

# Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Centro Settentrionale



## NUOVO PORTO COMMERCIALE DI FIUMICINO

### PROGETTO ESECUTIVO I LOTTO FUNZIONALE I STRALCIO "Darsena Pescherecci e viabilità di accesso al cantiere"

Committente:

Il presidente  
AVV. Francesco Maria Di Majo

Il responsabile del procedimento  
Dott. Ing. Maurizio Marini

Il coordinatore generale  
Dott. Ing. Giuseppe Solinas

Progettazione:

**ACQUA  
TECNO**

Ing. Renato Marconi  
Ing. Paolo Turbolente  
Ing. Barbara Doronzo



Titolo elaborato

Elaborato

A.2202.12 | PE | R

# SAO

Scala

## STUDIO DI AGITAZIONE ONDOSA INTERNA

Data	Preparato	Controllato	Approvato
Novembre 2020	Ing. Daniele Belotti	Ing. Paolo Turbolente	Ing. Renato Marconi
Revisione	Data		
01	Giugno 2021		
02	Febbraio 2022		

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>1</b>
<b>2. PROPAGAZIONE DA LARGO A RIVA CON MODELLO MIKE 21 SW .....</b>	<b>3</b>
<b>3. STUDIO DELL'AGITAZIONE INTERNA CON MODELLO MIKE 21 BW .....</b>	<b>6</b>
3.1. Definizione delle condizioni d'onda incidenti.....	6
3.2. Definizione della griglia di calcolo .....	7
3.3. Generazione del moto ondoso .....	7
3.4. Definizione dei parametri di riflessione .....	8
3.5. Periodo di simulazione e passo di integrazione.....	11
3.6. Analisi dei risultati .....	11
<b>4. CONCLUSIONI .....</b>	<b>16</b>
<b>5. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>18</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE .....</b>	<b>19</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE.....</b>	<b>19</b>

## 1. PREMESSA

Il presente studio di penetrazione ondosa è mirato all'osservazione dell'agitazione residua interna alla futura Darsena Pescherecci di Fiumicino per differenti layout portuali al fine di verificare e ottimizzare la soluzione di progetto.

Tale documento costituisce la relazione illustrativa della metodologia seguita, dei codici di calcolo utilizzati e dei risultati ottenuti.

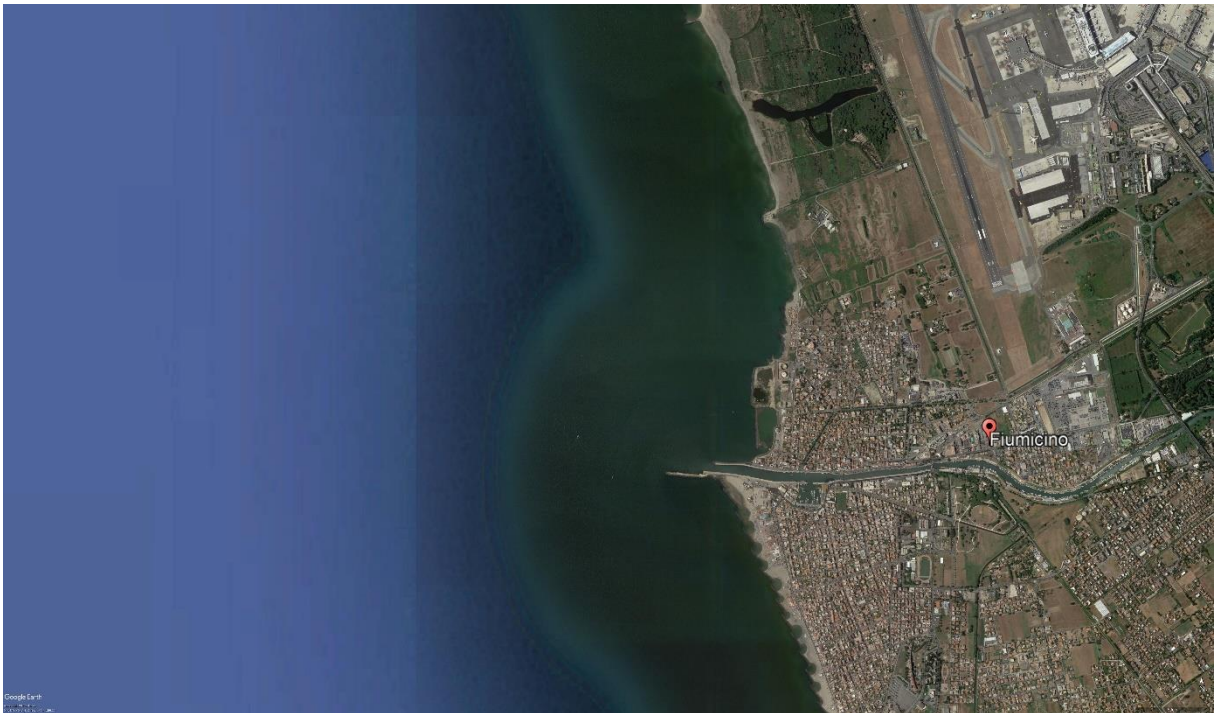


Figura 1 - Vista planimetrica di Fiumicino

A tal proposito, nel presente studio di penetrazione ondosa all'interno del porto, sono stati investigati quattro layout portuali del tipo “a bacino” (Figura 2):

- **SOLUZIONE A:** Diga di sopraflutto di lunghezza pari a  $L= 633$  m e Diga sottoflutto di lunghezza pari a  $L= 340$  m. I banchinamenti interni sono del tipo a parete verticale.
- **SOLUZIONE B:** Diga di sopraflutto di lunghezza pari  $L= 670$  m e Diga sottoflutto di lunghezza pari a  $L= 340$  m. I banchinamenti interni sono del tipo a parete verticale.
- **SOLUZIONE B1:** Soluzione coincidente con la “B” ( $L_{sopr}= 670$  m ,  $L_{sott}= 340$ m) eccetto la tipologia strutturale della banchina Sud (di Sopraflutto) del tipo “a giorno” .

- **SOLUZIONE C:** Diga di sopraflutto di lunghezza pari a  $L= 625$  m e Diga sottoflutto di lunghezza pari a  $L= 340$  m. Caratterizzata da banchina Sud (di Sopraflutto) del tipo “a giorno”. Il tronco terminale della diga di sopraflutto è imbasata su fondali minori rispetto alle soluzioni A,B,B1.

