

## AUTORITÀ DI SISTEMA PORTUALE DEL MAR LIGURE OCCIDENTALE

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO : DOTT. ING. MARCO VACCARI

### REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO DI SAMPIERDARENA

#### RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROGETTISTI

Mandataria



STUDIO BALLERINI  
INGEGNERI ASSOCIATI



ALBERTO ALBERT  
INGEGNERE

INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE : TECHNITAL S.P.A. DOTT. ING. ANTONIO LIZZADRO

### PROGETTAZIONE DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

TITOLO ELABORATO

#### PRIMA FASE – FATTIBILITA' DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI

**Volume 15 – Verifiche dell'agitazione ondosa nell'area  
portuale per le soluzioni d'intervento**

ELABORATO N° :

MI046R-PF-D-Z-R-015-00

NOME FILE :

MI046R-PF-D-Z-R-015-00.docx

DATA		ELABORATO		CONTROLLATO		APPROVATO	
Ottobre 2020		M. Del Bianco		P. De Girolamo		A. Lizzadro	
REVISIONE	N°	DATA	DESCRIZIONE				
	00	Ottobre 2020	EMISSIONE PER APPROVAZIONE				

## **AUTORITÀ DI SISTEMA PORTUALE DEL MAR LIGURE OCCIDENTALE**

### **REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO DI SAMPIERDARENA**

### **PROGETTAZIONE DI FATTIBILITA’ TECNICA ED ECONOMICA**

#### **PRIMA FASE – FATTIBILITA’ DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI**

#### **Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale per le soluzioni d’intervento**

## INDICE

1. PREMESSE	9
1.1. Introduzione	9
1.2. Obiettivi, metodologia di lavoro e sintesi dei risultati	9
1.2.1. Obiettivi	9
1.2.2. Metodologia di lavoro	13
1.2.3. Sintesi dei risultati	18
2. ANALISI DEL “DOWNTIME”	21
2.1. Moto ondoso	21
2.2. Metodologia di analisi	22
3. ANALISI DELLE CONDIZIONI ESTREME	25
3.1. Moto ondoso	25
3.2. Metodologia di analisi	26
4. MODELLO NUMERICO UTILIZZATO	27
5. ANALISI DELLA SITUAZIONE ATTUALE	29
5.1. Analisi del “downtime”	30
5.2. Analisi delle condizioni estreme	33
6. ANALISI DELLE SOLUZIONI SELEZIONATE	35
6.1. Soluzione 2	35
6.1.1. Analisi del “downtime”	35
6.1.2. Analisi delle condizioni estreme	39
6.2. Soluzione 3	41
6.2.1. Analisi del “downtime”	41
6.2.2. Analisi delle condizioni estreme	45
6.3. Soluzione 4	47
6.3.1. Analisi del “downtime”	47
6.3.2. Analisi delle condizioni estreme	51
6.4. Analisi comparativa tra le soluzioni e relative conclusioni	53
6.4.1. Fase costruttiva a	53
6.4.2. Fase costruttiva b	55
6.4.3. Conclusioni	57
7. MODIFICA DELLE SOLUZIONI PROGETTUALI	60
8. ANALISI DELLE SOLUZIONI SELEZIONATE MODIFICATE	65
8.1. Soluzione 2 modificata	65
8.1.1. Analisi del “downtime” lungo le banchine	65
8.1.2. Analisi delle condizioni estreme	69
8.2. Soluzione 3 modificata	71
8.2.1. Analisi del “downtime” lungo le banchine	71

---

8.2.2.	Analisi delle condizioni estreme	74
8.3.	Soluzione 4 Fase b) modificata	76
8.3.1.	Analisi del “downtime” lungo le banchine	76
8.3.2.	Analisi delle condizioni estreme	78
9.	ANALISI COMPARATIVA TRA LE SOLUZIONI MODIFICATE	80
9.1.	Fase a)	80
9.2.	Fase b)	82
10.	ANALISI DELL’AGITAZIONE ONDOSA ALL’ESTERNO DEL PORTO PER LO STATO DI FATTO E LE SOLUZIONI D’INTERVENTO	86
11.	CONCLUSIONI	88

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1 - Soluzione alternativa d’intervento 2	10
Figura 1-2 - Soluzione alternativa d’intervento 3	11
Figura 1-3 - Soluzione alternativa d’intervento 4	12
Figura 2-1 - Direzioni di provenienza del moto ondoso a ridosso delle opere foranee per l’analisi del “downtime”.	22
Figura 2-2 – Fase realizzativa a): Aree di riferimento per il calcolo del “downtime” delle banchine portuali.	23
Figura 2-3 - Fase realizzativa b): Aree di riferimento per il calcolo del “downtime” delle banchine portuali.	23
Figura 4-1 - Area simulata con il codice CGWAVE e relativa batimetria nella configurazione attuale.	28
Figura 5-1 - Inquadramento geografico del Porto di Genova.	29
Figura 5-2 - Esposizione ondometrica del Porto di Genova a stati di mare con $H_s > 1,0$ m.	30
Figura 5-3 Stato attuale - coefficienti di riflessione delle opere portuali	31
Figura 5-4 – “downtime” delle banchine portuali per lo stato attuale (numero di ore medio all’anno di superamento della soglia $H_s, lim$ ): pannello A: $H_s, lim = 0,5$ m; pannello B: $H_s, lim = 1,0$ m.	31
Figura 5-5 - Analisi del “downtime” per lo stato attuale: valori di $H_s$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli.	32
Figura 5-6 - Analisi delle onde estreme ( $Tr=10$ anni) per lo stato attuale. massima $H_{Qs}$ espressa in m per ogni banchina.	33
Figura 6-1- Soluzione 2 Fase A (pannello superiore) e fase b (pannello inferiore) - coefficienti di riflessione delle opere portuali.	35
Figura 6-2 - “downtime” delle banchine portuali per la soluzione 2 in Fase A (numero di ore medio all’anno di superamento della soglia $H_s, lim$ ): pannello A: $H_s, lim = 0,5$ m; pannello B: $H_s, lim = 1,0$ m.	36
Figura 6-3 “downtime” delle banchine portuali per la soluzione 2 in Fase B (numero di ore medio all’anno di superamento della soglia $H_s, lim$ ): pannello A: $H_s, lim = 0,5$ m; pannello B: $H_s, lim = 1,0$ m.	36
Figura 6-4 Analisi del “downtime” per la Soluzione 2 in Fase a: valori di $H_s$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli.	37
Figura 6-5 - Analisi del “downtime” per la Soluzione 2 in Fase b: valori di $H_s$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli.	38
Figura 6-6 - Soluzione 2 – Fase A: “downtime” del canale di accesso (area A1) e del cerchio di evoluzione (area A2).	39
Figura 6-7 - Analisi delle onde estreme ( $Tr=10$ anni) per la soluzione 2 in fase: a - pannello superiore e b – pannello inferiore. massima $H_{Qs}$ espressa in m per ogni banchina.	40

Figura 6-8 - Soluzione 3 Fase A (pannello superiore) e fase b (pannello inferiore) - coefficienti di riflessione delle opere portuali.	41
FIGURA 6-9 - “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 3 IN FASE A (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA $H_s, lim$ ): PANNELLO A: $H_s, lim = 0,5$ M; PANNELLO B: $H_s, lim = 1,0$ M.	42
FIGURA 6-10 - “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 3 IN FASE B (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA $H_s, lim$ ): PANNELLO A: $H_s, lim = 0,5$ M; PANNELLO B: $H_s, lim = 1,0$ M.	42
Figura 6-11 - Analisi del “downtime” per la Soluzione 3 in Fase a: valori di $H_s$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli.	43
Figura 6-12 - Analisi del “downtime” per la Soluzione 3 in Fase b: valori di $H_s$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli.	44
Figura 6-13 - Soluzione 3 – Fase A: “downtime” del canale di accesso (area A1) e del cerchio di evoluzione (area A2).	45
Figura 6-14 - Analisi delle onde estreme ( $Tr=10$ anni) per la soluzione 3 in fase: a - pannello superiore e b – pannello inferiore. massima $HQs$ espressa in m per ogni banchina.	46
Figura 6-15 - Soluzione 4 Fase A (pannello superiore) e fase b (pannello inferiore) - coefficienti di riflessione delle opere portuali.	47
Figura 6-16 - “downtime” delle banchine portuali per la soluzione 4 in Fase A (numero di ore medio all’anno di superamento della soglia $H_s, lim$ ): pannello A: $H_s, lim = 0,5$ m; pannello B: $H_s, lim = 1,0$ m.	48
Figura 6-17 - “downtime” delle banchine portuali per la soluzione 4 in Fase A (numero di ore medio all’anno di superamento della soglia $H_s, lim$ ): pannello A: $H_s, lim = 0,5$ m; pannello B: $H_s, lim = 1,0$ m	48
Figura 6-18 - Analisi del “downtime” per la Soluzione 4 in Fase a: valori di $H_s$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli.	49
Figura 6-19 - Analisi del “downtime” per la Soluzione 4 in Fase b: valori di $H_s$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli	50
Figura 6-20 - Soluzione 4 – Fase A: “downtime” del canale di accesso (area A1) e del cerchio di evoluzione (area A2).	51
Figura 6-21 - Analisi delle onde estreme ( $Tr=10$ anni) per la soluzione 4 in fase: a - pannello superiore e b – pannello inferiore. massima $HQs$ espressa in m per ogni banchina.	52
Figura 6-22 - Fase a): operatività delle banchine portuali con $H_s, lim = 0,5$ m. Comparazione tra lo stato attuale e le Soluzioni 2, 3 e 4.	53
Figura 6-23 - Fase a): operatività delle banchine portuali con $H_s, lim = 1,0$ m. Comparazione tra lo stato attuale e le Soluzioni 2, 3 e 4.	54
Figura 6-24 - Fase a): sicurezza delle banchine con onde estreme. Comparazione tra lo stato attuale e le Soluzioni 2, 3 e 4.	55

Figura 6-25 - Fase b): operatività delle banchine portuali con $Hs, lim = 0,5 m$ . Comparazione tra lo stato attuale e le Soluzioni 2, 3 e 4.	56
Figura 6-26 - Fase b): operatività delle banchine portuali con $Hs, lim = 1,0 m$ . Comparazione tra lo stato attuale e le Soluzioni 2, 3 e 4	56
Figura 6-27 - Fase b): sicurezza delle banchine con onde estreme. Comparazione tra lo stato attuale e le Soluzioni 2, 3 e 4.	57
Figura 6-28 – Fase a): orientamento delle imboccature portuali e settore di provenienza del moto ondoso a largo del Porto con $Hs > 1,0 m$ .	58
Figura 6-29 - Confronto tra la Soluzione 4 e le Soluzioni 2 e 3 sulla protezione geometrica offerta dal prolungamento della diga dell’aeroporto in Fase b.	59
Figura 7-1 - Soluzione 2 modificata fase a) e fase b).	62
Figura 7-2 - Soluzione 3 modificata fase a) e fase b).	63
Figura 7-3 - Soluzione 4 modificata fase b).	64
Figura 8-1 - Soluzione 2 modificata fase a (pannello superiore) e fase b (pannello inferiore) – coefficiente di riflessione delle opere portuali	65
Figura 8-2 - “downtime” delle banchine portuali per la soluzione 2 modificata in Fase A (numero di ore medio all’anno di superamento della soglia $Hs, lim$ ): pannello A: $Hs, lim = 0,5 m$ ; pannello B: $Hs, lim = 1,0 m$ .	66
Figura 8-3 “downtime” delle banchine portuali per la soluzione 2 modificata in Fase B (numero di ore medio all’anno di superamento della soglia $Hs, lim$ ): pannello A: $Hs, lim = 0,5 m$ ; pannello B: $Hs, lim = 1,0 m$ .	67
Figura 8-4 - Analisi del “downtime” per la Soluzione 2 modificata in Fase a: valori di $Hs$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli.	68
Figura 8-5 - Analisi del “downtime” per la Soluzione 2 modificata in Fase B: valori di $Hs$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli.	69
Figura 8-6 - Analisi delle onde estreme (Tr=10 anni) per la soluzione 2 modificata in fase: a -pannello superiore e b – pannello inferiore. massima $HQs$ espressa in m per ogni banchina.	70
Figura 8-7 - Soluzione 3 modificata fase a (pannello superiore) e fase b (pannello inferiore) – coefficiente di riflessione delle opere portuali	71
Figura 8-8 - “downtime” delle banchine portuali per la soluzione 3 modificata in Fase A (numero di ore medio all’anno di superamento della soglia $Hs, lim$ ): pannello A: $Hs, lim = 0,5 m$ ; pannello B: $Hs, lim = 1,0 m$ .	72
Figura 8-9 - “downtime” delle banchine portuali per la soluzione 3 modificata in Fase b (numero di ore medio all’anno di superamento della soglia $Hs, lim$ ): pannello A: $Hs, lim = 0,5 m$ ; pannello B: $Hs, lim = 1,0 m$ .	72
Figura 8-10 - Analisi del “downtime” per la Soluzione 3 modificata in Fase a: valori di $Hs$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli.	73

Figura 8-11 - Analisi del “downtime” per la Soluzione 3 modificata in Fase b: valori di $H_s$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli.	74
Figura 8-12 - Analisi delle onde estreme ( $T_r=10$ anni) per la soluzione 3 modificata in fase: a -pannello superiore e b – pannello inferiore. massima $H_{Qs}$ espressa in m per ogni banchina.	75
Figura 8-13 - Soluzione 4 fase b modificata – coefficiente di riflessione delle opere portuali	76
Figura 8-14 - “downtime” delle banchine portuali per la soluzione 4 modificata in Fase b (numero di ore medio all’anno di superamento della soglia $H_s, lim$ ): pannello A: $H_s, lim = 0,5$ m; pannello B: $H_s, lim = 1,0$ m.	77
Figura 8-15 - Analisi del “downtime” per la Soluzione 4 modificata in Fase b: valori di $H_s$ nel dominio di calcolo per le quattro condizioni di moto ondoso incidente riportate nei pannelli.	78
Figura 8-16 - Analisi delle onde estreme ( $T_r=10$ anni) per la soluzione 4 modificata in fase a. Massima $H_{Qs}$ espressa in m per ogni banchina.	79
Figura 9-1 - Fase a: operatività delle banchine portuali con $H_s, lim = 0,5$ m. Comparazione tra lo stato attuale e la Soluzione 2 modificata, la Soluzione 3 modificata e la Soluzione 4.	80
Figura 9-2 - Fase a: operatività delle banchine portuali con $H_s, lim = 1,0$ m. Comparazione tra lo stato attuale e la Soluzione 2 modificata, la Soluzione 3 modificata e la Soluzione 4.	81
Figura 9-3 - Fase a: sicurezza delle banchine con onde estreme. Comparazione tra lo stato attuale e la Soluzione 2 modificata, la Soluzione 3 modificata e la Soluzione 4.	82
Figura 9-4 - Fase B: operatività delle banchine portuali con $H_s, lim = 0,5$ m. Comparazione tra lo stato attuale e la Soluzione 2 modificata, la Soluzione 3 modificata e la Soluzione 4.	83
Figura 9-5 - Fase B: operatività delle banchine portuali con $H_s, lim = 1,0$ m. Comparazione tra lo stato attuale e la Soluzione 2 modificata, la Soluzione 3 modificata e la Soluzione 4.	84
Figura 9-6 - Fase b: sicurezza delle banchine con onde estreme. Comparazione tra lo stato attuale e la Soluzione 2 modificata, la Soluzione 3 modificata e la Soluzione 4 modificata.	85
Figura 10-1 - situazione attuale: frequenza di superamento in ore/anno della soglia $h_s=2,5$ m all’esterno del porto di genova.	86
Figura 10-2 - Soluzione 4 fase b modificata: frequenza di superamento in ore/anno della soglia $h_s=2,5$ m.	87

## **INDICE DELLE TABELLE**

Tabella 2-1 - a) Clima ondametrico incidente le opere foranee con $H_s > 1,0$ m; b) periodi del moto ondoso associati agli stati di mare con $H_s > 1,0$ m.	21
Tabella 3-1 Condizioni di moto ondoso incidenti con $Tr=10$ anni prese in esame per simulare le condizioni di moto ondoso estreme.	25

## 1. PREMESSE

### 1.1. Introduzione

Il presente documento è stato redatto nell'ambito della Fase 1 del servizio finalizzato all'esame della fattibilità delle alternative progettuali per la realizzazione della nuova diga foranea e riguarda lo studio dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale per le tre configurazioni delle opere foranee selezionate. Lo studio è stato eseguito dalla Modimar Sr.l. ed è stato curato dall'ing. Marco Del Bianco con il coordinamento tecnico-scientifico del Prof. Ing. Paolo De Girolamo.

### 1.2. Obiettivi, metodologia di lavoro e sintesi dei risultati

#### 1.2.1. Obiettivi

L'obiettivo dello studio di seguito esposto, è stato quello di valutare l'agitazione ondosa nel bacino portuale in relazione alle tre soluzioni selezionate per le nuove opere esterne del Porto di Genova, denominate Soluzione 2, Soluzione 3 e Soluzione 4 e sono riportate rispettivamente nella Figura 1-1, nella Figura 1-2 e nella Figura 1-3 dove, per ciascuna di esse, sono distinte le due Fasi realizzative a) e b).

Per la descrizione di dettaglio delle tre soluzioni si rimanda al "Volume 14 – Le soluzioni alternative di intervento selezionate". Per le finalità del presente studio si evidenziano i seguenti aspetti:

- per tutte e tre le soluzioni si conserva l'imboccatura attuale orientata verso Levante lungo la direzione 115° N;
- tutte e tre le soluzioni sono caratterizzate da un canale di accesso rettilineo di stesse dimensioni (lungo 2 km incluso il cerchio di evoluzione e largo 310 m) e lo stesso diametro del cerchio di evoluzione (800 m) con centro posizionato lungo l'asse del canale di accesso;
- le Soluzioni 2 e 3 prevedono una nuova imboccatura orientata a Levante lungo la direzione 115° N (parallela a quella attuale);
- la Soluzione 3, a differenza della 2, consente di accedere con la nuova imboccatura anche nel porto vecchio con una rotta che prevede una accostata a dritta di 135°;
- la Soluzione 4 prevede una nuova imboccatura portuale orientata verso Ponente lungo la direzione 270° N consentendo così di accedere anche nel porto vecchio con una rotta sostanzialmente rettilinea.

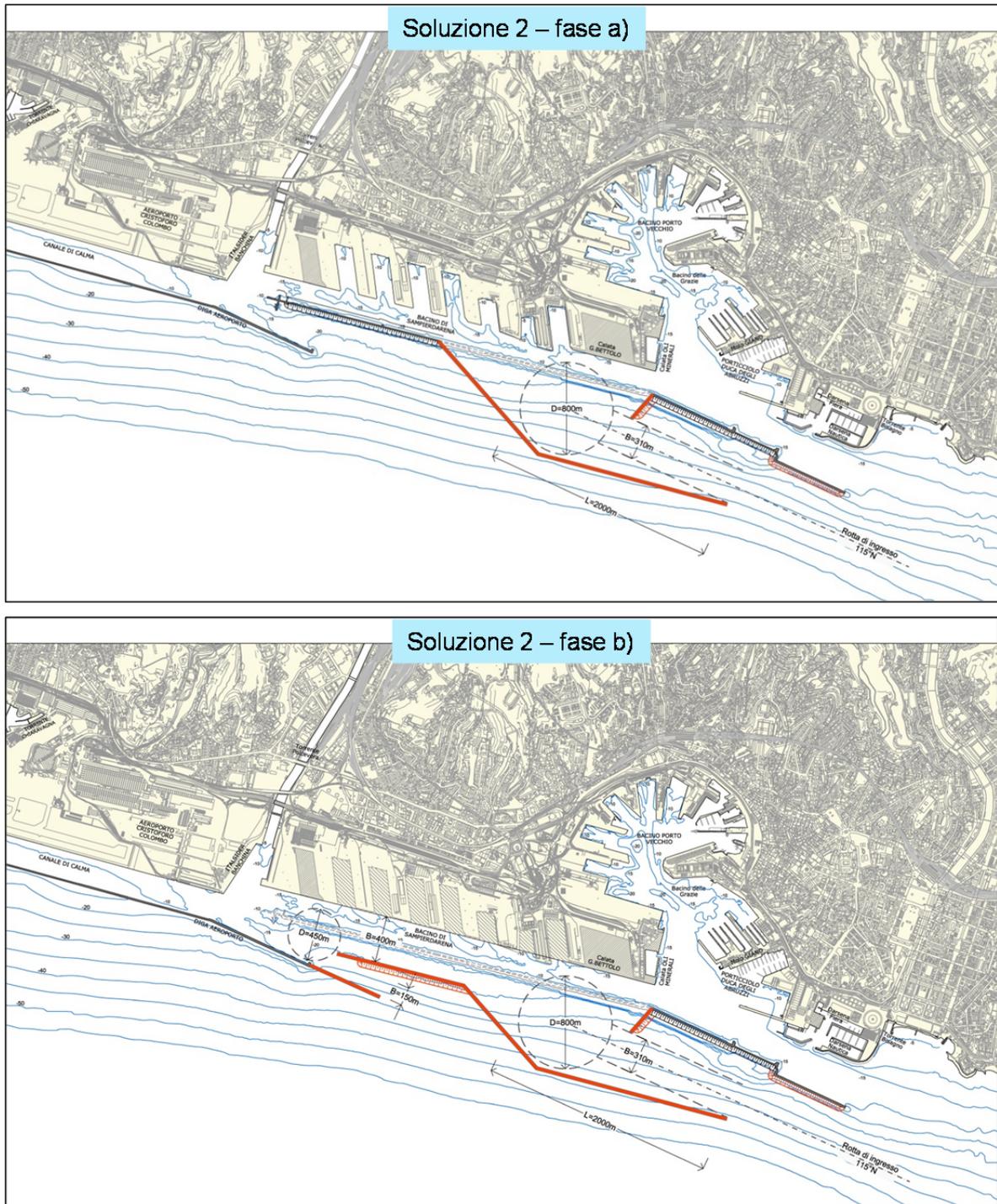


FIGURA 1-1 - SOLUZIONE ALTERNATIVA D'INTERVENTO 2

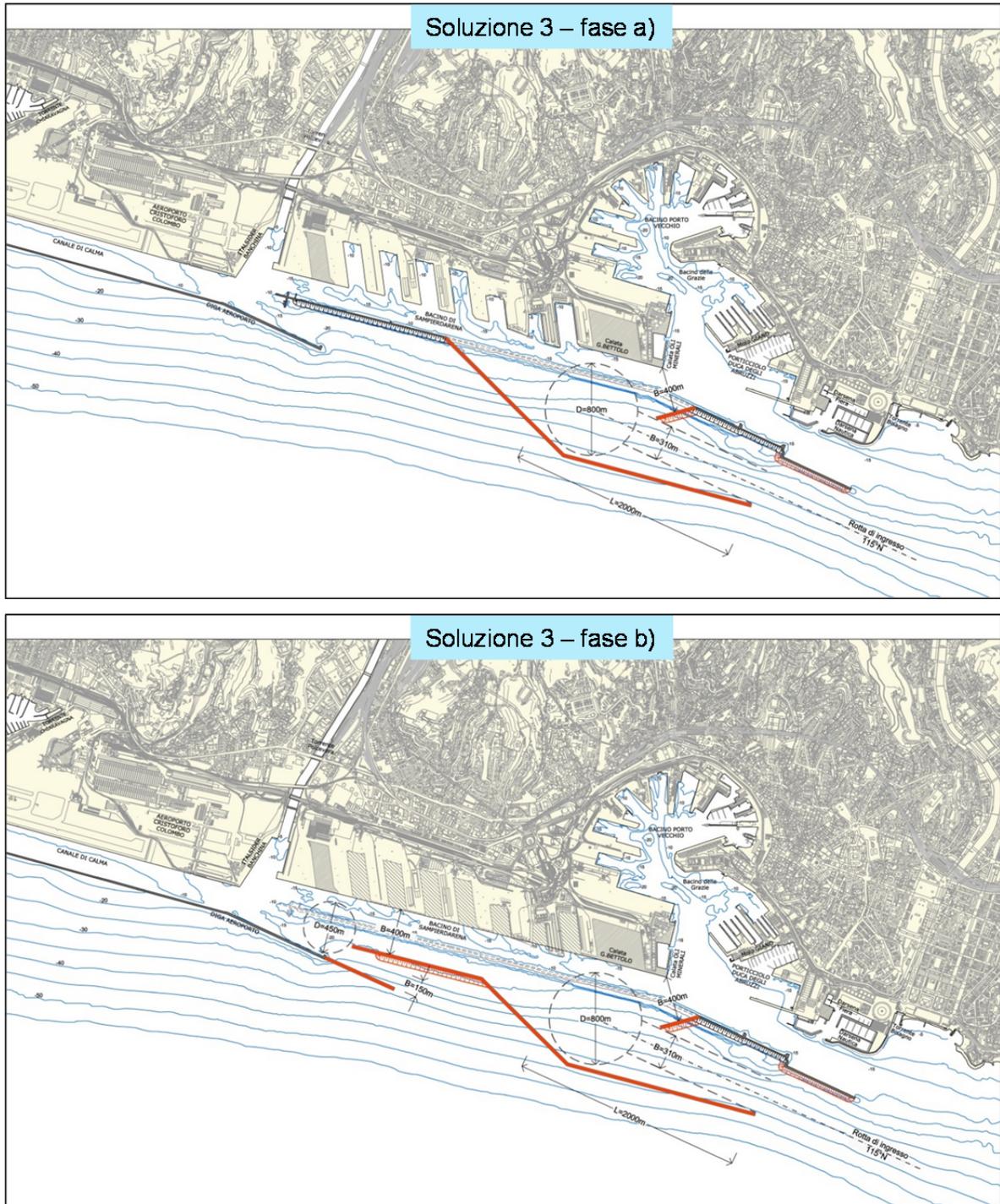


FIGURA 1-2 - SOLUZIONE ALTERNATIVA D’INTERVENTO 3

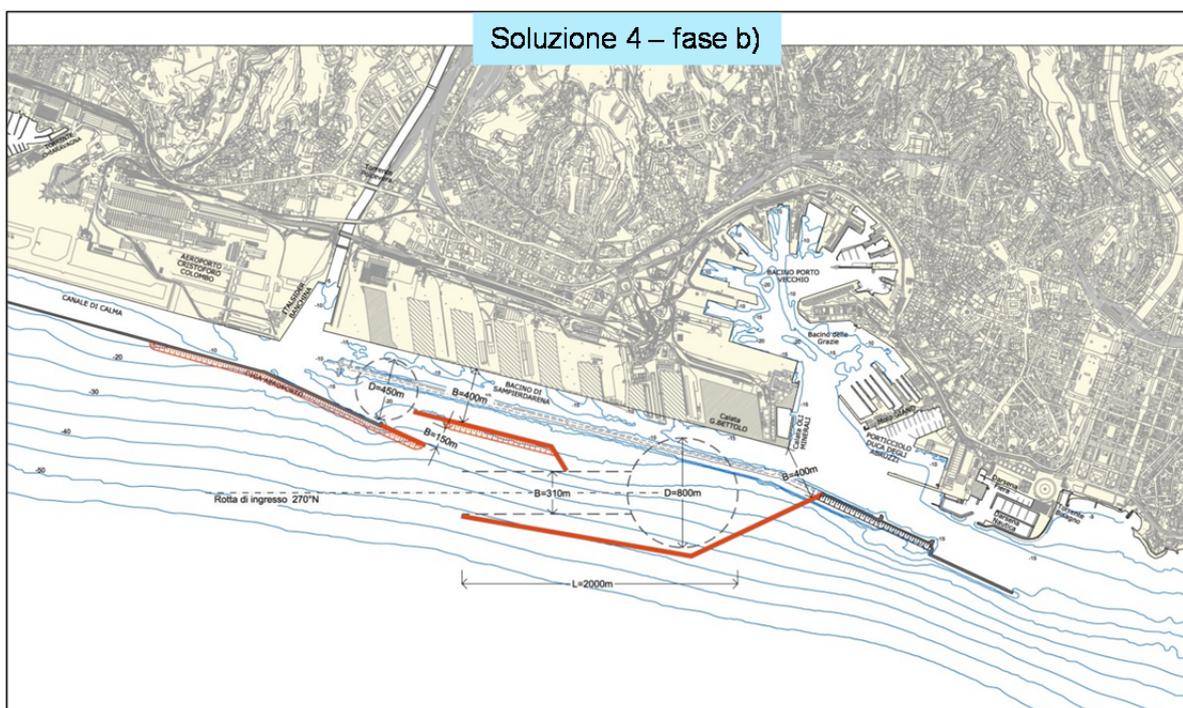
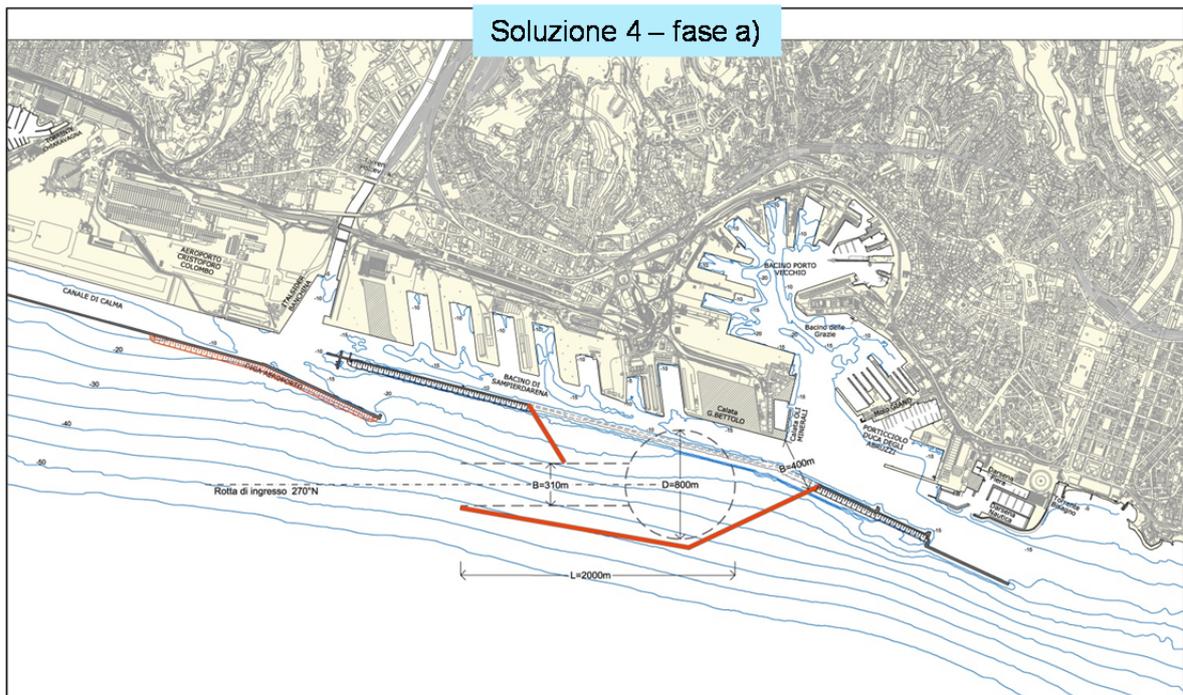


FIGURA 1-3 - SOLUZIONE ALTERNATIVA D'INTERVENTO 4

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

La valutazione dell’agitazione ondosa all’interno del bacino portuale per le tre soluzioni selezionate è stata eseguita prendendo in esame:

- (i) i tempi medi annuali di non operatività (“downtime”) delle banchine portuali;
- (ii) le condizioni di moto ondoso estreme che si determinano lungo le banchine portuali con stati di mare incidenti caratterizzati da un tempo di ritorno  $T_r=10$  anni.

Le stesse valutazioni sono state eseguite per la situazione attuale allo scopo di verificare rispetto a quest’ultima le variazioni in termini di agitazione ondosa residua apportate dalle nuove opere foranee.

Come criteri di riferimento si è valutato ai fini dell’operatività ai terminali un ‘downtime’ non superiore a 150-200 ore all’anno per un’altezza d’onda limite in banchina di 0,5 m e per la sicurezza all’ormeggio un’altezza d’onda inferiore a 2,5 m per un evento che si verifica mediamente una volta ogni 10 anni. Questi valori sono raccomandati nell’ambito della letteratura specialistica e dagli operatori portuali locali.

Si espone di seguito l’approccio metodologico seguito.

#### 1.2.2. Metodologia di lavoro

In generale le opere esterne di un porto svolgono la funzione di garantire due requisiti fondamentali, ovvero:

- I. devono rendere agevoli e sicure le manovre e le evoluzioni delle navi in ingresso e uscita dal porto (aspetti navigazionali);
- II. devono creare uno specchio d’acqua sufficientemente protetto dal moto ondoso incidente per limitare i movimenti delle navi all’ormeggio indotti dalle onde che riescono a penetrare nel porto e quindi per consentire sia di eseguire le operazioni di carico/scarico delle navi, sia lo stazionamento in sicurezza delle stesse navi anche in presenza di mareggiate.

Generalmente questi due requisiti risultano tra di loro antitetici, ovvero il miglioramento di uno può comportare il peggioramento dell’altro. Ciò è dovuto al fatto che per garantire una buona capacità di manovra alla nave in ingresso al porto (requisito I) è necessario assicurare: (i) una rotta di accesso il più possibile rettilinea; (ii) che il moto ondoso provenga prevalentemente dai settori di giardinetto della nave (“quarter”). Il soddisfacimento di queste due esigenze può dar luogo ad una sensibile penetrazione delle onde all’interno del porto a discapito del requisito II.

