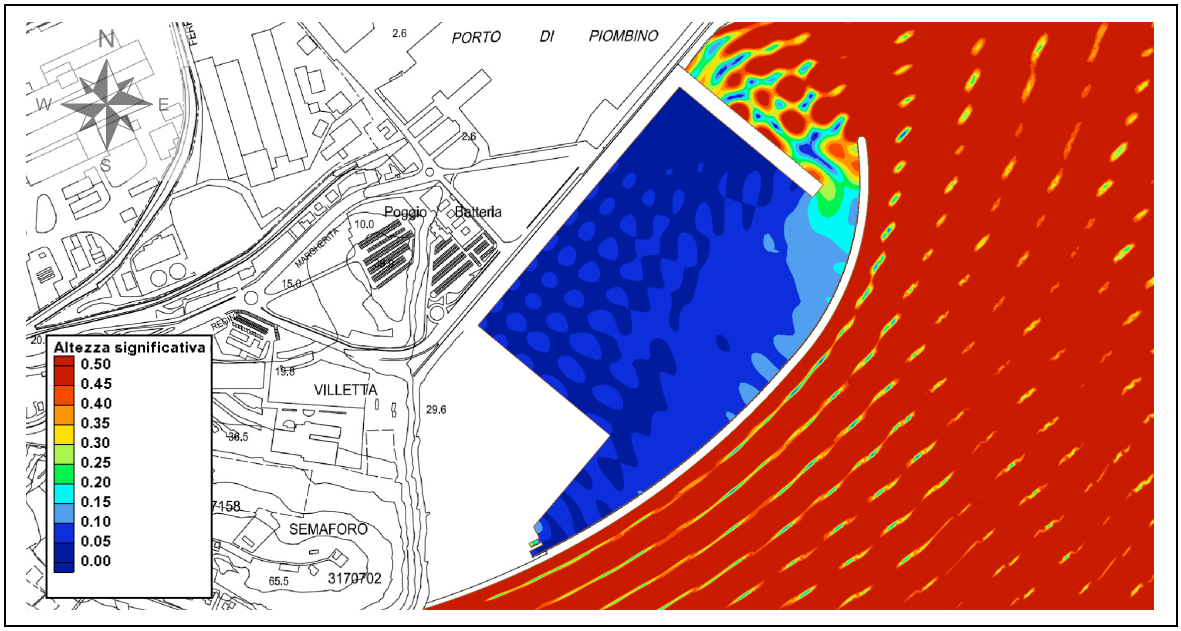

Fig. 4.11 – TEST 20 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

4.2.4 *Agitazione interna TEST 21 – periodo 10 s*

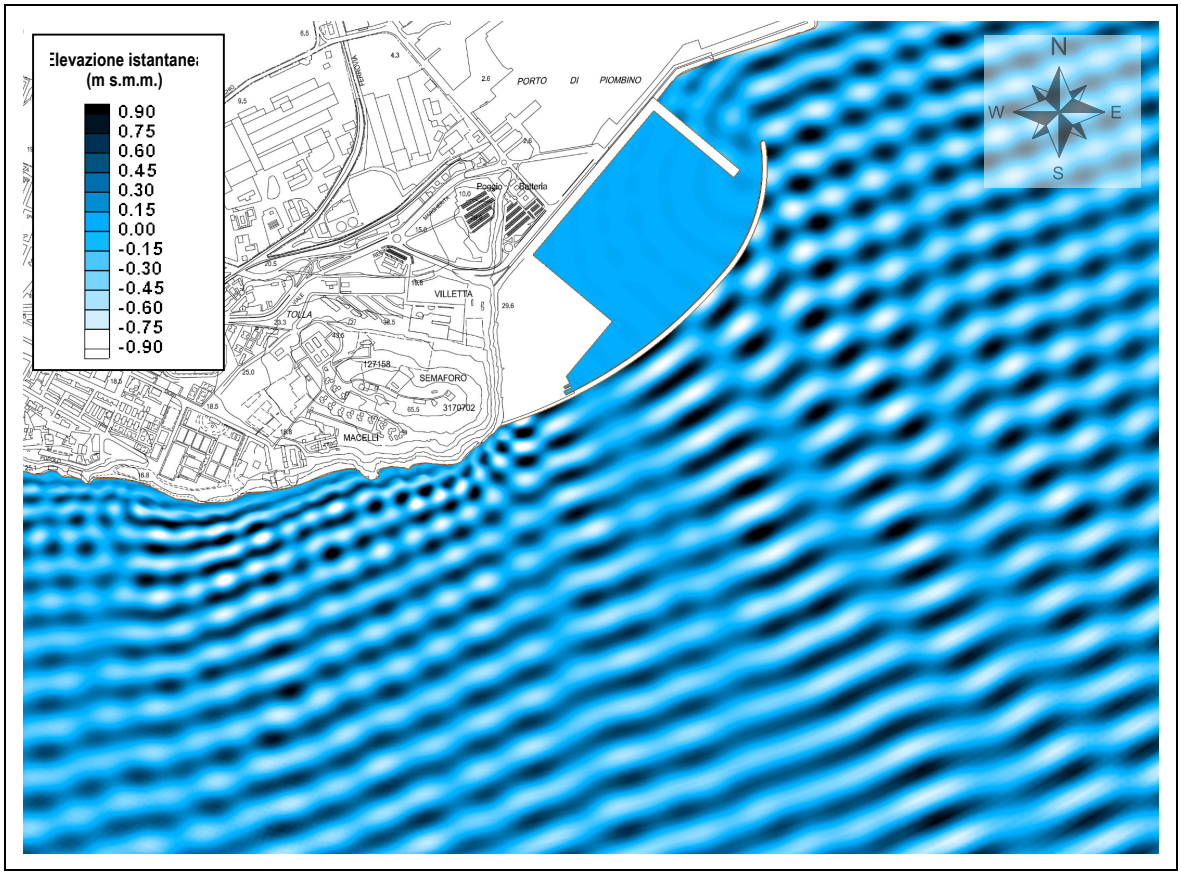

Fig. 4.12 – TEST 21 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

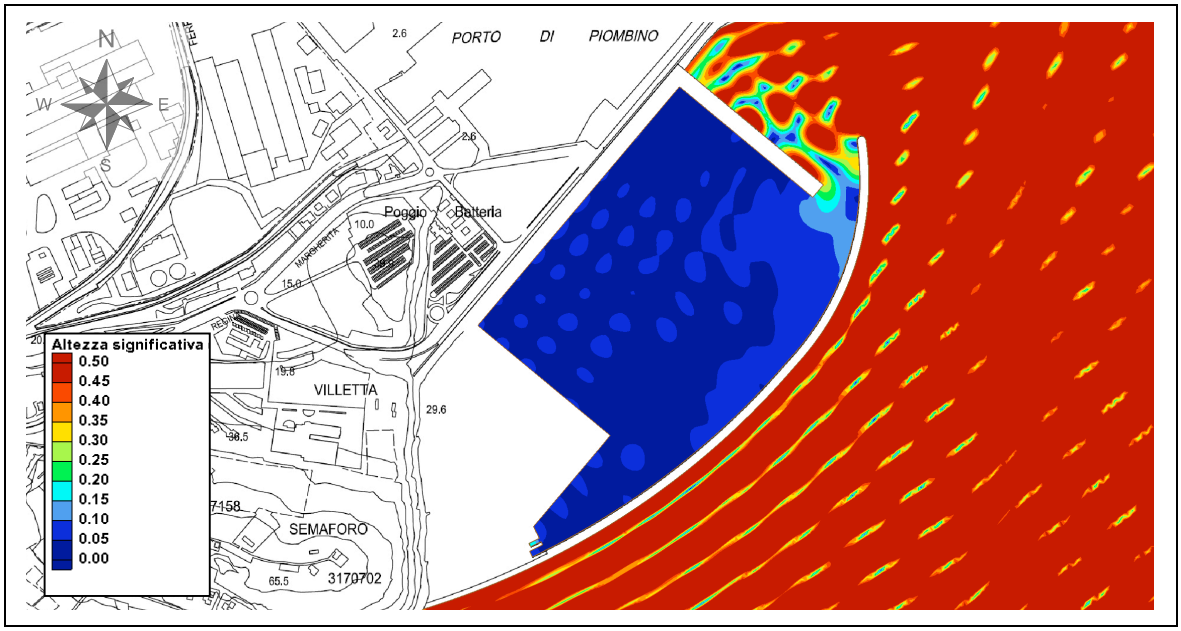

Fig. 4.13 – TEST 21 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

4.2.5 *Agitazione interna TEST 22 – periodo 11 s*

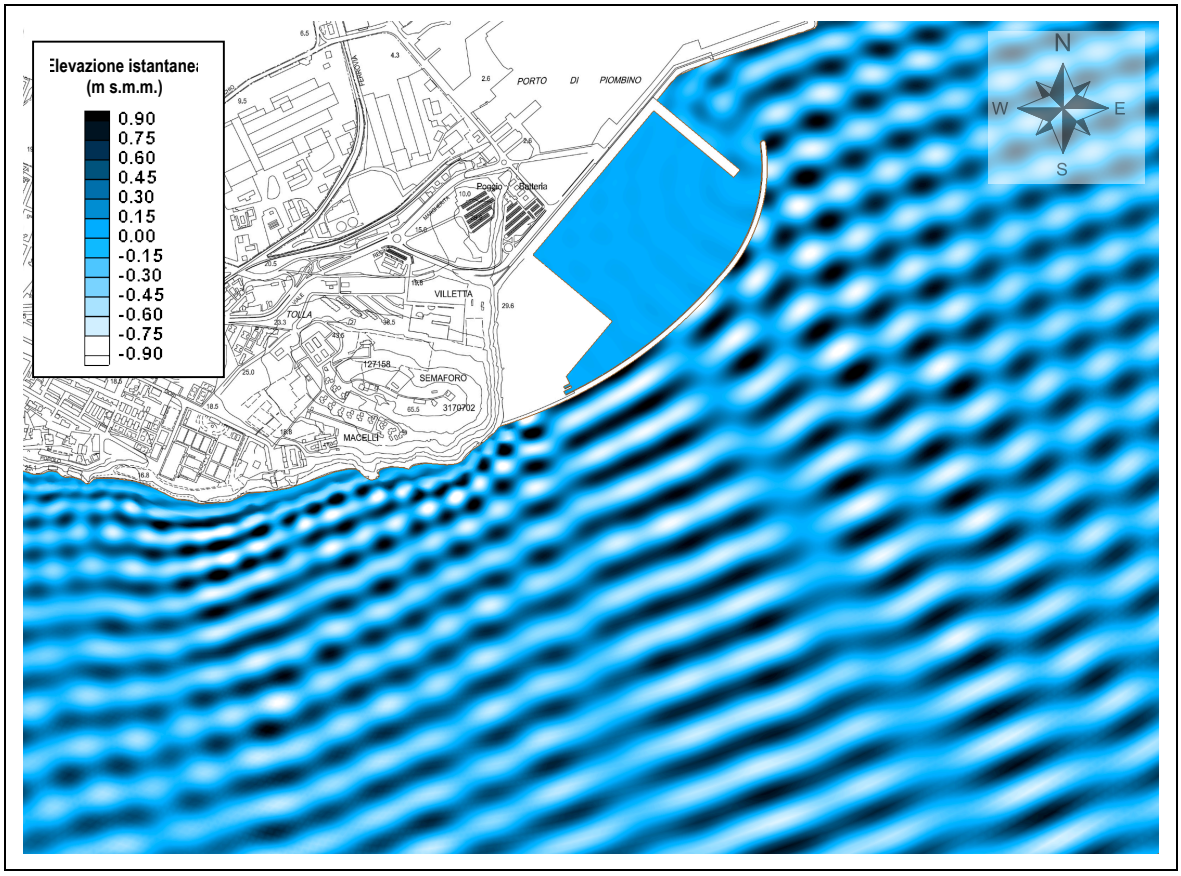

Fig. 4.14 – TEST 22 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

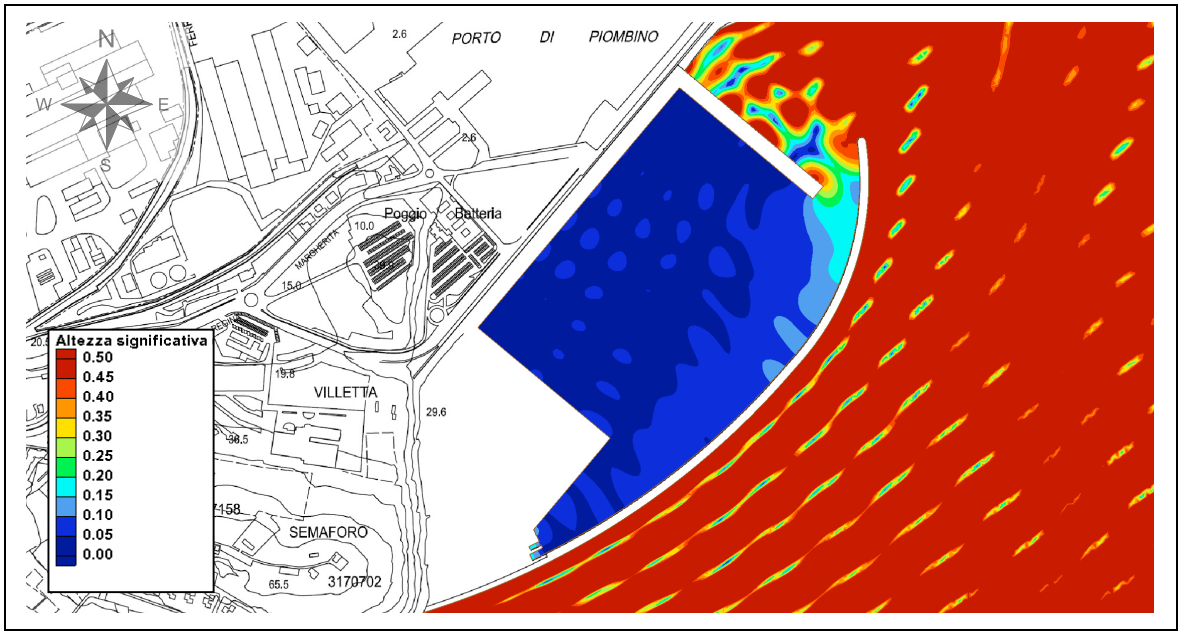

Fig. 4.15 – TEST 22 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

4.2.6 *Agitazione interna TEST 23 – periodo 12 s*

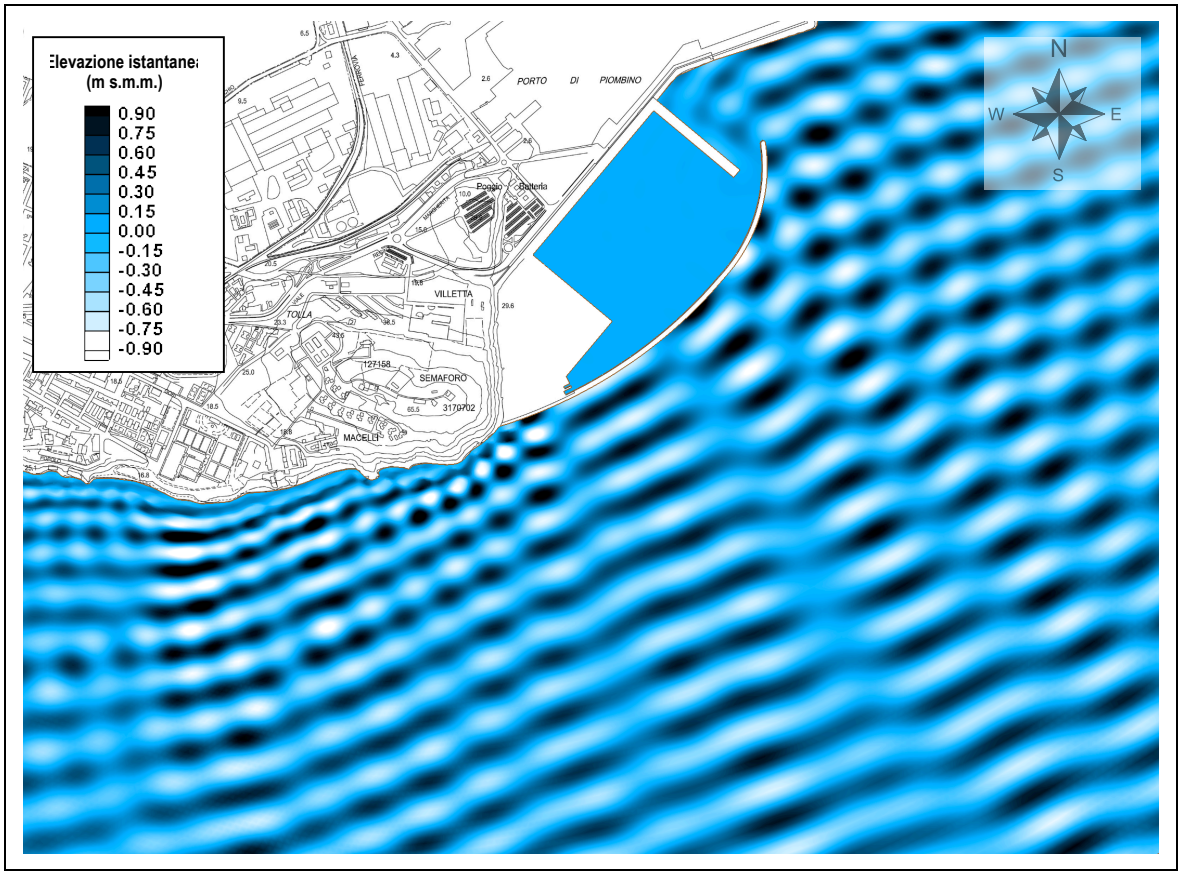

Fig. 4.16 – TEST 23 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

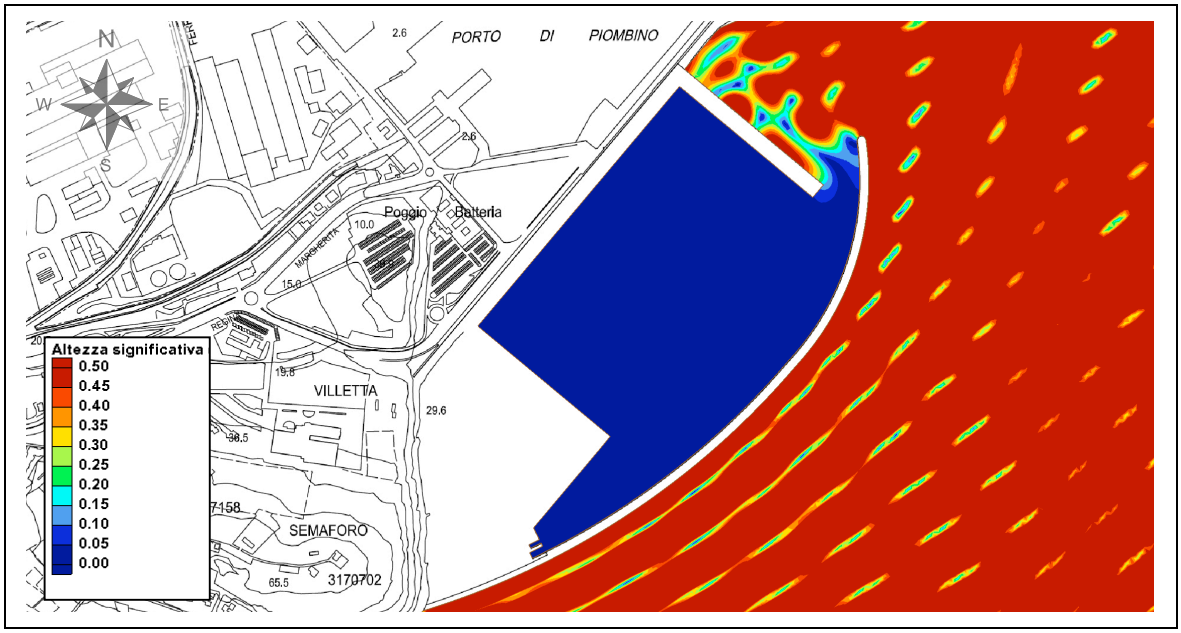

Fig. 4.17 – TEST 23 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

4.2.7 *Agitazione interna TEST 24 – periodo 13 s*

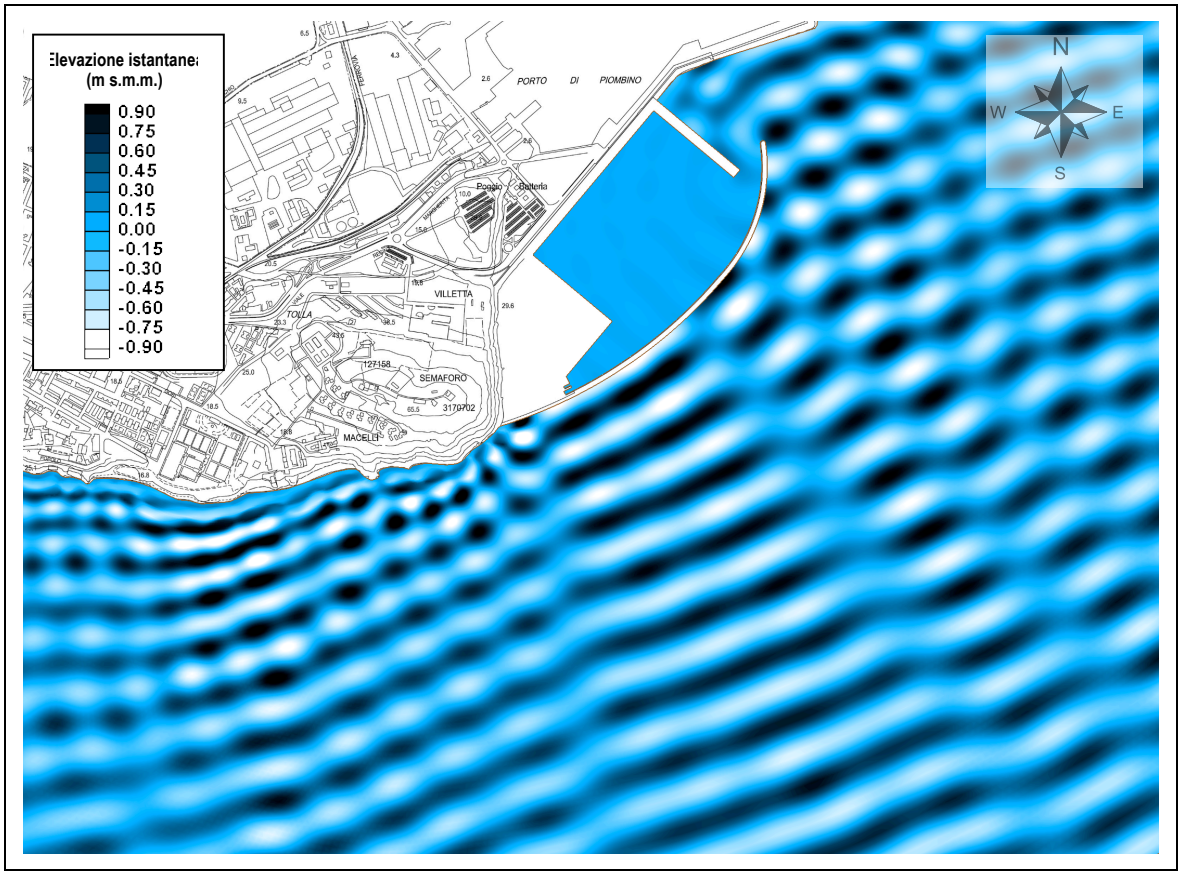

Fig. 4.18 – TEST 24 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

