

**PROGETTO DI CONVERSIONE A CARBONE
DELLA CENTRALE ENEL DI PORTO TOLLE**

**VALUTAZIONE DEGLI ASPETTI LEGATI
ALLA NAVIGAZIONE ED ALL'IMPATTO
AMBIENTALE DELLA SOLUZIONE
INDIVIDUATA PER LA LOGISTICA
FUNZIONALE AL PROGETTO DI
CONVERSIONE DELLA CENTRALE**

A cura di:

Prof. Ing. Luigi D'Alpaos *
Prof. Ing. Giuseppe Matteotti **

* Professore Ordinario di Idrodinamica nell'Università di Padova

** Professore Ordinario Fuori Ruolo di Costruzioni Marittime nell'Università di Padova

RELAZIONE

data: 13 maggio 2005

INDICE

1	<u>INTRODUZIONE</u>	5
2	<u>INDIVIDUAZIONE DELLE POSSIBILI DIRETTRICI DI COLLEGAMENTO TRA LA CENTRALE E LA NAVE "STORAGE"</u>	8
2.1	ACCESSO ALLA CENTRALE ATTRAVERSO I RAMI TERMINALI DEL PO DI VENEZIA	8
2.2	ACCESSO ALLA CENTRALE LUNGO LA DIRETTRICE LAGUNA DI BARBAMARCO – BUSA DI TRAMONTANA	10
2.3	ACCESSO ALLA CENTRALE ATTRAVERSO LA SACCA DEL CANARIN	14
2.4	ACCESSO ALLA CENTRALE LUNGO LA DIRETTRICE PO DI LEVANTE – CONCA DI VOLTA GRIMANA – BASSO CORSO DEL PO	16
2.5	CONSIDERAZIONI SULLA DIRETTRICE DI ACCESSO ALLA CENTRALE PREFERIBILE	21
3	<u>ANALISI DEGLI ASPETTI LEGATI ALLA NAVIGAZIONE</u>	22
3.1	INDICAZIONI DELLA PIANIFICAZIONE A LIVELLO REGIONALE RELATIVAMENTE AL TRASPORTO ACQUEO	22
3.1.1	Strumenti di pianificazione nel settore idroviario	22
3.1.2	Note particolari sugli strumenti di pianificazione	23
3.1.3	Piano regionale dei trasporti	23
3.1.4	Aspetti economici relativi alla ricalibratura dei canali navigabili	27
3.1.5	Note sull'adeguamento dell'idrovia veneta	27
3.2	PREVISIONI DI SVILUPPO DELLA NAVIGAZIONE LUNGO LA DIRETTRICE PO DI LEVANTE-CONCA DI VOLTA GRIMANA-BASSO CORSO DEL PO	31
3.3	COMPATIBILITÀ DEL TRAFFICO MARITTIMO E FLUVIALE DESTINATO AD ALIMENTARE LA CENTRALE CON IL TRAFFICO IDROVIARIO ATTUALE E FUTURO	38
3.4	ANALISI CON MODELLI MATEMATICI DELLA NAVIGAZIONE TRA LA NAVE "STORAGE" E L'INGRESSO DEL PO DI LEVANTE	40
3.4.1	Descrizione sintetica del codice di calcolo adottato	40
3.4.2	Studio della manovra di accesso al Po di Levante	41
3.4.3	Definizione del percorso ottimale	42
3.4.3.1	<i>Manovra in condizione di quiete</i>	44
3.4.3.2	<i>Manovre durante una perturbazione di Grecale (Bora)</i>	48

3.4.3.3	Manovre durante una perturbazione di Levante	60
3.4.3.4	Manovre durante una perturbazione di Scirocco	72
3.4.4	Osservazioni conclusive	84
4	ANALISI DEGLI ASPETTI AMBIENTALI	89
4.1	CLIMA METEOMARINO	89
4.1.1	Dati di vento	91
4.1.2	Dati di moto ondoso	92
4.1.2.1	<i>Dati RON</i>	92
4.1.2.2	<i>Dati CNR</i>	96
4.1.3	Dati di marea	101
4.2	PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSI	104
4.2.1	Descrizione sintetica del codice di calcolo utilizzato	104
4.2.2	Messa a punto del modello	105
4.2.3	Studio della propagazione locale del moto ondoso	108
4.3	CLIMA ONDOSI IN CORRISPONDENZA DELLA NAVE "STORAGE"	111
4.4	CLIMA ONDOSI ALL'IMBOCCATURA DEL PO DI LEVANTE	114
4.5	OPERATIVITÀ DEL COLLEGAMENTO TRA NAVE "STORAGE" E RETE IDROVIARIA	117
4.5.1	Considerazioni generali	117
4.5.2	Operatività del terminale e caratteristiche delle navi	120
4.5.3	Condizioni di moto ondoso lungo la rotta tra la nave "storage" ed il Po di Levante	121
4.6	CORRENTI INDOTTE DAL MOTO ONDOSI NELL'INTORNO DELLA BOCCA DELLA LAGUNA LA VALLONA E LORO INTERFERENZA CON LE CORRENTI LAGUNARI IN INGRESSO E USCITA DALLA LAGUNA STESSA	130
4.6.1	Dati disponibili	130
4.6.1.1	<i>Dati batimetrici</i>	130
4.6.1.2	<i>Dati idrometrici e correntometrici</i>	131
4.6.2	Modello matematico bidimensionale a fondo mobile della circolazione idrodinamica	131
4.6.2.1	<i>Descrizione sintetica del modello</i>	131
4.6.2.2	<i>Schematizzazione del sistema idraulico e condizioni al contorno</i>	132
4.6.2.3	<i>Messa a punto del modello</i>	137
4.6.3	Situazioni esaminate	141
4.6.4	Analisi dei risultati ottenuti	142
4.6.4.1	<i>Correnti ed evoluzione dei fondali indotte dai soli effetti della marea</i>	142
4.6.4.2	<i>Correnti ed evoluzione dei fondali in presenza di marea e di mareggiate eccezionali</i>	149
4.7	INDAGINI SUL FUNZIONAMENTO IDRODINAMICO DEL SISTEMA IDROVIARIO	155

4.7.1	Dati disponibili	155
4.7.1.1	Quote idrometriche e portate del Po a Pontelagoscuro	155
4.7.1.2	Portate significative ai fini della navigazione	157
4.7.1.3	Idrologia del Po di Levante	159
4.7.1.4	Dati idrometrici e correntometrici dei rami del Po	160
4.7.1.5	Dati batimetrici e sezioni	163
4.7.2	Modello matematico bidimensionale del sistema idroviario	165
4.7.2.1	Schematizzazione del sistema e condizioni al contorno	166
4.7.2.2	Messa a punto del modello	170
4.7.3	Situazioni esaminate	171
4.7.4	Analisi dei risultati	172
4.7.4.1	Correnti indotte dai soli effetti della marea lungo il Po di Levante	172
4.7.4.2	Correnti indotte dalla sovrapposizione della marea con le portate ordinarie e di piena del Po di Levante	178
4.7.4.3	Regime delle correnti lungo il Basso corso del Po per portate significative ai fini della navigazione	184
5	<u>COMPATIBILITÀ DEI NATANTI CON LE CARATTERISTICHE GEOMETRICHE ED IDRAULICHE DELLE VIE D'ACQUA</u>	191
5.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	191
5.1.1	Classificazione dei natanti e delle vie navigabili.	191
5.1.2	Criteri di verifica della navigabilità	192
5.2	VERIFICA DELLA COMPATIBILITÀ DEI NATANTI PREVISTI CON LE ATTUALI CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E CINEMATICHE DEL SISTEMA	195
5.2.1	Po di Levante	196
5.2.2	Conca di Volta Grimana	201
5.2.3	Basso corso del Po	201
5.2.4	Suggerimenti operativi	204
5.3	PERIODI DI SOSPENSIONE DEL TRAFFICO	205
6	<u>OSSERVAZIONI CONCLUSIVE</u>	207
7	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	209
8	<u>APPENDICE. DESCRIZIONE DEI MODELLI MATEMATICI</u>	211
8.1	DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO DI NAVIGAZIONE "SHIPMA"	211
8.1.1	Files di input e di output	212
8.2	CODICE DI CALCOLO SWAN	220

8.2.1	Capacità e limitazioni di SWAN	220
8.2.2	Cenni sulla formulazione del modello SWAN	220
8.2.3	Equazione di conservazione dell'azione	220
8.2.4	Cenni sulla numerica di SWAN	223
8.3	MODELLO MATEMATICO BIDIMENSIONALE A FONDO MOBILE DELLA CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA	224
8.3.1	Modulo idrodinamico	224
8.4	MODULO DI TRASPORTO DEI SEDIMENTI	226
8.4.1	Trasporto al fondo	226
8.4.2	Trasporto in sospensione	227

TAVOLE ALLEGATE

TAV 2.1	Laguna di Barbamarco – Batimetrie aggiornate al 1994 e al 2002
TAV 2.2	Laguna del Canarin – Planimetria con gli interventi di progetto del 2002
TAV 2.3	Bocca di Porto Levante – Rilievo 2004
TAV 5.1	Carta della navigabilità del Po di Levante da Volta Grimana allo sbocco in Laguna La Vallona
TAV 5.2	Carta della navigabilità del Po di Venezia da Volta Grimana alla centrale di Porto Tolle

1 INTRODUZIONE

Con lettera d'ordine in data 6 maggio 2005 Num. Rif. CAA_GCG-RM/P2005000038 la Divisione Generazione ed Energy Management dell'Enel (Enel Produzione S.p.A.) ha affidato agli scriventi Prof. Ing. Luigi D'Alpaos, ordinario di Idrodinamica nell'Università di Padova, e Prof. Ing. Giuseppe Matteotti, ordinario fuori ruolo di Costruzioni Marittime nell'Università di Padova, uno studio riguardante le possibili soluzioni per la logistica dei materiali solidi necessari all'esercizio della centrale termoelettrica di Porto Tolle, per la quale è prevista la riconversione dall'attuale funzionamento con olio combustibile ad una alimentazione con carbone/biomassa.

La riconversione richiede innanzitutto la movimentazione e lo stoccaggio del combustibile e degli eventuali reagenti necessari per il miglior funzionamento delle quattro sezioni termoelettriche della centrale e per la riduzione entro i termini previsti dalla normativa vigente dei prodotti della combustione.

Nello specifico si tratta:

- del carbone utilizzato come combustibile di base, movimentato e messo a deposito sotto forma di solido compatto in pezzatura;
- della biomassa utilizzata in co-combustione con il carbone su due dei quattro gruppi della centrale, approvvigionata localmente e messa a parco sotto forma di cippato;
- del calcare utilizzato come reagente per il processo di desolforazione dei fumi prodotti dalla combustione del carbone, approvvigionato ed immagazzinato in silos sotto forma di solido compatto in pezzatura.

Dovranno altresì essere previsti la movimentazione e lo stoccaggio dei prodotti solidi risultanti dalla combustione e più precisamente:

- il gesso, ottenuto come materiale derivante dal processo di desolforazione dei fumi prodotti dalla combustione del carbone, stoccato e poi trasportato sotto forma di materiale compatto umido;
- le ceneri, ottenute come materiale di risulta del processo di combustione del carbone e della biomassa, insilate e poi trasportate sotto forma di materiale secco oppure compatto umido.

Ad eccezione della biomassa, il progetto di riconversione della centrale prevede che tutti i materiali solidi siano movimentati attraverso vie d'acqua, partendo da una nave "storage" mobile posto al largo nel paraggio di mare antistante la centrale ad una distanza dalla riva di circa 2-4 miglia (Fig. 1.1). La centrale, come è noto, è localizzata in adiacenza al Po di Venezia poco a monte della sua biforcazione nei tre rami della Busa Dritta, della Busa di Scirocco e della Busa di Tramontana, che convogliano le sue portate al mare.

La nave "storage" ha una stazza di circa 100'000 t che garantirà lo stoccaggio temporaneo nelle sue stive del carbone, da una parte, e del gesso/calcare e delle ceneri umidificate, dall'altra. Alla nave "storage" attraccheranno sia le navi che garantiranno l'approvvigionamento dei materiali necessari al funzionamento della centrale, sia quelle che permetteranno l'allontanamento definitivo dei prodotti della combustione, sia, infine, le chiatte fluvio-marittime mediante le quali carbone e calcare saranno portati verso le aree di stoccaggio della centrale stessa e, seguendo il percorso inverso, gesso e ceneri risultanti dal processo produttivo alla nave "storage".

È a questi ultimi aspetti della movimentazione dei materiali solidi necessari all'esercizio della centrale che è rivolto il presente studio, considerando in primo luogo i possibili percorsi via acqua delle chiatte destinate a garantire il collegamento tra l'impianto e la nave "storage" ancorata al largo della costa ed esaminando poi nel dettaglio la compatibilità della soluzione prescelta con quanto previsto dalla pianificazione di settore della Regione Veneto relativamente allo sviluppo idroviario.

Nello studio, in particolare, la validità della soluzione progettuale prescelta è stata esaminata innanzitutto in termini operativi, indagando i problemi connessi con la navigazione delle chiatte fluvio-marittime destinate a sostenere l'esercizio dei gruppi termoelettrici lungo i canali di collegamento della centrale con il mare e nel tratto di mare interposto tra la nave "storage", ancorata al largo, e le foci di accesso alle vie navigabili interne. Si è inoltre valutata la compatibilità della soluzione progettuale in termini di traffico indotto sulle vie d'acque interne, considerando sia lo stato attuale, sia quello futuro previsto dagli strumenti di pianificazione.

Nello studio ampio spazio è stato, infine, riservato all'inquadramento idraulico e idrologico dei sistemi idrografici interessati dalla movimentazione dei materiali solidi necessari all'esercizio della centrale, esaminando per essi alcuni importanti aspetti di carattere ambientale che ne caratterizza l'attuale funzionamento, al fine di evidenziare la compatibilità della soluzione prescelta con il particolare ambiente costiero interessato dal progetto di riconversione dell'impianto.

A supporto delle indagini sviluppate, si è condotta un'ampia ricerca bibliografica sui vari aspetti trattati, per acquisire i contributi pubblicati nella letteratura tecnica. Si è, inoltre, messa a punto una serie di modelli matematici per inquadrare nel miglior modo possibile sia i problemi idraulici e marittimi del complesso sistema idrografico con il quale interferiscono le vie d'acqua interne interessate dalla proposta, sia i problemi più strettamente attinenti la navigazione dei battelli tra la nave "storage", ancorata al largo, e lo sbocco a mare della rete idroviaria utilizzata per raggiungere la centrale.

I risultati ottenuti sono nel dettaglio illustrati nei successivi capitoli della presente relazione.

Alle indagini illustrate nella presente relazione hanno collaborato gli ingegneri ed i tecnici della Ipros Ingegneria Ambientale S.r.l. e della Hydrosol S.r.l..

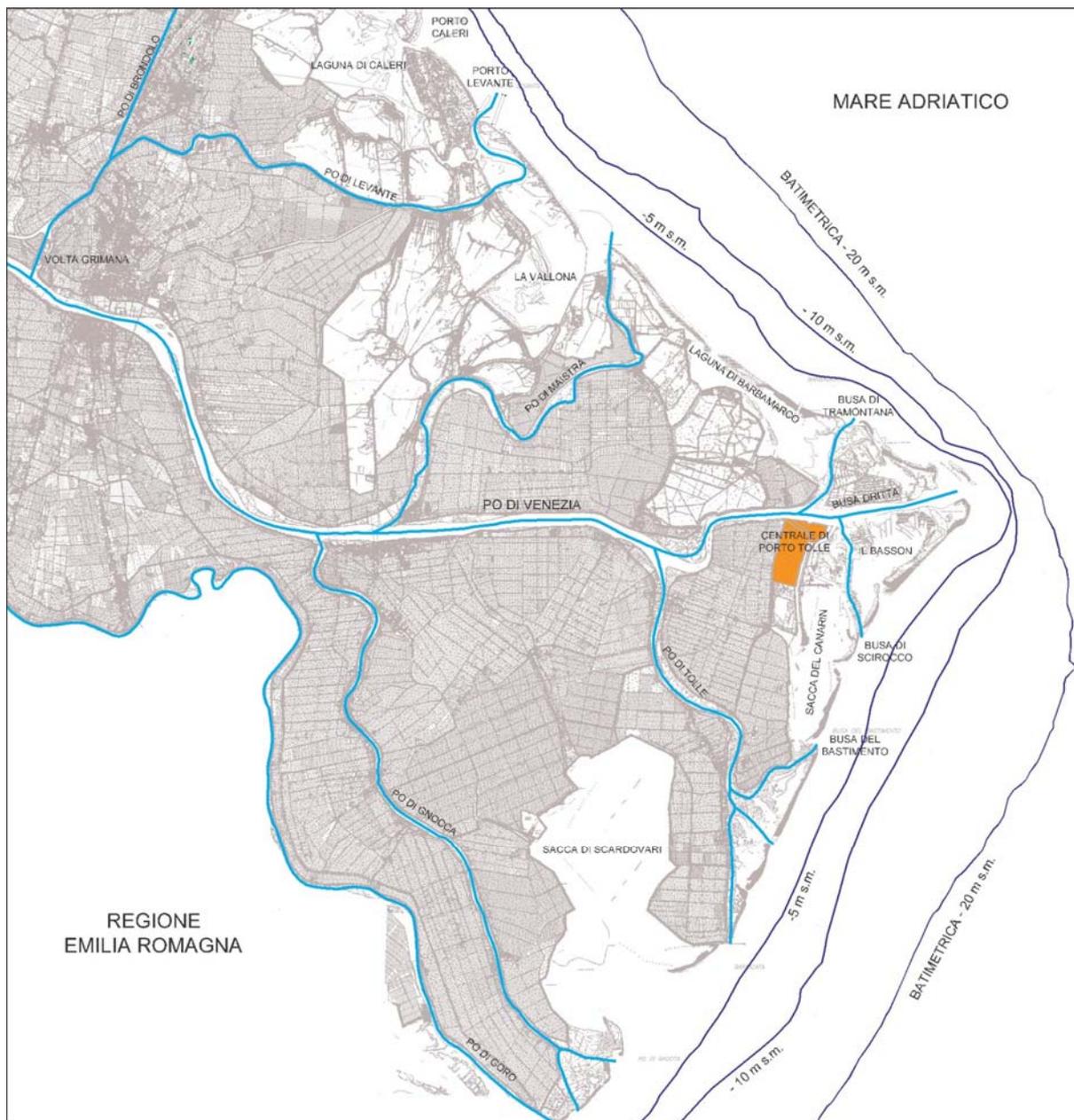


Fig 1.1 - Corografia del Delta del fiume Po con evidenziata la posizione della centrale di Porto Tolle.

2 INDIVIDUAZIONE DELLE POSSIBILI DIRETTRICI DI COLLEGAMENTO TRA LA CENTRALE E LA NAVE "STORAGE"

Di fronte alle foci del Po e alle sue lagune fondali pari a circa 20 m, quali sono quelli necessari allo stazionamento della nave "storage", si realizzano a distanze dalla costa variabili ma mediamente dell'ordine di 2-4 miglia. Coperto il tratto di mare che si interpone tra la nave "storage" e la costa, le chiatte fluvio-marittime, alle quali è affidato il collegamento tra la nave "storage" e la centrale, potrebbero seguire rotte diverse, utilizzando una delle tante foci che si aprono sul litorale e consentono, navigando per acque interne, di raggiungere l'impianto.

Le direttrici individuabili presentano problematiche diverse, che conviene esaminare preliminarmente per escludere le soluzioni maggiormente impattanti sull'ambiente o più difficilmente praticabili, richiedendo la realizzazione di opere onerose e non sempre di agevole realizzazione per garantire ai battelli l'efficienza del tracciato durante la quasi totalità dell'anno.

2.1 Accesso alla centrale attraverso i rami terminali del Po di Venezia

Per accedere alla centrale il percorso più diretto ipotizzabile è senza dubbio quello che penetra dal mare seguendo uno dei tre rami nei quali si suddivide il corso principale del Po di Venezia, sulla cui sponda, in destra idrografica (fig. 2.1.1), sorge l'impianto di Porto Tolle. Anche percorrendo la Busa di Tramontana, che è il ramo normalmente utilizzato dai pescherecci che ormeggiano al Porto di Pila per uscire in mare, l'attuale stato dei fondali nella zona di mare antistante la foce non garantirebbe, tuttavia, alle chiatte fluvio-marine l'efficienza del passo navigabile in condizioni di bassa marea, a causa della barra di foce che si forma in corrispondenza del suo sbocco in mare.

Per la foce della Busa di Tramontana, pertanto, fondali sufficienti alla navigazione delle chiatte fluvio-marittime (per le quali è previsto un pescaggio di 2.5 m) potrebbero ottenersi solamente mediante sistematiche e continue operazioni di dragaggio, particolarmente onerose ma soprattutto difficili da programmare, per la tendenza della barra di foce a ricostituirsi. Tanto più nel caso delle foci del Po dato che l'intensità del trasporto solido fluviale e costiero, particolarmente elevata, comporta importanti e relativamente rapide variazioni nel tempo dei fondali. Può conseguentemente accadere che durante una mareggiata o in caso di piena del fiume, e quindi con una non trascurabile frequenza nell'arco di un anno, le correnti fluviali sovrapponendosi a quelle indotte dal moto ondoso siano in grado di mobilitare lungo il litorale cospicue quantità di sedimenti, i quali tenderebbero inevitabilmente a depositarsi sulla coda dell'evento, riformando nelle zone a più bassa velocità la barra di foce.

Per contrastare efficacemente il fenomeno e garantire l'efficienza della foce, nello specifico l'efficienza della Busa di Tramontana, sarebbe necessario proteggere il passo navigabile con moli aggettanti in mare fino a fondali sufficientemente profondi. Questa soluzione, tuttavia, non è di semplice realizzazione comportando problemi sia di ordine idraulico, sia di tipo ambientale. Per gli aspetti idraulici, armare la foce della Busa di Tramontana per garantire la navigazione alle chiatte fluvio-marittime da e per la centrale causerebbe una significativa alterazione del regime locale delle correnti e, come conseguenza, del trasporto solido costiero.

Nel caso considerato, oltretutto, le opere si inserirebbero su di una struttura morfologica molto particolare ed attiva quale è quella costituita dal vertice del Delta, naturalmente proteso verso il mare. Per la presenza dei moli i sedimenti, che muovendo in direzione sub-parallela alla costa alimentano e modellano il litorale in adiacenza alla foce, tenderebbero fatalmente a depositarsi in corrispondenza del

molo sopraflutto, innescando fenomeni di erosione difficilmente controllabili nella spiaggia sottoflutto senza l'inserimento di opere artificiali.

La presenza dei moli che guidano la corrente fluviale in uscita, inoltre, formando un vero e proprio getto, favorirebbe l'allontanamento in mare delle frazioni più fini dei sedimenti trasportati dal fiume ed il loro deposito su fondali così profondi da non essere più rimaneggiabili dalle correnti. Tali sedimenti, diversamente da quanto attualmente accade in prossimità della foce naturale sarebbero sostanzialmente sottratti ai processi di risospensione indotti dal moto ondoso durante gli stati di mare più intensi e, quindi, al trasporto costiero, dal quale dipende l'evoluzione della linea di riva.

Quanto agli aspetti ambientali e paesaggistici, essi riguardano soprattutto la già ricordata necessità di inserire opere di controllo per garantire la stabilità della foce e del litorale proprio in corrispondenza della parte più attiva del Delta, incidendo negativamente sulla naturalità del sito.

Considerazioni del tutto analoghe si possono formulare qualora per raggiungere la centrale si intendesse risalire il fiume penetrando dal mare e navigando lungo la Busa Dritta o la Busa di Scirocco, le quali attualmente non sono a loro volta in grado di garantire la l'officiosità dei rispettivi passi navigabili durante consistenti periodi dell'anno.

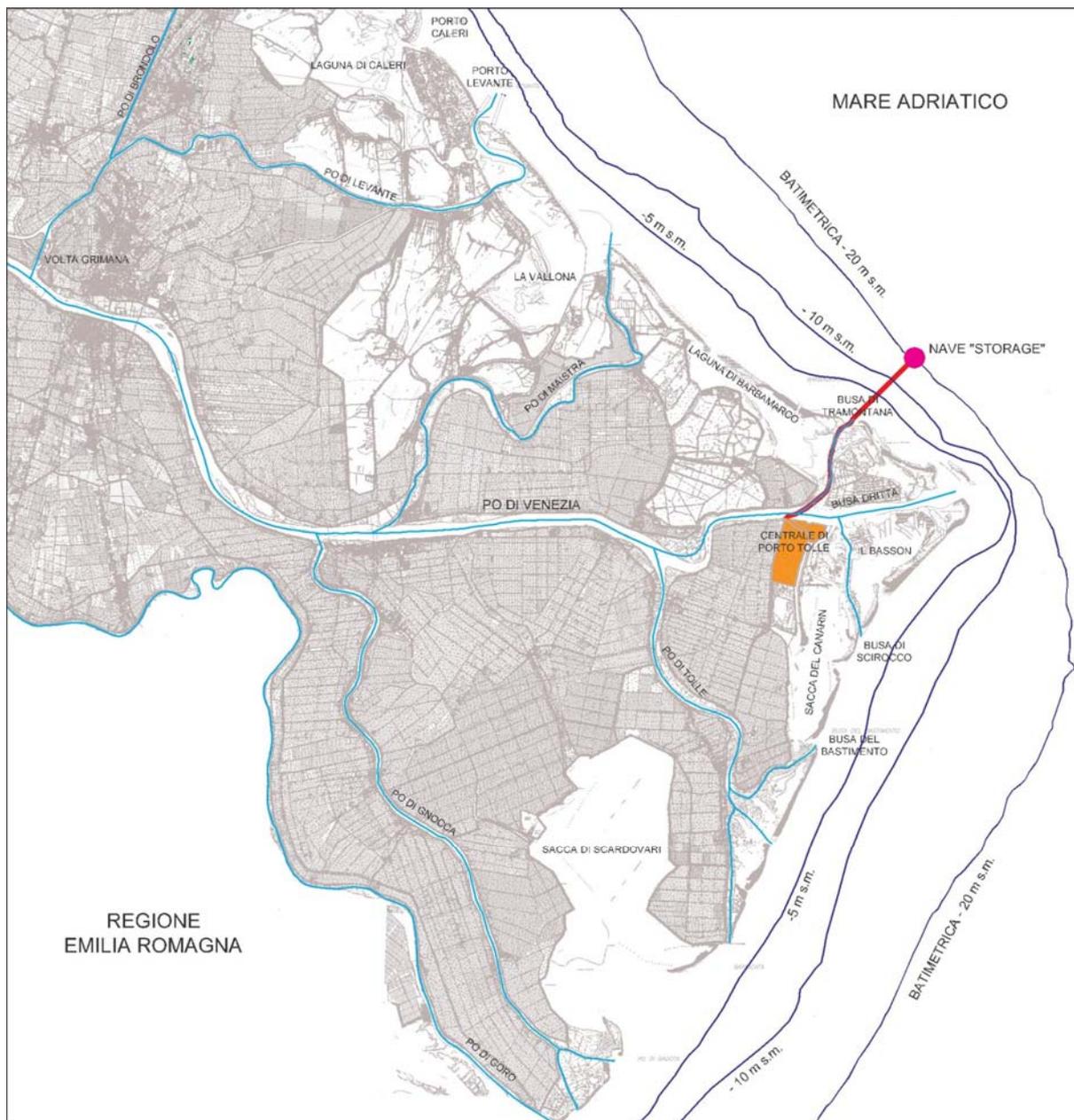


fig. 2.1.1 – Corografia del Delta del fiume Po con evidenziato il percorso tra la nave “storage” e la centrale di Porto Tolle con accesso attraverso la Busa di Tramontana.

2.2 Accesso alla centrale lungo la direttrice Laguna di Barbamarco – Busa di Tramontana

La laguna di Barbamarco, che si estende per una decina di km², è situata in adiacenza alla Busa di Tramontana e attualmente comunica con il mare attraverso due bocche, la Bocca Sud e la Bocca Nord, che si aprono sul litorale alle due estremità opposte del cordone sabbioso che separa la laguna stessa dal mare.

Un'opera presidiata, realizzata una decina di anni orsono nell'ambito degli interventi finalizzati a migliorare il regime idrodinamico dello specchio d'acqua, controlla mediante un sistema di porte vinciane manovrabili elettricamente il varco che in anni passati metteva in comunicazione diretta la

laguna con la Busa di Tramontana.

Nel 1994 al termine degli interventi realizzati per le citate finalità lo stato della laguna di Barbamarco era quello sinteticamente illustrato nella Tav. 2.1. All'interno del bacino lagunare era presente una rete di canali, uno dei quali della larghezza di circa 50 m e della profondità di 3 m, collegava direttamente la Bocca Sud all'opera di controllo posta tra la laguna e la Busa di Tramontana.

La Bocca Sud, della larghezza di circa 60 m, era ed è particolarmente attiva dal punto di vista idrodinamico. A distanza di tempo dagli interventi, il flusso delle correnti di marea che dominano il regime idraulico della laguna garantisce il mantenimento attraverso tale bocca di fondali minimi quasi ovunque superiori a 3.5-4.0 m e non inferiori a 2.50 m, in corrispondenza della barra di foce. Si tratta di fondali che consentono alla flotta peschereccia di Pila, ora quasi totalmente trasferitasi nel porticciolo interno posto ai limiti della laguna proprio di fronte alla Bocca Sud, di uscire in mare più agevolmente di quanto non avvenga utilizzando, come nel passato, la Busa di Tramontana. Fanno eccezione le situazioni di bassa marea molto spinta, durante le quali i fondali in corrispondenza della barra di foce risultano non del tutto sufficienti alla necessità della navigazione. Anche le velocità delle correnti attraverso la bocca si mantengono entro un campo di valori favorevoli ad una agevole navigazione. Per maree tipiche delle condizioni di sizigie, quando le correnti sono più sostenute, le velocità massime in fase di flusso e di riflusso non superano, infatti, il m/s (fig. 2.2.1), permettendo ai battelli di superare senza problemi il passo navigabile.

Queste condizioni, tenuto conto della posizione geografica della centrale di Porto Tolle, suggeriscono l'idea di utilizzare come possibile percorso delle chiatte fluvio-marittime da e per l'impianto quello che, passando attraverso la laguna di Barbamarco, una volta superata l'opera di collegamento tra il fiume e la laguna, consente di entrare nella Busa di Tramontana e di raggiungere l'impianto termoelettrico dopo un breve percorso fluviale (fig. 2.2.2).

Dal punto di vista logistico la soluzione indicata sembra essere ottimale. Essa consente di collegare la centrale con la nave "storage" ancorata al largo seguendo un percorso sostanzialmente diretto. Si tratta, tuttavia, di una soluzione che, per consentire alle chiatte fluvio-marine di garantire il collegamento tra la nave "storage" e la centrale, richiede l'attuazione di alcuni interventi, sia pure di minor rilievo rispetto a quelli già indicati per garantire la navigazione lungo uno dei tre rami terminali del Po di Venezia.

Prima di entrare nel merito di tali interventi, è innanzitutto da evidenziare che, come conseguenza di una improvvida gestione dell'opera di collegamento tra la laguna di Barbamarco e la Busa di Tramontana, il canale di collegamento tra la Bocca Sud e l'opera stessa si è parzialmente interrato, a causa dei sedimenti introdotti e depositati dalle morbide e dalle piene del Po. Durante un lungo periodo di tempo, infatti, contrariamente a quanto era stato prescritto, le paratoie del varco presidiato sono rimaste costantemente aperte, favorendo l'introduzione in laguna di cospicue portate di acqua dolce ed il deposito delle torbide trasportate. La condizione attuale dei fondali è ben documentata da un recente rilievo batimetrico della laguna (Tav. 2.1), che evidenzia l'entità del fenomeno lungo il canale un tempo esistente.

Si deve, inoltre, segnalare che l'opera di collegamento tra la laguna e la Busa di Tramontana non è adatta nella sua attuale configurazione alla navigazione delle chiatte fluvio-marittime destinate all'esercizio della centrale, essendo la sua larghezza di soli 10 m.

Infine, per permettere l'accesso in laguna ai natanti con qualsiasi condizione di marea, sarebbe necessario dragare periodicamente la barra di foce che si forma di fronte alla Bocca Sud, portando i suoi fondali minimi ad almeno 3.5 m.

In alternativa alle operazioni di dragaggio si potrebbe ipotizzare di ristrutturare la bocca, in modo che l'interazione tra le correnti di marea e quelle costiere indotte dal moto ondoso sia naturalmente in grado di mantenere tali fondali.

Gli interventi da attuare per raggiungere questi obiettivi non sono di grande rilievo, risultano facilmente attuabili e sono di gran lunga preferibili, per gli aspetti ambientali, rispetto a quelli che si dovrebbero

realizzare se si volesse garantire la navigabilità di uno dei tre rami terminali del Po di Venezia.

Nel concreto, con riferimento alla Bocca Sud di Barbamarco, per rendere praticabile l'idea si tratterebbe di:

- ripristinare il canale navigabile che collega la Bocca Sud con il manufatto che interclude il varco di collegamento tra la laguna e la Busa di Tramontana. Mentre la larghezza in cunetta di tale canale rimarrebbe invariata rispetto alla sua configurazione originale (50 m), per consentire la navigazione delle chiatte da e per la centrale la sua profondità dovrebbe essere portata a 3.5 m. Data la limitata estensione delle superfici liquide dominate dal canale, tale approfondimento non produrrebbe però modificazioni apprezzabili sul regime delle correnti di marea rispetto allo stato esistente;
- realizzare ex novo il manufatto di collegamento tra la laguna e la Busa di Tramontana, adattandone le dimensioni alla lunghezza e alla larghezza delle chiatte previste per l'esercizio della centrale. Tenuto conto dell'esperienza negativa del passato è opportuno, inoltre, che l'opera sia presidiata con un doppio sistema di paratoie (una in ingresso e una in uscita tra loro opportunamente asservite) in modo da evitare la libera introduzione in laguna di acque del Po. Utilizzando le stesse tecnologie costruttive e gli stessi materiali impiegati nella realizzazione del manufatto esistente, l'impatto dell'opera potrebbe essere minimizzato e la struttura potrebbe essere convenientemente inserita nell'ambiente;
- protendere maggiormente verso il mare i moli che già confinano lateralmente la Bocca Sud, in modo da contrastare più efficacemente, rispetto alle attuali condizioni, la formazione della barra di foce ed incrementare i fondali minimi di fronte al passo navigabile (Tav. 2.1) fino ai limiti necessari (3.5 m) per garantire la navigazione delle chiatte da e per la centrale, anche in condizioni di bassa marea. L'intervento non è di difficile attuazione ed è di gran lunga meno problematico dal punto di vista idraulico ed ambientale dell'analogo provvedimento che si dovrebbe attuare per rendere navigabile una delle tre foci del Po di Venezia. Basti osservare che per quanto riguarda le correnti costiere, la Bocca Sud si apre su di un litorale che già risente dell'effetto di schermo dell'adiacente testa del Delta, mentre, per quanto riguarda il trasporto solido, i sedimenti scambiati con il mare attraverso la foce lagunare sono solo e soltanto quelli eventualmente risospesi dalle onde lungo la fascia litoranea. L'assetto generale delle correnti costiere non sarebbe conseguentemente modificato in misura apprezzabile dalla presenza in corrispondenza della bocca di moli un poco più protesi verso il mare di quelli attuali. I loro eventuali effetti locali sarebbero agevolmente controllabili, essendo, ad esempio, sufficiente attuare operazioni periodiche di dragaggio, per alimentare con le sabbie prelevate a ridosso del molo sopraflutto il litorale situato sottoflutto.

Il complesso di queste opere non contrasta in alcun modo con gli interventi a suo tempo realizzati dalla Regione Veneto, attraverso il Consorzio di Bonifica Delta Po Adige, per migliorare la circolazione idrodinamica all'interno della laguna. Esse producono, anzi, effetti che vanno nella stessa direzione. Tali opere, inoltre, non contrastano con le attività della mitilicoltura, che ha trovato particolare sviluppo proprio a seguito degli interventi regionali. Infine, il traffico fluvio-marittimo, funzionale all'esercizio della centrale è più che compatibile con il traffico dei pescherecci (una ventina circa) ormeggiati nel porticciolo di Barbamarco, che potrebbe a sua volta trarre vantaggi dalla presenza di una foce lagunare, quella della Bocca Sud, con l'officiosità garantita anche durante le fasi di minimo livello delle maree.

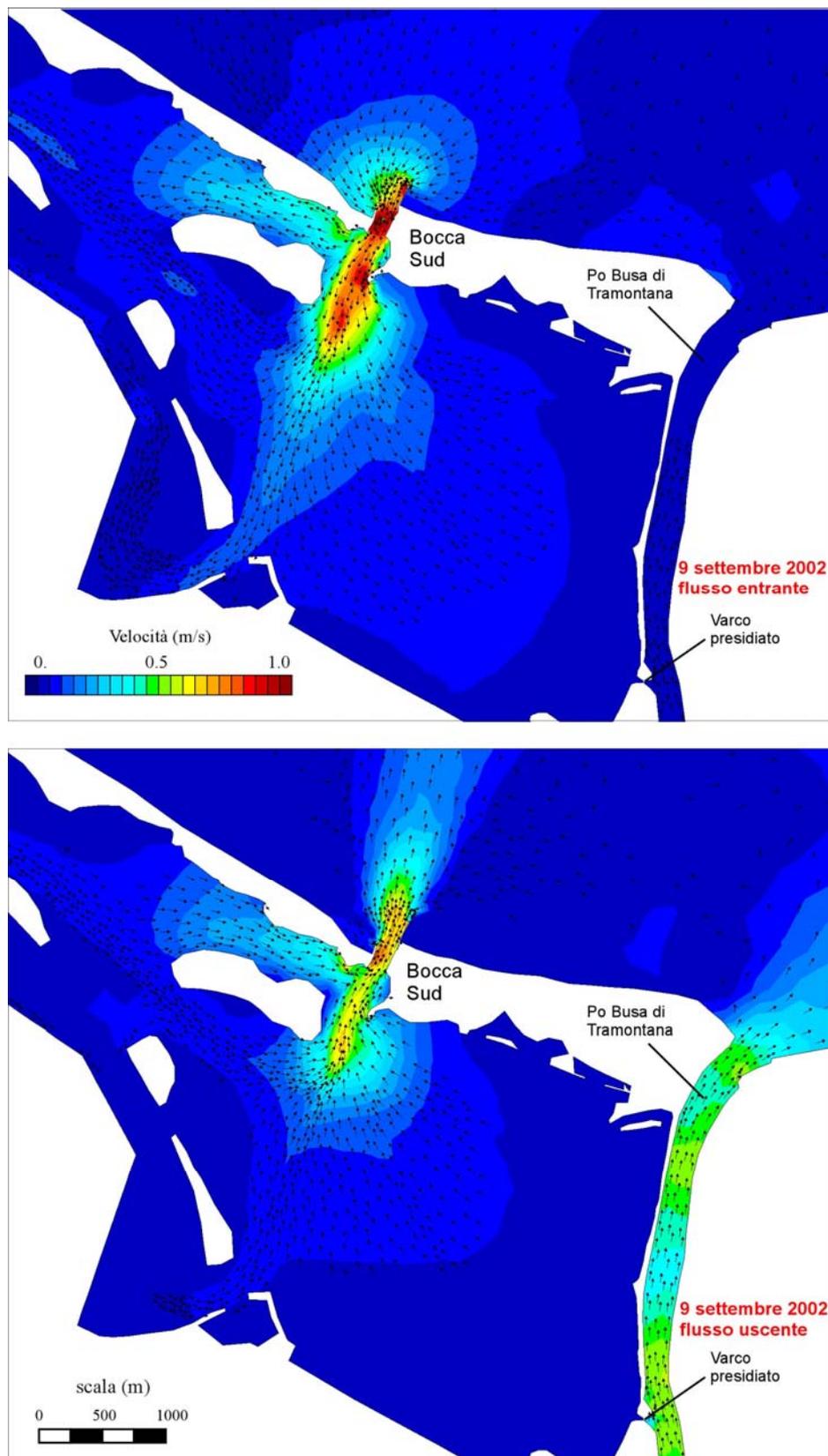


fig. 2.2.1 – Campi di velocità alla Bocca Sud della Laguna di Barbamarco, calcolati con un modello idrodinamico per la marea di sizigia del 9 settembre 2002. Tratto dallo studio [9].

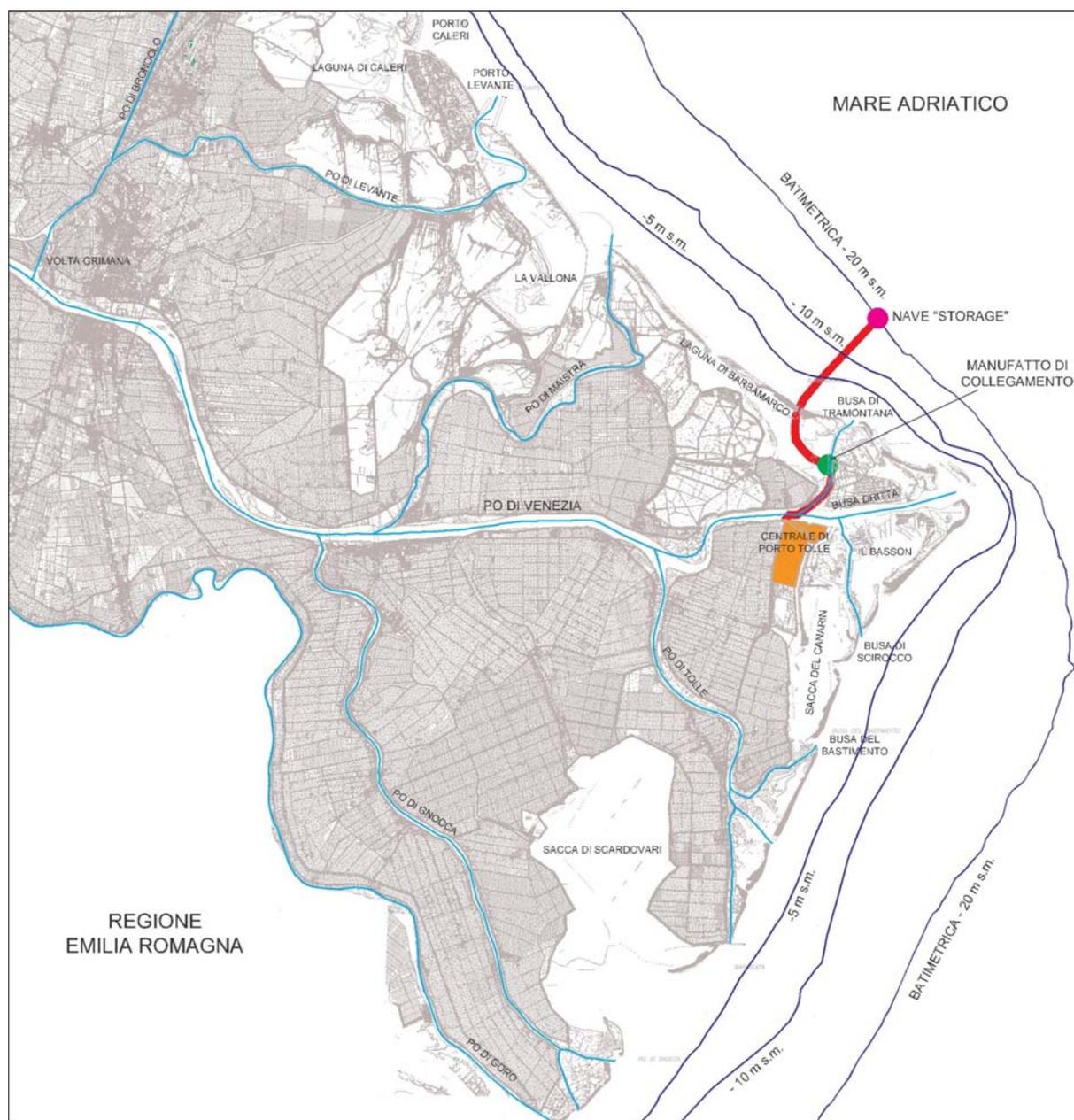


fig. 2.2.2 – Corografia del Delta del fiume Po con evidenziato il percorso tra la nave “storage” e la centrale di Porto Tolle lungo la direttrice Laguna di Barbamarco - Busa di Tramontana.

2.3 Accesso alla centrale attraverso la Sacca del Canarin

In anni recenti (2000 e 2004) il Consorzio di Bonifica Delta Po Adige ha proposto un progetto per la vivificazione della Sacca del Canarin (fig. 2.3.1) che è tuttora al vaglio degli organi competenti. Nelle sue linee generali il progetto elaborato prevede:

- lo scavo di una rete interna di canali per favorire la penetrazione dell’onda di marea;
- la realizzazione di alcune zone di barena per indirizzare le correnti di marea all’interno della laguna;
- la sistemazione del varco a mare esistente;

- la realizzazione di un ulteriore bocca a sud della bocca esistente, per alimentare più direttamente gli specchi d'acqua meridionali della laguna;
- l'attivazione di una circolazione secondaria mediante prelievo dalla laguna di acqua di raffreddamento da parte della Centrale di Porto Tolle.

Gli interventi previsti sono sintetizzati nella Tav. 2.2, che evidenzia, in particolare, l'inserimento in corrispondenza a ciascuna delle due bocche di moli leggermente aggettanti verso il mare con la finalità soprattutto di definire con opere fisse la geometria dei due varchi.

Partendo dal progetto presentato dal Consorzio di Bonifica, appare possibile conciliare gli obiettivi indicati per le opere destinate alla vivificazione del regime idrodinamico della Sacca del Canarin con quelle necessarie all'esercizio della Centrale di Porto Tolle, nel caso in cui si arrivi ad attuare la sua riconversione a carbone. Si potrebbe, infatti, ipotizzare per le chiatte fluvio-marittime destinate all'esercizio della centrale un collegamento diretto tra la nave "storage" ancorata al largo e l'impianto, entrando nella Sacca attraverso la Bocca Sud e navigando poi lungo uno dei canali interni di cui è previsto lo scavo al bordo occidentale della laguna (fig. 2.3.1). Si tratta del canale che collega la Bocca Sud all'esistente canale attraverso il quale già attualmente possono essere derivate, in caso di necessità, le portate di raffreddamento dei gruppi termoelettrici.

Questa soluzione richiede, tuttavia, un qualche adattamento degli interventi suggeriti dal progetto per la vivificazione della Sacca, articolabile nei seguenti punti:

- per garantire la navigabilità attraverso la Bocca Sud alle chiatte fluvio-marittime da e per la centrale bisognerebbe, infatti, protendere maggiormente verso il largo i moli, le cui testate si collocano all'incirca, secondo il progetto del Consorzio, in corrispondenza della batimetrica -2.00 m s.m.. Se si vuole permettere l'accesso alle chiatte, si dovrebbe raggiungere con le testate dei moli almeno la batimetrica -3.50 m s.m., ragione per cui la lunghezza delle due strutture di confinamento della Bocca Sud dovrebbe essere sensibilmente incrementata.
- coerentemente con questo provvedimento, i fondali del canale navigabile interno, previsti di 2.50 m, dovrebbero essere adeguati alla stessa profondità (3.50 m).

Si tratta in ogni caso di interventi che nel loro insieme non modificano apprezzabilmente il regime idrodinamico della laguna, rispetto alla condizione prevista dal Consorzio Delta Po Adige.

Più problematico, invece, diverrebbe lo stato dei litorali posti in adiacenza alla bocca. Spingendo alquanto più al largo le testate dei moli si alterano in misura apprezzabile sia le correnti costiere, sia il trasporto solido litoraneo, dal quale dipende l'evoluzione nel tempo della linea di riva. È concreto, come conseguenza, il pericolo di innescare processi di erosione a danno del litorale posto in adiacenza del molo sottoflutto. Per essere neutralizzabili tali fenomeni richiederebbero la realizzazione di opere di stabilizzazione del litorale, oppure, in alternativa, l'adozione di periodici interventi di ripascimento della spiaggia in erosione, trasportandovi con mezzi meccanici le sabbie depositate in prossimità del molo sopraflutto.

Gli aspetti positivi della soluzione sono riconducibili, da una parte, al limitato percorso che le chiatte fluvio-marittime dovrebbero coprire per raggiungere la centrale partendo dalla nave "storage", dall'altra all'assenza di qualsiasi apprezzabile interferenza con traffici di altro tipo, potendosi ritenere che nessuna altra imbarcazione impegni il canale che collega la centrale al mare, dall'altra ancora ad una più efficiente utilizzazione delle acque di raffreddamento dei gruppi termoelettrici, se si utilizzassero allo scopo acque prelevate dalla Sacca. Diversamente da quanto attualmente avviene, tali portate sarebbero prelevate a sufficiente distanza dal canale di scarico. La soluzione sinteticamente illustrata comporta, accanto ai problemi idraulici già ricordati, non meno rilevanti problemi di carattere ambientale e paesaggistico per l'inserimento di moli fortemente protesi verso il mare a difesa del passo navigabile.

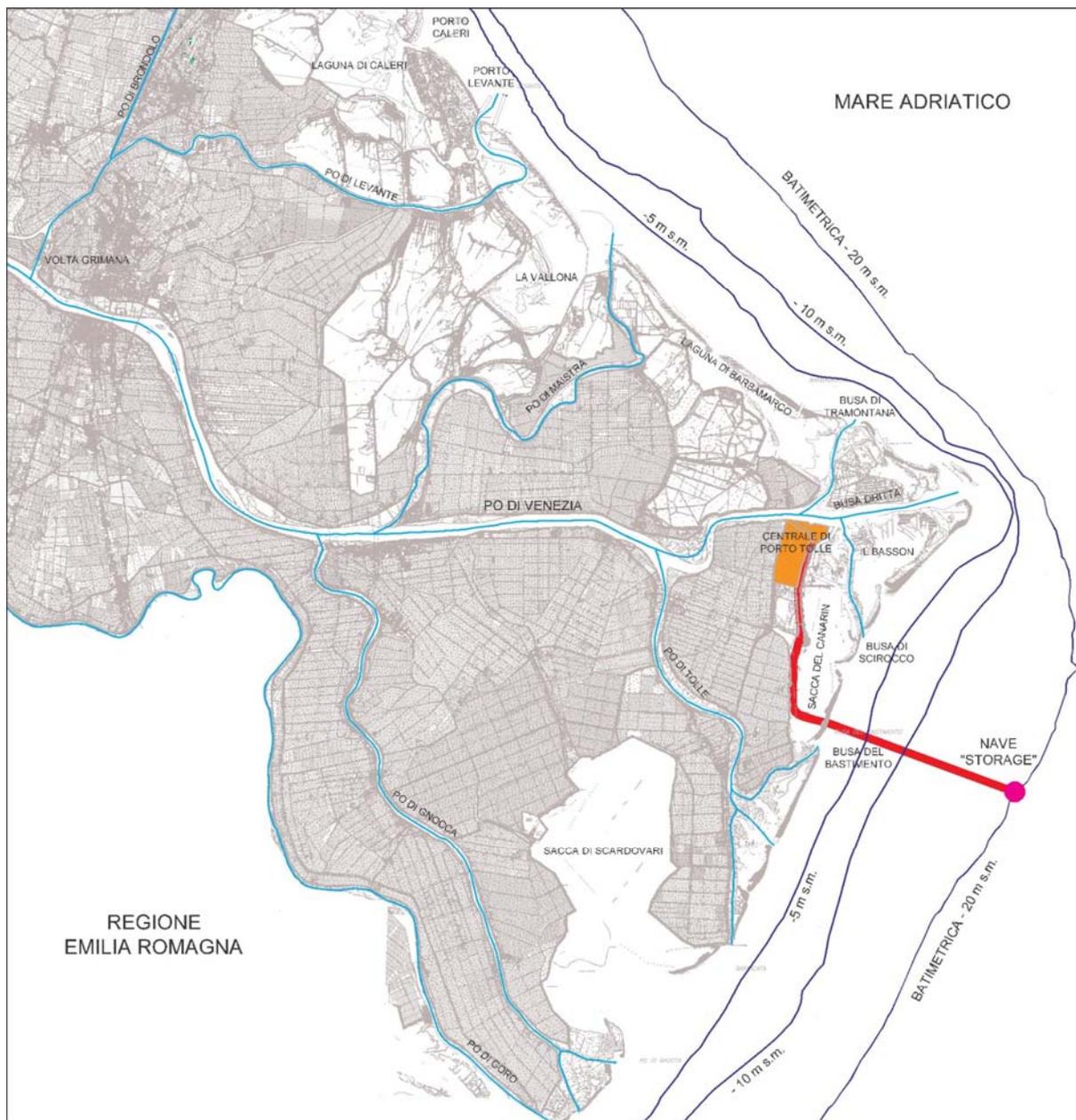


fig. 2.3.1 – Corografia del Delta del fiume Po con evidenziato il percorso tra la nave “storage” e la centrale di Porto Tolle con accesso attraverso la Sacca del Canarin.

2.4 Accesso alla centrale lungo la direttrice Po di Levante – Conca di Volta Grimana – Basso corso del Po

Percorso il tratto di mare che si interpone tra la zona di stazionamento della nave “storage” e la costa, un’ulteriore direttrice ipotizzabile per raggiungere la Centrale di Porto Tolle, percorrendo vie d’acqua interne, è quella di entrare dalla laguna La Vallona e di risalire il Po di Levante fino alla conca di Volta Grimana. Superata la conca, ci si immette quindi nel corso principale del Po, scendendo lungo il corso d’acqua per giungere alla centrale (fig. 2.4.1).

Rispetto ai percorsi già esaminati, questa direttrice costringe le chiatte fluvio-marine ad un tragitto sensibilmente più lungo, ma possiede l'indubbio vantaggio di impegnare strutture idrovie esistenti, già abilitate alla navigazione interna ed inquadrata nel più ampio contesto delle vie d'acqua del Veneto che da molti anni ormai attende di essere più incisivamente sviluppato.

Tenuto conto delle caratteristiche dei natanti destinati a garantire l'esercizio della centrale dopo la sua riconversione, sembrano sussistere per la direttrice considerata tutti i requisiti necessari per renderla attuabile.

A tale riguardo è innanzitutto da evidenziare che da qualche anno sono stati ultimati i lavori che hanno portato ad armare con esiti positivi mediante moli foranei la bocca a mare della laguna La Vallona, nella quale sfocia il Po di Levante. Attualmente, grazie alla presenza dei moli, i fondali minimi che si riscontrano in corrispondenza della barra di foce che si forma in mare di fronte al varco di accesso tra i moli stessi non sono mai inferiori ai 4 m (Tav. 2.3). Fondali minimi ancora maggiori (di circa 5 m) si realizzano e/o sono mantenuti dal COVNI lungo il canale interno, che collega la bocca a mare con lo sbocco in laguna del Po di Levante.

Non contrastanti con le esigenze della navigazione sono anche le velocità massime che si determinano in corrispondenza della bocca e lungo il canale lagunare che da questa si diparte. Attraverso il varco per una marea dell'ampiezza di 1 m, rappresentativa delle condizioni tipiche delle maree di sizigie, le velocità massime in fase di flusso e di riflusso raggiungono il m/s, in assenza di consistenti portate in arrivo dal Po di Levante (fig. 2.4.2). I campi di velocità in prossimità della bocca non si modificano apprezzabilmente se sulla marea si sovrappongono portate di piena in arrivo dal Po di Levante dell'ordine di quelle degli eventi più rari.

A titolo di esempio basti ricordare che con portate massime in ingresso del Po di Levante di 200 m³/s, le velocità massime non superano in corrispondenza della bocca i 1.2 m/s (Fig. 2.4.3).

Condizioni non dissimili si realizzano lungo il canale lagunare di collegamento tra la bocca a mare e lo sbocco del Po di Levante. Le velocità massime in sizigia sfiorano i 0.8 m/s in corrispondenza delle due grandi curve che il canale presenta, sempre considerando una marea dell'ampiezza di 1 m ed ipotizzando portate proprie in arrivo dal Po di Levante trascurabili.

La situazione è favorevole alla navigazione anche lungo tutto il corso del Po di Levante fino alla conca di Volta Grimana, le cui sezioni liquide sono adeguate alla necessità della navigazione con chiatte delle caratteristiche di quelle previste per l'esercizio della centrale. Il regime idrometrico del canale e le velocità che si realizzano lungo il suo percorso in condizioni normali sono dominati dalla marea. Con portate in ingresso da monte trascurabili, le velocità massime indotte lungo il canale dalle normali maree di sizigie non superano i 0.5 m/s. Compatibili con le caratteristiche geometriche delle chiatte destinate a garantire l'esercizio della centrale sono anche le luci libere dei ponti che superano la via d'acqua e la configurazione della conca di Volta Grimana, che consente di superare il dislivello idrometrico esistente tra il Po di Levante e il corso principale del Po.

Scendendo lungo il fiume tra la conca di Volta Grimana e la Centrale di Porto Tolle, il regime dei livelli idrometrici e le velocità massime sono ancora in estesi periodi dell'anno fortemente condizionati dai livelli di marea che si stabiliscono alla foce del fiume. Sono queste le situazioni che si caratterizzano per le minori portate fluenti nel fiume, che sono, pertanto, quelle maggiormente critiche per la navigazione. Anche in presenza di portate ridotte, tuttavia, il fiume sembra essere agevolmente percorribile, quantomeno da battelli con pescaggio pari a quello previsto per le chiatte fluvio-marittime (2.5 m) destinate all'esercizio della centrale.

Al crescere della portata in arrivo lungo il Po si incrementano sia i livelli idrometrici, che sono via via sempre meno influenzati dalla marea alla foce, sia le velocità, senza peraltro che per queste ultime si raggiungano valori tali da ostacolare la navigazione. Fanno eccezione i periodi di piena del fiume durante i quali localmente le velocità lungo il corso d'acqua potrebbero superare i 2.5-3.0 m/s, rendendo più complessa la navigazione, senza impedirla totalmente, se non per gli eventi di più rara frequenza.

Nel complesso la direttrice in esame appare percorribile dai natanti destinati all'esercizio della centrale

senza richiedere particolari interventi od adattamenti delle vie d'acqua interessate, che sembrano già ora in grado di accogliere il traffico da e per l'impianto termoelettrico.

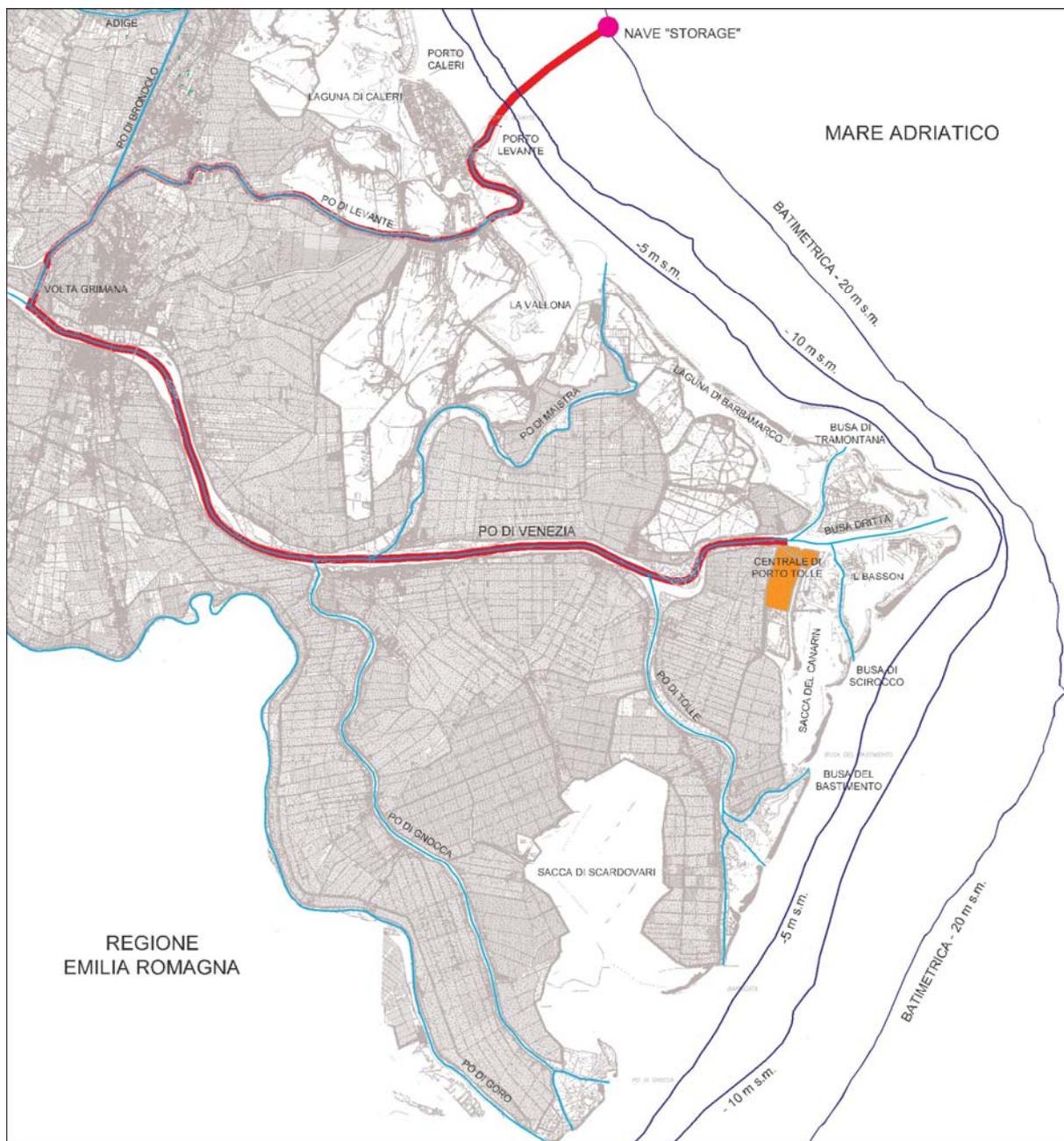


fig. 2.4.1 – Corografia del Delta del fiume Po con evidenziato il percorso tra la nave “storage” e la centrale di Porto Tolle lungo la direttrice Po di Levante – Conca di Volta Grimana - Basso corso del Po.

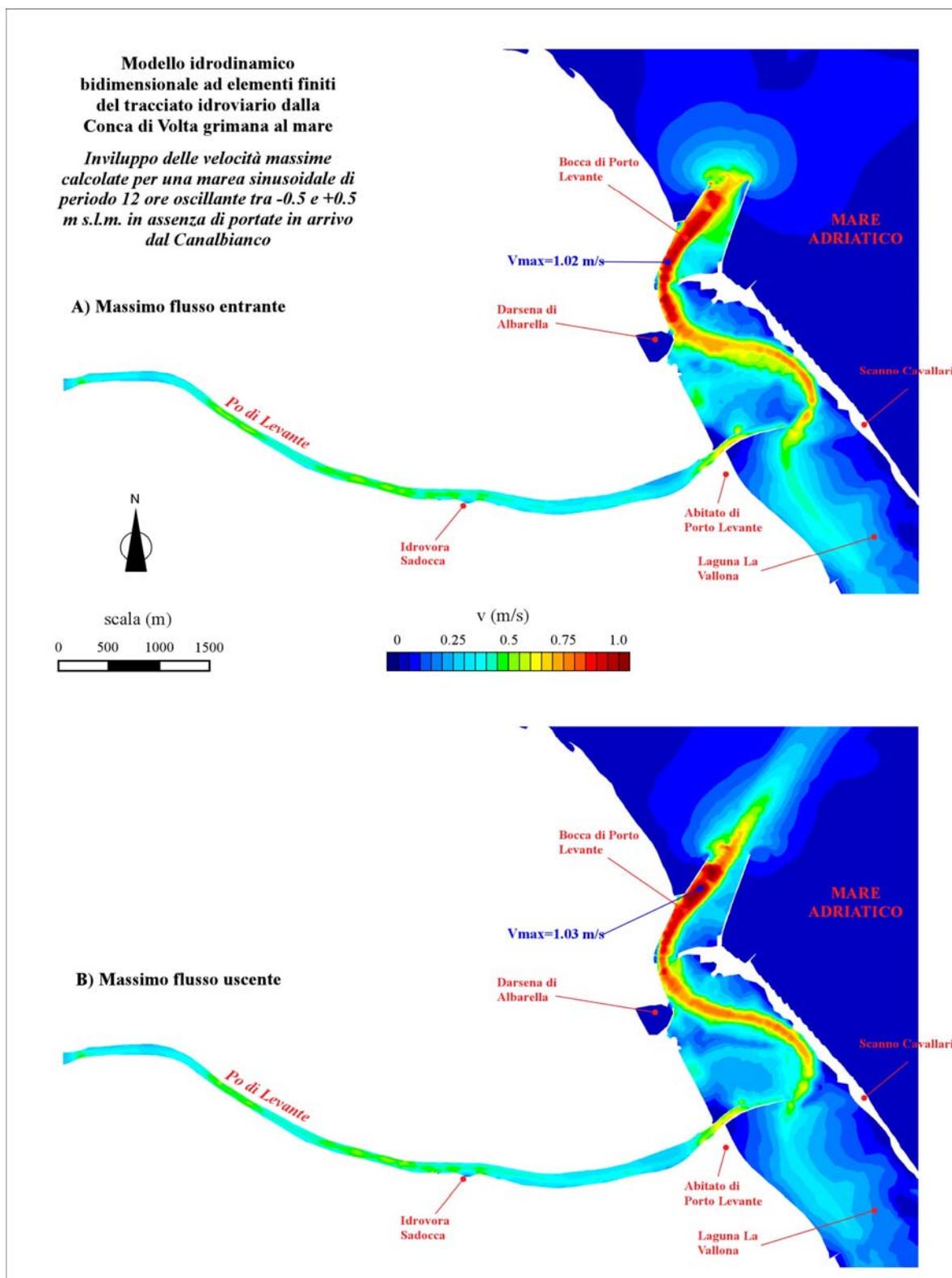


fig. 2.4.2 – Campi di velocità alla Bocca di Porto Levante calcolati con il modello bidimensionale per una marea semidiurna sinusoidale oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m. in assenza di portate in arrivo dal Canalbianco.

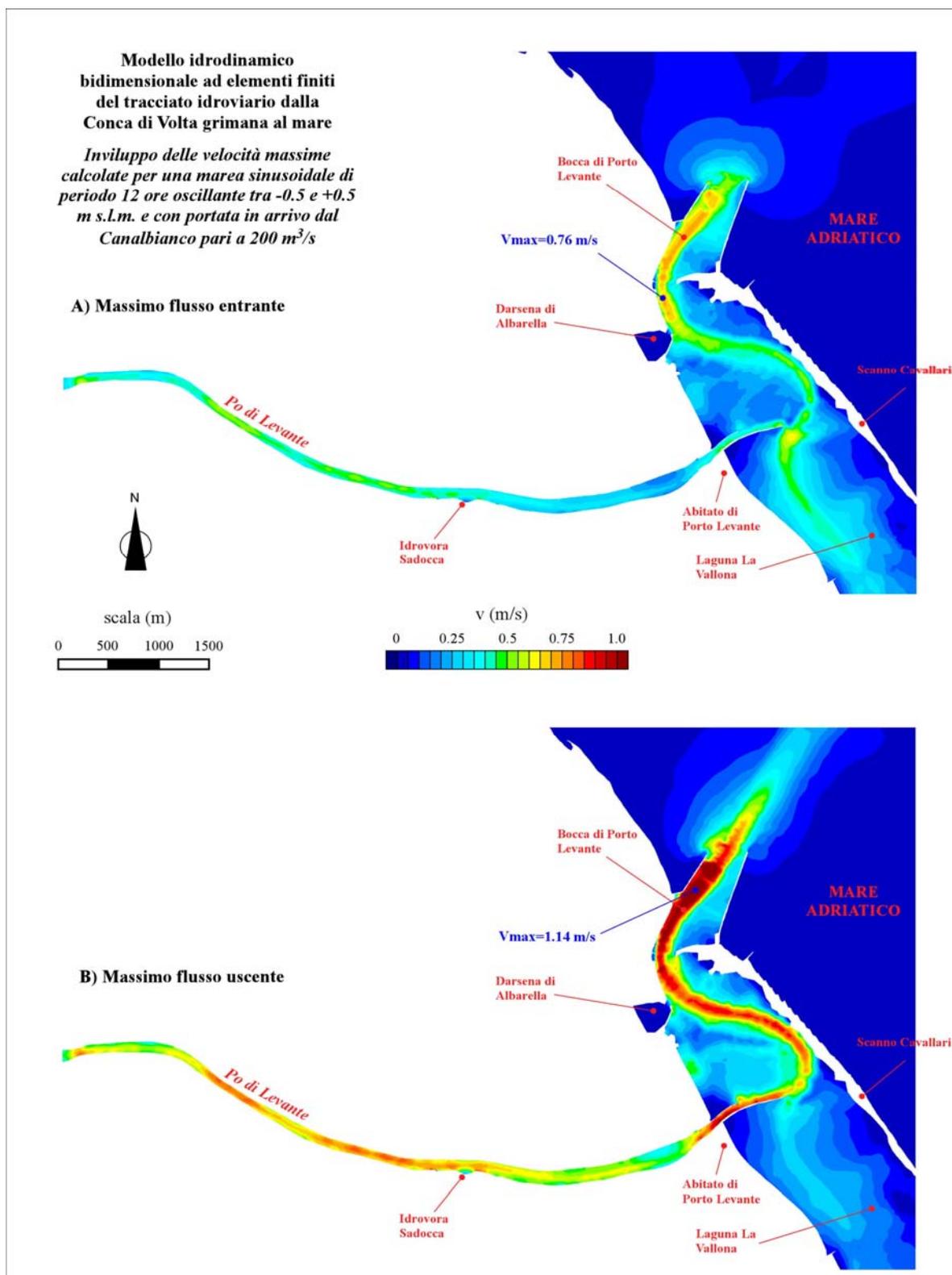


fig. 2.4.3 – Campi di velocità alla Bocca di Porto Levante calcolati con il modello bidimensionale per una marea semidiurna sinusoidale oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m. e portata dal Canalbianco pari a 200 m³/s.

2.5 Considerazioni sulla direttrice di accesso alla centrale preferibile

La proposta riconversione a carbone della Centrale di Porto Tolle con trasporto via acqua dei materiali destinati alla sua alimentazione ed asportazione dei materiali solidi prodotti dalla combustione, può essere attuata ipotizzando diverse direttrici di collegamento tra la nave "storage" ancorata al largo della costa e la centrale stessa, come si è sinteticamente evidenziato nei paragrafi precedenti della presente relazione.

Alcune delle soluzioni esaminate richiedono, tuttavia, la realizzazione di opere e di interventi di un certo rilievo che per il loro inevitabile impatto ambientale le confinano tra le ipotesi non consigliabili, quantomeno allo stato attuale.

Si tratta nello specifico delle soluzioni che prevedono di accedere alla centrale:

- risalendo direttamente dal mare lungo uno dei tre rami in cui si divide il Po di Venezia all'altezza dell'abitato di Pila (vedi paragrafo 2.1– fig. 2.1.1), in particolare lungo la Busa di Tramontana, prevalentemente utilizzata dai pescherecci del Porto di Pila per uscire in mare;
- penetrando nella Sacca del Canarin e percorrendo poi il canale interno attualmente utilizzato, in caso di necessità, per derivare da questa laguna, le portate di raffreddamento dei gruppi termici dell'impianto (vedi paragrafo 2.3 – fig. 2.3.1).

Di un certo interesse per la forte riduzione dei tempi di collegamento tra la centrale e la nave "storage" ancorata al largo è, invece, la direttrice laguna di Barbamarco-Busa di Tramontana (vedi paragrafo 2.2 – fig. 2.2.2), anche se la soluzione richiede a sua volta di attuare nella laguna alcune opere, peraltro di non grande rilievo e di modesto impatto ambientale. Si tratta di una soluzione conciliabile con le attività della pesca che attualmente si attua all'interno della laguna e con il traffico peschereccio che fa capo al porticciolo interno di Barbamarco, che potrebbe rendere anzi più agevole anche l'uscita in mare di tali battelli, a volte penalizzata durante le condizioni di bassa marea.

Decisamente preferibile rispetto a tutte è, in ogni caso, la soluzione che prevede di far percorrere alle chiatte fluvio-marittime destinate a garantire il funzionamento della centrale, la direttrice Laguna La Vallona – Po di Levante – Conca di Volta Grimana – Basso Corso del Po (vedi paragrafo 2.4 – fig. 2.4.1).

La soluzione, infatti, è di immediata attuazione, non essendo necessari né interventi, né opere per adattare le caratteristiche geometriche ed idrauliche delle vie d'acqua interessate alle necessità del nuovo traffico fluvio-marittimo.

Scegliendo questa direttrice è escluso, quindi, qualsiasi impatto di tipo ambientale connesso con la realizzazione di eventuali nuove opere. I risultati delle analisi di dettaglio, illustrati nei successivi paragrafi della presente relazione, evidenziano inoltre:

- la compatibilità di quest'ultima soluzione con le indicazioni della pianificazione sul trasporto acqueo nel sistema idroviario interessato, essendo l'incremento del traffico legato alle chiatte fluvio-marittime destinate all'esercizio della centrale ampiamente tollerabile sia per la situazione attuale, sia per quella futura;
- l'esistenza di condizioni favorevoli al trasporto via acqua delle materie solide da e per la centrale, lungo tutto il sistema idroviario interessato, la cui navigabilità, per gli aspetti idraulici e marittimi, è garantita durante la quasi totalità dell'anno e comunque per un numero di giorni superiore alle necessità dell'esercizio dell'impianto.

3 ANALISI DEGLI ASPETTI LEGATI ALLA NAVIGAZIONE

3.1 Indicazioni della pianificazione a livello regionale relativamente al trasporto acqueo

Gli strumenti principali di pianificazione regionali relativi al trasporto acqueo con navigazione interna sono rintracciabili:

- nel piano Regionale dei Trasporti;
- nei piani nazionali e regionali per lo sviluppo del settore della navigazione interna;
- nei P.T.P locali;
- nel PALAV
- negli strumenti urbanistici locali;
- nel P.R.R.A.;
- nel P.T.R.C..

3.1.1 Strumenti di pianificazione nel settore idroviario

Il trasporto idroviario è una componente fondamentale del tentativo di attenuare lo squilibrio che esiste attualmente tra le varie modalità di trasporto. A tale scopo esiste una Intesa per la Navigazione Interna Interregionale tra le regioni padane (Emilia Romagna, Lombardia e Piemonte) con l'obiettivo di sviluppare una azione comune ed integrata.

Alla base di tale Intesa vi è un piano poliennale delle idrovie , redatto sulla base dello studio S.I.M.P.O. per la formazione del piano generale della navigazione interna Padano-Veneta. In dettaglio la proposta di "*Piano poliennale per l'adeguamento ed il potenziamento delle rete idroviaria padano-veneta*" è punto di riferimento essenziale con riguardo alle scelte, alle priorità di intervento ed agli impegni economici da assumere negli anni a venire per realizzare la rete Interregionale di competenza dell'Intesa.

Il completamento e ammodernamento della idrovia Po-Brondolo è un'iniziativa considerata strategica in tale Piano per lo sviluppo globale della Navigazione Interna.

Nell'ambito della programmazione veneta (Piano Regionale di Sviluppo, P.R.S. Piano Territoriale di Coordinamento, P.T.R.C. e Piano regionale dei Trasporti, P.R.T.) il sistema idroviario è indicato tra le realizzazioni strutturali più significative per favorire un rilancio delle condizioni economiche del Veneto.

Il Piano Regionale di Sviluppo afferma "il sistema portuale veneto dovrà concretizzarsi nella realizzazione degli ammodernamenti strutturali e nello sviluppo del porto di Venezia; nel sistema idroviario Fissero-Tartaro Canal Bianco collegato attraverso il Canale di Valle e la laguna, al progettato canale Venezia-Padova; nell'attuazione di una più rilevante funzione commerciale e fluvio-marittima del Porto di Chioggia.....".

In un ambito generale di pianificazione del trasporto idroviario si richiama la legge 24 gennaio 2000 n.16 "Ratifica ed esecuzione dell'accordo europeo sulle grandi vie navigabili di importanza internazionale".

Il sistema idroviario padano-veneto è stato dichiarato di preminente interesse nazionale con la legge 380/90 che autorizzava lo stanziamento di fondi per le quattro regioni che si affacciano sul Po, fiume di interesse nazionale, fondi ulteriormente ampliati con le leggi 194/98 e 413/98 (con ulteriori 230 milioni di euro).

Il 13 marzo 1999 è stato firmato a Chioggia il Protocollo d'intesa per lo sviluppo del sistema idroviario tra il Ministro della Navigazione e gli Assessori di Piemonte Lombardia, Veneto, Emilia e Friuli che

ripartiva tra le Regioni i fondi stanziati della sopraccennate leggi.

3.1.2 Note particolari sugli strumenti di pianificazione

Il P.T.P. della provincia di Venezia definisce l'area meridionale della provincia stessa fortemente connessa al cuore del sistema territoriale provinciale, per l'essere Chioggia parte rilevante della laguna e dei suoi valori ambientali ed antropici.

L'area meridionale quindi richiede un progetto di sviluppo forte e coerente, che definisca gli usi da promuovere e quelli da scoraggiare.

Le proposizioni di progetto del P.R.T. (Piano Regionale dei Trasporti) , per quanto riguarda il sistema idroviario, risultano coerenti con gli obiettivi del P.T.R.C. e vengono pertanto assunti nella loro totalità.

Nel P.T.R.C. si afferma che il piano di potenziamento idroviario presenta vantaggi di natura economica generale. Esso, infatti, offre prospettive di sviluppo economiche alle aree marginali basso-polesane ed a quelle costiere per l'incremento del turismo nautico, particolarmente sulle litoranee e sulle aste di penetrazione e, soprattutto, estende potenzialmente ad un vasto entroterra regionale ed interregionale il bacino di influenza della portualità veneta. Si afferma inoltre che per quanto riguarda l'idrovia litoranea veneta è previsto l'adeguamento ai nuovi standard europei dei nodi di attraversamento idroviari e delle conche di accesso in laguna.

3.1.3 Piano regionale dei trasporti

Lo stato attuale del trasporto idroviario presenta delle notevoli carenze sia infrastrutturali che di esercizio, che ne impediscono un deciso sviluppo.

La scarsa competitività del trasporto idroviario è da attribuirsi a:

- vincoli alla navigabilità lungo le aste;
- mancato adeguamento/completamento di altre delle altre vie navigabili;
- vincoli riguardanti le caratteristiche dei natanti e delle strutture di attraversamento;
- vincoli che riguardano gli aspetti organizzativi e normativi;

Il Piano Regionale dei trasporti della Regione Veneto si propone di adeguare le strutture facenti parte delle vie idroviarie alle caratteristiche dei natanti, che sono attualmente inadeguate allo sviluppo del traffico idroviario.

Il superamento dei vincoli derivanti dai nodi di attraversamento è infatti un passo decisivo verso la reale efficacia del trasporto idroviario e l'affermarsi dell'intermodalità (che abbisogna all'interno di un servizio complessivo porta a porta). Nel Piano si rammenta come il Porto di Chioggia e Porto Levante siano le interfacce fluvio-marittime più importanti tra il sistema idroviario padano e il mare Adriatico.

La navigazione fluvio-marittima è allo stato attuale in una condizione limitata, sia dalla carenza di adeguamenti della rete dei canali navigabili, sia dalla carenza di adeguate strutture di attraversamento (i.e. conche). Esiste in ogni caso una grande possibilità di sviluppo legata all'adeguamento delle vie navigabili e delle infrastrutture ad esso collegate.

L'impegno della Regione Veneto indica la volontà della stessa di attuare l'ammodernamento ed il completamento della rete idroviaria al fine di portare il Veneto e le Regioni dell'intesa Interregionale per il trasporto idroviario in linea con la politica del trasporto dei principali partners europei.

Nel settore idroviario il PRT conta sugli indirizzi espressi insieme alle altre regioni padane dell'Intesa. In tale ambito si rammenta il "Piano Poliennale per l'adeguamento ed il potenziamento della rete idroviaria padano-veneta".

Lo sviluppo del trasporto idroviario è considerato in tutti i piani programmatici della Regione Veneto ed

anche nel Piano Generale dei Trasporti (P.G.T.). In esso si afferma *che lo sviluppo del cabotaggio ed il potenziamento del sistema idroviario vengono a costituire due momenti necessari di evoluzione strategica del trasporto merci realizzando un effettivo intermodalismo a vantaggio di un migliore equilibrio dell'assetto del trasporto interno ed una più alta efficienza globale.*

In fig. 3.1.1 si riporta il tracciato del sistema idroviario padano veneto (approvato dal C.I.P.E.T. in data 30.03.1992), mentre la fig. 3.1.2 riporta il tracciato veneto.

Porto levante rappresenta dopo Chioggia, l'interfaccia fluvio-marittima tra il sistema idroviario padano, attraverso lo sbocco del Po di Levante e il mare Adriatico.

Un primo finanziamento per la realizzazione di un primo stralcio del porto interno polifunzionale venne previsto dalla L.R. 34/1984 nell'ambito degli interventi straordinari per lo sviluppo dell'area polesana. Ulteriori finanziamenti vennero indicati nel Piano Poliennale per la rete idroviaria sia per il terminal fluvio-marittimo, sia per l'armamento della foce del Po di Levante. Le funzioni previste nel progetto generale erano quelle di un terminal fluvio-marittimo non esclusivamente limitato a funzioni di trasbordo e frazionamento dei carichi in prosecuzione lungo la rete idroviaria.

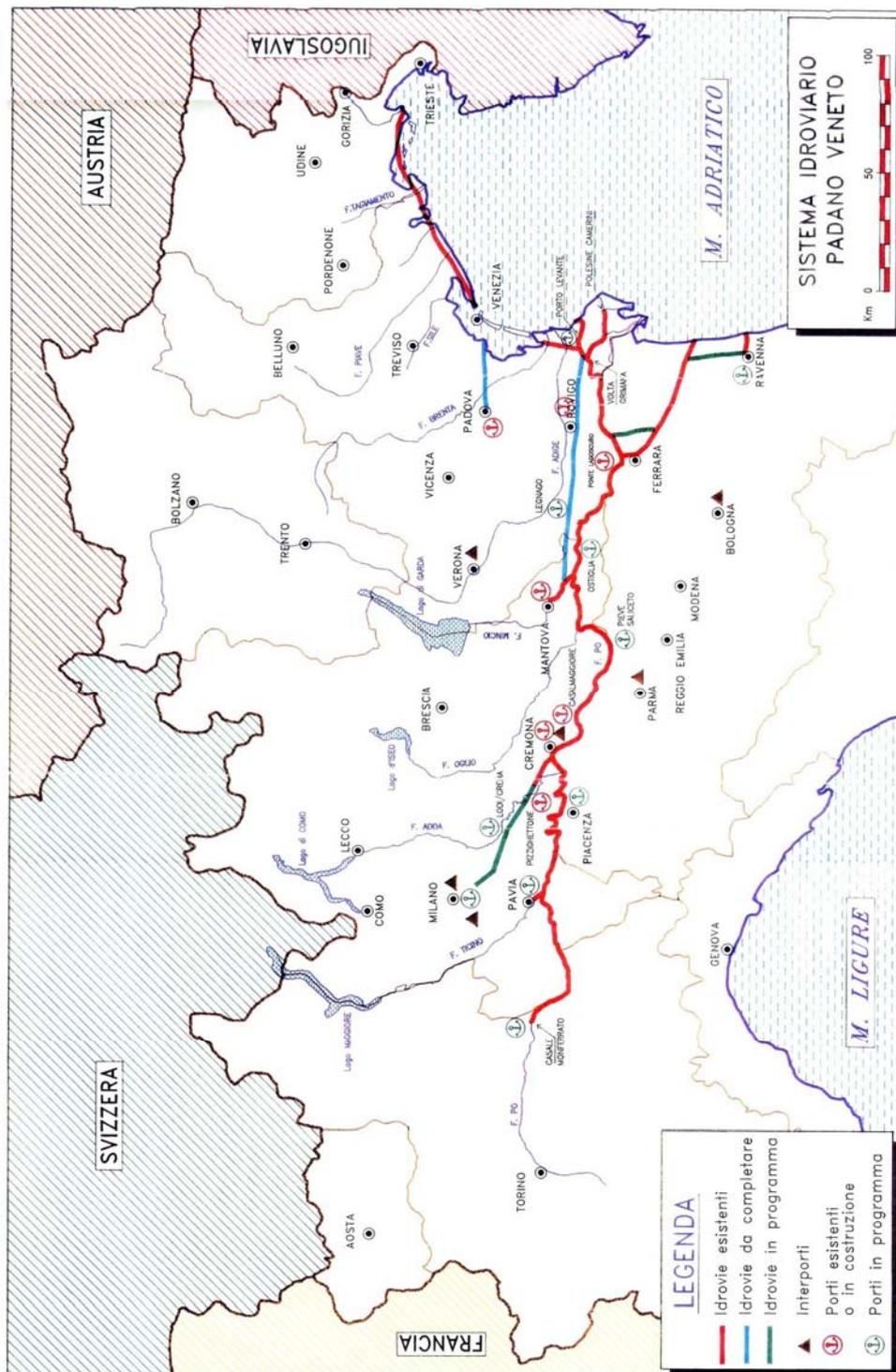


fig. 3.1.1 - Tracciato del sistema idroviario della Val Padana

3.1.4 Aspetti economici relativi alla ricalibratura dei canali navigabili

L'adeguamento strutturale previsto del naviglio idroviario dei canali lungo il tratto Po di Levante-Conca di Volta Grimana-Basso corso del Po, obiettivo di primaria importanza per consentire la connessione diretta del sistema portuale della Laguna di Venezia (porti di Venezia e Chioggia al più vasto sistema idroviario padano (fiume Po, canale Fissero-Tartaro-Canalbianco, Navigli Ferraresi ecc.), è in accordo con lo standard europeo previsto per la moderna navigazione idroviaria, basata sulla V classe secondo la classifica CEMT.

Si tratta dell'unico sistema di navigazione interna di possibile utilizzazione economica presente nel nostro Paese. Sistema che è già stato riconosciuto per la propria potenzialità tecnica dalla legislazione nazionale in materia di navigazione interna (legge n. 380/90).

L'Unione Europea ha stabilito lo "Schema direttore della rete delle vie navigabili" che per l'Italia pone all'attenzione realizzativa il collegamento del cuore della Val Padana (Milano in termini indicativi) con il Mare Adriatico (Venezia in termini indicativi), come si può rilevare in fig. 3.1.1. Tuttavia lo Schema direttore demanda all'azione del singolo Stato nazionale la reale attuazione dei completamenti necessari per dare possibilità navigatoria al collegamento descritto.

Dal punto di vista dell'operatività delle Regioni, va segnalato che la Regione del Veneto ha individuato tra i suoi interventi prioritari il completamento del Canale Po-Brondolo, al fine sia di dare finalit  ad una rete idroviaria complementare al fiume Po che di innestare nel circuito idroviario il realizzato Porto di Chioggia, per il quale   stata anche prevista l'integrazione intermodale con la costruzione di un raccordo ferroviario, oltre al transito in Adriatico tramite il Porto di Levante con sbocco attraverso la laguna La Vallona.

La Regione del Veneto ha, inoltre, approvato il Piano d'Area della Laguna Veneta, al fine di governare le problematiche ambientali unitamente al processi forti di trasformazione economica oggi in atto, in ambiti ad alta valenza ambientale e paesistica.

Come pu  essere facilmente dedotto dalla stessa fig. 3.1.1, il "Sistema idroviario padano"   tutto orientato ad una proiezione marittima. Del resto la limitata estensione interna che il sistema italiano presenta rispetto ad analoghi sistemi centro e nord europei, induce ad ipotizzare che solo da un'integrazione fluvio-marittima o fluvio-portuale si possano trarre i maggiori benefici per gli eventuali investimenti volti a dare effettiva operativit  al sistema italiano.

Il sistema idroviario padano rappresenta di per s  una risorsa in termini di investimenti, anche se non necessariamente tutti dedicati alla navigazione, essendo il compito idraulico la "missione" principale. Si tratta di investimenti che la rinnovata competizione tra le economie richiede siano messi a frutto. La mancata utilizzazione di un naviglio commisurato allo standard europeo e l'impossibilit  di fruire di utili interconnessioni fluvio-marittime di fatto svalutano tale capitale fisso sociale, che non pu  dimostrare redditivit  agli investimenti fatti nel corso degli anni.

3.1.5 Note sull'adeguamento dell'idrovia veneta

Il rinnovato interesse a favore del trasporto idroviario e, quindi, della valorizzazione dell'intero sistema padano esistente comincia ad essere importante per un'insieme di ragioni che possono essere sintetizzate nelle seguenti:

- una nuova onda di sviluppo delle attivit  economiche insediate nelle regioni padane per effetto di alcuni cambiamenti strutturali, tanto nelle economie quanto negli ordinamenti professionali ed istituzionali;
- il consolidamento di un settore agricolo inserito nei mercati internazionali che, da un lato, ha

assunto comportamenti organizzativi attenti ad abbassare la frontiera dei costi e, dall'altro, ha iniziato a "dismettere" i comparti meno redditizi ed economicamente marginali, destinandoli a funzioni ambientali da sostenere con incentivi diversi;

- una mutazione, in corso, in comparti manifatturieri ad alto contenuto di lavoro con spostamento di unità operative in Paesi dell'Europa dell'Est, mantenendo i centri decisionali, organizzativi e distributivi nella pianura padana;
- un'accelerazione dei processi d'innovazione tecnologica nelle aziende dei settori produttivi, con particolare riferimento alla crescita competitiva dei comparti dell'impiantistica e dei beni d'investimento che si candidano a competere sui nuovi mercati aperti dal rinnovato flusso del commercio internazionale a seguito degli accordi "libero scambisti";
- un'accentuazione della "sensibilità ambientale" che si sta trasferendo, a livello di sistema europeo e dei Paesi più sviluppati, sul sistema dei prezzi dei beni e dei servizi (ecotasse, incentivi fiscali, ecc.) e che quindi sta modificando convenienze localizzative, differenziali tariffari nei diversi modi di trasporto, vantaggi comparati tra infrastrutture.

Inoltre l'effettivo modificarsi della ripartizione internazionale del lavoro comporta effetti che sono diversi a seconda della vicinanza" o meno della localizzazione delle nuove attività economiche che si aggiungono a quelle esistenti sullo scenario internazionale. Più particolarmente, il fronte geografico più prossimo per l'espansione delle relazioni economiche internazionali italiane, e di quelle padane in particolare, è chiaramente individuabile nelle tre fasce:

- quella dei Paesi rivieraschi adriatici
- quella più interna, collegata al mare Nero, dell'Europa balcanica e russa
- quella, infine, che si affaccia sull'arco Mediterraneo mediorientale.

E' quindi ipotizzabile che il progressivo avvio di rilevanti processi di sviluppo economico dei Paesi che sono compresi nelle tre fasce citate si affermi mediante:

- una necessità di approvvigionamenti di impianti "chiavi in mano" per accelerare i saggi di crescita economica interna su ritmi capaci di avvicinare l'offerta di lavoro alla rilevante domanda presente in loco;
- una minore propensione nelle unità produttive all'utilizzo di tecniche gestionali del tipo "just in time" con richiesta di approvvigionamenti di materie prime, semilavorati grezzi, ecc, per grandi quantità d'immagazzinamento nonché per deposito distributivo;
- una crescente affermazione di correnti di prodotti di base e di prima lavorazione verso l'Italia con provenienza dai Paesi delle stesse tre fasce citate, correnti generate dalla fruizione dei vantaggi comparati prodotti da accordi di collaborazione e di sostegno attivati da specifici Programmi dell'Unione Europea od altri organismi Internazionali (WTO, FMI, ecc..).

Si rammenta infine un specifico intervento dell'Unione Europea con l'approvazione dello Schema Direttore delle infrastrutture idroviarie al 2010, che indica le direttrici prioritarie ed i progetti d'interesse per il sostegno del mercato interno anche dal punto di vista dei sistemi dei trasporti. In tal senso il collegamento Milano-Venezia viene inteso come collegamento di sistema con le necessarie eliminazioni delle strozzature esistenti del Po per il suo sbocco a mare.

La via navigabile Mantova-Venezia consente un collegamento permanente tra il Porto regionale di Mantova Valdaro e il mare Adriatico ed è costituita da quasi 150 chilometri di via navigabile con livello di acqua costante.

Obiettivo delle opere. In un senso più vasto l'obiettivo della ricalibratura e dell'adeguamento funzionale delle idrovie venete è una risposta tempestiva ed anticipatrice su una domanda di trasporto che si connette strettamente con l'operatività portuale, attività destinata a raccogliere i frutti dell'espansione internazionale del nostro commercio estero, che sulla base dei risultati è orientato nettamente dall'Italia

padana che assomma i 2/3 dell'intero commercio estero italiano.

La necessità di una risposta si colloca anche nel sentiero di crescita dell'intera regione veneta che chiamata, proprio in un momento di apparente favore economico, a ridefinire il proprio ruolo e la propria identità economica con un cambiamento della struttura del ciclo che l'ha accompagnata in quest'ultimo trentennio di trasformazione da regione agricola a regione manifatturiera e commerciale. In fig. 3.1.3 si riporta lo schema della situazione delle idrovie regionali.



fig. 3.1.3 - Sistema attuale delle idrovie venete

Di seguito, nelle tab. 3.1.1 e tab. 3.1.2 si riportano i valori normativi standards per le idrovie europee e le proposte del PIANC per la normalizzazione delle idrovie.

tab. 3.1.1 Classificazione attuale delle idrovie europee e classificazione delle barche

Classe delle idrovie	Classificazione CEMT					Classificazione CEE
	Navigazione convenzionale					
	caratteristiche	Lunghezza L	Larghezza B	Tirante d'acqua t_{ac}	Tirante d'aria t_{ar}	Portata T
	t	m	m	m	m	t
I	300	38,50	5,00	2,20	3,55	250÷400
II	600	50,00	6,00	2,50	4,20	400÷650
III	1000	67,00	8,20	2,50	3,95	650÷1000
IV	1350	80,00	9,50	2,50	4,40	1000÷1500
V	2000	95,00	11,50	2,70	6,70	1500÷3000
VI	≥3000	-	-	-	-	≥3000

Classe vie navigabili	Barche automotrici				Convogli spinti					spintori				Luce minima sotto ponti
	Caratteristiche generali				Caratteristiche generali					Caratteristiche generali				
	lunghezza	larghezza	Tirante d'acqua	portata	denominazione	lunghezza	larghezza	Tirante d'acqua	portata	denominazione	lunghezza	larghezza	Tirante d'acqua	
	m	m	m	t		m	m	m	t		m	m	m	m
I	38,50	5,05	2,20	250÷400										4,00
II				400÷650										4,50
III				650÷1000										5,00
IV				1000÷1500	1 barca E I	85	9,50	2,50	1240	Europa I	70,00	9,50	2,50	5,25
Va				1500÷3000	1 barca E II	95÷105	11,40	2,80	1850	Europa II	76,50	11,40	2,80	7,00
Vb					2 barca E II	172÷185	11,40	2,80	3700					
Vla					4 barche E II a	185÷195	22,80	4,50	8000 12000	Europa IIa	9,10	11,40	3,90	9,10
Vib					6 barche E II a	270	22,80	4,50	12000 18000					
							195	34,20	4,50	12000 18000				

tab. 3.1.2 - Proposta PIANC per la normalizzazione delle idrovie (Fonte:PIANC)

3.2 Previsioni di sviluppo della navigazione lungo la direttrice Po di Levante-Conca di Volta Grimana-Basso corso del Po

Secondo indagini condotte sul sistema aziendale padano (aziende produttrici e spedizionieri) che più direttamente interessa il sottosistema Fiume Po Laguna Veneta si sono potuti cogliere interessi crescenti verso questa forma di traffico, in quanto esistono correnti di trasporto che porrebbero essere incrementate e che riguardano:

- *trasporto* di granaglie, sfarinati e fertilizzanti verso l'interno della Pianura Padana allo scopo di abbassare i costi della distribuzione di tali input produttivi della filiera agroalimentare italiana, che trova qui il punto di massima concentrazione. In questo senso va ricordato che proprio il mutamento sostanziale della stessa Politica Agricola Europea (passaggio da una politica di sostegno ai prezzi ad una politica della redditività aziendale), volta a ridurre l'incidenza dei seminativi ed a favorire l'acquisizione di valore aggiunto nei settori più produttivi degli allevamenti e dell'industria di trasformazione alimentare, accelererà tale richiesta di maggiore trasporto. A dimostrazione di ciò va considerato che a fronte di una diminuzione di circa il 7% della PLV agricola la politica inciderà per circa il 50% sui cereali, il 10% sui semi oleosi, il 60% sulle piante proteiche, il 30% sulle coltivazioni ed il 125% sulla carne bovina; trasporto di cemento di provenienza extracomunitaria per i fabbisogni crescenti esistenti nella pianura padana, anche in vista del programma di costruzione di nuove infrastrutture (TAV in particolare);
- *trasporto* di GPL come trasferimento da nave marittima verso i depositi interni padani e le cui potenzialità di sviluppo vanno viste in relazione all'estensione della domanda relativa alla conversione ad uso GPL di molte utenze domestiche delle zone agricole padane, anche in relazione ad una diversificazione della politica fiscale locale. Un'ulteriore impulso al trasporto idroviario deriverebbe dalla genesi di traffici in uscita dalla pianura padana, che renderebbero alla pari dell'ulteriore sviluppo traffico in entrata, più redditizio il sistema padano veneto ed i conseguenti lavori di potenziamento

Sotto tale profilo vanno ricordati:

- *traffico relativo* alla produzione di impiantistica industriale che, oltre ad un rinnovato bisogno di traffico verso gli stabilimenti di produzione per componenti acquisiti da altri stabilimenti esteri, vede il possibile sbocco di molte commesse nella ricostituzione-espansione del sistema industriale di molti Paesi dell'Europa orientale (Paesi PECO secondo la dizione dell'Unione Europea). Trattandosi di traffico ricco e non commisurabile soltanto sulla base del tonnellaggio, la necessaria espansione produttiva di tale settore dell'industria italiana, prevalentemente ubicato nella pianura padana, non può non ricercare che opportunità di costi di trasporto estremamente economiche al fine di accrescere il valore aggiunto proprio in presenza di un'agguerrita competizione internazionale;
- *trasporto di materie prime* per l'industria metallurgica (coils) ubicata nell'ambito della pianura padana e conseguente trasporto dei prodotti metallurgici (in particolare tuberie) onde consentire di contenere i costi dei trasporti sul fatturato entro i margini percentuali del 3-4%, livelli sui quali sono attestati i concorrenti stranieri. Tale ipotesi-obiettivo può generare la possibilità del trasferimento verso ubicazioni padane meridionali di molte delle attività metallurgiche attualmente ubicate lungo la fascia padana settentrionale, costituendo la variabile costo del trasporto il punto di riferimento per il mantenimento delle stesse iniziative economiche;
- *trasporto di ceramiche* e materiali da rivestimento, manufatti che troverebbero convenienza a nuove ubicazioni verso le aste idroviarie tanto per fruire di bassi costi di trasporto delle materie prime, quanto per l'invio di carichi unitizzati verso i mercati di sbocco;
- *trasporto di cereali* per la trasformazione dell'industria alimentare (pastificazione, amidi, ecc.). In questo caso si tratterebbe prevalentemente di traffico di ingresso ma anche in questo caso si

sosterrebbe la permanenza di un segmento significativo dell'industria alimentare nel Paese che sempre più diventerà dipendente, per le ragioni della Politica Agricola Comune prima richiamate, da massicce importazioni di grano e, nel caso degli amidi di mais.