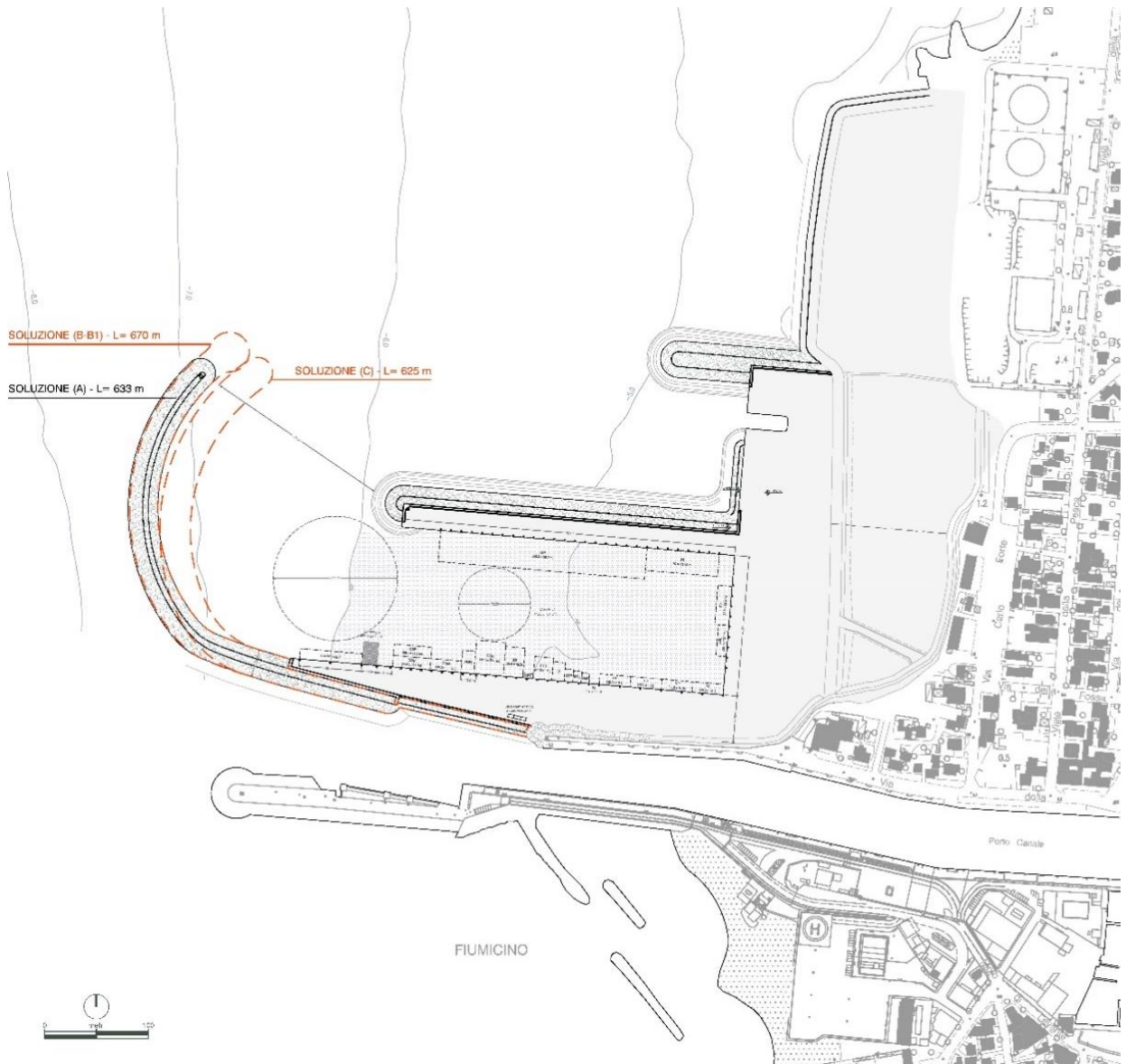


Figura 2 - Sovrapposizione planimetrica delle quattro soluzioni proposte

## 2. PROPAGAZIONE DA LARGO A RIVA CON MODELLO MIKE 21 SW

Per garantire una corretta analisi della penetrazione ondosa nel porto è stata effettuata un'analisi statistica delle onde estreme mirata ad individuare il settore di maggior rischio, ovvero quel settore dal quale provengono le onde che possono provocare la maggior agitazione interna del bacino portuale. La condizione più critica risulta essere per le onde provenienti dal quarto quadrante direzionale, in particolare per il settore che va dai 285°N a 345°N. Quindi è stata condotta un'analisi statistica di una serie tronca di dati (soglia di troncamento  $H = 1,5$  m), per il settore sopra citato. In Tabella 1 vengono riportati i risultati ottenuti utilizzando la distribuzione di Gumbel (si veda l'elaborato *SM – Studio Meteomarinò*).

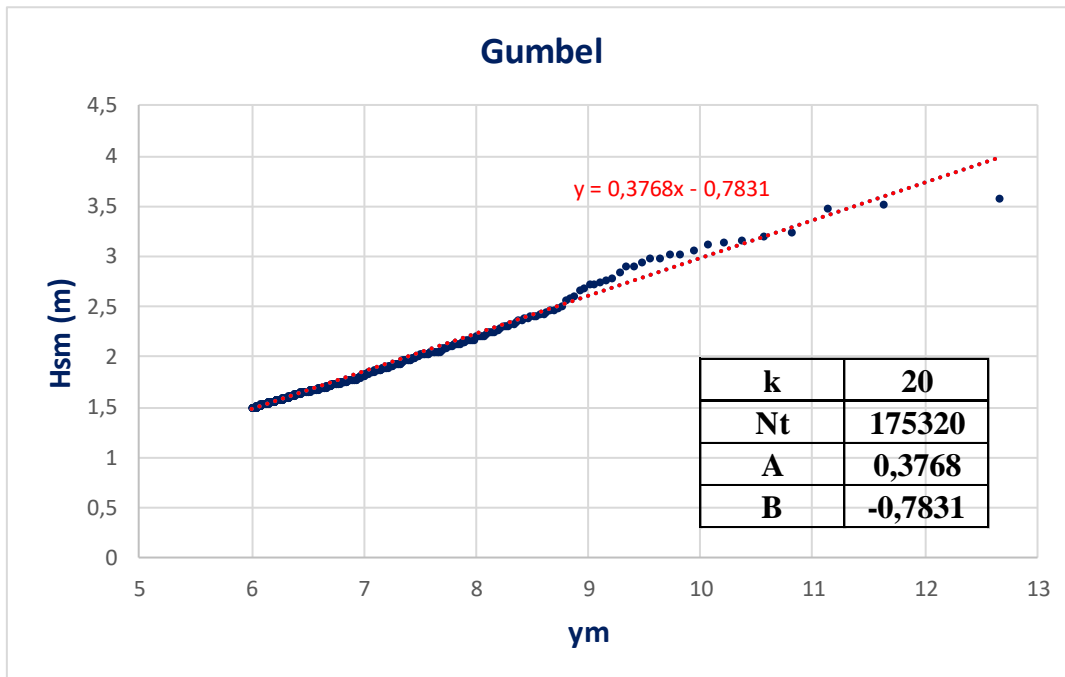


Figura 3 - Distribuzione di Gumbel per settore direzionale 285°N - 345°N

Tr (anni)	Hs di largo (m)	Tp di largo (s)	Dir di largo (°N)
5	3,25	8,8	315
50	4,11	9,5	315

Tabella 1 - Risultati ottenuti con la distribuzione di Gumbel

Definiti i parametri di onda, questi sono stati propagati da largo a riva tramite l'utilizzo del software Mike 21 SW.

Studio di agitazione ondosa interna

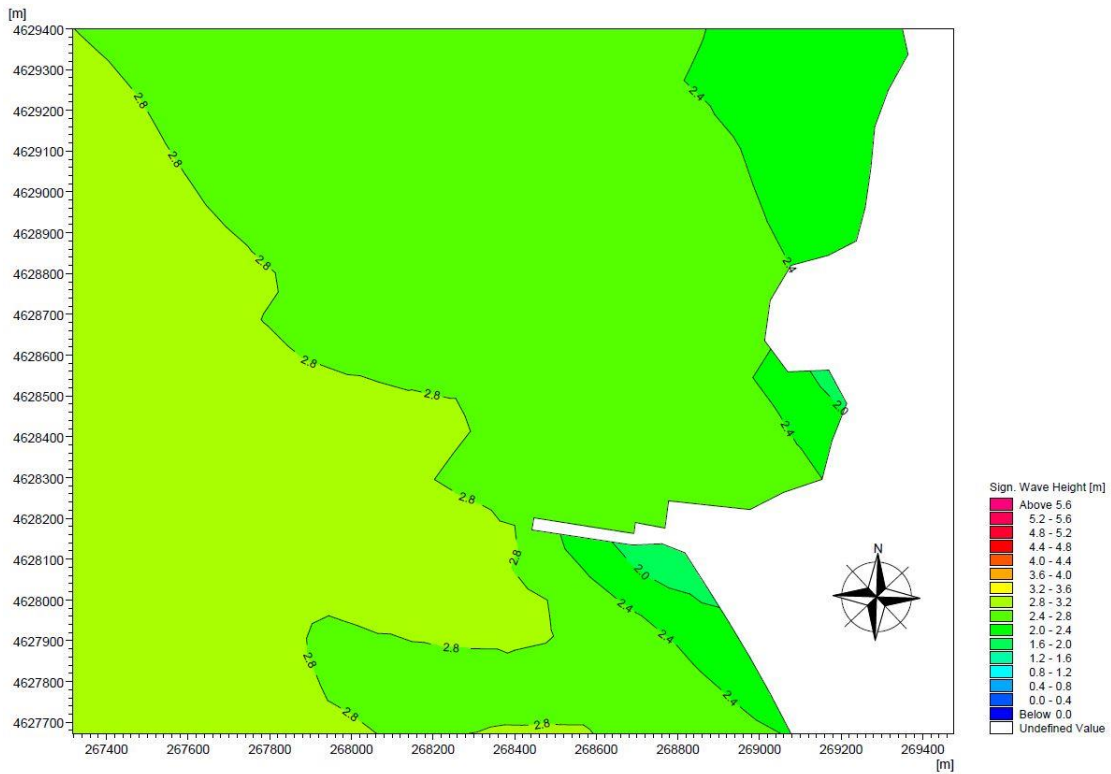


Figura 4 - Onda simulata:  $T_r = 5$  anni;  $H_s = 3,25$  m;  $T_p = 8,8$  s;  $Dir = 315^\circ N$  – Altezza d'onda.