Pertanto lo studio della configurazione ottimale delle opere esterne di un porto è finalizzato a definire una soluzione di compromesso in grado di mediare tra le esigenze contrapposte necessarie per perseguire i requisiti I e II.

L'analisi del primo requisito, ovvero quello navigazionale, è oggetto di valutazioni impiegando il simulatore di manovra "in tempo reale" del centro di ricerca inglese HR Wallingford, mentre l'analisi del secondo requisito, inerente le condizioni di stazionamento all'ormeggio delle navi, è eseguita mediante l'applicazione di codici numerici e costituisce l'obiettivo del presente studio.

Detto studio è stato eseguito preliminarmente all'analisi degli aspetti navigazionali, perché, data la rilevanza delle modifiche portuali in progetto, prima di eseguire lo studio di navigabilità, si è ritenuto opportuno verificare con dati oggettivi che tutte le tre le soluzioni proposte fossero in grado di proteggere in modo adeguato le banchine portuali dal moto ondoso incidente.

Come accennato, la penetrazione del moto ondoso all'interno di un porto determina i movimenti delle navi all'ormeggio, i quali, a loro volta, influenzano le operazioni di carico e scarico delle merci. In generale le operazioni di carico/scarico vengono rallentate al crescere dei movimenti della nave e quindi all'aumentare delle condizioni di esposizione al moto ondoso lungo le banchine di ormeggio.

Quando i movimenti della nave superano determinate soglie, che dipendono dalle caratteristiche operative dei mezzi impiegati per la movimentazione delle merci oltre che dalle dimensioni delle navi, le attività di carico/scarico devono essere sospese, anche se le navi possono rimanere ormeggiate alle stesse banchine. La sospensione delle attività di movimentazione delle merci causa la riduzione dell'operatività della banchina.

Al crescere ulteriormente del moto ondoso che investe la nave all'ormeggio, i movimenti della nave possono aumentare fino a raggiungere valori tali da produrre, ad esempio, la rottura dei dispositivi di ormeggio e quindi determinare condizioni di rischio per la sicurezza delle navi e degli operatori portuali. Ovviamente prima di raggiungere le condizioni di moto ondoso limite per la sicurezza, la nave è costretta ad abbandonare l'ormeggio e in alcuni casi il porto.

Nei porti molto protetti dal moto ondoso incidente, come attualmente è il Porto di Genova, le condizioni limite per la sicurezza delle navi vengono raggiunte raramente o addirittura mai. Questi porti vengono anche chiamati porti rifugio.

I terminali la cui operatività è maggiormente condizionata dai movimenti delle navi ormeggiate, sono quelli Contenitori e Ro-Ro, che a Genova sono localizzati prevalentemente nel bacino di Sampierdarena.

Oltre all'altezza delle onde, anche l'angolo formato tra la direzione di propagazione del moto ondoso che investe la nave e il suo asse longitudinale, ha una influenza rilevante nel determinare i movimenti della stessa nave. In particolare i movimenti della nave tendono ad aumentare all'aumentare di questo angolo e raggiungono valori massimi quando il moto ondoso incide al traverso la nave. Infatti in queste condizioni le onde eccitano facilmente il movimento di rollio il quale, peraltro, è quello che risulta più difficile da contrastare con i sistemi di ormeggio. Inoltre i periodi propri di rollio delle navi rientrano nel campo dei periodi delle onde che penetrano nei porti e pertanto possono essere facilmente eccitati dal moto ondoso residuo.

Per quanto riguarda gli spostamenti verticali causati dal moto di rollio della nave si osserva che per la nave contenitori di progetto, caratterizzata da una larghezza di circa 60 m, anche un solo grado di rollio produce in corrispondenza delle fiancate della nave uno spostamento verticale di circa 50 cm, supera il metro per un angolo di rollio di soli due gradi. Spostamenti di questa entità possono risultare non compatibili con le operazioni di carico e scarico delle navi a causa della difficoltà che incontra l'operatore della "portainer", installata a terra, per agganciare con lo "spreader" i golfari dei contenitori in movimento con la nave.

In via preliminare i movimenti delle navi possono essere correlati alle condizioni di moto ondoso che interessano le banchine portuali. Per le contenitori e per le Ro-Ro la letteratura specializzata (ad esempio le raccomandazioni marittime spagnole "ROM" e le raccomandazioni dell'AIPCN) è concorde nell'indicare quale valore di soglia per l'altezza d'onda significativa  $H_s$  oltre il quale le operazioni di carico/scarico delle navi vengono rallentate o sospese, il valore  $H_{s,lim} = 0,5$  m.

Dal punto di vista operativo, l'analisi di operatività di una banchina portuale viene eseguita calcolando il numero di ore l'anno durante le quali, mediamente, viene superata la soglia di altezza d'onda significativa massima ammissibile  $H_{s,lim}$  per consentire le operazioni di carico e scarico. Il calcolo ovviamente riguarda le zone di ormeggio della nave, ovvero i fronti di accosto delle singole banchine. Il tempo durante il quale viene superata la soglia  $H_{s,lim}$  per ciascuna banchina, viene denominato "downtime" o, in italiano, tempo di non operatività della banchina. Il "downtime" delle banchine genera un danno economico per il porto.

Il calcolo del “downtime” viene eseguito prendendo in esame il clima ondometrico medio annuale che incide sulle opere foranee.

Come descritto in dettaglio nel seguito, nel presente studio il clima ondometrico medio annuale ottenuto a ridosso del porto (vedi Studio meteomarinò) è stato schematizzato tramite 28 stati di mare distinti per classi di altezza d’onda significativa e direzioni di provenienza.

Le banchine portuali sono state suddivise in opportune aree di riferimento che coprono le zone destinate all’ormeggio delle navi. Per ciascuna di queste aree è stato eseguito il calcolo del “downtime” medio annuale. Le aree di riferimento analizzate coprono tutto il porto di Genova e quindi anche le zone del porto non oggetto di interventi diretti apparentemente non interessate dagli interventi per la nuova diga foranea. Ciò ha consentito di valutare, prendendo come riferimento la situazione attuale, sia i miglioramenti, sia i peggioramenti in termini di agitazione ondosa residua, indotti dal nuovo assetto planimetrico delle opere foranee sull’intero porto.

Per eseguire il calcolo del “downtime” di ciascuna area di riferimento, si è presa in esame un’altezza d’onda significativa rappresentativa dell’area, che è stata denominata  $HQ_s$  la quale è stata confrontata con il valore  $H_{s,lim}$  sopra introdotto secondo la metodologia che viene descritta nel Capitolo 2.

Per quanto riguarda l’analisi della sicurezza delle navi all’ormeggio, Ligteringen e Velsink (“Ports and Terminals”, VSSD, Delft, The Netherlands) ed altri testi specializzati, suggeriscono di fare riferimento agli stati di mare, incidenti le opere foranee del porto, caratterizzati da un tempo di ritorno di 10 anni. Si tratta di mareggiate, che pur essendo estreme, hanno una probabilità elevata di ripetersi più volte durante la vita economica dell’opera. Gli stessi autori però non definiscono, a differenza di quanto invece indicato per l’operatività delle banchine, valori di  $H_s$  da assumere come limite in queste condizioni, poiché essi dipendono in modo rilevante dalla geometria del sistema di ormeggio utilizzato, che a sua volta risulta funzione dalla tipologia e destinazione d’uso del terminale in analisi.

Ad esempio, per l’ormeggio delle rinfusiere liquide, che possono essere soggette anche a movimenti rilevanti durante il loro stazionamento al terminale, si utilizzano dispositivi di accosto flessibili e dispositivi di ormeggio la cui posizione plano-altimetrica è ottimizzata in modo tale da poter realizzare geometrie per i cavi di ormeggio in grado di poter contrastare i movimenti della nave in un ampio campo di variabilità (che può raggiungere anche l’ordine di alcuni metri) senza causare la rottura degli stessi cavi.

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Per ottenere questo risultato è necessario disporre:

- (i) di linee di ormeggio di diversa lunghezza poiché la deformabilità dei cavi dipende, a parità di carico di rottura, dalla loro lunghezza;
- (ii) di una geometria delle linee di ormeggio tale da poter assicurare, anche ai cavi più lunghi, angoli di lavoro adeguati rispetto all’asse longitudinale della nave.

Invece per l’ormeggio delle navi contenitori essendo contraddistinte da un “fronte longitudinale” di carico/scarico è necessario utilizzare banchine continue (“marginal quays”), per le quali non è possibile realizzare sistemi di ormeggio simili a quelli sopra descritti, a causa delle seguenti ragioni:

- i parabordi sono posizionati direttamente sulla banchina e quindi non è possibile dotare i dispositivi di accosto di una adeguata flessibilità strutturale. Inoltre per le banchine continue sussiste un vincolo sulla quota massima di posizionamento dei parabordi che è costituito dalla quota di coronamento delle stesse banchine;
- le bitte sono poste a margine del fronte di accosto della banchina allo scopo di non interferire con le gru. Di conseguenza i cavi di maggiore lunghezza (“cavi alla lunga” o “head and stern lines”) essendo caratterizzati da un angolo di lavoro molto piccolo rispetto all’asse longitudinale della nave, contrastano in modo poco efficace i movimenti trasversali della nave.

Per ovviare parzialmente a questi problemi si può aumentare la lunghezza dei cavi durante le mareggiate, garantendo allo stesso tempo un angolo di lavoro adeguato, posizionando “bitte di tempesta” all’interno del terrapieno di banchina che vengono rese operative quando le operazioni di carico e scarico sono sospese.

Tuttavia nonostante questo accorgimento i massimi movimenti che si riescono a garantire alla nave risultano notevolmente inferiori rispetto a quelli ottenibili per i terminali per prodotti liquidi.

Un requisito che deve essere imposto per le banchine continue che può introdurre una maggiore limitazione rispetto ai movimenti massimi accettabili per la nave, è costituito dal limitare le altezze d’onda che si verificano lungo le banchine al fine di evitare che le onde possano causare fenomeni di allagamento delle stesse banchine e dei terrapieni retrostanti.

Nel presente studio, per eseguire le simulazioni numeriche rivolte a definire le condizioni di moto ondoso estreme che si verificano lungo le banchine portuali, si sono in primo luogo definite le condizioni di moto ondoso incidenti sulle opere foranee caratterizzate

dal tempo di ritorno  $T_r$  di 10 anni. Per ciascuna configurazione e fase realizzativa sono stati simulati sei stati di mare, ciascuno caratterizzato da  $T_r=10$  anni con direzioni di provenienza delle onde al largo differenti e tali da coprire l'intero settore di traversia del Porto di Genova. Per ciascuna area di riferimento definita in precedenza e per ciascuno stato di mare incidente a largo, si è determinato il valore  $HQ_5$  rappresentativo della stessa area. Eseguite tutte le simulazioni si sono quindi assunti, per ciascuna area di riferimento, i valori massimi  $HQ_5$  ottenuti, i quali sono stati utilizzati per caratterizzare il livello di agitazione ondosa di ciascuna area in relazione alle condizioni estreme esaminate.

Per quanto riguarda i codici numerici da impiegare per lo studio della penetrazione ondosa all'interno di un porto, in generale questi devono essere in grado di simulare i fenomeni fisici che dominano la penetrazione del moto ondoso nei bacini portuali, ovvero, in assenza di frangimento come accade per Genova, i fenomeni combinati di diffrazione, riflessione e rifrazione.

Per condurre il presente studio è stato utilizzato il codice numerico CGWAVE che risolve l'equazione detta di "mild-slope", di tipo ellittico, mediante la tecnica numerica degli elementi finiti utilizzando, per discretizzare l'area di calcolo, elementi di forma triangolare con geometria comunque variabile nello spazio. L'equazione di mild-slope (Berkhoff, 1972<sup>1</sup>, De Girolamo et al. (1988)<sup>2</sup>, Beltrami et al. 2001<sup>3</sup>, Bellotti et al. 2003<sup>4</sup>) regola la propagazione di onde regolari in presenza dei fenomeni fisici citati in precedenza. Per maggiori dettagli si rimanda al capitolo 4.

### 1.2.3. Sintesi dei risultati

Come detto, la valutazione dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale per le tre soluzioni selezionate (2, 3 e 4) è stata eseguita prendendo in esame:

- i. i tempi medi annuali di non operatività ("downtime") delle banchine portuali;

---

<sup>1</sup> Berkhoff, J.C.W., (1972), "Computation of combined refraction-diffraction", Proc., 13th Int. Conf. On Coast. Eng., ASCE, New York, 471-490.

<sup>2</sup> De Girolamo, P., Kostense, J.K., Dingemans, M.W. (1988), "Inclusion of wave breaking in a mild slope model", Proc. Int. Con. Computer model in Ocean Eng., Schrefler & Zienkiewicz, Balkema, Rotterdam, the Netherlands.

<sup>3</sup> Beltrami, G.M., Bellotti, G., De Girolamo, P. and Sammarco, P. (2001) "Treatment of Wave Breaking and Total Absorption in a Mild-slope Equation FEM model", Jour. Of Waterway, Port, Coastal and ocean Eng., ASCE, Sept.-Oct. 2001, pp. 263-271.

<sup>4</sup> Bellotti, G., Beltrami, G.M., and De Girolamo, P. (2003), "Internal generation of waves in 2D fully elliptic mild-slope equation FEM models", Coastal Engineering, 49 (2003) pp. 71-81.

- ii. le condizioni di moto ondoso estreme che si determinano lungo le banchine portuali con stati di mare incidenti caratterizzati da un tempo di ritorno  $Tr=10$  anni (sicurezza delle navi all’ormeggio).

Le stesse valutazioni sono state eseguite per lo stato attuale del Porto di Genova allo scopo di verificare rispetto ad esso le variazioni in termini di agitazione ondosa residua apportate dalle nuove opere foranee.

I risultati ottenuti per lo stato attuale confermano che oggi le opere esterne del Porto di Genova garantiscono una elevata protezione dello specchio d’acqua portuale dal moto ondoso incidente, tanto che, da questo punto di vista, il porto può essere considerato, a ragione, un “porto rifugio”.

I risultati ottenuti per le tre soluzioni selezionate sia per il “downtime” (i) sia per la sicurezza delle navi all’ormeggio (ii), hanno mostrato che:

- per garantire una adeguata protezione dal moto ondoso incidente del bacino portuale anche in relazione alla situazione attuale, risulta necessario modificare le Soluzioni 2 e 3 in Fase a) e in Fase b) e la Soluzione 4 solo in Fase b);
- lungo il canale di accesso e nel cerchio di evoluzione delle tre Soluzioni esaminate non si riscontra una agitazione ondosa tale da condizionare gli aspetti navigazionali.

Le modifiche apportate alle configurazioni sono state eseguite in modo tale da garantire:

- a) la stessa larghezza e lo stesso orientamento ( $115^\circ$  N) del canale di accesso delle soluzioni originali allo scopo di non peggiorare gli aspetti navigazionali delle stesse soluzioni originali;
- b) la massima protezione del bacino portuale interno senza introdurre alcuna forma di impatto morfologico delle nuove opere sulla costa posta a Levante del porto.

Le Soluzioni 2 e 3 “Modificate” richiedono di incrementare, fin dalla Fase a), in modo considerevole la lunghezza della diga foranea (tra circa 700 e 800 m) con un conseguente rilevante aggravio dei costi trattandosi di opere che si sviluppano tra i -45,0 m e i -50,0 m di profondità rispetto al livello medio marino locale.

Per la Soluzione 4 in Fase b), l’unica modifica di rilievo che è risultata necessario apportare, riguarda solo il prolungamento della diga dell’aeroporto, che peraltro si è dovuta apportare anche per le Soluzioni 2 e 3 in Fase b) e che quindi non comporta un aggravio dei costi per gli aspetti comparativi tra le diverse soluzioni.

Per quanto riguarda la Fase a), il confronto tra le Soluzioni 2 e 3 modificate, la Soluzione 4 e lo stato attuale del Porto di Genova ha mostrato che:

1. la Soluzione 4 fornisce, rispetto alle altre due Soluzioni, le maggiori prestazioni in termini di attenuazione del moto ondoso incidente, sia in relazione al “downtime” delle banchine, sia in relazione alla sicurezza delle navi all’ormeggio;
2. le Soluzioni 2 e 3 Modificate comunque forniscono globalmente una adeguata protezione dal moto ondoso incidente anche in relazione allo stato attuale. E’ da rilevare che queste due Soluzioni forniscono un peggioramento, rispetto alla situazione attuale, dell’agitazione ondosa lungo le banchine poste in prossimità della sponda sinistra della foce del Polcevera;
3. per tutte le soluzioni si è valutato ai fini dell’operatività ai terminali un ‘downtime’ non superiore a 150-200 ore all’anno per un’altezza d’onda limite in banchina di 0,5 m e per la sicurezza all’ormeggio un’altezza d’onda inferiore a 2,5 m per un evento che si verifica mediamente una volta ogni 10 anni. Questi valori sono raccomandati nell’ambito della letteratura specialistica e dagli operatori portuali locali.
4. tutte e tre le soluzioni non determinano nel Porto Vecchio un aumento dell’agitazione ondosa rispetto allo stato attuale.

Per quanto riguarda la Fase b), si possono trarre delle conclusioni simili a quelle sopra riportate per la Fase a), ovvero la soluzione che fornisce le migliori prestazioni rimane la Soluzione 4 modificata e quindi si confermano le conclusioni riportate ai punti 2 e 3 precedenti.

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

## 2. ANALISI DEL “DOWNTIME”

### 2.1. Moto ondosso

L’analisi del “downtime” è stata eseguita sulla base del clima ondometrico medio annuale ottenuto nell’ambito dello Studio Meteomarino per un punto posto a largo del Porto di Genova posto alla profondità di -50 m s.l.m.m. cui si rimanda per i dettagli.

L’analisi è stata eseguita prendendo in esame solo gli stati di mare incidenti caratterizzati da  $H_s > 1,0 m$ , ovvero quelli dotati di maggiore energia che risultano di interesse ai fini dell’agitazione interna portuale.

Nella Tabella 2-1 è riportato sulla sinistra, pannello A), il clima medio annuale derivato dallo Studio Meteomarino. I valori riportati nel pannello A esprimono, in percentuale, le frequenze medie annuali di accadimento degli stati di mare ricadenti nelle classi di direzione di provenienza ed altezza d’onda significativa indicate nella stessa tabella. Per eseguire il calcolo del “downtime”, ciascuna classe della tabella è stata rappresentata da uno stato di mare avente: (i) direzione di provenienza della classe; (ii) altezza  $H_s$  pari all’altezza d’onda media della classe; (iii) frequenza media annuale di accadimento della classe. In totale quindi si sono presi in esame 28 stati di mare.

Nel pannello di destra della Tabella 2-1, pannello B), sono indicati i periodi di picco  $T_p$ , espressi in secondi, che sono stati associati a ciascuno stato di mare utilizzato per riprodurre il clima ondometrico. I valori di  $T_p$  sono stati derivati dalla correlazione  $H_s$ - $T_p$  riportata nello Studio Meteomarino.

TABELLA 2-1 - A) CLIMA ONDAMETRICO INCIDENTE LE OPERE FORANEE CON  $H_s > 1,0 M$ ; B) PERIODI DEL MOTO ONDOSO ASSOCIATI AGLI STATI DI MARE CON  $H_s > 1,0 M$ .

A) ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA $H_s$ [m]						
Dir °N	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	>5.00	Tot $H_s > 1$
120	0.01					0.0
135	0.49	0.04	0.002	0.0003		0.5
150	0.74	0.11	0.02	0.002		0.9
165	0.43	0.05	0.003	0.002		0.5
180	0.79	0.09	0.009	0.0003		0.9
195	4.62	0.50	0.06	0.007	0.0003	5.2
210	5.16	1.24	0.15	0.01	0.0003	6.6
225	0.007					0.0
<b>Totale</b>	<b>12.2</b>	<b>2.03</b>	<b>0.2</b>	<b>0.025</b>	<b>0.001</b>	<b>14.5</b>

B) VALORE DI $T_p$ ASSOCIATO ALLE CLASSI DI $H_s$					
Dir °N	Altezza d'onda significativa $H_s$ (m)				
	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
120	9	0	0	0	0
135	7	8	9	9	0
150	7	8	9	9	0
165	7	8	9	10	0
180	7	8	10	11	0
195	7	9	10	10	10
210	8	9	10	11	11
225	11	0	0	0	0

Gli stati di mare incidenti, caratterizzati dalle direzioni di provenienza rappresentate graficamente nella Figura 2-1, sono stati simulati tenendo conto della dispersione in direzione dell’energia in un settore direzionale di  $\pm 15^\circ$  rispetto alla direzione centrale di provenienza delle onde.

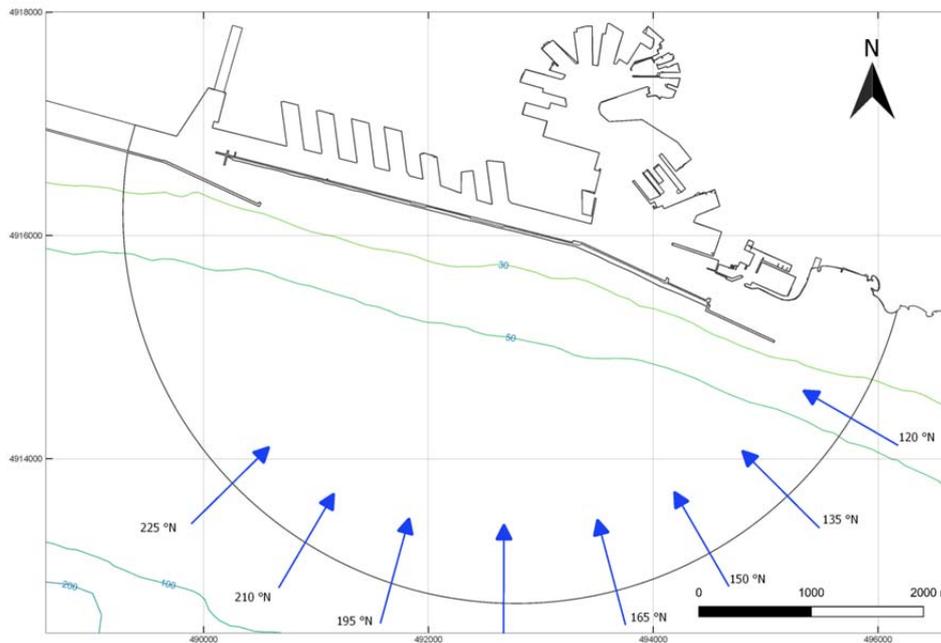


FIGURA 2-1 - DIREZIONI DI PROVENIENZA DEL MOTO ONDOSO A RIDOSO DELLE OPERE FORANEE PER L’ANALISI DEL “DOWNTIME”.

## 2.2. Metodologia di analisi

Come già scritto nelle premesse, l’analisi di operatività di una banchina portuale viene eseguita calcolando il numero di ore l’anno durante le quali, mediamente, viene superata la soglia di altezza d’onda significativa massima ammissibile,  $H_{s,lim}$ , per consentire le operazioni di carico e scarico. Il calcolo ovviamente riguarda le zone di ormeggio della nave, ovvero i fronti di accosto delle singole banchine. Il tempo durante il quale viene superata la soglia  $H_{s,lim}$  per ciascuna banchina, viene denominato “downtime” o, in italiano, tempo di non operatività della banchina. Il “downtime” delle banchine genera un danno economico per il porto.

In accordo con la letteratura specializzata per il calcolo del “downtime” delle banchine si è assunto il valore di soglia  $H_{s,lim} = 0,5$  m, valido per navi Contenitori e Ro-Ro. Il “downtime” delle banchine è stato determinato anche in relazione alla soglia meno cautelativa  $H_{s,lim} = 1,0$  m.

Con riferimento alla Figura 2-2 relativa alla fase realizzativa a) e alla Figura 2-3 relativa alla fase realizzativa b), le banchine portuali sono state suddivise in opportune aree di riferimento che coprono le zone destinate all’ormeggio delle navi. Come si evince dalle figure, le aree di riferimento coprono tutto il Porto di Genova e quindi anche le zone del porto non oggetto di interventi diretti, apparentemente non interessate dagli interventi per

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

la nuova diga foranea. Ciò ha consentito di valutare, prendendo come riferimento la situazione attuale, sia i miglioramenti, sia i peggioramenti in termini di agitazione ondosa residua, indotti dal nuovo assetto planimetrico delle nuove opere foranee.

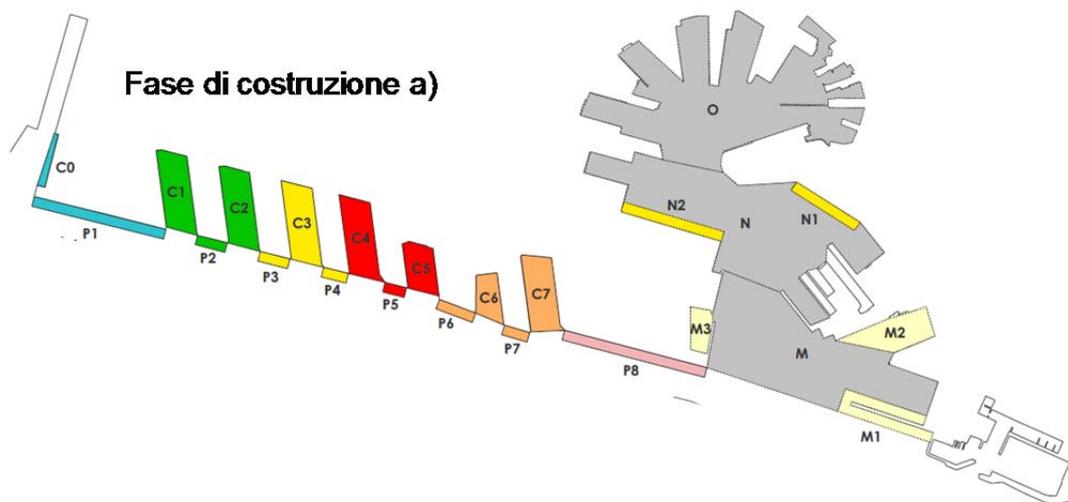


FIGURA 2-2 – FASE REALIZZATIVA A): AREE DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO DEL “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI.

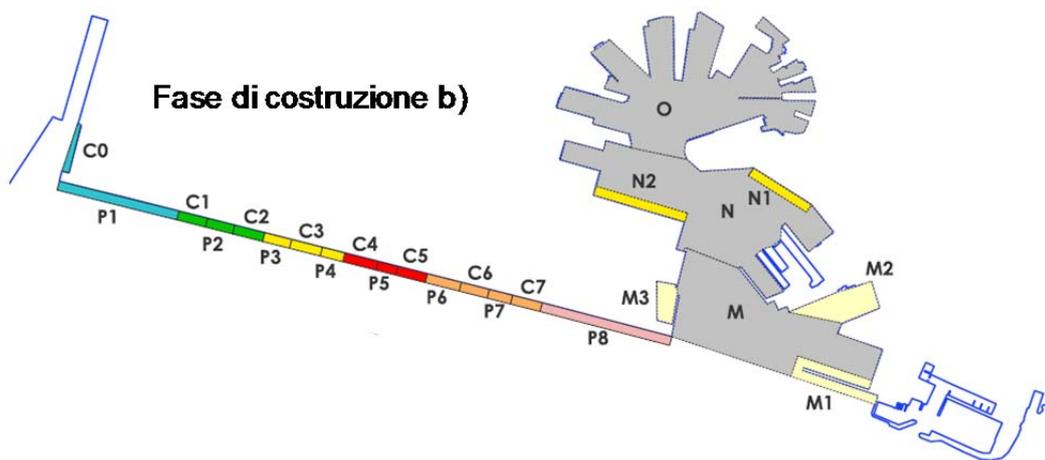


FIGURA 2-3 - FASE REALIZZATIVA B): AREE DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO DEL “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI.

Confrontando la Figura 2-2 con la Figura 2-3, si osserva che la differenza tra la fase di costruzione *a)* e quella *b)* inerente le opere interne portuali, riguarda l’eliminazione nella fase *b)* delle darsene trapeziche attualmente presenti a Sampierdarena, ottenuta mediante la rettificazione dei fili banchina che attualmente si aggettano maggiormente verso il mare e colmamento delle stesse darsene trapeziche.

Per ciascuna delle aree di riferimento è stato eseguito il calcolo del “downtime” medio annuale. Per eseguire il calcolo del “downtime” di ciascuna area di riferimento, si è presa in esame un’altezza d’onda significativa rappresentativa dell’area, che è stata denominata  $HQ_s$  la quale è stata confrontata con il valore  $H_{s,lim}$  sopra introdotto. Tale altezza d’onda è stata definita:

$$HQ_s = \overline{H_s} + \alpha \cdot \sigma(H_s)$$

dove:

- $\overline{H_s}$  è l’altezza d’onda significativa media calcolata sull’area di riferimento;
- $\sigma(H_s)$  è la deviazione standard dei valori di  $H_s$  calcolati sull’area di riferimento;
- $\alpha$  è una costante calcolata per ogni area, tale che  $HQ_s$  venga superato solo dal 5% dei valori maggiori di  $H_s$  calcolati sull’area di riferimento.

Sostanzialmente  $HQ_s$ , essendo superata da un numero limitato di altezze d’onda, rappresenta la popolazione dei valori più elevati delle  $H_s$  che si verificano sull’area di riferimento. Si osserva che se l’area di riferimento fosse caratterizzata in tutti i nodi di calcolo del modello di propagazione del moto ondoso utilizzato, da un valore costante di  $H_s$  (onde progressive), si otterrebbe:  $\sigma(H_s) = 0$  e quindi:

$$HQ_s = \overline{H_s} = H_s$$

Tuttavia nelle aree di riferimento l’altezza d’onda significativa risulta generalmente variabile, sia a causa della variabilità nello spazio delle altezze d’onda che penetrano nel porto, sia a causa della riflessione indotta dalle banchine portuali che generano un moto ondoso parzialmente stazionario. La discretizzazione spaziale utilizzata per applicare il modello numerico di propagazione del moto ondoso, è stata operata in modo tale da ottenere, per ciascuna area di riferimento, un numero di nodi di calcolo superiore ad alcune centinaia.

L’analisi del “downtime” ha riguardato, per ciascuna configurazione e fase realizzativa, anche il canale di accesso e il bacino di evoluzione e manovra delle navi, dove sono stati assegnati, in accordo con la letteratura di settore, quali condizioni operative limite, i seguenti valori:

- canale di accesso  $H_{s,lim} = 2,0$  m;
- bacino di evoluzione e manovra  $H_{s,lim} = 1,5$  m.

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

### 3. ANALISI DELLE CONDIZIONI ESTREME

#### 3.1. Moto ondosso

L’analisi della sicurezza delle navi all’ormeggio è stata eseguita facendo riferimento agli stati di mare caratterizzati da un tempo di ritorno di 10 anni (vedi ad esempio Ligteriningen e Velsink “Ports and Terminals”, VSSD, Delft, The Netherlands). Si tratta di mareggiate, che pur essendo estreme, hanno una probabilità elevata di ripetersi più volte durante la vita economica dell’opera.

Gli stati di mare analizzati incidenti le opere foranee, sono riportati nella Tabella 3-1 che è stata derivata dallo Studio Meteomarino. Nelle colonne di sinistra della Tabella 3-1 sono riportate le condizioni di moto ondosso a largo, mentre nelle colonne di destra sono riportate le condizioni di moto ondosso a ridosso delle opere foranee (sottocosta) che sono state utilizzate come condizioni al contorno per le simulazioni numeriche. In totale sono stati presi in esame sei stati di mare le cui direzioni coprono l’intero settore di traversia del Porto di Genova.

TABELLA 3-1 CONDIZIONI DI MOTO ONDOSSO INCIDENTI CON TR=10 ANNI PRESE IN ESAME PER SIMULARE LE CONDIZIONI DI MOTO ONDOSSO ESTREME.

#### Scirocco

Settore 105-180 °N						
al largo				sottocosta punto P1 (-50 m s.l.m.)		
TR [anni]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]
10	4.6	8.8	120	4.0	9.1	131
	4.6	8.8	150	4.5	9.1	152
	4.6	8.8	180	4.5	9.1	179

#### Libeccio - Mezzogiorno

Settore 180 – 240 °N						
al largo				sottocosta nel punto P1 (-50 m s.l.m.)		
TR [anni]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]
10	6.4	10.3	180	6.3	10.6	179
	6.4	10.3	210	5.9	10.6	203
	6.4	10.3	240	4.0	9.8	216

### **3.2. Metodologia di analisi**

Per ciascuna configurazione e fase realizzativa sono stati simulati i sei stati di mare sopra definiti.

Per ciascuna area di riferimento definita in precedenza e per ciascuno stato di mare incidente a largo, si è determinato il valore  $HQ_5$  rappresentativo della stessa area.

Eseguite tutte le simulazioni si sono quindi assunti, per ciascuna area di riferimento, i valori massimi  $HQ_5$ . Questi valori massimi consentono una caratterizzazione oggettiva del livello di agitazione ondosa di ciascuna area cui fare riferimento per l'analisi delle condizioni estreme della sicurezza delle navi ormeggiate.