La previsione dell'incremento dei volumi quantitativi del trasporto idroviario così come sopra prospettato (tanto per chiatte quanto per natante fluvio-marittimo) del 15-20% all'anno potrebbe apparire non azzardato e consentire all'intero sistema padano veneto (fiume Po, Tartaro Fissero Canalbianco, Brondolo Laguna Veneta) di sostenere un ruolo funzionale ai sistemi europei.

Inoltre si rammenta che il fronte geografico più prossimo per l'espansione delle relazioni economiche internazionali italiane e, di quelle padane in particolare è, come si è ricordato, individuabile nelle tre fasce: 1) quella dei paesi rivieraschi adriatici; 2) quella più interna, ma collegata al Mar nero, dell'Europa balcanica e russa; 3) quella che si affaccia sull'arco Mediterraneo medio-orientale.

Il caratteristico ventaglio merceologico del traffico idroviario mostra come un cospicuo incremento dello stesso si possa verificare solamente una volta superati gli ostacoli, che ancora impediscono l'affermarsi dell'intermodalità. Le stime previste dallo studio SIMPO (1986) davano, una volta reso concorrenziale il sistema di trasporto, già per l'anno duemila, un traffico idroviabile potenzialmente superiore ai 6'000'000 di tonnellate/anno e di esso una cospicua quota nei terminali del Veneto. Ciò non si è ancora verificato soprattutto per la mancanza di interventi strutturali a favore delle linee navigabili.

Nella tab. 3.2.2 e nei grafici seguenti a titolo esemplificativo è illustrata la situazione del traffico registrato (per anno) alla conca di Brondolo, proveniente in prevalenza dal settore meridionale della idrovia veneta (dati COVNI). Si può notare nel tempo un deciso incremento del passaggio dei natanti da diporto, mentre si registra uno stallo o addirittura un decremento del passaggio dei natanti di tipo commerciale ed, un decremento delle volume delle merci trasportate. Ciò è sicuramente da imputare al non avvenuto adeguamento strutturale della linea navigabile, che tra l'altro impedisce il transito ai natanti della nuova generazione.

Relativamente al movimento del traffico mensile registrato alla conca di Volta Grimana per quanto riguarda le merci energetiche nell'anno 2004, si rimanda alla tab. 3.2.2. Il traffico di natanti da 1350 t che passa per la Conca nel suo complesso, da dati offerti dal COVNI, assomma a 600, con una media di due al giorno.

Per quanto riguarda le previsioni di sviluppo infrastrutturale di una certa consistenza, il comune di Porto Viro ha previsto di adibire, nell'ambito del Piano Regolatore, circa 3'500'000 m² di area in destra del Po di Levante a valle del ponte sulla Romea, a zone di movimentazione portuale relative alla navigazione interna. In fig. 3.2.1 si riporta la planimetria dell'area adibita a tali usi (limite rappresentato dalla campitura marrone).

Nelle condizioni congiunturali attuali non si vede, tuttavia, come vi possa essere un aumento significativo nei prossimi 10 anni. Gli adeguamenti strutturali, per quanto più volte programmati, appaiono lontani, soprattutto per le condizioni ambientali locali, che difficilmente daranno il via a variazioni di sezione del canale navigabile adeguati alla potenzialità della conca di Volta Grimana.

Si può conseguentemente prevedere nei prossimi 10 anni, nelle migliori prospettive, un raddoppio dei natanti commerciali, cioè 3÷4 al giorno sempre appartenenti alla classe V europea. Bisogna, al riguardo, tener conto che la navigazione lungo il Fissero-Tartaro-Canalbianco ed il canale di Valle, per la presenza di conche di nuova costruzione (Baricetta, Bussari, Canda), consentirà il passaggio di natanti larghi al massimo 11.5 m, ovvero per natanti della V classe europea da 1.350 t, anche se la conca di Volta Grimana può consentire il passaggio di mezzi di maggiore tonnellaggio.

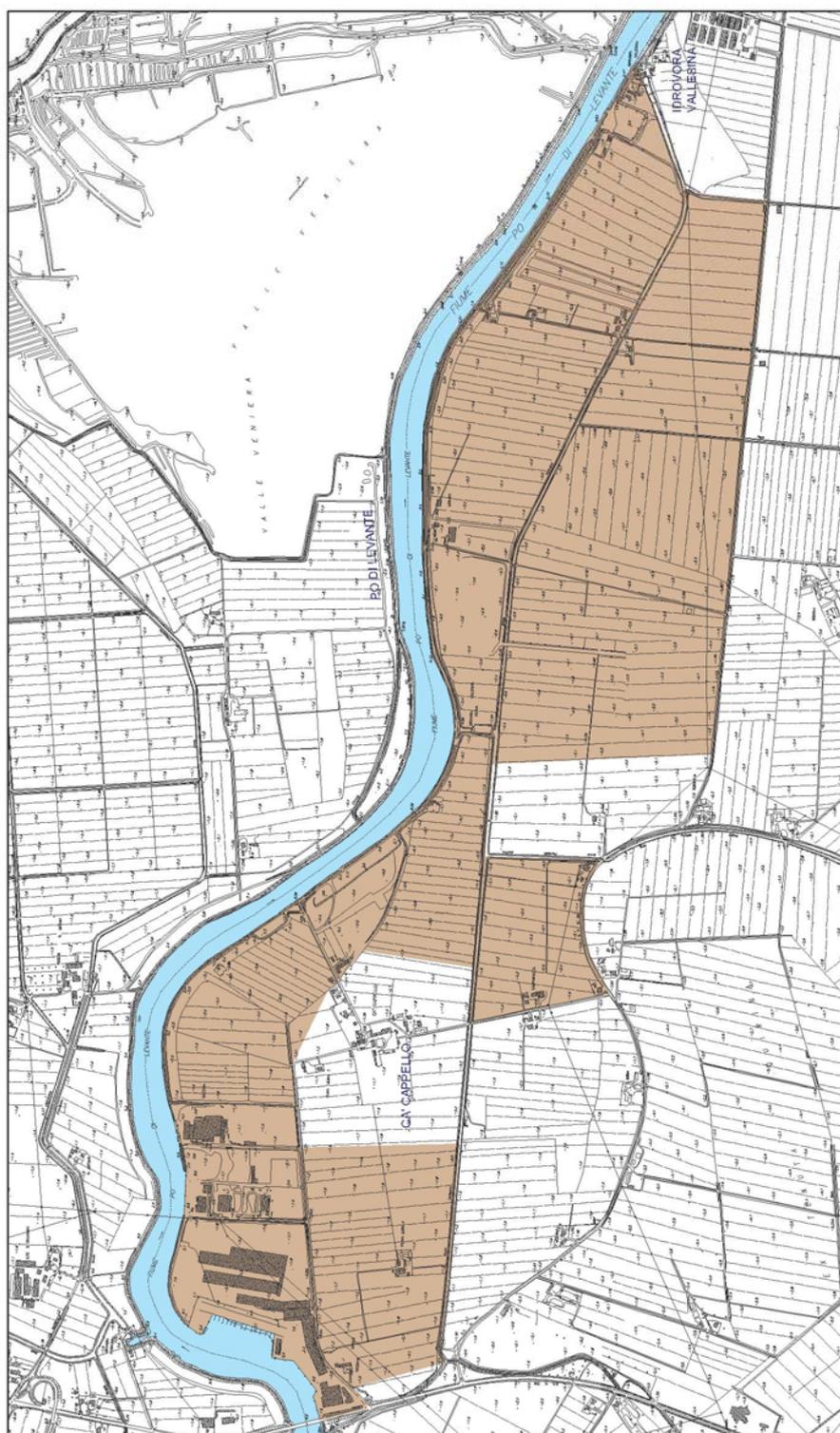


fig. 3.2.1 - Estratto del PRG di Porto Viro con localizzazione delle aree previste per la movimentazione portuale

tab. 3.2.1 - Natanti in transito alla conca di Brondolo (Fonte COVNI)

anno	Natanti commerciali	Natanti da diporto	tonn
1990	1646	5480	514895
1991	1174	4941	330518
1992	930	5919	198438
1993	945	9572	240210
1994	1134	9572	268554
1995	1375	8105	319954
1996	1295	7325	325311
1997	1957	13137	272532
1998	1263	13384	300377
1999	1064	14043	289046
2000	1113	16684	176104
2001	1645	15619	215676
2002	1808	15090	137560

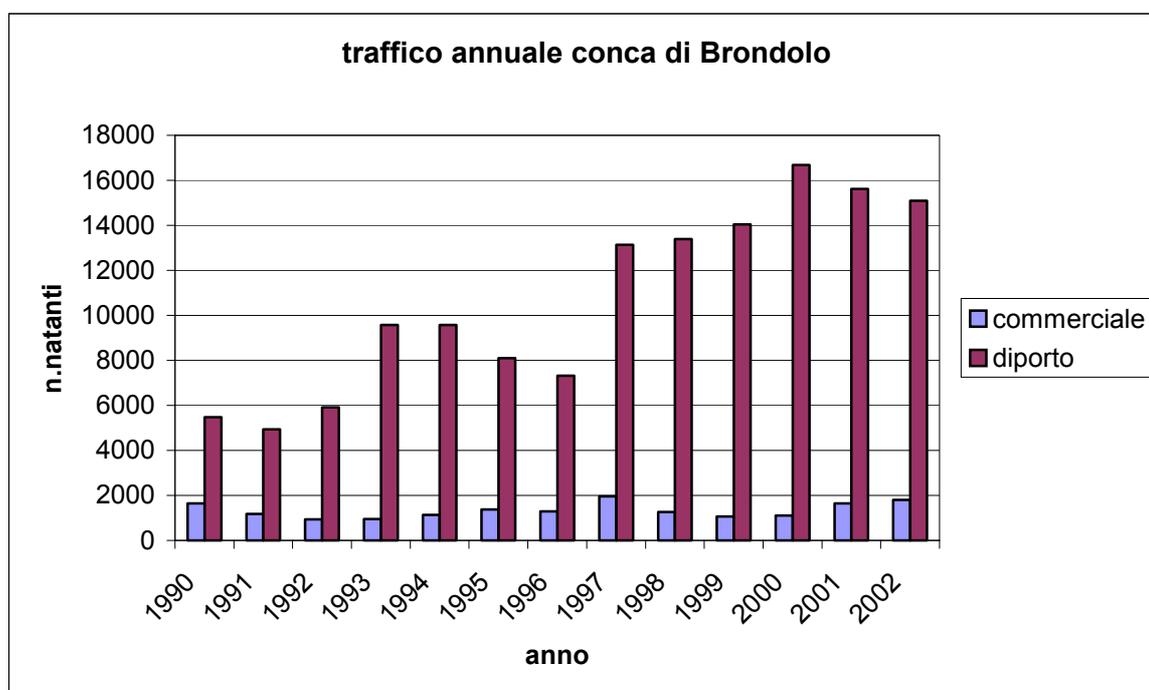


fig. 3.2.2 - Dati del traffico natanti (Fonte:COVNI)

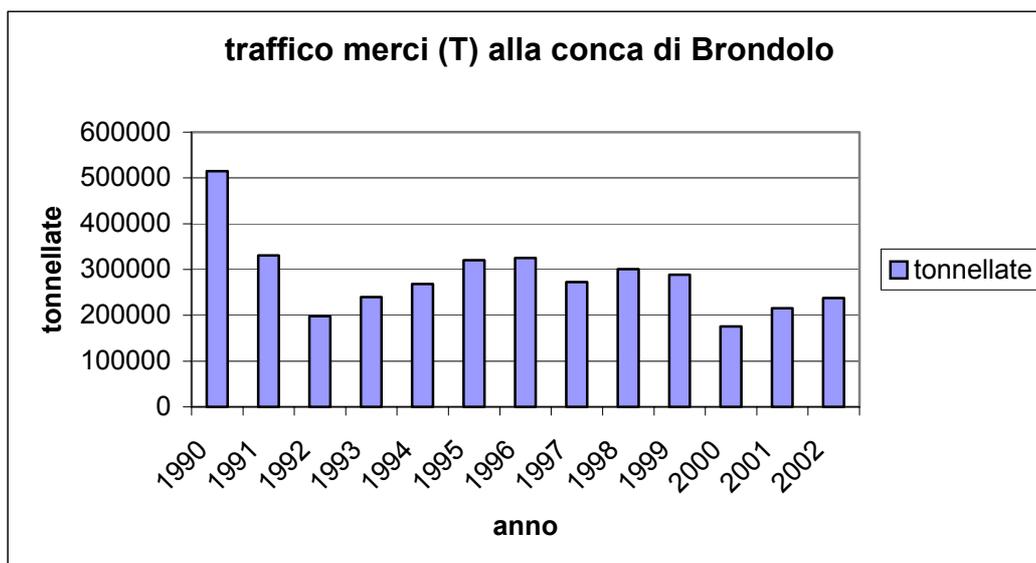


fig. 3.2.3 - Traffico merci registrato alla conca di Brondolo (Fonte:COVNI)

tab. 3.2.2 - Natanti in transito alla conca di Volta Grimana per la categoria derivati energetici

mese	Natanti commerciali	tonn
Gennaio	17	15332
febbraio	14	10627
Marzo	22	22835
aprile	17	14161
maggio	18	19048
giugno	10	7658
luglio	5	3252
agosto	6	3953
settembre	14	11794
ottobre	12	10340
Novembre	10	9091
dicembre	15	12490

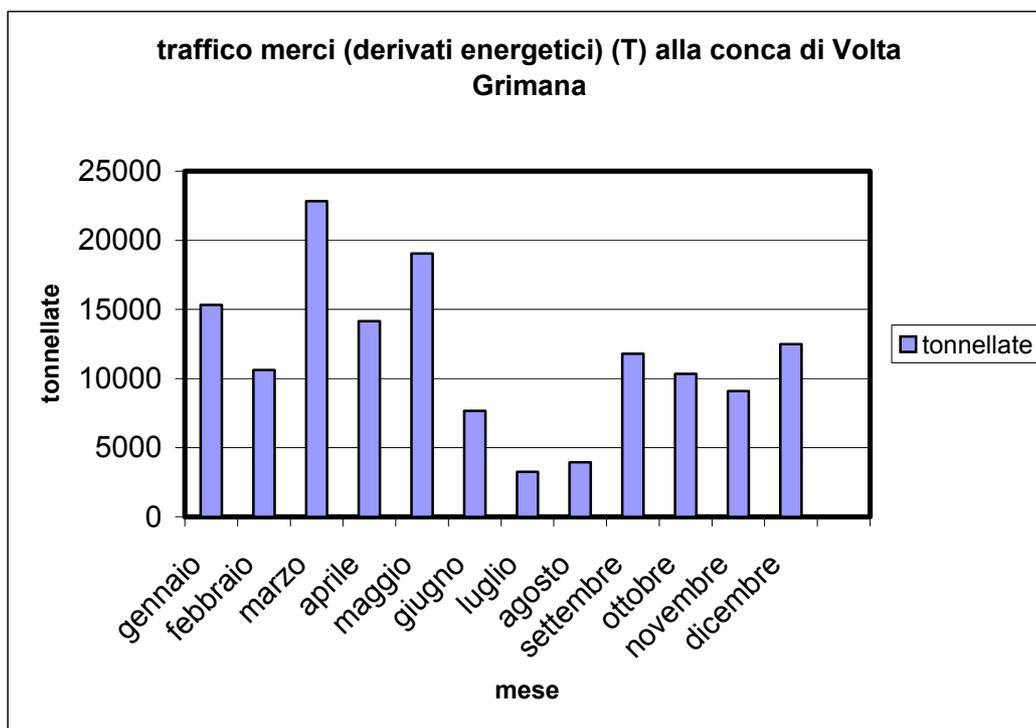


fig. 3.2.4 - Traffico merci alla conca di Volta Grimana

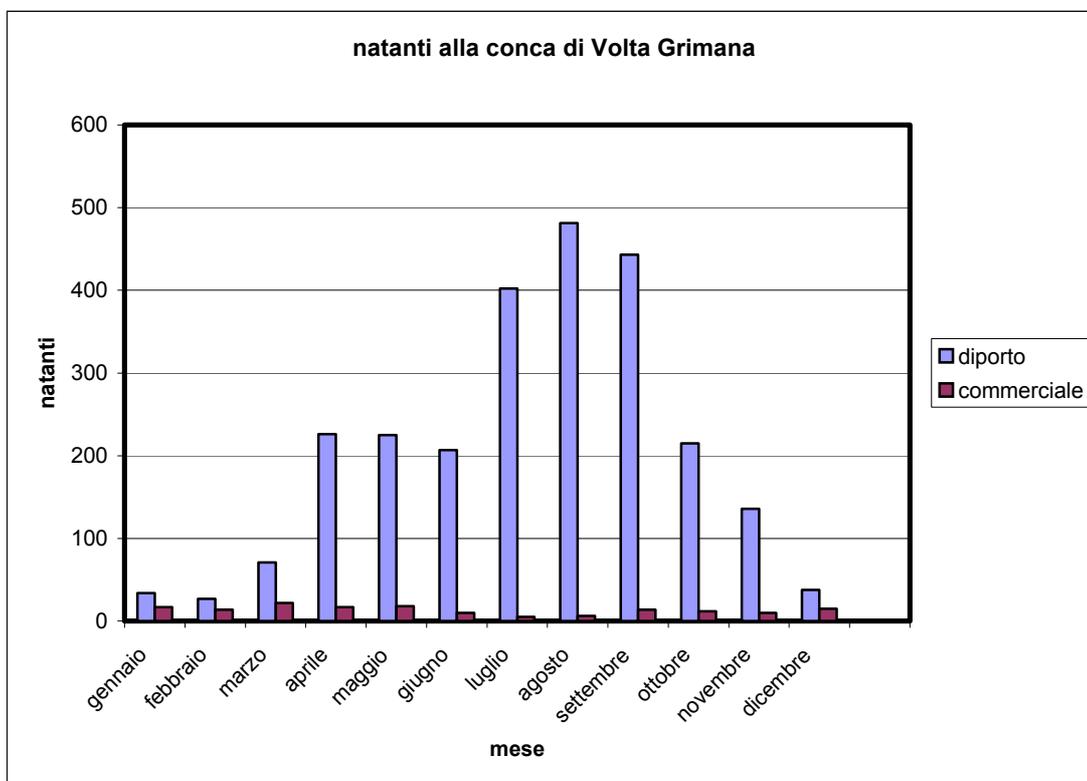


fig. 3.2.5 - Traffico diportistico osservato alla conca di Volta Grimana

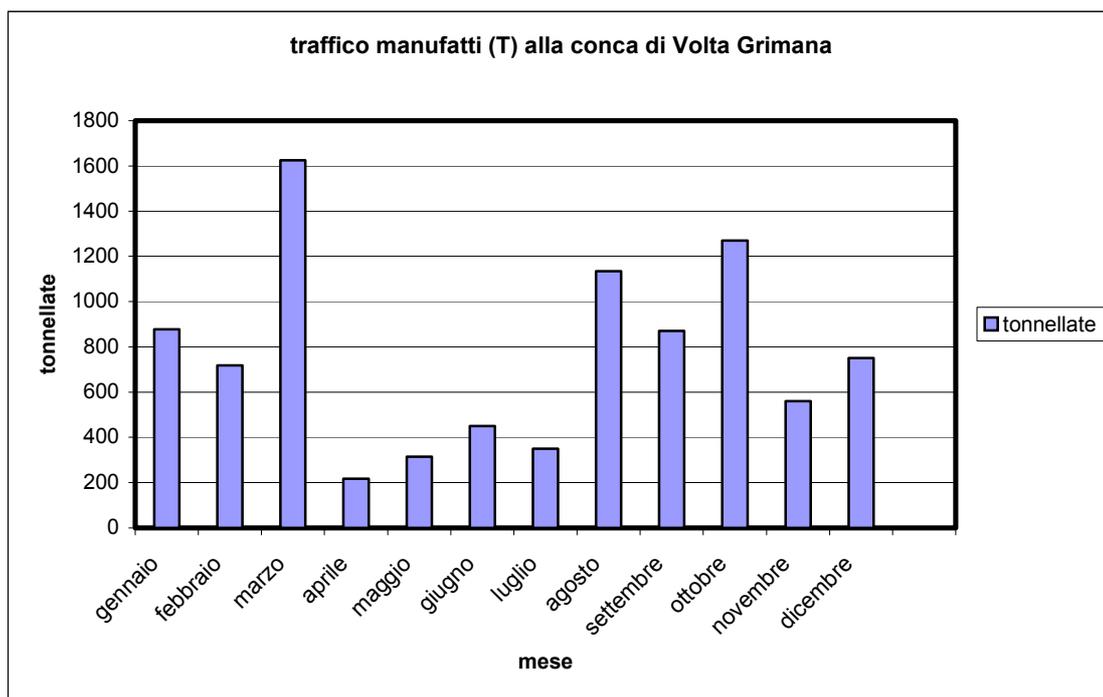


fig. 3.2.6 - Traffico manufatti (T)

3.3 Compatibilità del traffico marittimo e fluviale destinato ad alimentare la centrale con il traffico idroviario attuale e futuro

Concettualmente l'accesso di natanti fluvio-marittimi, in particolare di quelli destinati a sostenere l'esercizio della centrale nelle idrovie interne, è in generale legato ad alcuni elementi fra di loro associati.

Nella fattispecie si profilano:

- a) un tracciato in mare aperto a partire dalla nave "storage", che si rende necessario per l'ubicazione obbligata di questa su fondali di circa (-20,00) ad una distanza da riva di circa 4.500 m;
- b) un'imboccatura esistente sulla linea di riva, che consente l'ingresso alla Laguna della Vallona attraverso due moli convergenti con testate situate su fondali intorno a (-3,50);
- c) un percorso piuttosto tortuoso e già consolidato, che attraverso la Laguna, si immette direttamente sul ramo di Po di Levante, attraverso due pennelli che delimitano un'apertura di circa 50 m di larghezza;
- d) un lungo tratto del ramo Po di Levante, con andamento sinuoso, che incontra a Est il Canale di Valle ed è intersecato, a Ovest, dalla Conca di Volta Grimana;
- e) il tratto finale del Basso Corso del Po di Venezia, fino a raggiungere gli attracchi a servizio della Centrale di Porto Tolle.

Il percorso di un natante in mare aperto è individuato da una rotta che è definita dalla combinazione fra la manovrabilità del mezzo ed il suo sistema di controllo, e che è appropriata quanto meno si discosta dal percorso imposto, rimanendo entro limiti prestabiliti di questo.

La rotta in mare dipende dalle condizioni meteomarine e dalla possibile disposizione planimetrica.

Usualmente la manovra può essere simulata tramite un modello matematico – come appare nel Cap. 4 – con opportune equazioni di moto in cui le forze idrodinamiche sono espresse in termini di inerzia, di attrito e di spinta idraulica.

Le imboccature entro i canali interni, invece, devono garantire un sufficiente margine di sicurezza e di profondità, tenuto conto delle correnti e del moto ondoso. La larghezza delle suddette imboccature deve poter temperare la facilità di entrata con tali fenomeni, ma in generale essa può identificarsi con la lunghezza della nave.

Il canale navigabile viene valutato sulla base della larghezza del natante più importante e dei franchi per la nave e le sponde del canale. Mentre la profondità dipende prevalentemente dai movimenti possibili durante la navigazione e dalla immersione a pieno carico del mezzo in transito.

Inoltre il canale dovrebbe avere il più possibile un andamento rettilineo, con curve il cui raggio con dovrebbe essere inferiore, nel caso di chiatte di lunghezza sui 100 m, a 400 m in relazione all'angolo di barra (mediamente 30°) e del rapporto profondità/tirante d'acqua pari a circa 1,2. La larghezza della curva non deve essere inferiore a quella dei tratti rettilinei.

La larghezza del canale, se deve consentire il transito contemporaneo di due natanti, assume valori necessariamente superiori.

Tutte queste caratteristiche, esistenti nel Canale in esame e riportate nel Cap. 5 si avvicinano abbastanza alle citate esigenze, ad eccezione di alcune zone, che tuttavia non impediscono la libera circolazione.

Il traffico previsto per esigenze dell'ENEL sul percorso esistente si aggirerà su circa 6-7 chiatte al giorno, in andata e in ritorno, con caratteristiche di lunghezza, larghezza ed immersione pari mediamente a 15, 105, 2,5 m. Ogni chiatta deve poter percorrere la via indicata, le cui caratteristiche geometriche sono inalterabili e tenuto conto del traffico commerciale e turistico previsto.

Il traffico commerciale, come asserito in questo capitolo, è assai limitato, ed anche nei prossimi 10 anni, secondo stime realistiche, subirà incrementi modesti, previsti in 2÷3 chiatte della V classe europea, E' da rilevare, infatti, che questo tipo di traffico si svolge prevalentemente per il Canale Fissero-Tartaro-Canal Bianco e per il Canale di Valle-Brondolo.

Il traffico turistico, specialmente all'interno dell'imboccatura della Vallona verso il mare Adriatico è, invece, cospicuo.

Nell'immediato hinterland della Bocca di Porto Levante esistono 4 porticcioli turistici, che insistono sulla Vallona e, più a monte, sull'abitato di Porto Levante. Nel complesso trovano approdo circa 600 natanti da diporto, generalmente di piccole dimensioni: inoltre lungo il ramo terminale del fiume, sulla sponda destra trovano il proprio approdo circa 40 pescherecci.

Il traffico di queste imbarcazioni in entrata ed uscita assume un notevole movimento per quel che riguarda i mezzi turistici, pari a un centinaio di barche al giorno, concentrati nei mesi estivi e per la maggior parte nei giorni festivi.

Pertanto da maggio a settembre sull'imboccatura ci sarà un aumento sensibile di passaggi di natanti da diporto, che incidono sulla Vallona e sull'imboccatura.

Una certa oculatezza di manovra sarà perciò da osservare in questo periodo, soprattutto all'incile del fiume con la Laguna della Vallona.

Il livello del traffico commerciale – come si è prima osservato – lungo l'asta del Po di Levante - Basso corso del Po, via Volta Grimana, è più o meno costante durante l'anno, con forte calo durante i week-end. Al contrario il traffico delle barche da diporto si concentra nella stagione estiva con picco nei week-ends e nelle feste; inoltre, il movimento si anima generalmente dopo le 10 del mattino e si riduce sensibilmente al calar del sole e nelle giornate di mal tempo.

La manovrabilità dei natanti da diporto è molto più agile di quella delle bettoline commerciali, per cui convenzionalmente queste continuano nella propria rotta mentre le prime lasciano il passaggio.

Nei punti cruciali dei canali od in prossimità delle chiuse di Volta Grimana sarà necessario pertanto porre segnali di avviso di precedenza per il traffico commerciale.

In conclusione, date le caratteristiche del tracciato, usufruibile dalle chiatte ENEL, si può affermare che queste hanno buona possibilità di manovra per la maggior parte dell'anno.

In prossimità delle due imboccature del Po di Levante (in Laguna e in mare) e con le curve del Po di Levante all'altezza dei Cantieri Visentini a Taglio di Po, come è più dettagliatamente illustrato nel capitolo 5, i natanti devono procedere osservando la necessità di un solo transito per volta, non essendo possibile l'incrocio contemporaneo di due chiatte.

E' da ribadire, infine, quanto sopra notato riguardo l'incrocio con i natanti da diporto, che interessano più che altro la Laguna La Vallona e lo sbocco a mare.

3.4 Analisi con modelli matematici della navigazione tra la nave "storage" e l'ingresso del Po di Levante

La verifica di navigabilità nella manovra di accesso ad un porto o ad una rete navigabile riveste un ruolo di primaria importanza: si deve infatti garantire una agevole accessibilità ai natanti di maggiori dimensioni in condizioni meteorologiche favorevoli; si deve poi cercare di permettere alle navi di entrare nello specchio protetto anche durante le "normali" perturbazioni meteorologiche (e dunque in presenza di moto ondoso, vento e di eventuali correnti locali).

Tale studio può essere effettuato tramite idonei modelli matematici che, simulando le manovre delle navi nelle varie condizioni climatiche, sono in grado di fornire ai tecnici utili informazioni progettuali.

Nel caso in esame la verifica della navigazione tra la nave "storage" e l'ingresso del Po di Levante è stata svolta tramite implementazione di un modello matematico di tale natura (dettagliatamente descritto in appendice).

Nel seguito è dapprima descritto sinteticamente il modello matematico adottato, sono poi illustrati i risultati ottenuti tramite le simulazioni numeriche effettuate.

3.4.1 Descrizione sintetica del codice di calcolo adottato

Lo studio della manovra di ingresso al Po di Levante è stato effettuato utilizzando un modello matematico di recente concezione messo a punto dal laboratorio olandese Delft Hydraulics. Tale modello simula il comportamento di una imbarcazione durante una assegnata manovra. Il programma è in grado di calcolare la posizione e l'orientamento locale della nave tenendo in considerazione l'influenza del vento, del moto ondoso, delle correnti, della profondità locale dell'acqua e l'effetto di risucchio delle sponde. Nella simulazione vengono calcolati una serie di parametri quali, ad esempio, la distanza del baricentro dell'imbarcazione rispetto alla rotta "ideale" prescelta, il numero di giri-motore, la posizione del timone e le accelerazioni locali dell'imbarcazione.

Le forze idrodinamiche ed i momenti agenti sull'imbarcazione (così come le forze legate ai movimenti dell'elica e del timone) durante la manovra sono espresse in forze di inerzia, di portanza e di resistenza.

Le equazioni adottate per rappresentare il moto dell'imbarcazione sono del tipo di Abkowitz, formalmente analoghe alla legge di Newton, e basate sulla espansione in serie di Taylor di tutte le forze idrodinamiche agenti sull'imbarcazione. La soluzione di tali equazioni è effettuata considerando due diversi sistemi di assi cartesiani: un primo solidale con l'imbarcazione, un secondo fisso rispetto a terra (fig. 3.4.1).

L'integrazione numerica delle equazioni viene effettuata considerando nulli i movimenti di rollio, di beccheggio e di sollevamento della nave. Vengono invece considerate le forze dovute allo scafo, all'elica, al timone, al vento, alle onde, ed al risucchio delle sponde.

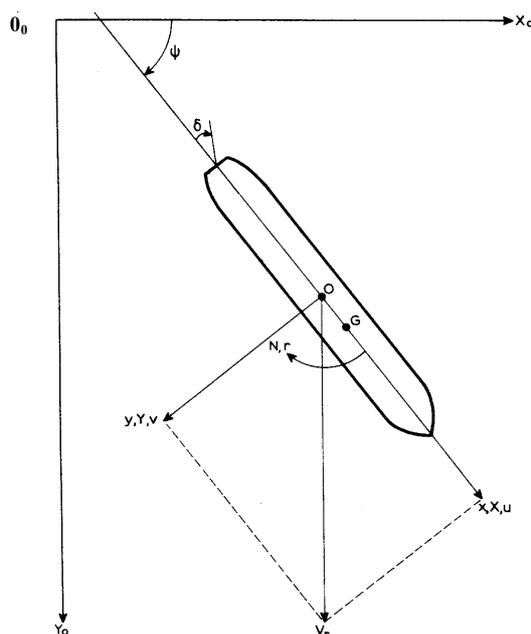


fig. 3.4.1 Definizione del sistema di coordinate solido con l'imbarcazione (x,y) e del sistema di coordinate fisso rispetto a terra ($X_0, 0_0, Y_0$).

3.4.2 Studio della manovra di accesso al Po di Levante

Sulla base delle preliminari indicazioni fornite dal Committente e delle successive indicazioni emerse nel corso dello studio da parte dei tecnici dell'ENEL, si sono potute definire le caratteristiche delle chiatte fluvio-marittime che dovranno fare da spola tra la nave "storage" mobile e la centrale.

La nave adottata nello studio di navigazione è corredata da una motorizzazione a doppia propulsione (doppia elica), che le garantisce una buona manovrabilità anche in presenza di percorsi molto sinuosi, quale quello in esame. La nave ha lunghezza (length over all) $L=105.0\text{m}$, larghezza (beam) $B=15.0\text{m}$ e pescaggio (draught) $d=2.5\text{m}$. Naturalmente lo studio svolto potrà essere considerato valido anche per navi di dimensioni leggermente diverse da quelle qui adottate e sopra riportate.

La manovra di "atterraggio" delle navi (chiatte fluvio-marittime), originata dalla nave "storage", ubicata in un fondale di circa 20m, a circa 4500m al largo dell'imboccatura di Porto Levante (ossia a 4500m dalle testate dei moli aggettanti a mare) è stata simulata attraverso tutto il canale navigabile della Laguna La Vallona, fino all'interno del Po di Levante, all'inizio del canale idroviario omonimo. L'intero percorso simulato ha pertanto una lunghezza di circa 10 km e prevede, dopo il primo tratto in mare aperto, un percorso ad S, con una doppia curva, che attraversa appunto la citata laguna e che precede la navigazione interna nel Po di Levante.

Nelle simulazioni sono state rappresentate le condizioni meteorologiche seguenti, che ricoprono la casistica completa delle caratteristiche meteomarine del paraggio:

- in condizione di quiete;
- durante una "normale" perturbazione di Grecale (Bora) con onde, vento e marea entrante;
- durante una "normale" perturbazione di Grecale (Bora) con onde, vento e marea uscente;

- durante una "normale" perturbazione di Levante con onde, vento e marea entrante;
- durante una "normale" perturbazione di Levante con onde, vento e marea uscente;
- durante una "normale" perturbazione di Scirocco con onde, vento e marea entrante;
- durante una "normale" perturbazione di Scirocco con onde, e vento e marea uscente.

Per quanto riguarda le mareggiate considerate, si sono considerate, per tutte tre le condizioni simulate (Bora, Libeccio e Scirocco) le massime onde compatibili con le operazioni intermodali (carico/scarico), definite dal Committente in relazione alle previste caratteristiche delle navi. In sostanza si sono considerate onde caratterizzate da altezza significativa $H_s=1.0\text{m}$ e, cautelativamente, periodo di picco $T_p=6.0\text{s}$, in corrispondenza della nave "storage" mobile; lungo tutto il percorso di navigazione si sono poi considerate le caratteristiche delle onde desunte dallo studio di propagazione dell'onda, ampiamente descritto nel seguente capitolo 4. A tal proposito si può anticipare che l'altezza d'onda decresce (più o meno velocemente, a seconda della direzione della mareggiata) dalla nave "storage" lungo tutto il percorso di avvicinamento a riva, per cui le navi saranno costantemente investite da onde con altezza inferiore al metro, come richiesto.

Per quanto concerne le correnti, si sono considerati i vettori (intensità e direzione) ottenuti dagli studi idrodinamici ampiamente descritti nel seguente capitolo 4. Questi valori delle correnti sono stati determinati considerando l'effetto combinato della marea (sia entrante che uscente) e delle agitazioni ondose come poc'anzi definite.

3.4.3 Definizione del percorso ottimale

Il percorso "ottimale" di navigazione delle chiatte fluvio-marine dalla nave "storage" al Po di Levante è stato definito sulla base della cartografia (e batimetria) disponibile e sulla base della prevista posizione della nave stessa. Tale percorso è stato definito imponendo una linea spezzata, individuata dalle coordinate di 9 punti lungo il percorso, e definendo i raggi di curvatura dei tratti curvi di raccordo dei segmenti così individuati. Il percorso considerato è rappresentato graficamente nella seguente fig. 3.4.2.

Con riferimento a tale elaborato, si può osservare che il percorso "ottimale" che le chiatte fluvio-marittime dovranno percorrere ha una lunghezza di circa 10000m e che, procedendo dal largo verso terra, i raggi (di curvatura) dei tratti curvi del percorso sono i seguenti: $R=500, 350, 350, 500, 200, 200, 500\text{m}$. Gli ampi raggi di curvatura risultanti per il percorso sono compatibili con i criteri progettuali della "navigazione interna" e si sono dimostrati adatti a percorrere, in totale sicurezza, tutto il tratto simulato.

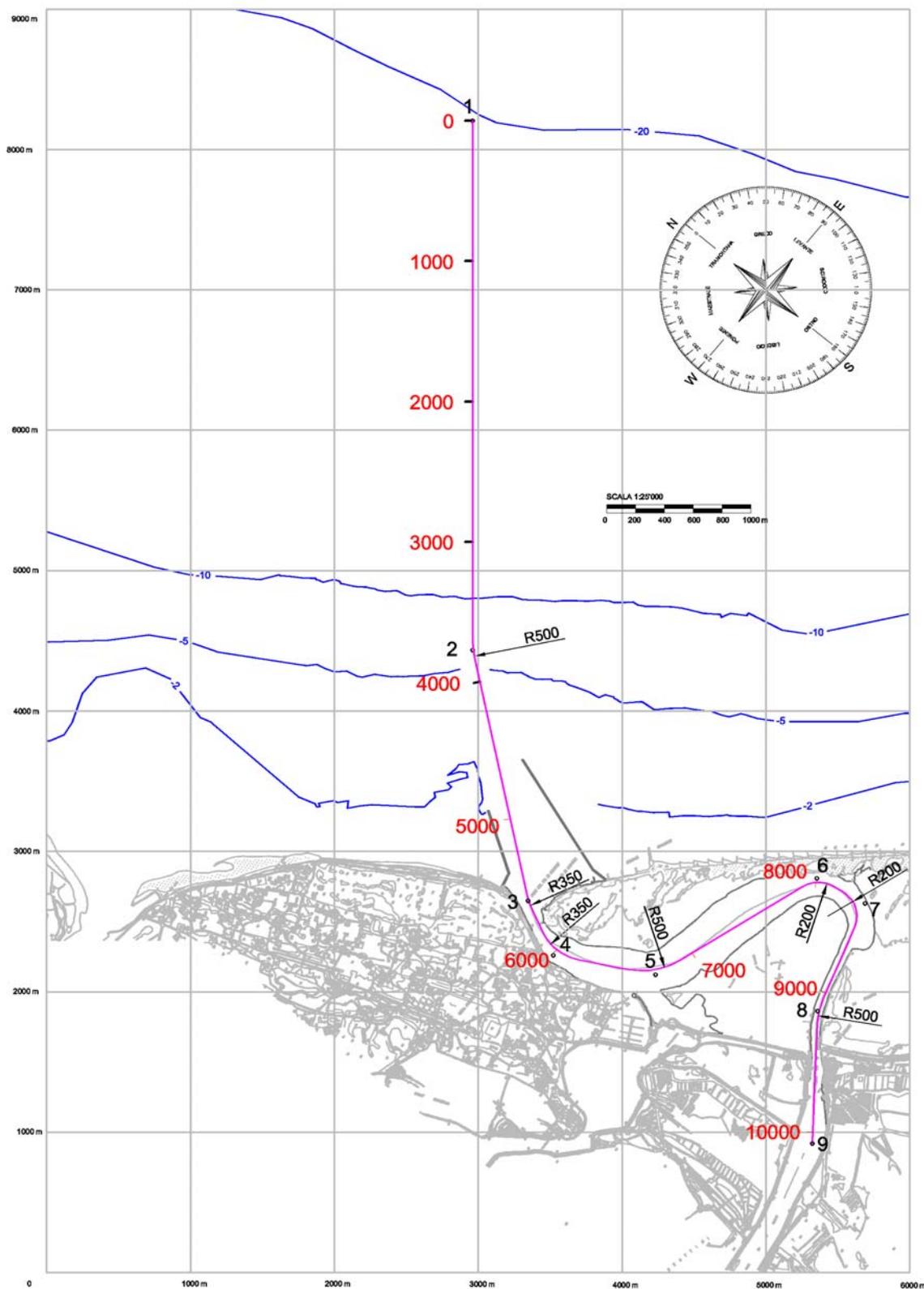


fig. 3.4.2 Definizione del percorso "ottimale"

3.4.3.1 *Manovra in condizione di quiete*

La prima manovra simulata ha considerato la più favorevole condizione climatica, ossia la condizione definita "di quiete", per cui non sono state imposte né correnti, né onde lungo il percorso. Questa prima manovra è stata considerata per verificare preliminarmente la manovrabilità delle chiatte fluvio-marittime in relazione al percorso "ottimale" imposto.

I risultati ottenuti da questa prima simulazione matematica sono rappresentati nelle seguenti figure (da fig. 3.4.3 a fig. 3.4.5).

In fig. 3.4.3 è rappresentata tutta la manovra di accesso dalla "nave storage" (track=0) all'interno del Po di Levante (track≈10000m); in essa la posizione della chiatta fluvio-marittima è plottata con un intervallo temporale di 100s.

In fig. 3.4.4 sono riportati, in funzione della posizione dell'imbarcazione lungo il percorso imposto (track), il tempo, la distanza del baricentro della nave dal percorso ideale (dy) e la deviazione angolare (dpsi) rispetto alla rotta (ossia l'angolo tra la tangente locale al percorso e l'asse longitudinale della nave).

Nella fig. 3.4.5, infine, sono riportati, sempre in funzione della posizione dell'imbarcazione lungo il percorso imposto (track), le velocità di avanzamento longitudinale (u) e trasversale (v) del natante e la "prua nave" (ossia l'orientamento della nave rispetto al Nord geografico) lungo tutto il percorso.

Dall'esame di questi elaborati grafici si può notare che la chiatta fluvio-marittima è in grado di coprire con ottima precisione l'intero percorso imposto in un tempo di circa 65 minuti, senza discostarsi mai più di 10m dall'asse di navigazione. Tale percorso è percorribile anche a velocità contenute e consente perciò eventuali correzioni del percorso o manovre in fase di incrocio con altre imbarcazioni. Naturalmente la dimensione della chiatta è tale per cui, in alcuni tratti del percorso, non potrà essere consentito l'incrocio con altre grosse navi o chiatte eventualmente in transito nella zona, per cui saranno da prevedere (come peraltro già sottolineato in precedenza) idonei sistemi di controllo della navigazione in corrispondenza di tali punti "critici".

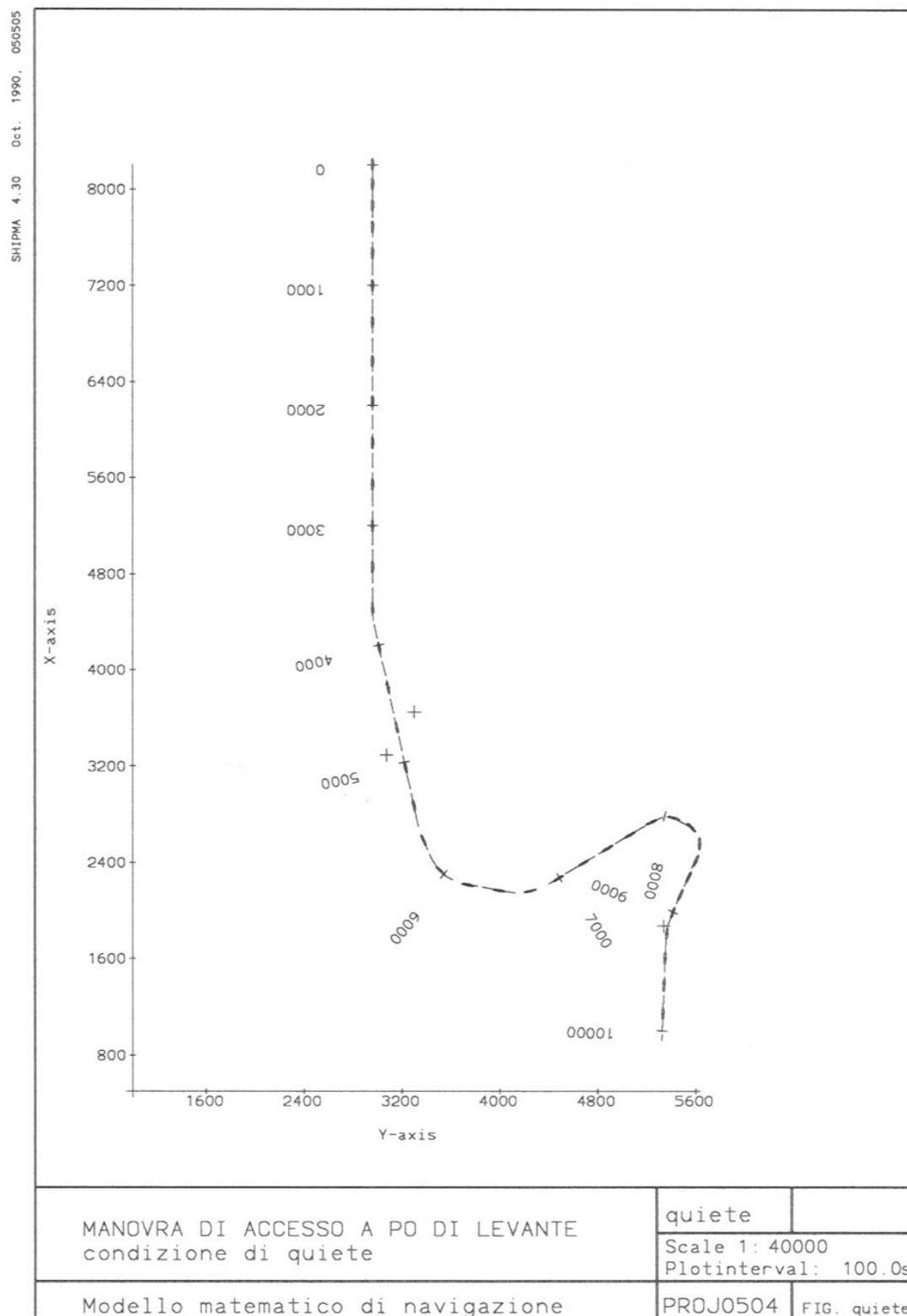


fig. 3.4.3 Manovra di accesso in condizione di quiete (q1)

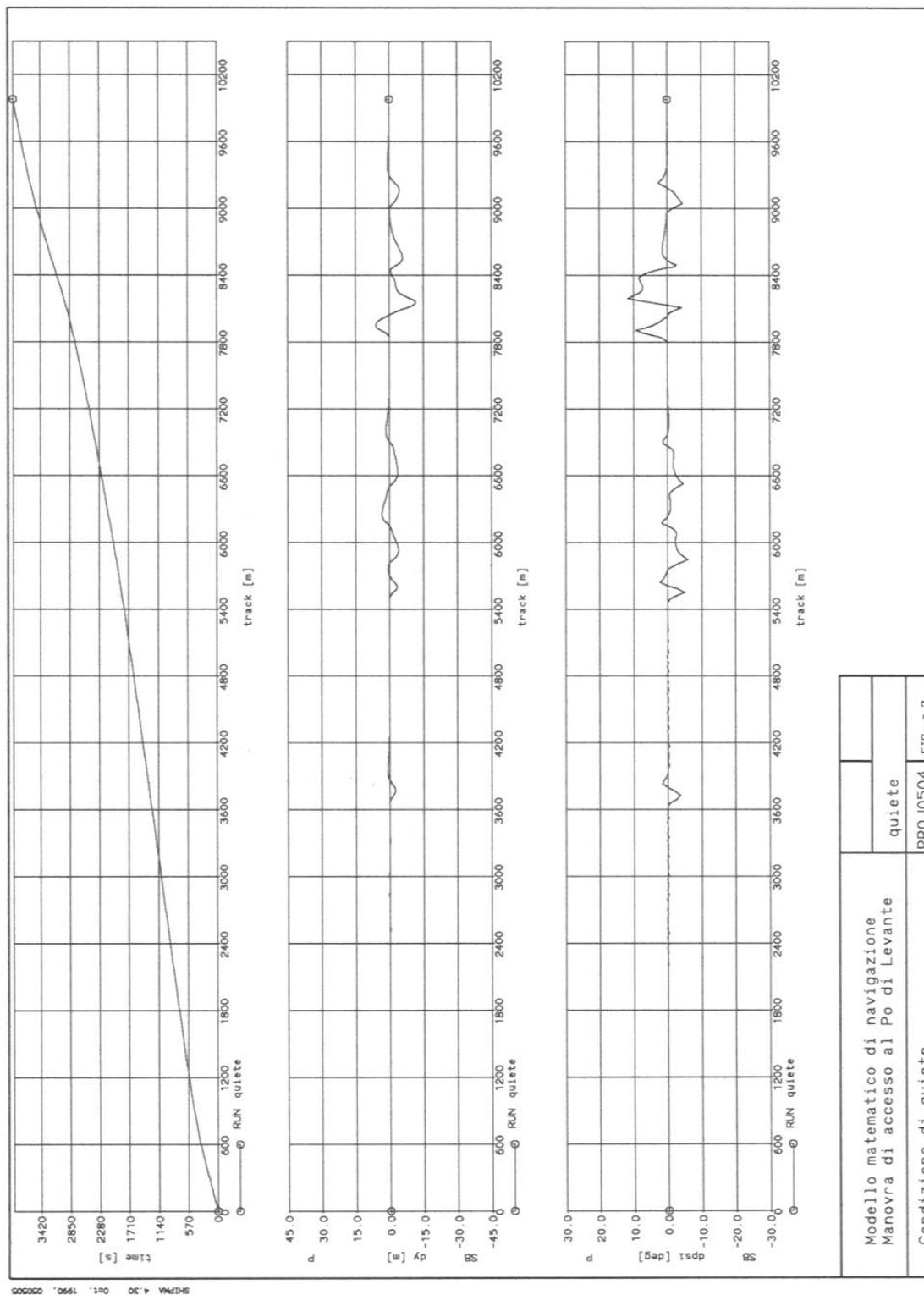


fig. 3.4.4 Risultati della manovra di accesso in condizione di quiete (q2)

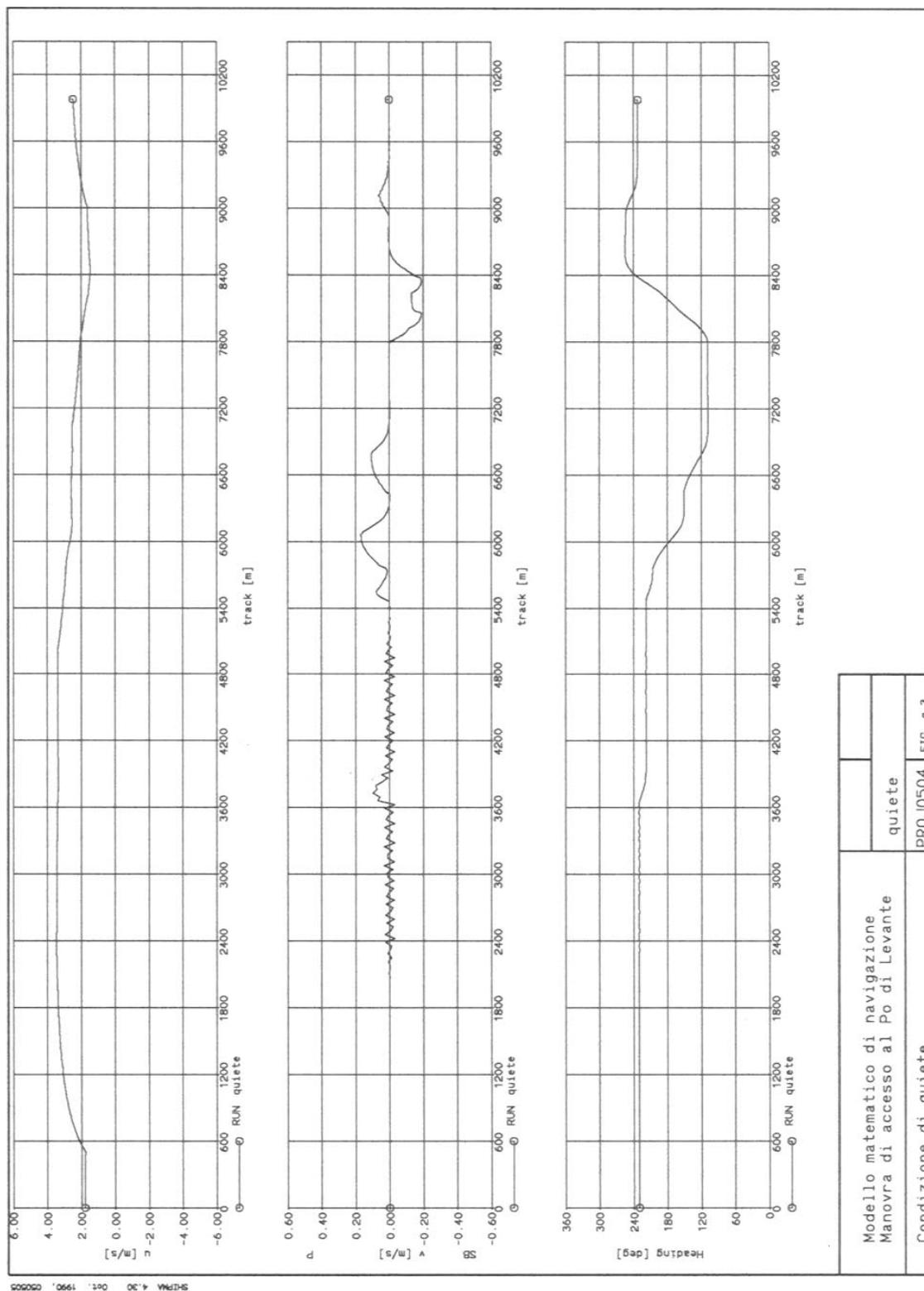


fig. 3.4.5 Risultati della manovra di accesso in condizione di quiete (q3)

3.4.3.2 Manovre durante una perturbazione di Grecale (Bora)

Dopo aver verificato che la manovra è percorribile in assoluta sicurezza in condizioni di quiete, si è proceduto alla verifica di navigabilità in condizioni meteorologiche avverse (in relazione alle caratteristiche nautiche delle chiatte).

Si è perciò implementato il "simulatore di navigazione" (ossia il modello di navigazione) al caso di perturbazioni di Bora in condizioni di corrente entrante e di corrente uscente dalla foce fluviale (i valori della velocità delle correnti sono stati desunti dallo studio idrodinamico descritto nel capitolo 4 della presente relazione).

Come accennato in precedenza, si è considerato un moto ondoso caratterizzato (nella zona della nave "storage") da altezza d'onda significativa $H_s=1.0$ m, periodo di picco $T_p=6.0$ s e direzione di provenienza $\alpha=55^\circ$ N. Per simulare le condizioni del moto ondoso reale si è ipotizzata un'agitazione "irregolare" tramite uno spettro di tipo "JONSWAP" con fattore di esaltazione del picco pari a $\gamma = 3.3$. Le caratteristiche delle onde lungo il percorso sono state desunte dai risultati degli studi svolti sulla propagazione delle onde dal largo a riva.

I risultati ottenuti in concomitanza con queste agitazioni ondose di Bora e condizione di marea entrante (ossia considerando l'interazione tra moto ondoso e corrente entrante) sono illustrati nelle figure da fig. 3.4.6 a fig. 3.4.10.

In fig. 3.4.6 è rappresentata tutta la manovra di accesso dalla nave "storage" (track=0) all'interno del Po di Levante (track \approx 10000m); nella figura la posizione della chiatta fluvio-marina è plottata con un intervallo temporale di 100s.

In fig. 3.4.7 sono riportati, invece, in funzione della posizione dell'imbarcazione lungo il percorso imposto (track), il tempo, la distanza del baricentro della nave dal percorso ideale (dy) e la deviazione angolare (dpsi) rispetto alla rotta (ossia l'angolo tra la tangente locale al percorso e l'asse longitudinale della nave).

Nella fig. 3.4.8 sono poi riportati, sempre in funzione della posizione dell'imbarcazione lungo il percorso imposto (track), le velocità di avanzamento longitudinale (u) e trasversale (v) del natante e la "prua nave" (ossia l'orientamento della nave rispetto al Nord geografico) lungo tutto il percorso.

Nella fig. 3.4.9 sono riportate le sollecitazioni longitudinali (X_{wa}), trasversali (Y_{wa}) ed i momenti (N_{wa}) trasmessi dalle onde alla nave.

L'ultima rappresentazione grafica (fig. 3.4.10) dei risultati riferiti alla condizione meteorologica in esame (bora e corrente entrante) riporta i valori della velocità longitudinale (u_c) e trasversale (v_c) della corrente e la velocità di rotazione della corrente.

I risultati ottenuti in concomitanza con agitazione ondosa di Bora e condizione di corrente uscente (ossia considerando l'interazione tra moto ondoso e marea uscente) sono rappresentati nelle figure da fig. 3.4.11 a fig. 3.4.15, strutturate in modo del tutto analogo alle precedenti.

Dall'esame delle figure relative alla perturbazione di Bora e corrente entrante/uscente, si può desumere che la chiatta fluvio-marittima è sempre in grado di coprire con buona precisione l'intero percorso imposto in un tempo di circa 1 ora (rigorosamente: un po' di più con marea uscente, un po' di meno con marea entrante), e ciò senza discostarsi mai più di 10m dall'asse di navigazione. Tale rotta è percorribile anche a velocità contenute e consentirebbe perciò di effettuare eventuali correzioni del percorso o manovre (accelerando o frenando la nave) in fasi di incrocio con altre imbarcazioni o in analoghe situazioni impreviste.

A proposito delle sollecitazioni impresse dal moto ondoso allo scafo, si può notare che le forze ed i momenti sono decisamente molto ridotti, a testimoniare che l'onda considerata (di altezza massima pari ad 1.0m) non è certamente in grado di penalizzare la navigazione della chiatta nel tratto di mare aperto.

Si deve in ultimo osservare che, come nel caso della manovra in condizione di quiete, la dimensione della chiatta è tale per cui, in alcuni tratti del percorso, non potrà essere consentito l'incrocio con altre grosse navi o chiatte eventualmente in transito nella zona, per cui saranno da prevedere idonei sistemi di controllo della navigazione in corrispondenza di tali punti "critici".

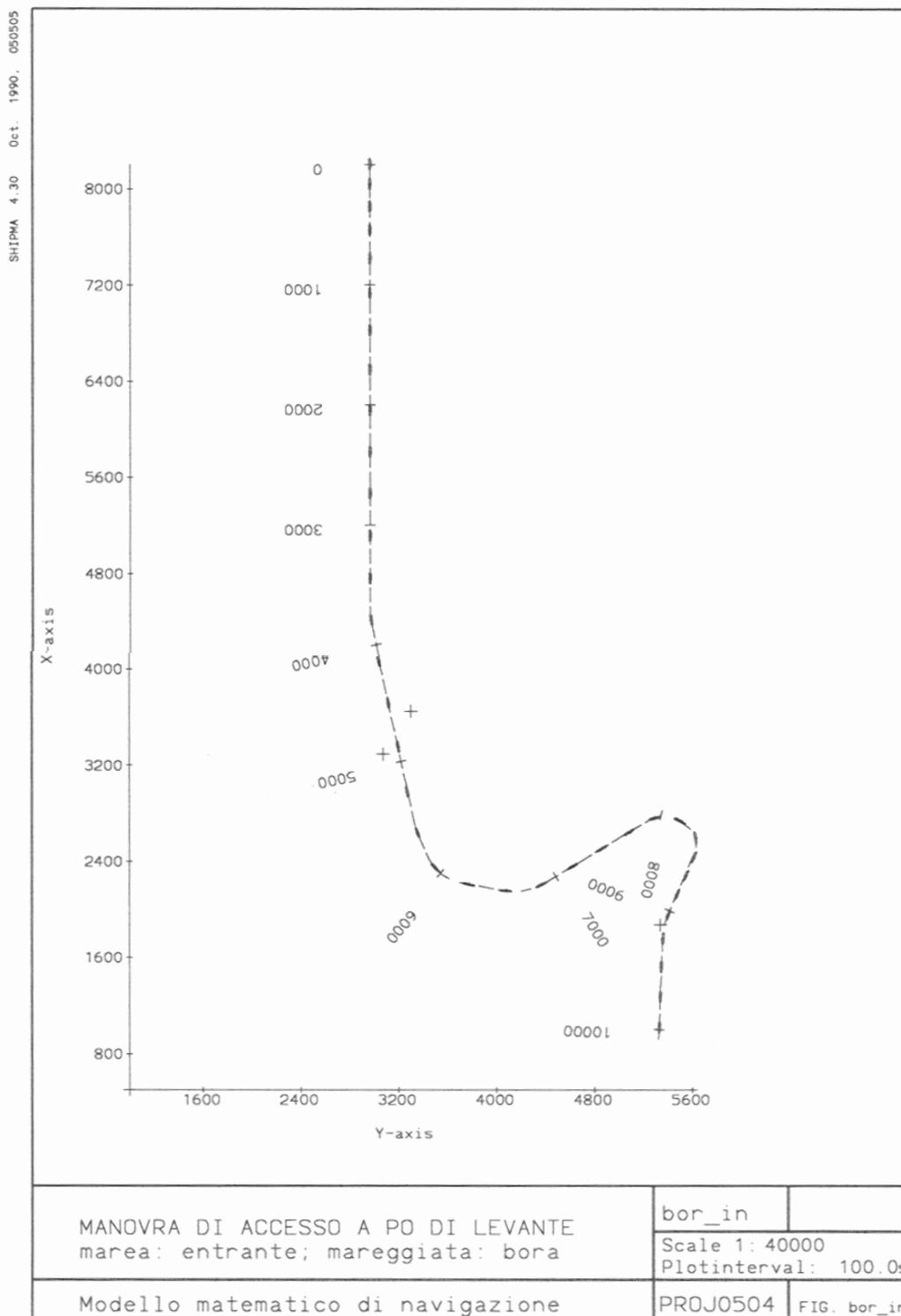


fig. 3.4.6 Manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Bora (b1)

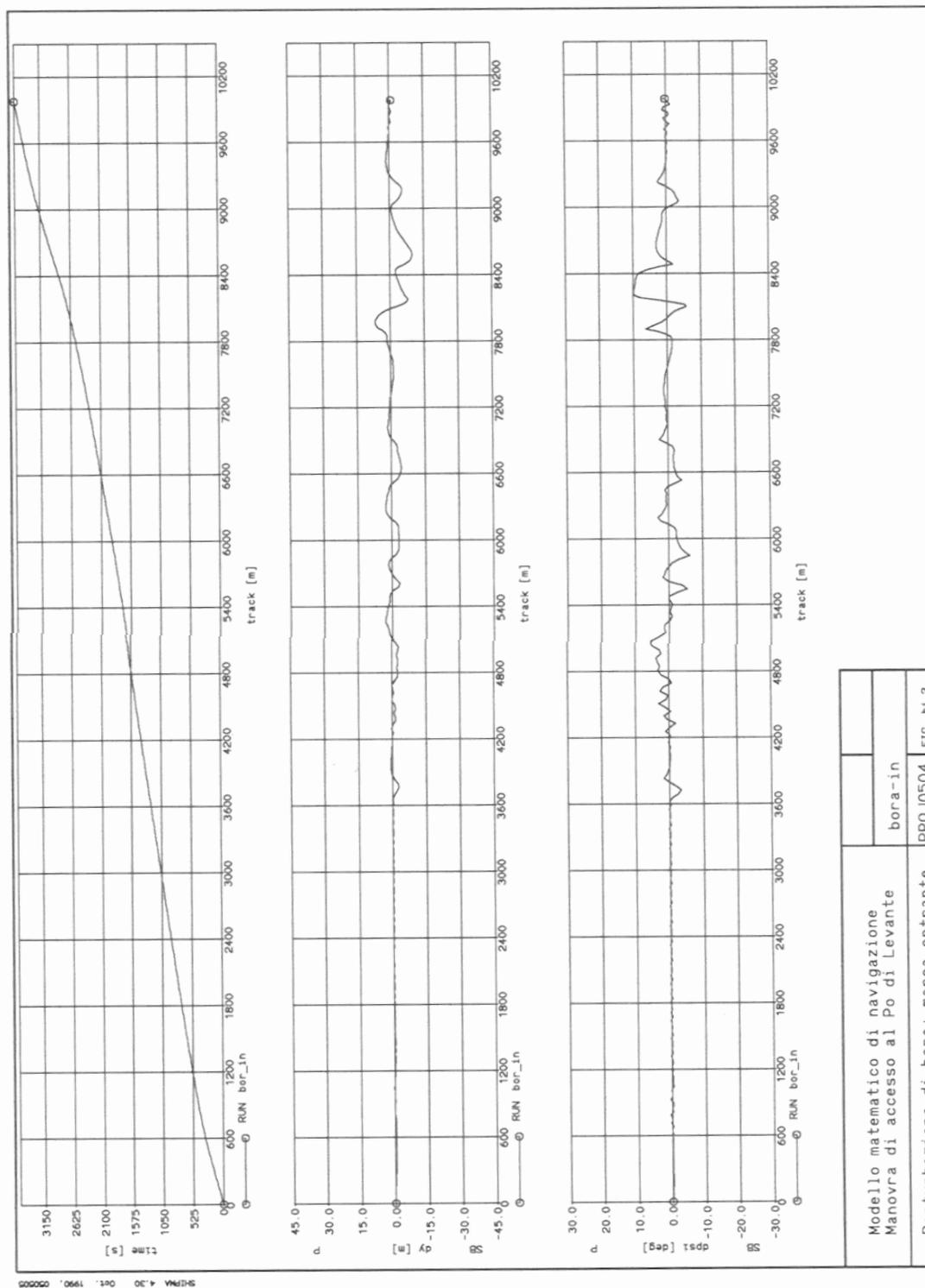


fig. 3.4.7 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Bora (b2)

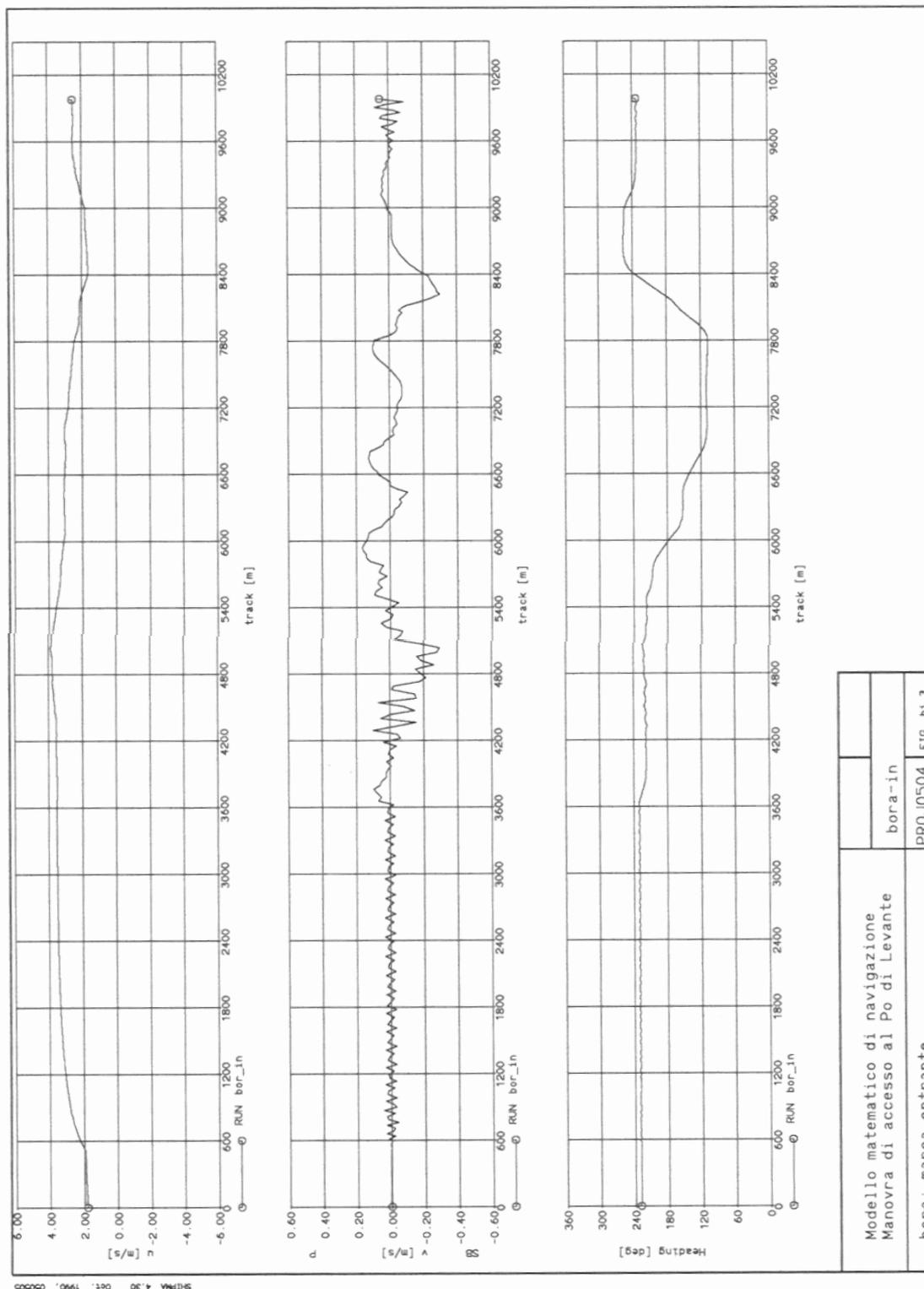


fig. 3.4.8 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Bora (b3)

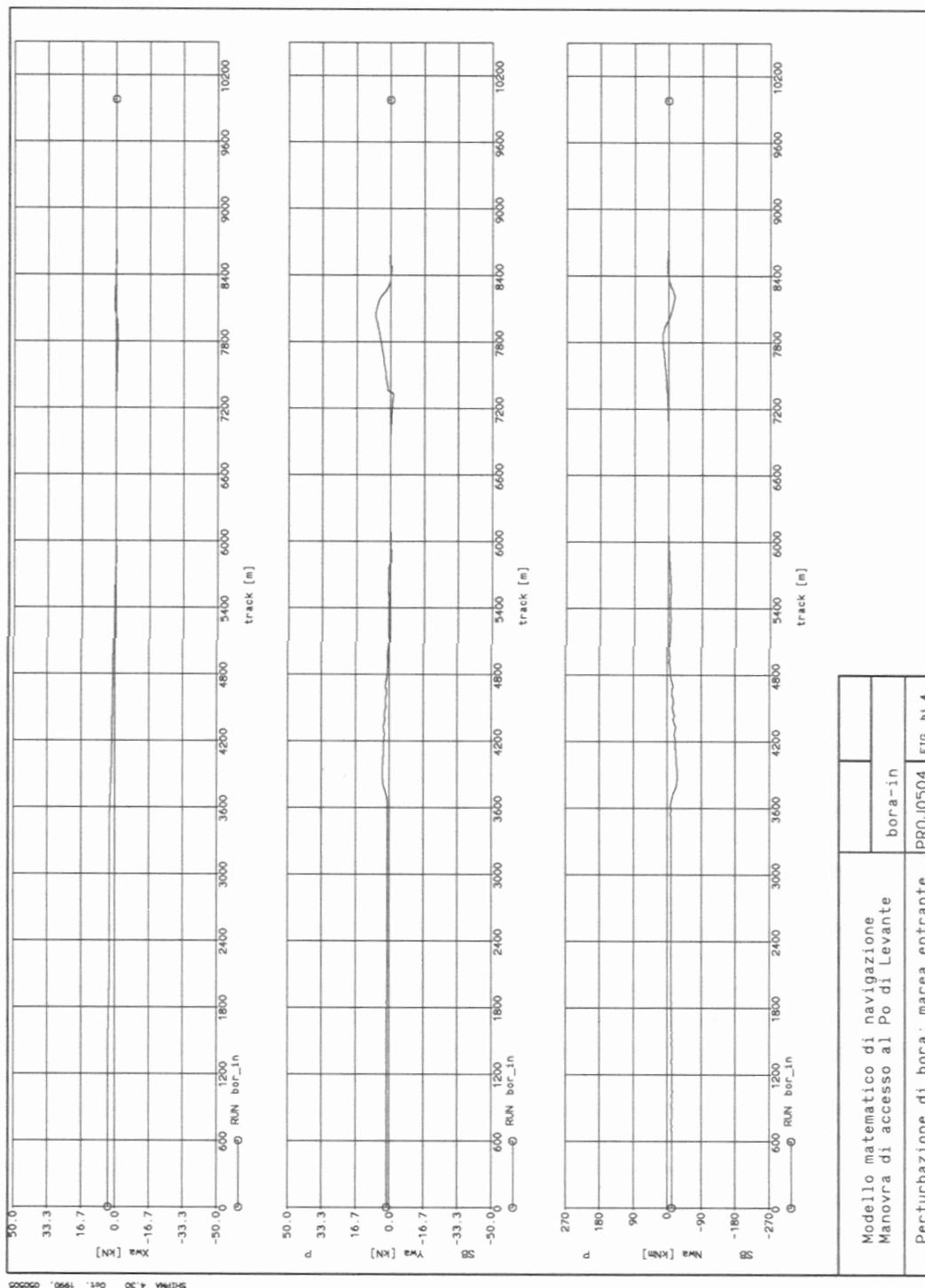


fig. 3.4.9 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Bora (b4)

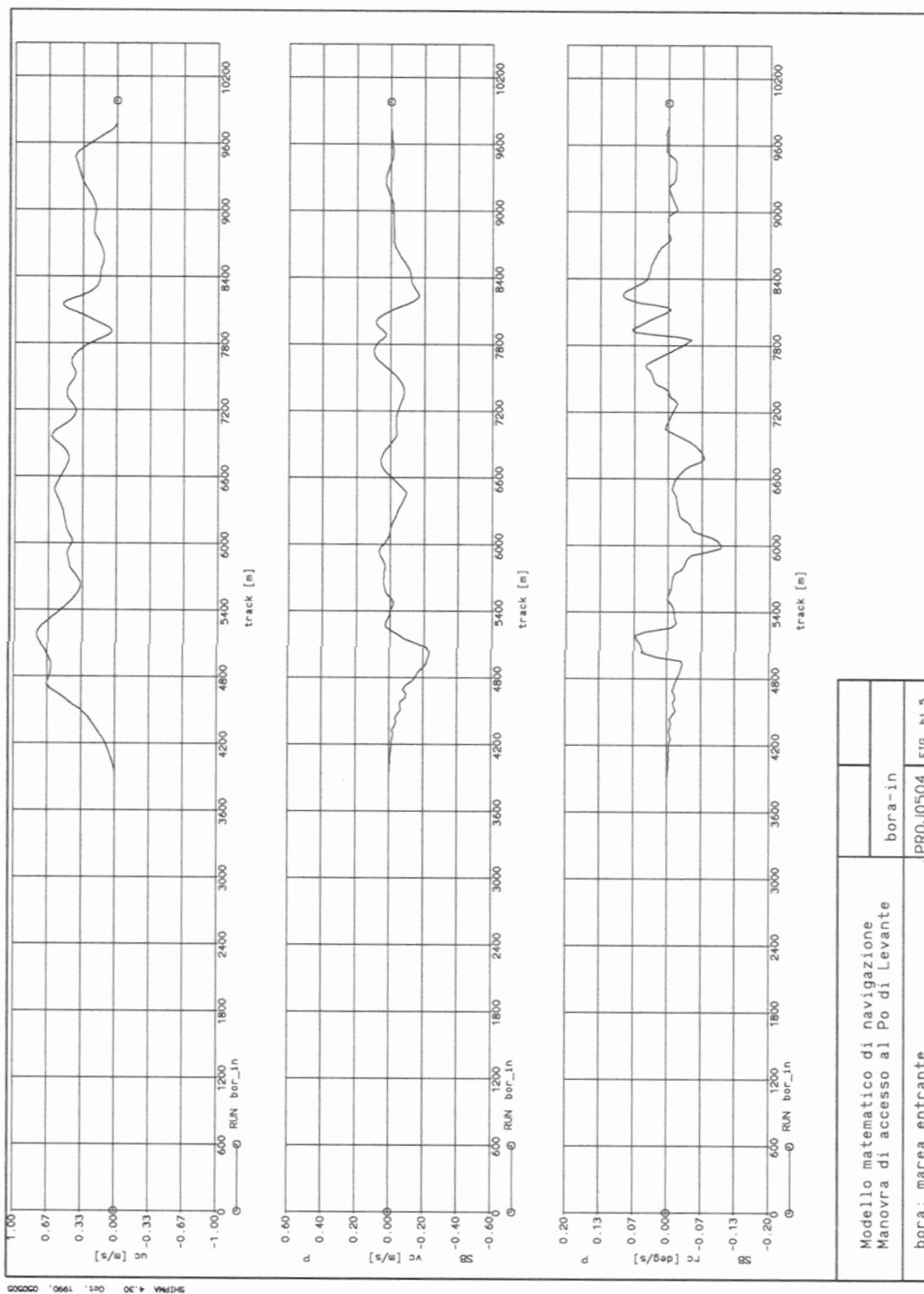


fig. 3.4.10 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Bora (b5)

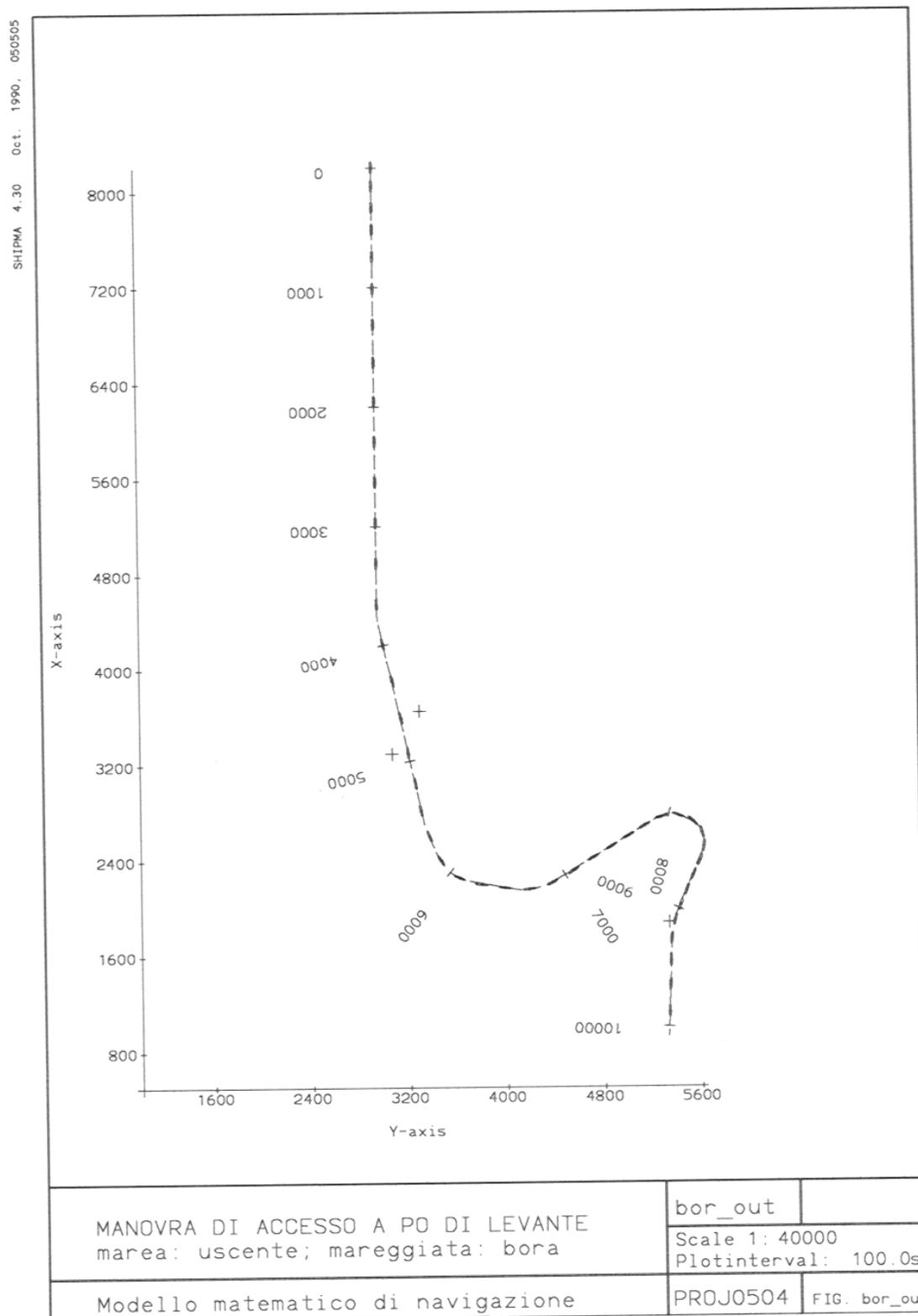


fig. 3.4.11 Manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Bora (b6)

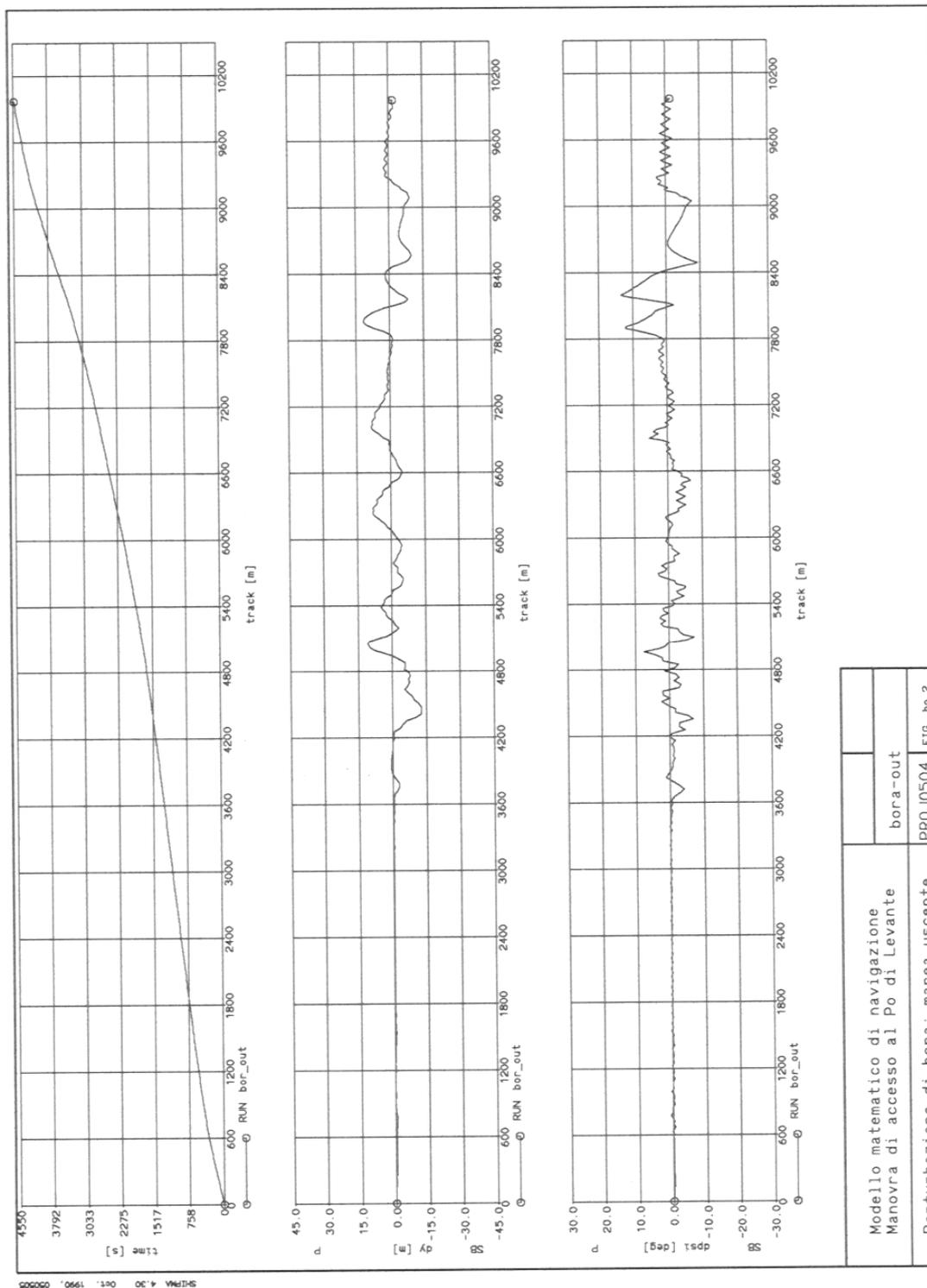


fig. 3.4.12 Risultati della manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Bora (b7)

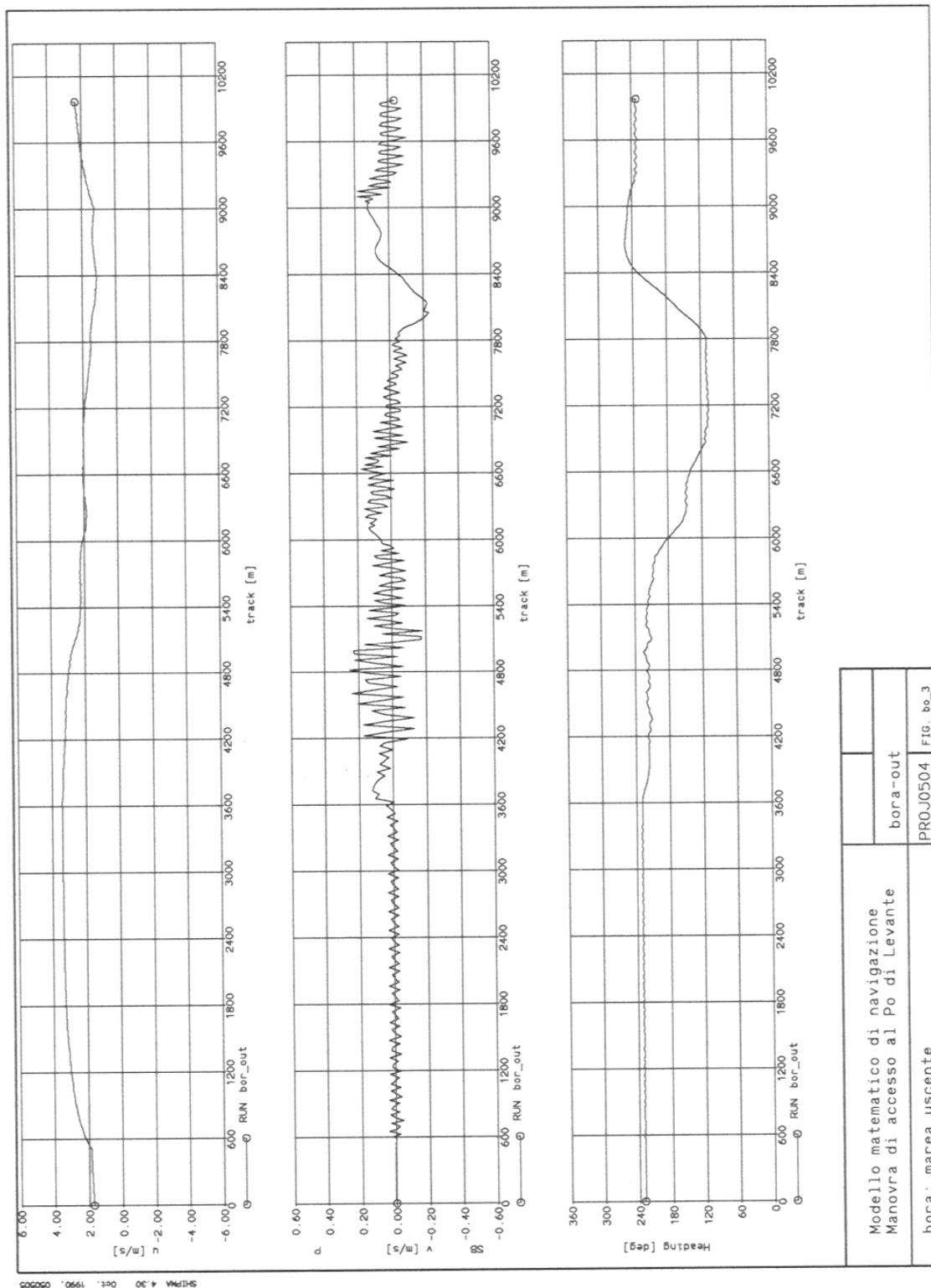


fig. 3.4.13 Risultati della manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Bora (b8)

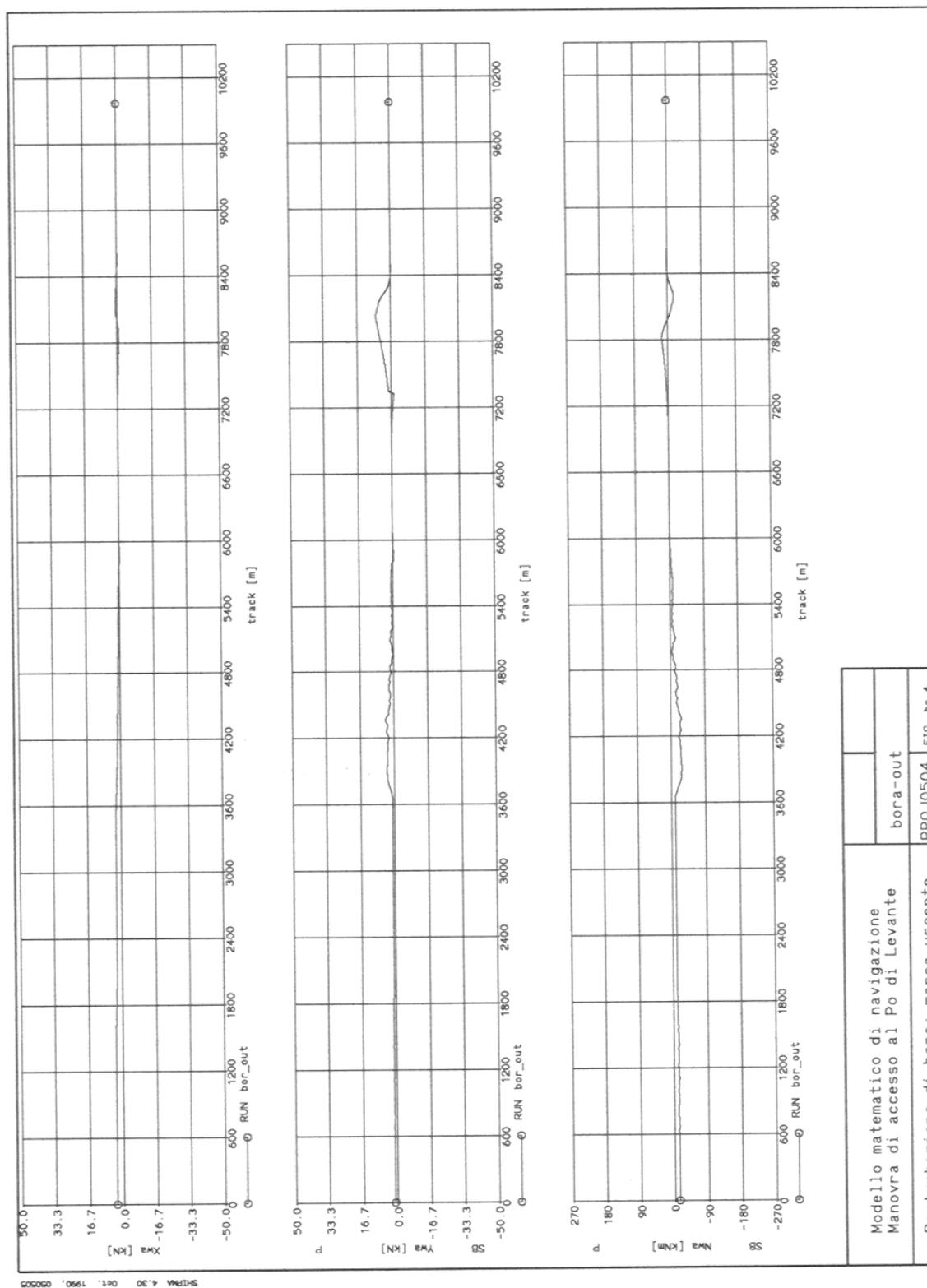


fig. 3.4.14 Risultati della manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Bora (b9)

3.4.3.3 Manovre durante una perturbazione di Levante

Sempre nell'ottica di verificare l'accessibilità nautica al Po di Levante in condizioni meteorologiche avverse (in relazione alle caratteristiche nautiche delle chiatte fluvio-marine), si è implementato il "simulatore di navigazione" al caso di perturbazioni di Levante, sia in condizioni di corrente entrante che di corrente uscente dalla foce fluviale (i valori delle velocità delle correnti sono stati desunti dallo studio idrodinamico descritto nel Capitolo 4 della relazione).

Come in precedenza, si è considerato un moto ondoso caratterizzato (alla nave "storage") da altezza d'onda significativa $H_s=1.0$ m, periodo di picco $T_p=6.0$ s, ma direzione di provenienza $\alpha=85^\circ$ N. Per simulare le condizioni del moto ondoso reale si è ancora descritta l'agitazione "irregolare" tramite uno spettro di tipo "JONSWAP" con fattore di esaltazione del picco pari a $\gamma = 3.3$. Le caratteristiche delle onde lungo il percorso sono state desunte dai risultati degli studi svolti sulla propagazione delle onde dal largo a riva.

I risultati ottenuti in concomitanza con queste agitazioni ondose di Levante e condizione di marea entrante (ossia considerando l'interazione tra moto ondoso e corrente entrante) sono rappresentati nelle figure da fig. 3.4.16 a fig. 3.4.20.

In fig. 3.4.16 è rappresentata tutta la manovra di accesso dalla nave "storage" (track=0) all'interno del Po di Levante (track \approx 10000m); analogamente ai casi precedenti, nella figura, la posizione della chiatta fluvio-marittima è plottata con un intervallo temporale di 100s.

In fig. 3.4.17 sono riportati, in funzione della posizione dell'imbarcazione lungo il percorso imposto (track), il tempo, la distanza del baricentro della nave dal percorso ideale (dy) e la deviazione angolare (dpsi) rispetto alla rotta (ossia l'angolo tra la tangente locale al percorso e l'asse longitudinale della nave).

Nella fig. 3.4.18 sono poi riportati, sempre in funzione della posizione dell'imbarcazione lungo il percorso imposto (track), le velocità di avanzamento longitudinale (u) e trasversale (v) del natante e la "prua nave" (ossia l'orientamento della nave rispetto al Nord geografico) lungo tutto il percorso.

Nella fig. 3.4.19 sono riportate, infine, le sollecitazioni longitudinali (X_{wa}), trasversali (Y_{wa}) ed i momenti (N_{wa}) trasmessi dalle onde alla nave.

L'ultima rappresentazione grafica (fig. 3.4.20) dei risultati riferiti alla condizione meteorologica in esame (Levante e corrente entrante) riporta i valori della velocità longitudinale (u_c) e trasversale (v_c) della corrente e la velocità di rotazione della corrente.

I risultati ottenuti in concomitanza con agitazione ondosa di Levante e condizione di corrente uscente (ossia considerando l'interazione tra moto ondoso e marea uscente) sono illustrati nelle figure da fig. 3.4.21 a fig. 3.4.25, strutturate in modo del tutto analogo alle precedenti (con marea entrante).

Dall'esame delle figure relative alla perturbazione di Levante e corrente entrante/uscente, si può desumere un comportamento del tutto simile al caso della mareggiata di Bora. La chiatta fluvio-marittima è sempre in grado di coprire con buona precisione l'intero percorso imposto in un tempo di circa 1 ora (rigorosamente: un po' di più con marea uscente, un po' di meno con marea entrante), senza discostarsi mai più di 10m dall'asse di navigazione. Tale percorso è percorribile anche a velocità contenute e consentirebbe perciò di effettuare eventuali correzioni del percorso o manovre (accelerando o frenando la nave) in fasi di incrocio con altre imbarcazioni o in analoghe situazioni impreviste.