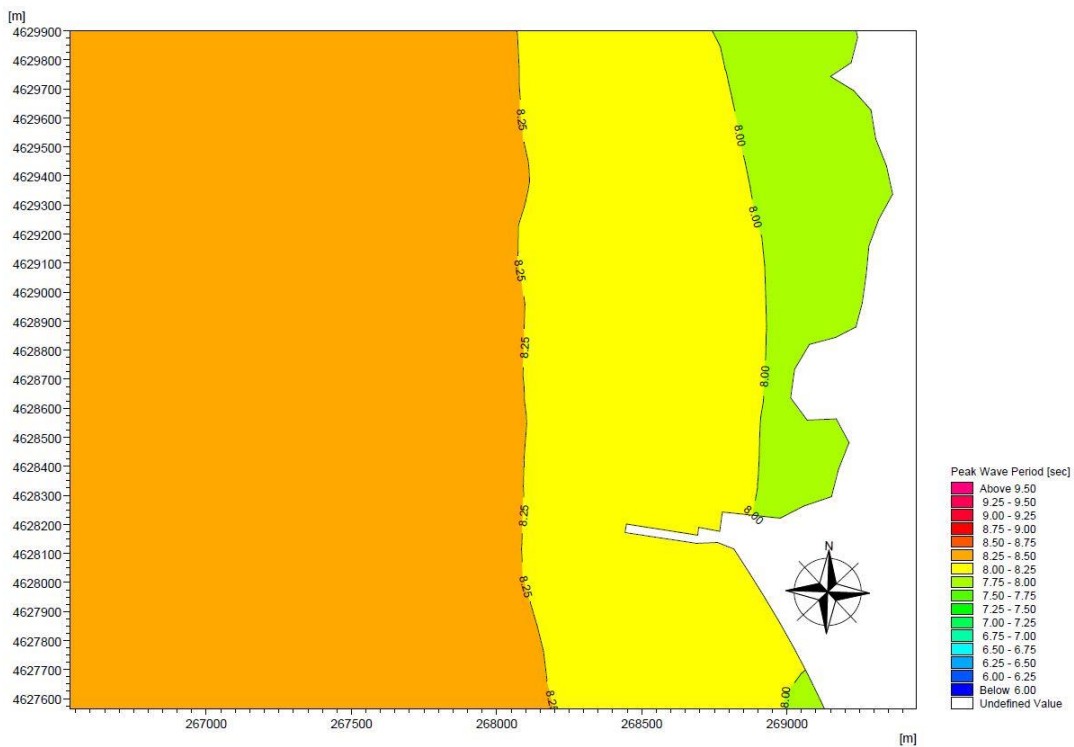


Figura 5 - Onda simulata:  $T_r = 5$  anni;  $H_s = 3,25$  m;  $T_p = 8,8$  s;  $Dir = 315^\circ N$  – Periodo di picco.

Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino – I Lotto Funzionale – I Stralcio

Progetto Esecutivo – Darsena Pescherecci e viabilità di accesso al cantiere

Studio di agitazione ondosa interna

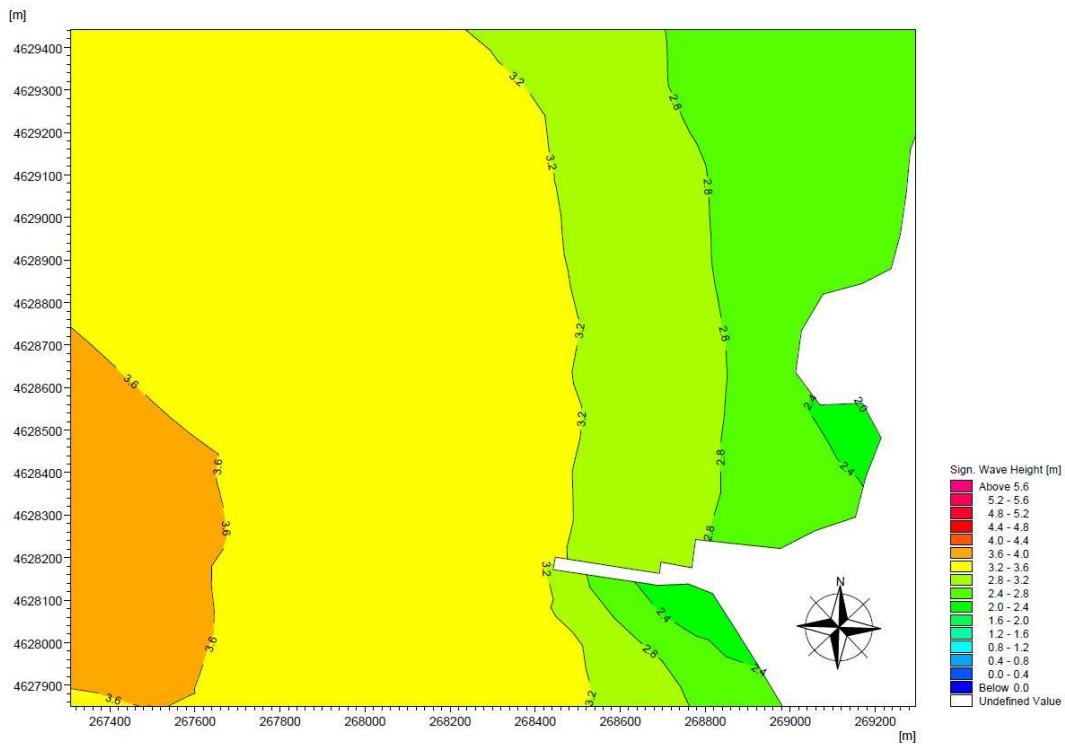


Figura 6 - Onda simulata:  $T_r = 50$  anni;  $H_s = 4,11$  m;  $T_p = 9,5$  s;  $Dir = 315^\circ N$  – Altezza d'onda.

