

**PROGETTAZIONE
 GENERALE**

Ing. P. Rossetto
 Thetis S.p.a.

Ing. G. Zoletto
 Ing. E. Mantovani
 S.p.a.

Nuovi Interventi per la Salvaguardia di Venezia

Legge 798 del 29-11-1984
 Convenzione rep. n.7191 del 4-10-1991
 Atto Attuativo rep. n. 8513 del 27-07-2011 (Progettazione Preliminare)

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE
 AL LARGO DELLA COSTA DI VENEZIA**

DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO

PROGETTO PRELIMINARE

CUP: D73B11000150001

Progettazione
 Ambientale e
 Impiantistica



Progettazione
 Infrastrutture



Progetto - Studi ed indagini Preliminari

Cod.Elabor.

**RELAZIONE MODELLO
 IDRODINAMICO**

C4-REL-004

elaborato

controllato

approvato

Coordinamento alla
 Progettazione

 Consorzio
 Venezia
 Nuova
 Ing. M. Brotto

Settembre 2011

revisione	descrizione	elab.	contr.	appr.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

**TERMINAL PLURIMODALE OFF – SHORE
al largo della COSTA VENETA**

DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO

RELAZIONE MODELLO IDRODINAMICO

Gruppo di progettazione



Collaborazione specialistica



**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

Gruppo di progettazione



Collaborazione specialistica



TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

INDICE

1	PREMESSE	5
2	STRUTTURA DEL MODELLO	6
	2.1 IL MODULO DELFT 3D WAVE.....	7
	2.2 IL MODULO DELFT 3D FLOW	8
	2.3 DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI INDAGINE.....	10
	2.4 GRIGLIE COMPUTAZIONALI E BATIMETRIE ASSOCIATE.....	10
3	CALIBRATURA DEL MODELLO	16
4	IL MOTO ONDOSO.....	18
	4.1 REGIME METEOMARINO DELL' AMBITO OGGETTO DI INTERVENTO	18
	4.1.1 Dati di vento di base per le simulazioni.....	22
	4.2 EVENTI MASSIMALI	34
	4.2.1 Traversia di grecale-bora (ne).....	35
	4.2.2 Traversia di scirocco (se).....	37
	4.2.3 Traversia di libeccio (so)	39
	4.2.4 Traversia di maestrale (no)	40
	4.1 STUDIO DELLA DURATA DELLE ALTEZZE D'ONDA	41
	4.1.1 Traversia di grecale-bora (ne).....	42
	4.1.2 Traversia di scirocco (se).....	43
	4.1.3 Traversia di libeccio (so)	44
	4.1.4 Traversia di maestrale (no)	45
	4.1.5 Durata delle altezze d'onda.....	46
5	IL REGIME DELLE CORRENTI.....	51
	5.1 CASO 1 – MAREA DI QUADRATURA	56
	5.2 CASO 2 – MAREA DI SIZIGIA.....	59
	5.3 CASO 3 – MAREGGIATA DI BORA	61

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

	5.4 CASO 4 – MAREGGIATA DI SCIROCCO.....	65
6	CONCLUSIONI	69

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

1 PREMESSE

Fra le attività connesse con la progettazione preliminare e lo studio di impatto ambientale del progetto denominato *Terminal plurimodale off-shore al largo della costa di Venezia – Diga foranea e terminal petrolifero* del Magistrato alle Acque di Venezia - Consorzio Venezia Nuova, è stata prevista anche l'implementazione di un modello idrodinamico tridimensionale, il cui ambito di applicazione è di seguito rappresentato in Figura 1 (elaborato C5-DIS-020).

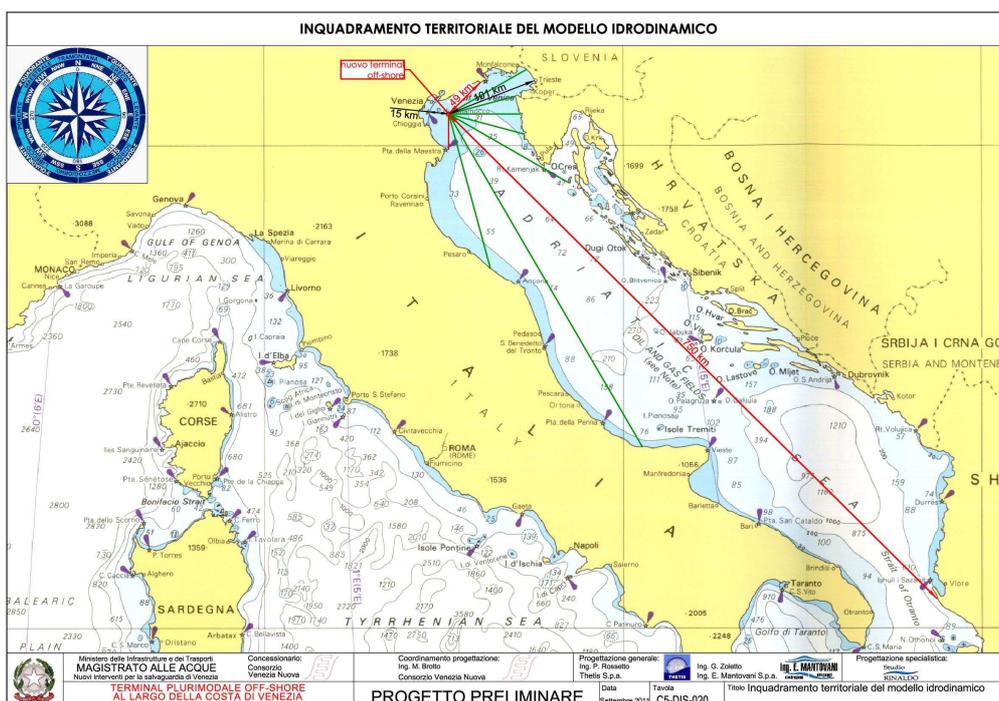


Figura 1: inquadramento territoriale del modello idrodinamico

Detto modello, qui di seguito descritto, è stato realizzato al fine di valutare:

- Il moto ondoso incidente, per mareggiate provenienti sia dalla traversia di bora, che da quella di scirocco;
- il moto ondoso residuo nell'area del terminal per diverse condizioni di vento, con l'obiettivo di restituire le relative curve di durata per intervalli significativi delle altezze d'onda, sulla base delle statistiche di vento disponibili;

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

- il regime delle velocità delle correnti, che si instaura nell'area del realizzando terminal off-shore, sia in condizioni meteomarine tipiche, che in coincidenza di eventi estremi, in occasione di mareggiate realmente registrate nel paraggio oggetto d'indagine;

Nei seguenti paragrafi verrà dapprima descritta la struttura del modello in uso con i relativi fondamenti teorici, quindi la fase di calibratura dello stesso ed infine verranno discussi i tre aspetti indagati, ciascuno in un apposito paragrafo.

2 STRUTTURA DEL MODELLO

Il modello tridimensionale idrodinamico Delft3D, sviluppato dall'Istituto nazionale ed internazionale per le questioni deltizie Deltares di Delft (Olanda), di cui si è in possesso di regolare e piena licenza d'uso, permette di analizzare l'idrodinamica, il trasporto di sedimenti, la morfologia e la qualità delle acque di ambienti costieri, fluviali ed estuari.

In particolare per il calcolo del regime delle correnti è stato utilizzato il modulo FLOW, per il calcolo del moto ondoso il modulo WAVE ed infine per la diffusione dello spanto il modulo PART.

La caratteristica principale del programma è il suo carattere di tridimensionalità che permette ad esempio di analizzare il regime verticale delle velocità ed il fenomeno delle correnti di densità.

Al fine di rappresentare questo tipo di fenomeni il campo di moto in verticale viene suddiviso in fasce (layers): nel caso in esame sono tre.

I layers non sono piani orizzontali, ma seguono l'andamento dei fondali, venendo quindi assegnati come percentuale della profondità complessiva e la relativa funzione, è per l'appunto, quella di consentire una rappresentazione delle variazioni di densità di un prefissato parametro lungo lo sviluppo del campo di moto.

Nella Figura 2 qui di seguito riportata, direttamente tratta dal manuale del programma, è contenuta un'immagine che consente di chiarire in modo più efficace il concetto, demandando alla lettura di detto testo per ogni necessario approfondimento.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

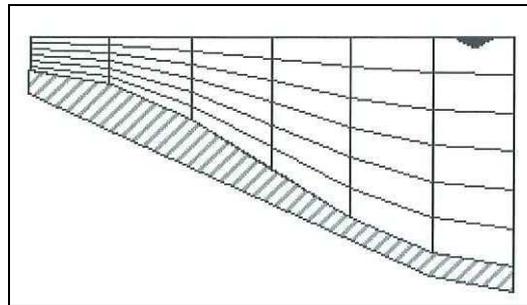


Figura 2- immagine di esempio tratta dal manuale del programma Delft3D

2.1 IL MODULO DELFT 3D WAVE

Il modulo Delft 3D-WAVE può essere usato per simulare la propagazione e la trasformazione di onde da vento in mare aperto, acque costiere, estuari, canali ed ambienti a marea. Viene calcolata l'evoluzione delle onde su profondità variabili, per predeterminate condizioni di vento e di marea.

Il programma è in grado di considerare la generazione dell'onda dovuta al vento e la relativa dissipazione dell'energia dovuta all'attrito di fondo, oltre alle interazioni non lineari fra onda e onda, quali ad esempio rifrazione e diffrazione.

Il modello matematico utilizzato per il calcolo delle onde, della cosiddetta terza generazione, è denominato SWAN (Simulating Waves Nearshore) ed è stato validato e verificato con successo da Ris, 1997 e Booij, 1999, essendo stato sviluppato dall'Università tecnica di Delft e continuamente applicato a casi di studio in tutto il Mondo.

Il modello matematico SWAN si basa sull'equazione discreta di bilancio dell'azione spettrale e permette di coprire tutte le direzioni e frequenze. Di conseguenza può modellare un campo di moto per onde a cresta corta, che si propagano simultaneamente da differenti direzioni.

SWAN tiene conto di una serie di fenomeni connessi alla propagazione di un'onda, riconducibili a:

- lo shoaling ovvero la progressiva crescita dell'onda all'avvicinarsi della terraferma;
- la rifrazione indotta sia dalla corrente che dalla profondità;
- il vento;

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

- il whitecapping, ovvero il frangimento per raggiunta ripidità limite dell'onda, con conseguente dissipazione di energia;
- l'attrito di fondo;
- il frangimento dovuto alla profondità del fondale;
- l'interazione non lineare tra le onde.

2.2 IL MODULO DELFT 3D FLOW

Tale modulo simula fenomeni di trasporto e di flusso instabile risultanti da forzanti meteorologiche e di marea, includendo l'effetto delle differenze di densità dovute ad una distribuzione non uniforme di temperatura e salinità.