#### 4. MODELLO NUMERICO UTILIZZATO

Per condurre il presente studio è stato utilizzato il codice numerico CGWAVE, sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, che risolve l'equazione detta di "mild-slope" (Berkhoff, 1972<sup>5</sup>, De Girolamo et al. (1988)<sup>6</sup>, Beltrami et al. 2001<sup>7</sup>, Bellotti et al. 2003<sup>8</sup>) di tipo ellittico, mediante la tecnica numerica degli elementi finiti utilizzando, per discretizzare l'area di calcolo, elementi di forma triangolare con geometria comunque variabile nello spazio. L'equazione di mild-slope regola la propagazione di onde regolari su fondali variabili in presenza dei fenomeni fisici combinati di diffrazione, rifrazione, riflessione e dissipazioni di energia per frangimento e attrito sul fondo. Il modello può tenere conto della dispersione in direzione e frequenza dell'energia.

Si osserva che i codici agli elementi finiti che risolvono la versione ellittica della mild-slope, costituiscono attualmente uno degli strumenti maggiormente affidabili e versatili per eseguire studi di penetrazione del moto ondoso nei bacini portuali. Uno dei vantaggi di questi codici risiede nel fatto che è possibile imporre, con esattezza, lungo le linee che identificano le banchine portuali, il coefficiente di riflessione desiderato.

Ciò invece non è possibile, ad esempio, con i modelli tipo "Boussinesq", per i quali è necessario creare lungo le banchine contorni "fittizi" assorbenti, denominati nella letteratura specializzata "sponge-layers". Questi contorni occupano uno spazio "fisico" in direzione ortogonale alla banchina, che nella realtà non esiste. La larghezza degli "sponge-layers" dipende dalla lunghezza delle onde incidenti e dal coefficiente di riflessione che si vuole riprodurre numericamente. In tal modo si è costretti a modificare in modo "fittizio", rispetto alla realtà, la geometria delle banchine, ottenendo risultati "approssimati" proprio nella zona di maggior interesse, ovvero dove ormeggiano le navi.

Un ulteriore vantaggio dei modelli tipo "mild-slope" agli elementi finiti, risiede nel fatto che la griglia di calcolo consente di seguire in modo accurato geometrie dei contorni anche molto articolate e di qualsiasi forma, poiché è possibile modificare, dove è necessario, la forma e la dimensione degli elementi, senza incrementare in modo rilevante

---

<sup>5</sup> Berkhoff, J.C.W., (1972), "Computation of combined refraction-diffraction", Proc., 13th Int. Conf. On Coast. Eng., ASCE, New York, 471-490.

<sup>6</sup> De Girolamo, P., Kostense, J.K., Dingemans, M.W. (1988), "Inclusion of wave breaking in a mild slope model", Proc. Int. Con. Computer model in Ocean Eng., Schrefler & Zienkiewicz, Balkema, Rotterdam, the Netherlands.

<sup>7</sup> Beltrami, G.M., Bellotti, G., De Girolamo, P. and Sammarco, P. (2001) "Treatment of Wave Breaking and Total Absorption in a Mild-slope Equation FEM model", Jour. Of Waterway, Port, Coastal and ocean Eng., ASCE, Sept.-Oct. 2001, pp. 263-271.

<sup>8</sup> Bellotti, G., Beltrami, G.M., and De Girolamo, P. (2003), "Internal generation of waves in 2D fully elliptic mild-slope equation FEM models", Coastal Engineering, 49 (2003) pp. 71-81.

i tempi di calcolo. Ciò non è possibile, ad esempio, con i codici tipo Boussinesq che di solito risolvono le equazioni discretizzandole alle differenze finite su griglie di calcolo di forma rettangolare e con passo costante.

L’area simulata con il codice è riportata nella Figura 4-1 dove viene rappresentata, a titolo di esempio, anche la batimetria di calcolo per la situazione attuale. Il dominio esterno di forma semicircolare ha un diametro di circa 7,0 km e lungo di esso è stata imposta: (i) la condizione al contorno relativa alle caratteristiche delle onde incidenti da largo; (ii) la condizione di radiazione verso l’infinito delle onde “scatterate” dal dominio di calcolo. Il numero di elementi e di nodi in cui l’area di calcolo è stata discretizzata, pur variando al variare delle configurazioni delle opere portuali prese in esame, è risultato nell’ordine di circa 650.000 elementi e di circa 330.000 nodi.

I coefficienti di riflessione utilizzati per simulare le opere esterne ed interne portuali sono riportati nei paragrafi seguenti relativi alle varie configurazioni esaminate.

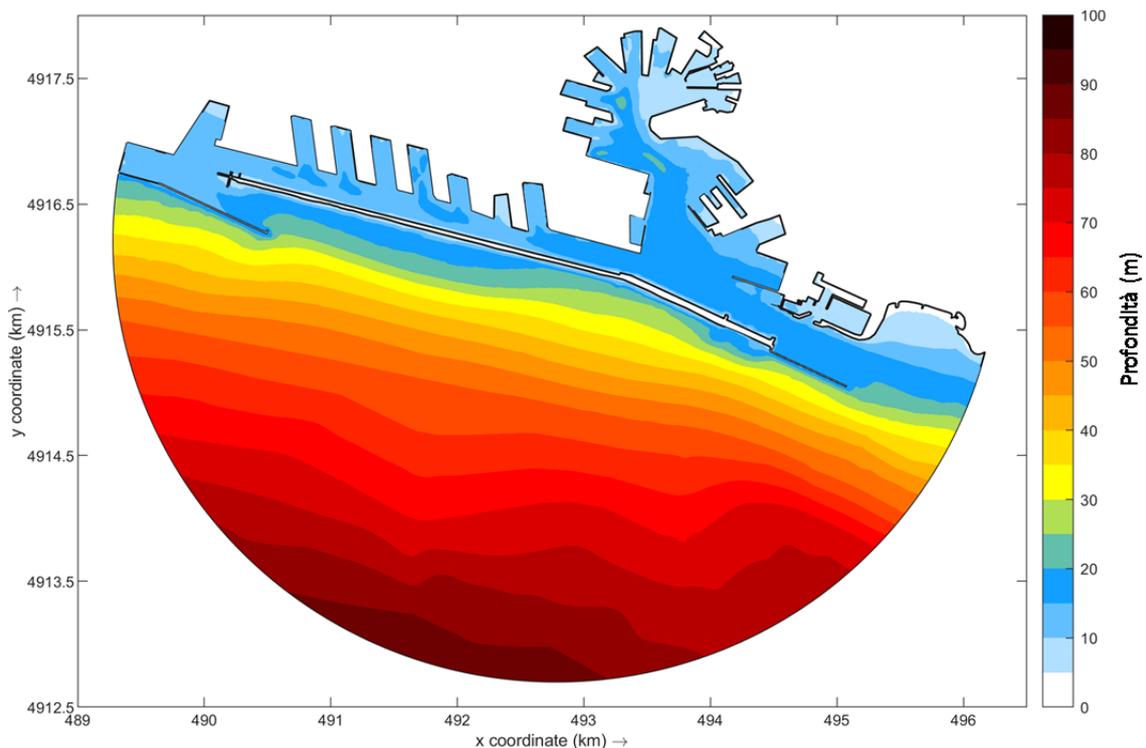


FIGURA 4-1 - AREA SIMULATA CON IL CODICE CGWAVE E RELATIVA BATIMETRIA NELLA CONFIGURAZIONE ATTUALE.

## 5. ANALISI DELLA SITUAZIONE ATTUALE

La conformazione planimetrica attuale delle opere foranee del porto di Genova (vedi Figura 5-1) rientra nello schema di porto “con diga foranea principale isolata in mare e parallela alla costa”.

Nella Figura 5-1 è riportata la planimetria attuale del Porto che è caratterizzata dalla presenza di tre imboccature portuali, ovvero: (i) la Bocca di Levante che attualmente costituisce l’imboccatura principale del Porto dalla quale entrano ed escono le navi commerciali di dimensioni maggiori; (ii) la Bocca di Ponente e la Bocca Ovest che vengono utilizzate dal naviglio minore.



FIGURA 5-1 - INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PORTO DI GENOVA.

Le due lunghe dighe foranee di Levante e di Ponente proteggono molto bene il Porto dal moto ondoso incidente il cui clima ondometrico medio annuale a ridosso delle attuali opere foranee è rappresentato graficamente nella Figura 5-2.

Il Porto di Genova è posto al centro dell’omonimo Golfo e, come evidenziato dalla Figura 5-2, la sua traversia geografica rientra nel settore compreso tra la direzione  $115^\circ$  N, che traguarda la Punta di Portofino, e la direzione  $225^\circ$  N che traguarda Capo Noli. Al di fuori di questo settore il moto ondoso è generato localmente e, a ragione delle modeste aree di generazione delle onde, risulta estremamente limitato. La direzione  $115^\circ$  N coincide con l’asse dell’attuale imboccatura portuale, ovvero con la giacitura del Molo Duca di Galliera che delimita, insieme al suo prolungamento, il Porto verso Levante.

Il clima ondometrico, riportato qualitativamente nella Figura 5-2 e quantitativamente nella Tabella 2-1, mostra che in effetti le onde di altezza significativa superiori al metro sono limitate dalle direzioni 120° N e 225° N.

In accordo con il clima ondometrico ottenuto nell’ambito del presente progetto e con la giacitura delle sue opere foranee, attualmente il porto di Genova è soggetto a moto ondoso residuo principalmente a causa delle onde provenienti da Scirocco che generano, in alcune zone portuali, una fastidiosa risacca, invece le onde di maggiore intensità e frequenza provenienti dal settore di Mezzogiorno-Libeccio che sono completamente schermate dalle opere foranee, attualmente non costituiscono un problema per l’agitazione interna del Porto, anche se probabilmente possono esserlo dal punto di vista navigazionale perché investono al traverso le navi in ingresso e uscita del porto.

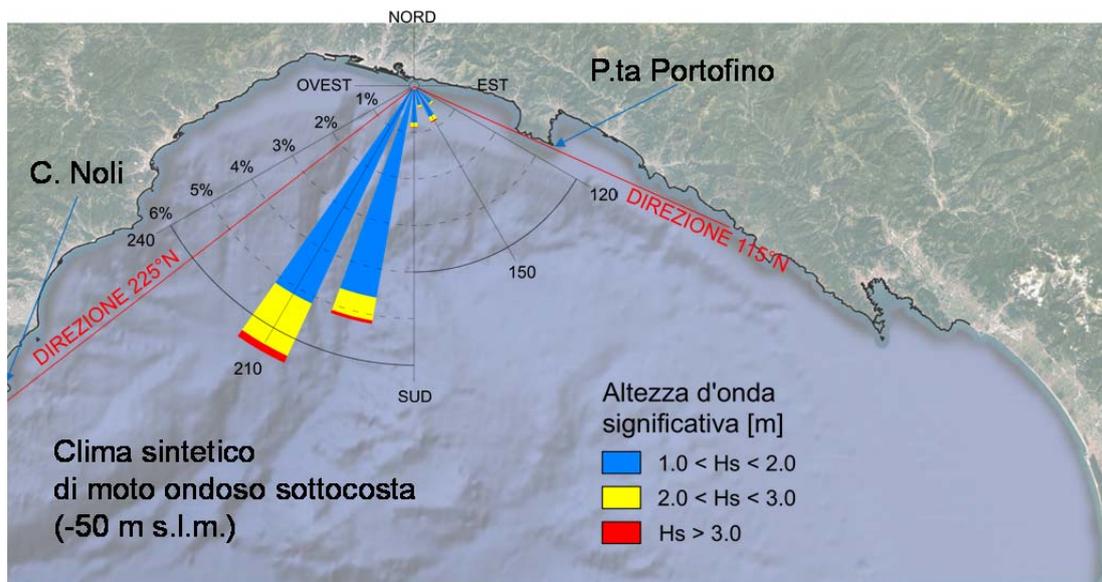


FIGURA 5-2 - ESPOSIZIONE ONDAMETRICA DEL PORTO DI GENOVA A STATI DI MARE CON  $H_s > 1,0$  M.

### 5.1. Analisi del “downtime”

Nella Figura 5-3 sono riportati i coefficienti di riflessione utilizzati nelle simulazioni per riprodurre le opere interne ed esterne portuali.

Nella Figura 5-4 sono mostrati i risultati del “downtime” per le banchine portuali. Per ogni area di riferimento (ascissa) si riportano in ordinata i risultati ottenuti espressi in numero di ore medio annuo di superamento della soglia  $H_{s,lim}$ . Il pannello B della figura

mostra che la soglia  $H_{s,lim} = 1,0$  m non viene mai superata dal moto ondoso che penetra nel porto.

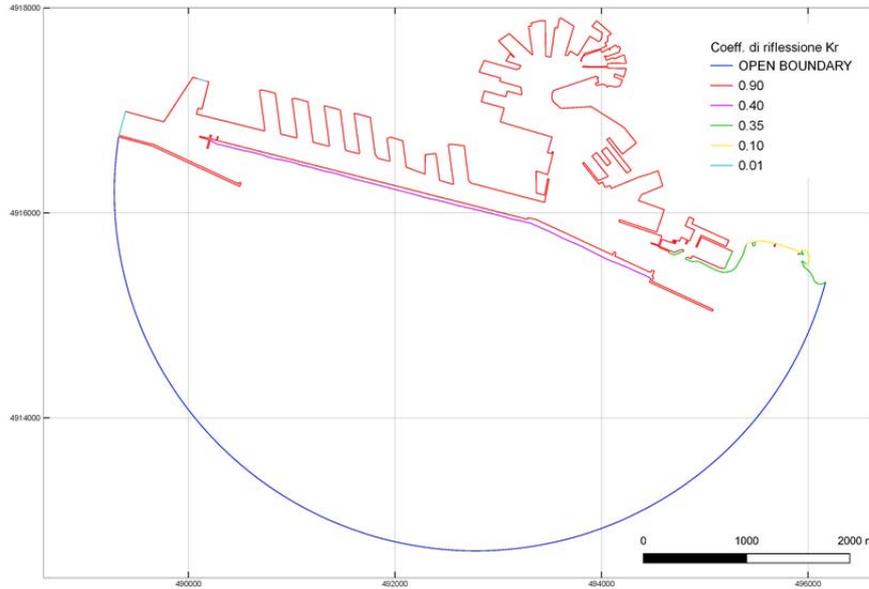


FIGURA 5-3 STATO ATTUALE - COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE DELLE OPERE PORTUALI

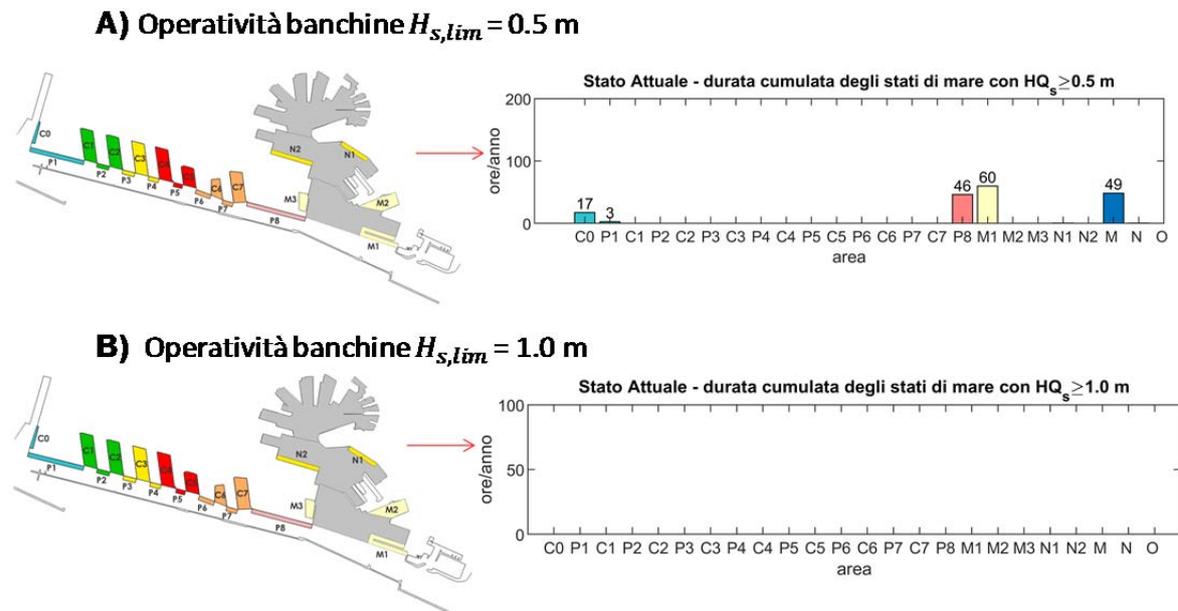


FIGURA 5-4 – “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LO STATO ATTUALE (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  m; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  m.

Nella Figura 5-5 si riportano, a titolo di esempio, i risultati ottenuti nel dominio di calcolo espressi in termini di  $H_s$  per quattro condizioni di moto ondoso incidente rappresentative.

Allo scopo di semplificare il confronto tra la situazione attuale e le varie soluzioni, le stesse condizioni di moto ondoso sono riportate nel seguito per tutte le soluzioni analizzate.

### Stato Attuale

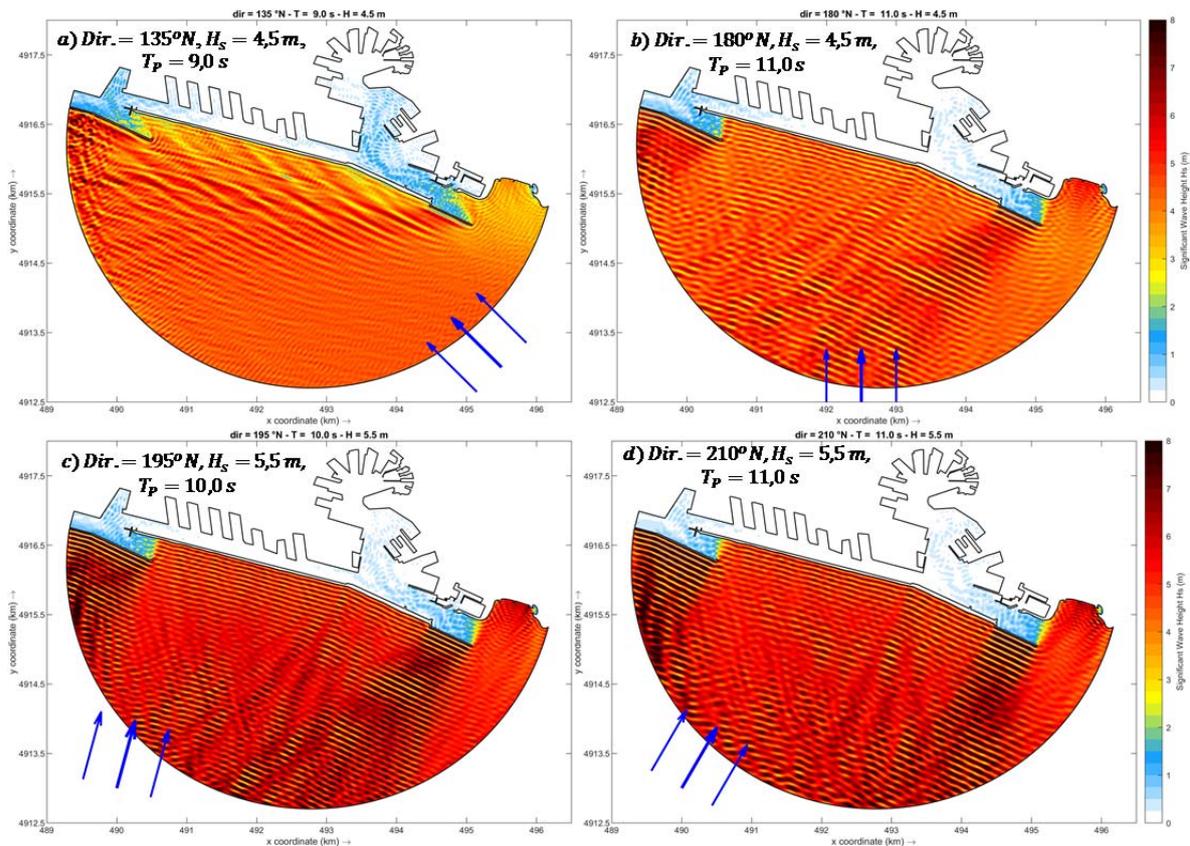


FIGURA 5-5 - ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LO STATO ATTUALE: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI.

I risultati ottenuti mostrano chiaramente che nella situazione attuale gli specchi d’acqua interni risultano molto ben schermati dal moto ondoso incidente. Un modesto moto ondoso residuo si verifica solo in zone limitate del porto ed è dovuto principalmente agli stati di mare provenienti da Scirocco che riescono a penetrare sia dalla Bocca di Levante, sia dalla Bocca di Ponente, ambedue aperte proprio a questa direzione (si veda ad esempio il pannello *a* della Figura 5-5). Questi stati di mare inducono agitazioni ondose superiori ai 0,5 m per un numero limitato di ore/anno nelle zone P8, M1 e M, localizzate nella parte

orientale del porto, e nella zona C0, localizzata nei pressi della Bocca di Ponente in sponda sinistra idraulica della foce del Polcevera. La zona C0 può essere interessata da agitazione interna residua anche con moto ondoso incidente proveniente dai settori meridionali, che riescono a penetrare dalla Bocca di Ponente a causa delle riflessioni indotte dalla diga foranea (si vedano ad esempio i pannelli *b* e *c* della Figura 5-5).

## 5.2. Analisi delle condizioni estreme

Nella Figura 5-6 sono riportati i risultati dell’analisi delle onde estreme ( $Tr=10$  anni). Per ogni area di riferimento (ascissa), si riportano in ordinata i valori dell’altezza d’onda significativa rappresentativa dell’area che viene indicata con  $HQ_5$  ed espressa in m.

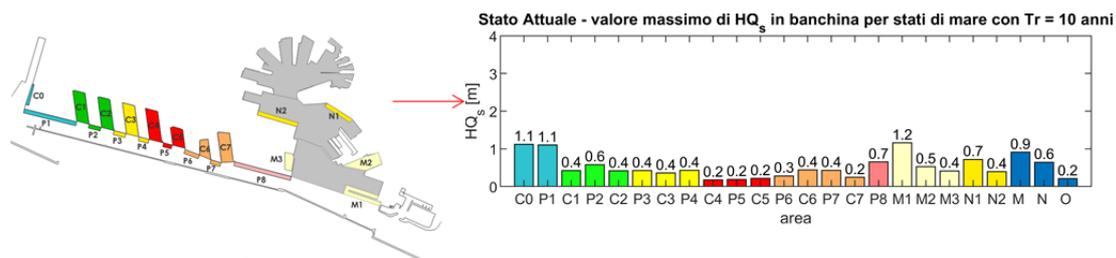


FIGURA 5-6 - ANALISI DELLE ONDE ESTREME ( $Tr=10$  ANNI) PER LO STATO ATTUALE. MASSIMA  $HQ_5$  ESPRESSA IN M PER OGNI BANCHINA.

La figura mostra che le massime altezze d’onda significative che si verificano lungo le banchine in occasioni di mareggiate estreme, superano di poco il metro di altezza solo in zone limitate e risultano in generale inferiori a 0,5 m.

Le zone più critiche sono la C0 e la P1, entrambe localizzate in prossimità della foce del Polcevera, e la zona M1 posta nell’avamposto della Bocca di Levante.

Il Porto Vecchio è scarsamente interessato dal moto ondoso residuo che penetra dalle imboccature portuali che comunque non costituisce alcun problema per il naviglio di maggiori dimensioni.

In conclusione si può affermare che attualmente il Porto di Genova, dal punto di vista dell’agitazione interna portuale, può essere considerato a ragione un porto rifugio adeguato ai moderni standard ed esigenze dei traffici marittimi.

Ovviamente la realizzazione di una nuova imboccatura portuale finalizzata a consentire l’accesso al porto di grandi navi contenitori con dimensioni maggiori rispetto alle navi che attualmente fanno scalo nel porto, porterà necessariamente ad un aumento dell’agitazione ondosa residua. Pertanto questo aspetto è stato analizzato con estremo dettaglio nell’ambito del presente studio.

## 6. ANALISI DELLE SOLUZIONI SELEZIONATE

### 6.1. Soluzione 2

Nei seguenti sottoparagrafi sono illustrati i risultati delle simulazioni condotte per l’analisi del “downtime” e delle “condizioni estreme” delle banchine e degli spazi di manovra (canale di accesso e cerchio di evoluzione) associati allo scenario di attuazione della Soluzione 2.

#### 6.1.1. Analisi del “downtime”

##### **Banchine**

Nella Figura 6-1 sono riportati i coefficienti di riflessione utilizzati nelle simulazioni per riprodurre le opere interne ed esterne portuali. Il pannello superiore si riferisce alla Fase a, mentre il pannello inferiore si riferisce alla Fase b.

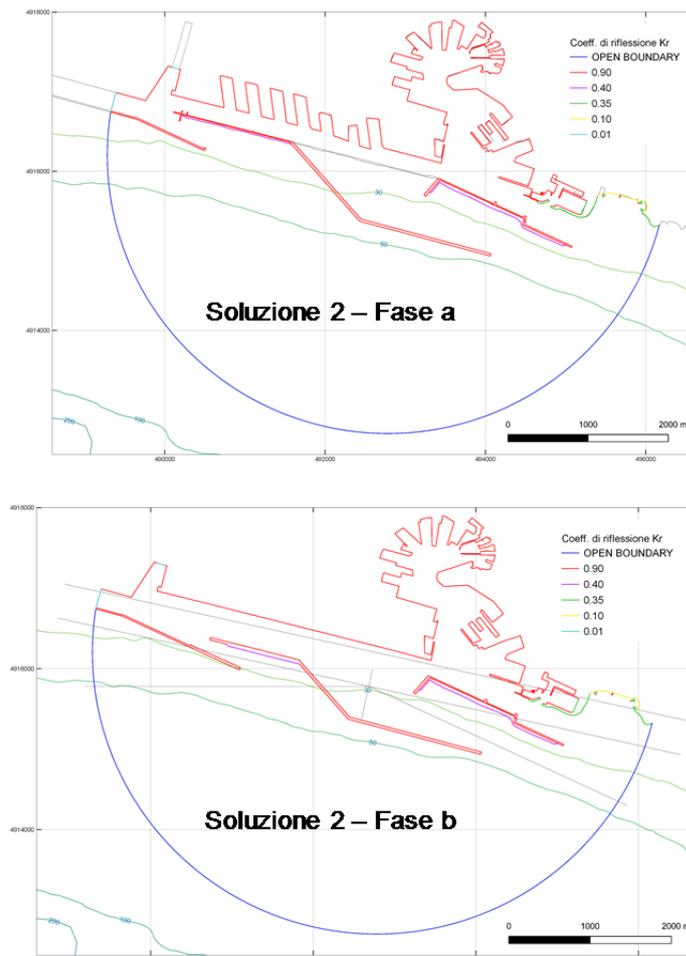
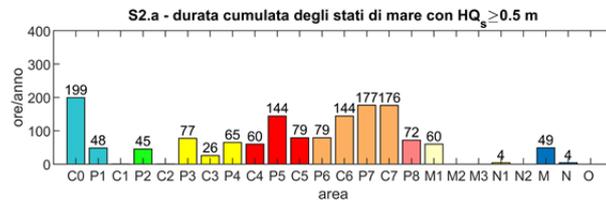
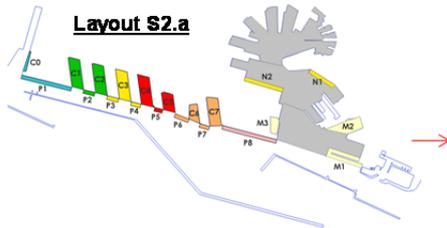


FIGURA 6-1- SOLUZIONE 2 FASE A (PANNELLO SUPERIORE) E FASE B (PANNELLO INFERIORE)  
- COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE DELLE OPERE PORTUALI.

**Fase a**

**A) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5$  m**



**B) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

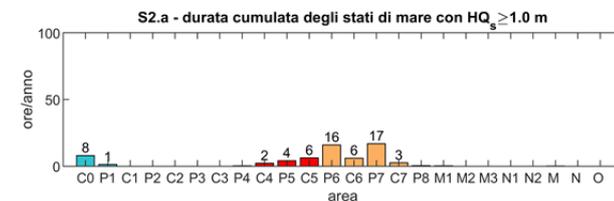
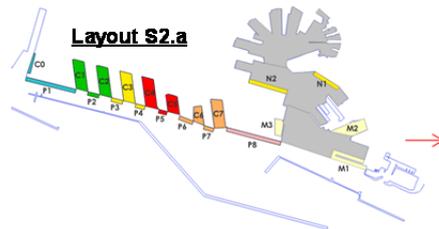
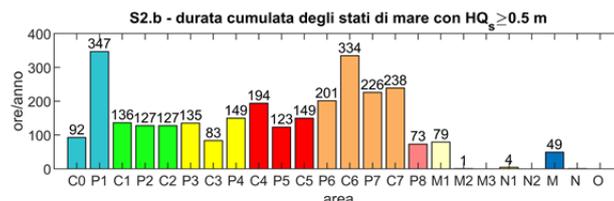
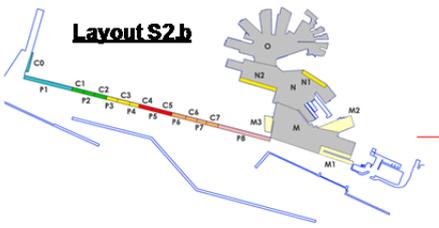


FIGURA 6-2 - “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 2 IN FASE A (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  M; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  M.

**Fase b**

**A) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5$  m**



**B) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

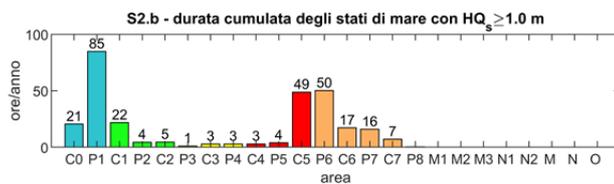
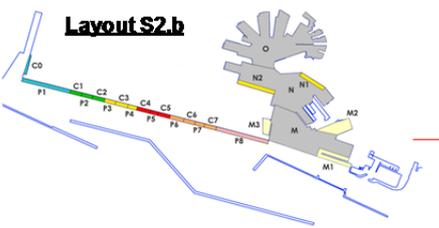


FIGURA 6-3 “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 2 IN FASE B (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  M; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  M.

Nella Figura 6-2 e nella Figura 6-3 sono riportati i risultati del “downtime” per le banchine portuali ottenuti rispettivamente per le Fasi costruttive a e b. Per ogni area di riferimento (ascissa) si riportano in ordinata i risultati ottenuti espressi in numero di ore medio annuo di superamento della soglia  $H_{s,lim}$ .

Nella Figura 6-4 (Soluzione 2 – Fase a) e nella Figura 6-5 (Soluzione 2 – Fase b) si riportano a titolo di esempio i risultati ottenuti nel dominio di calcolo espressi in termini di  $H_s$  per quattro condizioni di moto ondoso incidente rappresentative, le quali coincidono con quelle riportate per la situazione attuale (Figura 5-5).

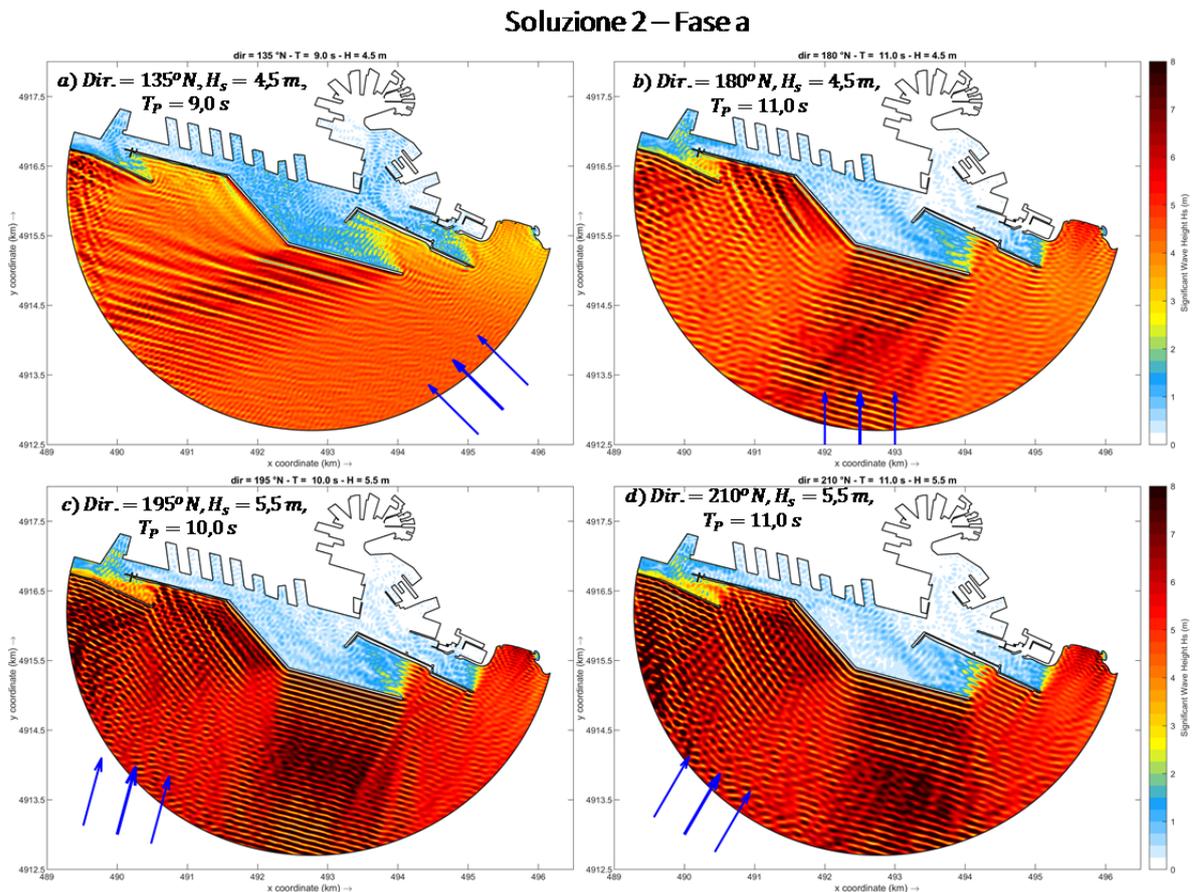


FIGURA 6-4 ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LA SOLUZIONE 2 IN FASE A: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI.