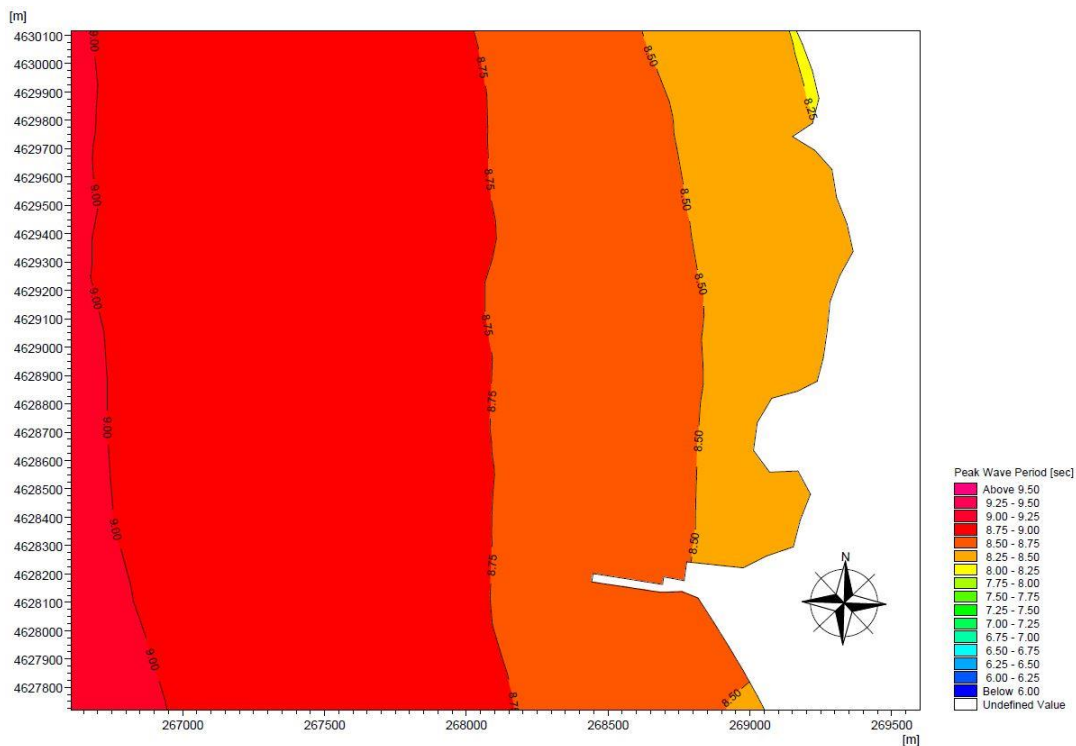


Figura 7 - Onda simulata:  $T_r = 50$  anni;  $H_s = 4,11$  m;  $T_p = 9,5$  s;  $Dir = 315^\circ N$  – Periodo di picco.

In Tabella 2 sono riportati i risultati ottenuti in prossimità dell'imboccatura portuale, utilizzabili come dati di input per lo studio dell'agitazione interna del bacino portuale.

Tr (anni)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
5	2,50	8,3	295
50	3,30	8,7	295

Tabella 2 - Risultati ottenuti dalla propagazione largo- riva e di input allo studio agitazione ondosa interna

### 3. STUDIO DELL'AGITAZIONE INTERNA CON MODELLO MIKE 21 BW

Le condizioni di agitazione residua all'interno del bacino portuale sono state ottenute utilizzando il modello numerico Mike 21 BW (Boussinesq Waves) costituito da un codice di calcolo basato sulla risoluzione numerica delle Equazioni di Boussinesq nel dominio del tempo, attraverso la tecnica delle differenze finite. Questo codice rende possibile la modellazione di diversi fenomeni fisici tra cui quelli dipendenti dalla variazione dei fondali all'esterno del porto, come la rifrazione e quelli dovuti alla presenza di opere emergenti, ovvero riflessione e diffrazione.

Nei paragrafi seguenti si descrivono le impostazioni utilizzate sia in relazione alle condizioni ondose incidenti sia alle impostazioni del modello in termini di definizione del dominio di simulazione che di settaggio dei parametri idraulici di riferimento.

#### 3.1. Definizione delle condizioni d'onda incidenti

I livelli di agitazione ondosa all'interno del porto sono stati studiati simulando le condizioni ondose riportate in Tabella 2. Sono state pertanto prese in considerazione l'onda cinquantennale e l'onda quinquennale. Questi valori di tempo di ritorno sono suggeriti dalle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici" redatte dall' "AIPCN – PIANC Associazione Internazionale dei Congressi di Navigazione" (Febbraio 2002).

Nelle predette Raccomandazioni sono indicate due condizioni di altezza d'onda ammissibile all'interno del porto.

- Condizione "limite": Tr = 50 anni, Hs = 0,50 m;
- Condizione di "sicurezza": Tr = 5 anni, Hs = 0,30 m;



### 3.2. Definizione della griglia di calcolo

Al fine di rappresentare in maniera ottimale le condizioni ondose, è stata definita una griglia di calcolo, rettangolare, a maglie quadrate, con discretizzazione pari a 5 m.

Per la simulazione delle onde è stata adottata un'area di calcolo rettangolare pari a 2500 m x 2000 m. Alla griglia è stata associata una rotazione di 25° in senso orario rispetto al Nord, in modo da avere una rotazione della direzione di propagazione rispetto all'asse y di massimo 30° N.

### 3.3. Generazione del moto ondoso

Le onde sono state introdotte nel modello tramite una linea di generazione interna alla griglia di calcolo, posta parallelamente all'asse y, ad una distanza adeguata rispetto alle opere portuali.

Lungo l'intera frontiera del dominio di calcolo è stata introdotta una "corona di terra" per far sì che non vi fosse alcuna propagazione attraverso i bordi dell'area di calcolo. Al fine di evitare fenomeni di riflessione ondosa inesistenti lungo il perimetro della griglia, è stato realizzato un contorno assorbente con spessore di 15 celle. La Figura 8 rappresenta la batimetria in prossimità della zona portuale. La Figura 8 riporta il posizionamento degli strati assorbenti per la configurazione di progetto "Soluzione A".