- Un numeroso insieme di fenomeni fisici viene preso in considerazione dal modello:
- Gradienti di superficie libera;
- Effetto della rotazione terrestre, la cosiddetta forza di Coriolis;
- Acqua con diverse densità;
- Gradienti di densità orizzontale per la pressione;
- Turbolenza indotta da flussi di massa e momento;
- Trasporto di sali, calore ed altri costituenti conservativi;
- Forzanti di marea al contorno;
- Sforzo di taglio dovuto alla variazione spazio temporale del vento sulla superficie dell'acqua;
- Variazione spaziale dello sforzo di taglio sul fondo;
- Variazione spazio temporale della pressione atmosferica sulla superficie dell'acqua;
- Apporti di portata variabili nel tempo;

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

- Sommersioni ed emersioni di bassifondi;
- Scambio di calore attraverso la superficie libera;
- Evaporazione e precipitazione;
- Forze generate dalle maree;
- Effetto del flusso secondario sulle equazioni dei momenti a media profondità;
- Sforzo di taglio laterale sulle pareti;
- Scambio verticale del momento dovuto al moto ondoso interno;
- Influenza delle onde sullo sforzo tangenziale di fondo;
- Sollecitazioni indotte dalle onde e dai flussi di massa;
- Flusso attraverso strutture idrauliche;
- Flussi derivanti da vento inclusi cicloni ad uragani.

La modellazione numerica idrodinamica risolve nello spazio e nel tempo le equazioni di Navier – Stokes per fluidi incomprimibili sotto le assunzioni di Boussinesq e di acque poco profonde. Nel modello 3D le velocità verticali sono computate dall’equazione di continuità e l’insieme delle equazioni differenziali parziali, combinate con un appropriato set di condizioni iniziali ed al contorno, è risolto per una griglia computazionale curvilinea.

Superfluo appare, nel caso in esame, proporre una descrizione dei fondamenti matematici del modello demandando eventuali approfondimenti al riguardo alla lettura dei manuali d’uso del programma, che rappresenta uno strumento di uso consolidato e riconosciuto a livello internazionale.

La modellazione è basata sulla costruzione di una griglia computazionale dell’area oggetto d’indagine, con associata batimetria dei fondali. Nel seguito del presente paragrafo verranno descritti i vari passaggi, che hanno permesso di costruire il modello a partire dalla griglia di calcolo.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

2.3 DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI INDAGINE

Il *terminal off-shore* oggetto del presente studio è localizzato nel Golfo di Venezia, circa 14 km a sud-est della bocca di porto di Malamocco (circa 7.3 miglia marine) e circa 15 km a sud-est della bocca di porto di Lido (circa 8 miglia marine), come indicato nella succitata Figura 1. Per il paraggio di Venezia, vicino a cui è localizzato il realizzando terminal, può essere definito come settore di traversia principale il quadrante di nord-ovest (0° - 90° N) da cui spirano venti di Grecale (o Bora per l'alto Adriatico), mentre può essere indicato come settore di traversia secondaria il quadrante di sud-ovest (90° - 180° N), da cui spira il vento di Scirocco. Come si osserva dalla Figura 1 il fetch disponibile al vento di Scirocco corrisponde alla intera estensione del Mare Adriatico, delimitato a sud dallo Stretto di Otranto, per una lunghezza efficace di circa 750 km (circa 405 MN) lungo la direttrice in direzione 135° N.

Per memoria si rammenta, come il *fetch* rappresenti la lunghezza della superficie libera del mare su cui il vento è libero di spirare senza incontrare ostacoli, con velocità e direzioni relativamente costanti.

In queste condizioni, è stata una evidente necessità l'estensione del dominio di studio all'intero Mare Adriatico, dal Golfo di Venezia allo Stretto di Otranto, in modo da poter rappresentare correttamente lo sviluppo del moto ondoso in tutte le condizioni analizzate, pur se una tale scelta ha evidentemente reso più complicato lo sviluppo dello studio.

2.4 GRIGLIE COMPUTAZIONALI E BATIMETRIE ASSOCIATE

Il sistema delle griglie computazionali del modello Delft3D è composto di maglie quadrilatere a dimensione evidentemente variabile in funzione delle esigenze del calcolo idrodinamico, della tipologia e della precisione dei risultati attesi, oltre che della geometria del dominio stesso. La profondità delle celle corrisponde alla media ponderata dei fondali nella relativa superficie. Con maggior dettaglio, si osserva che l'area oggetto di studio è stata coperta da cinque tipi di griglie a diverse risoluzioni:

- La più estesa è la griglia n. 1, essendo composta da 121x130 celle ciascuna di dimensione 5x5 km che coprono l'intero mare Adriatico, con una superficie pari a circa 860 x 180 km². In tal modo è possibile simulare sia l'intero ciclo di maree caratteristiche dell'Adriatico che l'intero fetch per la formazione delle onde lungo la traversia di scirocco;

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

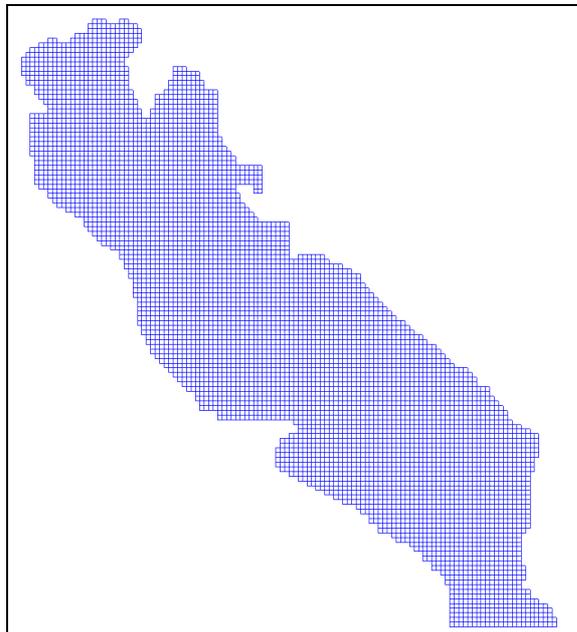


Figura 3: griglia n.1 – mare Adriatico

- La griglia n. 2 è invece composta da 122x106 celle di dimensioni 1000x1000 m per una superficie di 113 x 103 km², al fine di rappresentare con maggior dettaglio l'area dell'Alto Adriatico indicativamente dal golfo di Trieste a Ravenna. Come descritto in seguito, dando come condizione al contorno l'escursione di marea a Ravenna, combinata con i valori calcolati sull'intera superficie del mare Adriatico, il modello simula correttamente la corrispondente marea registrata a Venezia, dando così indicazioni confortanti sulla robustezza di quanto realizzato. Sulla calibrazione del modello, considerazioni di maggior dettaglio sono poste nel seguito della presente relazione;
- La griglia n. 3 è stata costruita appositamente per simulare la presenza della Laguna di Venezia con 207x219 celle di dimensioni 200x200 m. L'obiettivo dell'analisi non è ovviamente quello di simulare con dettaglio il regime delle correnti all'interno dell'area lagunare bensì considerare la Laguna come volume di scambio di modo da tenerne correttamente conto per i calcoli idrodinamici nel tratto di mare ad essa antistante fino all'area del terminal.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

Una tale valutazione sarà in particolare importante per quanto attiene la valutazione della diffusione di eventuali spanti di idrocarburi in corrispondenza del realizzando terminal off shore, sia per la corretta valutazione del relativo andamento, che per la comprensione della relativa evoluzione, in particolare per quanto riguarda la possibilità che tali contributi possano entrare nella Laguna di Venezia.

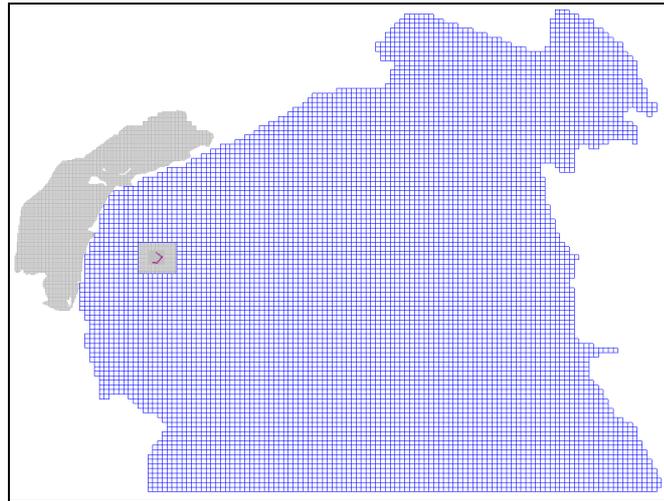


Figura 4: griglia n.2 – Alto Adriatico

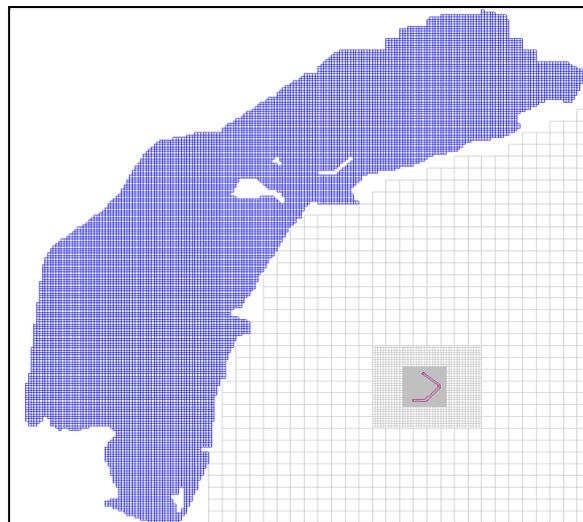


Figura 5: griglia n.3 – Laguna di Venezia

- Infine, per rappresentare la sola area del terminal sono state proposte ulteriori due griglie: la numero 4, con 42x37 celle di dimensioni 200x200 metri e la numero 5, con 322x342 celle di dimensioni medie 10x10 m. Quest'ultima copre un'area di 3.2x3.5 km corrispondente al

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

nuovo terminal con dimensione così ridotta delle celle per la necessità di dover schematizzare la geometria delle mantellate del nuovo porto. L'esigenza di scalare gradualmente la dimensione delle griglie è anche dettata dall'opportunità di evitare grandi variazioni nelle dimensioni delle griglie accostate, ad evitare potenziali instabilità di calcolo.

