



SEZIONE DEL GENIO MILITARE PER LA MARINA DI CAGLIARI

Stazione VLF - Isola di Tavolara (OT)

RESTAURATION OF HEALTH AND SAFETY CONDITIONS TO
OPERATE THE STATION - STAZIONE VLF - ISOLA DI
TAVOLARA (OT)

004

PROGETTO DEFINITIVO

STUDIO DI AGITAZIONE ONDOSA RESIDUA E ANALISI DI RISONANZA

21

018

DR

004

0

MAR

Committente

SEZIONE DEL GENIO MILITARE
PER LA MARINA DI CAGLIARI

P.zza Marinai d'Italia snc

Progettazione opere marittime:



MODIMAR s.r.l. Via Monte Zebio 40 - 00195 ROMA
06.3269461 - www.modimar.it

Progettazione:

Ing. Mauro MARINI

Ing. Davide SALTARI

Ing. Leonardo FARINA

Dott. Arch. Alessandro BARTOLESCHI

Studi ambientali

Dott.ssa Scrimieri Sara

Dott. De Pirro Maurizio

Febbraio 2022	0	0	D.S.	D.S.	M.M.
Data	Rev.	DESCRIZIONE	Disegnato:	Verificato:	Approvato:
Dimensioni foglio: A1		La MODIMAR s.r.l. si riserva la proprietà di questo documento con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta. This document is property of MODIMAR s.r.l. Reproduction and divulgation forbidden without written permission			

INDICE

1	PREMESSE	2
2	CONFIGURAZIONI ESAMINATE. IPOTESI DI CALCOLO	3
3	MODALITÀ DI APPLICAZIONE DEL MODELLO VEGA	5
4	ANALISI DEI RISULTATI RELATIVI ALLE ONDE GENERATE DAL VENTO	6
	4.1 <i>SITUAZIONE ATTUALE</i>	6
	4.2 <i>CONFIGURAZIONE DI PROGETTO</i>	7
5	ANALISI DELLA RISONANZA PORTUALE	9
	5.1 <i>ANALISI DEI FENOMENI LEGATI ALLE ONDE LUNGHE</i>	10
	ALLEGATO 1	13

1 Premesse

Con il presente studio si intende verificare l'agitazione ondosa che si viene a determinare in prossimità dell'imboccatura dell'approdo gestito dalla Marina Militare a servizio della stazione VLF nell'isola di Tavolara e all'interno dello specchio acqueo ridossato dalla diga foranea oggetto di intervento relativamente all'attuale configurazione geometrica ed a quella di progetto.

Ai fini di una trattazione pienamente esaustiva il presente studio è stato finalizzato anche all'investigazione dei possibili fenomeni di oscillazione propria della darsena interna che possono verificarsi in presenza di onde di piccola ampiezza e di lungo periodo provenienti dal mare aperto, aventi come caratteristica principale quella di non subire sensibili riduzioni né per effetto della diffrazione causata dalle opere di protezione, né dell'assorbimento su superficie inclinate come le spiagge o le scogliere che caratterizzano il perimetro interno dello specchio acqueo portuale.

Il modello numerico utilizzato ha fornito utili risultati che hanno consentito di poter eseguire la verifica oggettiva delle condizioni di agitazione ondosa sia per la situazione attuale dell'approdo che per quella di progetto che prevede una generale riqualificazione e adeguamento delle sagome della diga foranea ormai molto degradata a causa di alcuni eventi di moto ondoso estremi.

Per la determinazione dei livelli di oscillazione residui è stato utilizzato un modello numerico (che integra in modo esatto l'equazione di Helmholtz) per la determinazione dei valori dell'altezza d'onda residua nello specchio acqueo interno (area retrostante l'imboccatura e darsena interna) tenendo conto dei fenomeni combinati di diffrazione e riflessione.

Per ciascuna configurazione portuale sono state considerate quattro direzioni d'onda e tre periodi significativi per le condizioni meteo-marine raggiungibili nel paraggio in esame e precedentemente derivati sia dallo studio meteo-marino che da quello di trasferimento sotto costa.

2 Configurazioni esaminate. Ipotesi di calcolo

Per lo studio della penetrazione del moto ondoso all'interno dello specchio portuale della Stazione VLF dell'Isola di Tavolara sono state considerate le seguenti configurazioni:

- situazione attuale (Figura 1) in cui è stata considerata l'attuale geometria e consistenza della diga foranea di protezione dello specchio acqueo interno
- configurazione di progetto (Figura 12) contraddistinta da un maggiore ingombro della suddetta diga foranea, in conseguenza dei previsti lavori di salpamento, rifioritura e risagomatura che offrirà una migliore e maggiore protezione dal moto ondoso incidente, caratteristico del paraggio costiero esaminato.

Le simulazioni sono state condotte assumendo una profondità media, costante, del bacino interno (caratterizzato da fondali che variano fino alla profondità di -10,0 m sul l.m.m.) pari a 4,0 m.

I coefficienti di riflessione R delle opere delimitanti la spiaggia, le banchine portuali interne oltre che le scogliere ed i tratti di costa rocciosi (falesie) esterne sono stati scelti in funzione delle caratteristiche riflettenti delle stesse, variabili a seconda della tipologia strutturale (banchine a parete verticale in calcestruzzo e corpi diga a gettata) adottata (fig. 1 e 12).

In tutte le configurazioni esaminate sono stati assegnati i seguenti coefficienti di riflessione:

- $R = 0,90$ per le banchine a parete verticale completamente riflettenti,
- $R = 0,50$ per le falesie rocciose alte (aventi buone caratteristiche riflessive delle onde incidenti),
- $R = 0,35$ per le mantellate delle opere a gettata,
- $R = 0,10$ per le spiagge e tratti di costa di modesta pendenza.

Per quanto riguarda le direzioni di provenienza delle onde in prossimità dell'imboccatura portuale, è stato preliminarmente individuato il settore caratterizzato dagli stati di mare più gravosi. Tale settore (vedi relazione meteomarina e successivo studio di trasferimento del moto ondoso sotto costa) è risultato compreso tra le direzioni 330°N e 30°N in cui durante la propagazione verso riva sia la rotazione delle onde che la loro attenuazione è modesta. Sulla base dei suddetti risultati, cui si rimanda per ogni ulteriore approfondimento, si è pertanto deciso di utilizzare per lo studio di penetrazione del moto ondoso all'interno del bacino portuale le direzioni 330°N , 345°N , 360°N e 15°N in quanto rappresentative delle condizioni più ortogonali e gravose che si possono presentare in corrispondenza dell'imboccatura. Fissate le direzioni, sono stati considerati tre periodi del moto

ondoso, pari rispettivamente a $T = 5,0 \div 7,0 \div 9,0$ s e solo per la direzione $15^\circ N$ appartenente al settore da cui provengono gli stati di mare più intensi è stato considerato il periodo $T = 12,0$ s.

I risultati sono stati elaborati per tutte le simulazioni effettuate con il programma di interpolazione "SURFER" che restituisce i valori numerici ottenuti come curve di uguale entità dell'agitazione ondosa e con una scala cromatica gradualmente variata. Di seguito viene elencata la corrispondenza fra i test effettuati e il nominativo dato ai relativi grafici:

* Situazione attuale:

Test 1	→	File Att_Dir330 T5 s.SRF	→	Fig. 2
Test 2	→	File Att_Dir345 T5 s.SRF	→	Fig. 3
Test 3	→	File Att_Dir345 T7 s.SRF	→	Fig. 4
Test 4	→	File Att_Dir360 T5 s.SRF	→	Fig. 5
Test 5	→	File Att_Dir360 T7 s.SRF	→	Fig. 6
Test 6	→	File Att_Dir360 T9 s.SRF	→	Fig. 7
Test 7	→	File Att_Dir15 T5 s.SRF	→	Fig. 8
Test 8	→	File Att_Dir15 T7 s.SRF	→	Fig. 9
Test 9	→	File Att_Dir15 T9 s.SRF	→	Fig. 10
Test 10	→	File Att_Dir15 T12 s.SRF	→	Fig. 11

* configurazione di progetto:

Test 11	→	File Pro_Dir330 T5 s.SRF	→	Fig. 13
Test 12	→	File Pro_Dir345 T5 s.SRF	→	Fig. 14
Test 13	→	File Pro_Dir345 T7 s.SRF	→	Fig. 15
Test 14	→	File Pro_Dir360 T5 s.SRF	→	Fig. 16
Test 15	→	File Pro_Dir360 T7 s.SRF	→	Fig. 17
Test 16	→	File Pro_Dir360 T9 s.SRF	→	Fig. 18
Test 17	→	File Pro_Dir15 T5 s.SRF	→	Fig. 19
Test 18	→	File Pro_Dir15 T7 s.SRF	→	Fig. 20
Test 19	→	File Pro_Dir15 T9 s.SRF	→	Fig. 21
Test 20	→	File Pro_Dir15 T12 s.SRF	→	Fig. 22

3 Modalità di applicazione del modello VEGA

Per le simulazioni della penetrazione del moto ondoso all'interno dello specchio d'acqua portuale, caratterizzato da una profondità media assunta costante e pari mediamente a -4,0 m sul l.m.m. è stato utilizzato il modello numerico VEGA descritto in allegato. Il modello, sviluppato dalla Modimar S.r.l., è in grado di simulare la propagazione di onde armoniche lineari in presenza dei fenomeni combinati di diffrazione e riflessione che risultano dominanti nel caso in esame. Questi fenomeni sono regolati dall'equazione di Helmholtz che viene risolta dal modello numerico VEGA con la tecnica degli elementi di contorno (boundary elements). Tale tecnica richiede che venga discretizzato il contorno del dominio di calcolo. Le opere a gettata che delimitano l'imboccatura portuale e le banchine presenti all'interno dello specchio acqueo sono stati quindi schematizzate per mezzo di una serie di segmenti. Ciascun segmento è stato a sua volta suddiviso in elementi di lunghezza compresa tra $1/6$ ed $1/7$ della lunghezza d'onda, assicurandosi in tal modo che in tutte le simulazioni fossero introdotte almeno 5 elementi (sorgenti) per ogni segmento considerato. L'altezza d'onda è stata calcolata in corrispondenza di circa 14.400 nodi posti all'interno dell'area simulata comprendente anche i relativi tratti di costa esterni costituiti da scogliere alte.

In corrispondenza della retta con equazione $Y = 0$ m del dominio di calcolo sono state imposte le caratteristiche del moto ondoso incidente (altezza, direzione e periodo). Tale retta rappresenta praticamente il generatore del moto ondoso e viene trattata dal modello come un contorno di radiazione, cioè la perturbazione riflessa dalla linea di costa e dalle strutture portuali (dighe foranee e banchine) è libera di transitare per tale contorno irradiandosi nel campo, supposto infinito, posto all'esterno del dominio schematizzato.

I risultati delle elaborazioni, allegati in forma grafica (figure 2÷11 e 13÷22), indicano la distribuzione planimetrica dei coefficienti di agitazione (moltiplicatori dell'altezza d'onda incidente) con una scala di intensità avente una risoluzione di 0,1. Per chiarezza sono evidenziate solo le curve di iso - altezza d'onda pari a $0,1 \div 0,3 \div 0,5$.

Poiché il modello è lineare, i risultati sono stati rappresentati utilizzando il coefficiente di diffrazione (altezza d'onda relativa) che esprime il rapporto tra l'altezza d'onda calcolata nel punto e l'altezza d'onda incidente. Per ottenere il valore dell'altezza d'onda in un punto è sufficiente moltiplicare il coefficiente di diffrazione per l'altezza dell'onda incidente.

4 Analisi dei risultati relativi alle onde generate dal vento

Vengono qui di seguito brevemente commentati i principali risultati ottenuti nelle numerose simulazioni effettuate.

4.1 Situazione attuale

L'analisi delle figure 2÷11 mostra ⁽¹⁾ che le onde caratterizzate dai periodi più elevati $T = 9,0$ s e $12,0$ s presentano una maggiore capacità di penetrazione del moto ondoso all'interno nello specchio acqueo interno in tutte le simulazioni eseguite; in particolare per le direzioni 360°N e 15°N il valore dell'altezza d'onda relativa assume nell'area retrostante l'imboccatura portuale e nella piccola darsena in cui si effettua solitamente l'ormeggio che raggiungono, in diverse zone del bacino interno, valori compresi tra il 30 ed il 50% dell'altezza d'onda incidente (Figg. 7 e 10). Tali valori nella configurazione di progetto vengono ugualmente raggiunti nel bacino interno e nell'area immediatamente retrostante l'imboccatura portuale, ma risultano essere meno estese e diffuse rispetto all'esistente geometria. Tale risposta è da attribuire al maggiore ingombro della nuova diga foranea rispetto a quella attuale, notevolmente degradata e irregolare.

Dall'analisi delle figg. 8÷11 è possibile inoltre constatare che le onde provenienti dalla direzione 15°N (appartenente al settore di traversia principale caratterizzata da stati di mare più elevati) associate ai periodi minori ($T = 5,0$ e $7,0$ sec) l'agitazione all'interno dello specchio acqueo risulta contenuta (altezze d'onda relative al massimo pari al 10% di quella incidente), ma per i periodi maggiori assumono valori cospicui, come per la direzione 360°N , sempre in prossimità dell'imboccatura e della piccola darsena utilizzata per lo stazionamento dei mezzi di servizio.

I risultati delle simulazioni eseguite per la direzione 345°N dimostrano che gli stati di mare aventi un'incidenza maggiormente ortogonale all'imboccatura portuale inducono livelli di oscillazioni residue abbastanza elevati, anche se associati ai periodi ed altezze d'onda minori, soprattutto nella zona occidentale dello specchio acqueo interno che comunque non viene utilizzata per l'ormeggio e/o stazionamento dei mezzi di servizio. Più in dettaglio, per il periodo $T = 7,0$ sec la riflessione delle scogliere che caratterizzano il perimetro interno del bacino inducono un'agitazione residua abbastanza elevata (che raggiunge in alcuni punti anche il 50% dell'onda incidente esterna).

Infine si osserva che per la direzione 330°N (Fig. 2), che rappresenta la direzione incidente più ortogonalmente all'imboccatura portuale e caratterizzata da onde di minore altezza perché appartenente al settore di traversia secondario, il livello di oscillazione residua all'interno dello

¹ Nelle rappresentazioni grafiche i risultati delle simulazioni sono riferiti ad un'altezza d'onda unitaria in modo tale da poter interpretare i risultati numerici come coefficienti di "attenuazione/amplificazione" dell'altezza d'onda ipotizzata al contorno (generatore) del modello.

specchio acqueo si mantiene accettabile nella zona più ridossata, raggiungendo valori compresi tra il 30 ed 50% nell'area immediatamente retrostante l'imboccatura portuale.

4.2 Configurazione di progetto

I livelli di agitazione residua nella configurazione di progetto che differisce da quella attuale per la riqualificazione e adeguamento delle sagome trapezoidali della diga di foranea di sopraflutto posta a protezione dello specchio acqueo risultano accettabili per quasi tutte le simulazioni eseguite.

Più in dettaglio:

- per la direzione di provenienza 330 °N si osserva che il coefficiente di diffrazione nell'area ridossata dalla nuova diga foranea assume valori inferiori o al massimo pari al 10% del valore dell'altezza d'onda incidente, mentre nella zona più esposta all'incidenza diretta delle onde (molo di sottoflutto e zona retrostante) raggiunge anche picchi pari al 30 - 50 % (vedi fig. 13). I livelli di agitazione residui confrontati con quelli della situazione attuale si presentano praticamente simili;
- per la direzione 345 °N i valori del coefficiente di diffrazione, per entrambe i periodi simulati, assumono nel bacino interno valori al massimo pari al 10% del valore dell'altezza d'onda incidente, con qualche limitato picco che raggiunge anche il 30% (vedi fig. 14 e 15). Si osserva che la darsenetta più interna è soggetta ad una amplificazione delle oscillazioni per il periodo maggiore di 7 secondi (vedi fig. 15). Rispetto alla situazione attuale si rileva una modesta diminuzione dei livelli di agitazione residua (confronto tra figura 4 e 15).
- per la direzione 360 °N, che appartiene al settore con le maggiori frequenze di accadimento degli eventi di moto ondoso, le condizioni di agitazione all'interno delle aree portuali proposte risultano accettabili tutte le simulazioni, associate ai periodi 5, 7 e 9 secondi (figure 16, 17 e 18). Per il periodo maggiore si osserva che nella configurazione di progetto, per il maggiore effetto di protezione offerto dalla maggiore sagoma della diga foranea, i livelli di oscillazione massimi si riducono dal 50 al 30% (confronto tra figura 7 e figura 18).
- per la direzione 15 °N, che rappresenta la direzione maggiormente ruotata verso grecale da cui provengono gli eventi di moto ondoso più intensi, le condizioni di agitazione all'interno dello specchio acqueo interno risultano accettabili per le simulazioni, associate ai periodi minori 5 e 7 secondi (figure 19 e 20). Per i periodi maggiori i livelli di agitazione aumentano fino ad arrivare al 30 – 50% dell'altezza d'onda incidente (figure 21 e 22), molto simili a quelli ottenuti nella situazione attuale (figure 10 e 11), ma con un'estensione più limitata per il maggior ridosso dalla nuova diga foranea.