A proposito delle sollecitazioni impresse dal moto ondoso sullo scafo, si può notare che le forze, sempre positive (che tendono cioè a far scarrocciare la nave in avanti e verso dritta) ed i momenti sono decisamente molto ridotti, a testimoniare che l'onda considerata (di altezza massima pari ad 1.0m) non è certamente in grado di penalizzare la navigazione della chiatta nel tratto di mare aperto.

Si deve infine osservare che, come nel caso delle manovre precedentemente analizzate, la dimensione della chiatta è tale per cui, in alcuni tratti del percorso, non potrà essere consentito l'incrocio con altre grosse navi o chiatte eventualmente in transito nella zona, per cui saranno da prevedere idonei sistemi di controllo della navigazione in questi punti "critici".

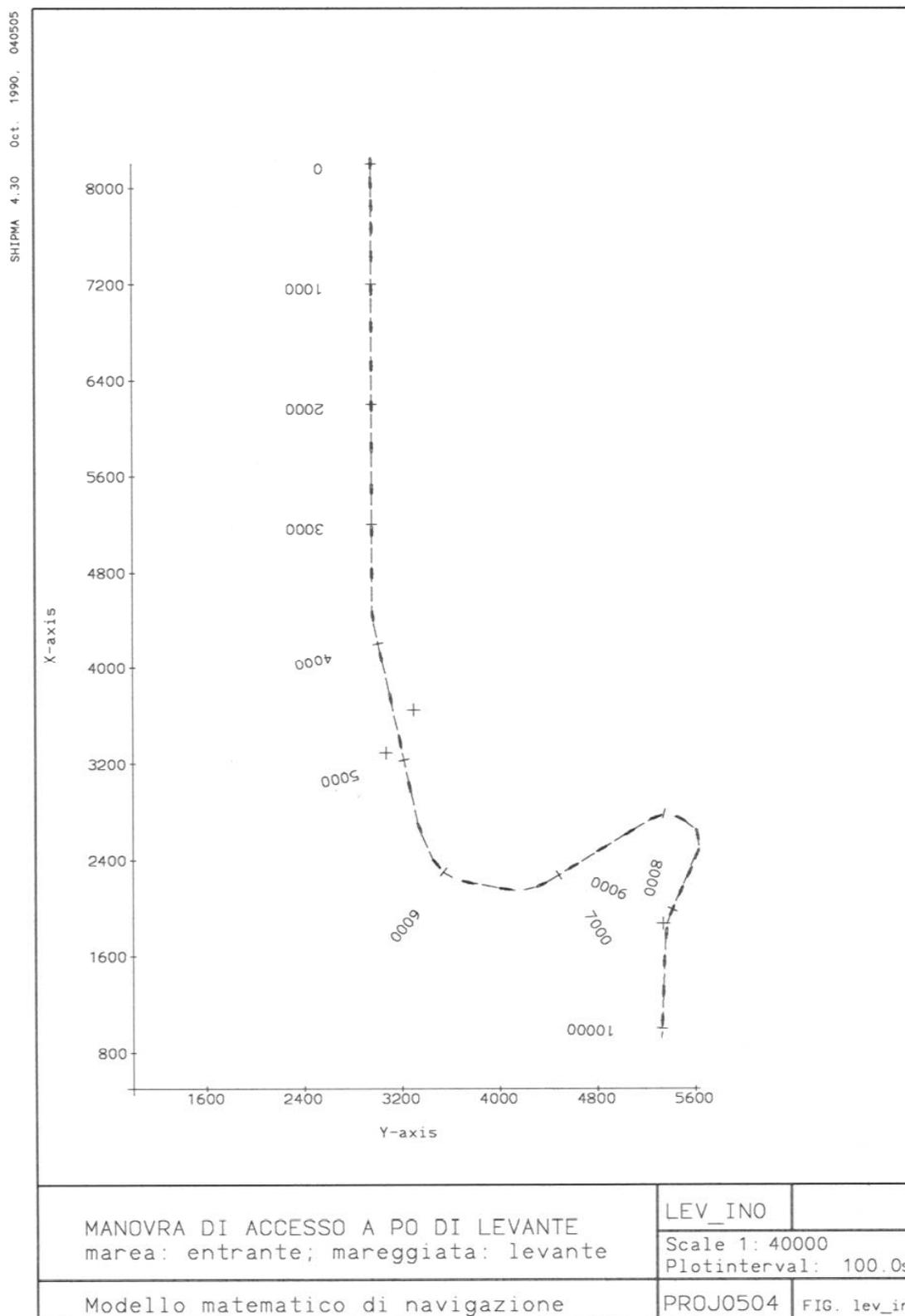


fig. 3.4.16 Manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Levante (I1)

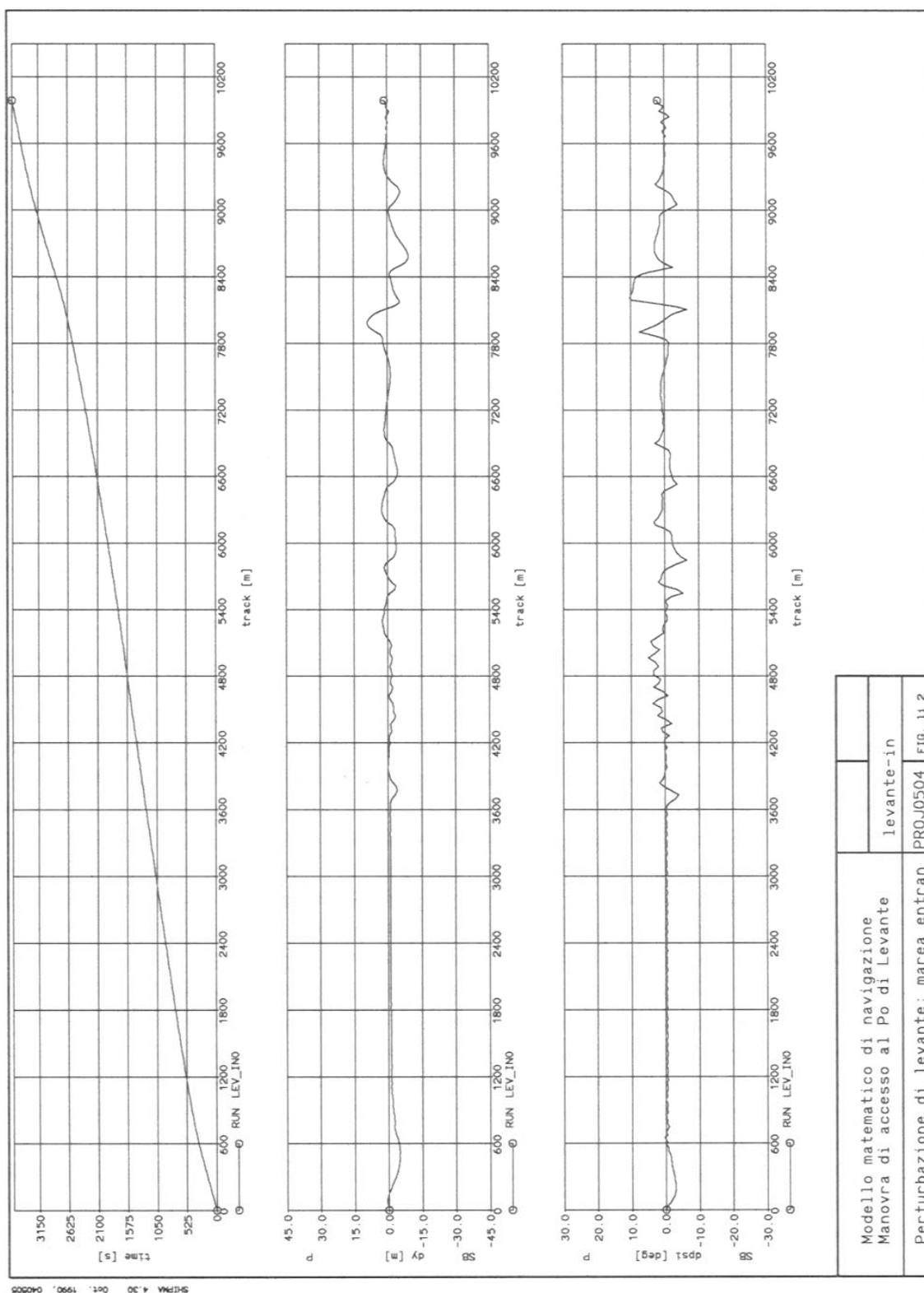


fig. 3.4.17 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Levante (I2)

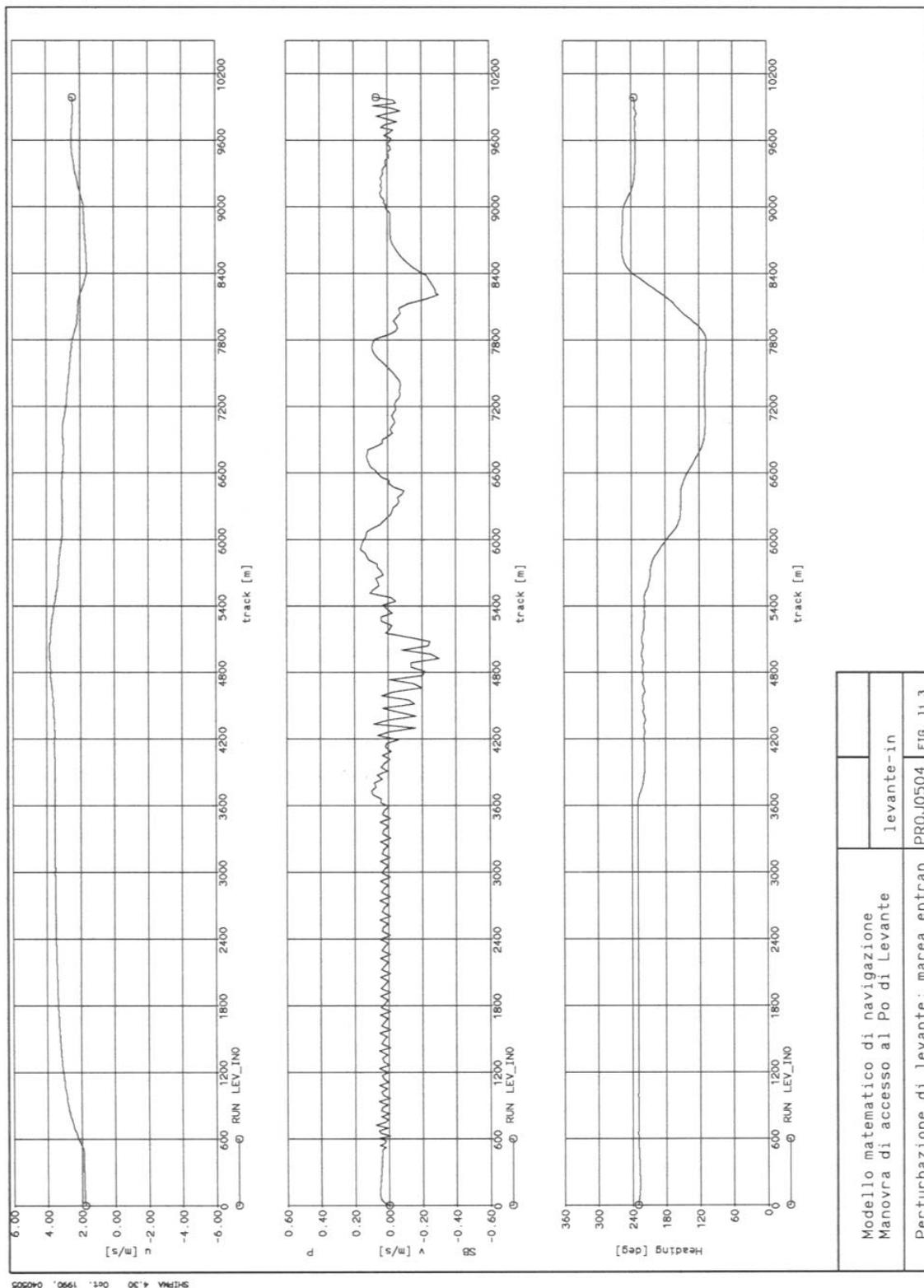


fig. 3.4.18 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Levante (I3)

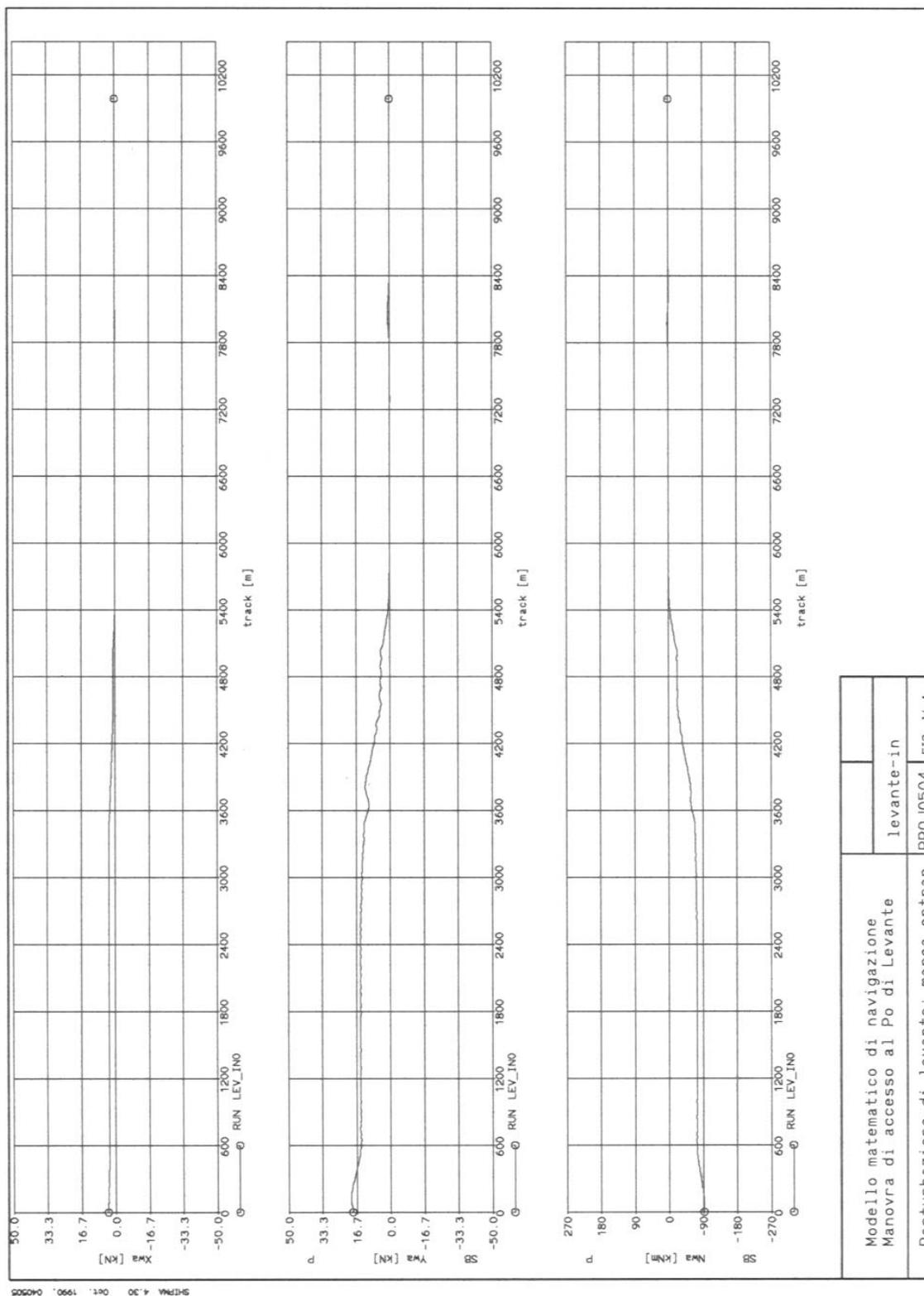


fig. 3.4.19 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Levante (I4)

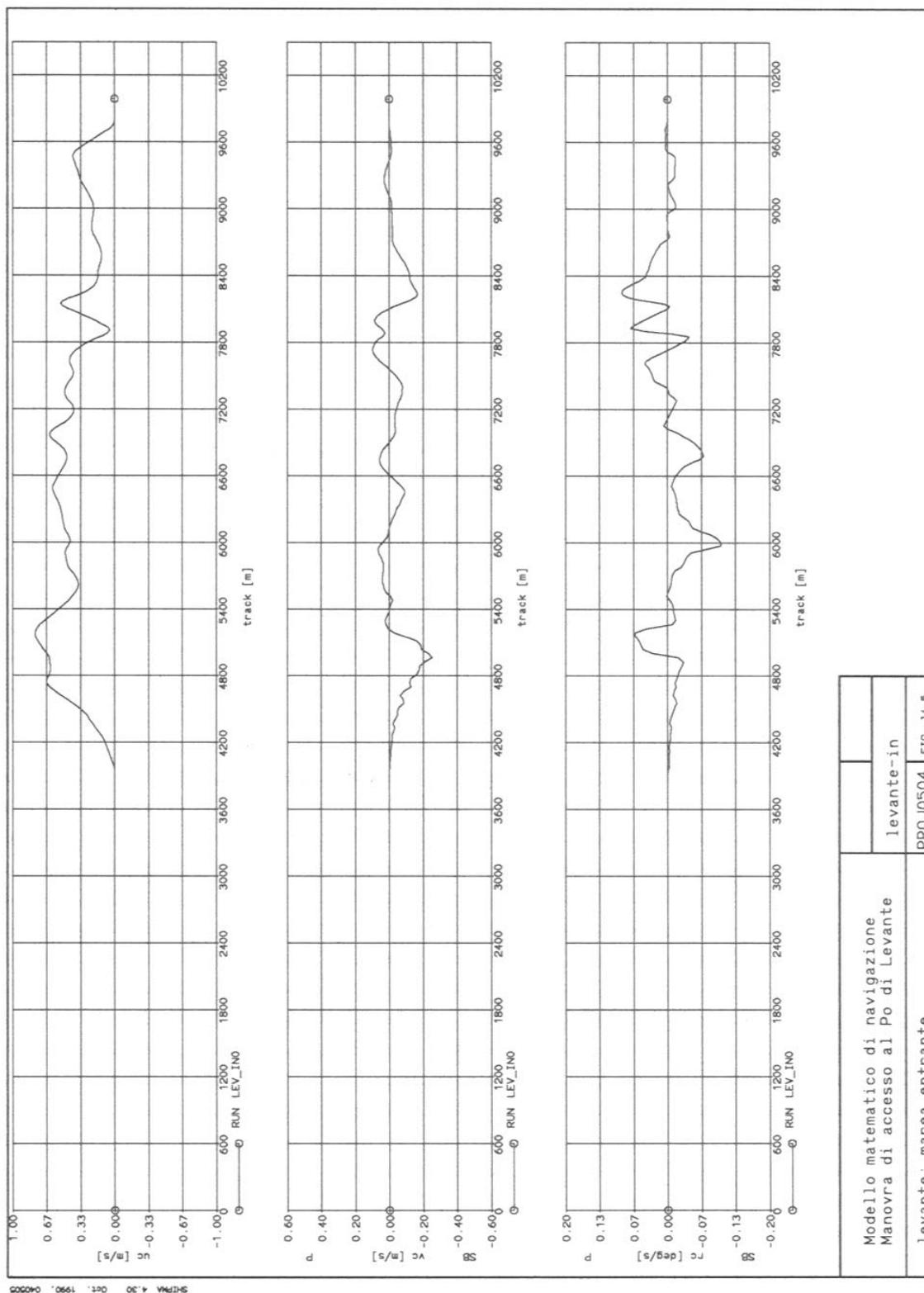


fig. 3.4.20 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Levante (I5)

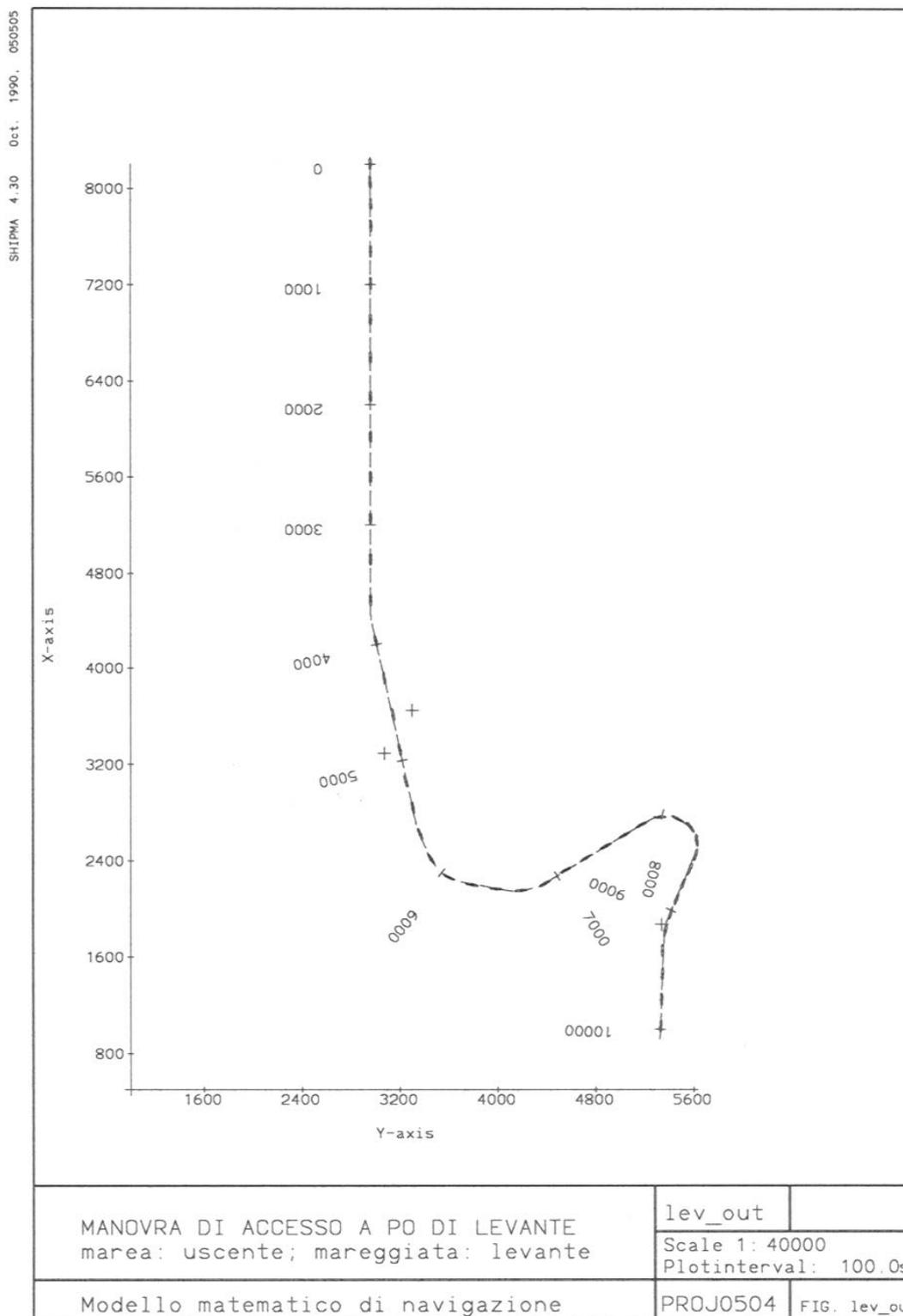


fig. 3.4.21 Manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Levante (I6)

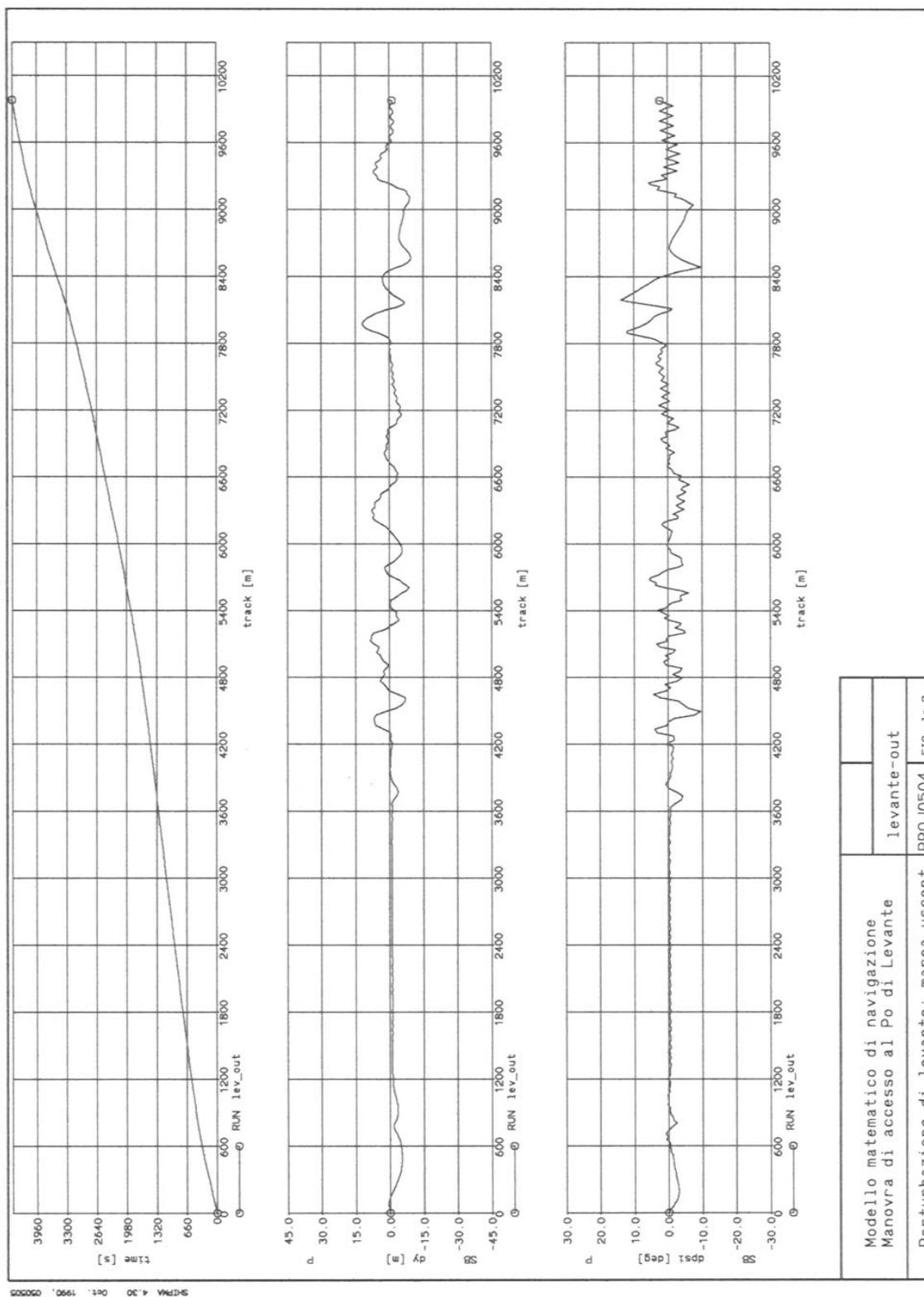


fig. 3.4.22 Risultati della manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Levante (I7)

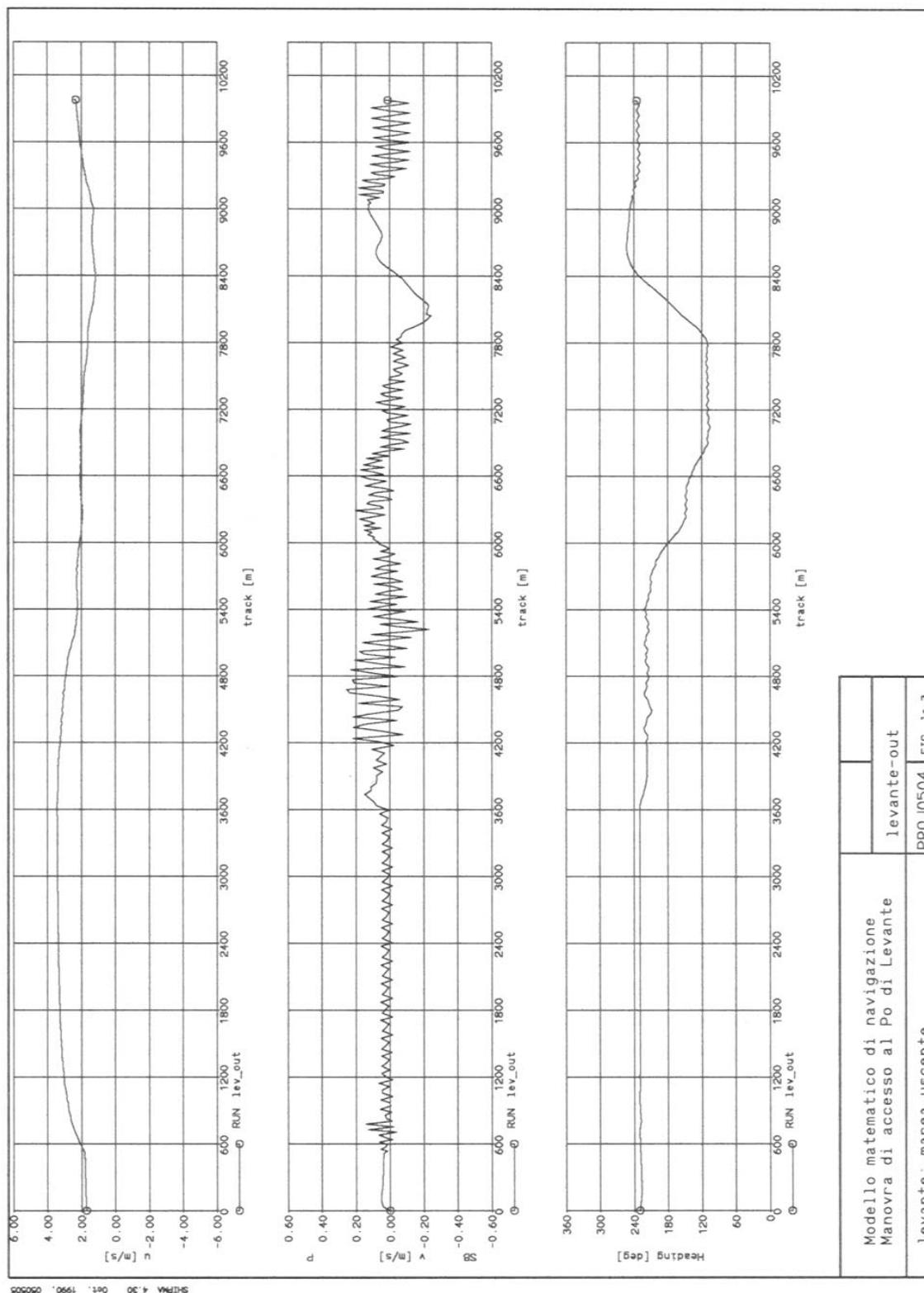


fig. 3.4.23 Risultati della manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Levante (I8)

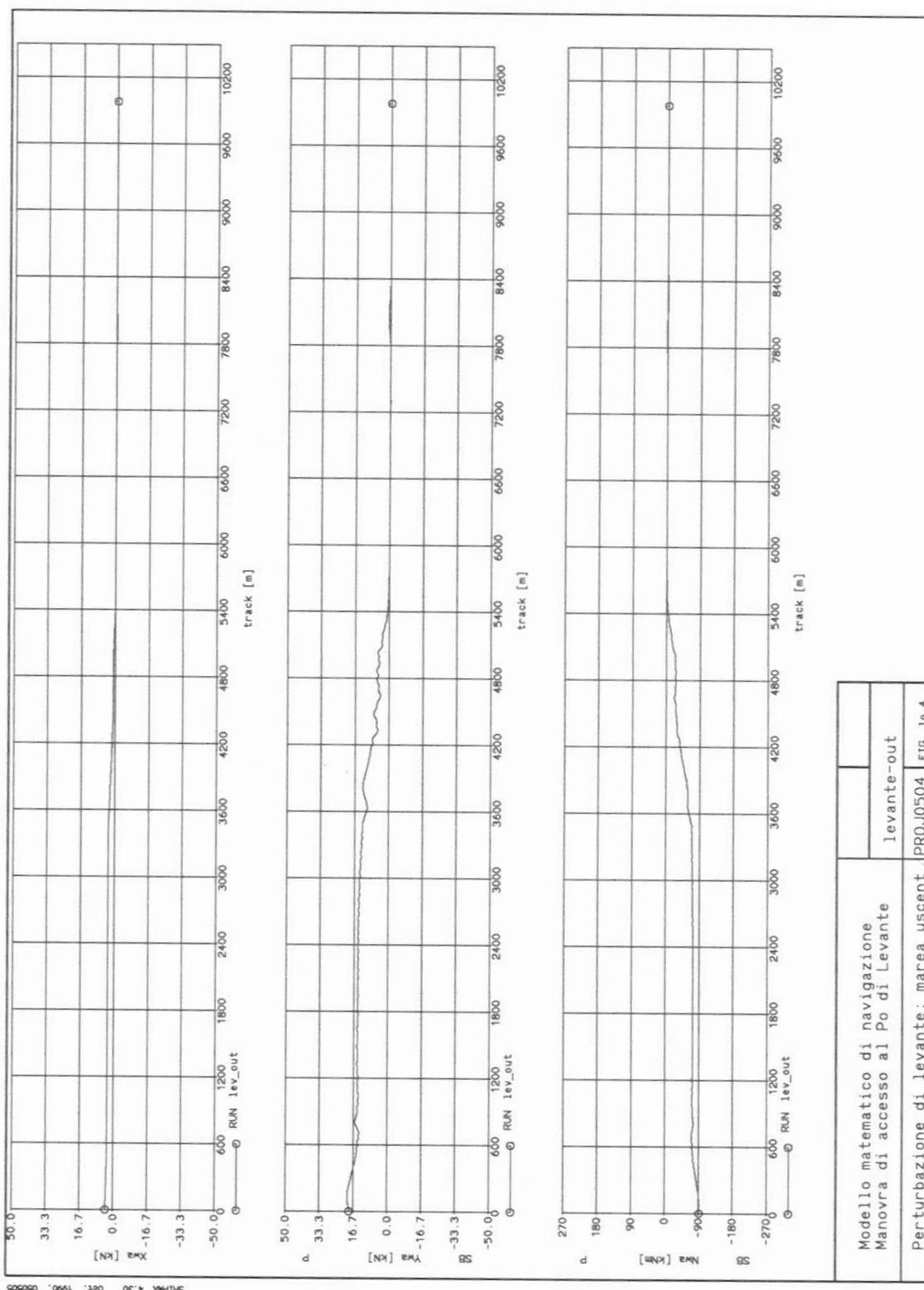


fig. 3.4.24 Risultati della manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Levante (I9)

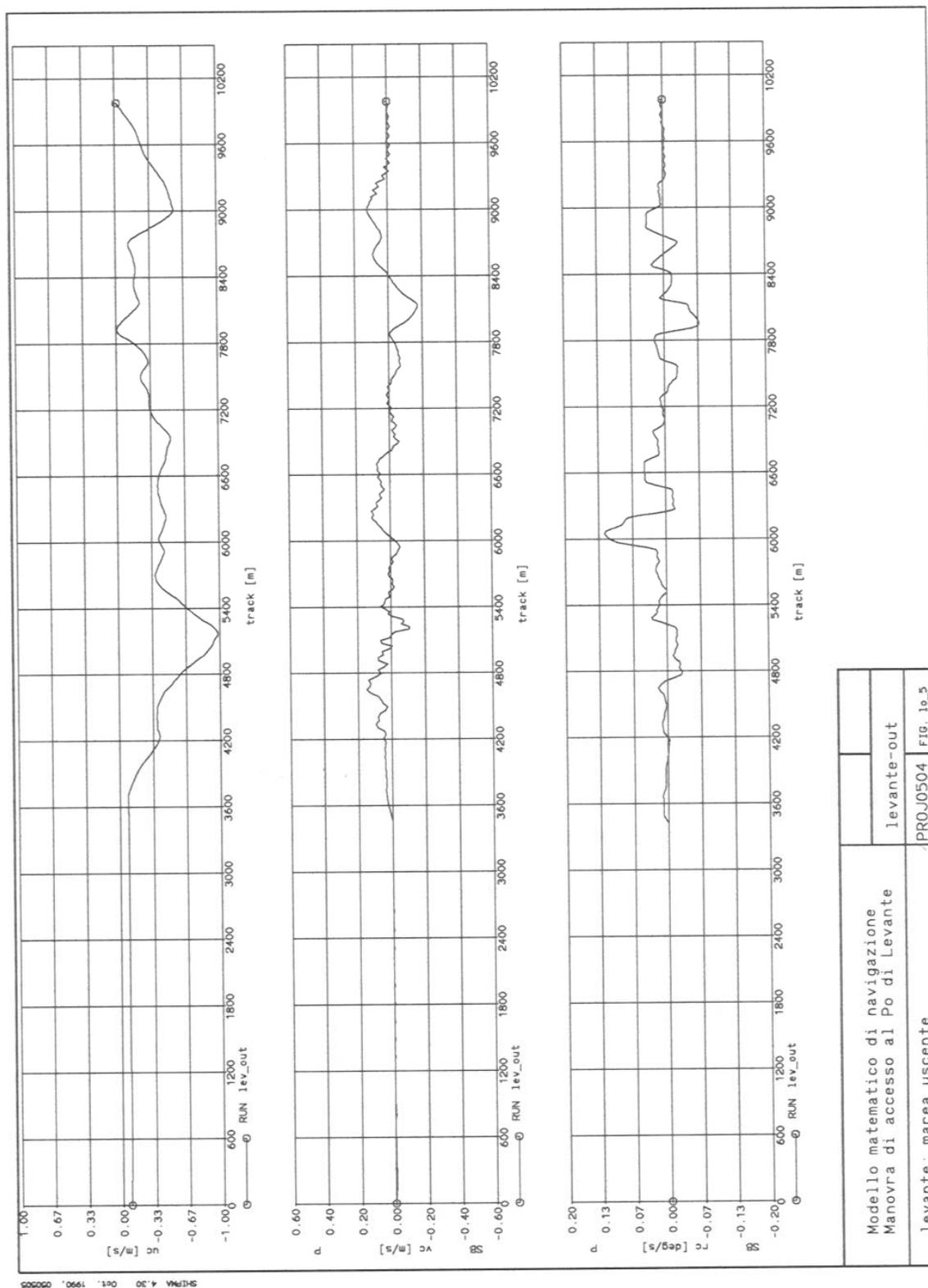


fig. 3.4.25 Risultati della manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Levante (I10)

3.4.3.4 Manovre durante una perturbazione di Scirocco

L'ultima fase della verifica dell'accessibilità nautica al Po di Levante in condizioni meteorologiche avverse (in relazione alle caratteristiche nautiche delle chiatte fluvio-marine), è stata svolta implementando il "simulatore di navigazione" al caso di perturbazioni di Scirocco, considerando sia la condizione di corrente entrante che di corrente uscente dalla foce fluviale (i valori dei vettori velocità delle correnti sono stati desunti dallo studio idrodinamico descritto nel capitolo 4 della presente relazione).

Come negli altri casi, si è considerato un moto ondoso caratterizzato (nella zona della nave "storage") da altezza d'onda significativa $H_s=1.0$ m, periodo di picco $T_p=6.0$ s, ma direzione di provenienza $\alpha=135^\circ$ N. Per simulare le condizioni del moto ondoso reale si è ancora ipotizzata l'agitazione "irregolare" tramite uno spettro di tipo "JONSWAP" con fattore di esaltazione del picco pari a $\gamma = 3.3$. Le caratteristiche delle onde lungo il percorso sono state desunte dai risultati degli studi svolti sulla propagazione delle onde dal largo a riva.

I risultati ottenuti in concomitanza con un'agitazione ondosa di Scirocco e condizione di marea entrante (ossia considerando l'interazione tra moto ondoso e corrente entrante) sono rappresentati nelle figure da fig. 3.4.26 a fig. 3.4.30.

In fig. 3.4.26 è rappresentata tutta la manovra di accesso dalla nave "storage" (track=0) all'interno del Po di Levante (track \approx 10000m); analogamente ai casi precedenti, nella figura, la posizione della chiatte fluvio-marittima è plottata con un intervallo temporale di 100s.

In fig. 3.4.27 sono riportati, in funzione della posizione dell'imbarcazione lungo il percorso imposto (track), il tempo, la distanza del baricentro della nave dal percorso ideale (dy) e la deviazione angolare (dpsi) rispetto alla rotta (ossia l'angolo tra la tangente locale al percorso e l'asse longitudinale della nave).

Nella fig. 3.4.28 sono riportati, sempre in funzione della posizione dell'imbarcazione lungo il percorso imposto (track), le velocità di avanzamento longitudinale (u) e trasversale (v) del natante e la "prua nave" (ossia l'orientamento della nave rispetto al Nord geografico) lungo tutto il percorso.

Nella fig. 3.4.29 sono riportate le sollecitazioni longitudinali (X_{wa}), trasversali (Y_{wa}) ed i momenti (N_{wa}) trasmessi dalle onde alla nave.

L'ultima rappresentazione grafica (fig. 3.4.30) dei risultati riferiti alla condizione meteorologica in esame (Scirocco e corrente entrante) riporta i valori della velocità longitudinale (u_c) e trasversale (v_c) della corrente e la velocità di rotazione della corrente.

I risultati ottenuti in concomitanza con agitazione ondosa di Scirocco e condizione di corrente uscente (ossia considerando l'interazione tra moto ondoso e marea uscente) sono rappresentati nelle figure da fig. 3.4.31 a fig. 3.4.35, strutturate in modo del tutto analogo alle precedenti figure (con marea entrante).

Dall'esame delle figure relative alla perturbazione di Scirocco e corrente entrante/uscente, si può desumere un comportamento del tutto simile al caso della mareggiata di Bora o di Levante. La chiatte fluvio-marittima è sempre in grado di coprire con buona precisione l'intero percorso imposto in un tempo di circa 1 ora (rigorosamente: un po' di più con marea uscente, un po' di meno con

marea entrante), senza discostarsi mai più di 10m dall'asse di navigazione. La rotta è percorribile anche a velocità contenute e consentirebbe perciò di effettuare eventuali correzioni del percorso o manovre (accelerando o frenando la nave) in fasi di incrocio con altre imbarcazioni o in analoghe situazioni impreviste.

A proposito delle sollecitazioni impresse dal moto ondoso allo scafo, si può notare che le forze assiali impresse allo scafo (lungo l'asse X) sono molto contenute, mentre le forze trasversali (lungo Y) sono considerevolmente più elevate dei casi precedenti e tendono a far scarrocciare verso dritta la nave, essendo l'onda "al traverso"; di conseguenza anche momenti sono più elevati (essendo negativi sottintendono una tendenza a far ruotare in senso antiorario lo scafo) rispetto ai casi precedenti. Ciononostante la chiatta riesce a contrastare efficacemente queste forze ed a procedere in sicurezza lungo tutto il tratto di mare aperto. Dunque anche in concomitanza con le mareggiate di Scirocco l'onda assunta (di altezza massima pari ad 1.0m) non è in grado di penalizzare la navigazione della chiatta nel tratto di mare aperto.

Si deve infine ribadire che, come nei casi precedentemente analizzati, la dimensione della chiatta è tale per cui, in alcuni tratti del percorso, non potrà essere consentito l'incrocio con altre grosse navi o chiatte eventualmente in transito nella zona, per cui saranno da prevedere idonei sistemi di controllo della navigazione in corrispondenza di questi punti "critici".

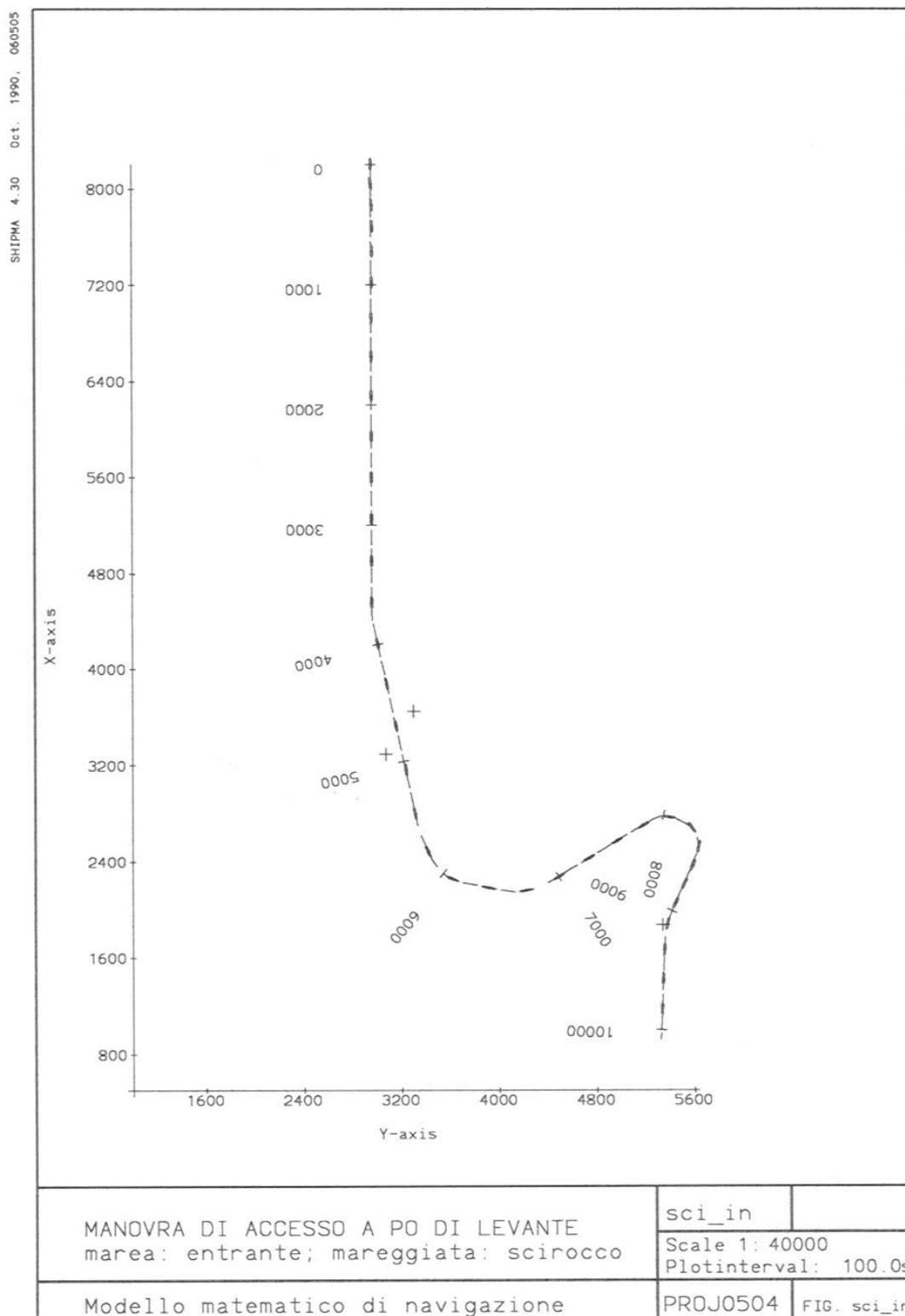


fig. 3.4.26 Manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Scirocco (s1)

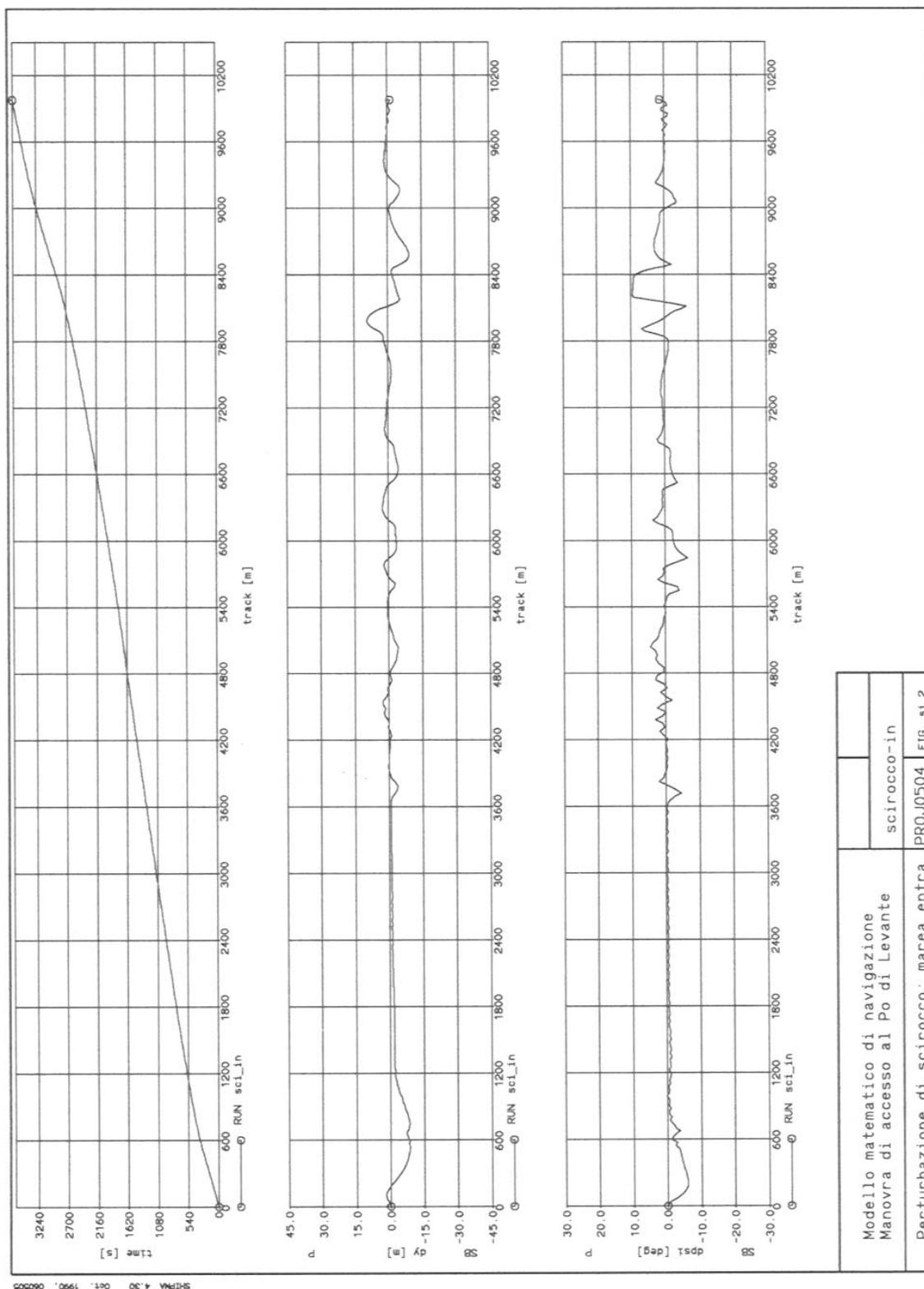


fig. 3.4.27 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Scirocco (s2)

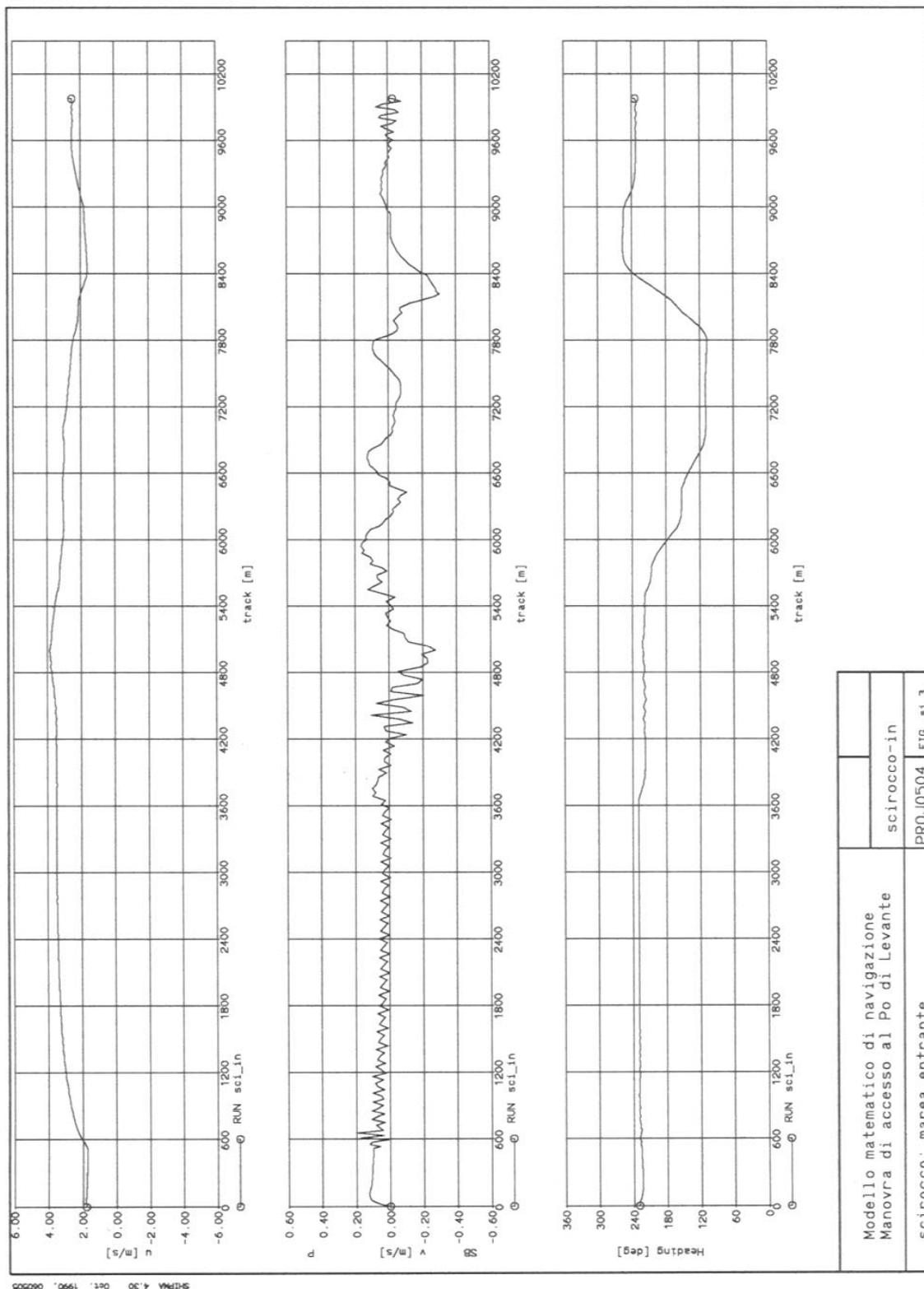


fig. 3.4.28 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Scirocco (s3)

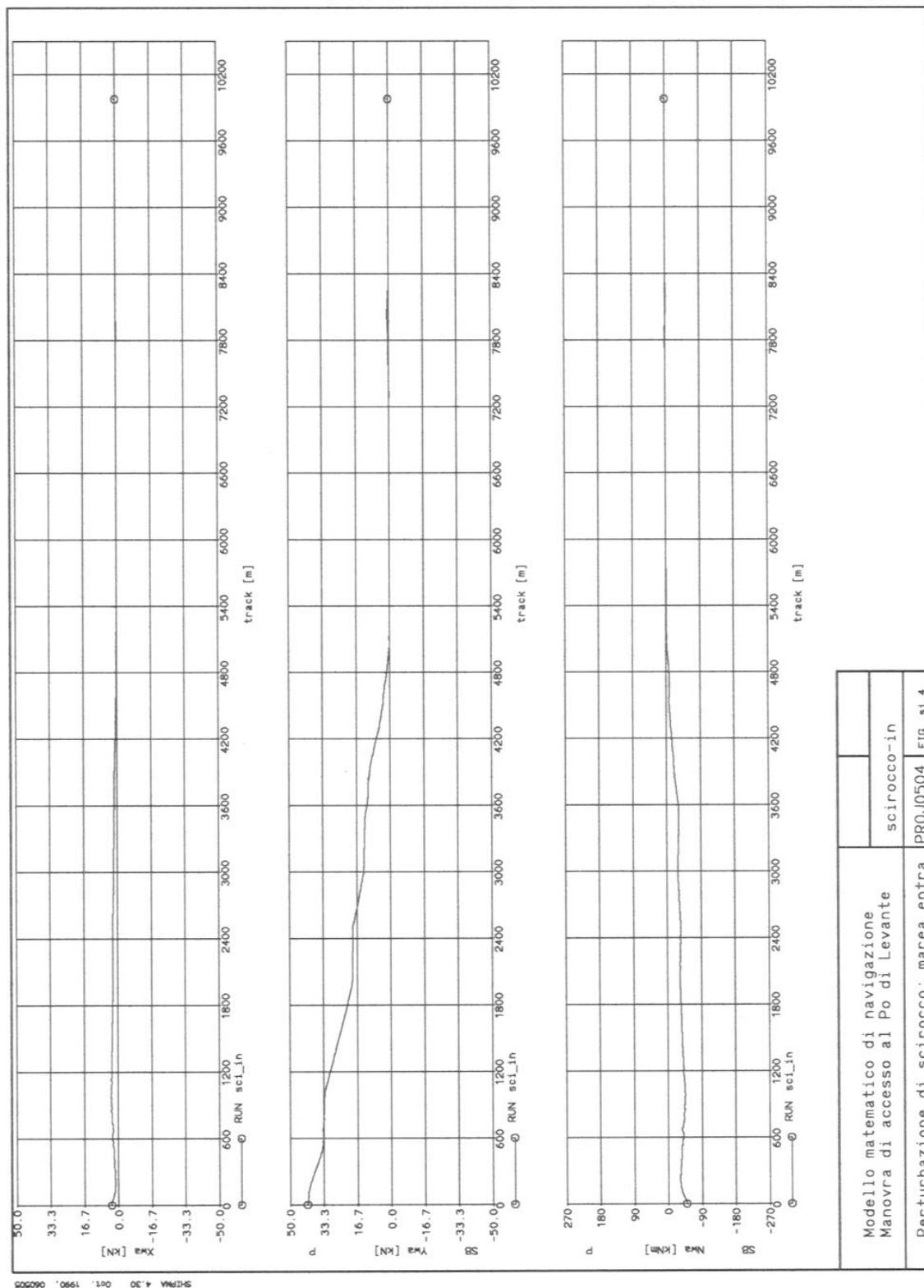


fig. 3.4.29 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Scirocco (s4)

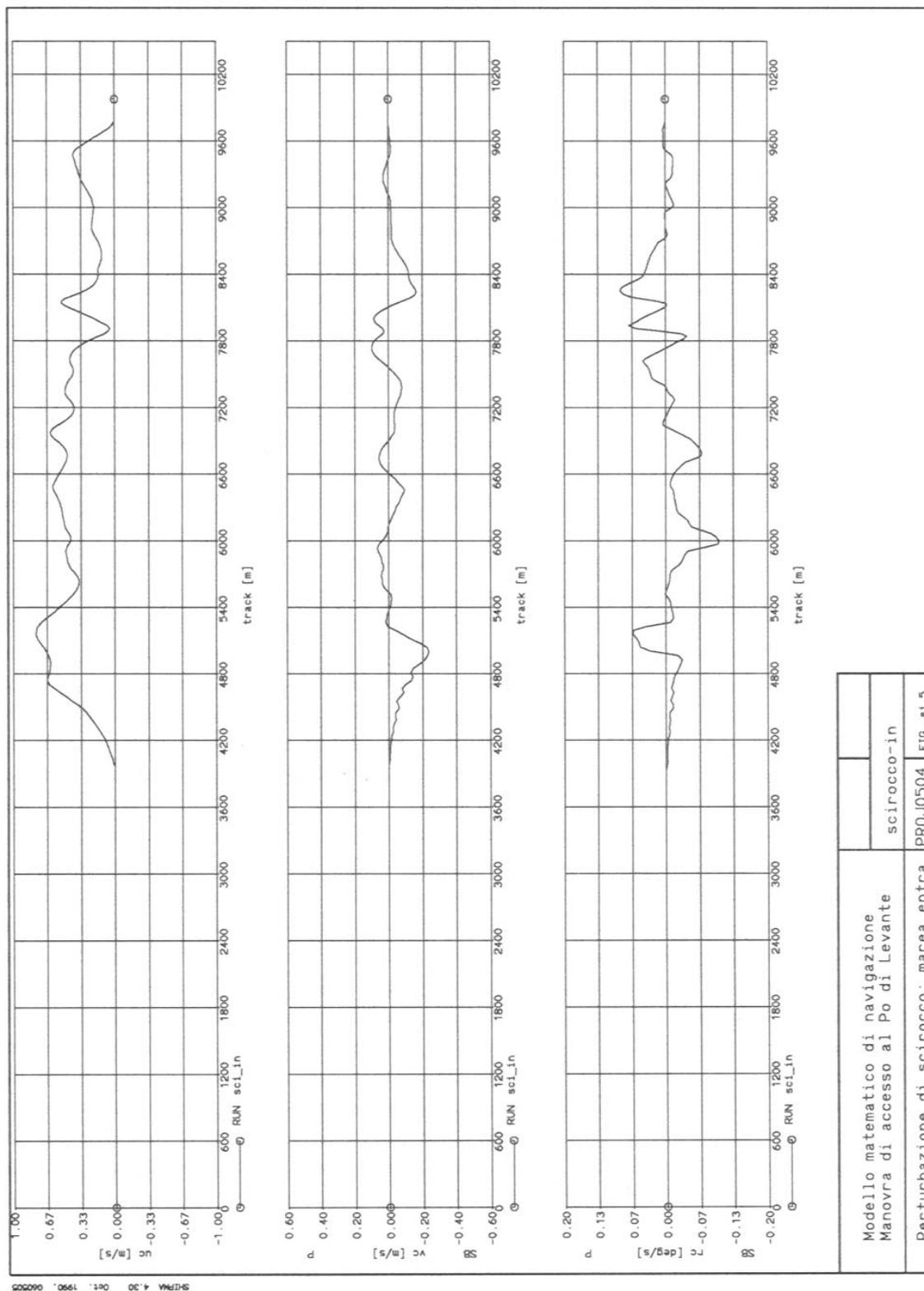


fig. 3.4.30 Risultati della manovra di accesso con marea entrante e mareggiata di Scirocco (s5)

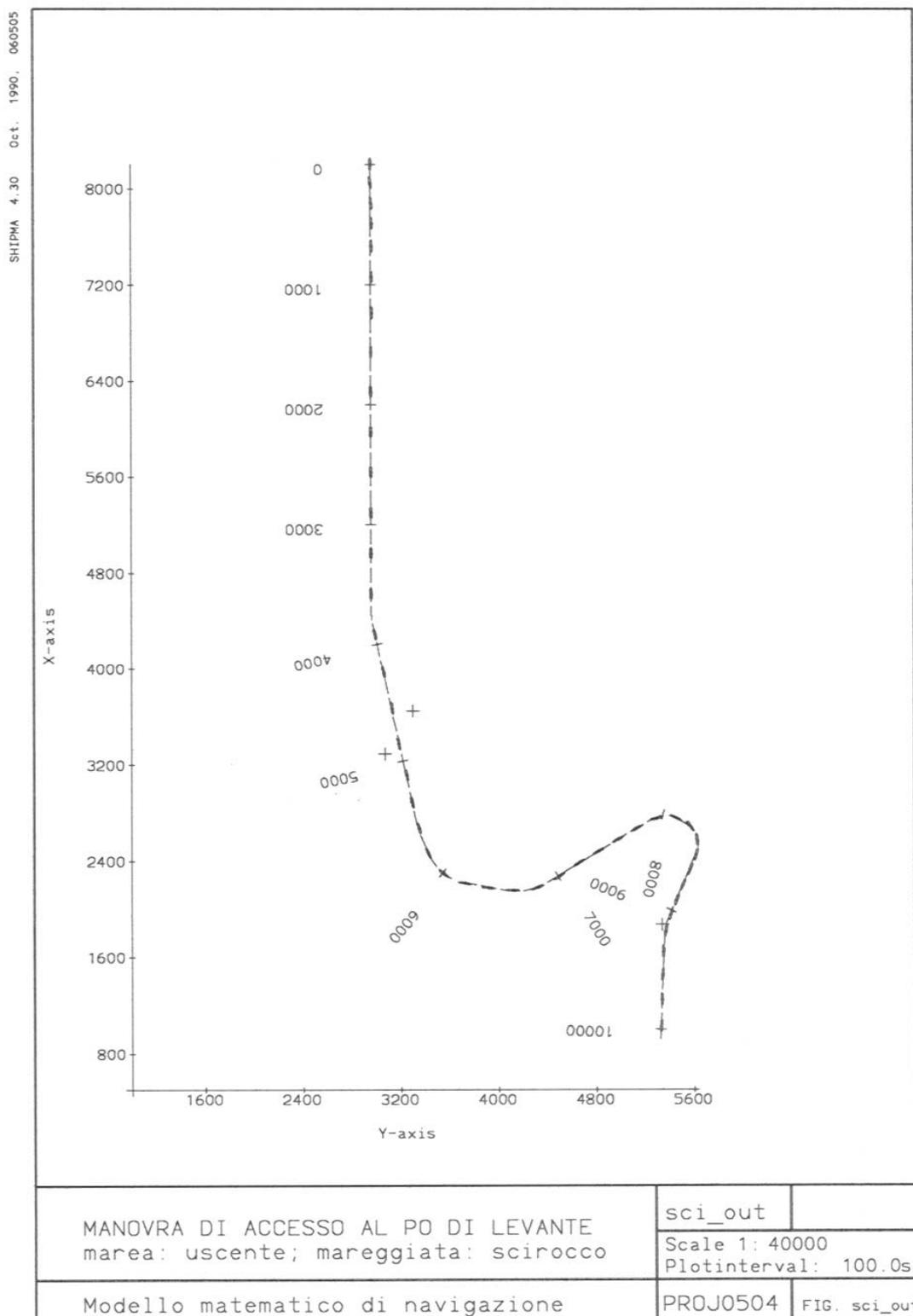


fig. 3.4.31 Manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Scirocco (s6)

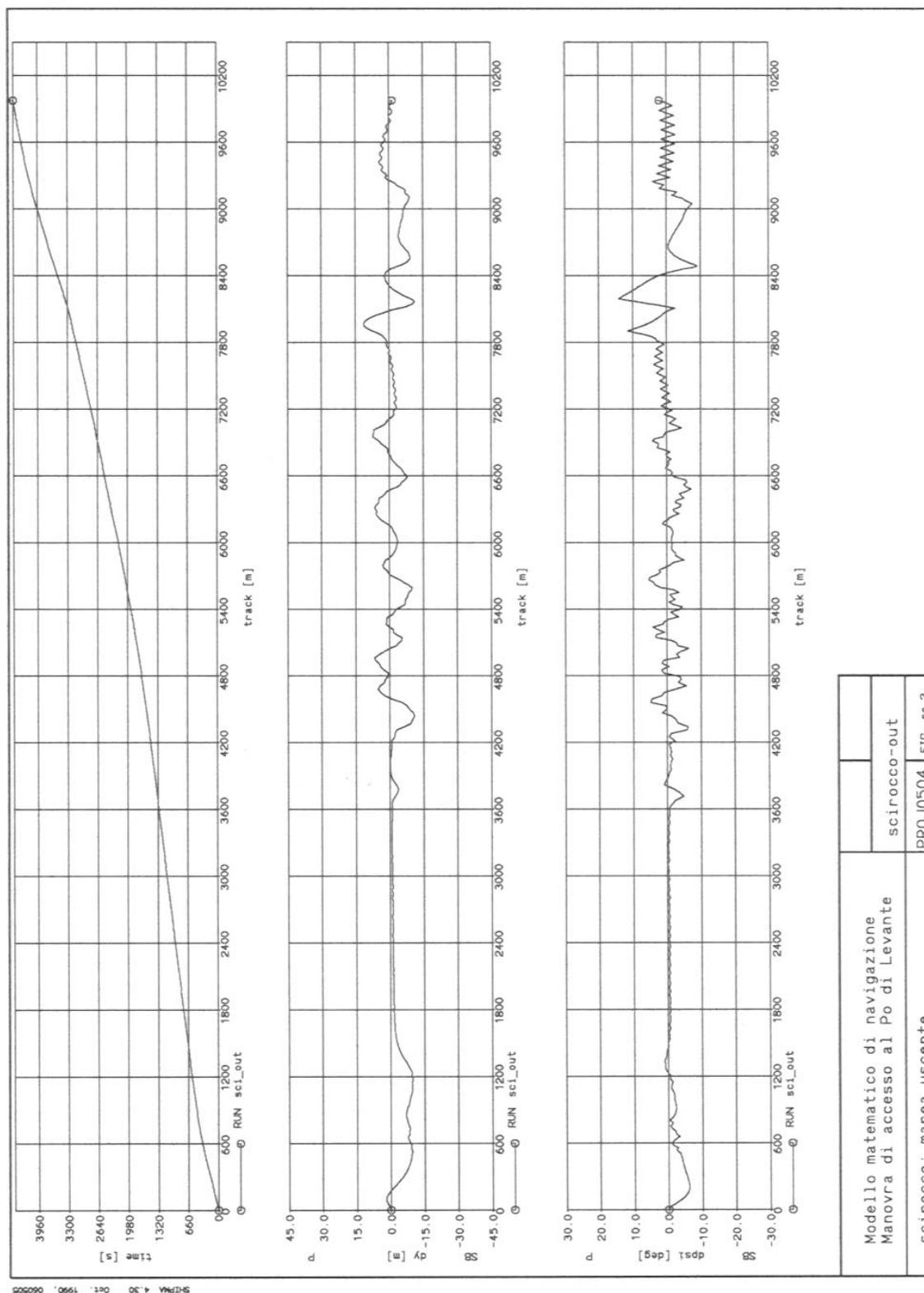


fig. 3.4.32 Risultati della manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Scirocco (s7)

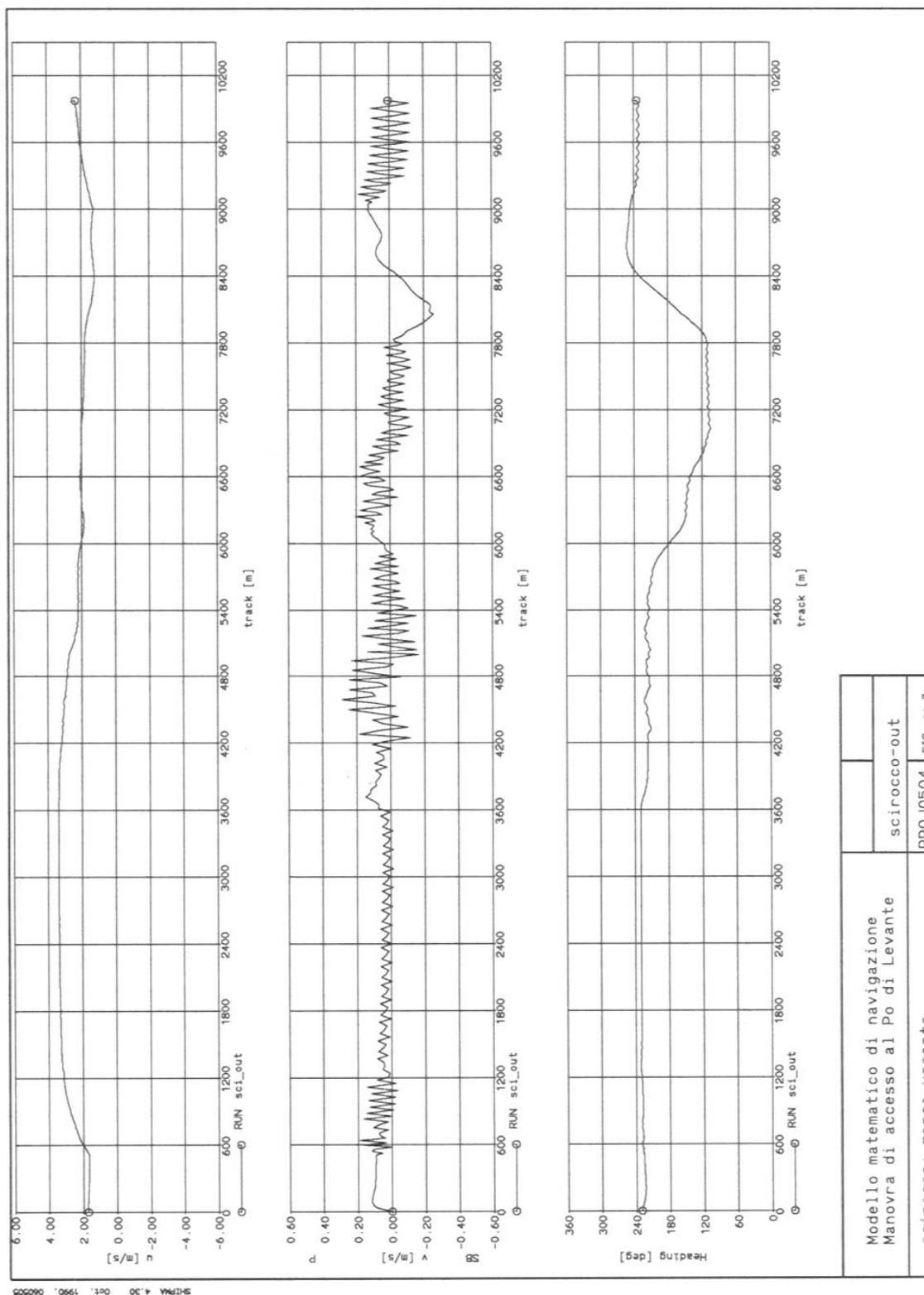


fig. 3.4.33 Risultati della manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Scirocco (s8)

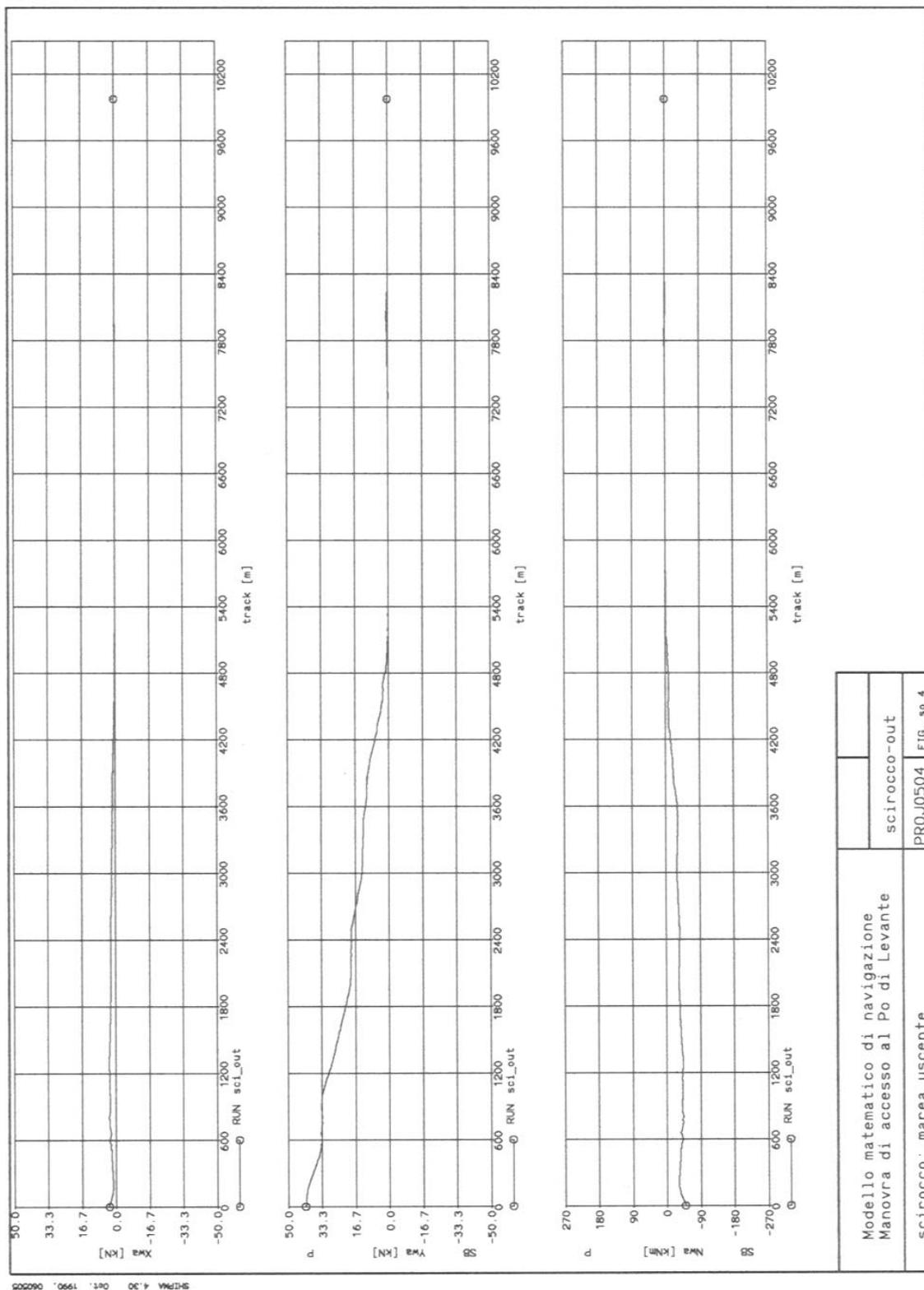


fig. 3.4.34 Risultati della manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Scirocco (s9)

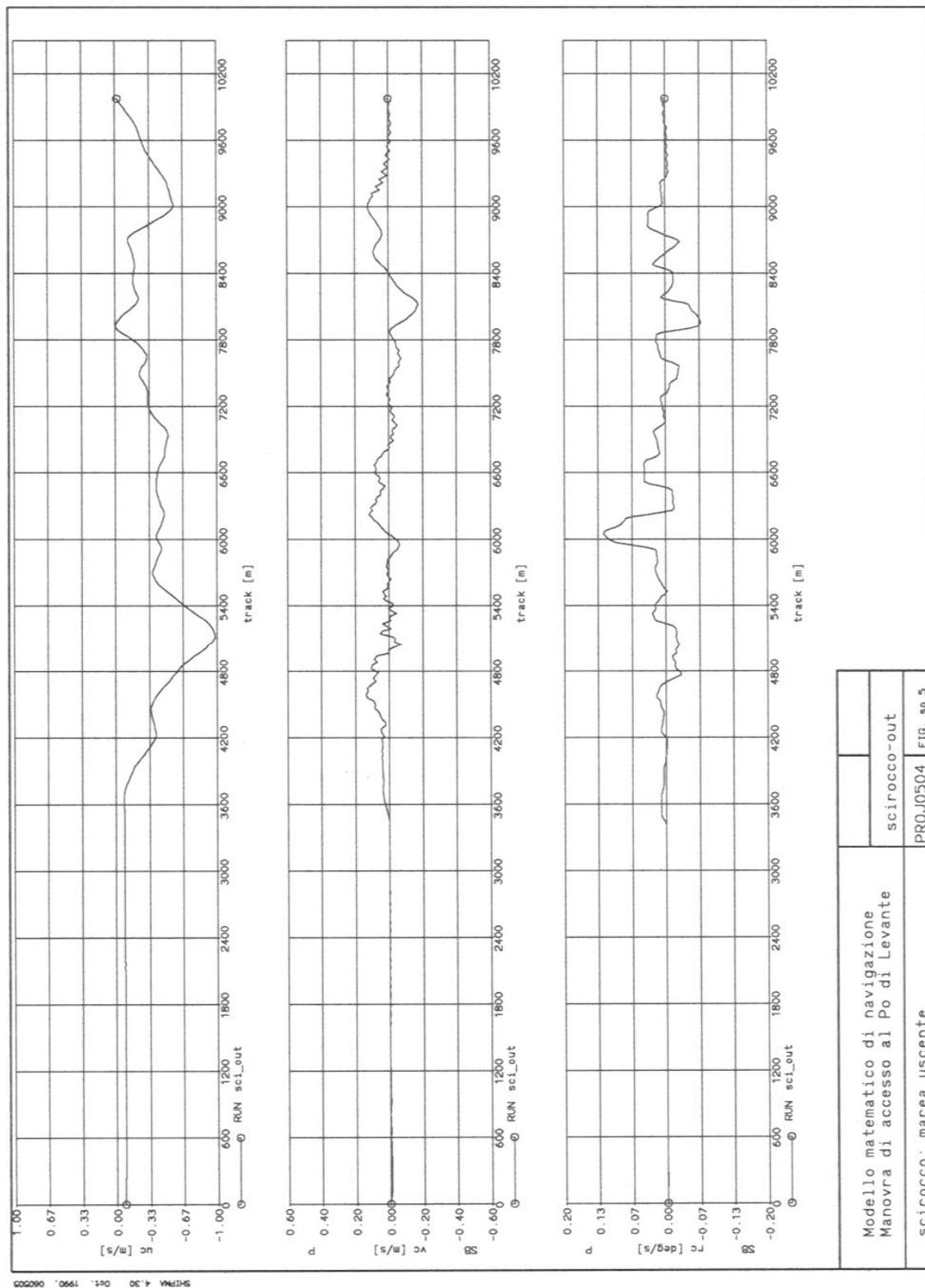


fig. 3.4.35 Risultati della manovra di accesso con marea uscente e mareggiata di Scirocco (s10)

3.4.4 Osservazioni conclusive

Lo studio della navigazione tra la nave "storage" (posta su di un fondale di circa 20m) e l'ingresso del Po di Levante è stato effettuato considerando una chiatta fluvio-marittima di lunghezza pari a 105 m, larghezza 15 m e pescaggio di 2.5m.

La manovra di "atterraggio" simulata, originata a circa 4500m al largo dell'imboccatura di Porto Levante, è stata protratta fino all'interno del Po di Levante, in corrispondenza dell'inizio del canale dell'idrovia omonima, ricoprendo un percorso di lunghezza pari a circa 10 km.

Nelle simulazioni sono state rappresentate le situazioni meteorologiche seguenti:

- in condizione di quiete;
- durante una perturbazione di Bora con onde e marea entrante/uscente;
- durante una perturbazione di Levante con onde e marea entrante/uscente;
- durante una perturbazione di Scirocco con onde e marea entrante/uscente.

Tutti i risultati ottenuti hanno sottolineato anzitutto che la manovra di accesso è percorribile in tutta sicurezza in condizioni di quiete (vedi Fig. 3.4.36, in cui la sagoma della chiatta è plottata ad intervalli temporali di 100s).

Le simulazioni effettuate in concomitanza con mareggiate di Bora, Levante e Scirocco hanno pure sottolineato che la manovra è percorribile in sicurezza sia con corrente entrante che uscente, e hanno dimostrato che le agitazioni ondose (caratterizzate da altezza massima di 1.0m) non sono in grado di trasmettere sollecitazioni allo scafo tali da penalizzare la navigazione nel tratto di mare aperto. Le differenze tra le manovre ricavate con i tre attacchi ondososi considerati sono risultate, inoltre, modeste.

Nella seguente Fig. 3.4.37 è rappresentata una manovra di accesso al Po di Levante in concomitanza con corrente entrante(marea crescente), mentre nella Fig. 3.4.38 è rappresentato il caso di corrente uscente (marea decrescente).

In tutti i casi analizzati la chiatta fluvio-marittima riesce a percorrere la rotta imposta (di circa 10 km) in un tempo di circa 1 ora, procedendo a velocità ridotta e dunque con un buon margine di sicurezza.

Si deve osservare che la dimensione della chiatta fluvio-marittima è tale per cui, in alcuni tratti del percorso (accesso in laguna, lungo la grande "S" del canale lagunare, accesso al Po di Levante), non potrà essere consentito l'incrocio con altre grosse navi o chiatte eventualmente in transito nella zona, per cui saranno da prevedere idonei sistemi di controllo della navigazione in questi punti "critici".

Alcune simulazioni sono state effettuate considerando anche la manovra opposta, ossia la manovra di navigazione che prevede che la chiatta fluvio-marittima provenga dal Po di Levante e si diriga verso il mare aperto per arrestarsi in prossimità della nave "storage". Le simulazioni effettuate hanno ancora sottolineato che la manovra è sicura lungo tutto il percorso prefissato (Fig. 3.4.39). Risultato, peraltro, prevedibile, visto che le condizioni al contorno sono pressoché speculari, a parte le sollecitazioni indotte dalle onde, che sono però in questo caso meno pericolose in quanto la nave affronta il mare di prua anziché di poppa).

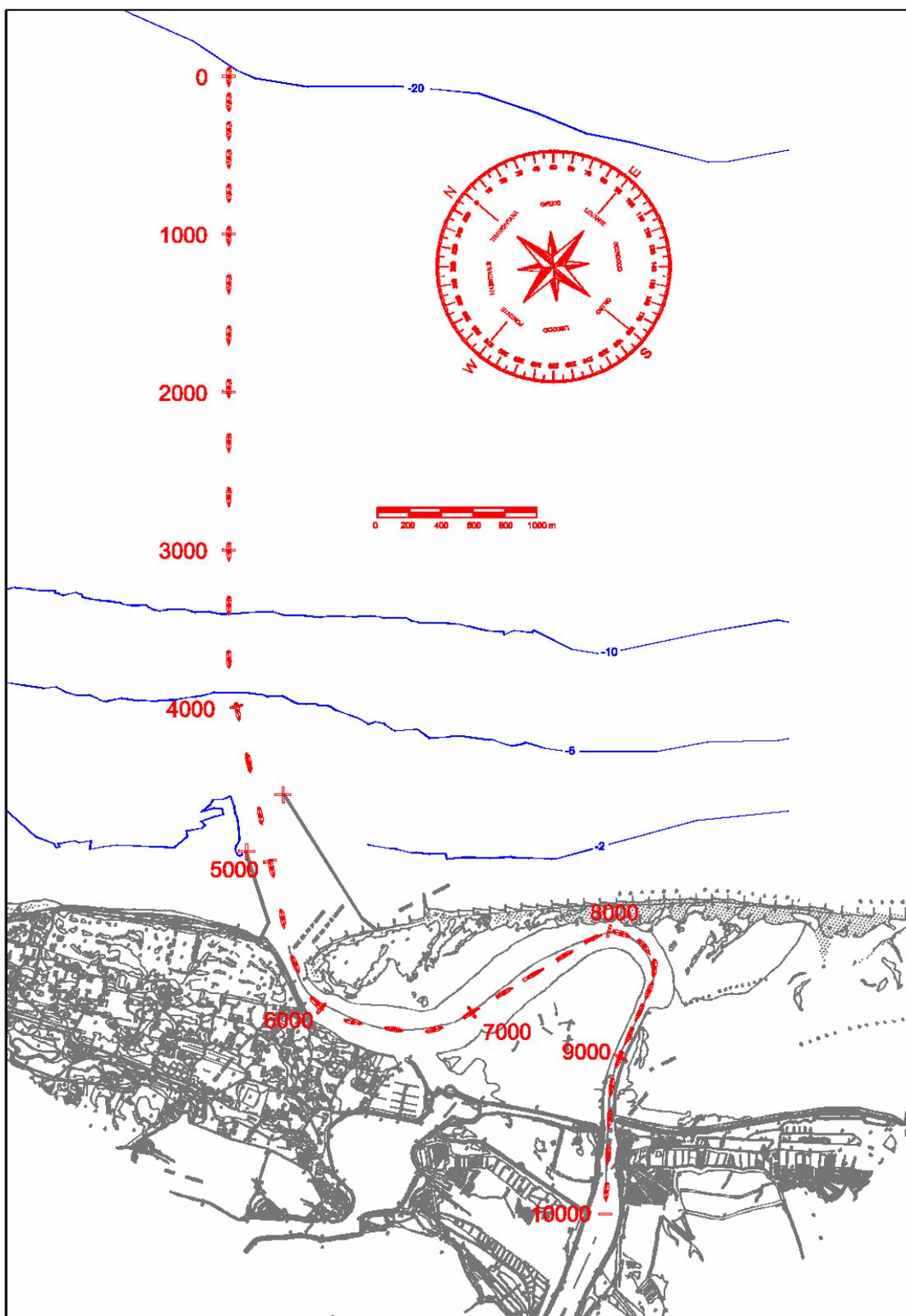


Fig. 3.4.36 Esempio di manovra in condizione di quiete

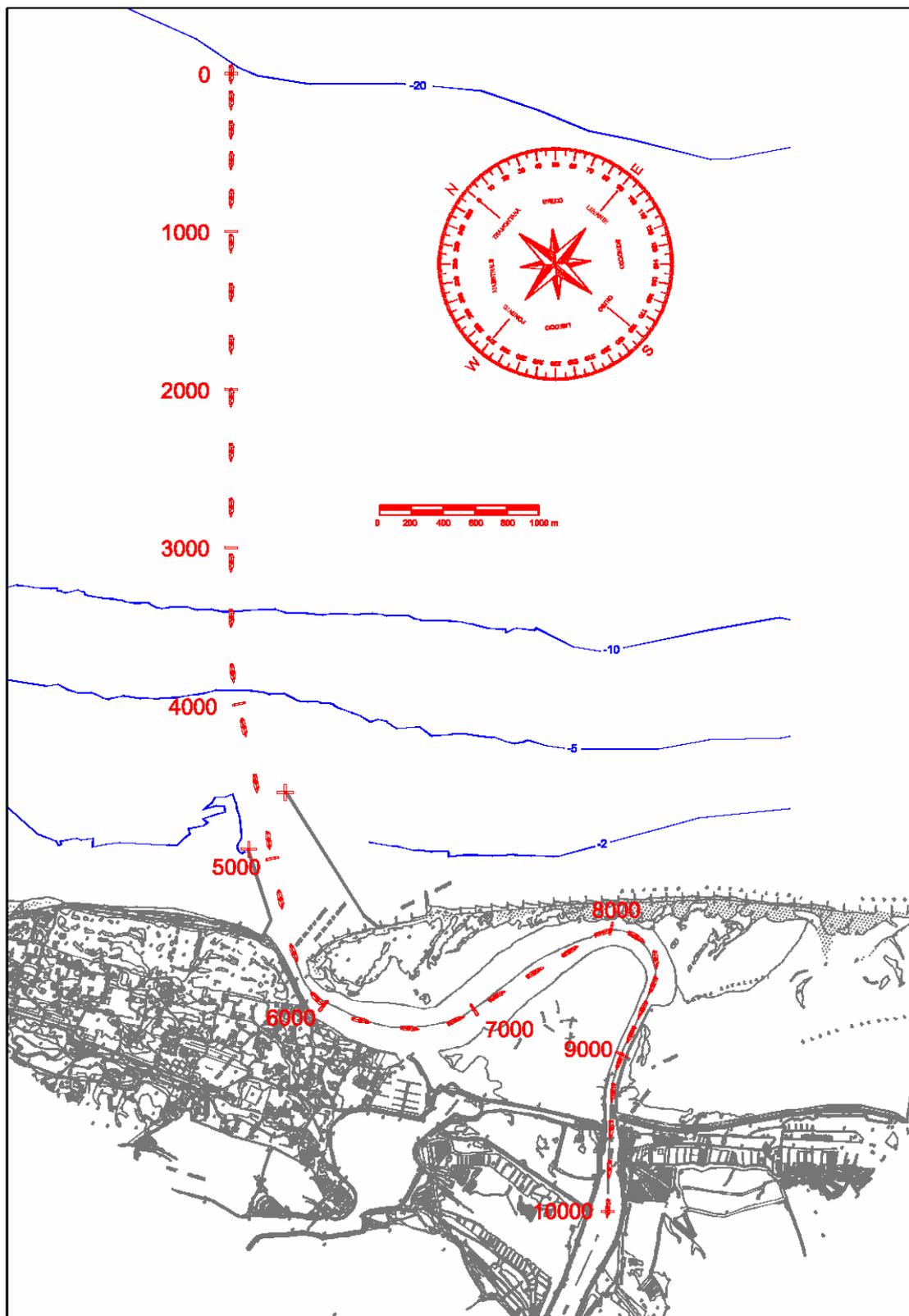


Fig. 3.4.37 Esempio di manovra con onde e marea entrante

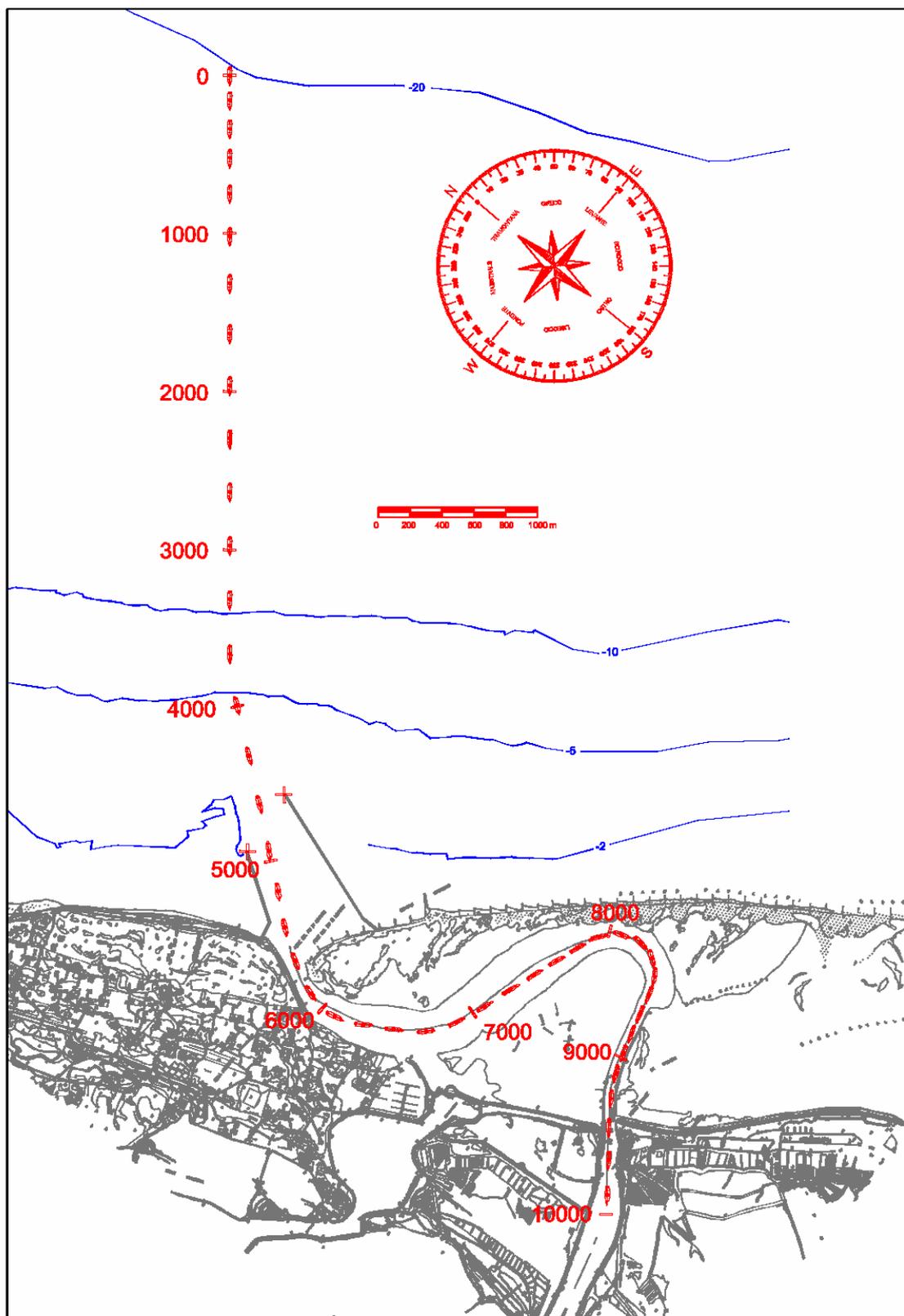


Fig. 3.4.38 Esempio di manovra con onde e marea uscente

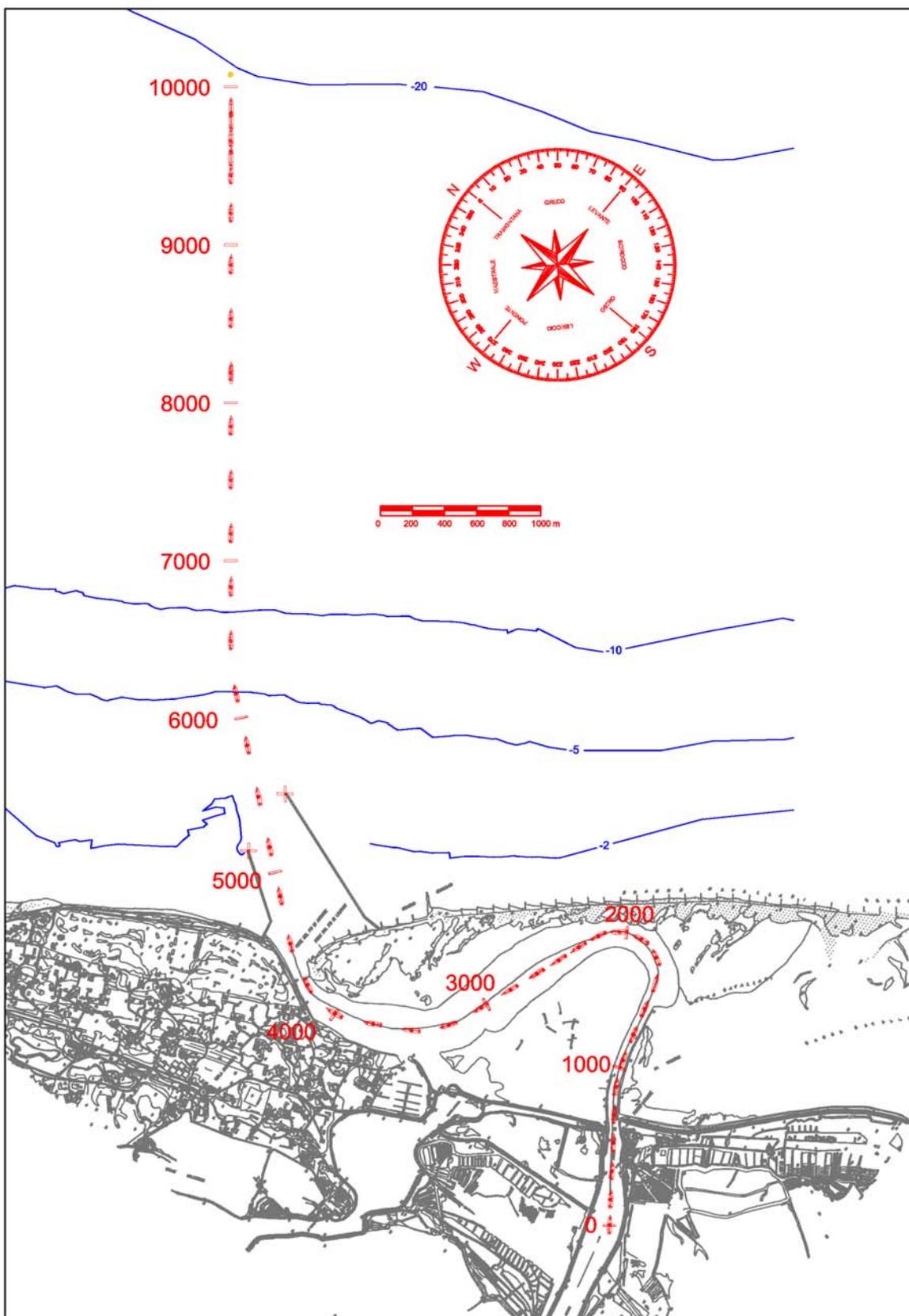


Fig. 3.4.39 Esempio di manovra inversa (da Po di Levante alla nave "storage")

4 ANALISI DEGLI ASPETTI AMBIENTALI

La direttrice prescelta Laguna La Vallona – Po di Levante – Conca di Volta Grimana – Basso corso del Po, come percorso per le chiatte fluvio-marittime destinate a sostenere l'esercizio della centrale di Porto Tolle, si inserisce per buona parte lungo il tracciato del sistema idroviario padano che, almeno per i tratti coinvolti dal progetto di riconversione della centrale stessa, possiedono caratteristiche adeguate rispetto alle necessità dei battelli che la dovrebbero percorrere. Essa non richiede conseguentemente interventi o realizzazioni di opere da analizzare per quanto riguarda il loro eventuale impatto ambientale.