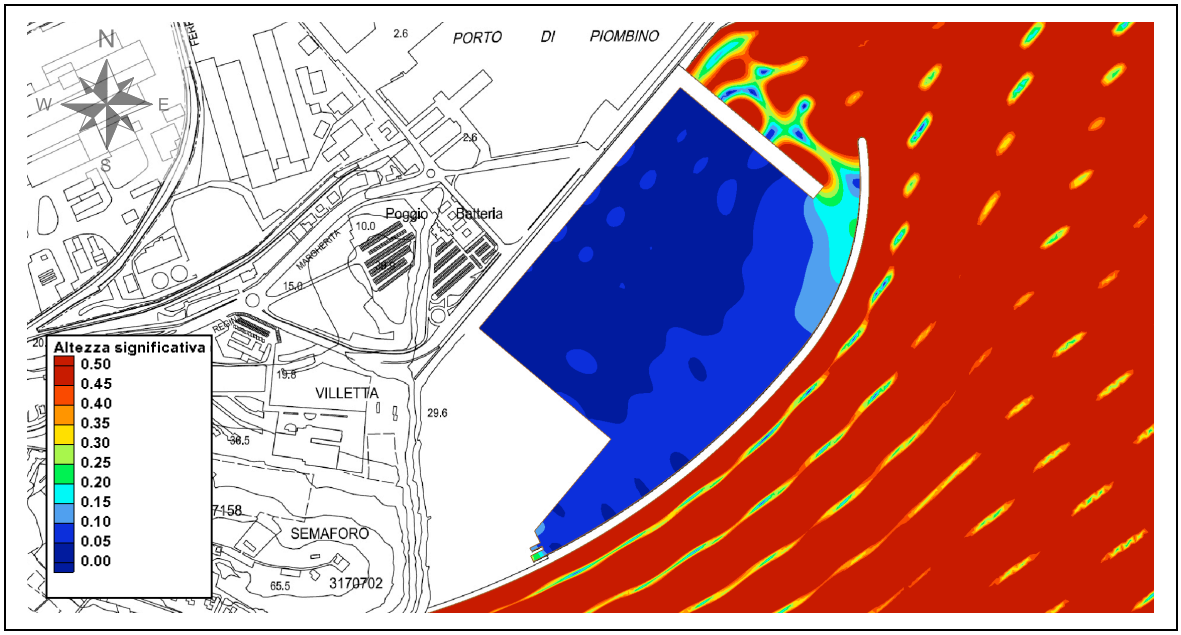

Fig. 4.19 – TEST 24 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

4.2.8 Agitazione interna TEST 25 – periodo 14 s

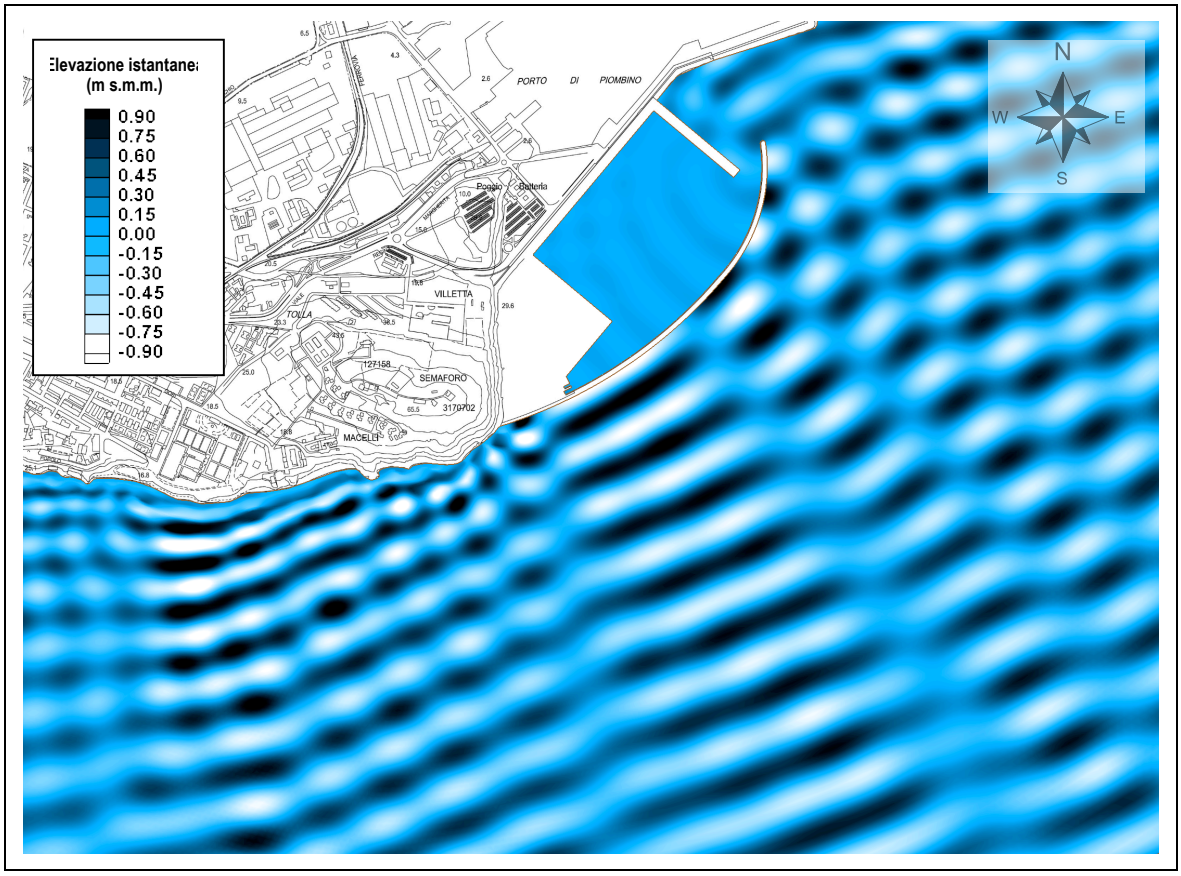

Fig. 4.20 – TEST 25 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

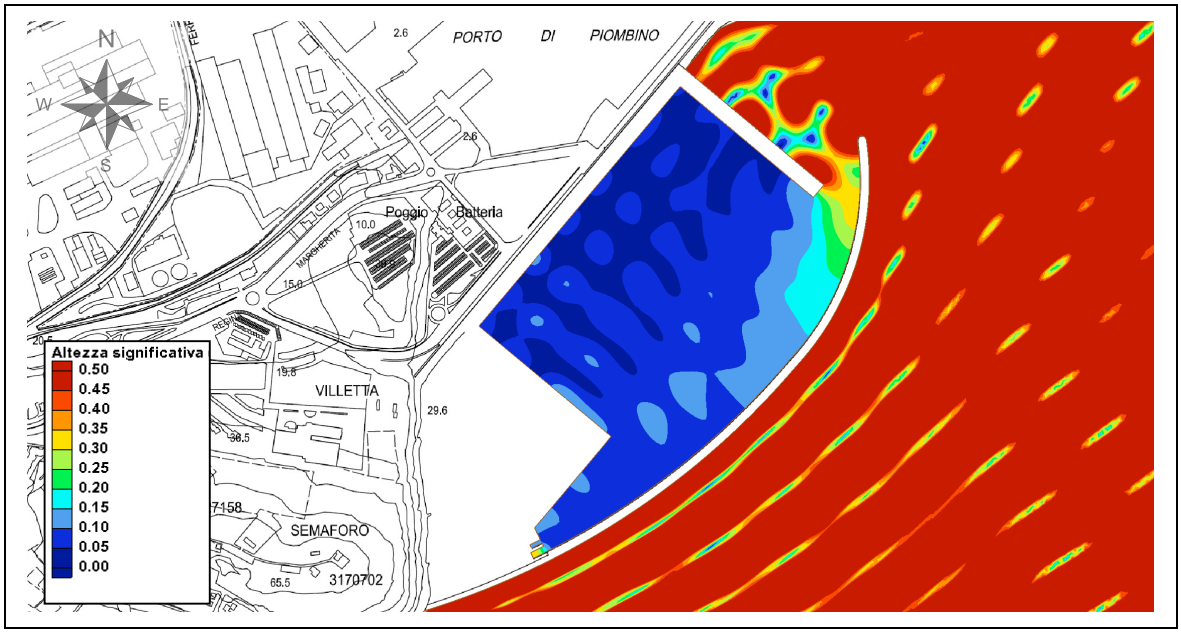

Fig. 4.21 – TEST 25 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

4.2.9 *Agitazione interna TEST 26 – periodo 15 s*

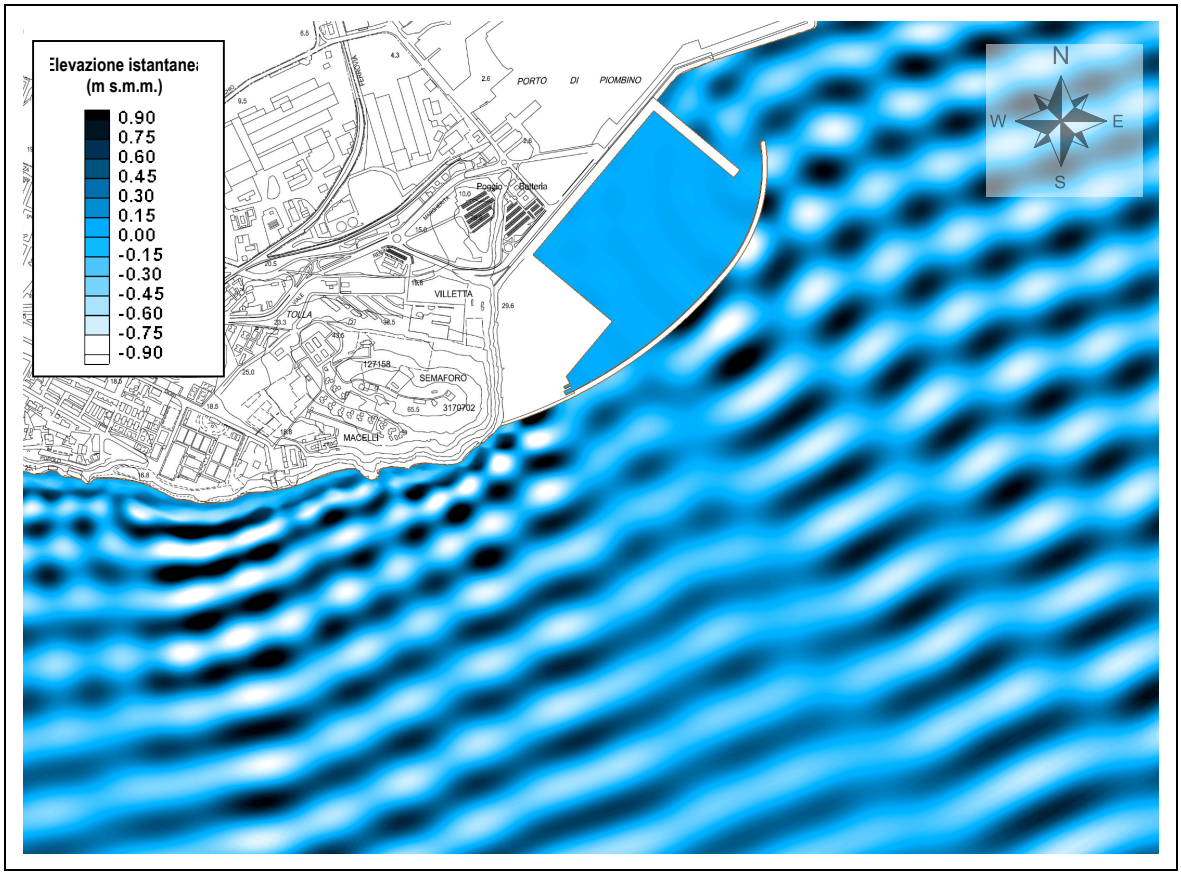

Fig. 4.22 – TEST 26 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

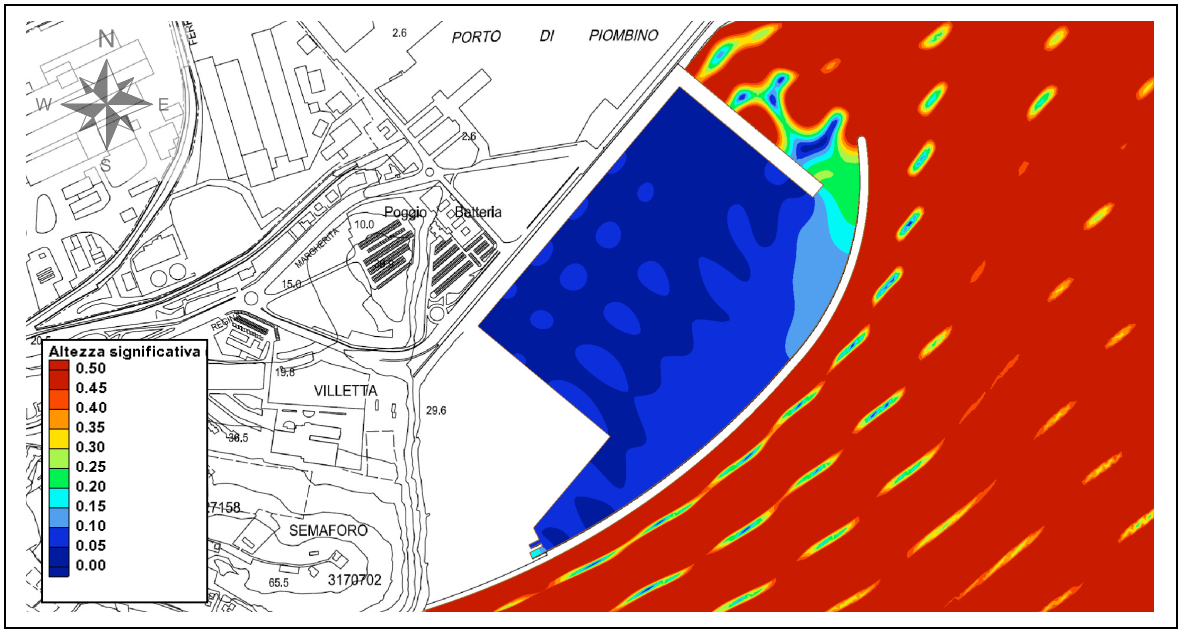

Fig. 4.23 – TEST 26- Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

4.2.10 Agitazione interna TEST 27 – periodo 16 s

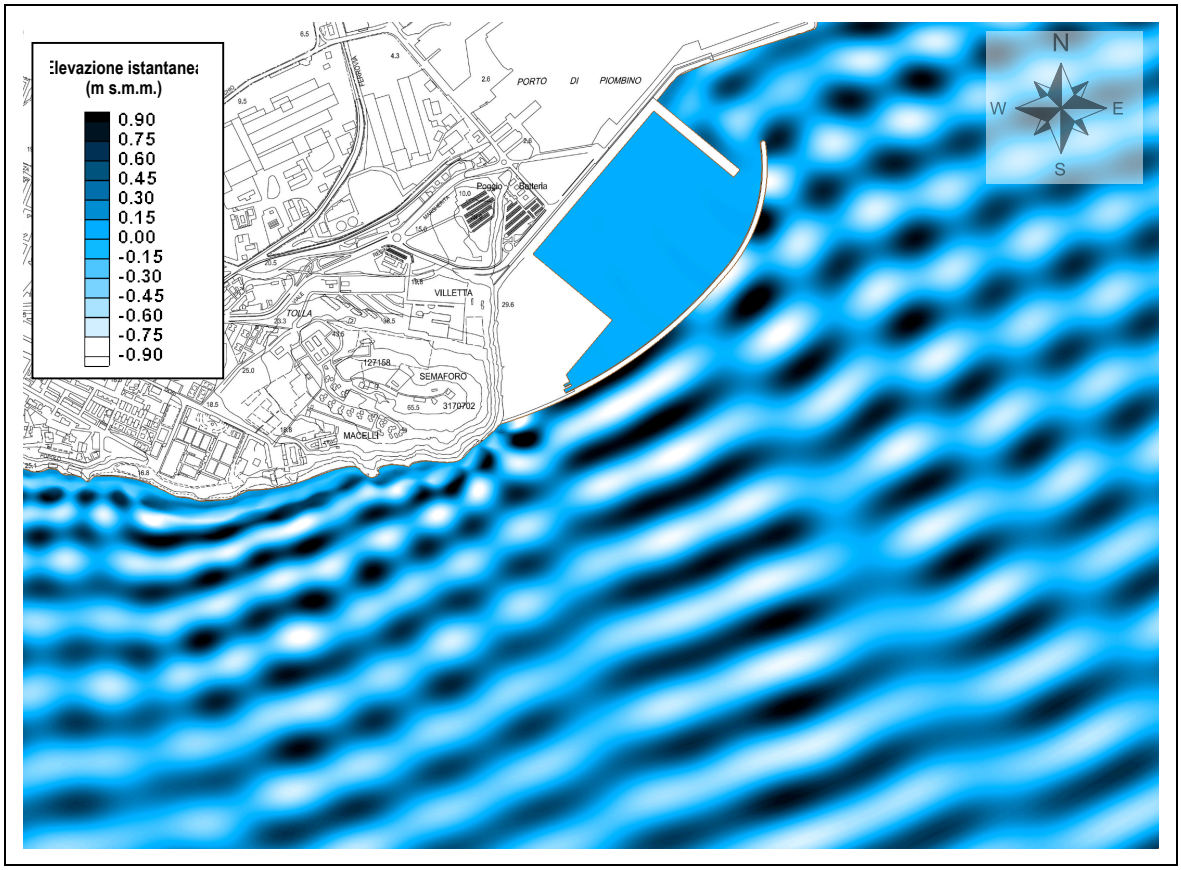

Fig. 4.24 – TEST 27 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

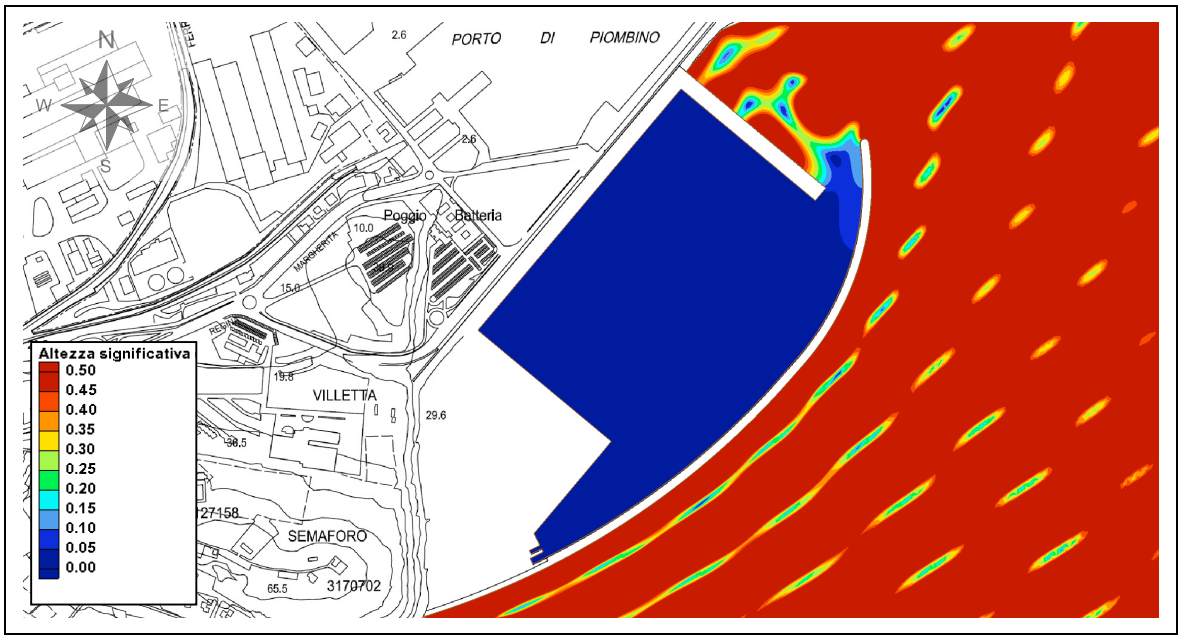

Fig. 4.25 – TEST 27 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)

5 VERIFICA DELLA RISPONDENZA DELLE CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL BACINO AI REQUISITI DEL MASTERPLAN