## Soluzione 2 – Fase b

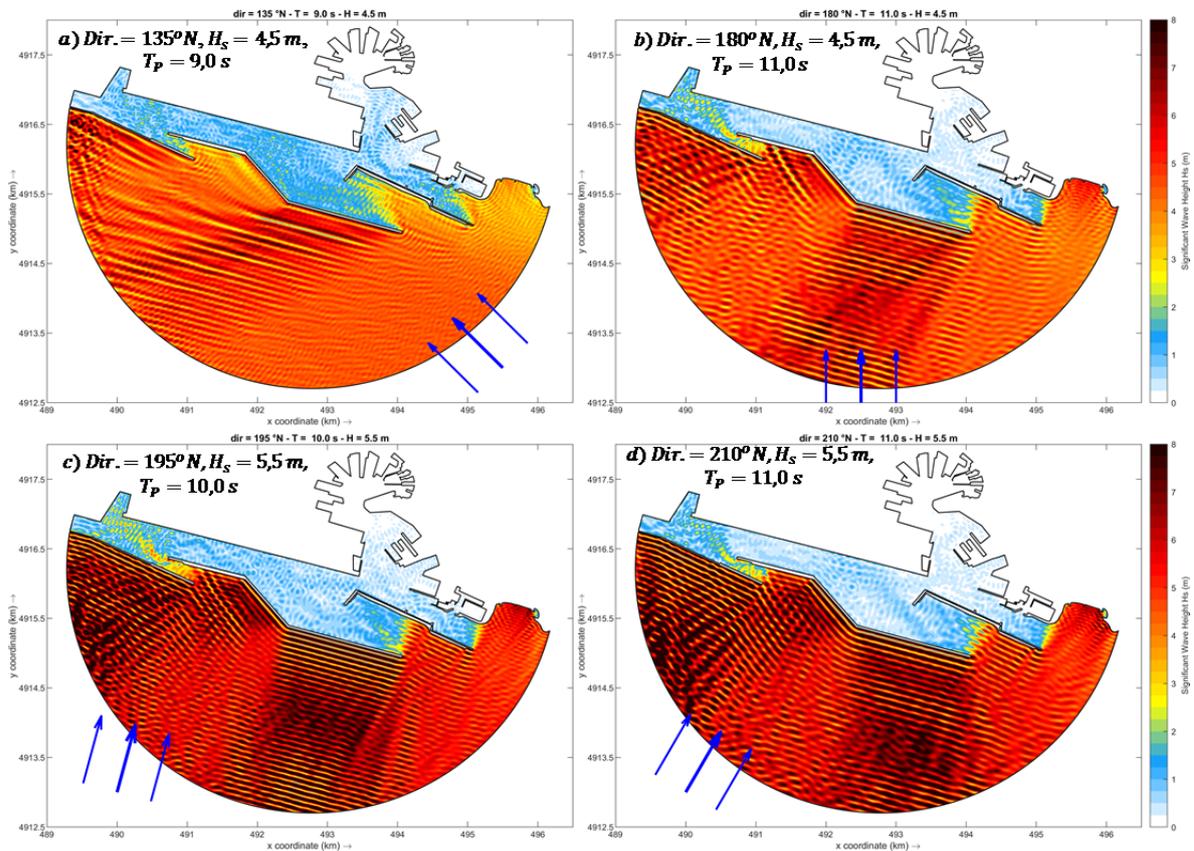


FIGURA 6-5 - ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LA SOLUZIONE 2 IN FASE B: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI.

I diagrammi di “downtime” delle banchine mostrano chiaramente che, rispetto alla situazione attuale, la nuova imboccatura portuale aperta a Levante, determina un rilevante aumento dell’agitazione interna portuale.

Nella Fase a, lungo le banchine C0, P5, C6, P7 e C7, la soglia  $H_{s,lim}=0,5$  m viene superata per più di 100 ore/anno e raggiunge le 200 ore/anno lungo la banchina C0 localizzata in prossimità della foce del Polcevera. Come prevedibile, aumentando il valore della soglia a  $H_{s,lim}=1,0$  m si riduce la durata di superamento della soglia, confermando comunque il netto peggioramento rispetto alla situazione attuale.

Nella Fase b l’agitazione media residua aumenta rispetto alla Fase a, e in alcune zone la soglia  $H_{s,lim}=0,5$  m viene superata per più di 300 ore/anno. Nella Fase b anche la frequenza di superamento della soglia  $H_{s,lim}= 1,0$  aumenta rispetto alla Fase a, raggiungendo valori compresi tra 50 e 100 ore/anno.

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

La Figura 6-4 e la Figura 6-5 mostrano che, rispetto alla situazione attuale, l’aumento dell’agitazione ondosa lungo le banchine poste in prossimità della foce del Polcevera è dovuta anche alla riflessione del moto ondoso indotta dal tratto obliquo, orientato lungo la direzione NO-SE, della nuova diga foranea.

**Canale di accesso e cerchio di evoluzione**

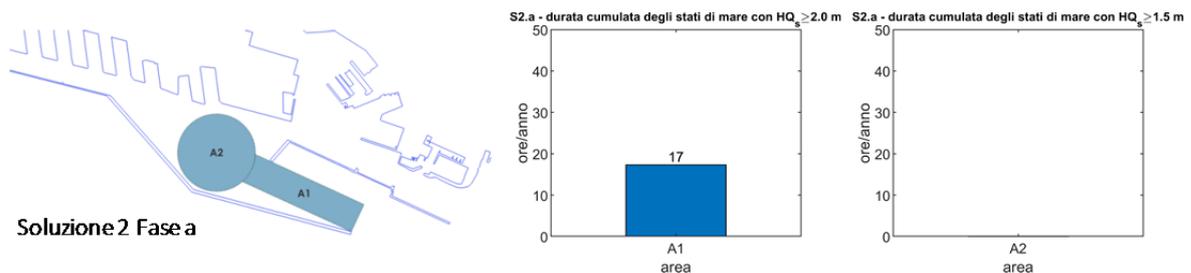


FIGURA 6-6 - SOLUZIONE 2 – FASE A: “DOWNTIME” DEL CANALE DI ACCESSO (AREA A1) E DEL CERCHIO DI EVOLUZIONE (AREA A2).

Nella Figura 6-6 sono riportati i risultati del “downtime” per: (i) il canale di accesso (area A1) dove si è assunto il valore limite  $H_{s,lim} = 2,0$  m; (ii) il cerchio di evoluzione (area A2) dove si è assunto il valore limite  $H_{s,lim} = 1,5$  m.

Come si evince dalla figura relativa alla Soluzione 2 Fase a, nel cerchio di evoluzione le condizioni limite non vengono mai superate mediamente durante l’anno, mentre nel canale di accesso si verificano, mediamente, solo 17 ore/anno di superamento della soglia. I risultati relativi alla Soluzione 2 Fase b coincidono con quelli della Fase a e pertanto non vengono riportati.

6.1.2. Analisi delle condizioni estreme

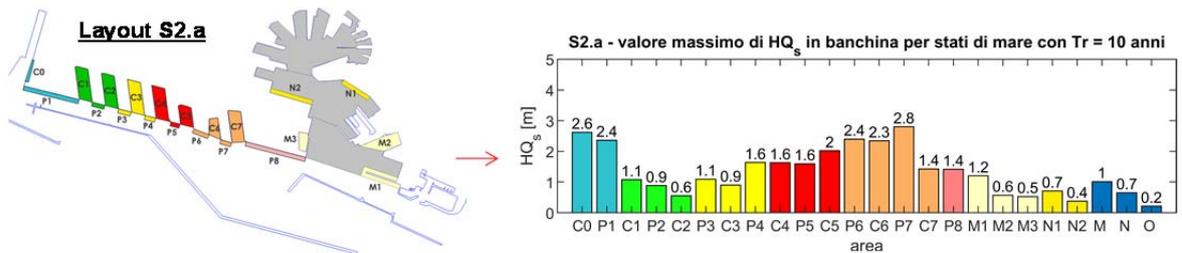
La Figura 6-7 mostra i risultati ottenuti in presenza di stati di mare estremi, caratterizzati dal tempo di ritorno  $Tr=10$  anni. I diagrammi sono riferiti alla Fasi a e b di costruzione. In ascissa sono rappresentate le aree di riferimento che delimitano le banchine e le calate portuali, mentre in ordinata sono riportati i valori massimi dell’altezza d’onda significativa rappresentativa di ciascuna area, indicati con  $HQ_s$ .

Anche questi risultati confermano il considerevole aumento dell’agitazione ondosa residua nel porto rispetto alla situazione attuale. In alcune zone l’ $HQ_s$  supera i 2,5 m nella Fase a, mentre nella situazione attuale l’ $HQ_s$  risulta limitata da valori di poco superiori al metro e lungo la maggior parte delle banchine è inferiore a 0,5 m.

Nella Fase b la situazione peggiora ulteriormente e in prossimità della foce del Polcevera l’ $HQ_s$  supera i 4,5 m.

**Onde estreme  $Tr = 10$  anni**

**Fase a**



**Fase b**

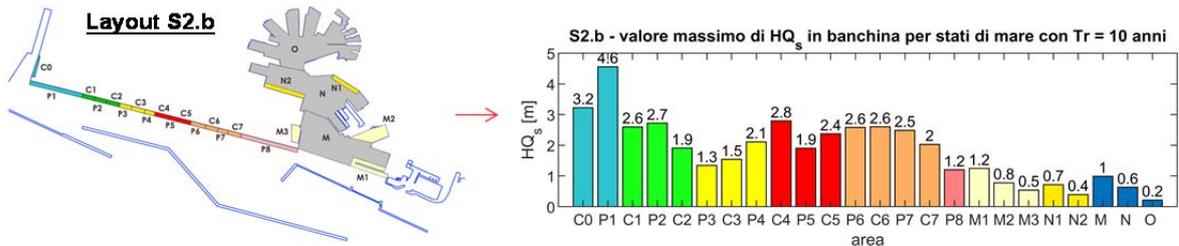


FIGURA 6-7 - ANALISI DELLE ONDE ESTREME ( $Tr=10$  ANNI) PER LA SOLUZIONE 2 IN FASE: A -PANNELLO SUPERIORE E B – PANNELLO INFERIORE. MASSIMA  $HQ_s$  ESPRESSA IN M PER OGNI BANCHINA.

## 6.2. Soluzione 3

Nei seguenti sottoparagrafi sono illustrati i risultati delle simulazioni condotte per l’analisi del “downtime” e delle “condizioni estreme” delle banchine e degli spazi di manovra (canale di accesso e cerchio di evoluzione) associati allo scenario di attuazione della Soluzione 3.

### 6.2.1. Analisi del “downtime”

#### **Banchine**

Nella Figura 6-8 sono riportati i coefficienti di riflessione utilizzati nelle simulazioni per riprodurre le opere interne ed esterne portuali. Il pannello superiore si riferisce alla Fase a, mentre il pannello inferiore si riferisce alla Fase b.

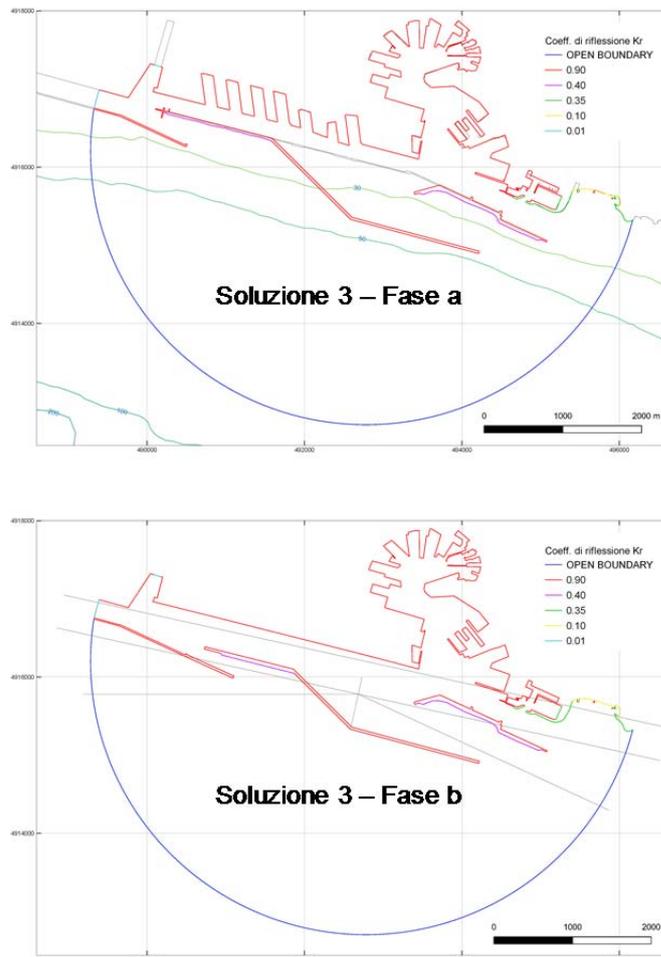
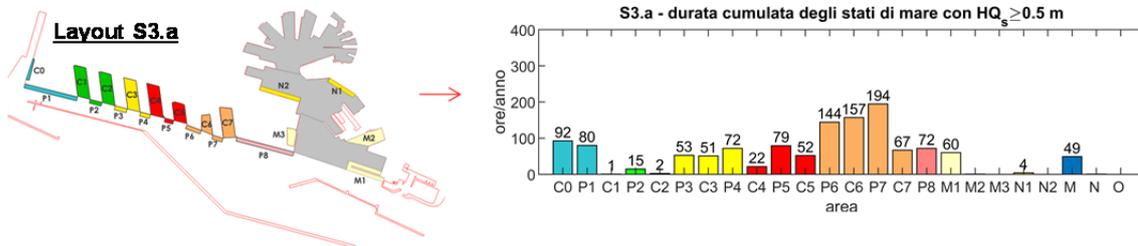


FIGURA 6-8 - SOLUZIONE 3 FASE A (PANNELLO SUPERIORE) E FASE B (PANNELLO INFERIORE) - COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE DELLE OPERE PORTUALI.

**Fase a**

**A) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5$  m**



**B) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

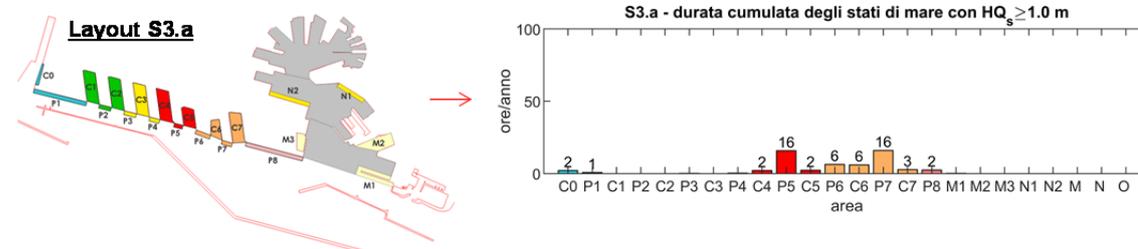
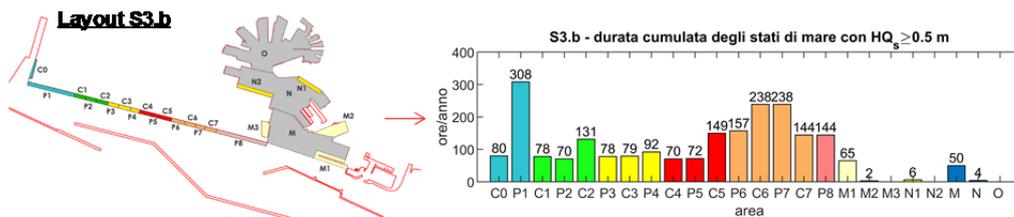


FIGURA 6-9 - “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 3 IN FASE A (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  m; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  m.

**Fase b**

**A) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5$  m**



**B) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

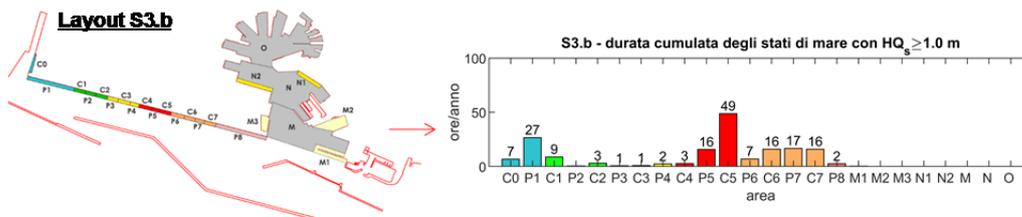


FIGURA 6-10 - “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 3 IN FASE B (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  m; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  m.

Nella FIGURA 6-9 e nella

FIGURA 6-10 sono riportati i risultati del “downtime” per le banchine portuali ottenuti rispettivamente per le Fasi costruttive a e b. Per ogni area di riferimento (ascissa) si riportano in ordinata i risultati ottenuti espressi in numero di ore medio annuo di superamento della soglia  $H_{s,lim}$ .

Nella Figura 6-11 (Soluzione 3 – Fase a) e nella Figura 6-12 (Soluzione 3 – Fase b) si riportano a titolo di esempio i risultati ottenuti nel dominio di calcolo espressi in termini di  $H_s$  per quattro condizioni di moto ondoso incidente rappresentative.

### Soluzione 3 – Fase a

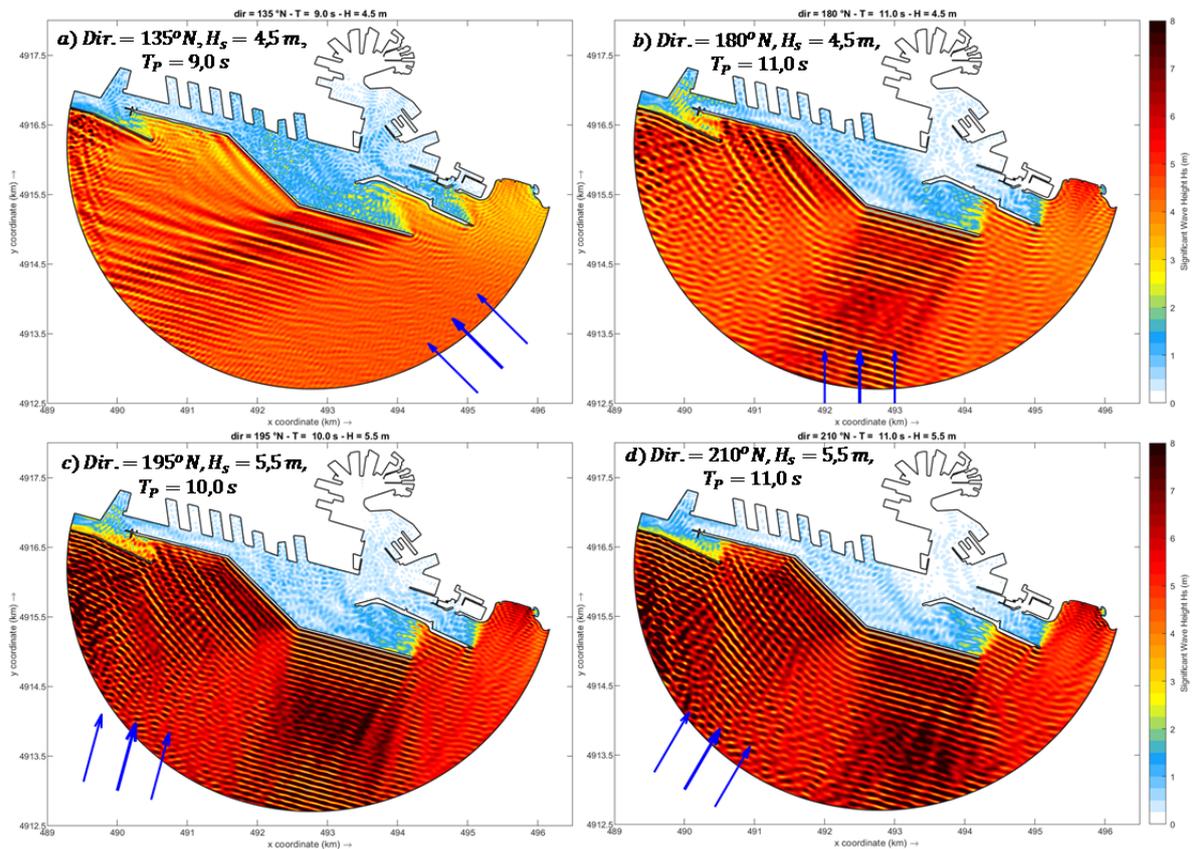


FIGURA 6-11 - ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LA SOLUZIONE 3 IN FASE A: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI.

## Soluzione 3 – Fase b

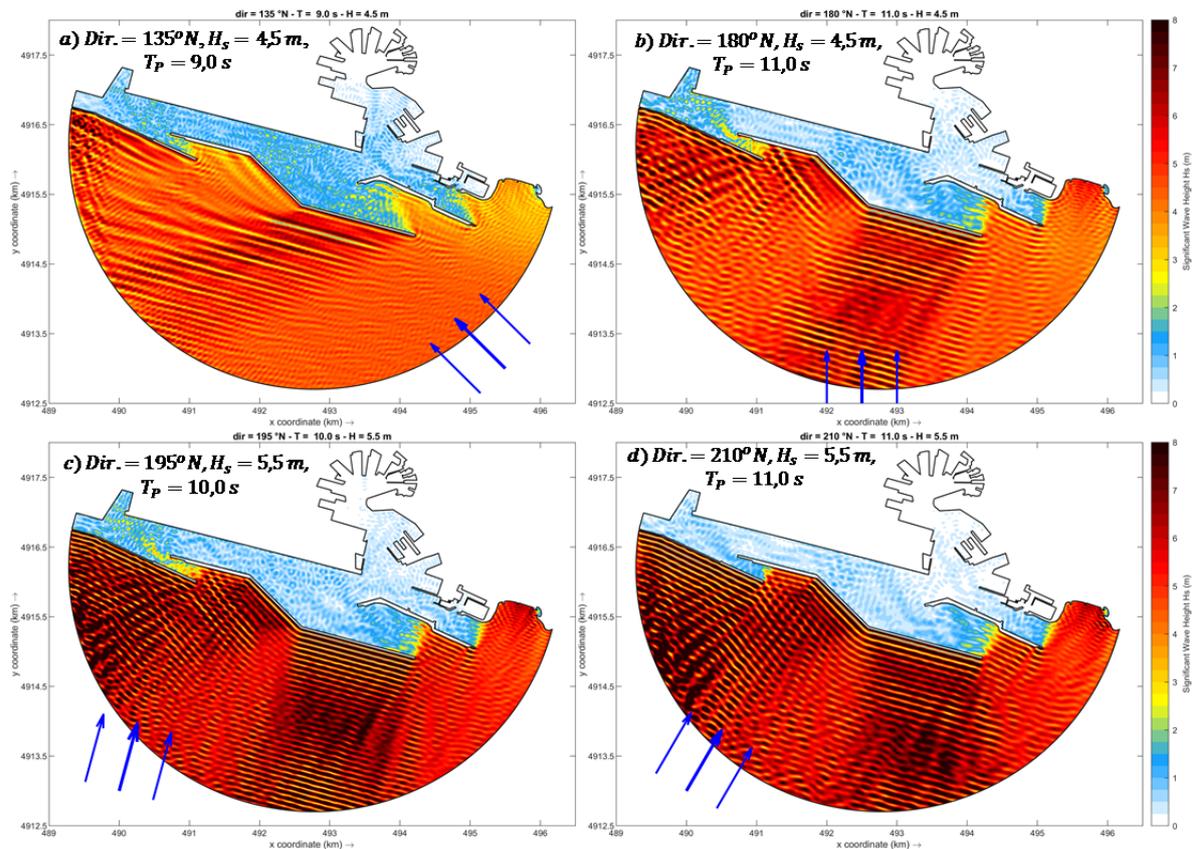


FIGURA 6-12 - ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LA SOLUZIONE 3 IN FASE B: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI.

Al pari della Soluzione 2, i diagrammi di “downtime” delle banchine per la Soluzione 3 mostrano chiaramente che la nuova imboccatura portuale aperta a Levante, determina, rispetto alla situazione attuale, un rilevante aumento dell’agitazione interna portuale.

Tuttavia si nota che sia nella Fase a che nella Fase b, l’aumento del “downtime” rispetto alla situazione attuale risulta mediamente di poco inferiore che nella Soluzione 2.

Comunque anche in questo caso nella Fase b l’agitazione media residua tende ad aumentare rispetto alla Fase a.

La Figura 6-11 e la Figura 6-12 confermano anche per la Soluzione 3, l’aumento, rispetto alla situazione attuale, dell’agitazione ondosa lungo le banchine poste in prossimità della foce del Polcevera dovuta in parte anche dalla riflessione del moto ondoso indotta dal tratto obliquo orientato per NO-SE della nuova diga foranea.

### Canale di accesso e cerchio di evoluzione

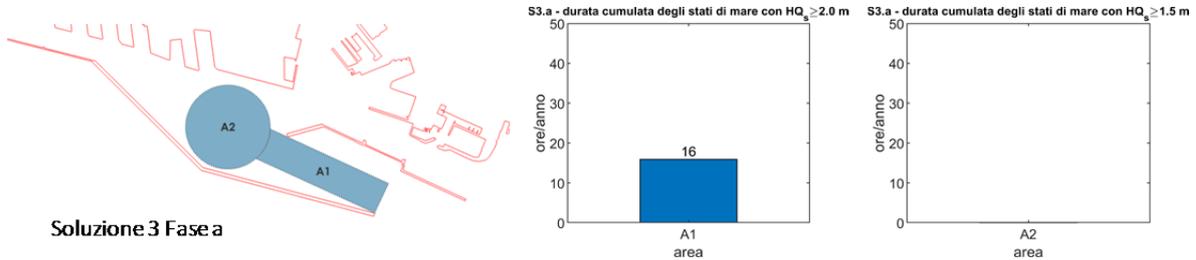


FIGURA 6-13 - SOLUZIONE 3 – FASE A: “DOWNTIME” DEL CANALE DI ACCESSO (AREA A1) E DEL CERCHIO DI EVOLUZIONE (AREA A2).

Nella Figura 6-13 sono riportati i risultati del “downtime” per: (i) il canale di accesso (area A1) dove si è assunto il valore limite  $H_{s,lim} = 2,0$  m e (ii) il cerchio di evoluzione (area A2) dove si è assunto il valore limite  $H_{s,lim} = 1,5$  m. Come si evince dalla figura relativa alla Soluzione 3 Fase a, nel cerchio di evoluzione, mediamente durante l’anno, le condizioni limite non vengono mai superate, mentre nel canale di accesso vengono superate solo 16 ore/anno. I risultati relativi alla Soluzione 3 Fase b coincidono con quelli della Fase a e pertanto non vengono riportati.

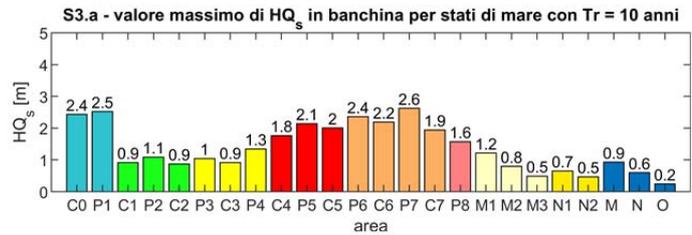
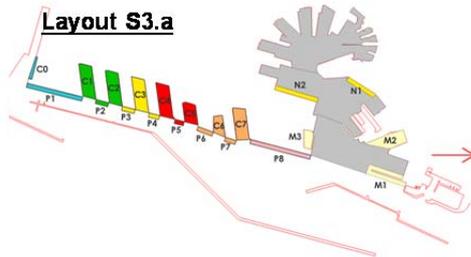
#### 6.2.2. Analisi delle condizioni estreme

La Figura 6-14 mostra i risultati ottenuti in presenza di stati di mare estremi, caratterizzati dal tempo di ritorno  $T_r=10$  anni. I diagrammi sono riferiti alle Fasi a e b di costruzione. In ascissa sono rappresentate le aree di riferimento che delimitano le banchine e le calate portuali, mentre in ordinata sono riportati i valori massimi dell’altezza d’onda significativa rappresentativa di ciascuna area, indicati con  $H_{Q_5}$ .

Anche questi risultati confermano il considerevole aumento dell’agitazione ondosa residua nel porto rispetto alla situazione attuale anche se, come per il “downtime”, l’aumento è leggermente più contenuto rispetto a quello che si ottiene per la Soluzione 2.

**Onde estreme Tr = 10 anni**

**Fase a**



**Fase b**

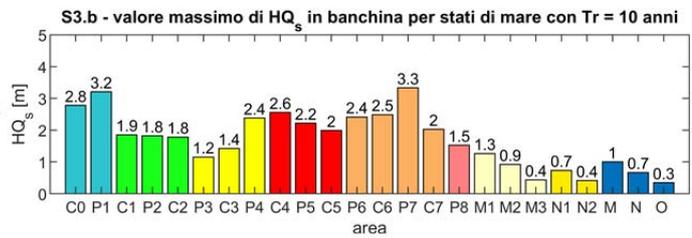
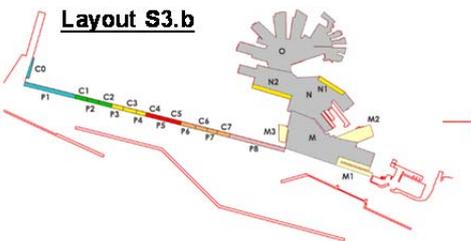


FIGURA 6-14 - ANALISI DELLE ONDE ESTREME (Tr=10 ANNI) PER LA SOLUZIONE 3 IN FASE: A -PANNELLO SUPERIORE E B – PANNELLO INFERIORE. MASSIMA  $HQ_s$  ESPRESSA IN M PER OGNI BANCHINA.

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

**6.3. Soluzione 4**

Nei seguenti sottoparagrafi sono illustrati i risultati delle simulazioni condotte per l’analisi del “downtime” e delle “condizioni estreme” delle banchine e degli spazi di manovra (canale di accesso e cerchio di evoluzione) associati allo scenario di attuazione della Soluzione 4.

**6.3.1. Analisi del “downtime”****Banchine**

Nella Figura 6-15 sono riportati i coefficienti di riflessione utilizzati nelle simulazioni per riprodurre le opere interne ed esterne portuali. Il pannello superiore si riferisce alla Fase a, mentre il pannello inferiore si riferisce alla Fase b.

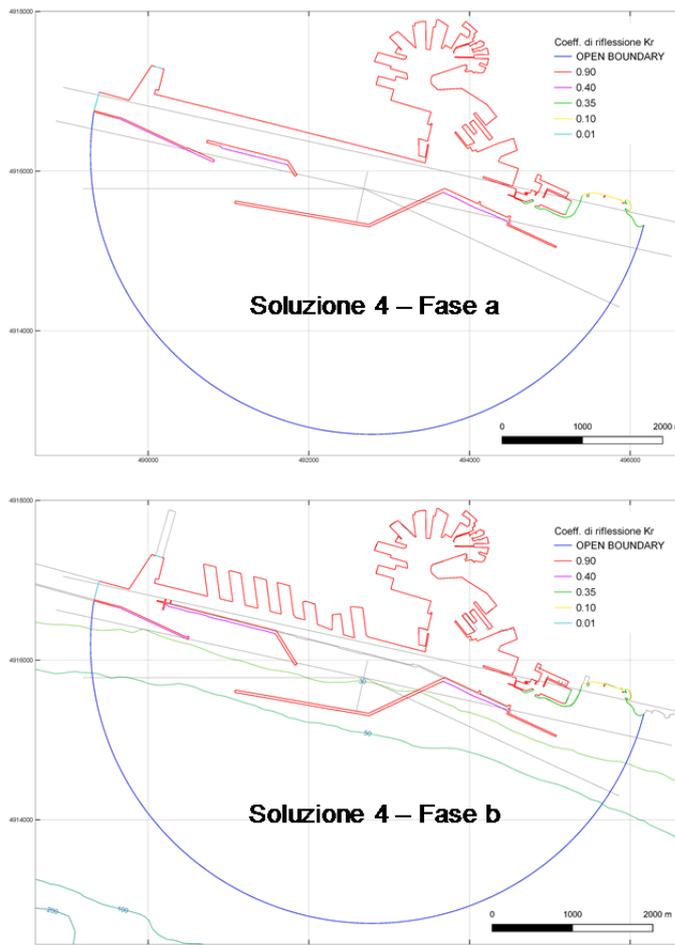
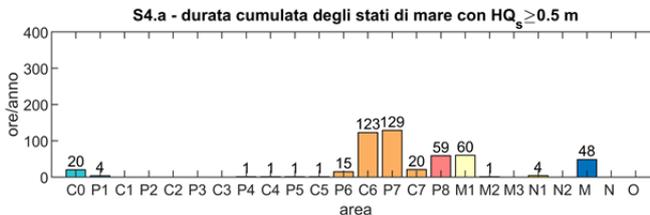
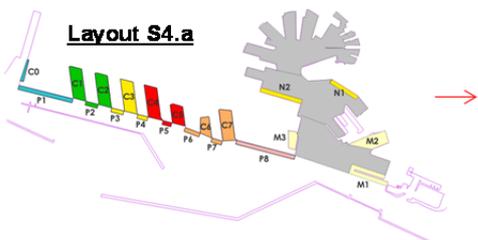


FIGURA 6-15 - SOLUZIONE 4 FASE A (PANNELLO SUPERIORE) E FASE B (PANNELLO INFERIORE) - COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE DELLE OPERE PORTUALI.