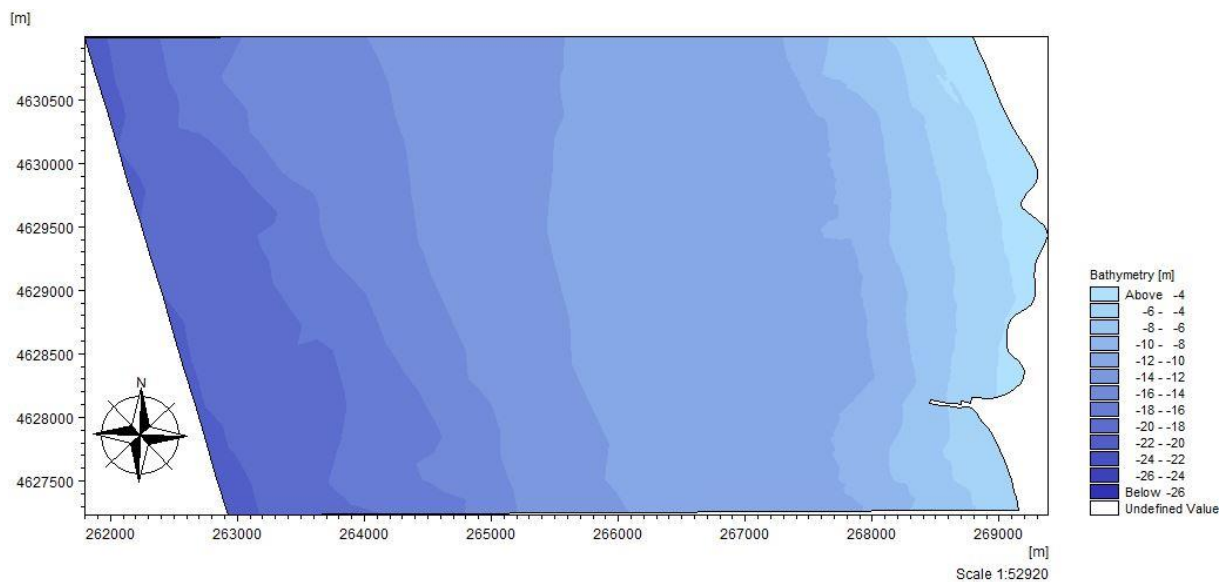


Figura 8 - Batimetria del paraggio

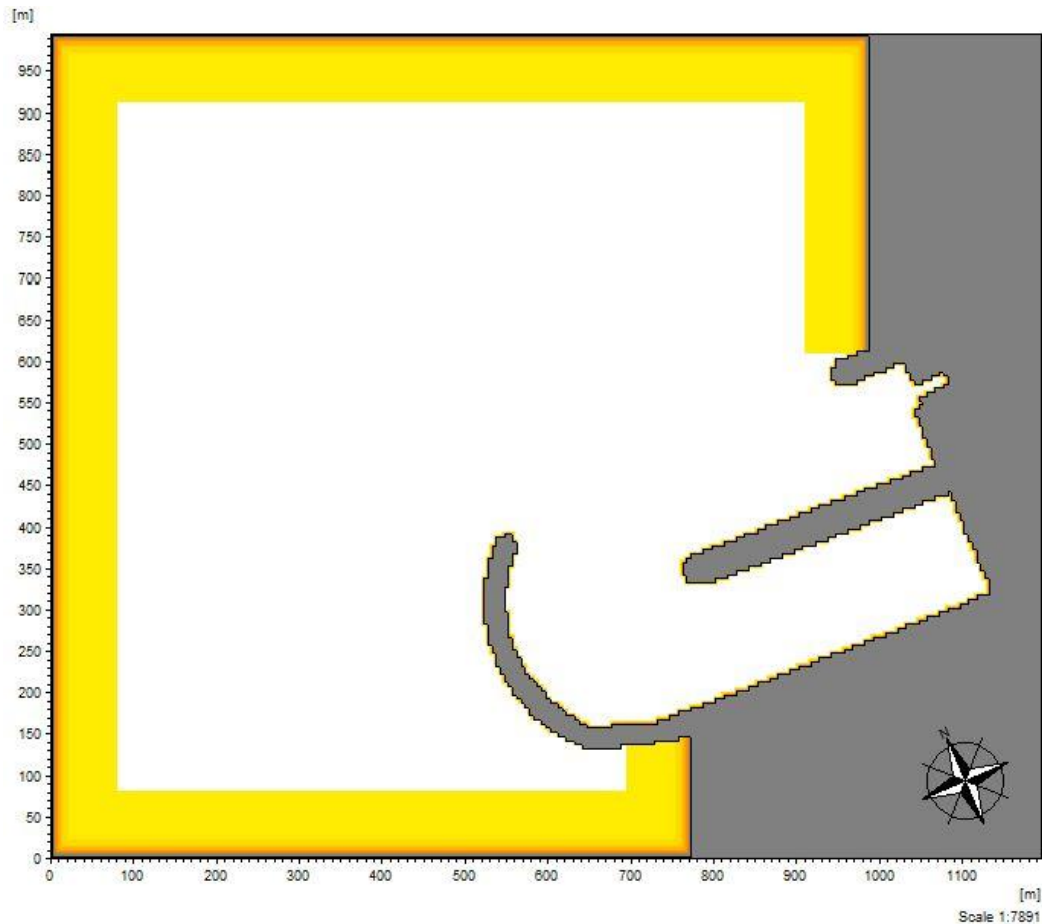


Figura 9 - Strati assorbenti per la configurazione di progetto (Soluzione A)

### 3.4. Definizione dei parametri di riflessione

Per ottenere una maggiore accuratezza dei risultati delle simulazioni numeriche, si è deciso di associare ai diversi tipi di opera (banchinamenti interni e opere foranee) presenti nel Porto di Fiumicino differenti valori dei coefficienti di riflessione, a cui verrà associato un valore di “porosità” con spessore di 5 celle. Sono state pertanto individuate due classi di opere (Figura 10 e Figura 11):

- totalmente riflettenti ovvero tutte quelle opere caratterizzate da pareti verticali;
- opere parzialmente riflettenti ovvero le opere di difesa in massi naturali/artificiali (parte esterna della diga di sopraflutto e della diga di sottoflutto).

Per le opere a parete verticale è consuetudine associare cautelativamente un coefficiente di riflessione pari all'unità, ovvero l'onda incidente viene completamente riflessa dalla struttura. Per le opere di difesa in massi naturali/artificiali si è fatto riferimento ai valori suggeriti dall'USA CEM02, relativa

Studio di agitazione ondosa interna

alle opere dotate di berma per l'attenuazione della pendenza. Nel caso in esame, date le dimensioni di progetto della berma ed i fondali su cui le opere sono imbasate, possiamo considerare un coefficiente di riflessione pari a circa 0.45 (Figura 12). Nella Tabella 3 sono riassunti i valori del coefficiente di riflessione per categoria di opere.

Tipologia di opere	Cr	Porosità
Opere a parete verticale	1.00	1.00
Scogliere in massi artificiali o artificiali	0.45	0.88

Tabella 3 - Coefficienti di riflessione adottati per ogni classe di opera



Figura 10 - Porosità per le configurazioni di progetto - Soluzione A

Studio di agitazione ondosa interna

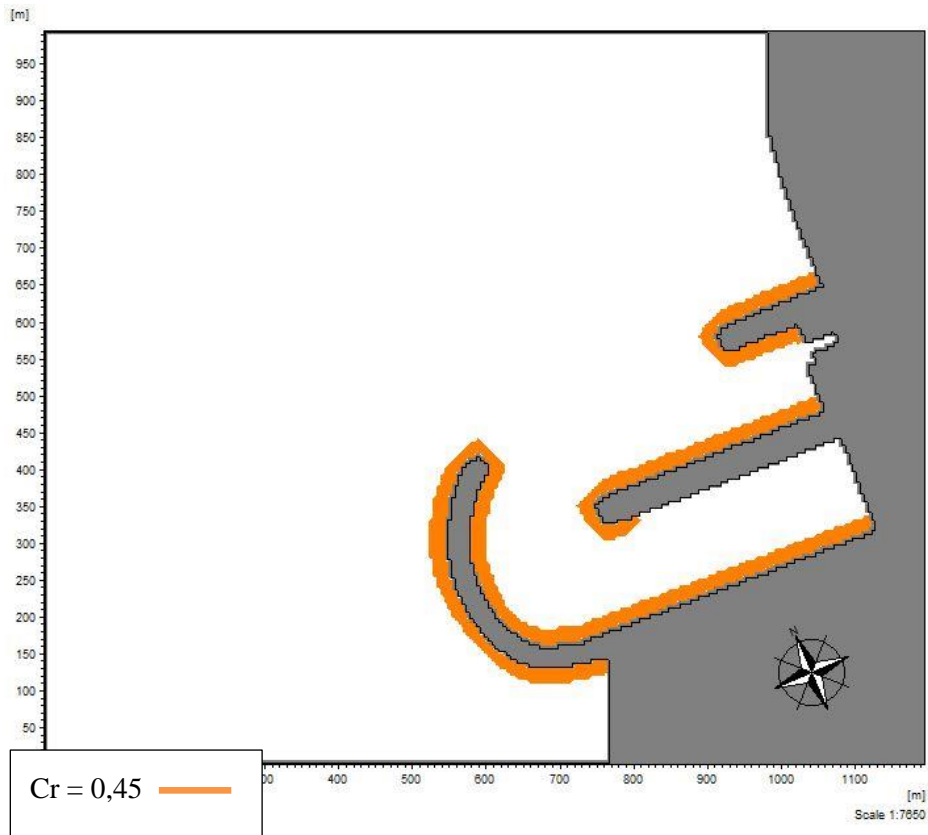


Figura 11 - Porosità per le configurazioni di progetto - Soluzione B1 e Soluzione C

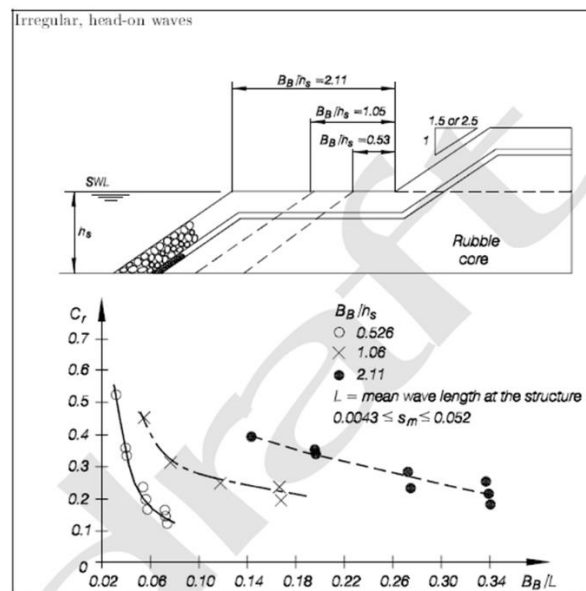


Figure VI-5-19. Wave reflection coefficients for rock armored slope with berm at SWL (Allsop 1990)

Figura 12 - Leggi empiriche per la determinazione dei coefficienti di riflessione relativi ad opere dotate di berma

### 3.5. Periodo di simulazione e passo di integrazione

Il codice di calcolo Mike 21 BW richiede l'impostazione di un periodo rappresentativo della durata dell'evento da simulare ed un passo di integrazione. Il periodo deve essere tale da consentire il completo sviluppo del moto ondoso all'interno del porto, pertanto per l'area in esame è stato scelto un periodo di simulazione pari ad un'ora. Il passo di integrazione deve essere scelto in modo che il *Numero di Courant*, parametro che determina la stabilità del modello, si mantenga inferiore all'unità. Nel caso in esame è stato scelto un intervallo temporale pari a 0.2 s.