Ciò premesso, a sostegno della validità della soluzione proposta, è comunque opportuno analizzare con il dovuto dettaglio, le condizioni di funzionamento dei sistemi idrografici coinvolti, valutando alcuni aspetti fisico-ambientali delle parti maggiormente sensibili, al fine di fornire elementi conoscitivi utili ad inquadrare eventuali limiti della soluzione stessa.

Si tratta, innanzitutto, di inquadrare le caratteristiche del moto ondoso nel tratto di mare interessato dallo stazionamento della nave "storage" e di valutare quali modificazioni subiscano le onde generate dal vento nei diversi settori di traversia, trasferendosi sottocosta.

Il fenomeno da una parte influenza l'operatività del collegamento tra la nave "storage" e le vie d'acqua interne, dall'altra è alla base dei processi di risospensione dei sedimenti che sono sollevati dal fondo soprattutto nella zona dei frangenti, dall'altra ancora genera le correnti costiere che, interagendo con le correnti di flusso e di riflusso di marea attraversa la Foce lagunare della Vallona, governa il trasporto dei sedimenti stessi, modellando la morfologia dei fondali ed, in particolare, le caratteristiche della barra che tende a formarsi in corrispondenza della foce stessa.

Relativamente all'officiosità del passo navigabile che consente di accedere in laguna e quindi nel Po di Levante è, inoltre, rilevante valutare la capacità delle correnti di mantenere i fondali e stimare quali possano essere le variazioni indotte in occasione degli stati di mare in occasione degli stati di mare più sostenuti. Non è infatti, preoccupante un graduale e lento interrimento del passo navigabile, che potrebbe essere eventualmente contrastato con un adeguato programma di dragaggio, un intenso e rapido processo di interrimento che avvenisse nell'arco di tempo tipico di una mareggiata.

Di particolare interesse, infine, sono le condizioni idrodinamiche che si stabiliscono lungo il Po di Levante ed in particolare lungo il basso corso del Po, che nel caso specifico sono governate sia dall'andamento dei livelli di marea, sia dal regime delle portate fluenti. A tutti questi aspetti e alla loro influenza sulle condizioni di navigabilità della direttrice prescelta per collegare la centrale alla nave "storage" si rivolgono le indagini nel seguito illustrate.

4.1 Clima meteomarino

Per la caratterizzazione delle condizioni meteomarine al largo della zona del delta del Po, sono disponibili più fonti di dati di diversa natura.

I dati presi in considerazione nel presente studio sono i seguenti:

1. dati di vento: registrazioni orarie di velocità e direzione del vento, relative alla Centrale ENEL di Porto Tolle;

2. dati di moto ondoso: per quanto riguarda i dati di moto ondoso sono disponibili due fonti:
 - dati RON: dati di moto ondoso registrati da ondometro TRIAXIS traslazionale, ubicato a Punta della Maestra appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale (i dati sono disponibili in rete);
 - dati CNR: ricostruzione della serie storica delle mareggiate mediante modellazione matematica dei fenomeni di generazione/dissipazione del moto ondoso sulla base dei venti ricavati dalle carte bariche; il procedimento, sviluppato dal CNR nell'ambito di precedenti progetti di ricerca, si è avvalso anche della taratura dei risultati ottenuti sulla base di misure locali e da satellite;
3. dati di marea: variazioni del livello di marea relative alla stazione RMN di Venezia, registrate da mareografo appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (i dati sono disponibili in rete).

4.1.1 Dati di vento

I dati di vento disponibili ai fini della valutazione degli aspetti legati all'impatto ambientale della soluzione proposta nella presente relazione sono stati rilevati presso la Centrale ENEL di Porto Tolle.

Con riferimento ai dati in questione, sono state rese disponibili le rose di vento alla quota del camino (altezza 250 m) ed al suolo (altezza 10 m).

Pertanto, non disponendo della serie storica delle registrazioni, di seguito è stata riportata solo un'elaborazione statistica dei dati, rappresentata dalla rosa delle velocità del vento al suolo in funzione della direzione di provenienza, ritenuta maggiormente significativa in relazione allo studio condotto. Per ciascuna direzione di provenienza la frequenza dei venti appartenenti a diverse classi di intensità è rappresentata con tratti di diverso spessore e colore, come chiaramente evidenziato nella scala grafica.

L'elaborazione, riportata in Fig. 4.1.1, si basa sulle registrazioni effettuate nel periodo 1 gennaio 1993 – 31 marzo 2005. Si può osservare che la velocità del vento risulta sempre inferiore ai 12 m/s e che gli eventi caratterizzati da intensità maggiore provengono dai settori di Bora (45°N), Levante (90°N) e Scirocco (115°N).

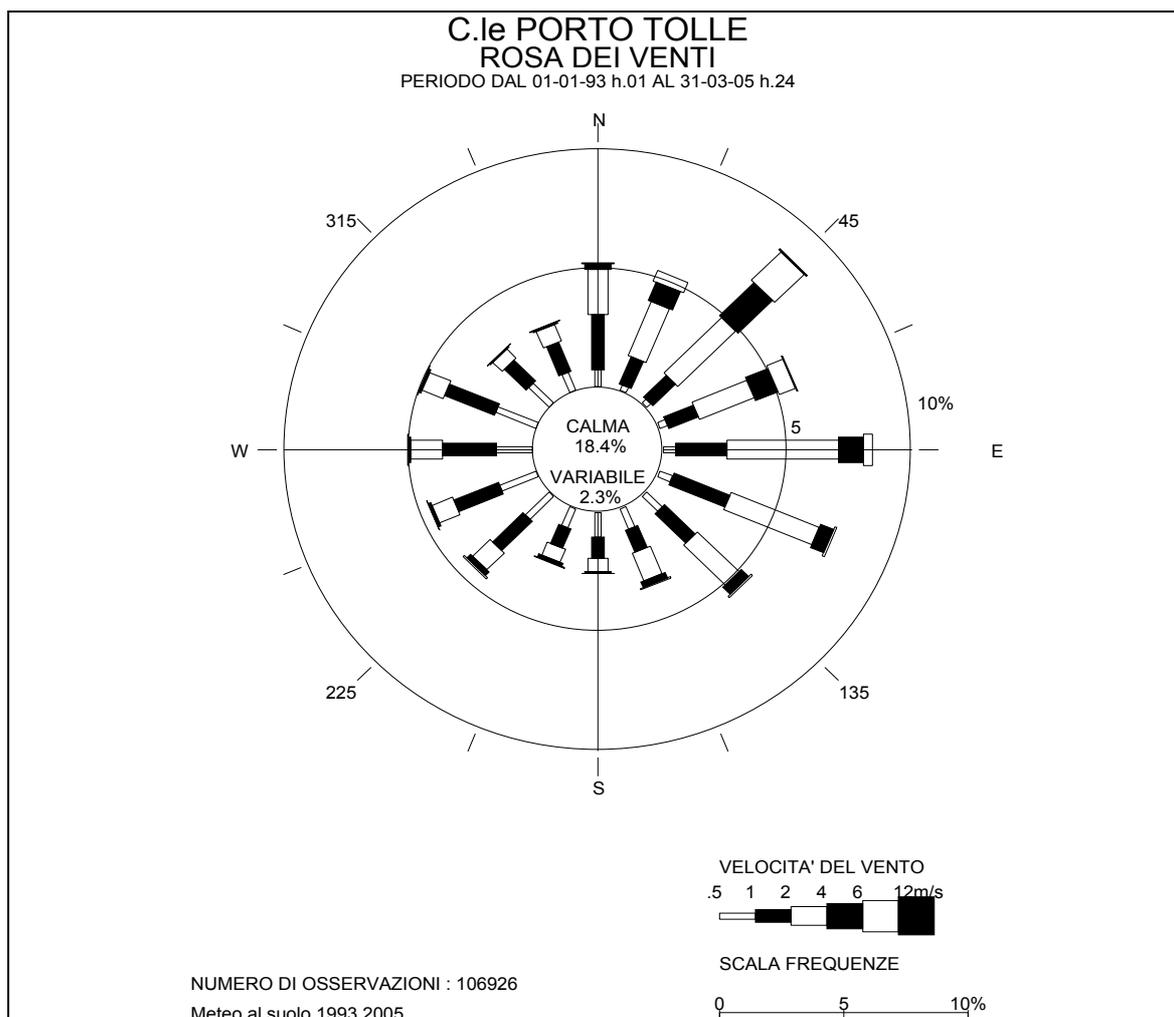


Fig. 4.1.1 – Rosa delle velocità del vento al suolo

4.1.2 Dati di moto ondoso

Come accennato, i dati di moto ondoso utilizzati provengono da due fonti di differente natura: dati RON (Rete Ondametrica Nazionale) e dati CNR.

I dati RON, scaricabili dal sito dell'APAT (www.telemisura.it), sono relativi al periodo dicembre 2002 – novembre 2004; invece, i dati forniti dal CNR si basano sulla ricostruzione, su base esaoraria, della serie storica delle mareggiate mediante modellazione matematica (periodo luglio 1992 – giugno 2002).

4.1.2.1 Dati RON

I dati RON fanno riferimento alla stazione denominata Punta della Maestra (Long. 12.83°, Lat. 44.97°), appartenente alla rete ondametrica nazionale. Come si può osservare in Fig. 4.1.2, la stazione è ubicata al largo del delta del Po, su un fondale di circa 30 m.

La descrizione del sito, desunta dai dati RON, appare piuttosto limitata, sia con riferimento al breve periodo di osservazione (circa 2 anni dal dicembre 2002 al novembre 2004) sia con riferimento alle consistenti rilevate nei dati in tale periodo (copertura annua pari a circa il 69% nel 2003 e a circa il 57% nel 2004).

Di seguito, in Tab. 4.1.1, si riportano le caratteristiche delle onde registrate dall'ondametro di Punta della Maestra suddivise per classi di altezza significativa (assunta corrispondente alla H_{m0} , fornita dalla R.O.N., con passo 0.25 m) e per settori di provenienza (passo 30°).

In Fig. 4.1.3, si riportano le rose delle registrazioni (in blu), delle energie (in rosso) e delle altezze massime (in verde), relative sempre alla stazione RON per il settore di traversia del paraggio (0° - 180°N). Le massime altezze registrate (pari a circa 5 m) provengono dal settore 0° - 90°N, settore in cui si registrano anche i maggiori picchi di energia. Condizioni diverse rispetto a queste si riscontrano per il settore da 90° -180°N, che è caratterizzato da onde più basse (inferiori ai 4 m), con percentuale di apparizione maggiore.



Fig. 4.1.2 - Ubicazione stazione ondometrica di Punta della Maestra (RON)

H _s (m)	SETTORI DI PROVENIENZA (°N)											
	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360
0.00-0.25	0.58	1.42	2.83	7.32	8.35	2.55	0.66	0.42	0.24	0.24	0.34	0.29
0.25-0.50	1.26	2.99	2.94	5.49	8.92	4.09	0.92	0.89	0.60	0.29	0.26	0.68
0.50-0.75	0.71	2.57	2.31	3.33	4.46	1.05	0.26	0.10	0.03	0.05	0.05	0.34
0.75-1.00	0.45	2.13	2.07	2.10	3.04	0.73	0.26	0	0	0.03	0	0.18
1.00-1.25	0.13	1.39	1.71	0.92	1.39	0.26	0.08	0	0.03	0	0.03	0.10
1.25-1.50	0.08	1.00	1.13	0.79	0.60	0.21	0.05	0	0	0.03	0	0.08
1.50-1.75	0.18	1.21	0.73	0.52	0.66	0.08	0	0	0	0	0	0
1.75-2.00	0.10	0.89	0.66	0.37	0.29	0	0.03	0	0	0	0.03	0
2.00-2.25	0	0.66	0.66	0.10	0.31	0	0	0	0	0	0	0
2.25-2.50	0	0.34	0.10	0.08	0.03	0	0	0	0	0	0	0
2.50-2.75	0	0.26	0.13	0.13	0	0	0.05	0	0	0	0	0
2.75-3.00	0	0.05	0.08	0.13	0	0	0	0	0	0	0	0
3.00-3.25	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0.03	0	0	0
3.25-3.50	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.50-3.75	0	0	0	0	0.03	0	0	0	0.03	0	0	0
3.75-4.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.00-4.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.25-4.50	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0	0	0
4.50-4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.75-5.00	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.00-5.25	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03

Tab. 4.1.1 - Regrazioni di moto ondoso relative alla stazione RON di Punta della Maestra

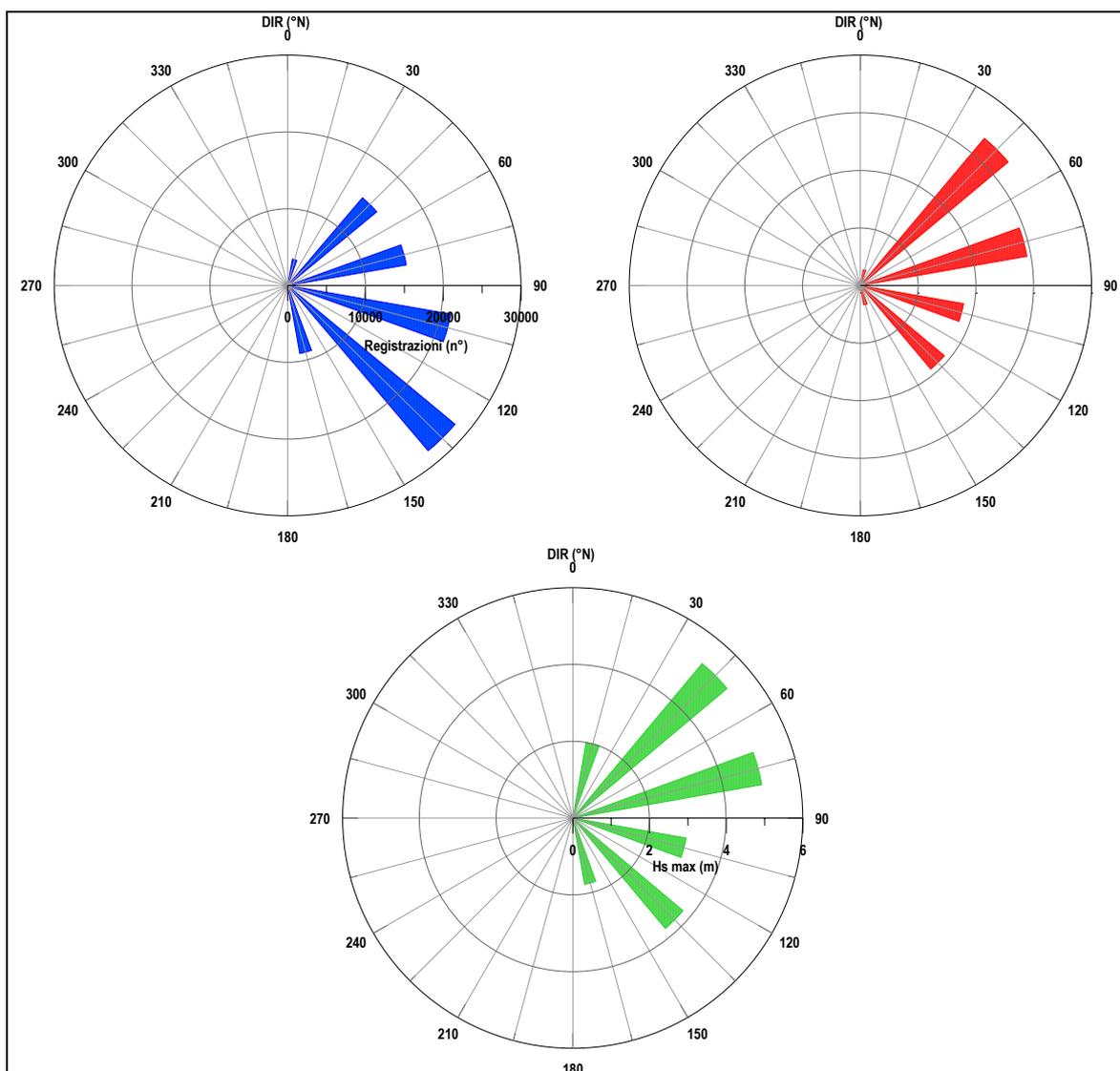


Fig. 4.1.3 - Rose delle registrazioni (in blu), delle energie (in rosso) e delle altezze massime (in verde)

4.1.2.1.1 Curva di durata

A partire dai dati di moto ondoso disponibili, è stato possibile ricostruire la curva di durata degli eventi riferita alla stazione di Punta della Maestra.

Tale curva è stata determinata per il settore di traversia 0° - 180° N (Fig. 4.1.4), a partire dalla Tab. 4.1.1, associando a ciascuna classe di altezza significativa la relativa percentuale di superamento espressa in giorni/anno.

La curva evidenzia come lo specchio di mare antistante il delta del fiume Po sia caratterizzato da moto ondoso di intensità generalmente modesta; i due metri di altezza significativa, per esempio, sono mediamente superati per meno di 15 giorni all'anno.

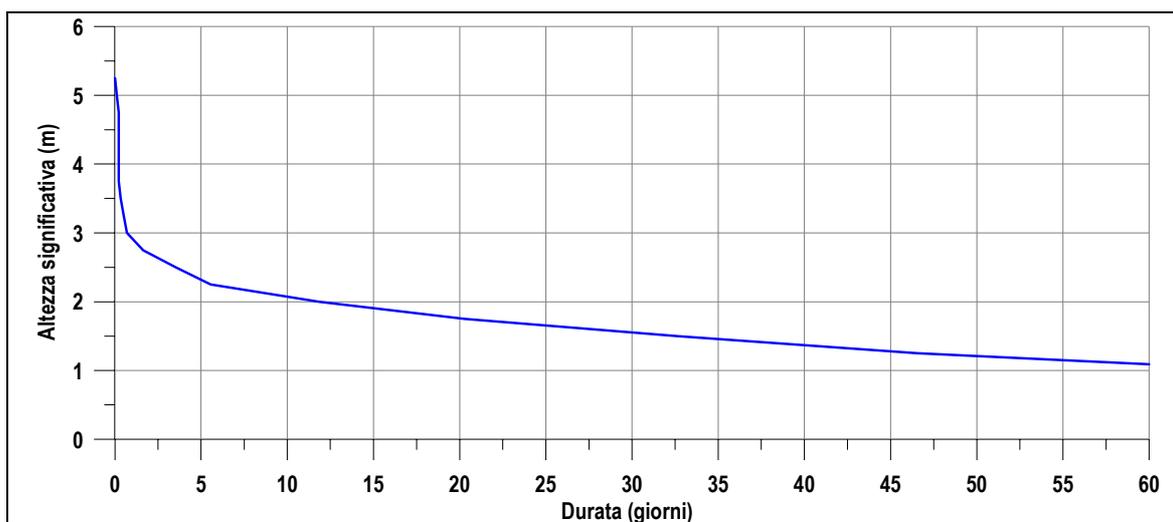


Fig. 4.1.4 - Curva di durata del settore di traversia 0° - 180°N (dati RON)

4.1.2.2 Dati CNR

I dati forniti dal CNR si basano sulla ricostruzione della serie storica delle mareggiate mediante modellazione matematica dei fenomeni di generazione/dissipazione del moto ondoso partendo dai dati di vento ricavati dalle carte bariche. Attraverso tali dati è stato possibile definire il clima ondoso in corrispondenza del punto di coordinate (Long. 13.0°, Lat. 45.0°), situato nell'Alto Adriatico nella zona antistante il delta del Po e posto su un fondale di circa 35 m (Fig. 4.1.5).

Nello specifico si tratta della ricostruzione delle condizioni meteomarine ottenute mediante modelli matematici (calibrati in base a dati da satellite –topex poseidon- e dati rilevati da boe ondometriche) utilizzando i dati meteorologici ottenuti dall'archivio del Centro Meteorologico Europeo (ECMWF).

L'informazione è fornita su di una serie di punti uniformemente distribuiti con un intervallo di 0.5 gradi geografici (55 km in latitudine; in longitudine l'intervallo dipende dalla latitudine ed è di circa 40 km alle nostre latitudini). Un esempio della distribuzione dei punti di output del modello WAM con risoluzione 0.5° è fornito dalla Fig. 4.1.6, che mostra la loro distribuzione per il Mediterraneo Occidentale. L'output del modello WAM viene immagazzinato al centro europeo sotto forma di campi esaorari. Le informazioni originali, disponibili come campi bidimensionali, sono organizzate in serie temporali, che comprendono altezza significativa H_s , periodo medio spettrale e di picco (T_{01} e T_p), direzione media di provenienza (DIR). I dati coprono il periodo luglio 1992 - giugno 2002, ad intervalli di sei ore. Per ragioni di proprietà dei dati originali le serie temporali non sono cedibili a terzi, ma sono state utilizzate per ricavare la climatologia nel punto offshore prescelto.

In Tab. 4.1.2 sono riportate le caratteristiche delle onde "al largo", cioè nel punto cui si riferiscono i dati CNR. In Fig. 4.1.7 sono, invece, riportate rispettivamente le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze massime al largo, riferite al settore di traversia 0°-180°N. Si può notare che gli eventi con percentuale di apparizione più elevata corrispondono a mareggiate provenienti da 55° N (Bora) e da 145°N (Scirocco). Inoltre, si possono osservare due picchi di energia: il massimo valore dell'energia si ha in corrispondenza a mareggiate di Bora, mentre il secondo picco si ha in corrispondenza di mareggiate di Scirocco.

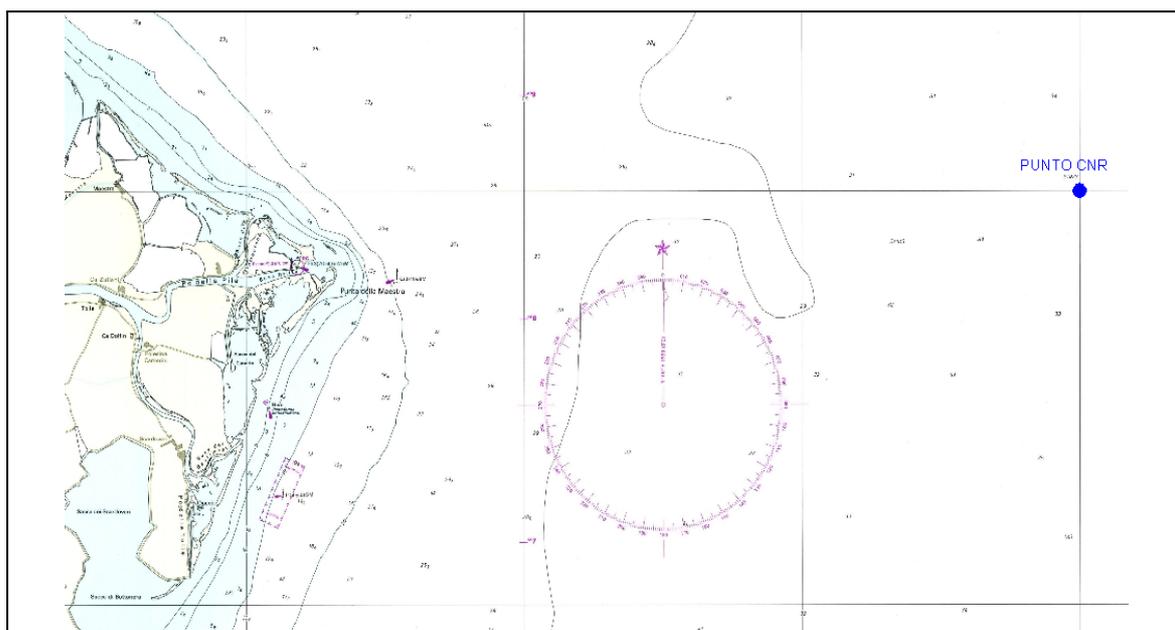


Fig. 4.1.5 - Ubicazione del punto CNR di coordinate 13.0° E, 45.0° N

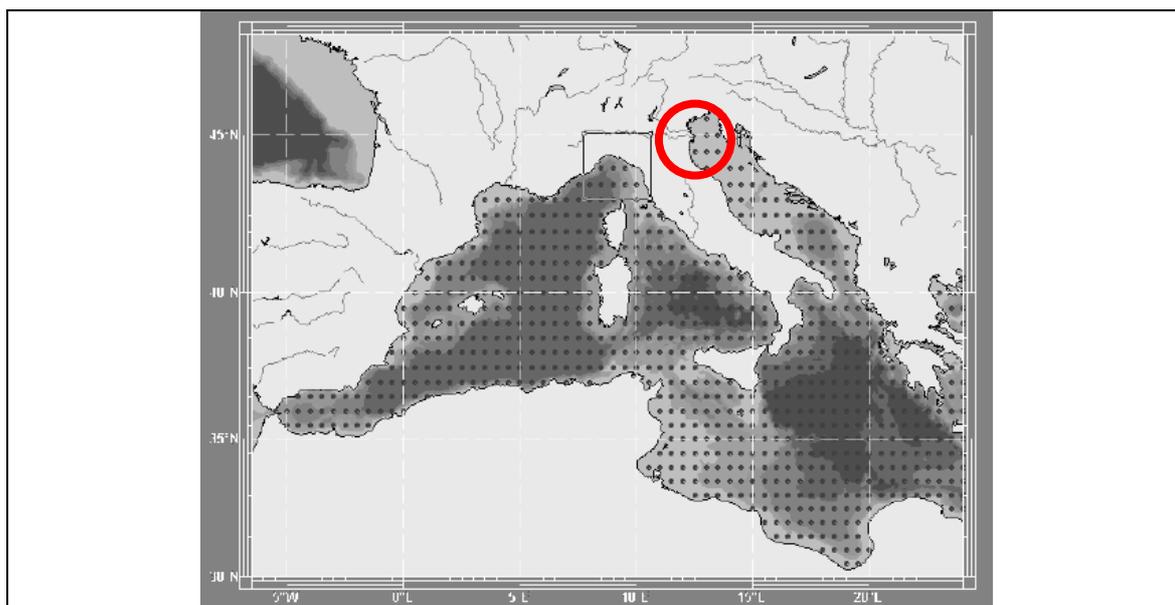


Fig. 4.1.6 - Mediterraneo occidentale. Distribuzione dei punti WAM

DIR (°N)	Altezza significativa (m)											Frequenze N _{rec} (1/10 ⁵)	Hmax	
	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50			
5	1428	151	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1600	1.50
15	1812	488	131	41	7	0	0	0	0	0	0	0	2479	2.50
25	1553	516	186	83	48	14	21	0	7	0	0	0	2428	4.50
35	1717	1045	392	138	97	62	28	0	0	0	0	0	3479	3.50
45	1718	1539	661	281	234	159	69	62	14	7	0	0	4744	5.00
55	1794	1422	962	543	454	282	116	21	21	14	14	0	5643	5.50
65	1512	1423	948	543	323	269	75	76	21	14	28	0	5232	5.50
75	1408	1203	585	240	166	117	14	14	7	7	0	0	3761	5.00
85	1595	982	406	171	75	35	7	0	7	0	7	0	3285	5.50
95	1491	804	345	103	14	14	0	0	7	0	0	0	2778	4.50
105	1732	715	274	117	14	14	7	0	14	0	0	0	2887	4.50
115	2315	894	338	124	28	41	0	0	0	0	0	0	3740	3.00
125	3771	1093	503	152	69	49	41	7	7	0	0	0	5692	4.50
135	8744	2295	708	186	89	54	14	7	14	7	0	0	12118	5.00
145	7024	3483	1327	494	226	69	42	28	28	14	0	0	12735	5.00
155	3407	1712	598	192	124	48	14	0	0	0	0	0	6095	3.50
165	1546	888	309	130	62	21	7	7	7	0	0	0	2977	4.50
175	1272	632	227	35	69	21	0	0	0	0	0	0	2256	3.00
185	1112	516	103	89	14	7	0	0	0	0	0	0	1841	3.00
195	1237	475	103	76	35	7	0	0	0	0	0	0	1933	3.00
205	1472	440	144	96	28	0	0	0	0	0	0	0	2180	2.50
215	1572	419	131	28	7	0	0	0	0	0	0	0	2157	2.50
225	1043	330	103	28	7	0	0	0	0	0	0	0	1511	2.50
235	461	219	76	14	0	0	0	0	0	0	0	0	770	2.00
245	405	124	55	7	0	0	0	0	0	0	0	0	591	2.00
255	370	152	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	543	1.50
265	255	102	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	391	1.50
275	180	69	28	7	0	0	0	0	0	0	0	0	284	2.00
285	172	0	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	200	2.00
295	144	14	14	7	0	0	0	0	0	0	0	0	179	2.00
305	83	35	7	0	7	0	0	0	0	0	0	0	132	2.50
315	178	55	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	240	2.00
325	329	34	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370	1.50
335	261	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	316	1.00
345	543	35	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	592	1.50
355	1752	61	21	7	0	0	0	0	0	0	0	0	1841	2.00
	57408	24420	9796	3953	2197	1283	455	222	154	63	49	0	100000	

Tab. 4.1.2 - Regrazioni di moto ondoso ordinate per altezza e direzione relative al punto CNR

I dati del clima ondoso forniti dal CNR comprendono l'altezza significativa, anche in questo caso assunta corrispondente alla H_{m0} , e i periodi caratteristici da associare alle diverse classi di altezza e direzione di provenienza, stimati in base alla serie storica.

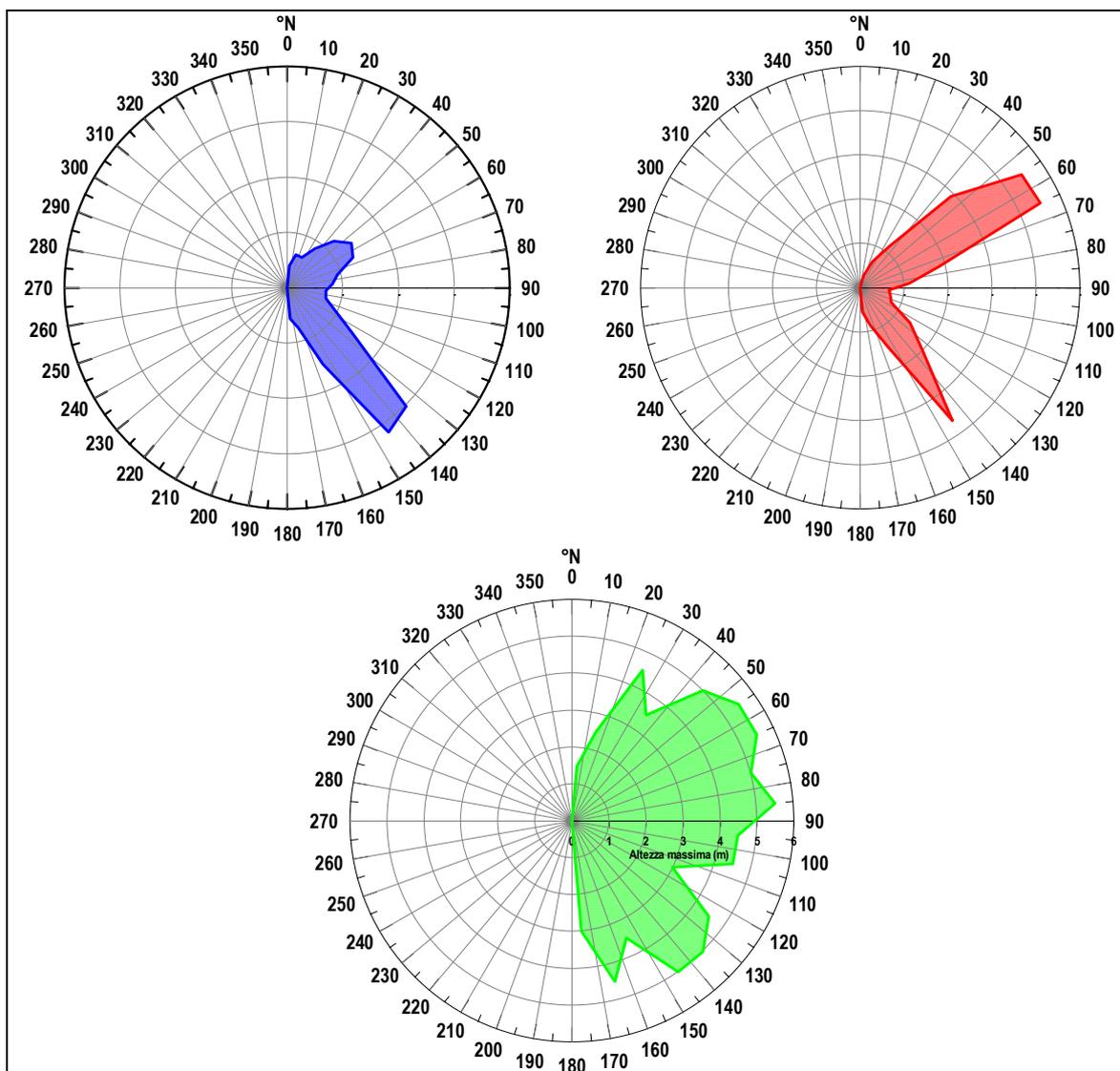


Fig. 4.1.7 - Rose delle registrazioni (in blu), delle energie (in rosso) e delle altezze massime (in verde)

4.1.2.2.1 Statistica degli eventi estremi

Utilizzando i dati CNR disponibili, è stata ricostruita una statistica degli eventi estremi relativa al periodo luglio 1992 - giugno 2002, utilizzando la distribuzione di Gumbel.

In particolare, sono state considerate le altezze significative massime relative a ciascun anno di osservazione, differenziando tra eventi di Bora (0° - 70° N), Levante (70° - 110° N) e Scirocco (110° - 180° N).

Le altezze significative massime registrate negli anni 1992 e 2002 non sono state considerate perché si riferiscono ad un periodo di osservazione di circa sei mesi e non risultano pertanto essere

dati significativi per l'analisi dei massimi annuali. Fa eccezione al criterio descritto il caso in cui il valore massimo registrato nell'anno parziale corrisponda al valore massimo di altezza significativa registrato nell'intero periodo di misura.

Di seguito, in Fig. 4.1.8, sono riportati in un unico grafico i risultati delle elaborazioni statistiche, ottenuti utilizzando il metodo di Gumbel, per i tre settori di provenienza citati.

In Tab. 4.1.3, si riportano le altezze significative corrispondenti a periodi di ritorno di 5, 10, 25 anni per ciascun settore.

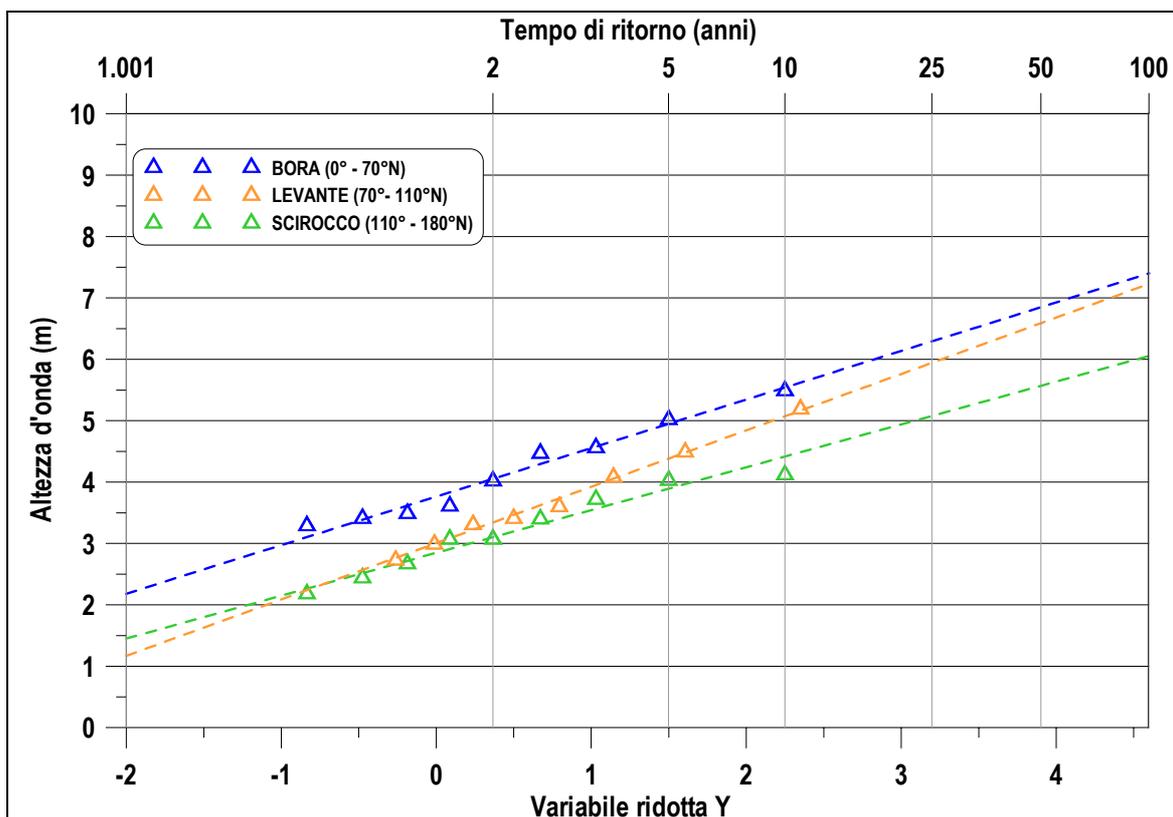


Fig. 4.1.8 - Statistica delle onde estreme per eventi di Bora, Levante e Scirocco

EVENTI	BORA	LEVANTE	SCIROCCO
	0°-70°N	70°-110°N	110°-180°N
T_R	H_s		
(anni)	(m)		
5	4.95	4.38	3.89
10	5.54	5.07	4.42
25	6.29	5.94	5.08

Tab. 4.1.3 - Risultati statistica degli estremi per eventi di Bora, Levante e Scirocco

4.1.2.2.2 Curva di durata

A partire dai dati disponibili, sono state, da ultimo, ricostruite le curve di durata riferite al punto al largo antistante il sito oggetto dell'indagine. Come è noto, la curva di durata consente di mettere in relazione le caratteristiche di un evento con la sua durata media annuale.

Di seguito vengono riportati i grafici relativi alle curve di durata rispettivamente per tutto il settore di traversia 0° - 180°N (Fig. 4.1.9) e suddivisa per settori di Bora 0° - 70°N, Levante 70° - 110°N e Scirocco 110° - 180°N (Fig. 4.1.10).

Va sottolineato che la curva di durata ricavata dai dati CNR fornisce una situazione leggermente diversa (altezze più elevate per durate corrispondenti) rispetto a quella ricavata in base ai dati RON; la differenza può essere giustificata in relazione al differente posizionamento del punto di "misura", ma probabilmente anche alle numerose lacune dei dati RON.

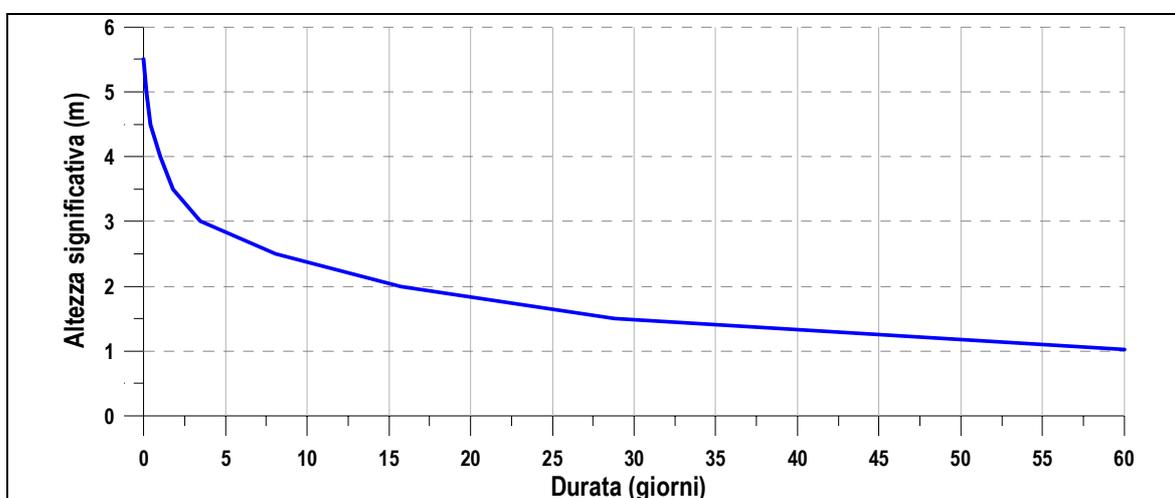


Fig. 4.1.9 - Curva di durata del settore di traversia 0° - 180°N (dati CNR)

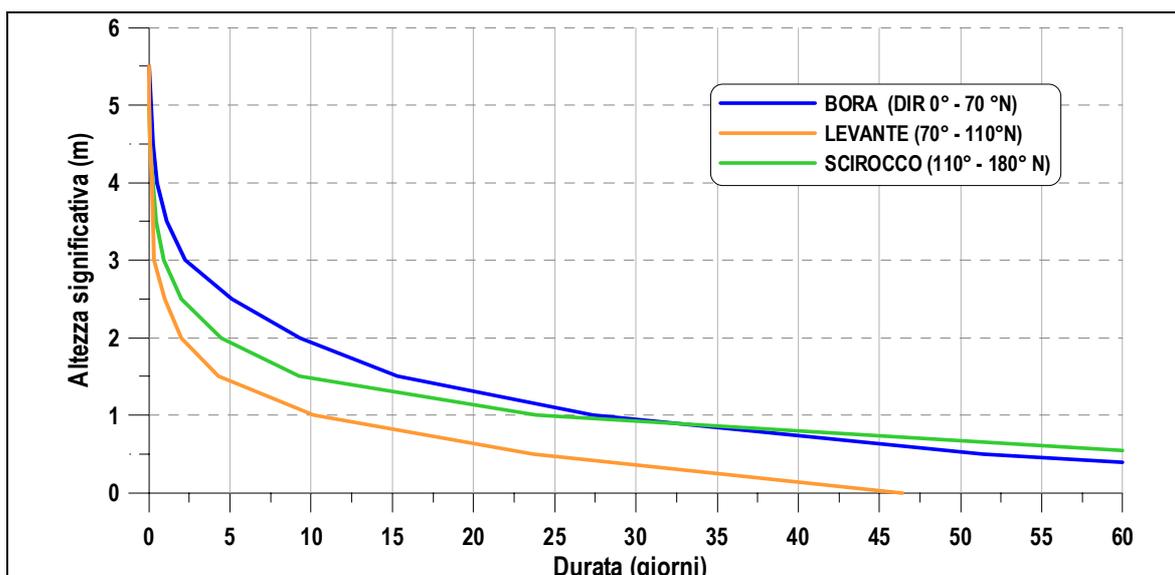


Fig. 4.1.10 - Curva di durata suddivisa per settori di Bora, Levante e Scirocco (dati CNR)

4.1.3 Dati di marea

I dati di marea, utilizzati nel presente studio, sono stati scaricati dal sito dell'APAT (www.idromare.com) e si riferiscono alla stazione RMN di Venezia. Il mareografo, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale, si trova alla Bocca di Lido presso la diga Sud in corrispondenza del punto di coordinate (Long. 12° 25' 22", Lat. 45° 25' 22"); vedi Fig. 4.1.11); i livelli di marea registrati sono riferiti allo zero dell'I.G.M..

I dati utilizzati, registrati ad intervalli orari, si riferiscono al periodo 28 agosto 1986 – 31 dicembre 2003, con alcune limitate lacune parziali (registrazioni mancanti). La serie storica dei dati registrati dal mareografo è riportata in fig. 4.1.12. Le registrazioni sono state depurate dei dati mancanti e di una registrazione evidentemente anomala; infatti il livello di marea oscilla tra 1.3 m e -1.01 m, con l'anomalia rappresentata da un livello di -1.7 m, registrato l'11 luglio 2002 alle ore 11 (dato probabilmente errato).

Partendo da tali registrazioni, sono stati separati i livelli di marea negativi da quelli positivi (in questi ultimi sono state inserite anche le registrazioni con valore 0 m); le registrazioni sono state quindi riordinate in ordine decrescente (nel caso dei valori positivi) e crescente (nel caso dei valori negativi). In questo modo è stato possibile ricostruire le curve di durata dei livelli positivi e negativi di marea riferiti ad un anno tipo, ottenuto mediando le registrazioni relative all'intero periodo considerato (ciascuna registrazione è stata presa in considerazione con peso pari ad 1).

In Fig. 4.1.13 è riportata la curva di durata dei livelli di marea, distinguendo tra livelli di marea positivi e negativi. Si può osservare come, mediamente, nell'anno tipo così costruito, siano più frequenti gli eventi di marea superiore al medio mare. Infatti, oltre ai fenomeni di carattere astronomico, vanno considerati anche fenomeni di carattere meteorologico (es: mareggiate eccezionali, variazioni di pressione, ecc.) che tendono, mediamente, a provocare localmente, all'altezza delle bocche di porto della Laguna di Venezia, un innalzamento del livello medio del mare.



Fig. 4.1.11 - Ubicazione della stazione RMN di Venezia di coordinate 12° 25' 25" E, 45° 25' 22" N

Ai fini della presente indagine, risulta di particolare importanza l'analisi dei livelli minimi di marea, per

verificare la compatibilità della via navigabile con i natanti previsti anche in condizioni di bassa marea. A tale riguardo, il grafico di Fig. 4.1.13 in basso, indica che i livelli permangono al di sotto della quota di -0.4 m s.l.m per circa 30 giorni all'anno e al di sotto della soglia di -0.5 m s.l.m per circa 10 giorni all'anno.

E' importante rilevare, peraltro, che la durata dei livelli negativi risulta dall'aggregazione di dati appartenenti ad eventi di marea diversi, e fornisce quindi un'indicazione solo parzialmente significativa nei riguardi del problema della navigazione.

Più interessante, al riguardo, risulta la valutazione del numero di eventi di bassa marea che si possono verificare durante l'anno. Per questa ragione è stata effettuata anche un'elaborazione sui dati del triennio 2000-2002, isolando e conteggiando tutti gli eventi (cavi di marea) durante i quali il livello è sceso al di sotto di una prefissata soglia. La Fig. 4.1.14 riporta il risultato di questo calcolo. Da essa si evince che il numero di eventi (cavi di marea) in cui il livello, nei tre anni considerati, è sceso sotto la soglia di -0.4 m è pari a 596 (circa 200 all'anno), mentre quello degli eventi in cui il livello stesso è sceso sotto la soglia di -0.5 m s.l.m., è pari a 359 (circa 120 all'anno).

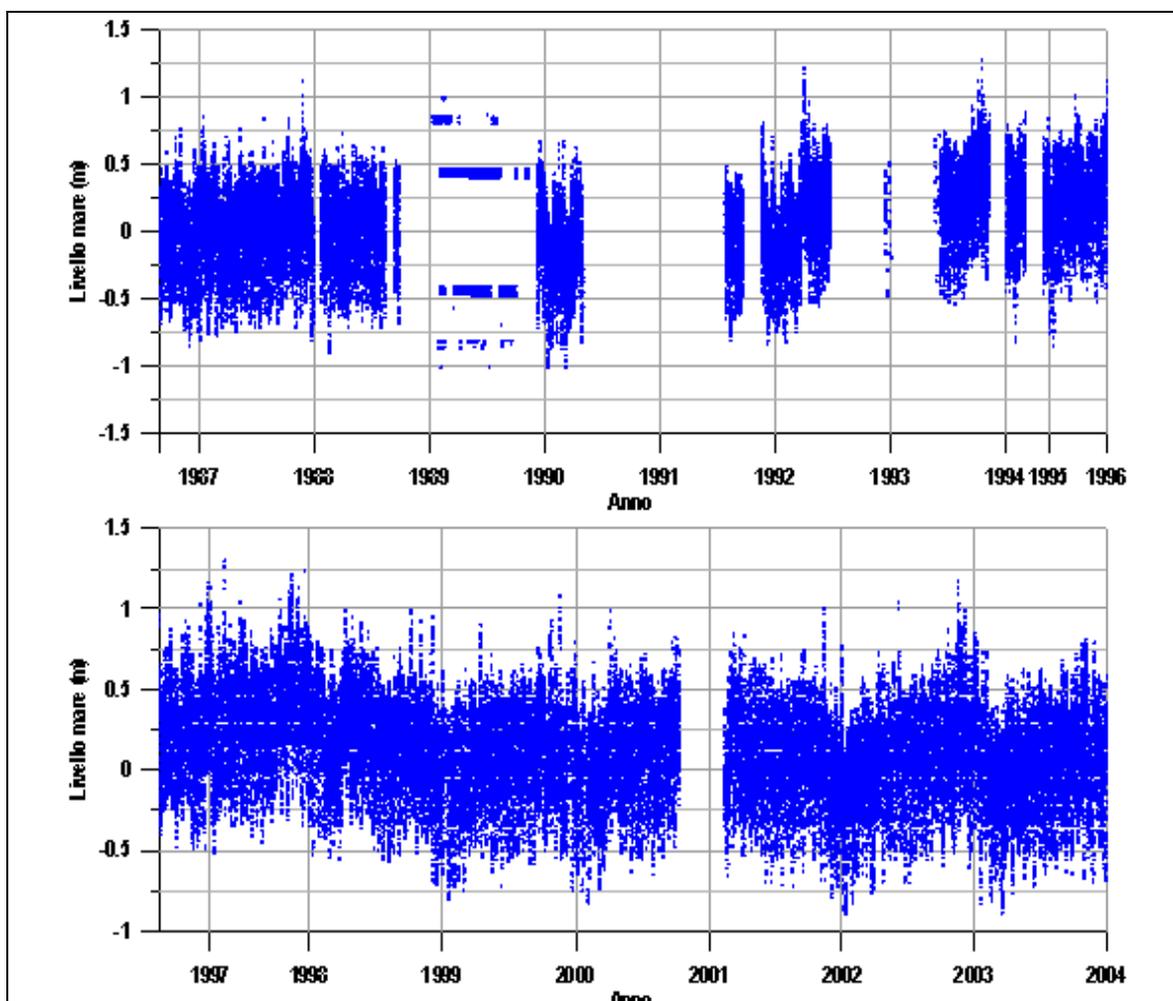


fig. 4.1.12 - Andamento livelli di marea agosto 1986 – dicembre 2003

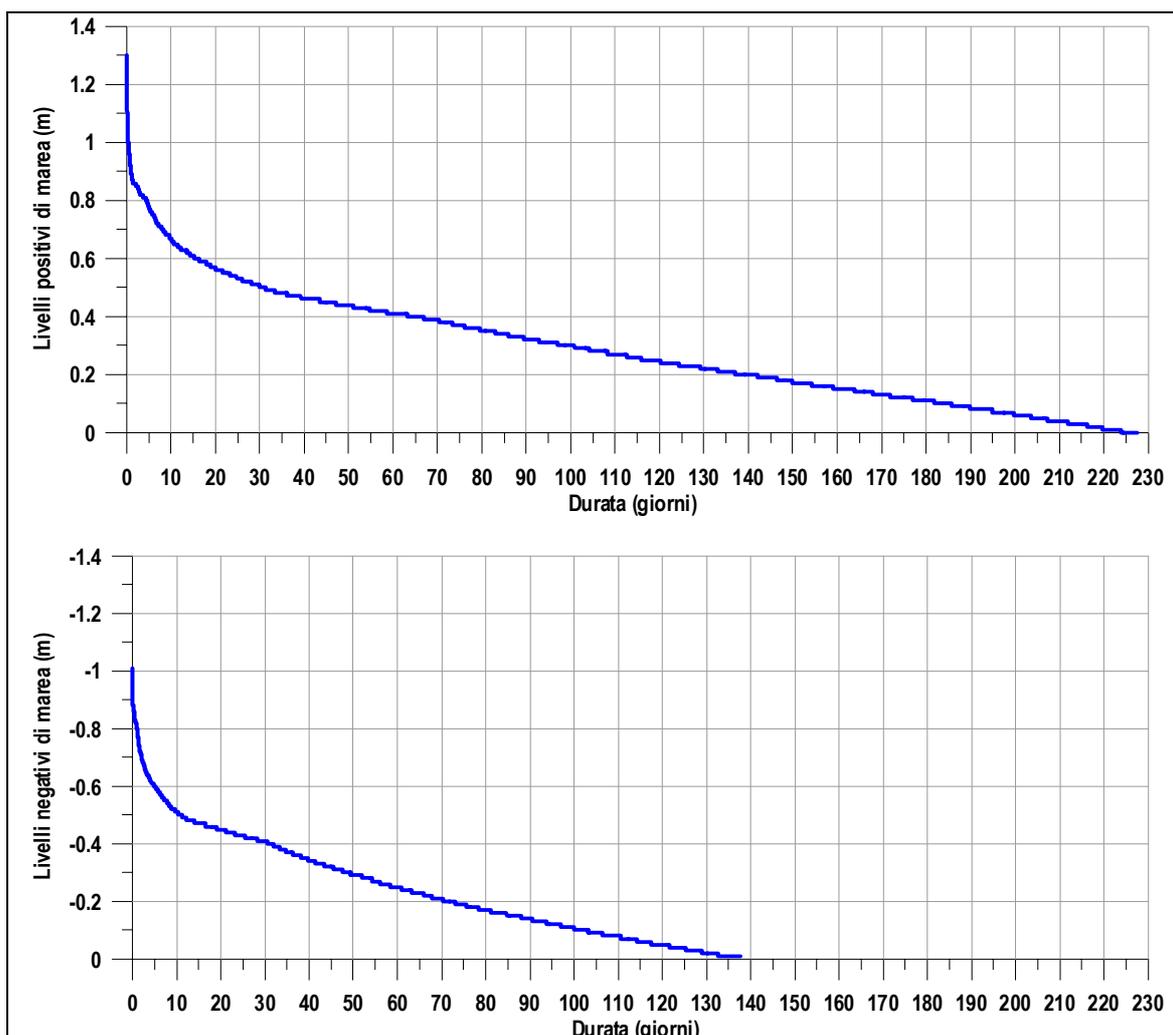


Fig. 4.1.13 - Curva di durata dei livelli di marea

livello	ore	%	casi
0.00	11403	43.35	1740
-0.10	8020	30.49	1528
-0.20	5385	20.47	1217
-0.30	3406	12.95	891
-0.40	1924	7.31	596
-0.50	942	3.58	359
-0.60	400	1.52	174
-0.70	116	0.44	62
-0.80	25	0.10	13
-0.90	4	0.02	4
-1.00	0	0.00	0

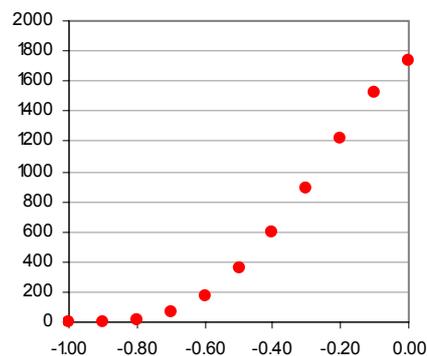


Fig. 4.1.14 – Numero di eventi di bassa marea nel periodo 2000-2003

4.2 Propagazione del moto ondoso

La propagazione del moto ondoso sottocosta è stata ricostruita a partire dai dati al largo forniti dal CNR e sulla base della batimetria aggiornata del sito oggetto di studio, ricavata dalle carte nautiche e dai più recenti rilievi locali a disposizione.

Per le necessità dello studio, si tratta di un'analisi indispensabile, poiché le onde al largo, muovendo in direzione della costa, risentono progressivamente degli effetti del fondale, che ne modificano le caratteristiche e generano una serie di fenomeni dai quali non è possibile prescindere se si vogliono inquadrare correttamente i processi di interazione tra correnti costiere e correnti in ingresso e/o in uscita dalle foci fluviali e lagunari. Da tali processi, in particolare, dipende l'evoluzione dei fondali e la morfologia della linea di riva di tutta la fascia di mare più prossima al litorale che potrebbero influenzare negativamente taluni aspetti della navigazione.

Nello specifico l'analisi è stata condotta mediante il modello numerico SWAN (Simulation WAVes Nearshore), descritto sinteticamente al paragrafo 4.2.1 e, più in dettaglio, in appendice alla presente relazione (paragrafo 8.2).

4.2.1 Descrizione sintetica del codice di calcolo utilizzato

SWAN (acronimo per Simulation WAVes Nearshore) è un modello numerico espressamente sviluppato per ottenere stime attendibili dei parametri d'onda in aree costiere. Il modello si basa sull'equazione di conservazione dell'azione d'onda, e tiene conto di varie forzanti e fattori dissipativi. SWAN è un modello della terza generazione, cioè dinamico e completamente spettrale in frequenza e direzione. Il modello e il relativo codice di calcolo sono stati sviluppati dall'Università di Delft (Olanda) e contano ormai come utenti - validatori moltissimi Istituti di Ricerca in più di trenta paesi.

Utilizzando il modello SWAN si può tenere conto dei seguenti processi: rifrazione dovuta al fondo e ai gradienti di corrente, shoaling dovuto al fondo e ai gradienti di corrente, blocking e riflessione dovuti alla corrente. Il modello inoltre considera le seguenti forzanti/processi dissipativi: generazione dovuta al vento, dissipazione dovuta al whitecapping, frangimento, attrito al fondo, redistribuzione dell'energia sullo spettro dovuta ad interazioni non lineari (interazioni a tre e a quattro onde).

La diffrazione e la riflessione non sono, invece, modellati da SWAN. Il modello non è perciò affidabile in presenza di forti gradienti di profondità, nelle immediate vicinanze di ostacoli e all'interno di porti o bacini protetti. Si tratta peraltro di situazioni che non interessano le presenti indagini, per le quali lo schema di calcolo inquadra con sufficiente approssimazione gli aspetti di maggiore rilevanza, anche con riferimento agli sforzi addizionali (radiation stress) che generano le correnti costiere e ai conseguenti fenomeni di risospensione dei sedimenti sotto costa.

4.2.2 Messa a punto del modello

La batimetria utilizzata per la discretizzazione del campo di moto è stata ricavata usando come base la più recente cartografia dell'Istituto Idrografico Militare ed alcuni recenti rilievi locali eseguiti dal COVNI (Centro Operativo Veneto per la Navigazione Interna della Regione Veneto) nel 2002 e nel 2004.

Il dominio di calcolo è stato discretizzato con un sistema di griglie annidate: sono state, infatti, impiegate 3 griglie con passo decrescente (BIG, MEDIUM, SMALL). La griglia di dettaglio (SMALL GRID), centrata nell'area di interesse.

La griglia maggiore (BIG GRID, vedi Fig. 4.2.1) ha origine nel punto di coordinate (2307570.52 E, 4966345.83 N), ha dimensione 30000 × 54000 m e maglia quadrata di passo 200 m. Le coordinate dei punti di origine delle griglie sono espresse nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

Per le simulazioni annidate sono state utilizzate, in successione, due griglie meno estese con maggiore risoluzione:

- MEDIUM GRID (Fig. 4.2.2): origine (2314671.83 E, 4989985.82 N), passo 50 m, dimensioni 8100 × 10000 m, inclinata di 39° rispetto all'orizzontale;
- SMALL GRID (Fig. 4.2.3): origine (2312415.35 E, 4993884.65 N), passo 10 m, dimensioni 2700 × 1700 m, inclinata di 39° rispetto all'orizzontale.

Per le simulazioni oggetto del presente studio, i parametri significativi del moto ondoso sono stati rappresentati con uno spettro bidimensionale di tipo JONSWAP avente fattore di picco (γ) e spreading direzionale (s) desunti dalla ripidità dell'onda (mediante la formula di Wilson, 1965). Lo spettro è stato poi discretizzato in 25 frequenze ($f_1=0.04$ Hz, $f_{n+1}=1.1 f_n$) e 24 direzioni (equispaziate di 15°).

In questo contesto è stata utilizzata la tecnica del ciclo annidato: si è inizialmente usata una griglia di calcolo di 30000 × 54000 m (BIG GRID), discretizzata in maglie di calcolo di 200 m di lato. Le condizioni al contorno sono state assunte costanti lungo i bordi della griglia, con l'accortezza di scalare i parametri d'onda in funzione della profondità nella porzione di bordo immediatamente sottoriva, dove avvengono fenomeni di frangimento dovuti al fondo. I risultati della prima simulazione sono serviti da input per un secondo ciclo di calcolo effettuato su una griglia di calcolo di 8100 × 10000 m (MEDIUM GRID), discretizzata in maglie di calcolo di 50 m di lato. Successivamente i risultati della seconda simulazione sono serviti da input per un terzo ciclo di calcolo effettuato su una griglia di 2700 × 1700 m (SMALL GRID), discretizzata in maglie di calcolo di 10 m di lato e centrata sull'area di interesse (Porto Levante).

Per quanto riguarda i fenomeni generativi potenzialmente in grado di avvenire durante la propagazione dal largo verso riva, nelle simulazioni è stata considerata la condizione "mild wind", che presuppone fenomeni generativi legati a un vento di media intensità con effetti dissipativi trascurabili.

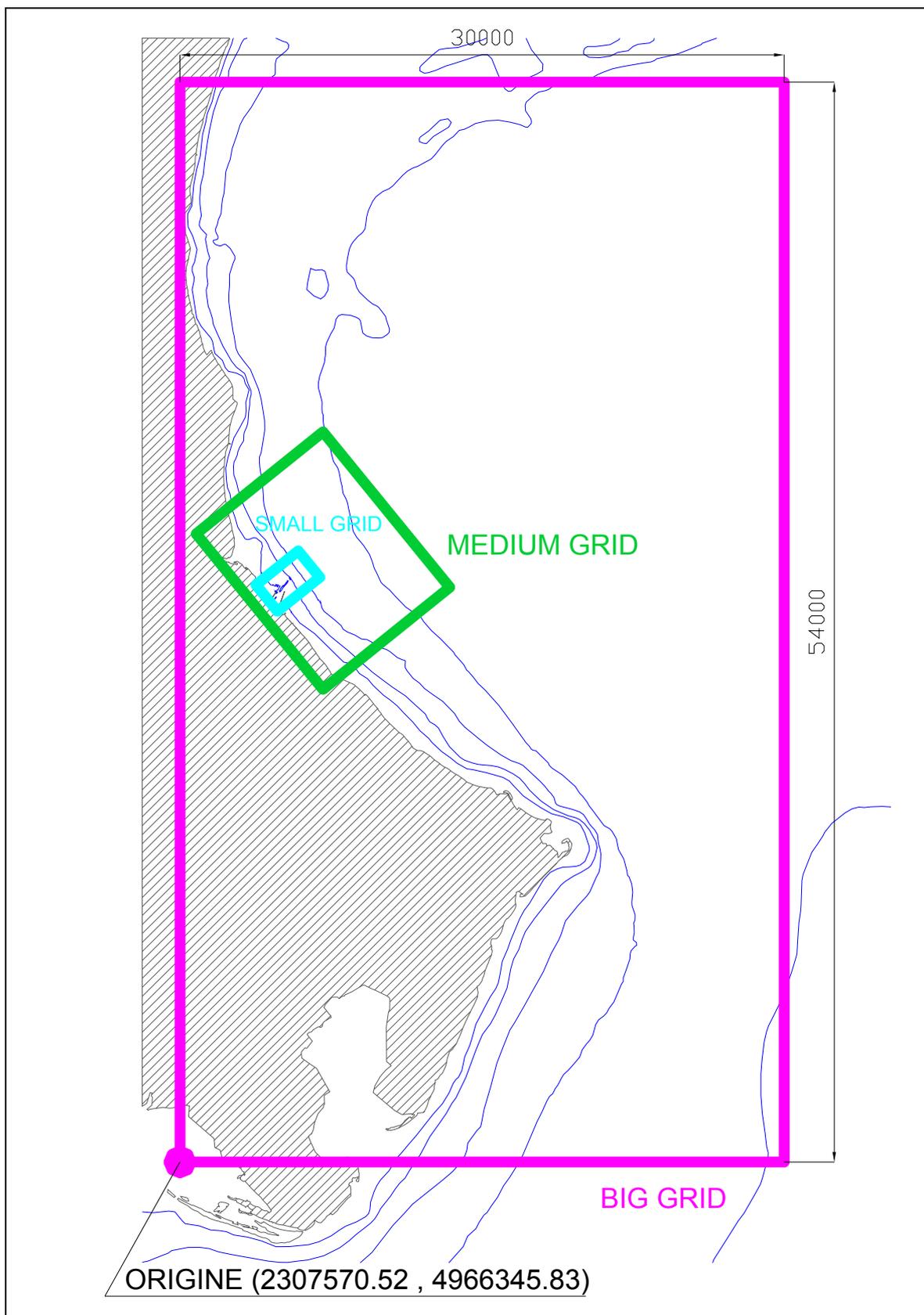


Fig. 4.2.1 - BIG GRID (30000 X 54000 m) - passo 200 m

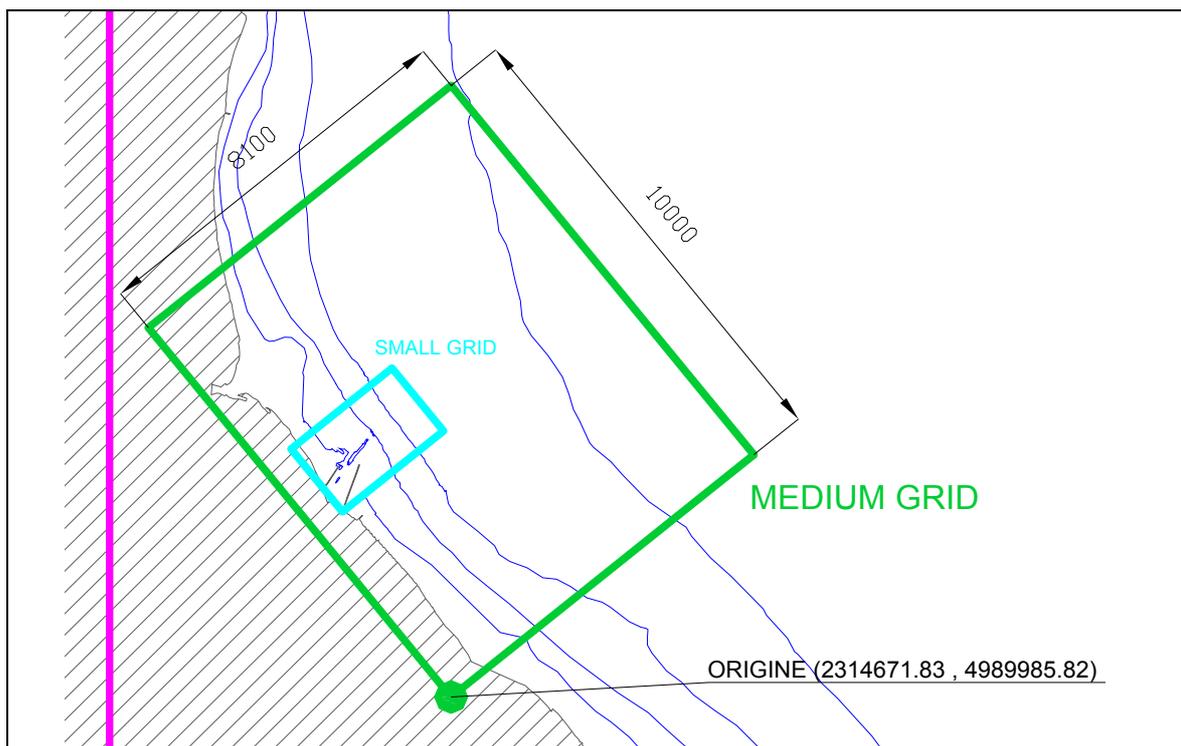


Fig. 4.2.2 - MEDIUM GRID (8100 X 10000 m) - passo 50 m

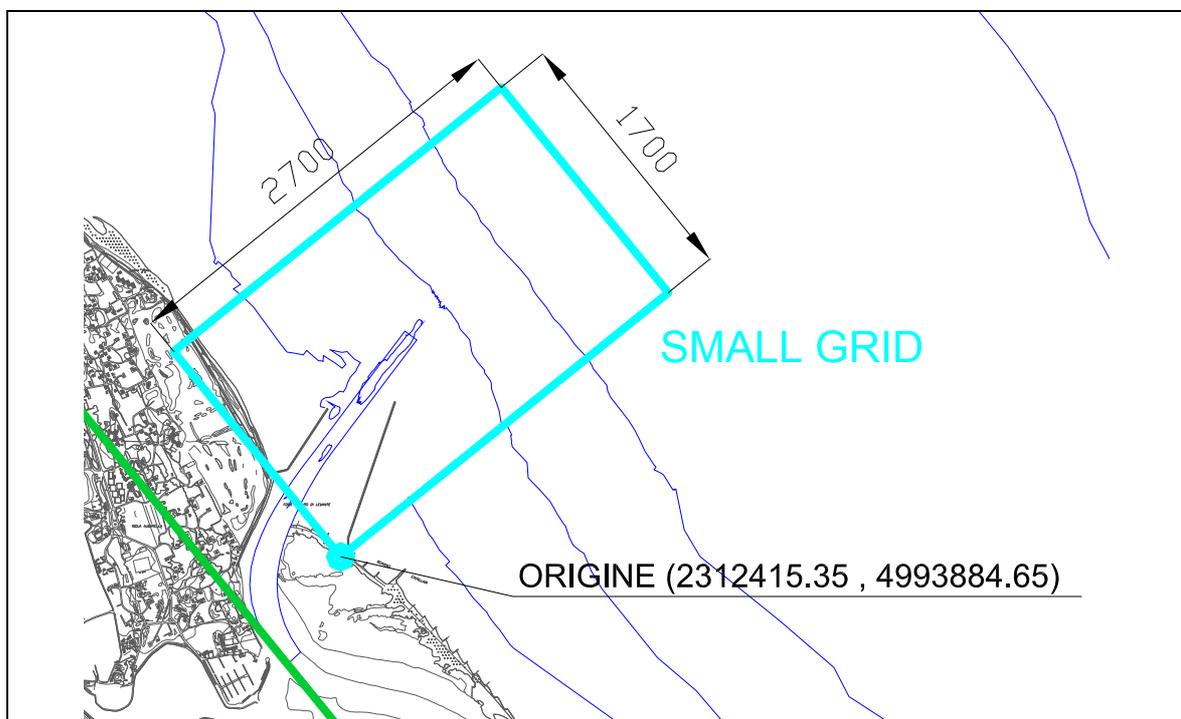


Fig. 4.2.3 - SMALL GRID (2700 X 1700 m) - passo 10 m

4.2.3 Studio della propagazione locale del moto ondoso

La determinazione del clima ondoso locale è stata condotta utilizzando il modello matematico descritto al paragrafo 4.2.1 e in appendice al paragrafo 8.2.

I dati di moto ondoso, utilizzati come input per il modello, sono quelli forniti dal CNR, i quali, con riferimento al sito in esame, risultano essere più completi rispetto a quelli scaricati dal sito dell'APAT (stazione RON di Punta della Maestra).

Le simulazioni della propagazione del moto ondoso dal punto CNR verso riva sono state effettuate per alcune onde, ritenute significative ai fini della determinazione del clima del paraggio considerato. In particolare, le onde da simulare sono state scelte in base a due approcci differenti:

- propagazione di onde estreme, derivanti dall'analisi dell'elaborazione statistica di Gumbel relativa ai dati CNR, riportata in dettaglio al paragrafo 4.1.2.2.1;
- propagazione di onde con durata annuale di 1 giorno e 7 giorni, derivanti dall'analisi della curva di durata relativa ai dati CNR, riportata in dettaglio al paragrafo 4.1.2.2.2.

Le onde estreme, come si può osservare in Fig. 4.2.4, vengono ricavate dalla retta interpolatrice derivante dalla statistica di Gumbel, ottenuta suddividendo il settore di traversia del paraggio (0° - 180°N) nei tre settori principali di provenienza (Bora, Levante, Scirocco).

Pertanto sono state considerate tre direzioni principali di provenienza (55°N, 85°N e 135°N), rappresentative di ciascun settore e, per ciascuna di queste, le altezze significative relative ad un tempo di ritorno rispettivamente di 5, 10 e 25 anni. Complessivamente sono state quindi considerate nelle simulazioni 9 onde, riportate in Tab. 4.2.1.

Per quanto riguarda la scelta del periodo (T_{01}) da associare a ciascuna onda, è stato seguito il seguente approccio, basato sull'elaborazione della serie storica relativa al periodo luglio 1992 - giugno 2002. Innanzitutto, sono state considerate solo le registrazioni con altezza significativa superiore al metro, in maniera tale da ottenere una relazione valida per onde con H_s rappresentativa per lo studio in questione. Procedendo con l'analisi, per ciascuno dei settori in cui è stata suddivisa la traversia del paraggio (Bora 0°-70°N, Levante 70°-110°N e Scirocco 110°-180°N), è stata effettuata un'ulteriore schematizzazione, discretizzando per classi di altezza e di periodo e assegnando a ciascuna classe il relativo peso (numero di registrazioni). Sono state considerate, quindi, le coppie (H_s, T_{01}) costituite dagli elementi centrali della partizione e, utilizzando questi valori, è stato poi calcolata la miglior approssimante dei dati pesando ogni coppia con il numero di registrazioni della classe corrispondente. L'equazione utilizzata è del tipo:

$$T_{01} = A + B \cdot \sqrt{H_s} ,$$

dove A e B rappresentano rispettivamente l'intercetta con l'asse delle ordinate e la pendenza della retta. Utilizzando le equazioni così ottenute per ciascun settore, è stato possibile associare ad ogni onda il corrispondente periodo.

	BORA (55°N)		LEVANTE (85°N)		SCIROCCO (135°N)	
T_R (anni)	H_s (m)	T_{01} (s)	H_s (m)	T_{01} (s)	H_s (m)	T_{01} (s)
5	4.95	8.22	4.38	7.93	3.89	8.42
10	5.54	8.62	5.07	8.38	4.42	8.78
25	6.29	9.09	5.94	8.91	5.08	9.19

Tab. 4.2.1 - Elenco onde estreme

Le onde con durata annuale di 1 giorno e 7 giorni sono state ricavate dalla curva di durata, sempre distinguendo i tre settori principali di provenienza (Bora 55°N, Levante 85°N e Scirocco 135°N) e considerando rispettivamente eventi con durata di 1 e 7 giorni anno (Fig. 4.2.5). Di seguito, in Tab. 4.2.2, si riporta l'elenco delle onde simulate per ciascuna direzione di provenienza, con i relativi parametri (altezza d'onda significativa e periodo). Il periodo è stato calcolato utilizzando la stessa metodologia precedentemente descritta per le onde estreme.

DURATA	BORA (55°N)		LEVANTE (85°N)		SCIROCCO (135°N)	
	H _s (m)	T ₀₁ (s)	H _s (m)	T ₀₁ (s)	H _s (m)	T ₀₁ (s)
1 giorno	3.58	7.20	2.49	6.45	2.95	7.73
7 giorni	2.28	6.03	1.27	5.15	1.73	6.63

Tab. 4.2.2 - Elenco onde con durata di 1 giorno e 7 giorni anno

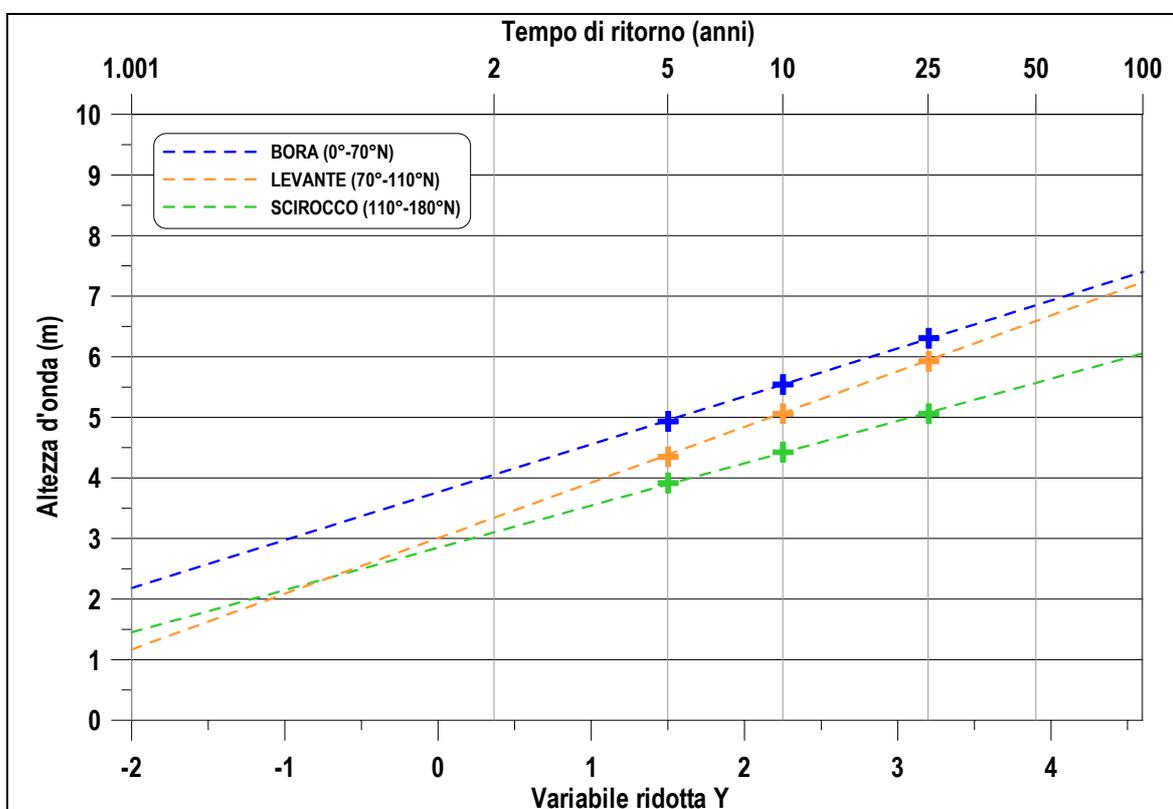


Fig. 4.2.4 - Scelta onde estreme

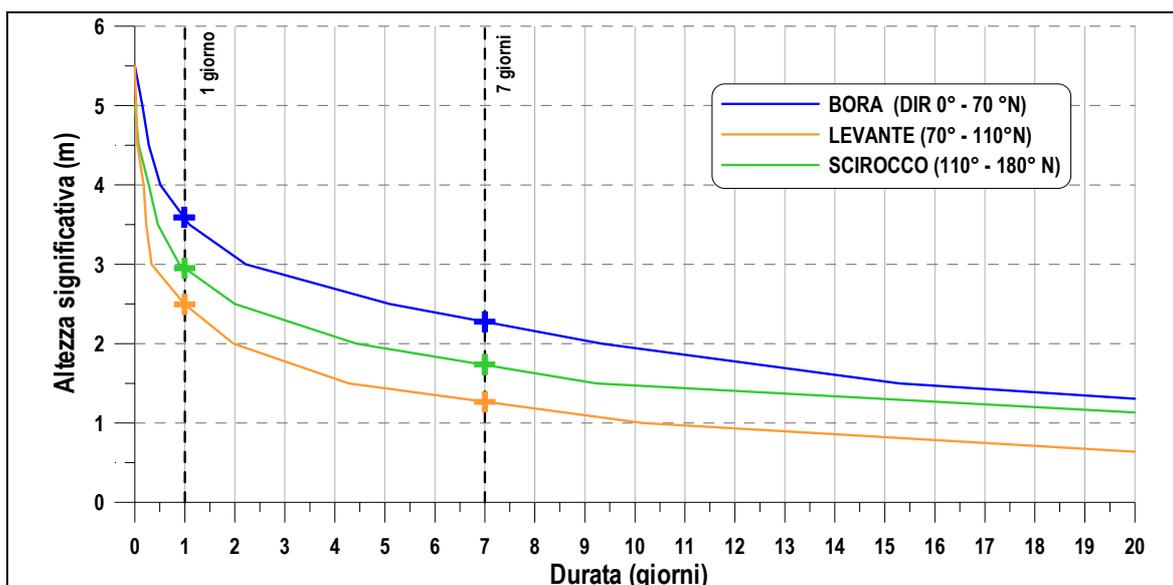


Fig. 4.2.5 - Scelta onde con durata di 1 giorno/anno e 7 giorni/anno

4.3 Clima ondoso in corrispondenza della nave "storage"

Lo studio della propagazione locale del moto ondoso, con il tracciamento dei piani d'onda, è finalizzato alla valutazione del clima ondoso del paraggio e all'impatto delle mareggiate più significative, nella fattispecie quelle caratterizzate dalle massime altezze d'onda (onde estreme) o da una determinata durata annuale, ricostruite per i settori di provenienza considerati.

Il clima meteomarinico, ricavato dai dati CNR relativi al punto al largo, è stato infatti riportato al paraggio in esame attraverso una serie di simulazioni numeriche, effettuate con il codice di calcolo SWAN.

In particolare, sono stati individuati due punti di output del clima locale, uno in corrispondenza della nave "storage" (punto T) e uno dell'imboccatura dei moli del Po di Levante (punto I, Fig. 4.3.1).

Oltre al clima meteomarinico nei punti di output, vengono forniti anche i risultati delle simulazioni per alcuni test, riportati in Tab. 4.3.1, relativamente alla griglia di calcolo centrata nell'area di interesse (SMALL GRID). Tali risultati sono riportati in dettaglio nelle seguenti figure da fig. 4.5.11 a fig. 4.5.16.

NUMERO TEST	H _s (m)	T ₀₁ (s)	DIR (°N)	Caratteristiche onda
2	5.54	8.62	55	Tempo ritorno 10 anni
5	2.28	6.03	55	Durata 7 giorni/anno
7	5.07	8.38	85	Tempo ritorno 10 anni
10	1.27	5.15	85	Durata 7 giorni/anno
12	4.42	8.78	135	Tempo ritorno 10 anni
15	1.73	6.63	135	Durata 7 giorni/anno

Tab. 4.3.1 – Caratteristiche al largo (punto CNR) dei TEST rappresentati nelle tavole

In questo paragrafo sono riportate le caratteristiche del clima ondoso nel punto T (posto su un fondale di circa 20 m), in corrispondenza della nave "storage". Infatti, in relazione alle caratteristiche dei natanti che dovranno fungere da collegamento tra mare Adriatico, centrale e rete idroviaria interna, nonché alle indicazioni del committente, la nave "storage" è stata ubicata in un punto (punto T) antistante la foce del Po di Levante e posto su un fondale di circa 20 m.

Le coordinate del punto T, espresse nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est sono 2316178.8 E, 4997897.3 N.

Di seguito, in Fig. 4.3.2, si riportano le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze significative massime in corrispondenza del punto T. Osservando la distribuzione dei picchi di registrazione e di energia, si può notare che dal settore di Bora provengono le mareggiate con altezza significativa maggiore, mentre dal settore di Scirocco provengono, mediamente, mareggiate più frequenti, ma con altezza significativa inferiore.

In Fig. 4.3.3 e Fig. 4.3.4 si riportano le curve di durata nel punto T, riferite rispettivamente a tutto il settore di traversia (0°-180°N) e suddivise per settori di Bora, Levante e Scirocco.

Si può osservare che onde con altezze significative superiori ai 2 m hanno durata inferiore a 3 giorni per i settori di Levante e di Scirocco, e inferiore a 10 giorni per il settore di Bora.

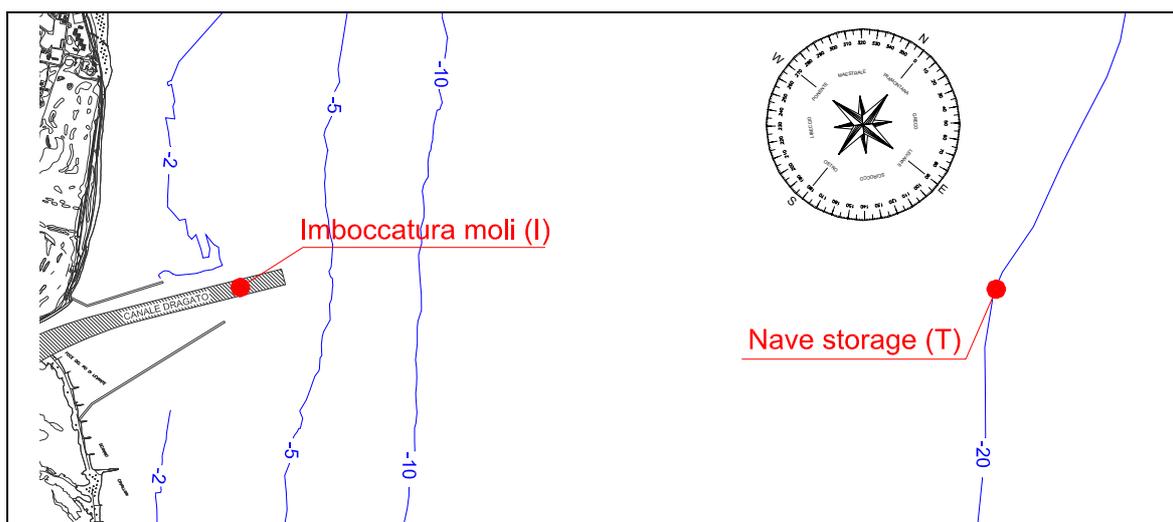


Fig. 4.3.1 - Planimetria con ubicazione dei punti di output del clima locale

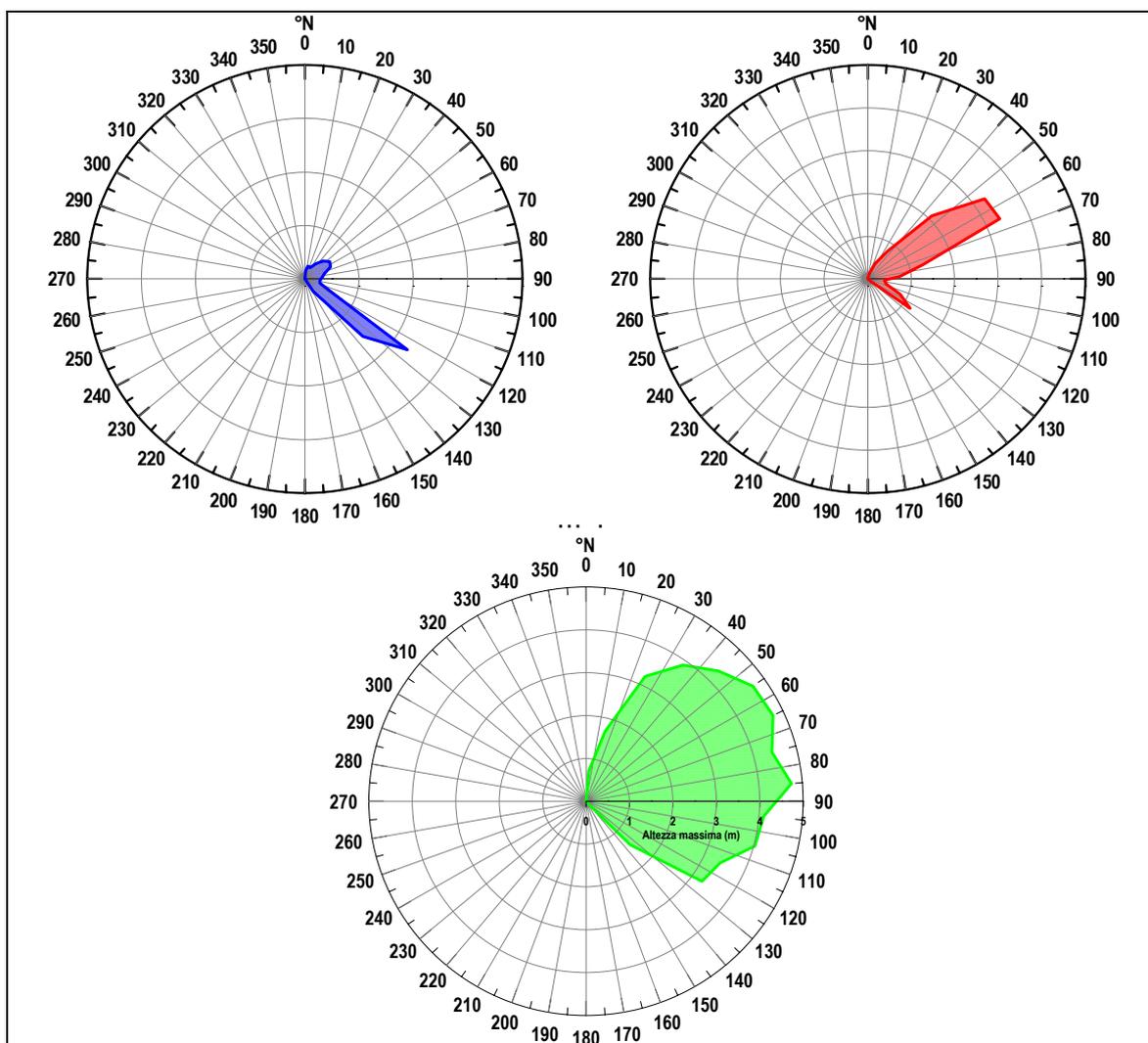


Fig. 4.3.2 - Rosa delle registrazioni (in blu), delle energie (in rosso) e delle altezze massime (in verde) calcolate in corrispondenza della nave "storage"

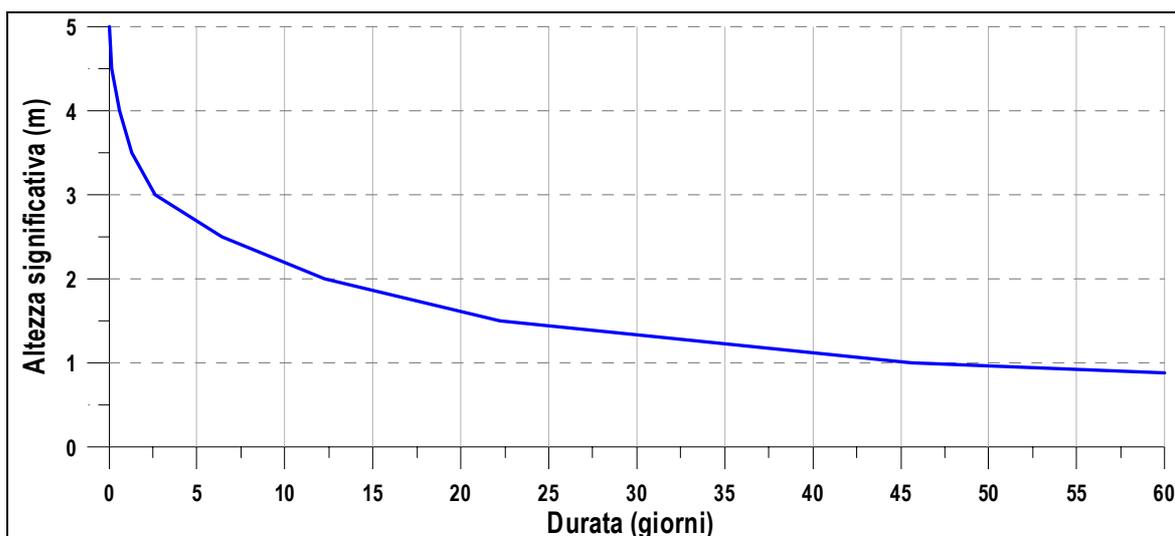


Fig. 4.3.3 - Curva di durata del settore di traversia 0° - 180°N calcolata in corrispondenza della nave "storage"

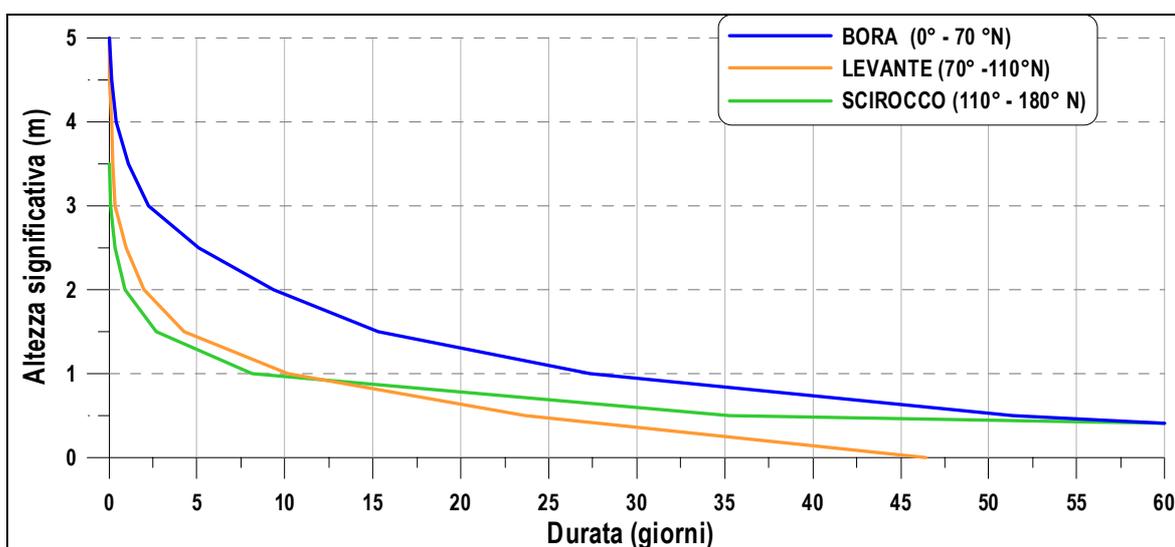


Fig. 4.3.4 - Curva di durata suddivisa per settori di Bora, Levante e Scirocco calcolata in corrispondenza della nave "storage"

4.4 Clima ondoso all'imboccatura del Po di Levante

Come già accennato nel paragrafo 4.3, oltre al clima ondoso in corrispondenza della nave "storage", è stato ritenuto significativo, ai fini dello presente studio, considerare le caratteristiche del clima ondoso anche in corrispondenza dell'imboccatura dei moli del Po di Levante (punto I; vedi Fig. 4.4.1). Tale punto è posto su un fondale di circa 5 m, al centro del canale dragato che consente l'ingresso dei natanti al Po di Levante, in corrispondenza del punto di coordinate 2312706.4 E e 4995098.3 N (sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est).

La propagazione del clima ondoso dal punto CNR al punto I è stata condotta, anche in questo caso, utilizzando il codice di calcolo SWAN.

