

COMUNE DI VIAREGGIO

G

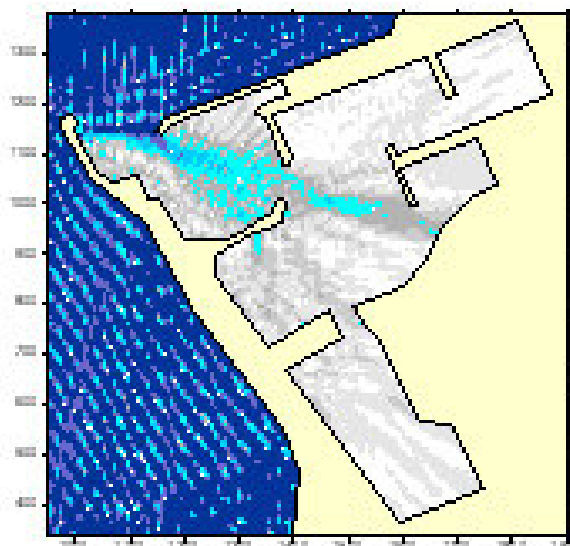
PIANO REGOLATORE DEL PORTO DI VIAREGGIO
STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSA

DOTT. G. DE FILIPPI

maggio 2007

DEAM	COMUNE DI VIAREGGIO	
TOSCANA		400084
AREA	CLIENTE	COMMESSA

VARIANTE DEL PIANO REGOLATORE DEL PORTO DI VIAREGGIO



STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSA

RELAZIONE DI SINTESI

2				
1				
0	Maggio 2003	Emissione	 C. AVEZZANO	Dr. G. DE FILIPPIS
	DATA	DESCRIZIONE	AUTORE	APPROVATO

DEAM

INDICE

1.	SCOPO	2
2.	AREA DI STUDIO.....	3
3.	DATI DISPONIBILI E METODOLOGIA DI ANALISI	4
4.	CLIMA DEL MOTO ONDOSO	6
4.1	Clima del moto ondoso al largo	6
4.2	Clima locale.....	7
4.3	Campo di moto ondoso.....	8
5.	AGITAZIONE ONDOSA ALL'INTERNO DI UN BACINO PORTUALE	9
5.1	Agitazione causata dalle onde	9
5.2	Diffrazione	9
5.3	Riflessione.....	10
5.4	Il modello matematico	11
6.	SCHEMATIZZAZIONE DELL'AREA.....	13
7.	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	14
8.	ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	16
9.	CONCLUSIONI E SUGGERIMENTI.....	18
10.	BIBLIOGRAFIA	19
	ALLEGATO A	
	ALLEGATO B	

1. SCOPO

Nell'ambito della Revisione del Piano Regolatore Portuale è stata tenuta in debito conto, da parte delle competenti Autorità, la necessità di progettare tecnicamente ed economicamente interventi che garantiscano la massima funzionalità della struttura portuale.

A tal fine il Comune di Viareggio ha ritenuto essenziale, già in questa fase, valutare quantitativamente, attraverso l'adozione di opportuna modellistica numerica, l'agitazione ondosa residua all'imboccatura e all'interno del bacino portuale nella nuova configurazione progettuale, fenomeno che attualmente comporta alcuni problemi soprattutto nella parte più esterna della Darsena Madonnina.

La fase di approfondimento delle problematiche, non solo dell'agitazione ondosa, ma anche di tutti gli aspetti connessi con l'ottimizzazione delle darsene in funzione delle varie esigenze emerse nel corso del progetto, ha portato a varie ipotesi progettuali, tutte analizzate in termini di penetrazione del moto ondoso all'interno dell'imboccatura portuale.

Oggetto della presente relazione di sintesi, basata su quanto già evidenziato e discusso nelle conferenze dei servizi via via effettuate e sulle precedenti relazioni DEAM "Studio dell'agitazione ondosa all'imboccatura e nelle darsene", nelle varie versioni (settembre-ottobre-dicembre 2002) che sono state redatte in funzione delle successive varianti al progetto, e che costituiscono quindi parte integrante del presente documento, è quello di riassumere i principali risultati ottenuti e di evidenziare l'andamento spaziale dell'agitazione ondosa nella configurazione progettuale finale.

2. AREA DI STUDIO

Il porto di Viareggio è situato alle coordinate 43°51'69" N -10°14'08" E.

In **Fig. 2.1** è mostrata l'ubicazione del porto. Tutta la zona immediatamente a Nord e a Sud del porto è caratterizzata da un lungo litorale sabbioso.

Il progetto di revisione della configurazione del porto prevede una sostanziale modifica rispetto allo stato attuale, in particolare l'ampliamento della darsena turistica della Madonnina e la creazione di altre darsene nell'area a sud, con la formazione di una zona di avamposto.

In **Fig 2.2** è mostrato lo schema della configurazione portuale definitiva di progetto.

2.1 Settore di traversia

Il porto è esposto ad un settore di traversia molto ampio, che va da 180° a 320°N.

Ovviamente le onde che possono penetrare all'interno dell'imboccatura portuale possono provenire da un settore di ampiezza molto più limitata, in particolare:

- da 300 a 320°N: Golfo di La Spezia, con fetches dell'ordine massimo di 35 Km;
- da 265 a 300°N: Golfo Ligure, con fetches massimi di circa 200 Km;
- da 225 a 265°N: mare aperto, con fetches tali da consentire mare completamente sviluppato.

2.2 Caratteristiche batimetriche

A causa del notevole afflusso di materiale sedimentario proveniente da sud, per il quale la presenza del porto costituisce una trappola, i fondali antistanti l'imboccatura sono caratterizzati dalla presenza di una barra di sabbia orientata approssimativamente a 10°N (**Fig. 2.3**), mentre la parte interna l'imboccatura risulta parzialmente interrata, e in alcuni tratti lungo la parte interna del molo di sovralfutto in maniera anche consistente. Tale fatto comporta, oltre all'ovvio pericolo per le imbarcazioni in entrata-uscita dal porto:

- una rotazione accentuata dei fronti d'onda per effetti rifrattivi, con penetrazione delle onde nell'avamposto;
- un incremento dell'altezza d'onda per effetto del fenomeno di "shoaling";
- il frangimento delle onde, anche per mareggiate di intensità medio-bassa, negli immediati pressi dell'imboccatura;
- il sollevamento di numeroso materiale sedimentario, che viene poi convogliato nell'avamposto con conseguente riduzione dei fondali.

Si sottolinea che, al momento della stesura del presente rapporto, sono previste consistenti attività di dragaggio dei fondali da parte della Regione Toscana. Mediante tali attività l'imboccatura portuale ed i fondali immediatamente adiacenti dovrebbero subire un notevole rimodellamento.

3. DATI DISPONIBILI E METODOLOGIA DI ANALISI

Vengono sinteticamente riportati i dati disponibili per lo studio e dettagli sulla metodologia seguita.

3.1 Dati disponibili

Il presente studio si basa sulle seguenti informazioni:

- lay-out portuale fornito dal Comune di Viareggio;
- dati batimetrici locali, forniti dal Comune di Viareggio, rilevati da ARPAT in data 11/10/2001 e 21/05/2002;
- clima meteo-marino definito nella relazione DEAM “Analisi dell’agitazione ondosa nel Porto di Viareggio” dell’Aprile 2001;
- risultati generali ottenuti dalle simulazioni effettuate nelle fasi precedenti e contenute nella relazione DEAM “Revisione del Piano Regolatore del Porto di Viareggio – Analisi dell’agitazione ondosa” del Maggio 2002.

3.2 Metodologia

Lo studio dell’agitazione ondosa residua nel Porto di Viareggio è stato effettuato secondo la seguente procedura:

- a) Definizione del clima di moto ondoso al largo
Per la definizione del clima meteo-marino al largo di Viareggio si è fatto riferimento allo studio ‘Analisi dell’agitazione ondosa nel porto di Viareggio’ del 2001.
- b) Calcolo delle condizioni locali dettagliate del clima di moto ondoso
Le condizioni locali di moto ondoso, che rappresentano l’input per il modello che simula l’agitazione ondosa, sono state definite secondo la seguente procedura:
 - è stato effettuato, mediante modello matematico di rifrazione-shoaling-atrito, il “backscattering”, cioè la rifrazione inversa (da costa al largo) per definire le traiettorie di tutte le onde che, dal largo, possono arrivare nei pressi dell’imboccatura portuale;
 - definite così le direzioni di provenienza, sono state selezionate le coppie (H,T), cioè altezza e periodo dell’onda, che raggiungono l’area di studio e la loro percentuale di occorrenza;
 - è stato infine calcolato, per ogni direzione e periodo d’onda selezionati, il campo di moto ondoso locale mediante lo stesso modello di rifrazione .
- c) Calcolo delle condizioni di agitazione ondosa attraverso modello numerico per la configurazione di progetto

Le attività sono state le seguenti:

- è stata schematizzata, ai fini modellistici, la configurazione di progetto;

DEAM

- sono stati effettuati i “runs” del modello di agitazione ondosa per tutte le coppie (H, T) prescelte, in condizioni di totale assorbimento delle pareti. Ciò permette di valutare l’adeguatezza delle schematizzazioni effettuate (assenza di problemi numerici) e di ottimizzare lo schema geometrico;
- sono state ripetute le stesse simulazioni in condizioni di riflessione totale al fine di verificare la situazione peggiore in assoluto;
- sono stati definiti i coefficienti di riflessione per le varie tipologie di strutture previste nel porto ed effettuati nuovamente i ‘runs’ del modello assumendo in input le direzioni e le coppie (H,T) definite al punto b).

4. CLIMA DEL MOTO ONDOSO

Prima di procedere alle simulazioni è ovviamente necessario definire il clima del moto ondoso nell'area.

Ricordiamo che con clima del moto ondoso si fa riferimento ad una funzione $p(H_s, \theta, T_s)$ che rappresenti la distribuzione in frequenza di eventi definiti dall'altezza significativa H_s , dal periodo significativo T_s e dalla sua direzione di provenienza θ .

4.1 Clima del moto ondoso al largo

Per la definizione del clima al largo si fa riferimento alla già citata relazione DEAM dell'Aprile 2001, di cui vengono riportati, in forma sintetica, i dati utilizzati nel presente studio.

La definizione del clima del moto ondoso al largo è basata sulle osservazioni visive KNMI, relative a 20 anni di ship's observations (1961-80) su una vasta area toscana scelta in modo che il baricentro dei dati fosse ubicato al largo di Viareggio.

Il clima al largo è presentato nella **Tab. 4.1**.

Per quanto riguarda il periodo dell'onda da associare all'altezza, è stata utilizzata la relazione sperimentale tra altezza e periodo dell'onda trovata dall'analisi numerose misure di moto ondoso rilevate nel Canale di Sicilia nel 1976-77 [rif. 1]:

$$H_s = 0.06 T_s^2 \quad [4.1]$$

e successivamente verificata in altri bacini italiani. Negli anni recenti, misure a lungo termine effettuate nell'Adriatico Centrale e Meridionale hanno evidenziato, ancora una volta, come tale relazione abbia una notevole validità generale, soprattutto per le onde più alte [rif. 2].

Infatti, mentre i valori di altezza d'onda visiva sono generalmente in buon accordo con le altezze misurate, lo stesso non accade per il periodo dell'onda in quanto l'osservazione visiva è affetta da errori anche grossolani, tenuto conto dell'oggettiva difficoltà di valutare il periodo da un natante in moto.

Sulla base della [4.1], alle varie classi di periodo possono dunque essere associate le classi di altezza d'onda significativa di seguito riportate:

PERIODO DELL'ONDA (s)	ALTEZZA SIGNIFICATIVA H_s CORRISPONDENTE AL LARGO (m)
4 (3.5 – 4.5)	0.5-1.0
5 (4.6 – 5.5)	1.1-1.5
6 (5.6 – 6.5)	1.6-2.5
7 (6.6 – 7.5)	2.6-3.0
8 (7.6 – 8.5)	3.1-4.0

4.2 Clima locale

E' noto che nella propagazione dal largo verso le acque meno profonde le onde subiscono delle trasformazioni dovute all'effetto del fondo (in pratica quando la profondità dell'acqua diventa circa metà della lunghezza d'onda).

Si hanno così i fenomeni di "rifrazione", cioè la rotazione dei fronti d'onda dovuta alla diminuzione della velocità delle onde con la profondità, di "shoaling", cioè un incremento o decremento dell'altezza d'onda legato alla concentrazione o dispersione dell'energia per effetto delle differenze tra velocità di fase dell'onda e velocità di gruppo (velocità con cui si propaga l'energia) causato dal fondale, di "attrito", cioè dalla dispersione di energia per effetto dell'attrito sul fondo che determina una riduzione dell'altezza dell'onda.

L'altezza dell'onda al largo H_0 si modifica quindi continuamente nella sua propagazione verso le acque basse secondo la relazione:

$$H_i = H_0 * K_r * K_s * K_f \quad [4.2]$$

dove H_i è l'altezza d'onda locale, K_r , K_s , K_f sono rispettivamente i coefficienti di rifrazione, shoaling e attrito.

Il clima del moto ondoso nell'area antistante il porto, così calcolato, desunto dalla già citata relazione DEAM, è mostrato in **Tab. 4.2**.

Considerando l'orientamento dell'imboccatura portuale, si è ritenuto necessario analizzare in dettaglio la frequenza delle onde provenienti dal settore 300° N, in quanto onde incidenti con 300° N entrano praticamente indisturbate nel porto.

Il settore 300° N (si ricorda che tale settore va da 286 a 315°N) è caratterizzato da fetches ridotti, dove si possono sviluppare solo onde di modesta ampiezza, ma a causa della rotazione dei fronti d'onda connessa con il fenomeno della rifrazione, va attentamente valutata la possibilità che all'imboccatura portuale si presentino anche onde provenienti dal settore 270° N, a cui corrispondono fetches molto più lunghi e conseguentemente onde più elevate.

A tale scopo si è utilizzata la tecnica del "backtracing": a partire da un punto posto in prossimità dell'imboccatura portuale sono stati tracciati i raggi d'onda, operando una rifrazione inversa per tutte le onde che, nel punto esaminato, interessano l'imboccatura. Mediante un modello matematico capace di considerare i processi di rifrazione-shoaling-attrito e che opera sulla batimetria reale (si è ovviamente proceduto a schematizzare nel dettaglio la batimetria di una vasta area, **Fig. 4.1**) sono stati quindi definite le onde che arrivano all'imboccatura.

L'analisi è stata estesa anche al settore 270° N.

La descrizione del modello è presentata in **Allegato A**.

I risultati sono presentati in:

- **Fig. 4.2**, mostra i raggi d'onda per onde caratterizzate da periodi di 4 e 5 secondi e direzione all'imboccatura portuale di 300°N, e **Fig. 4.3** che mostra, per la stessa direzione, la traiettoria delle onde caratterizzate da periodi di 6 e 7 s. Dall'analisi delle traiettorie (corrispondenti a traiettorie da 300° a 285° N con passo di 3°) si osserva che, per i periodi di 5, 6 e 7 s le onde provengono da costa o dal Golfo di La Spezia. Tenuto conto del fetch ridotto, solo le onde con periodi di 4 s risultano

pertanto compatibili con la direzione 300°. Per la direzione 290° N risultano invece compatibili le onde con periodi di 4, 5 e 6 s;

- **Fig.4.4**, evidenzia le traiettorie corrispondenti a periodi di 4 e 5 s per onde provenienti da 270°N, **Fig. 4.5**, che riporta le traiettorie relative ai periodi di 6 e 7 s per la stessa direzione. Dall'esame delle figure (in questo caso i raggi corrispondono ad angoli da 285° e 255° N) si nota che, per tutti i periodi considerati, le onde sono compatibili con la direzione 270° N.

Sulla base dei risultati ottenuti dall'applicazione del modello, sono state quindi definite le direzioni di provenienza riportate in **Tab. 4.3**.

Nella tabella sono riportate la direzione di incidenza dell'onda locale (cioè la direzione dell'onda che si presenta all'imboccatura) utilizzata per la simulazione e la corrispondente onda al largo, il periodo dell'onda e le corrispondenti classi di altezza d'onda significativa, la frequenza percentuale delle classi considerate.

Queste ultime sono state calcolate sulla base del clima di **Tab. 4.2**, ipotizzando una distribuzione uniforme della frequenza all'interno di ciascun settore direzionale.

Direzione di incidenza dell'onda locale (°N)	Periodo (s)	Altezza (m)	Frequenza (%)
300	4	0.5-1.0	4.69
	4	0.5-1.0	4.69
290	5	1.1-1.5	0.11
	6	1.6-2.5	0.08
270	4	0.5-1.0	12.37
	5	1.1-1.5	0.48
	6	1.6-2.5	0.21
	7	2.6-3.0	0.12
	8	3.1-4.0	0.19
240	5	1.1-1.5	0.92
	6	1.6-2.5	0.19
	7	2.6-3.0	0.13
	8	3.1-4.0	0.17

4.3 Campo di moto ondoso

Mediante il modello di rifrazione sono stati calcolati i campi di moto ondoso su una vasta area, i cui dettagli sono riportati in **Fig. 4.1**, al fine di valutare, per ogni ondatazione simulata, le caratteristiche dell'onda all'imboccatura del porto.

Alcuni esempi grafici sono mostrati nelle **Fig. 4.6-4.9**: in ogni figura vengono riportati il diagramma di rifrazione dell'onda e le isolinee dell'altezza d'onda significativa calcolata dal modello.

5. AGITAZIONE ONDOSA ALL'INTERNO DI UN BACINO PORTUALE

Nel presente capitolo vengono evidenziate alcune brevi considerazioni teoriche su alcuni fenomeni che giocano un ruolo fondamentale nella sicurezza e efficienza in termini operazionali di un porto.

Sono analizzati in primo luogo i termini forzanti che, nelle condizioni tipiche della zona in esame, possono innescare e provocare fenomeni di agitazione ondosa all'interno del bacino, successivamente vengono presentati alcuni brevi cenni teorici su 'come' il porto può rispondere a tali sollecitazioni.

Vengono inoltre presentate le caratteristiche del modello numerico utilizzato per le varie simulazioni.

5.1 Agitazione causata dalle onde

Garantire la tranquillità all'interno del porto è essenziale non soltanto per assicurare un ancoraggio sicuro ma anche per l'efficienza delle operazioni portuali.