### 3.6. Analisi dei risultati

Si riporta di seguito un'analisi dei risultati ottenuti a valle delle simulazioni svolte.

In Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16 sono rappresentati gli output in termini di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) rispettivamente per le N .4 configurazioni di progetto (Sol. A, Sol. B, Sol. B1, Sol C).

L'onda propagata all'interno del bacino portuale presenta le seguenti caratteristiche: altezza d'onda significativa  $H_s = 3.30$  m, periodo d'onda di picco  $T_p = 8.7$  s, direzione media di provenienza  $Dir = 295^\circ N$ , tempo di ritorno  $Tr = 50$  anni.

In Figura 13 vengono riportati i risultati delle simulazioni svolte per la configurazione di progetto "Soluzione A". Si evidenzia un'agitazione residua interna compresa nel range di altezza d'onda  $0,2 < H_s (m) < 0,5$ . L'altezza d'onda in prossimità dell'imboccatura portuale varia tra  $0,4 < H_s (m) < 0,6$ .

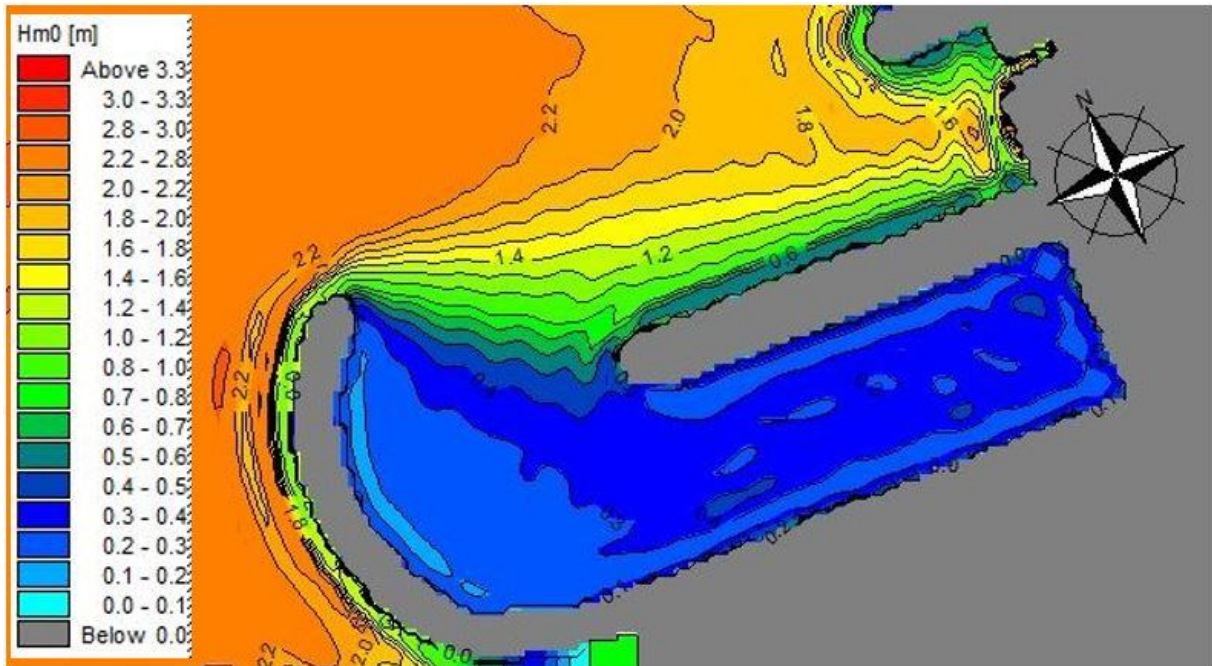


Figura 13 – Configurazione di progetto – Soluzione A ( $T_r = 50$  anni;  $H_s = 3,30$  m,  $T_p = 8,7$ , Dir.  $295^\circ N$ )

In Figura 14 vengono riportati i risultati delle simulazioni svolte per la configurazione di progetto “Soluzione B”. Si evidenzia un’agitazione residua interna compresa nel range di altezza d’onda  $0,1 < H_s$  (m)  $< 0,3$ . L’altezza d’onda in prossimità dell’imboccatura portuale varia tra  $0,3 < H_s$  (m)  $< 0,6$ .

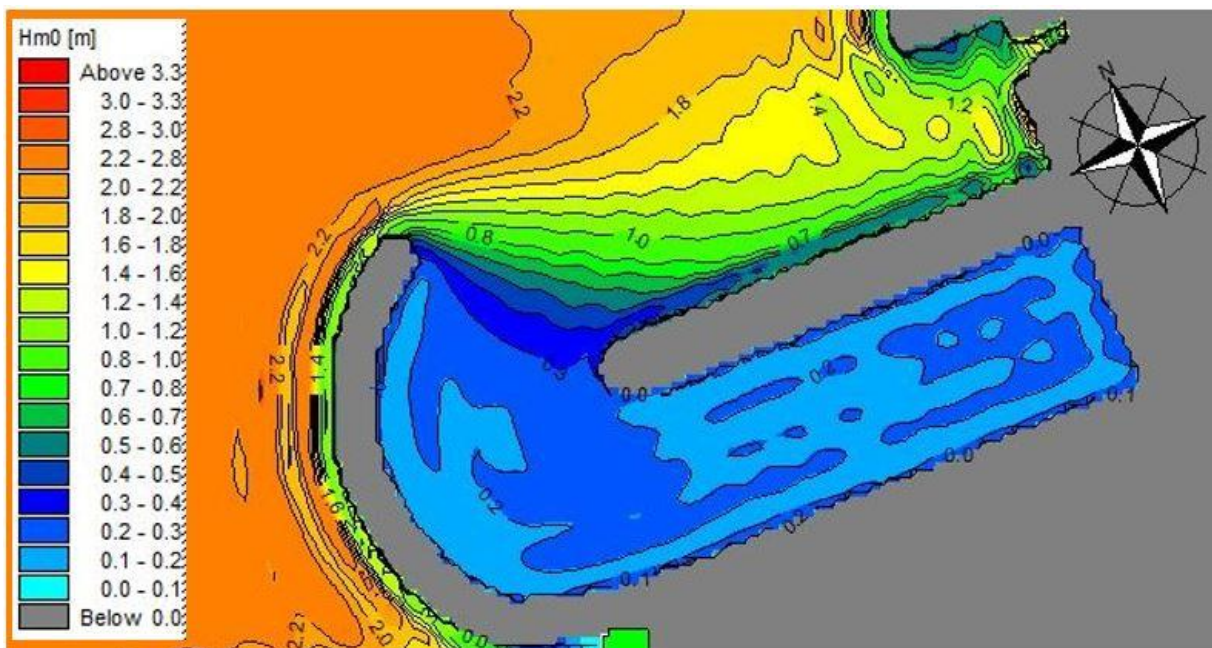


Figura 14 – Configurazione di progetto – Soluzione B ( $T_r = 50$  anni;  $H_s = 3,30$  m,  $T_p = 8,7$ , Dir.  $295^\circ N$ )

In Figura 15 vengono riportati i risultati delle simulazioni svolte per la configurazione di progetto “Soluzione B1”. Si evidenzia un’agitazione residua interna compresa nel range di altezza d’onda  $0,1 < H_s (m) < 0,3$ . L’altezza d’onda in prossimità dell’imboccatura portuale varia tra  $0,3 < H_s (m) < 0,6$ .