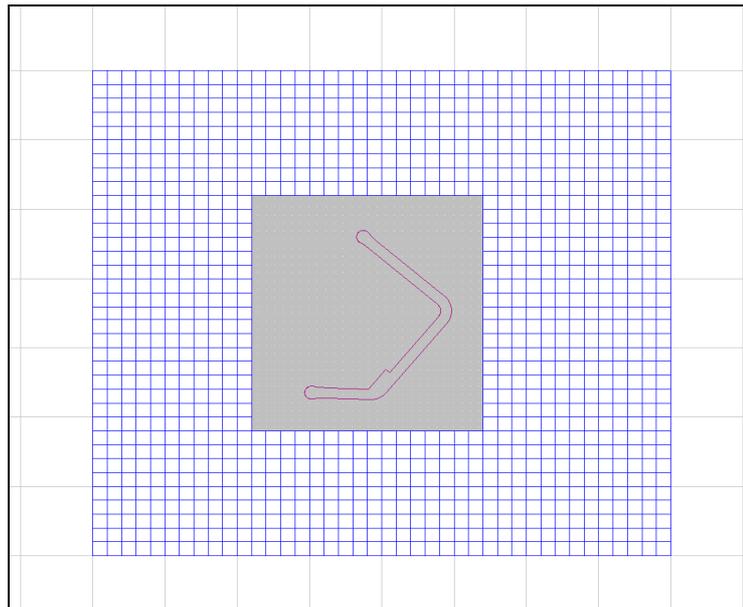


Figura 6: griglie n.4 e 5 – terminal offshore

Le cinque griglie, così costruite, vengono accoppiate con apposite funzioni del programma Delft 3D, che permette appunto di trasferire i valori calcolati, per una griglia al contorno di una o più griglie collegate alla prima.

Una tale funzione è fondamentale, in quanto consente di decomporre il dominio in più aree di interesse, potendo specificare per ciascuna di esse il livello di precisione richiesta con la variazione della misura delle celle.

È del tutto evidente, infatti, come non sia necessaria l'assunzione di una griglia di dettaglio su superfici ampie, per la sola generazione e propagazione al largo in acque profonde del moto ondoso. I fondali possono variare anche significativamente in valore assoluto all'interno della dimensione del lato della cella (5 km), rimanendo però su valori tali da non poter influenzare, in modo

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

apprezzabile, la propagazione del moto ondoso, per onde di ampiezza pochi metri, le cui caratteristiche continuano a rimanere quelle tipiche del moto ondoso in acque profonde.

Risulta invece necessario, per studiare il regime della velocità delle correnti, predisporre una griglia di dettaglio per l'area del terminal al fine di poterne rappresentare correttamente l'influenza sul regime idrodinamico. Dal momento che larghezza media della struttura è di circa 100 metri, si è deciso di predisporre la griglia di dettaglio (n. 5) con celle di dimensioni 10 m².

L'insieme delle griglie appena descritte è rappresentato nell'elaborato C5-DIS-021, qui rappresentato in Figura 7.

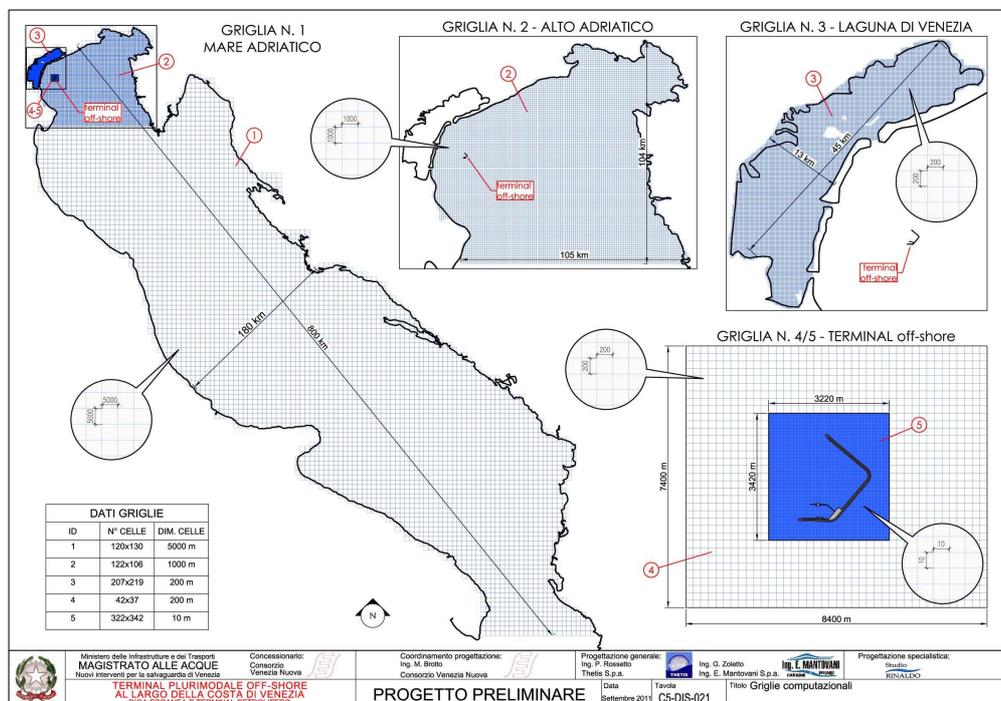


Figura 7: griglie computazionali

Per quanto concerne la Laguna di Venezia, si ritiene che la dimensione prescelta per le celle (200x200 m) consenta di rappresentarne correttamente le bocche di porto, che sono i canali di comunicazione tra laguna e mare, non dovendo rappresentare con dettaglio la morfologia lagunare per gli scopi di tale studio. Si d'ora occorre però segnalare come, per quanto attiene la diffusione degli spanti, sia stato necessario procedere anche ad una simulazione delle dighe foranee alle

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

bocche di porto, tenuto conto della relativa influenza, per quanto attiene l'idrodinamica degli scambi idrici fra mare e laguna.

Le batimetrie associate alle griglie appena descritte provengono da diverse fonti, in particolare sono state utilizzate:

1. Carte batimetriche dell'Adriatico Settentrionale e del mare Ionio in scala 1:750.000, edite dall'Istituto Idrografico della Marina nel 1970 e sistematicamente aggiornate;
2. Carta batimetrica dal Po di Goro a Punta Tagliamento in scala 1:100.000 dell'Istituto idrografico della Marina;
3. Carta della Laguna 2002 del Magistrato alle Acque di Venezia;

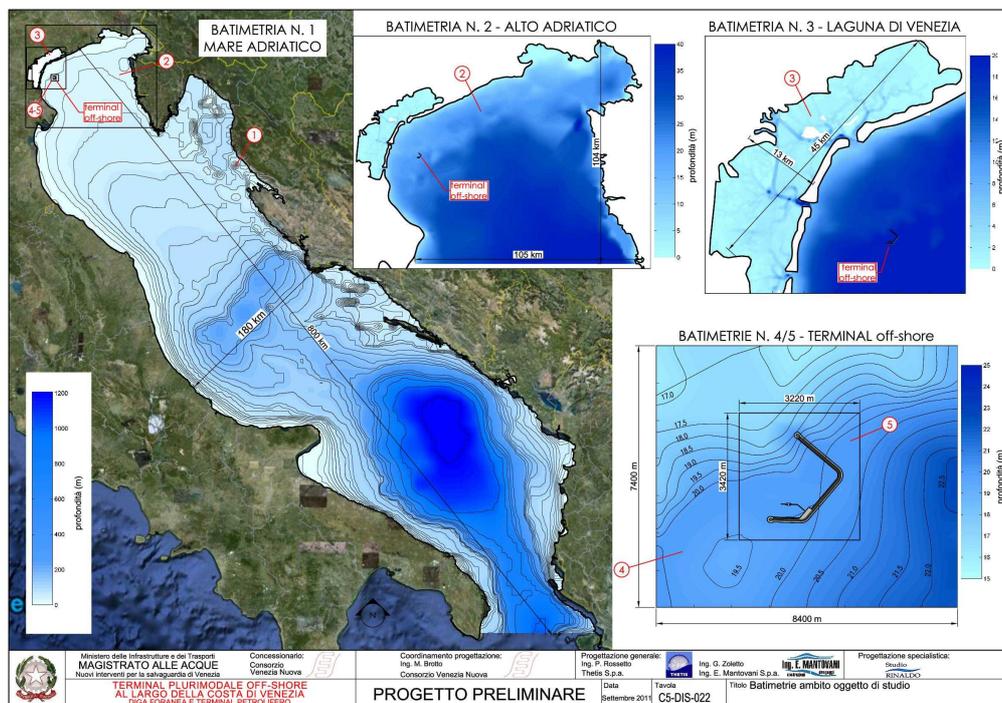


Figura 8: carte batimetriche

L'insieme delle carte batimetriche associate alle cinque griglie computazionali, descritte in precedenza, è rappresentato nella precedente Figura 8, dalla quale possono essere tratte le seguenti considerazioni:

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

1. Per quanto riguarda la batimetria n.1 si osserva che la porzione più profonda del mare Adriatico è situata nella sua parte meridionale, con valori che arrivano fino a 1200 metri nella zona compresa, fra la costa pugliese e quella albanese;
2. La carta batimetrica associata alla griglia n.2 rappresenta l'area dell'alto mare Adriatico, con profondità oscillano tra 0 e 40 metri;
3. La carta delle profondità relativa alla Laguna di Venezia (batimetria n.3), rappresenta con sufficiente precisione i canali principali dello specchio lagunare ed anche la rete secondaria. Certamente non vi è sufficiente precisione nella rappresentazione dei ghebi e delle strutture morfologiche, ma dal momento che il modello è stato costruito per simulare le condizioni idrodinamiche nell'area del nuovo terminal offshore, tale livello di precisione è giudicato idoneo, non essendo richiesto in questa sede valutazioni sull'evoluzione morfologica della laguna, per cui sarebbe necessaria evidentemente una griglia molto più accurata;
4. La batimetrie associate all'area del terminal (batimetrie n. 4/5) mostrano che l'escursione dei fondali varia tra le profondità di 15 e 25 metri. In particolare la struttura portuale in via di realizzazione garantisce fondali di almeno 20 metri nello spazio acqueo di pertinenza.

3 CALIBRATURA DEL MODELLO

Al fine di verificare le capacità predittive del modello è necessario operare una fase di calibratura, per verificare, ed eventualmente correggere, i numerosi parametri introdotti nella fase di realizzazione. Va da sé, infatti, che in assenza di una tale verifica i risultati ottenibili saranno affetti da un'alea di incertezza, in merito alla relativa rappresentatività degli eventi reali. Di fatto la calibrazione, come in dettaglio qui di seguito illustrato, consiste nella simulazione di uno o più eventi noti, in modo da poter valutare la significatività delle differenze fra i valori misurati e quelli calcolati.

Dopo aver definito le griglie computazionali e le relative batimetrie come descritto in precedenza, sono state effettuate diverse simulazioni di prova mediante il modulo Delft3D FLOW, della durata di otto giorni consecutivi, imponendo come condizione al contorno una sequenza temporale di livelli di marea in vari punti della griglia n.1, corrispondente all'intero mare Adriatico. In particolare è stata imposta come condizione al contorno l'escursione di marea registrata ad Otranto

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

ed a Ravenna nell'intervallo di tempo compreso tra il 9 ed il 17 ottobre 2010. Tale sequenza di giorni è stata scelta avendo avuto modo di verificare come nel suddetto periodo non vi fossero stati eventi meteorologici apprezzabili, attesa l'influenza della pressione atmosferica sull'andamento delle maree astronomiche.