A tal fine essa viene generalmente valutata come il numero di giorni in cui, mediamente in un anno, si ha il superamento di una certa altezza d'onda.

Le onde in questione sono le onde 'tipiche', ossia le onde da vento tipicamente presenti nel corso dell'anno, derivabili appunto dal clima del moto ondoso locale.

La propagazione dell'onda all'interno del bacino crea un'agitazione ondosa la cui intensità, oltre all'ovvia dipendenza dall'altezza dell'onda incidente, è funzione della geometria del bacino, della tipologia delle strutture presenti nel porto e della loro capacità di assorbire l'energia ondosa. Maggiore è l'assorbimento, minore è l'agitazione ondosa.

Nel caso di strutture completamente riflettenti l'interazione tra onda incidente ed onda riflessa esalta il fenomeno con conseguente incremento dell'agitazione ondosa.

La penetrazione del moto ondoso all'interno di un bacino portuale è funzione del rapporto B/L , cioè delle dimensioni dell'imboccatura B ("gap") del porto, della lunghezza d'onda locale L (e quindi del periodo dell'onda e della profondità dell'acqua) e della direzione di provenienza θ dell'onda.

Se per geometrie semplici l'onda presente all'imboccatura è ragionevolmente approssimabile, in casi più complessi, come quello attuale, l'agitazione ondosa all'esterno della rada portuale influenza, in maniera anche consistente, la successiva penetrazione all'interno del bacino.

5.2 Diffrazione

La distribuzione delle onde all'interno di un porto è fortemente influenzata ai processi di diffrazione delle strutture di protezione.

La diffrazione delle onde è il fenomeno per cui si ha un trasferimento laterale di energia lungo la cresta dell'onda e si verifica, ad esempio quando le onde incontrano l'estremità di una struttura. Le onde vengono diffratte creando, nella zona 'in ombra', onde con fronti concentrici rispetto all'estremità della struttura stessa.

DEAM

Viene definito coefficiente di diffrazione $K_d=H_d/H_i$ il rapporto fra l'onda diffratta e l'onda incidente. Tale coefficiente è funzione, nota la posizione, della direzione e del periodo dell'onda incidente.

Ai fini pratici, due strutture distanti meno di circa cinque volte la lunghezza dell'onda incidente.

Per lunghezze d'onda minori o uguali all'apertura si verifica un'amplificazione dell'altezza d'onda che può raggiungere anche valori pari a 1.3 volte quelle dell'onda incidente per distanze di varie lunghezze d'onda. Nel caso invece di lunghezze d'onda maggiori dell'apertura il coefficiente di diffrazione è inferiore all'unità.

Ogni componente in frequenza dello spettro delle onde subisce una differente diffrazione: le frequenze maggiori nello spettro sono sottoposte a maggior decremento dell'altezza d'onda (e quindi di densità di energia). Poiché maggiori frequenze significa lunghezze d'onda più corte, lo spettro diffratto avrà uno spostamento della densità di energia verso le basse frequenze.

5.3 Riflessione

La riflessione è un fenomeno molto importante in un porto, in quanto riflessioni multiple e mancanza di una sufficiente dissipazione di energia all'interno del porto possono causare un incremento dell'energia e quindi dell'agitazione ondosca.

Per quanto concerne i coefficienti di riflessione, si ricorda che la quantità di energia riflessa da una struttura dipende essenzialmente dalla pendenza, scabrezza e permeabilità della struttura stessa, dalla ripidità dell'onda e dall'angolo di incidenza dell'onda sulla struttura.

Il grado di riflessione è in generalmente definito mediante un coefficiente K_{rf} dato da:

$$K_{rf} = H_r/H_i \quad [5.5]$$

dove H_r è l'altezza d'onda riflessa e H_i l'onda incidente.

Nota la scabrezza e la porosità della superficie, la riflessione dell'onda dipende da un parametro noto come 'surf similarity number':

$$\xi = 1 / (\cot \alpha \sqrt{H_i / L_0}) \quad [5.6]$$

dove α è la pendenza della struttura, H_i l'altezza d'onda incidente, L_0 la lunghezza d'onda al largo. Studi effettuati in laboratorio (Seelig e Arens 1981; Seelig 1983; Allsop e Hettiarachchi 1988) indicano che il coefficiente di riflessione può essere espresso mediante la seguente relazione:

$$K_{rf} = \frac{a\xi^2}{b + \xi^2} \quad [5.7]$$

dove i valori di a e b dipendono principalmente dalla geometria della struttura e dal fatto che le onde siano regolari o irregolari.

Il 'surf similarity number' utilizza la pendenza della struttura e l'altezza d'onda al piede della struttura stessa.

Dall'equazione [5.7] si vede come per pareti piane verticali il coefficiente di riflessione sia prossimo all'unità. Generalmente viene utilizzato il valore di 0.9 per tenere conto delle irregolarità della superficie.

5.4 Il modello matematico

Tutte le simulazioni dell'agitazione ondosa residua all'interno e all'esterno del bacino portuale sono state effettuate con il modello "PORTO", sviluppato da DEAM ed utilizzato in numerosi studi precedenti.

Finalità del modello è la valutazione del coefficiente di amplificazione/attenuazione dell'onda, rapporto tra l'ampiezza dell'onda effettiva e quella incidente, in vari punti-griglia del bacino in esame.

Il modello di agitazione ondosa, oltre alla geometria della rada portuale, richiede in input i seguenti parametri:

- coefficienti di riflessione per tutti i singoli tratti in cui sono state suddivise le opere portuali;
- periodo dell'onda;
- direzione dell'onda.

Il modello matematico utilizzato si basa sulla soluzione di un problema al contorno in cui all'interno del dominio deve essere soddisfatta l'equazione di Laplace (che esprime l'equazione di continuità nell'ipotesi di moto irrotazionale)

$$\nabla^2 \phi = 0$$

Nell'ipotesi che le onde siano di ampiezza infinitesima le condizioni al contorno sulla superficie libera impongono il soddisfacimento della relazione di dispersione lineare:

$$\omega^2 = kg \tanh(kh)$$

e, ammettendo che le pareti laterali siano verticali e che il fondo abbia profondità costante, il potenziale di velocità si può scrivere come somma del potenziale incidente e del potenziale diffratto:

$$\phi = \phi^{(I)} + \phi^{(D)}$$

Si impone che il potenziale incidente abbia la stessa struttura verticale di quello diffratto, ovvero sia del tipo:

$$\phi^{(D)}(x, y, z) = \varphi^{(D)}(x, y) \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)}$$

dove la funzione bidimensionale φ soddisfa a sua volta l'equazione di Laplace. Tale equazione si può scrivere in forma come integrale sul contorno del dominio fluido (Boundary Integral Equation - BIE):

$$\frac{1}{2} \varphi(x, y) = \int_{\Gamma} \frac{\partial G}{\partial n} \varphi - G \frac{\partial \varphi}{\partial n} d\Gamma$$

dove G è la funzione di Green.

DEAM

L'equazione al contorno viene risolta attraverso il metodo degli elementi al contorno (BEM - Boundary Element Method), imponendo la conoscenza, sui contorni, del potenziale di velocità o della sua derivata normale al contorno. Sui contorni laterali si impone una condizione nella forma:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} - jk\alpha\varphi = 0$$

dove j è l'unità immaginaria e α un coefficiente di assorbimento ($\alpha=0$ per pareti completamente riflettenti e $\alpha=1$ per pareti completamente assorbenti – condizione radiativa).

Il modello matematico è così capace di calcolare l'amplificazione o la riduzione del moto ondoso dovuto ai fenomeni di diffrazione e riflessione delle strutture.

L'area portuale in esame viene suddivisa in due domini: il primo esterno ("dominio dell'infinito") corrispondente al mare aperto, il secondo interno corrispondente alla configurazione portuale ("dominio interno").

Il dominio interno alla rada, D_1 , è limitato da pareti verticali e da un fondale costituito da una superficie la cui profondità è costante.

Il dominio esterno della rada, D_2 , ha fondale a profondità costante; la superficie di separazione da D_1 è costituita dalle imboccature della rada portuale.

L'onda progressiva incidente è approssimata da un'onda di Airy in acqua di profondità finita costante (dominio D_2) di cui sono noti ampiezza, periodo, direzione di propagazione (riferita ad un sistema di riferimento fisso).

Tale caratterizzazione del moto ondoso può essere estesa a trattare casi in cui è assegnata la densità spettrale di energia $S(\omega, \theta)$ in funzione della pulsazione e della direzione.

I confini del modello, la rada portuale e le strutture principali vengono suddivise in tratti: ogni tratto viene a sua volta suddiviso in elementi ed in ogni elemento ("mesh-point") viene posizionata una "sorgente potenziale" che rappresenta una soluzione.

Viene quindi costruito e risolto un sistema di equazioni in campo complesso la cui soluzione consente di determinare il potenziale di velocità e quindi l'altezza dell'onda in ogni elemento in cui è stata suddivisa l'area.

La soluzione del sistema lineare complesso è effettuata mediante la triangolarizzazione di Gauss.

Una dettagliata descrizione del modello utilizzato è fornita in **Allegato B**.

6. SCHEMATIZZAZIONE DELL'AREA

L'area di studio è stata schematizzata come mostrato in **Fig. 6.1**: sono stati considerati 167 tratti per un totale di 1670 mesh-points e un'area di 1700 x 2500 m, si è cioè utilizzato un'area notevolmente superiore a quella interessata dal porto, in modo da garantire risultati non affetti dalle condizioni ai contorni aperti del modello.

La direzione dell'asse Y del modello coincide con la direzione del Nord geografico.

Data la complessità del layout interno del progetto l'area è stata schematizzata e ottimizzata più volte per giungere ad una schematizzazione che risultasse ottimale per tutti i periodi d'onda considerati.

La profondità del bacino è stata assunta costante e pari a 4 m.

Nelle simulazioni effettuate sono stati utilizzati vari coefficienti di riflessione, in base al tipo di struttura presente nel tratto e alla lunghezza d'onda analizzata.

I valori del coefficiente di riflessione, calcolati mediante la formula [5.5] con $a=0.6$ e $b=0.66$, sono i seguenti:

- tratti a parete verticale: $K_{rf} = 90\%$
- tratti di spiaggia: $K_{rf} = 0\%$
- tratti misti: $K_{rf} = 40\%$
- tratti scogliere 1:1 $K_{rf} = 50\%$
- tratti scogliere 1:2 $K_{rf} = 30\%$
- confini del modello: $K_{rf} = 0\%$

I confini del modello sono stati cioè caratterizzati da assorbimento totale dell'energia, in modo da evitare riflessioni varie che avrebbero potuto interferire con i risultati. Analogamente è stata considerata totalmente assorbente la spiaggia.

Secondo la metodologia già utilizzata nella fase precedente, si è ritenuto opportuno studiare prima in maniera dettagliata l'imboccatura. Dati gli onerosi tempi di calcolo dovuti della schematizzazione precedentemente illustrata, è stata individuata una nuova schematizzazione in modo da focalizzare l'attenzione sul comportamento della sola zona di avamposto.

La schematizzazione è riportata in **Fig. 6.2**: sono stati considerati 97 tratti per un totale di 940 mesh-points mentre l'area totale è rimasta invariata ossia 1700X 2500 m.

I runs del modello in questo caso sono stati fatti sia in condizioni di totale assorbimento, sia in condizione di totale riflessione, sia fornendo valori del coefficiente di riflessione riportati nella precedente tabella.

7. Risultati delle simulazioni

Nel presente capitolo vengono riassunti i risultati ottenuti dall'applicazione del modello in termini del coefficiente di attenuazione/amplificazione per il layout di progetto, successivamente vengono analizzati e discussi i risultati in termini di altezza d'onda. Si ricorda che in tutte le simulazioni è stata considerata un'altezza d'onda unitaria, per avere una visualizzazione immediata dei coefficienti di attenuazione o di amplificazione del moto ondoso nei vari punti considerati.

Per ogni esempio viene mostrato un grafico contenente le isolinee del coefficiente di amplificazione/attenuazione dell'onda ($K=H/H_i$, rapporto tra l'altezza d'onda effettiva e quella incidente).

I risultati hanno mostrato una discreta generale tranquillità nelle darsene, mentre l'imboccatura è ovviamente interessata da valori di altezza d'onda maggiori. I risultati che, limitatamente alle 2 direzioni che, nel corso dei vari studi effettuati si sono dimostrate quelle che inducono maggiore agitazione nell'avamposto e cioè la 300 e la 290°N, sono riportati nelle **Figg 7.1 – 7.2**.

- **Onde provenienti da 300°N (Fig. 7.1):**
Le onde provenienti da queste direzione penetrano nell'avamposto con scarsa attenuazione. Nella zona centrale dell'avamposto si ha un coefficiente di attenuazione dell'ordine di 0.8, mentre la zona riservata alle imbarcazioni commerciali (ex "zona del triangolino") risulta invece caratterizzata da valori del coefficiente di attenuazione di 0.2-0.3.
- **Onde provenienti da 290°N (Fig. 7.2):**
Per onde da tale direzione si hanno valori del coefficiente di amplificazione dell'ordine di 0.5-0.6 nella zona più prossima all'imboccatura e di 0.2-0.3 nell'area dell'ex triangolino.

Su suggerimento della Capitaneria di Porto era anche stata studiata una soluzione caratterizzata dalla presenza di un piccolo molo perpendicolare alla banchina posto nell'area del triangolino. I risultati ottenuti, ripetendo le simulazioni in maniera del tutto analoga a quelle presentate nelle figure precedenti, erano i seguenti:

- **Onde provenienti da 300°N (Fig. 7.3):**
L'effetto di un molo lungo 20 m è quello di diminuire leggermente il valore del coefficiente di attenuazione nell'area immediatamente contigua al molo stesso, mentre vengono lasciati inalterati i valori di agitazione nella zona più lontana dal molo: in pratica l'effetto è quello di creare una zona più tranquilla per una fascia che si estende per circa 30 m lungo il molo e di ampiezza 20 m via via decrescente.
- **Onde provenienti da 290°N (Fig. 7.4):**
L'effetto del molo perpendicolare di protezione è quello di proteggere meglio l'area retrostante, dove i valori del coefficiente di attenuazione assumono valori di 0.2, praticamente costanti su tutta la zona interessata dall'ormeggio.

DEAM

In termini di altezza d'onda presente all'interno dell'imboccatura, si è calcolato l'altezza d'onda significativa più elevata, moltiplicando il valore del coefficiente di attenuazione calcolato dal modello per il valore dell'altezza d'onda antistante l'imboccatura, calcolato dal modello di rifrazione.

E' stato trascurato il coefficiente di attrito, in modo da presentare risultati cautelativi. Sono stato peratanto ottenuti i seguenti valori di altezza d'onda:

- **per onde da 300°N:** altezza d'onda significativa all'imboccatura 0.9 m, lunghezza d'onda locale 21 m;
 - zona centrale della darsena: 72 cm;
 - zona ex-triangolino in assenza di molo di protezione si alternano così zone di 18 e 27 cm;
 - zona ex-triangolino con molo di protezione: 14 cm per una fascia di circa 30 m, poi 27 cm.

- **per onde da 290°N:** altezza d'onda significativa all'imboccatura 1.3 m, lunghezza d'onda locale 28 m;
 - zona centrale della darsena: 78 cm;
 - zona ex-triangolino in assenza di molo di protezione: 26 cm;
 - zona ex-triangolino con molo di protezione: 20 cm per una fascia di circa 30 m, poi 26 cm.

Le **Figg. 7.5 e 7.6** mostrano esempi delle simulazioni effettuate su tutta l'area portuale relativamente alla configurazione finale. Gli esempi si riferiscono alle direzioni 290°N per onde caratterizzate da periodi dell'ordine dei 6 s e 270°N per onde caratterizzate da periodi di 7 s.

Ulteriori esempi di quanto effettuato sono presentati nelle **Figg. 7.7-7.11**, relativi ad una configurazione precedente anch'essa ampiamente esaminata e discussa.

8. Analisi e discussione dei risultati

Prima di analizzare ed interpretare i risultati, si ritiene opportuno sottolineare alcuni aspetti che, se trascurati, possono portare ad erronee interpretazioni:

- il primo aspetto è relativo al fatto che il modello utilizzato non è stato calibrato su dati misurati, non disponibili nell'area in esame (e lungo tutta la costa) e quindi i risultati debbono essere letti non in termini assoluti, ma esclusivamente in termini relativi, cioè come confronto tra situazioni differenti;
- il secondo aspetto è quello dell'attrito: il modello non può tenere conto dell'attrito, la qual cosa comporta che le simulazioni forniscono risultati del tutto cautelativi, considerando anche il fatto che, vista la bassa profondità dei fondali, l'effetto dell'attrito è tutt'altro che trascurabile;
- le isolinee presentate nei grafici si riferiscono ai valori del coefficiente di amplificazione/attenuazione così come calcolato dal modello: non sono cioè stati effettuati "smoothing" di nessun tipo sui grafici presentati. Tale scelta è giustificata dal fatto che si è preferito mostrare risultati oggettivi, non influenzati in alcun modo da interpolazioni soggettive. E' ovvio che in mare esiste uno smussamento naturale, e non esistono "gradini" tra i vari punti di calcolo del reticolo.
- la realizzazione dell'avamposto, e quindi delle varie strutture, comporta una serie di riflessioni parziali da parte delle strutture stesse che, sovrapponendosi, creano un'agitazione ondosa. Tale agitazione propria dell'avamposto è anche presente all'ingresso delle varie darsene: può quindi indurre, a sua volta, un'agitazione ondosa residua all'interno delle singole darsene.

Tenuto conto di tali aspetti importanti, si è poi calcolata l'altezza d'onda più elevata all'interno delle singole darsene, moltiplicando il valore del coefficiente di attenuazione calcolato dal modello (assumendo il massimo valore presente nelle singole darsene) per il valore dell'altezza d'onda antistante l'imboccatura (calcolato dal modello di rifrazione).

Il valore di altezza d'onda così ottenuto è stato moltiplicato poi per il valore del coefficiente di attrito corrispondente alla profondità di 4 m, desunto dal modello di rifrazione. Si è cioè voluto tener conto in questo caso anche dell'attrito, al fine di valutare nel modo più realistico possibile il valore di altezza d'onda ipotizzabile all'interno delle singole darsene.

