



Regione Lazio
Comune di Anzio (RM)



CAPO D'ANZIO S.p.A.
C.D.M. n. 6586/2011

PROGETTAZIONE ESECUTIVA
FASE 2 - ADEGUAMENTO DARSENA NORD

Proponente:



Marina di
Capo d'Anzio

Presidente:
Luigi D'Arpino

A.D.:
Ing. Enrico Aliotti

Titolo elaborato:

**STUDIO DELLA PENETRAZIONE
DEL MOTO ONDO SO
ALL'INTERNO DEL PORTO**

Progettazione:



Marinedi S.r.l.

Ing. Renato Marconi

Arch. Vittoria Biego

Dott.ssa in G.P.E. Dionisia Poulacos



Regione Lazio

Comune di Anzio (RM)

Proponente: Capo d'Anzio S.p.A.

Progettazione: Marinedi S.r.l.

Capo d'Anzio S.p.A.

C.D.M. n. 6586/2011

PROGETTAZIONE ESECUTIVA

FASE 2

ADEGUAMENTO DARSENA NORD

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

INDICE

1.	PREMESSA.....	3
2.	DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI	4
3.	CONDIZIONI ONDOSE DI RIFERIMENTO	6
4.	MODELLI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	7
4.1	SW (Spectral Wave).....	7
4.1.1	Definizione delle griglie di calcolo.....	8
4.1.2	Periodo di simulazione e passo di integrazione	11
4.1.3	Risultati delle simulazioni.....	11
4.2	BW (Boussinesq Wave)	15
4.2.1	Definizione delle griglie di calcolo.....	16
4.2.2	Moto ondoso in ingresso	17
4.2.3	Parametri di riflessione	20
4.2.4	Periodo di simulazione e passo di integrazione	22
4.2.5	Risultati delle simulazioni.....	22
5.	CONCLUSIONI.....	29

1. PREMESSA

Nell'ambito della progettazione Esecutiva Fase 2 Adeguamento darsena Norda del Porto turistico di Anzio (RM), è stato effettuato lo studio della penetrazione ondosa all'interno del porto per verificarne l'operabilità in previsione delle modifiche previste dalla seconda fase realizzativa.

Nella figura 1 è riportata l'area di studio.



Figura 1. Vista aerea del porto turistico di Anzio (RM) Stato attuale

Per la simulazione numerica bidimensionale è stato utilizzato il modello matematico MIKE 21, sviluppato dal Danish Hydraulic Institute. Esso è basato sulla risoluzione alle differenze finite su griglia strutturata o flessibile, ed è costituito da differenti moduli che implementano le numerose equazioni che governano gran parte dei fenomeni idraulici riscontrabili in un determinato sistema marino.

Nel caso in esame sono stati utilizzati il modello SW (Spectral Wave), che consente di simulare la penetrazione ondosa all'interno del bacino portuale tenendo conto di vari fenomeni quali, shoaling, diffrazione, rifrazione, riflessione semplice e l'amplificazione ondosa indotta dal vento che spira all'interno di esso, ed il modello BW (Boussinesq Wave) che consente di simulare l'agitazione ondosa all'interno di bacini portuali.

2. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI

La progettazione esecutiva Fase 2 per il completamento del porto turistico di Anzio prevede la realizzazione di nuovi posti barca 57 da 18 metri, 86 posti barca da 16 metri, 103 posti barca da 14 metri, 56 posti barca da 12 metri, 153 posti barca da 10 metri, 56 posti barca da 8 metri e 43 posti barca da 7 metri. Gli ormeggi verranno realizzati utilizzando due tipologie di pontili galleggianti con monoblocco di calcestruzzo, sette pontili frangionde posizionati in testata al molo a T in prossimità dell'imboccatura portuale dimensione 20,00 m x 4,00 m e 16,00 m x 4,00 m, e 73 moduli 12,00 m x 2,55 m. Altresì saranno installati i corpi morti e le catenarie necessarie per l'ormeggio delle barche e dei pontili.

**Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord**

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto



Figura 2. Planimetria degli ormeggi

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

3. CONDIZIONI ONDOSE DI RIFERIMENTO

Per la definizione di moto ondoso (altezza, periodo, direzione di provenienza) in ingresso al porto di Anzio sono stati utilizzati i dati ricavati da un precedente studio idraulico-marittimo presso Gaeta tenendo conto delle differenze dei Fetches e dal grado di esposizione del paraggio. Oltre ai dati ondosi è stato considerato il vento per valutare la generazione di onde di corto periodo, per fare questo sono stati utilizzati i dati dell'anemometro di Anzio.

Nella tabella 1 sono riportate le caratteristiche del moto ondoso utilizzato.

Velocità vento[m/s]	Tr [anni]	Hs[m]	Tp[s]	Dir[°N]
	50	4,18	9,75	135
	1	1,98	6,72	135
20				90

Tabella 1. Condizioni ondose utilizzate per le simulazioni

La scelta di tali dati ondosi è stata fatta per poter analizzare in dettaglio tutte le condizioni ondose all'interno del porto, sia ordinarie, pertanto più frequenti con tempo di ritorno 1 anno ed onde generate dal vento, sia estreme con tempo di ritorno di 50 anni, considerando le direzioni di provenienza del moto ondoso più gravose.

La propagazione all'interno del dominio di calcolo delle condizioni ondose, individuate precedentemente, viene eseguita dal modello considerando l'intero spettro in termini di direzione e frequenza, utilizzando in particolare onde direzionali irregolari con spettro JONSWAP medio. Nel caso in esame è stata simulata anche

la presenza di un innalzamento del livello medio mare di +0,50m dovuto alle maree ed allo storm-surge.

4. MODELLI DI CALCOLO UTILIZZATI

4.1 SW (Spectral Wave)

Il modello Spectral wave (SW) del codice MIKE 21 viene utilizzato per valutare le trasformazioni del moto ondoso in aree costiere ed off-shore sia per hind-cast che per forecast, il modello è in grado di simulare:

1. crescita dell'onda per effetto del vento
2. interazione non lineare tra le onde
3. dissipazione dovuta al *white capping*
4. dissipazione dovuta all'attrito con il fondo
5. frangimento dell'onda su profondità limitate
6. rifrazione e shoaling dovuti alla morfologia batimetrica
7. diffrazione
8. riflessione semplice

Il modello MIKE 21 SW è basato sulla risoluzione numerica nel dominio e nel tempo dell'equazione di bilancio dell'azione delle onde:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla_x \cdot (c_g A) + \nabla_\theta \cdot (c_\theta A) + \nabla_\sigma \cdot (c_\sigma A) = S$$

Il modello utilizza una formulazione parametrica direzionalmente disaccoppiata ed una formulazione completamente spettrale. La formulazione parametrica direzionalmente disaccoppiata si basa su una parametrizzazione dell'equazione di conservazione dell'azione ondosa. La parametrizzazione viene effettuata nel dominio delle frequenze introducendo lo zeroth, ed il primo momento dello spettro delle

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

onde come variabili dipendenti. La formulazione completamente spettrale si basa sull'equazione di conservazione dell'onda come descritto da Komen et al. (1994) e Young (1999), in cui lo spettro di frequenza direzionale dell'azione dell'onda è la variabile dipendente. Il modulo SW comprende anche due formulazioni per il tempo. Una formulazione quasi stazionaria ed una non stazionaria, in quella quasi stazionaria la variabile tempo viene rimossa come variabile indipendente e viene associata una soluzione stazionaria ad ogni passo temporale. Quando viene utilizzata la soluzione stazionaria non è possibile inserire il vento come forzante. L'immissione delle onde all'interno del dominio di calcolo può essere effettuate utilizzando dei contorni aperti dove poter inserire il moto ondoso di interesse, oppure inserendo dei contorni chiusi ed immettere la forzante del vento. L'output principale di MIKE 21 SW è il campo d'onda residua all'interno della zona di studio.

4.1.1 Definizione delle griglie di calcolo

La fase planimetrica analizzata in questo studio di agitazione interna del Porto di Anzio è la seconda.

Per poter avere le giuste condizioni d'onda in prossimità dell'imboccatura portuale si è eseguita una trasposizione ondosa da largo delle onde di riferimento, e sono stati estratti i valori ondosi in prossimità dell'imboccatura portuale da poter utilizzare come condizioni al contorno per la griglia di calcolo all'interno del porto. Per la propagazione da largo delle onde si è utilizzata una griglia di calcolo flessibile con passo di discretizzazione dx e dy pari a 100m a largo e 10 metri in prossimità dell'area portuale, il contorno aperto dove sono state inserite le onde di progetto si trova lungo la batimetrica -100m s.l.m. per assicurarsi che l'onda non risenta dei fondali.

Le figure 3 e 4 mostrano rispettivamente, la batimetria e la griglia di calcolo utilizzata a largo di Anzio.