**Fase a**

**A) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5$  m**



**B) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

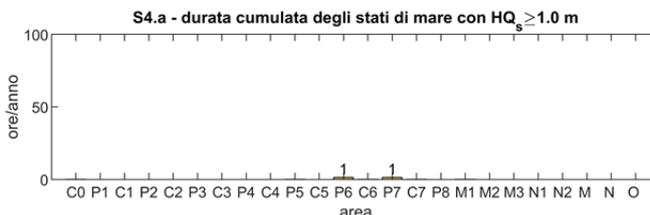
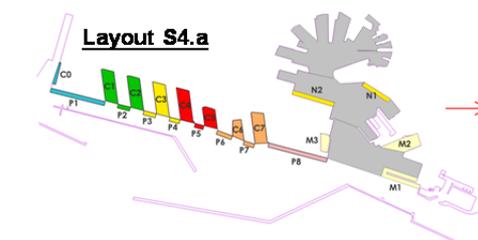
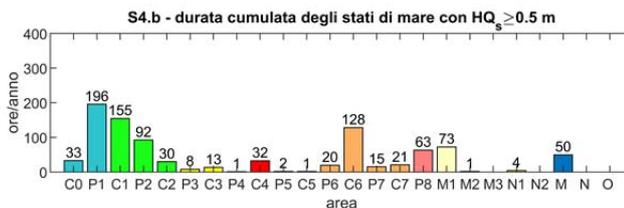
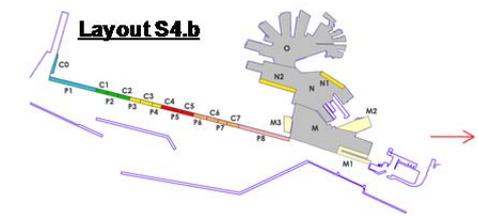


FIGURA 6-16 - “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 4 IN FASE A (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  M; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  M.

**Fase b**

**A) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5$  m**



**B) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

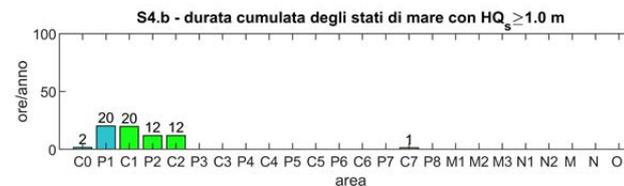
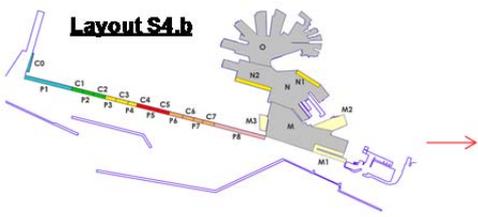


FIGURA 6-17 - “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 4 IN FASE A (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  M; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  M

Nella Figura 6-16 e nella Figura 6-17 sono riportati i risultati del “downtime” per le banchine portuali ottenuti rispettivamente per le Fasi costruttive a e b. Per ogni area di riferimento (ascissa) si riportano in ordinata i risultati ottenuti espressi in numero di ore medio annuo di superamento della soglia  $H_{s,lim}$ .

Nella Figura 6-18 (Soluzione 4 – Fase a) e nella Figura 6-19 (Soluzione 4 – Fase b) si riportano, a titolo di esempio, i risultati ottenuti nel dominio di calcolo espressi in termini di  $H_s$  per quattro condizioni di moto ondoso incidente rappresentative.

#### Soluzione 4 – Fase a

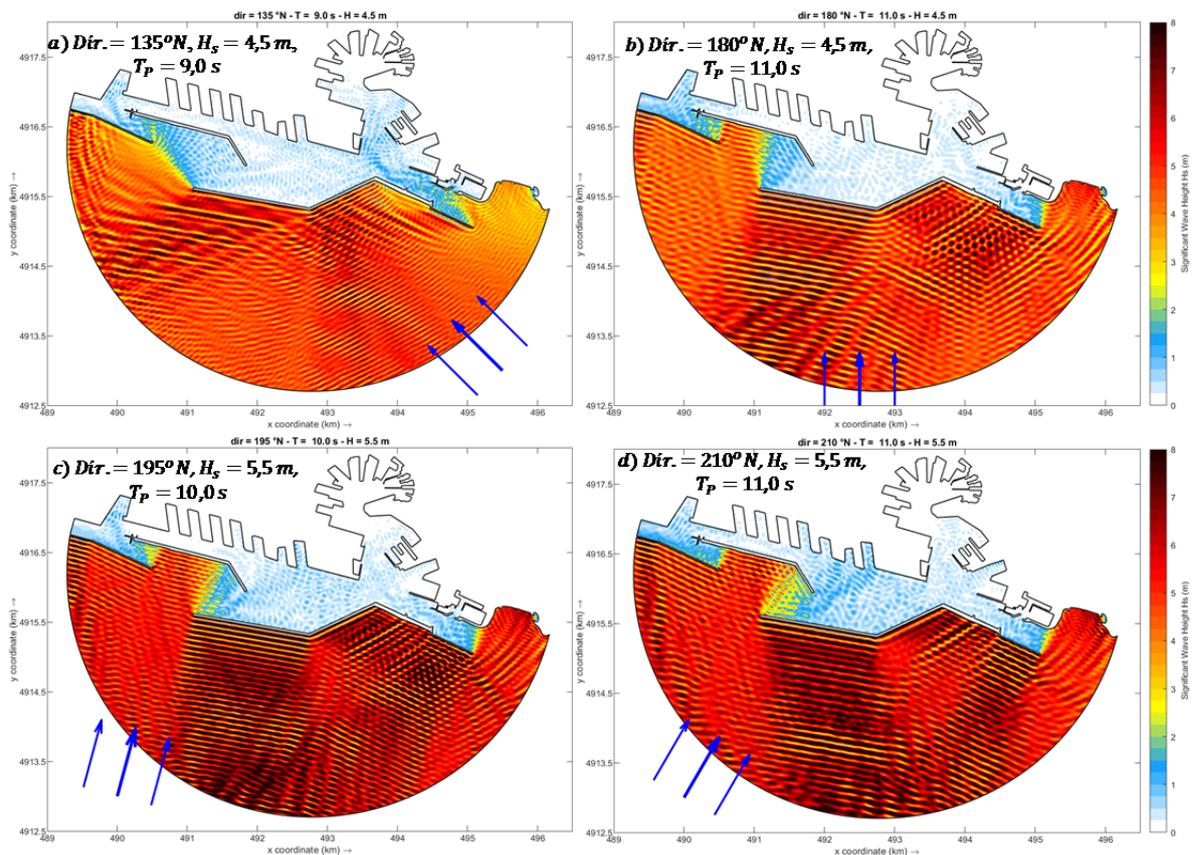


FIGURA 6-18 - ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LA SOLUZIONE 4 IN FASE A: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI.

A differenza delle Soluzioni 2 e 3, i diagrammi di “downtime” delle banchine per la Soluzione 4 nella Fase a, mostrano chiaramente che la nuova imboccatura portuale aperta a Ponente, determina, uno stato di agitazione interna molto simile rispetto a quello della situazione attuale. La frequenza di superamento della soglia  $H_s = 0,5 m$  non cambia sostanzialmente per le banchine poste in prossimità della foce del Polcevera, mentre

aumenta solo leggermente per le banchine C6, P7 e C7. Al pari della situazione attuale non si verifica praticamente mai il superamento della soglia  $H_s = 1,0$  m.

Per la Soluzione 4, solo nella la Fase b si ottiene un peggioramento rispetto allo stato attuale, che tuttavia risulta limitato alle banchine poste in prossimità della foce del Polcevera.

### Soluzione 4 – Fase b

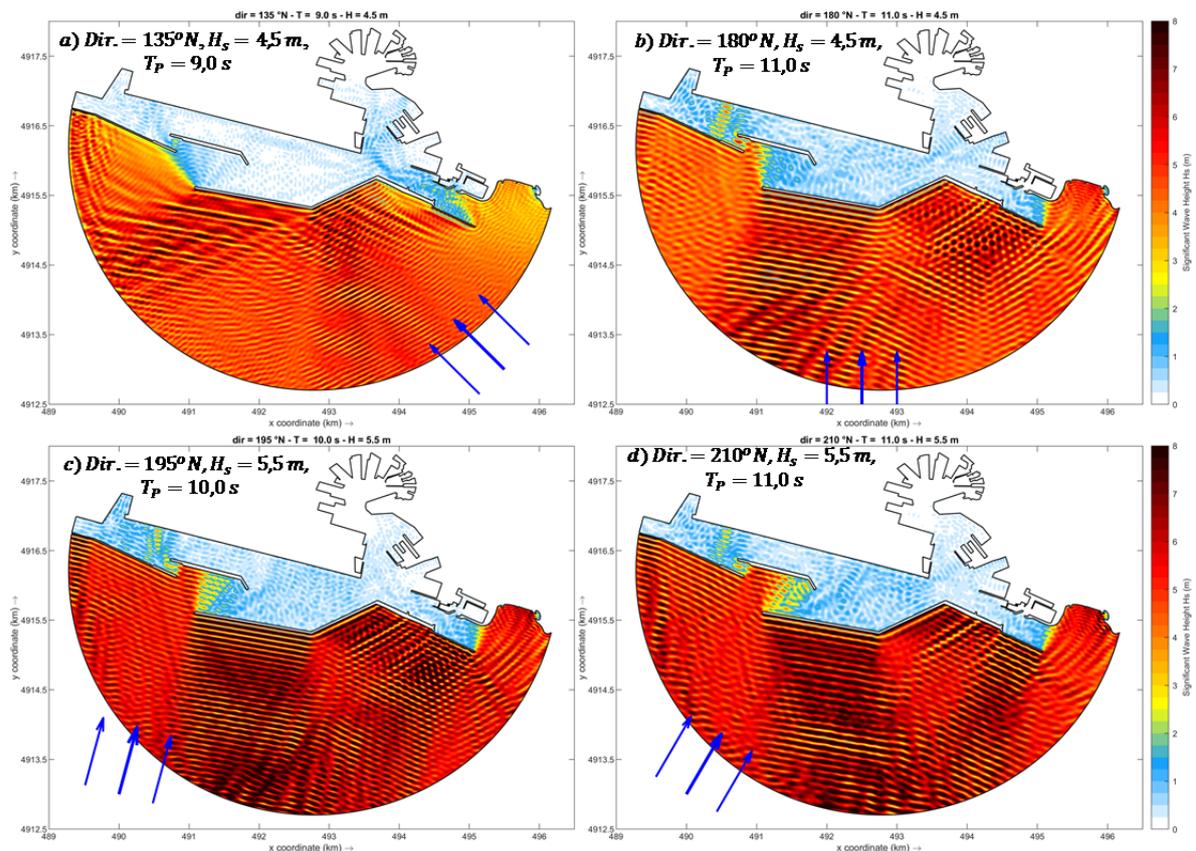


FIGURA 6-19 - ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LA SOLUZIONE 4 IN FASE B: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI

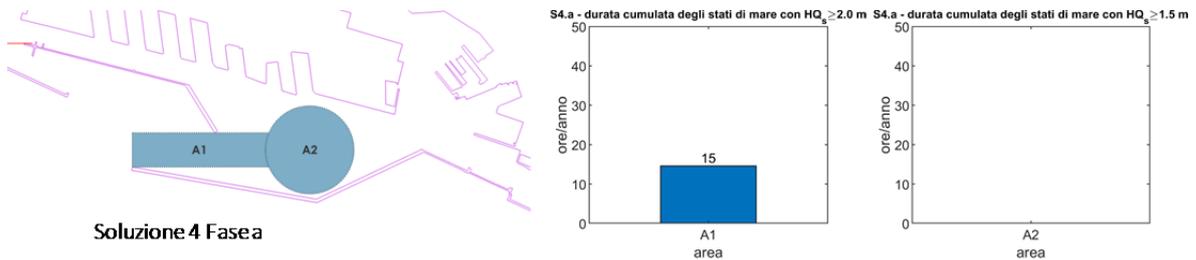
**Canale di accesso e cerchio di evoluzione**

FIGURA 6-20 - SOLUZIONE 4 – FASE A: “DOWNTIME” DEL CANALE DI ACCESSO (AREA A1) E DEL CERCHIO DI EVOLUZIONE (AREA A2).

Nella Figura 6-20 sono riportati i risultati del “downtime” per: (i) il canale di accesso (area A1) dove si è assunto il valore limite  $H_{s,lim} = 2,0$  m e (ii) il cerchio di evoluzione (area A2) dove si è assunto il valore limite  $H_{s,lim} = 1,5$  m. Come si evince dalla figura relativa alla Soluzione 3 Fase a, nel cerchio di evoluzione le condizioni limite, mediamente durante l’anno, non vengono mai superate, mentre nel canale di accesso si verificano mediamente solo 15 ore/anno di superamento della soglia. I risultati relativi alla Soluzione 4 Fase b coincidono con quelli della Fase a e pertanto non vengono riportati.

### 6.3.2. Analisi delle condizioni estreme

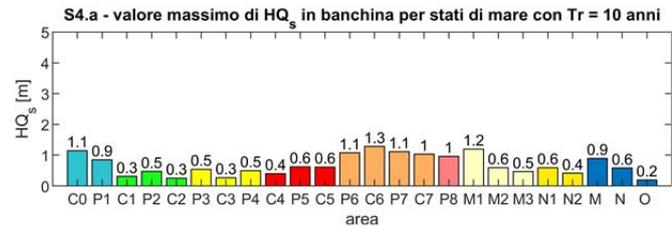
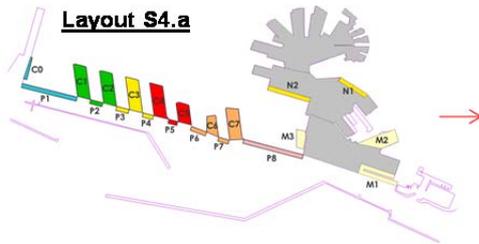
La Figura 6-21 mostra i risultati ottenuti in presenza di stati di mare estremi, caratterizzati dal tempo di ritorno  $T_r=10$  anni. I diagrammi sono riferiti alle Fasi a) e b) di costruzione. In ascissa sono rappresentate le aree di riferimento che delimitano le banchine e le calate portuali, mentre in ordinata sono riportati i valori massimi dell’altezza d’onda significativa rappresentativa di ciascuna area, indicati con  $HQ_5$ .

Questi risultati confermano che per la Soluzione 4 in Fase a l’agitazione interna in presenza di onde estreme lungo le banchine risulta molto simile rispetto a quella che si ottiene per la situazione attuale.

Invece per la Fase b) si verifica un peggioramento rispetto alla situazione attuale paragonabile a quello ottenuto per le Soluzioni 2 e 3 in Fase b).

**Onde estreme Tr = 10 anni**

**Fase a**



**Fase b**

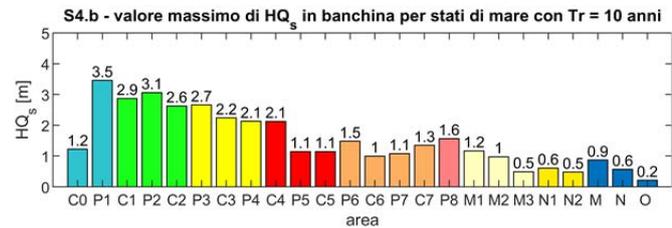
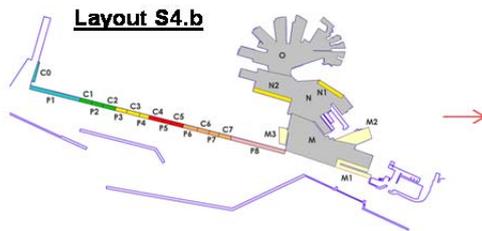


FIGURA 6-21 - ANALISI DELLE ONDE ESTREME (Tr=10 ANNI) PER LA SOLUZIONE 4 IN FASE: A -PANNELLO SUPERIORE E B – PANNELLO INFERIORE. MASSIMA  $HQ_s$  ESPRESSA IN M PER OGNI BANCHINA.

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

#### 6.4. Analisi comparativa tra le soluzioni e relative conclusioni

In questo paragrafo viene effettuata l’analisi comparativa relativa all’agitazione interna portuale che si ottiene per la situazione attuale e per le Soluzioni 2, 3 e 4. L’analisi viene effettuata considerando separatamente per le due fasi costruttive.

##### 6.4.1. Fase costruttiva a

Nella Figura 6-22 sono riportati i risultati ottenuti per il “downtime” delle banchine portuali relativamente alla soglia  $H_{s,lim} = 0,5 m$  e alla Fase costruttiva a. La figura paragona lo stato attuale, riportato nel pannello superiore, con i risultati delle tre configurazioni selezionate. Dal confronto emerge chiaramente che la Configurazione 4 risulta nettamente la migliore rispetto alle soluzioni 2 e 3 e fornisce risultati simili rispetto alla situazione attuale. Solo per le banchine C6 e P7 si ottiene una frequenza media annuale di superamento della soglia di 0,5 m superiore rispetto a quella attuale, la quale comunque si può ritenere dal punto di vista economico accettabile, essendo limitata per queste banchine a circa 120 ore/anno, ovvero a sole 10 ore/mese.

#### Fase a): operatività banchine $H_{s,lim} = 0.5 m$

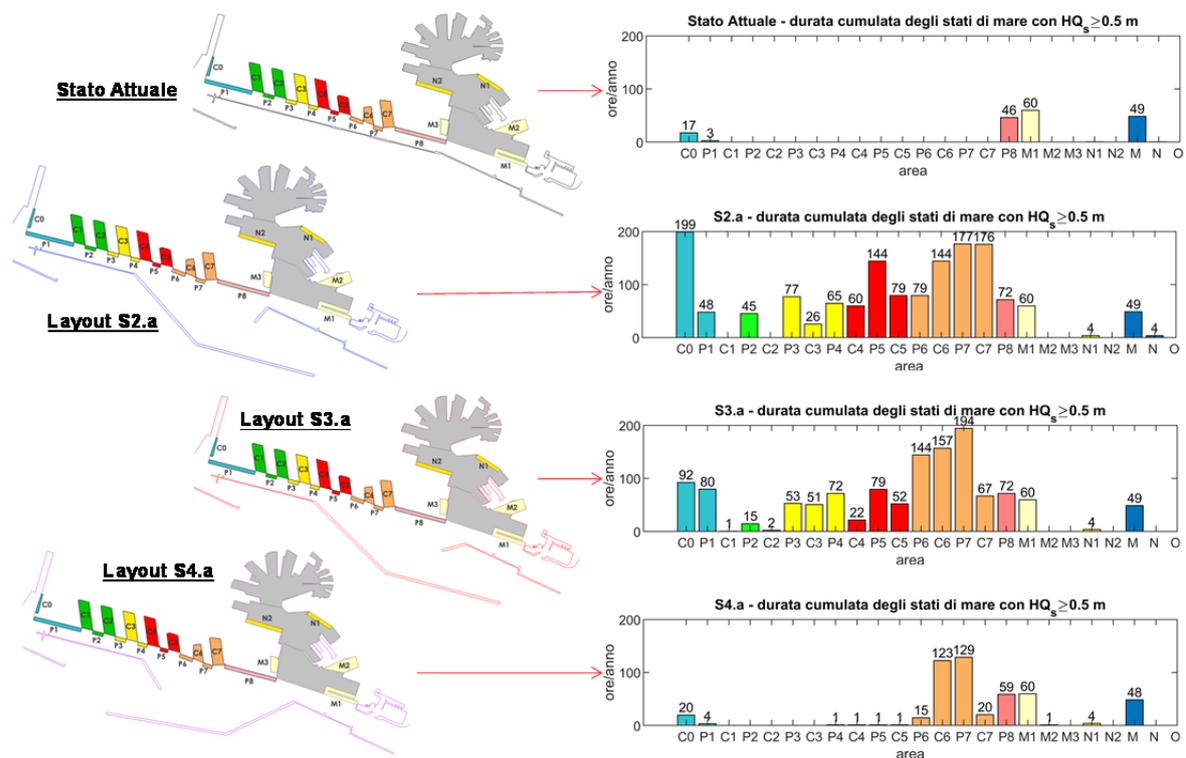


FIGURA 6-22 - FASE A): OPERATIVITÀ DELLE BANCHINE PORTUALI CON  $H_{s,lim} = 0,5 m$ . COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LE SOLUZIONI 2, 3 E 4.

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

**Fase a): operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

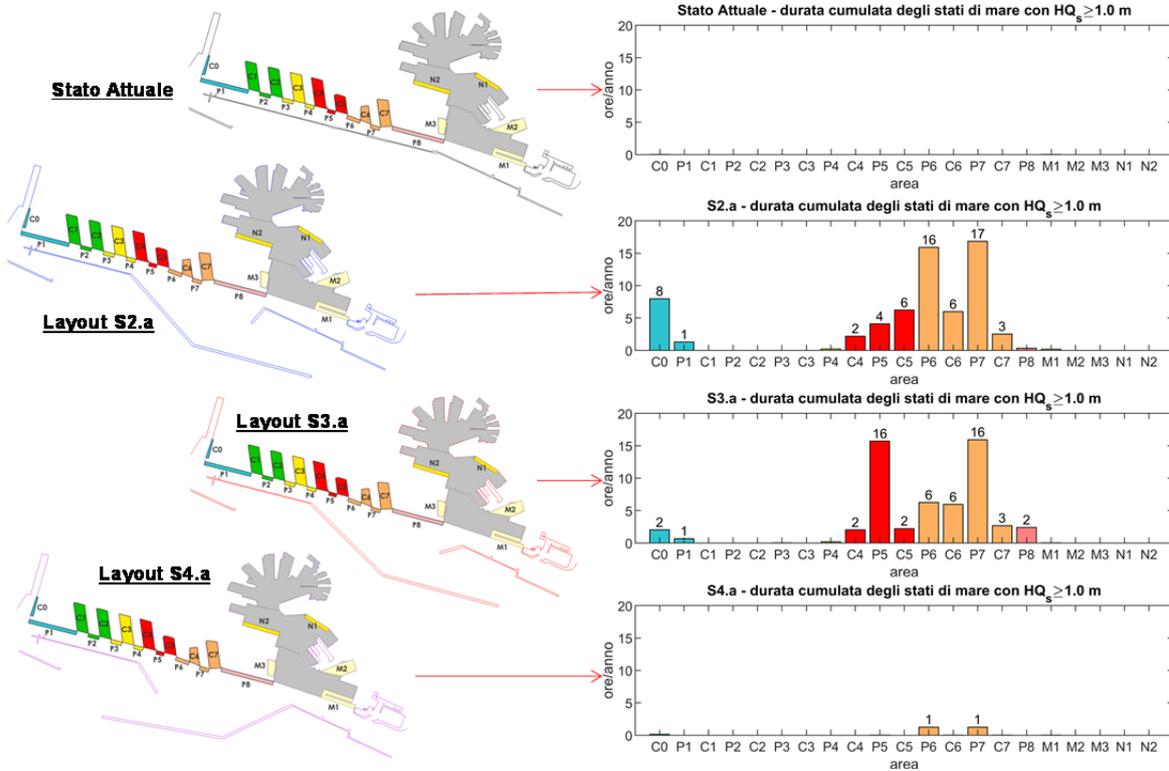


FIGURA 6-23 - FASE A): OPERATIVITÀ DELLE BANCHINE PORTUALI CON  $H_{s,lim} = 1,0$  m. COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LE SOLUZIONI 2, 3 E 4.

Nella Figura 6-23 viene effettuato lo stesso confronto prendendo in esame la soglia  $H_{s,lim} = 1,0$  m. Anche in questo caso si osserva che la Soluzione 4, al pari di quella attuale, praticamente non dà mai luogo al superamento della soglia, mentre ciò non accade per le altre due Soluzioni.

Infine nella Figura 6-24 si riportano i risultati delle onde estreme ( $Tr=10$  anni), rappresentando, per ogni area di riferimento riportata in ascissa, i corrispondenti valori dell’altezza d’onda significativa massima rappresentativa dell’area ( $H_{Q_s}$ ) ottenuta al variare delle condizioni del moto ondoso incidente.

I risultati mostrano di nuovo che la Soluzione 4 per le onde estreme dà luogo a livelli di agitazione ondosa residua lungo le banchine paragonabili a quelli della situazione attuale, mentre per le Soluzioni 2 e 3 si ottengono livelli di agitazione ondosa nettamente più elevati che superano anche i 2,5 m di altezza d’onda significativa.

**Volume 15 – Verifiche dell'agitazione ondosa nell'area portuale  
per le soluzioni d'intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

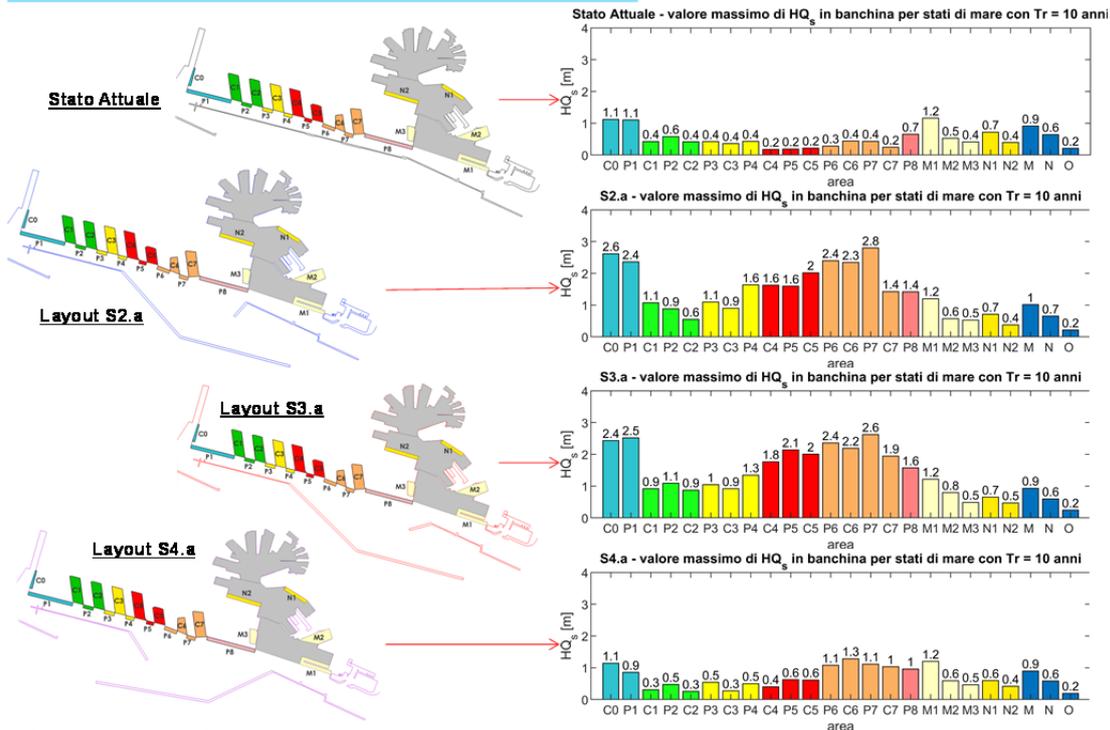
**Fase a): sicurezza banchine con onde estreme Tr = 10 anni**

FIGURA 6-24 - FASE A): SICUREZZA DELLE BANCHINE CON ONDE ESTREME. COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LE SOLUZIONI 2, 3 E 4.

## 6.4.2. Fase costruttiva b

Nella Figura 6-25, nella Figura 6-26 e nella Figura 6-27, si riportano gli stessi risultati mostrati al paragrafo precedente, ma relativi alla Fase b).

Come già osservato, nella Fase b tutte le tre Soluzioni mostrano un peggioramento rispetto alla Fase a), e quindi anche rispetto allo stato attuale. Il peggioramento riguarda anche la Soluzione 4, per la quale l'aumento di agitazione ondosa riguarda prevalentemente le banchine poste in prossimità della foce del Polcevera.

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

**Fase b): operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5 m$**

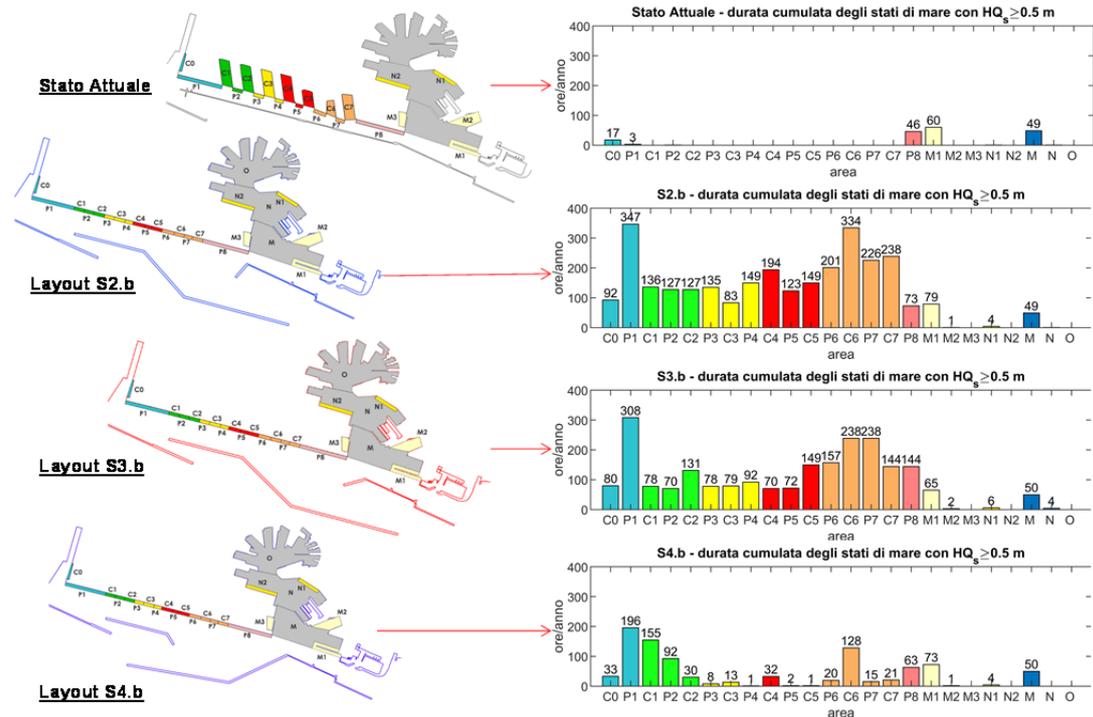


FIGURA 6-25 - FASE B): OPERATIVITÀ DELLE BANCHINE PORTUALI CON  $H_{s,lim} = 0,5 m$ . COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LE SOLUZIONI 2, 3 E 4.