Di seguito, in Fig. 4.4.1, si riportano le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze massime nel punto I. Dall'analisi della distribuzione delle altezze massime, si nota che le mareggiate arrivano nel punto I con un'altezza significativa non superiore ad 1.5 m (altezza limitata dalla profondità dei fondali circostanti). Le onde più alte provengono dal settore di Bora, come si può notare dalla rosa delle energie e delle altezze massime.

In Fig. 4.4.3 e Fig. 4.4.4 si riportano le curve di durata in corrispondenza dell'imboccatura, riferite rispettivamente a tutto il settore di traversia (0°-180°N) e suddivisa per settori di Bora, Levante e Scirocco.

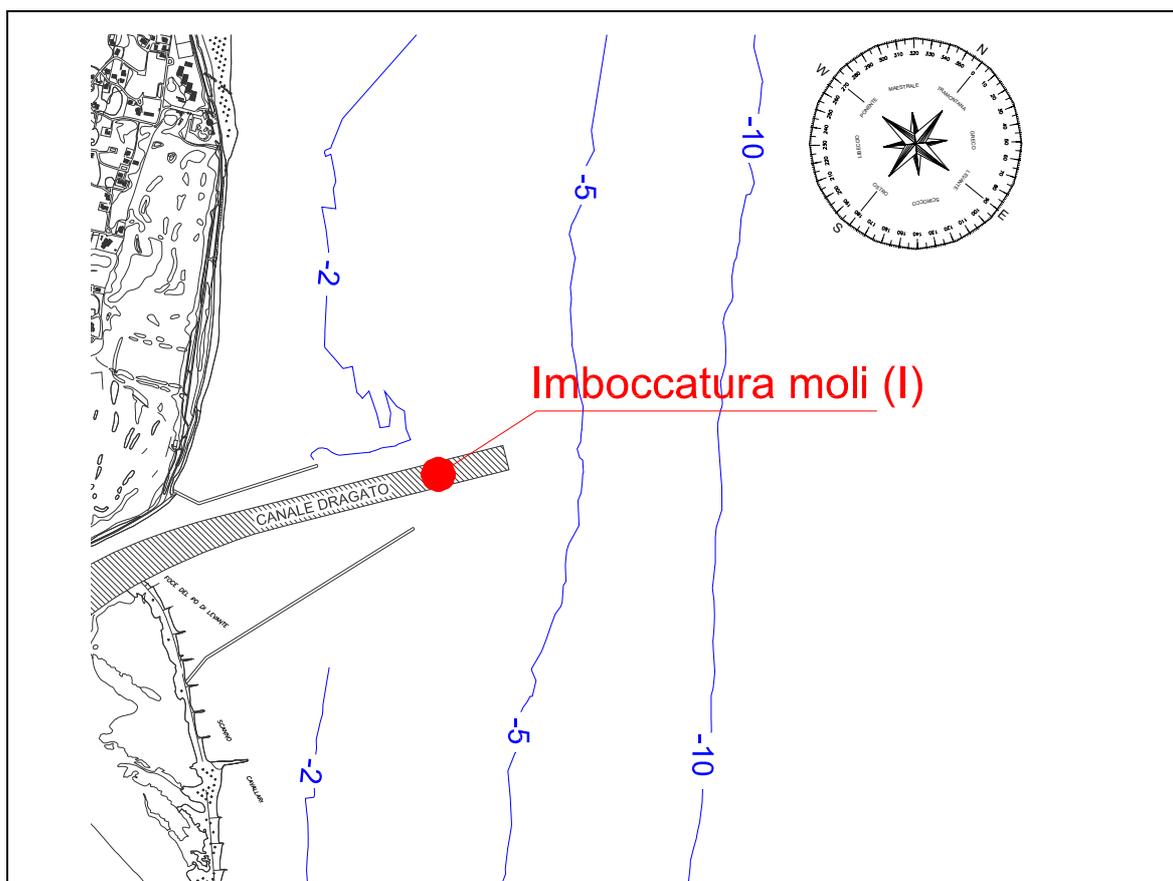


Fig. 4.4.1 - Planimetria con ubicazione del punto di output del clima ondoso all'imboccatura del Po di Levante

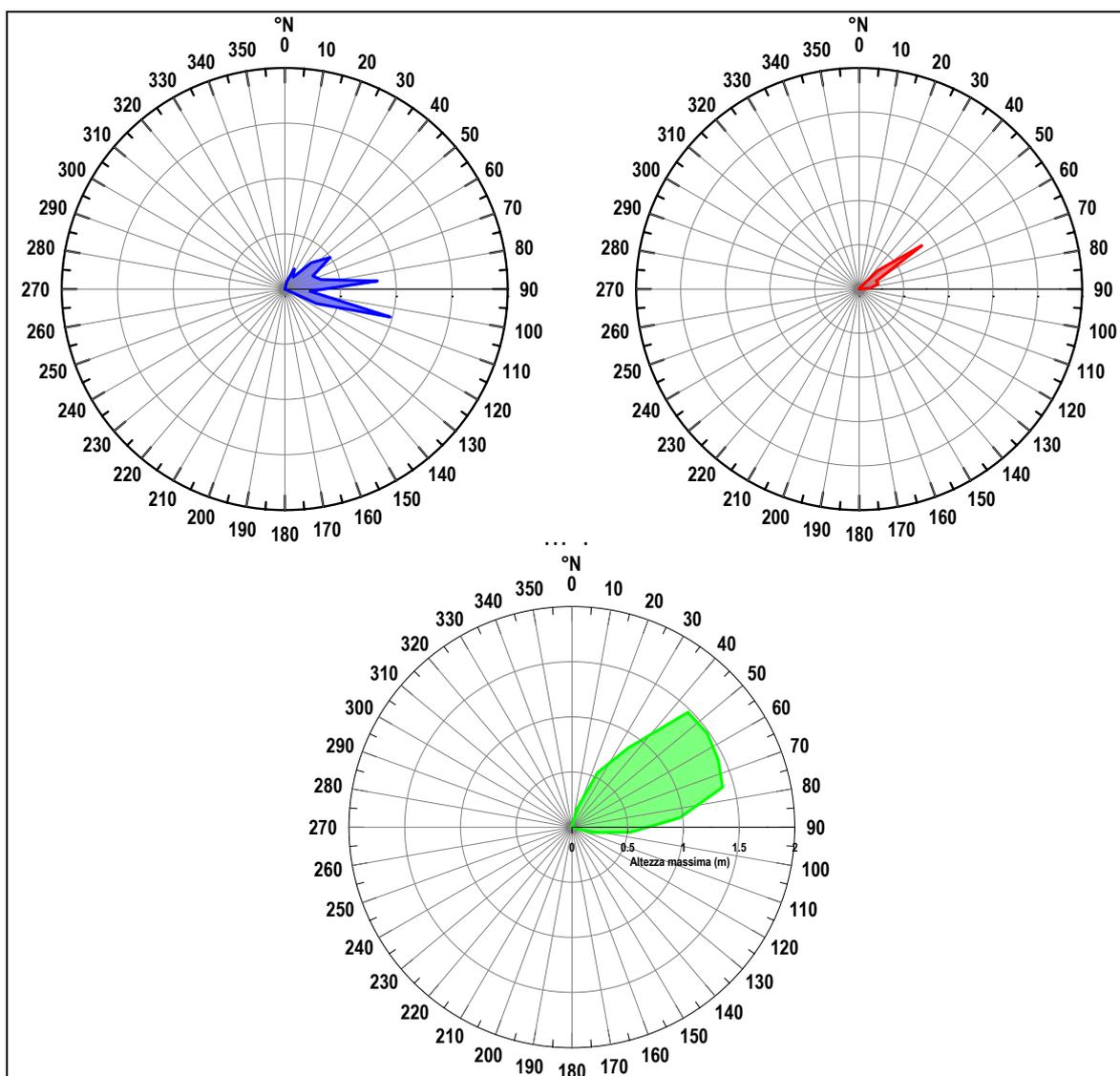


Fig. 4.4.2 - Rosa delle registrazioni (in blu), delle energie (in rosso) e delle altezze massime (in verde) calcolata all'imboccatura dle Po di Levante

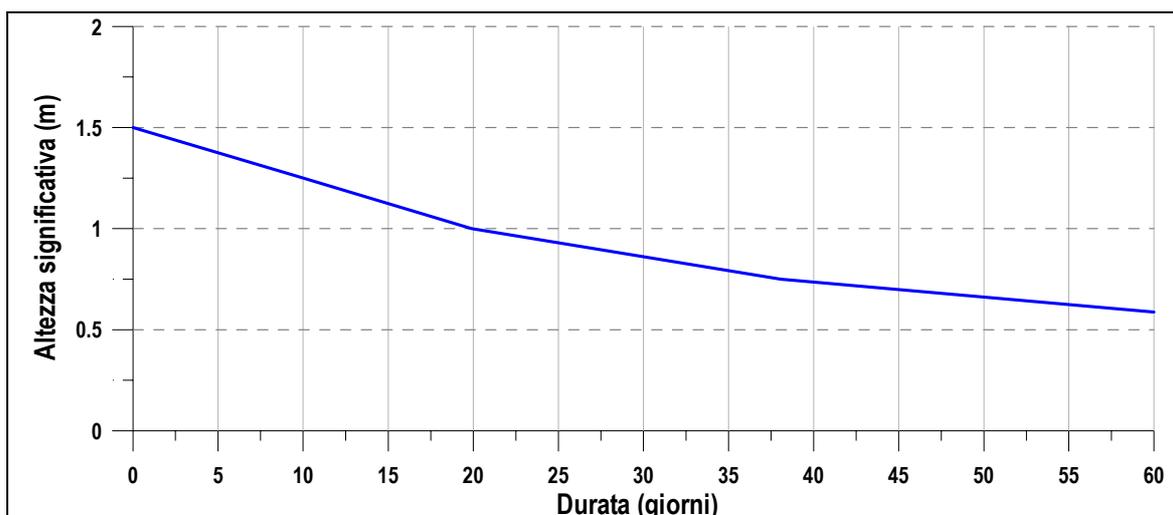


Fig. 4.4.3 – Curva di durata del settore di traversia 0° - 180°N calcolata all'imboccatura del Po di Levante

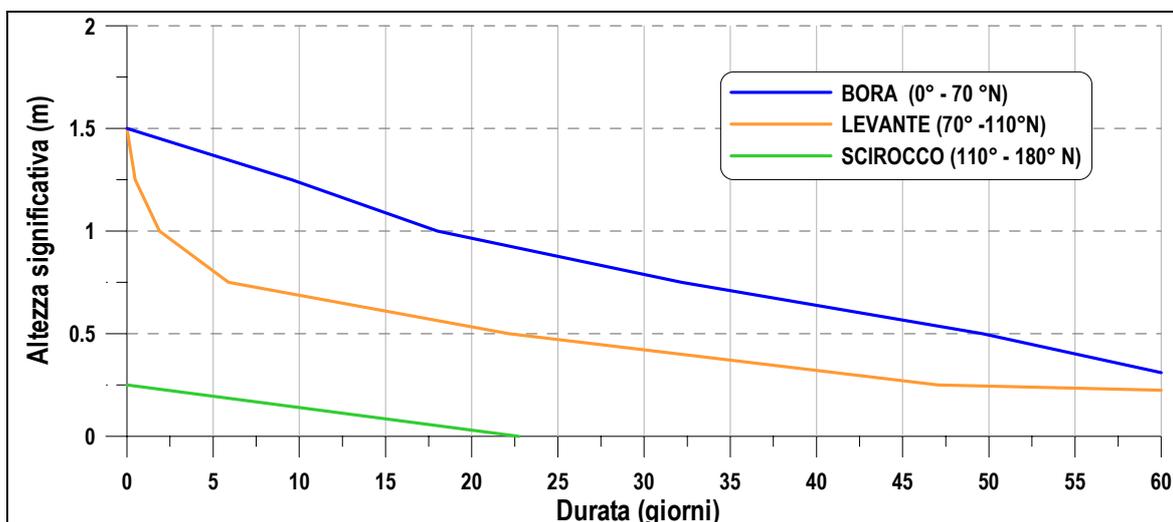


Fig. 4.4.4 - Curva di durata suddivisa per settori di Bora, Levante e Scirocco calcolata all'imboccatura del Po di Levante

4.5 Operatività del collegamento tra nave "storage" e rete idroviaria

4.5.1 Considerazioni generali

Allo scopo di valutare l'operatività del collegamento tra nave "storage" e rete idroviaria interna, la rotta di collegamento tra terminale e imboccatura dei moli è stata schematizzata attraverso un opportuno transetto di calcolo.

Come si può osservare nella tavola allegata, che riporta l'ubicazione del transetto (tavola di inquadramento), la rotta dei natanti tra la foce del Po di Levante e la nave "storage" è lunga circa 4500 metri.

Prima di considerare più in dettaglio le condizioni di moto ondoso idonee all'operatività del collegamento oggetto del presente studio e le variazioni delle loro grandezze caratteristiche lungo la rotta tra la nave "storage" e il Po di Levante, può essere significativo analizzare, attraverso un confronto tra i risultati finora ottenuti, la trasformazione del clima ondoso dal punto CNR all'imboccatura del molo.

Infatti, oltre al transetto di calcolo e ai punti di output T (nave "storage") e I (imboccatura moli della foce del Po di Levante), è stato considerato un altro punto di output posto lungo la rotta, tra la nave "storage" e l'estremità a mare dei moli del porto. Tale punto (denominato P), di coordinate 2313167.2 E e 4995625.8 N, posto su un fondale di circa 6.5 m, può essere ritenuto rappresentativo, al fine di evidenziare la variazione del clima dal largo verso riva.

I tre punti di output e il transetto di calcolo sono rappresentati in Fig. 4.5.1 e, più in dettaglio, nella tavola di inquadramento di fig. 4.5.10.

Di seguito, da Fig. 4.5.2 a Fig. 4.5.5, si riporta un confronto tra le rose delle registrazioni, delle energie, delle altezze massime e delle curve di durata (riferita al settore 0°-180°N) nel punto CNR al largo, nel terminale (punto T), nel punto intermedio (punto P) e in corrispondenza dell'imboccatura del Po di Levante (punto I).

Si può osservare (Fig. 4.5.2) come il settore di provenienza tenda a restringersi passando dal punto al largo all'imboccatura dei moli, poiché a ridosso della linea di costa il settore di Scirocco risulta, in pratica, completamente schermato dalla presenza del Delta del Po.

Le Fig. 4.5.3 e Fig. 4.5.4 mostrano, inoltre, come l'energia e l'altezza dell'onda si riducano notevolmente nella propagazione verso riva. In particolare, l'altezza d'onda passa da valori massimi di 5.5 m al largo a 1.5 m nel punto I.

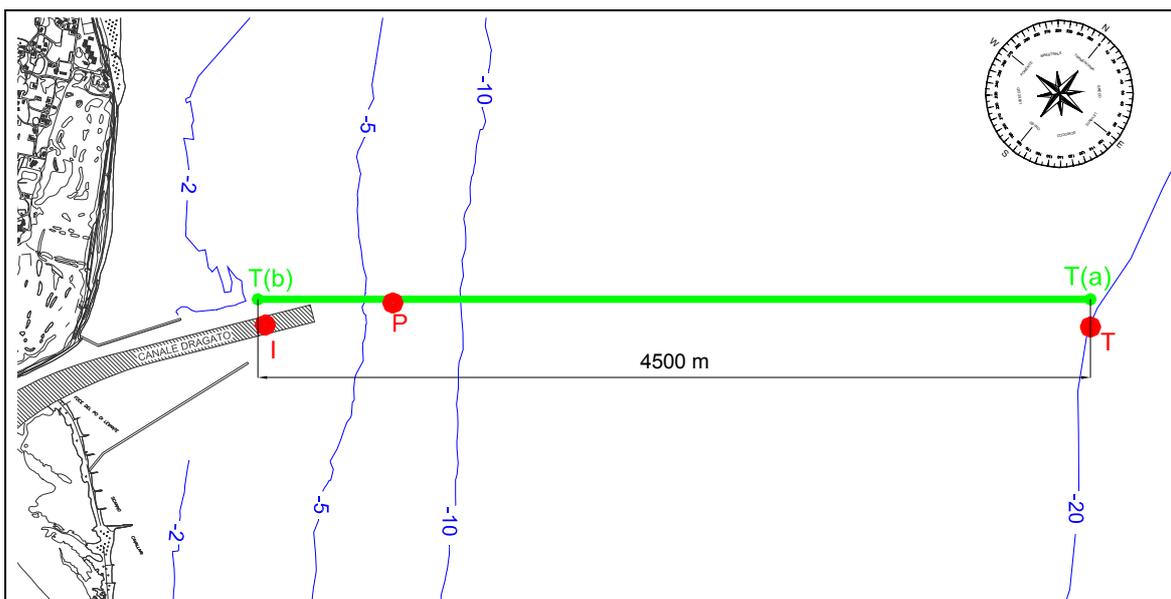


Fig. 4.5.1 – Planimetria con ubicazione dei punti di output e del transetto

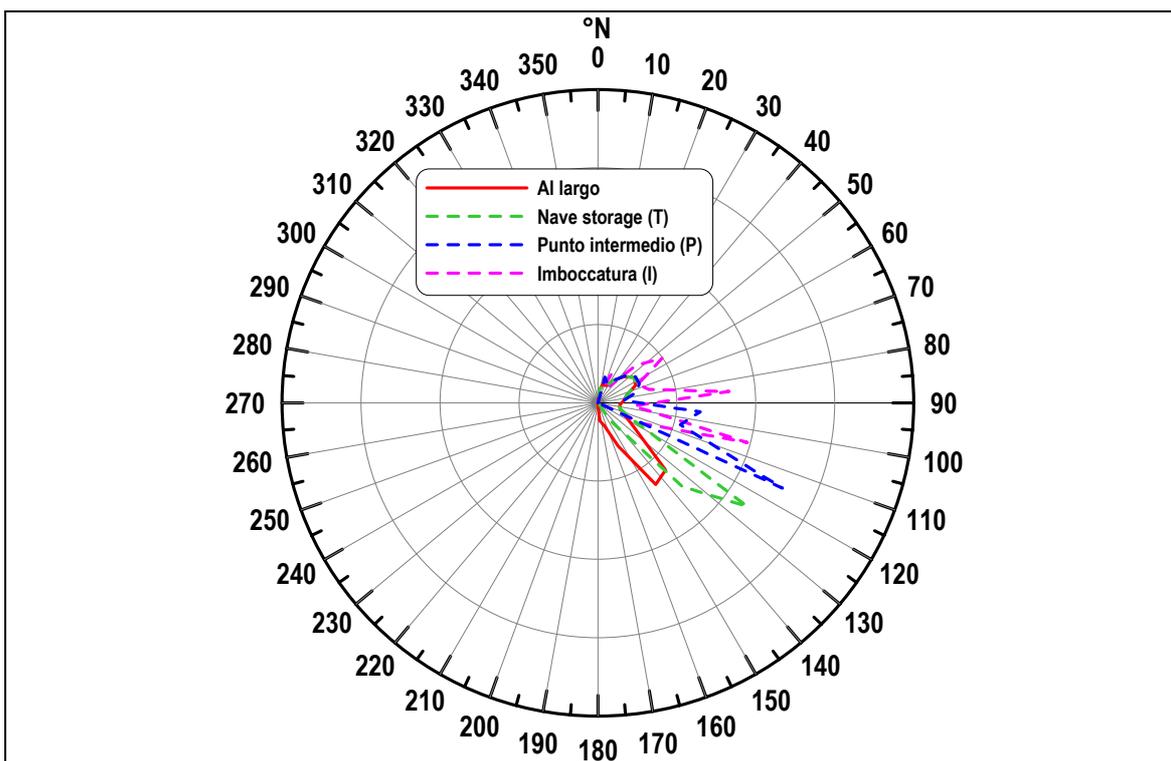


Fig. 4.5.2 - Confronto delle rose delle registrazioni al largo, nel punto CNR, nel terminale (T) e all'imboccatura (I)

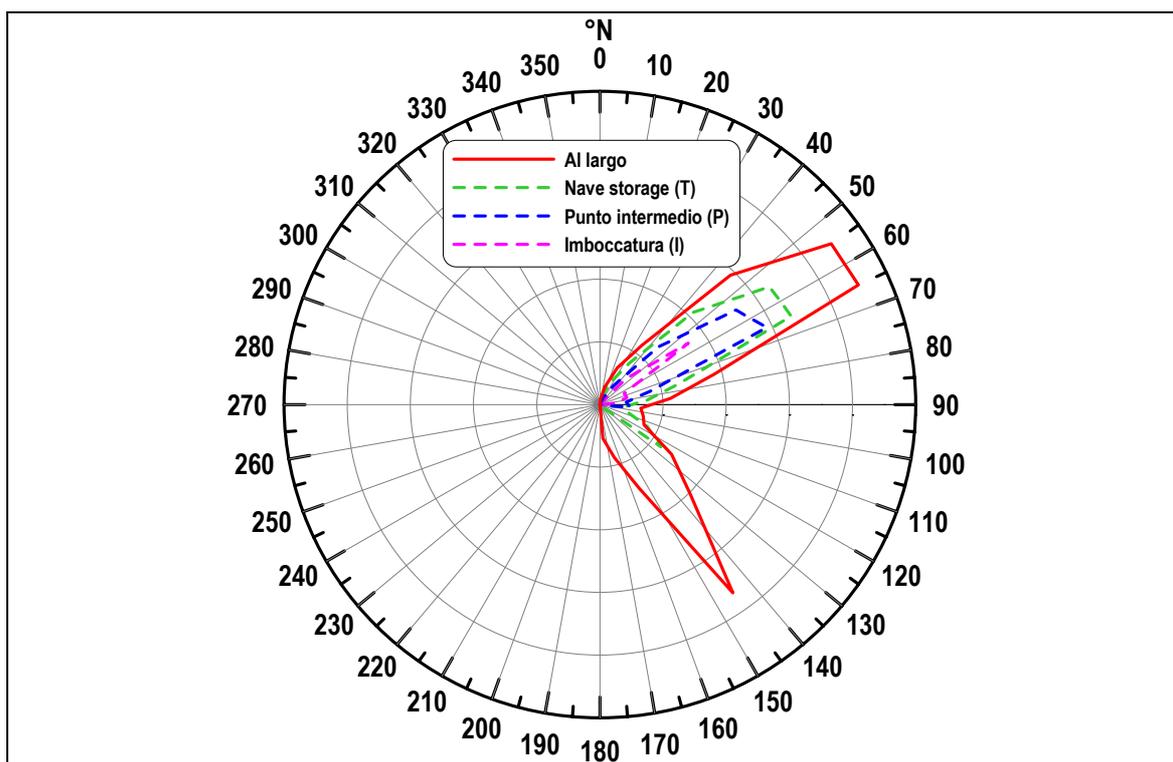


Fig. 4.5.3 - Confronto delle rose delle energie al largo, nel punto CNR, nel terminale (T) e all'imboccatura (I)

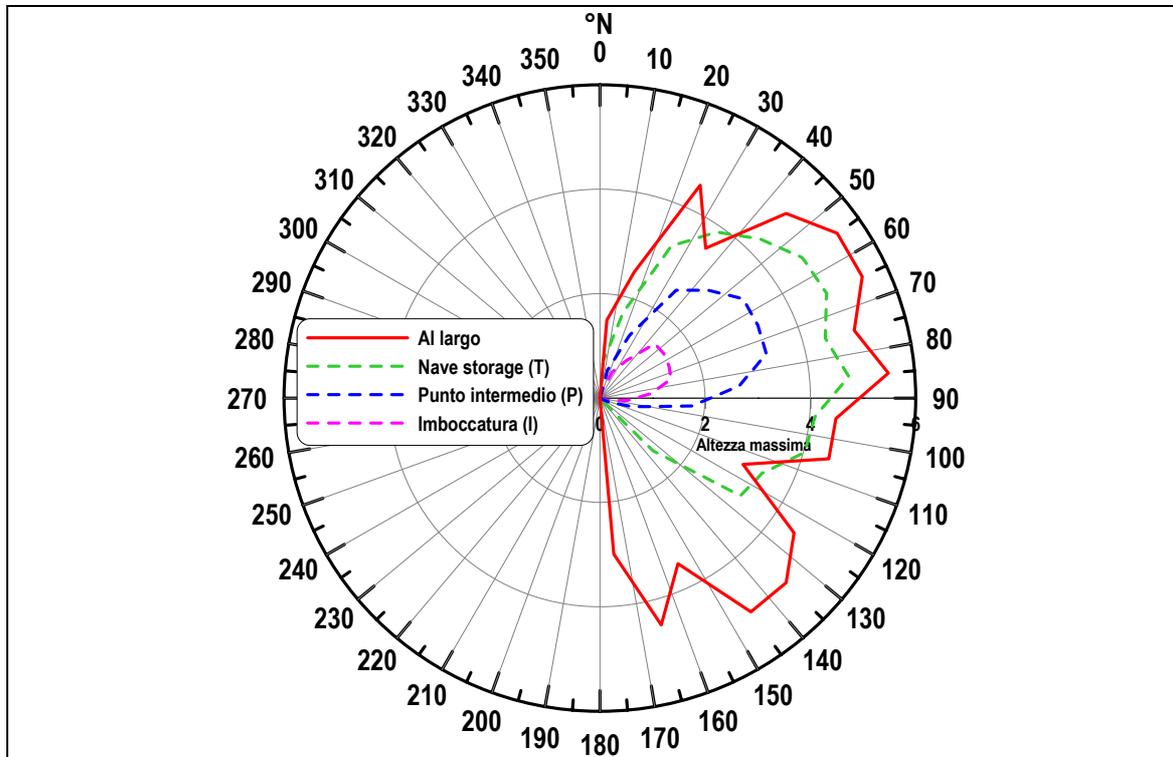


Fig. 4.5.4 - Confronto delle rose delle Hs massime al largo, nel punto CNR, nel terminale (T) e all'imboccatura (I)

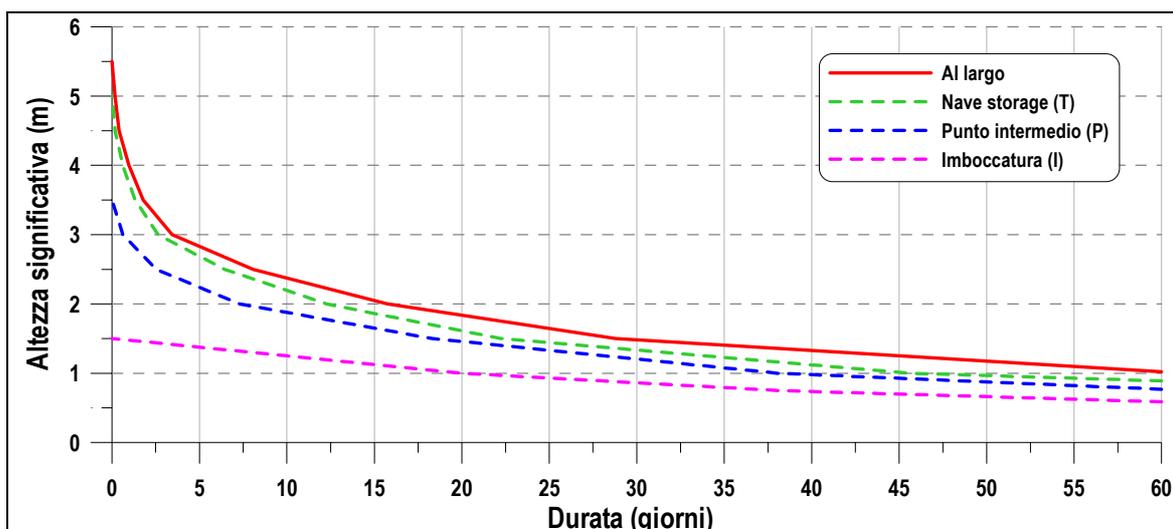


Fig. 4.5.5 - Confronto delle curve di durata al largo, nel punto CNR, nel terminale (T) e all'imboccatura (I)

4.5.2 Operatività del terminale e caratteristiche delle navi

Al fine di valutare l'operatività della nave "storage" e, di conseguenza, la funzionalità del collegamento terminale – Po di Levante, è stata ricostruita la curva di durata nel punto T, posto nelle vicinanze del terminale stesso.

La curva di durata, ottenuta dall'analisi dei risultati della propagazione del clima con il codice di calcolo SWAN e riportata in Fig. 4.5.6, permette di correlare l'altezza d'onda nel punto T alla relativa percentuale di superamento, espressa, per una più facile interpretazione, in giorni/anno.

Si osserva che mareggiate con altezza significativa superiore ad 1 m in corrispondenza della nave "storage" si verificano, mediamente, per circa 46 giorni all'anno; l'altezza significativa di 1.5 m viene invece superata, sempre mediamente, 22 giorni all'anno.

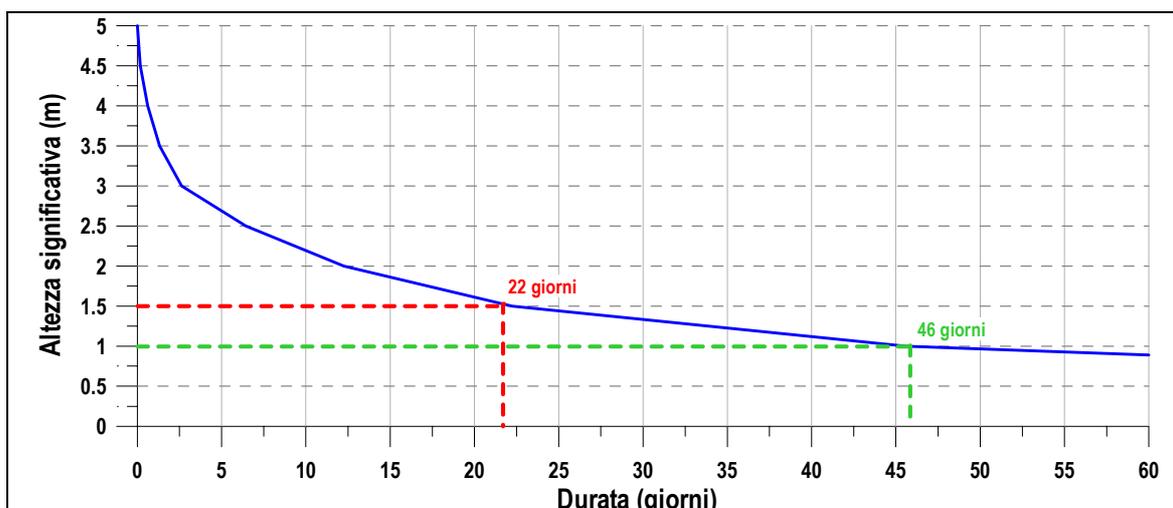


Fig. 4.5.6 – Curva di durata nel punto T per il settore 0°-180°N

In base a quanto indicato dal committente e alle caratteristiche dei natanti che devono percorrere il tratto di mare oggetto del presente studio, è stata considerata come condizione limite per l'operatività del terminale e per la navigabilità dei natanti quella caratterizzata da onde con altezza significativa di 1 m in corrispondenza della nave "storage".

4.5.3 Condizioni di moto ondoso lungo la rotta tra la nave "storage" ed il Po di Levante

In base alle considerazioni esposte nel precedente paragrafo, sono stati condotti, attraverso il codice di calcolo SWAN, una serie di test allo scopo di valutare la variazione dell'altezza d'onda lungo il transetto di calcolo rappresentato in Fig. 4.5.1.

Gli estremi del transetto collegano i seguenti punti (le coordinate dei punti sono espresse nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est):

- T(a) di coordinate (2316084.4 E, 4998013.9 N), posto su un fondale di 20 m circa nelle vicinanze del punto T;
- T(b) di coordinate (2312587.3 E, 4995181.9 N), posto su un fondale di 2.5 m circa, di fronte al molo Nord del Po di Levante.

In Tab. 4.5.1 si riportano le caratteristiche al largo (nel punto CNR) per i 3 TEST simulati: Tali TEST sono stati scelti in base alle caratteristiche dell'onda al largo nel punto T, in corrispondenza della nave "storage". Più precisamente, a partire dalle caratteristiche dell'onda nel punto T (altezza significativa pari ad 1 m), differenziando per le tre direzioni principali di provenienza (Bora 55°N, Levante 85°N, Scirocco 135°N), si è risaliti alle caratteristiche della corrispondente onda al largo, che è stata poi utilizzata come input per le simulazioni.

NUMERO TEST	H _s (m)	T01 (s)	DIR (°N)
T1	1.00	4.46	55
T2	1.00	4.79	85
T3	1.42	6.29	135

Tab. 4.5.1 - Caratteristiche al largo (punto CNR) dei TEST utilizzati per la rappresentazione dei transetti

Di seguito, in Fig. 4.5.7, Fig. 4.5.8 e Fig. 4.5.9, si riportano i risultati delle simulazioni: viene rappresentata in figura la variazione dell'altezza significativa lungo il transetto di calcolo.

Si osserva che, a parità di altezza significativa (pari ad 1 m) presso il terminale, l'altezza significativa lungo il transetto (procedendo verso riva) decresce in maniera differente a seconda che l'onda provenga da Bora/Levante o Scirocco.

Infatti, per il TEST T1 e T2 (onde di Bora e Levante), si riscontra sostanzialmente lo stesso andamento dell'altezza significativa, che si mantiene su valori superiori a 0.9 m fino a circa 1 km dall'imboccatura dei moli e in corrispondenza di questi raggiunge valori di 0.65 - 0.7 m.

Nel caso del TEST T3 (onde di Scirocco), H_s tende ad assumere valori inferiori a 0.9 m già ad un distanza di circa 1 km dal terminale per raggiungere una valore di circa 0.5 m in corrispondenza dei moli di Porto Levante.

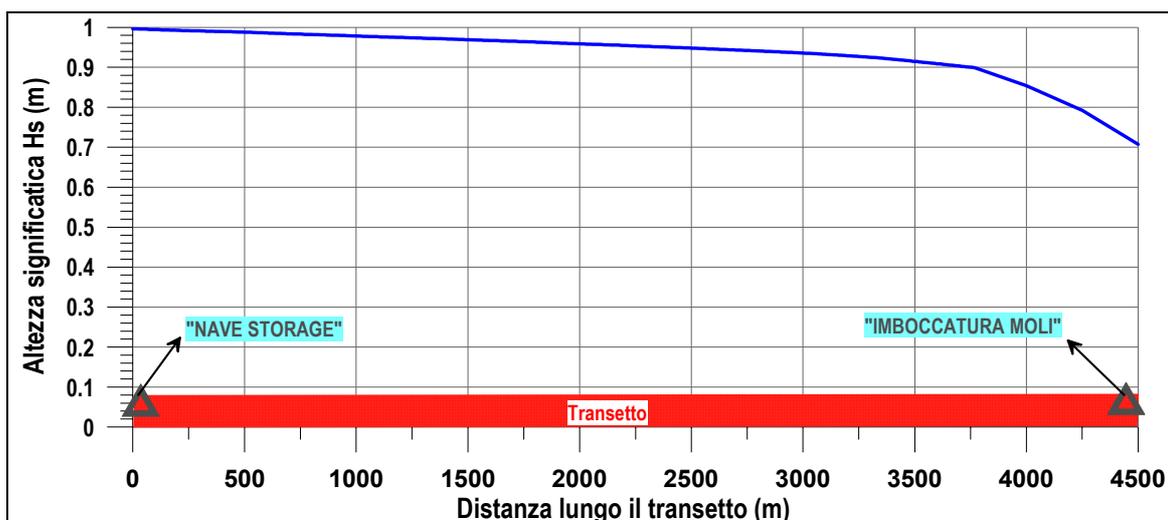


Fig. 4.5.7 – TEST T1 (Bora). Altezza significativa calcolata lungo il transetto dal terminal all'imboccatura

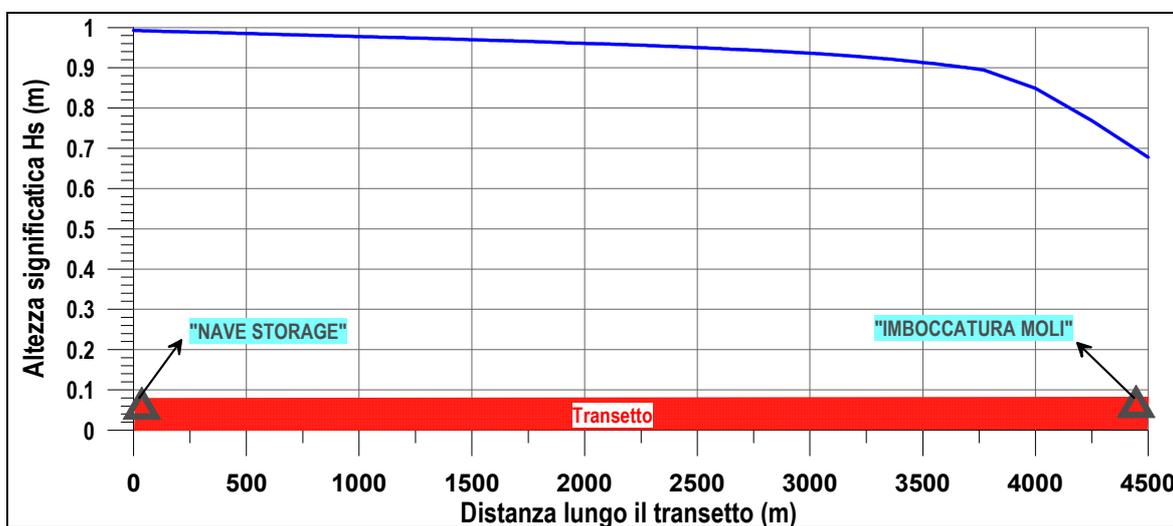


Fig. 4.5.8 – TEST T2 (Levante) Altezza significativa calcolata lungo il transetto dal terminal all'imboccatura

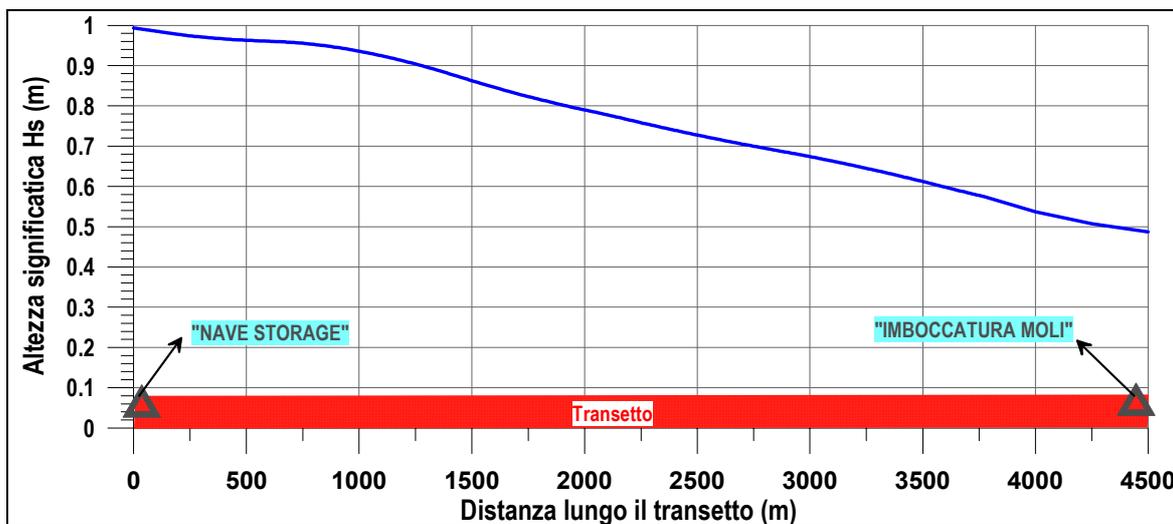


Fig. 4.5.9 – TEST T3 (Scirocco) Altezza significativa calcolata lungo il transetto dal terminal all'imboccatura

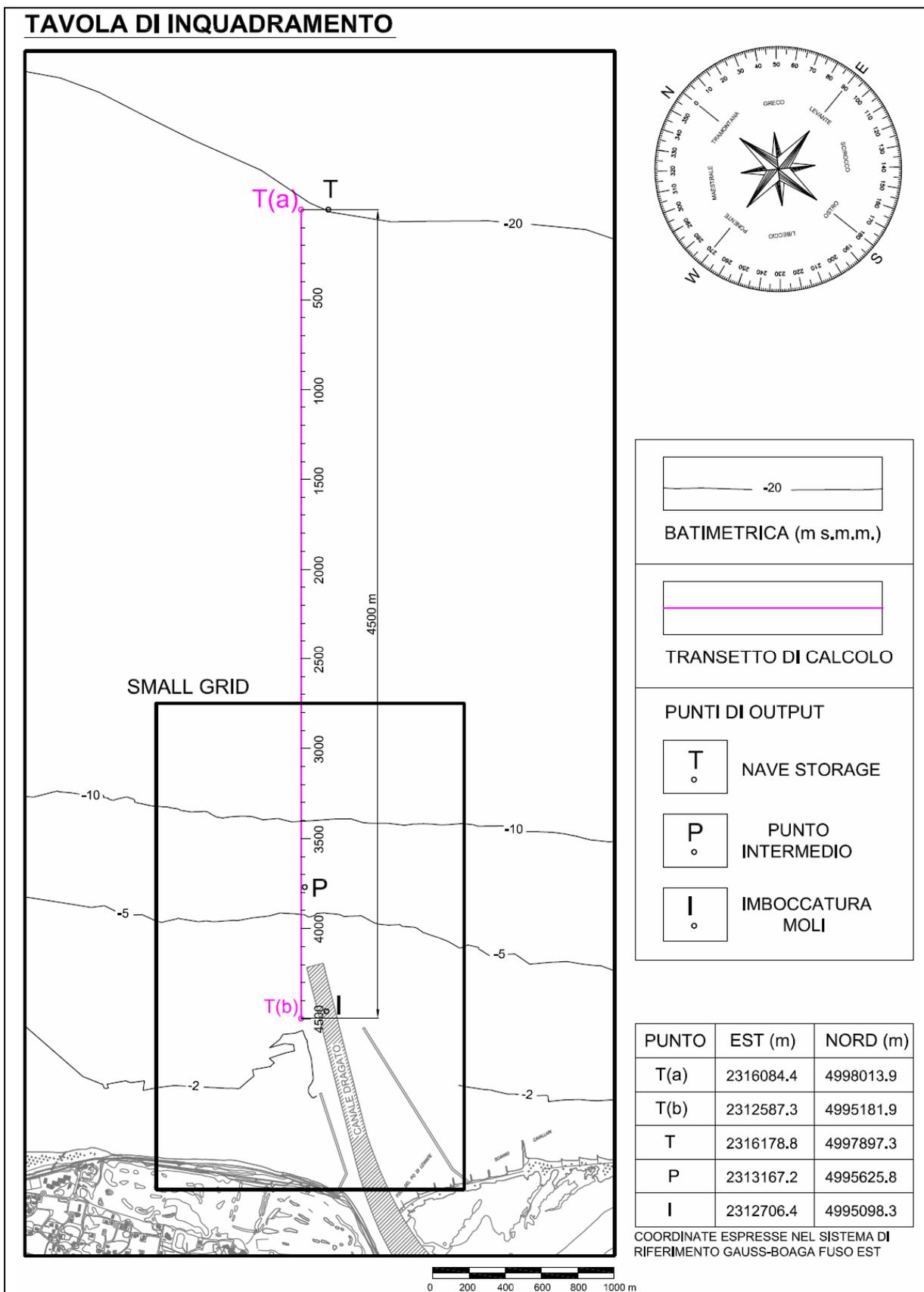


fig. 4.5.10 - Tavola di inquadramento dei risultati delle simulazioni con il modello SWAN

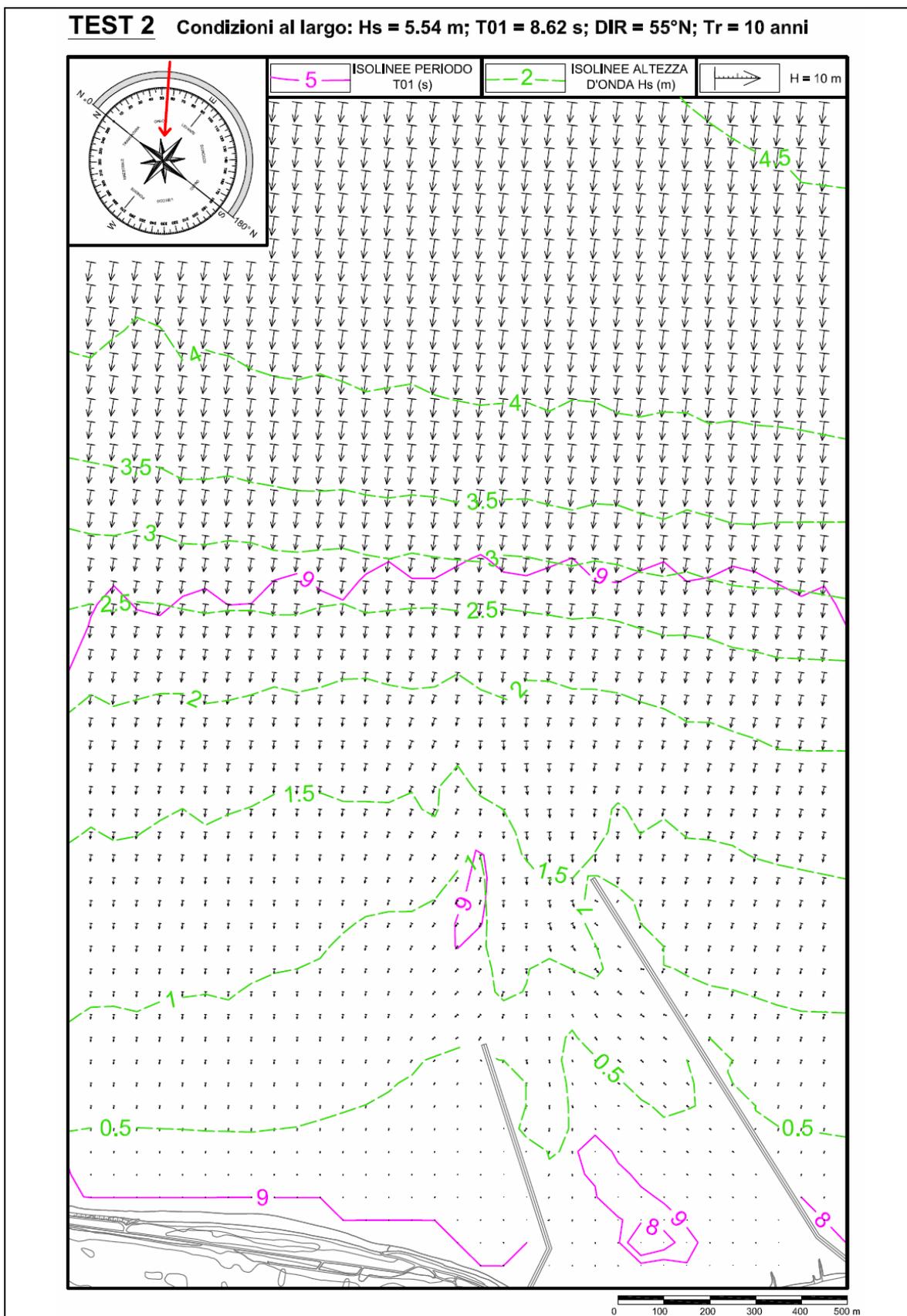


fig. 4.5.11 - Rappresentazione grafica di altezza d'onda, direzione e periodo per la simulazione TEST 2

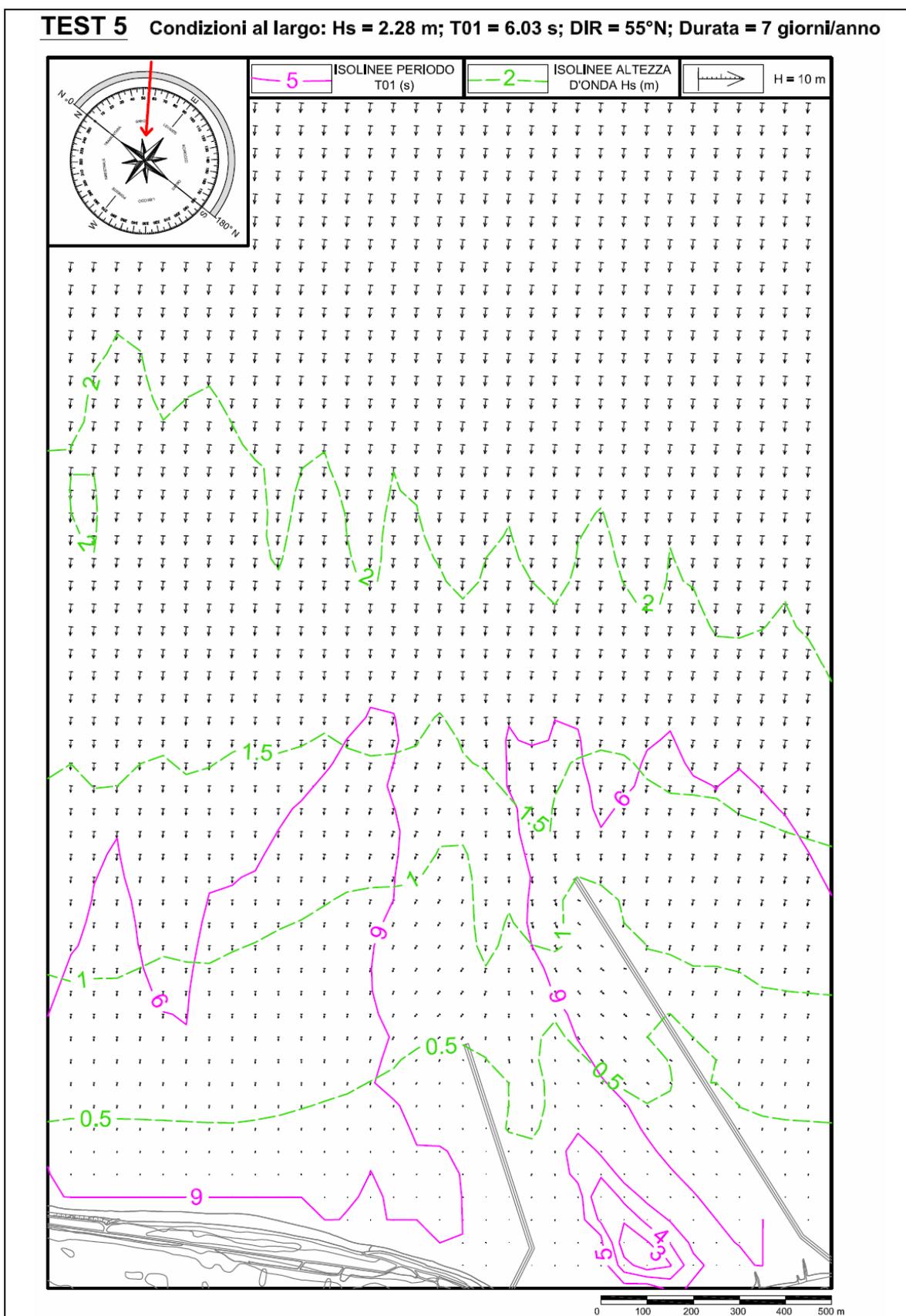


fig. 4.5.12 - Rappresentazione grafica di altezza d'onda, direzione e periodo per la simulazione TEST 5

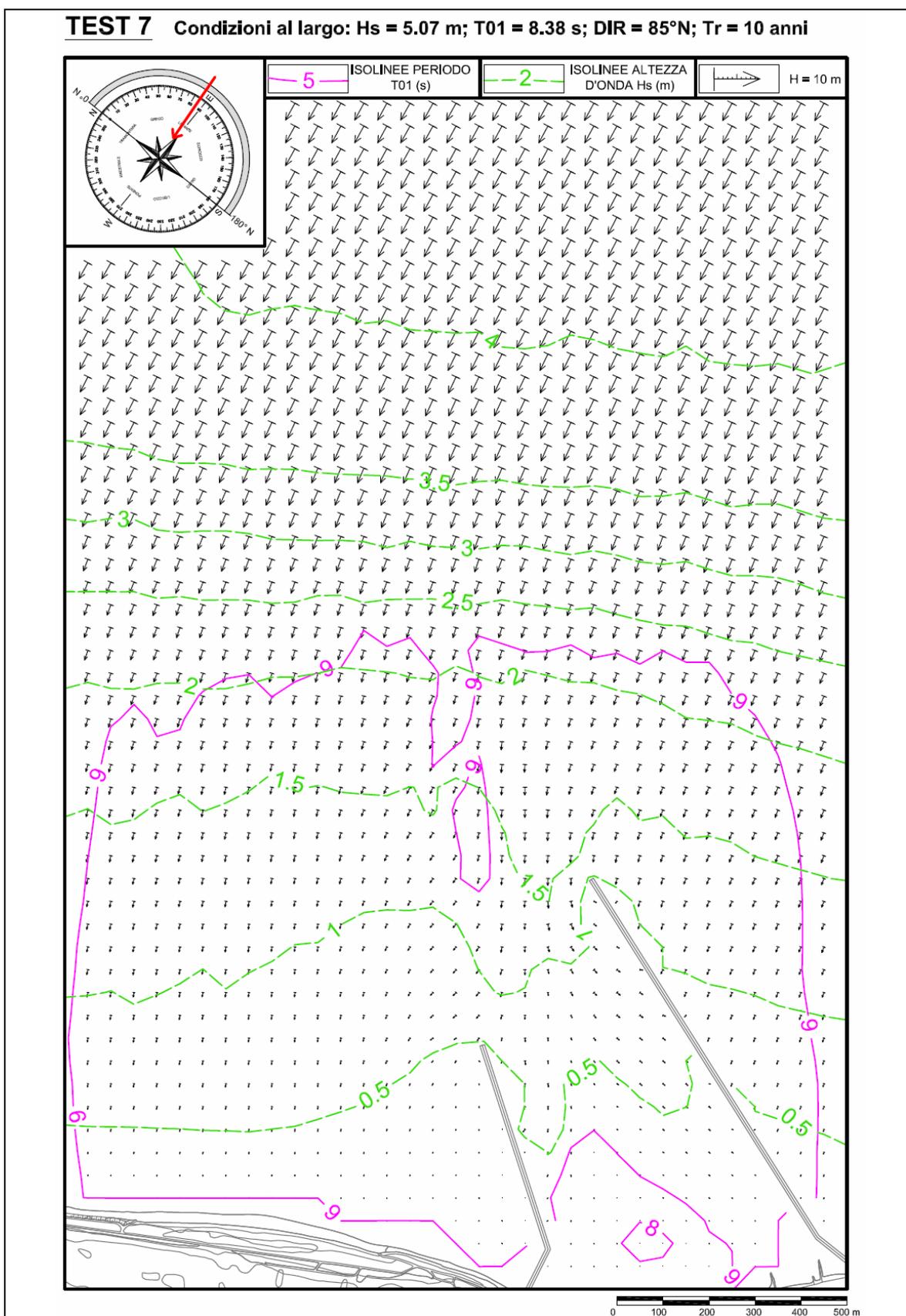


fig. 4.5.13 - Rappresentazione grafica di altezza d'onda, direzione e periodo per la simulazione TEST 7

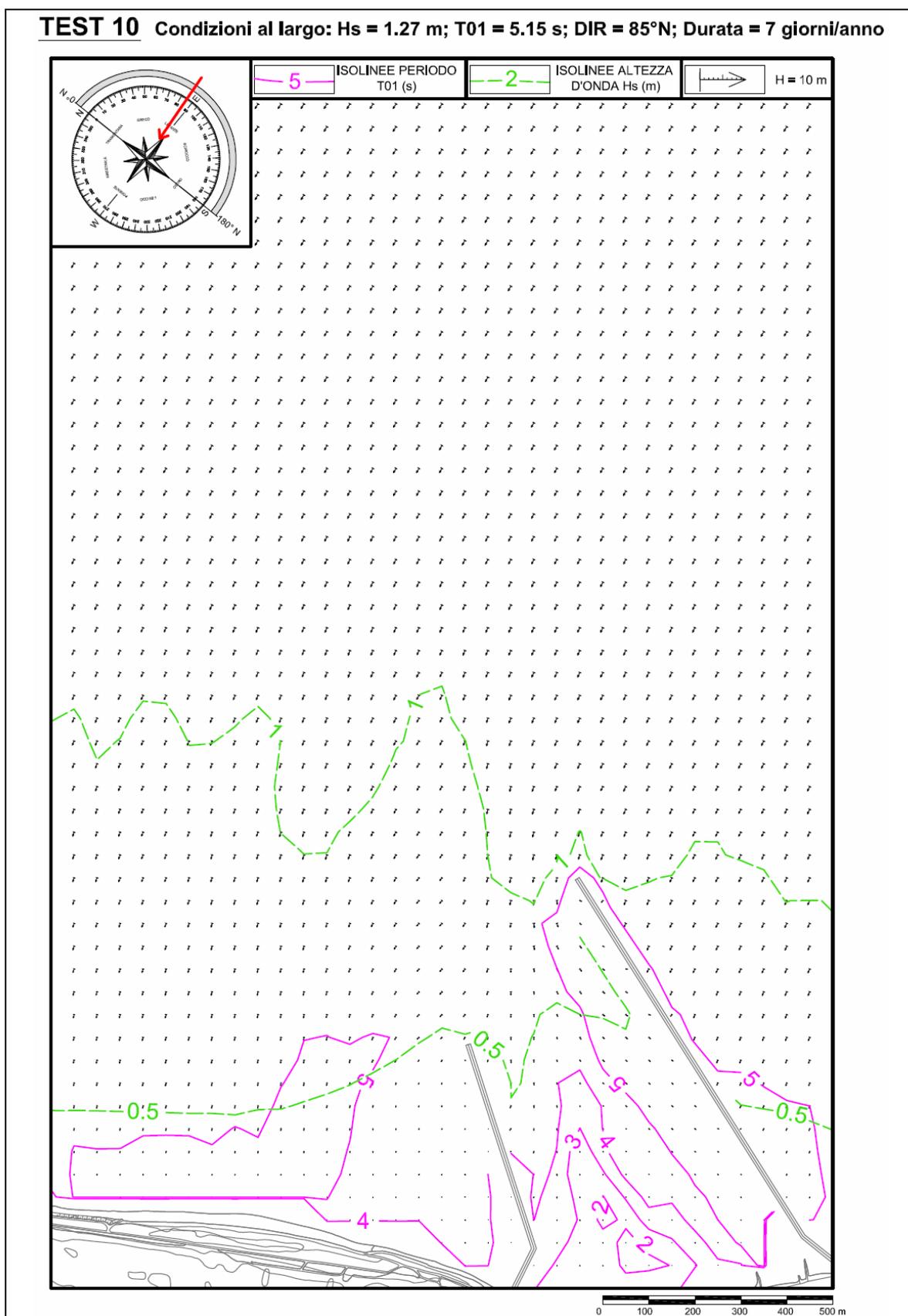


fig. 4.5.14 - Rappresentazione grafica di altezza d'onda, direzione e periodo per la simulazione TEST 10

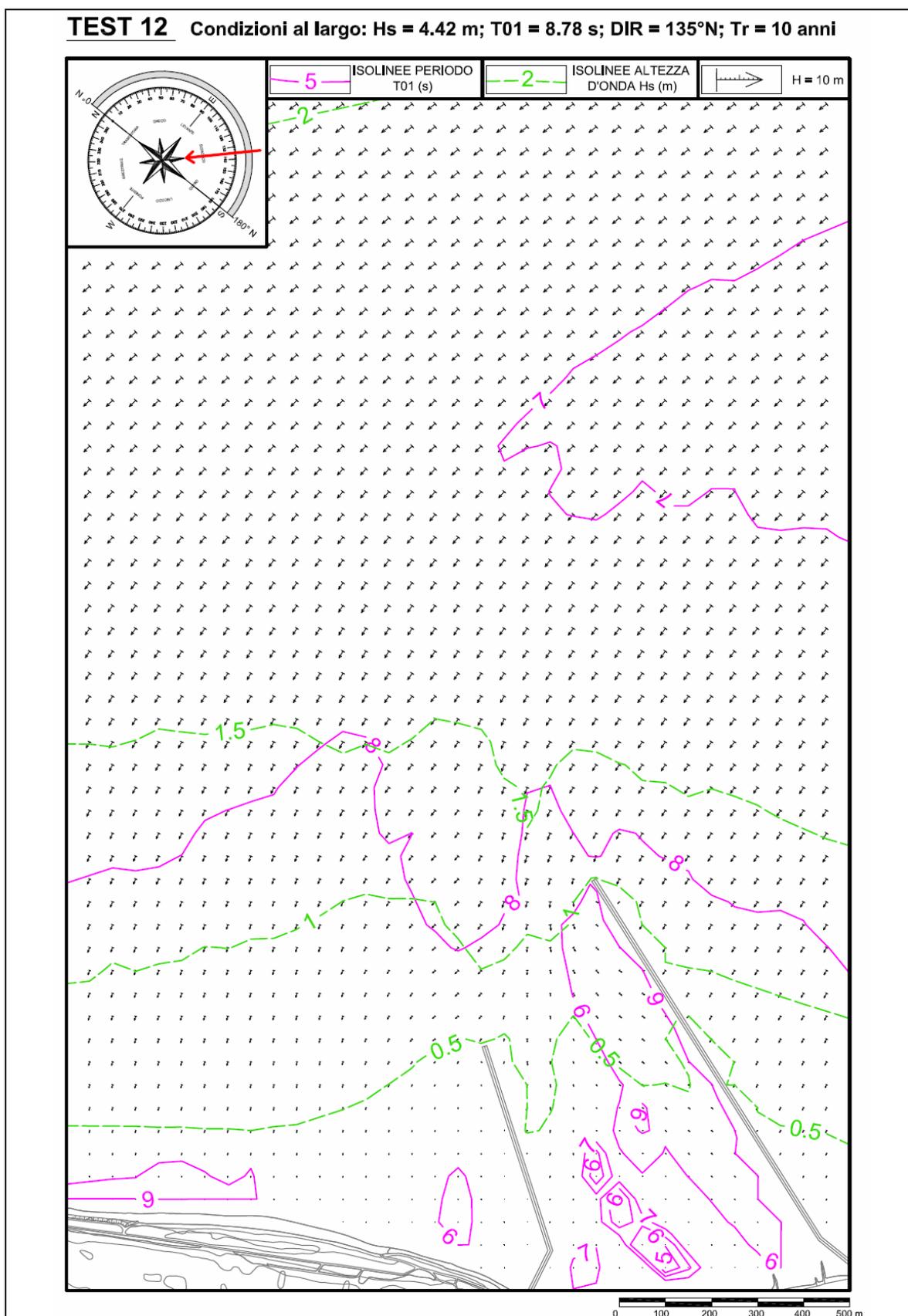


fig. 4.5.15 - Rappresentazione grafica di altezza d'onda, direzione e periodo per la simulazione TEST 12

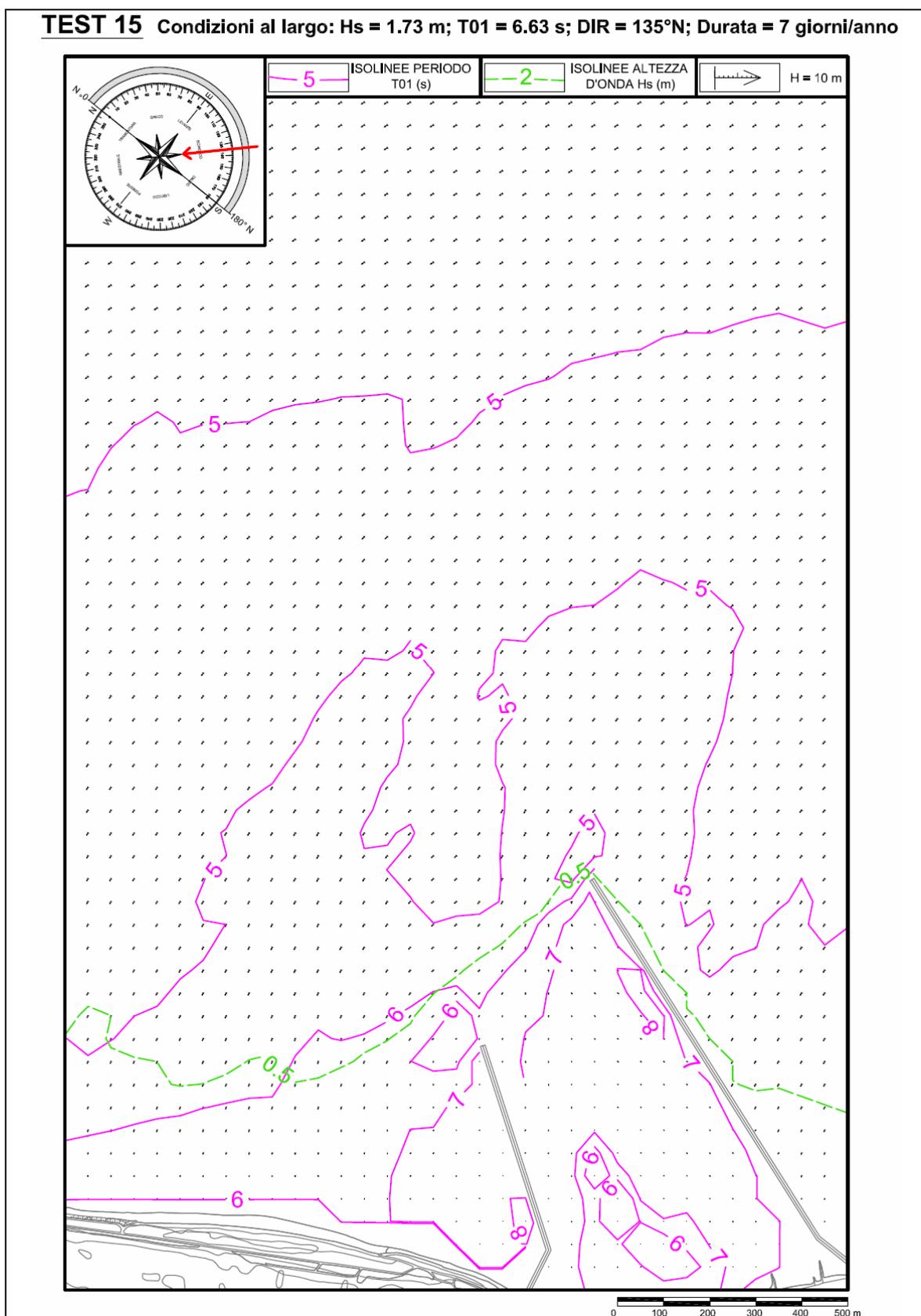


fig. 4.5.16 - Rappresentazione grafica di altezza d'onda, direzione e periodo per la simulazione TEST 15

4.6 Correnti indotte dal moto ondoso nell'intorno della bocca della laguna La Vallona e loro interferenza con le correnti lagunari in ingresso e uscita dalla laguna stessa

Le caratteristiche cinematiche e dinamiche del campo di moto che si stabilisce all'imboccatura di Porto Levante per effetto della marea e delle correnti indotte dal moto ondoso sono state indagate con l'ausilio di un modello matematico idrodinamico bidimensionale a fondo mobile appositamente predisposto. Queste indagini di tipo teorico nel caso in esame sono le uniche possibili dal momento che non sono disponibili risultati di tipo sperimentale, in grado di fornire un quadro esaustivo dei complessi fenomeni che si manifestano in corrispondenza di una foce lagunare e del paraggio di mare antistante dove le correnti indotte dall'alternarsi delle maree si incontrano con quelle sostenute dalle onde nella loro propagazione sottocosta.

Per rappresentare e descrivere correttamente i fenomeni, il dominio di calcolo del modello è stato esteso, oltre che all'imboccatura e al braccio di mare ad essa adiacente, alla laguna La Vallona e al Po di Levante.

Al modello idrodinamico è stato accoppiato un modulo per la valutazione del trasporto dei sedimenti al fondo e in sospensione, al fine di poter condurre anche valutazioni sulla prevedibile evoluzione dei fondali associata ai campi cinematici calcolati nelle diverse condizioni che sono di interesse per la navigabilità.

La metodologia su cui si sono basate le indagini, i dati utilizzati ed i risultati ottenuti sono nel seguito descritti.

4.6.1 Dati disponibili

4.6.1.1 Dati batimetrici

Per la batimetria dei fondali a ridosso della bocca di Porto Levante e nel braccio di mare antistante si è fatto uso dei più recenti rilievi batimetrici disponibili, eseguiti dal COVNI (Centro Operativo Veneto per la Navigazione Interna) di Rovigo. E' stato reperito, in particolare, il rilievo dei fondali attorno alla bocca del Po di Levante eseguito nel 2002, che copre con una serie di sezioni ortogonali alla linea di costa un tratto di lunghezza pari a circa 3200 m a cavallo dei moli foranei, estendendosi fino alla batimetria -13.0 m (che si colloca a circa 2500 m dalla riva). Tali dati sono stato integrati con le sezioni eseguite nel 2004 lungo tutto il percorso navigabile che, a partire dall'esterno dell'imboccatura di Porto Levante, attraversa la laguna La Vallona lungo il grande canale "ad S", fino a congiungersi con l'asta fluviale del Po di Levante (circa 100 sezioni per un'estesa di 5.6 km). Infine, sono state utilizzate le sezioni, risalenti anch'esse al 2002, che descrivono la geometria del Po di Levante dalla laguna alla conca di Volta Grimana (circa 150 sezioni su di un'estesa di 17 km).

La batimetria delle parti più esterne del dominio di calcolo, in mare aperto, è stata ricavata partendo degli elementi riportati nella carta nautica dell'Istituto Idrografico della Marina (Carta n. 38) alla scala 1:100000.

La batimetria della parte meridionale della laguna La Vallona, non coperta dai citati rilievi del COVNI, è stata ricavata da un recente studio sull'armamento della foce del Po di Levante [6] che, a sua volta, si basava su di una serie di rilievi eseguiti nel periodo 1989 – 1993 a cura del Consorzio di Bonifica Delta Po Adige, nell'ambito dei lavori a quell'epoca eseguiti per la vivificazione della laguna.

4.6.1.2 *Dati idrometrici e correntometrici*

Per verificare la validità dei risultati forniti dal modello si sono acquisiti i dati idrometrici e correntometrici disponibili per il sito in esame, conducendo alcune simulazioni di taratura, per confrontare i risultati forniti dal calcolo con quelli rilevati sperimentalmente.

In base alle informazioni raccolte, le uniche recenti campagne di misura correntometriche eseguite sulla bocca di Porto Levante sono state effettuate per conto del Consorzio di Bonifica Delta Po Adige nel marzo 1998 [7], nell'ambito delle attività di monitoraggio dei parametri di qualità delle acque della laguna, e per conto della Regione Veneto nel 2001 [5], tra le attività di controllo degli effetti dei lavori di armamento della foce eseguiti in quegli anni.

Per quanto è di interesse per la presente indagine, nel primo caso sono disponibili misure di livello all'interno della laguna, e misure contemporanee di portata sia in corrispondenza della bocca lagunare a ridosso dell'isola di Albarella (non essendo all'epoca i moli foranei ancora realizzati), sia nella sezione terminale del Po di Levante, poco a monte del suo sbocco in laguna La Vallona.

Nel secondo caso sono disponibili un'ulteriore serie di misure di livello in laguna e di portata alla bocca, nel canale di accesso tra i due moli foranei, all'epoca appena completati.

In entrambi i casi i rilievi sono stati effettuati in occasione di maree di sizigia e coprono quasi interamente un ciclo di marea.

Oltre a tali elementi, presso l'APAT del Veneto sono stati reperiti i dati mareografici locali per il periodo di un anno (2001), rilevati presso la vicina stazione di Porto Caleri.

4.6.2 *Modello matematico bidimensionale a fondo mobile della circolazione idrodinamica*

Il modello matematico utilizzato nell'indagine risolve le equazioni differenziali che governano il flusso bidimensionale di una corrente a superficie libera su bassi fondali in moto vario associando ad esse le relazioni che consentono di tener conto dell'evoluzione dei fondali indotta dalle correnti di marea e da quelle generate dal moto ondoso [3].

4.6.2.1 *Descrizione sintetica del modello*

La componente idrodinamica del modello risolve le equazioni che governano il moto delle onde lunghe in acque basse, in ipotesi di fondali lentamente erodibili. Tali equazioni sono formulate in modo da poter essere applicate anche ad aree parzialmente asciutte o che possono essere allagate o prosciugate durante l'evoluzione del fenomeno [1], [2].

Senza entrare nel merito della soluzione numerica adottata, di cui si riferisce in Appendice ci si limita a ricordare che la soluzione del sistema delle equazioni del moto, nelle incognite h (quota idrometrica) e q (velocità integrata sulla verticale), avviene utilizzando il metodo degli elementi finiti, adottando una soluzione secondo uno schema alle differenze finite semi-implicito per le derivate temporali. Poiché nella discretizzazione spaziale del campo di moto sono utilizzati elementi finiti di forma triangolare, la soluzione per i livelli prevede una variazione lineare delle quote idrometriche all'interno di ciascun elemento, mentre le velocità (integrate sulla verticale) sono considerate costanti

sull'elemento.

Tra le forzanti del modello sono inclusi i termini che permettono di descrivere gli effetti del moto ondoso. Il valore di detti termini (sforzi dovuti ai cosiddetti "radiation stress") è calcolato separatamente dal modello di propagazione del moto ondoso, descritto nei paragrafi precedenti, per ciascuna delle mareggiate considerate e per ciascuno dei livelli assegnati al largo. A tale scopo è stata predisposta una apposita procedura per trasferire, per ogni attacco ondoso e per ogni livello considerato al largo, le componenti delle forzanti dovute al moto ondoso sugli elementi triangolari della griglia di calcolo del modello idrodinamico. In questo modo, ad ogni istante di calcolo, gli effetti del moto ondoso sono stati automaticamente inseriti nella simulazione idrodinamica, influenzando ad ogni istante di calcolo la soluzione fornita dal modello.

Per quanto riguarda l'evoluzione delle quote dei fondali, il modello assume l'ipotesi, valida nella maggior parte dei problemi di evoluzione morfologica, che i tempi caratteristici che descrivono le variazioni dell'idrodinamica e quella dei fondali siano tra loro molto diversi. Si tratta di un'ipotesi più che accettabile e normalmente utilizzata da tutta la letteratura tecnica sull'argomento. Ciò consente di trattare i due fenomeni, dal punto di vista della modellazione matematica, in modo disaccoppiato. Pertanto il modello, ad ogni passo di calcolo, risolve dapprima l'idrodinamica, assumendo invariante la geometria del fondo secondo lo schema già descritto, e poi il trasporto dei sedimenti al fondo e in sospensione utilizzando lo schema descritto nel dettaglio in appendice e considerando come invarianti le grandezze idrodinamiche [3].

L'evoluzione altimetrica del fondo è calcolata risolvendo, ad ogni passo temporale, l'equazione di Exner, che descrive, come è noto, il bilancio tra le variazioni delle quote del fondo, il flusso di materiale trasportato in sospensione che si deposita (dipendente dalla concentrazione C del materiale in sospensione stesso), ed il flusso di materiale eroso dal fondo, che è mandato in sospensione dalla corrente.

E' opportuno precisare che è necessario distinguere tra i due diversi modi di trasporto (al fondo e in sospensione) soprattutto per il fatto che il trasporto al fondo, per intensità e direzione, è influenzato dalla pendenza locale del fondo stesso, mentre il trasporto in sospensione non risente di questo parametro. Per questo motivo, nello studio dell'evoluzione morfologica dei fondali, non possono essere utilizzate formule di trasporto solido totale e le due modalità di trasporto devono essere simulate separatamente.

Per quanto riguarda il trasporto al fondo, la formulazione adottata nel modello si basa su una stima della portata solida derivata dalla ben nota formula di Meyer-Peter e Müller.

Per quanto riguarda il trasporto in sospensione, invece, lo schema risolve la classica equazione del trasporto e diffusione mediata sulla verticale, avente come incognita la concentrazione media verticale del materiale trasportato. Il flusso del materiale eroso è valutato sulla base della formula di Van Rijn, in cui, per la situazione qui esaminata, il valore dello sforzo tangenziale al fondo è dato dal contributo dovuto alle correnti di marea e da quello dovuto al moto ondoso. Quest'ultimo, a sua volta, dipende dal valore dell'ampiezza della velocità orbitale al fondo, che è reso disponibile, istante per istante, dalla simulazione effettuata con il modello di propagazione del moto ondoso, descritto nei paragrafi precedenti.

4.6.2.2 Schematizzazione del sistema idraulico e condizioni al contorno

Il dominio di calcolo considerato dal modello idrodinamico comprende la foce del Po di Levante, armata con i moli foranei, e il braccio di mare ad essa antistante per un tratto che si sviluppa

lateralmente per una lunghezza di circa 9 km, estendosi all'incirca dalla foce del Po di Maistra, a Sud, alla spiaggia di Porto Caleri, a Nord.

A partire dalla linea di spiaggia il dominio di calcolo si estende verso il mare aperto, in modo da includere tutta la fascia di mare prevedibilmente interessata dalla circolazione delle correnti dovute alla marea. Tale ambito si estende per una profondità di circa 4 km, raggiungendo al bordo esterno la batimetrica -16.00 m.

La schematizzazione del modello include, inoltre, tutta la laguna La Vallona, dal momento che i flussi scambiati attraverso la bocca con il mare e le correnti che si stabiliscono nel suo grande canale interno sono principalmente governati dal funzionamento idraulico del sistema lagunare retrostante.

Infine, il reticolo di calcolo comprende l'intero corso del Po di Levante, a partire dallo sbocco in laguna fino alla conca di Volta Grimana (circa 17 km). L'inserimento dell'intero ramo fluviale nello schema si è reso necessario da una parte per mettere a punto un modello completo, che potesse essere utilizzato anche per valutare le condizioni idrodinamiche lungo il fiume ai fini della navigabilità, dall'altra per il fatto che, in base alle simulazioni preliminari effettuate per calibrare il modello, è emerso chiaramente che il l'invaso rappresentato dal corso d'acqua, e quindi le portate scambiate tra il fiume e la laguna in occasione di maree di una certa ampiezza, giocano un ruolo non trascurabile sulle portate e sulla circolazione delle correnti nel canale navigabile che collega lo sbocco in laguna del Po di Levante alla bocca a mare. A tal proposito, sempre in base alle simulazioni preliminari, si è ritenuto opportuno ampliare ulteriormente il tratto fluviale schematizzato, prolungando il Po di Levante fino al sostegno di Baricetta (altri circa 16 km) ed includendo anche il ramo del Po di Brondolo, che si dirama dal Po di Levante, fino alla conca di Cavanella d'Adige (circa 5.7 km). Solo includendo tali specchi d'acqua è stato possibile ottenere portate fluenti lungo il Po di Levante per effetto della marea di entità confrontabile con quelle rilevate sperimentalmente.

La griglia del reticolo di calcolo ad elementi finiti è stata costruita con un programma di generazione automatica, che fa parte del programma di interfaccia utente del modello matematico utilizzato.

Il reticolo risultante è rappresentato graficamente in fig. 4.6.1. L'immagine mette in evidenza come il modello implementato si presti molto bene a schematizzare la complessa morfologia del sistema esaminato, consentendo l'impiego di elementi di dimensioni maggiori, dove le variazioni batimetriche sono meno accentuate, e di dimensioni alquanto più ridotte, fino a valori dell'ordine di qualche metro, dove la batimetria o la geometria dei contorni sono più articolati e possono determinarsi fenomeni di separazione della corrente.

La versatilità del modello si riflette ovviamente anche sulla qualità dei risultati forniti dalle simulazioni numeriche. Grazie a tale versatilità, ampiamente documentata in campo tecnico e scientifico, Disponendo opportunamente i nodi della griglia è possibile ottenere una notevole definizione dei caratteri del moto nelle zone di maggior interesse, pur utilizzando un numero complessivo di nodi relativamente limitato.

Complessivamente il reticolo di calcolo predisposto risulta composto da circa 22000 nodi e 41000 elementi triangolari. Le dimensioni dei lati delle maglie variano tra un minimo di circa 5 m, nelle zone descritte con grande dettaglio all'interno della foce e in prossimità delle testate dei moli che armano la bocca, a circa 200 m per le maglie di maggiori dimensioni poste a ridosso del bordo esterno del dominio verso il mare aperto.

I coefficienti di resistenza del fondo, descritti nel modello secondo la formula di Strickler, sono stati scelti in base ai valori adottati in numerose analoghe esperienze condotte con lo stesso modello. In particolare, al coefficiente di Strickler, dopo alcune simulazioni preliminari, è stato attribuito un valore

uniforme pari a $38 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. Com'è meglio illustrato nei successivi paragrafi, la disponibilità di alcuni dati sperimentali sui livelli idrometrici e sulle portate fluenti ed i risultati delle simulazioni condotte in fase di taratura, hanno consentito una verifica della validità di tale assunzione.

Con riferimento ai valori degli altri parametri inseriti nel modello, che principalmente controllano i fenomeni di trasporto dei sedimenti, essi sono stati determinati mediante relazioni proposte dalla letteratura tecnica, non essendo disponibili i dati sperimentali necessari per una loro specifica taratura.

In particolare, per quanto riguarda la granulometria dei sedimenti presenti sul fondo, è stato considerato un diametro rappresentativo d_{50} del materiale, pari a 0.1 mm. A tale assunzione si è pervenuti facendo riferimento agli elaborati contenuti nel Progetto di Armamento della foce di Porto Levante [6], ed in particolare allo Studio di Impatto Ambientale. In tale studio il materiale presente sul fondo all'esterno dell'imboccatura è classificato come "sabbia fine limosa", il cui diametro medio (d_{50}), in base alle curve granulometriche riportate, è, appunto, di circa 0.1 mm.

E' opportuno in ogni caso sottolineare che la scelta operata è derivata anche da una serie di simulazioni preliminari eseguite, in base alle quali si è potuto constatare come la variazione del diametro dei sedimenti entro un intervallo ragionevolmente accettabile (è stata sperimentata una variazione da 0.1 a 0.5 mm) influenzi l'entità dei fenomeni di erosione e deposito, ma non modifichi in modo sostanziale la distribuzione planimetrica delle aree soggette a tali fenomeni.

D'altra parte, la modellazione a fondo mobile della foce si deve intendere orientata principalmente all'individuazione delle aree soggette ad erosione e/o deposito, non potendo essa essere ritenuta del tutto esente da incertezze, per quanto riguarda la quantificazione dell'entità delle variazioni delle quote dei fondali. Per essere più correttamente inquadrati anche dal punto di vista quantitativo, i processi di erosione e/o di deposito segnalati dal calcolo necessiterebbero di verifiche e di controlli sperimentali attualmente non disponibili.

Relativamente alla componente idrodinamica del modello, le condizioni al contorno utilizzate nelle simulazioni numeriche consistono essenzialmente nell'assegnazione dell'andamento dei livelli di marea sul contorno aperto in corrispondenza del lato a mare. Nelle simulazioni di taratura, tale andamento è stato ovviamente assegnato sulla base delle misure dirette disponibili. Per le simulazioni finalizzate all'analisi dei diversi scenari considerati, si è assunta, invece, per la marea un andamento di tipo sinusoidale con periodo di 12 ore, ampiezza complessiva di 0.8 m o di 1.0 m, oscillante attorno al livello medio del mare. Si tratta di una marea rappresentativa delle usuali condizioni di sizigie.

Inoltre, è stato assegnato l'andamento delle portate scambiate tra la laguna La Vallona e la laguna di Caleri in corrispondenza del varco Pozzadini. L'andamento di tali portate è stato ricavato in base a delle simulazioni preliminari effettuate con un modello semplificato, che considera il sistema complessivo delle lagune di Caleri e La Vallona.

Infine, sono state assegnate le portate in ingresso nella sezione di monte del Po di Levante a Baricetta. Nelle simulazioni finalizzate alle necessità dello studio, tali portate sono state valutate sulla base di quanto riportato nel progetto del PAI (Piano di Assetto Idrogeologico) della Autorità di Bacino del Fiume Fissero Tartaro Canalbianco [8].

Poiché le simulazioni tengono in conto l'effetto combinato delle correnti di marea e di quelle indotte dal moto ondoso, tra le condizioni al contorno sono inclusi anche gli sforzi calcolati con il modello di propagazione delle onde descritto nel precedente paragrafo 4.2.3.

La procedura utilizzata a tal fine consente di determinare le componenti τ_{wx} e τ_{wy} degli sforzi dovuti agli stati di mare considerati, in corrispondenza del centro di ciascun elemento del reticolo di calcolo del modello idrodinamico, mediante un'interpolazione lineare tra i nodi vicini del modello del moto ondoso. Inoltre, poiché la simulazione idrodinamica considera un andamento variabile nel tempo del livello secondo le condizioni imposte dalla marea, mentre le simulazioni di propagazione dell'onda sotto riva sono effettuate solo per determinati valori del livello al largo (+0.6, 0.0, -0.6 m s.l.m.), la procedura predisposta consente di calcolare, istante per istante, il valore dello sforzo che compete al livello istantaneo raggiunto dalla marea mediante interpolazione lineare tra i valori che competono ai livelli considerati per il moto ondoso.

Per quanto riguarda il trasporto dei sedimenti, le condizioni al contorno consistono nell'assegnazione degli scambi di portata solida sui nodi al contorno. Ciò si traduce, relativamente al trasporto al fondo, nell'individuazione di un certo numero di nodi in cui si suppone che il trasporto solido di fondo sia in equilibrio idrodinamico con la corrente. Per il trasporto in sospensione, invece, sono individuate alcune porzioni di frontiera del dominio in cui si assegna il flusso di materiale solido scambiato con l'esterno.

Nel caso in esame, si è assunta l'ipotesi che il trasporto di fondo sia in equilibrio idrodinamico nei nodi di monte del modello, dove si applicano le portate liquide in ingresso (Po di Levante e varco Pozzadini), e che i flussi di materiale solido in sospensione scambiati con l'esterno del dominio siano nulli su tutta la frontiera del dominio.

Ancora con riferimento al trasporto dei sedimenti, poiché il valore dello sforzo tangenziale al fondo è dato, oltre che al contributo dovuto alla corrente, anche a quello dovuto al moto ondoso, quest'ultimo è stato calcolato in funzione del valore dell'ampiezza della velocità orbitale al fondo., valutata con il modello di propagazione del moto ondoso. Anche in questo caso, a ciascun elemento triangolare del modello idrodinamico è stato attribuito un valore calcolato mediante interpolazione lineare tra i più vicini nodi del modello che esamina la propagazione delle onde.

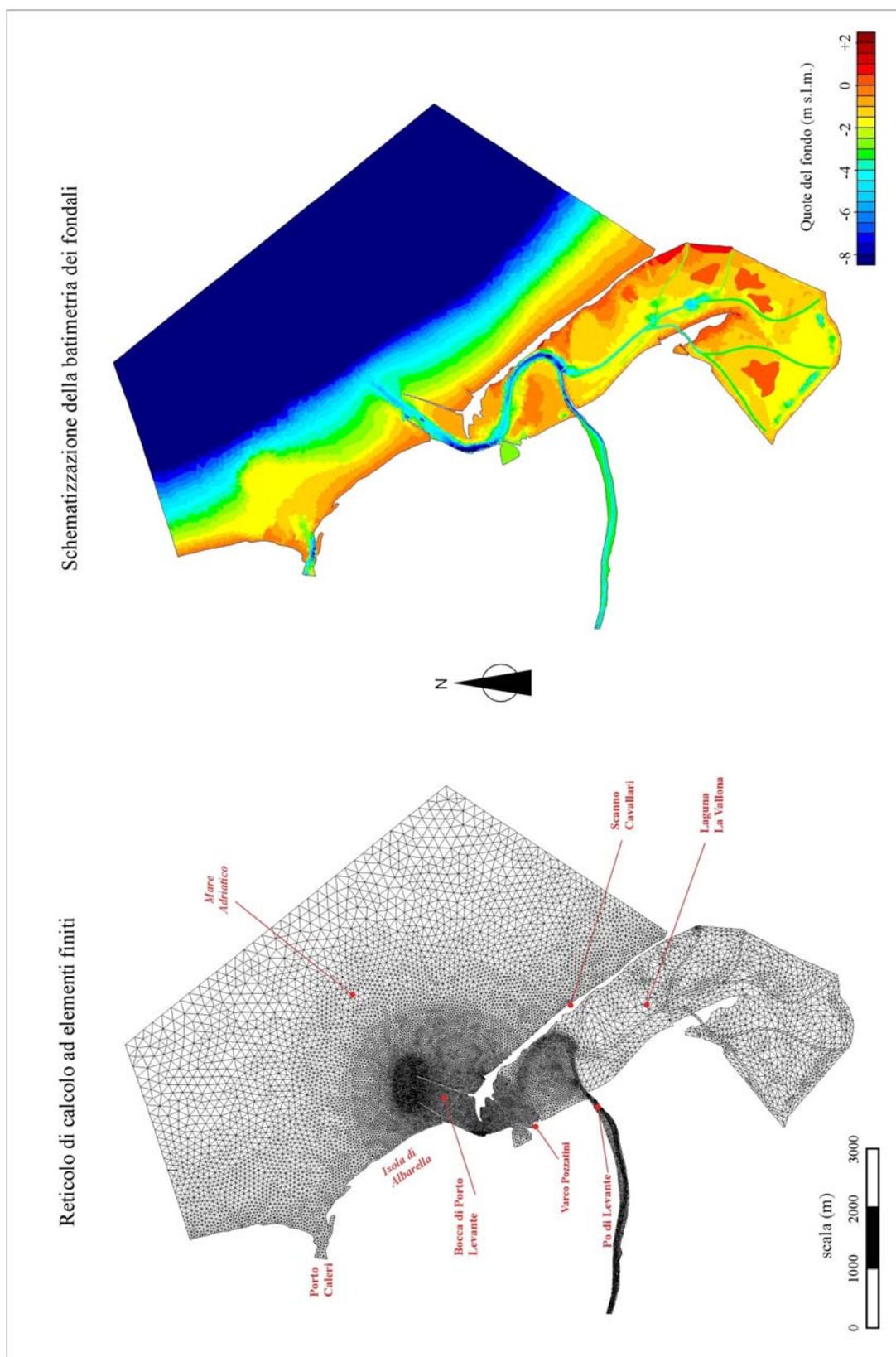


fig. 4.6.1 - Modello bidimensionale ad elementi finiti del Po di Levante dalla conca di Volta Grimana al mare. Particolare della schematizzazione della laguna La Vallona e del braccio di mare antistante

4.6.2.3 *Messa a punto del modello*

Per verificare il corretto funzionamento del modello idrodinamico ed, in particolare, i valori assunti per il coefficiente di scabrezza, il modello è stato preliminarmente applicato per simulare la circolazione delle correnti indotte dalle maree sizigiali dei giorni 10 marzo 1998 e 5 luglio 2001, per i quali, come si è detto precedentemente, sono disponibili misure contemporanea dei livelli idrometrici e delle portate fluenti.

Nessun dato di riferimento è disponibile, invece, per la taratura del modello per quanto riguarda il trasporto dei sedimenti. Per questo aspetto, come si è già detto, i risultati ottenuti, riportati nei paragrafi successivi, devono considerarsi con una qualche attenzione, potendo in alcuni casi essere affetti da incertezze, soprattutto per quanto riguarda gli aspetti quantitativi dei fenomeni simulati numericamente.

Nelle simulazioni di taratura, sui nodi a mare del reticolo di calcolo, è stato assegnato l'andamento dei livelli di marea registrati nei giorni della misura in corrispondenza del più prossimo mareografo disponibile, situato a Porto Caleri. Relativamente alle portate scambiate dalla laguna La Vallona con la laguna di Caleri, attraverso il Varco Pozzadini, l'andamento assegnato è stato determinato mediante una simulazione preliminare condotta con il modello semplificato menzionato in precedenza. Non essendo disponibili dati sulle portate fluenti nel Po di Levante durante il periodo delle misure per il corso d'acqua, sui nodi di monte (a Baricetta) è stata assegnata una modesta portata in arrivo, pari a 30 m³/s.

Nelle fig. 4.6.2 - fig. 4.6.3 sono messi a confronto i livelli e le portate misurati con quelli calcolati con il modello. I punti di controllo dei livelli si collocano nel primo caso (marea del 10 marzo 1998) presso il Varco Pozzadini, nel secondo caso (marea del 5 luglio 2001) all'interno della darsena di Albarella. Le portate fluenti sono state misurate, in entrambi i casi, in una sezione sulla bocca, in modo da intercettare interamente i flussi scambiati tra la laguna e il mare. Nel marzo 1998 la misura è stata effettuata anche nella sezione terminale del Po di Levante, poco a monte dello sbocco del fiume in laguna.

Si può osservare che per la marea del 10 marzo 1998 i livelli calcolati presso il Varco Pozzadini risultano in ottimo accordo con quelli misurati, se si eccettua una leggera riduzione di ampiezza del segnale calcolato rispetto a quello misurato, valutabile in qualche centimetro. Accettabile è anche l'accordo tra le portate misurate e calcolate alla bocca di Porto Levante, anche se le massime portate calcolate risultano maggiori di quelle misurate. In particolare, le portate massime in fase di riflusso valgono quasi 600 m³/s, secondo il calcolo, e poco meno di 500 m³/s, in base alla misura, a fronte di un'escursione dei livelli di marea in fase decrescente di poco più di 80 cm; le portate massime in fase di flusso sfiorano gli 800 m³/s (solo secondo il calcolo non essendo disponibile la misura) a fronte di un'escursione del livello di marea in fase crescente di circa 90 cm. Si deve tenere presente, comunque, che la geometria della bocca di Porto Levante era, all'epoca delle misure, un po' diversa da quella attuale, cui si riferisce invece la schematizzazione modellistica. In particolare non erano ancora stati realizzati i moli di armamento della foce e non erano periodicamente effettuati i dragaggi lungo il passo navigabile compreso tra i moli stessi. Tutto questo lascia presumere che le portate fluenti attraverso la bocca potessero essere, allora, inferiori a quelle attuali.

Eguale accettabile è da ritenersi il confronto tra le portate calcolate e quelle misurate per la sezione del Po di Levante. Le misure si riferiscono alla sola fase di flusso uscente (portate immerse dal Po di Levante in laguna) e forniscono valori massimi dell'ordine di 190 m³/s. Il calcolo riproduce

bene l'andamento delle portate nel tempo, anche se i valori massimi sono leggermente inferiori (165 m³/s). Anche in questo caso un certo grado di incertezza deriva dal fatto che, come ricordato precedentemente, mancano indicazioni sulle reali portate in arrivo da monte nel Po di Levante. A questa insufficienza si è sopperito assegnando ipoteticamente in ingresso al Po di Levante una portata costante pari a 30 m³/s.

Nel secondo caso (marea del 5 luglio 2001), l'accordo sui livelli appare meno soddisfacente. Tuttavia, il fatto che il segnale misurato si collochi sempre al di sotto di quello calcolato, ma che l'ampiezza complessiva dell'oscillazione sia praticamente la medesima, lascia supporre che ci possa essere una qualche discrepanza tra gli zeri di riferimento adottati nei due casi. L'accordo che si verifica sull'andamento delle portate alla bocca di Porto Levante, a sua volta, è ottimo, sia in fase di flusso entrante che in fase di flusso uscente, poiché la curva che rappresenta i risultati del calcolo approssima molto bene quasi tutti i punti sperimentali. Quanto alle portate massime, in fase di flusso valgono poco più di 600 m³/s, a fronte di un'escursione dei livelli di marea in fase crescente di circa 75 cm. Le portate massime in fase di riflusso, invece, sono poco meno di 400 m³/s, a fronte di un'escursione del livello di marea in fase decrescente di poco meno di 30 cm.

Per quanto riguarda il Po di Levante, pur non essendo possibile, per questo evento, il confronto con misure sperimentali, è significativo osservare come esse assumano valori massimi dell'ordine di 140 m³/s in flusso e di 170 m³/s in riflusso. Tenuto conto che, anche in questo caso, la portata di base assegnata a monte è pari a soli 30 m³/s, la simulazione indica che le portate fluenti nella sezione terminale del Po di Levante dovute alla sola marea, sono di un certo rilievo, perché in condizioni di sizigia, come quelle esaminate, il loro contributo può raggiungere valori massimi compresi tra i 100 e i 200 m³/s.

Nel complesso il confronto tra le misure e i risultati del calcolo mette in evidenza che, quantomeno con riferimento a situazioni in cui il flusso è controllato dal solo andamento della marea, il modello predisposto è in grado di simulare con buona approssimazione i flussi scambiati tra mare e laguna, l'andamento dei livelli all'interno della laguna stessa, e le portate fluenti allo sbocco in laguna del Po di Levante.

Il tutto fa presumere che lo schema di calcolo predisposto possa simulare l'intero schema idraulico con buona approssimazione anche in condizioni diverse da quelle considerate per la sua taratura. E' ragionevole, pertanto, far riferimento ai risultati ottenuti dal calcolo per inquadrare con sufficiente approssimazione le grandezze ed i parametri idraulici e marittimi dai quali dipendono l'assetto dei fondali del passo navigabile, i campi di velocità che dovranno essere fronteggiati dai battelli in navigazione da e per la centrale, i livelli idrometrici e le sezioni idrauliche della struttura idroviaria.