Il layout del nuovo porto turistico è stato definitivo nel rispetto dei requisiti previsti nell'allegato II del "Masterplan – La rete dei porti toscani" (*Direttive e standard per la progettazione di opere marittime esterne ed interne al porto*), con particolare riferimento alle dimensioni e alle caratteristiche dell'imboccatura e del cerchio di evoluzione in relazione alla flotta tipo di progetto.

Le disposizioni prescritte nel Masterplan costituiscono riferimenti consigliati per la progettazione; il progettista può comunque, motivatamente, adottare valori diversi anche in relazione alle specifiche condizioni meteo marine e geomorfologiche e della tipologia del porto, in coerenza con quanto disposto dalle "Raccomandazioni tecniche" approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (AIPCN-PIANC, febbraio 2002).

Nell'Articolo 2 dell'Allegato II del Masterplan, si riportano alcune prescrizioni relative all'imboccatura portuale; in particolare si raccomandano le seguenti caratteristiche geometriche relative alla più grande imbarcazione che si prevede possa essere ospite del porto:

- larghezza (calcolata alla quota di fondo del canale di accesso): indicativamente non inferiore a 5 volte la larghezza dell'imbarcazione più grande (per doppio senso di circolazione); comunque non inferiore a 1 volta la lunghezza dell'imbarcazione più grande e mai meno di 30 m.
- profondità (rispetto al l.m.m.): immersione dell'imbarcazione più grande aumentata del valore medio delle basse maree sigiziali, degli effetti barici, del franco sotto chiglia (pari al 15% dell'immersione dell'imbarcazione più grande, e comunque non meno di 0.3 m per fondali sabbiosi o limosi e non meno di 0.6 m per fondali rocciosi) e di un valore che tiene conto del moto ondoso massimo accettabile per la navigabilità in sicurezza dell'imboccatura portuale (valore consigliato non inferiore ad 1.0 m).

L'imboccatura del nuovo porto turistico, calcolata alla quota di fondo del canale di accesso, è larga 60 m; tale dimensione rispetta tutte le prescrizioni del Masterplan. Infatti, considerando che le imbarcazioni più grandi ospitate nel porto apparterranno alla classe XI (lunghezza 40 m e larghezza 10 m), ne consegue che la larghezza dell'imboccatura è:

- maggiore di 5 volte la larghezza dell'imbarcazione più grande (pari a 5*10 = 50 m);
- maggiore della lunghezza dell'imbarcazione più grande (pari a 40 m);
- superiore a 30 m.

Per quanto riguarda, invece, la profondità dell'imboccatura non si ravvisano particolari difficoltà nel soddisfare le prescrizioni richieste dal Masterplan, dal momento che la nuova opera portuale verrà realizzata su fondali mediamente superiori ai 10 m.
In particolare l'imboccatura verrà realizzata su fondali compresi tra -13 e -15 m s.l.m.m.; anche considerando la riduzione della sezione dovuta alla presenza della berma di fondazione dei cassoni,

la profondità dell'imboccatura (al fondo del canale di accesso), è superiore a 11 m al di sotto del livello medio del mare.

Il Masterplan non riporta alcuna prescrizione specifica per quanto concerne le caratteristiche del cerchio di evoluzione; pertanto, in mancanza di indicazioni al riguardo, si è fatto esplicito riferimento alle "Raccomandazioni tecniche" approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (AIPCN).
Nel caso specifico si raccomanda che il diametro sia pari ad almeno 1.5 volte la lunghezza della più grande imbarcazione ospite del porto e sia comunque non inferiore a 50 m. Il cerchio di evoluzione ha un diametro di 110 m, per cui risultano ampiamente soddisfatte le raccomandazioni di cui sopra: almeno 1.5 volte la lunghezza dell'imbarcazione più grande (1.5*40 = 60 m) e non inferiore a 50 m.

Va infine evidenziato che, con riferimento al tracciamento del layout del nuovo porto turistico e alla progettazione delle opere marittime esterne ed interne al porto, sono state comunque rispettate le raccomandazioni riportate nel Masterplan in merito a: canale di accesso, opere esterne di difesa, canali di manovra, pontili fissi e galleggianti, posti barca, ecc..

6 CONSIDERAZIONI SUGLI EFFETTI DI VENTI ESTREMI DI SCIROCCO

Lo studio degli effetti di venti estremi sono stati studiati nella precedente "Relazione idraulico-marittima". Nel dettaglio sono state studiate le caratteristiche delle mareggiate in grado di generarsi all'interno del golfo di Follonica (settore di Grecale e Scirocco) per effetto di venti caratterizzati da elevati tempi di ritorno pari a 50 anni.

Lo studio è stato svolto impiegando i modelli di calcolo STWAVE (per la generazione del moto ondoso da vento) e CGWAVE per valutare le caratteristiche locali della mareggiata e la penetrazione del moto ondoso all'interno del porto, tenendo conto degli effetti di diffrazione e riflessione.
Si riportano nella successiva Tab. 6.1 le caratteristiche dell'evento anemologico estremo di Scirocco e della mareggiata generata, impiegata per la valutazione degli effetti di tale evento anemologico.

I risultati ottenuti dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso, in termini di agitazione ondosa in prossimità dell'imboccatura e all'interno del bacino portuale, sono riportati nelle figure alle pagine seguenti.
La figura rappresenta mediante gradazioni cromatiche le caratteristiche locali della mareggiata: nella Fig. 6.1 è riportato l'andamento delle creste, mentre nella Fig. 6.2 sono riportate le altezze d'onda significativa nei pressi del costruendo porto e all'interno del bacino portuale.