Si sottolinea, infine, che i risultati di tutte le simulazioni eseguite, sia per la situazione attuale sia in quella di progetto, sono da considerare cautelative rispetto alle condizioni reali di agitazione residua in quanto non si è simulato il fenomeno di attenuazione del moto ondoso per dispersione delle componenti direzionali, che in realtà caratterizza la “fascia” dello specchio portuale investita dal moto ondoso entrante attraverso l’imboccatura portuale. Rimangono comunque valide tutte le considerazioni ed osservazioni riportate poco sopra eseguite considerando onde di tipo monocromatico.

5 Analisi della risonanza portuale

La principale funzione cui deve assolvere uno specchio acqueo portuale sia esso un bacino naturale o artificiale, è quella di offrire alle imbarcazioni un sicuro riparo dagli agenti meteo-marini (vento, correnti e moto ondoso), garantendo il loro ormeggio e stazionamento in condizioni di sicurezza. E' quindi indispensabile che le suddette operazioni portuali possano svolgersi il più regolarmente possibile, qualunque siano le condizioni di moto ondoso esistenti all'esterno. Peraltro non è possibile evitare, in generale, la penetrazione all'interno delle aree portuali delle onde di vento che pervengono all'imboccatura portuale.

Frequentemente infatti, anche in presenza di condizioni meteomarine moderate (onde di minore periodo ed altezza), si può registrare la presenza di oscillazioni di lungo periodo della superficie libera dell'acqua negli specchi acquei interni; questo fenomeno induce fastidiosi movimenti sia verticali che orizzontali delle masse idriche, che possono risultare fastidiosi per le imbarcazioni ormeggiate in corrispondenza dei fronti di accosto a parete verticale.

La presenza di tali onde è dovuta al fatto che qualunque sistema fisico, capace di muoversi intorno ad una posizione di quiete con una determinata frequenza, oscilla con una consistente ampiezza quando è soggetto ad impulsi periodici di frequenza prossima o coincidente a quelle proprie o libere del sistema stesso, dette frequenze di risonanza. Ogni bacino portuale ha, quindi, i suoi periodi di risonanza naturali e può comportarsi come un "risuonatore".

Nelle strutture portuali, che sono tutte poste in comunicazione con il mare, le oscillazioni sono provocate dall'ingresso di treni di onde di lungo periodo provenienti dal mare aperto. Il fenomeno che origina tali oscillazioni è identificabile in gruppi di onde, il cui involuppo ha parimenti la forma di un'onda, ma con un periodo notevolmente più lungo di quello delle singole onde componenti il treno di onde di breve periodo. Come è noto le onde di lungo periodo e di bassa ripidità non vengono ridotte in modo consistente, né attraverso il fenomeno di diffrazione generato dalla presenza delle opere di protezione, né dall'assorbimento di superfici inclinate come le spiagge o le scogliere. Infatti si ammette che per le onde lunghe aventi una bassa ripidità si verifichi una riflessione quasi totale da parte di pareti comunque inclinate e perfino di spiagge a dolce pendenza, qualora fossero presenti. Appare quindi evidente la difficoltà di "evitare" l'ingresso e la propagazione delle onde di lungo periodo e la successiva persistenza delle oscillazioni all'interno degli specchi d'acqua portuali.

La pendenza dello specchio acqueo ingenerata dalle onde di lungo periodo e le elevate velocità in corrispondenza dei "nodi" di tali onde (con caratteristiche di stazionarietà) possono provocare a volte la rottura dei cavi di ormeggio.

Comunque, gli effetti più temibili si verificano in corrispondenza delle linee nodali del sistema d'onda presente nel bacino ridossato. Infatti nei punti nodali (dove non si hanno spostamenti verticali della superficie idrica) la velocità orizzontale delle particelle può anche assumere valori di alcuni metri al secondo con conseguenti azioni di trascinamento considerevoli.

L'associazione dei due fenomeni appena descritti generano forze orizzontali considerevoli sulle imbarcazioni ormeggiate, le quali possono essere amplificate dall'effetto "molla" dei dispositivi di ormeggio, con il risultato di una possibile rottura dei cavi, di un danneggiamento dei parabordi e conseguentemente collisione con i muri di sponda a parete verticale con conseguenti danneggiamenti sia per l'imbarcazione che per le strutture (nel caso di grandi navi).

Infine, occorre ricordare che un'altra caratteristica peculiare dei porti, interessati dal fenomeno di risonanza, è la difficoltà di navigazione in prossimità dell'imboccatura, a causa della presenza di correnti di flusso e riflusso che in relazione alla massa d'acqua "movimentata" dal fenomeno di risonanza e dalla profondità dei fondali possono far registrare picchi di notevole intensità.

5.1 Analisi dei fenomeni legati alle onde lunghe

Le onde provenienti da largo incidenti il sistema portuale subiscono la diffrazione in corrispondenza dell'imboccatura; una volta all'interno del bacino, esse vengono in parte assorbite ed in parte riflesse verso l'imboccatura dai muri di sponda che definiscono la geometria interna del bacino portuale. In prossimità dell'imboccatura queste onde riflesse, uscenti, subiscono un'ulteriore riflessione ad opera del moto ondoso incidente, con il risultato che parte dell'energia associata ad esse non fuoriesce completamente dal bacino. Tale energia rimane quindi intrappolata incrementando nel tempo e alimentando l'amplificazione delle oscillazioni interne (fenomeno di risonanza portuale) qualora si verificano le seguenti condizioni:

- le fasi delle diverse onde incidenti e riflesse si sovrappongono in modo opportuno;
- il treno di onde è di lungo periodo;
- la frequenza del treno di onde è prossimo o coincide con la frequenza propria del bacino chiuso (definita dalle dimensioni geometriche dello stesso).

Come conseguenza diretta è possibile che l'ampiezza dell'oscillazione della superficie libera all'interno del porto aumenti considerevolmente rispetto al valore dell'ampiezza delle onde incidenti. In ogni caso, l'ampiezza delle oscillazioni, dovuta al fenomeno della risonanza, può essere limitata a causa della dissipazione dell'energia che si manifesta mediante:

- il frangimento delle onde dentro il bacino quando l'oscillazione supera un determinato limite,
- gli effetti dovuti all'attrito sul fondo e sulle pareti, nel caso di basse profondità.

La simulazione degli effetti indotti dalle onde di lungo periodo all'interno delle aree dello specchio acqueo della stazione VLF di Tavolara, è stato condotto con il modello matematico VEGA che non tiene conto dei sopra citati effetti dissipativi, per cui i risultati ottenuti (seppur mantenendo la loro piena validità) sono da ritenere cautelativi e rappresentano i massimi valori di oscillazione che possono presentarsi all'interno del bacino portuale esaminato.

Le simulazioni sono state condotte prendendo la direzione di provenienza 360°N , appartenente al settore di traversia principale caratterizzato dagli stati di mare più intensi e frequenti (settore sotto costa compreso fra $350 - 40^{\circ}\text{N}$) e prendendo un intervallo di periodi compresi fra i 5 ed i 150 secondi, in modo tale da coprire le possibili frequenze di risonanza che si possono sviluppare nello specchio acqueo interno. Tale scelta è stata effettuata anche considerando che essa ha un'incidenza più ortogonale rispetto all'imboccatura e quindi un maggior potere di penetrazione all'interno del bacino, seppure nella teoria della risonanza portuale è dimostrato che anche onde parallele all'imboccatura possono provocare effetti di amplificazione delle oscillazioni residue interne.

In seguito, è stato ricavato l'andamento dell'altezza d'onda relativa in funzione della frequenza per alcuni punti significativi posti nelle zone interessate dall'ormeggio delle imbarcazioni che frequentano l'approdo della Stazione VLF di Tavolara.

Dall'analisi degli andamenti dei diagrammi ottenuti sono state individuate le frequenze rappresentative a cui corrispondono i massimi valori di oscillazione nei diversi punti considerati.

Dai grafici allegati si rileva che:

- nella darsenetta rettangolare più interna solitamente utilizzata per l'ormeggio (figura 23) in cui è stato ubicato il punto P1 le frequenze a cui corrispondono i valori più elevati dell'altezza relativa ($H_r = 0,6 - 1,0$) corrispondono ai periodi 5 e 30 s;
- in corrispondenza dello spigolo sud della banchina di riva (figura 25) nel punto P2 i valori più elevati delle oscillazioni ($H_r = 0,4$) sono associati al periodo 30 secondi;
- nel punto centrale della banchina di riva (Punto P3 - figura 26) si è ottenuto un valore del coefficiente di altezza relativa limitato ($H_r = 0,6$) in corrispondenza del periodo $T=9$ e 15 s; tale valore tende ad aumentare sensibilmente avvicinandosi a periodi di 50 secondi ($H_r = 0,9$).
- in corrispondenza dello spigolo nord della banchina di riva (figura 27) nel punto P4 i valori più elevati delle oscillazioni ($H_r = 0,3$) sono associati al periodo 30 secondi.

A conclusione dello studio delle onde di lungo periodo può affermarsi che il fenomeno di risonanza non si presenta nel caso dell'approdo di Cala di Ponente con caratteristiche di particolare gravosità, essendovi coefficienti di amplificazione abbastanza piccoli, anche per i periodi più elevati. E' comunque da raccomandare che nelle posizioni individuate come più soggette a fenomeni di risonanza (Punto P1 nella darsenetta rettangolare) si sconsiglia lo stazionamento quando si

presentano condizioni meteo-marine avverse fuori dell'infrastruttura portuale e che vengano curati particolarmente gli ormeggi in caso di mare anche non particolarmente mosso.

In prossimità della banchina di riva le conseguenze sui natanti sono meno gravose in virtù dei minori valori di oscillazione registrati, ma è ugualmente opportuno, nelle zone potenzialmente più pericolose come quella centrale (punto P3), utilizzare tali accosti solo in assenza di stati di mare gravosi caratterizzati da periodi elevati.

La banchina parallela alla diga foranea, come dimostrano i risultati ottenuti nel punto P4, rappresenta la zona più idonea all'ormeggio in caso di condizioni meteo marine avverse in quanto è quella caratterizzata dai valori di oscillazione residua minori, soprattutto dopo il rifacimento della diga foranea.

ALLEGATO 1

Modello matematico di diffrazione-riflessione VEGA
(penetrazione ondosa in aree ridossate)

In modello numerico **VEGA** utilizzato è classificabile come modello irrotazionale lineare bidimensionale per onde armoniche. Il modello è basato sull'equazione di Helmholtz valida sotto le seguenti ipotesi:

- irrotazionalità del moto;
- rapporto $H/L \ll 1$ dove H ed L sono rispettivamente l'altezza e la lunghezza d'onda;
- assenza di dissipazioni;
- assenza di forze legate alla rotazione terrestre (forze di Coriolis);
- profondità del fondale costante;
- fondo impermeabile;
- variazione verticale del potenziale delle velocità coincidente con la soluzione per onde progressive lineari su fondale costante;
- onde armoniche nel tempo (monocromatiche).

L'equazione ellittica di Helmholtz risulta:

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

dove:

k = numero d'onda calcolato tramite la relazione di dispersione della teoria lineare ($\omega^2 = gk \tanh(kd)$)

$\phi(x,y)$ = potenziale bidimensionale delle velocità orbitali delle particelle

∇^2 = operatore di Laplace definito nel piano x,y coincidente con il livello medio marino

Con le ipotesi poste tale equazione è in grado di simulare correttamente il fenomeno combinato di diffrazione-riflessione di onde armoniche lineari. Per risolvere l'equazione di Helmholtz, di tipo ellittico, è necessario imporre condizioni al contorno note su tutta la frontiera del dominio di integrazione. Nel caso di bacini portuali si impone lungo l'imboccatura portuale (o comunque lungo i contorni di continuità con il semispazio infinito escluso dal dominio di integrazione) che venga soddisfatta una opportuna condizione di radiazione. Contemporaneamente lungo il resto della frontiera vengono imposte condizioni sulla derivata direzionale del potenziale delle velocità (totale o parziale riflessione).

Il modello numerico **VEGA** risolve l'equazione di Helmholtz tramite la tecnica numerica degli elementi di contorno. In breve la tecnica consiste nel ridurre l'equazione ellittica di Helmholtz definita sul campo bidimensionale di calcolo ad un'equazione integrale definita sulla sola frontiera del campo. La discretizzazione della frontiera permette quindi di ridurre l'equazione integrale ad un

sistema di equazioni lineari definite nel campo complesso dove le incognite sono costituite da un sistema di sorgenti distribuite sulla frontiera discretizzata. La risoluzione del sistema di equazioni, che costituisce la parte più onerosa dal punto di vista computazionale del modello numerico, è ottenuta utilizzando il metodo delle eliminazioni successive di Gauss. La dimensione del sistema di equazioni dipende dal numero di sorgenti incognite introdotte sulla frontiera che risulta essere a sua volta funzione della lunghezza d'onda (sono necessarie almeno 5 sorgenti per lunghezza d'onda) e della dimensione dell'elemento (banchina, canale) più corto presente nell'area da simulare (sono necessarie almeno 6 sorgenti per ogni elemento). Risolto il sistema di equazioni è quindi possibile calcolare in ogni punto del campo di potenziale delle velocità orbitali delle particelle idriche in superficie, l'altezza d'onda e la sua fase.

Il modello numerico richiede i seguenti dati in ingresso:

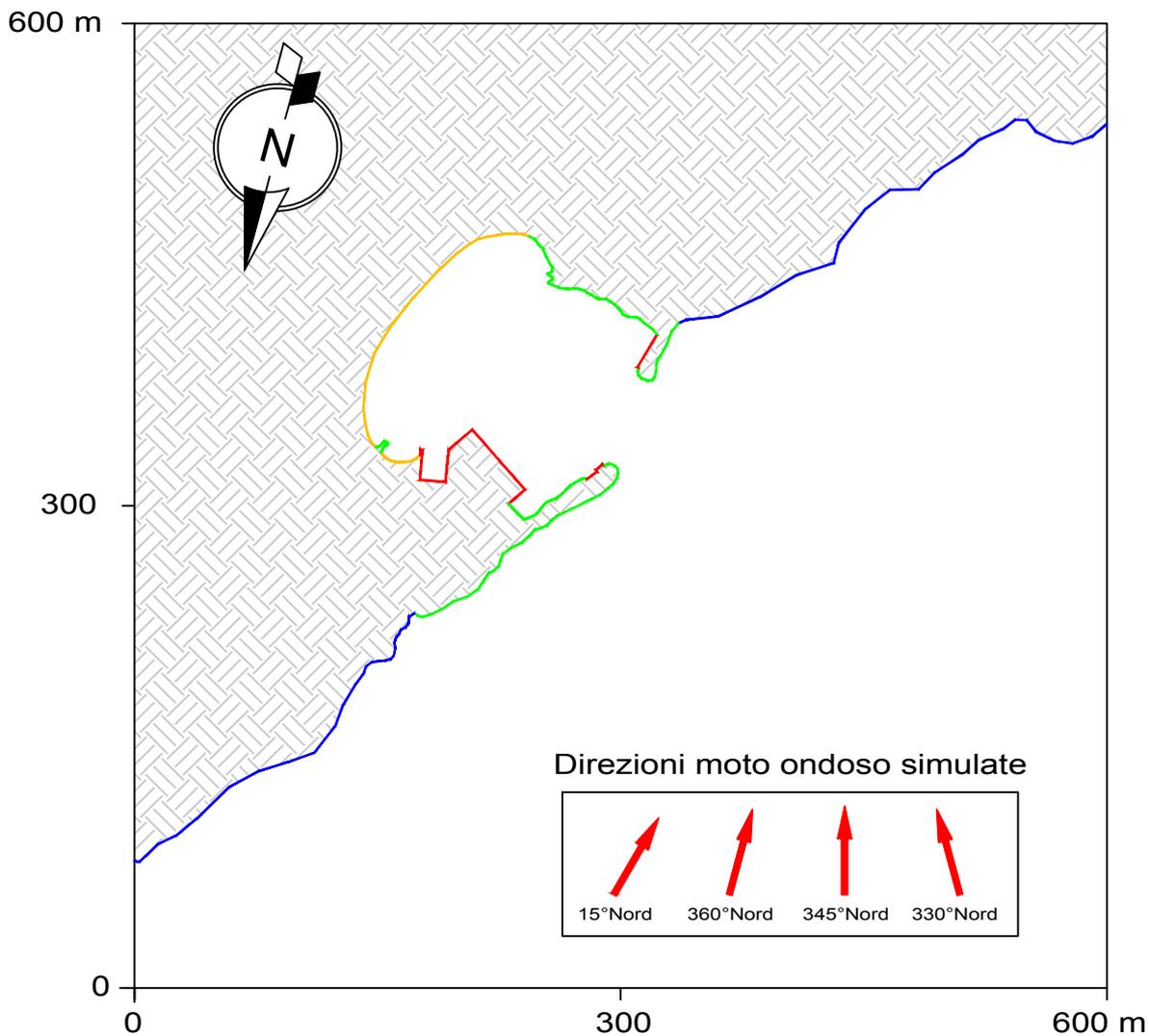
- coordinate dei vertici del contorno dell'area portuale;
- posizione dell'imboccatura/e portuale;
- direzione e periodo del moto ondoso sull'imboccatura portuale;
- profondità del fondale all'interno del porto;
- profondità del fondale all'esterno dell'imboccatura portuale;
- passo di discretizzazione del contorno;
- coefficienti di riflessione delle banchine;
- coordinate dei punti dove devono essere calcolati i risultati.