Sono stati a tal fine reperiti le rilevazioni ufficiali della Rete Mareografica Nazionale (RMN) per le stazioni sopra indicate. Viene dunque preso in considerazione, come grandezza obiettivo della calibrazione, il livello di marea calcolato nel nodo della griglia computazionale corrispondente alla stazione mareografica di Venezia (diga sud della bocca di porto di Lido) per l'intervallo di tempo sopra indicato. Nella seguente Figura 9 viene riportato il confronto tra i livelli di marea misurati dalla stazione mareografica ed i livelli calcolati con il modello.

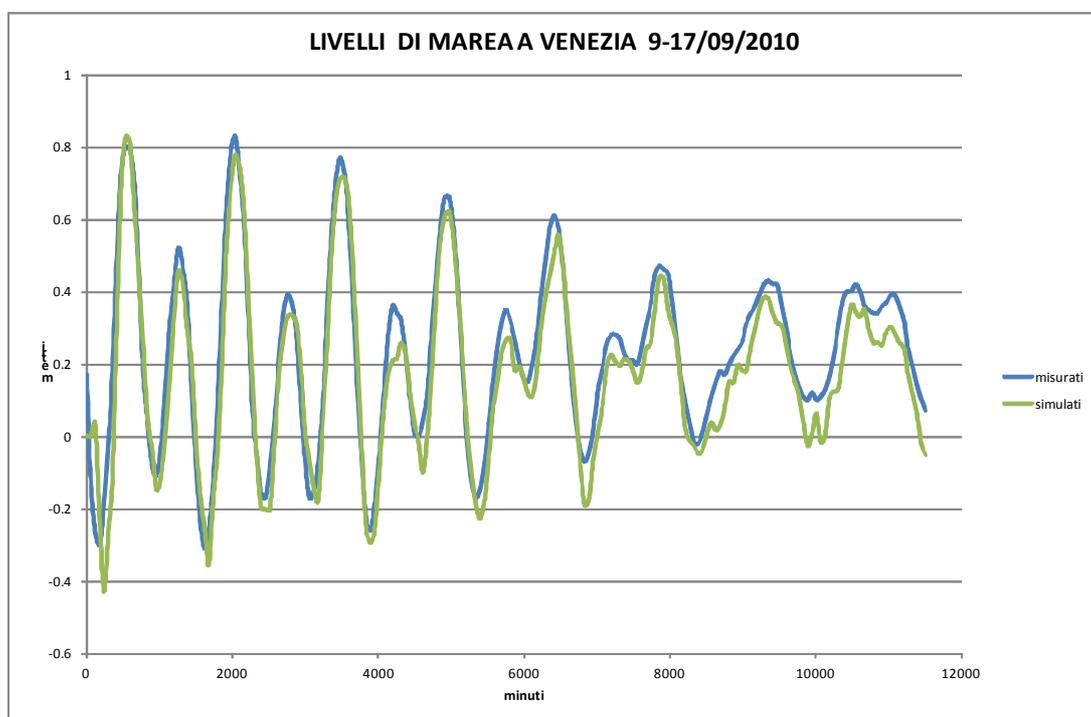


Figura 9: confronto tra livelli di marea misurati e calcolati da modello per la stazione di Venezia

Il confronto dei livelli simulati dal modello (in blu nella precedente Figura 9) con quelli effettivamente misurati nei medesimi giorni dalla stazione di Venezia della RMN (in verde nella medesima figura), dimostrano che il modello simula correttamente l'andamento delle caratteristiche idrodinamiche nell'area di indagine, essendo ben simulata la sequenza delle fasi di crescita e calo, con una più che buona rappresentazione dei relativi valori sui cavi e sulle creste.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

Sulla base di tali risultati, si può ritenere che il modello così impostato sia idoneo per una corretta simulazione degli obiettivi citati nelle premesse della presente relazione.

4 IL MOTO ONDOSO

Come definito in precedenza, lo studio del moto ondoso nel dominio di indagine viene effettuato mediante il modulo Delft 3D WAVE, basato sul modello matematico SWAN per la simulazione di onde corte.

Scopo di questa prima fase di studio è duplice:

- la valutazione delle condizioni meteomarine estreme, anche al fine di disporre dei dati meteomarini del moto ondoso necessari al dimensionamento delle opere;
- l'analisi del moto ondoso residuo all'interno della zona protetta del terminal plurimodale, ai fini della valutazione delle condizioni di operatività del terminal stesso. Le opere portuali di difesa dal moto ondoso consistono in una diga a scogliera in massi e pietrame, estesa complessivamente 4100 m, costituita da tre tratti lunghi circa 1470 m, 1530 m, 810 m rispettivamente a protezione dei settori di Bora (NE) di Scirocco (SE) e di Libeccio (SO). Si osserva al riguardo, come il porto non preveda protezione dai venti provenienti dal quadrante di nord-ovest, essendo prevista da questo lato l'imboccatura di accesso ai moli ed agli attracchi. Oggetto di indagine è dunque l'effetto di moto ondoso residuo provocato dalla generazione, propagazione e diffrazione delle onde provenienti dal largo e che investono il terminal.

4.1 REGIME METEOMARINO DELL'AMBITO OGGETTO DI INTERVENTO

Il nuovo terminal offshore, ubicato poche miglia al largo della laguna di Venezia di fronte alla bocca porto di Malamocco, è caratterizzato da un settore di traversia geografico delimitato da:

- il confine fra Veneto e Friuli Venezia-Giulia a nord-est, con un'estesa di circa 50 km;
- la costa veneta nel settore settentrionale ed in particolare il cordone litoraneo che delimita a mare la laguna di Venezia, posto ad una distanza dal nuovo terminal di circa 15 km;

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

- il promontorio di Punta della Maestra nel settore sud-occidentale, ad una distanza di circa 36 km;
- il settore sud-orientale invece, esposto alla traversia di Scirocco, non è di fatto delimitato da coste e presenta i valori massimi dei fetch geografici, essendo il relativo limite costituito dalla costa albanese ubicata a circa 750 km dall'ambito qui oggetto di studio.

Nella Figura 1 riportata nel cap. 1 è contenuta la rappresentazione del fetch geografico disponibile, i cui valori maggiori sono disposti lungo la direzione parallela all'asse del Mar Adriatico (circa 130-140°N). Per quanto attiene il fetch efficace, per il nuovo terminal off-shore, il valore massimo si ottiene in corrispondenza del settore direzionale compreso tra i 100°N ed i 170°N.

Per quanto attiene il regime meteomarinico del paraggio ove sorgerà il nuovo terminal, occorre evidenziare come nelle relative prossimità insista la stazione della torre CNR, dove è in funzione una stazione ondometrica sin dal 1987. Analizzando le registrazioni del periodo intercorso fra il giorno 1/11/1987 ed il 31/10/2007, per una durata totale quindi di 20 anni, è stato possibile dare corso alla relativa analisi statistica, attesa la durata delle misurazioni, di entità tale da poter ritenere significativo il campione a disposizione. Il riferimento per i dati di vento per ambiti più ampi del paraggio della laguna di Venezia è invece l'Atlante del vento e delle Onde del Mediterraneo (MEDATLAS), realizzato da Thetis S.p.A. in collaborazione con CNR - ISMAR, Communication and Systems, National Technical University of Athens, Meteofrance e Semantic.

È stato così possibile determinare la distribuzione degli eventi di moto ondoso per classi di direzione e altezza d'onda significativa (dati Consorzio Venezia Nuova – Servizio Informativo): nella seguente Figura 10 è contenuto il diagramma polare delle registrazioni del moto ondoso incidente alla torre CNR. Prevalente, per intensità e frequenza, è il settore di traversia di bora (30°-90° N), pur se, in considerazione del regime degli stati di mare registrati, è possibile individuare un settore di traversia secondario, nell'intervallo angolare 90°N-160°N (Scirocco).

Dall'osservazione di tale grafico possono essere poste alcune considerazioni a commento:

- complessivamente il 57% degli stati di moto ondoso hanno altezza d'onda significativa inferiore a 0.5 m;
- gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 0,5 m provengono per il 51,71% dal settore di traversia principale, per il 34,88% dal settore di traversia secondario e per il

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

rimanente 13,41% dalle altre direzioni, principalmente da nord ovest (Libeccio, detto anche Garbin in dialetto veneto).

- Ovviamente, avendo a disposizione una serie di eventi su base statistica, è possibile valutarne anche la regolarizzazione degli eventi estremi, che caratterizza i due settori di traversia, ed associando un determinato tempo di ritorno all'altezza d'onda significativa, rappresentativa del colmo della mareggiata (Tabella 1). Per memoria, si rammenta come con la dizione di 'onda significativa' H_s si intenda la media aritmetica del terzo superiore della distribuzione in frequenza del gruppo d'onde, ipotizzata pari alla distribuzione statistica di *Rayleigh*. Interessante osservare come l'ordine di grandezza delle onde incidenti, con tempo di ritorno 50 anni, sia prossimo al valore di quattro metri, sia per la traversia principale, che per quella secondaria.

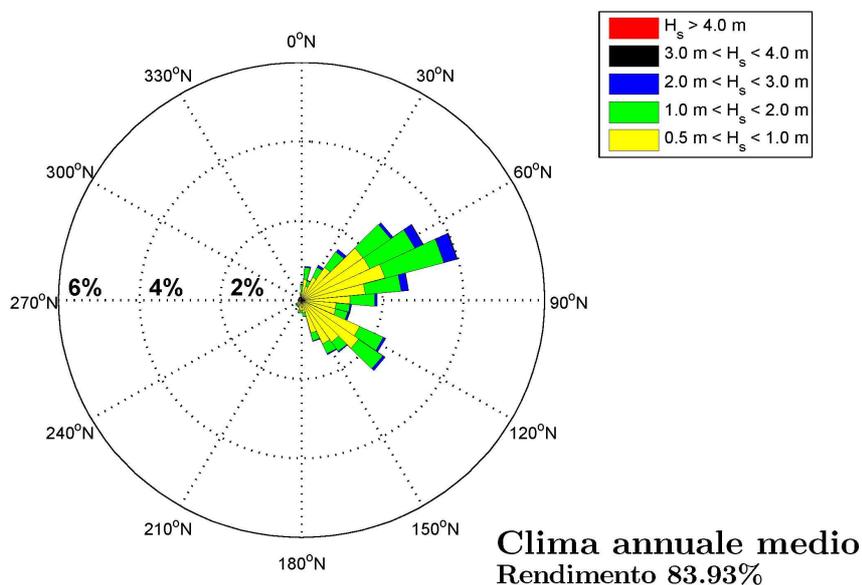
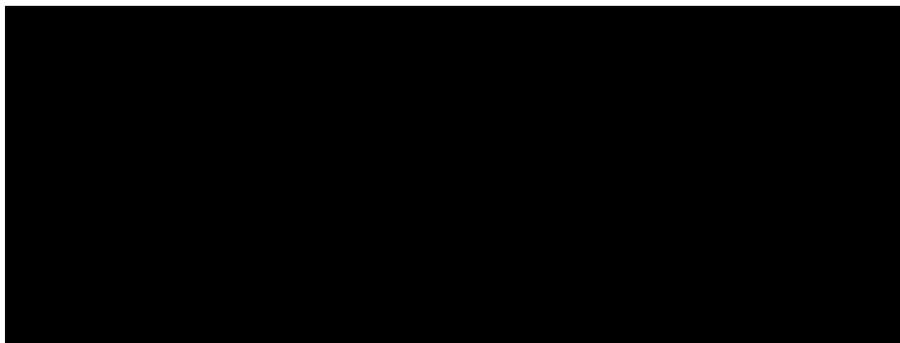


Figura 10: rosa di distribuzione media annua degli eventi di moto ondoso a largo di Venezia



TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

Tabella 1. Valori estremi di altezza d'onda significativa in funzione del tempo di ritorno.