I risultati sono presentati in **Tab. 8.1**: per ogni periodo e direzione considerati, vengono presentati i valori dell'altezza d'onda al largo, dell'altezza d'onda nell'area antistante l'imboccatura, l'altezza d'onda più elevata all'interno delle varie darsene (valori arrotondati ai 5 cm) e la corrispondente frequenza percentuale.

Dall'esame della tabella si osserva che:

- tra le varie darsene, quella della Madonnina, collegata direttamente con l'avamposto, risulta quella caratterizzata dai valori più elevati: l'onda è comunque contenuta (valori di 30-35 cm nello 0.27 % dei casi, minori o uguali a 25 cm nel 9,61% dei casi, valori inferiori o uguali a 10 cm nel 12.85% dei casi);
- la Darsena Europa, alla quale si accede attraverso la darsena Madonnina, presenta valori massimi molto simili, ma con frequenza percentuale inferiore per i

DEAM

valori più elevati e inferiore per i valori più bassi (rispettivamente 0.19%, 9.79% e 12.96 %);

- la Darsena Pescherecci è in genere caratterizzata da valori inferiori dell'ordine dei 10 cm (17,65% dei casi). Si hanno valori di 20-25 cm nello 0.41% degli eventi e di 35 cm nello 0.19% dei casi.
- da notare che i valori di 35 cm corrispondono a mareggiate caratterizzate da altezze significative al largo di 4 m e di 3.3 m a costa.

Sembra pertanto di poter concludere che:

- nella grande maggioranza delle situazioni il bacino portuale è caratterizzato da una sufficiente tranquillità;
- l'avamposto è caratterizzato da una certa agitazione, in corrispondenza delle mareggiate da 290 e 300°N, nella parte centrale e orientale, mentre la zona occidentale, detta del "triangolino" risulta relativamente più tranquilla. L'agitazione è notevole per la direzione 300°N: se è vero che da questa direzione non possono provenire onde di notevole altezza, è però ovvio che altezze d'onda anche di 1 m che si presentino all'imboccatura si propagano verso la parte orientale dell'avamposto imperturbate o addirittura amplificandosi leggermente;
- le darsene presentano valori di agitazione ondosa tali da garantire una notevole tranquillità; solo in corrispondenza di forti mareggiate, caratterizzate da una frequenza di occorrenza molto bassa, si osservano valori comunque accettabili.

9. CONCLUSIONI E SUGGERIMENTI

Si ricorda che il porto di Viareggio, nella situazione attuale, è interessato da alcuni problemi oceanografici che, se non opportunamente considerati e risolti, possono comportare risvolti negativi permanenti con conseguente abbandono o limitato utilizzo da parte delle imbarcazioni medie piccole.

La fase di revisione del Piano Progettuale giunge dunque opportuna anche per le risoluzioni di tali problemi.

La necessità di riorganizzare le varie darsene interne ha comportato in pratica, la progettazione di un avamporto: i motivi e la necessità di prevedere tale avamporto esulano dallo scopo del presente studio.

Rimane il fatto che, a causa della realizzazione dell'avamporto, e quindi delle realizzazioni di varie strutture, l'onda che penetra all'interno del bacino è soggetta ad una serie di riflessioni parziali che, sovrapponendosi, creano un'agitazione ondososa. Tale agitazione propria dell'avamporto è anche presente all'ingresso delle varie darsene: potrebbe quindi indurre, a sua volta, un'agitazione ondososa all'interno delle singole darsene.

Per verificare tale fatto è stato applicato un modello di estremo dettaglio che ha

permesso di simulare le varie condizioni di moto ondososo che si presentano

all'imboccatura del porto prima e successivamente di analizzare la penetrazione

all'interno delle varie darsene.

I risultati delle simulazioni hanno mostrato che nella grande maggioranza delle situazioni il bacino portuale, in particolare all'interno delle darsene, è caratterizzato da una sufficiente tranquillità.

Diversa è la situazione nell'avamporto, che risulta caratterizzato da una certa agitazione, ma solo in corrispondenza delle mareggiate da 290 e 300°N, nella parte centrale dell'area. La zona occidentale, quella attualmente detta del "triangolino" risulta relativamente più tranquilla in tutte le situazioni.

La configurazione dell'avamporto, senz'altro accettabile in una fase di progettazione preliminare come quella attuale, può essere tuttavia ottimizzata ulteriormente, prevedendo tutti quei miglioramenti atti a ridurre il più possibile la riflessione del moto ondososo da parte delle strutture, per garantire una ulteriore riduzione dell'agitazione soprattutto in corrispondenza delle mareggiate da 290-300°N.

Rimane del tutto ovvio, ma si ritiene comunque doveroso sottolinearlo, che il presente studio si riferisce alla presenza di adeguati fondali (4-5 m) nei pressi dell'imboccatura, cioè a fondali già dragati (come previsto dalla Regione Toscana) e ad un'imboccatura non affetta dalla presenza di bassi fondali o comunque parzialmente interrata.

10. BIBLIOGRAFIA

1. Grancini G.G., Iovenitti L., De Filippi G.L., (1979) – Analisi del moto ondoso nel Canale di Sicilia – Cetena, Genova
2. Rampolli M., Biancardi A., De Filippi G.L., 1996 – Meteo-oceanographic premises for structural design purposes in the Adriatic Sea: acquisition and processing of data – OMAE, Florence (Italy)
3. Mei, C.C. (1989) – The applied dynamics of ocean surface waves – World Scientific
4. C.E.R.C., (1984) – Shore Protection Manual – Dep. of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington
5. Goda Y., (1985) - Random Seas and Design of Maritime Structures – University of Tokyo Press,
6. Coastal Engineering Manual (2001) Dep. of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington

DEAM

INDICE DELLE TABELLE

- TAB. 4.1 - CLIMA DI MOTO ONDOSI AL LARGO DI VIAREGGIO:
DISTRIBUZIONE DELLA FREQUENZA PERCENTUALE DELL'ALTEZZA
D'ONDA PER DIREZIONE DI PROVENIENZA
- TAB. 4.2 - CLIMA DEL MOTO ONDOSI NELL'AREA ANTISTANTE IL PORTO –
PROFONDITA' DI CALCOLO: 10 m
- TAB. 4.3 - CARATTERISTICHE DELLE ONDE FORNITE IN INPUT AL MODELLO
MATEMATICO
- TAB. 8.1 - SINTESI DELL'AGITAZIONE ONDOSI ALL'INTERNO DELLE DARSENE

DEAM

DIR	Hs (m)													
	(°N)	.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	TOT
0	2.83	.83	.12	.04	.00	.02	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	3.84
30	4.68	.79	.33	.12	.00	.00	.00	.02	.00	.00	.00	.00	.00	5.94
60	10.20	1.49	.41	.08	.04	.04	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	12.26
90	7.69	.65	.31	.20	.02	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	8.87
120	4.78	.69	.28	.12	.02	.02	.04	.00	.00	.00	.00	.00	.00	5.95
150	5.41	1.45	.29	.24	.02	.06	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	7.47
180	3.89	.87	.22	.12	.04	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	5.14
210	4.13	1.12	.59	.22	.12	.01	.02	.06	.00	.02	.00	.00	.00	6.29
240	5.51	1.61	1.16	.47	.24	.12	.26	.04	.00	.02	.00	.02	.02	9.45
270	5.76	1.67	.62	.49	.24	.19	.16	.08	.06	.00	.00	.00	.00	9.27
300	4.86	.59	.16	.26	.02	.02	.02	.00	.02	.00	.00	.00	.00	5.95
330	6.06	.53	.12	.06	.04	.02	.02	.02	.00	.00	.00	.00	.00	6.87
TOT	65.80	12.29	4.61	2.42	0.80	0.50	0.52	0.22	0.08	.04	.00	.02	.02	87.30
CALMA	12.70													

TAB. 4.1 – CLIMA DI MOTO ONDOSO AL LARGO DI VIAREGGIO: DISTRIBUZIONE DELLA FREQUENZA PERCENTUALE DELL'ALTEZZA D'ONDA PER DIREZIONE DI PROVENIENZA

DIR	ALTEZZA D'ONDA H_s (m)										
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	TOT	
(°N)											
180	2.36	0.37	0.03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.76	
210	6.75	2.31	0.37	0.06	0.01	0.03	0.02	0.0	0.0	9.55	
240	8.51	3.46	0.92	0.14	0.05	0.08	0.14	0.03	0.01	13.34	
270	8.94	3.43	0.48	0.15	0.06	0.06	0.12	0.07	0.0	13.31	
300	8.13	1.24	0.11	0.06	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	9.56	
330	3.68	0.22	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.90	
TOT	38.37	11.03	1.91	0.41	0.14	0.17	0.28	0.10	0.01	52.42	
FREQUENZA DEGLI EVENTI RESIDUI										47.58	

TAB. 4.2 – CLIMA DI MOTO ONDOSO NELL'AREA ANTISTANTE IL PORTO –
PROFONDITA' DI CALCOLO: 10 m

DIREZIONE DI PROVENIENZA DELL'ONDA	PERIODO SIGNIFICATIVO	ALTEZZA SIGNIFICATIVA	FREQUENZA
(°N)	Ts(s)	Hs(m)	(%)
300	4	0.5-1.0	4.69
	4	0.5-1.0	4.69
290	5	1.1-1.5	0.11
	6	1.6-2.5	0.08
	4	0.5-1.0	12.37
	5	1.1-1.5	0.48
270	6	1.6-2.5	0.21
	7	2.6-3.0	0.12
	8	3.1-4.0	0.19
	5	1.1-1.5	0.92
240	6	1.6-2.5	0.19
	7	2.6-3.0	0.13
	8	3.1-4.0	0.17

TAB.4.3 – CARATTERISTICHE DELLE ONDE FORNITE IN INPUT AL MODELLO MATEMATICO

ALTEZZA D'ONDA AL LARGO Hs(m)	DIREZIONEDI PROVENIENZA DELL'ONDA (gradi Nord)	PERIODO DELL'ONDA Ts (s)	ALTEZZA D'ONDA ALL'IMBOCCATURA Hs(m)	ALTEZZA D'ONDA PIU' ELEVATA ALL'INTERNO DEL PORTO			FREQUENZA (%)
				DARSENA MADONNINA	DARSENA EUROPA	DARSENA PESCHERECCI	
1.0	300	4	0.9	0.25	0.25	0.20	4.69
1.0		4	0.9	0.25	0.20	0.10	4.69
1.5	290	5	1.3	0.25	0.10	0.10	0.11
2.5		6	2.1	0.30	0.20	0.20	0.08
1.0		4	0.9	0.10	0.10	0.10	12.37
1.5		5	0.9	0.10	0.10	0.10	0.48
2.5	270	6	2.0	0.20	0.20	0.20	0.21
3.0		7	2.5	0.25	0.20	0.25	0.12
4.0		8	3.3	0.35	0.35	0.35	0.19

TAB. 8.1 – SINTESI DELL'AGITAZIONE ONDOSA ALL'INTERNO DELLE DARSENE

INDICE DELLE FIGURE

- FIG. 2.1 - UBICAZIONE DELL'AREA DI STUDIO
- FIG. 2.2 - CONFIGURAZIONE PORTUALE DI PROGETTO
- FIG. 2.3 - CARATTERISTICHE BATIMETRICHE NELL'AREA ANTISTANTE L'IMBOCCATURA DEL PORTO
- FIG. 4.1 - SCHEMA DEL MODELLO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE
- FIG. 4.2 - SETTORE 300° N – TRAIETTORIE DEGLI ORTOGONALI D'ONDA PER PERIODI DI 4 E 5 s
- FIG. 4.3 - SETTORE 300° N – TRAIETTORIE DEGLI ORTOGONALI D'ONDA PER PERIODI DI 6 E 7 s
- FIG. 4.4 - SETTORE 270° N – TRAIETTORIE DEGLI ORTOGONALI D'ONDA PER PERIODI DI 4 E 5 s
- FIG. 4.5 - SETTORE 270° N – TRAIETTORIE DEGLI ORTOGONALI D'ONDA PER PERIODI DI 6 E 7 s
- FIG. 4.6 - DIAGRAMMA DI RIFRAZIONE E ISOLINEE DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA PER ONDAZIONE DA 290° N CON PERIODO 5 s
- FIG. 4.7 - DIAGRAMMA DI RIFRAZIONE E ISOLINEE DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA PER ONDAZIONE DA 290° N CON PERIODO 6 s
- FIG. 4.8 - DIAGRAMMA DI RIFRAZIONE E ISOLINEE DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA PER ONDAZIONE DA 270° N CON PERIODO 7 s
- FIG. 4.9 - DIAGRAMMA DI RIFRAZIONE E ISOLINEE DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA PER ONDAZIONE DA 270° N CON PERIODO 8 s
- FIG. 6.1 SCHEMA GEOMETRICO DEL MODELLO UTILIZZATO PER LO STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSA IN TUTTO IL BACINO PORTUALE
- FIG. 6.2 SCHEMA GEOMETRICO DEL MODELLO UTILIZZATO PER LO STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSA ALL'IMBOCCATURA PORTUALE
- FIG. 7.1 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA ONDAZIONE DA 300° N – T = 4 s
- FIG. 7.2 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA ONDAZIONE DA 290° N – T = 5 s
- FIG. 7.3 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA

DEAM

ONDAZIONE DA 300° N – T = 4 s

FIG. 7.4 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA ONDAZIONE DA 290° N – T = 5 s

FIG. 7.5 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA NELLA CONFIGURAZIONE PORTUALE DI PROGETTO - 290° N – T = 6 s

FIG. 7.6 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA NELLA CONFIGURAZIONE PORTUALE DI PROGETTO - 270° N – T = 7 s

FIG. 7.7 - ISOLINEE DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA COEFF. ASSORBIMENTO A=0.5 NELL'AVAMPORTO

FIG. 7.8 - ISOLINEE DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA COEFF. ASSORBIMENTO A=0.5 NELL'AVAMPORTO

FIG. 7.9 - ISOLINEE DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA COEFF. ASSORBIMENTO A=0.5 NELL'AVAMPORTO

FIG. 7.10 - ISOLINEE DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA COEFF. ASSORBIMENTO A=0.5 NELL'AVAMPORTO

FIG. 7.11 - ISOLINEE DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA COEFF. ASSORBIMENTO A=0.5 NELL'AVAMPORTO

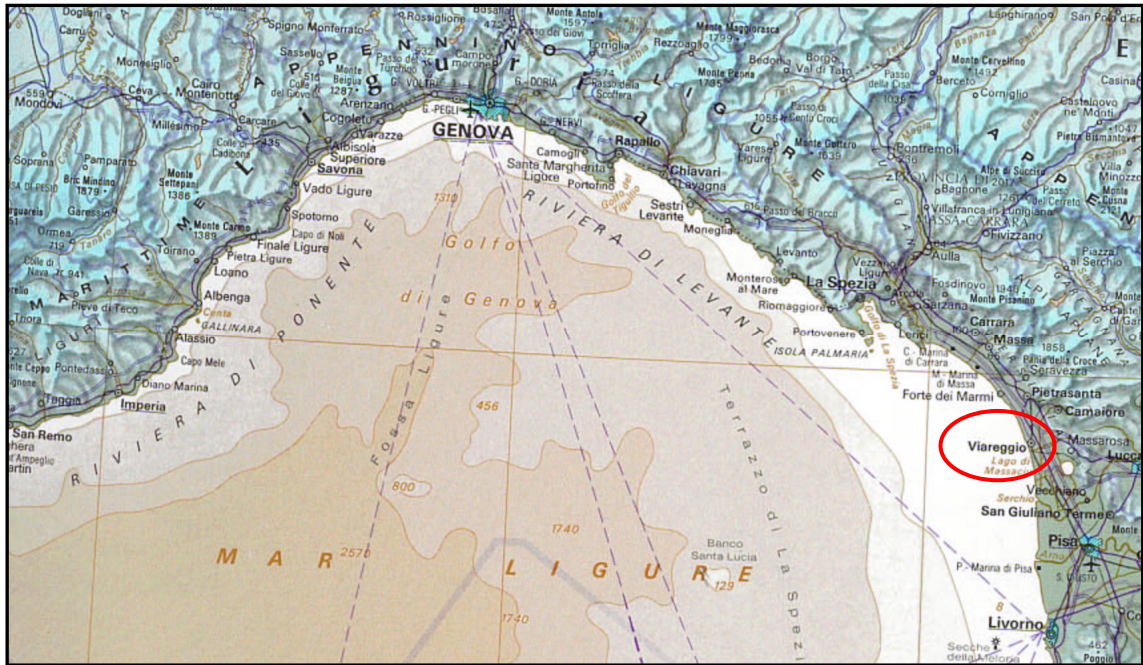


FIG. 2.1 – UBICAZIONE DELL'AREA DI STUDIO

CARATTERISTICHE BATIMETRICHE DEL MODELLO DI RIFRAZIONE

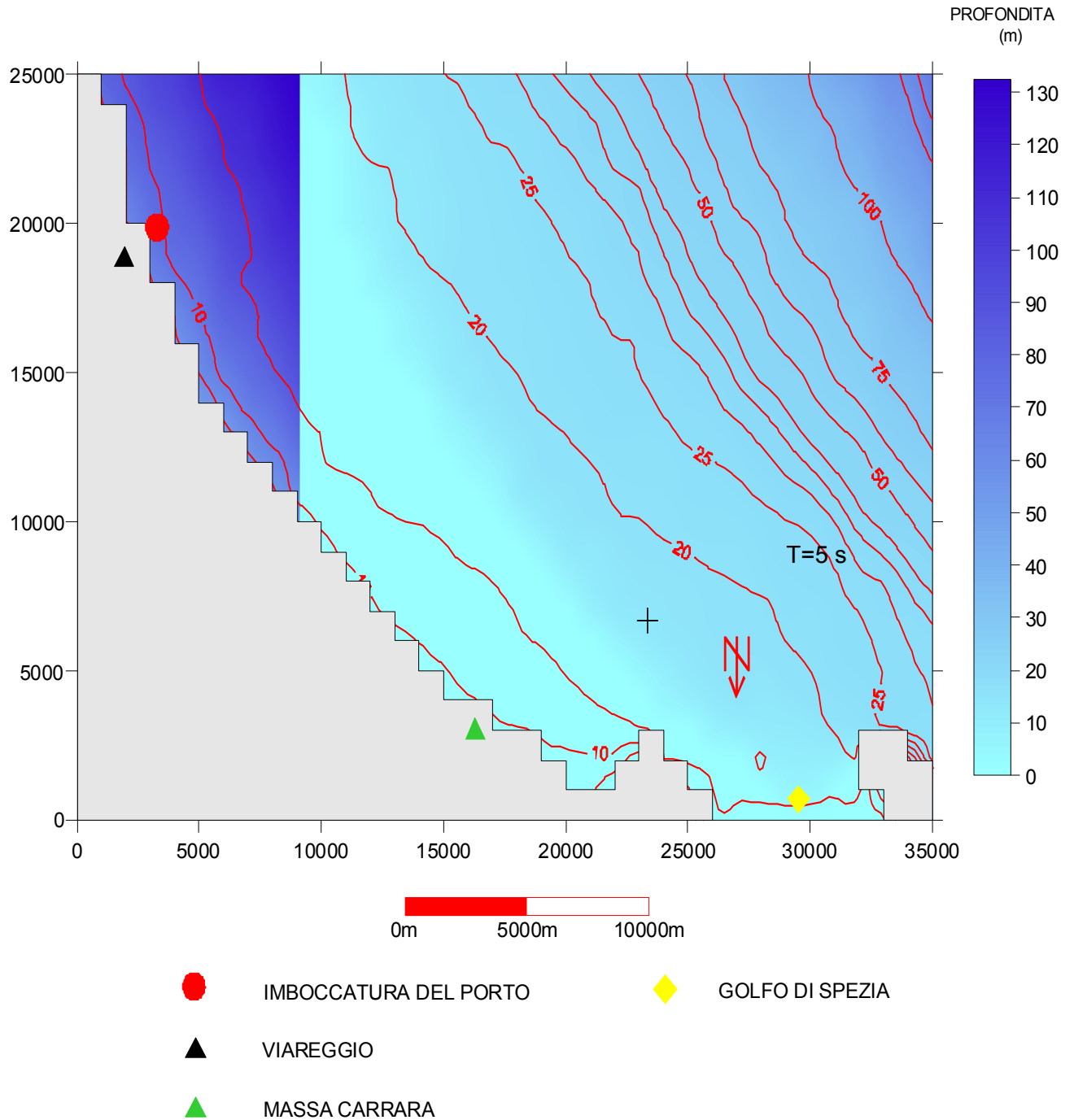


FIG. 4.1 - SCHEMA DEL MODELLO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE