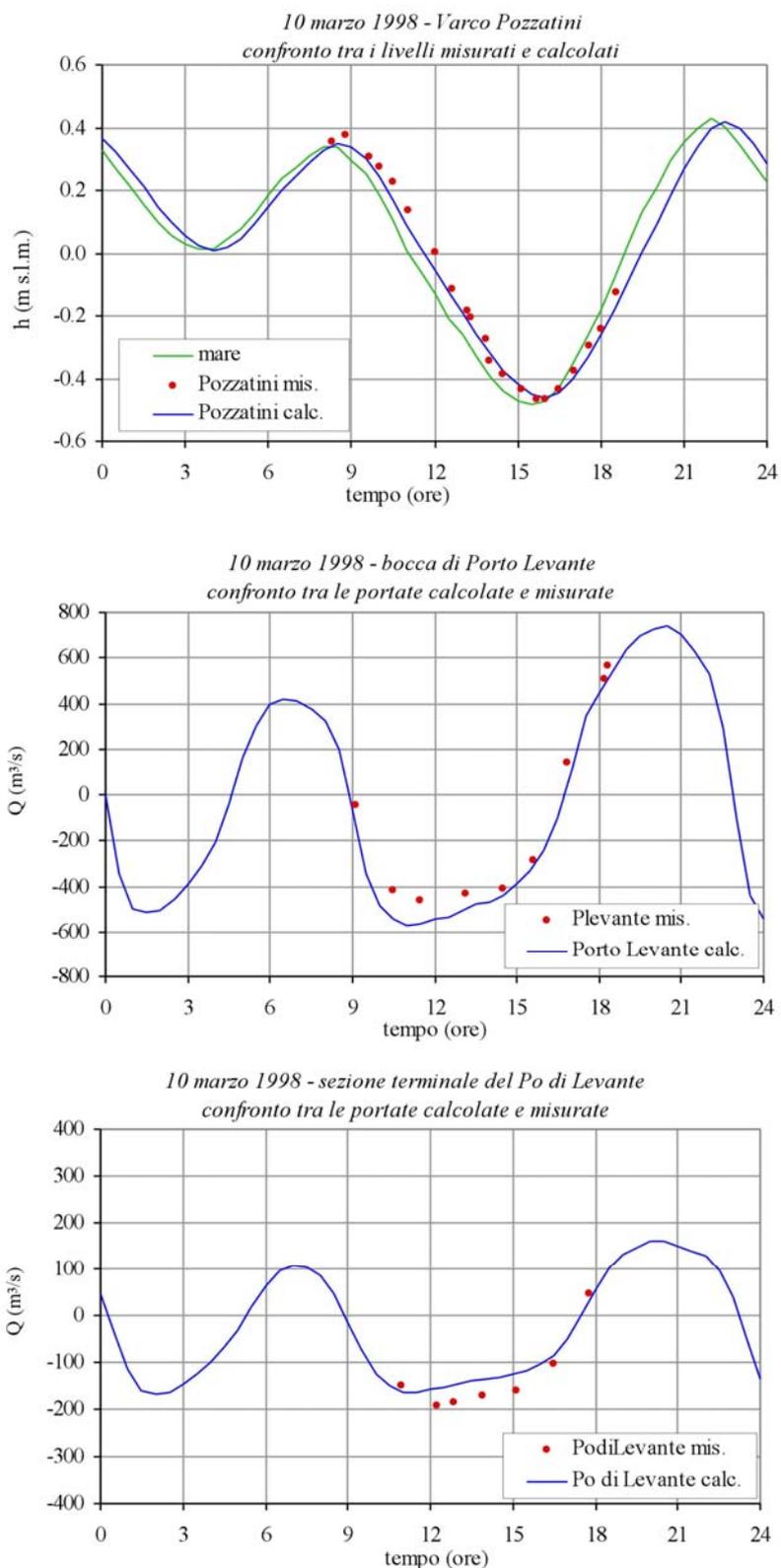


fig. 4.6.2 - Confronto tra i risultati del calcolo e i dati sperimentali per la marea del 10 marzo 1998

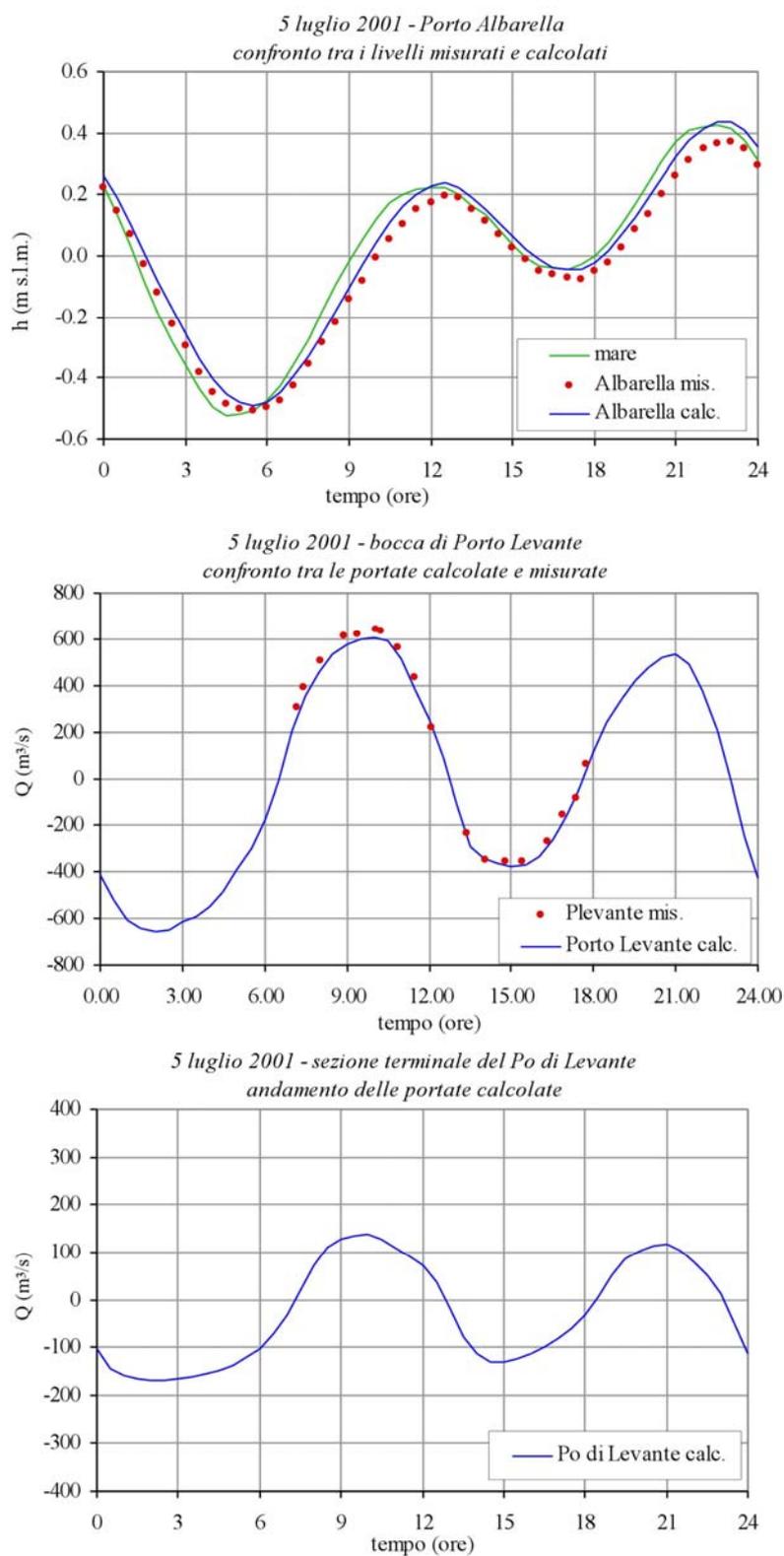


fig. 4.6.3 - Confronto tra i risultati del calcolo e i dati sperimentali per la marea del 5 luglio 1998

4.6.3 Situazioni esaminate

Tenuto conto delle finalità dello studio finalizzato a verificare le condizioni di navigabilità delle vie d'acqua interne della direttrice varco a mare della Laguna di La Vallona – canale lagunare interno – Po di Levante fino a Volta Grimana, le simulazioni con il modello matematico sono state effettuate considerando le diverse situazioni idrodinamiche critiche per il funzionamento del sistema relativamente ai diversi aspetti.

E' stato, innanzitutto, studiato il comportamento idrodinamico della bocca e del canale di accesso in laguna nell'ipotesi che la forzante della circolazione idrodinamica sia costituita esclusivamente dall'oscillazione della marea. A tale scopo, si è ipotizzato che il livello in mare segua un andamento sinusoidale con periodo di 12 ore oscillante tra le quote +0.4 e -0.4 m s.l.m.. In tale modo si è schematizzato, in pratica, l'effetto di una marea sizigiale, quali sono quelle che si possono normalmente verificare in Adriatico. Questo tipo di simulazione è stato esteso per una durata di 8 cicli di marea. Data la natura periodica della condizione al contorno, e nell'ipotesi che il campo idrodinamico sia modificato gradualmente dalle eventuali variazioni di quota del fondale, si è scelto, come è possibile nel modello utilizzato, di amplificare l'entità dei fenomeni di erosione e di deposito calcolati ad ogni passo di calcolo di 4 volte rispetto al reale. In questo modo, gli effetti riscontrati sulle variazioni delle quote dei fondali al termine delle simulazioni sono equivalenti a quelli riscontrabili dopo 32 cicli di marea, ovvero dopo 16 giorni caratterizzati dal medesimo andamento dei livelli in mare.

In secondo luogo, è stato analizzato il comportamento della bocca nell'ipotesi che, oltre alla forzante mareale, la circolazione idrodinamica e il trasporto dei sedimenti siano influenzati anche dagli effetti delle mareggiate. A tale riguardo, le simulazioni sono state condotte considerando tre degli scenari di moto ondoso presi in esame con il relativo modello matematico, di cui si è riferito nel precedente paragrafo 4.2.3.

Il primo scenario riguarda l'onda avente durata media annua di 24 ore per il settore di Bora. Essa è caratterizzata, in base all'analisi statistica precedentemente riportata, da un'altezza significativa di 3.58 m, un periodo T_{01} di 7.2 s e una direzione di provenienza di 55° N.

Il secondo scenario considerato riguarda l'onda di analoga frequenza per il settore di Levante, ed è caratterizzata da un'altezza significativa di 2.49 m, un periodo T_{01} di 6.45 s e una direzione di provenienza di 85° N.

L'ultimo scenario riguarda l'onda di analoga frequenza per il settore di Scirocco, caratterizzata da un'altezza significativa di 2.95 m, un periodo T_{01} di 7.73 s e una direzione di provenienza di 135° N.

In tutti e tre i casi i campi d'onda sono stati calcolati per diverse altezze della marea, variabili tra +0.6 e -0.6 m s.l.m., in modo da considerare l'effetto dovuto allo spostamento della fascia dei frangenti a seconda della quota della superficie libera durante una marea di sizigie un po' più ampia rispetto a quella considerata per descrivere il comportamento del sistema in assenza di qualsiasi effetto del moto ondoso.

Le simulazioni che considerano l'effetto del moto ondoso sono state estese per una durata di 3 giorni. La forzante mareale, analoga a quella precedentemente descritta (andamento sinusoidale con periodo di 12 ore oscillante tra le quote +0.4 e -0.4 m s.l.m), è stata applicata per l'intera durata della simulazione, mentre la forzante dovuta al moto ondoso è stata applicata solo nella seconda delle tre giornate. Anche in questo caso si è scelto di amplificare l'entità dei fenomeni di erosione e

di deposito calcolati ad ogni passo di calcolo, ma considerando un coefficiente di amplificazione di 2 volte rispetto al reale. Conseguentemente le variazioni morfologiche ottenute sono equivalenti a quelle riscontrabili dopo un periodo di 6 giorni, durante i quali gli effetti del moto ondoso si esplicano ininterrottamente nelle due giornate centrali.

4.6.4 Analisi dei risultati ottenuti

Nei paragrafi successivi sono illustrati i risultati principali ottenuti dalle simulazioni numeriche per le diverse situazioni di marea e di moto ondoso esaminate, precedentemente descritte nei loro caratteri essenziali.

4.6.4.1 Correnti ed evoluzione dei fondali indotte dai soli effetti della marea

Nell'ipotesi di considerare la presenza delle sole correnti di marea, il modello segnala che, nella propagazione attraverso la bocca, la marea subisce una riduzione dell'ampiezza dell'onda appena apprezzabile (meno di 4 cm complessivamente) ed un modesto sfasamento dei colmi e dei cavi rispetto al mare che è valutabile in circa 30-40 minuti (fig. 4.6.4). Per la marea considerata dell'ampiezza complessiva di 0.80 m, le portate massime scambiate dalla laguna con il mare in fase di flusso sfiorano gli 800 m³/s e sono di poco superiori ai 600 m³/s in fase di riflusso. Modestissime riduzioni di ampiezza si riscontrano anche nella successiva propagazione della marea all'interno della laguna, che si caratterizza, invece, per il diverso ritardo di fase che si incontra per le diverse zone.

Più interessante è l'analisi dell'andamento dei campi di velocità e delle variazioni di quota dei fondali che si determinano in corrispondenza della bocca nell'ipotesi assunta di sola marea agente.

Nella fig. 4.6.5 è illustrata con una scala di colori la distribuzione dei moduli della velocità in corrispondenza della bocca in fase di massimo flusso e di massimo riflusso.

Nella fase di flusso entrante, le portate sono chiamate verso la bocca da tutte le direzioni, producendo un assetto del campo di moto del tutto simile a quello che si otterrebbe in condizioni di moto a potenziale di velocità. Si riscontrano, infatti, modeste separazioni di corrente che si localizzano solo in prossimità della testata dei moli (fig. 4.6.6).

Un assetto completamente diverso del campo di moto si incontra nella fase di flusso uscente, quando la corrente si immerge nel mare antistante formando un vero e proprio getto che tende a mantenere la sua configurazione e a mescolarsi debolmente con le acque circostanti. Ampii vortici laterali accompagnano la corrente in uscita (fig. 4.6.6) e si muovono verso il mare staccandosi dalle testate dei moli. Il comportamento asimmetrico osservato per la bocca è tipico di tutte le foci armate con moli e facilita la perdita in mare dei sedimenti più fini trasportati dalla corrente che, espulsi fino a zone molto profonde, vi si depositano e non possono essere più risospesi dalle onde.

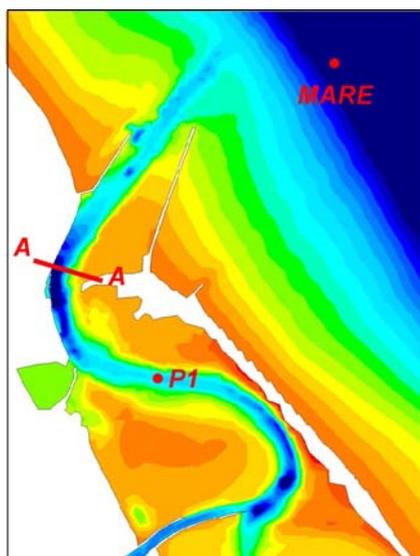
Elevate velocità si manifestano in fase di flusso a ridosso della testata del molo Nord, per una prevalente chiamata delle portate in direzione Nord-Sud. Tale assetto dà in qualche modo giustificazione dell'erosione che i rilievi batimetrici effettuati negli ultimi anni segnalano a ridosso della testa di questo molo. Il fenomeno erosivo, pertanto, sembra essere dovuto non tanto agli effetti del moto ondoso, quanto piuttosto alle correnti di marea entrante che aggirano la testata del molo nord.

Il modello, sempre con riferimento alla distribuzione della velocità, mette in evidenza che sia in fase di flusso entrante sia in fase di flusso uscente, il filone della corrente tende a lambire il molo Nord,

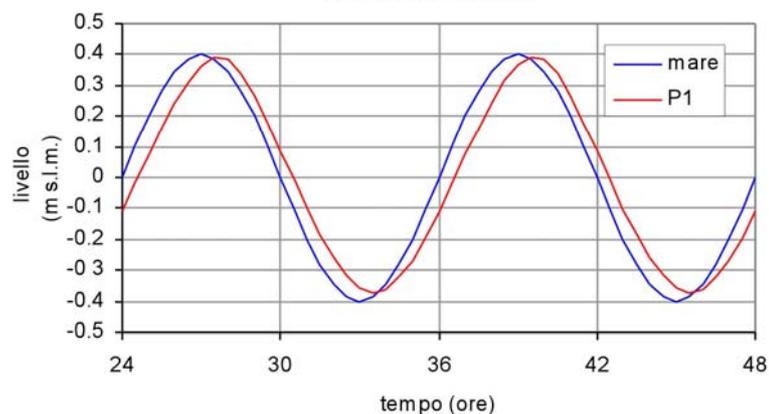
addossandosi particolarmente alla riva lungo la grande curva che il canale di accesso alla laguna presenta, subito dopo aver superato il tratto iniziale compreso tra i moli foranei.

Le velocità massime che si verificano non sono però particolarmente elevate, essendo localmente dell'ordine di $0.9 \div 1.0$ m/s.

Quanto alla configurazione planimetrica attuale del canale di accesso, se da una parte essa può comportare pericoli di erosione per la riva Nord, dall'altra garantisce il mantenimento di fondali stabili e più che adeguati alla necessità della navigazione dei battelli destinati al collegamento tra la nave "storage" al largo e la centrale di Porto Tolle. In tal senso, sembrerebbe opportuno non tanto intervenire per allargare artificialmente il passo navigabile nella zona in cui lo scanno sud si protende verso la sponda opposta, quanto piuttosto a difendere eventualmente dall'erosione la riva occidentale.



Simulazione marea sinusoidale
Andamento del livello



Simulazione marea sinusoidale
Andamento della portata

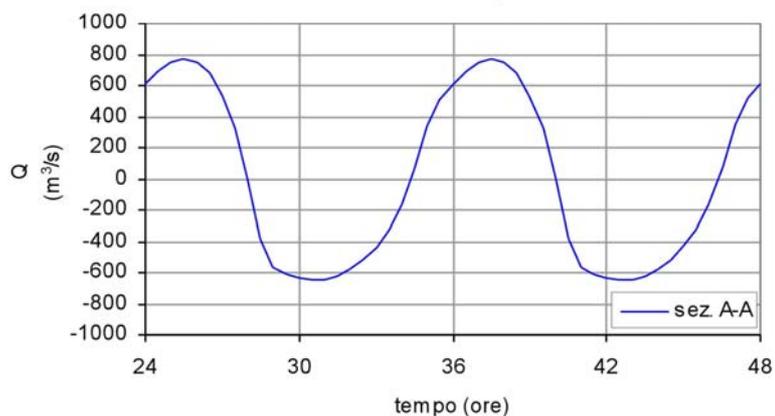


fig. 4.6.4 - Andamento del livello e della portata calcolati nella simulazione che prevede una marea semidiurna sinusoidale oscillante tra +0.4 e -0.4 m s.l.m.

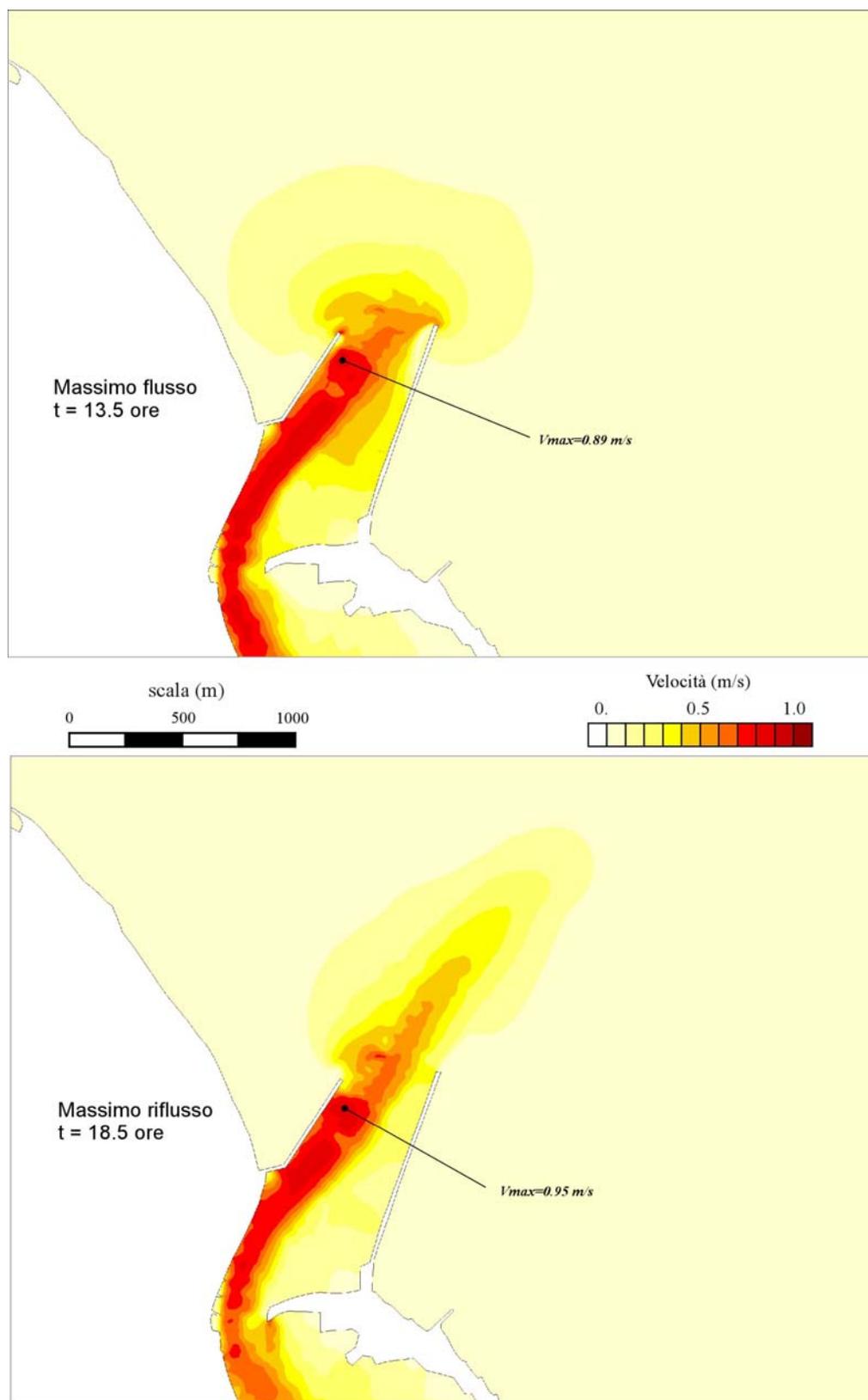


fig. 4.6.5 - Campi di velocità nell'intorno della bocca di Porto Levante valutati con il modello a fondo mobile nella simulazione che prevede l'effetto di una marea semidiurna sinusoidale oscillante tra +0.4 e -0.4 m s.l.m.

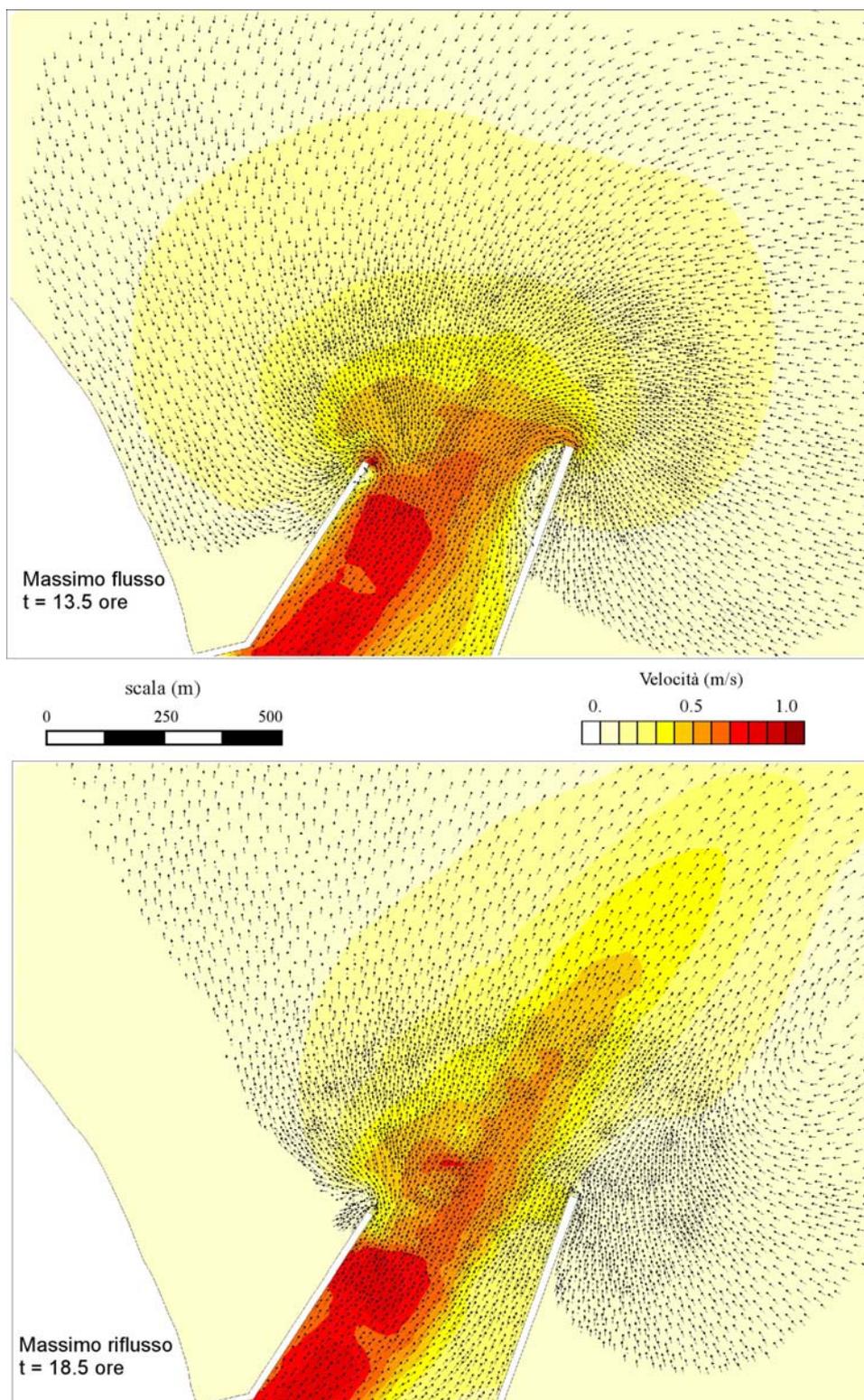


fig. 4.6.6 - Particolare dei campi di velocità a ridosso delle testate dei moli valutati con il modello a fondo mobile nella simulazione che prevede l'effetto di una marea semidiurna sinusoidale oscillante tra +0.4 e -0.4 m s.l.m.

Queste caratteristiche del campo idrodinamico si riflettono sull'assetto dei fondali, come è ben documentato dai risultati ottenuti considerando la mobilità del fondo.

Per lo stato attuale, il confronto tra la condizione iniziale dei fondali e quella che si realizza dopo 16 giorni, durante i quali si è supposto che agisca costantemente la sola marea con le caratteristiche periodiche sopra indicate, evidenzia una sostanziale condizione di equilibrio delle profondità (fig. 4.6.7). Il canale navigabile presente tra i moli e nel tratto di mare immediatamente prospiciente la bocca tende a mantenersi, garantendo fondali sufficienti. Il modello segnala, in prossimità della testata del molo Nord, un parziale interrimento dell'ampio scavo segnalato anche dai più recenti rilievi topografici. Con riferimento a questo aspetto, tuttavia, si deve ricordare che lo schema bidimensionale utilizzato non è in grado di descrivere correttamente quanto avviene in prossimità di un'opera come quella esaminata. I caratteri locali del moto in prossimità della testata del molo, infatti, sono decisamente tridimensionali e dovrebbero essere descritti puntualmente e non mediante uno schema che media le velocità sulla verticale. I caratteri turbolenti del moto, tipicamente di natura tridimensionale, condizionano in misura rilevante il processo locale di scavo.

Una rappresentazione a scala di colori delle variazioni di quota che, secondo il modello, si manifesterebbero lungo il canale di accesso sotto l'azione periodica di una marea sinusoidale, come quella esaminata, è riportata in fig. 4.6.8.

Per lo stato attuale, dopo 16 giorni di marea, si riscontrano nel tratto di canale compreso tra i moli prevalenti fenomeni di deposito, con variazioni di quota di alcune decine di cm ($< \sim 50$ cm). Un modesto fenomeno di erosione è segnato in prossimità della diga Nord, con scavi che restano comunque inferiori a $0.7 \div 1.0$ m.

Una modesta tendenza al deposito è anche indicata per il canale navigabile in vicinanza della grande curva che esso presenta una volta entrato in laguna. Si tratta, anche in questo caso, di fenomeni di modesta entità, generalmente inferiori a 0.5 m.

Depositi per una cinquantina di cm di spessore sono, infine, evidenziati nella zona di mare immediatamente prospiciente il varco di accesso tra i moli.

Nel complesso, come si è accennato, emerge dalle analisi condotte la capacità delle correnti di marea di garantire accettabili condizioni di officiosità della bocca in assenza di mareggiate. I fenomeni di deposito segnalati si manifestano con gradualità e, tenuto conto dei fondali esistenti, sono di entità tale da non pregiudicare in alcun modo ai battelli da e per la centrale di Porto Tolle di accedere in condizioni di sicurezza al canale di Porto Levante.

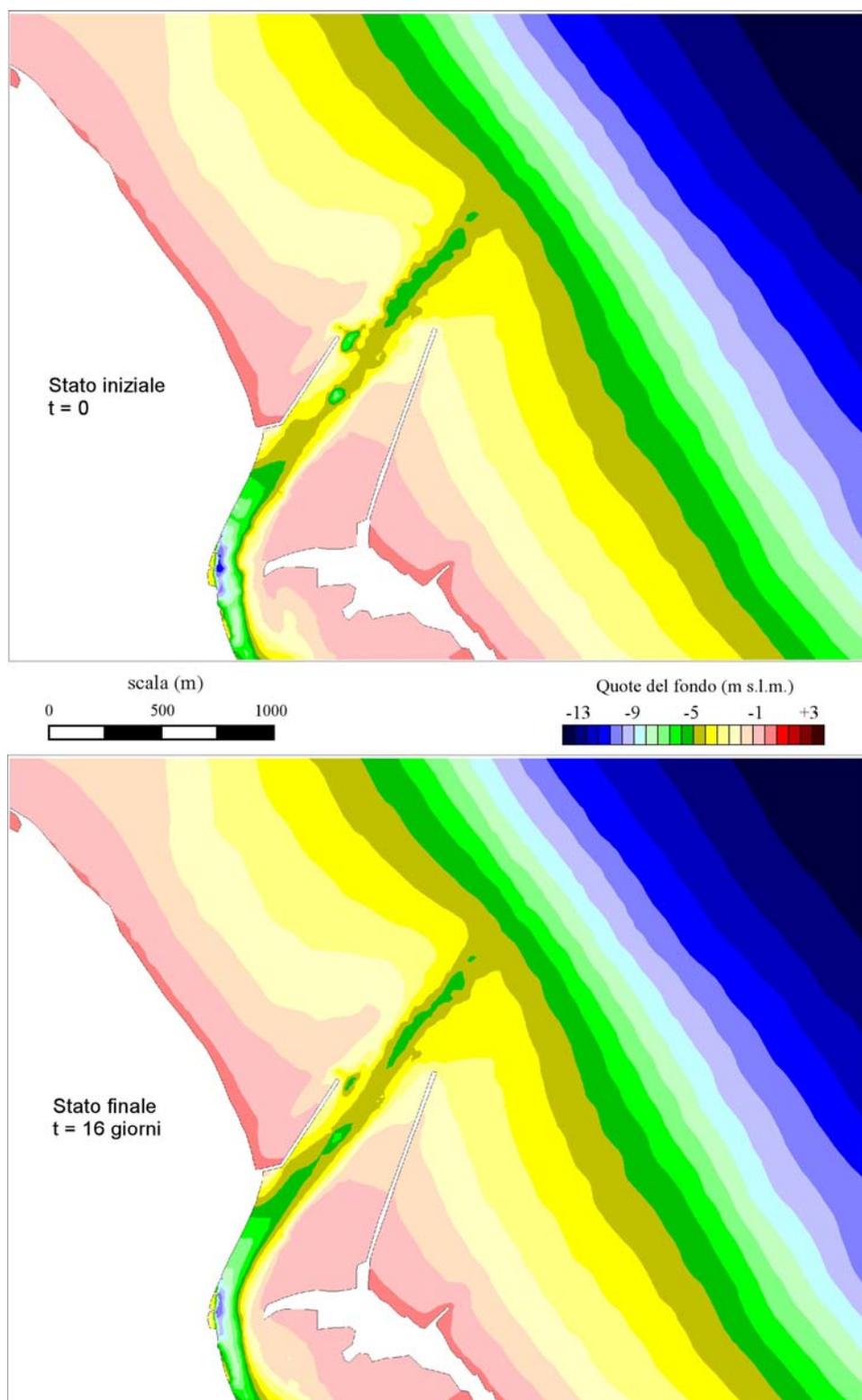


fig. 4.6.7 - Quote del fondo valutate con il modello a fondo mobile nella simulazione che prevede l'effetto di una marea semidiurna sinusoidale oscillante tra +0.4 e -0.4 m s.l.m.

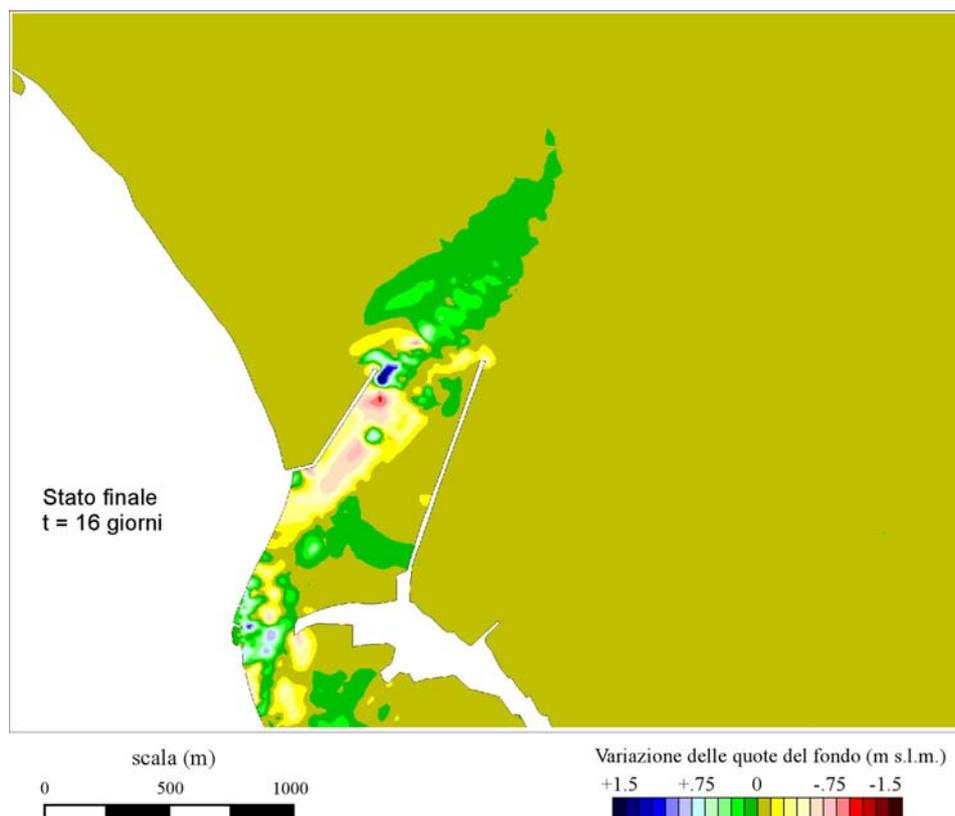


fig. 4.6.8 - Variazione delle quote del fondo valutate con il modello a fondo mobile nella simulazione che prevede l'effetto di una marea semidiurna sinusoidale oscillante tra +0.4 e -0.4 m s.l.m.

4.6.4.2 Correnti ed evoluzione dei fondali in presenza di marea e di mareggiate eccezionali

La propagazione sotto costa del moto ondoso genera la comparsa di correnti costiere che interagiscono con le correnti di marea e possono in molti casi modificare apprezzabilmente l'assetto idrodinamico del campo di moto. Tanto più rilevante è questo effetto se si considera che, contemporaneamente, i sedimenti presenti sui fondali sono, a loro volta, soggetti all'azione del moto ondoso che ne facilita lo spostamento sia in prossimità del fondo, sia in sospensione per le parti più fini.

Per evidenziare gli effetti dell'interazione tra i processi sostenuti dalle correnti di marea e i fenomeni indotti dalla propagazione sotto riva del moto ondoso, si sono condotte alcune simulazioni introducendo opportunamente nel modello idrodinamico gli effetti conseguenti alla propagazione del moto ondoso.

A tal fine, si sono considerate tre situazioni rappresentative delle mareggiate aventi durata media annua di 24 ore conseguenti a venti di Bora (con direzione 55°N), a venti di Levante (con direzione 85°N) e a venti di Scirocco (con direzione 135°N).

Nell'area di mare prossima alla bocca la distribuzione degli sforzi tangenziali corrispondenti alle tre

situazioni esaminate (in gergo tecnico denominati sforzi da "radiation stress" con riferimento alla letteratura anglosassone) calcolata con il modello del moto ondoso, è illustrata in fig. 4.6.9. E' evidente come sotto costa per onde provenienti dai settori di Scirocco, con altezza al largo di 3 m e periodo 7.7 s, gli sforzi da "radiation stress" siano alquanto modesti, principalmente a causa dell'effetto di schermo dovuto alla presenza del Delta del Po, che si protende alquanto verso il largo proteggendo il litorale prospiciente la bocca. Si tratta, quindi, di una condizione che non altera sostanzialmente i risultati che si ottengono per la configurazione attuale dei moli considerando gli effetti delle sole correnti di marea.

Di relativamente bassa entità sono anche gli sforzi dovuti alle onde provenienti dal settore di Levante, caratterizzate da altezza significativa dell'onda al largo pari a 2.5 m e periodo pari a 6.5 s. Anche in questo caso, pertanto, gli effetti dell'azione del moto ondoso sulla dinamica della circolazione a ridosso della bocca di Porto Levante sono modesti se confrontati con quelli dovuti alla marea. Trascurabili sono di conseguenza gli effetti di queste mareggiate sullo stato dei fondali, che è ancora controllato dalle sole correnti di marea.

Sollecitazioni molto più intense si rilevano, invece, per la mareggiata proveniente dal settore di Bora, la quale è caratterizzata da onde al largo dell'altezza di 3.6 m e periodo di 7.2 s. In questo caso, avvicinandosi alla riva, le onde producono sollecitazioni da "radiation stress" consistenti che, interagendo con le correnti di marea, ne modificano apprezzabilmente gli effetti. Per tale tipo di mareggiata il calcolo evidenzia sia l'entità degli sforzi prodotti, sia la posizione della linea dei frangenti (fig. 4.6.9 in alto).

E, quindi, di un qualche interesse, tenuto conto di tali risultati, esaminare in quale misura si modifichi eventualmente il comportamento della bocca quando sulle correnti di marea si sovrapponesse una mareggiata di Bora con le caratteristiche sopra determinate.

Gli effetti da considerare con particolare attenzione sono, ovviamente, quelli relativi alle variazioni di quota dei fondali in corrispondenza della bocca, essendo del tutto irrilevanti quelli sulle portate scambiate dalla laguna con il mare e sull'andamento dei livelli interni di marea.

Con queste finalità si è simulato il comportamento della bocca nell'arco di tempo di 6 giorni sovrapponendo alla marea, assunta di tipo sinusoidale con periodo di 12 ore e ampiezza tra colmo e cavo pari a 0.80 m (marea rappresentativa di tipiche condizioni di sizigie) durante tutto il terzo e il quarto giorno, gli effetti della mareggiata.

Le quote dei fondali calcolate con il modello a fondo mobile sono illustrate nella fig. 4.6.10, che mette in evidenza le conseguenze della mareggiata in esame. Come si può osservare, mentre la configurazione dei fondali tra i moli rimane sostanzialmente invariata prima e dopo la mareggiata, verso mare, all'esterno dell'imboccatura, il canale navigabile inizialmente presente tende ad interrarsi, riducendo i suoi fondali di circa $0.75 \div 1$ m, per un tratto di lunghezza pari a circa 700 m.

Zone soggette a deposito e aree interessate da erosione sono meglio individuabili se i risultati forniti dal modello sono rappresentati in termini differenziali (fig. 4.6.11).

La mappa a scala di colori indica che, secondo il calcolo, verso mare il canale di accesso tende ad insabbiarsi, essendo interessato da depositi di materiale, come si è detto, per spessori di circa $0.75 \div 1$ m. L'azione del moto ondoso favorisce nello stesso tempo una erosione dei fondali su di una fascia al largo del canale di accesso.

In definitiva i risultati delle simulazioni indicano che, nella configurazione attuale, la conformazione dei moli foranei che armano l'imboccatura del Po di Levante, non consente di impedire totalmente i fenomeni di interrimento dovuti al moto ondoso davanti alle testate dei moli stessi. In particolare le

condizioni sono quelle che si determinano durante le più gravose mareggiate di Bora.

Decisamente meno critici appaiono gli stati di mare di Scirocco, per l'azione di schermo offerta al tratto di costa su cui si apre la bocca da parte del Delta del Po, e quelli di Levante, per i quali sono gli effetti della marea a controllare principalmente l'evoluzione della bocca stessa.

L'intensità degli interrimenti prodotti da una mareggiata, pur riducendo i fondali, non è però di entità tale da impedire la navigazione attraverso la bocca a natanti con pescaggio pari a quello dei battelli previsti per sostenere l'esercizio della centrale (2.50 m).

Non vi sono, conseguentemente, vincoli particolari da considerare per questi aspetti, tanto più se si considera che periodicamente il passo navigabile nel tratto esposto al pericolo di eventuali interrimenti è tenuto costantemente sotto controllo ed è dragato, se necessario, a cura del COVNI.

Dopo la costruzione dei moli, l'esperienza di questi anni, anche se estesa ad un limitato periodo, conferma nella sostanza il risultato del modello. Per mantenere tra i moli fondali di 5 m, e quindi ben superiori a quelli necessari alla navigazione delle chiatte fluvio-marittime destinate a sostenere l'esercizio della centrale, i volumi mediamente dragati sono stati di circa 100'000 m³ all'anno, con attività concentrate sostanzialmente in corrispondenza alla barra di foce.

Del tutto irrilevanti, invece, i volumi dragati all'interno della laguna lungo il canale che collega la bocca all'uscita del Po di Levante, dove non si sono mai superati in questi anni volumi di scavo di circa 10-15'000 m³ e in alcuni anni non si è dragato affatto.

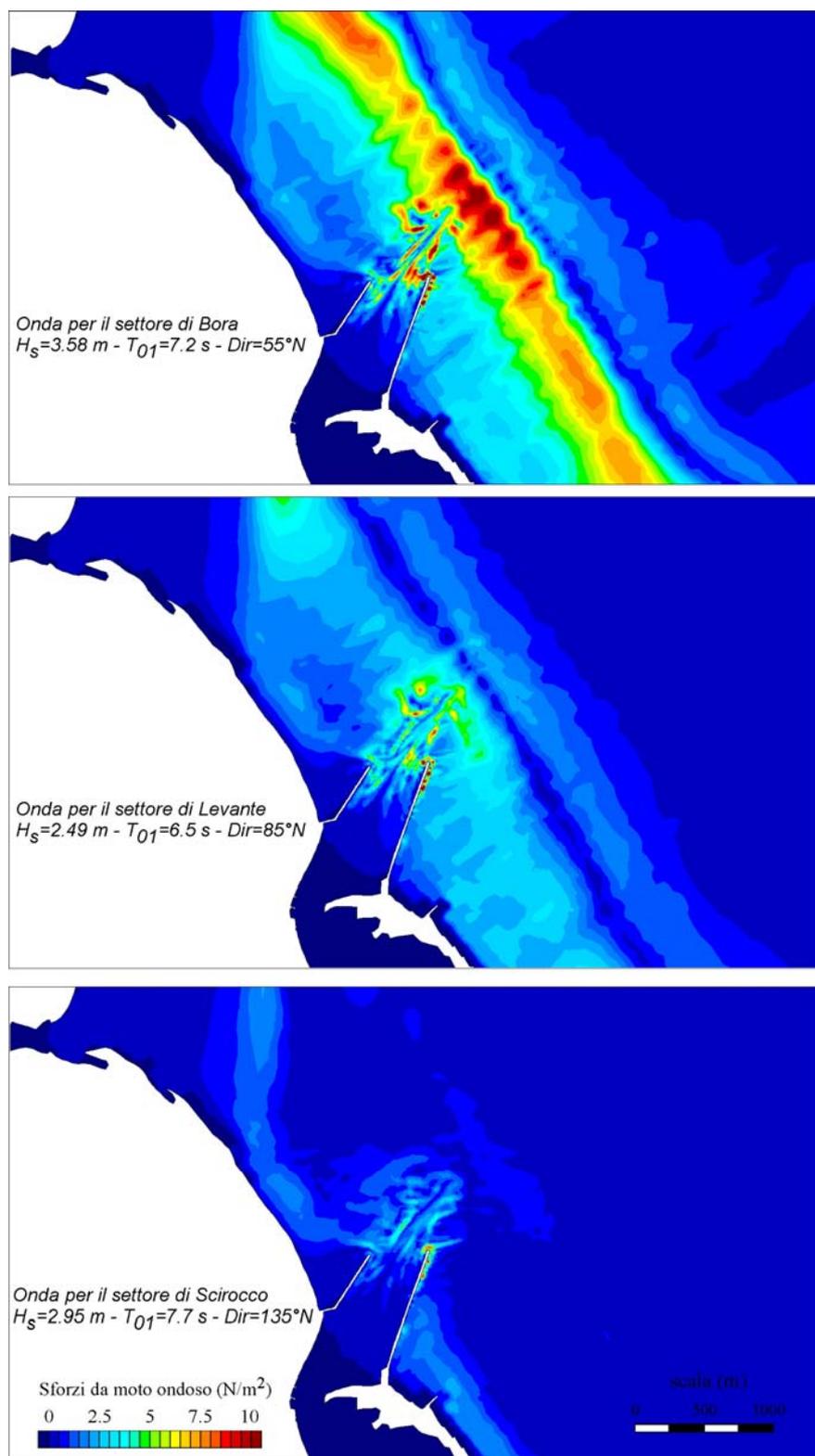


fig. 4.6.9 - Mappa delle forzanti dovute al moto ondoso (sforzi da radiation stress) per gli eventi meteomarinari considerati di Bora, Levante e di Scirocco.

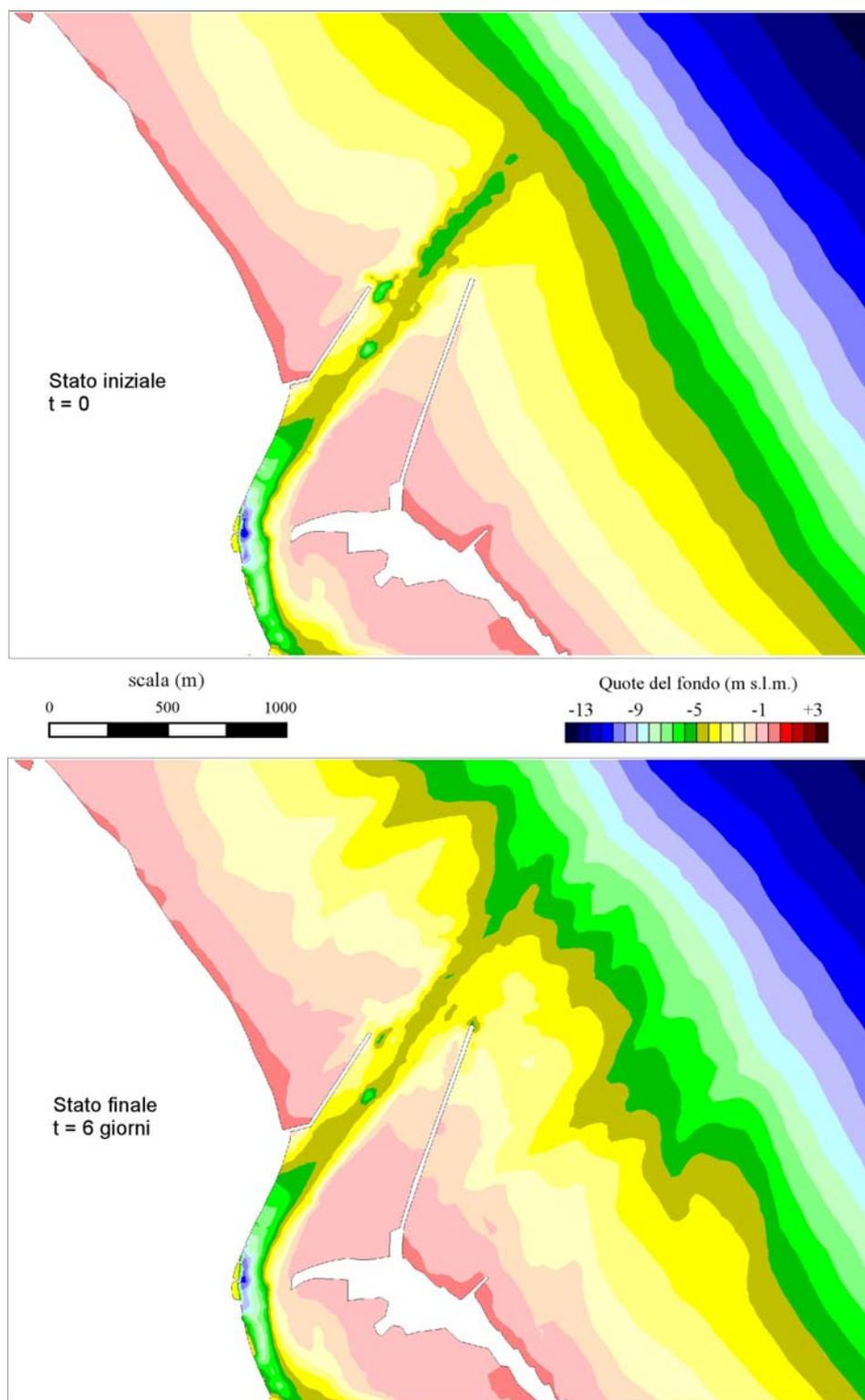


fig. 4.6.10 - Quote del fondo valutate con il modello a fondo mobile nella simulazione che prevede l'effetto di una marea semidiurna sinusoidale oscillante tra +0.4 e -0.4 m s.l.m. e di una mareggiata di Bora ($H_s = 3.6$ m - $T_{01} = 7.2$ s - Dir = 55° N)..

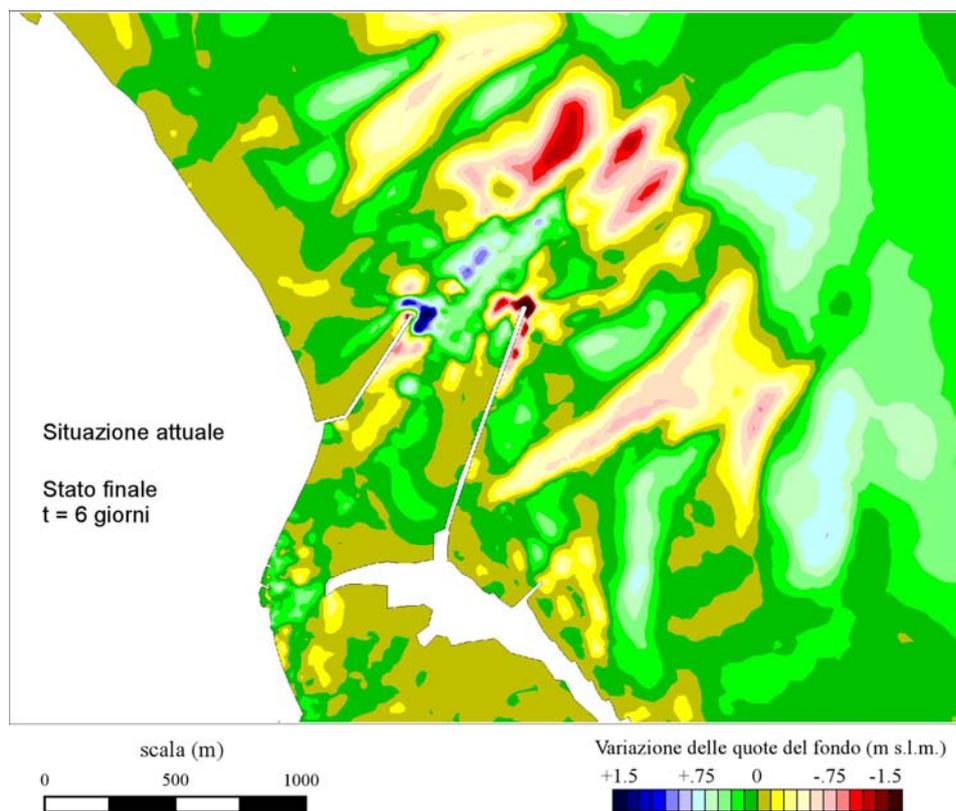


fig. 4.6.11 - Variazione delle quote del fondo valutate con il modello a fondo mobile nella simulazione che prevede l'effetto di una marea semidiurna sinusoidale oscillante tra +0.4 e -0.4 m s.l.m. e di una mareggiata di Bora ($H_s = 3.6$ m - $T_{01} = 7.2$ s - Dir = 55° N).

4.7 Indagini sul funzionamento idrodinamico del sistema idroviario

Non essendo reperibili in letteratura serie di dati sperimentali sui livelli idrometrici e sulle portate fluenti, in grado di descrivere il comportamento idrodinamico del sistema idroviario percorso dalle chiatte da e per la centrale, non vi è altra alternativa se non quella di inquadrare con il calcolo il funzionamento del sistema stesso.

Il modello matematico predisposto a tal fine necessita, per essere implementato, di una serie di dati che consentano, da una parte di rappresentare con sufficiente accuratezza la geometria del sistema, dall'altra di verificare, mediante una serie di simulazioni numeriche preliminari, la capacità del codice di calcolo di riprodurre le situazioni osservate sperimentalmente.

Per condurre al meglio la messa a punto del modello sono state, innanzitutto reperite presso i vari Enti le sezioni trasversali dei corsi d'acqua appartenenti al sistema e le caratteristiche delle opere interferenti o che ne regolano il funzionamento idraulico. Si è quindi proceduto a raccogliere le registrazioni di una serie di misure di livello e di portata, utili alla taratura del modello implementato.

I dati di diverso genere utilizzati ed i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche condotte per le diverse condizioni di regime del sistema idraulico esaminato.

4.7.1 Dati disponibili

4.7.1.1 Quote idrometriche e portate del Po a Pontelagoscuro

La sezione di Pontelagoscuro (FE) è la sezione di chiusura del bacino idrografico del Po, che si estende a monte per oltre 70'000 km². Tale sezione, che dista dallo sbocco del fiume in mare poco meno di 100 km, è ritenuta anche il punto oltre il quale, in condizioni di magra, non si risente degli effetti della marea.

Proprio per questo motivo, la sezione di Pontelagoscuro è stata utilizzata fin dagli inizi del 1800 come sezione di misura dei livelli idrometrici del fiume. Negli anni 1811, 1812 e 1815 vennero anche eseguite accurate misure di portata che consentirono di elaborare negli anni successivi la prima scala dei deflussi del fiume (1844).

Attualmente a Pontelagoscuro sono registrati in continuo i livelli idrometrici del Po e si valutano le portate fluenti, utilizzando una scala delle portate che è periodicamente aggiornata e della quale è riportata in tab. 4.7.1 la più recente formulazione.

tab. 4.7.1 - Scala delle portate della sezione del Po a Pontelagoscuro

Livello (m)	Portata (m ³ /s)	Livello (m)	Portata (m ³ /s)
-6.70	375	-5.00	1080
-6.60	406	-4.50	1310
-6.50	438	-4.00	1560
-6.40	472	-3.00	2140
-6.30	508	-2.00	2760
-6.20	545	-1.00	3450
-6.10	584	-0.00	4190
-6.00	625	1.00	5180
-5.50	835	2.00	6510

Sulla base di questa scala delle portate, in fig. 4.7.1, per gli anni 2001 e 2002, è riportato l'andamento delle portate fluenti in Po con una scansione di 30 minuti, dedotti a partire dalle registrazioni dei livelli idrometrici messi a disposizione dall'Enel.

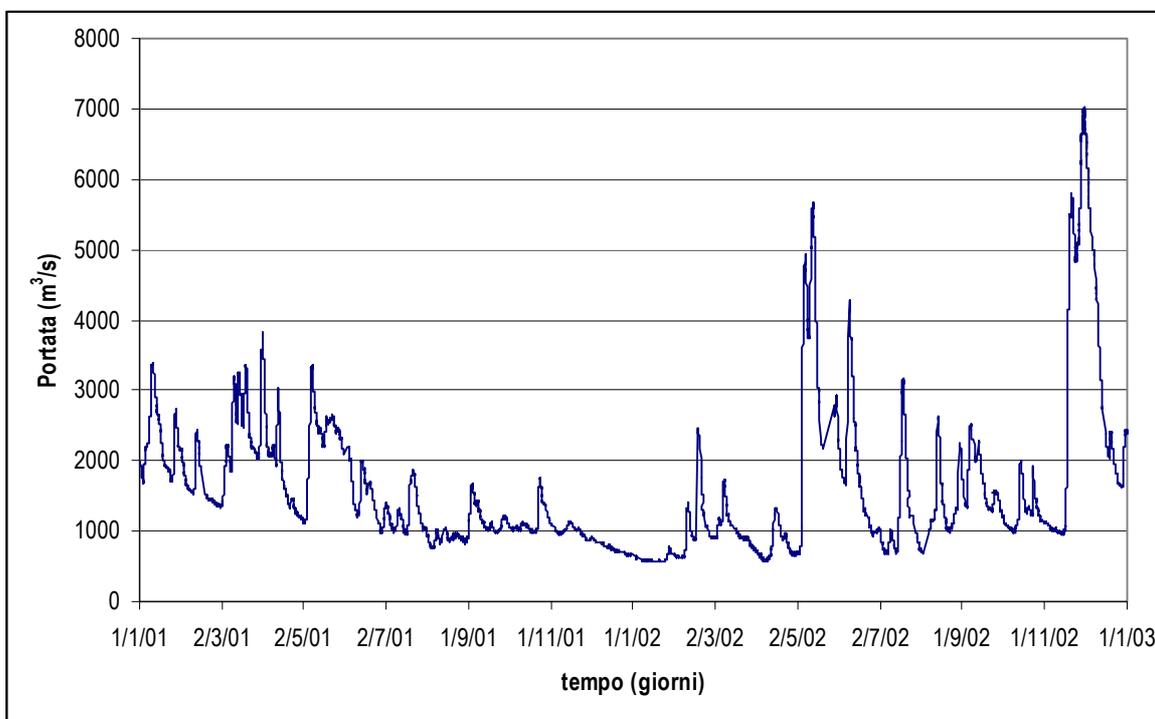


fig. 4.7.1 – Andamento della portata registrata nel Po a Pontelagoscuro negli anni 2001 e 2002.

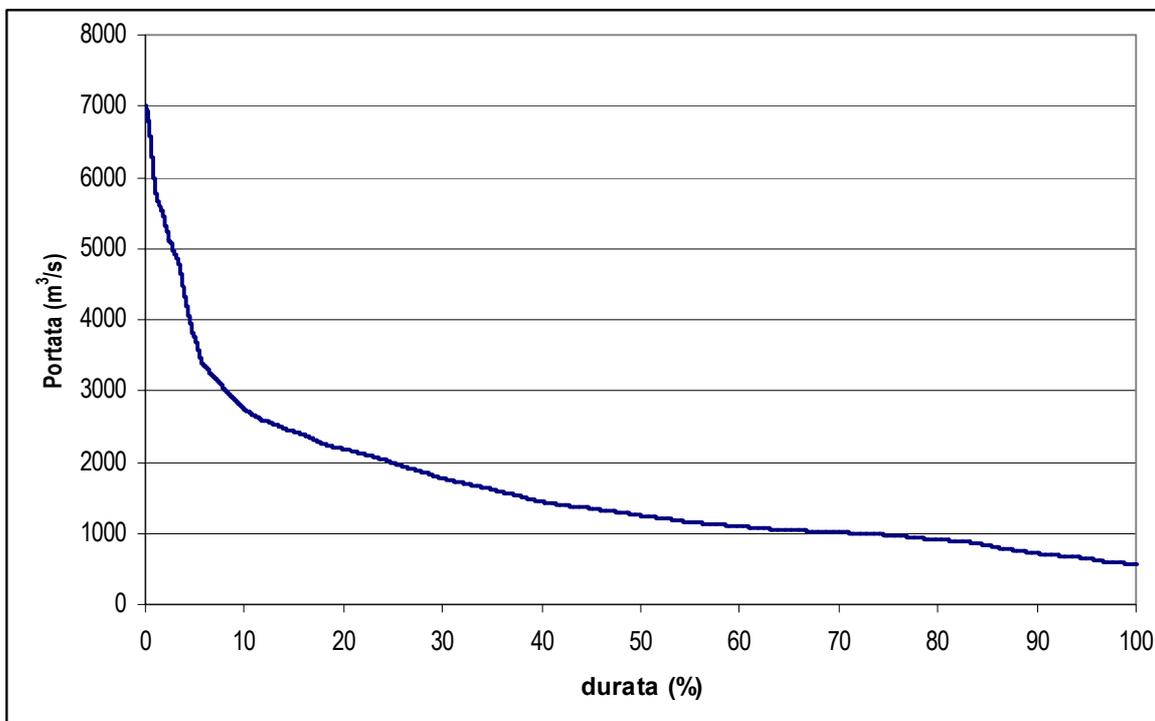


fig. 4.7.2 – Curva di durata della portata del Po a Pontelagoscuro per il periodo 2001-2002.

Si osservano portate che variano da circa 7'000 m³/s, in concomitanza del colmo della piena dei mesi di novembre e dicembre 2002, fino poco più di 550 m³/s, nel periodo di magra invernale che si colloca a cavallo della fine dell'anno 2001. I valori della portata così ottenuti, ordinati in senso decrescente, forniscono la curva di durata delle portate stesse, riportata in fig. 4.7.2.

Esaminando tale curva, che ben si presta ad illustrare gli aspetti dominanti del regime del corso d'acqua, si riscontrano per il periodo considerato una portata media di circa 1615 m³/s, una portata superata rispettivamente nel 50% dei casi (Q_{50}), e nel 90% dei casi (Q_{10}), pari rispettivamente a, 1250 m³/s e 715 m³/s.

E' da osservare che le portate relative al periodo 2001-2002 qui considerato forniscono, per un'assegnata percentuale di superamento, valori delle portate più persistenti leggermente superiori a quelli riportati in letteratura per periodi di osservazione più lunghi, con ogni probabilità gli scostamenti sono attribuibili alle piene che hanno sostenuto i deflussi nel periodo considerato. Pur con queste differenze, la curva di durata così ottenuta è un buon termine di confronto per la valutazione portate caratteristiche del fiume.

4.7.1.2 Portate significative ai fini della navigazione

Volendo indagare le condizioni di navigabilità di un corso d'acqua naturale come è il Po, è necessario fare riferimento sia ai valori della portata fluente, valutata nelle diverse situazioni idrologiche (magra, regime normale e piena), sia all'andamento dei livelli di marea, quando si voglia esaminare il comportamento del suo tratto terminale, prima dello sbocco in mare.

Nello specifico, relativamente alle portate di magra, si è fatto riferimento alla curva di durata delle portate medie decadiche del Po a Pontelagoscuro, valutata per il periodo 1941-1966, riportata in fig. 4.7.3.

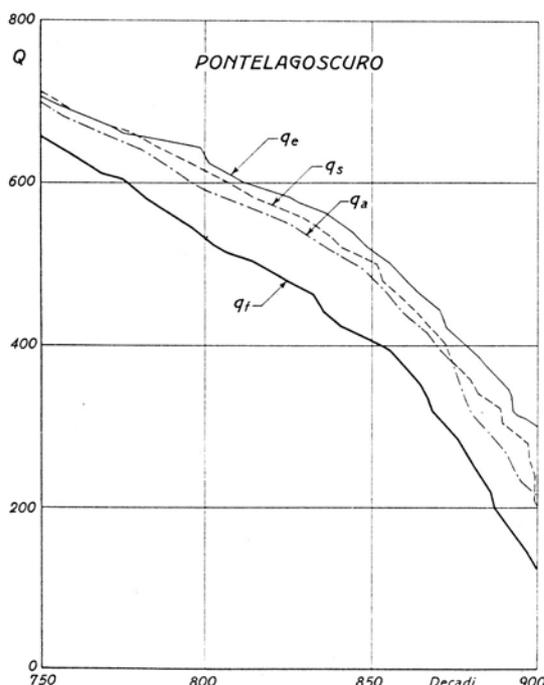


fig. 4.7.3 – Po a Pontelagoscuro. Particolare della curva di durata delle portate (tra 750 e 900 decadi) del periodo 1941-1966 (estratto da: L. Gherardelli – U. Raffa, Le portate disponibili nel Po per la navigazione, L'Energia Elettrica – n. 9 - 1970).

Assumendo il vincolo di poter navigare con le chiatte fluvio-marittime per almeno 330 giorni all'anno, pari a circa il 90 % del tempo, sulle curve di durata di fig. 4.7.3, tracciate nell'ipotesi di diverse condizioni di esercizio dei serbatoi alpini e delle derivazioni irrigue presenti nel bacino del Po, la portata Q_{90} , superata nel 90% dei casi (corrispondente a 810 decadi in fig. 4.7.3) varia da circa 500 m^3/s a circa 600 m^3/s .

Si tratta di portate non lontane, anche se inferiori, a quelle valutabili in base alla fig. 4.7.2, che però considera un periodo di tempo limitato ed è quindi, per questi aspetti, meno significativa.

Adottando per la portata Q_{90} a Pontelagoscuro il valore medio (550 m^3/s) tra i due valori citati, considerando una portata fluente nel Po di Goro, che si dirama dal corso d'acqua principale a monte della sezione di Volta Grimana, pari al 10% di quella di Pontelagoscuro, come è suggerito dai numerosi riscontri sperimentali, si ottiene per differenza lungo il Po di Venezia, e quindi a monte della sezione di Volta Grimana, una portata di magra pari a circa 500 m^3/s .

E' su tale portata che si sono condotte le indagini per valutare le condizioni di navigabilità in situazioni di magra lungo il Basso corso del Po, nel tratto compreso tra Volta Grimana e la centrale di Porto Tolle.

Lungo la direttrice Porto Levante – Laguna La Vallona – Volta Grimana – Basso corso del Po, la presenza della bi-conca di Volta Grimana, che consente il passaggio dei natanti dal Po di Venezia verso il Canalbianco-Po di Levante e viceversa, costituisce una vera e propria sezione di sconnessione idraulica per il sistema idraulico in esame.

La sconnessione è attiva per tutti gli stati idrometrici (magra, regime normale e piena) che si possono presentare sia nel Po di Venezia, sia nel sistema Canalbianco-Po di Levante. E', tuttavia, da evidenziare che in condizioni di piena pronunciata nel Po di Venezia, ovvero per quote idrometriche misurate in corrispondenza della conca superiori od uguali a circa 4.40 m s.m., la conca stessa rimane inattiva, non essendo possibile effettuare le manovre di apertura e chiusura delle porte che regolano il traffico attraverso il manufatto.

Secondo informazioni raccolte presso il C.O.V.N.I., l'interruzione del traffico alla conca per condizioni di piena del Po si verifica mediamente circa una volta ogni 3-4 anni.

A tale frequenza temporale corrisponde sul cartogramma di Gumbel, che riporta in fig. 4.7.4 i valori della portata al colmo osservati nella sezione del Po a Pontelagoscuro, una portata di circa 6'000 m^3/s , essendo la variabile ridotta secondo Gumbel per il tempo di ritorno di 3 anni pari a 0.90.

Sulla citata portata di 6'000 m^3/s sono state condotte le indagini per valutare, in una situazione estrema di funzionamento della Conca di Volta Grimana, le condizioni di navigabilità lungo il Basso corso del Po, da Volta Grimana stessa alla centrale di Porto Tolle.

Sempre con riferimento alle indagini sulla navigabilità nel tratto terminale del Po di Venezia, si sono esaminate anche le condizioni idrodinamiche della corrente per un regime idrologico corrispondente alla portata media annua valutata a Pontelagoscuro. A tal fine si è considerato il valore della portata media annua relativa al periodo 1918-1989, che risulta essere pari a circa 1500 m^3/s , come riportato in uno studio dell'Enel - CRIS Servizio Idrologico di Mestre [4].

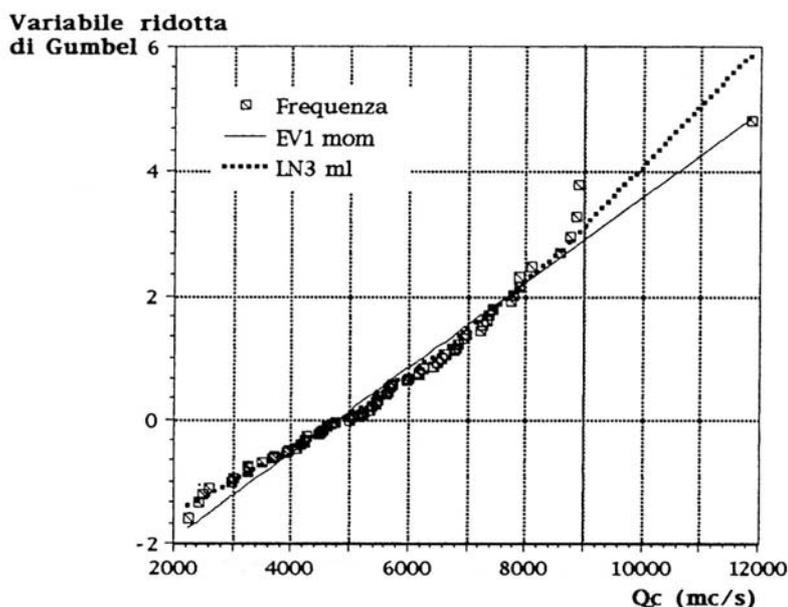


fig. 4.7.4 – Ripartizione delle portate al colmo a Pontelagoscuro (estratto da: Luigi Natale, *Il deflusso delle piene nel medio corso del Po*, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma – 1992).

4.7.1.3 Idrologia del Po di Levante

Nell'anno 2002 la Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile della Regione del Veneto ha elaborato il Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) per il Bacino del Fiume Fissero-Tartaro-Canalbiano [8].

Il complesso sistema idrografico costituito dai corsi d'acqua Fissero, Tartaro, Canalbiano e dai loro affluenti raccoglie le acque di un bacino che ha una estensione complessiva di circa 2885 km² (di cui approssimativamente il 10% nella Regione Lombardia e il 90% nella Regione del Veneto) e le immette nel Po di Levante all'altezza della sezione di Volta Grimana.

Nel Piano sono descritti in forma sintetica i risultati delle indagini idrologico-idrauliche che hanno consentito di valutare le condizioni di sicurezza idraulica del territorio attraversato dai corsi d'acqua del sistema. In particolare, sono riportati i valori delle portate massime nelle sezioni di chiusura dei sottobacini dei corsi d'acqua principali e dei loro affluenti, calcolati utilizzando un modello basato sul metodo cinematico e sul metodo dell'invaso e facendo riferimento ad eventi di piena sintetici generati da precipitazioni con tempo di ritorno di 20, 50, 100 e 200 anni.

Per gli scopi della presente indagine si sono considerate le portate di piena calcolate alla chiusura del bacino complessivo del Fissero-Tartaro-Canalbiano, che si immettono in testa al Po di Levante pressoché in corrispondenza della conca di navigazione di Volta Grimana. Sulla base di tali valori valutati per i tempi di ritorno compresi tra 20 e 200 anni, riportati in tab. 4.7.2, si sono calcolati i valori delle portate di piena caratterizzate da una frequenza probabile più ridotta, pari a quella di un evento annuale (circa 140 m³/s) e decennale (circa 200 m³/s), utilizzando una regressione logaritmica sui dati disponibili.

tab. 4.7.2 - Portate di piena calcolate per il Canalbianco-Po di Levante a Volta Grimana

Corso d'acqua	Portata massima (m ³ /s)					
	Tr = 1.1 anni	Tr = 10 anni	Tr = 20 anni	Tr = 50 anni	Tr = 100 anni	Tr = 200 anni
Canalbianco a Volta Grimana	140	200	218 *	243 *	262 *	280 *

(* valori riportati nel Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Veneto relativo al sistema idrografico Fissero-Tartaro-Canalbianco [8])

4.7.1.4 Dati idrometrici e correntometrici dei rami del Po

Nel secolo appena trascorso sono state condotte numerose indagini sperimentali per determinare la ripartizione tra i vari rami del Delta della portata in arrivo a Pontelagoscuro, con lo scopo principale di valutare l'efficienza del deflusso attraverso i rami stessi ed eventuali variazioni nel tempo.

Nella tab. 4.7.3, tratta dal già citato studio condotto nel 1993 dell'Enel - CRIS [4], sono riportati, in percentuale rispetto alla portata misurata a Pontelagoscuro, i valori della portata fluente in ciascun ramo del Po, a partire dall'inizio del 1900.

tab. 4.7.3 - Ripartizione percentuale della portata del Po misurata a Pontelagoscuro nei rami del Delta dal 1900 al 1989

Periodo	Stato d'acqua	Po di					
		Goro	Gnocca	Maistra	Venezia	Tolle	Pila
1900 ⁽¹⁾	acque basse	0.1	11.9	1.0	87.0	34.0	53.0
	acque alte	7.0	13.0	5.0	75.0	28.0	47.0
1926-1939 ⁽¹⁾	acque basse	2.5	12.2	1.5	83.9	14.1	69.7
	acque medie	6.8	12.6	2.1	77.9	15.8	62.7
	acque alte	9.3	12.6	2.3	75.8	15.9	59.9
1958-1959 ⁽¹⁾	acque basse	3.8	16.0	2.8	77.4	13.8	63.6
	acque medie	7.6	16.3	3.4	72.7	12.1	60.6
	acque alte	9.9	14.1	3.6	72.4	12.8	59.6
1959-1960 ⁽¹⁾	acque medie	9.0	15.3	3.2	72.5	14.2	58.3
	acque alte	8.9	13.2	3.3	74.6	12.7	61.9
1970-1971 ⁽²⁾	acque basse	-	-	-	78.2	20.6	57.6
	acque medie	-	-	-	67.5	16.6	50.9
1974-1976 ⁽²⁾	acque medie	10.0	15.9	4.5	69.6	19.5	50.1
1980-1981 ⁽²⁾	acque basse	10.8	17.2	4.3	67.7	20.4	47.3
	acque medie	10.8	15.7	4.3	65.3	-	-
1988-1989 ⁽²⁾	acque basse	12.8 ⁽³⁾	15.8 ⁽³⁾	4.4 ⁽³⁾	67.0 ⁽³⁾	(15.5) ⁽³⁾	51.5 ⁽³⁾

⁽¹⁾ rilievi U.I.Po

⁽²⁾ rilievi ENEL

⁽³⁾ percentuali riferite alla portata ENEL misurata a Pontelagoscuro

() valore calcolato per differenza

acque basse

acque medie

acque alte

$Q_{Po} < 1000 \text{ m}^3/\text{s}$

$1000 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{Po} < 3000 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{Po} > 3000 \text{ m}^3/\text{s}$

Si evidenzia che prima del 1970 circa il 60% della portata del Po era scaricata in mare dal Po di Pila attraverso la Busa di Tramontana, la Busa Dritta e la Busa di Scirocco. Dopo il 1970 tale percentuale si sarebbe, invece, leggermente ridotta, passando a circa il 50%.

La tendenza alla riduzione dell'efficienza delle bocche del Po di Pila è confermata anche dai risultati di una recente campagna di misure condotta il giorno 14 settembre 2002 dalla Ipros Ingegneria Ambientale nell'ambito di indagini eseguite per conto del Consorzio di Bonifica Delta Po Adige di

Taglio di Po (RO) [9].

Nell'ambito di tali indagini, in particolare, si sono effettuate misure di portata nei tratti terminali di tutti i rami del Fiume Po a valle dell'attraversamento della Strada Romea, con esclusione quindi del solo Po di Goro.

Con riferimento alla fig. 4.7.5 si sono, in particolare considerate le seguenti sezioni:

- **Po1** sezione del Po di Venezia circa 300 m a monte della diramazione del Po di Gnocca;
- **Po2** sezione del Po di Gnocca all'incile;
- **Po3** sezione del Po di Maistra all'incile, circa 200 m a monte del ponte lungo la strada che conduce a Pila e Boccasette;
- **Po4** sezione del Po di Tolle all'incile;
- **Po5** sezione della Busa di Scirocco all'incile;
- **Po6** sezione della Busa Dritta, poco a valle della diramazione della Busa di Scirocco;
- **Po7** sezione della Busa di Tramontana, in corrispondenza delle paratoie mobili sul varco di collegamento con la laguna di Barbamarco.

La campagna di misure è stata condotta in concomitanza con una marea di quadratura, con ridotte escursioni del livello idrometrico, in modo che i valori delle portate misurate fossero influenzati il meno possibile dall'andamento dei livelli alla foce e fossero, invece, sostanzialmente determinati dalle caratteristiche geometriche ed idrauliche dei diversi rami del Delta.

Le misure sono state effettuate utilizzando un'imbarcazione, su cui era installato un correntometro ADCP, in grado di spostarsi velocemente da una sezione all'altra tra quelle considerate. In tal modo, i rilievi correntometrici nelle 7 sezioni di misura sono stati effettuati in un periodo di tempo relativamente breve, dalle ore 9 alle ore 11 circa del 14 settembre 2002, consentendo di cogliere di fatto una situazione pressoché istantanea della distribuzione della portata nei tratti terminali del Po.

I valori della portata misurata in ciascuna sezione sono riportati nella fig. 4.7.5, assieme all'ubicazione delle sezioni stesse.

Nella tab. 4.7.4, in forma sintetica, sono riassunti gli stessi dati espressi in percentuale della portata complessiva in arrivo da monte, misurata poco a valle della diramazione dle Po di Goro.

A fronte di una portata misurata nel Po di Venezia (sezione Po1) pari a 1782 m³/s, la somma delle portate misurate nei 6 rami in cui si ripartisce il flusso complessivo del fiume fornisce un valore di 1759 m³/s, portata pressoché coincidente con quella in arrivo da monte, a conferma della bontà della campagna di misura.

Poiché, per i giorni a cavallo del 14 settembre 2002, la portata nel Po a Pontelagoscuro, ricostruita sulla base del livello idrometrico misurato e della relativa scala dei deflussi, è pari a circa 1980 m³/s, per differenza si ottiene una portata fluente nel Po di Goro di circa 200 m³/s, pari a circa il 10% di quella osservata a Pontelagoscuro, ed in linea con i risultati di precedenti campagne di misura.

La tendenza in atto alla riduzione dei deflussi che si scaricano in mare attraverso le "buse" che si diramano dal Po di Pila è confermata anche dalle misure effettuate nel settembre 2002. La somma della portata fluente nella Busa di Tramontana, nella Busa Dritta e nella Busa di Scirocco è, infatti, di 954 m³/s, pari a circa il 48% di quella valutata a Pontelagoscuro, valore in linea con quelli di una situazione di "acque medie", secondo la classificazione riportata nella tab. 4.7.3.

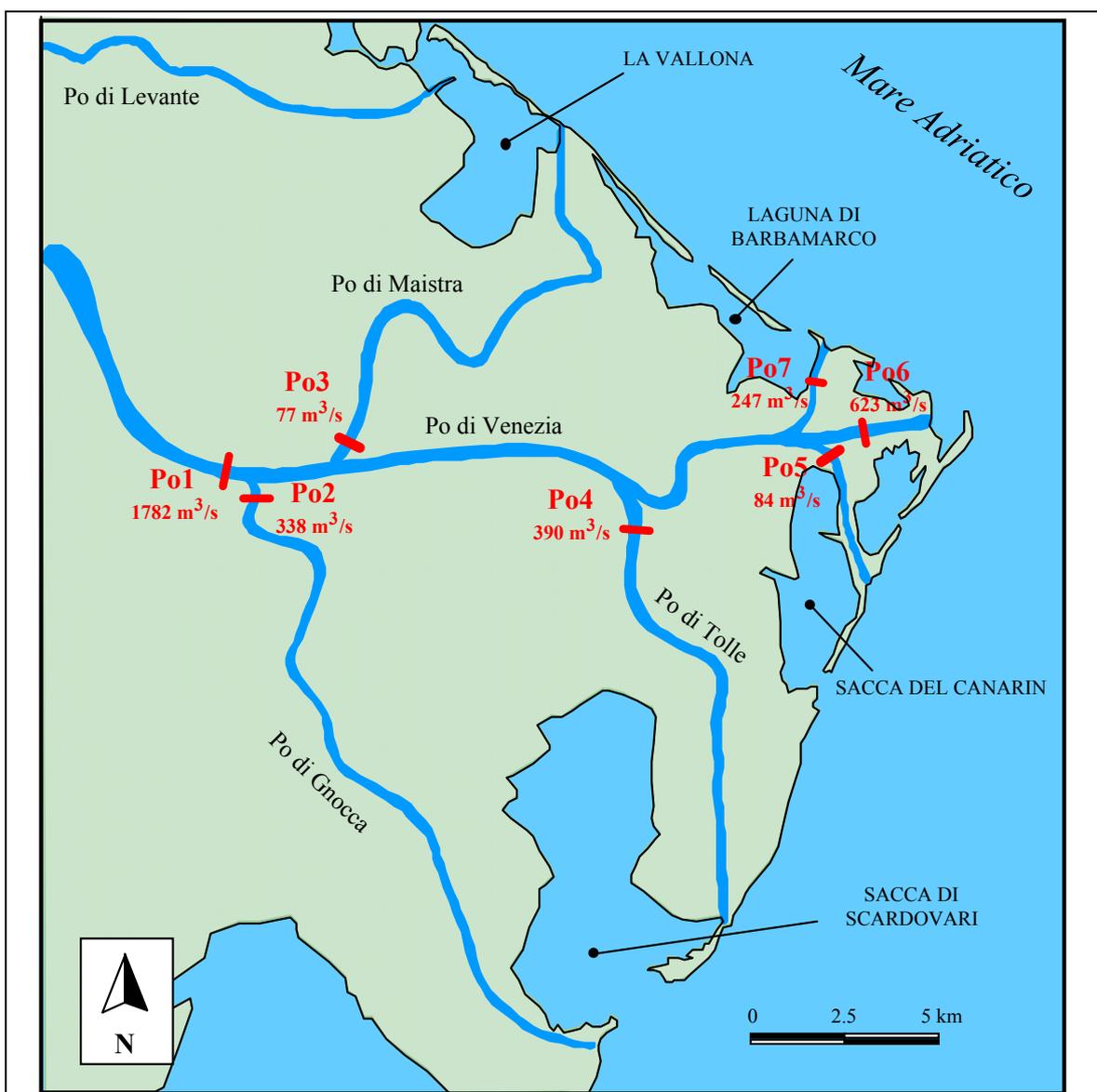


fig. 4.7.5 – Sezioni di misura lungo i rami terminali del F. Po con i relativi valori della portata misurata il 14 settembre 2002

tab. 4.7.4 - Sintesi dei valori di portata misurati sui rami del Fiume Po il giorno 14 settembre 2002

Misure del 14 settembre 2002 su Fiume Po				
ora	ramo del Po	Sezione	Portata (m³/s)	Distribuzione Percentuale (%)
9.06	Po di Venezia	Po1	1782	100.0
9.22	Po di Gnocca	Po2	338	19.2
9.40	Po di Maistra	Po3	77	4.4
10.01	Po di Tolle	Po4	390	22.2
10.27	Busa di Scirocco	Po5	84	4.8
10.41	Busa Dritta	Po6	623	35.4
11.05	Busa di Tramontana	Po7	247	14.0

Per la messa a punto del modello matematico idrodinamico bidimensionale del Po, dalla sezione di Corbola alla foce dei vari rami, si è cercato di riprodurre al meglio con il calcolo la situazione osservata nella citata campagna di misure delle portate condotta il giorno 14 settembre 2002.

A tal fine si sono acquisite sia le osservazioni dei livelli registrati al mareografo di Porto Caleri, presso l'APAT del Veneto, sia le registrazioni idrometriche relative agli idrometri posti lungo il Po, a Pila, in corrispondenza della centrale Enel di Porto Tolle e a Cavanella Po, circa 2.5 km a monte della conca di Volta Grimana, registrazioni rese disponibili dall'A.R.P.A. del Veneto e dell'Emilia Romagna. Gli andamenti di tali registrazioni sono riportati a confronto nel grafico di fig. 4.7.6 per il periodo dal 08.09.2002 al 17.09.2002, a cavallo del giorno di misura delle portate. Le registrazioni idrometriche evidenziano sperimentalmente come l'effetto della marea, sia in fase di sizigia, con escursioni dei livelli più marcate tra cavo e colmo, sia in quella di quadratura, caratterizzata da escursioni minime dei livelli stessi, si faccia sentire verso monte ben oltre la sezione di Cavanella Po, anche in presenza di una intumescenza del fiume come quella osservata nei giorni 12 - 14 settembre.

Ne deriva, per riprodurre correttamente l'andamento delle quote idrometriche del Po lungo il suo tratto terminale, la necessità di esaminare il funzionamento del fiume a moto vario, introducendo in corrispondenza delle sue foci a mare l'oscillazione dei livelli indotta dalla marea.

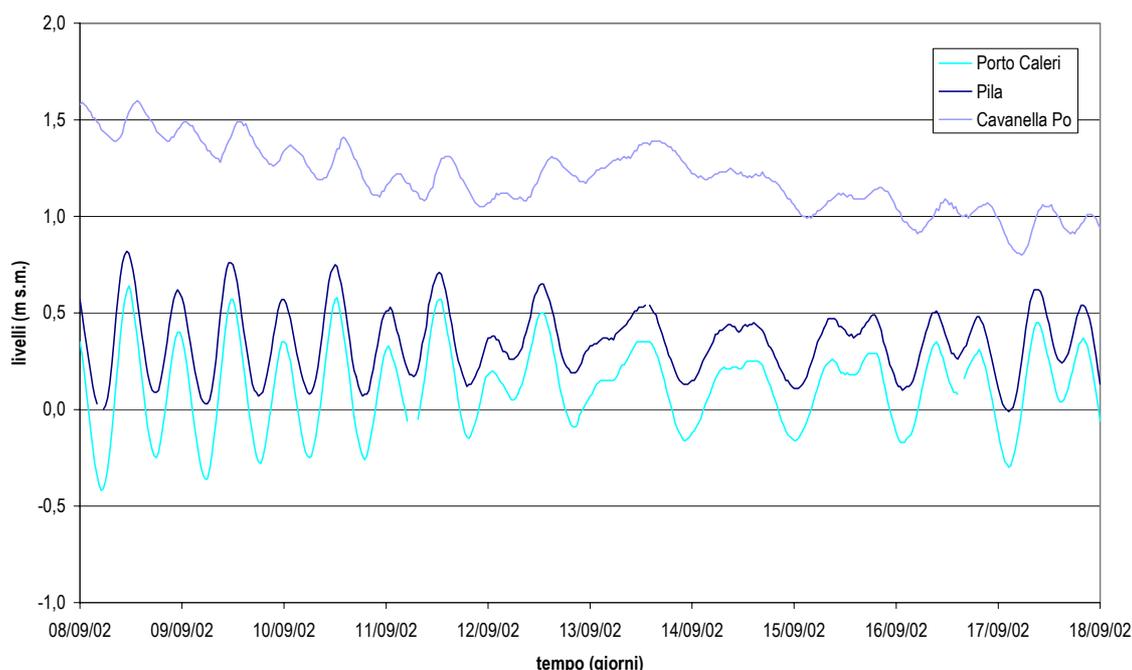


fig. 4.7.6 – Livelli registrati al mareografo di Porto Caleri e agli idrometri di Pila e Cavanella Po lungo il fiume Po nel periodo 8-17 settembre 2002

4.7.1.5 Dati batimetrici e sezioni

Per simulare matematicamente il comportamento idraulico dei corsi d'acqua del sistema costituito dai rami principale e secondari del Delta del Po a valle di Corbola e del Po di Levante dalla conca di Volta Grimana fino al mare, è necessario conoscere, innanzitutto, la geometria delle varie aste del sistema.

La disponibilità di rilievi topografici, di una cartografia attuale e di riprese aeree aggiornate che

descrivano con sufficiente dettaglio l'andamento morfologico dei corsi d'acqua, l'altimetria delle golene e del terreno e tutti gli elementi che controllano la propagazione delle onde di marea e di piena, è, pertanto di fondamentale importanza per conseguire risultati soddisfacenti.

Ciò premesso, la geometria delle sezioni dei diversi rami del Delta è stata sostanzialmente ricostruita tramite i dati resi disponibili dall'Agenzia Interregionale per il fiume Po - Parma (A.I.PO) e dall'Enel, che in epoche diverse hanno eseguito campagne di rilievi topo-batimetrici lungo il fiume.

Alcune informazioni riassuntive sui dati utilizzati per la modellazione matematica sono sintetizzati nel seguente elenco, in cui per ciascun corso d'acqua considerato sono riportati il numero di sezioni disponibili e la fonte dei dati stessi:

- Po di Venezia, Po di Pila, Busa Dritta: per il ramo principale del Po, che varia il suo toponimo procedendo verso valle, si sono considerate le sezioni rilevate negli anni 1998-1999 nell'ambito dello studio "Aggiornamento delle sezioni e dei profili del fiume Po e delle sue arginature" a cura del Ministero dei Lavori Pubblici – Magistrato per il Po – Parma, messe a disposizione dall'A.I.PO. In particolare si sono utilizzate 25 sezioni, dalla n. 75A nel Po di Venezia all'altezza dell'abitato di Corbola, fino alla n. 90 in corrispondenza dello sbocco della Busa Dritta in mare;
- Po di Gnocca: per questo ramo secondario del fiume si sono considerate 40 sezioni topografiche rilevate a partire dalla sua diramazione fino allo sbocco in mare, messe a disposizione dall'Enel;
- Po di Maistra: per tale ramo secondario in sinistra del fiume si è fatto riferimento a 25 sezioni rilevate a partire dalla sua diramazione a Ca' Venier fino allo sbocco in mare, messe a disposizione dall'Enel;
- Po di Tolle e Busa del Bastimento: per l'alveo di tale ramo del fiume, a partire dalla sua diramazione dal Po di Venezia fino alla sua successiva diramazione nella Busa del Bastimento, si sono considerate 36 sezioni messe a disposizione dall'Enel. Per il tratto terminale del Po di Tolle, fino allo sbocco in mare a Porto Barricata, e per la diramazione della Busa del Bastimento, si è invece fatto riferimento rispettivamente a 28 sezioni ed a 13 sezioni rilevate nel 1989 a cura del Magistrato per il Po – Ufficio Operativo di Rovigo nell'ambito dei "Lavori di sistemazione della foce del Po delle Tolle in località Bonelli";
- Busa di Tramontana: per la schematizzazione con il modello matematico dell'ultimo ramo del fiume che si diparte in sinistra del Po all'altezza dell'abitato di Pila, si sono considerate 12 sezioni rilevate nel 1972 dall'Enel nell'ambito degli studi propedeutici alla realizzazione della centrale di Porto Tolle;
- Busa di Scirocco: per tale ramo, che si sviluppa tra la Sacca del Canarin e il Basson, in destra della Busa Dritta, a valle della centrale di Porto Tolle, si sono considerate 17 sezioni rilevate nel 1972 dall'Enel nell'ambito degli studi preliminari alla realizzazione della centrale stessa;
- Po di Levante: per tale corso d'acqua, che costituisce la parte terminale del sistema idrografico di cui fanno parte anche i corsi d'acqua Fissero, Tartaro e Canalbiano, si sono utilizzate circa 150 sezioni rilevate nel 2002, nel tratto compreso tra Volta Grimana e lo sbocco nella laguna La Vallona, dal Centro Operativo Veneto per la Navigazione Interna (C.O.V.N.I.) nell'ambito delle indagini condotte periodicamente per controllare le profondità dei fondali della via navigabile, ed eventualmente procedere, se necessario, ad interventi di dragaggio per ripristinare le quote di navigazione.

La posizione di tutte le sezioni acquisite, è riportata sinteticamente nella fig. 4.7.7.

La schematizzazione dei vari corsi d'acqua di interesse si è basata, oltre che sugli elementi geometrici sopra ricordati, anche su di alcune foto aeree recenti, per verificare l'assetto planimetrico attuale dell'alveo, e sulla Carta Tecnica Regionale numerica in scala 1:5'000, utilizzata per definire le quote delle aree di golena comprese tra una sezione e la successiva.

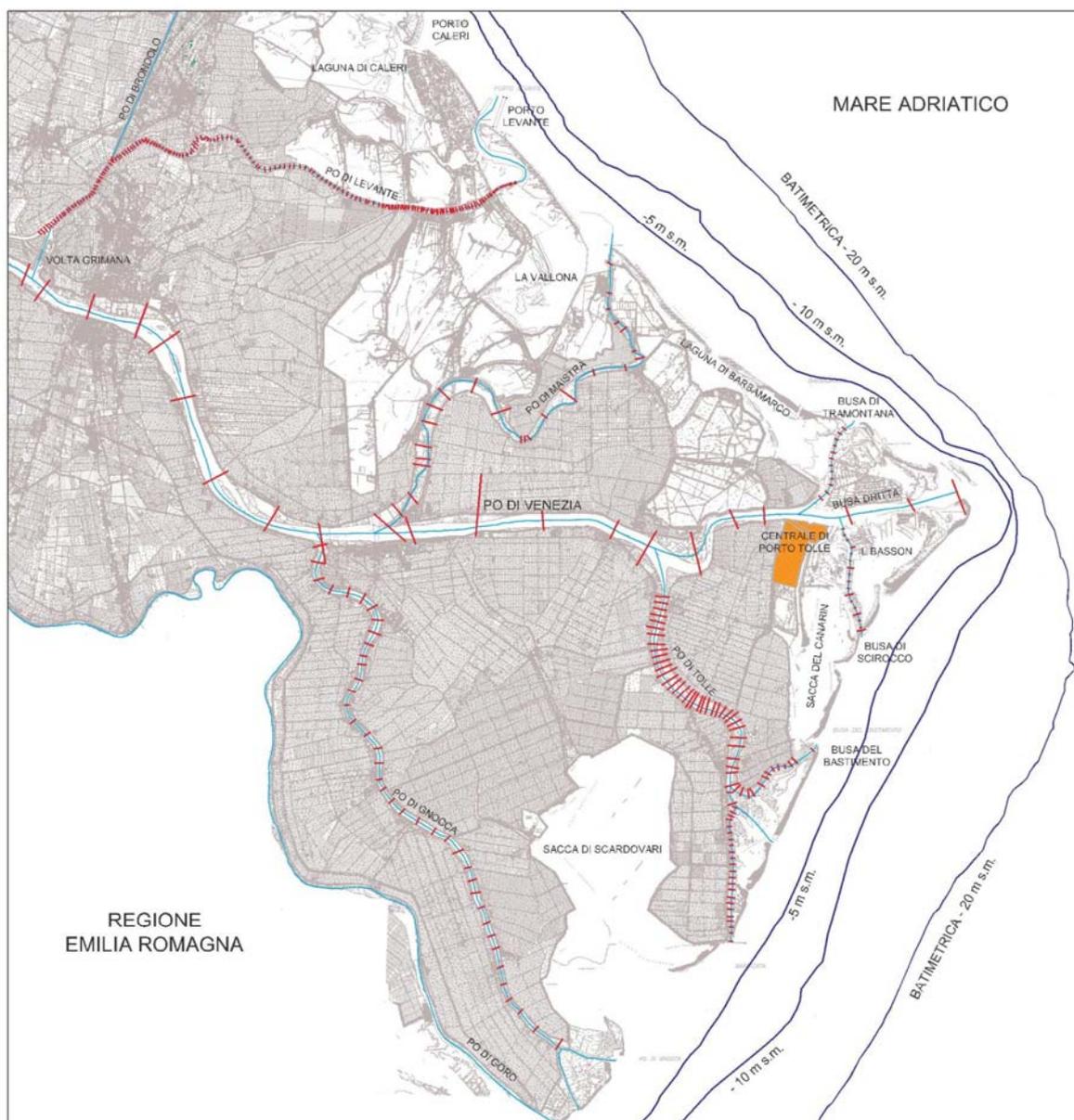


fig. 4.7.7 – Corografia del delta del fiume Po con la posizione delle sezioni topografiche dei corsi d'acqua raccolte presso gli enti competenti.

4.7.2 Modello matematico bidimensionale del sistema idroviario

Lungo il percorso Porto Levante – Laguna La Vallona – Volta Grimana – Basso corso del Po, la presenza della conca di Volta Grimana, che consente il passaggio dei natanti dal Po di Venezia verso il Canalbianco-Po di Levante e viceversa, costituisce una vera e propria sezione di sconnessione idraulica nel sistema idrografico considerato.