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

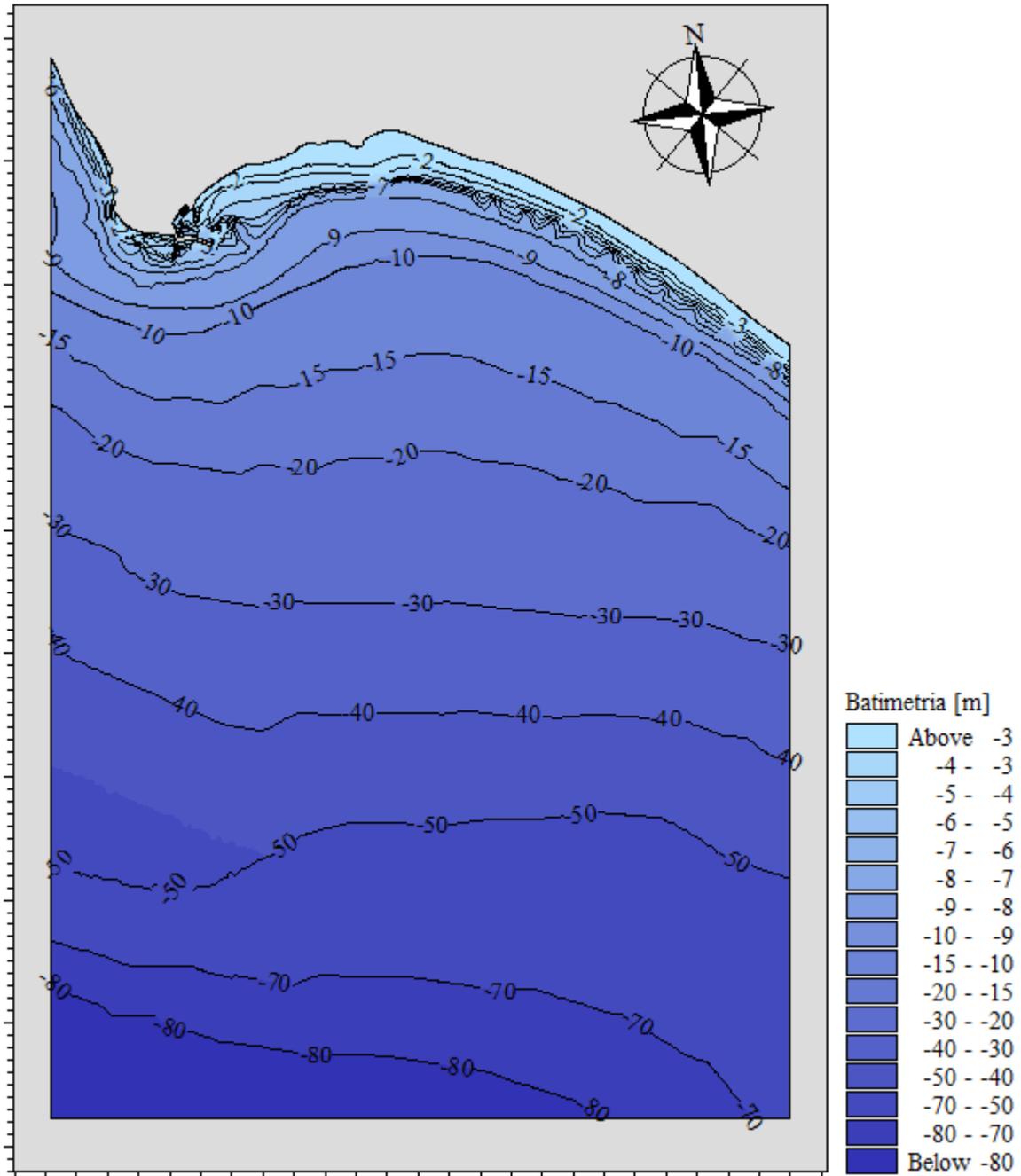


Figura 3. Batimetria

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

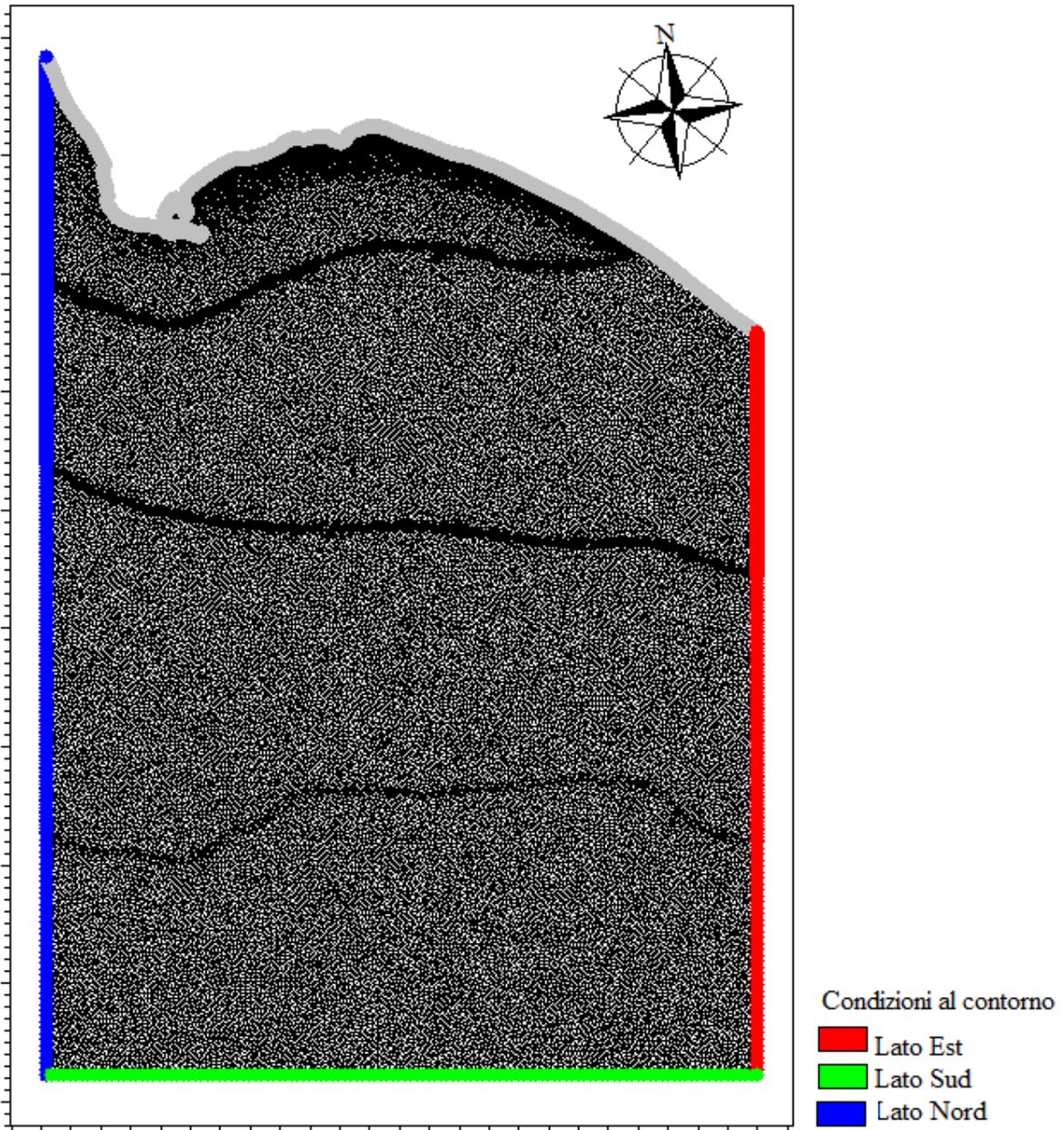


Figura 4. Condizioni al contorno utilizzata e griglia di calcolo

4.1.2 Periodo di simulazione e passo di integrazione

Il periodo di simulazione è stato scelto in modo da poter garantire l'intero sviluppo del moto ondoso all'interno dell'area di studio. Questo periodo è strettamente legato alle dimensioni del dominio di calcolo, nel caso in esame si è scelto un intervallo di tempo pari a 3 ore per la trasposizione ondosa da largo ai pressi dell'imboccatura portuale, questo risulta sufficiente per lo sviluppo del moto ondoso in tutto il dominio di calcolo.

Il passo successivo è stato impostare un time step sufficiente a garantire la stabilità del modello, nel caso in esame si è scelto pari ad un secondo.

4.1.3 Risultati delle simulazioni

I risultati del modello SW, mostrati nelle figure dalla 5 alla 7, presentano i valori di altezza significativa dell'onda per le onde in ingresso. Questi valori sono quelli relativi all'ultimo time-step della simulazione in quanto sono quelli che presentano la situazione di campo di moto ondoso completamente sviluppato e che quindi non risente delle condizioni iniziali di simulazione.