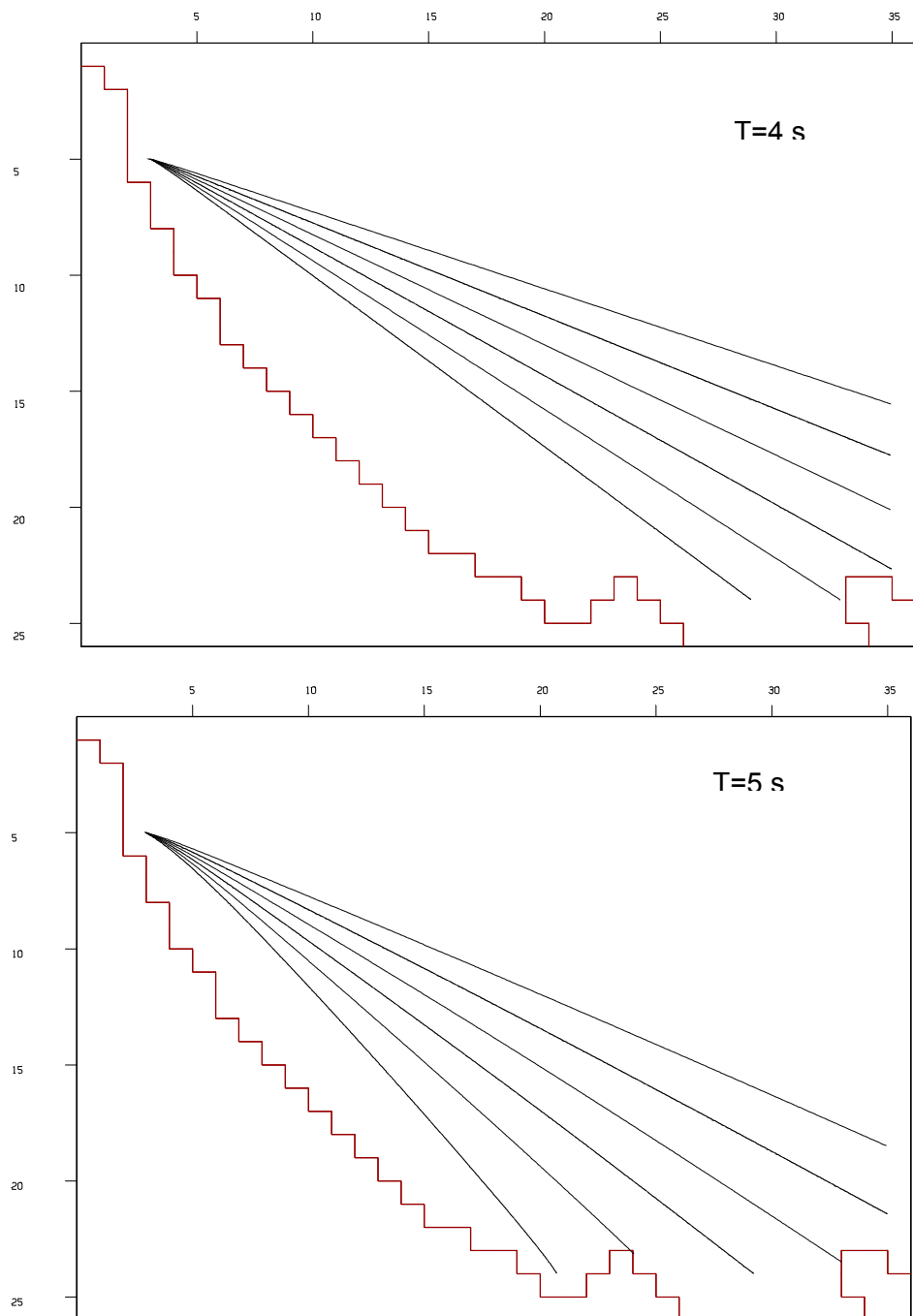


FIG. 4.2 - SETTORE 300° N – TRAIETTORIE DEGLI ORTOGONALI D'ONDA
PER PERIODI DI 4 E 5 s

DEAM

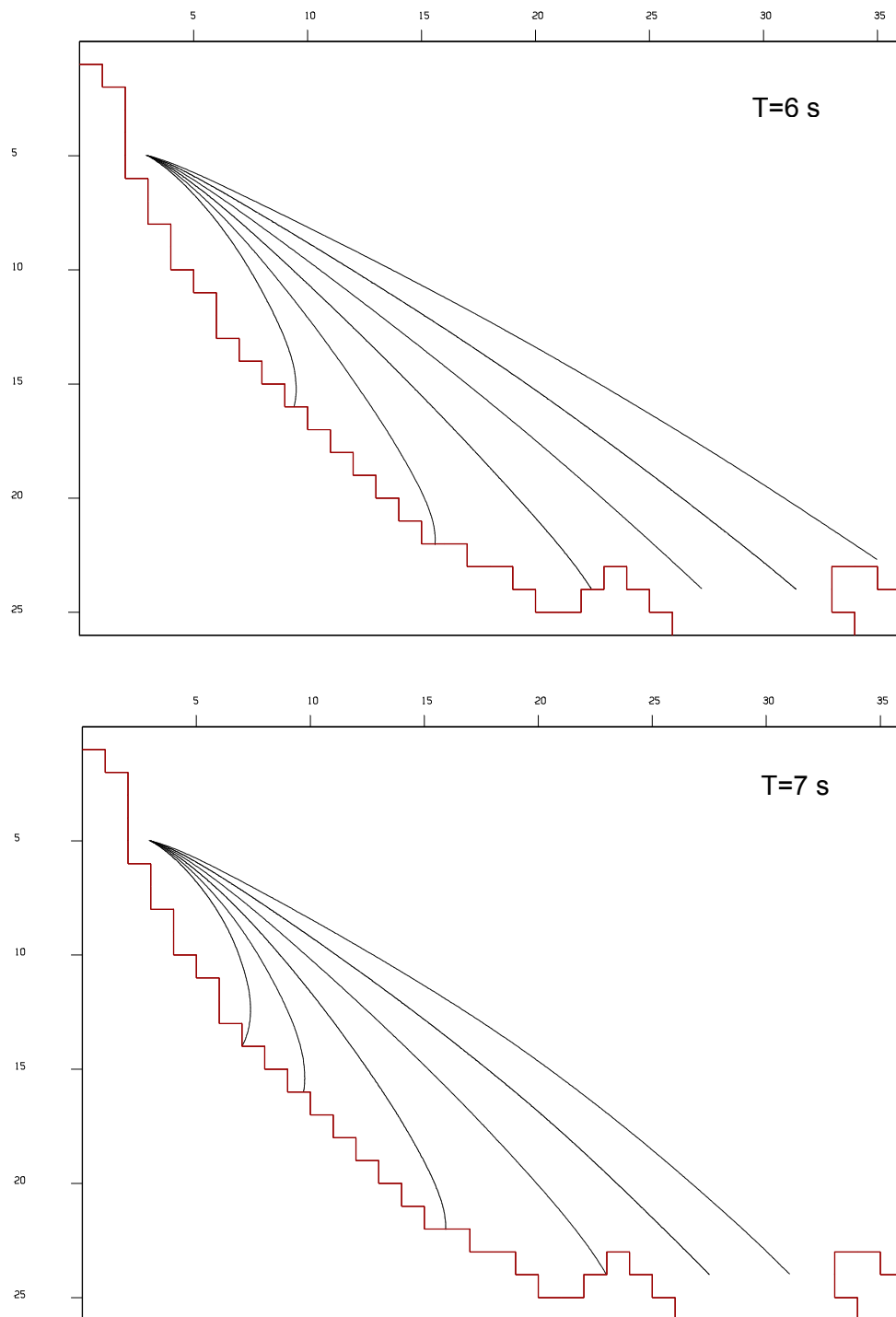


FIG. 4.3 - SETTORE 300° N – TRAIETTORIE DEGLI ORTOGONALI D'ONDA
PER PERIODI DI 6 E 7 s

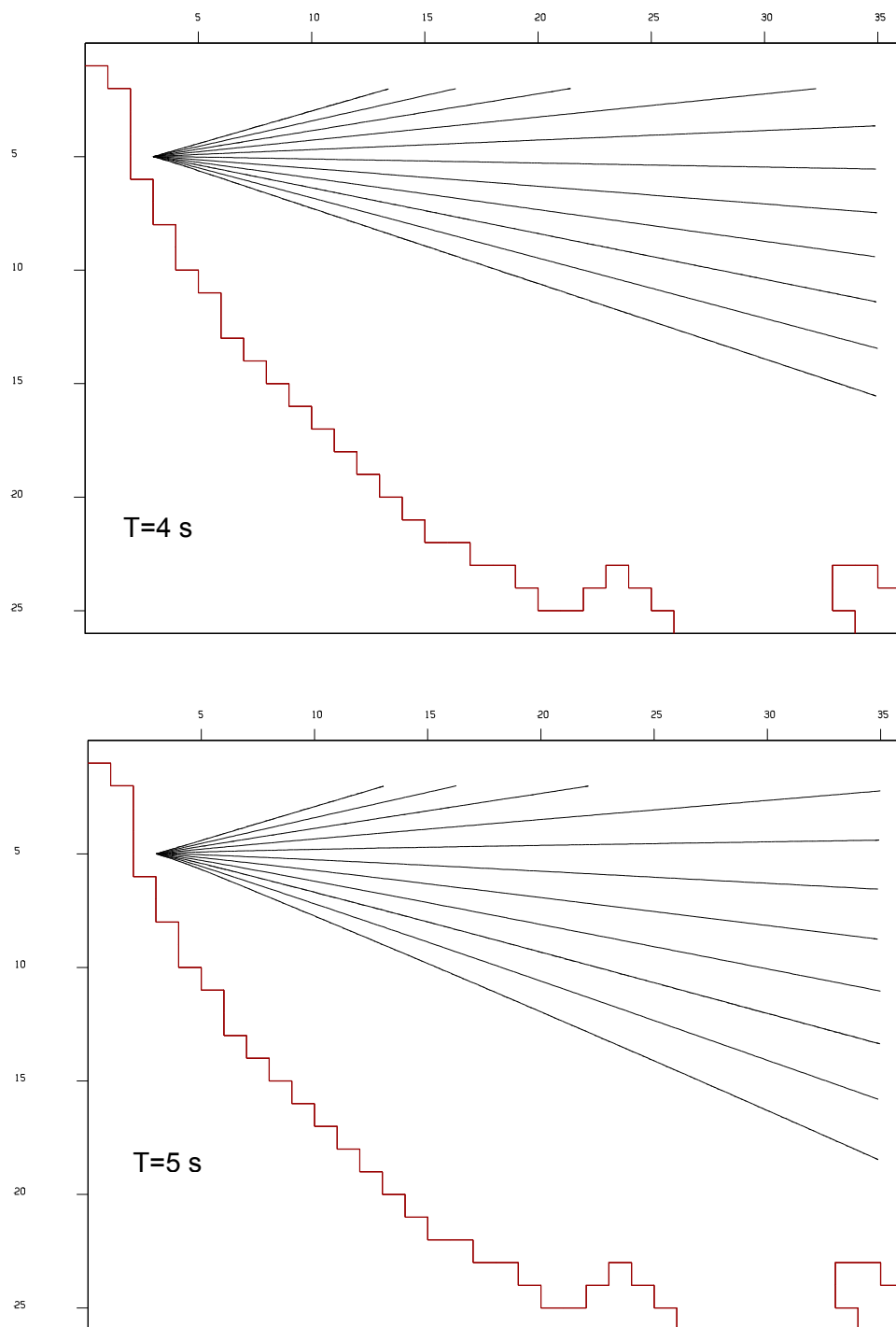


FIG. 4.4 - SETTORE 270° N – TRAIETTORIE DEGLI ORTOGONALI D'ONDA PER PERIODI DI 4 E 5 s

DEAM

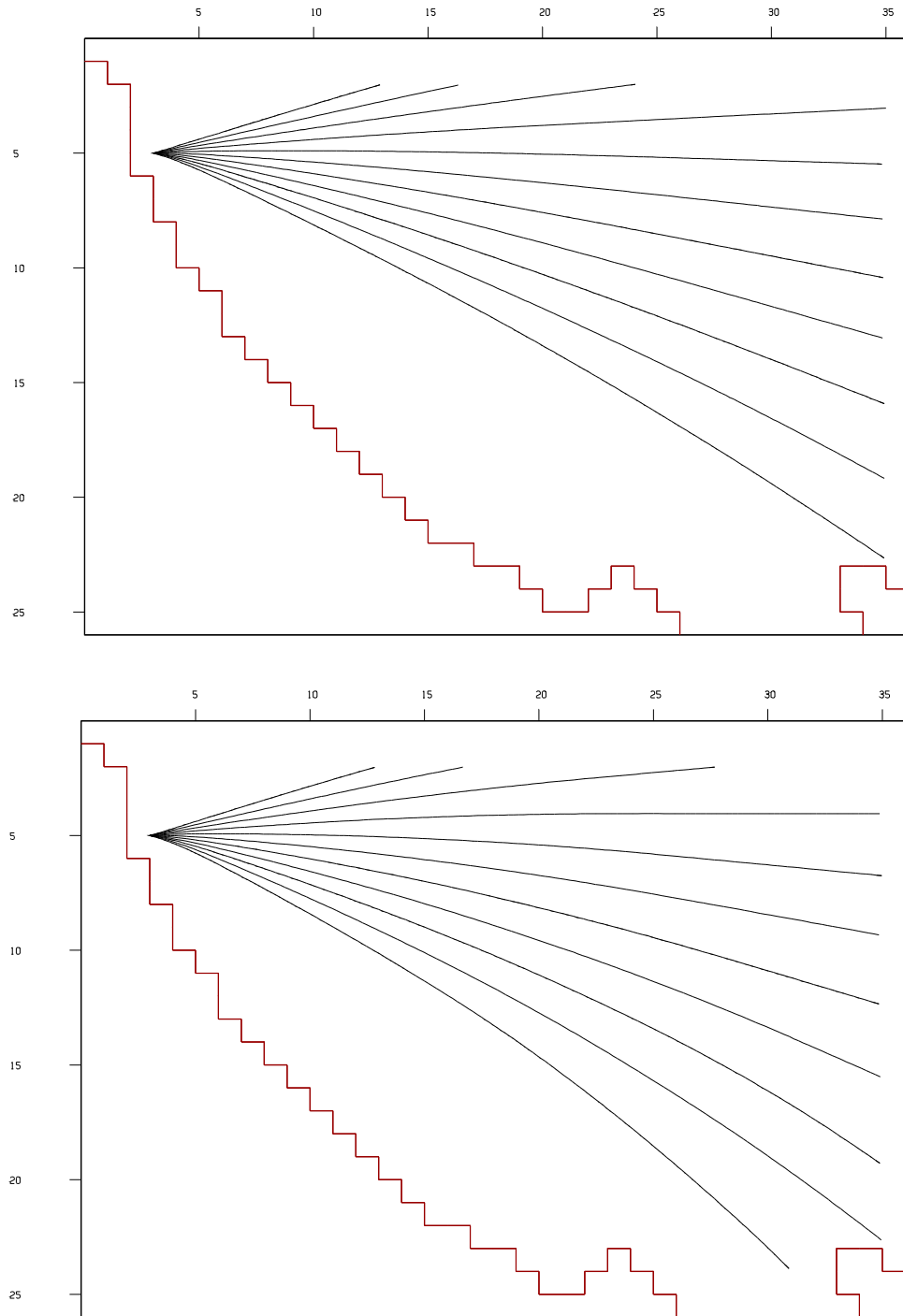
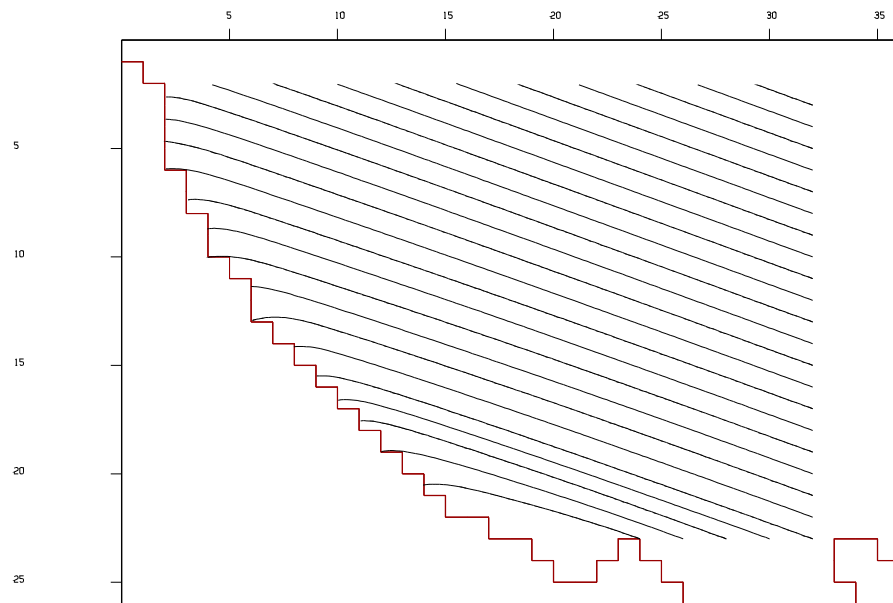
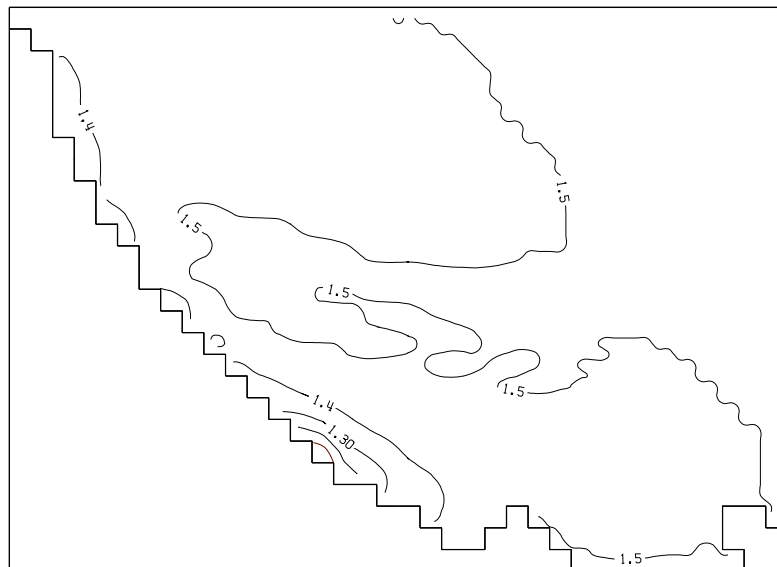