Per completezza, qualche considerazione va posta anche per quanto attiene il regime dei venti, sulla base della serie storica a disposizione (registrata alla stazione RMN di Lido diga Sud), dei dati di vento (modulo e direzione di provenienza) dal 26/06/1998 al 31/12/2009. Il rendimento dell'anemometro, nel periodo di misurazione è risultato pari all'84.34%.

Nel suddetto periodo, i venti prevalenti per intensità e frequenza provengono sempre dal settore di bora (0-120°N), dopo i quali vanno considerati quelli provenienti dalla traversia di scirocco (120-240°N). Non appare però trascurabile a priori il settore di libeccio (330° N), pur se in presenza di un fetch assolutamente limitato, in quanto delimitato dal cordone litoraneo della laguna di Venezia.

In Figura 11 è rappresentata la distribuzione degli stati di vento su base annua, suddivisi per classi di velocità e direzione, da cui si può osservare che:

- il regime anemometrico annuale presenta una incidenza percentuale di eventi con intensità inferiore a 2,0 m/s pari a circa il 20%;
- gli eventi caratterizzati da un'intensità superiore a 7,0 m/s provengono per il 40% dal settore 0°-120°N, per il 25% dal settore 120°-240°N e per il rimanente 35% dalle altre direzioni. La direzione prevalente di provenienza è NE (Bora).

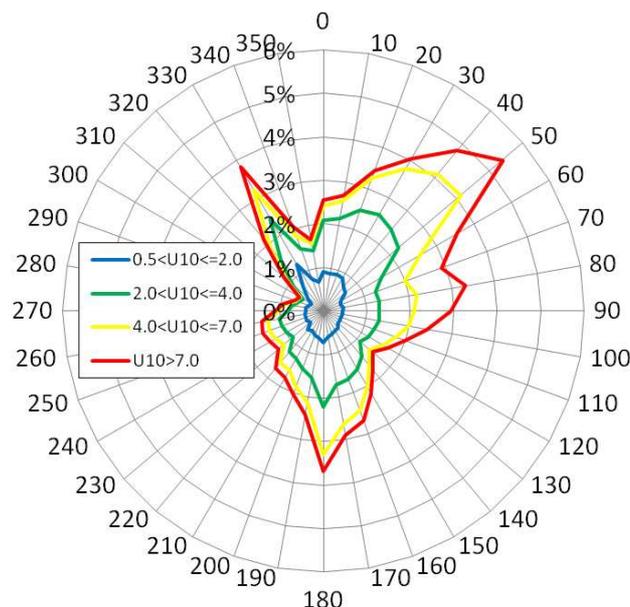


Figura 11: rosa di distribuzione media annuale del vento in corrispondenza alla diga Sud di Lido.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

4.1.1 Dati di vento di base per le simulazioni

Come citato in precedenza, il riferimento per i dati di vento, per ambiti più ampi del paraggio della laguna di Venezia, è costituito dall'*Atlante del vento e delle onde del Mediterraneo* in precedenza citato, di cui si riportano di seguito in Figura 12, i punti di calcolo delle elaborazioni statistiche. Di tutta evidenza, come si abbia a disposizione una ampia gamma di dati, in grado di fornire una completa caratterizzazione del regime dei venti nell'area, persino sovrabbondante rispetto ai limiti del fetch del nuovo terminal off shore.



Figura 12: punti di calcolo dell'atlante MEDATLAS

In particolare, per quanto riguarda il Mare Adriatico (cfr. Figura 13) sono stati considerati 17 punti, per i quali sono disponibili le tabelle bivariate di frequenza delle seguenti coppie di parametri:

- velocità e direzione del vento;
- altezza d'onda e velocità del vento.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0



Figura 13 punti di calcolo MEDATLAS nel mare Adriatico

Al fine di caratterizzare il regime dei venti caratteristico del mare Adriatico, sono state considerate le tabelle, che correlano la velocità alla direzione del vento, a partire dalle quali sono stati realizzati i diagrammi polari di seguito riportati da Figura 14 a Figura 30. In ciascuno di detti diagrammi, uno per tutti i 17 punti di misura ubicati nel mare Adriatico, è possibile osservare per ogni direzione la frequenza percentuale di ciascun intervallo di velocità, da 0 a 20 m/s. Una tale analisi riveste una significativa importanza in particolare per i venti provenienti dalla traversia secondaria (Scirocco), attesa la necessità di capire se i valori massimi della velocità del vento alla bocca di Lido debbano essere considerati contemporaneamente validi, anche per l'intera superficie del fetch. È circostanza nota, infatti, la tendenza del vento a diminuire progressivamente la propria intensità, lungo la direzione su cui soffia. Basti al riguardo considerare, a titolo di esempio, le differenze nella velocità del vento di bora fra Trieste e Venezia, per non dare per scontato che la velocità del vento possa essere ritenuta un valore costante a priori, su superfici ampie come quella in esame.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