Tale sconnessione è ovviamente attiva per tutti gli stati idrometrici (magra, regime normale e piena) che si possono presentare sia nel Po di Venezia, sia nel sistema Canalbianco-Po di Levante. In particolare, in condizioni di piena pronunciata nel Po di Venezia, vale a dire per quote d'acqua

misurate in corrispondenza dell'opera superiori od uguali a 4.40 m s.m., la conca rimane chiusa, non essendo possibile effettuare le manovre di apertura e chiusura delle porte che la presidiano e regolano il traffico attraverso il manufatto.

Tenuto conto di tutto questo, nel valutare il funzionamento idrodinamico del sistema idroviario complessivo costituito dalla laguna La Vallona, dal Po di Levante fino a Volta Grimana e dal tratto terminale del fiume Po, si sono considerati due schemi di calcolo distinti, il primo composto dalla laguna La Vallona e dal Po di Levante, il secondo dal tratto terminale del Po di Venezia, da Corbola fino alla foce, e dai rami secondari del fiume che ne costituiscono il Delta. Ed è sui due sistemi così separati che si sono condotte le analisi idrauliche che ne descrivono il funzionamento evidenziando i principali aspetti connessi con la loro navigabilità.

4.7.2.1 Schematizzazione del sistema e condizioni al contorno

Per schematizzare il tratto idroviario che va dalla bocca a mare della laguna di Porto Levante (laguna La Vallona) alla conca di Volta Grimana è stato fatto riferimento al medesimo reticolo di calcolo, costituito da circa 22000 nodi e 41000 elementi triangolari, utilizzato per esaminare il comportamento idrodinamico della bocca (paragrafo 4.6). Tale schema, infatti, è predisposto in modo da descrivere con elevata accuratezza anche la geometria di tutti i 17 km del corso del Po di Levante, per il quale è disponibile una base dati piuttosto dettagliata ed aggiornata, rappresentata da circa 150 sezioni disposte all'incirca ad interasse di 100 m l'una dall'altra.

Nella fig. 4.7.8 è rappresentato il reticolo di calcolo utilizzato per simulare il comportamento idraulico della via navigabile con il modello bidimensionale.

Per schematizzare, invece, il tratto del percorso navigabile che va dalla conca di Volta Grimana alla centrale di Porto Tolle, è stato predisposto un modello del fiume Po, che va dalla foce a mare fino al ponte di Corbola e che comprende anche i rami deltizi del fiume fino alle rispettive foci.

Come ricordato in precedenza, le sezioni disponibili per descrivere la geometria del ramo principale del Po, pur essendo relativamente recenti, sono piuttosto distanziate tra loro (il loro interasse è pari a circa 1000 m), lasciando scoperti tratti relativamente lunghi per quanto riguarda l'accurata descrizione geometrica del sistema e la rappresentazione del relativo dominio di calcolo. Tuttavia, anche grazie alla disponibilità delle ortofoto aeree del 1999, che hanno permesso di controllare l'effettiva conformazione del corso fluviale tra una sezione e l'altra individuando l'esatto tracciato delle sponde e la conformazione di alcune isole presenti in alveo, il dettaglio della schematizzazione ottenuta per il Po di Venezia è risultato nel complesso adeguato per gli scopi dello studio. Meno numerosi sono gli elementi geometrici disponibili per descrivere i 6 rami secondari del Po. Con le sezioni reperite è stato possibile comunque predisporre un modello "schematico" dei rami stessi, in cui il reticolo di calcolo rispetta, nel complesso, i dati geometrici principali dei corsi d'acqua (lunghezza, profondità media, larghezza delle sezioni liquide), ma non è in grado di fornire una rappresentazione accurata dei caratteri locali del moto. Tale carenza non pregiudica però la validità delle simulazioni, poiché, come emerge dalle valutazioni riportate nei paragrafi successivi, l'inserimento dei rami "schematici" consente in ogni caso di raggiungere l'obiettivo prefissato, ossia di ottenere con il calcolo una corretta ripartizione delle portate del Po tra i suoi rami deltizi nei diversi possibili stati idrometrici.

Il reticolo di calcolo del Po è rappresentato nella fig. 4.7.9. Complessivamente esso risulta composto da 6800 nodi e 12000 elementi triangolari. Nella stessa figura sono messi in evidenza con una scala maggiore i particolari della schematizzazione nell'intorno della conca di Volta Grimana e in prossimità della centrale di Porto Tolle. Nel primo caso, è evidenziata la presenza di una zona di bassi fondali situata in corrispondenza della grande curva a destra che si trova a valle della conca

(curva sulla quale si colloca il ponte della S.S. Romea). Nel secondo caso è rappresentata la schematizzazione del drizzagno recentemente costruito in corrispondenza dell'incile del Po delle Tolle. Nella stessa immagine è visibile la batimetria dei fondali nella zona prospiciente la centrale, che si caratterizza per lo spostamento del filone principale del fiume a ridosso della sponda sinistra, verso l'incile della Busa di Tramontana, lasciando la parte meno profonda della sezione a ridosso della sponda destra, dove si trova l'area occupata dall'impianto.

Per quel che concerne le simulazioni del funzionamento idrodinamico del Po di Levante, le condizioni al contorno applicate sono le medesime adottate per analizzare le condizioni idrodinamiche sulla bocca a mare (paragrafo 4.6). Esse consistono nell'andamento del livello di marea, assegnato sui nodi del contorno aperto in mare, e nell'andamento delle portate in arrivo nella sezione di monte del sistema (Canalbianco al sostegno di Baricetta).

Per quanto concerne il modello del Po, anche in questo caso è stato assegnato l'andamento dei livelli in mare sui nodi di foce di tutti i rami del fiume, e l'andamento delle portate in arrivo da monte sui nodi della sezione iniziale del modello, situata in corrispondenza dell'ansa di Corbola.

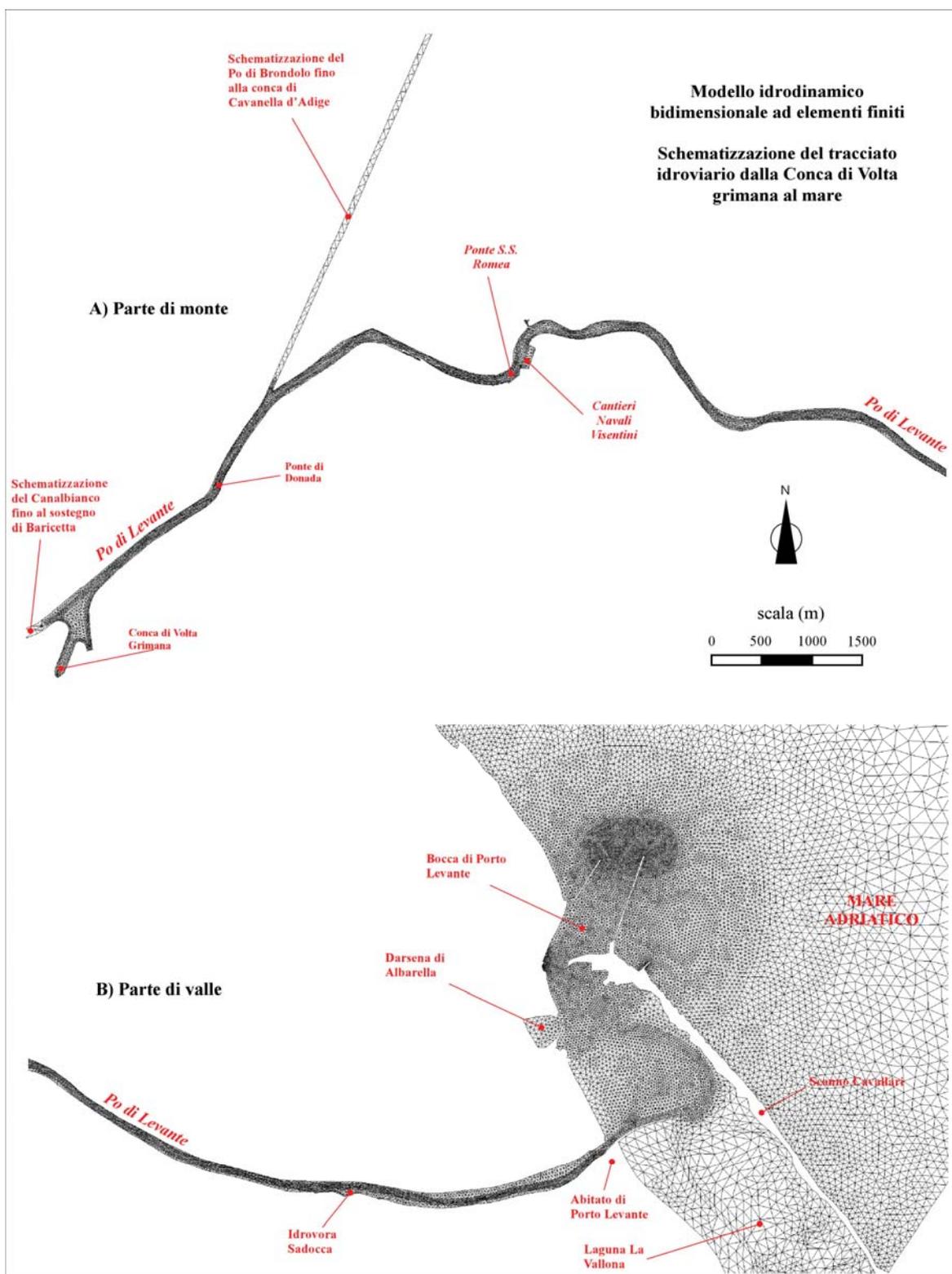


fig. 4.7.8 – Modello bidimensionale del sistema idroviario. Schematizzazione della via navigabile lungo il Po di Levante dalla conca di Volta Grimana al mare.

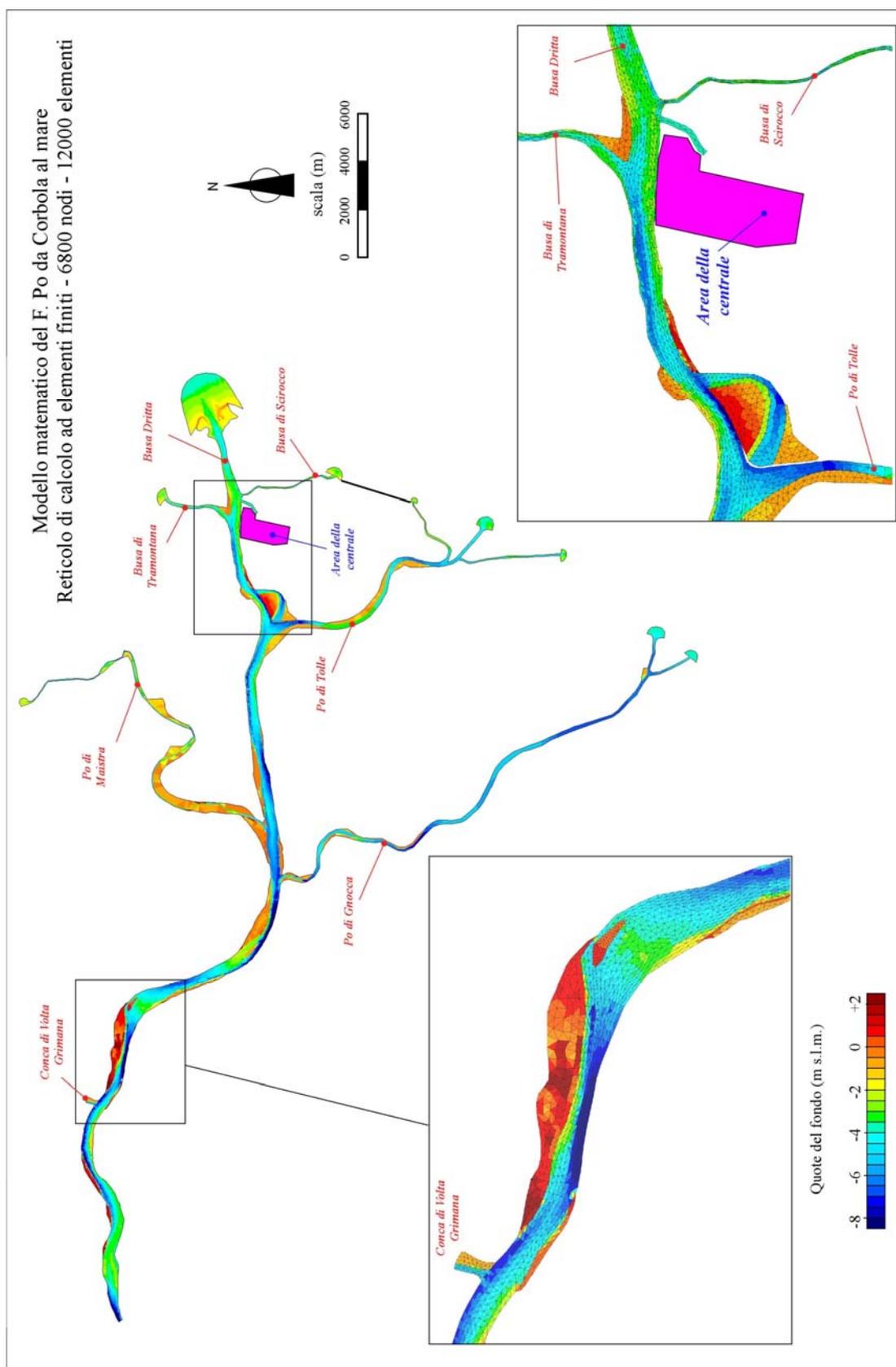


fig. 4.7.9 – Modello bidimensionale del sistema idroviario. Schematizzazione del Basso corso del F. Po da Corbola al mare.

4.7.2.2 Messa a punto del modello

Come illustrato nel precedente paragrafo 4.6, per la messa a punto e per la validazione dello schema modellistico del Po di Levante da Volta Grimana alla foce, è stato possibile disporre di alcuni elementi sperimentali relativamente ai livelli idrometrici in laguna La Vallona, alle portate scambiate attraverso la Bocca di Porto Levante e alle portate fluenti nella sezione terminale del Po di Levante in occasione di maree sizigiali. Si tratta di una serie di elementi conoscitivi che hanno consentito di verificare la corretta risposta del modello alla forzante mareale. Per la via d'acqua, oltre agli effetti della marea, è stata esaminata anche una condizione di "piena", considerando la massima portata in arrivo da monte dal Canalbianco. Per tali condizioni non sono disponibili riscontri sperimentali diretti. Tuttavia, come è stato messo in evidenza precedentemente, essendo tale portata dello stesso ordine di grandezza delle portate massime che si possono verificare nel tratto terminale del Po di Levante per effetto della sola marea (circa 200 m³/s), essa non dovrebbe modificare sostanzialmente i caratteri del campo di moto nel corso d'acqua, consentendo di estendere i risultati della taratura anche a tali condizioni idrologiche estreme.

Per quanto riguarda il modello del Po, la verifica della validità della schematizzazione predisposta è stata eseguita utilizzando le misure di una campagna effettuata nel settembre 2002 nell'ambito dello studio [9] in cui è stata misurata, in condizioni di quadratura, la portata fluente in tutti i rami del Po ad esclusione del Po di Goro. Poiché, come illustrato nel precedente paragrafo 4.7.1.4, è stato possibile reperire anche i livelli di marea e i livelli idrometrici in Po registrati nelle due stazioni di Pila e di Cavanella Po nel giorno della misura, sono state condotte alcune simulazioni per verificare, applicando sui nodi di monte la portata misurata (pari a 1782 m³/s) e sui nodi in mare il livello di marea rilevato (pari a 0.25 m s.l.m.), da una parte la corretta ripartizione delle portate nei rami deltizi, dall'altra i livelli idrometrici riscontrati. Questa procedura ha consentito, in particolare, di calibrare i coefficienti di scabrezza utilizzati nel modello.

In base a tali simulazioni, si è scelto di attribuire un unico valore al coefficiente di scabrezza, espresso nel modello secondo la formula di Strickler, pari a 50 m^{1/3}s⁻¹. In queste ipotesi, come si evince dalla successiva tabella tab. 4.7.5, il modello fornisce dei risultati che approssimano bene i dati sperimentali, sia per quel che concerne la ripartizione delle portate, sia per quanto riguarda i livelli idrometrici riscontrati a Pila e a Cavanella Po.

In base alla tab. 4.7.5 si osserva che, per quel che riguarda i livelli, il modello tende a sovrastimare leggermente il dato misurato, soprattutto nella stazione di Cavanella Po, situata circa 2 km a monte della conca di Volta Grimana. Per quanto riguarda le portate, il modello tende, invece, a sottostimare le portate per i rami posti più a monte (Po di Gnocca, Po di Maistra), mentre sovrastima quelle fluenti nei rami terminali (Po di Tolle, Busa Dritta, Busa di Tramontana e Busa di Scirocco). In ogni caso gli scostamenti tra il dato misurato e il valore calcolato sono modesti, essendo contenuti entro il 10 %, della media dei due valori.

I risultati ottenuti dimostrano che il modello predisposto consente di cogliere gli aspetti fondamentali della propagazione delle portate nel sistema deltizio ed è pertanto da ritenersi adeguato per gli scopi dell'indagine.

Un miglior adattamento dei risultati numerici ai valori sperimentali avrebbe potuto essere raggiunto calibrando opportunamente i valori dei coefficienti di scabrezza nei diversi rami. Tale operazione non è stata ritenuta, tuttavia, significativa, sia perché essa non avrebbe incrementato di fatto l'attendibilità del modello, data la natura schematica dello stesso dovuta alle poche sezioni disponibili, sia perché non stato è possibile riferirsi ad altre campagne di misure.

Modello del Basso corso del Po
Confronto tra i risultati del calcolo e le misure disponibili

	Sezione	Misurato	Calcolato	Diff. %
livelli (m s.m.)	Pila	0.42	0.45	6.90
	Cavanella Po	1.23	1.35	9.30
portate (m ³ /s)	Po di Gnocca	338	316	-6.73
	Po di Maistra	77	73	-5.33
	Po di Tolle	390	403	3.28
	Busa di Scirocco	84	87	3.51
	Busa Dritta	623	633	1.59
	Busa di Tramontana	247	267	7.78

tab. 4.7.5 – Confronto tra i risultati del calcolo e i dati sperimentali per la simulazione della situazione idrometrica rilevata alla foce del Po il 14 settembre 2002.

4.7.3 Situazioni esaminate

Le simulazioni effettuate sul sistema Po di Levante – Laguna La Vallona – mare hanno preso in esame 2 situazioni. In un primo caso è stata considerata la condizione di “magra”, caratterizzata da una portata in arrivo nulla dal Canalbianco. In un secondo caso è stata ipotizzata una situazione di “piena”, assumendoda una portata in ingresso a Volta Grimana pari a 200 m³/s. Tale portata, come ricordato nel precedente paragrafo 4.7.1, corrisponde ad un evento di piena con tempo di ritorno di 10 anni. E' comunque da tenere presente che, rispetto al valore considerato, al variare del tempo di ritorno, non si hanno significativi cambiamenti delle portate massime.

Le simulazioni effettuate sul modello del Po e dei suoi rami hanno preso in esame tre situazioni, individuate nel precedente paragrafo 4.7.1, in base all'analisi condotta sulle portate fluenti nel Basso corso del Po e su quelle significative ai fini della navigazione.

Nel primo caso è stata presa in esame la condizioni di “magra” del fiume, assegnando nella sezione di monte a Corbola una portata di 500 m³/s; nel secondo caso è stata simulata la condizione relativa alla “media annua” delle portate, assegnando a monte una portata di 1500 m³/s; nell'ultimo caso è stata presa in esame la condizione di “piena limite” per la navigazione, identificata con una portata di 6000 m³/s, che corrisponde ad un evento avente tempo di ritorno pari a circa 3 anni.

In tutti i casi le simulazioni sono state effettuate mantenendo costante la portata in ingresso a monte e assegnando sui nodi in mare una marea ipotetica sinusoidale, con periodo di 12 ore oscillante tra le quote -0.5 e +0.5 m s.l.m., che può essere considerata rappresentativa di una marea media di sizigia.

Le simulazioni sono state estese per due cicli completi di marea, preceduti da un altro ciclo completo necessario per l'avviamento del modello. Il passo di integrazione adottato nella soluzione numerica è stato pari a 2.5 s per il modello del Po di Levante e a 4 s per il modello del Po.

4.7.4 Analisi dei risultati

Il modello bidimensionale utilizzato consente di rappresentare, in forma numerica e grafica, il campo di moto in tutte le celle del dominio di calcolo nelle diverse fasi del ciclo di marea. In particolare, è possibile rappresentare l'andamento locale della quota idrometrica e della velocità della corrente (velocità media sulla verticale). Nei paragrafi seguenti sono illustrati i risultati ottenuti, con riferimento ai diversi stati idrometrici e di portata simulati.

4.7.4.1 Correnti indotte dai soli effetti della marea lungo il Po di Levante

Una prima analisi condotta ha riguardato il campo di moto generato dalla sola forzante di marea in assenza di portata in arrivo dal Canalbianco, nel quale, fatta eccezione per gli stati di piena, non sono generalmente introdotte portate apprezzabili.

Si è allo scopo considerata una marea semidiurna sinusoidale dell'ampiezza di 1 m, oscillante attorno al livello medio del mare. Si tratta, come si è detto, di una marea rappresentativa delle condizioni di sizigia, quando sono più accentuate le oscillazioni di livello indotte dalla componente mareale astronomica.

In fig. 4.7.10 e fig. 4.7.11 è riportato con una scala a colori l'inviluppo delle velocità massime in fase di flusso e di riflusso lungo la via d'acqua e nella laguna della Vallona, dove sfocia il Po di Levante. Il modello mette bene in evidenza il progressivo incremento della velocità massima che si verifica a misura che ci si sposta da Volta Grimana verso la foce. Per buona parte del tratto iniziale dell'idrovia le velocità massime restano, tuttavia, al di sotto di 0.5 m/s. Valori più elevati si realizzano poco prima dello sbocco del Po di Levante nella laguna La Vallona, dove si raggiungono velocità massime di circa 0.7 m/s. Valori ancora maggiori si segnalano lungo il canale lagunare che collega lo sbocco del Po di Levante alla bocca a mare, per il quale le portate convogliate risentono degli incrementi dovuti all'escursione nel tempo dei livelli degli ampi specchi d'acqua sottesi dal canale stesso. Qui le velocità massime sfiorano il m/s, in corrispondenza del canale navigabile compreso tra i moli foranei. Per questo parametro, la velocità massima, non vi sono sostanziali differenze tra la fase di flusso e di riflusso, se si esclude la zona antistante lo sbocco a mare tra le dighe, dove è ben evidenziata la già ricordata struttura a getto assunta dalla corrente in uscita, molto diversa dalla configurazione del campo di moto in condizione di flusso entrante.

Per la situazione di regime considerata, tenuto conto dei problemi connessi con la navigabilità, è significativo esaminare l'andamento nel tempo dei livelli e delle velocità in alcune sezioni significative lungo il Po di Levante.

In assenza di portate introdotte dal Canalbianco, il regime dei livelli dell'idrovia è dominato dalle oscillazioni di marea imposte in corrispondenza della bocca a mare della laguna La Vallona (fig. 4.7.12). Procedendo dalla bocca verso la foce del Po di Levante, per effetto della propagazione, colmi e cavi di marea subiscono un apprezzabile sfasamento nel tempo, ma una relativamente modesta attenuazione dei livelli massimi e minimi (complessivamente poco più di una decina di cm sull'ampiezza), più apprezzabile sui cavi che sui colmi.

Risalendo lungo l'idrovia un comportamento opposto si riscontra per i livelli. I fenomeni inerziali prevalgono sui processi dissipativi e l'ampiezza della marea tende progressivamente ad incrementarsi, tant'è che a Volta Grimana i cavi tornano ad assumere livelli confrontabili con quelli del mare, mentre i colmi subiscono una qualche esaltazione.

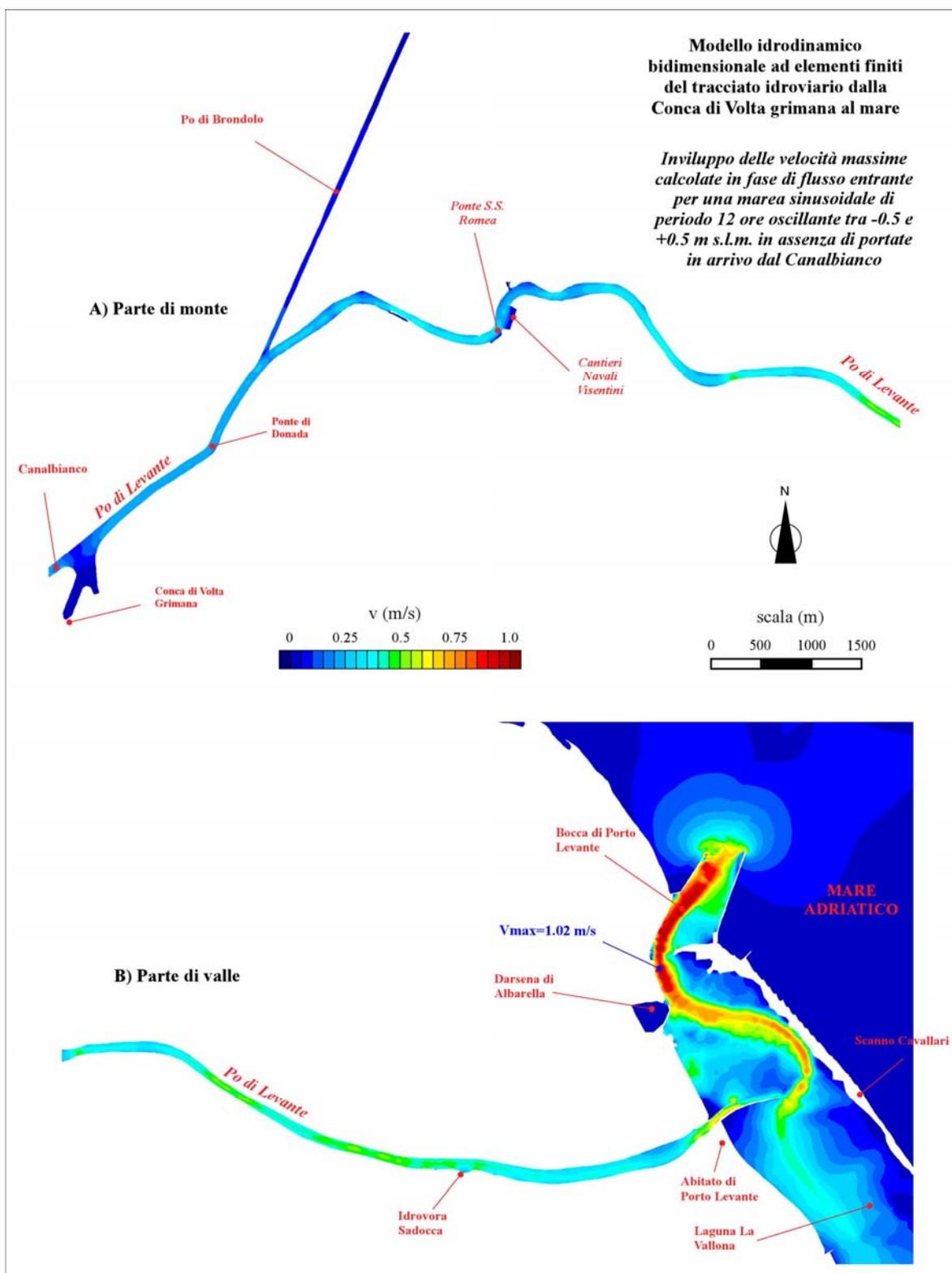
Ai fini pratici della navigabilità, in ogni caso, se si fa riferimento ai livelli minimi, si può assumere per

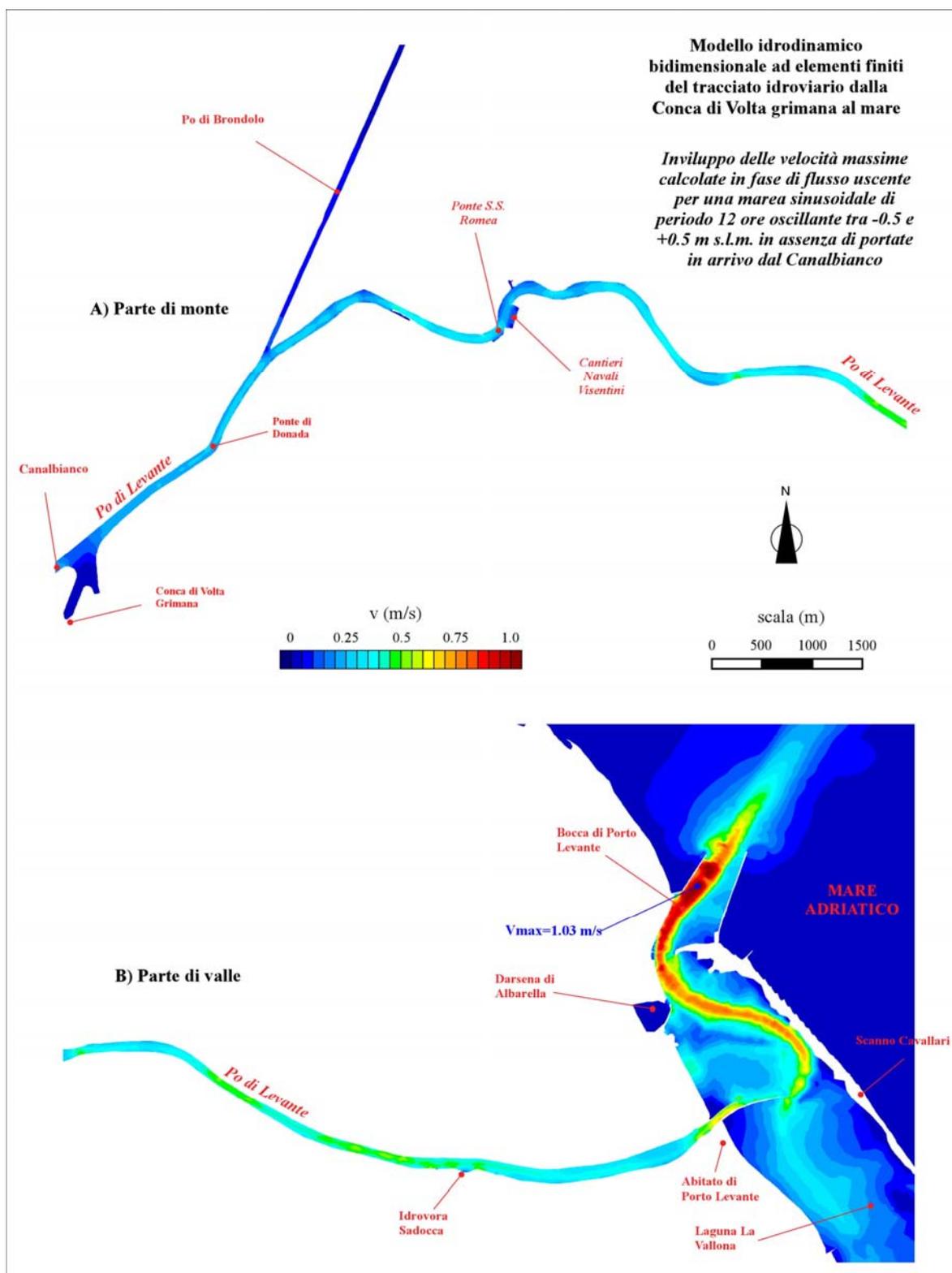
essi valori del tutto coincidenti con quelli del mare, essendo l'effetto della propagazione limitato a pochi cm.

Quanto all'andamento delle velocità, la stessa fig. 4.7.12, ne rappresenta l'andamento negli stessi punti considerati per i livelli. Dai grafici si evince che le velocità massime sono progressivamente crescenti scendendo lungo il Po di Levante, poiché aumentano, come è ovvio, le portate fluenti per effetto delle oscillazioni della marea. L'andamento simmetrico della marea utilizzata comporta che le velocità massime in condizioni di flusso assumano, praticamente, lo stesso valore di quelle che si verificano in fase di riflusso.

Condizioni di flusso dominante si riscontrano, invece, in corrispondenza della bocca a mare, dove le massime velocità in fase di flusso superano di circa 20 cm/s quelle della fase di riflusso, senza raggiungere, però, il m/s.

Nella fig. 4.7.13 l'involuppo dei livelli minimi è messo a confronto con le quote della linea di thalweg, che sono ovunque sensibilmente più ridotte e garantiscono fondali ampiamente superiori ai 4 m lungo questo particolare allineamento. Si tratta, naturalmente, di profondità raggiunte solo localmente nella sezione, e spesso sensibilmente superiori alla profondità media della sezione stessa, come è dettagliatamente illustrato nel successivo paragrafo 5.2.





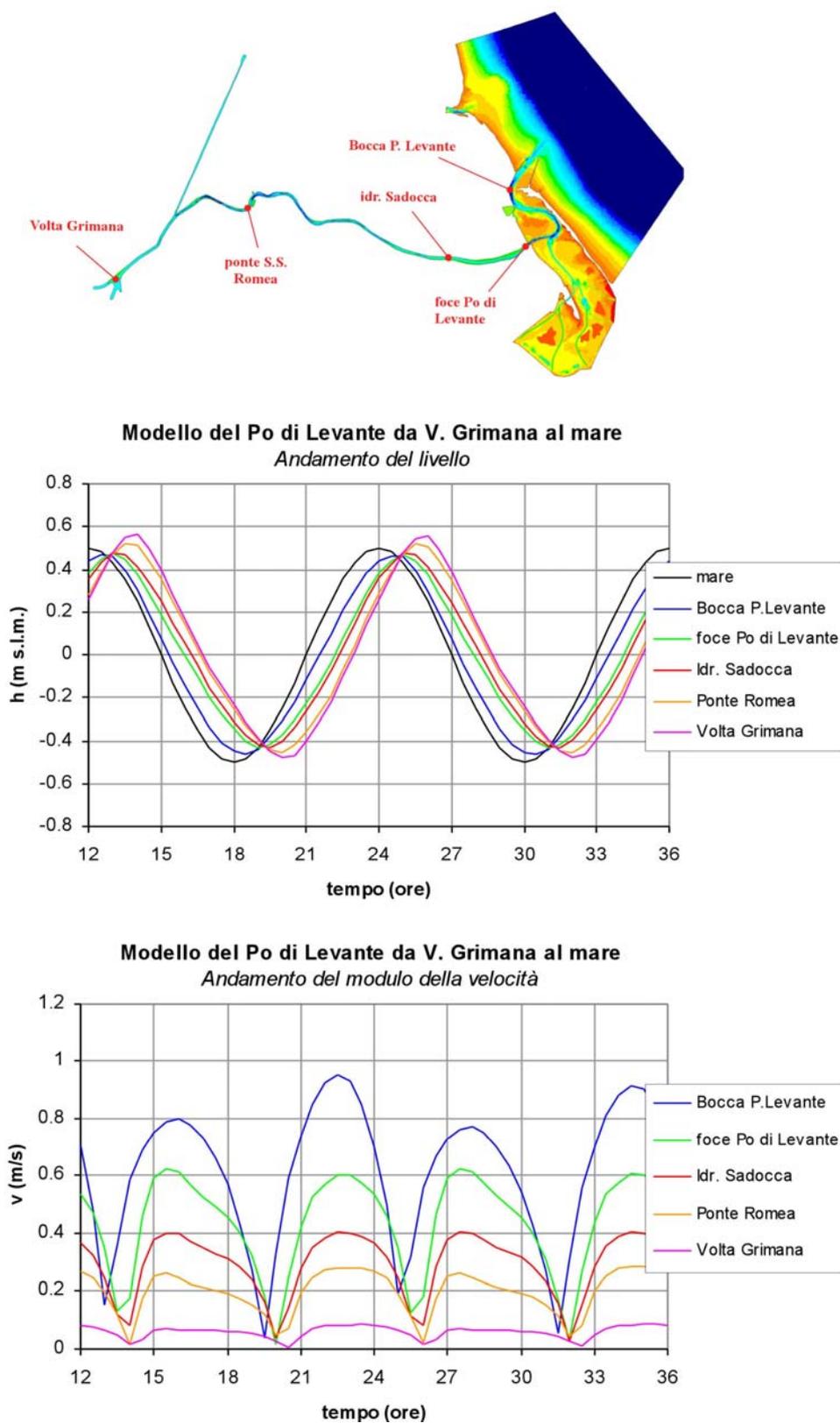


fig. 4.7.12 – Andamento del livello e del modulo della velocità in alcuni punti lungo il tracciato idroviario da Volta Grimana al mare per una marea sinusoidale di periodo pari a 12 ore oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m., e portata nulla in arrivo dal Canalbianco.

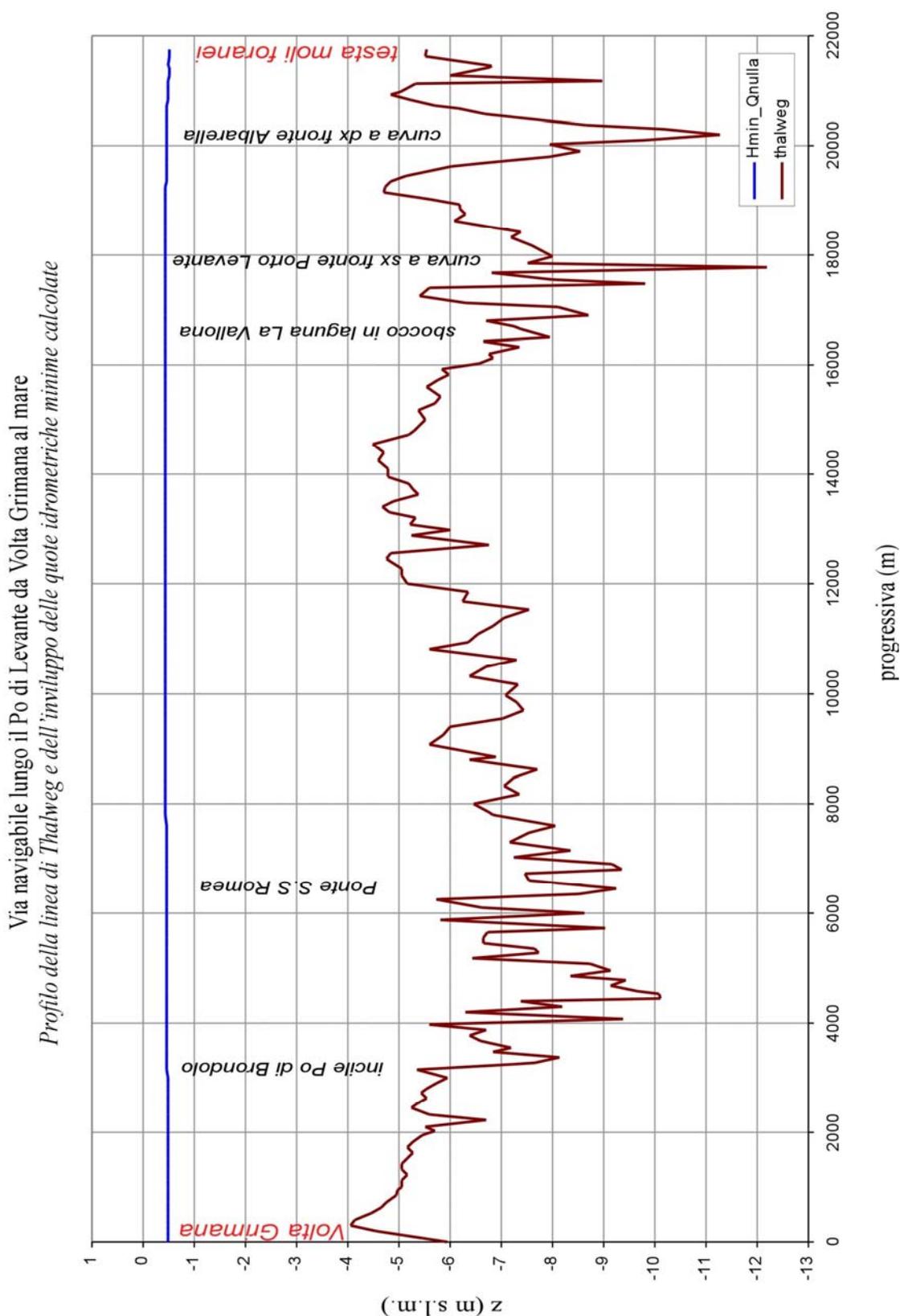


fig. 4.7.13 – Profilo della linea di thalweg nel Po di Levante da Volta Grimana al mare e delle quote idrometriche minime calcolate con il modello bidimensionale per una marea sinusoidale di periodo 12 ore oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m, con portata nulla in arrivo dal Canabianco.

4.7.4.2 Correnti indotte dalla sovrapposizione della marea con le portate ordinarie e di piena del Po di Levante

Gli effetti della sovrapposizione sull'oscillazione di marea di una portata cospicua in arrivo dal Canalbianco sono illustrati nelle fig. 4.7.14 e fig. 4.7.15, nelle quali sono rappresentati con una scala a colori gli involucri delle velocità massime in fase di flusso e di riflusso per una portata di 200 m³/s corrispondente alla portata al colmo di un evento con tempo di ritorno all'incirca decennale (si veda il paragrafo 4.7.1.3).

Si tratta, in pratica, di una portata rappresentativa anche di un più ampio campo di funzionamento del sistema Fissero-Tartaro-Canalbianco, poiché secondo il PAI redatto a cura della Regione Veneto, la portata di piena ordinaria del corso d'acqua (tempo di ritorno all'incirca annuale) è pari a circa 140 m³/s, mentre quella dell'evento cinquantennale è valutata in circa 240 m³/s.

Poiché le variazioni delle portate sul passaggio dei colmi di piena sono caratterizzate da una significativa persistenza nel tempo delle portate stesse, la simulazione è stata condotta considerando una portata in ingresso costante pari a quella al colmo, assumendo in mare la stessa marea sinusoidale del caso precedente (± 0.5 m s.l.m.).

La presenza di consistenti portate in arrivo da monte riduce le velocità massime lungo il Po di Levante durante la fase di flusso (fig. 4.7.14). Lungo l'idrovia i valori massimi sono di circa 0.5 m/s e le massime variazioni rispetto al caso precedente si realizzano verso la foce. Anche lungo il canale lagunare che collega il Po di Levante alla bocca a mare si verificano riduzioni delle velocità massime che non superano 0.7-0.8 m/s.

Incrementi apprezzabili delle velocità massime lungo l'idrovia si verificano, per contro, nella fase di riflusso, quando sulle portate provenienti dal Canalbianco si sovrappongono i contributi dovuti ai volumi d'acqua liberati dalla marea discendente (fig. 4.7.15). La parte dell'idrovia più prossima allo sbocco in laguna risente maggiormente di tale sovrapposizione ed in alcuni tratti la velocità massima sale a valori superiori a 0.8-0.9 m/s. Il fenomeno è ancora più evidente lungo il canale navigabile che collega lo sbocco in laguna del Po di Levante alla bocca. Qui in alcuni punti si superano valori di 1.10÷1.15 m/s, velocità che sono però più che compatibili con la navigazione dei battelli da e per la centrale.

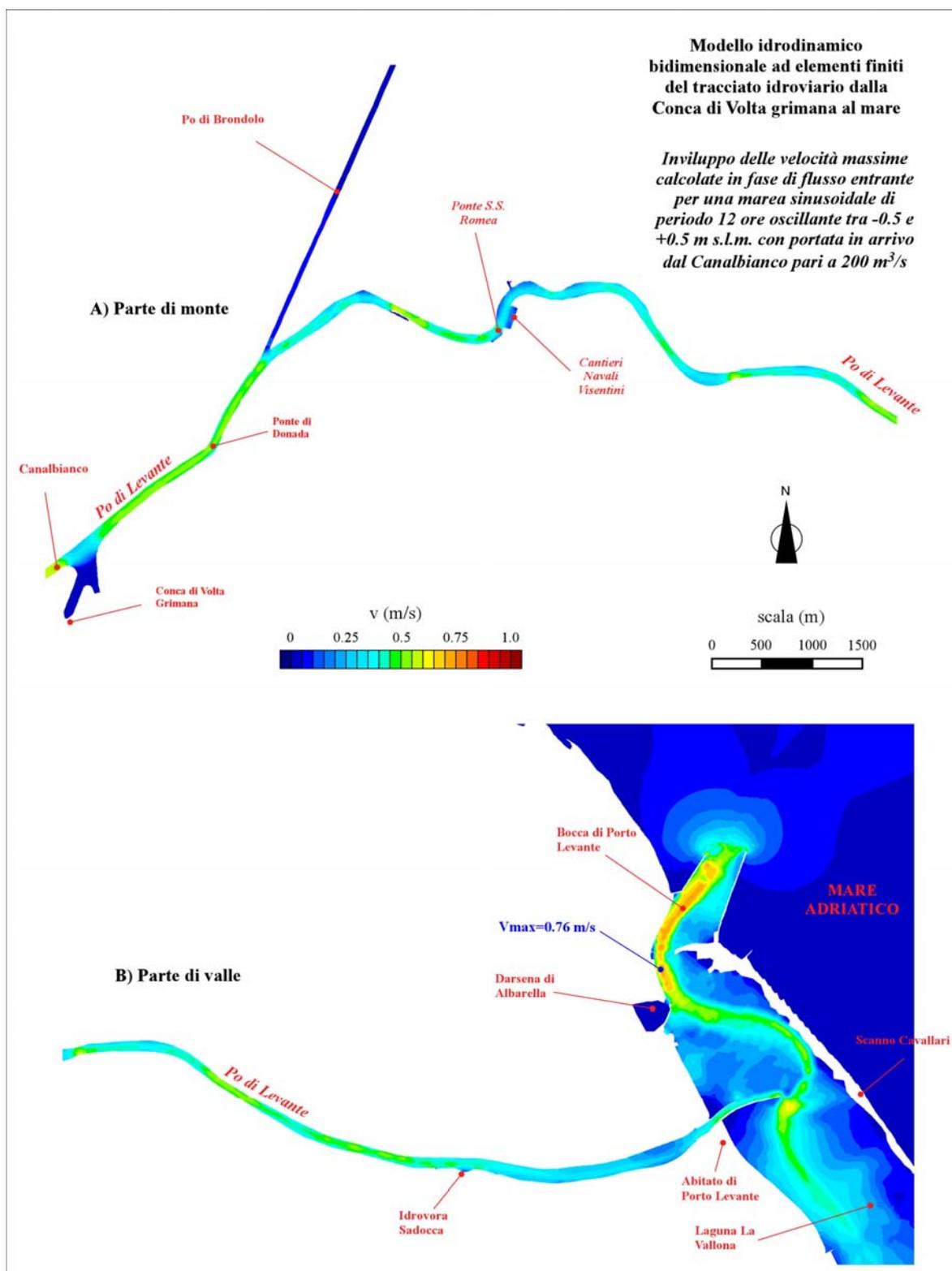
Le consistenti portate in arrivo dal Canalbianco modificano apprezzabilmente anche l'andamento nel tempo dei livelli lungo il Po di Levante. I livelli risentono ancora dell'oscillazione della marea in corrispondenza della bocca a mare della laguna La Vallona, ma in misura attenuata a misura che ci si sposta verso Volta Grimana (fig. 4.7.16). Colmi e cavi di marea si rialzano progressivamente a causa delle consistenti portate fluenti, mentre si incrementano sensibilmente rispetto al caso precedente i ritardi di fase rispetto al mare con cui livelli minimi e massimi si presentano nelle diverse sezioni considerate.

A Volta Grimana i livelli massimi sono di circa 0.75 m s.m. (0.5 m s.m. alla bocca), quelli minimi di circa 0.15 m s.m. (-0.5 m s.m. alla bocca).

Per le velocità massime le variazioni maggiori si riscontrano nel Po di Levante, dove allo sbocco in laguna si raggiungono valori di circa 0.9 m/s durante la fase di riflusso. Si tratta di velocità di poco superiori a quelle che si realizzano in corrispondenza della bocca a mare della laguna.

Per la situazione esaminata l'involuppo dei livelli minimi lungo il Po di Levante segnala condizioni più

che favorevoli alla navigazione. Le profondità in corrispondenza della linea di thalweg (fig. 4.7.17) si incrementano apprezzabilmente rispetto al caso esaminato precedentemente (di circa 60 cm all'altezza di Volta Grimana). Tenuto conto delle velocità massime e delle profondità minime che si realizzano lungo il Po di Levante, in queste condizioni di regime non si hanno problemi di sorta per la navigabilità delle chiatte da e per la centrale lungo l'idrovia. Al riguardo valutazioni dettagliate sono riportate nel successivo paragrafo 5.2.



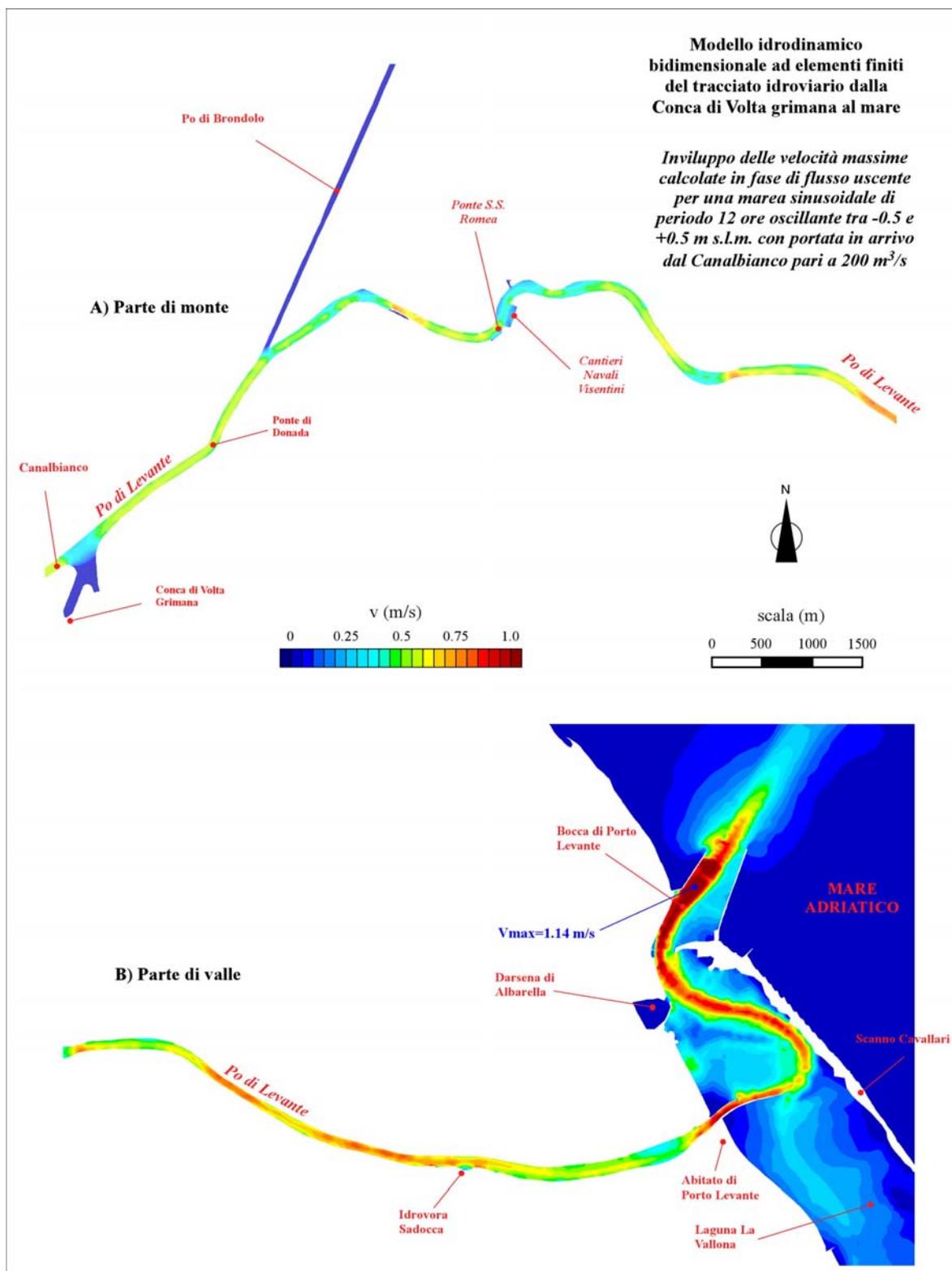


fig. 4.7.15 – Inviluppo delle velocità massime calcolate in fase di flusso uscente nel sistema Po di Levante – Laguna La Vallona per una marea sinusoidale di periodo pari a 12 ore oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m, e portata in arrivo dal Canalbianco pari a 200 m³/s.

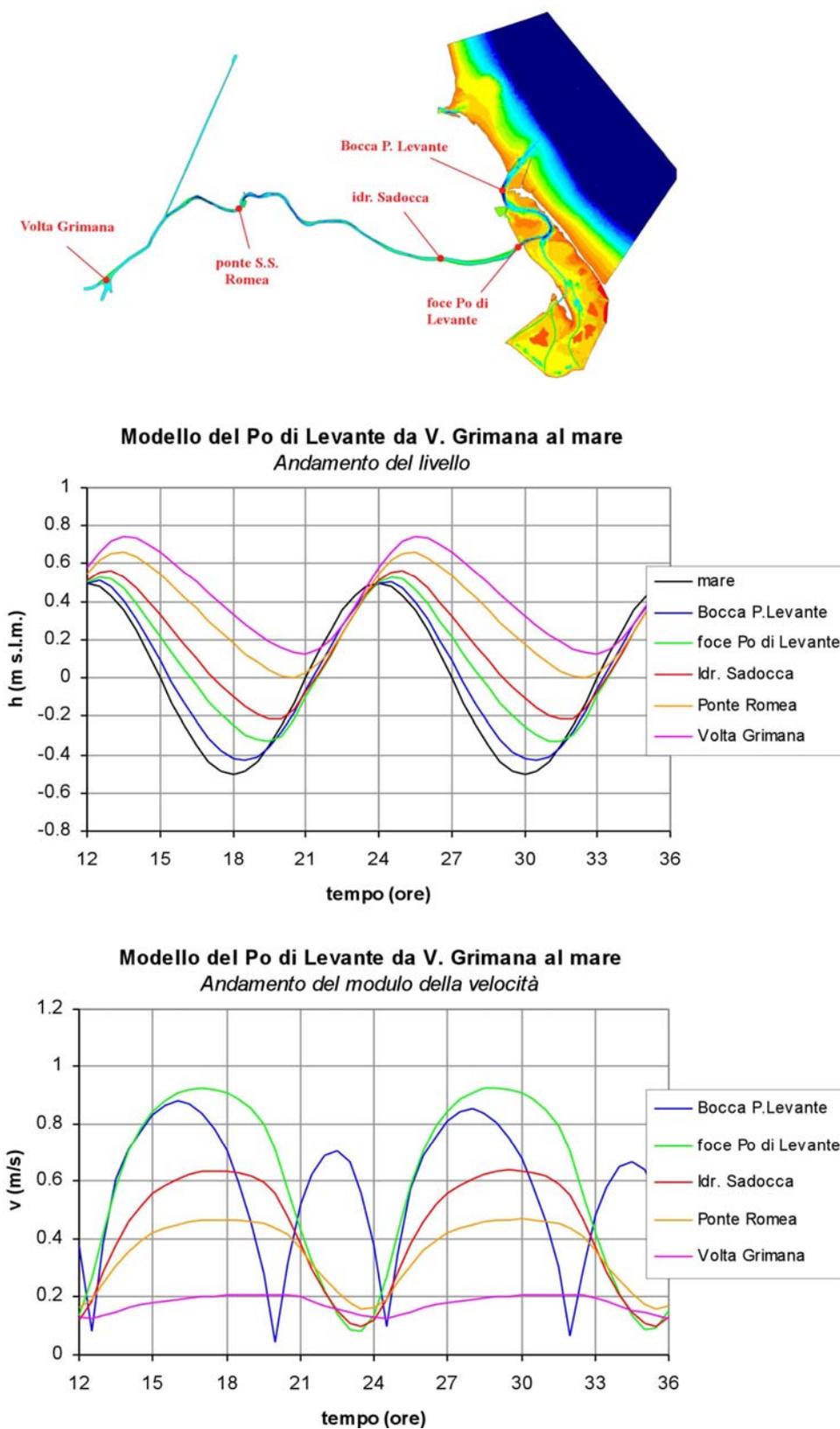


fig. 4.7.16 – Andamento del livello e del modulo della velocità in alcuni punti lungo il tracciato idroviario da Volta Grimana al mare per una marea sinusoidale di periodo pari a 12 ore oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m, e portata in arrivo dal Canalbianco pari a 200 m³/s.

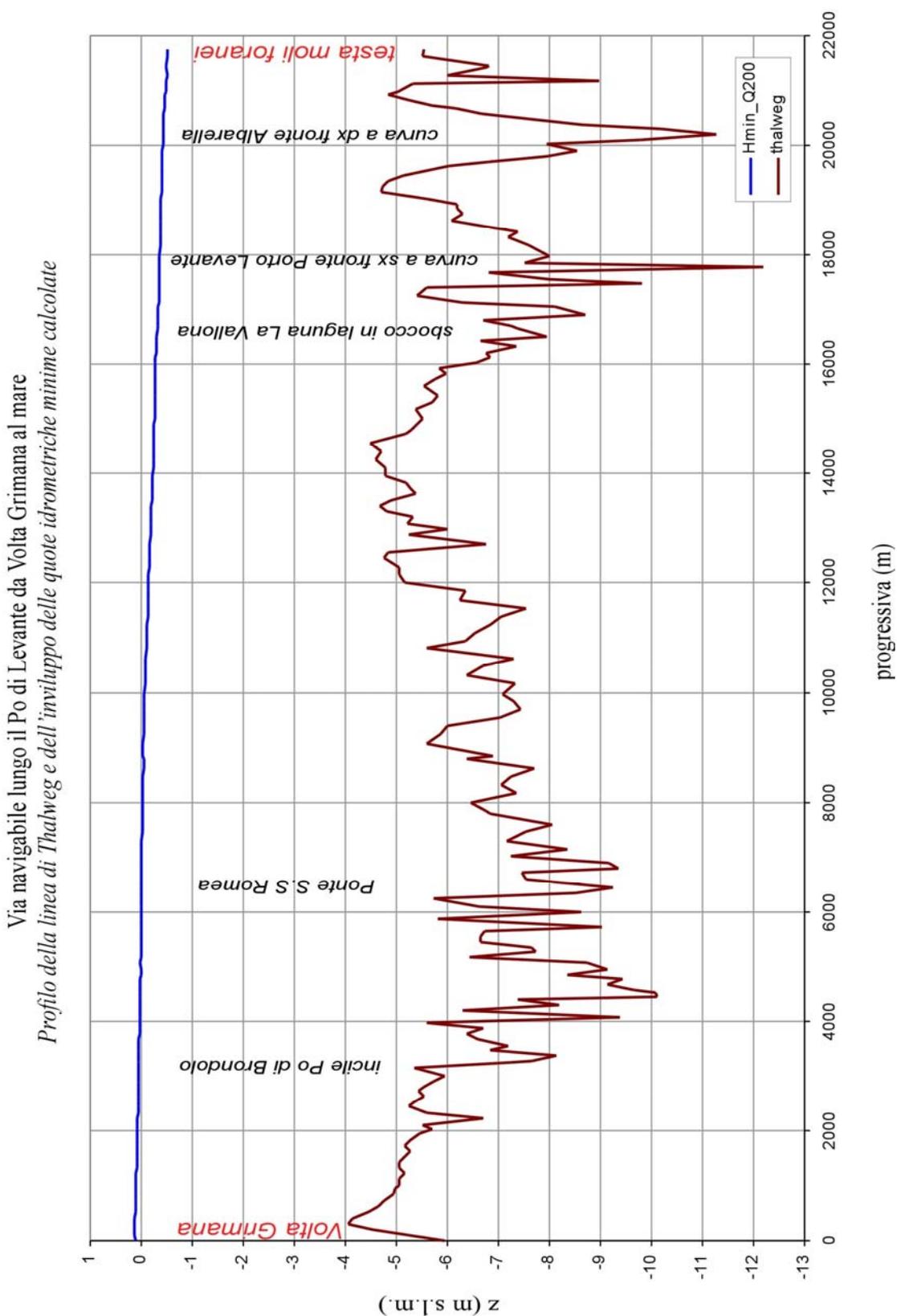


fig. 4.7.17 – Profilo della linea di thalweg nel Po di Levante da Volta Grimana al mare e delle quote idrometriche minime calcolate con il modello bidimensionale per una marea sinusoidale di periodo 12 ore oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m, e portata in arrivo dal Canalbiano pari a 200 m³/s.

4.7.4.3 *Regime delle correnti lungo il Basso corso del Po per portate significative ai fini della navigazione*

Lungo il Basso corso del Po livelli idrometrici e regime delle correnti risentono in misura apprezzabile, oltre che dei livelli imposti dalla marea alla foce dei rami del suo Delta, anche dalla portate in arrivo da monte, che possono variare entro un campo di valori molto ampio (vedi paragrafo 4.7.1).

Per tale motivo, fermo restando l'andamento dei livelli in mare (descritto da una marea semidiurna sinusoidale di ampiezza di 1 m oscillante intorno allo zero mareografico), tenuto conto delle finalità dell'indagine rivolta ad esaminare la navigabilità di fiume, si sono considerate per le portate fluenti valori corrispondenti allo stato di magra pronunciata, alla portata media annua fluente ed alla portata di piena che determina la sospensione del funzionamento della conca di Volta Gimana (superamento nel fiume della quota idrometrica di 4.40 m s.m.).

Data la relativa brevità del tratto di fiume esaminato, con buona approssimazione si è assunto per la portata in ingresso un valore costante nel tempo, come suggerisce anche la persistenza del flusso in condizioni di piena.

Per le condizioni di magra pronunciata si è considerata a Pontelagoscuro la portata di 550 m³/s valore superato nel 90% dei casi, che determina a Corbola una portata di circa 500 m³/s, tenuto conto che il 10% circa della portata fluente verso il Delta è sottratto dal ramo del Po di Goro.

In queste ipotesi alcuni dei risultati forniti dal calcolo sono illustrati nella fig. 4.7.18, i cui grafici evidenziano l'andamento dei livelli e delle velocità in una serie di sezioni del Po di Venezia tra Volta Grimana e la foce.

Nelle diverse sezioni considerate, secondo il calcolo, l'andamento dei livelli segue l'oscillazione della marea alla foce, che si propaga verso monte sfasata progressivamente, ma con una modesta riduzione dell'ampiezza.

Per la situazione esaminata, colmi e cavi si rialzano rispetto al mare, stabilendo quote via via crescenti. Gli effetti sono più evidenti sui livelli minimi che a Volta Grimana si rialzano di circa 0.40 m (-0.10 m s.m. circa contro il valore in mare di -0.5 m s.m.), mentre i colmi si incrementano di poco meno di 0.3 m.

Per quanto riguarda le velocità (fig. 4.7.18) i loro valori, ovviamente, sono maggiori nelle fasi di marea calante, quando sulle portate in arrivo da monte si sovrappongono gli effetti dello svaso progressivo dell'alveo. Nelle diverse sezioni considerate per il Po di Venezia, tuttavia, esse assumono valori modesti, variabili tra circa 0.6 m/s e 0.4 m/s per i valori massimi, in corrispondenza rispettivamente delle sezioni da cui si stacca la Busa di Tramontana, non lontano quindi dalla foce, e di Volta Grimana.

Se si incrementa la portata fluente nel Po di Venezia a 1500 m³/s, procedendo dalla foce verso monte, l'oscillazione dei livelli indotti dalla marea alla foce si attenua (fig. 4.7.20), divenendo praticamente trascurabile già all'altezza dell'incile del Po di Tolle. Parallelamente si incrementano le quote idrometriche, che all'altezza di Volta Grimana sono pari a circa 1.0 m s.m.. Valori relativamente modesti si determinano per le velocità massime che nelle diverse sezioni variano tra 0.7-0.9 m/s, ampiamente tollerabili dai battelli in navigazione da e per la centrale.

Per le due portate esaminate di 500 m³/s e di 1500 m³/s, interessante ai fini della navigazione è anche l'andamento dei livelli minimi il cui inviluppo in fig. 4.7.19 è posto a confronto con l'andamento

della linea di thalweg. Per la portata di 500 m³/s quasi ovunque su larghezze trasversali significative le profondità nelle sezioni del Po sono superiori a quelle necessarie alla navigazione dei battelli da e per la centrale. I valori più ridotti si riscontrano lungo la grande ansa percorsa dal fiume a valle di Volta Grimana. Qui le profondità massime in corrispondenza della linea di Thalveg si riducono a poco meno di 4 m (sez. 79), ma la profondità media nella quasi totalità della sezione è inferiore ai 2.5 m, con conseguente forte riduzione anche della larghezza del canale utilizzabile per la navigazione. Si tratta di un problema che riguarda un tratto d'alveo di lunghezza limitata, ma che deve essere considerato.

Al crescere delle portate fluenti si incrementano ovviamente le profondità disponibili come è evidenziato dal confronto tra l'inviluppo delle quote idrometriche minime e l'andamento della linea di thalweg per la portata di 1500 m³/s (fig. 4.7.19). Si determinano di conseguenza condizioni più favorevoli alla navigazione, anche nel tratto d'alveo esaminato, subito a valle della conca di Volta Grimana dove, passando da 500 m³/s a 1500 m³/s, le quote idrometriche aumentano, secondo il calcolo, di poco più di 0.40 m, consentendo alle chiatte fluvio-marittime di navigare, ma senza il necessario franco.

Si è da ultimo considerata una portata fluente in ingresso dal Po di Venezia di circa 6000 m³/s corrispondente alla portata massima al colmo di un evento con tempo di ritorno di circa 3 anni (vedi paragrafo 4.7.1).

Con tale portata, ferme restando le condizioni di livello alla foce, all'altezza della conca di Volta Grimana si realizza una quota idrometrica di poco inferiore ai 4.4 m s.m. (fig. 4.7.21), limite superato il quale diventa inagibile la conca e si determina, quindi, la sospensione della navigazione.

In queste condizioni la corrente fluviale non è più influenzata dalle oscillazioni della marea alla foce e i livelli, già all'altezza della sezione da cui si stacca la Busa di Tramontana, assumono valori praticamente costanti di circa 1.2 m s.m.

Un analogo comportamento è segnalato dalle velocità, che si incrementano apprezzabilmente in relazione anche alla sezione liquida disponibile. Per le sezioni esaminate lungo il Po di Venezia le velocità variano, mediamente, entro un campo di valori che va da poco meno di 1.5 m/s, all'incile del Po di Tolle, a poco più di 2 m/s, all'incile del Po di Gnocca.

Puntualmente, tuttavia, le velocità massime possono salire ben al sopra dei limiti indicati (fig. 4.7.22), come accade ad esempio in corrispondenza delle curve ed in particolare lungo quella che l'alveo presenta subito a valle della conca di Volta Grimana, dove i valori massimi della velocità per il caso in esame raggiungono i 3 m/s.

Valori non eccessivi della velocità massima si riscontrano, infine, in prossimità della centrale, dove si stacca il canale che porta alla darsena esistente a servizio dell'impianto. In sponda destra, i fondali relativamente ridotti contengono le velocità entro limiti accettabili, anche in condizioni di piena accentuata, superando di poco valori di circa 1.5 m/s (fig. 4.7.22).

In questo contesto l'ampliamento della darsena per permettere l'attracco delle chiatte fluvio-marittime a servizio della centrale appare ammissibile, purché essa sia realizzata in arretrato rispetto all'andamento della linea di riva del fiume, in modo da non influenzare con opere sporgenti l'assetto locale del campo di moto.

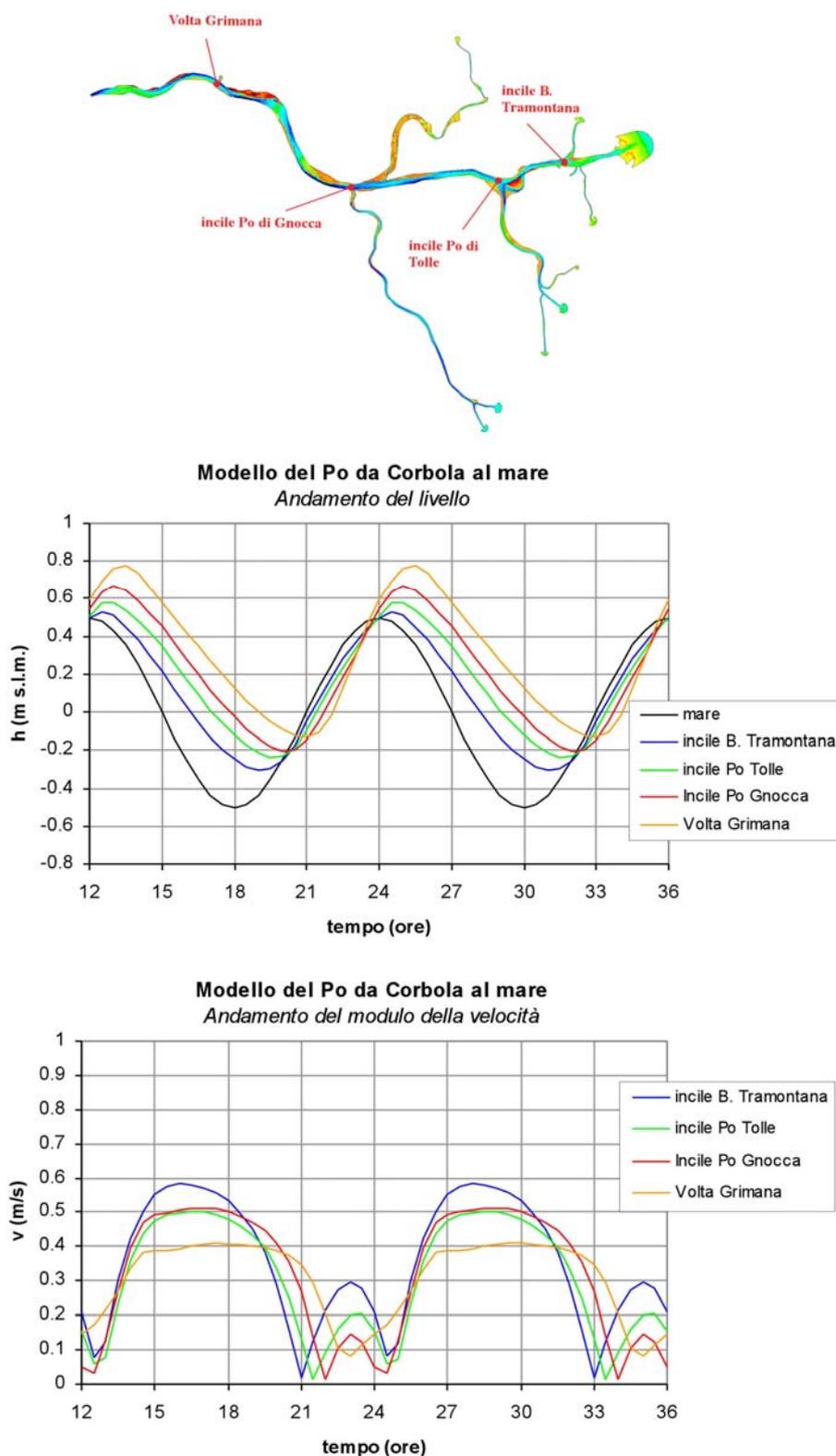


fig. 4.7.18 – Andamento dei livelli e del modulo delle velocità in alcuni punti lungo il Po da Volta Grimana al mare per una marea sinusoidale di periodo pari a 12 ore oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m. e una portata in arrivo da monte pari a 500 m³/s.

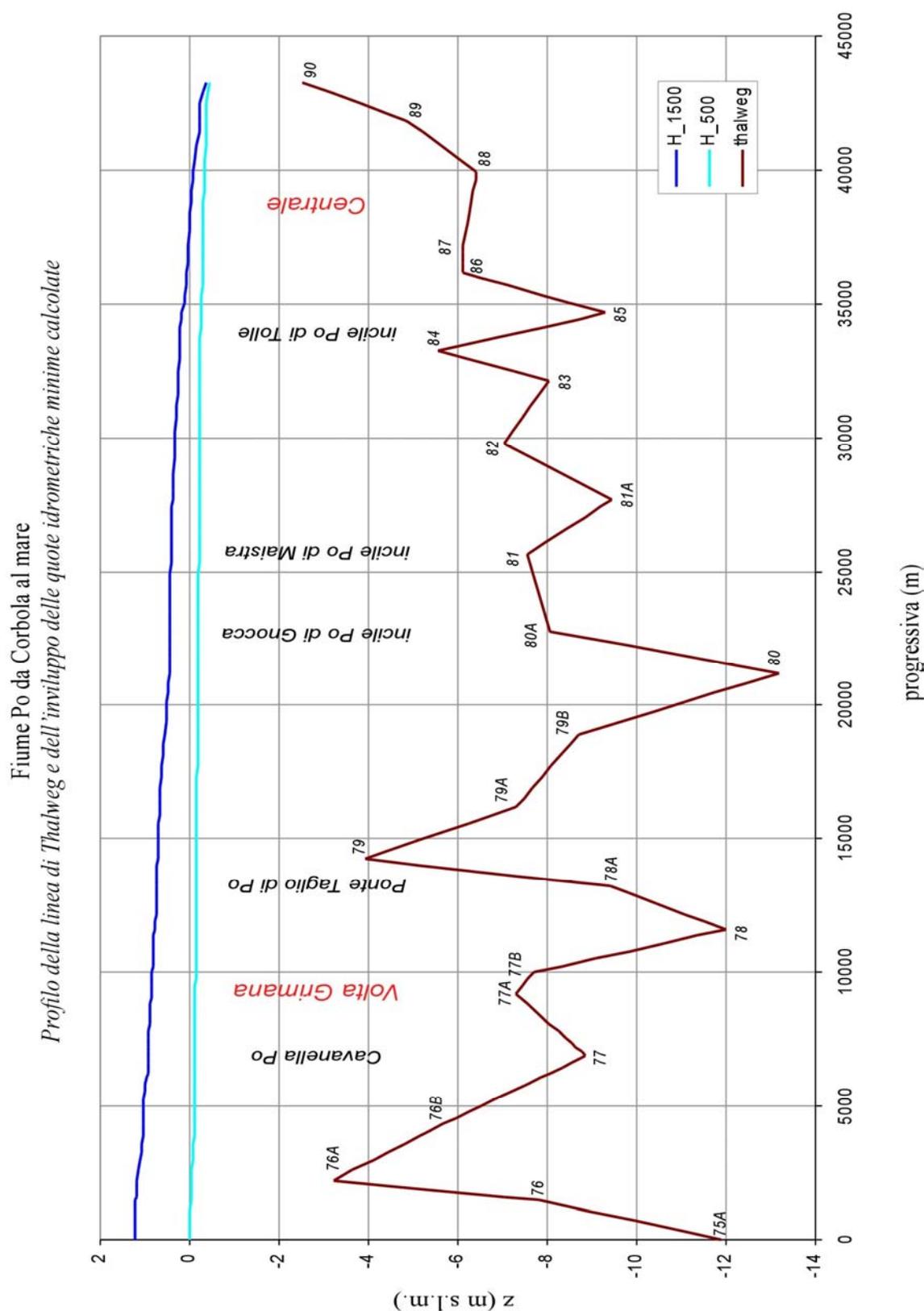


fig. 4.7.19 – Profilo delle quote di thalweg e inviluppo dei livelli minimi raggiunti lungo il Po da Volta Grimana alla foce per una marea sinusoidale di periodo pari a 12 ore oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m, e portate in arrivo da monte pari a 500 e 1500 m³/s.

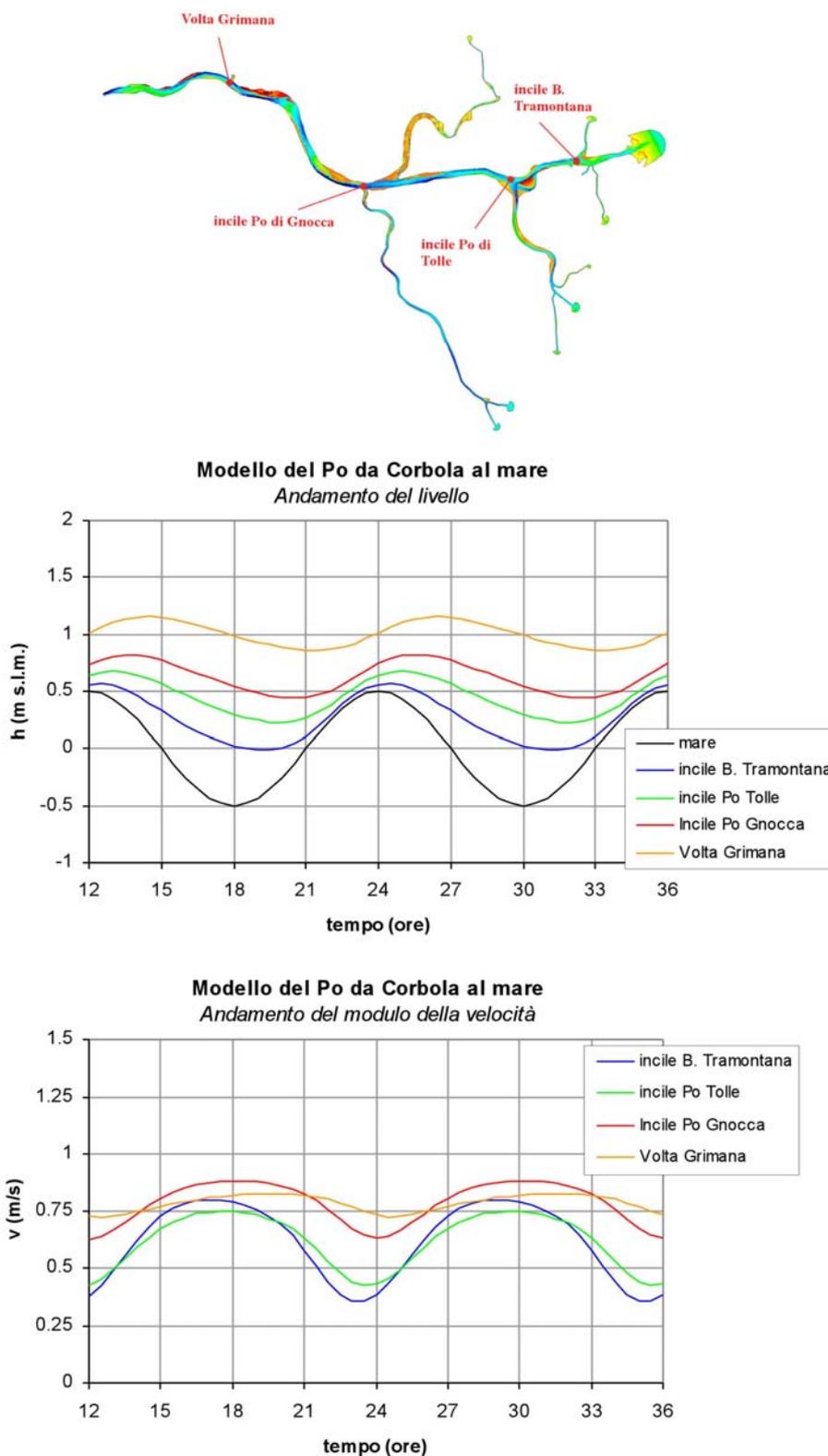


fig. 4.7.20 – Andamento dei livelli e del modulo delle velocità in alcuni punti lungo il Po da Volta Grimana al mare per una marea sinusoidale di periodo pari a 12 ore oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m, e una portata in arrivo da monte pari a 1500 m³/s.

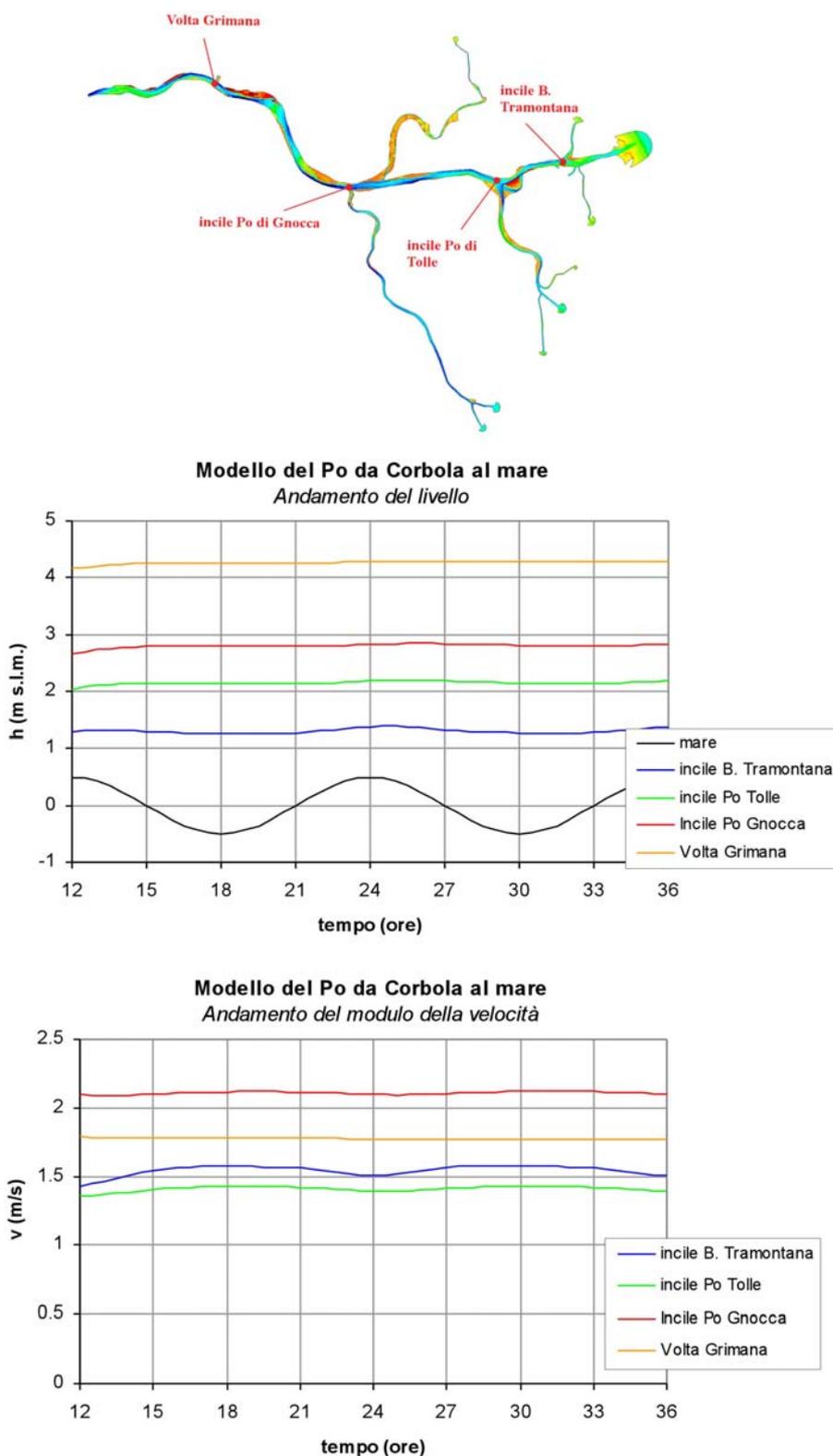


fig. 4.7.21 – Andamento dei livelli e del modulo delle velocità in alcuni punti lungo il Po da Volta Grimana al mare per una marea sinusoidale di periodo pari a 12 ore oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m, e una portata in arrivo da monte pari a 6000 m³/s.

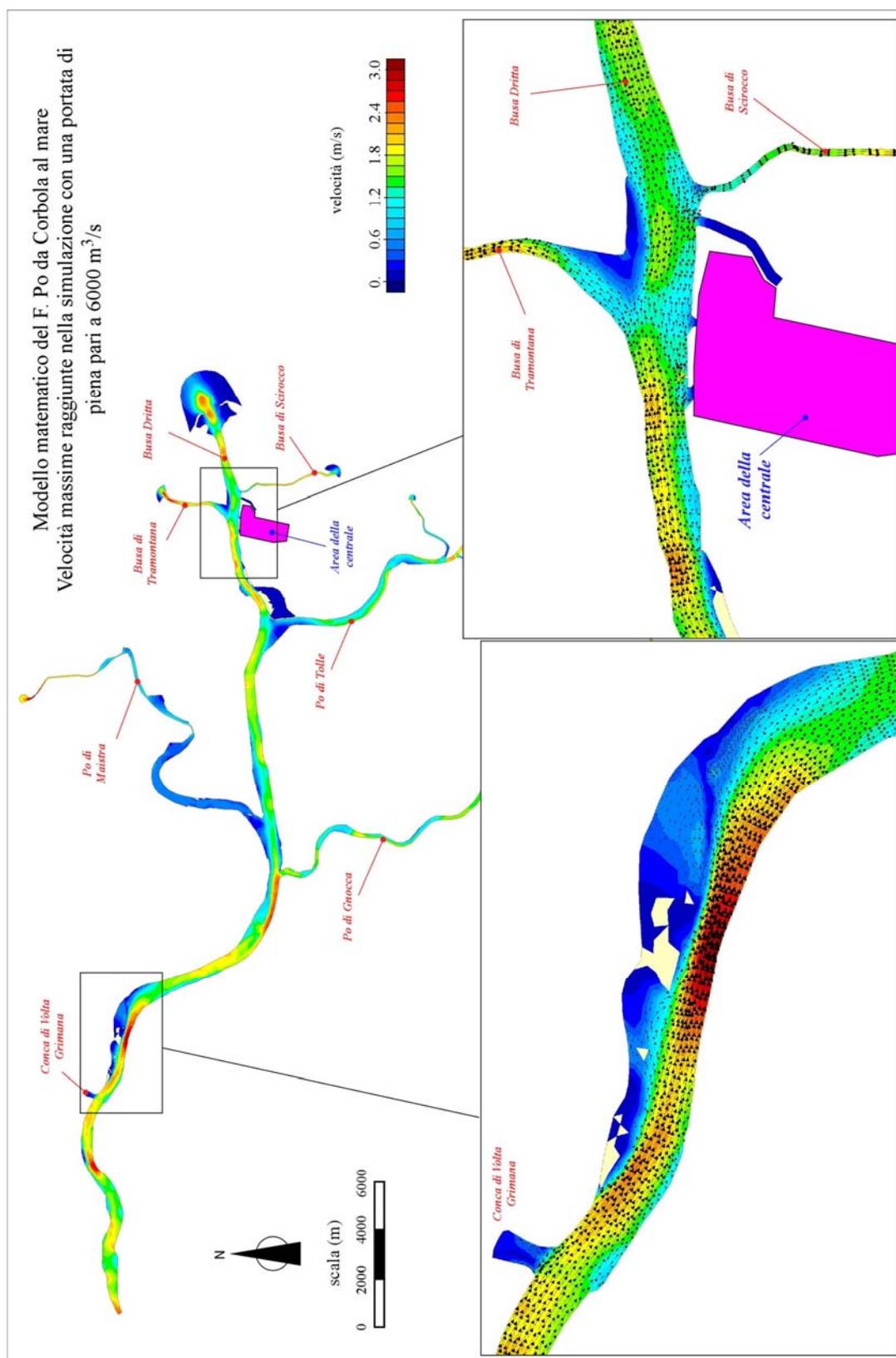


fig. 4.7.22 – Velocità massime raggiunte lungo il Po da Volta Grimana alla foce per una marea sinusoidale di periodo pari a 12 ore oscillante tra +0.5 e -0.5 m s.l.m, e portata in arrivo da monte pari a $6000 \text{ m}^3/\text{s}$.

5 COMPATIBILITÀ DEI NATANTI CON LE CARATTERISTICHE GEOMETRICHE ED IDRAULICHE DELLE VIE D'ACQUA

L'ipotesi progettuale, qui esaminata nel dettaglio relativamente alla navigabilità della direttrice di collegamento tra la nave storage mobile autocaricante ancorata al largo della costa e la centrale di Porto Tolle non comporta, come si è più volte evidenziato, interventi particolari o l'esecuzione di nuove opere. Essa incide, tuttavia, sul traffico del sistema idroviario che in alcune sue parti sarà interessato dal passaggio dei nuovi natanti. Di tali parti è necessario, pertanto, verificare la compatibilità strutturale, analizzando, anche alla luce dei risultati delle indagini condotte per inquadrare il regime idraulico del sistema che fa capo al Po di Levante e al Basso corso del Po, se sussistano vincoli da considerare.

Poiché per le chiatte fluvio-marittime sono previste dimensioni trasversali non usuali, una prima verifica riguarda la compatibilità geometrica delle sezioni idrauliche del Po di Levante e del Basso corso del Po, tenuto conto del regime delle correnti e dell'influenza sulle quote idrometriche del periodico variare dei livelli di marea alla foce.

Per questi aspetti le condizioni più gravose si determinano per le minori portate fluenti, che sono perciò quelle da considerare nelle verifiche sulla navigabilità, in particolare nel caso del Basso corso del Po.

Nei successivi paragrafi di questo capitolo, richiamata la normativa di riferimento, sono esposti i risultati delle analisi e delle verifiche condotte e sono forniti alcuni suggerimenti per consentire la percorribilità dei tratti critici individuati, evidenziando periodi di sospensione del traffico lungo le vie d'acqua esaminate.

5.1 Normativa di riferimento

Le caratteristiche geometriche delle vie navigabili europee non sono regolate da vere e proprie norme. Esistono, tuttavia, relazioni dettagliate che contengono le caratteristiche consigliate per i principali aspetti che intervengono nella navigazione interna. Ed è a queste relazioni che si fa riferimento per la verifica della compatibilità dei natanti destinati a sostenere l'esercizio della Centrale di Porto Tolle con le attuali caratteristiche del sistema idroviario Po di Levante-Conca di Volta Grimana-Basso corso del Po.

Ciò premesso, nell'individuazione dei criteri più opportuni da utilizzare nelle verifiche ci si è in modo specifico basati sulle indicazioni contenute nella "Normativa per la redazione dei progetti di vie navigabili: proposta elaborata dalla Commissione nominata presso il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con d.i. n. 3569/89/280 del 30/11/1988".

Si è, inoltre, tenuto conto delle valutazioni di carattere generale riportate nella letteratura tecnica e, in particolare, nel "Manuale di Ingegneria Civile" – A.Cremonese – Capitolo VII: Navigazione Interna (Roma, 1986) e in "Handbook of Coastal and Ocean Engineering".

5.1.1 Classificazione dei natanti e delle vie navigabili.

Come è noto, la navigabilità di un corso d'acqua naturale o artificiale dipende da numerosi fattori tra i

quali la tipologia, le dimensioni ed il tonnellaggio delle imbarcazioni, le caratteristiche idrodinamiche e geometriche della via d'acqua.

La classificazione delle vie navigabili interne, costituite da fiumi e canali, è stabilita dal CEMT (Conferenza Europea dei Ministri dei Trasporti). L'ultima classificazione risale alla risoluzione n. 92/2, che suddivide le vie d'acqua, in ragione della loro capacità di accogliere natanti di diverse dimensioni, in una serie di classi già indicate nel capitolo 3.1 e qui riprese, secondo le indicazioni CEMT, per comodità di lettura (tab. 5.1.1).

tab. 5.1.1 - Classificazione dei natanti e delle vie navigabili secondo CEMT

CLASSE	LUNGHEZZA L (m)	LARGHEZZA b (m)	PESCAGGIO MAX i (m)	PORTATA P (t)	TIRANTE D'ARIA h (m)
0	20÷30	4÷6	1.0÷1.6	36÷120	-
I	38.5	5.05	1.80÷2.20	250÷400	4.0
II	50÷55	6.60	2.50	400÷650	4.0÷5.0
III	67÷80	8.20	2.50	650÷1000	4.0÷5.0
IV	80÷85	9.50	2.50	1000÷1500	5.25 o 7.00
Va	95÷110	11.40	2.50÷2.80	1500÷3000	5.25 o 7.00 o 9.10
Vb	95÷110	11.40	2.50÷2.80	1500÷3000	5.25 o 7.00 o 9.10

La classe zero che compare in tab. 5.1.1 è destinata alle idrovie storiche che risultano difficilmente inquadrabili nell'ambito degli standard di riferimento. La quinta classe, poi, è divisa in due sottoclassi che si differenziano non per le caratteristiche dei natanti previsti, quanto piuttosto per la tipologia di formazione dei convogli.

Le dimensioni dei natanti che saranno utilizzati per il trasporto delle materie solide ad uso della centrale non sono state ancora stabilite in modo definitivo se non per quanto riguarda il pescaggio, fissato in 2.5 m, e il volume lordo di circa 4'000 m³, per una capacità di trasporto complessiva di circa 3'000 t. La scelta comunque ricadrà all'interno delle possibili soluzioni sintetizzate nella tab. 5.1.2.

tab. 5.1.2 - Dimensioni dei natanti per il trasporto delle materie solide: soluzioni esaminate

	Soluzione 1	Soluzione 2	Soluzione 3
Lunghezza L (m)	110	100	90
Larghezza b(m)	15	17	19
Immersione max (m)	2.5	2.5	2.5

È immediato constatare che le dimensioni previste, in particolare le larghezze, non rientrano nelle classi previste dalla attuale normativa. Si rende quindi necessario l'introduzione di idonei criteri di compatibilità che, come si è ricordato, sono stati nel caso specifico formulati sulla base delle considerazioni e dei suggerimenti contenuti nella relazione finale della già citata Commissione.

5.1.2 Criteri di verifica della navigabilità

In via preliminare per giudicare della navigabilità di una via d'acqua si può far riferimento ad un criterio geometrico basato sul confronto tra la sezione bagnata del corso d'acqua in esame e la minima sezione necessaria alla navigazione.

Dimensioni della sezione. I valori minimi della sezione trasversale del canale o del corso d'acqua

sono fissati in relazione ai problemi posti dalla navigazione in acque limitate. Questi fattori sono sia di natura idraulica, sia legati alla manovrabilità del natante.

I primi sono da ricollegarsi al sistema di onde prodotte dal natante in moto e dipendono, quindi, oltre che dalla forma, dalle dimensioni della sezione e dall'ingombro del natante, anche dalla velocità relativa del natante stesso, che deve essere regolata di conseguenza.

In particolare è in uso considerare come velocità massima la cosiddetta *velocità limite* (v_L), descritta dal diagramma di Schijf (fig. 5.1.1), superata la quale vi è un brusco incremento della resistenza all'avanzamento del natante e dell'intensità del moto ondosso generato. Tale velocità limite risulta essere funzione del cosiddetto *indice di navigabilità* n , che rappresenta il rapporto tra l'area della sezione bagnata del canale e l'area della sezione maestra immersa del natante a pieno carico. Pur potendo limitare la velocità in relazione al valore di n , la normativa suggerisce per l'indice di navigabilità valori che si mantengano superiori a $n=7$ e comunque mai inferiori a $n=5$.

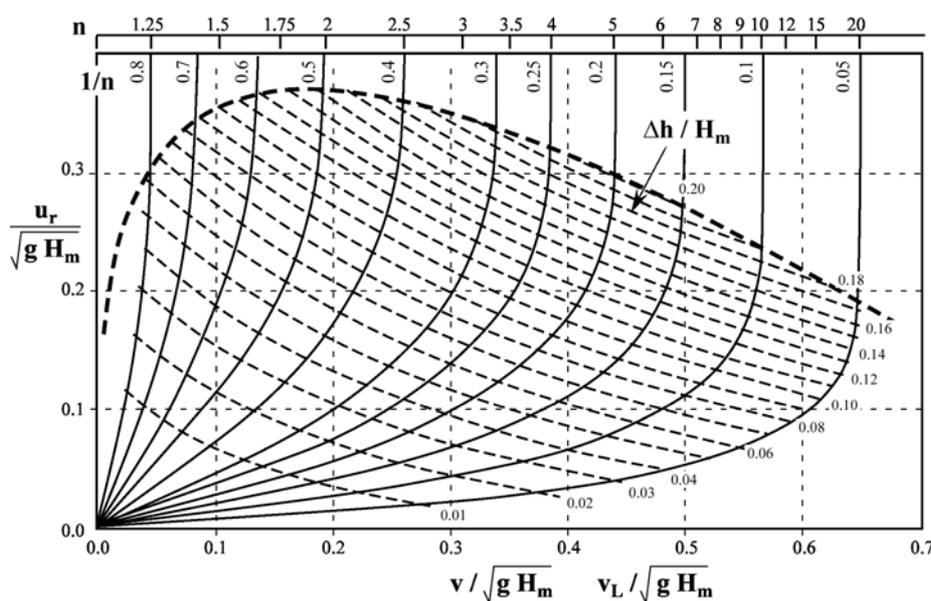


fig. 5.1.1 - Diagramma di Schijf (modificato con coefficiente di sicurezza 1.1) – Valori del rapporto tra la velocità limite (v_L) e la velocità critica $c=(gH_m)^{1/2}$ in funzione dell'indice di navigabilità (n) – Valori della velocità di ritorno (u_r) e dell'abbassamento del piano d'acqua (Δh) in funzione della velocità del natante (v) e dell'indice di navigabilità (n).