FIG. 4.5 - SETTORE 270° N – TRAIETTORIE DEGLI ORTOGONALI D'ONDA PER PERIODI DI 6 E 7 s



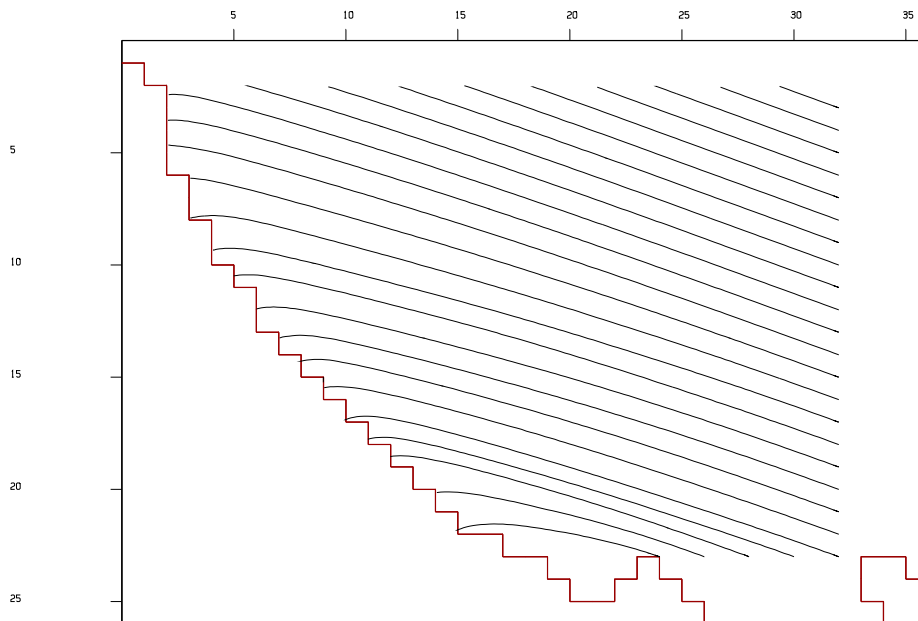
ONDAZIONE da 290° N, T=5 S

VIAREGGIO



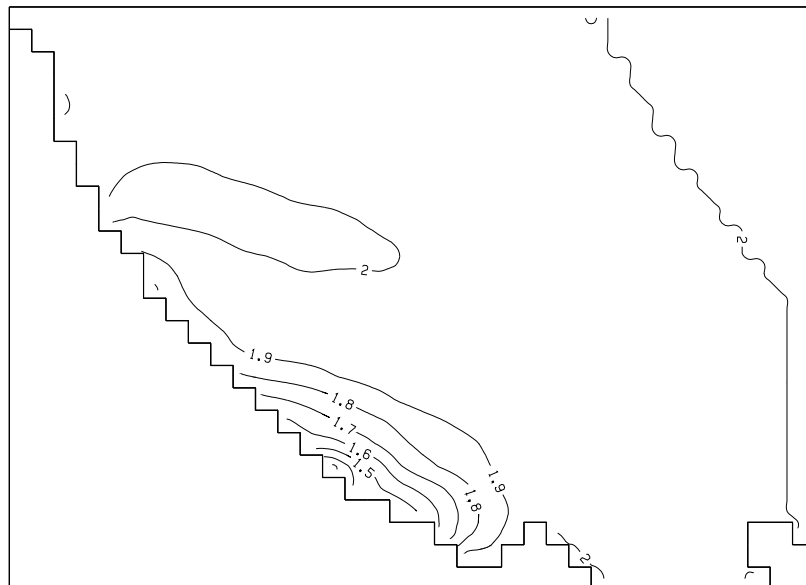
290° N - T = 5.0 s

FIG. 4.6 – DIAGRAMMA DI RIFRAZIONE E ISOLINEE DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA PER ONDAZIONE DA 290°N CON PERIODO 5 s



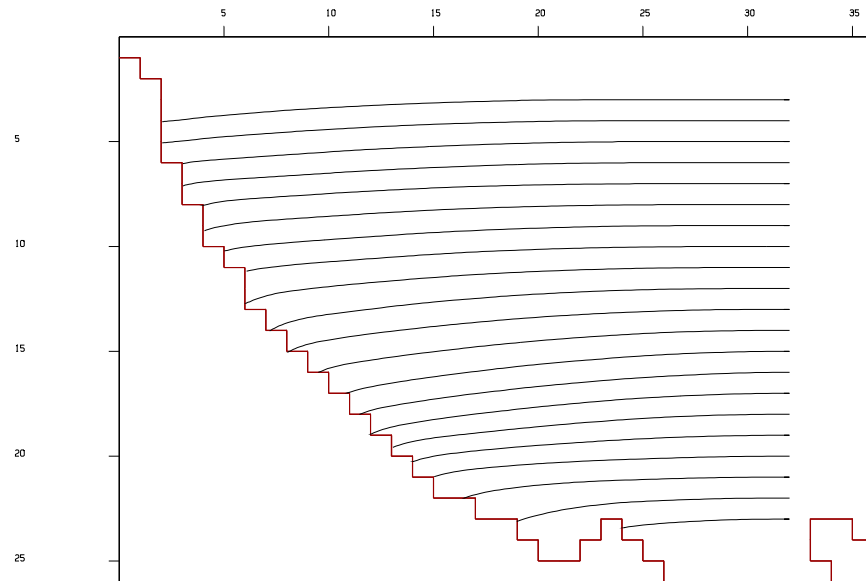
ONDAZIONE da 290° N, T=6 S

VIAREGGIO



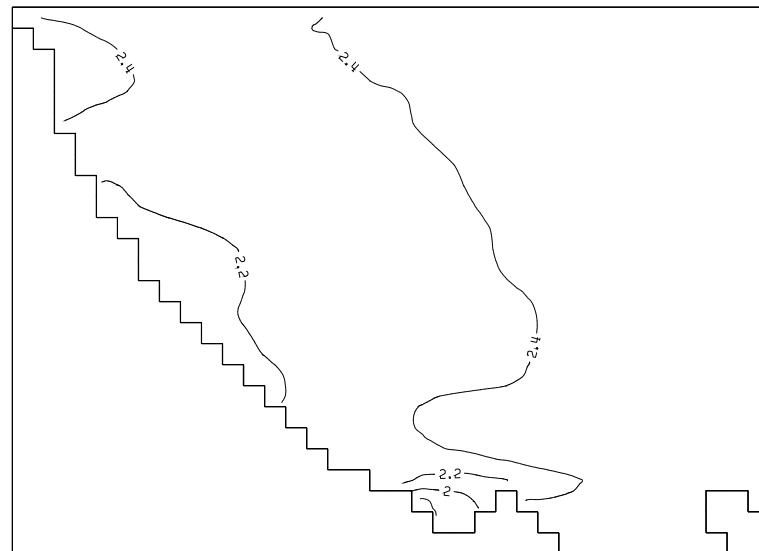
290° N - T = 6.0 s

FIG. 4.7 – DIAGRAMMA DI RIFRAZIONE E ISOLINEE DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA PER ONDAZIONE DA 290°N CON PERIODO 6 s



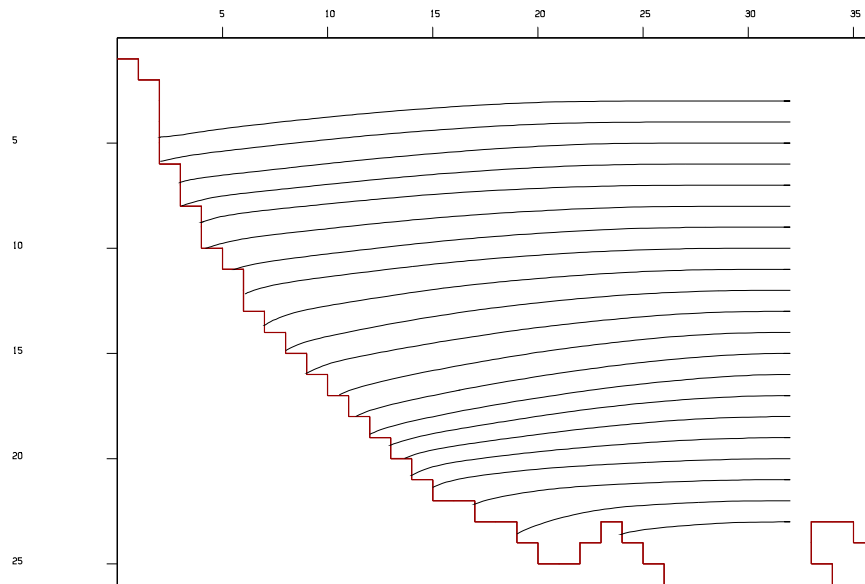
ONDAZIONE da 270° N, T=7 S

VIAREGGIO



270° N - T = 7.0 s

FIG. 4.8 – DIAGRAMMA DI RIFRAZIONE E ISOLINEE DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA PER ONDAZIONE DA 270°N CON PERIODO 7 s



ONDAZIONE da 270° N, T=8 S

VIAREGGIO



270° N - T = 8.0 s

FIG. 4.9 – DIAGRAMMA DI RIFRAZIONE E ISOLINEE DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA PER ONDAZIONE DA 270°N CON PERIODO 8 s

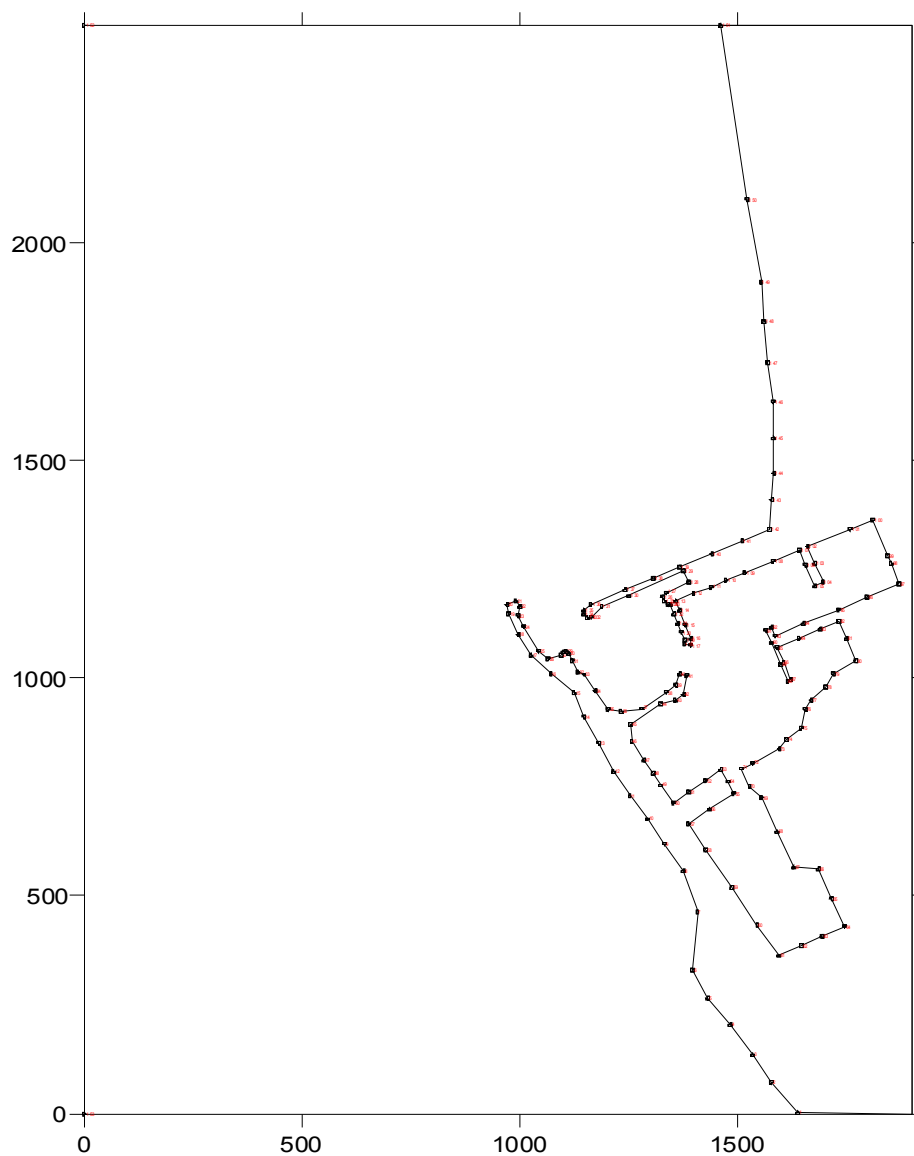


FIG. 6.1 – SCHEMA GEOMETRICO DEL MODELLO UTILIZZATO PER LO STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSA IN TUTTO IL BACINO PORTUALE



FIG. 6.2 - SCHEMA GEOMETRICO DEL MODELLO UTILIZZATO PER LO STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSA ALL'IMBOCCATURA PORTUALE

ONDAZIONE DA 300° N - T = 4 s
(RISULTATI VALIDI SOLO PER L'IMBOCCATURA)

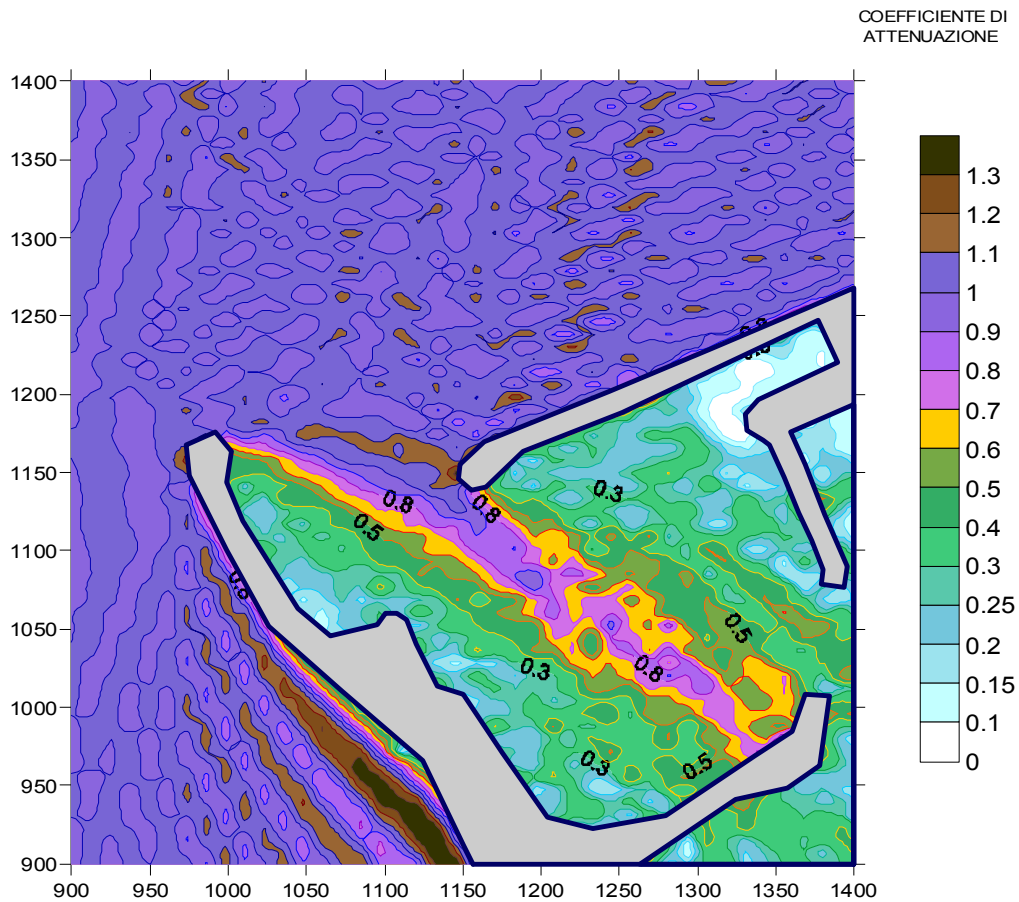


FIG. 7.1 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA
ONDAZIONE DA 300° N - T = 4 s