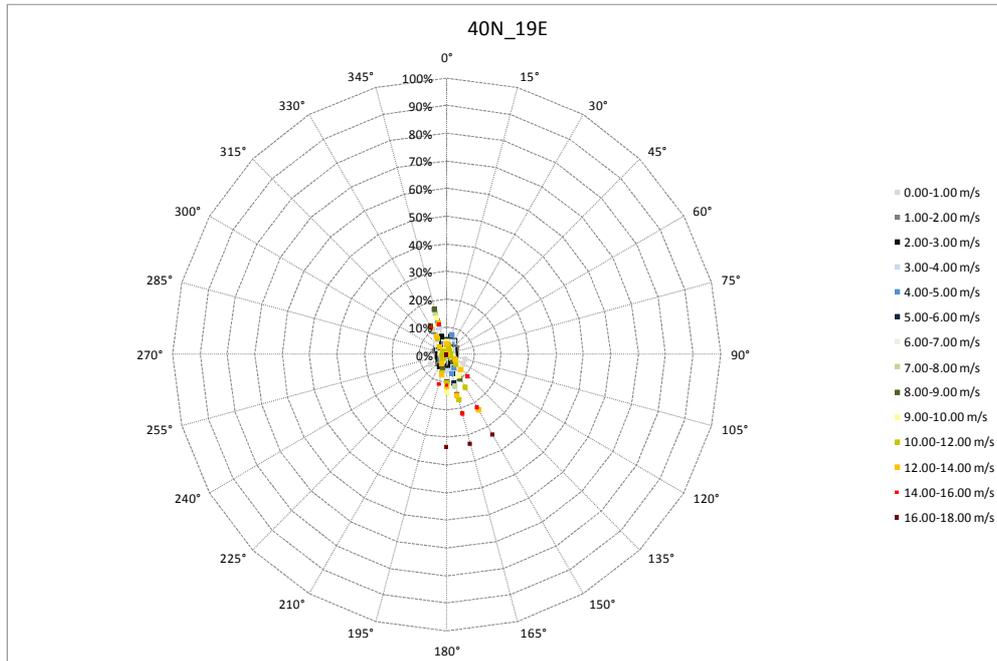


Figura 14: stazione 40N_19E

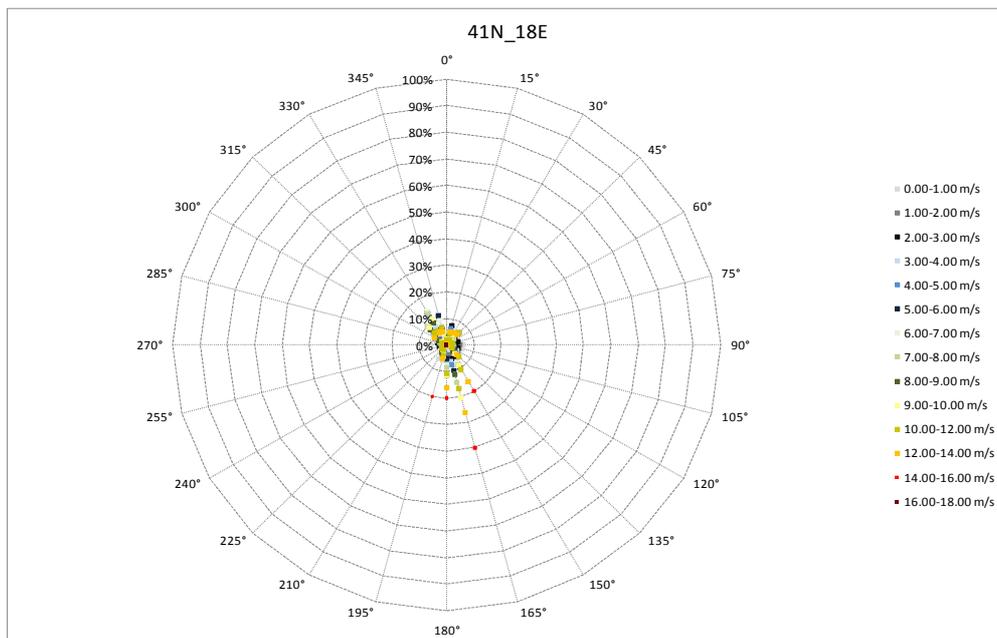


Figura 15: stazione 41N_18E

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

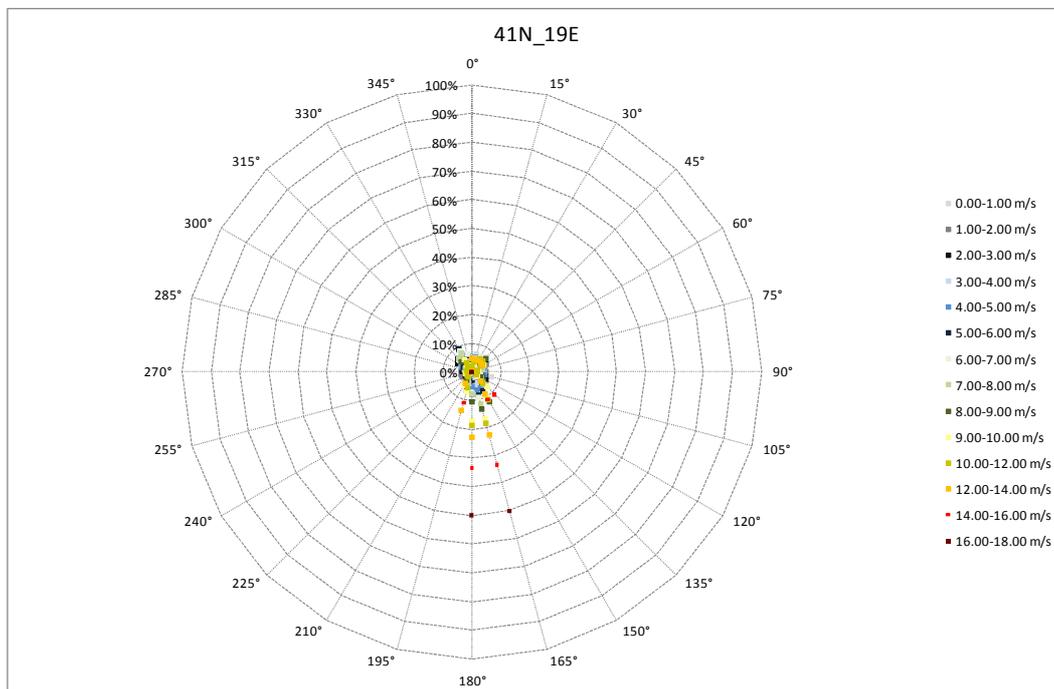


Figura 16: stazione 41N_19E

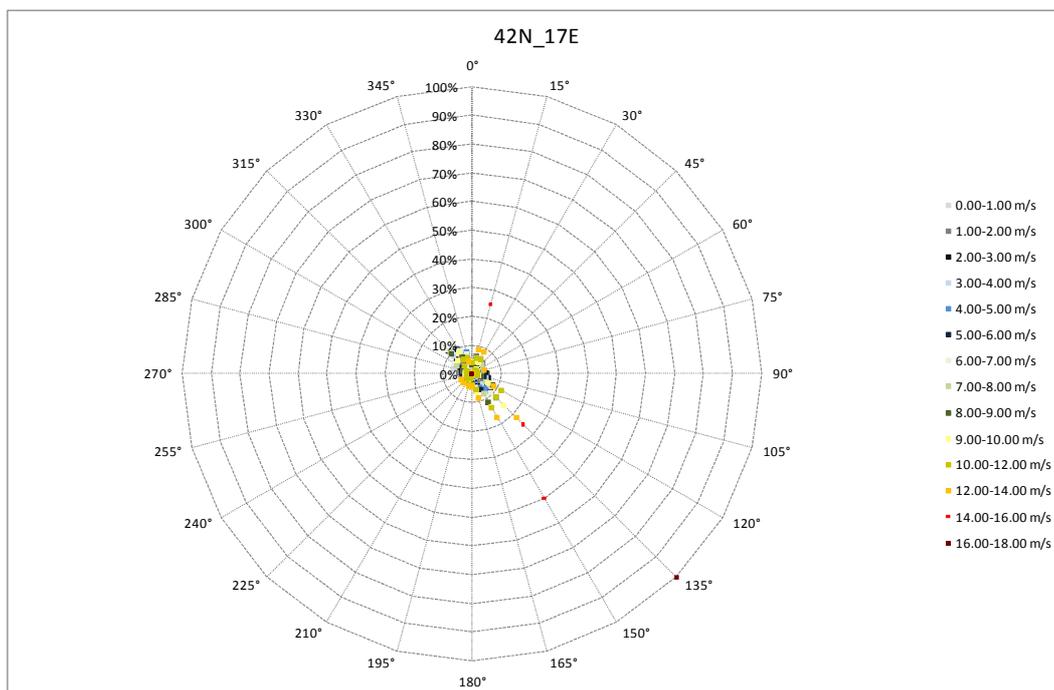


Figura 17: stazione 42N_17E

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

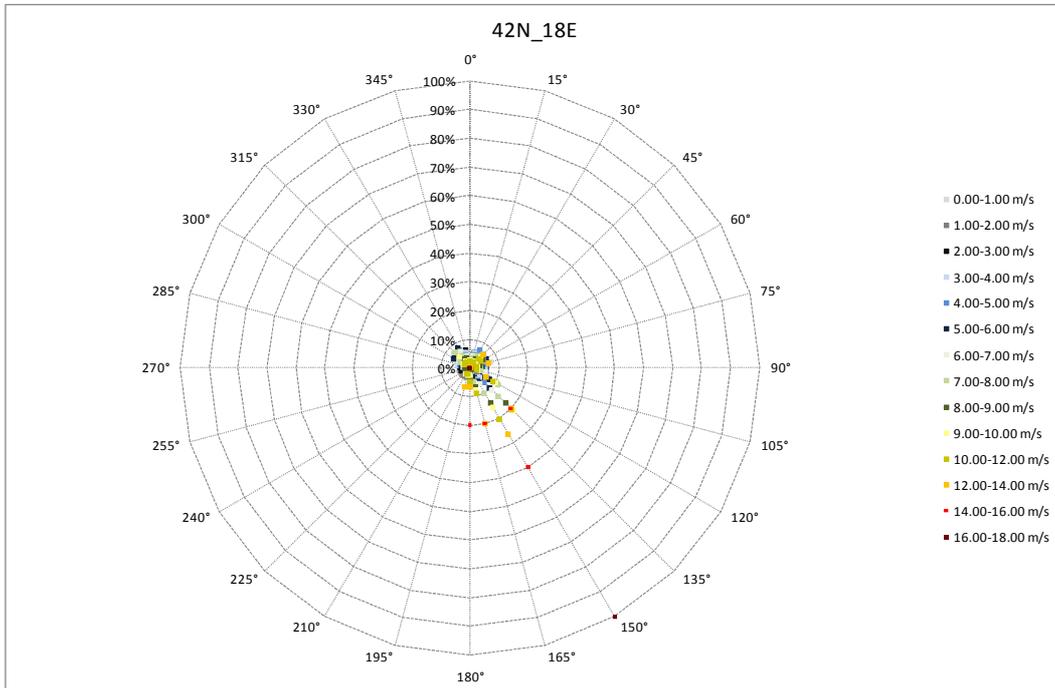


Figura 18: : stazione 42N_17E

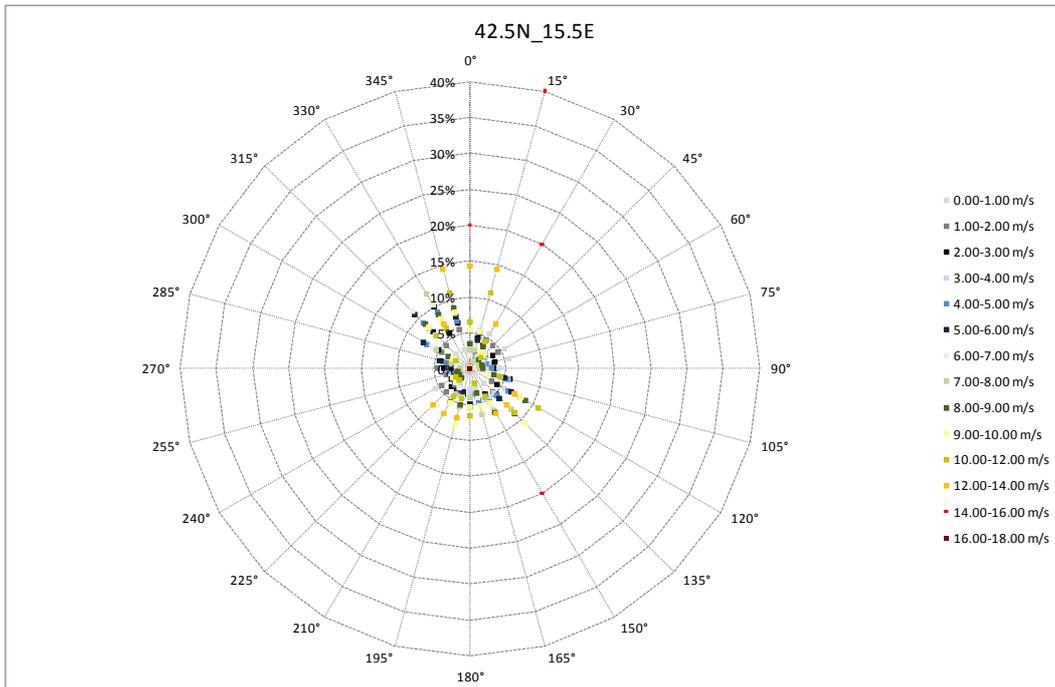