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

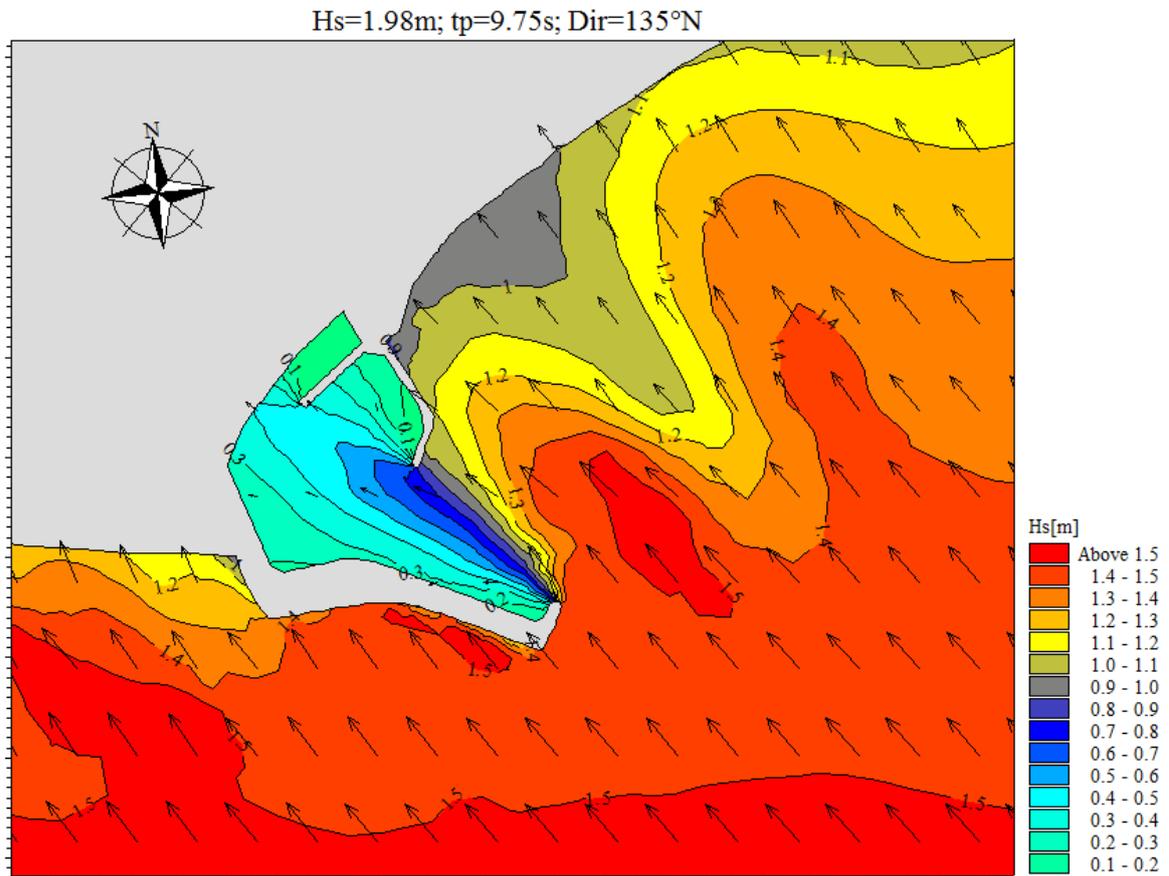


Figura 5. Hs Tr = 1 anno SW

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

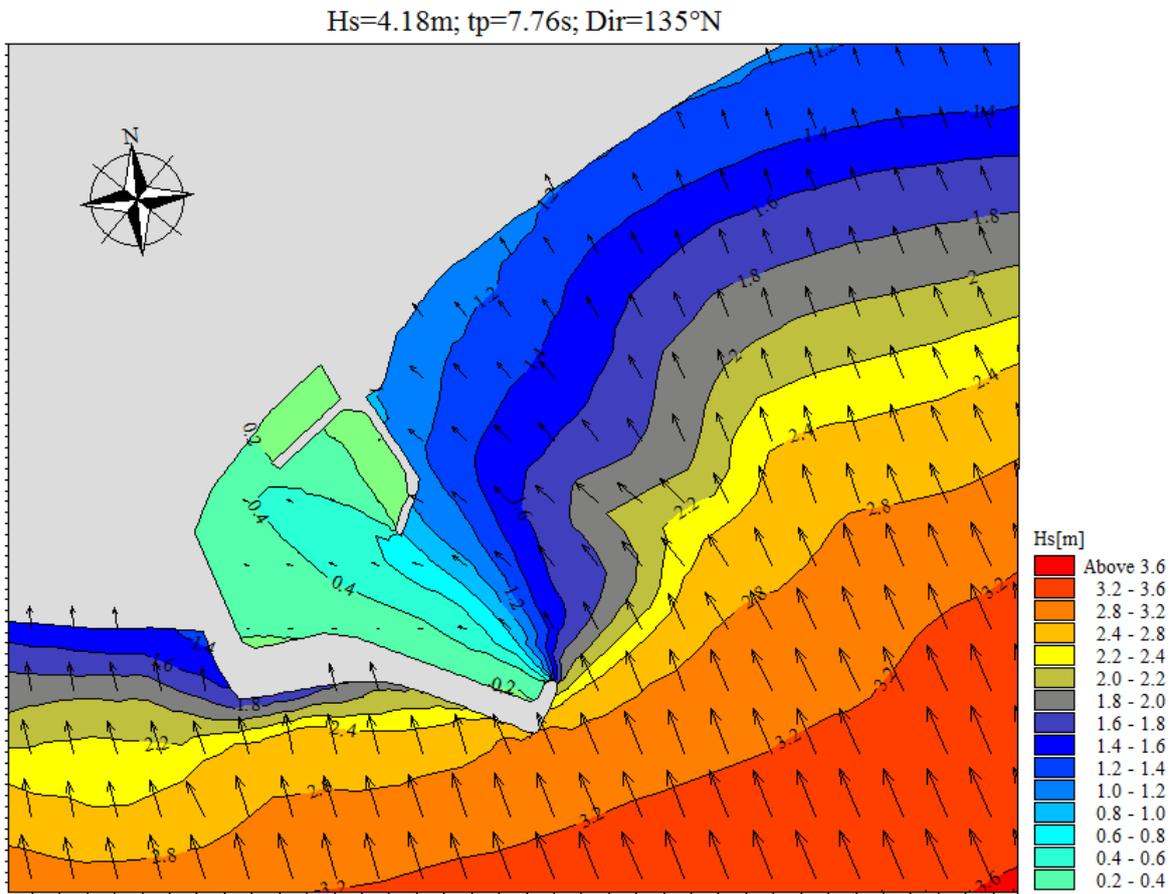


Figura 6. Hs Tr = 50 anni SW

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

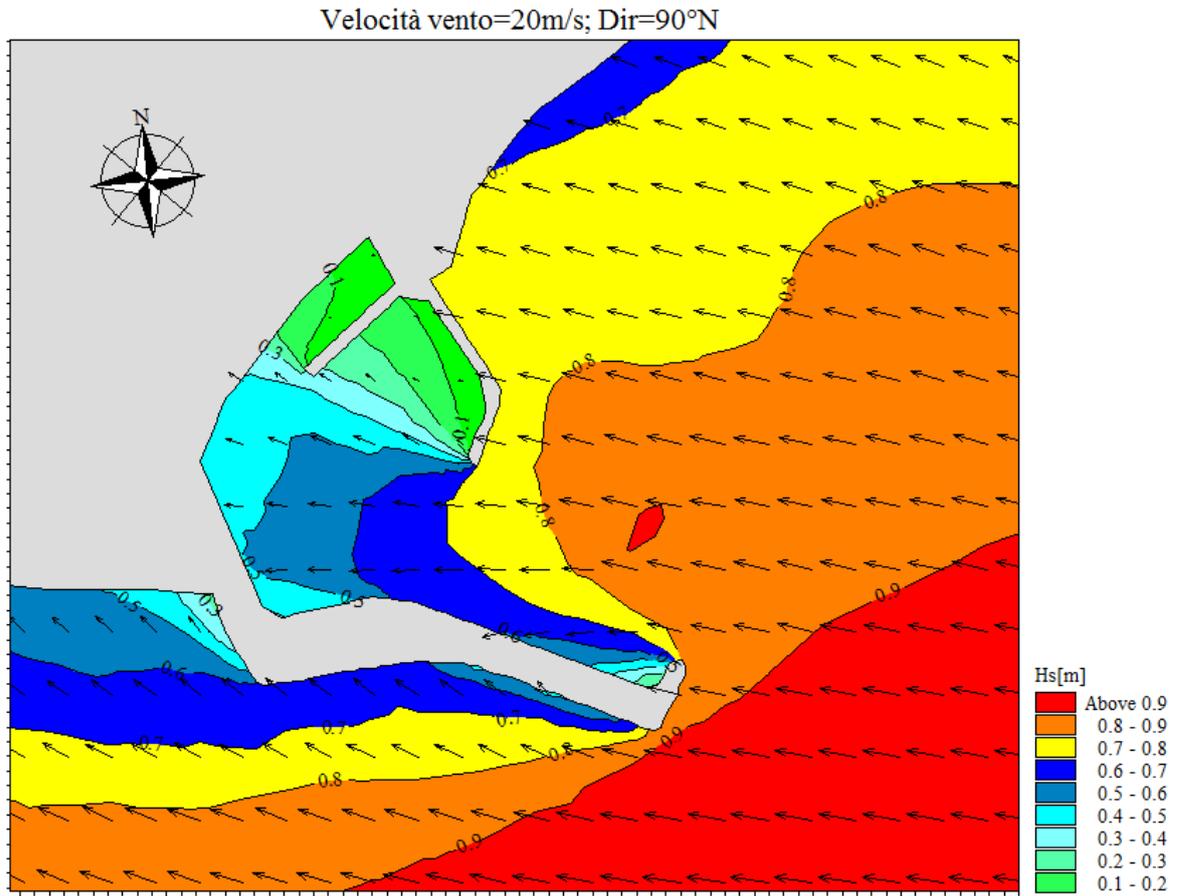


Figura 7. Hs vento SW

4.2 BW (Boussinesq Wave)

Il passo successivo per individuare l'agitazione ondosa all'interno del porto turistico di Anzio e l'interazione tra onde e strutture è stato applicare il modello BW, questo modello è basato sulla risoluzione numerica nel dominio del tempo delle equazioni di Boussinesq in due dimensioni (Madsen et al., 1997) attraverso uno schema implicito alle differenze finite. Le equazioni includono i termini non lineari e la dispersione in frequenza che è introdotta nelle equazioni del moto considerando gli effetti delle accelerazioni verticali sulla distribuzione di pressione. Le equazioni di Boussinesq sono risolte in riferimento ad una formulazione basata sul flusso di quantità di moto con un miglioramento nella descrizione della dispersione lineare. Queste equazioni di Boussinesq estese rendono il modello adatto alla simulazione di onde direzionali che viaggiano da acque profonde ad acque basse. La profondità massima rappresentabile con le equazioni di Boussinesq estese è pari a circa mezza lunghezza d'onda, mentre con la formulazione classica si scende a circa lo 0,22.

Tale modello è in grado di riprodurre l'effetto combinato della maggior parte dei fenomeni che intervengono nella propagazione del moto ondoso in aree costiere e nei porti. Questi includono:

1. Shoaling
2. Rifrazione
3. Diffrazione
4. Attrito con il fondo
5. Frangimento
6. Riflessione parziale
7. Trasmissione di spettri d'onda (direzione e frequenza) che si propagano in batimetrie complesse

Mike 21 BW include la possibilità di considerare la porosità delle strutture per la simulazione della riflessione parziale e la trasmissione attraverso pali o frangiflutti. Inoltre è possibile applicare dei contorni assorbenti laddove sia necessario simulare l'assorbimento dell'energia ondosa.