Il modello fornisce come risultati:

- altezza d'onda, potenziale delle velocità e fase nei punti richiesti.

I risultati ottenuti possono essere restituiti sia sotto forma numerica che grafica.

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: Stato attuale
Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con
indicazione dei coefficienti di riflessione

Coefficienti di riflessione

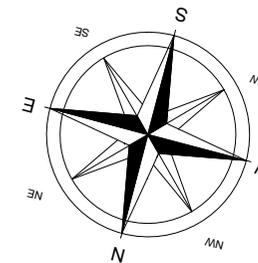
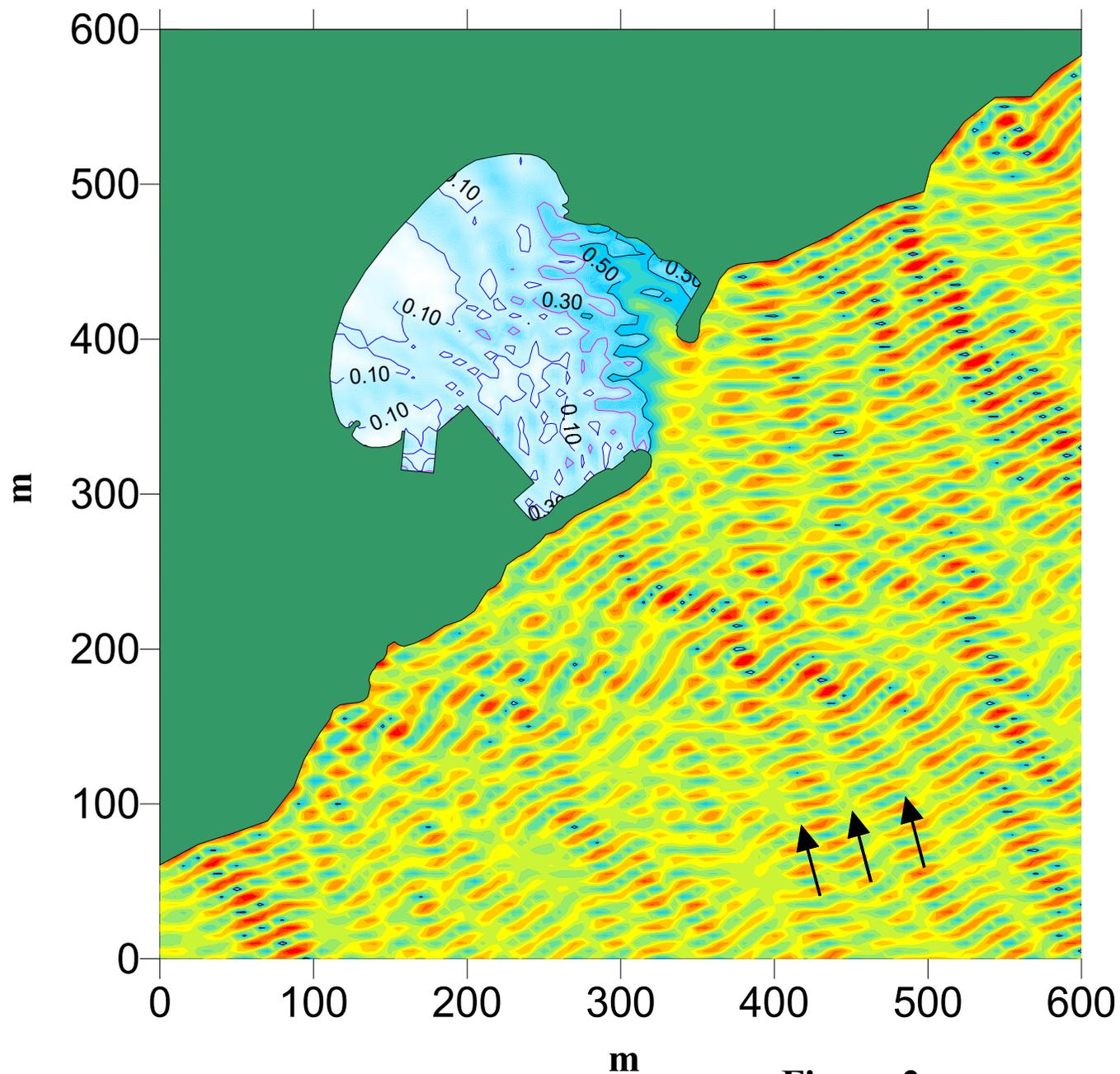
	R=0.90
	R=0.50
	R=0.35
	R=0.10

Profondita' media del bacino: - 4.0 m sul l.m.m.
Profondita' generatore moto ondoso: -15.0 m sul l.m.m.

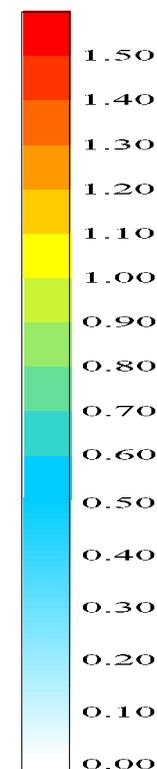
Figura 1

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: SITUAZIONE ATTUALE

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 5,0$ s

Direzione Dir = 330° N

File = Tavolara att DIR 330 T 5.SRF

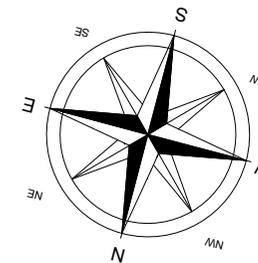
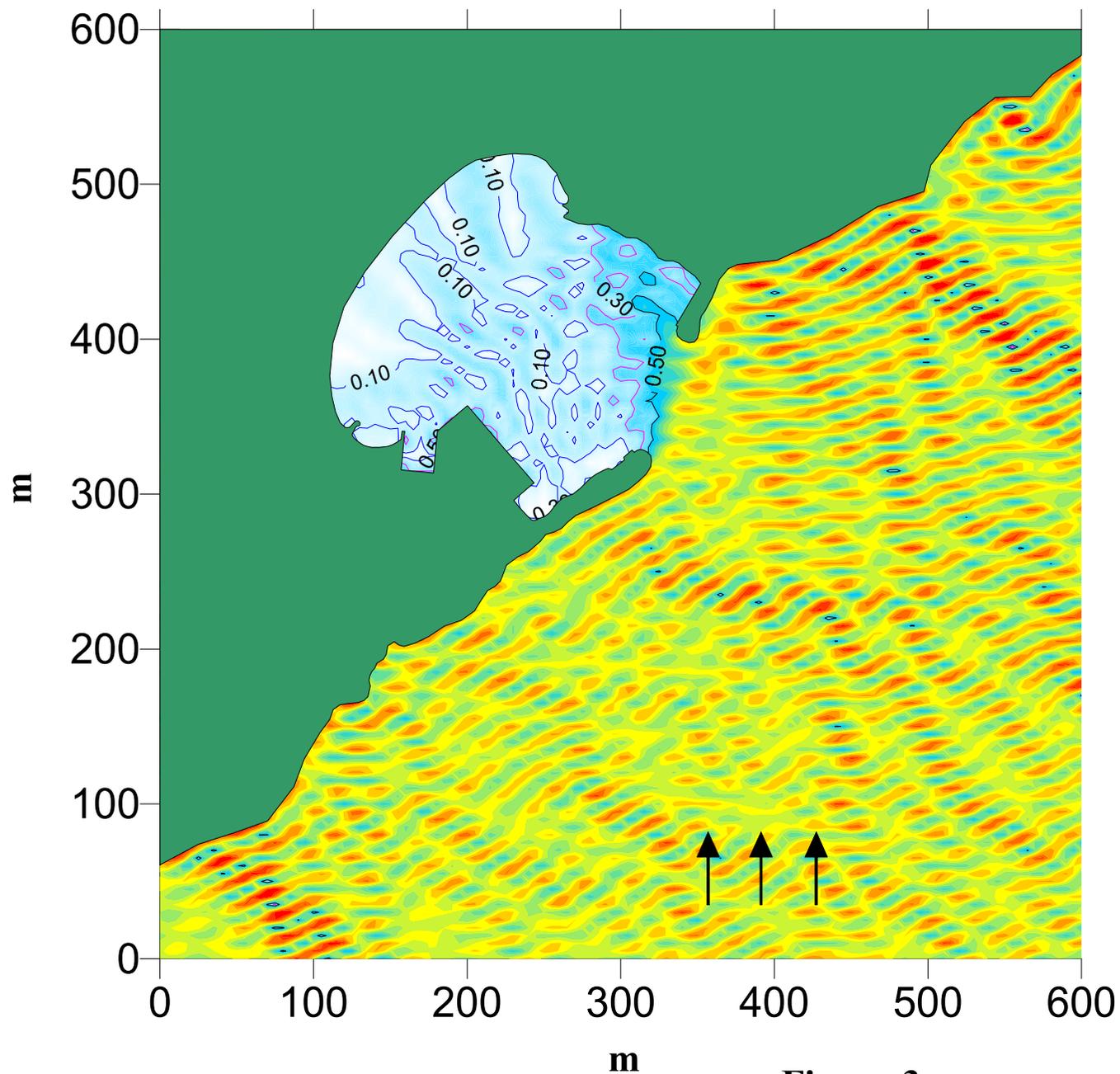


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

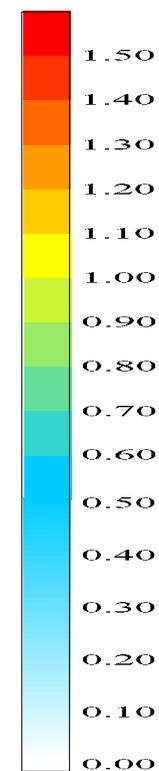
Figura 2

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: SITUAZIONE ATTUALE

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 5,0$ s

Direzione $Dir = 345^\circ N$

File = Tavolara att DIR 345 T 5.SRF

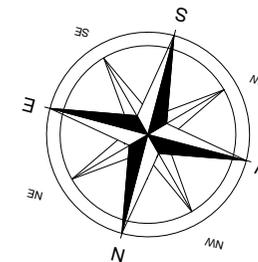
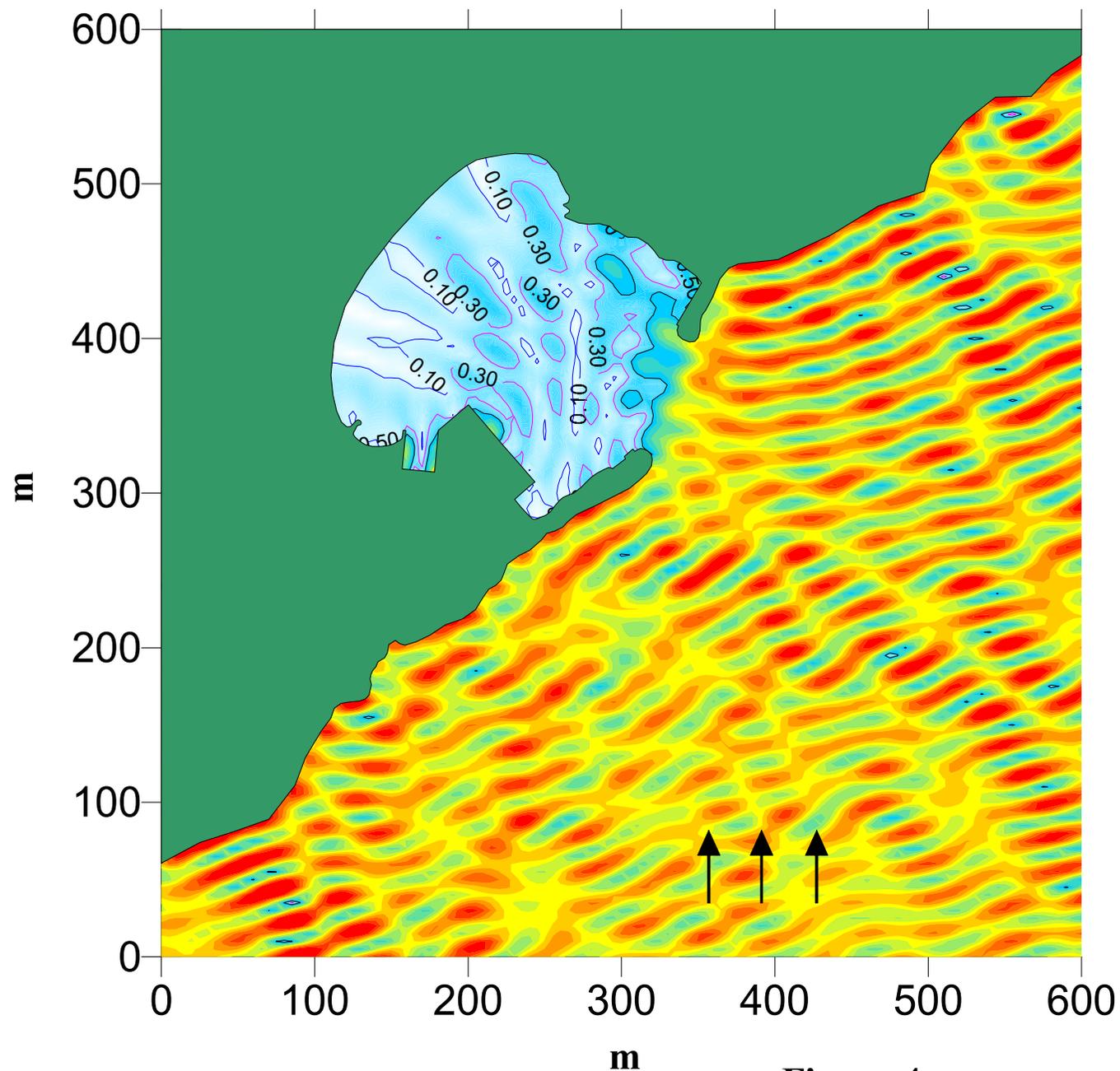