ONDAZIONE DA 290° N - T = 5 s
(RISULTATI VALIDI SOLO PER L'IMBOCCATURA)

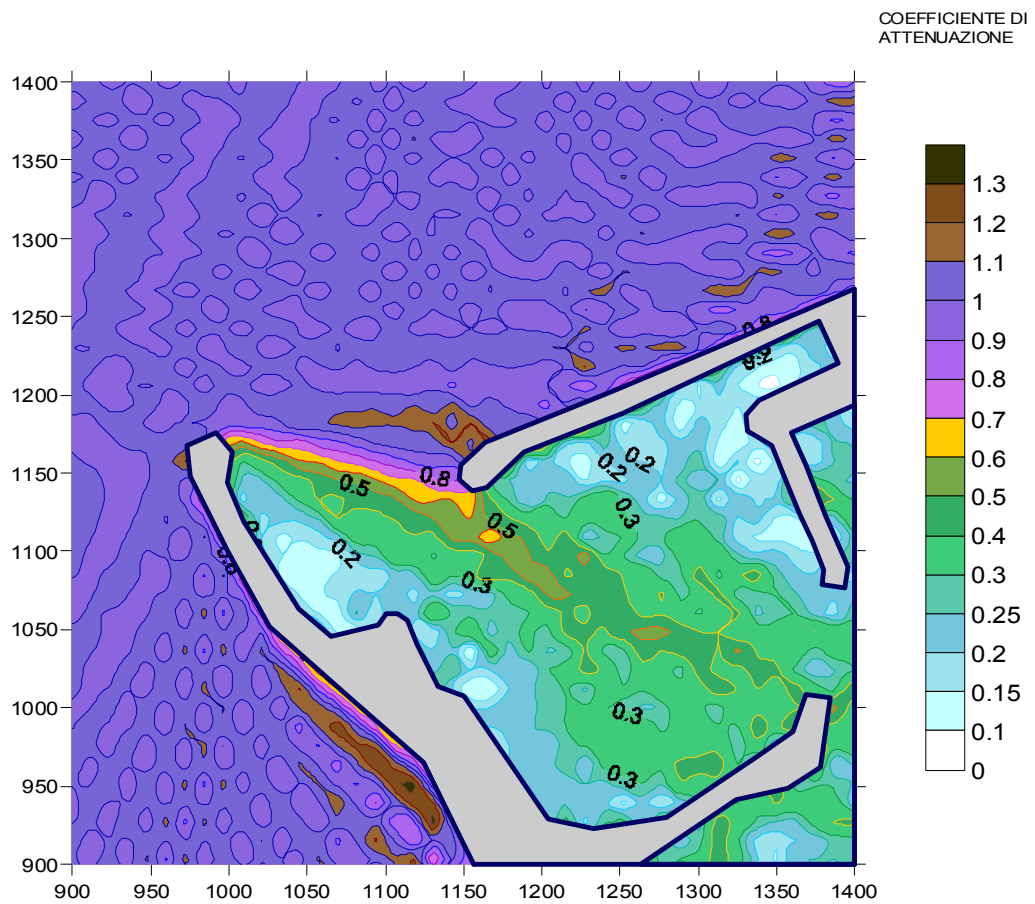


FIG.
7.2 -

VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA
ONDAZIONE DA 290° N - T = 5 s

ONDAZIONE DA 300°N - T = 4 s
 (RISULTATI VALIDI SOLO PER L'IMBOCCATURA)
 CON MOLO DI PROTEZIONE LUNGO 20 M

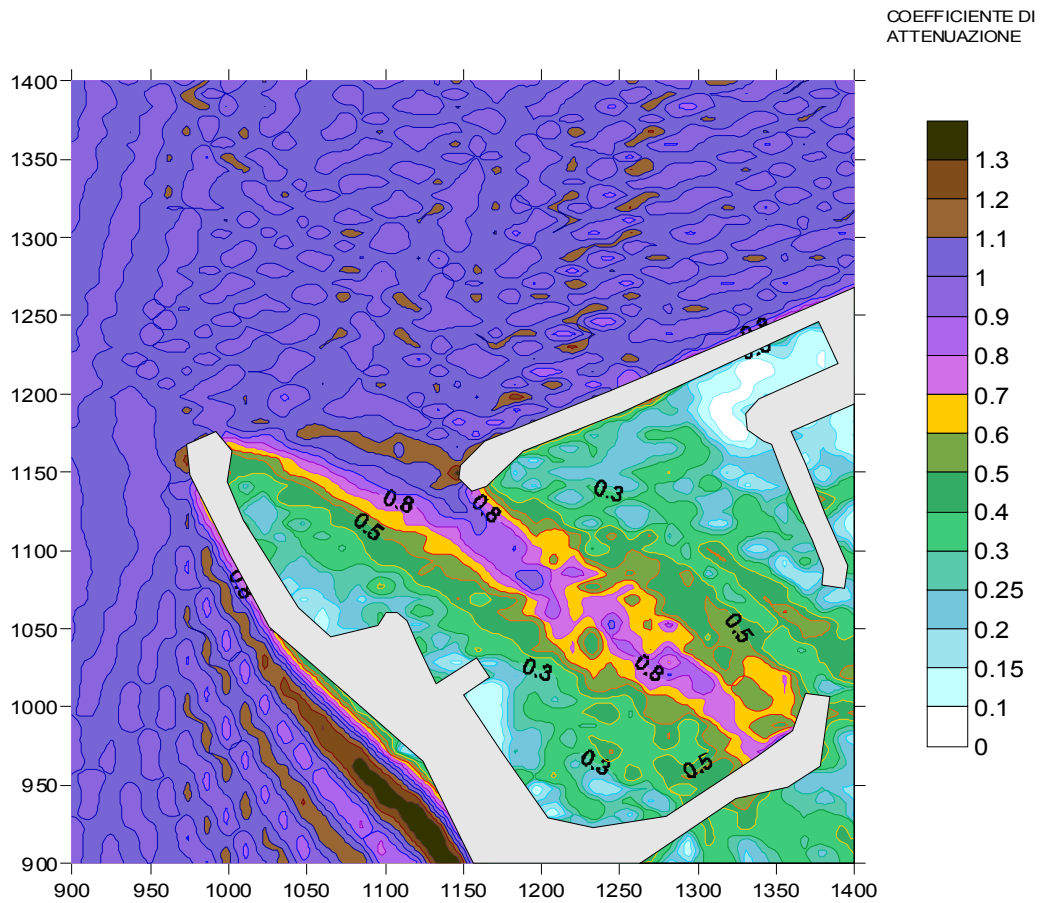


FIG. 7.3 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA ONDAZIONE DA 300° N – T = 4 s

ONDAZIONE DA 290° N - T = 5 s
 (RISULTATI VALIDI SOLO PER L'IMBOCCATURA)
 CON MOLO DI PROTEZIONE LUNGO 20 M

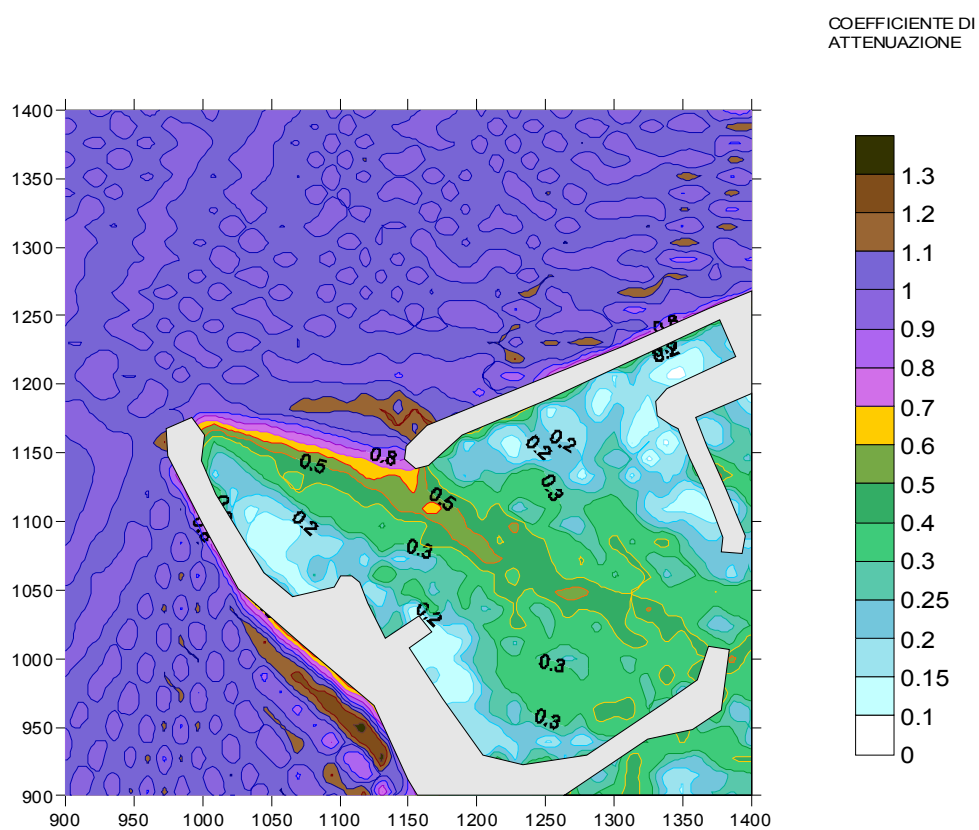
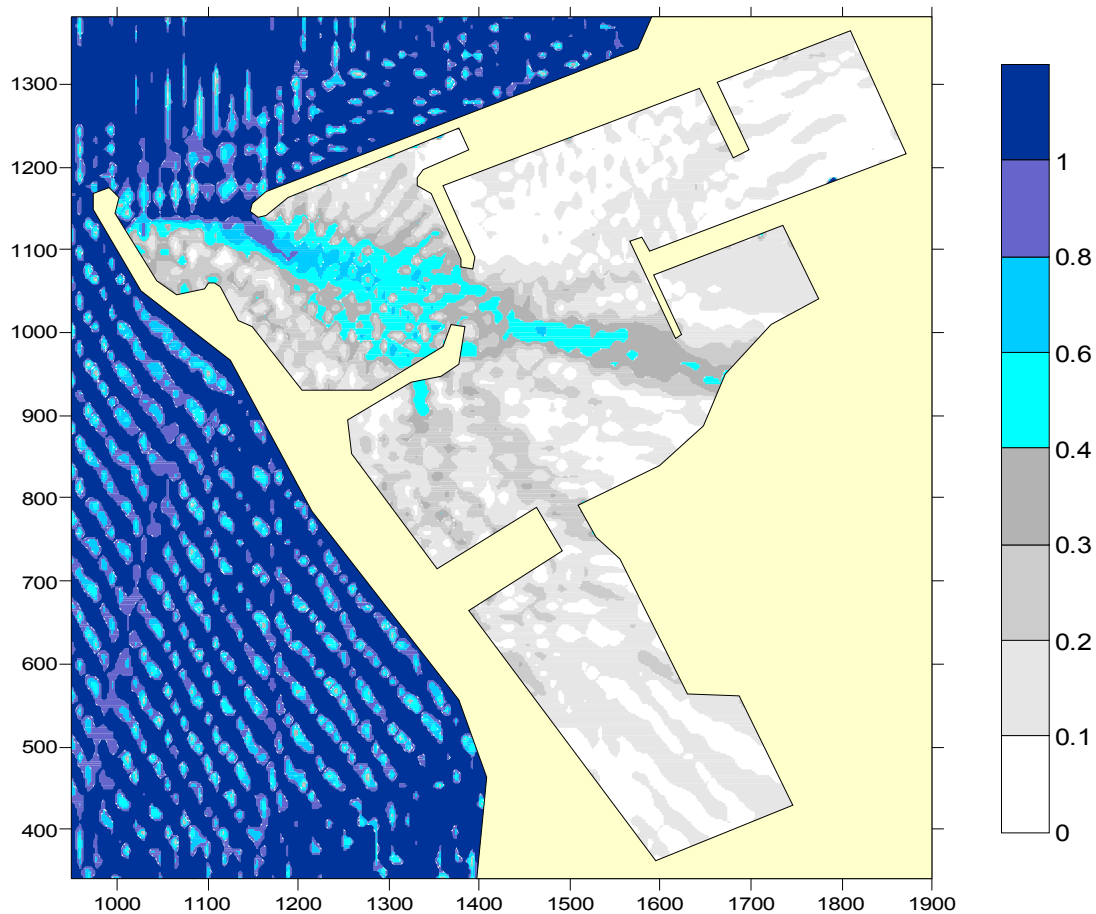


FIG. 7.4 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA ONDAZIONE DA 290° N - T = 5 s



290 N - 6 s

FIG. 7.5 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA
NELLA CONFIGURAZIONE PORTUALE DI PROGETTO
290° N, T=6 s

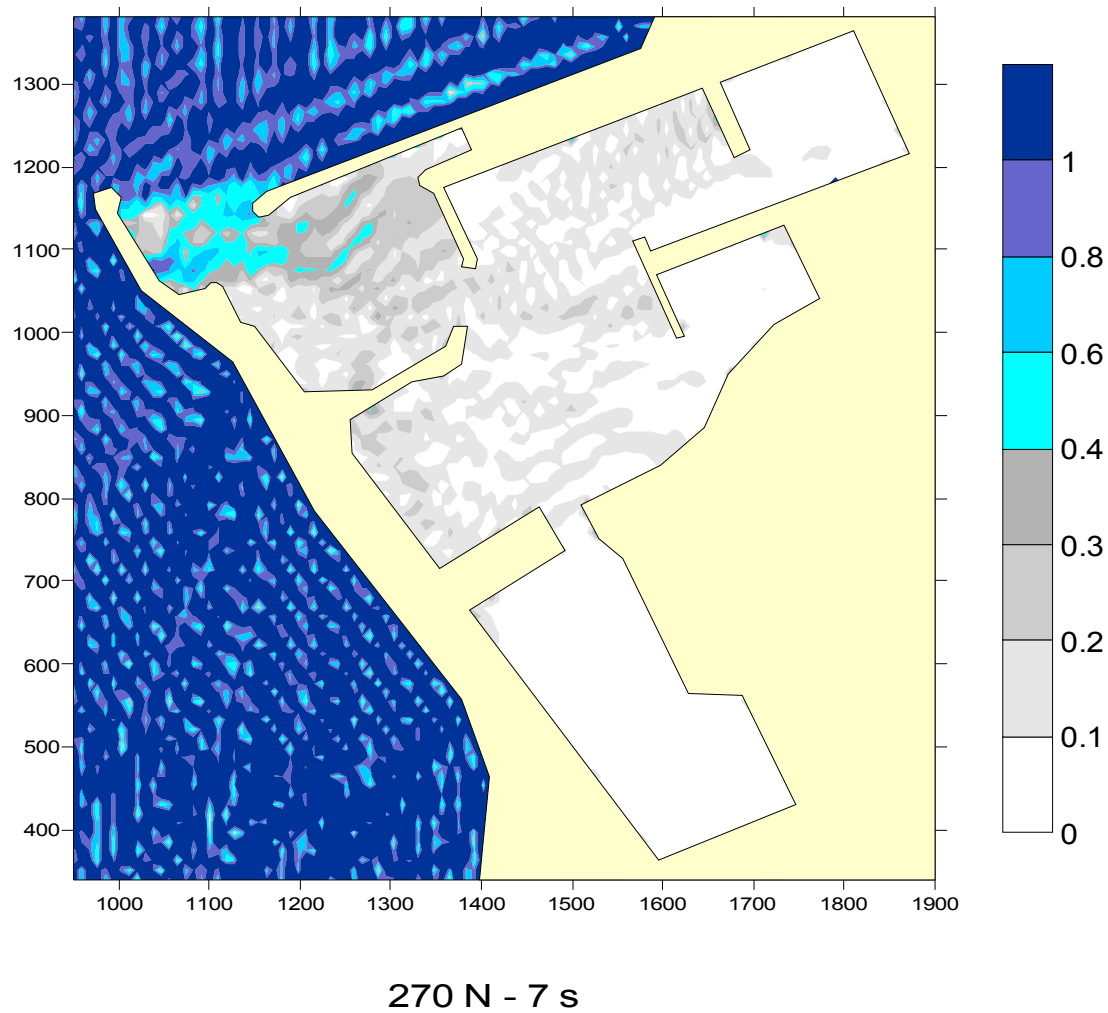


FIG. 7.6 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA NELLA CONFIGURAZIONE PORTUALE DI PROGETTO - 270° N - T = 7 s