L'immissione delle onde all'interno del dominio di calcolo è stata eseguita mediante una linea di generazione del moto ondoso. L'output principale del BW è il campo di agitazione residua all'interno del bacino di studio.

4.2.1 Definizione delle griglie di calcolo

Per le simulazioni all'interno dell'area portuale è stata costruita una griglia di calcolo utilizzando un passo di discretizzazione dx e dy di 4m per lo studio di penetrazione ondosa e di 2m per lo studio della penetrazione ondosa dovuta al vento in quanto tale modello necessita di almeno 7 punti di calcolo per ogni lunghezza d'onda. Per la simulazione dell'onda avente tempo di ritorno 50 anni si hanno 450 punti in direzione x e 450 punti in direzione y , l'origine degli assi ha coordinate Gauss-Boaga 2321486 E, 591233 N, la griglia è stata ruotata di 67° in modo tale da poter avere i fronti d'onda in ingresso ortogonali al contorno della griglia di calcolo, per la simulazione dell'onda avente tempo di ritorno 1 anno si è costruita una griglia avente 400 punti in direzione x e 400 punti in direzione y , l'origine degli assi ha coordinate Gauss-Boaga 2321417 E, 4590883 N in questo caso la griglia è stata ruotata di 47° , in fine, per le onde generate dal vento, si è costruita una griglia di calcolo avente 900 punti in direzione x e 900 punti in direzione y con origine degli assi aventi coordinate Gauss-Boaga 2321801 E, 4590380 N ed una rotazione di 12° .

4.2.2 Moto ondoso in ingresso

Il moto ondoso in ingresso per il calcolo dell'agitazione ondosa all'interno del porto di Anzio è quello precedentemente individuato (paragrafo 2), riferito ad un tempo di ritorno di 1 e 50 anni e dal vento avente velocità 20m/s.

Le onde sono state introdotte nel dominio attraverso una linea di generazione interna ad esso per la quale sono stati elaborati i vettori tempovarianti di densità e di flusso, e pendenza della superficie libera. Si è costruito uno strato assorbente lungo i contorni del dominio in modo da poter annullare l'energia ondosa lungo i punti in cui l'onda non può propagarsi, evitando così la generazione di fenomeni di riflessione ondosa inesistenti, lo spessore di questo strato è stato scelto pari a due lunghezze d'onda. La linea di generazione è riportata nella figura 8, nella figura 9 è riportato lo strato assorbente inserito nel dominio di calcolo.