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

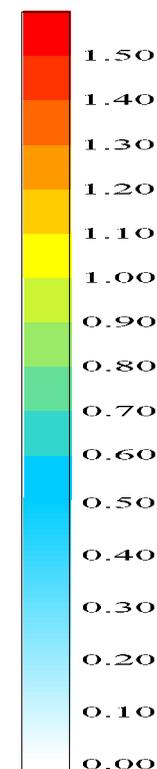
Figura 3

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: SITUAZIONE ATTUALE

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 7,0$ s

Direzione $Dir = 345^\circ N$

File = Tavolara att DIR 345 T 7.SRF

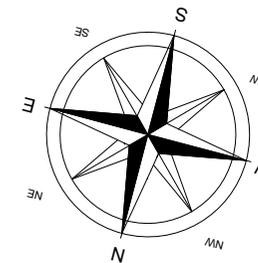
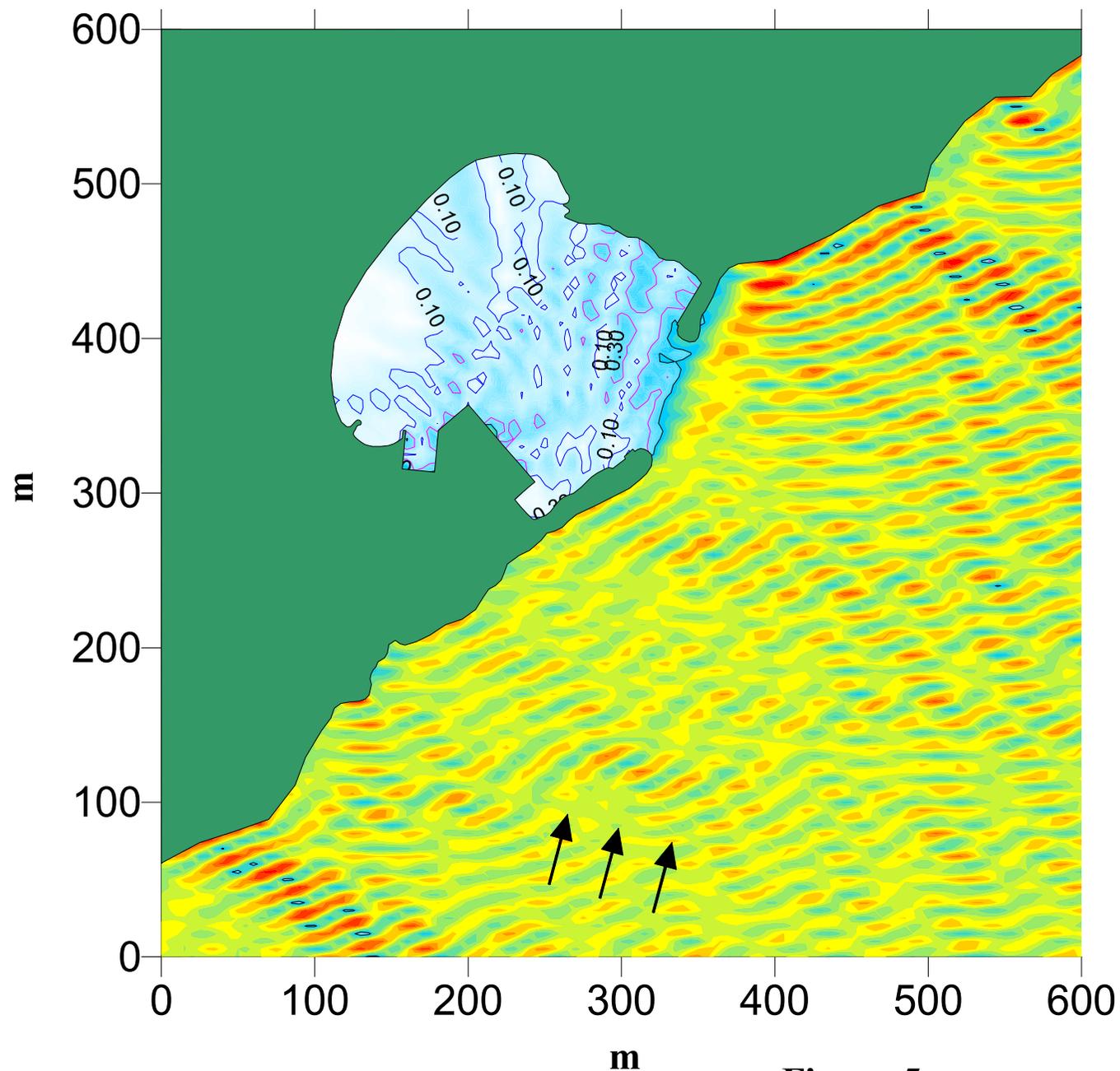


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

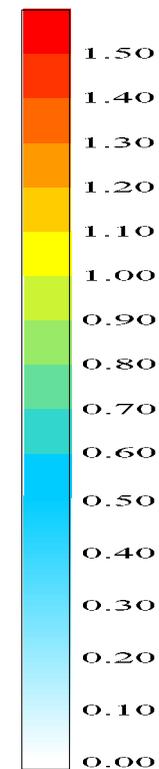
Figura 4

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: SITUAZIONE ATTUALE

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 5,0$ s

Direzione Dir = 360° N

File = Tavolara att DIR 360 T 5.SRF

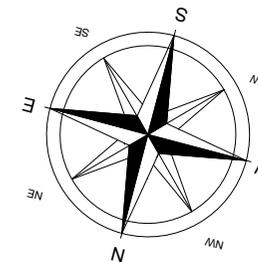
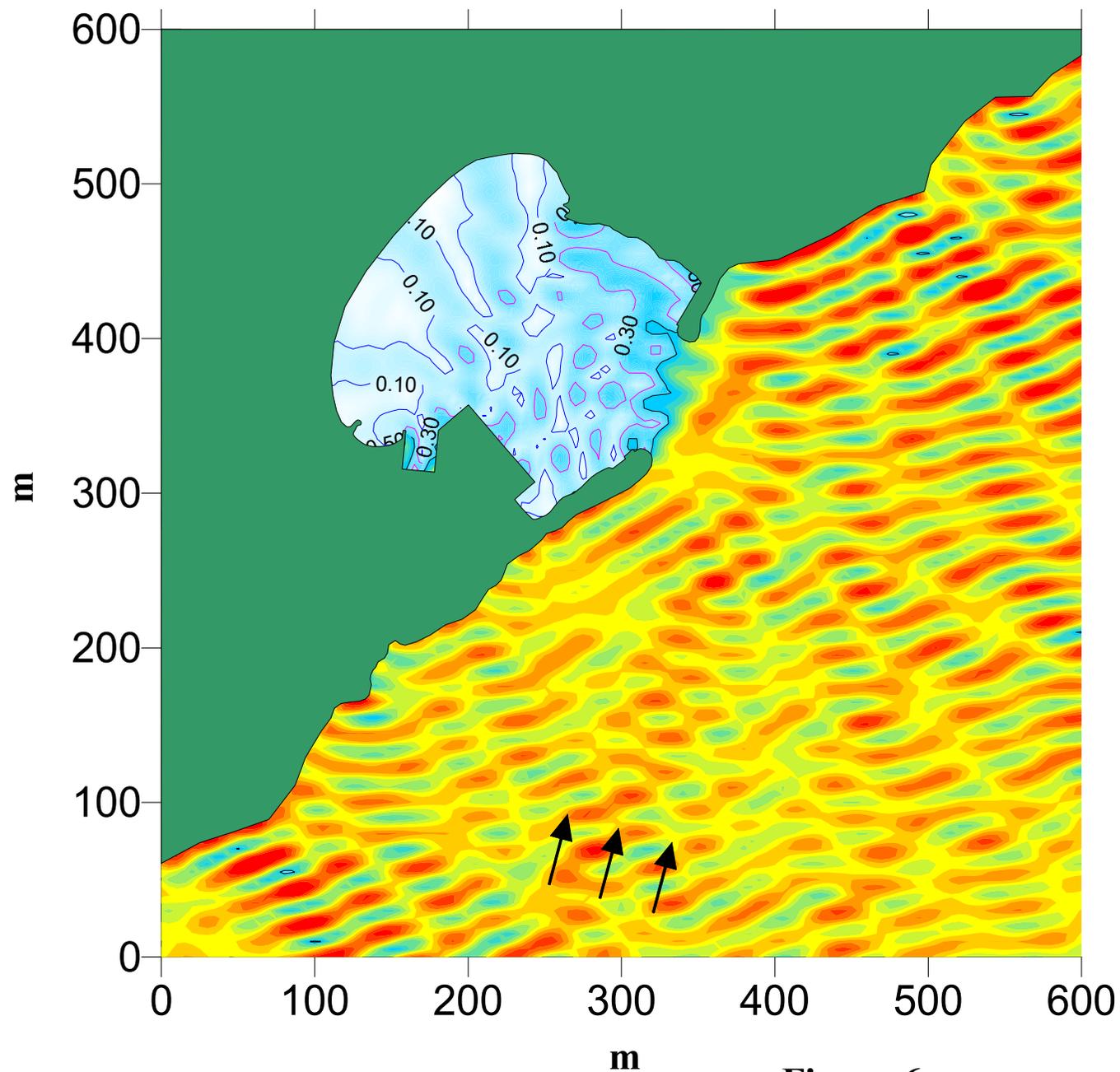


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

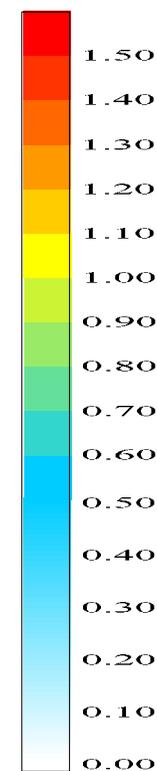
Figura 5

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: SITUAZIONE ATTUALE

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 7,0$ s

Direzione Dir = 360° N

File = Tavolara att DIR 360 T 7.SRF

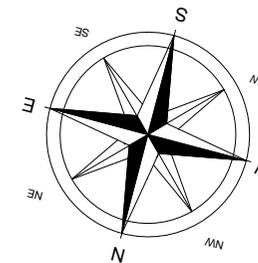
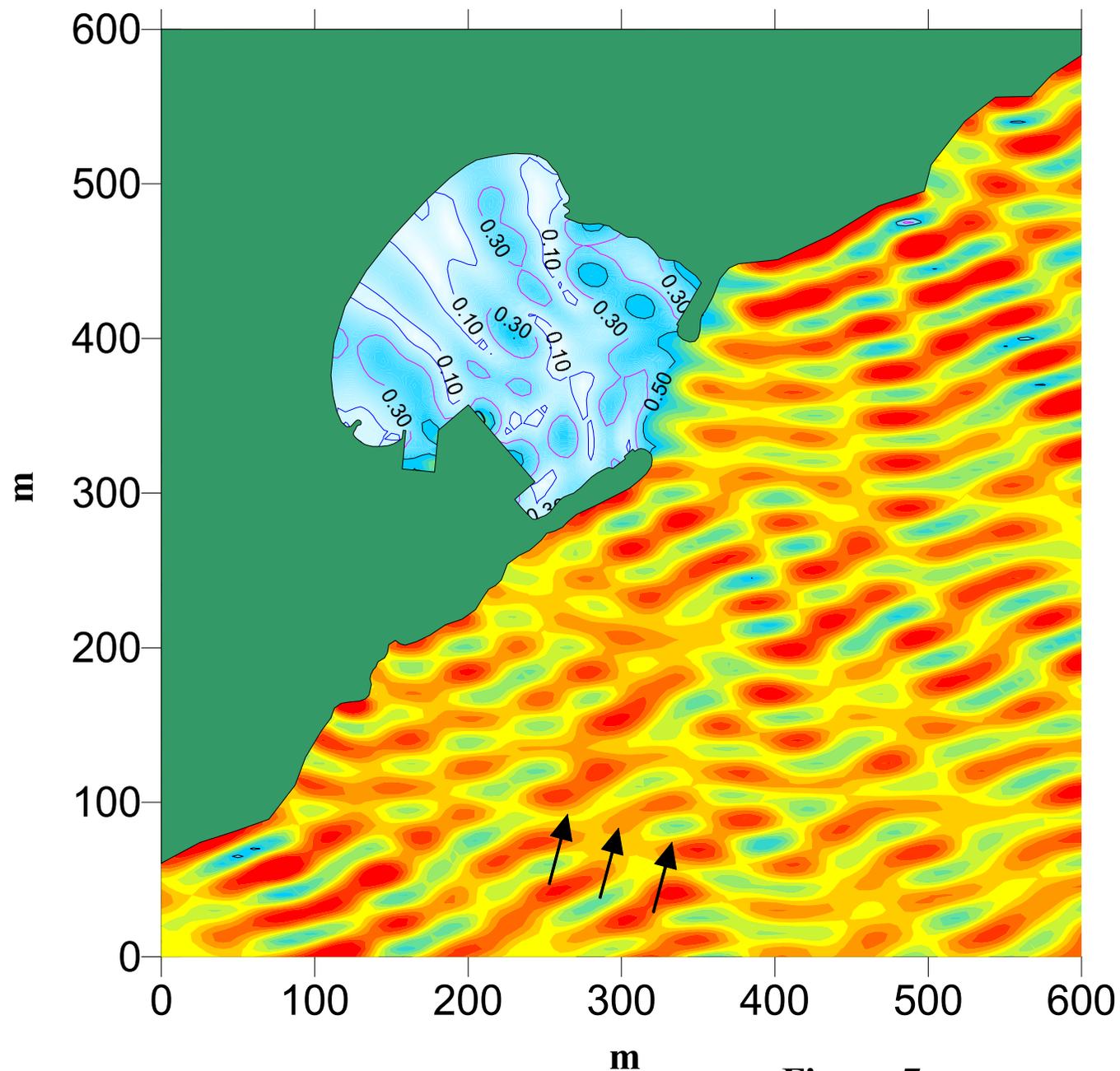


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

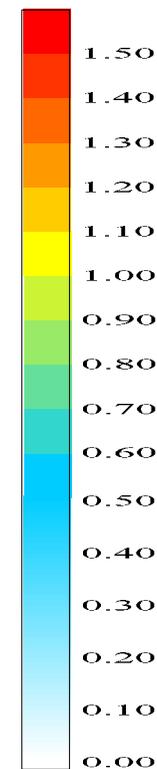
Figura 6

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: SITUAZIONE ATTUALE

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 9,0$ s

Direzione Dir = 360° N

File = Tavolara att DIR 360 T 9.SRF

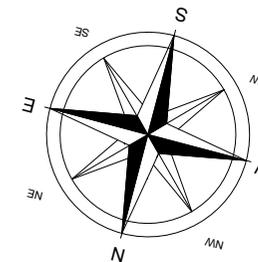
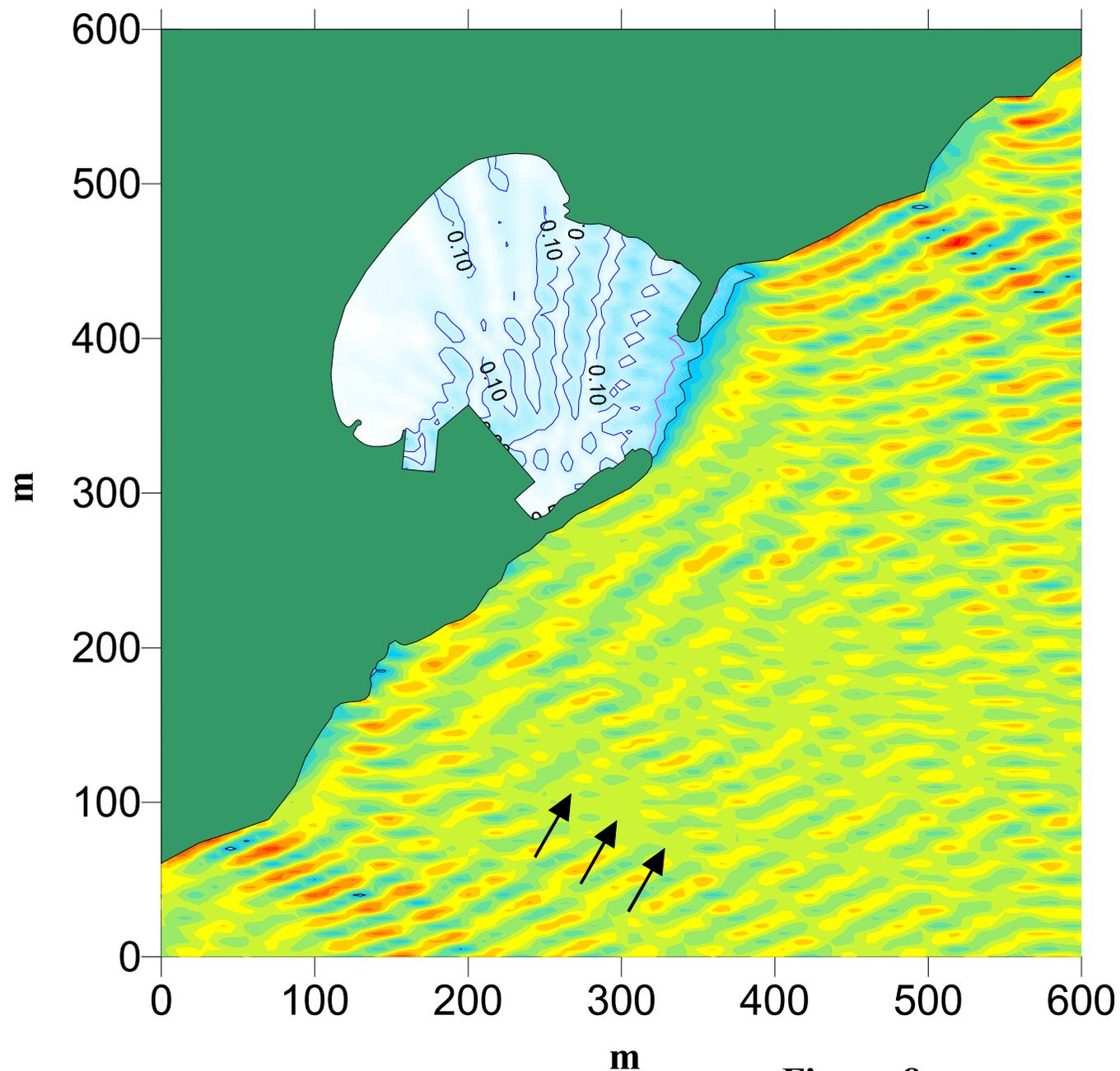