Figura 19: stazione 42N_15.5E

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

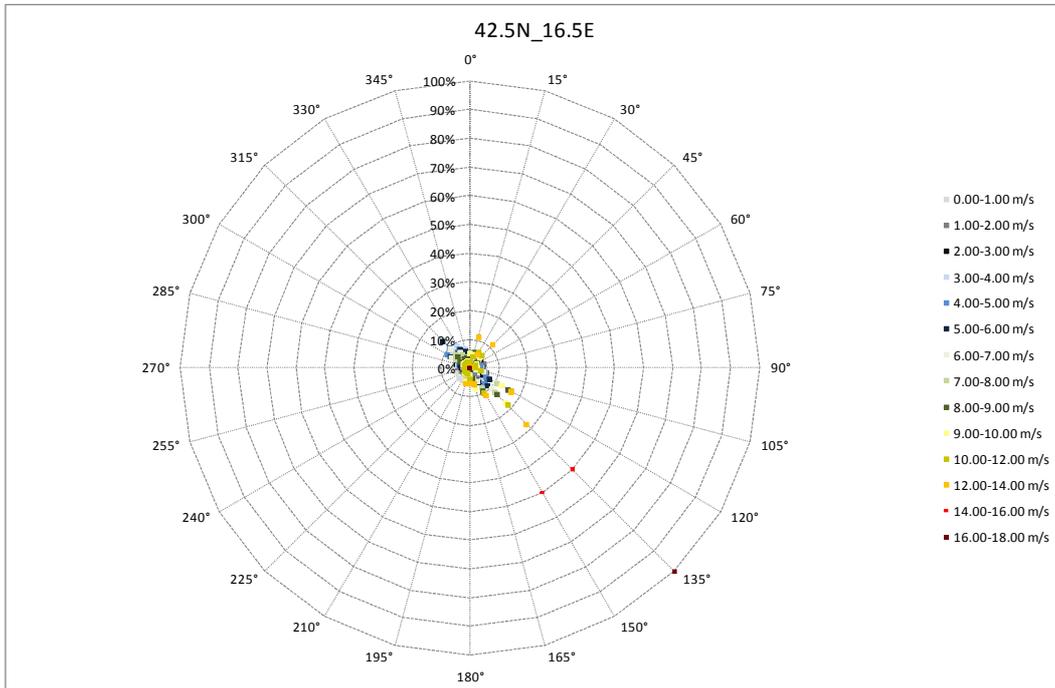


Figura 20: stazione 42.5N_16.5E

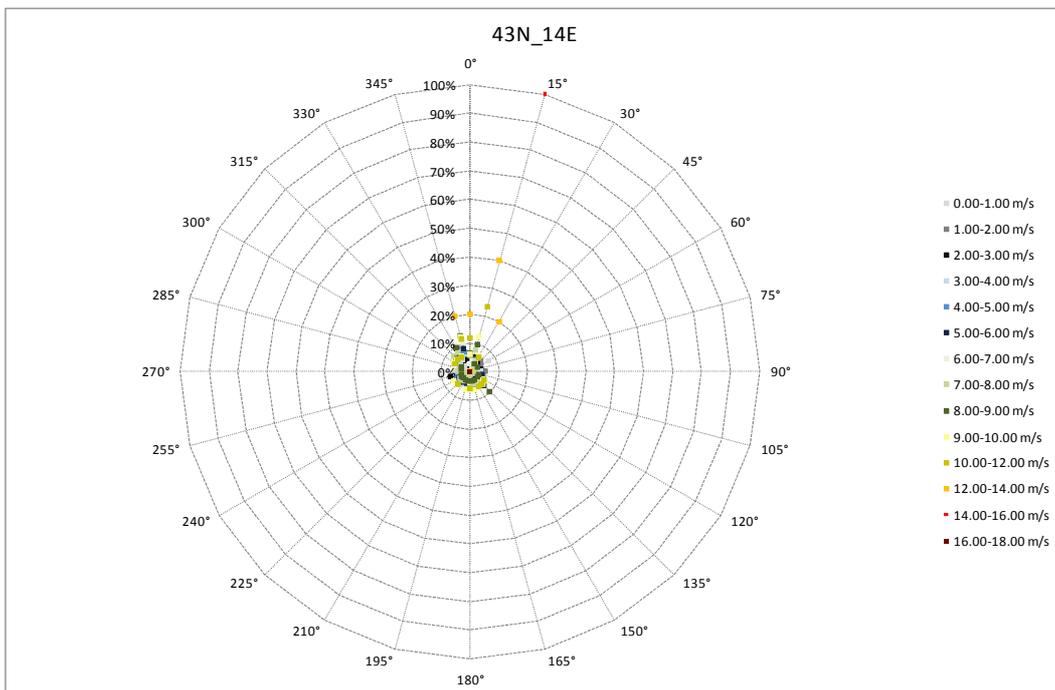


Figura 21: stazione 43N_14E

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

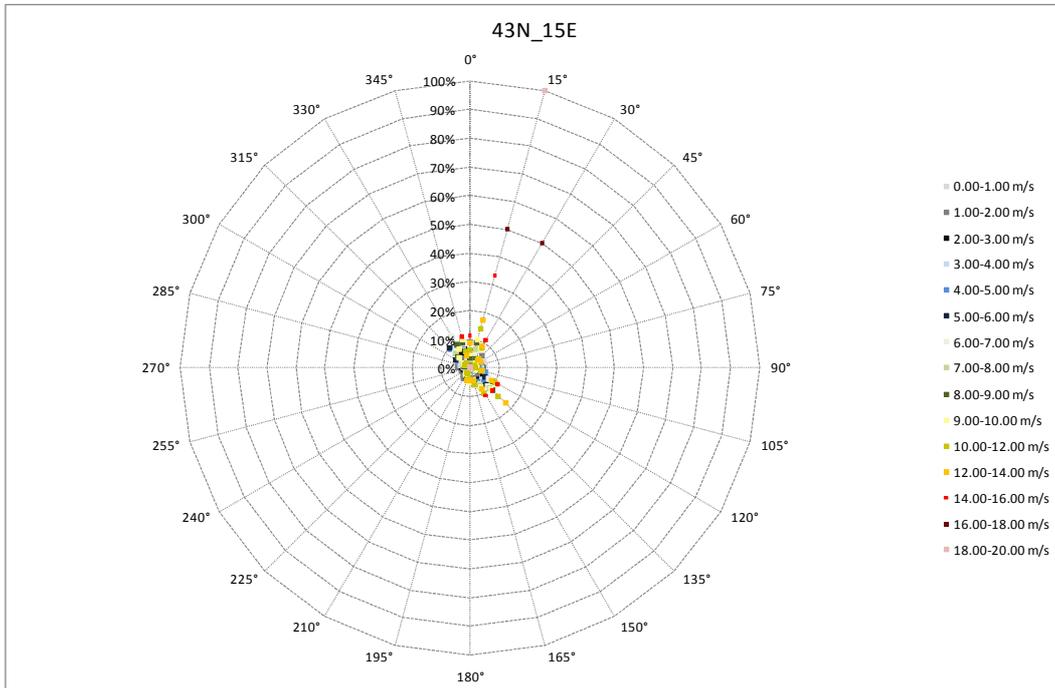


Figura 22: stazione 43N_15E

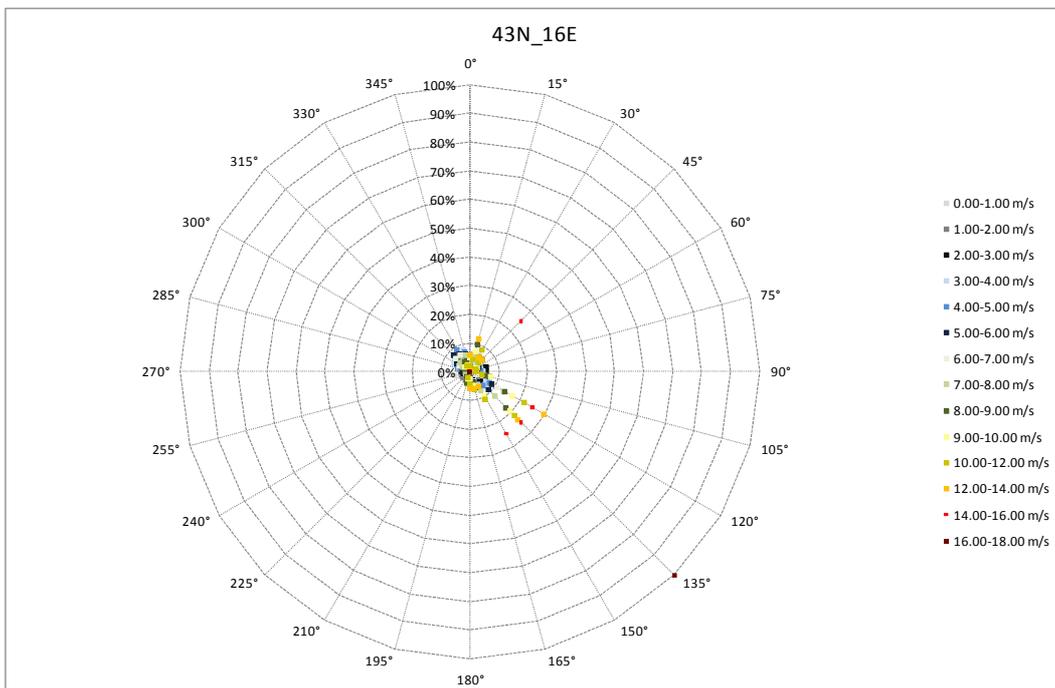


Figura 23: stazione 43N_16E

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

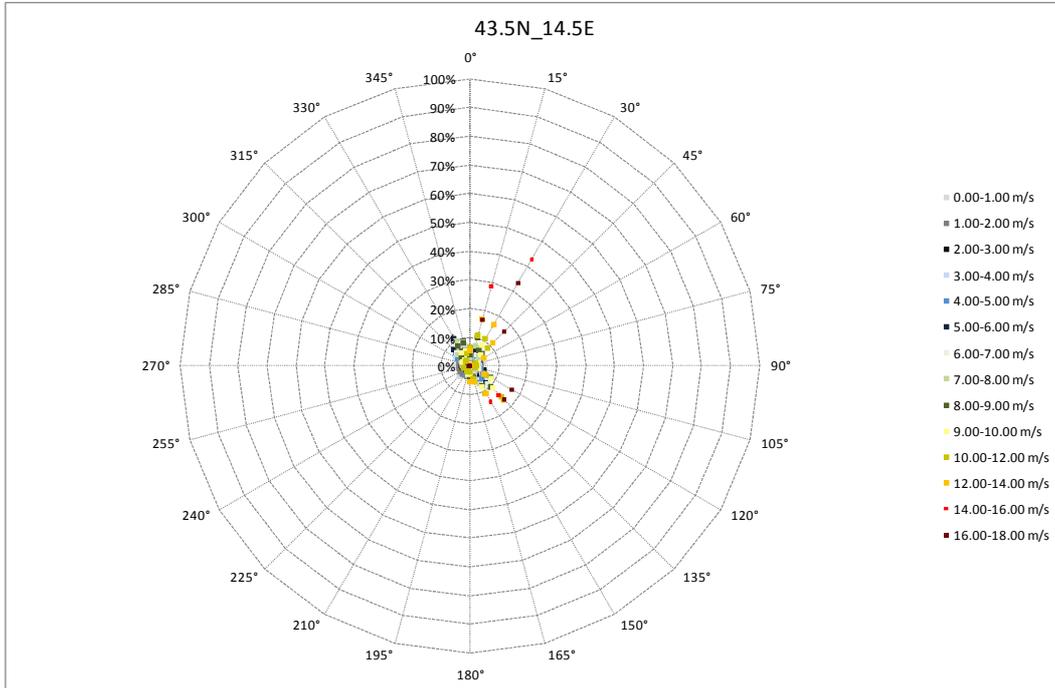