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

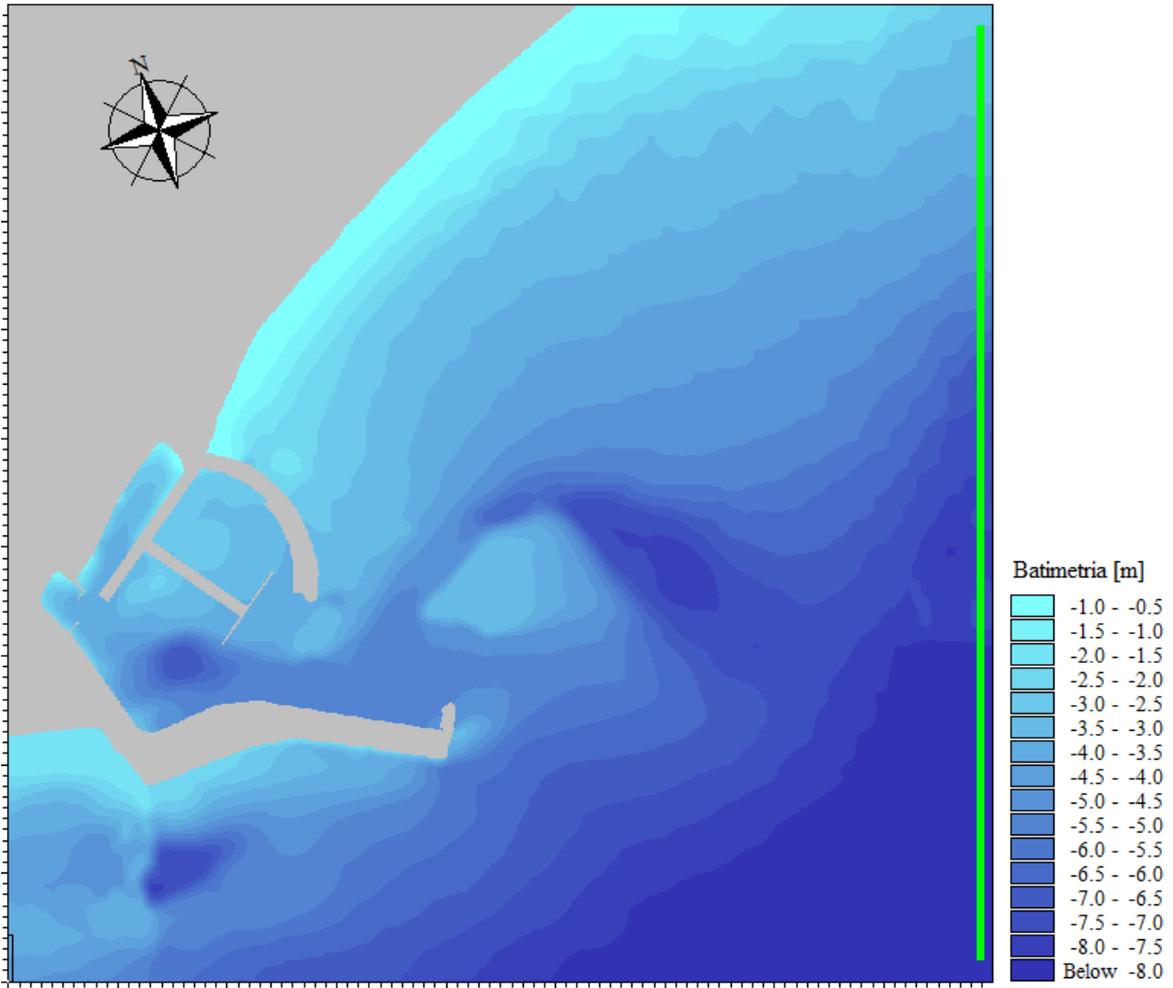


Figura 8. Linea di generazione del moto ondoso

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

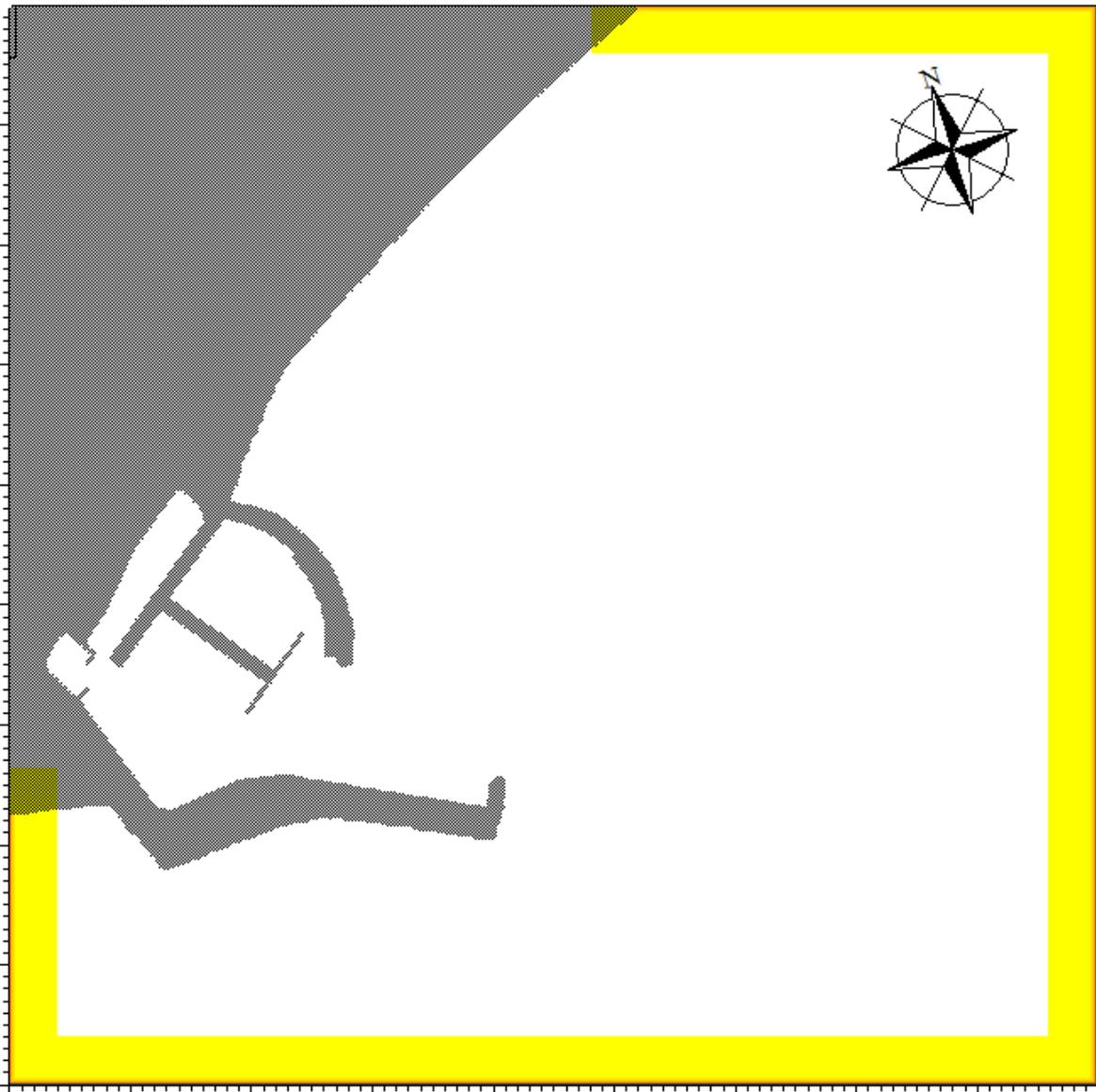


Figura 9. Strato assorbente

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

4.2.3 Parametri di riflessione

In corrispondenza di tutti gli elementi rigidi del dominio, sono stati definiti dei coefficienti di porosità del materiale che regolano i fenomeni di riflessione dovuti alla presenza delle strutture. Questi coefficienti sono definiti per ogni tratto in funzione delle caratteristiche medie dell'onda incidente e della profondità d'acqua antistante la struttura.

Sulla base delle tipologie di opere presenti nel dominio di simulazione, sono stati adottati i parametri di riflessione riportati in Tabella 2. In funzione di questi si sono stimati i coefficienti di porosità richiesti dal modello numerico.

Tipologia opera	Coefficienti di riflessione
Parete verticale	1,00
Antiriflettente	0,85
Scogliera	0,35
Spiaggia	0,25

Tabella 2. Coefficienti di riflessione

Nella figura 10 in verde si evidenziano le opere a scogliera, in giallo quelle antiriflettenti ed in rosso le opere verticali.

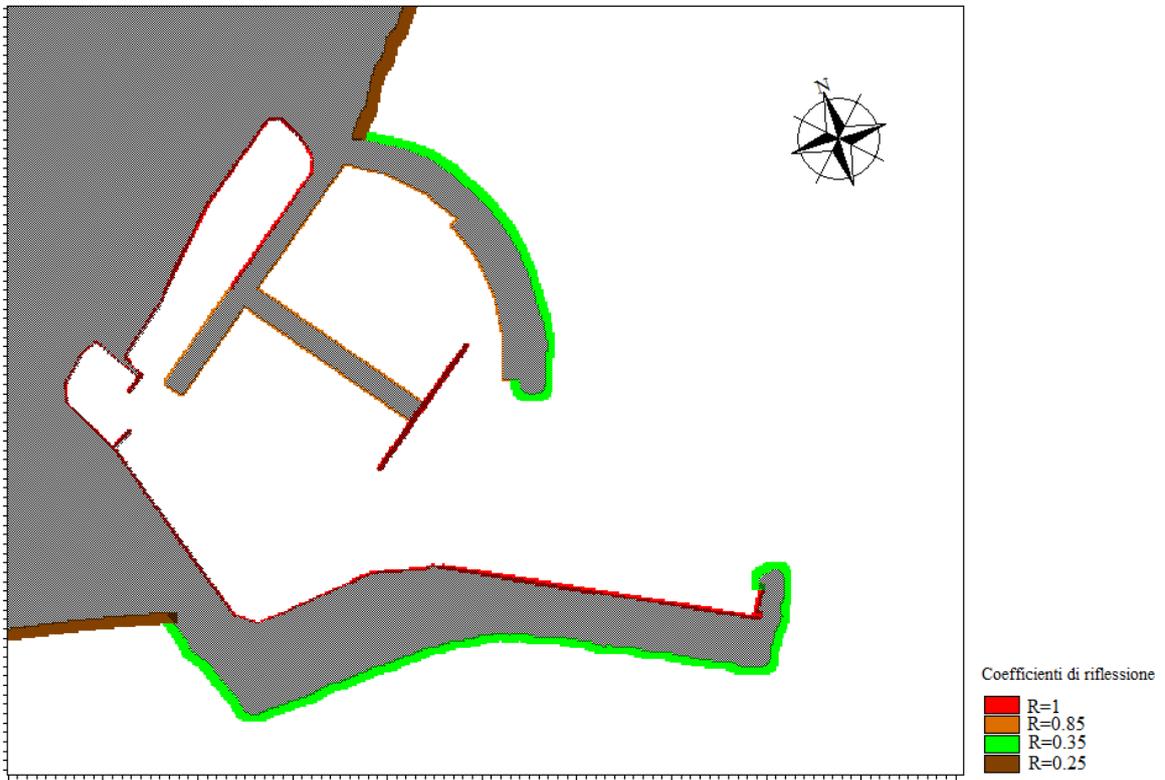


Figura 10. Coefficienti di riflessione

4.2.4 Periodo di simulazione e passo di integrazione

In aggiunta ai parametri descritti precedentemente, il modello numerico BW ha bisogno di un periodo di simulazione e di un passo temporale di integrazione. Il periodo di simulazione deve essere tale da consentire il completo sviluppo del moto ondoso all'interno di tutto il dominio di calcolo, nel caso in esame, dopo un'accurata analisi, si è utilizzato come tempo di simulazione un'ora in quanto questa è sufficiente per avere uno sviluppo completo del moto ondoso.

Il passo temporale di integrazione è fondamentale per la stabilità del modello stesso ed è funzione della risoluzione spaziale, del numero di Courat e del periodo delle onde utilizzate. Nel caso in esame è stato utilizzato un passo temporale di integrazione pari a 0,1 secondi.

4.2.5 Risultati delle simulazioni

I risultati dello studio sono mostrati nelle figure dalla 11 alla 16, rappresentano il campo di valori di altezza significativa (H_s) ed i coefficienti di disturbo, tale coefficiente è dato dalla seguente relazione:

$$C_d = \frac{H_i}{H_s}$$

dove con H_i si intende l'altezza d'onda incidente e con H_s si intende l'onda di progetto. Quando il C_d è circa uno si ha che l'onda frangente all'opera è prossima a quella a largo, viceversa quando C_d è vicino a zero l'onda frangente all'opera è ridotta notevolmente rispetto a quella a largo.

I valori raffigurati corrispondono all'ultimo stadio del periodo di simulazione che rappresenta la condizione di mare completamente sviluppato.