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

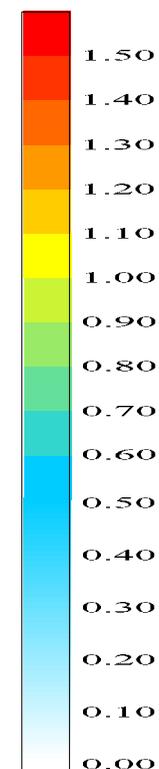
Figura 7

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: SITUAZIONE ATTUALE

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 5,0$ s

Direzione Dir = 15° N

File = Tavolara att DIR 15 T 5.SRF

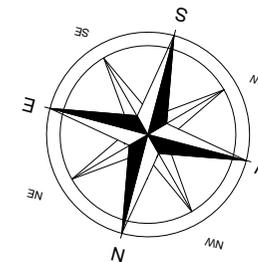
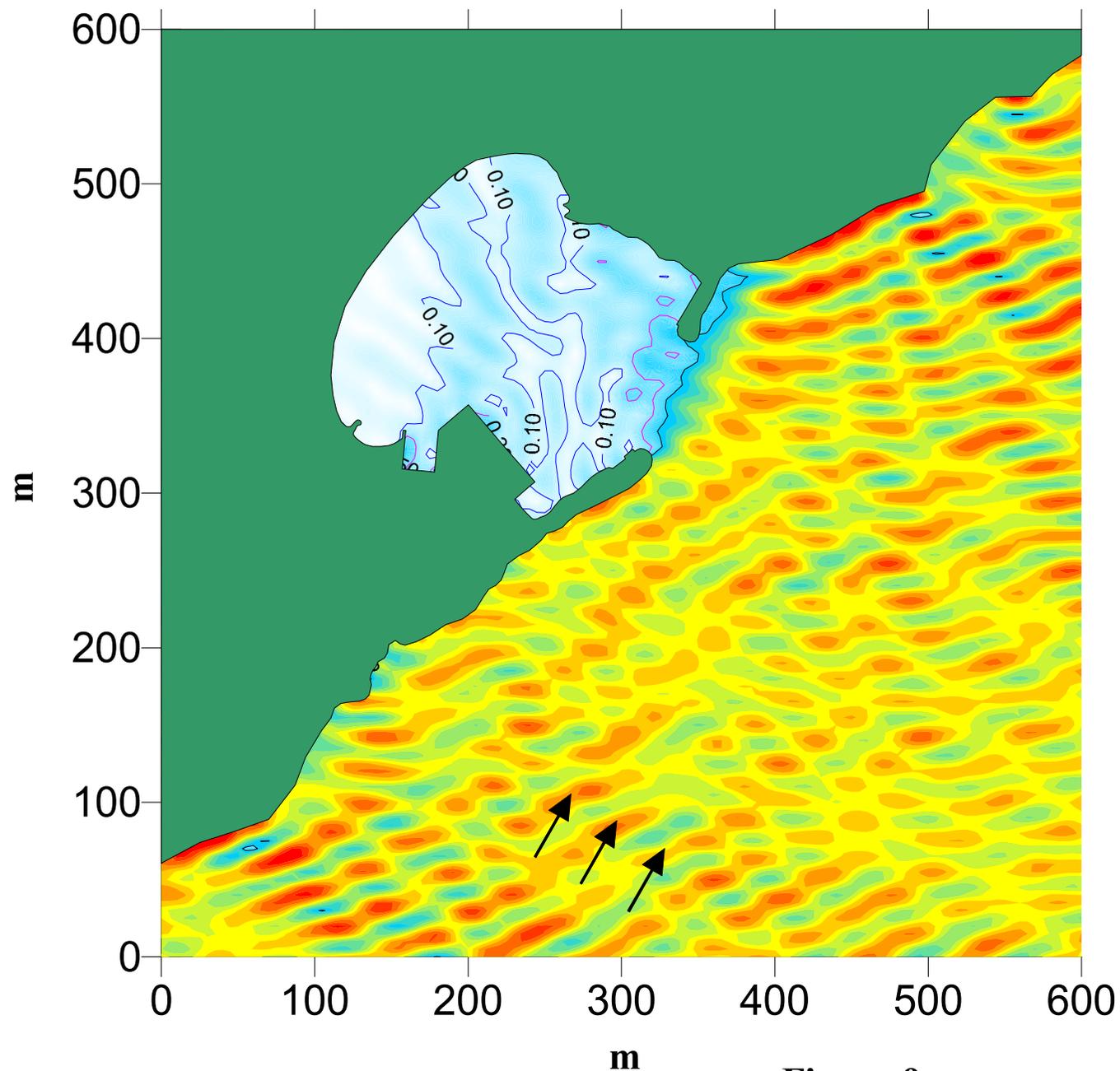


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

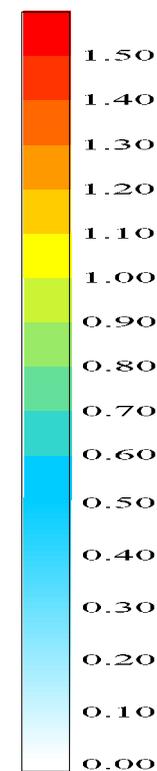
Figura 8

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: SITUAZIONE ATTUALE

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 7,0$ s

Direzione Dir = 15° N

File = Tavolara att DIR 15 T 7.SRF

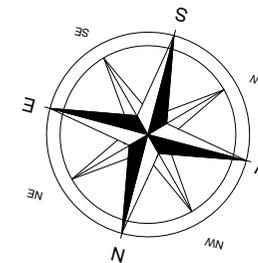
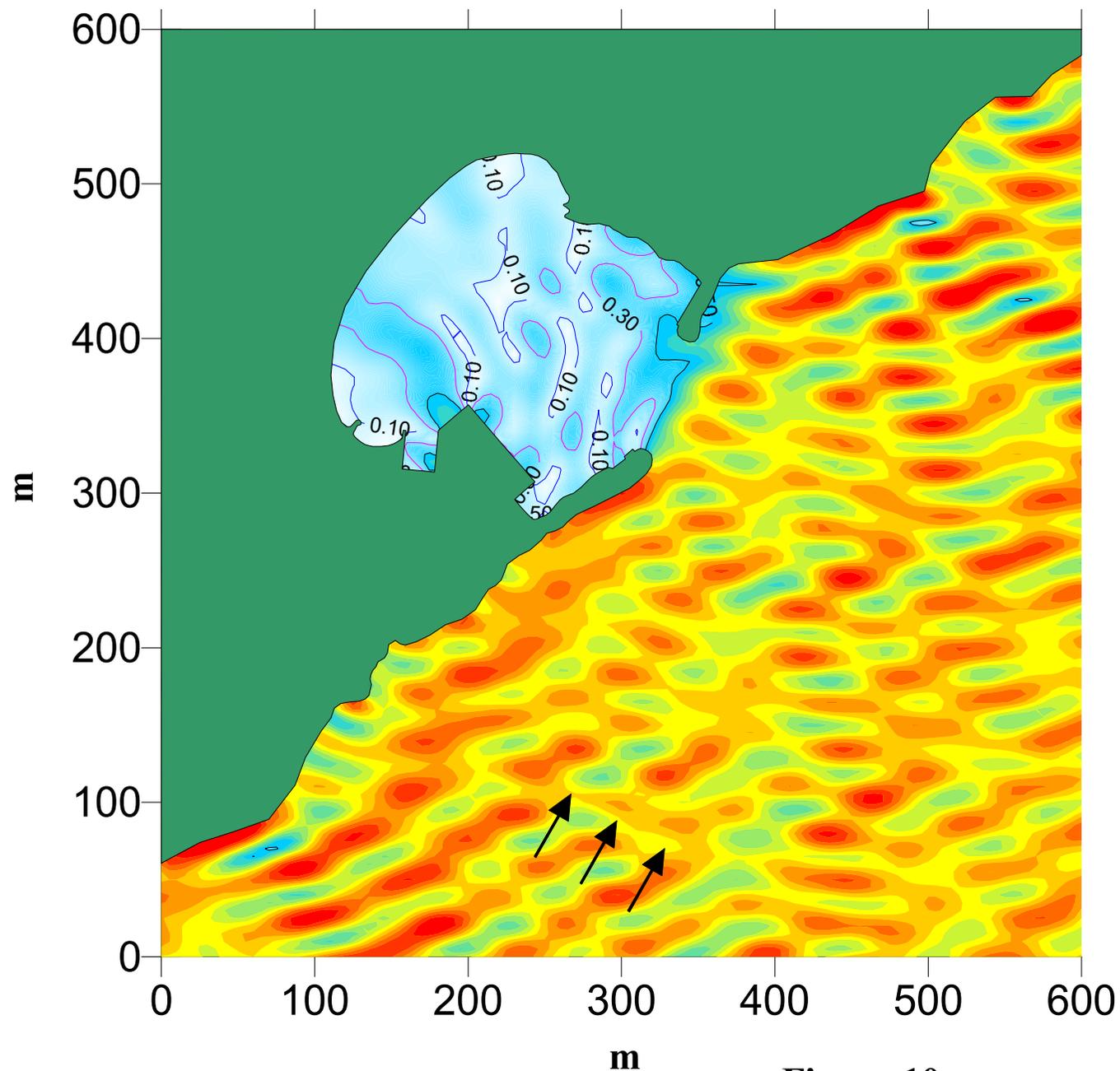


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

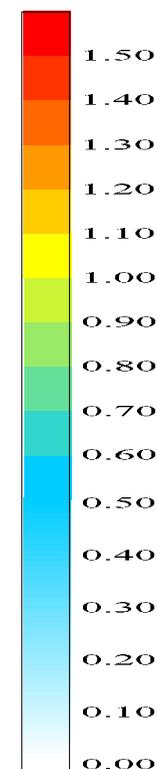
Figura 9

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: SITUAZIONE ATTUALE

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 9,0$ s

Direzione Dir = 15° N

File = Tavolara att DIR 15 T 9.SRF

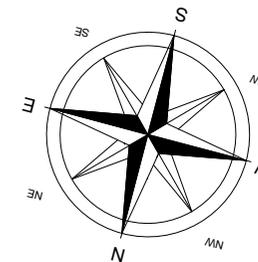
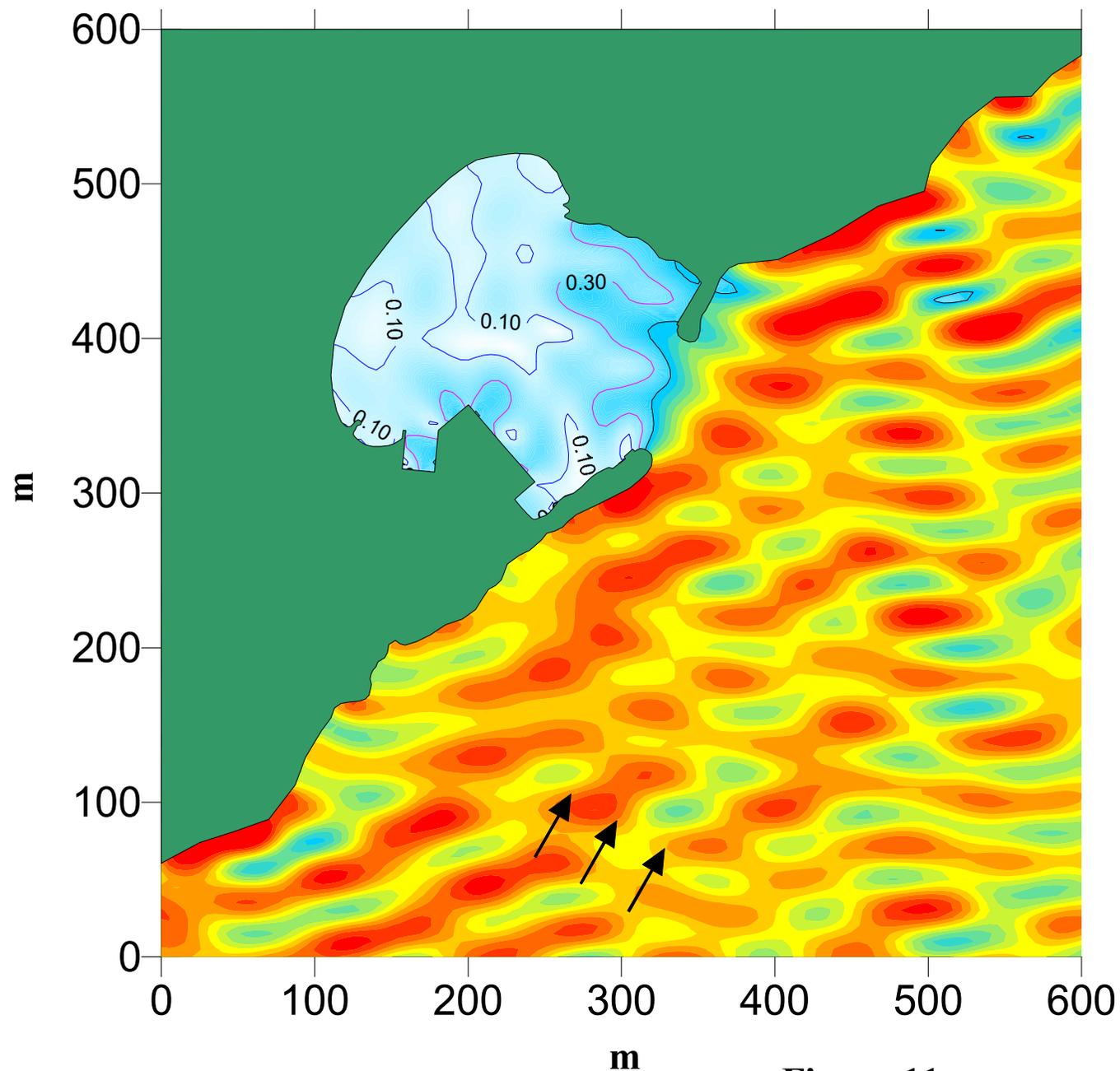


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

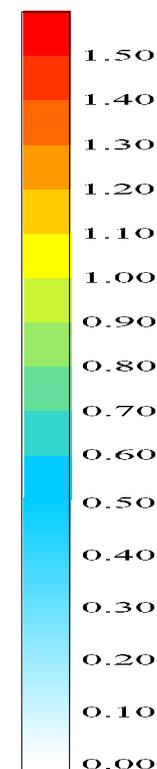
Figura 10

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: SITUAZIONE ATTUALE

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 12,0$ s

Direzione Dir = 15° N

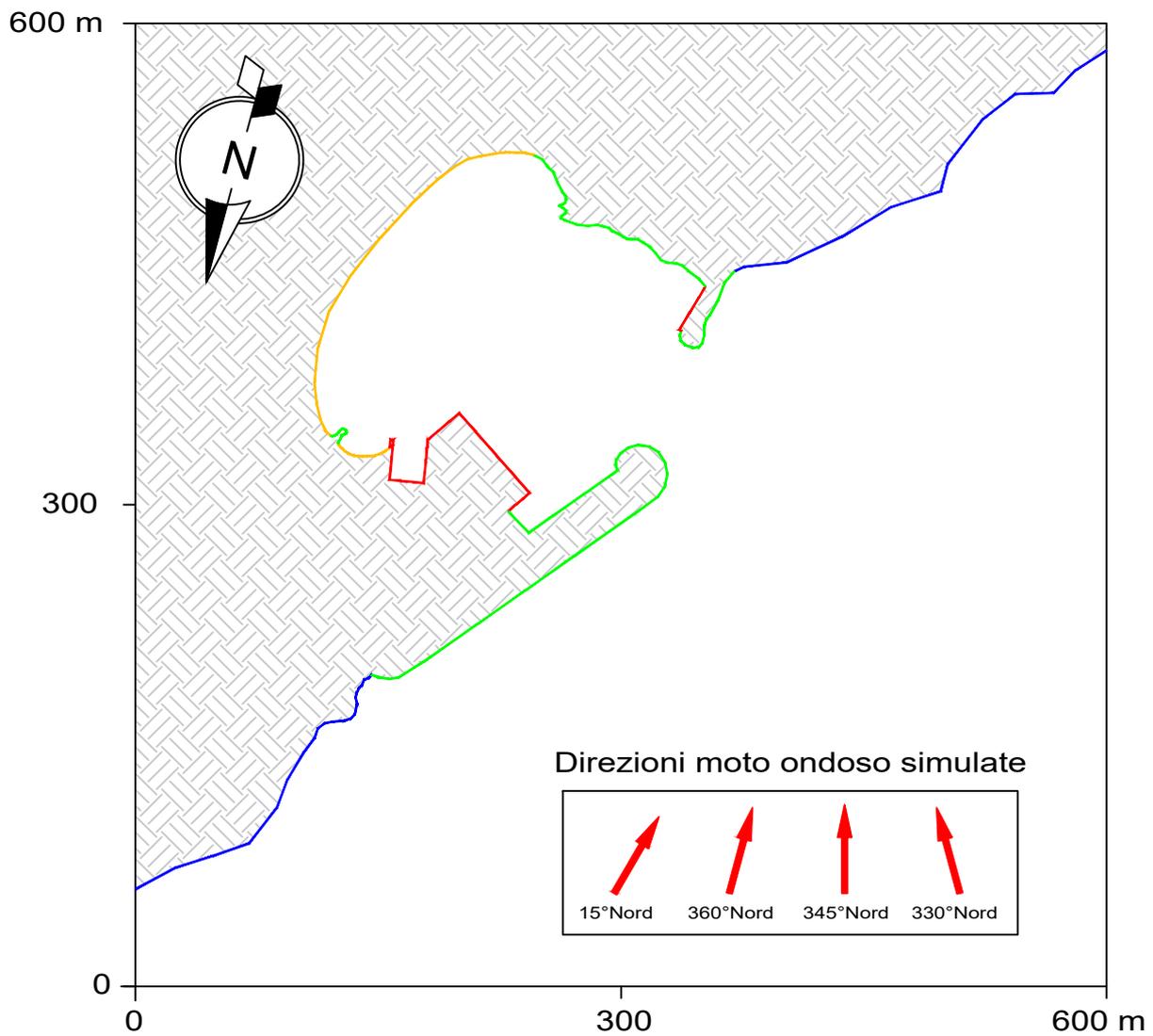
File = Tavolara att DIR 15 T 12.SRF



Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

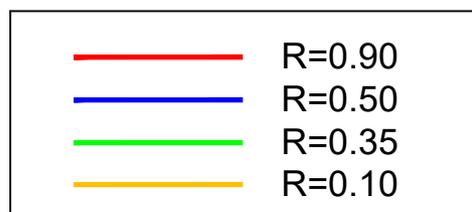
Figura 11

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: Configurazione di progetto
Modello matematico VEGA: agitazione ondosa interna