**Fase b): operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0 m$**

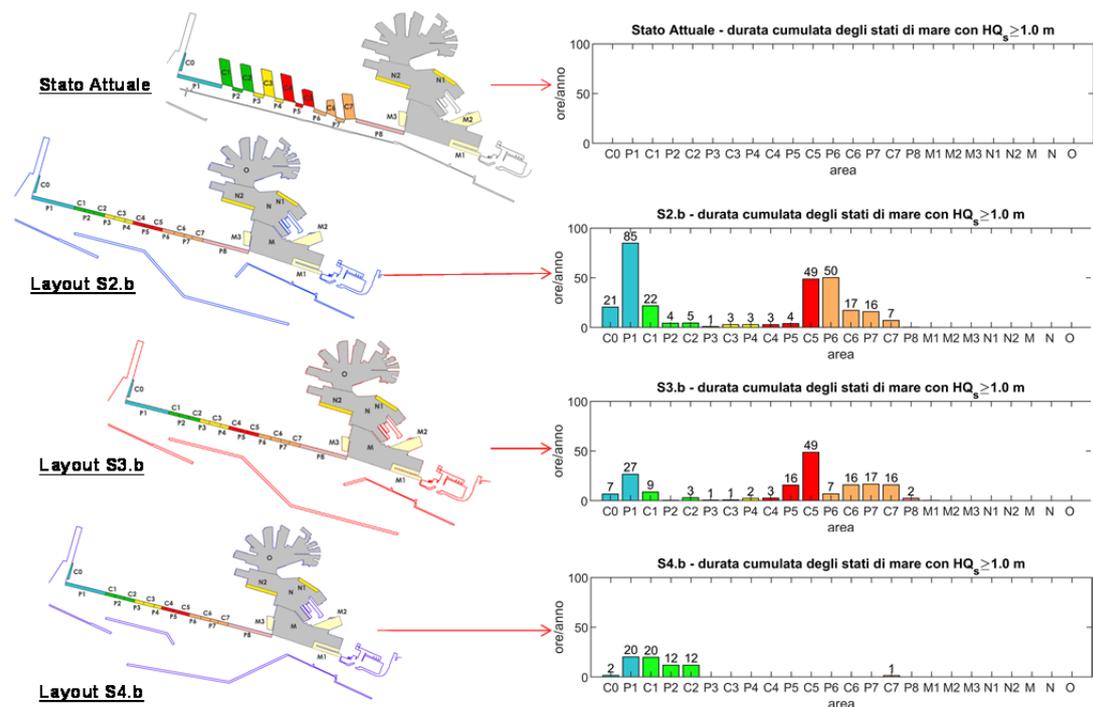


FIGURA 6-26 - FASE B): OPERATIVITÀ DELLE BANCHINE PORTUALI CON  $H_{s,lim} = 1,0 m$ . COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LE SOLUZIONI 2, 3 E 4

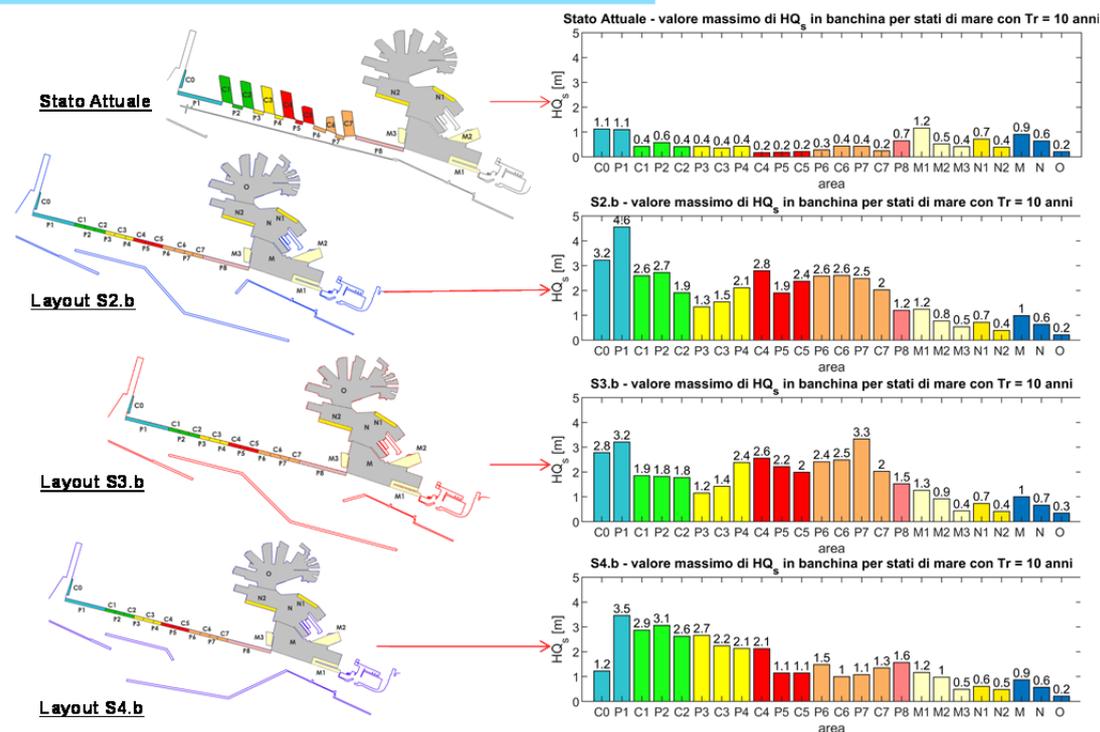
**Fase b): sicurezza banchine con onde estreme  $T_r = 10$  anni**

FIGURA 6-27 - FASE B): SICUREZZA DELLE BANCHINE CON ONDE ESTREME. COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LE SOLUZIONI 2, 3 E 4.

### 6.4.3. Conclusioni

In sintesi le analisi condotte hanno mostrato che:

1. la Soluzione 4 in Fase a è l'unica in grado di garantire un livello di agitazione interna portuale confrontabile rispetto allo stato attuale;
2. il livello di agitazione ondosa per le Soluzioni 2 e 3 sia in Fase a, sia in Fase b risulta troppo elevato per garantire una adeguata operatività delle banchine portuali e la sicurezza delle navi all'ormeggio;
3. anche la Soluzione 4 in Fase b dà luogo ad un livello di agitazione ondosa troppo elevato rispetto alla situazione attuale;
4. lungo il canale di accesso e il cerchio di evoluzione delle tre Soluzioni esaminate non si è riscontrata una agitazione ondosa tale da condizionare gli aspetti navigazionali.

In merito al punto 2, la ragione per cui le Soluzioni 2 e 3 danno luogo ad una agitazione ondosa portuale molto elevata rispetto alla situazione attuale, può essere facilmente

compresa analizzando la Figura 6-28, dove, per ciascuna delle tre Soluzioni in esame rappresentate graficamente in Fase a, è riportato:

- (i) l'orientamento dell'imboccatura portuale;
- (ii) il settore di provenienza del moto ondoso a largo del porto caratterizzato da stati di mare con  $H_s > 1,0 m$ .

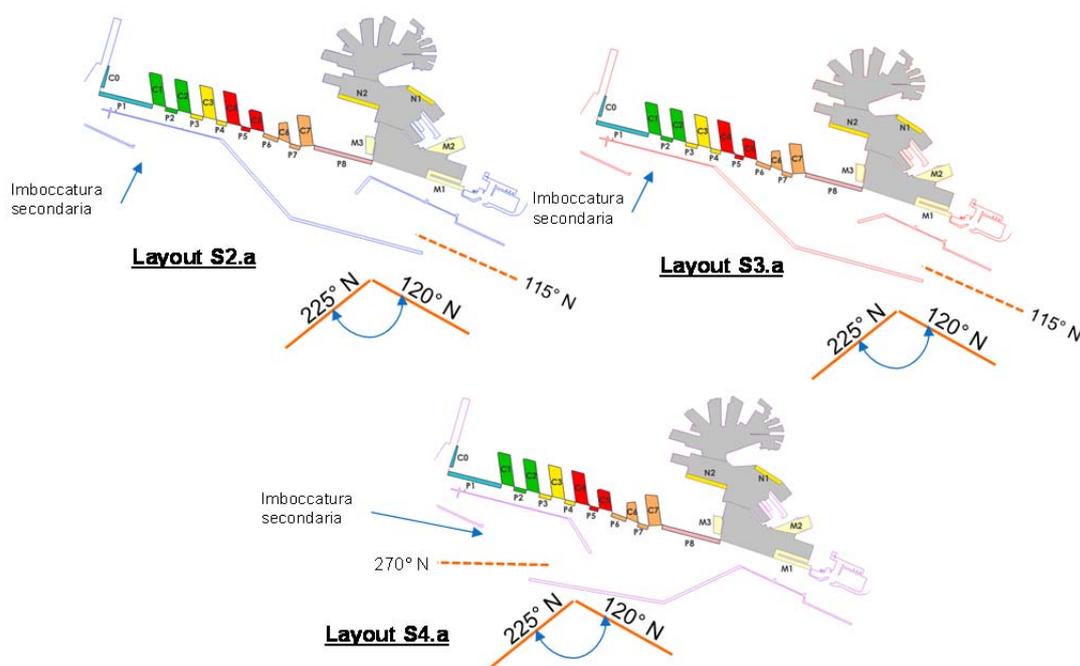


FIGURA 6-28 – FASE A): ORIENTAMENTO DELLE IMBOCCATURE PORTUALI E SETTORE DI PROVENIENZA DEL MOTO ONDOSO A LARGO DEL PORTO CON  $H_s > 1,0 m$ .

L'analisi della figura mostra che per le Soluzioni 2 e 3 l'orientamento dell'imboccatura portuale ( $115^\circ N$ ) presenta una differenza di soli  $5^\circ$  rispetto al moto ondoso più obliquo proveniente da Levante ( $120^\circ N$ ). Questa differenza angolare è troppo piccola per garantire una adeguata protezione geometrica dal moto ondoso proveniente da Levante. Inoltre anche l'imboccatura secondaria risulta aperta al moto ondoso proveniente da Levante e per questa ragione si ottiene, sempre per le Soluzioni 2 e 3, una elevata agitazione interna portuale anche lungo le banchine poste in prossimità della foce del Polcevera.

Ciò invece non accade per la Soluzione 4, per la quale l'angolo formato tra il moto ondoso più obliquo proveniente da Ponente ( $225^\circ N$ ) con l'orientamento dell'imboccatura

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

portuale ( $270^\circ$  N) risulta di  $45^\circ$  ed è quindi sufficientemente elevato per schermare il bacino portuale dal moto ondoso incidente. Inoltre l’opera foranea della Soluzione 4 scherma l’imboccatura secondaria dal moto ondoso proveniente da Levante.

Per quanto riguarda l’aumento dell’agitazione ondosa che si ottiene nella Fase b della Soluzione 4, con riferimento alla Figura 6-29 si evidenzia che ciò è dovuto alla limitata protezione offerta dalla diga dell’aeroporto la quale nella Fase b è stata prolungata maggiormente per le Soluzioni 2 e 3 rispetto a quanto fatto per la Soluzione 4.

Un’ultima osservazione riguarda le Soluzioni 2 e 3 per le quali si è constatato che le riflessioni del moto ondoso incidente causate dall’opera foranea orientata lungo la direzione NO-SE provocano un aumento di penetrazione delle onde attraverso l’imboccatura secondaria.

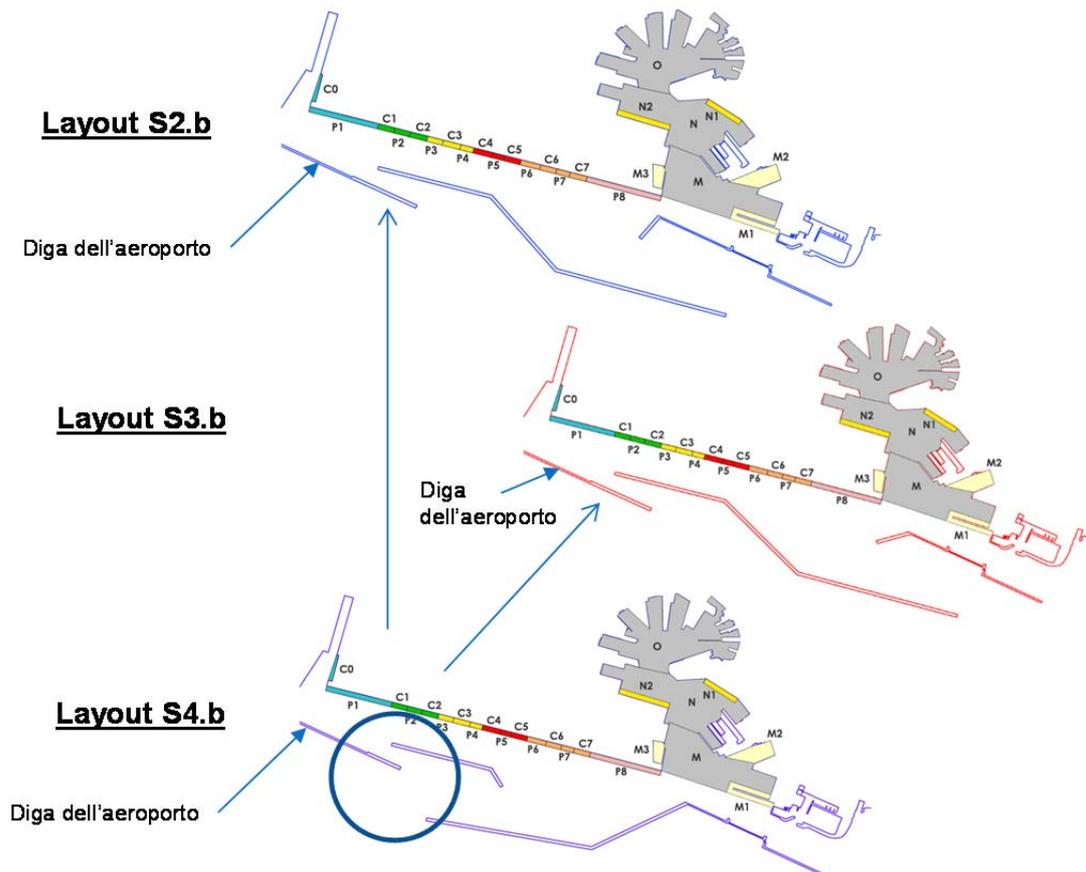


FIGURA 6-29 - CONFRONTO TRA LA SOLUZIONE 4 E LE SOLUZIONI 2 E 3 SULLA PROTEZIONE GEOMETRICA OFFERTA DAL PROLUNGAMENTO DELLA DIGA DELL’AEROPORTO IN FASE B.

## 7. MODIFICA DELLE SOLUZIONI PROGETTUALI

Alla luce delle conclusioni riportate nel paragrafo precedente, si può affermare che le Soluzioni 2 e 3, sia nella Fase a che nella Fase b, non sono in grado di proteggere in modo adeguato le banchine portuali dal moto ondoso incidente. La stessa cosa riguarda la Fase b della Soluzione 4.

Pertanto si è deciso di modificare queste Soluzioni allo scopo di aumentare la loro capacità di protezione del bacino interno portuale.

Nella Figura 7-1, nella Figura 7-2 e nella Figura 7-3 sono riportate, sia per la Fase a che per la Fase b, le modifiche apportate alle Soluzioni. Per distinguere le nuove Soluzioni dalle originali, le prime vengono nel seguito indicate con “modificate”.

La Figura 7-1 e la Figura 7-2 mostrano le modifiche apportate alle Soluzioni 2 e 3.

La prima modifica riguarda la diga di sopraflutto. Nelle figure la parte della diga oggetto della modifica è riportata in verde per distinguerla da quella originale riportata nelle stesse figure in rosso.

Per aumentare il grado di protezione del bacino portuale esercitato dalla diga di sopraflutto, si è deciso di prolungare quest'ultima per ambedue le soluzioni. Il prolungamento è stato effettuato in modo tale da garantire:

- a) la stessa larghezza e lo stesso orientamento ( $115^{\circ}$  N) del canale di accesso delle soluzioni originali allo scopo di non peggiorare gli aspetti navigazionali delle Soluzioni originali;
- b) la massima protezione del bacino portuale interno senza introdurre alcuna forma di impatto morfologico delle nuove opere sulla costa posta a Levante del porto.

Per conseguire il secondo obiettivo (b) nel rispetto del primo (a), le testate delle dighe di sopraflutto prolungate raggiungono, senza superarla, la linea ideale ortogonale alla giacitura del prolungamento del Molo Duca di Galleria (diga foranea esistente) e passante per la sua testata Est. In tal modo lo schermo operato sul moto ondoso incidente dalla nuova diga di sopraflutto, in relazione alla costa posta a Levante del porto, non subisce sostanziali variazioni rispetto alla situazione attuale. Di conseguenza non sono da aspettarsi nuovi impatti morfologici sulla costa posta a Levante del porto.

Operando in tal modo, come evidenziato nella Figura 7-1 e nella Figura 7-2, la Soluzione 2 modificata (diga in verde) prevede il prolungamento di circa 900 m della diga di

sopraflutto, mentre per la Soluzione 3, indicata sempre in verde nella figura, il prolungamento risulta leggermente inferiore, ovvero pari a circa 750 m.

La seconda modifica riguarda la protezione con scogliera del primo tratto della diga di sopraflutto orientato lungo la direzione NO-SE. Questa modifica, che riguarda sia la Fase a che la Fase b, è stata introdotta per ridurre le onde riflesse dalla diga che tendono a penetrare nell’imboccatura secondaria.

La terza modifica, che attiene solo la Fase b delle Soluzioni 2 e 3, riguarda un ulteriore prolungamento di circa 300 m della diga dell’aeroporto, la quale era stata già prolungata nelle soluzioni originali. Complessivamente, come riportato dalla Figura 7-1 e dalla Figura 7-2, nella Fase b) il prolungamento della diga dell’aeroporto diventa di circa 970 m. Tale ulteriore prolungamento è stato introdotto sempre per ridurre la penetrazione del moto ondoso dall’imboccatura secondaria.

Infine la quarta modifica riguarda solo la Fase b per la quale, come mostrato dalle figure, si è previsto di realizzare una parte della nuova banchina di riva con celle antiriflettenti allo scopo di assorbire parte dell’energia che riesce a penetrare nel porto.

Come mostrato dalla Figura 7-3, le modifiche introdotte per la Soluzione 4 riguardano solo la Fase b e in particolare:

- un ulteriore prolungamento di circa 300 m della diga dell’aeroporto per ridurre la penetrazione del moto ondoso dall’imboccatura secondaria, per un totale quindi di circa 650 m rispetto alla situazione attuale;
- la realizzazione di parte della banchina di riva con celle antiriflettenti come proposto per le Soluzioni 2 e 3.

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

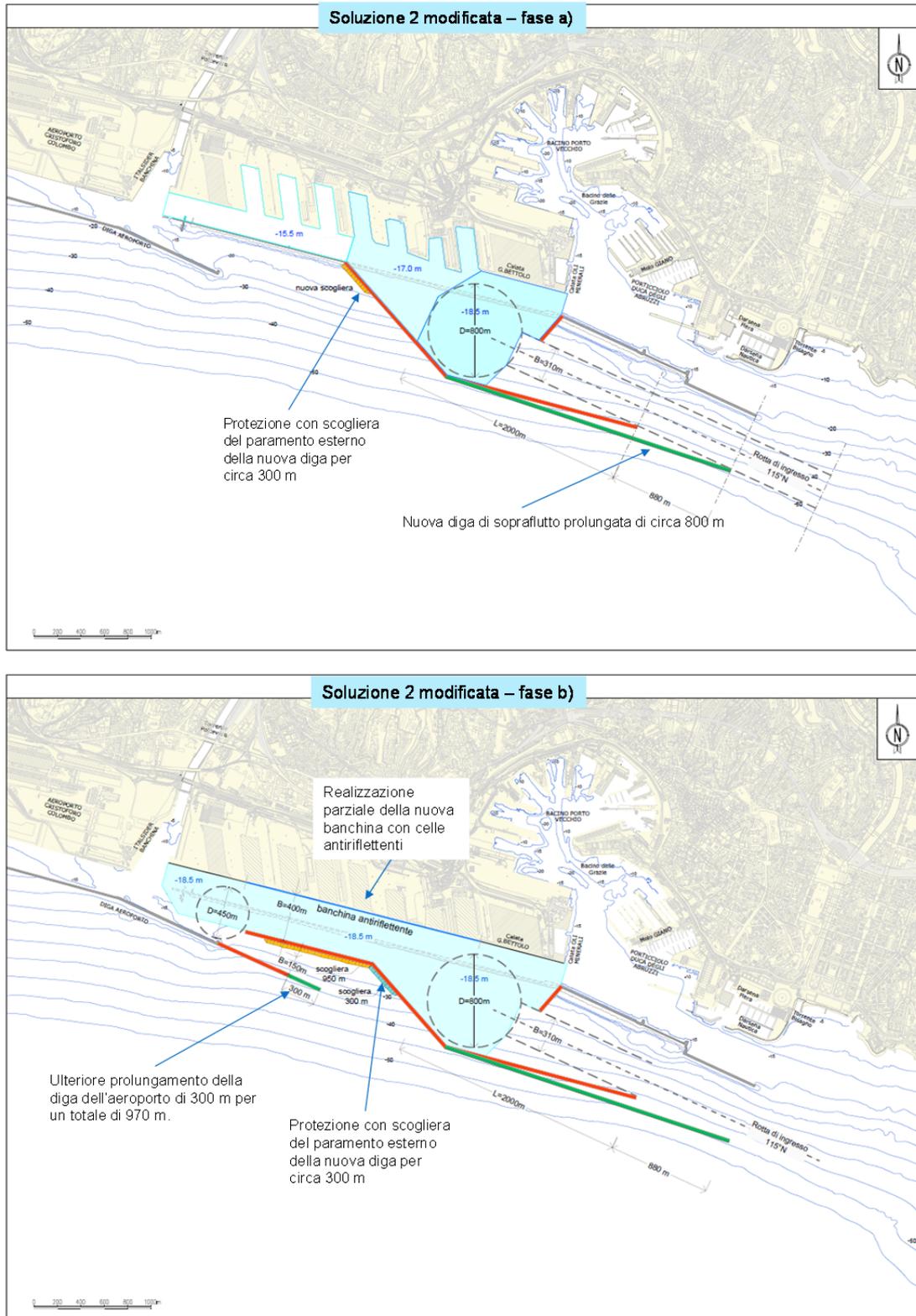


FIGURA 7-1 - SOLUZIONE 2 MODIFICATA FASE A) E FASE B).

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

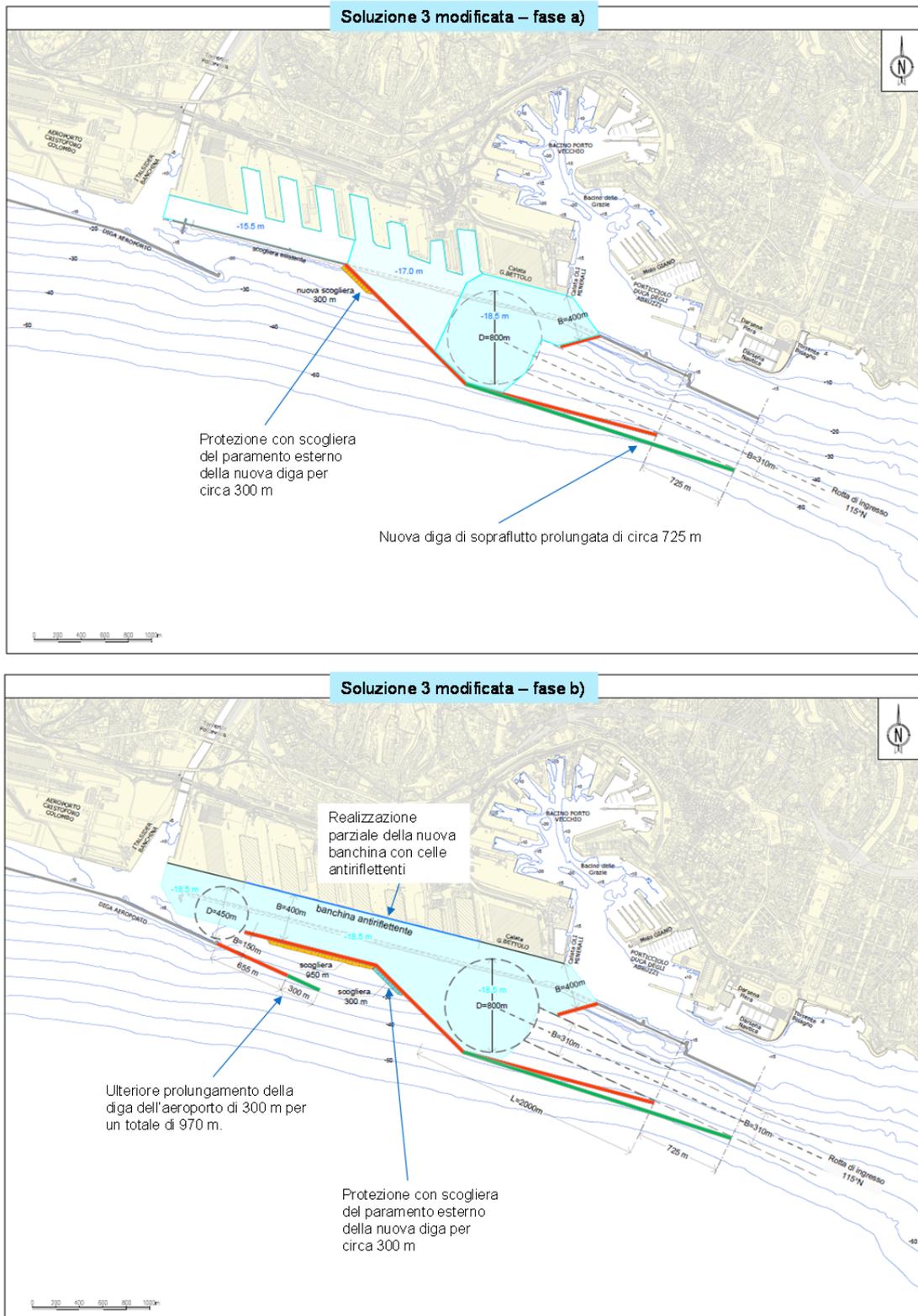


FIGURA 7-2 - SOLUZIONE 3 MODIFICATA FASE A) E FASE B).

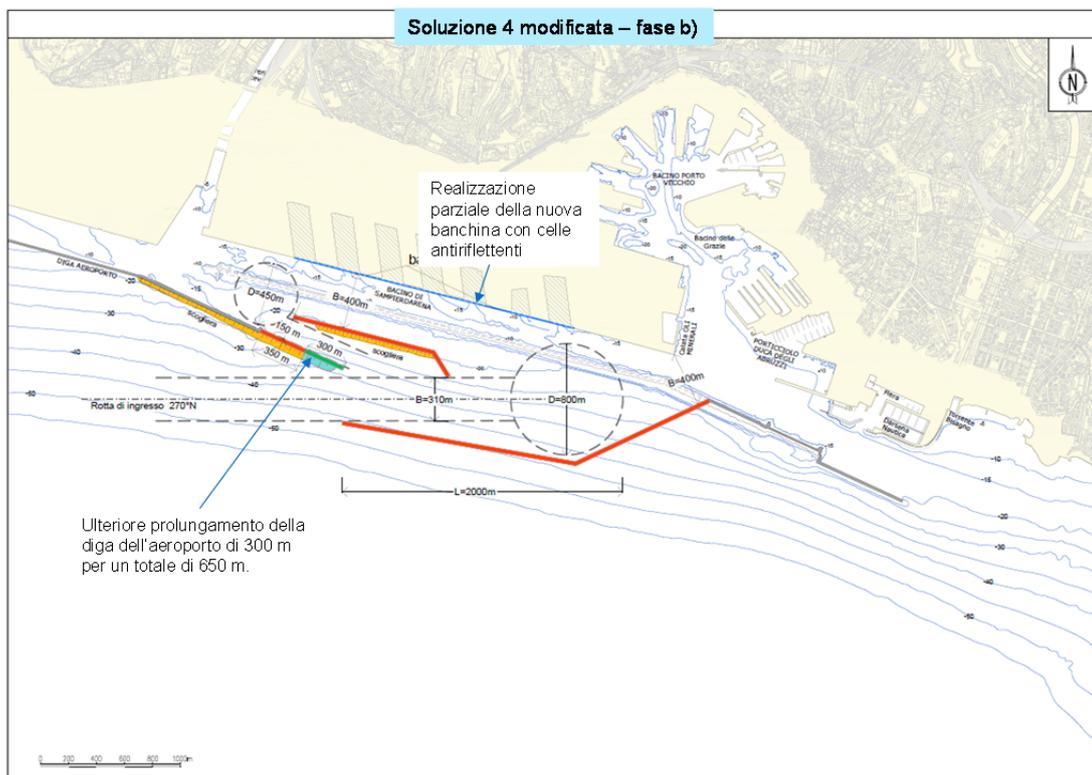


FIGURA 7-3 - SOLUZIONE 4 MODIFICATA FASE B).

## 8. ANALISI DELLE SOLUZIONI SELEZIONATE MODIFICATE

### 8.1. Soluzione 2 modificata

Nei seguenti sottoparagrafi sono illustrati i risultati delle simulazioni condotte per l’analisi del “downtime” e delle “condizioni estreme” delle banchine associati allo scenario di attuazione della Soluzione 2 modificata. L’analisi delle aree di evoluzione delle navi non è stata ripetuta per le Soluzioni modificate perché l’allungamento del canale di accesso comporta necessariamente una ulteriore riduzione dell’altezza d’onda residua.

#### 8.1.1. Analisi del “downtime” lungo le banchine

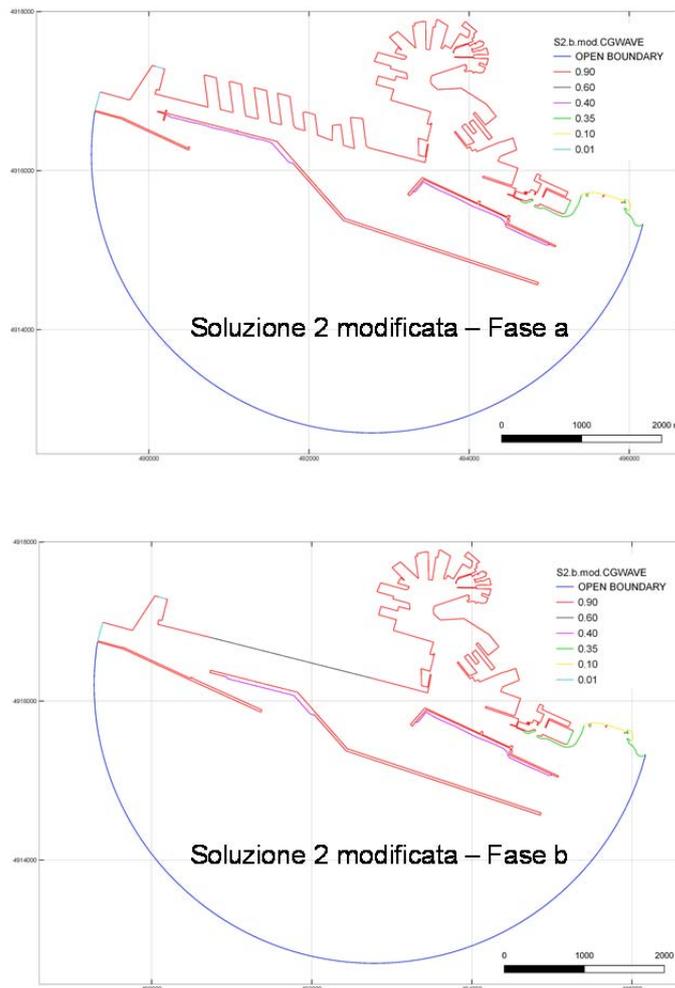


FIGURA 8-1 - SOLUZIONE 2 MODIFICATA FASE A (PANNELLO SUPERIORE) E FASE B (PANNELLO INFERIORE) – COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE DELLE OPERE PORTUALI

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

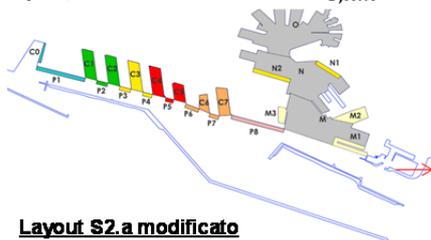
El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

Nella Figura 8-1 sono riportati i coefficienti di riflessione utilizzati nelle simulazioni per riprodurre le opere interne ed esterne portuali. Il pannello superiore si riferisce alla Fase a, mentre il pannello inferiore si riferisce alla Fase b).

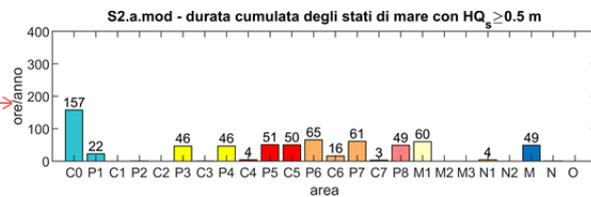
Nella Figura 8-2 e nella Figura 8-3 sono riportati i risultati del “downtime” per le banchine portuali ottenuti rispettivamente per le fasi costruttive a) e b). Per ogni area di riferimento (ascissa) si riportano in ordinata i risultati ottenuti espressi in numero di ore medio annuo di superamento della soglia  $H_{s,lim}$ .

### Fase a

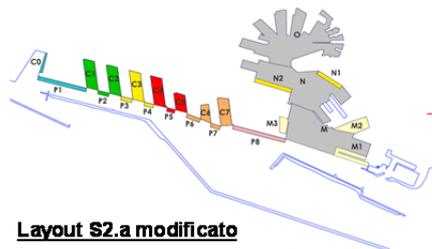
#### A) Operatività banchine $H_{s,lim} = 0.5$ m



**Layout S2.a modificato**



#### B) Operatività banchine $H_{s,lim} = 1.0$ m



**Layout S2.a modificato**

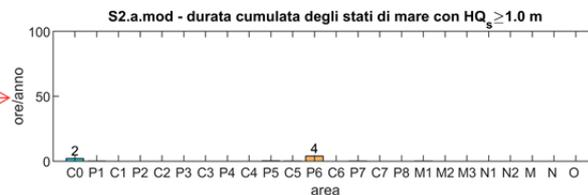


FIGURA 8-2 - “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 2 MODIFICATA IN FASE A (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  m; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  m.

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

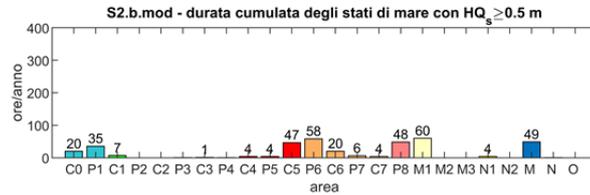
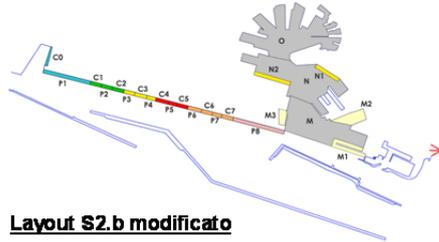
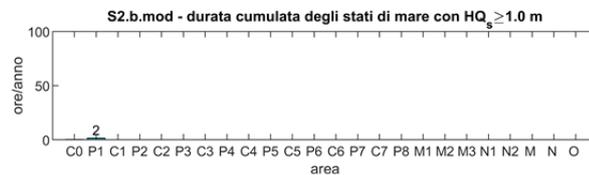
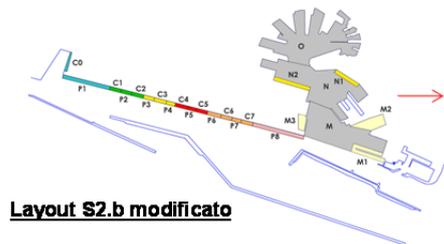
**Fase b****A) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5$  m****B) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

FIGURA 8-3 “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 2 MODIFICATA IN FASE B (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  M; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  M.