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

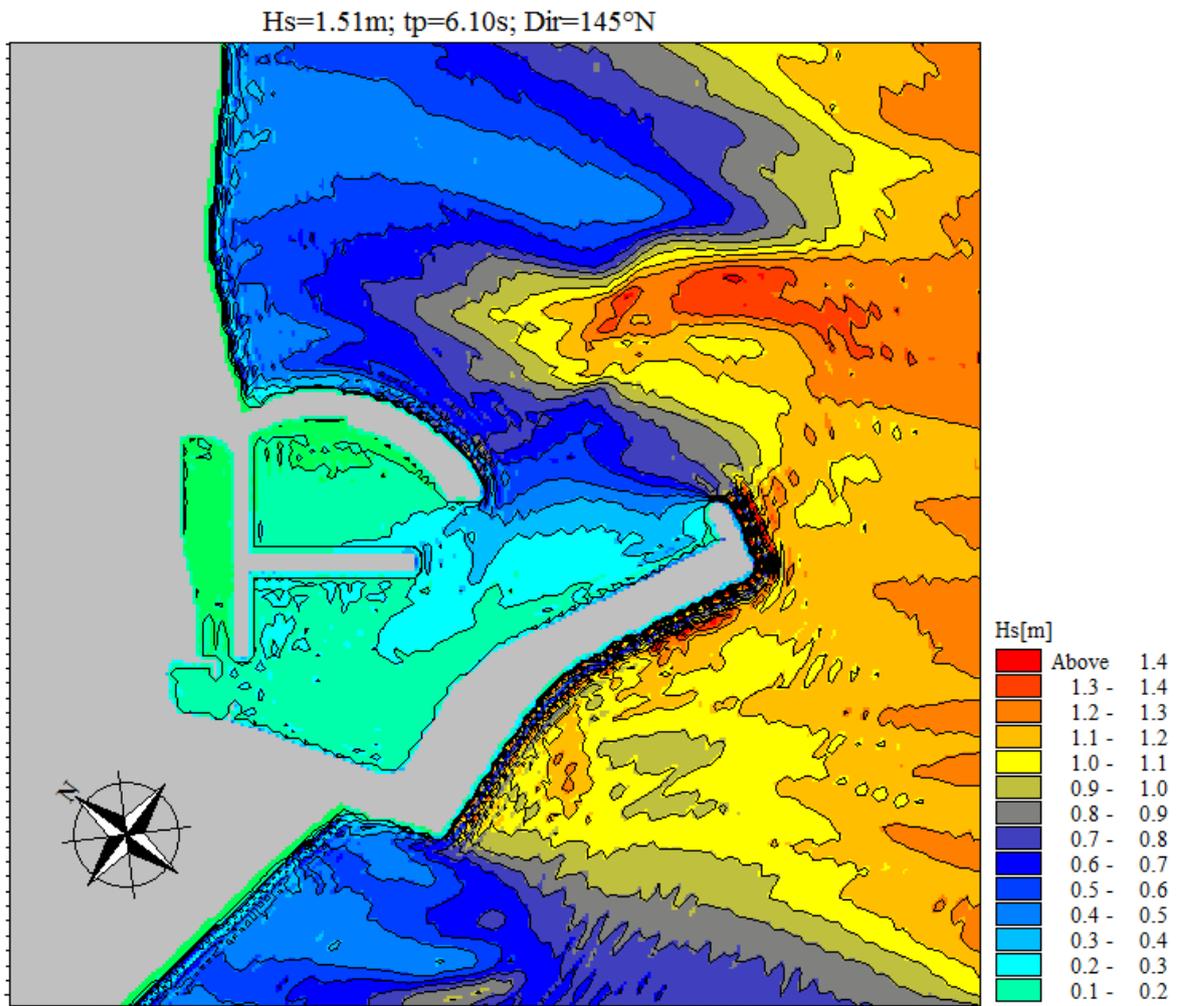


Figura 11. Hs Tr = 1 anno

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

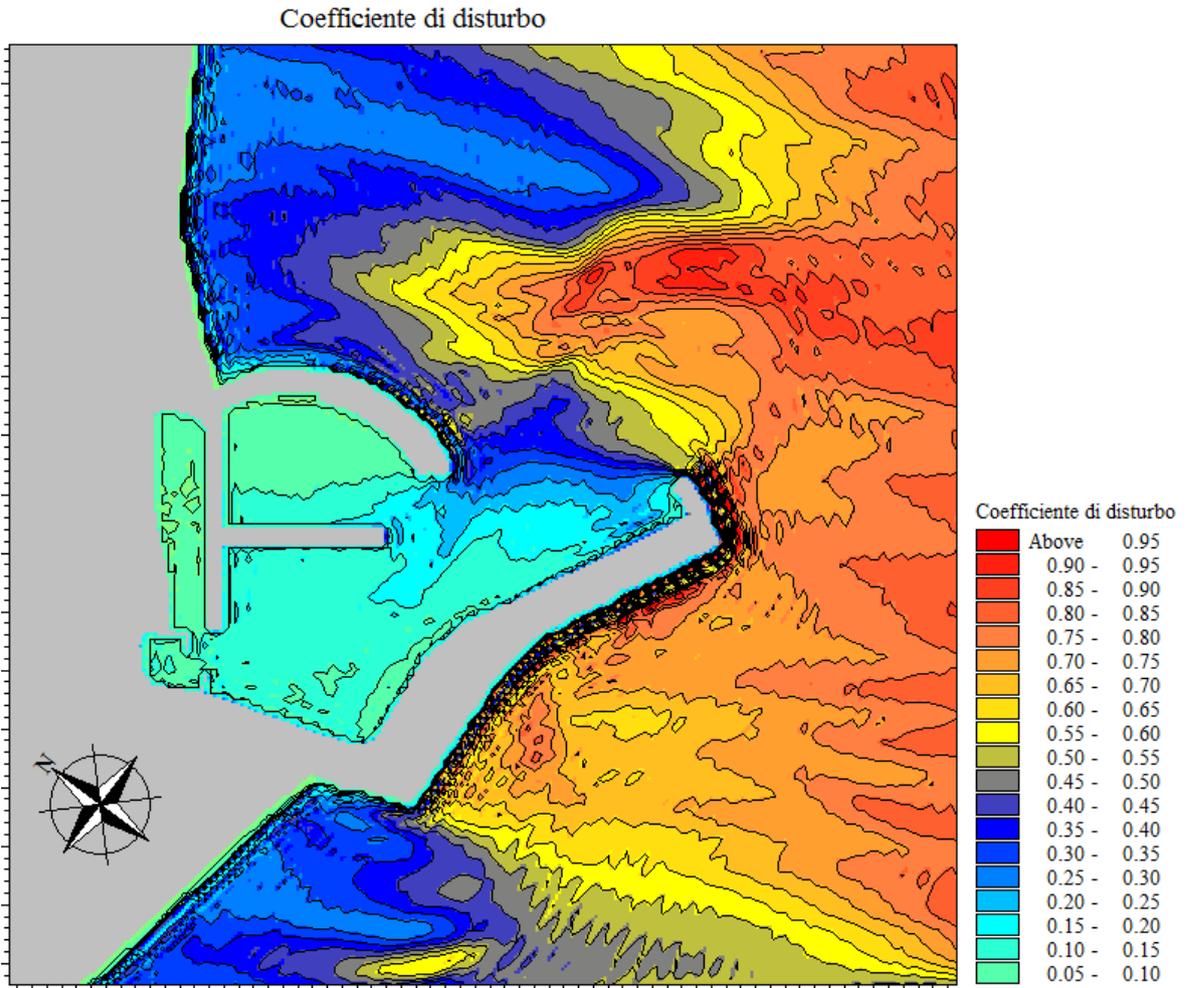


Figura 12. Coefficienti di disturbo $T_r = 1$ anno

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

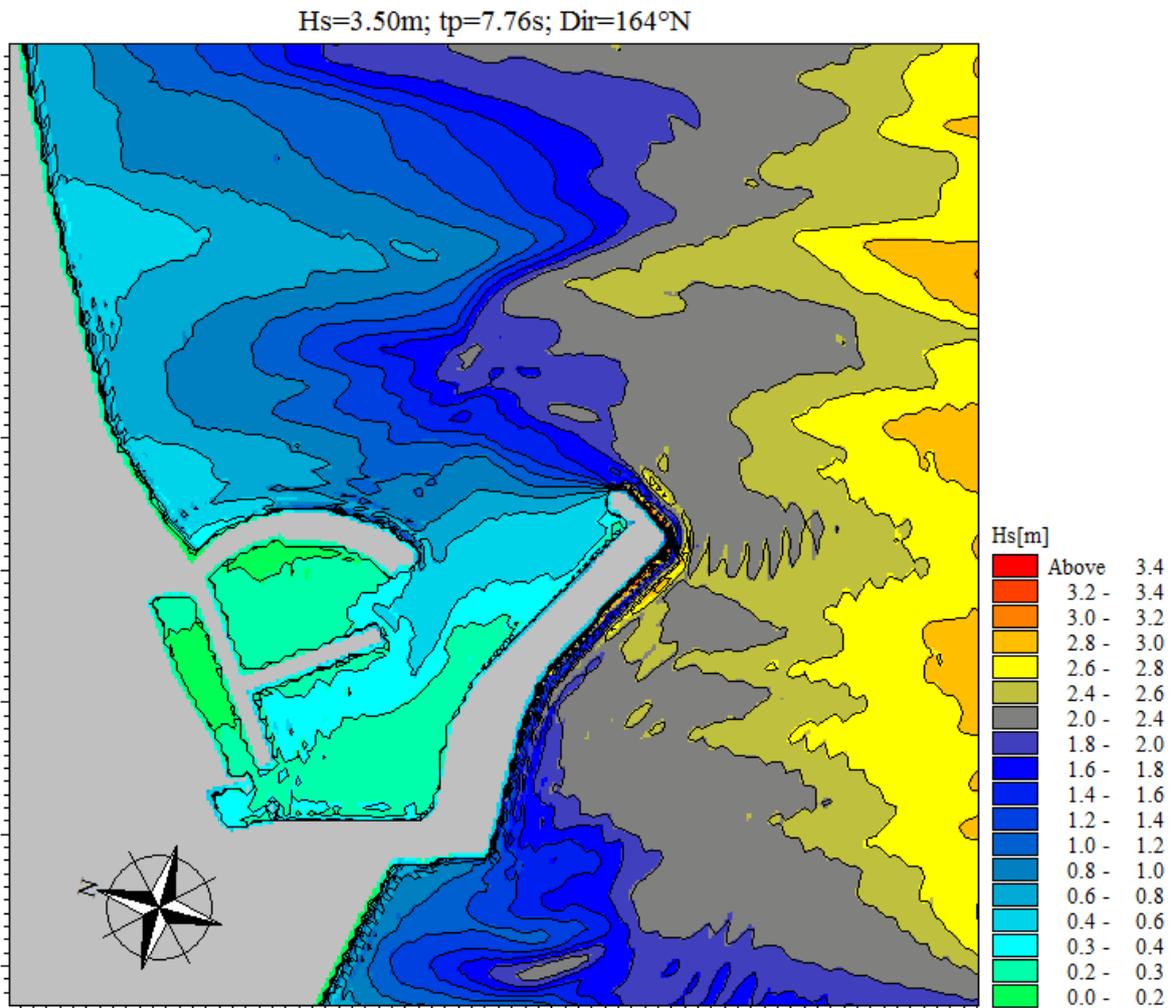


Figura 13. Hs Tr = 50 anni

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

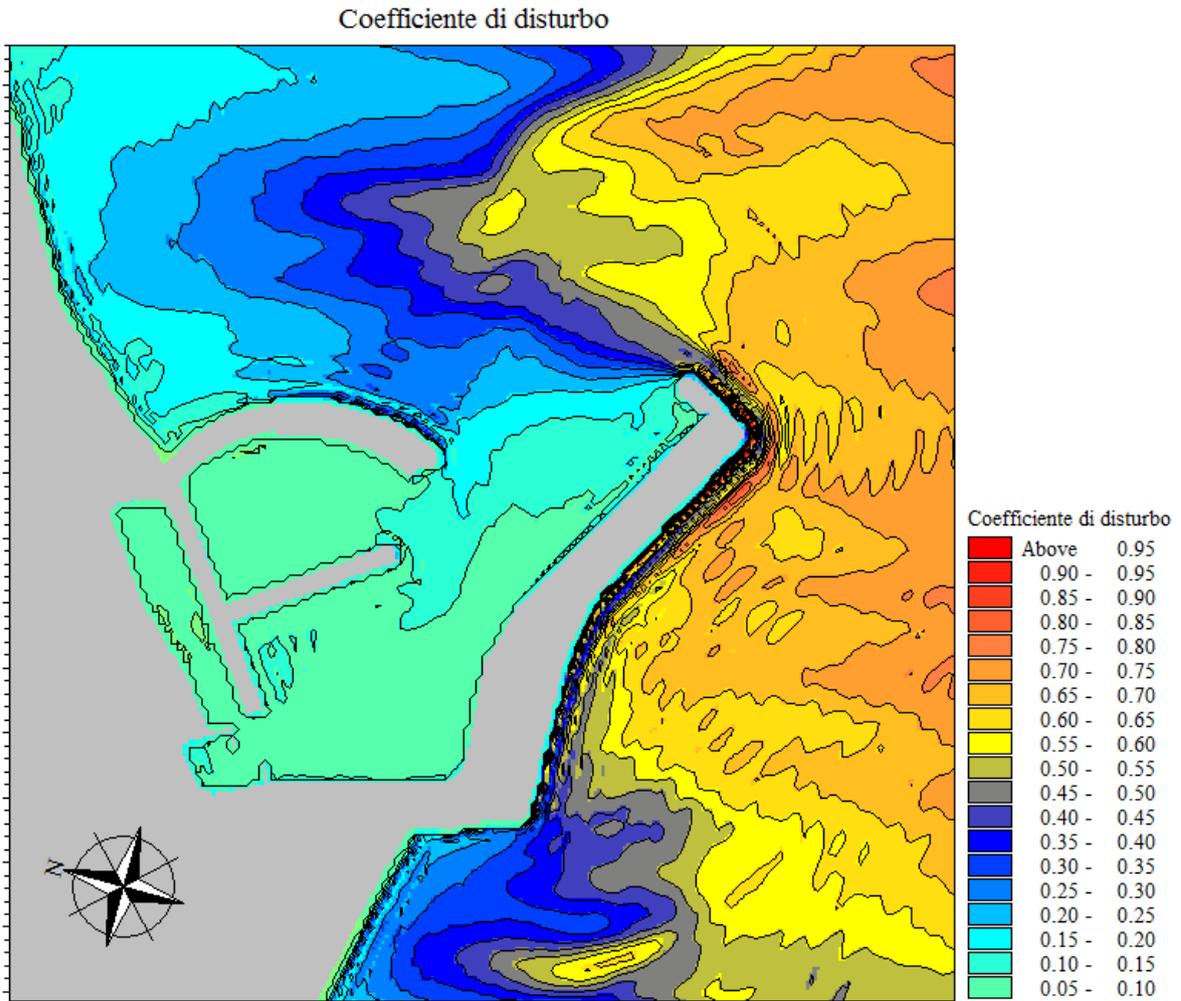


Figura 14. Coefficienti di disturbo $T_r = 50$ anni

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

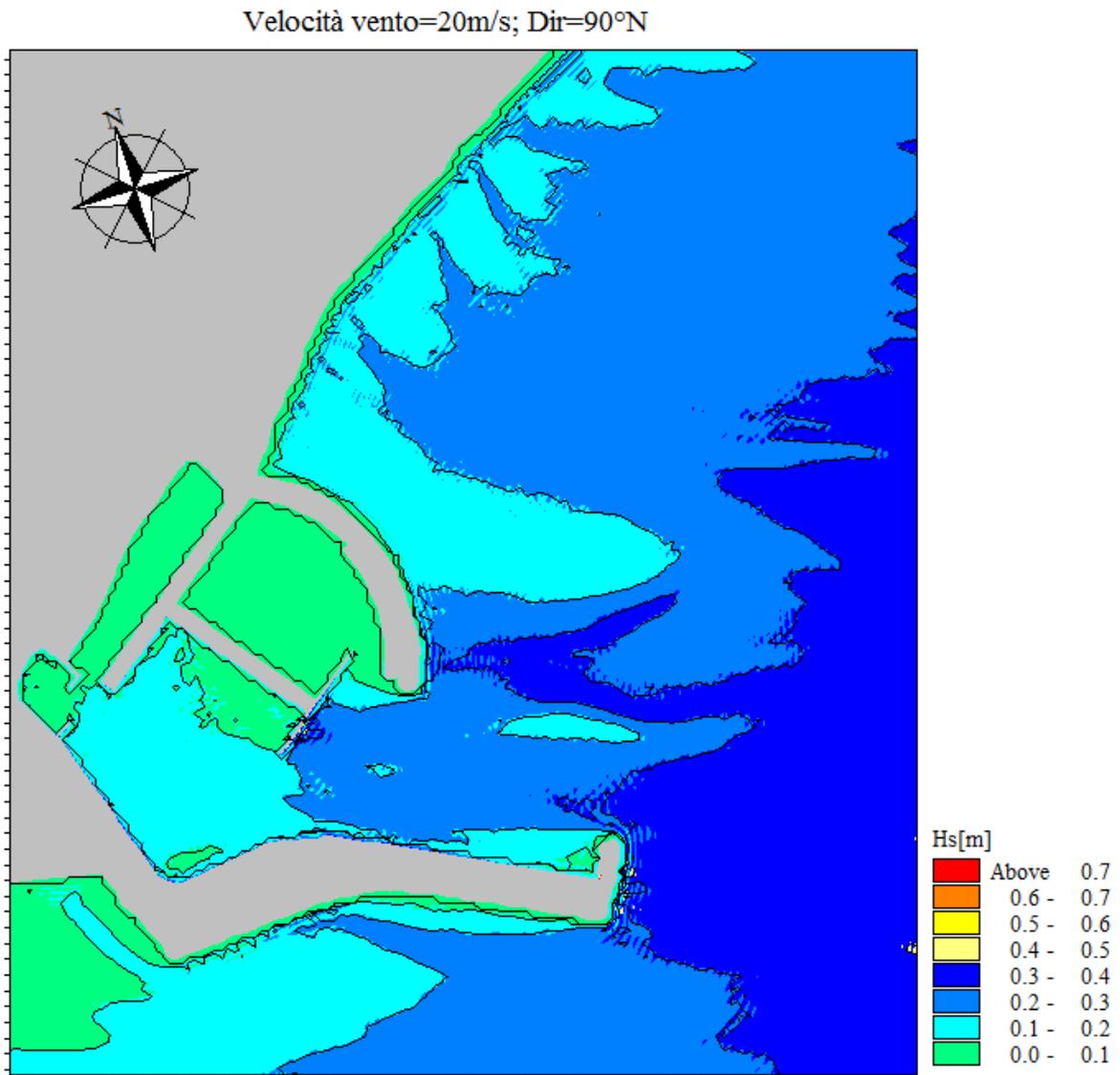


Figura 15. Hs vento 20m/s

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

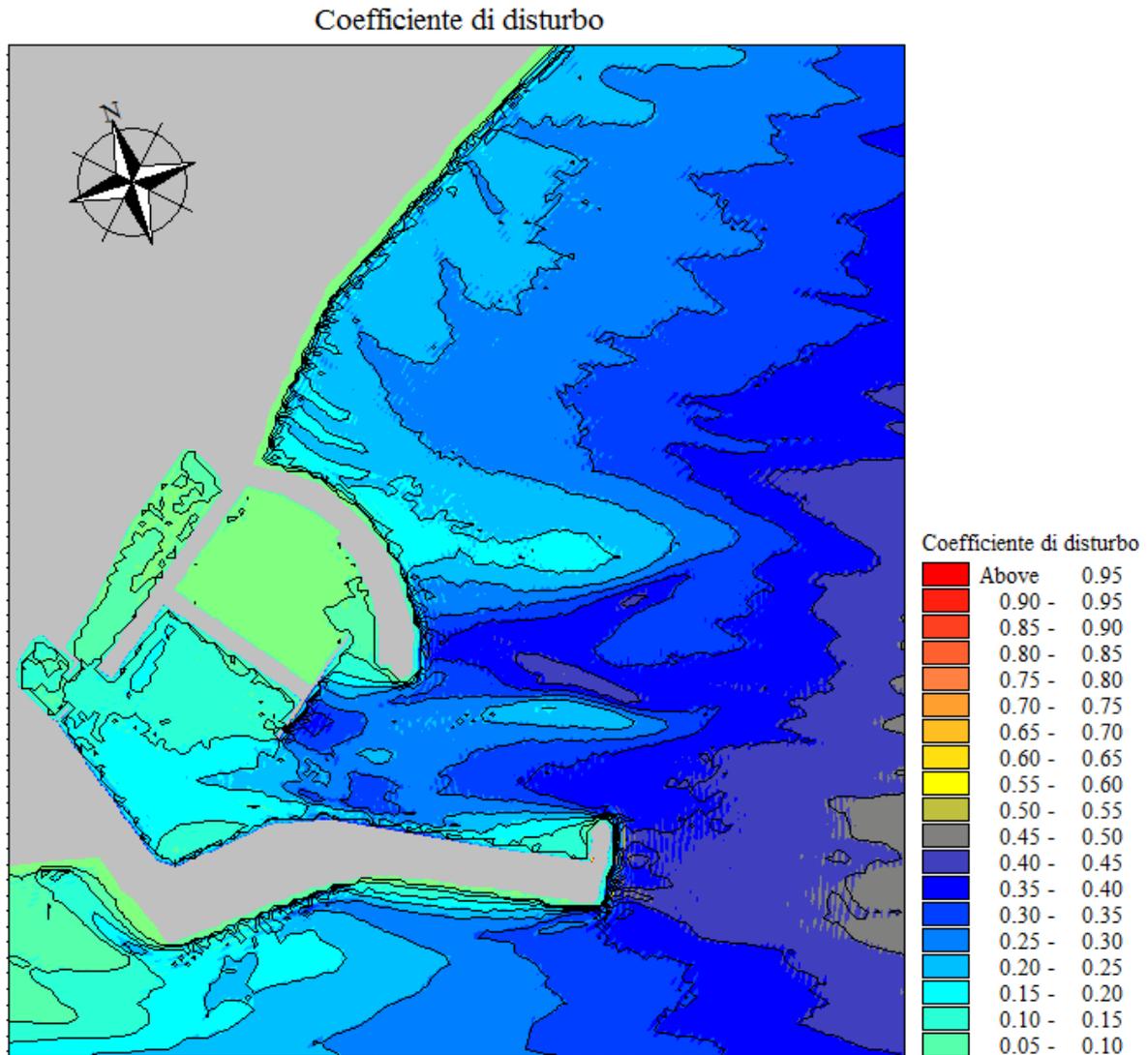


Figura 16. Coefficienti di disturbo vento

5. CONCLUSIONI

Il presente studio è stato redatto per poter conoscere la penetrazione ondosa all'interno del porto di Anzio e valutare così l'efficienza delle opere da realizzare nella Fase 2.

Le condizioni ondose in ingresso sono state ricavate da un precedente studio idraulico-marittimo presso Gaeta tenendo conto delle differenze dei Fetches e dal grado di esposizione del paraggio. Oltre ai dati ondosi è stato considerato il vento per valutare la generazione di onde di corto periodo, per fare questo sono stati utilizzati i dati dell'anemometro di Anzio

Da tale studio sono state individuate due onde rilevanti ai fini dell'agitazione interna, entrambe provenienti da Sud-Est (135°N), una con altezza di 4,18m e periodo di picco 9,74s associata ad un tempo di ritorno di 50 anni, l'altra con altezza d'onda pari a 1,98m ed un periodo di picco pari a 6,72s con tempo di ritorno pari a 1 anno, si è studiata anche l'agitazione ondosa interna dovuta ad onde generate da un vento di velocità 20m/s che spira da 90°N.