Configurazione portuale simulata con
indicazione dei coefficienti di riflessione

Coefficienti di riflessione

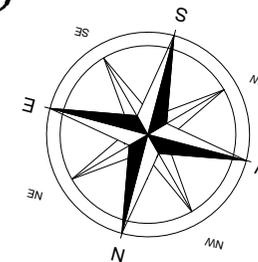
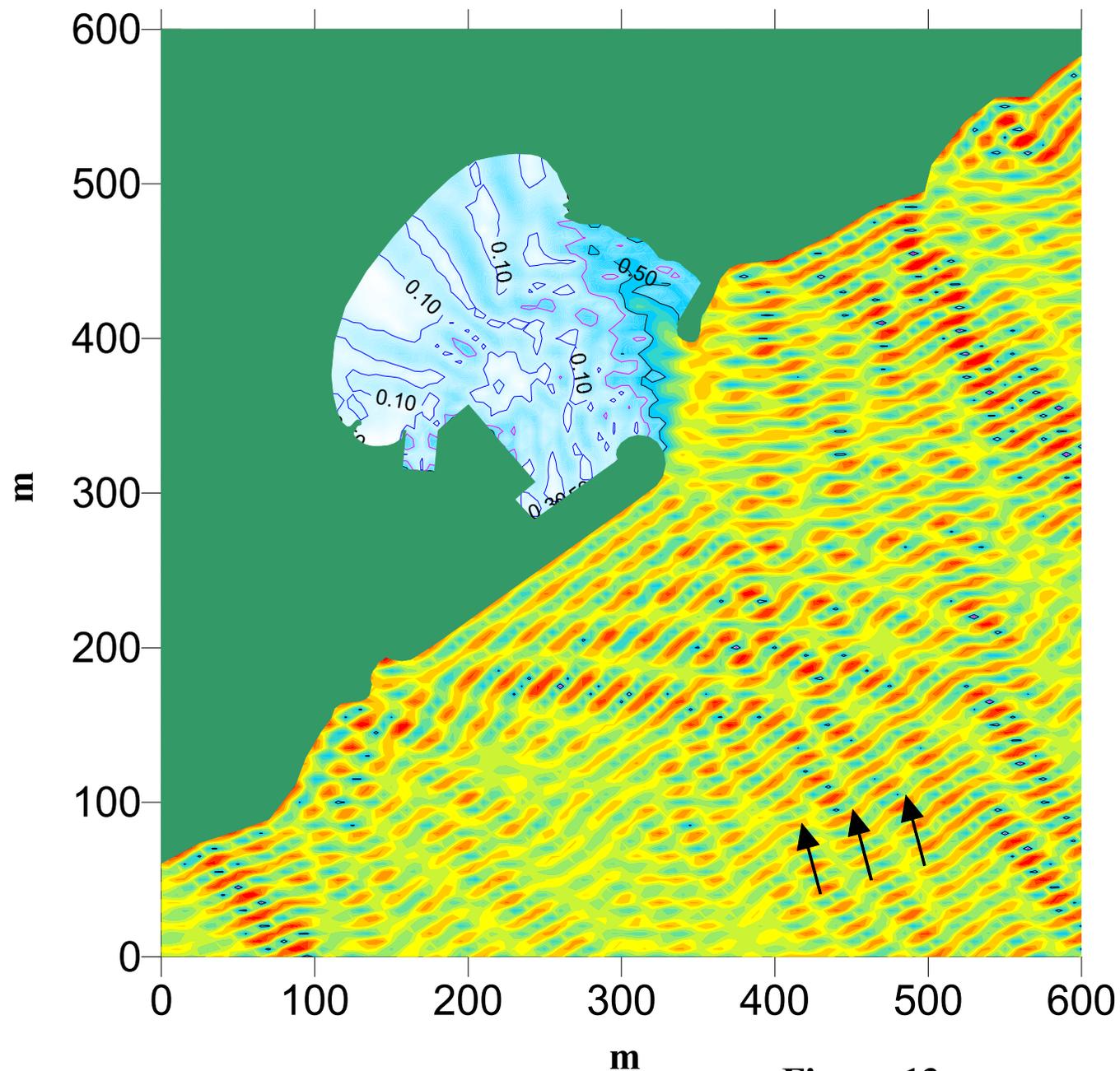


Profondita' media del bacino: - 4.0 m sul l.m.m.
Profondita' generatore moto ondoso: -15.0 m sul l.m.m.

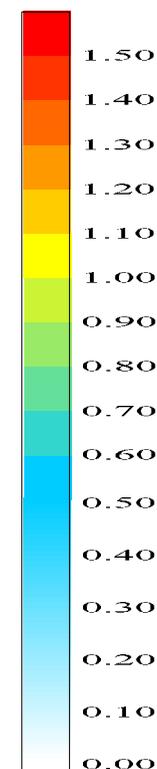
Figura 12

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 5,0$ s

Direzione Dir = 330 °N

File = Tavolara Pro DIR 330 T 5.SRF

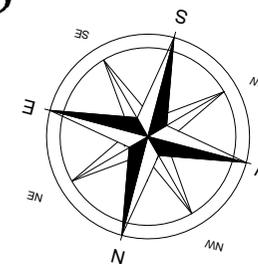
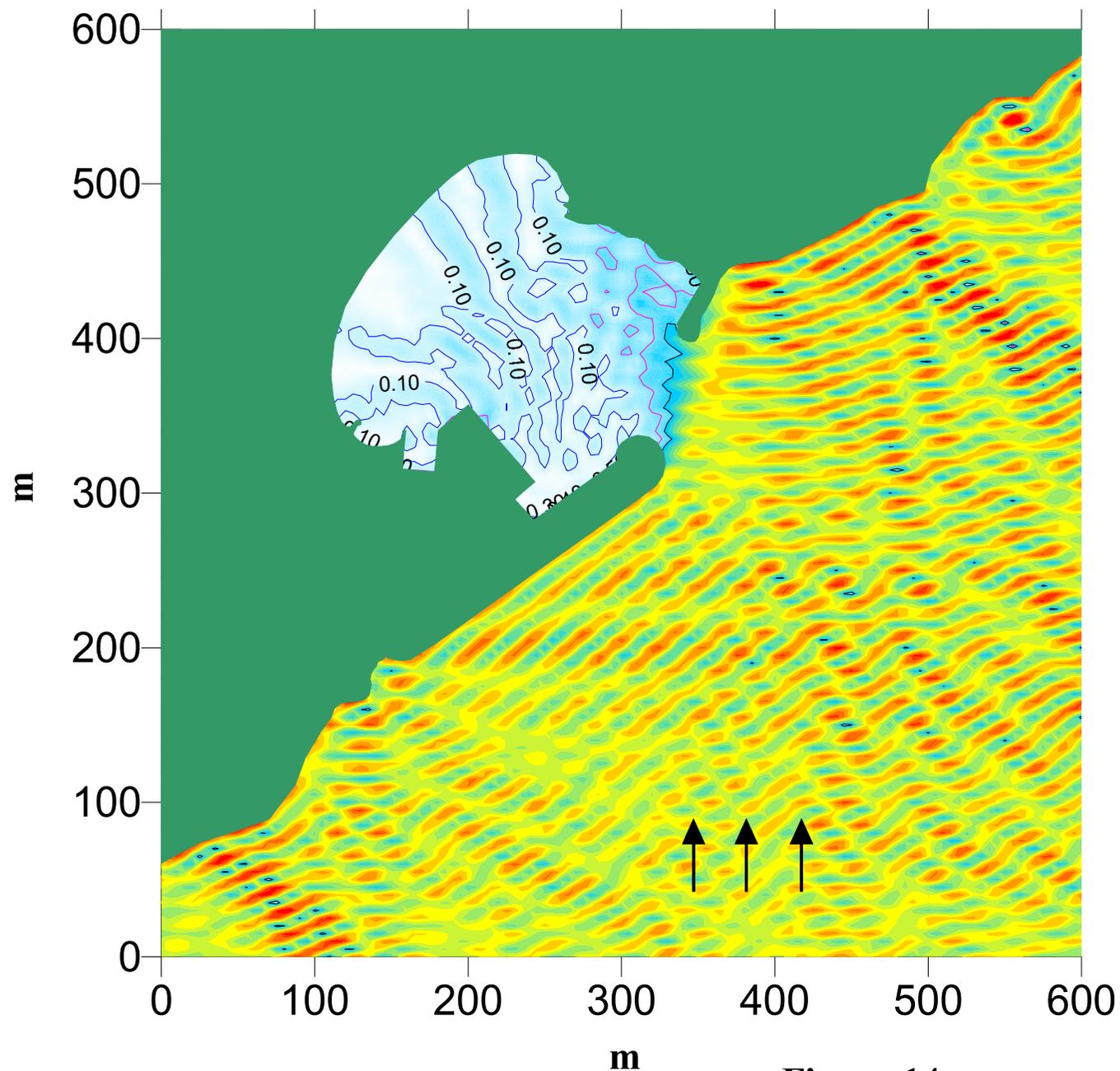