Un secondo aspetto di natura idraulica, legato alle dimensioni della sezione, riguarda la corrente di ritorno prodotta dal natante in moto, la quale, soprattutto in canali con sponde non protette, può determinare fenomeni di erosione delle sponde. Il valore della velocità di ritorno è deducibile dallo stesso diagramma di Schijf e va confrontata con la velocità critica di erosione dei materiali costituenti le sponde.

Forma della sezione: profondità e larghezza. Con riferimento al livello del corso d'acqua la minima profondità H della corrente in corrispondenza delle diverse sezioni dipende dall'immersione del battello a pieno carico incrementata da un franco, per il quale si suggerisce il valore $f=1.0$ m, anche se localmente si possono accettare valori più ridotti, soprattutto per il sistema in esame nel quale i fondali sono costituiti essenzialmente da materiale sabbioso o sabbioso-limoso.

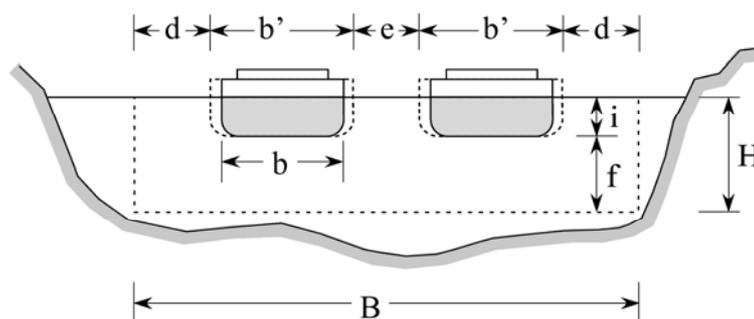


fig. 5.1.2 - Parametri geometrici caratteristici della sezione per la navigazione a due vie.

Per quanto riguarda la larghezza minima B di navigazione, nel caso di traffico a due vie (fig. 5.1.2), essa risulta pari a:

$$B = 2d + e + 2b' \quad (5.1.1)$$

Nella relazione precedente:

- b' è la larghezza apparente del natante, che coincide con l'effettiva larghezza b del natante nei tratti rettilinei ed è superiore a questa nei tratti in curva;
- d è il franco laterale, generalmente assunto pari alla larghezza b del natante, ma che può essere ridotto nel caso di sezioni di forma trapezia al valore $b/2$ per sponde con scarpa inferiore o uguale a 1:2;
- e è il franco tra due battelli che si incrociano o si sorpassano, assunto pari a circa $1/3$ della già citata larghezza del natante (fig. 5.1.3).

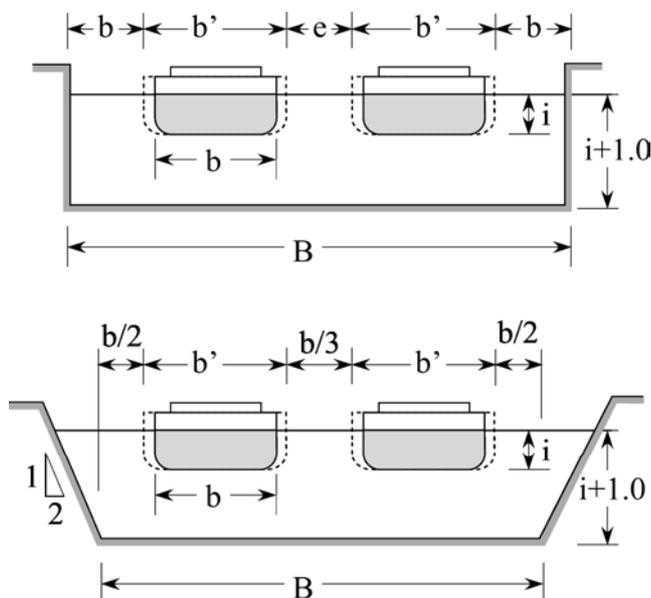


fig. 5.1.3 - Dimensioni geometriche caratteristiche della sezione per la navigazione a due vie.

Nei tratti in curva, in luogo della larghezza effettiva del natante, deve essere assunta una larghezza apparente, che dipende dalla deriva, il cui angolo a sua volta dipende dalla manovrabilità del mezzo,

dalla sua velocità, dalla velocità della corrente, dall'ampiezza e dal raggio medio R delle curve e dal verso di percorrenza (a favore o controcorrente).

Con riferimento a questo aspetto, la normativa semplifica il problema proponendo, per i tratti in curva, le limitazioni nel seguito sintetizzate:

- non sono richiesti allargamenti della sezione in curva ($b'=b$), quando il raggio di curvatura R è almeno 10 volte la lunghezza del natante;
- se il raggio di curvatura è inferiore, vanno previsti allargamenti ($b'=b+\Delta B$) da calcolarsi mediante la seguente relazione:

$$\Delta B = L^2 / 2R \quad (5.1.2)$$

essendo L la lunghezza del natante;

- il raggio di curvatura R non deve comunque essere mai inferiore a 4 volte la lunghezza del natante.

Interferenze. A tali controlli è ovviamente da associare la verifica che i natanti in navigazione a vuoto e con i livelli d'acqua massimi previsti per la navigazione possano superare gli eventuali sovrappassi della via d'acqua, costituiti da ponti, condotte e cavi aerei, con un franco adeguato.

La normativa, per la massima classe (V), prevede altezze libere rispetto al pelo dell'acqua di 5.25-8.00 m, nel caso di ponti, di 8.00 m, per le condotte aeree, e di 10 m, 18 m, e 21 m, per i cavi aerei rispettivamente a bassa tensione, ad alta tensione fino a 110 kV e ad alta tensione fino a 380 kV.

Questa regolamentazione considera navi fluvio-marittime porta containers, caricate con tre ordini di containers vuoti e quindi con una configurazione che, rapportata alla situazione qui esaminata, è sicuramente cautelativa.

Conche di navigazione. Le dimensioni di una conca di navigazione devono ovviamente essere coerenti con quelle dei natanti. In particolare, con riferimento alla classe Va, che più si avvicina alle caratteristiche dei natanti previsti per sostenere l'esercizio della centrale una volta terminata la sua riconversione a carbone, la normativa prevede i seguenti rapporti tra le dimensioni caratteristiche dei natanti e quelle della conca:

$$L/L_{conca} \approx 0.95$$

$$b/b_{conca} \approx 0.93$$

$$i/H_{conca} \approx 0.70$$

5.2 Verifica della compatibilità dei natanti previsti con le attuali caratteristiche geometriche e cinematiche del sistema

Le dimensioni dei natanti previsti e alcune delle caratteristiche geometriche necessarie alla verifica di compatibilità sulla base di quanto esposto nel paragrafo precedente sono riassunte nella tabella seguente (tab. 5.2.1).

Per quanto riguarda la larghezza utile della sezione, essendo la stessa di forma sostanzialmente trapezia con pendenza delle sponde mai superiore a 1:2, si assume un franco laterale $d=B/2$ come suggerito nel precedente paragrafo.

tab. 5.2.1 - Dimensioni dei natanti per il trasporto delle materie solide e caratteristiche minime delle vie d'acqua per le tre diverse soluzioni possibili

	Soluzione 1	Soluzione 2	Soluzione 3
Lunghezza L (m)	110	100	90
Larghezza b(m)	15	17	19
Immersione max (m)	2.5	2.5	2.5
Area sez. imm. a (m ²)	37.5	42.5	47.5
Larghezza B(*) (m)	50.0	58.0	65.0
Profondità H (m)	3.5	3.5	3.5
L _{conca} (m)	115	105	95
b _{conca} (m)	16	18	20
H _{conca} (m)	3.6	3.6	3.6

(*) Riferita ai tratti rettilinei

Relativamente alle caratteristiche idrauliche del sistema, sulla base anche dei risultati delle indagini illustrati nel paragrafo 4.7 della presente relazione, si sono valutate le larghezze minime in cunetta che si determinano nelle varie condizioni di funzionamento ed in particolare in quelle relative alle minime portate fluenti lungo il Po di Levante e il Basso corso del Po in situazione di bassa marea.

Nelle diverse condizioni esaminate nel già citato paragrafo 4.7, con portate fluenti tipiche degli stati di magra, degli stati normali e di quelli di piena ordinaria, le velocità della corrente risultano generalmente di modesta entità e non incidono apprezzabilmente sulla manovrabilità dei natanti, ragione per cui nell'analisi effettuata non si è tenuto conto di tale parametro.

Nelle verifiche si è considerato un tirante minimo rispetto al medio mare di 3.5 m, per garantire ai natanti in navigazione un franco sufficiente per far fronte agli effetti locali del moto ondoso generato dai natanti stessi e della riduzione dei livelli idrometrici durante le fasi di bassa marea, per la quale si è considerato un abbassamento del livello di 0.5m.

I risultati di tali verifiche, per le soluzioni 1 e 2 di tab. 5.2.1 sono nel seguito illustrati, considerando separatamente il Po di Levante, la Conca di Volta Grimana e il Basso corso del Po.

I risultati della verifica per la soluzione 3 di tab. 5.2.1 non sono stati invece riportati, in quanto, per essa sono numerosi i tratti che, secondo i criteri adottati, richiederebbero un adeguamento della larghezza minima in cunetta o una penalizzante regolazione del traffico.

Nelle verifiche, ovviamente, si è esaminata separatamente la percorribilità delle varie curve presenti lungo il tracciato, valutando per ciascuna di esse i raggi di curvatura in asse e la larghezza apparente da considerare secondo il criterio esposto al punto precedente.

5.2.1 Po di Levante

Verifica della forma della sezione: larghezza e profondità.

Utilizzando i rilievi batimetrici eseguiti dal C.O.V.N.I. si è determinata per tutta l'asta del Po di Levante da Volta Grimana fino allo sbocco nella laguna La Vallona, la larghezza della parte dell'alveo con quote di fondo inferiori a -3.50 m s.m.. I risultati di tale indagine sono riportati graficamente nella Tav. 5.1, in cui sono evidenziati con diversi colori i tratti caratterizzati da diverse larghezze in cunetta. Si osserva, in Tav. 5.1, che in prossimità dello sbocco del Po di Levante nella laguna La Vallona sono presenti due brevi tratti, per una lunghezza complessiva di circa 230 m caratterizzati da larghezze in cunetta inferiori a 50 m. Per tali tratti, quindi, non è possibile la navigazione a doppio senso e deve essere prevista un'opportuna regolazione del traffico. La

rimanente parte del corso del Po di Levante presenta larghezze superiori ai 50 m e risulta pertanto navigabile nei due sensi ai natanti previsti dalla soluzione 1. Più problematica risulta, invece, la navigabilità per i natanti previsti dalla soluzione 2, essendo numerosi i tratti con larghezza inferiore ai 58 m i quali, variamente dislocati lungo il percorso, coprono complessivamente un'estensione che sia avvicina ai 4 km.

Sono stati quindi verificati i tratti in curva. Le curve più accentuate, lungo il percorso, sono state numerate (C1-C16) e sono indicate nella Tav. 5.1. Le caratteristiche geometriche di queste curve sono riportate nella seguente tab. 5.2.2.

tab. 5.2.2 - Caratteristiche delle curve presenti lungo il Po di Levante

CURVA	R (m)	R/L		ΔB (m)		B minimo (m)		B sez. (m)
		Soluz. 1	Soluz. 2	Soluz. 1	Soluz. 2	Soluz. 1	Soluz. 2	
C1	732	6.7	7.3	8.3	6.8	58.3	64.8	70.0
C2	448	4.1	4.5	13.5	11.2	63.5	69.2	69.0
C3	1352	12.3	13.5	0	0	50.0	58.0	71.0
C4	444	4.0	4.4	13.6	11.3	63.6	69.3	65.0
C5	342	3.1	3.4	-	-	-	-	71.0
C6	252	2.3	2.5	-	-	-	-	81.0
C7	455	4.1	4.6	13.3	11.0	63.3	69.0	70.0
C8	447	4.1	4.5	13.5	11.2	63.5	69.2	70.0
C9	453	4.1	4.5	13.4	11.0	63.4	69.0	78.0
C10	921	8.4	9.2	6.6	5.4	56.6	63.4	60.0
C11	781	7.1	7.8	7.7	6.4	57.7	64.4	65.0
C12	1787	16.2	17.9	0	0	50.0	58	58.0
C13	1616	14.7	16.2	0	0	50.0	58.0	51.0
C14	851	7.7	8.5	7.1	5.9	57.1	63.9	57.0
C15	594	5.4	5.9	10.2	8.4	60.2	66.4	62.0
C16	885	8.0	8.9	6.8	5.6	56.8	63.6	51.0

Nella tab. 5.2.2 sono riportati anche il rapporto tra il raggio di curvatura e la lunghezza del natante (R/L), che, come si è ricordato, non dovrebbe scendere al di sotto del valore 4, l'incremento di larghezza ΔB previsto quando il rapporto R/L risulta inferiore a 10, la larghezza corretta del rettangolo di navigazione e la larghezza in cunetta minima lungo la curva.

Le due curve C5 e C6, poste in successione, non verificano il criterio citato, che generalmente si adotta nella fase di progetto di una via navigabile, che limita il raggio di curvatura a valori superiori a 4 volte la lunghezza del natante. Per le curve in questione non è peraltro possibile individuare un tracciato che, mantenendosi all'interno della sezione navigabile, consenta una riduzione del raggio di curvatura. E' pertanto opportuno, nel tratto interessato dalla doppia curva, limitare il traffico ad una via, prevedendo un transito alternato dei natanti, regolato da opportune segnalazioni semaforiche.

Per le altre curve non si riscontrano problemi quando il natante ha le caratteristiche previste dalla soluzione 1, fatta eccezione per la curva C16, che è posizionata peraltro in prossimità dello sbocco del Po di Levante nella laguna La Vallona in un tratto in cui, già per la presenza di larghezze in cunetta inferiori a 50 m, non è possibile la navigazione a doppio senso e deve essere egualmente prevista un'opportuna regolazione del traffico.

Leggermente più critica è la situazione per il natante contemplato dalla soluzione 2 in corrispondenza delle curve C4, C10, C13, C14, C15 ed ovviamente C16, laddove la larghezza risulta insufficiente per il transito a due vie. Si tratta, però di condizioni non particolarmente gravose,

almeno per le curve C4, C10, C13, C14 e C15, come risulta dal confronto tra la larghezza minima necessaria per affrontare in sicurezza la curva e la larghezza effettiva della sezione in cunetta.

Verifica delle dimensioni della sezione.

Con riferimento alle verifiche relative alle dimensioni della sezione, esposte nel paragrafo precedente, sono state considerate alcune sezioni caratteristiche posizionate in tratti della via navigabile che, sulla base dei dati geometrici disponibili, risultano avere larghezze in cunetta più ridotte. Le caratteristiche di tali sezioni, numerate da S1 a S5 nella planimetria di Tav. 5.1, sono riportate in tab. 5.2.3.

tab. 5.2.3 - Valutazione dell'indice di navigabilità e della velocità limite per le soluzioni 1 e 2 di tab. 5.2.1

SEZIONE		1	2	3	4	5
Area (m ²)		328	392	340	435	306
Larghezza alla superficie (m)		53.2	73.8	72.1	156.3	67.7
Profondità H _m (m)		6.2	5.3	4.7	2.8	4.5
Indice di navigabilità n	Soluz. 1	8.7	10.4	9.1	11.6	8.2
	Soluz. 2	7.7	9.2	8.0	10.2	7.2
Velocità critica (m/s)		7.8	7.2	6.8	5.2	6.6
Velocità limite (km/h)	Soluz. 1	15.1	14.6	13.3	10.8	12.5
	Soluz. 2	14.6	14.1	12.8	10.5	12.1

Nella stessa tab. 5.2.3 sono inoltre riportati l'indice di navigabilità, la velocità critica e la velocità limite calcolati per le due diverse soluzioni prospettate in tab. 5.2.1.

Si osserva che, per entrambe le soluzioni, l'indice di navigabilità si mantiene ovunque superiore al valore $n=7$ suggerito dalla normativa. Per quanto riguarda le velocità limite, non si osservano sostanziali differenze tra i valori ottenuti per le due diverse soluzioni, mentre risultano sensibilmente variabili lungo il percorso e comprese tra i 10 e i 15 km/h. Nel complesso, quindi, considerato che la velocità prevista per i natanti fluvio-marittimi in esame è dell'ordine dei 10 km/h, la verifica delle dimensioni delle sezioni per il Po di Levante è senz'altro superata per entrambe le soluzioni qui esaminate.

Verifica delle interferenze.

Nel caso in esame, il carico delle chiatte determina altezze largamente inferiori a quelle prevedibili per tre ordini di containers. Essendo il sistema "Fissero-Tartaro-Canalbianco-Po di Levante" omologato per natanti della categoria Va, non si rende, conseguentemente, necessaria alcuna verifica relativamente ai problemi di interferenza con i sovrappassi della via d'acqua.

Considerazioni sulle verifiche eseguite.

Con riferimento ai problemi della navigabilità lungo il Po di Levante, riassumendo le diverse verifiche

effettuate e con riferimento alle indicazioni riportate nella Tav. 5.1, per un natante che risalga la via d'acqua si presentano le seguenti condizioni.

A partire dalla laguna La Vallona si imbecca il Po di Levante percorrendo un primo tratto, fino alla curva C15, caratterizzato da larghezze insufficienti alla navigazione a due vie. Per questo tratto quindi è da prevedere una regolazione semaforizzata del traffico.

Successivamente, fino alla curva C11, la via navigabile presenta una sezione sufficiente al traffico a doppio senso, limitatamente ai natanti previsti dalla soluzione 1. Le curve che si incontrano (C11-C14) sono relativamente strette e richiedono solamente attenzione in occasione di incrocio tra i natanti o di sorpasso. La velocità limite consentita, soprattutto nel tratto iniziale in corrispondenza della sezione S4 è di poco superiore ai 10 km/h, mentre discreto risulta essere l'indice di navigabilità, ad indicare che il moto ondoso prodotto dovrebbe risultare abbastanza contenuto. In questo tratto non è sostanzialmente possibile la navigazione a due vie per i natanti previsti dalla soluzione 2, la quale, se scelta, imporrebbe il prolungamento del tratto regolato dallo sbocco nella laguna La Vallona fino alla curva C11.

Nel tratto successivo, compreso tra le curve C11 e C6, la via navigabile è caratterizzata da larghezze elevate che consentono un'agevole navigazione anche nel caso di incroci. Le curve presenti nel tratto (C7-C10) sono in media caratterizzate da raggi di curvatura poco ampi. La sensibile larghezza delle sezioni consente tuttavia il loro superamento senza grandi difficoltà, anche per i natanti previsti dalla soluzione 2. Discreto risulta essere anche l'indice di navigabilità per entrambe le soluzioni indagate. Le velocità limite che possono essere raggiunte dai natanti sono in genere superiori ai 15 km/h.

Procedendo ancora verso monte, si incontrano le curve C6 e C5, consecutive, la prima verso sud, la seconda verso est. Entrambe queste curve sono caratterizzate da un raggio di curvatura molto piccolo, sensibilmente inferiore a quattro volte la lunghezza del natante. Pur essendo la larghezza della sezione abbastanza ampia, per entrambe le soluzioni prospettate è necessario disciplinare il traffico mediante opportuna regolazione semaforica, consentendo il solo percorso ad una via.

Superata la curva C5 e fino alla successiva curva C6, per una distanza di circa 1.5 km, la via navigabile presenta nuovamente larghezze modeste appena sufficienti al transito dei natanti previsti nella prima soluzione. L'indice di navigabilità risulta a sua volta appena sufficiente, mentre, grazie alla relativamente elevata profondità delle sezioni, la velocità limite si mantiene intorno ai 15 km/h. Con riferimento ai natanti previsti dalla soluzione 2, quindi, anche per questo tratto dovrebbe essere prevista una regolazione semaforica per controllare gli incroci tra natanti. Tale regolazione dovrebbe essere estesa verso la Conca di Volta Grimana fino al completo sviluppo della curva C4 che, per i natanti della soluzione 2, risulta critica.

Il tratto finale, compreso tra la curva C4 e conca di Volta Grimana, è caratterizzato da sezioni sufficientemente larghe e da curve (C1-C3) graduali ed ampie, tali da consentire un'agevole navigazione anche per i natanti della soluzione 2.

Le considerazioni esposte sono sintetizzate nelle due planimetrie di fig. 5.2.1 relative, rispettivamente, alla prima e alla seconda soluzione indicata per i natanti.

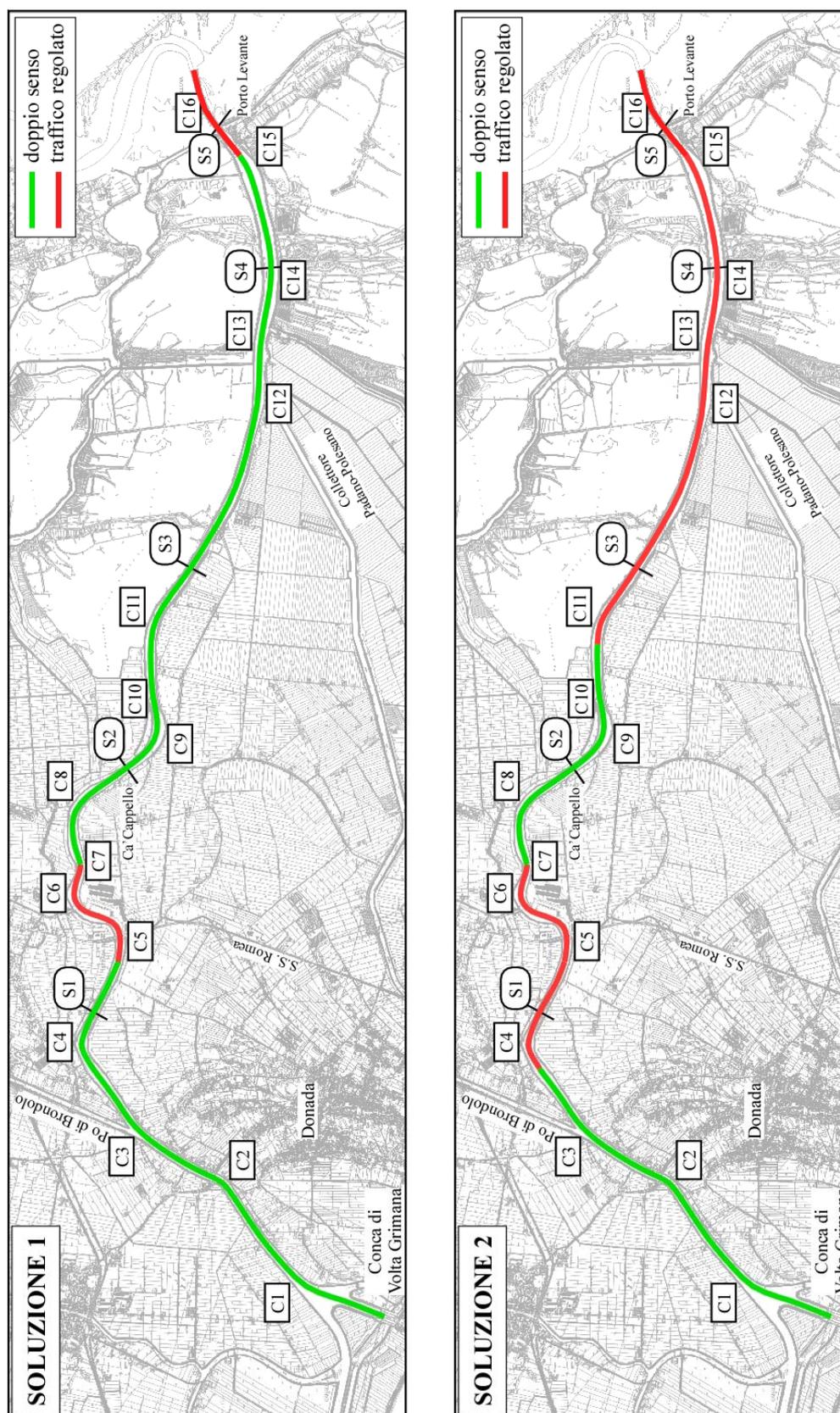


fig. 5.2.1 - Sintesi grafica delle verifiche condotte sulla navigabilità del Po di Levante dallo sbocco in laguna La Vallona a Volta Grimana.

5.2.2 Conca di Volta Grimana

La bi-conca di Volta Grimana è omologata per natanti della categoria Va. La larghezza utile del manufatto è di 24 m, la lunghezza utile complessiva agli effetti della navigabilità è di 224.5 m, divisa tra i due bacini verso il Po di Venezia (112.0m) e verso il Po di Levante (82.0m). Il fondo della conca è posto a -4.0 m s.m..

In condizioni di piena pronunciata nel Po di Venezia, vale a dire per quote d'acqua misurate in corrispondenza della conca stessa superiori od uguali a circa 4.40 m s.m., la conca rimane chiusa, non essendo possibile effettuare le manovre di apertura e chiusura delle porte che regolano il traffico attraverso il manufatto. E' questa, di fatto, l'unica limitazione all'esercizio della conca che, tuttavia, non ha un'influenza rilevante sul funzionamento del sistema. Infatti, il livello di 4.4 m s.m. viene raggiunto quando lungo il Po transitano portate dell'ordine di 6'000m³/s, caratterizzate da un tempo di ritorno di circa 3 anni. Durante questi eventi di piena, inoltre, l'esercizio della conca viene interrotto per soli due-tre giorni.

Per quanto riguarda i tempi necessari ad effettuare la concata, questi dipendono, ovviamente, dal dislivello che è necessario superare e varia, in generale, tra i 20 e i 40minuti.

Le caratteristiche geometriche della conca sono tali da consentire sia il passaggio dei natanti in esame, sia il passaggio contemporaneo di due natanti allineati per entrambe le soluzioni, 1 e 2 indagate.

5.2.3 Basso corso del Po

Verifica della forma della sezione: larghezza e profondità.

Utilizzando i rilievi delle sezioni eseguiti negli anni 1998-1999 dal Magistrato per il Po di Parma e messi a disposizione dall'A.I.PO si è determinata per l'asta del Po da Volta Grimana fino alla centrale di Porto Tolle, la larghezza della parte dell'alveo con quote di fondo inferiori a -3.50 m s.m..

I risultati di tale indagine sono sintetizzati nella Tav. 5.2, in cui sono evidenziati con differenti colori i tratti caratterizzati da diverse larghezze in cunetta. Si osserva, secondo la scala di colori adottata, che la larghezza navigabile del fiume è ovunque superiore ai 70 m ed anzi non scende mai al di sotto dei 100 m in tutto il percorso considerato, fatta eccezione per un breve tratto posto a valle del ponte della Strada Romea. In corrispondenza della sezione S79 la profondità media dell'alveo è di circa 2 m, con valori massimi che arrivano a circa 4 m, su di una larghezza peraltro modesta, pari a circa 10 m, nella parte sinistra dell'alveo. Il tutto è ben evidenziato in fig. 5.2.2, in cui sono riportate la sezione S79 e le sezioni poste immediatamente a monte (S78A) ed a valle (S79A), la cui posizione planimetrica è indicata nella già citata Tav. 5.2. Nella stessa fig. 5.2.2 sono anche riportate le quote idrometriche calcolate con il modello idrodinamico considerando alla foce del Po un livello di marea di -0.50 m s.m. ed a monte, nella sezione di Corbola, una portata fluente tipica di condizioni idrologiche di magra pari a 500 m³/s.

Lungo il tratto del fiume considerato, della lunghezza di circa 500 m, si dovrà provvedere periodicamente a rilievi batimetrici di controllo dei fondali e ad interventi di dragaggio, per garantire i tiranti d'acqua necessari alla navigazione dei natanti da e per la centrale di Porto Tolle su di una larghezza che consenta almeno il passaggio di una chiatta a senso alternato. È opportuno che i sedimenti derivanti dal dragaggio non siano asportati ma siano opportunamente disposti al lato del canale di magra, in modo che la corrente durante i regimi di portata più sostenuti li possa rimaneggiare trasportandoli verso valle e non sottraendoli al bilancio complessivo del fiume. Così operando la periodica riapertura del canale di magra non è in alcun modo da considerare come un provvedimento negativo per il buon regime del corso d'acqua.

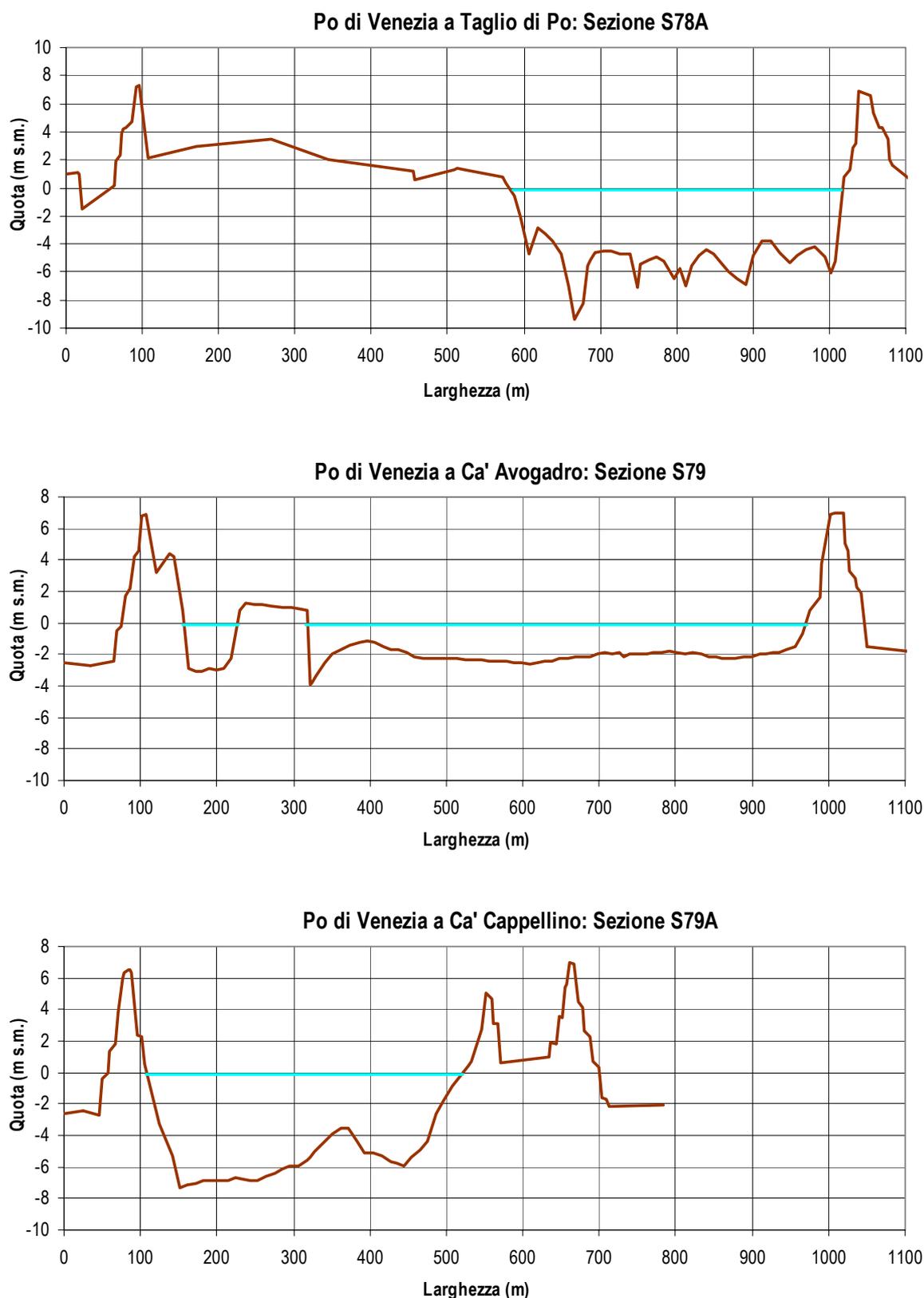


fig. 5.2.2 - Sezioni del Po di Venezia a valle del ponte lungo la strada Romea con i livelli idrometrici calcolati con un livello di marea alla foce di -0.50 m s.m. e una portata fluente di 500 m³/s.

Per la rimanente parte del Basso corso del Po, almeno fino alla centrale di Porto Tolle, l'alveo presenta, come si è detto, larghezze navigabili in cunetta superiori ai 100 m. Esso, pertanto, è percorribile nei due sensi dai natanti previsti sia dalla soluzione 1, sia dalla soluzione 2.

Per quanto riguarda i tratti in curva, le curve più accentuate lungo il percorso sono state numerate (C17-C22) e riportate nella Tav. 5.2. Le caratteristiche geometriche di tali curve sono sintetizzate nella seguente tab. 5.2.4, assieme al rapporto tra il raggio di curvatura e la lunghezza del natante (R/L), all'incremento di larghezza ΔB previsto quando il rapporto R/L risulta inferiore a 10, la larghezza corretta del rettangolo di navigazione e la larghezza in cunetta minima lungo la curva.

tab. 5.2.4 - Caratteristiche delle curve presenti lungo il Po di Venezia e il Po di Pila

CURVA	R (m)	R/L		ΔB (m)		B minimo (m)		B sez. (m)
		Soluz. 1	Soluz. 2	Soluz. 1	Soluz. 2	Soluz. 1	Soluz. 2	
C17	670	6.1	6.7	9.0	7.5	59.0	65.5	>200.0
C18	670	6.1	6.7	9.0	7.5	59.0	65.5	10.0
C19	3615	32.9	36.2	0	0	50.0	58.0	122.0
C20	2275	20.7	22.8	0	0	50.0	58.0	177.0
C21	1100	10	11.0	0	0	50.0	58.0	118.0
C22	980	8.9	9.8	6.2	5.1	56.2	63.1	107.0

Considerate le notevoli larghezze dell'alveo navigabile nel tratto del fiume compreso tra Volta Grimana e la centrale di Porto Tolle, non si riscontrano problemi per i natanti con le caratteristiche previste sia dalla soluzione 1, sia dalla soluzione 2, fatta eccezione per la curva C18, che si sviluppa nel già citato tratto di larghezza insufficiente per la navigazione che si colloca a cavallo della sezione S79 (Tav. 5.2).

Va da sé che gli interventi di dragaggio necessari per garantire la navigabilità anche in questa zona del fiume, dovranno essere realizzati su di una larghezza e lunghezza tali da consentire ai battelli sia di oltrepassare le zone a basso fondale, sia di manovrare per superare la curva in sicurezza.

Verifica delle dimensioni della sezione.

Fatta eccezione per il più volte citato tratto posto a cavallo della sezione S79, le sezioni del fiume presentano aree liquide e profondità che non comportano problemi né per quanto riguarda l'indice di navigabilità, né per quanto attiene alla velocità limite per entrambe le soluzioni esaminate.

Per le sezioni S78A, S79, S79A, posizionate a cavallo del tratto in cui l'alveo del fiume si presenta con fondali medi pari a circa -2.0 m s.m. (vedi Tav. 5.2), in tab. 5.2.5 sono riportate alcune caratteristiche geometriche assieme all'indice di navigabilità, alla velocità critica e alla velocità limite calcolate per le due diverse soluzioni prospettate in tab. 5.2.1.

Per entrambe le soluzioni considerate, l'indice di navigabilità è sempre ben superiore al valore $n=7$ suggerito dalla normativa. Per quanto riguarda la valutazione delle velocità limite, invece, i valori dell'indice di navigabilità sono superiori a quello di fondo scala del diagramma di Schijf (fig. 5.1.1), pari a circa 20. Cautelativamente si è adottato per il rapporto tra la velocità limite e la velocità critica un valore di 0.7, pari a quello di fondo scala del diagramma citato. Sulla base dei valori della velocità limite così dedotti, compresi tra i 10 e i 18 km/h, considerato che la velocità prevista per i natanti fluvio-marittimi in esame è dell'ordine dei 10 km/h, le dimensioni delle sezioni del Basso corso del Po per entrambe le soluzioni proposte sono ampiamente sufficienti, fatte salve le osservazioni formulate per la sezione S79, situata circa 4 km a valle di Volta Grimana (Tav. 5.2).

tab. 5.2.5 - Valutazione dell'indice di navigabilità e della velocità limite per le soluzioni 1 e 2 di tab. 5.2.1 per alcune sezioni lungo il Basso corso del Po

SEZIONE		S79A	S79	S78A
Area (m ²)		2120	1340	2160
Larghezza alla superficie (m)		415	655	430
Profondità H _m (m)		5.1	2.0	5.0
Indice di navigabilità n	Soluz. 1	56.5	35.7	57.6
	Soluz. 2	49.9	31.5	50.8
Velocità critica (m/s)		7.1	4.4	7.0
Velocità limite (km/h)	Soluz. 1	17.9 *	11.1 *	17.6 *
	Soluz. 2	17.9 *	11.1 *	17.6 *

(*) valori calcolati per un rapporto tra la velocità limite e la velocità critica pari al valore di fondo della scala del digramma di Schijf, pari a 0.7

Verifica delle interferenze.

Il Basso corso del Po tra Volta Grimana e la centrale di Porto Tolle è superato solamente da due ponti, quello della Strada Romea all'altezza di Taglio di Po e quello di recente costruzione all'altezza del centro abitato di Porto Tolle. Entrambi garantiscono però la presenza di luci libere ampiamente compatibili con le necessità della navigazione, per cui non sussistono per questi aspetti problemi di sorta.

5.2.4 Suggestimenti operativi

I risultati delle analisi condotte lungo il Po di Levante, lungo il Basso corso del Po e all'interno della laguna La Vallona mettono in evidenza la necessità di adottare alcuni provvedimenti al fine di garantire la percorribilità delle vie d'acqua ai natanti destinati a sostenere l'esercizio della centrale.

L'ingresso dalla Vallona al Po di Levante è un punto critico che può però essere superato mediante una regolazione del traffico ad una via e opportune segnalazioni.

Se si adotta per le chiatte la Soluzione 1 (larghezza 15 m), il tratto interessato ha una lunghezza di circa 1 km. Esso si estende in misura apprezzabile verso monte se si fa riferimento ai natanti previsti per la Soluzione 2. In tal caso la regolazione del traffico ad una via si estende per circa 6 km., arrivando fino quasi alla località Ca' Cappello.

Una regolazione del traffico ad una via è opportuna anche nel tratto di idrovia posto a cavallo dell'attraversamento della Strada Romea, in questo caso per i ridotti raggi di curvatura di due curve che si presentano in rapida successione. La lunghezza del tratto a navigazione controllata è di circa 1 km per la Soluzione 1 e di circa 2 km per la Soluzione 2.

Da regolare opportunamente con adeguata segnaletica è anche l'incrocio con il canale di Valle, lungo il quale è attualmente diretto, prevalentemente, il traffico commerciale.

Per quanto riguarda il Basso corso del Po, la navigabilità è possibile solo se si provvede al

monitoraggio sistematico dei fondali del tratto d'alveo posto a cavallo della sezione S79 e al mantenimento con periodiche operazioni di dragaggio di un canale di magra avente fondali e larghezza sufficienti per garantire la navigazione.

Una regolazione del traffico ad una via è, infine, opportuna anche in corrispondenza delle due grandi curve che presenta il canale lagunare allacciante la bocca a mare della Vallona con lo sbocco del Po di Levante. In questo tratto eventuali incroci sono da prevedere non tanto con trasporti commerciali, quanto piuttosto con battelli turistici o da diporto, i quali, secondo la normativa vigente, hanno l'obbligo di dare la precedenza ai natanti ad uso commerciale.

Con riferimento agli aspetti operativi della navigazione e ai suggerimenti sopra richiamati, non è di poco conto segnalare, da ultimo, che la loro messa a punto per regolare al meglio il traffico nei tratti sensibili individuati è favorita dalla gradualità degli interventi di riconversione della centrale di Porto Tolle prevista dal progetto.

Poiché la riconversione non interessa fin dall'inizio tutti i gruppi della centrale, ma avverrà per fasi successive, l'esperienza maturata nelle fasi iniziali dell'esercizio, con un numero più ridotto di chiatte in navigazione durante la giornata, potrà fornire utili indicazioni per la migliore regolazione del traffico nei brevi tratti per i quali si è segnalata l'opportunità di un percorso ad una via.

5.3 Periodi di sospensione del traffico

Le indagini sviluppate nell'ambito dello studio evidenziano le possibili cause di sospensione del traffico, che sono sostanzialmente riconducibili, da una parte alla presenza di un moto ondoso eccessivo in corrispondenza della nave "storage" e lungo la rotta di accesso alla bocca della laguna La Vallona, dall'altra a stati idrometrici eccessivamente ridotti e non in grado di garantire fondali sufficienti per la navigazione delle chiatte.

Per quanto riguarda il tratto in mare, lo studio del clima ondoso in corrispondenza della nave "storage" e della bocca della laguna permette di individuare la durata annuale delle massime altezze d'onda eccedenti un assegnato valore per tutto il settore di traversia interessato.

Assumendo per la navigazione delle chiatte come altezza massima ammissibile dell'onda il valore di 1 m, la curva di durata del moto ondoso in corrispondenza della nave "storage" indica un superamento di tale limite per 45 giorni all'anno.

Penalizzazioni minori si hanno all'entrata in laguna dove, per gli effetti della propagazione, il limite di 1 m per le massime altezze dell'onda è superato in appena 20 giorni all'anno.

Per quanto riguarda la navigabilità lungo tutta la direttrice Porto Levante – Po di Levante – Conca di Volta Grimana - Basso corso del Po, in condizioni di magra per le portate fluenti, i risultati ottenuti evidenziano che le quote idrometriche sono controllate dai livelli di marea. Un limite alla navigazione per tiranti d'acqua insufficienti è perciò eventualmente posto dai più bassi livelli di marea. Di tale circostanza si deve tenere conto solo quando i livelli di marea scendono al di sotto di -0.50 m s.m.. Ciò premesso, le analisi condotte hanno evidenziato che il numero di cavi di marea inferiori a tale valore è mediamente di 120 casi all'anno. Attribuendo alla persistenza dei livelli al di sotto di -0.50 m s.m. una durata media di circa 3 ore per ogni evento si determinerebbe per tale causa l'impossibilità di navigare durante circa 15 giorni all'anno. Si tratta di un periodo di tempo che non necessariamente si somma al periodo durante il quale non è possibile navigare per altezza d'onda eccessiva (1 m presso la nave storage). Generalmente, infatti, le basse maree più spinte nell'Alto Adriatico si concentrano soprattutto nei mesi di Gennaio e Febbraio, diversamente dalle mareggiate che interessano tutti i mesi invernali e primaverili.

Sempre con riferimento ai limiti introdotti dai più bassi livelli di marea è anche da ricordare che,

programmando opportunamente la navigazione sulla base delle previsioni di marea, che sono affidabili con anticipi di circa 24 ore, i suddetti vincoli possono di fatto essere rimossi e non considerati.

Questa analisi è valida solo se si garantisce nel tratto di Po posto poco a valle di Volta Grimana, a cavallo della sezione S79 (vedi Tav. 5.2), il mantenimento del fondale di navigazione mediante periodiche operazioni di dragaggio su di una lunghezza di circa 300-400 m. In caso contrario la navigazione delle chiatte da e per la centrale non sarebbe possibile, se non con portate fluenti superiori ai 1500 m³/s, valore che non è superato a valle di Volta Grimana durante circa il 50% del tempo. L'ipotesi esaminata non può, pertanto, prescindere dagli interventi suggeriti per questo tratto critico del fiume ai fini della navigabilità.

6 OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Alla luce delle analisi condotte, tra le direttrici esaminate che consentono la movimentazione via acqua e lo stoccaggio dei materiali solidi necessari al funzionamento della centrale Enel di Porto Tolle o prodotti dal suo esercizio, le soluzioni che sembrano di più agevole realizzazione sono quelle che consentono di accedere all'impianto:

- attraverso la laguna di Barbamarco;
- lungo il percorso Laguna La Vallona – Po di Levante – conca di Volta Grimana – Basso corso del Po.

La prima soluzione indicata ha l'indubbio vantaggio di permettere un collegamento in tempi brevi tra la centrale e la nave "storage" ancorata al largo, destinata ad accogliere sia le materie prime necessarie al funzionamento dell'impianto, sia i prodotti solidi della combustione. Per garantire la navigabilità delle vie d'acqua interessate sarebbe, tuttavia, necessario attuare alcuni interventi che richiedono, tra l'altro, di realizzare una nuova opera di presidio del collegamento esistente tra la Laguna di Barbamarco e la Busa di Tramontana e un sia pur modesto prolungamento verso mare dei moli foranei, che già attualmente presidiano la bocca sud della laguna stessa.

Non volendo incidere in alcun modo sull'ambiente con nuove opere, allo stato attuale si ritiene preferibile, come direttrice di collegamento tra la nave "storage" e la centrale, la seconda soluzione, che consente di raggiungere l'impianto termoelettrico seguendo un tracciato più lungo, ma che ha l'indubbio vantaggio di permettere l'esercizio della centrale senza eseguire alcuna nuova opera per garantire alle chiatte fluvio-marittime la navigabilità delle vie d'acqua percorse.

L'analisi dettagliata di tale soluzione per alcuni rilevanti aspetti idraulici, marittimi e della pianificazione e sviluppo del trasporto acqueo, porta a formulare le seguenti osservazioni:

- Il traffico necessario per sostenere l'esercizio a regime della centrale, di circa 6-7 chiatte fluvio-marittime al giorno, è pienamente compatibile con l'attuale trasporto fluviale lungo le vie d'acqua interessate dalla soluzione. Esso è anche ampiamente compatibile con le previsioni di sviluppo del trasporto acqueo lungo le direttrici Po di Levante – Conca di Volta Grimana, Conca di Volta Grimana – Canale di Valle – Porto di Chioggia, Conca di Volta Grimana – Canalbianco – Tartaro – Fissero. Interferenze di scarso rilievo sono ipotizzabili tra il traffico delle chiatte da e per la centrale e il traffico turistico, che interessa prevalentemente i fine settimana ed è assoggettato al preciso vincolo regolamentare di dare in ogni caso la precedenza alle manovre delle imbarcazioni ad uso commerciale.
- Lo studio del moto ondoso in corrispondenza del paraggio di mare in cui staziona la nave "storage" indica il superamento delle altezze d'onda massime compatibili con la navigazione delle chiatte fluvio-marittime (1 m di altezza) per un periodo di tempo limitato (45 giorni all'anno), compatibile con le necessità dell'esercizio della centrale, che prevede un'agibilità della direttrice navigabile per almeno 300 giorni all'anno.
- Nel trasferimento sottocosta del moto ondoso non si riscontrano effetti di amplificazione delle altezze d'onda. Il limite sopra indicato, pertanto, vale anche per l'agibilità della bocca di Porto Levante, e del canale lagunare che la collega al Po di Levante, che possono essere superati dalle chiatte in navigazione senza apprezzabili scostamenti dalla rotta prestabilita, anche nelle situazioni in cui il moto ondoso si sovrappone con i suoi effetti alle correnti di marea di maggiore intensità.

- Il trasporto solido sostenuto dalle correnti costiere durante le mareggiate più intense non comporta processi di interrimento della bocca di Porto Levante tali da pregiudicare la navigazione. Le correnti di marea attraverso la bocca sono naturalmente in grado di mantenere fondali superiori a circa 4 m, sufficienti per la navigazione delle chiatte da e per la centrale. Tantomeno questi fenomeni sono da temere se si considera che i fondali della bocca e del canale lagunare, che ad essa si collega, sono mantenuti a 5 m con periodiche operazioni di dragaggio da parte del COVNI.
- Gli stati idrometrici minimi e le velocità massime che si stabiliscono lungo il Po di Levante e il Basso corso del Po a valle di Volta Grimana garantiscono, in generale, la navigabilità a due vie lungo quasi tutta la direttrice di collegamento prescelta tra la nave "storage" e la centrale. Adottando per le chiatte una larghezza di 15 m, in attraversamento alla laguna La Vallona e lungo il Po di Levante si segnalano solo alcuni tratti, peraltro di lunghezza limitata, lungo i quali è opportuno predisporre adeguati controlli segnaletici e navigare ad una sola via. Alla migliore messa a punto di tali controlli potrà giovare la gradualità prevista per la riconversione dei quattro gruppi termici della centrale che, nei tempi iniziali, richiederà un traffico più ridotto, con un minor numero di chiatte in navigazione a servizio dell'impianto.
- In un tratto del corso del Po subito a valle della Conca di Volta Grimana, per garantire la navigazione delle chiatte è necessario prevedere periodiche operazioni di dragaggio su di una lunghezza di alcune centinaia di m, allargando la naturale configurazione delle sezioni. Si tratta, tuttavia, di un intervento modesto, eseguibile con criteri compatibili con la tutela dell'ambiente fluviale e senza sostanzialmente alterare il regime del trasporto solido lungo il corso d'acqua. A tale fine è sufficiente che i materiali scavati non vengano asportati, ma siano ridepositati lateralmente al canale di magra in opportune piazze di accumulo, per essere poi rimaneggiati dalle maggiori portate fluenti e trasferiti verso valle.

Emerge in definitiva dal complesso delle analisi condotte nello studio e dalle considerazioni qui sinteticamente riassunte, l'idoneità della soluzione proposta per collegare via acqua la centrale di Porto Tolle alla nave "storage" destinata a sostenerne la riconversione a carbone.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] D'Alpaos, L. and A. Defina. "Modellazione matematica del comportamento idrodinamico di zone a barena solcate da una rete di canali minori". Estratto da *Rapporti e Studi, Ist. Veneto di Scienze, Lettere ed Arti*, 1995.
- [2] Defina, A., "Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas", *Water Resources Research*, vol.36, 11, 3251-3264, 2000.
- [3] Defina, A., "Numerical experiments on bar growth", *Water Resources Research*, vol.39, 4, 1092, 2003.
- [4] ENEL-CRIS Servizio Idrologico di Mestre. "Programma di ricerca CEE MAST II Caratteristiche fisiche ed idrografiche del Delta del Po – Dati di input per l'applicazione del codice di calcolo tridimensionale TELEMAC". Ing G. Grego, 1993.
- [5] Regione Veneto – Direzione Difesa del Suolo. "Consulenza e coordinamento delle attività di monitoraggio fisico e ambientale nell'ambito dei lavori di armamento della Foce del Po di Levante, realizzazione di campagne di misura di parametri idrodinamici con elaborazione di modello matematico". Esecuzione: Ipros Ingegneria Ambientale, 2002.
- [6] Regione Veneto – Dipartimento Viabilità e Trasporti. "Progetto esecutivo di armamento della Foce del Po di Levante". Ipros s.r.l., Prof. G. Matteotti, prof. L. D'Alpaos, prof. C. Monti, 1992.
- [7] Consorzio di Bonifica Delta Po Adige. "Campagna di misure correntometriche nel sistema lagunare: Laguna di Caleri – Laguna di Vallona". Esecuzione: Ipros Ingegneria Ambientale, 1998.
- [8] Regione del Veneto – Autorità di Bacino del fiume Fissero Tartaro Canalbianco.. "Progetto PAI Piano di Assetto Idrogeologico – Relazione Norme di attuazione". 12 Aprile 2002.
- [9] Consorzio di Bonifica Delta Po Adige. "Messa a punto di un modello idrodinamico e di un modello ecologico nella laguna di Barbamarco". Esecuzione: Ipros Ingegneria Ambientale, Centre for Water Research University of W. Australia. 2004.
- [10] Ruol P.: "Analyses on liquid and solid discharges of the Po river in the last century" Workshop: Impact of Climatic Change on Northwestern Mediterranean Deltas. Venezia, 1996.
- [11] Ruol P., Tondello M.: "Waves and tides characteristics in the Northern Adriatic Sea, with reference to the Po delta area". Workshop: Impact of Climatic Change on Northwestern Mediterranean Deltas. Venezia, 1996.
- [12] PIANC-IAPH Working Group II-30, APPROACH CHANNELS A guide for Design.

- [13] *Abkowitz, M.A., Lectures on ship hydrodynamics, steering and manoeuvrability, Hydro- and Aerodynamics Laboratory, Rep. No. HY-5, 1962. Copenhagen, Denmark.*
- [14] *SURSIM, Computer Program for the calculation hydrodynamic reaction forces, MARIN.*
- [15] *Janssen, P.A.E.M.. "Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting", J. Phys. Oceanogr., 21, 1631-1642. 1991.*
- [16] *Janssen, P.A.E.M.. "Weather and Wave Prediction over the Oceans", ECMWF Newsletter, 67, pp. 3-15. 1994.*
- [17] *Krogstad, H.E. and Barstow, S.F. "Satellite Wave Measurements in Coastal Engineering Applications". To be published in Coastal Engineering. 1999.*
- [18] *Mork, G. and S. Barstow. "Comparison of WAM estimates of Hs with TOPEX/POSEIDON altimeter data in the Mediterranean Sea; a comparison of low and high resolution wind models". OCN R-98019, 10 pp. 1998a.*
- [19] *Mork, G. and S. Barstow. "Comparison of WAM estimates of Hs with Topex/Poseidon altimeter data in European Atlantic waters; a comparison of low and high resolution wind models". OCN R-98025, 10 pp. 1998b.*
- [20] *Gregory P. Tsinker. "Port Engineering. Planning, construction, maintenance, and security". 2004.*
- [21] *US Army Corps of Engineers. "Coastal Engineering Manual". 2002-2003.*

8 APPENDICE. DESCRIZIONE DEI MODELLI MATEMATICI

8.1 Descrizione del modello matematico di navigazione "SHIPMA"

Il codice di calcolo adottato per simulare le manovre delle navi è il modello SHIPMA, messo a punto e validato dal noto laboratorio olandese Delft Hydraulics. Tale modello simula il comportamento di una imbarcazione durante una assegnata manovra. Il programma è in grado di calcolare la posizione e l'orientamento locale della nave tenendo in considerazione l'influenza del vento, del moto ondoso, delle correnti, dei rimorchiatori, delle profondità dell'acqua e l'effetto di risucchio delle sponde. Nella simulazione vengono calcolati inoltre una serie di parametri quali, ad esempio, la distanza del baricentro dell'imbarcazione rispetto alla rotta "ideale" prescelta, il numero di giri-motore, la posizione del timone e le accelerazioni locali dell'imbarcazione.

Le forze idrodinamiche ed i momenti agenti sull'imbarcazione (così come le forze legate ai movimenti dell'elica e del timone) durante la manovra sono espresse in forze di inerzia, di portanza e di resistenza.

Le equazioni adottate per rappresentare il moto dell'imbarcazione sono del tipo di Abkowitz, formalmente analoghe alla legge di Newton, e basate sulla espansione in serie di Taylor di tutte le forze idrodinamiche agenti sull'imbarcazione. La risoluzione di tali equazioni è effettuata considerando due diversi sistemi di assi cartesiani: un primo solidale con l'imbarcazione, un secondo fisso rispetto a terra (Fig. 8.1.1).

L'integrazione numerica delle equazioni viene effettuata considerando nulli i movimenti di rollio, di beccheggio e di sollevamento della nave. Vengono invece considerate le forze dovute allo scafo, all'elica, al timone, al vento, alle onde, ai rimorchiatori (allorché vengano utilizzati) ed all'eventuale risucchio delle sponde.

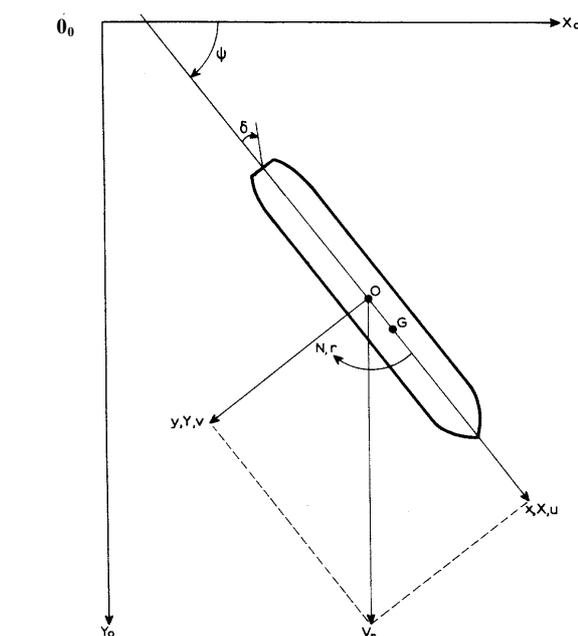


Fig. 8.1.1 Definizione del sistema di coordinate solidale con l'imbarcazione (x, y) e del sistema di coordinate fisso rispetto a terra (X_0, Y_0) .

8.1.1 Files di input e di output

Il modello utilizzato consta di una serie di files di ingresso (*input*) che, essenzialmente, descrivono:

- i dati concernenti la manovra "ideale" per l'accesso al porto,
- le impostazioni inerenti l'uso del "pilota automatico", il passo d'integrazione temporale, la posizione e la velocità iniziale dell'imbarcazione, etc;
- le caratteristiche dell'imbarcazione quali la sua geometria, la massa, le superfici esposte al vento (opera morta) ed alle onde (opera viva) in funzione della orientazione, le caratteristiche di manovrabilità (timone ed elica);
- le condizioni esterne: batimetrie e livelli di marea, posizione delle sponde e delle strutture, campo di corrente, campo di moto ondoso, campo di vento, numero e posizioni dei rimorchiatori, etc.

I files dei risultati (*output*) comprendono i risultati dell'elaborazione per cui, in ogni punto della rotta, è possibile quantificare le principali grandezze in gioco quali, ad esempio:

- posizione e orientamento della nave rispetto ad un sistema di coordinate fisso rispetto a terra;
- deviazione dalla rotta prescelta;
- velocità dell'imbarcazione;
- inclinazione dell'asse del timone e numero di giri-motore;
- direzione e velocità del vento e conseguenti forze impresse sulla nave;
- direzione ed altezza d'onda e conseguenti forze indotte sullo scafo;
- profondità locale dell'acqua in corrispondenza del baricentro;
- velocità della corrente rispetto alla nave;
- forze di risucchio delle sponde agenti sullo scafo;
- forze idrodinamiche agenti sull'imbarcazione;
- forze dei rimorchiatori sullo scafo.

Il diagramma di flusso del modello è rappresentato schematicamente nella seguente Fig. 8.1.2.

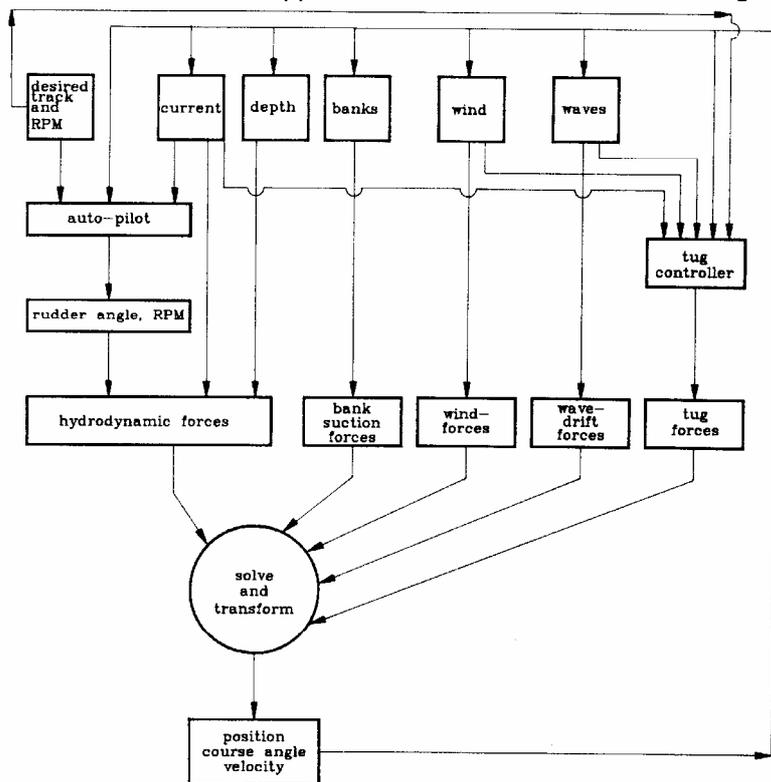


Fig. 8.1.2 Diagramma di flusso del modello matematico adottato

Per una più agevole lettura degli elaborati grafici e numerici, nella seguente tabella, sono riportati i significati dei principali simboli adottati.

SIMBOLO	SIGNIFICATO	UNITA' DI MISURA
A_{wx}	Frontal windage area	$[m^2]$
A_{wy}	Lateral windage area	$[m^2]$
B	Ship's beam	$[m]$
CN_G	N wave drift coefficient	$[N/m^2]$
CX_G	X wave drift coefficient	$[N/m^2]$
CY_G	Y wave drift coefficient	$[N/m^2]$
CN_w	N wind coefficient	$[-]$
CX_w	X wind coefficient	$[-]$
CY_w	Y wind coefficient	$[-]$
d_p	Rudder rate	$[deg/s]$
dy	Distance to the desired track (cross-track deviation)	$[m]$
$d\Psi$	Course deviation	$[deg]$
DWT	Ship's dead weight tonnage	$[tons]$
G	Ship's centre of gravity	
h	Water depth	$[m]$
H_{wa}	Significant wave height	$[m]$
K_{ry}	Yaw distance gain	$[-]$

$K_{r\psi}$	Yaw course gain	[-]
K_{vy}	Drift distance gain	[-]
L_{oa}	Ship's length over all	[m]
L_{pp} or L_n	Ship's length (between perpendiculars)	[m]
n	Number of propeller revolutions	[rev/s]
N_b	Moment due to bank-suction forces	[kNm]
N_c	Moment due to ship's control forces	[kNm]
N_h	Moment due to hydrodynamic hull forces (without accelerations)	[kNm]
N_{tug}	Moment due to tug forces	[kNm]
N_{wa}	Moment on the ship due to wave forces	[kNm]
N_{wi}	Moment on the ship due to wind forces	[kNm]
O	Ship's origin	
P	Anticipation point	
r	Rate of turn	[deg/s]
r_c	Rotational velocity of the current	[deg/s]
rc_p	Acceleration of the rotational current	[deg/s ²]
r_p	Yaw acceleration	[deg/s ²]
S	Track parameter	[m]
T	Draught of the ship	[m]
t	Time	[s]
T_p	Peak period in wave spectrum	[s]
$tfactN$	Tug controller N-coefficient for power burst control	[-]
$tfactY$	Tug controller Y-coefficient for power burst control	[-]
u	Ship's speed in longitudinal direction	[m/s]
u_c	Current-velocity over the ground in ship's longitudinal direction	[m/s]
uc_p	Acceleration of the current in ship's longitudinal direction	[m/s ²]
u_p	Ship's acceleration in ship's longitudinal direction	[m/s ²]
v	Ship's speed in transverse direction	[m/s]
v_c	Current-velocity over the ground in ship's transverse direction	[m/s]
vc_p	Acceleration of the current in ship's transverse direction	[m/s ²]
v_p	Ship's acceleration in ship's transverse direction	[m/s ²]
vr	Ship's speed through the water	[m/s]
V_s	Service speed	[m/s]
V_{wi}	Wind speed	[m/s]
X_b	Bank-suction force in ship's longitudinal direction	[kN]
X_c	Ship's control forces in ship's longitudinal direction	[kN]
x_G	Distance between O and G	[m]
X_h	Hydrodynamic hull forces in ship's longitudinal direction (without accelerations)	[kN]
X_{wa}	Wave force on the ship in longitudinal direction	[kN]
X_{wi}	Wind force on the ship in longitudinal direction	[kN]
x, O, y	Ship-fixed co-ordinate system	
x_o	X-position of ship's centre of gravity in the earth-fixed co-ordinate system	[m]

x_o, O_o, y_o	User-defined earth-fixed co-ordinate system (SHIPMA co-ordinate system).	
Y_b	Bank-suction force in ship's transverse direction	[kN]
Y_c	Ship's control forces in ship's transverse direction	[kN]
Y_h	Hydrodynamic hull forces in ship's transverse direction (without accelerations)	[kN]
Y_{tug}	Tug force in ship's transverse direction	[kN]
Y_{wa}	Wave force on the ship in transverse direction	[kN]
Y_{wi}	Wind force on the ship in transverse direction	[kN]
y_o	Y-position of ship's centre of gravity in the earth-fixed co-ordinate system	[m]
δ or d	Rudder angle	[deg]
Δs	Anticipation distance	[-]
Φ_{wa}	Wave direction in the earth-fixed co-ordinate system	[deg]
Φ_{wi}	Wind direction in the earth-fixed co-ordinate system	[deg]
ψ	Ship's course in the earth-fixed co-ordinate system	[deg]
Ψ_m	Execute angle	[deg]
ρ	Mass density	[kg/m ³]

N.B. *Co-ordinate systems:*
Angles, rotations and moments; clockwise is positive.

Ship-fixed co-ordinate system:
Directions, speeds, accelerations and forces: forward and starboard is positive.

computer program

SHIPMA 6

Fast-time simulation program for ship manoeuvring

Introduction SHIPMA model (version 6)

The latest version of the fast-time simulation program SHIPMA is a joint development of MARIN's nautical centre MSCN and WL| Delft Hydraulics. The combined contribution of these institutes leads to a fit for purpose program to simulate the manoeuvring behaviour of vessels in ports and fairways.

In SHIPMA the vessels are steered by an autopilot which is capable to operate in the track keeping mode and the harbour manoeuvring mode, making it possible to perform typical harbour manoeuvres like turning, reverse sailing and berthing.



SHIPMA applications

The application of SHIPMA is primarily in port and fairway design, referring to both approach channels and inland waterways. According to PIANC [1] a first estimate of the required channel width based on their methodology (computerised version freely available at MARIN/MSCN) has to be followed by ship manoeuvring simulations.

These simulations give insight into the inherent possibilities and/or restrictions of vessels, infrastructure and environmental conditions including the effect of additional manoeuvring devices like bow and stern thrusters and the role of tugs. Based on the insights gained, mitigations, if needed, of the infrastructure design (channel layout, manoeuvring basin and terminal layout) and/or the admittance policy can be proposed. In the final stage of the design the SHIPMA study can be followed by a study on a real-time simulator. The flow diagram on the next page gives an overview of the program structure.



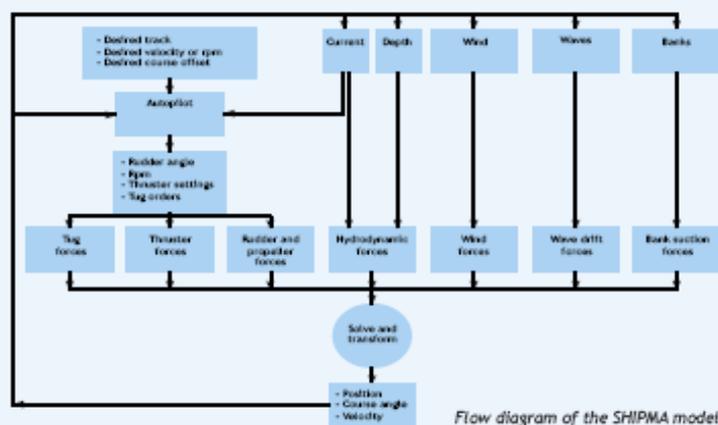
wl | delft hydraulics

SHIPMA 6

Fast-time simulation program for ship manoeuvring

Methodology of SHIPMA use

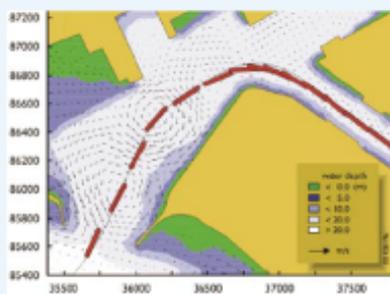
SHIPMA relies on the use of an autopilot, which also includes a tug allocation algorithm. The choice for using an autopilot rather than hands-on steering by a pilot or master allows the engineer to clearly judge and compare the results of different simulations on technical and physical aspects. The use of an automatic pilot in desktop simulation assures repeatability and a consistent nautical assessment procedure. The hands-on mode often seen in other models (actively steering the ship over a chart displayed on a screen) would put a civil engineer in a position where he is in fact playing the role of a pilot or master. Alternatively one could ask a pilot to do the runs, but the chart display offered to him is rather different from his normal sailing practice. This will jeopardise the result of the manoeuvres. Furthermore runs have to be repeated to guarantee consistency.



Flow diagram of the SHIPMA model

Ship characteristics

The mathematical ship models, consisting of sets of hydrodynamic derivatives (Abkowitz type [2]), are specific for each ship. They are determined either by scale model test, through scaling from other models or by calculation (SURSIM [3]). Models can be chosen from an existing list of over 100 high-quality ship models covering the latest ship designs. Specific models can be made according to the client's wishes. The models include wind coefficients, bank suction coefficients, second order wave drift forces and shallow water effects.



Example of an entry manoeuvre into the 'Stoehaven' Flushing, with an aerial view of the port

SHIPMA 6

Fast-time simulation program for ship manoeuvring

SHIPMA input and output

The input of the SHIPMA model is organised through the 'case management tool'. This tool guides the user through the preparation and execution of a simulation. The input of the model is organised in a number of files:

- a file containing data concerning the manoeuvre, desired track, setting of autopilot, time step, starting position, tugs etc.;
- files in which the ship is represented by dimensions, mass, windage area, etc. and the manoeuvring characteristics of the ship, to be expressed in hydrodynamic derivatives;
- files to describe several external conditions such as:
 - bottom level;
 - current pattern;
 - wind field;
 - wave field.

Note that for this type of data the number of grid points is practically unlimited, and that data from other mathematical models can be used easily.

The main output consists of:

- track, position, course and heading of the ship;
- course deviation and distance to the desired track;
- rudder angle and number of propeller revolutions;
- for wind and waves: direction, velocity/height and forces acting on the ship;
- water depth at the centre of gravity;
- current velocities on the ship;
- bank suction forces;
- tug forces.

The track and the output data can be plotted using DELFT-GPP.

Examples

Included are two examples of a computation with the new SHIPMA model. The first example (see left page) shows an entry manoeuvre into the 'Sloehaven', Flushing. The manoeuvre is executed under maximum current conditions, the current is computed with the DELFT3D-FLOW model and imported in SHIPMA, together with bathymetry and the results of wave penetration calculations.

The 2 plots at the right show an example of an entry and berthing manoeuvre with a twin propeller twin rudder vessel equipped with a bow thruster.

Track plot and Data plot (forward speed, sideward speed and rudder angle)



WL | delft hydraulics

SHIPMA 6

Fast-time simulation program for ship manoeuvring



SHIPMA is also capable of simulating inland waterway situations (picture left). Mathematical models are available for various types of ships.

The algorithm for simulating tug assistance has been improved considerably. Tugs are capable of controlling the ship speed in combination with the track keeping mode (picture right).

Computer requirements

- Pentium processor (300 Mhz)
- 64 Mb memory
- 75 Mb disk space
- Operating system (Windows 95 or higher).

References

- [1] PIANC-IAPH Working Group II-30, APPROACH CHANNELS A guide for Design.
- [2] Abkowitz, M.A., Lectures on ship hydrodynamics, steering and manoeuvrability, Hydro- and Aerodynamics Laboratory, Rep. No. HY-5, 1962. Copenhagen, Denmark.
- [3] SURSIM, Computer Program for the calculation hydrodynamic reaction forces, MARIN.

Addresses

WL | Delft Hydraulics
P.O. Box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
Tel.: +31 15 285 85 85
Fax: +31 15 285 85 82
E-mail: delftchess.info@wldelft.nl
Internet: www.wldelft.nl/soft/chess

MARIN/MSCN
P.O. Box 28
6700 AA Wageningen
The Netherlands
Tel.: +31 317 47 99 11
Fax: +31 317 47 99 99
E-mail: info@marin.nl
Internet: www.marin.nl



8.2 Codice di calcolo SWAN

Il modello SWAN (Simulation WAVes Nearshore) è un modello numerico espressamente sviluppato per ottenere stime attendibili dei parametri d'onda in aree costiere. Il modello si basa sull'equazione di conservazione dell'azione, e tiene conto di varie forzanti e fattori dissipativi. SWAN è un modello della terza generazione, cioè dinamico e completamente spettrale in frequenza e direzione. Il modello è stato sviluppato dall'Università di Delft (Olanda) e conta ormai come utenti - validatori moltissimi Istituti di Ricerca in più di trenta paesi.

8.2.1 Capacità e limitazioni di SWAN

Il modello SWAN può tenere conto dei seguenti processi: rifrazione dovuta al fondo e ai gradienti di corrente, shoaling dovuto al fondo e ai gradienti di corrente, blocking e riflessione dovuti alla corrente. Il modello inoltre considera le seguenti forzanti/processi dissipativi: generazione dovuta al vento, dissipazione dovuta al whitcapping, frangimento, attrito al fondo, ridistribuzione dell'energia sullo spettro dovuta ad interazioni non lineari (interazioni a tre e a quattro onde).

La diffrazione e la riflessione non sono modellati da SWAN. Il modello non è perciò affidabile in presenza di forti gradienti di profondità, nelle immediate vicinanze di ostacoli e all'interno di porti o bacini protetti.

Si ricorda che la significatività dei risultati di un modello di propagazione di moto ondoso del tipo di quello qui impiegato è vincolata alla qualità dei dati impiegati. In particolare, in acque basse (prima della zona dei frangenti) i risultati dipendono in maniera critica dall'attrito sul fondo. In presenza di informazioni dettagliate sul fondo (materiale, conformazione ecc) e di una taratura mediante misure in sito i risultati sono generalmente affetti da un errore inferiore al 5% per quanto riguarda l'altezza d'onda ed inferiore al 10% per il periodo.

8.2.2 Cenni sulla formulazione del modello SWAN

In SWAN le onde sono modellate mediante uno spettro bidimensionale della densità d'azione. Lo spettro considerato è quello della densità d'azione $N(\sigma, \theta)$ e non quello della densità d'energia $E(\sigma, \theta)$, in quanto la densità d'azione si conserva anche in presenza di correnti, mentre ciò non accade per la densità di energia (Whitham, 1974). Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa σ (osservata in un sistema di riferimento che si muove con la velocità di propagazione dell'azione) e la direzione dell'onda θ . La densità di azione è pari alla densità di energia divisa per la frequenza: $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$.

8.2.3 Equazione di conservazione dell'azione

In SWAN l'evoluzione dello spettro è descritta dall'equazione di conservazione dell'azione spettrale che, in coordinate cartesiane è (Hasselmann et al., 1973):

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

Il primo termine del primo membro rappresenta la variazione locale, in funzione del tempo, della

densità di azione; il secondo e terzo termine rappresentano la propagazione dell'azione nello spazio (con velocità di propagazione c_x e c_y rispettivamente in x - e y -). Il quarto termine rappresenta lo shift della frequenza relativa dovuta a variazioni di profondità e a correnti (con velocità di propagazione c_σ nello spazio σ). Il quinto termine rappresenta la rifrazione indotta dalla batimetria e dalla corrente (con velocità di propagazione c_θ nello spazio θ). Le suddette velocità di propagazione sono ricavate dalla teoria lineare (Dingemans, 1997). Il termine $S (= S(\sigma, \theta))$ a secondo membro è il cosiddetto termine sorgente e rappresenta gli effetti generativi, dissipativi e le interazioni non lineari. Di seguito viene riportata, in breve, la formulazione dei vari termini sorgenti.

Input dovuto al vento

Il trasferimento di energia dal vento alle onde è descritto in SWAN sulla base del meccanismo di risonanza di Phillips (1957) e del meccanismo di feedback di Miles (1957). Il corrispondente termine sorgente può essere schematizzato come la somma di una crescita lineare e di una esponenziale:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + B E(\sigma, \theta)$$

dove A e B dipendono dalla frequenza e dalla direzione dell'onda e dalla frequenza e direzione del vento. L'effetto di correnti è modellato in SWAN mediante l'uso, per il vento, della velocità e direzione apparenti.

L'espressione per A è dovuta a Cavaleri e Malanotte-Rizzoli (1981), come modificata da Tolman (1992). L'espressione per B è mutuata dalla versione più recente del modello WAM (WAM Cycle 4, Komen et al., 1994). E' dovuta a Janssen (1991) e tiene conto delle interazioni tra vento e onde considerando esplicitamente effetti atmosferici di interfaccia e la lunghezza d'onda caratteristica della superficie del mare. Il corrispondente insieme di equazioni viene risolto mediante la procedura iterativa di Mastenbroek et al. (1993).

Dissipazione

I termini dissipativi sono rappresentati dalla somma di tre contributi: whitecapping $S_{ds,w}(\sigma, \theta)$, attrito sul fondo $S_{ds,b}(\sigma, \theta)$ e frangimento dovuto alla profondità $S_{ds,br}(\sigma, \theta)$. Il whitecapping è essenzialmente controllato dalla ripidità dell'onda. La formulazione del fenomeno è basata su un adattamento del modello di Hasselmann (WAMDI group 1988):

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \frac{\tilde{\sigma}}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta)$$

Dove Γ è un coefficiente che dipende dalla ripidità dell'onda, k è il numero d'onda, $\tilde{\sigma}$ e \tilde{k} sono rispettivamente la frequenza media e il numero d'onda medio. Il coefficiente Γ è basato sull'espressione di Janssen (1991).

La dissipazione energetica dovuta alle interazioni con il fondo può essere causata dall'attrito sul fondo, da movimenti del materiale del fondo, da percolazione e riflessione dovuta ad irregolarità del fondo stesso. Il meccanismo dominante è l'attrito sul fondo, che può essere rappresentato come:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta)$$

dove C_{bottom} è il coefficiente di attrito sul fondo. A partire dal primo lavoro di Putnam e Johnson (1949), sono stati proposti moltissimi modelli per la stima di C_{bottom} . Dal momento che nelle aree costiere le condizioni del fondo (caratteristiche del materiale, conformazione del fondo, ecc.) sono estremamente varie, non esiste evidenza sperimentale che porti a preferire una qualche formulazione per il coefficiente di attrito. Per questo motivo in SWAN sono attualmente implementati solo i modelli più semplici: il modello empirico JONSWAP di Hasselmann et al. (1973), il modello di Madsen et al. (1988) ed il modello di Collins (1972). L'utente deve scegliere la formulazione ed i coefficienti che più si adattano alle caratteristiche del fondale. In mancanza di informazioni dettagliate, il modello usa dei coefficienti di attrito che garantiscono la conservatività dei risultati. L'effetto della corrente sulla dissipazione dovuta all'attrito sul fondo non è modellato, essendo di ordine superiore (Tolman, 1992).

Il processo del frangimento spettrale dovuto alla profondità è ancora poco conosciuto. Al contrario, la dissipazione totale (cioè integrata su tutto lo spettro) può essere ben modellata (Battjes and Janssen, 1978; Thornton and Guza, 1983). Il modello di Battjes e Janssen è stato perfezionato in termini spettrali da Eldeberky e Battjes (1995). Generalizzando la loro espressione per includere le direzioni, si ottiene la formulazione implementata nel modello:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = - \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta)$$

dove E_{tot} è l'energia totale dell'onda e D_{tot} rappresenta la dissipazione dell'energia totale dovuta al frangimento, come in Battjes e Janssen (1978). Il valore di D_{tot} dipende dal valore del parametro $\gamma = H_{\text{max}} / d$ (dove H_{max} è la massima altezza possibile per un'onda monocromatica, in una profondità d). In SWAN al parametro γ viene dato un valore costante $\gamma = 0.73$ (che costituisce la media del data set riportato in Battjes e Stive, 1985). Come opzione si può impostare un valore di γ variabile in funzione della pendenza del fondo, come suggerito da Nelson (1987, 1994), oppure in funzione della ripidità dell'onda al largo, come suggerito dagli stessi Battjes e Stive (1985) nei casi di onda non monocromatica.

SWAN può stimare la trasmissione delle onde oltre una struttura semisommersa, tramite la formulazione di Goda et al. (1967), modificata secondo Seelig (1979) per tenere conto della sezione della barriera.

Il programma può inoltre tenere conto del set-up indotto dall'onda, secondo la procedura avanzata da Dingemans (1997). Se non diversamente specificato, il setup viene assunto come nullo nel punto più profondo della griglia di calcolo.

Interazioni non lineari

In acque profonde, le interazioni a quattro onde dominano l'evoluzione dello spettro. Queste interazioni trasferiscono energia dal picco verso le basse frequenze (con l'effetto netto di diminuire la frequenza di picco) e verso le alte frequenze (aumentando così l'energia dissipata dal whitecapping). In acque molto basse, le interazioni a tre onde trasferiscono l'energia dalle basse alle alte frequenze, dando luogo ad armoniche di ordine superiore (Beji and Battjes, 1993).

In SWAN il calcolo delle interazioni a quattro onde è eseguito tramite la tecnica "Discrete Interaction Approximation" (DIA) di Hasselmann et al. (1985), tecnica che è risultata molto efficace nel descrivere lo sviluppo dello spettro (Komen et al., 1994).

Il calcolo delle interazioni a quattro onde è eseguito tramite la tecnica "Lumped Triad Approximation" (LTA) sviluppata da Eldeberky (1996). Questa tecnica si è dimostrata molto efficace nel descrivere il trasferimento di energia dal picco dello spettro verso le armoniche di ordine superiore.

8.2.4 Cenni sulla numerica di SWAN

L'integrazione dell'equazione di bilancio dell'azione è stata implementata in SWAN mediante uno schema alle differenze finite in tutte e cinque le dimensioni (tempo, spazio e direzione spettrale). Nel modello lo spettro è discretizzato con una risoluzione direzionale costante (tipicamente 30° o 15°) e una risoluzione in frequenza con f_n/f_{n+1} costante (distribuzione logaritmica delle frequenze). Le frequenze (tipicamente 15-30) sono definite tra una frequenza minima (tipicamente 0.6 fp) ed una frequenza massima (tipicamente 2.5 fp). Per frequenze superiori alla frequenza massima il modello aggiunge una "coda" allo spettro, per rendere possibile il calcolo delle interazioni non lineari ad alta frequenza e per calcolare i parametri integrati. In SWAN questa coda viene calcolata seguendo la formulazione di Phillips (1985).

Per la propagazione lo schema numerico di SWAN è uno schema "upwind" implicito del primo ordine nello spazio geografico (x-y). Uno schema implicito, essendo incondizionatamente stabile, permette di usare passi di integrazione lunghi. Molti anni di sperimentazione e validazione del modello di seconda generazione HISWA (Holthuijsen et al., 1989) hanno mostrato che lo schema numerico usato è sufficientemente accurato nello spazio geografico. Nello spazio spettrale è tuttavia richiesta, specialmente in acque basse, una maggiore accuratezza. Questa è stata ottenuta integrando, nello spazio spettrale, lo schema di primo ordine con uno schema del secondo ordine ad approssimazione centrale (più economico, in termini computazionali, di uno schema "upwind" di secondo ordine). I due schemi vengono combinati linearmente mediante due coefficienti di somma unitaria.

Le condizioni al contorno in SWAN, sia nello spazio geografico che spettrale, sono di completo assorbimento dell'energia che esce dalla griglia di calcolo o che attraversa la linea di riva. L'energia entrante dai bordi della griglia di calcolo deve essere indicata dall'utente, con particolare cautela sui bordi che intersecano la linea di riva.

8.3 Modello matematico bidimensionale a fondo mobile della circolazione idrodinamica

Il modello matematico utilizzato nell'indagine risolve le equazioni differenziali che governano il flusso bidimensionale di una corrente a superficie libera su bassi fondali in moto vario associando ad esse le relazioni che consentono di tener conto dell'evoluzione dei fondali indotta dalle correnti di marea e da quelle generate dal moto ondoso [1], [2].

8.3.1 Modulo idrodinamico

Per quanto riguarda gli aspetti idrodinamici, le equazioni che governano il moto in ipotesi di fondali lentamente erodibili sono formulate in modo da poter essere applicate anche ad aree parzialmente asciutte o che possono essere allagate o prosciugate durante l'evoluzione del fenomeno:

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{d(q_x / Y)}{dt} + \frac{q_x |\mathbf{q}|}{K_s^2 \cdot H^{10/3}} - \frac{\tau_{wx}}{\gamma Y} - \text{Re}_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{g} \frac{d(q_y / Y)}{dt} + \frac{q_y |\mathbf{q}|}{K_s^2 \cdot H^{10/3}} - \frac{\tau_{wy}}{\gamma Y} - \text{Re}_y = 0 \quad (2)$$

$$\eta(h) \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} = 0 \quad (3)$$

Nelle (1), (2) e (3), h indica la quota idrometrica, x , y sono le ascisse spaziali orizzontali correnti, g è l'accelerazione di gravità, K_s è il coefficiente di scabrezza secondo Strickler, t è il tempo, \mathbf{q} è la velocità integrata sulla verticale con componenti q_x e q_y , τ_{wx} e τ_{wy} sono i termini che descrivono l'effetto sulla circolazione delle eventuali azioni del vento e/o del moto ondoso, Re_x e Re_y sono gli sforzi adimensionali di Reynolds nel piano orizzontale, calcolati mediante le seguenti relazioni:

$$\text{Re}_x = \frac{v_T}{g} \left(\frac{\partial^2 (\frac{q_x}{Y})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\frac{q_x}{Y})}{\partial y^2} \right) \quad \text{Re}_y = \frac{v_T}{g} \left(\frac{\partial^2 (\frac{q_y}{Y})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\frac{q_y}{Y})}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Il coefficiente di viscosità cinematica turbolenta v_T che compare nelle precedenti relazioni, è determinato utilizzando come schema di chiusura il modello suggerito da Smagorinsky.

Nelle equazioni (1), (2) e (3) compaiono inoltre i termini η , Y e H i quali, nell'istante generico, indicano, rispettivamente, la frazione locale di dominio allagato, il volume d'acqua per unità di superficie ed un'altezza d'acqua equivalente introdotta per descrivere correttamente l'effetto dei

termini dissipativi. Tali termini sono dati dalle espressioni seguenti:

$$\eta(h) = \frac{1}{2} [1 - \operatorname{erf}(2Y_a / a_r)] \quad (5)$$

$$Y = \int_{-\infty}^h \eta \cdot dz = a_r \left\{ \eta \frac{Y_a}{a_r} + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-4(Y_a/a_r)^2} \right\} \quad (6)$$

$$H \cong Y + 0.27 \sqrt{Y \cdot a_r} \cdot e^{-2Y/a_r} \quad (7)$$

in cui $\operatorname{erf}()$ è la funzione errore, $Y_a = h - h_f$, essendo h_f l'altezza media locale del fondo e a_r indica la ampiezza massima delle ondulazioni locali del terreno.

Si osserva, nelle equazioni (1) e (2), che l'accelerazione convettiva è, di fatto, considerata in modo lagrangiano, dato che la variazione nel tempo delle velocità mediate lungo la verticale è rappresentata da una derivata totale.

Per la discretizzazione di questo termine si è adottata una tecnica alle differenze finite trascurando, perché piccola, la variazione temporale dell'altezza d'acqua Y . In queste ipotesi, ad esempio, la derivata totale della velocità nella direzione x , è calcolata come segue:

$$\frac{d(q_x / Y)}{dt} \cong \frac{(q_x / Y)' - (q_x / Y)'_0}{\Delta t} \quad (8)$$

essendo le grandezze con apice riferite all'istante di calcolo precedente. Conseguentemente la derivata totale delle velocità, calcolata nel generico punto P del campo di moto, si scrive come differenza tra la velocità $(q_x / Y)'$ calcolata nello stesso punto P e la velocità $(q_x / Y)'_0$ calcolata, invece, nel punto P_0 che si determina per integrazione a ritroso nel tempo lungo la "linea di fumo" passante per P .

Senza entrare nel merito della soluzione numerica adottata, ci si limita a ricordare che il sistema delle equazioni (1), (2) e (3), nelle incognite h e \mathbf{q} , è risolto con il metodo degli elementi finiti, adottando una soluzione secondo uno schema alle differenze finite semi-implicito per le derivate temporali. Poiché nella discretizzazione spaziale del campo di moto si sono utilizzati elementi finiti di forma triangolare, la soluzione per i livelli prevede una variazione lineare delle quote idrometriche all'interno di ciascun elemento, mentre le velocità (integrate sulla verticale) sono considerate costanti sull'elemento.

Relativamente ai termini τ_{wx} e τ_{wy} che, nelle equazioni (1) e (2), permettono di descrivere gli effetti del moto ondoso, essi sono calcolati separatamente dal modello di propagazione del moto ondoso stesso, descritto nei capitoli precedenti, per ciascuna delle mareggiate considerate e per ciascuno dei livelli assegnati al largo. Tale modello calcola, oltre alle caratteristiche del campo d'onda a partire da prefissate condizioni al largo, la distribuzione in tutto il dominio delle forzanti principali della circolazione, che sono costituite dalle derivate dei cosiddetti termini di "radiation stress", secondo la nota trattazione di Longuet-Higgins e Stewart (1962 e 1964), e corrispondono ai succitati termini. Come è meglio illustrato nel seguente paragrafo, per le necessità delle indagini è stata predisposta una procedura per trasferire, per ogni attacco ondoso e per ogni livello considerato al largo, le componenti delle forzanti dovute al moto ondoso sugli elementi triangolari della griglia di calcolo del

modello idrodinamico. In questo modo, ad ogni istante di calcolo, gli effetti del moto ondoso sono stati automaticamente inseriti nella simulazione idrodinamica.

8.4 Modulo di trasporto dei sedimenti

Il modello idrodinamico precedentemente descritto non considera gli effetti legati alle variazioni nel tempo delle quote del fondo. Per altro, nella maggior parte dei problemi di evoluzione morfologica, i tempi caratteristici che descrivono le variazioni dell'idrodinamica e quella dei fondali, sono molto diversi tra loro. Ciò consente di trattare i due fenomeni, dal punto di vista della modellazione matematica, in modo disaccoppiato.

Nella presente indagine questa possibilità è sfruttata impiegando un modello che, ad ogni passo di calcolo, risolve dapprima l'idrodinamica, assumendo invariante la geometria del fondo ed utilizzando lo schema già descritto, e poi il trasporto dei sedimenti al fondo utilizzando lo schema nel seguito descritto e considerando come invarianti le grandezze idrodinamiche [3].

L'evoluzione altimetrica del fondo è governata dall'equazione di Exner:

$$(1 - n) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \nabla \mathbf{q}_b = D(C) - E \quad (9)$$

in cui n è la porosità dei sedimenti costituenti il fondo, z_b è la quota del fondo, t il tempo, \mathbf{q}_b è la portata solida al fondo, $D(C)$ è il flusso di materiale trasportato in sospensione che si deposita (dipendente dalla concentrazione C del materiale in sospensione stesso), ed E è il flusso di materiale che, eroso dal fondo, è mandato in sospensione.

La (9) può essere agevolmente risolta per fornire l'andamento nel tempo delle quote del fondo, una volta determinati la portata solida al fondo e i flussi di deposito e di erosione. E' opportuno precisare che è necessario distinguere tra i due diversi modi di trasporto (al fondo e in sospensione) soprattutto per il fatto che il trasporto al fondo, per intensità e direzione, è influenzato dalla pendenza locale del fondo stesso, mentre il trasporto in sospensione non risente di questo parametro. Per questo motivo, nello studio dell'evoluzione morfologica dei fondali, non possono essere utilizzate formule per il trasporto solido totale e le due modalità di trasporto devono essere simulate separatamente.

8.4.1 Trasporto al fondo

La portata \mathbf{q}_b è calcolata come:

$$\mathbf{q}_b = q_b (\cos \alpha, \sin \alpha) \quad (10)$$

in cui q_b e α sono rispettivamente l'intensità della portata solida e la direzione effettiva del trasporto. L'intensità della portata solida può essere scritta come:

$$q_b = q_{b0} \left(1 - \chi c_F \frac{\partial z_b}{\partial s} \right) \quad (11)$$

in cui $c_F = k_s Y^{4/3} / g$ è il termine di attrito e χ è un opportuno coefficiente che considera l'effetto

della pendenza del fondo nella direzione della corrente (nel modello è stato assunto $\chi=0.03$), q_{b0} è la portata solida al fondo per il caso di moto unidimensionale uniforme che nel modello è stimata mediante la ben nota formula di Meyer-Peter e Müller:

$$q_{b0} = 8\sqrt{gd^3(s-1)(\mu\theta - \theta_c)^{3/2}} \quad (12)$$

Nelle (11) e (12) d è il diametro medio dei sedimenti, μ è il cosiddetto "ripple factor" che tiene conto degli effetti legati alla presenza di piccole ondulazioni sul fondo, $\theta = u_*^2 / [(s-1)gd]$ è il parametro di Shields, u_* e s sono rispettivamente la velocità d'attrito e la densità relativa dei sedimenti e $\theta_c=0.047$ è il valore critico del parametro di Shields per l'inizio del movimento.

La direzione effettiva del trasporto α nel caso di fondali poco pendenti, è espressa come:

$$\alpha = \arctan \left[\frac{\text{sen}(\delta) - \frac{1}{f(\theta)} \frac{\partial z_b}{\partial y}}{\text{cos}(\delta) - \frac{1}{f(\theta)} \frac{\partial z_b}{\partial x}} \right] \quad (13)$$

in cui δ è la direzione della corrente in prossimità del fondo e $f(\theta)$ è una funzione che pesa l'influenza della pendenza del fondo trasversale al moto. Tale funzione si può scrivere come:

$$f(\theta) = \zeta \cdot \sqrt{\theta} \quad ; \quad \zeta = 9(d/Y)^{0.3} \quad (14)$$

La direzione della corrente in prossimità del fondo può essere stimata come:

$$\delta = \arctan(q_y / q_x) + \Delta\beta \quad (15)$$

in cui $\Delta\beta$ rappresenta la deviazione dovuta alle circolazioni trasversali innescate dall'eventuale curvatura nell'andamento planimetrico del flusso. Nel modello questo termine, che è relativamente modesto, è stato però trascurato.

8.4.2 Trasporto in sospensione

Per quanto riguarda il trasporto in sospensione, si è utilizzata la classica equazione del trasporto e diffusione mediata sulla verticale:

$$\frac{\partial CY}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} C - \nabla (\mathbf{D} Y \nabla C) = E - D(C) \quad (16)$$

in cui C è la concentrazione media sulla verticale del materiale trasportato, $\mathbf{q} = (q_x, q_y)$ è la portata liquida per unità di lunghezza, Y è l'altezza d'acqua, \mathbf{D} è il tensore della diffusione, E e $D(C)$ sono i già ricordati flussi del materiale in erosione e deposizione. Questi ultimi sono legati alla capacità di trasporto della corrente e alla concentrazione C . In particolare si ha:

$$D(C) = w R C \quad (17)$$

in cui w è la velocità di caduta in acqua ferma del materiale trasportato in sospensione e il parametro R è il rapporto tra la concentrazione al fondo e la concentrazione media. Nel modello

tale parametro è assunto costante pari a 1.6.

A sua volta il termine E è espresso nella forma:

$$E = w E_{S0} \quad (18)$$

in cui w è sempre la velocità di caduta del materiale e il parametro E_{S0} , denominato "erosione specifica adimensionale" è calcolato secondo la formulazione di Van Rijn:

$$E_{S0} = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \quad (19)$$

Nella (19) d_{50} indica il diametro medio dei sedimenti, il parametro a , assunto nel modello pari a $0.05 \cdot Y$, indica la distanza dal fondo in corrispondenza della quale si valuta la concentrazione al fondo, e T e D_* sono rispettivamente il parametro di trasporto e il diametro adimensionale dei sedimenti, calcolati in base alle espressioni seguenti:

$$T = \left(\frac{\theta}{\theta_c} - 1 \right) \quad D_* = \left(\frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot g}{\nu^2} \right)^{1/3} \cdot d_{50} \quad (20)$$

in cui ρ e ρ_s sono la densità dell'acqua e del materiale trasportato, ν è la viscosità cinematica dell'acqua, θ è il parametro di Shields espresso in funzione dello sforzo al fondo come $\theta = \tau / (\rho_s - \rho) g d_{50}$; il suo valore critico, al variare del diametro adimensionale dei sedimenti, θ_c è valutato mediante le relazioni:

$$\begin{aligned} \theta_c &= 0.24 / D_* && \text{se } D_* < 4 \\ \theta_c &= 0.14 / D_*^{0.64} && \text{se } 4 < D_* < 10 \\ \theta_c &= 0.04 / D_*^{0.1} && \text{se } 10 < D_* < 20 \\ \theta_c &= 0.013 / D_*^{0.29} && \text{se } 20 < D_* < 150 \\ \theta_c &= 0.055 && \text{se } D_* > 150 \end{aligned}$$

Il valore dello sforzo tangenziale al fondo è dato dal contributo dovuto alla corrente e da quello dovuto al moto ondoso secondo la seguente espressione, proposta da Van der Velden:

$$\tau = \tau_{corrente} + \frac{1}{2} \tau_{onda} \quad (21)$$

Il contributo dovuto alla corrente si esprime nella forma seguente:

$$\tau_{corrente} = \rho g \frac{q|q|}{K_s Y^{7/3}} \quad (22)$$

mentre il contributo dovuto al moto ondoso è dato dalla seguente espressione:

$$\tau_{onda} = \frac{1}{2} \rho f_w \hat{u}_0^2 \quad (23)$$

in cui f_w è un coefficiente di attrito e \hat{u}_0 è l'ampiezza della velocità orbitale al fondo. Nel modello si assume:

$$f_w = 0.01 \quad \text{e} \quad \hat{u}_0 = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{Y}}$$

in cui H è l'altezza d'onda e l'espressione di \hat{u}_0 discende dalla teoria lineare nelle ipotesi di acque basse. Nel caso in esame, per ciascun elemento del reticolo di calcolo, il valore dell'ampiezza della velocità orbitale al fondo è reso disponibile, istante per istante, dalla simulazione effettuata con il modello di propagazione del moto ondoso.