E' stato utilizzato il modello numerico MIKE 21 SW che è basato sulla risoluzione numerica nel dominio e nel tempo dell'equazione di bilancio dell'azione delle onde per la propagazione dell'onda da largo a riva (in prossimità dell'imboccatura portuale). Tale modello è in grado di simulare la crescita dell'onda per effetto del vento, l'interazione non lineare tra le onde, la dissipazione dovuta al *white capping*, la dissipazione dovuta all'attrito con il fondo, il frangimento dell'onda su profondità limitate, la rifrazione e lo shoaling dovuti alla batimetria, la diffrazione e la riflessione semplice.

Il passo successivo è stato applicare il modello numerico MIKE 21 BW che è basato sulla risoluzione numerica nel dominio del tempo delle equazioni di Boussinesq in due dimensioni (Madsen et al., 1997) attraverso uno schema

Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

implicito alle differenze finite. Le equazioni includono i termini non lineari e la dispersione in frequenza che è introdotta nelle equazioni del moto considerando gli effetti delle accelerazioni verticali sulla distribuzione di pressione. Si sono costruite delle griglie di calcolo utilizzando un passo di discretizzazione dx e dy di 4m per la simulazione delle onde in quanto tale modello necessita di almeno 7 punti di calcolo per ogni lunghezza d'onda. Per poter permettere l'ingresso dei fronti d'onda ortogonali alla griglia di calcolo, la mesh per la simulazione dell'onda con Tempo di ritorno di 50 anni è stata ruotata di 67°, la mesh per l'onda avente 1 anno di tempo di ritorno è stata ruotata di 47° e la griglia di calcolo per la simulazione del vento è stata ruotata di 12° in quanto la direzione di propagazione delle onde deve risultare ortogonale alla griglia stessa. Tutte le simulazioni hanno una durata temporale di un'ora che risulta essere un periodo sufficiente per l'intero sviluppo del moto ondoso all'interno dell'area.