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

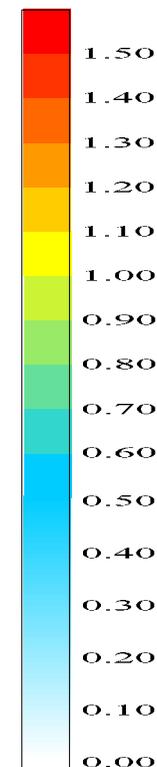
Figura 13

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 5,0$ s

Direzione Dir = 345 °N

File = Tavolara Pro DIR 345 T 5.SRF

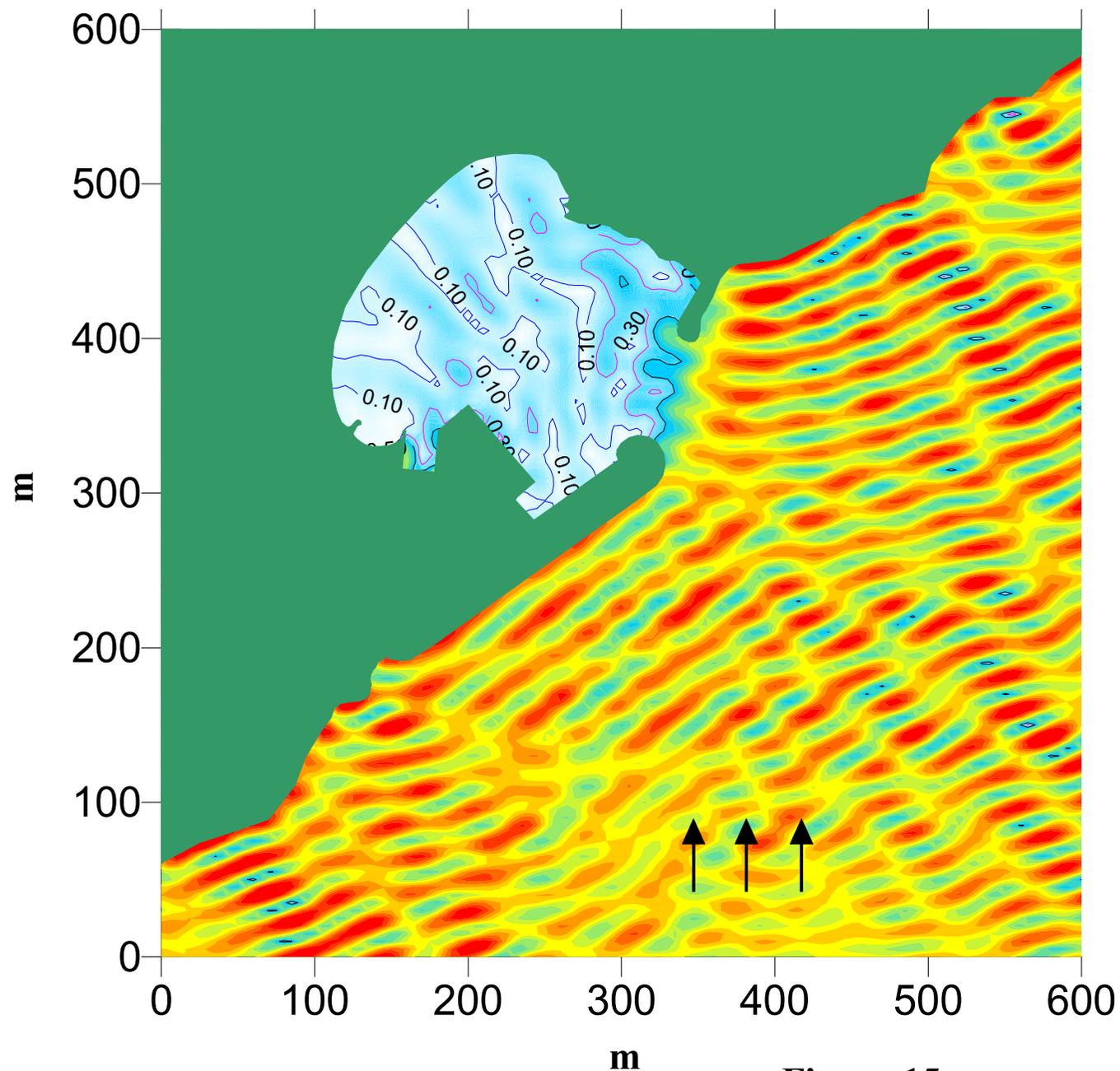


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

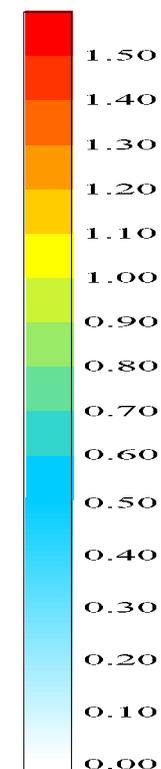
Figura 14

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 7,0$ s

Direzione Dir = 345° N

File = Tavolara Pro DIR 345 T 7.SRF

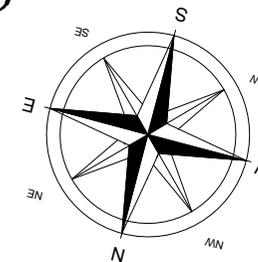
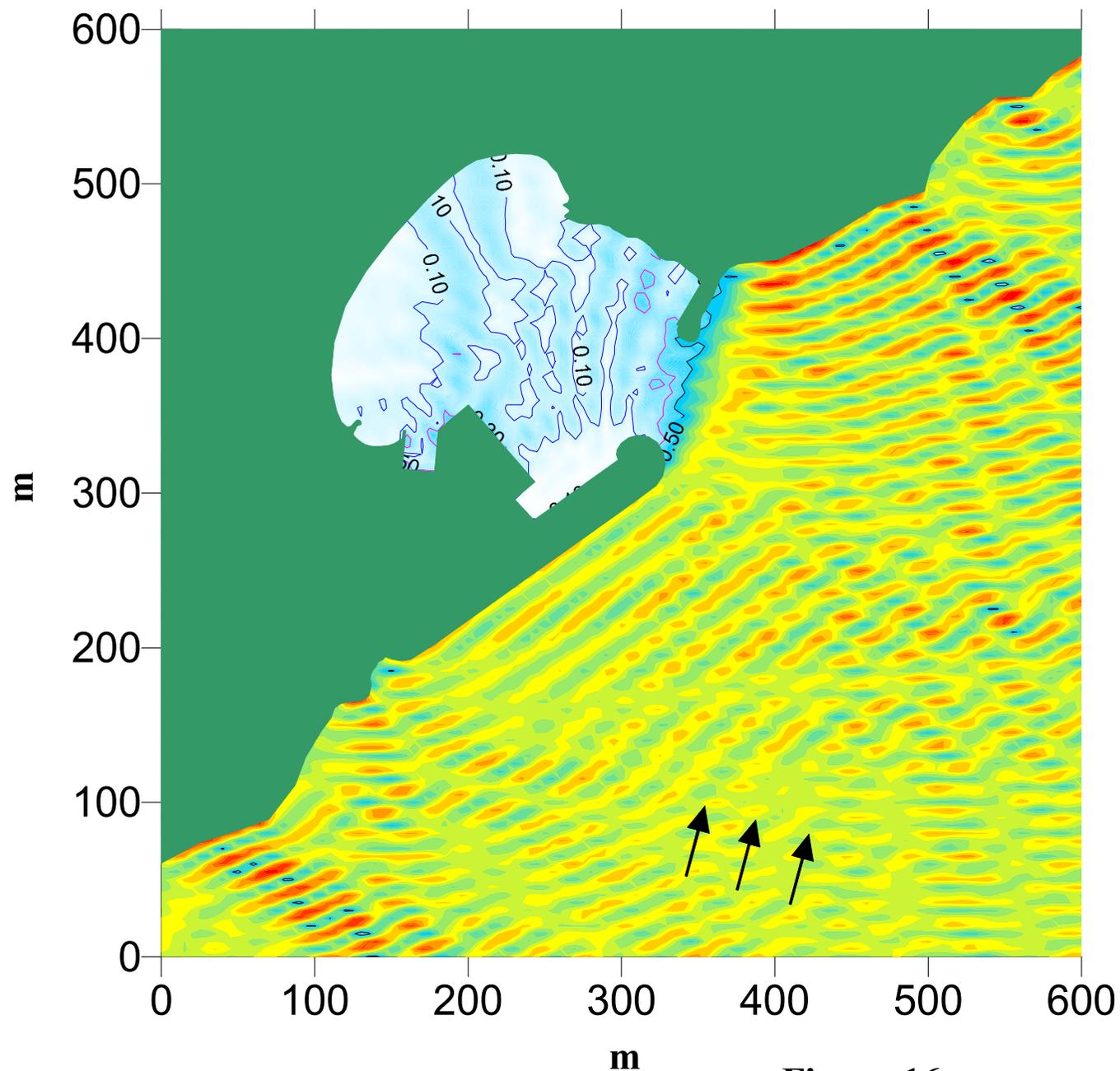


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

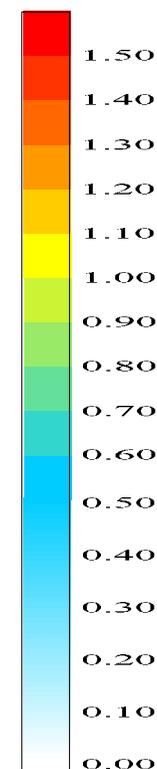
Figura 15

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 5,0$ s

Direzione Dir = 360 °N

File = Tavolara Pro DIR 360 T 5.SRF

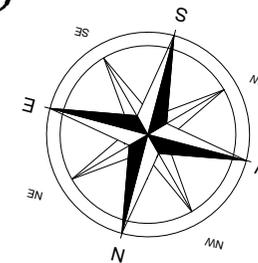
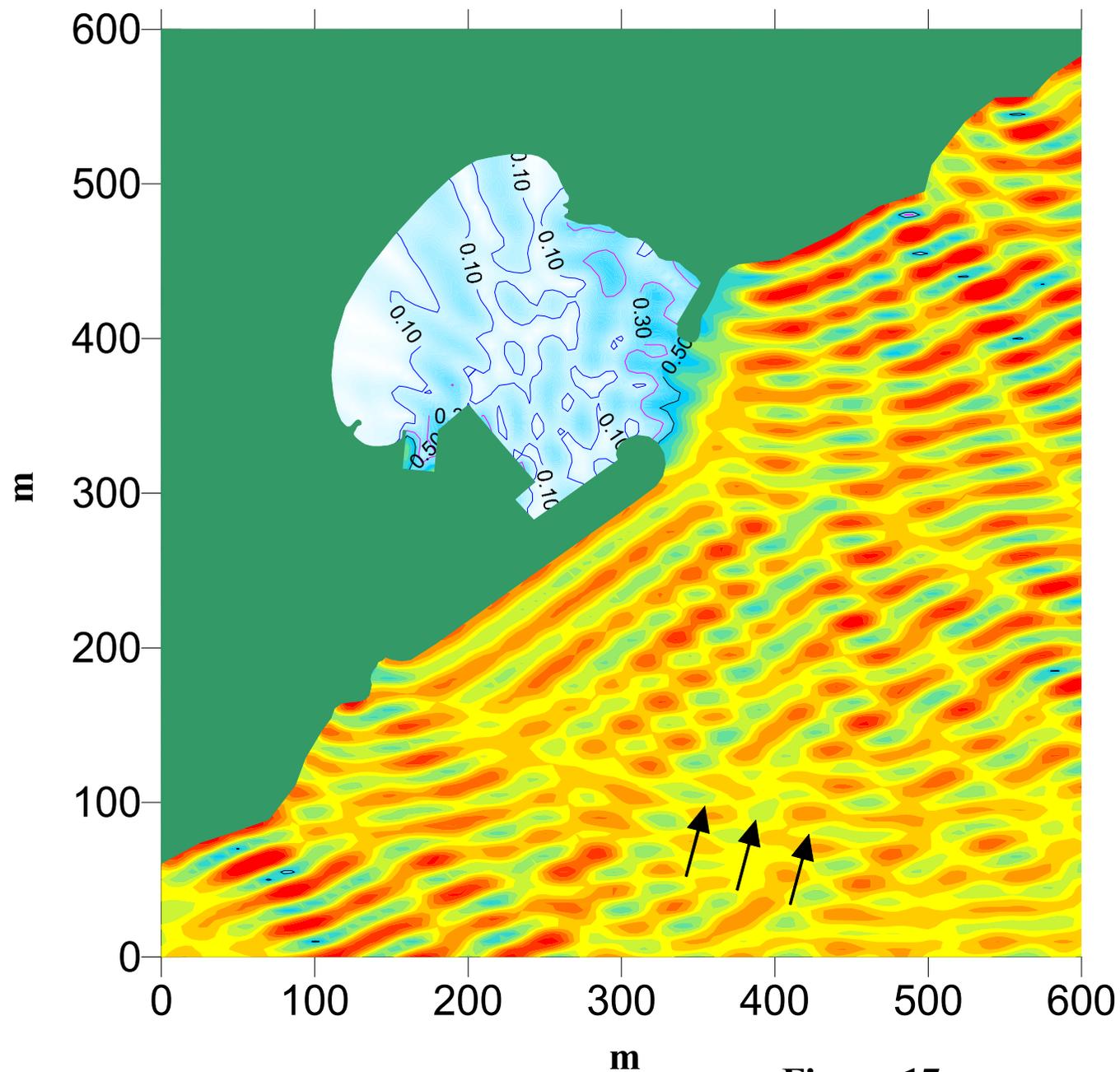


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

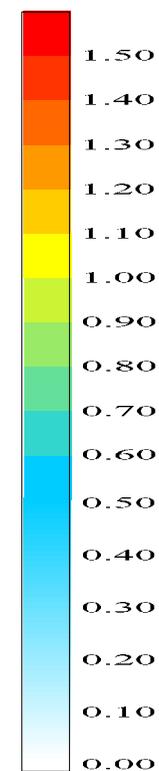
Figura 16

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 7,0$ s

Direzione Dir = 360° N

File = Tavolara Pro DIR 360 T 7.SRF

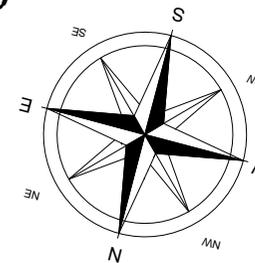
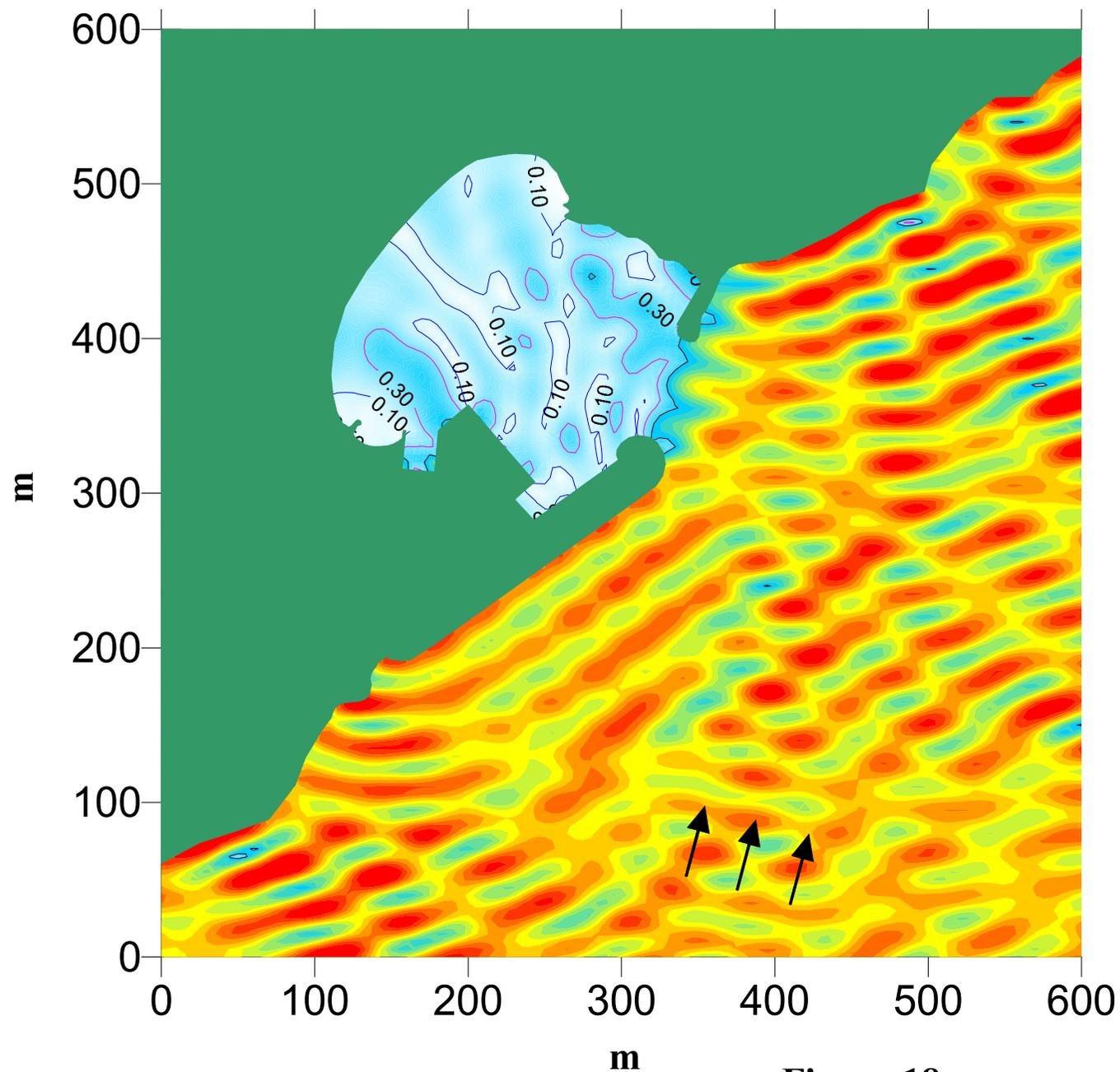


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

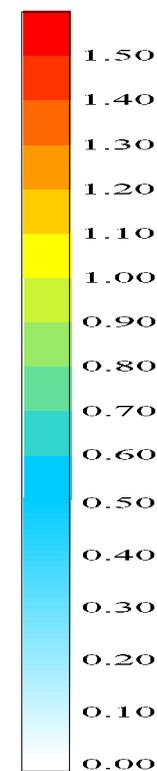
Figura 17

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 9,0$ s

Direzione Dir = 360° N

File = Tavolara Pro DIR 360 T 9.SRF

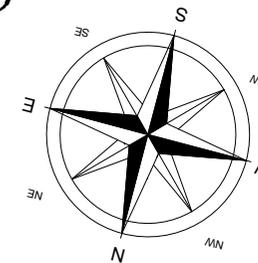
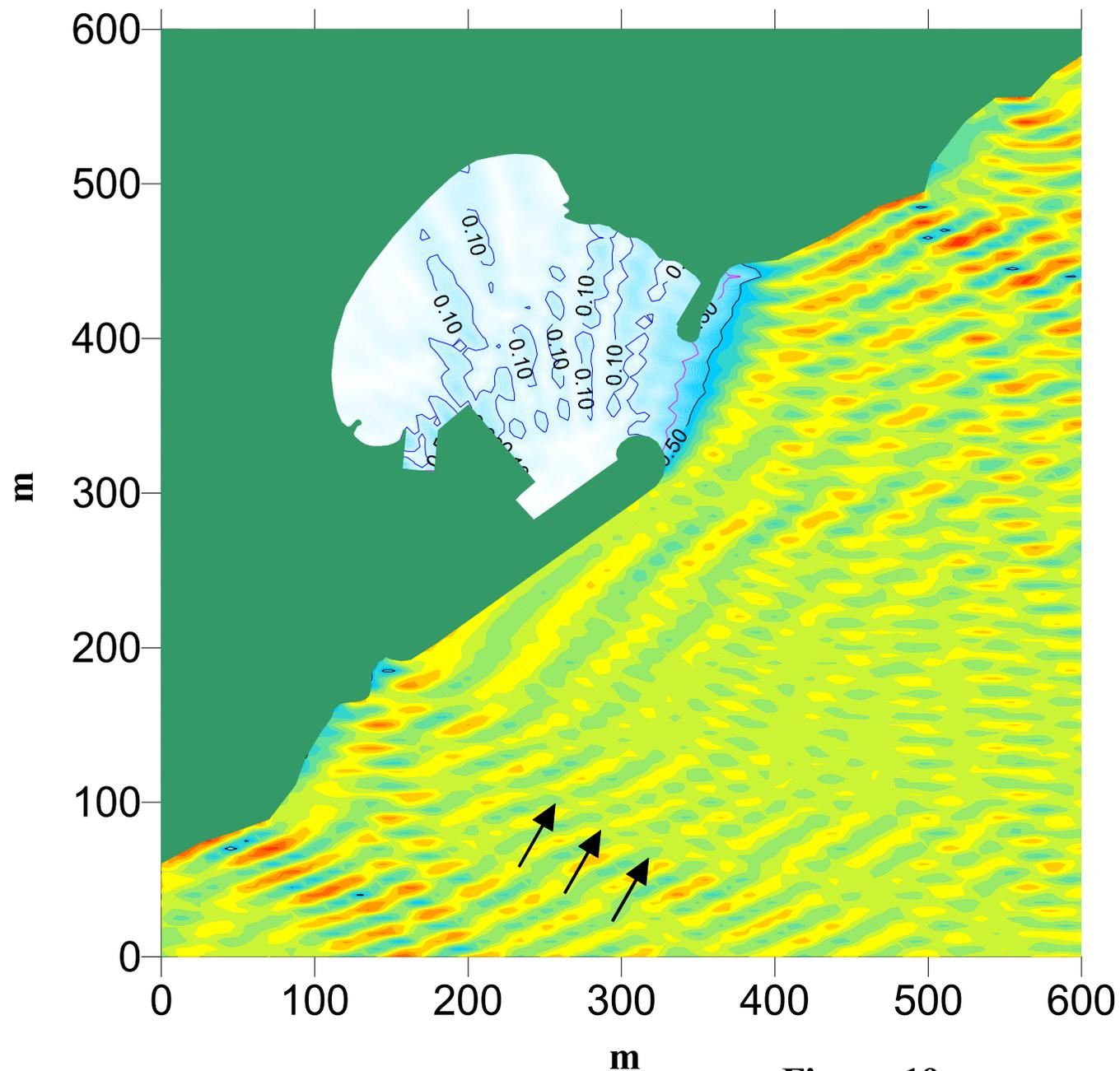