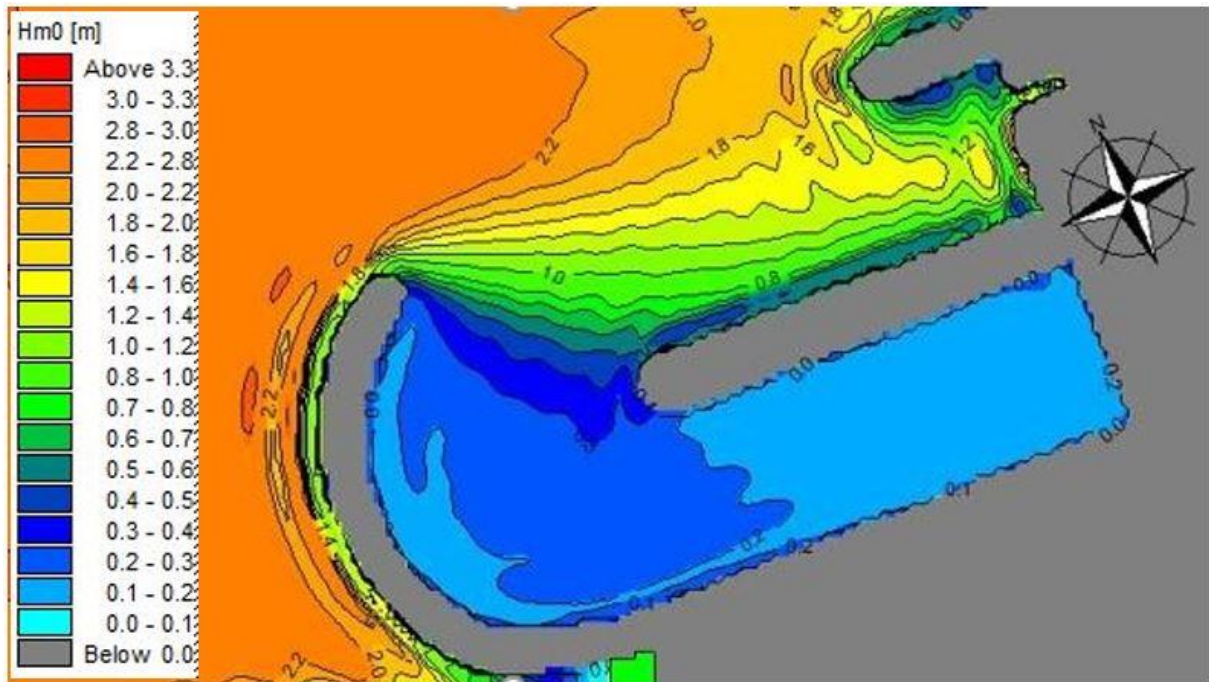


Figura 15 - Configurazione di progetto – Soluzione B1 (Tr = 50 anni; Hs= 3,30 m, Tp =8,7, Dir. 295 °N)

In Figura 16 vengono riportati i risultati delle simulazioni svolte per la configurazione di progetto “Soluzione C”. Da cui risulta un’agitazione residua interna compresa nel range di altezza d’onda  $0,1 < H_s (m) < 0,3$ . L’altezza d’onda in prossimità dell’imboccatura portuale varia tra  $0,3 < H_s (m) < 0,6$ .

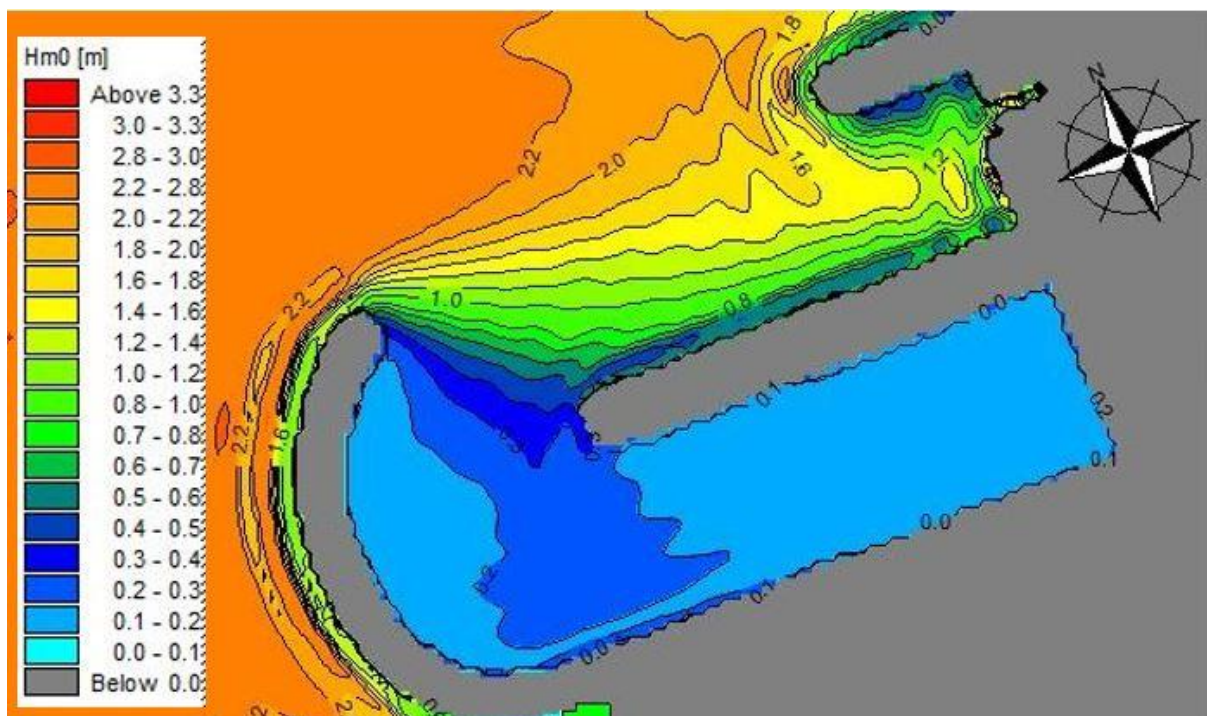


Figura 16 - Configurazione di progetto – Soluzione C (Tr = 50 anni; Hs= 3,30 m, Tp =8,7, Dir. 295 °N)

A valle dei risultati ottenuti si è scelta come configurazione di progetto definitiva la Soluzione C. Questa garantisce una risposta positiva sia in termini di sicurezza, andando a soddisfare la condizione limite indicata nelle “*Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*” redatte dall’ “AIPCN – PIANC Associazione Internazionale dei Congressi di Navigazione”, sia in termini economici. Nella soluzione C, a differenza delle altre proposte, il tronco e la testata della Diga di sopraflutto sono imbasati ad una batimetrica inferiore rispetto alle medesime opere delle Soluzioni A,B e B1; tale elemento comporta un notevole risparmio economico in termini di materiale lapideo da approvvigionare.

Scelta la configurazione di progetto definitiva, al fine di verificare la condizione di sicurezza indicata nel “AIPCN – PIANC Associazione Internazionale dei Congressi di Navigazione”, è stata simulata anche l’onda avente le seguenti caratteristiche: periodo di ritorno  $Tr = 5$  anni, altezza d’onda significativa  $Hs = 2.50$  m, periodo d’onda di picco  $Tp = 7.3$  s e direzione media di provenienza  $Dir = 295^\circ N$ .

In Figura 17 vengono riportati i risultati della simulazione. Si evidenzia un’agitazione residua interna compresa nel range di altezza d’onda  $0,0 < Hs (m) < 0,2$ . L’altezza d’onda in prossimità dell’imboccatura portuale varia tra  $0,2 < Hs (m) < 0,5$ .