Per le verifiche dell'agitazione residua all'interno di un porto si è fatto riferimento a:

“Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici” febbraio 2002., AIPCN (ora Associazione Internazionale di Navigazione), recepite favorevolmente dalla Terza sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

In particolare l'Art. 5 “Agitazione interna” raccomanda i seguenti valori dell'altezza significativa

ammmissibile all'interno del porto per:

- per le “*condizioni limite*” un valore pari a 0,50 m
- per le “*condizioni di sicurezza*” un valore pari a 0,30 m.

Dai risultati ottenuti è emerso che per tutte le onde simulate, la condizione di agitazione all'interno del porto di Anzio è tale da non creare problemi alle imbarcazioni ormeggiate in quanto il range di altezza d'onda varia tra 0,10m e

***Progettazione Esecutiva
Fase 2
Adeguamento Darsena Nord***

Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del porto

0,30m (valori stimati dall'onda avente 1 anno di tempo di ritorno), per l'onda avente 50 anni di tempo di ritorno il range di agitazione ondosa interna varia tra 0,18m e 0,36m mentre per le onde generate dal vento il range ondoso varia tra 0,05m e 0,15m. Si deve precisare che il pontile B è del tipo frangionde e che questo è in grado di smorzare le onde aventi periodo massimo di circa 3,50 secondi; nelle simulazioni si è tenuto conto di tale pontile solamente per le onde generate dal vento, per tutte le altre si è rappresentato tale pontile come una struttura trasparente in quanto i periodi delle onde erano maggiori di 3,50 secondi.