ONDA DA 300°N Ts=4s

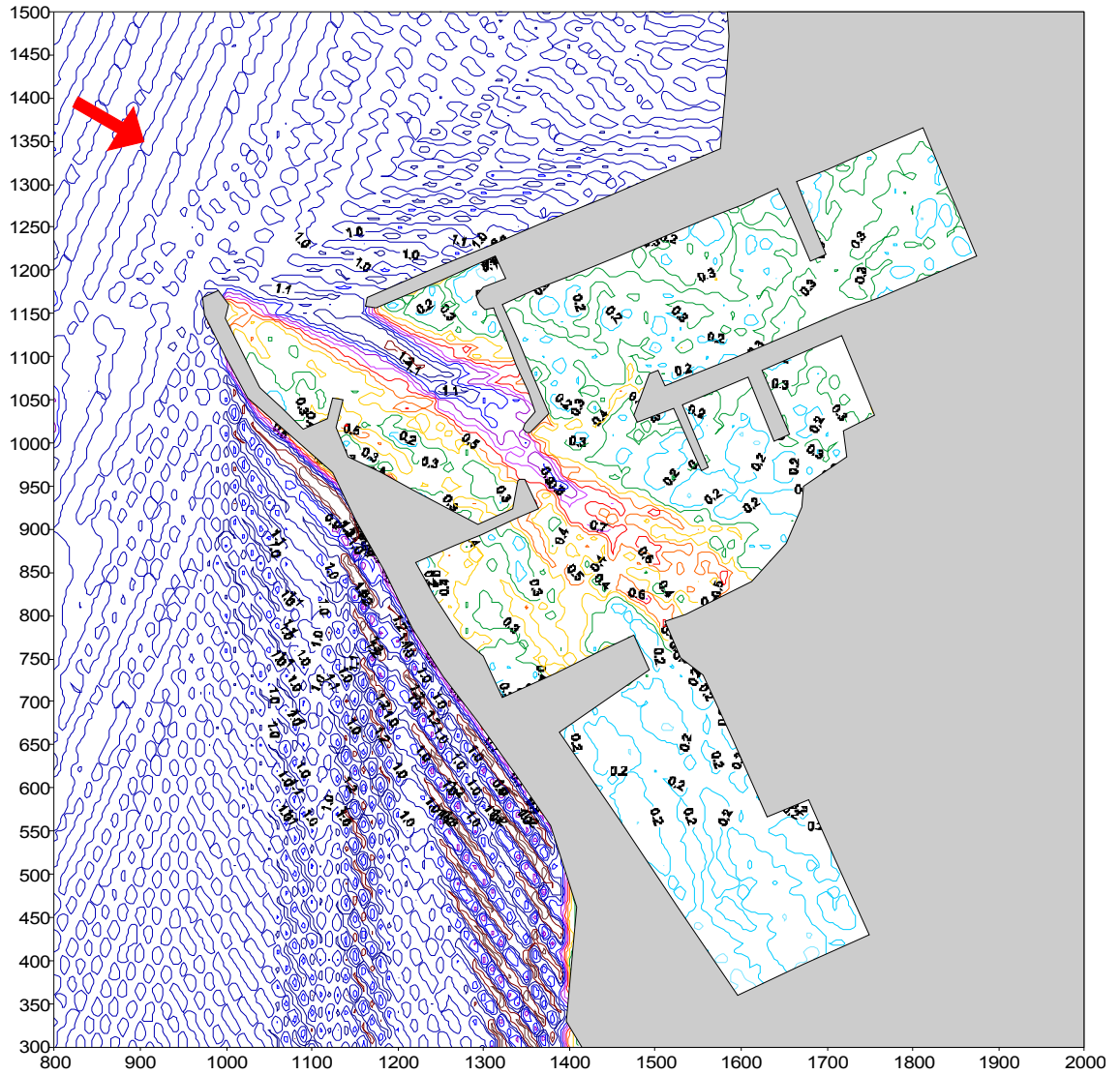


FIG. 7.7 - ISOLINEE DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA
COEFF. ASSORBIMENTO $A=0.5$ NELL'AVAMPORTO

ONDA DA 290°N Ts=4s

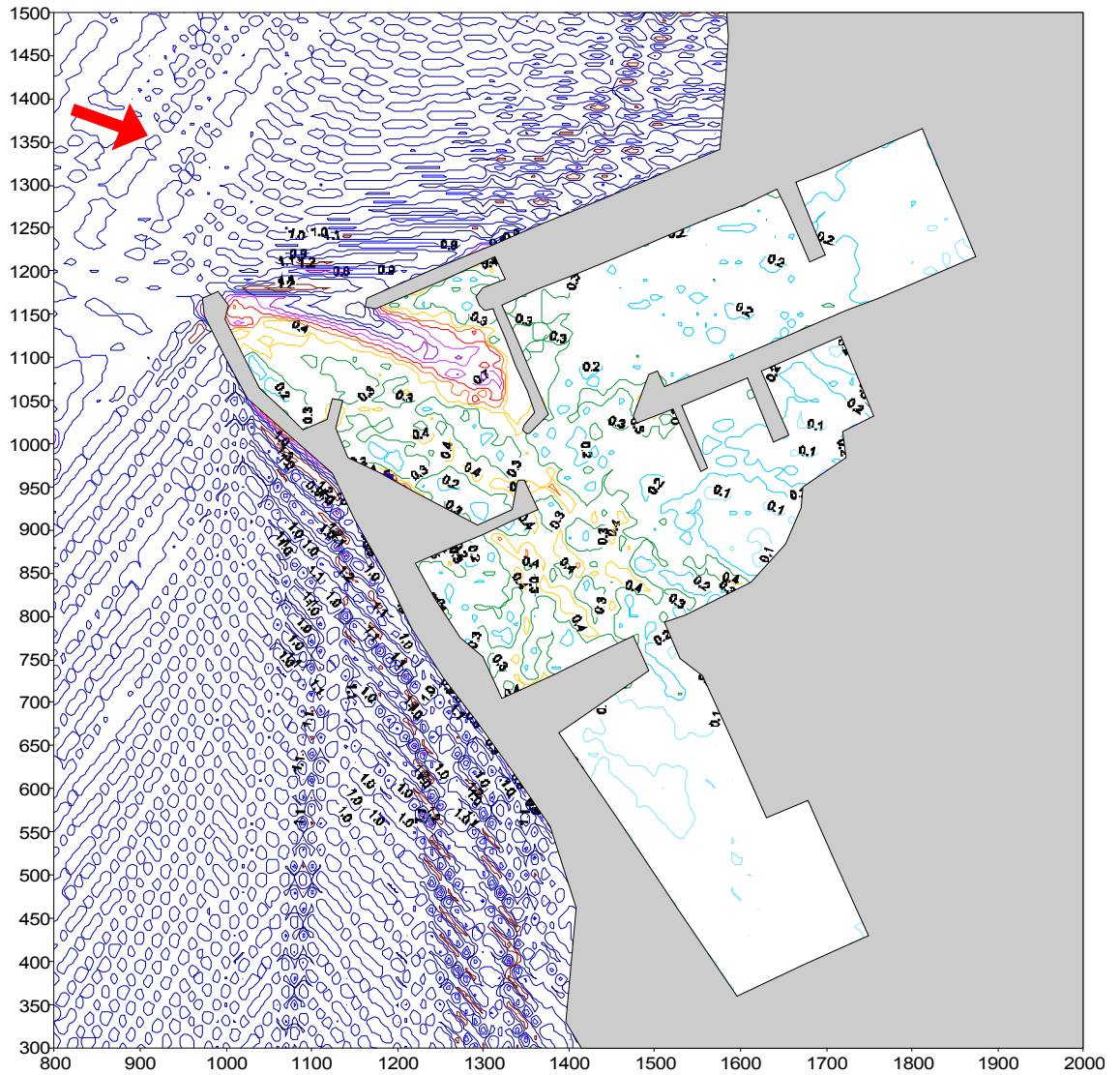


FIG. 7.8 - ISOLINEE DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA
COEFF. ASSORBIMENTO A=0.5 NELL'AVAMPORTO

ONDA DA 290°N Ts=5 s

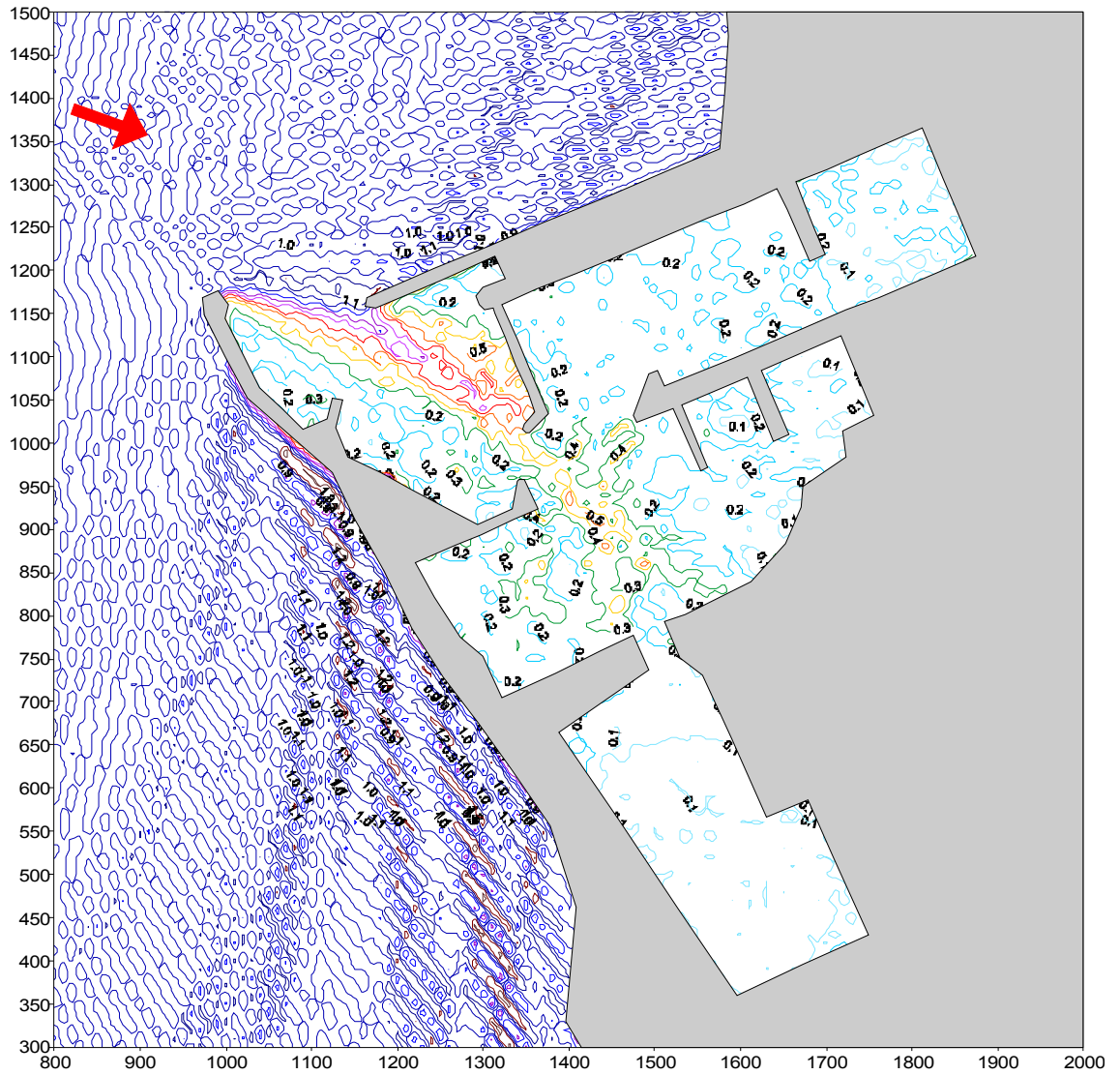


FIG. 7.9 - ISOLINEE DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA
COEFF. ASSORBIMENTO $A=0.5$ NELL'AVAMPORTO

ONDA DA 290°N Ts=6 s

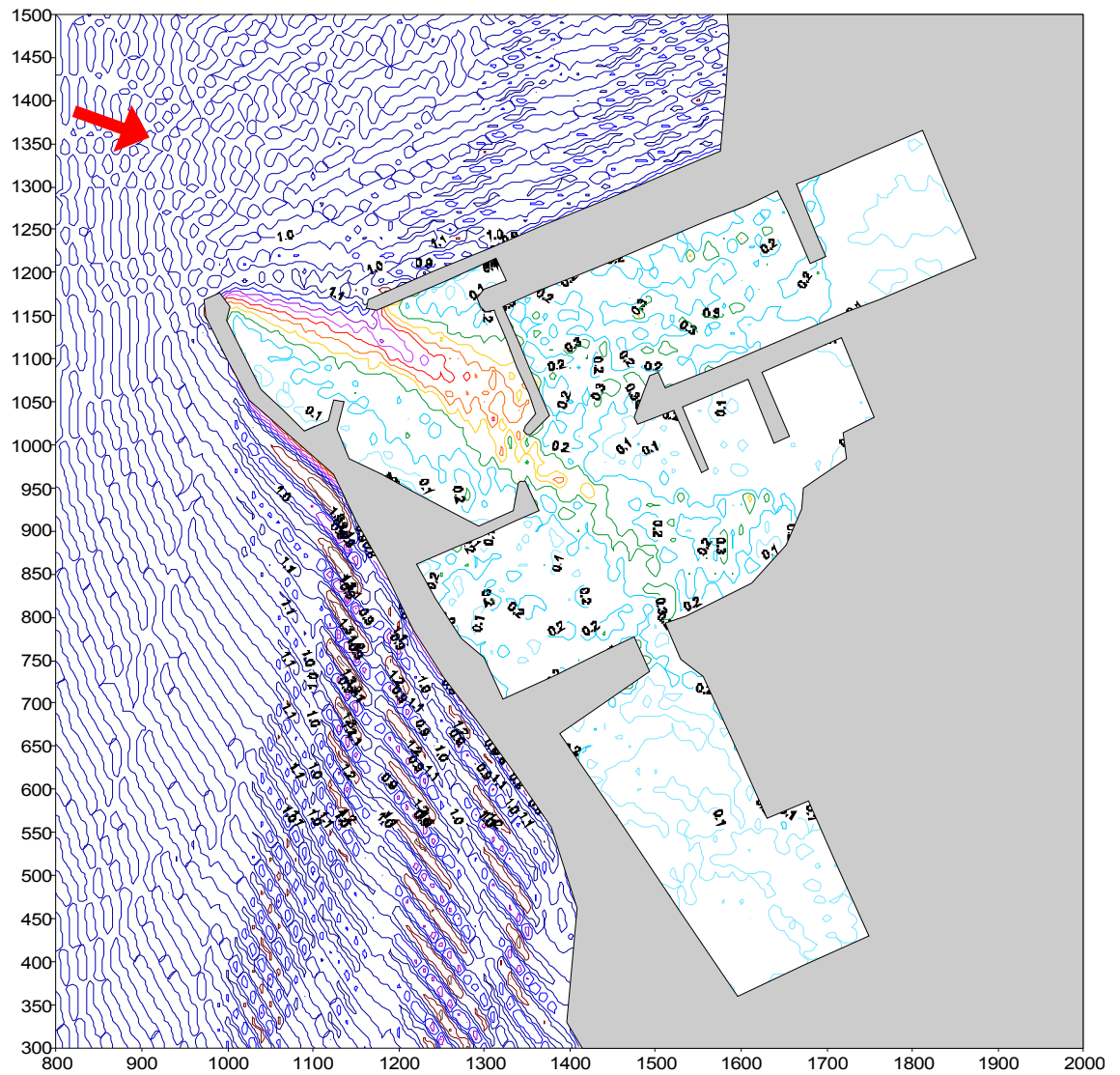


FIG. 7.10 - ISOLINEE DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA
COEFF. ASSORBIMENTO A=0.5 NELL'AVAMPORTO

ONDA DA 270°N Ts=6 s

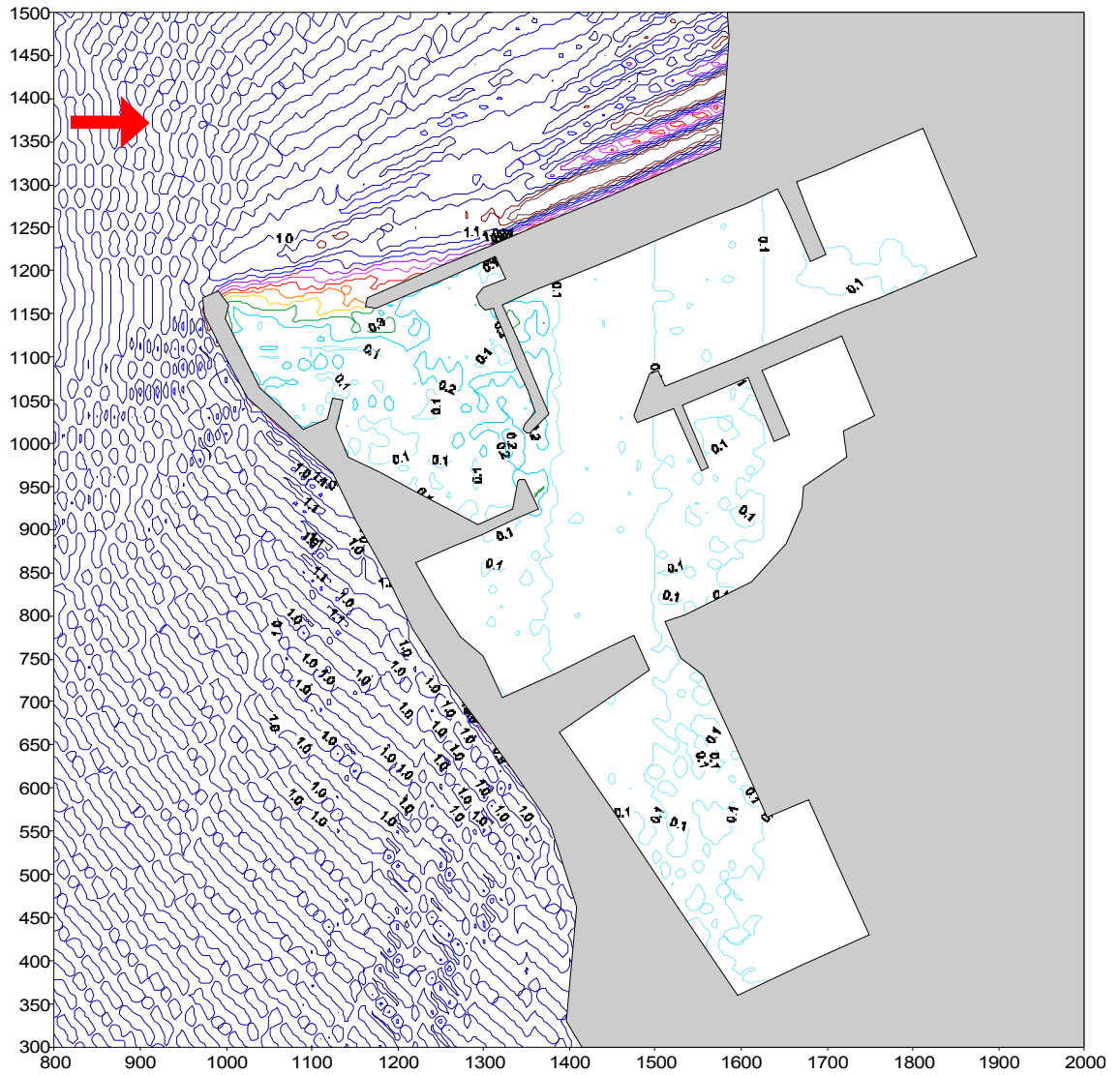


FIG. 7.11 - ISOLINEE DEL COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE DELL'ONDA
COEFF. ASSORBIMENTO A=0.5 NELL'AVAMPORTO

ALLEGATO A

**MODELLO PER LA PROPAGAZIONE
DEL MOTO ONDOSI SU BASSI FONDALI
(EFFETTI DI RIFRAZIONE, SHOALING, ATTRITO,
DIFFRAZIONE, RIFLESSIONE)**

MODELLO NUMERICO PER LA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO VERSO COSTA (FENOMENI DI RIFRAZIONE, SHOALING, ATTRITO, DIFFRAZIONE, RIFLESSIONE)

Il modello numerico analizza le modifiche subite dal moto ondoso nella sua propagazione verso i bassi fondali per i fenomeni rifrazione, shoaling e di dissipazione per attrito sul fondo. Il modello è inoltre in grado di calcolare la diffrazione e la riflessione causata da strutture nell'ipotesi di "barriera semi-infinita".