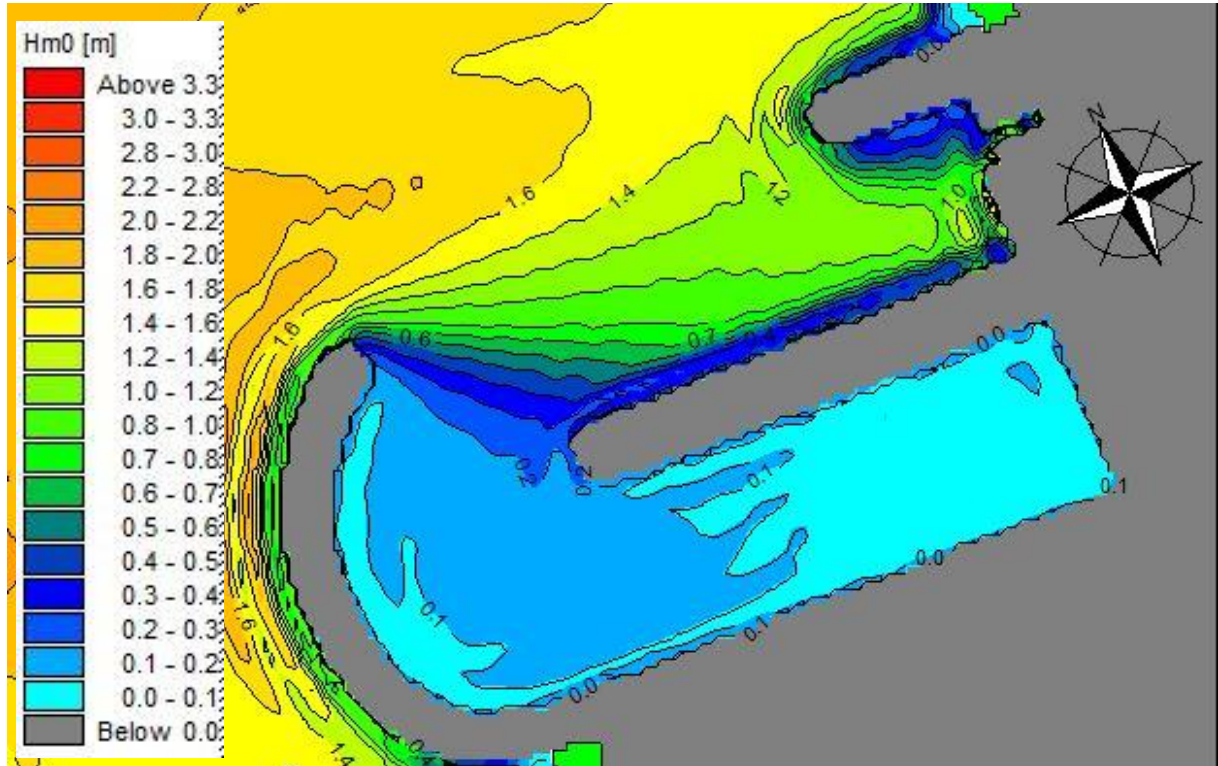


Figura 17 – Configurazione di progetto – Sol C. ( $T_r = 5$  anni,  $H_s = 2,5$  m,  $T_p = 7,3$  s,  $Dir = 295^\circ N$ ).

#### 4. CONCLUSIONI

Il presente studio di penetrazione ondosa è stato sviluppato al fine di determinare i livelli di agitazione residua all'interno della futura Darsena. L'onda propagata all'interno del bacino ( $T_r = 50$  anni,  $H_s = 3,3$  m,  $T_p = 8,7$  s e  $Dir = 295^\circ N$ ) è stata simulata per i quattro layout proposti.

La configurazione di progetto "A" porta ad un'altezza d'onda significativa  $H_s$  interna al bacino portuale compresa nell'intervallo 0.20 m – 0.50 m. L'imboccatura del bacino è caratterizzata da un'altezza d'onda significativa  $0.40 \text{ m} < H_s < 0.60 \text{ m}$ .

La configurazione di progetto Variante B porta ad un'altezza d'onda significativa interna al bacino protetto compresa nell'intervallo 0.10 m – 0.30 m. L'imboccatura del bacino è caratterizzata da un'altezza d'onda significativa  $0.30 \text{ m} < H_s < 0.60 \text{ m}$ .

La configurazione di progetto Variante B1 porta ad un'altezza d'onda significativa interna al bacino protetto compresa nell'intervallo 0.10 m – 0.30 m. L'imboccatura del bacino è caratterizzata da un'altezza d'onda significativa  $0.30 \text{ m} < H_s < 0.60 \text{ m}$ .

La configurazione di progetto Variante C porta ad un'altezza d'onda significativa interna al bacino protetto compresa nell'intervallo 0.10 m – 0.30 m. L'imboccatura del bacino è caratterizzata da un'altezza d'onda significativa da  $0.30 \text{ m} < H_s < 0.60 \text{ m}$ .

Al fine di garantire l'agibilità delle opere portuali e la sicurezza durante le operazioni di ormeggio è necessario verificare che il livello di agitazione residua all'interno del porto sia al disotto dei valori ammissibili raccomandati dall'AIPCN – PIANC (*Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*). Le altezze d'onda significativa devono quindi rispettare le seguenti condizioni:

- Condizione "limite":  $H_s$  al massimo pari a 0.50 m per onde con periodo non inferiore a 50 anni.
- Condizione di "sicurezza":  $H_s$  non superiore a 0.30 m per onde con periodo di ritorno non inferiore a 5 anni;

I valori suddetti possono essere incrementati fino al 50 % nel caso la direzione del moto ondoso sia pressoché parallela all'asse longitudinale e/o per ormeggio con finger laterale.

Tutte le soluzioni di progetto analizzate rispettano le suddette condizioni "limite" e le condizioni di "sicurezza" suggerite dall'AIPN-PINAC, pertanto, la scelta progettuale ricade sulla "C" garantendo questa un risparmio in termini economici per imbasamento su fondali minori del tronco e della testata

della diga di sopraflutto. La futura Darsena sarà pertanto perfettamente agibile all'ormeggio per tutto l'anno anche in condizioni di mare limite.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- US Army Corps of Engineers Coastal Engineering Manual, Part VI, 2002.
- Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici. AIPCN – PIANC, 2002.
- DHI. Mike 21 BW – Boussinesq Wave Module, Short Description. *Mike 21 wave modelling*, 2007.
- DHI. Mike 21 BW – Boussinesq Wave Module, Step-by-step training guide. *Mike 21 wave modelling*, 2007.
- Madsen et al.. *Boussinesq type equations with high accuracy in dispersion and non-linearity*, 1997.

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Vista planimetrica di Fiumicino .....	1
Figura 2 - Sovrapposizione planimetrica delle quattro soluzioni proposte .....	2
Figura 3 - Distribuzione di Gumbel per settore direzionale 285°N - 345°N.....	3
Figura 4 - Onda simulata: Tr = 5 anni; Hs = 3,25 m; Tp = 8,8 s; Dir = 315 °N – Altezza d’onda. ....	4
Figura 5 - Onda simulata: Tr = 5 anni; Hs = 3,25 m; Tp = 8,8 s; Dir = 315 °N – Periodo di picco.....	4
Figura 6 - Onda simulata: Tr = 50 anni; Hs = 4,11 m; Tp = 9,5 s; Dir = 315 °N – Altezza d’onda. ....	5
Figura 7 - Onda simulata: Tr = 50 anni; Hs = 4,11 m; Tp = 9,5 s; Dir = 315 °N – Periodo di picco.....	5
Figura 8 - Batimetria del paraggio .....	7
Figura 9 - Strati assorbenti per la configurazione di progetto (Soluzione A) .....	8
Figura 10 - Porosità per le configurazioni di progetto - Soluzione A .....	9
Figura 11 - Porosità per le configurazioni di progetto - Soluzione B1 e Soluzione C .....	10
Figura 12 - Leggi empiriche per la determinazione dei coefficienti di riflessione relativi ad opere dotate di berma.....	10
Figura 13 – Configurazione di progetto – Soluzione A (Tr = 50 anni; Hs= 3,30 m, Tp =8,7, Dir. 295 °N).....	12
Figura 14 – Configurazione di progetto – Soluzione B (Tr = 50 anni; Hs= 3,30 m, Tp =8,7, Dir. 295 °N).....	12
Figura 15 - Configurazione di progetto – Soluzione B1 (Tr = 50 anni; Hs= 3,30 m, Tp =8,7, Dir. 295 °N).....	13
Figura 16 - Configurazione di progetto – Soluzione C (Tr = 50 anni; Hs= 3,30 m, Tp =8,7, Dir. 295 °N).....	14
Figura 17 – Configurazione di progetto – Sol C. (Tr = 5 anni, Hs = 2,5 m, Tp = 7,3 s, Dir = 295°N). 15	15

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Risultati ottenuti con la distribuzione di Gumbel .....	3
---	---

Tabella 2 - Risultati ottenuti dalla propagazione largo- riva e di input allo studio agitazione ondosa interna.....	6
Tabella 3 - Coefficienti di riflessione adottati per ogni classe di opera .....	9