I risultati evidenziano che, essendo l'onda caratterizzata da una frequenza relativamente elevata, non si evidenziano particolari concentrazioni energetiche del moto ondoso (i.e. esaltazioni locali dell'altezza d'onda) che possano mettere in crisi la navigabilità dell'imboccatura o le infrastrutture che vi si affacciano.
Per ogni ulteriore valutazione legata al comportamento locale del moto ondoso in condizioni d'onda diverse, si rimanda alla precedente relazione, nella quale sono rappresentati tutti i campi d'onda delle mareggiate analizzate.

			Caratteristiche vento		**Caratteristiche onda sul contorno CGWAVE**		
TEST	**Caratteristiche TEST**	**Sovralzo (m s.m.m.)**	**Vento (m/s)**	**Dir (°)**	**H_S (m)**	**T_{01} (s)**	**Dir (°)**
8 (precedente studio)	Scirocco da vento, T_R=50 anni	+0.50	26.6	120	**2.43**	4.5	121

Tab. 6.1 – Caratteristiche dell'evento anemologico e della mareggiata considerata nello studio

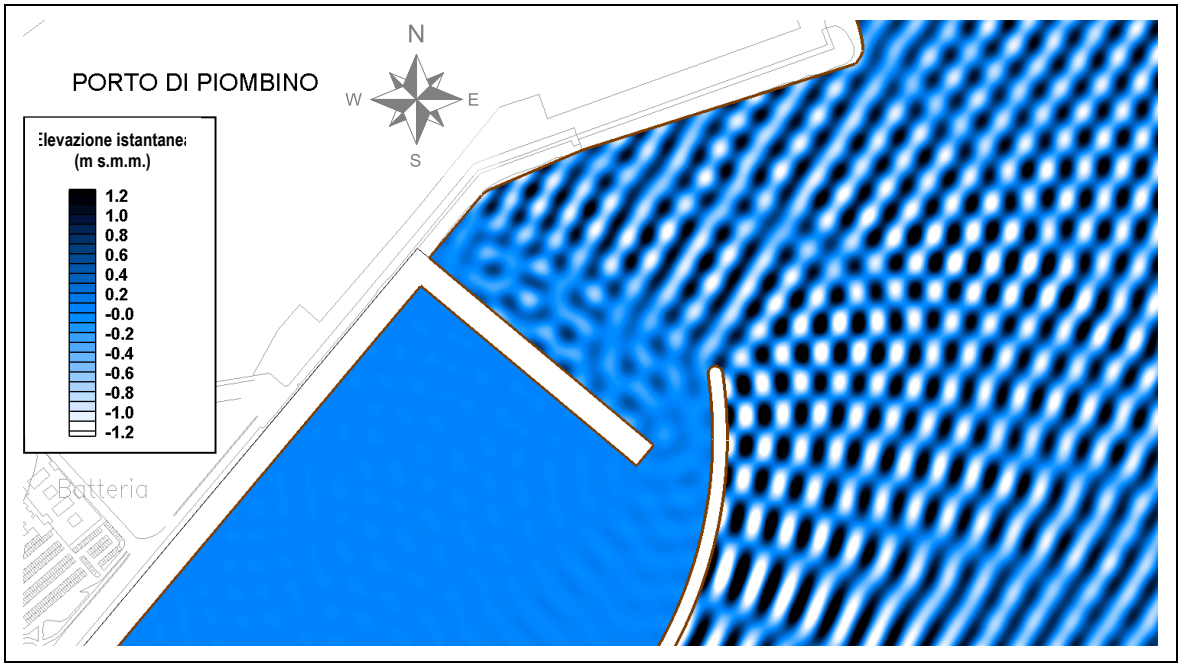

Fig. 6.1 – TEST 8 - Caratteristiche locali della mareggiata (andamento delle creste)

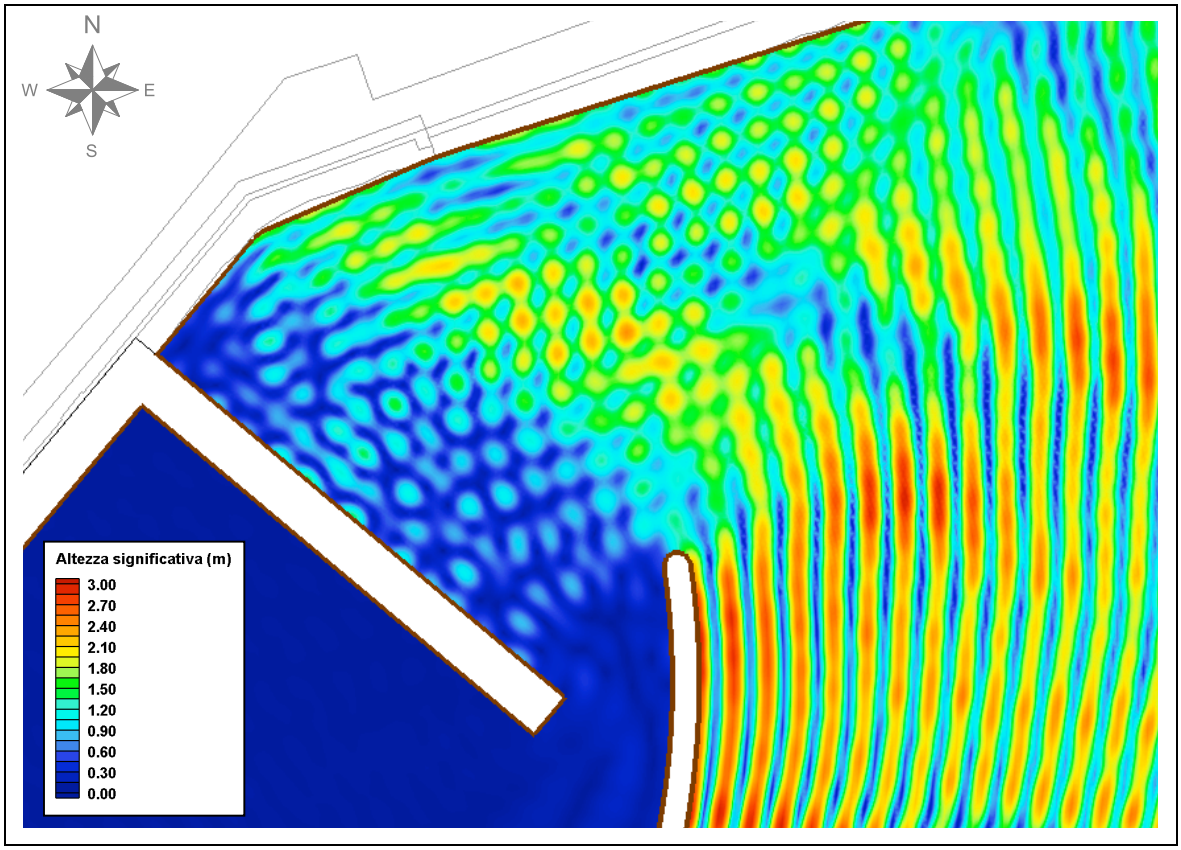

Fig. 6.2 – TEST 8 - Caratteristiche locali della mareggiata (altezza significativa)