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

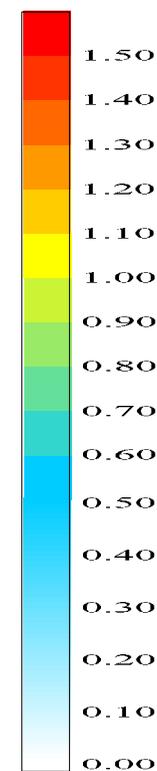
Figura 18

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 5,0$ s

Direzione Dir = 15 °N

File = Tavolara Pro DIR 15 T 5.SRF

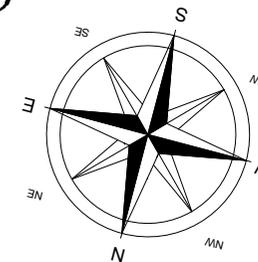
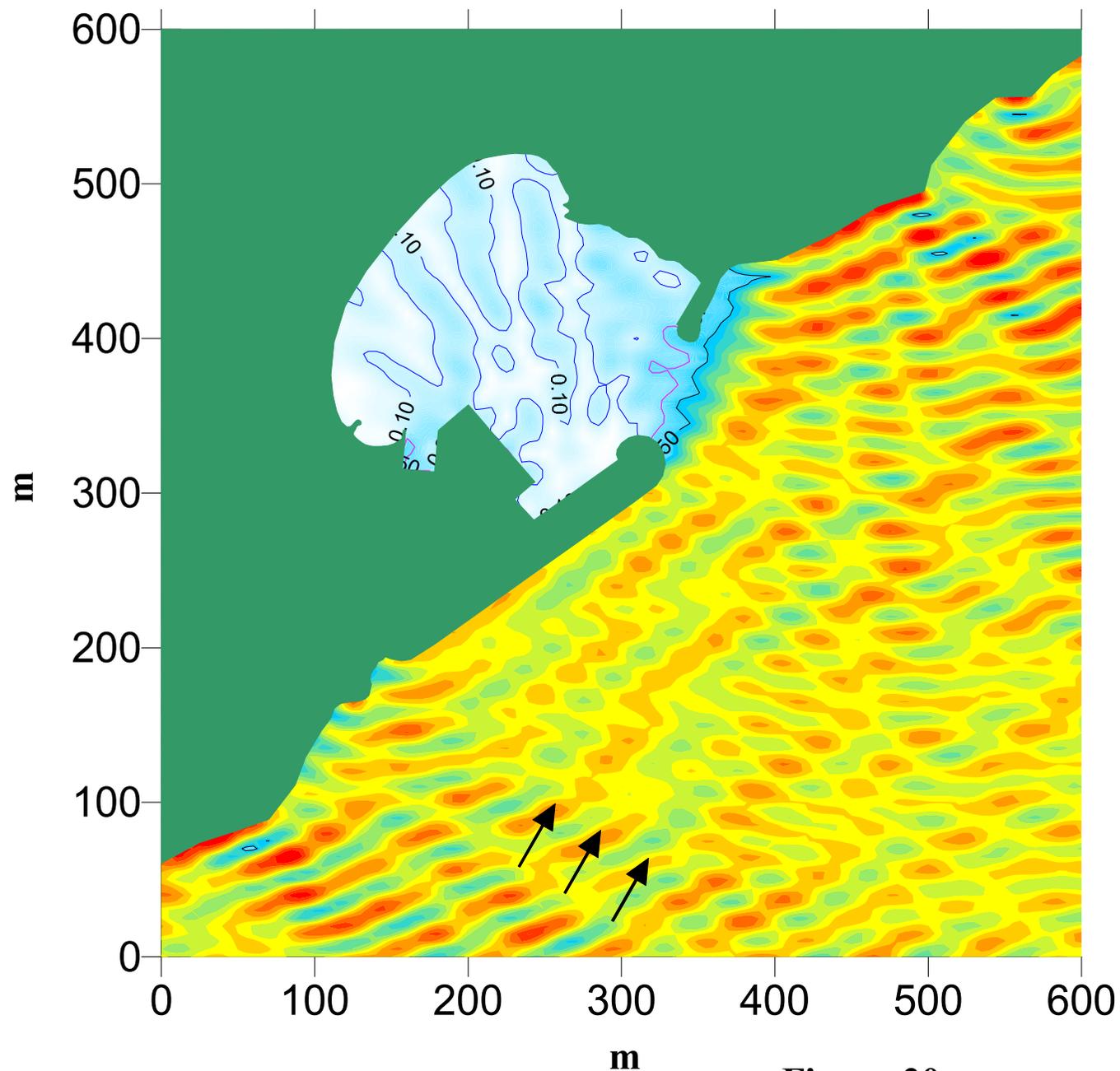


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

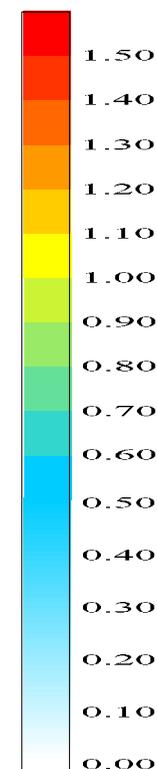
Figura 19

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 7,0$ s

Direzione Dir = 15° N

File = Tavolara Pro DIR 15 T 7.SRF

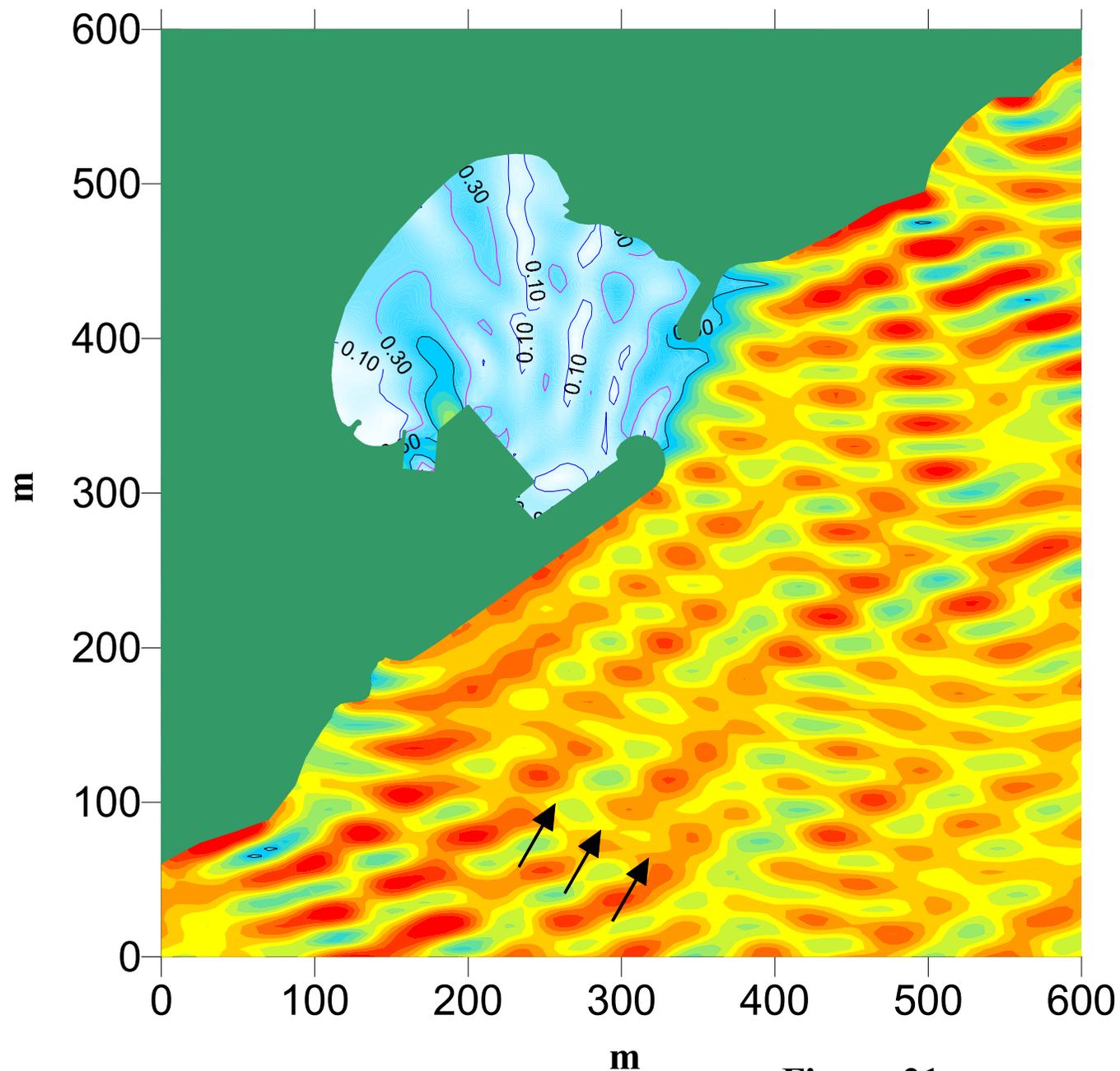


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

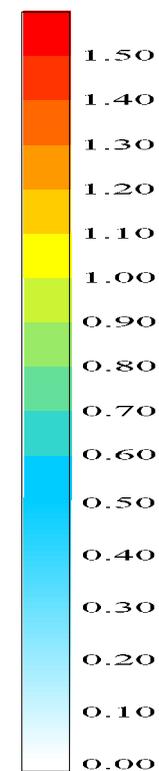
Figura 20

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 9,0$ s

Direzione Dir = 15° N

File = Tavolara Pro DIR 15 T 9.SRF

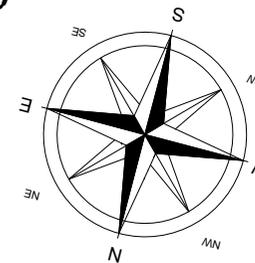
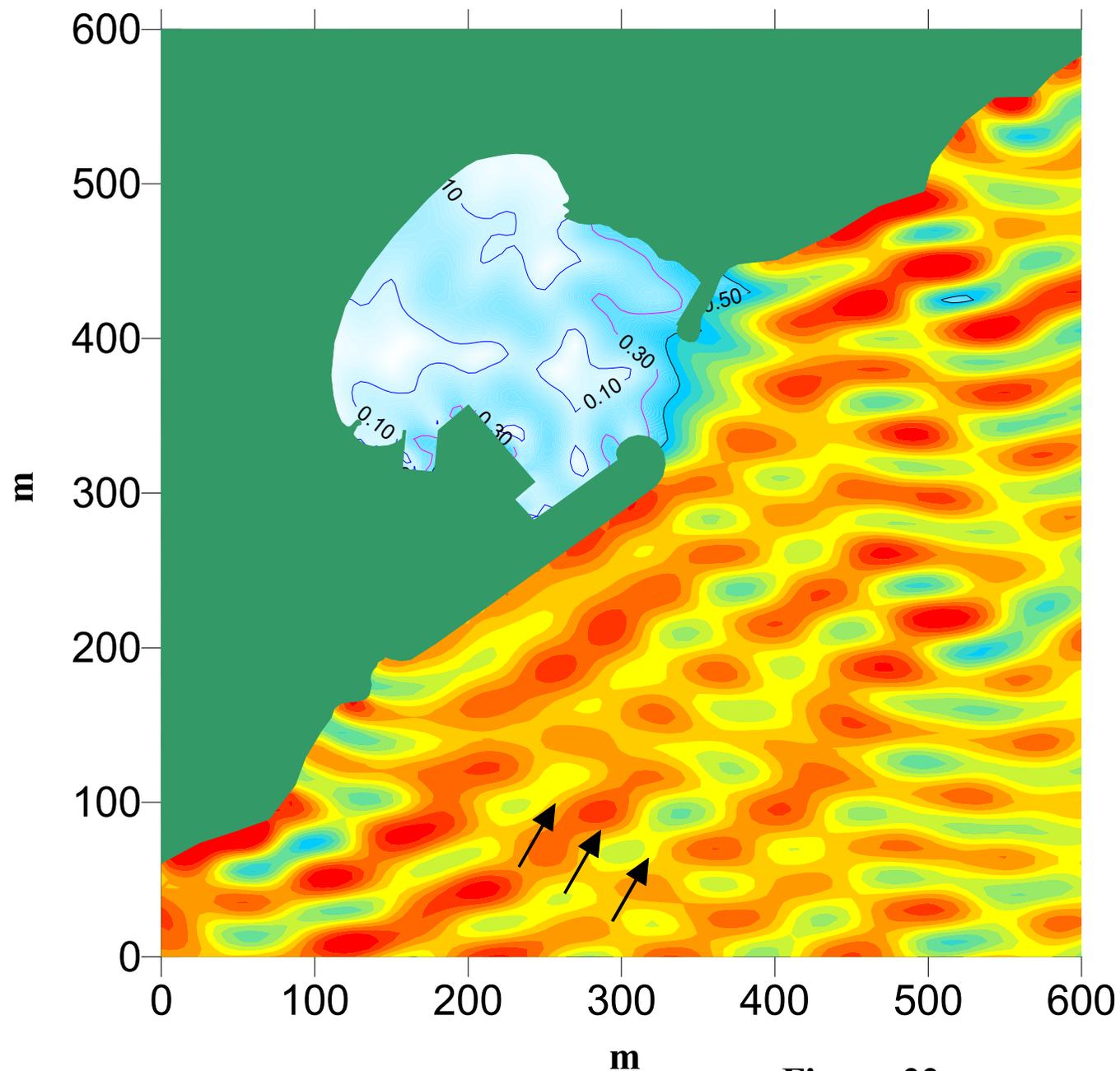


Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

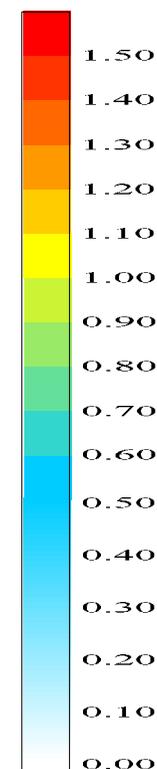
Figura 21

STAZIONE VLF - ISOLA DI TAVOLARA: CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



Periodo $T = 12,0$ s

Direzione Dir = 15° N

File = Tavolara Pro DIR 15 T 12.SRF



Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

Figura 22

Fig. 23 - Ubicazione dei punti di calcolo dell'amplificazione dei livelli di moto ondoso causati dalle oscillazioni interne

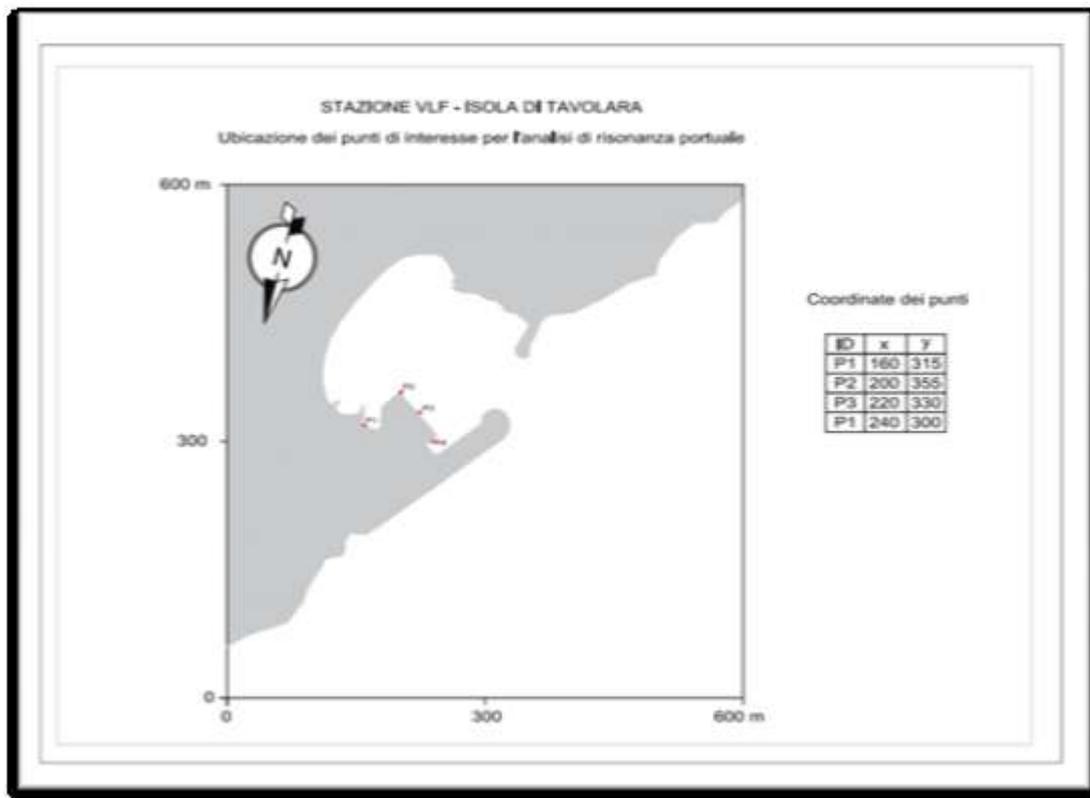


Fig. 24 - Grafici Hr (Altezza relativa - Periodo) in 4 punti dello specchio portuale