L'entità dei diversi fenomeni è calcolata a partire dalla batimetria reale dell'area.

Per la realizzazione del modello si è fatto riferimento principalmente al lavoro di Worthington e Herbich (1970).

1. EQUAZIONI

Il procedimento consiste nel seguire un gruppo di onde che propaga verso costa lungo gli ortogonali ai fronti d'onda (o raggi d'onda).

Il calcolo degli ortogonali d'onda viene effettuato svolgendo le seguenti equazioni:

$$x_t = c \cos \theta \quad [1]$$

$$y_t = c \sin \theta \quad [2]$$

$$\theta_t = c_x \sin(\theta) - c_y \cos(\theta) \quad [3]$$

dove i pedici x,y(coordinate spaziali) e t(tempo) indicano la derivata parziale, θ è la direzione del raggio e c la velocità di fase dell'onda definita dalla teoria lineare:

$$c = gT / 2\pi \tanh(2\pi d / L) \quad [4]$$

L'altezza d'onda lungo il raggio risulta proporzionale all'altezza d'onda al largo:

$$H / H_0 = K_s K_r K_f \quad [5]$$

dove K_s è il coefficiente di shoaling, K_r il coefficiente di rifrazione e K_f il coefficiente di attrito.

Lungo il raggio, per ogni intervallo di integrazione δt scelto in input, vengono calcolati i coefficienti K_s , K_r , K_f .

Il coefficiente di shoaling K_s è ottenuto direttamente dalla relazione:

$$K_s = [(1 + G_0)C_0]^{1/2} [(1 + G)C]^{-1/2} \quad [6]$$

con:

$$G = 2\pi d / L [\sinh(2\pi d / L)]^{-1}$$

in cui l'indice "0" indica i valori corrispondenti ai contorni (mare aperto).

Il coefficiente di rifrazione $K_r = \beta^{-1/2}$ è calcolato risolvendo l'equazione per il fattore di separazione degli ortogonali d'onda β :

$$\beta_{ss} + p^s \beta_s + q^s \beta = 0$$

$$p^s = -1 / C [C_x \cos(\theta) + C_y \sin(\theta)] \quad [7]$$

$$q^s = -1 / C [C_{xx} \sin^2(\theta) - 2C_{xy} \sin(\theta) \cos(\theta) + C_{yy} \cos^2(\theta)]$$

dove:

s = distanza lungo la traiettoria

θ = angolo tra l'asse x del riferimento e la traiettoria.

Il termine β rappresenta la variazione, lungo la traiettoria, della distanza reciproca degli ortogonali adiacenti.

Il coefficiente di attrito K_f è calcolato nell'ipotesi che l'unica forza dissipativa sia l'attrito del fondo, risolvendo l'equazione seguente:

$$(K_f)_x = -8 / (3L) C_H a_{bm} f_e K_f \quad [8]$$

dove :

a_{bm} rappresenta la massima ampiezza di oscillazione della particella sul fondo;

f_e il "fattore di frizione" che dipende dal rapporto tra l'ampiezza del moto oscillatorio in prossimità del fondo e la rugosità del fondo.

Quando, nell'avvicinarsi a costa, avviene il frangimento dell'onda, valutato secondo la relazione:

$$H/d = 0.78 \quad [9]$$

il modello segnala il fenomeno, assumendo successivamente una variabilità dell'altezza d'onda al variare della profondità fino in prossimità della battigia secondo la stessa relazione. La direzione dell'onda viene ottenuta integrando le equazioni cinematiche.

Il secondo passo consiste nel calcolo dell'onda diffratta dalle estremità di una eventuale struttura presente nell'area (nell'ipotesi di barriera semi-infinita).

Quando la propagazione di un treno di onde è interrotta da un ostacolo, come ad esempio una barriera frangiflutti, si ha, come noto, il fenomeno della diffrazione, che consiste in un trasferimento laterale dell'energia attraverso gli ortogonali.

Nei pressi della barriera si possono allora distinguere tre regioni con caratteristiche differenti: un'area limitata dall'estremità della barriera in cui l'onda si propaga (in prima approssimazione) sostanzialmente indisturbata, un'area dietro la barriera in cui si ha il fenomeno diffrattivo e infine un'area antistante la barriera caratterizzata dalla presenza dell'onda incidente e dalle onde riflesse della barriera stessa.

DEAM

Per un'onda monocromatica che incide sulla struttura con una qualsiasi direzione l'elevazione "η" della superficie marina rispetto al l.m.m. è data da:

$$\eta = (aiKc / g) \exp(iKct) \cosh(Kh) F(r, \theta)$$

dove:

$$F(r, \theta) = f(\sigma) \exp\{-iKr \cos(\theta - \theta_0)\} + f(\sigma') \exp\{-iKr \cos(\theta + \theta_0)\}$$

$$\sigma = (4Kr / \pi)^{0.5} \sin(\theta + \theta_0) / 2$$

$$\sigma' = (4kR / \pi)^{0.5} \sin(\theta_0 - \theta) / 2$$

$$f(\sigma) = (1+i) / 2 \int_{-\infty}^{\sigma} \exp(-i\pi t^2 / 2) dt$$

$$f(\sigma') = (1+i) / 2 \int_{-\infty}^{\sigma'} \exp(-i\pi t^2 / 2) dt$$

a = ampiezza dell'onda

K = $2\pi/L$

i = $(-1)^{0.5}$

r, θ = raggio vettore e angolo vettoriale rispetto al sistema di coordinate polari con origine sull'estremo della struttura;

t = tempo

Il secondo termine dell'equazione in $F(r, \theta)$ rappresenta il contributo dell'onda riflessa dalla barriera, che è significativo solamente negli immediati dintorni della barriera e vicino alla testata.

Le equazioni in $f(\sigma)$ possono essere riscritte come integrali di seni e coseni:

$$f(\sigma) = (1+i) / 2 \left(\int_{-\infty}^{\sigma} \cos(\pi t^2 / 2) dt - i \int_{-\infty}^{\sigma} \sin(\pi t^2 / 2) dt \right)$$

e risolte mediante gli integrali di Fresnel.

2. METODO DI CALCOLO

L'area viene discretizzata mediante un reticolo di maglie di ugual dimensione e ad ogni nodo viene assegnata la corrispondente profondità del fondale.

Il primo passo consiste nel calcolo di rifrazione e shoaling: dato il periodo e l'angolo di incidenza dell'onda, il programma calcola per prima cosa la geometria del sistema e

DEAM

cioè l'andamento degli ortogonali "primari" dal punto di partenza fino al limite della griglia o della linea di costa calcolando le coordinate con un passo Δt imposto dall'utente.

Per ogni punto così individuato vengono poi calcolati i coefficienti di rifrazione, shoaling ed attrito, ed infine la direzione e la lunghezza d'onda.

Quando, nell'avvicinarsi a costa, avviene il frangimento dell'onda, il modello segnala il fenomeno, assumendo successivamente una variabilità dell'altezza d'onda al variare della profondità fino in prossimità della battigia secondo la stessa relazione.

Il secondo passo consiste nel calcolo dell'onda diffratta dalle estremità della barriera.

Fornite in input coordinate, orientazione e coefficiente di riflessione della barriera, nota la lunghezza d'onda in corrispondenza alla testata, precedentemente calcolata dal modello stesso, vengono calcolati i valori dell'integrale di Fresnel mediante un'espansione in serie.

L'altezza d'onda risultante è data quindi dal prodotto dell'onda al largo e dei coefficienti di rifrazione, shoaling, attrito, diffrazione ed eventuale riflessione.

Gli ortogonali "radiali" che rappresentano il campo diffratto, partono dalle estremità della barriera e differiscono uno dall'altro per la direzione che assumono inizialmente, assegnata dal programma secondo un passo angolare fornito in input.

3. PARAMETRI DI INPUT

I dati necessari all'applicazione del modello sono:

- la geometria dell'area in esame;
- la batimetria dell'area, discretizzata in maglie quadrate di dimensioni costanti;
- le condizioni iniziali di moto ondoso (altezza, periodo, direzione dell'onda monocromatica);
- l'ubicazione della struttura costiera;
- il coefficiente di riflessione della struttura;
- il passo temporale di integrazione.

4. OUTPUT

Lungo il raggio d'onda il modello fornisce su tabulato le seguenti grandezze:

coordinate geografiche, direzione del raggio, profondità dell'acqua, coefficienti di rifrazione, di shoaling, di diffrazione e di attrito, parametro di Ursell HL^2/d^3 (che definisce il grado di non linearità del processo propagativo).

Si ottiene inoltre il grafico dell'andamento degli ortogonali d'onda primari e secondari ed una rappresentazione grafica del campo di moto ondoso calcolato (isolinee di altezza e direzione dell'onda).

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Worthington H.W., Herbich J.B., 1970 - "A Computer Program to estimate the Combined Effect of Refraction and Diffraction of Water Waves", Coastal and Ocean Engineering Division, Report N° 127.
2. Weigel R.L., 1964 - "Oceanographical Engineering", Prentice Hall Inc.
3. Basco D.R., 1982 - "Surf Zone Currents", Coastal Engineering Research Centre, Miscellaneous Report N° 82-7.

ALLEGATO B

**MODELLO NUMERICO PER LA SIMULAZIONE
DELL'AGITAZIONE ONDOSA ALL'ESTERNO E ALL'INTERNO
DI UN BACINO PORTUALE E NEI PRESSI DI STRUTTURE
MARINE ANCHE COMPLESSE**

1. INTRODUZIONE

La progettazione di una struttura marina richiede la conoscenza delle forze che l'ambiente esercita sulla stessa, in particolare le azioni idrodinamiche dovute al moto ondoso.

La difficoltà del calcolo di queste azioni è collegata al fatto che la presenza delle strutture modifica il campo imperturbato. Questa mutua interazione tra ambiente marino e strutture immerse può essere opportunamente modellizzata ipotizzando che la struttura sia un corpo rigido che perturba il campo di velocità incidente con fenomeni di diffrazione e di riflessione.

Mediante opportune ipotesi sulla geometria del volume liquido da esaminare e sulla natura del fluido, è possibile impiegare, per la risoluzione del problema descritto, modelli numerici particolarmente efficienti ed efficaci, in domini di estensione illimitata (mare aperto), utilizzando la tecnica dei "boundary elements".

L'uso di questa tecnica consente di affrontare problemi anche complessi con medie e/o modeste risorse computazionali.

2. EQUAZIONI

Il modello matematico si basa sull'integrazione delle equazioni di Navier-Stokes nelle ipotesi:

- I. fluido incomprimibile e privo di viscosità;
- II. campo di velocità irrotazionale.

Con tali ipotesi è possibile introdurre una funzione potenziale ϕ , detta potenziale di velocità, il cui gradiente rappresenta in ogni punto il vettore velocità del fluido, in modo tale che le equazioni di Navier-Stokes si riducono alle equazioni di conservazione della massa in condizioni stazionarie, ovvero:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad [1]$$

Tale equazione deve essere integrata nel dominio occupato dal fluido, tridimensionale ed illimitato.

Sui contorni del dominio al finito (detto Γ il contorno) deve essere soddisfatta la condizione:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} - iK\alpha\phi|_{\Gamma} = 0 \quad [2]$$

essendo:

i = unità immaginaria;

\mathbf{n} = la normale uscente dal dominio;

il numero d'onda, funzione del periodo dell'onda incidente e della profondità

DEAM

$K =$ del mare ($=2\pi/L$, dove L è la lunghezza d'onda);

$\alpha =$ il coefficiente di assorbimento delle pareti che costituiscono il contorno ($\alpha=0$ per pareti completamente riflettenti, $\alpha=1$ per pareti totalmente assorbenti, $0<\alpha<1$ per pareti parzialmente riflettenti).

Una semplificazione si ottiene se il fondale è di profondità costante ovunque e le pareti che costituiscono il contorno sono verticali.

La prima condizione (profondità costante) permette di calcolare il potenziale di velocità dell'onda incidente (imperturbata in assenza di ostacoli) nella forma:

$$\phi^{(0)} = \frac{Hg}{2i\omega} e^{i(K\tau \cdot r - \omega t)} \frac{chK(z+h)}{chKh} \quad [3]$$

essendo:

H l'altezza dell'onda;

$\omega = 2\pi/T$ la pulsazione (T periodo);

g l'accelerazione di gravità;

τ il versore di propagazione dell'onda;

r un punto qualsiasi del piano orizzontale di componenti x, y ;

z le coordinate verticali, variabili nell'intervallo $-h$ (fondo del mare), 0 (superficie libera).

Nel caso di onde di piccola ampiezza le due condizioni, cinematica e dinamica (teorema di Bernoulli in condizioni dinamiche), si traducono nel soddisfacimento da parte di K della relazione di dispersione:

$$K \tanh(Kh) = \omega^2/g \quad (4)$$

La seconda condizione (pareti verticali) porta alla conclusione che il potenziale di velocità totale ha la stessa dipendenza da z (coordinate verticali) del potenziale incidente, ovvero si comporta come:

$$\frac{\cosh K(z+h)}{\cosh Kh}$$

Ciò consente di ricondurre il problema al calcolo del potenziale totale (incidente + diffratto) sulla superficie $z=0$ (livello del mare).

Posti:

$$\phi^{(I)} = \phi^{(I)}(x, y) \frac{\cosh K(z+h)}{\cosh Kh} \quad \text{potenziale incidente}$$

$$\phi^{(D)} = \phi^{(D)}(x, y) \frac{\cosh K(z+h)}{\cosh Kh} \quad \text{potenziale diffratto}$$

$$\varphi(x, y) = \phi^{(I)}(x, y) + \phi^{(D)}(x, y)$$

e determinata una soluzione fondamentale $G(x, y/x_0, y_0)$ dell'equazione $\nabla^2 U = \delta(x-x_0, y-y_0)$, essendo δ la distribuzione di Dirac, che soddisfi le condizioni di superficie libera, le equazioni sul fondo ($\partial G/\partial z=0$), e la condizione di irraggiamento (per $r \rightarrow \infty$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$) si vede che φ è la soluzione dell'equazione integrale sul contorno Γ :

$$\frac{1}{2} \varphi(x_0, y_0) = \int_{\Gamma} \left(\frac{\partial G}{\partial n} \varphi - G \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) d\Gamma \quad [5]$$

che, risolta, fornisce il valore del potenziale totale di velocità sul contorno φ^* . Noto il potenziale di velocità sul contorno, quello in ogni altro punto del dominio è determinato da:

$$\varphi = \int_{\Gamma} \left(\frac{\partial G}{\partial n} \varphi^* - G \frac{\partial \varphi^*}{\partial n} \right) d\Gamma \quad [6]$$

3. METODOLOGIA DI CALCOLO

La schematizzazione consiste nel suddividere l'area portuale in esame in due domini: il primo esterno ("dominio dell'infinito") corrispondente al mare aperto, il secondo interno, corrispondente alla configurazione portuale ("dominio interno").

Il dominio interno alla rada, D_1 , è limitato da pareti verticali e da un fondale costituito da una superficie la cui profondità h è costante.

Il dominio esterno alla rada, D_2 , è rappresentato dal mare aperto, è delimitato dalla geometria della costa e si estende all'infinito. Il fondale ha la stessa profondità costante h . La superficie di separazione da D_1 è costituita dall'imboccature della rada portuale e dalle strutture presenti nell'area.

Sia all'interno di D_1 che in D_2 possono essere inseriti ostacoli di forma qualsiasi, descritti mediante poligoni chiusi a pareti verticali.

L'onda progressiva incidente è approssimata da un'onda di Airy in acqua di profondità finita costante (dominio D_2) di cui sono noti ampiezza, periodo, direzione di propagazione (riferita ad un sistema di riferimento fissato arbitrariamente).

Tale caratterizzazione del moto ondoso può essere estesa, su richiesta dell'utente, a trattare casi in cui è assegnata la densità spettrale di energia $S(\omega, \theta)$, di tipo JONSWAP, in funzione della pulsazione e della direzione.

Finalità del modello è la valutazione del coefficiente di amplificazione dell'onda, rapporto tra l'ampiezza dell'onda effettiva e quella incidente, in posizioni definite, qualsiasi, nei domini D_1 e D_2 .

I confini del modello, la rada portuale e le strutture principali vengono suddivise in tratti: ogni tratto viene a sua volta suddiviso in elementi ed in ogni elemento ("mesh-point") viene posizionata una "sorgente potenziale" che rappresenta una soluzione.

Viene quindi costruito e risolto un sistema di equazioni in campo complesso la cui soluzione consente di determinare il potenziale di velocità e quindi l'altezza dell'onda in ogni elemento in cui è stata suddivisa l'area.

La soluzione del sistema lineare complesso è effettuata mediante la triangolarizzazione di Gauss.

Successivamente vengono calcolate isolinee di altezza d'onda all'interno e all'esterno della rada portuale.

Su richiesta dell'utente è possibile aumentare la risoluzione di calcolo per punti di particolare importanza.

4. PARAMETRI DI INPUT

Vanno forniti in input:

- I. la geometria del bacino;
- II. la geometria degli eventuali ostacoli presenti;
- III. la profondità del bacino costante;
- IV. la direzione di incidenza dell'onda;
- V. altezza e periodo dell'onda monocromatica (o, in alternativa, lo spettro JONSWAP del moto ondoso).

5. OUTPUT

Il modello fornisce in output:

- I. tabella contenente le coordinate dei punti di calcolo ed il valore del coefficiente di amplificazione;
- II. graficazione delle isolinee e della geometria portuale.