Nella Figura 8-4 (Soluzione 2 modificata – Fase a) e nella Figura 8-5 (Soluzione 2 modificata – Fase b) si riportano a titolo di esempio i risultati ottenuti nel dominio di calcolo espressi in termini di  $H_s$  per quattro condizioni di moto ondoso incidente rappresentative.

## Soluzione 2 modificata – Fase a

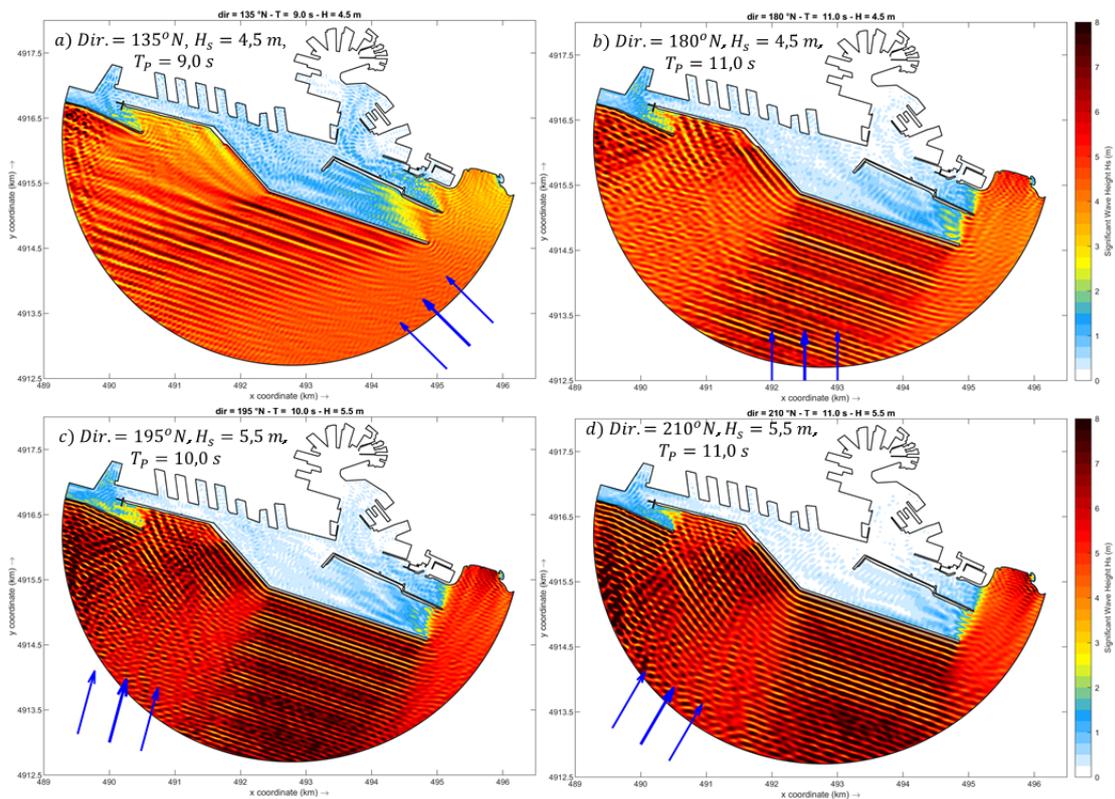


FIGURA 8-4 - ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LA SOLUZIONE 2 MODIFICATA IN FASE A: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI.

## Soluzione 2 modificata – Fase b

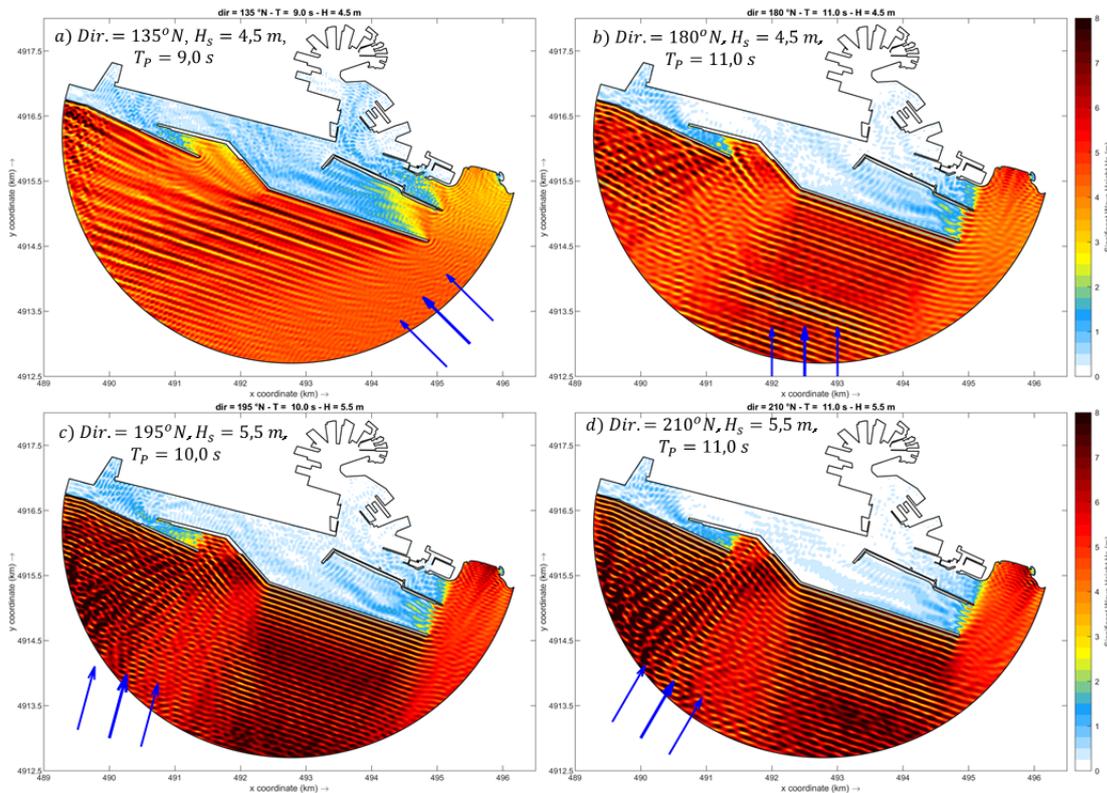


FIGURA 8-5 - ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LA SOLUZIONE 2 MODIFICATA IN FASE B: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI.

I risultati ottenuti per il “downtime” delle banchine mostrano chiaramente che le modifiche apportate alla Soluzione 2 sono estremamente efficienti per ridurre l’agitazione ondosa portuale rispetto alla soluzione originale.

### 8.1.2. Analisi delle condizioni estreme

La Figura 8-6 mostra i risultati ottenuti in presenza di stati di mare estremi, caratterizzati dal tempo di ritorno  $T_r=10$  anni. I diagrammi sono riferiti alle fasi a) e b) di costruzione. In ascissa sono rappresentate le aree di riferimento che delimitano le banchine e le calate portuali, mentre in ordinata sono riportati i valori massimi dell’altezza d’onda significativa rappresentativa di ciascuna area, indicati con  $HQ_s$ .

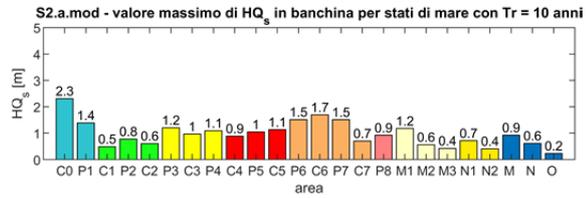
Anche per le condizioni estreme si osserva per la Soluzione 2 modificata un netto miglioramento rispetto alla soluzione originale.

Onde estreme  $T_r = 10$  anni

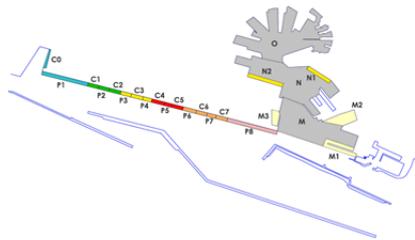
**Fase a**



**Layout S2.a modificato**



**Fase b**



**Layout S2.b modificato**

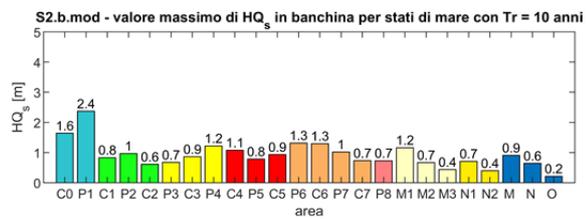


FIGURA 8-6 - ANALISI DELLE ONDE ESTREME ( $T_r=10$  ANNI) PER LA SOLUZIONE 2 MODIFICATA IN FASE: A -PANNELLO SUPERIORE E B – PANNELLO INFERIORE. MASSIMA  $HQ_s$  ESPRESSA IN M PER OGNI BANCHINA.

## 8.2. Soluzione 3 modificata

Nei seguenti sottoparagrafi sono illustrati i risultati delle simulazioni condotte per l’analisi del “downtime” e delle “condizioni estreme” delle banchine associati allo scenario di attuazione della Soluzione 3 modificata.

### 8.2.1. Analisi del “downtime” lungo le banchine

Nella Figura 8-7 sono riportati i coefficienti di riflessione utilizzati nelle simulazioni per riprodurre le opere interne ed esterne portuali. Il pannello superiore si riferisce alla Fase a, mentre il pannello inferiore si riferisce alla Fase b.

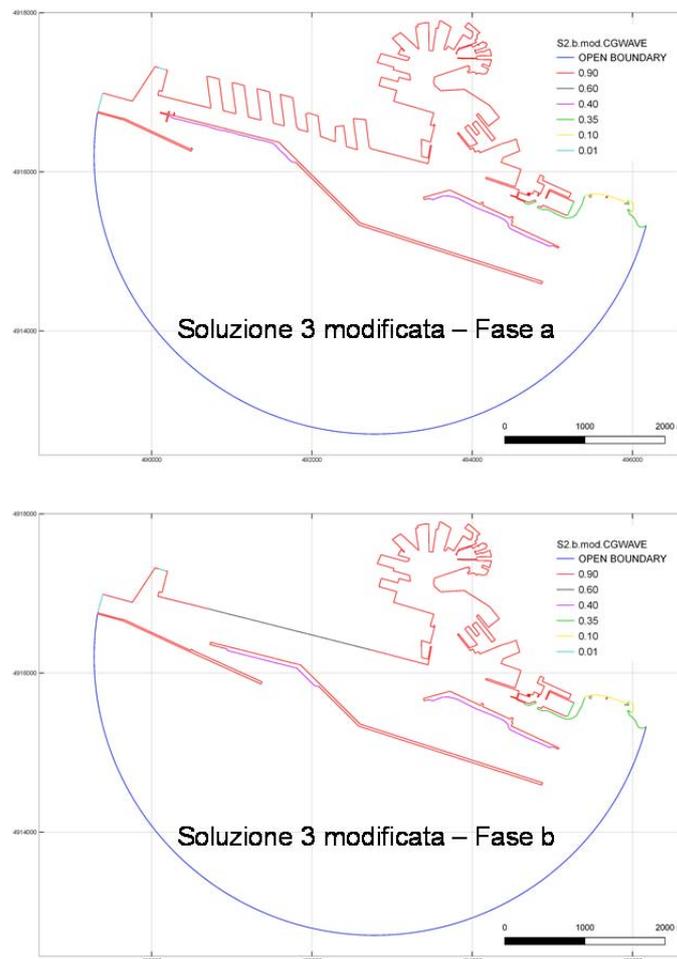


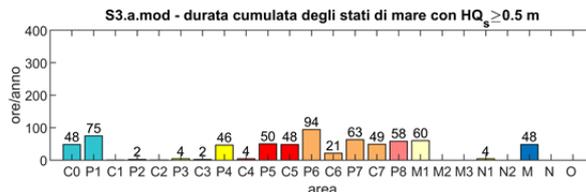
FIGURA 8-7 - SOLUZIONE 3 MODIFICATA FASE A (PANNELLO SUPERIORE) E FASE B (PANNELLO INFERIORE) – COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE DELLE OPERE PORTUALI

Nella Figura 8-8 e nella Figura 8-9 sono riportati i risultati del “downtime” per le banchine portuali ottenuti rispettivamente per le fasi costruttive a) e b). Per ogni area di

riferimento (ascissa) si riportano in ordinata i risultati ottenuti espressi in numero di ore medio annuo di superamento della soglia  $H_{s,lim}$ .

**Fase a**

**A) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5$  m**



**B) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

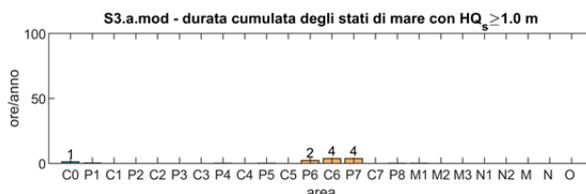
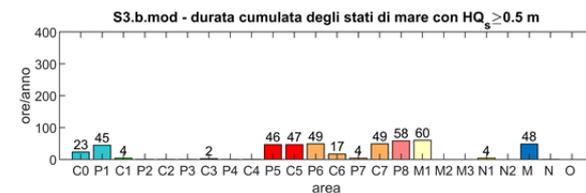
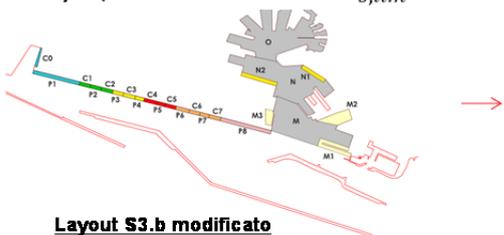


FIGURA 8-8 - “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 3 MODIFICATA IN FASE A (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  M; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  M.

**Fase b**

**A) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5$  m**



**B) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

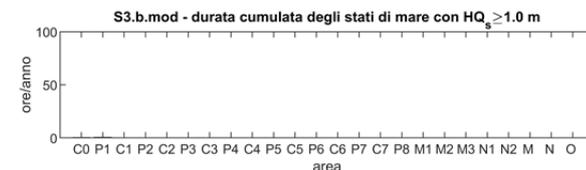
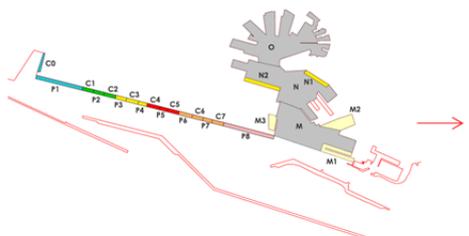


FIGURA 8-9 - “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 3 MODIFICATA IN FASE B (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  M; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  M.

Nella Figura 8-10 (Soluzione 3 modificata – Fase a) e nella Figura 8-11 (Soluzione 3 modificata – Fase b) si riportano a titolo di esempio i risultati ottenuti nel dominio di calcolo espressi in termini di  $H_s$  per quattro condizioni di moto ondoso incidente rappresentative.

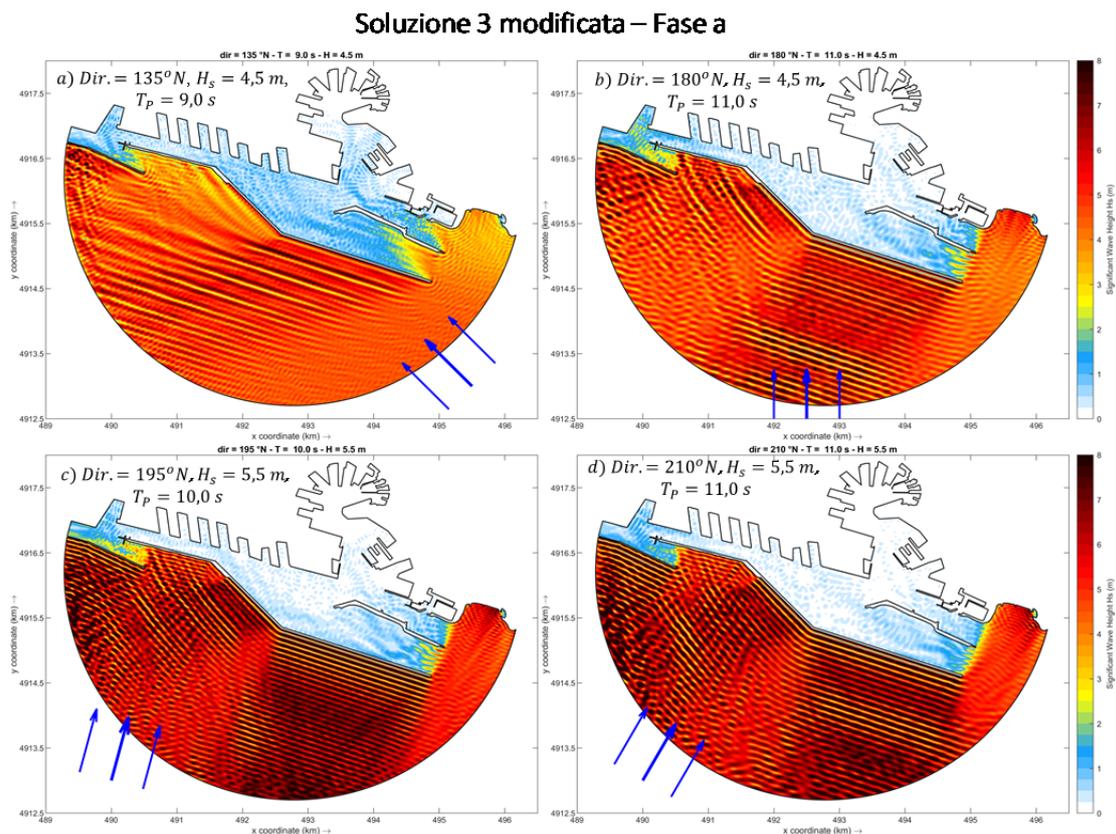
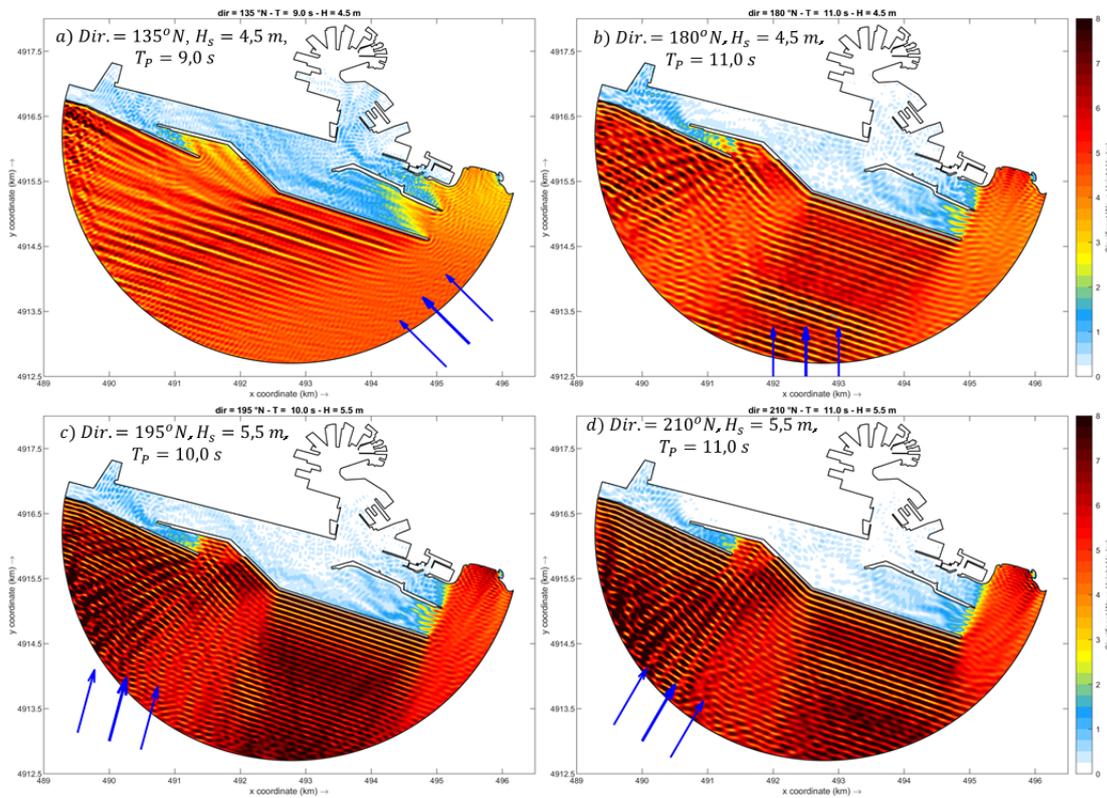


FIGURA 8-10 - ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LA SOLUZIONE 3 MODIFICATA IN FASE A: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI.

**Soluzione 3 modificata – Fase b**



**FIGURA 8-11 - ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LA SOLUZIONE 3 MODIFICATA IN FASE B: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI.**

L’analisi delle figure mostra che anche in questo caso la Soluzione 3 modificata da luogo ad un sostanziale miglioramento rispetto alla soluzione originale.

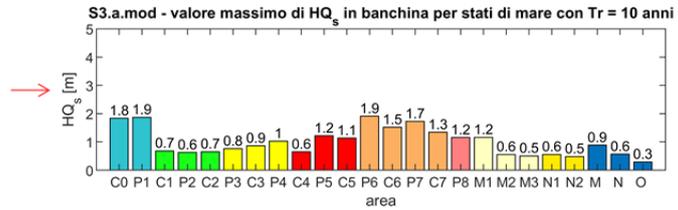
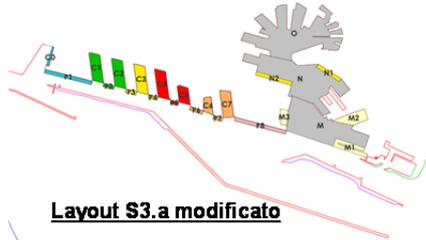
### 8.2.2. Analisi delle condizioni estreme

La Figura 8-12 mostra i risultati ottenuti in presenza di stati di mare estremi, caratterizzati dal tempo di ritorno  $T_r=10$  anni. I diagrammi sono riferiti alla fasi a) e b) di costruzione. In ascissa sono rappresentate le aree di riferimento che delimitano le banchine e le calate portuali, mentre in ordinata sono riportati i valori massimi dell’altezza d’onda significativa rappresentativa di ciascuna area, indicati con  $HQ_s$ .

Anche per le condizioni estreme si osserva per la Soluzione 3 modificata un sostanziale miglioramento rispetto alla soluzione originale.

**Onde estreme Tr = 10 anni**

**Fase a**



**Fase b**

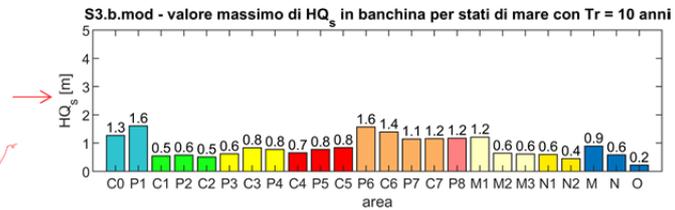
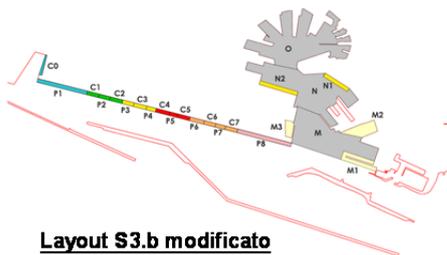


FIGURA 8-12 - ANALISI DELLE ONDE ESTREME (Tr=10 ANNI) PER LA SOLUZIONE 3 MODIFICATA IN FASE: A -PANNELLO SUPERIORE E B – PANNELLO INFERIORE. MASSIMA  $HQ_s$  ESPRESSA IN M PER OGNI BANCHINA.

### 8.3. Soluzione 4 Fase b) modificata

Nei seguenti sottoparagrafi sono illustrati i risultati delle simulazioni condotte per l’analisi del “downtime” e delle “condizioni estreme” delle banchine associati allo scenario di attuazione della Soluzione 4 in Fase b modificata.

#### 8.3.1. Analisi del “downtime” lungo le banchine

Nella Figura 8-13 sono riportati i coefficienti di riflessione utilizzati nelle simulazioni per riprodurre le opere interne ed esterne portuali. La figura si riferisce alla Fase b modificata in quanto per la Soluzione 4 la fase a non è stata oggetto di modifiche.

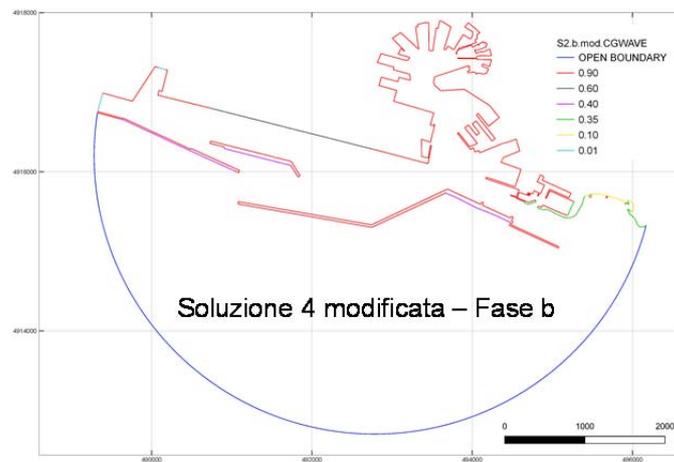


FIGURA 8-13 - SOLUZIONE 4 FASE B MODIFICATA – COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE DELLE OPERE PORTUALI

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

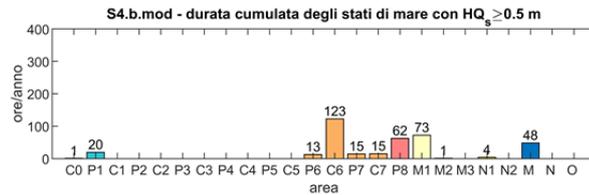
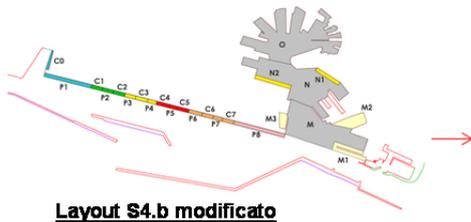
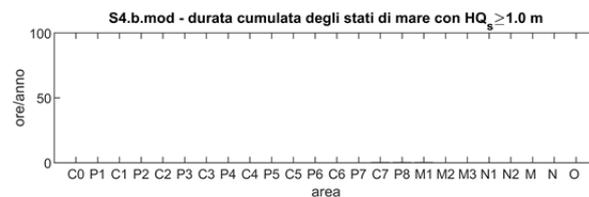
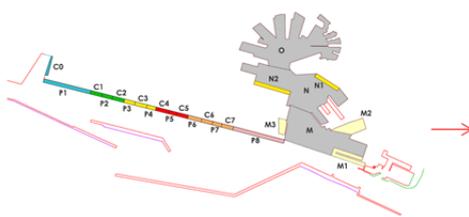
**Fase b****A) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5$  m****B) Operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

FIGURA 8-14 - “DOWNTIME” DELLE BANCHINE PORTUALI PER LA SOLUZIONE 4 MODIFICATA IN FASE B (NUMERO DI ORE MEDIO ALL’ANNO DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA  $H_{s,lim}$ ): PANNELLO A:  $H_{s,lim} = 0,5$  M; PANNELLO B:  $H_{s,lim} = 1,0$  M.

Nella Figura 8-14 sono riportati i risultati del “downtime” per le banchine portuali ottenuti per la Fase b). Per ogni area di riferimento (ascissa) si riportano in ordinata i risultati ottenuti espressi in numero di ore medio annuo di superamento della soglia  $H_{s,lim}$ .

Nella Figura 8-15 (Soluzione 4 modificata – Fase b) si riportano a titolo di esempio i risultati ottenuti nel dominio di calcolo espressi in termini di  $H_s$  per quattro condizioni di moto ondoso incidente rappresentative.

Anche per la Soluzione 4 in Fase b) modificata i miglioramenti in termini di “downtime” delle banchine sono evidenti rispetto alla soluzione originale.

## Soluzione 4 modificata – Fase b

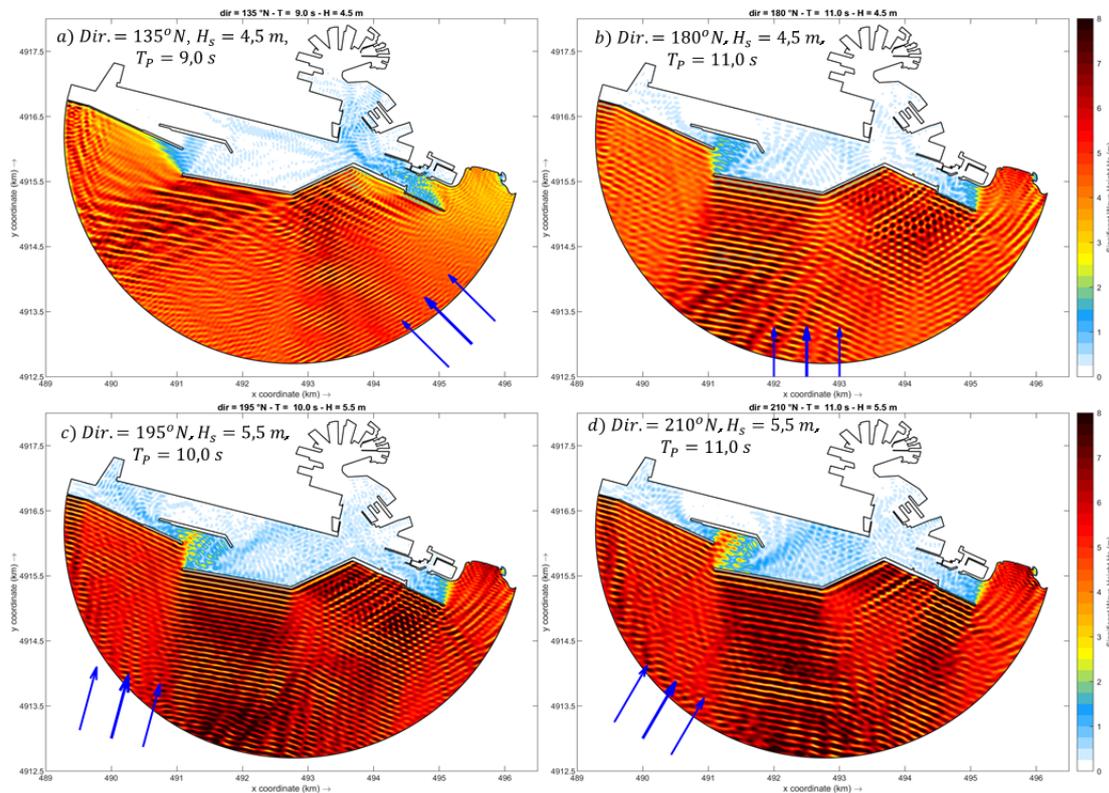


FIGURA 8-15 - ANALISI DEL “DOWNTIME” PER LA SOLUZIONE 4 MODIFICATA IN FASE B: VALORI DI  $H_s$  NEL DOMINIO DI CALCOLO PER LE QUATTRO CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO INCIDENTE RIPORTATE NEI PANNELLI.

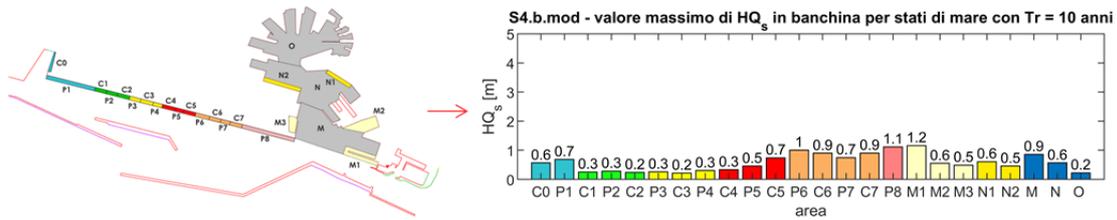
## 8.3.2. Analisi delle condizioni estreme

La Figura 8-16 mostra i risultati ottenuti in presenza di stati di mare estremi, caratterizzati dal tempo di ritorno  $T_r=10$  anni. I diagrammi sono riferiti alle fasi a) e b) di costruzione. In ascissa sono rappresentate le aree di riferimento che delimitano le banchine e le calate portuali, mentre in ordinata sono riportati i valori massimi dell’altezza d’onda significativa rappresentativa di ciascuna area, indicati con  $HQ_s$ .

Anche per le condizioni estreme si osserva per la Soluzione 4 in fase b modificata un netto miglioramento rispetto alla soluzione originale.

**Onde estreme Tr = 10 anni**

**Fase b**



**Layout S4.b modificato**

FIGURA 8-16 - ANALISI DELLE ONDE ESTREME (TR=10 ANNI) PER LA SOLUZIONE 4 MODIFICATA IN FASE A. MASSIMA  $HQ_s$  ESPRESSA IN M PER OGNI BANCHINA.

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

## 9. ANALISI COMPARATIVA TRA LE SOLUZIONI MODIFICATE

In questo paragrafo viene effettuata l’analisi comparativa relativa all’agitazione interna portuale che si ottiene per lo stato attuale e per le soluzioni 2,3 e 4 modificate. L’analisi viene effettuata separatamente per le due fasi costruttive.

### 9.1. Fase a)

La Figura 9-1 riporta i risultati ottenuti per il “downtime” delle banchine portuali relativamente alla soglia  $H_{s,lim} = 0,5 m$  e alla Fase costruttiva a). La figura paragona lo stato attuale, riportato nel pannello superiore, con i risultati delle Soluzioni 2 e 3 modificate e della Soluzione 4 in fase a che non è stata oggetto, come detto, di modifiche.

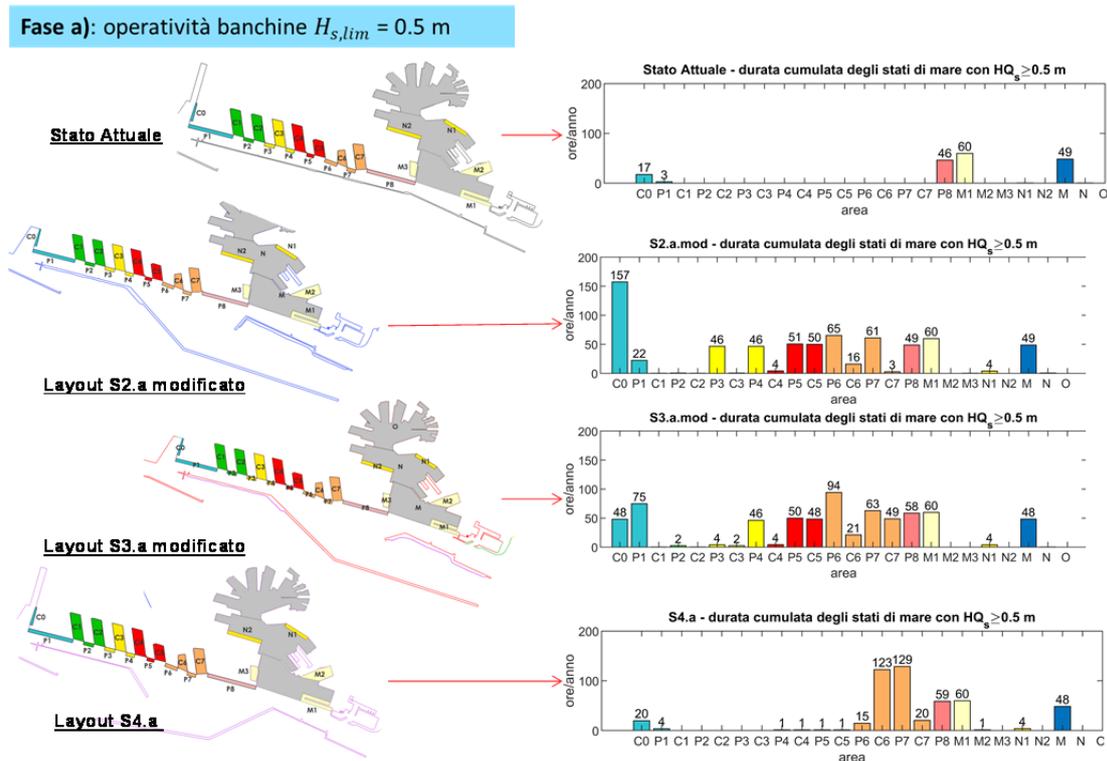


FIGURA 9-1 - FASE A: OPERATIVITÀ DELLE BANCHINE PORTUALI CON  $H_{s,lim} = 0,5 m$ . COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LA SOLUZIONE 2 MODIFICATA, LA SOLUZIONE 3 MODIFICATA E LA SOLUZIONE 4.

Dal confronto emerge che la Soluzione 4 risulta nel complesso la migliore e in particolare per le banchine poste in prossimità della foce del Polcevera. Solo per le banchine C6 e P7 si registra una frequenza di superamento della soglia di 0,5 m superiore rispetto a quella che si ottiene per le altre due soluzioni anche se l’aumento risulta del tutto accettabile dal

Pag. 80 di 89

**Volume 15 – Verifiche dell’agitazione ondosa nell’area portuale  
per le soluzioni d’intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

punto di vista economico. Anche il confronto con la situazione attuale mostra che tutte e tre le soluzioni sono in grado di garantire un adeguato livello di protezione dal moto ondoso incidente.

**Fase a): operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

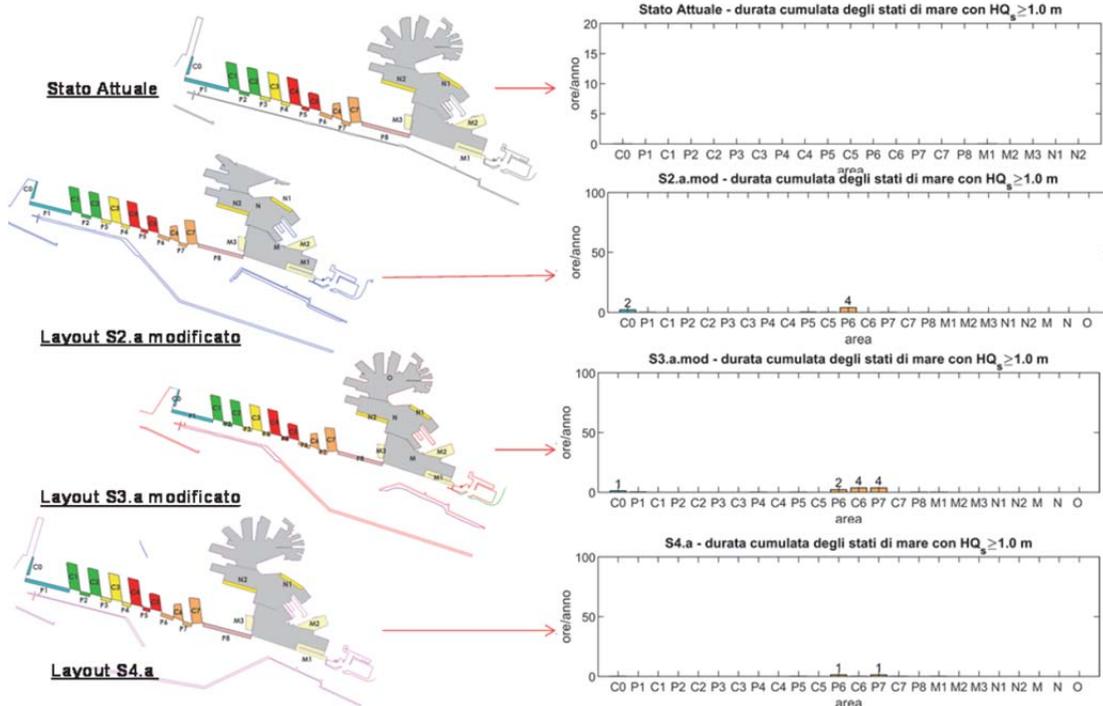


FIGURA 9-2 - FASE A: OPERATIVITÀ DELLE BANCHINE PORTUALI CON  $H_{s,lim} = 1,0$  m. COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LA SOLUZIONE 2 MODIFICATA, LA SOLUZIONE 3 MODIFICATA E LA SOLUZIONE 4.

Nella Figura 9-2 viene effettuato lo stesso confronto prendendo in esame la soglia  $H_{s,lim} = 1,0$  m. Per tutte e tre le soluzioni la soglia non viene mediamente quasi mai superata durante l’anno, come avviene per lo stato attuale.

Infine la Figura 9-3 riporta i risultati ottenuti per le onde estreme ( $Tr = 10$  anni).

Di nuovo i risultati mostrano che nel complesso la Soluzione 4 è risultata la migliore in relazione allo stato di agitazione di tutte le banchine portuali. Anche il confronto tra questa soluzione e lo stato attuale mostra una sostanziale somiglianza tra i livelli di agitazione ondosa.

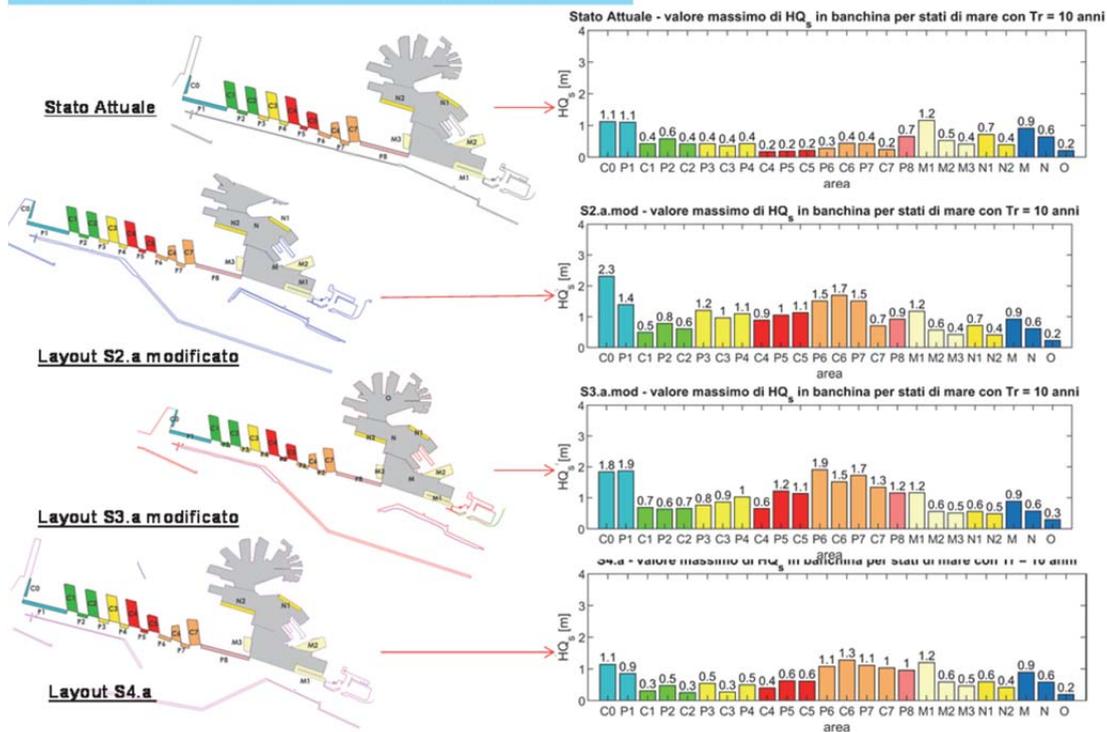
**Fase a): sicurezza banchine con onde estreme  $T_r = 10$  anni**

FIGURA 9-3 - FASE A: SICUREZZA DELLE BANCHINE CON ONDE ESTREME. COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LA SOLUZIONE 2 MODIFICATA, LA SOLUZIONE 3 MODIFICATA E LA SOLUZIONE 4.

## 9.2. Fase b)

La Figura 9-4 riporta i risultati ottenuti per il “downtime” delle banchine portuali relativamente alla soglia  $H_{s,lim} = 0,5 m$  e alla Fase b). La figura paragona lo stato attuale, riportato nel pannello superiore, con i risultati delle Soluzioni 2, 3 e 4 Modificate.

Rispetto ai risultati relativi alla Fase a), tutte le soluzioni mostrano un miglioramento dell'agitazione ondosa lungo le banchine poste in prossimità della foce del Polcevera. I livelli di agitazione ondosa lungo le altre banchine, seppur leggermente superiori rispetto allo stato attuale, risultano compatibili con l'operatività delle banchine.

**Fase b): operatività banchine  $H_{s,lim} = 0.5 m$**

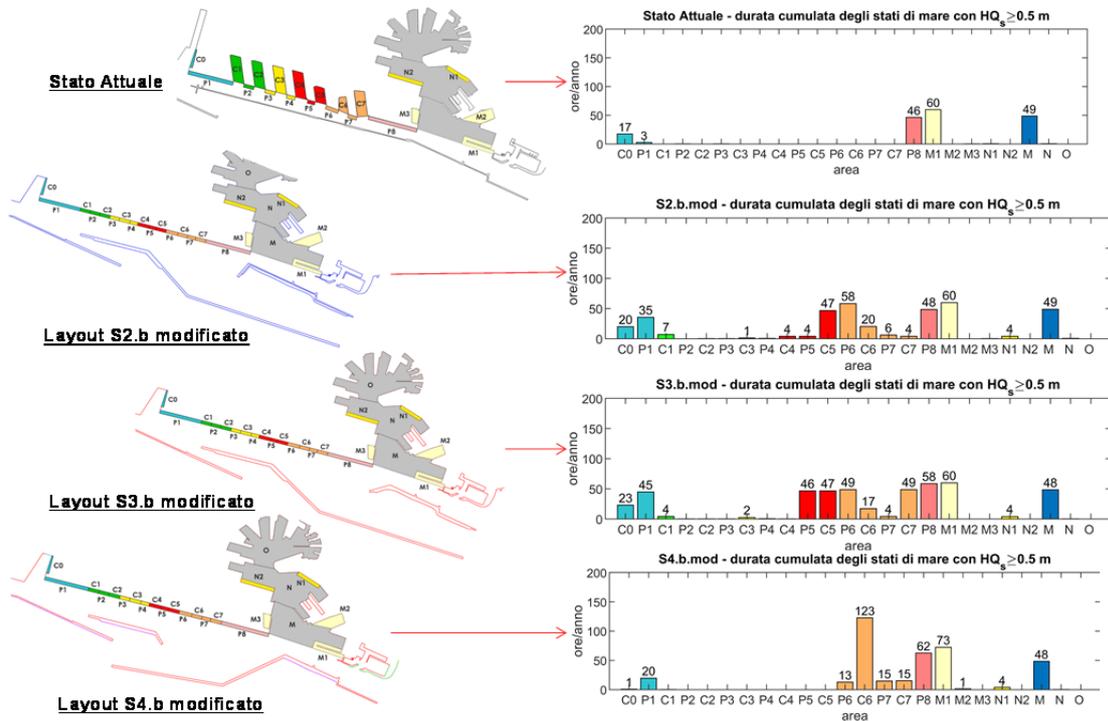


FIGURA 9-4 - FASE B: OPERATIVITÀ DELLE BANCHINE PORTUALI CON  $H_{s,lim} = 0,5 m$ .  
COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LA SOLUZIONE 2 MODIFICATA, LA SOLUZIONE 3  
MODIFICATA E LA SOLUZIONE 4.

La Figura 9-5 mostra lo stesso confronto relativamente alla soglia  $H_{s,lim} = 1,0 m$ . Per tutte e tre le soluzioni la soglia non viene mai superata durante l’anno, come avviene per lo stato attuale.

**Volume 15 – Verifiche dell'agitazione ondosa nell'area portuale  
per le soluzioni d'intervento**

Rev.00

Data: Ottobre 2020

El. MI046R-PF-D-Z-R-015-00

**Fase b): operatività banchine  $H_{s,lim} = 1.0$  m**

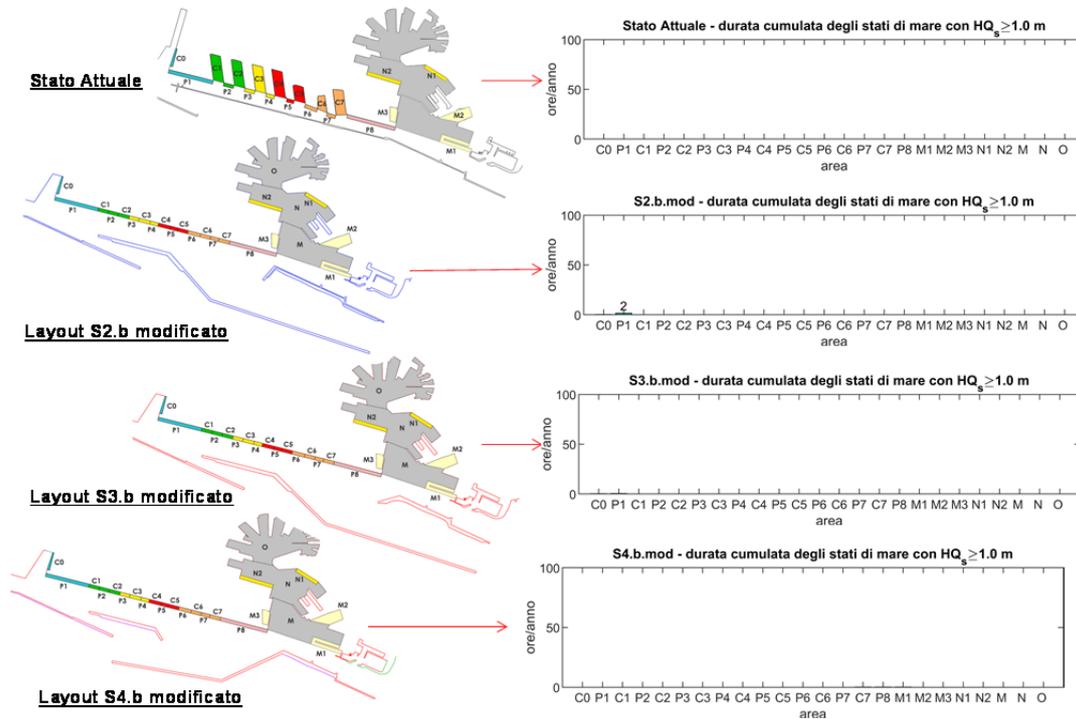


FIGURA 9-5 - FASE B: OPERATIVITÀ DELLE BANCHINE PORTUALI CON  $H_{s,lim} = 1,0$  m. COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LA SOLUZIONE 2 MODIFICATA, LA SOLUZIONE 3 MODIFICATA E LA SOLUZIONE 4.

Infine la Figura 9-6 riporta i risultati ottenuti per le onde estreme ( $T_r = 10$  anni).

Anche in questo caso i risultati mostrano che nel complesso la Soluzione 4 è risultata la più efficace nel ridurre lo stato di agitazione di tutte le banchine portuali. I risultati ottenuti per la Soluzione 4 risultano del tutto paragonabili rispetto a quelli dello stato attuale.

Per le Soluzioni 2 e 3 Modificate il livello di agitazione ondosa delle banchine poste in prossimità della foce del Polcevera risulta ancora superiore rispetto allo stato attuale, mentre la Soluzione 4 Modificata induce un miglioramento rispetto allo stato attuale.

**Fase b): sicurezza banchine con onde estreme Tr = 10 anni**

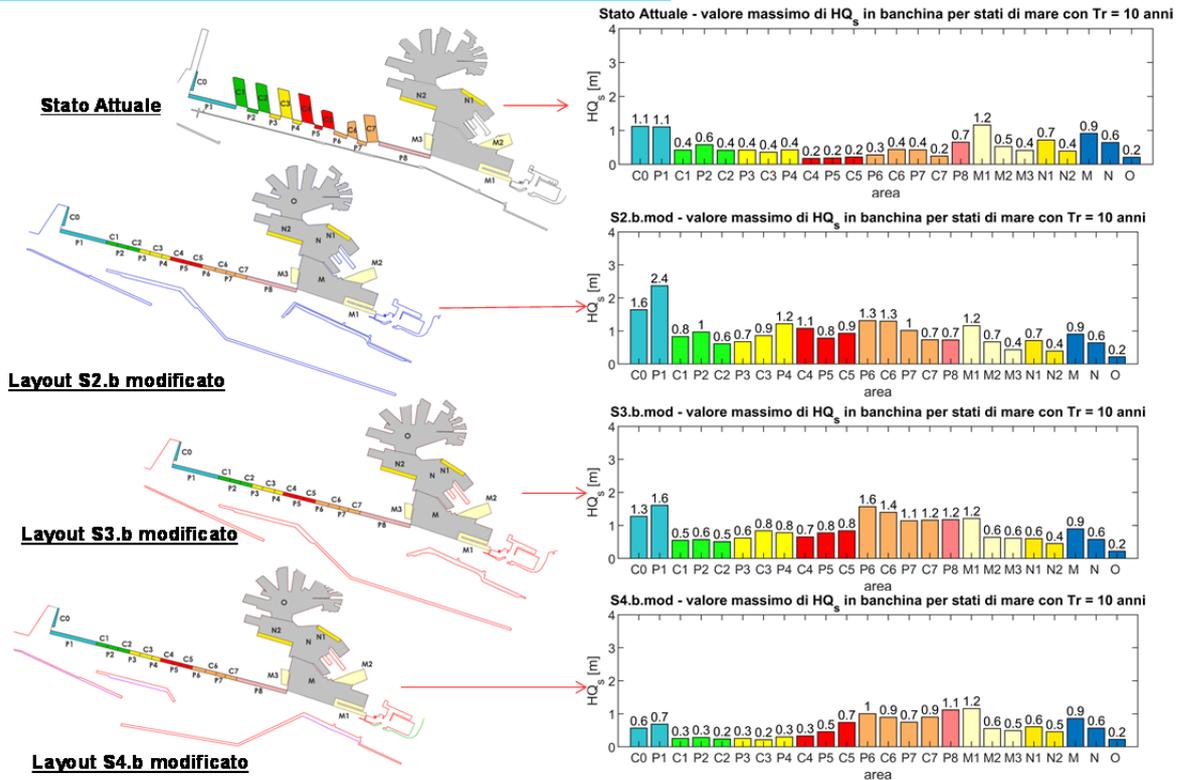


FIGURA 9-6 - FASE B: SICUREZZA DELLE BANCHINE CON ONDE ESTREME. COMPARAZIONE TRA LO STATO ATTUALE E LA SOLUZIONE 2 MODIFICATA, LA SOLUZIONE 3 MODIFICATA E LA SOLUZIONE 4 MODIFICATA.

## 10. ANALISI DELL’AGITAZIONE ONDOSA ALL’ESTERNO DEL PORTO PER LO STATO DI FATTO E LE SOLUZIONI D’INTERVENTO

Con riferimento alla situazione attuale, nella Figura 1 1 viene riportata nella porzione di mare prospiciente il Porto di Genova la frequenza di superamento della soglia di altezza d’onda significativa  $H_s = 2,5$  m espressa in numero medio di ore/anno. Questa soglia esprime le condizioni di moto ondoso limite per consentire l’imbarco via mare del pilota del porto a bordo delle navi in arrivo. Nella Figura 1 1 il cerchio giallo indica la zona dove attualmente avviene la salita del pilota a bordo delle navi.

La porzione di mare posta ad Ovest della figura, che è caratterizzata dai valori maggiori della frequenza di superamento, è influenzata dalla riflessione del moto ondoso causata dalla diga a parete verticale dell’aeroporto che risulta totalmente riflettente.

La porzione di mare posta di fronte la diga foranea Est, quella che protegge il Porto di Genova, è caratterizzata da una frequenza di superamento della soglia di  $H_s$  simile a quella che si verifica lungo la costa posta a Levante del porto. Ciò è dovuto al fatto che gran parte della diga Est, essendo protetta sul suo lato foraneo mediante una scogliera che induce il frangimento del moto ondoso, è caratterizzata da un modesto coefficiente di riflessione.

La figura seguente mostra che mediamente nella zona dove avviene l’imbarco del pilota la soglia di 2,5 m viene superata circa 20÷30 ore/anno.

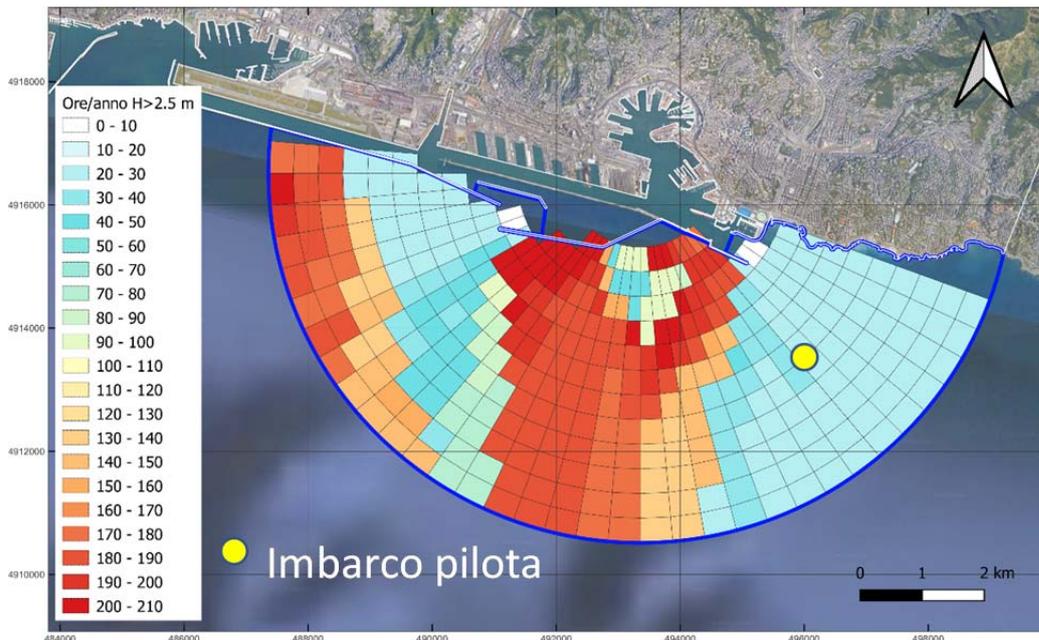


FIGURA 10-1 - SITUAZIONE ATTUALE: FREQUENZA DI SUPERAMENTO IN ORE/ANNO DELLA SOGLIA  $H_s=2,5$  M ALL’ESTERNO DEL PORTO DI GENOVA.

La figura seguente mostra lo stesso risultato per la Soluzione 4 fase b modificata. Come si evince dalla figura, in prossimità della nuova imboccatura portuale vi è un’area sufficientemente ampia che presenta una frequenza di superamento della soglia  $H_s$  simile a quella che attualmente caratterizza l’area d’imbarco del pilota. In questa area si può prevedere una nuova zona per l’imbarco del pilota a bordo delle navi in arrivo che devono utilizzare la nuova imboccatura portuale.

Si osserva che la riduzione della frequenza di superamento della soglia di altezza d’onda che si verifica nella zona Ovest della Figura 10-2 rispetto alla stessa zona della Figura 10-1 è dovuta al fatto che nella Soluzione 4 si è previsto che la prima parte della diga dell’aeroporto posta in adiacenza della nuova imboccatura venga protetta da una scogliera avente la funzione di ridurre il coefficiente di riflessione della struttura.

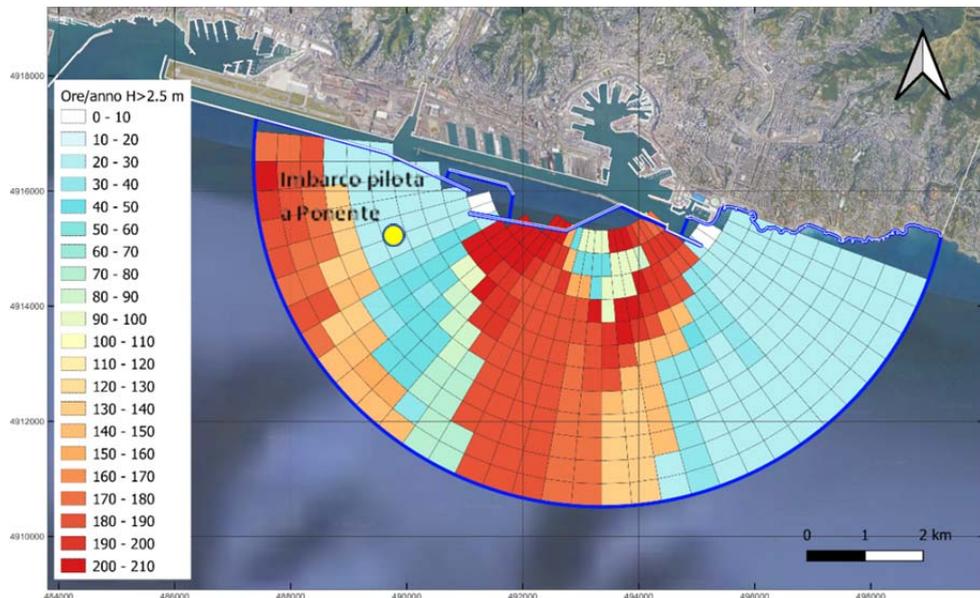


FIGURA 10-2 - SOLUZIONE 4 FASE B MODIFICATA: FREQUENZA DI SUPERAMENTO IN ORE/ANNO DELLA SOGLIA  $H_s=2,5$  M.

Si osserva infine che la problematica dell’imbarco del pilota via mare a bordo delle navi in arrivo alla nuova imboccatura portuale potrebbe essere completamente superata prevedendo che l’accesso del pilota del porto a bordo delle navi venga effettuato mediante elicottero, come già avviene in numerosi porti del mondo. L’imbarco del pilota tramite elicottero ridurrebbe inoltre i tempi di non operatività (“downtime”) dell’imboccatura portuale a causa del moto ondoso con un indubbio vantaggio economico per la gestione del porto.

## **11. CONCLUSIONI**

La valutazione dell’agitazione ondosa all’interno del bacino portuale per le tre soluzioni selezionate (2, 3 e 4) è stata eseguita prendendo in esame:

- i. i tempi medi annuali di non operatività (“downtime”) delle banchine portuali;
- ii. le condizioni di moto ondoso estreme che si determinano lungo le banchine portuali con stati di mare incidenti caratterizzati da un tempo di ritorno  $T_r=10$  anni (sicurezza delle navi all’ormeggio).

Le stesse valutazioni sono state eseguite per lo stato attuale del Porto di Genova allo scopo di verificare rispetto ad esso le variazioni in termini di agitazione ondosa residua apportate dalle nuove opere foranee.

I risultati ottenuti per lo stato attuale confermano che oggi le opere esterne del Porto di Genova garantiscono una elevata protezione dello specchio d’acqua portuale dal moto ondoso incidente, tanto che, da questo punto di vista, il porto può essere considerato, a ragione, un “porto rifugio”.

I risultati ottenuti per le tre soluzioni selezionate sia per il “downtime” (i) sia per la sicurezza delle navi all’ormeggio (ii), hanno mostrato che, per garantire una adeguata protezione dal moto ondoso incidente del bacino portuale anche in relazione alla situazione attuale, risulta necessario modificare le Soluzioni 2 e 3 in Fase a) e in Fase b) e la Soluzione 4 solo in Fase b).

Le modifiche apportate alle configurazioni sono state introdotte al fine di garantire:

- a) la stessa larghezza e lo stesso orientamento ( $115^\circ$  N) del canale di accesso delle soluzioni originali allo scopo di non peggiorare gli aspetti navigazionali delle stesse soluzioni originali;
- b) la massima protezione del bacino portuale interno senza introdurre alcuna forma di impatto morfologico delle nuove opere sulla costa posta a Levante del porto.

Le Soluzioni 2 e 3 “Modificate” richiedono di incrementare, fin dalla Fase a), in modo considerevole la lunghezza della diga foranea (tra circa 700 e 800 m) con un conseguente rilevante aggravio dei costi trattandosi di opere che si sviluppano tra i -45,0 m e i -50,0 m di profondità rispetto al livello medio marino locale.

Per la Soluzione 4 in Fase b), l’unica modifica di rilievo che è risultata necessario apportare, riguarda solo il prolungamento della diga dell’aeroporto, che peraltro si è

dovuta apportare anche per le Soluzioni 2 e 3 in Fase b) e che quindi non comporta un aggravio dei costi per gli aspetti comparativi tra le varie soluzioni.

Per quanto riguarda la Fase a), il confronto comparativo tra le Soluzioni 2 e 3 Modificate, la Soluzione 4 e lo stato attuale del Porto di Genova ha mostrato che:

1. la Soluzione 4 fornisce, rispetto alle altre due Soluzioni, le maggiori prestazioni in termini di attenuazione del moto ondoso incidente, sia in relazione al “downtime” delle banchine per un’altezza d’onda limite di 0,5 m), sia in relazione alla sicurezza delle navi all’ormeggio;
2. le Soluzioni 2 e 3 Modificate comunque forniscono globalmente una adeguata protezione dal moto ondoso incidente anche in relazione allo stato attuale. E’ da rilevare che queste due Soluzioni forniscono un peggioramento, rispetto alla situazione attuale, dell’agitazione ondosa lungo le banchine poste in prossimità della sponda sinistra della foce del Polcevera;
3. per tutte le soluzioni si è valutato ai fini dell’operatività ai terminali un ‘downtime’ non superiore a 150-200 ore all’anno per un’altezza d’onda limite in banchina di 0,5 m e per la sicurezza all’ormeggio un’altezza d’onda inferiore a 2,5 m per un evento che si verifica mediamente una volta ogni 10 anni. Questi valori sono raccomandati nell’ambito della letteratura specialistica e dagli operatori portuali locali.
4. tutte e tre le soluzioni non determinano nel Porto Vecchio un aumento dell’agitazione ondosa rispetto allo stato attuale.

Per quanto riguarda la Fase b), si possono trarre delle conclusioni simili a quelle sopra riportate per la Fase a), ovvero la soluzione che fornisce le migliori prestazioni in termini di attenuazione del moto ondoso rimane la Soluzione 4 Modificata e quindi si confermano le conclusioni riportate ai punti 2 e 3 precedenti.