Figura 24: stazione 43.5N_14.5E

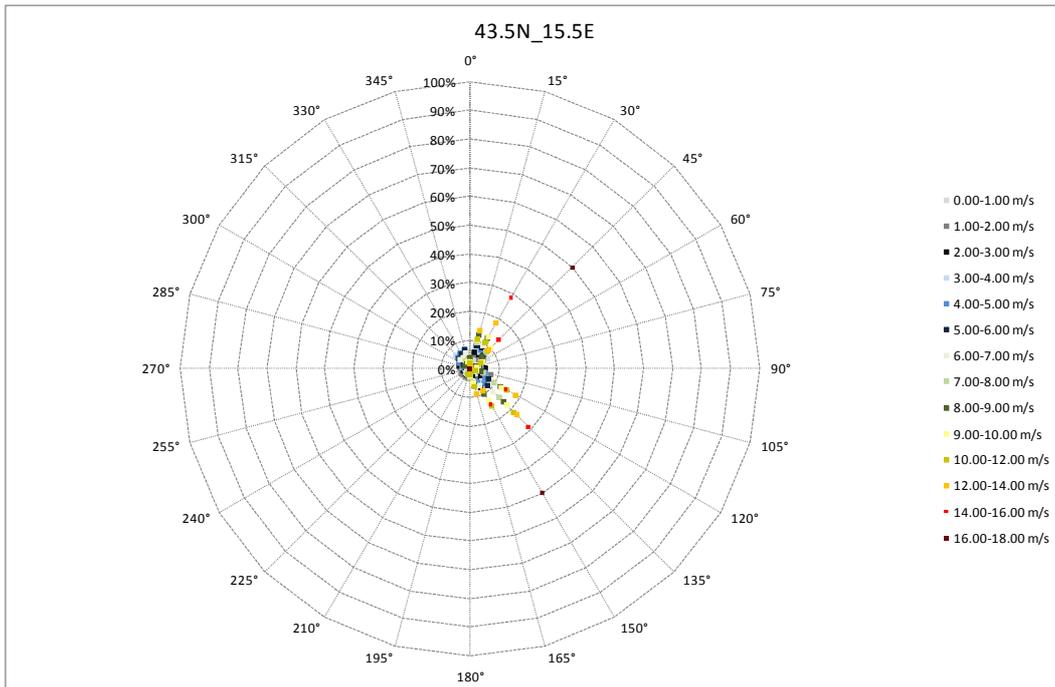


Figura 25: stazione 43.5N_15.5E

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

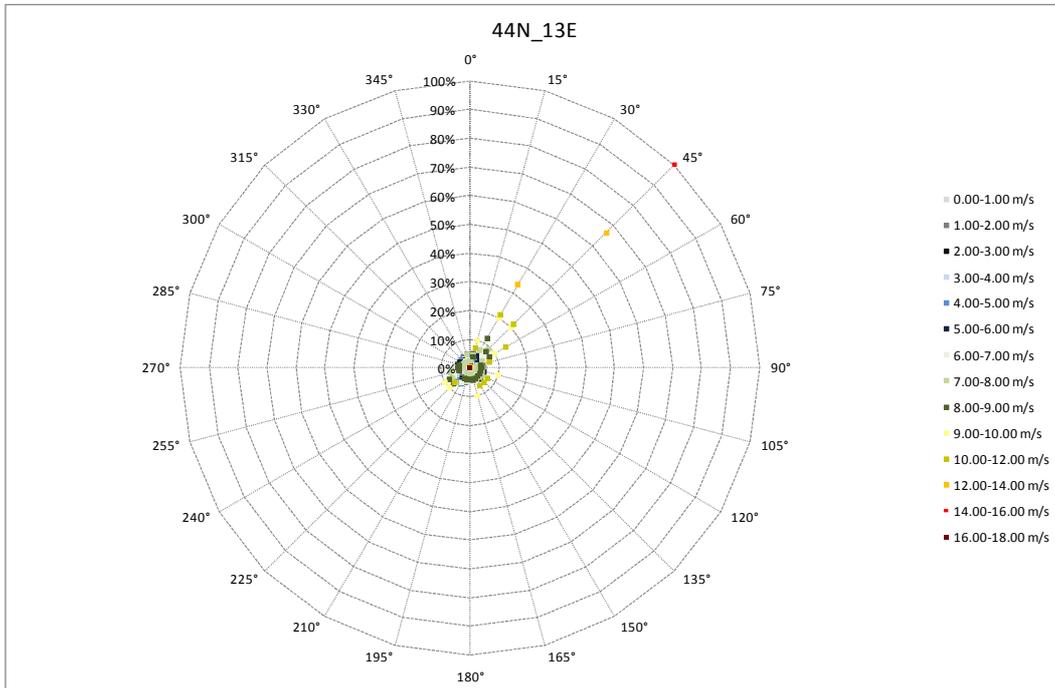


Figura 26: stazione 44N_13E

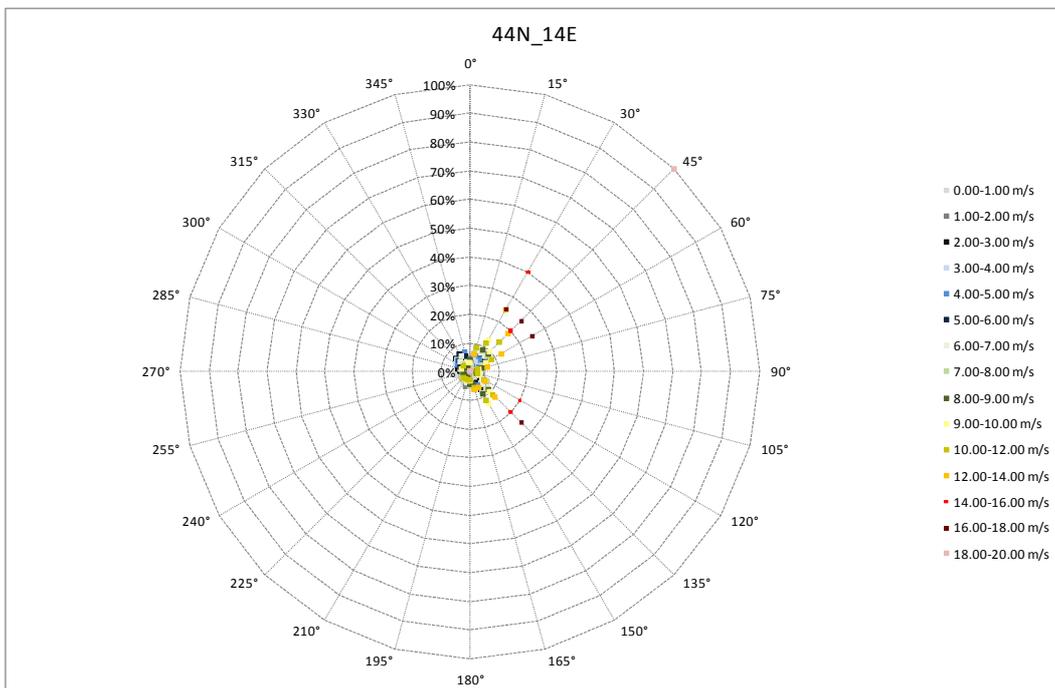


Figura 27: stazione 44N_14E

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

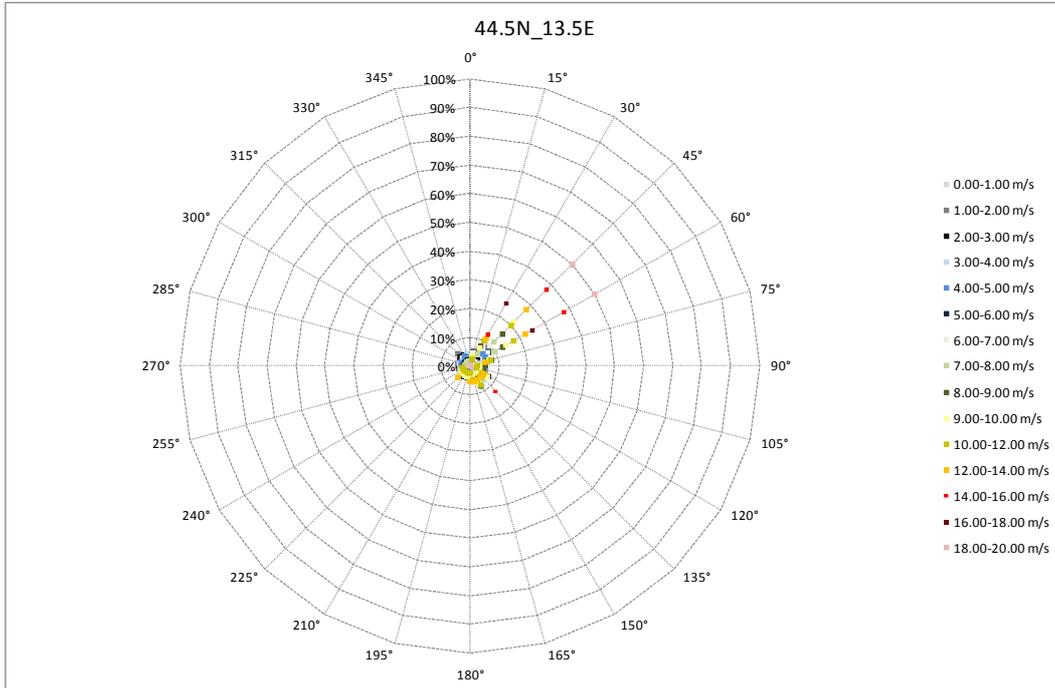


Figura 28: stazione 44.5N_13.5E

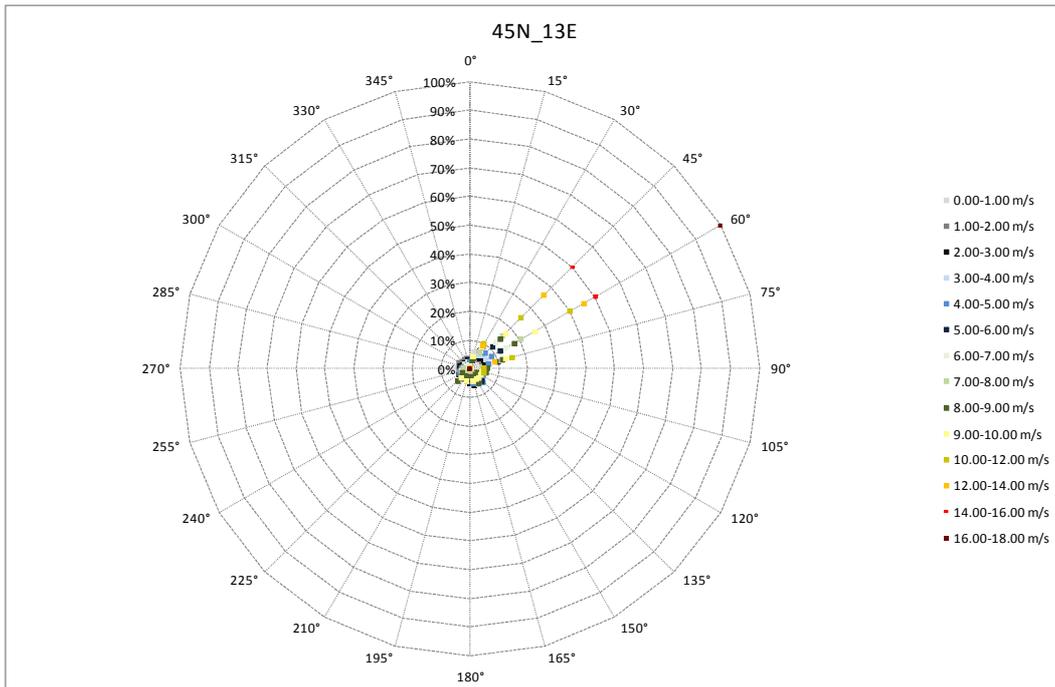


Figura 29: stazione 45N_13E

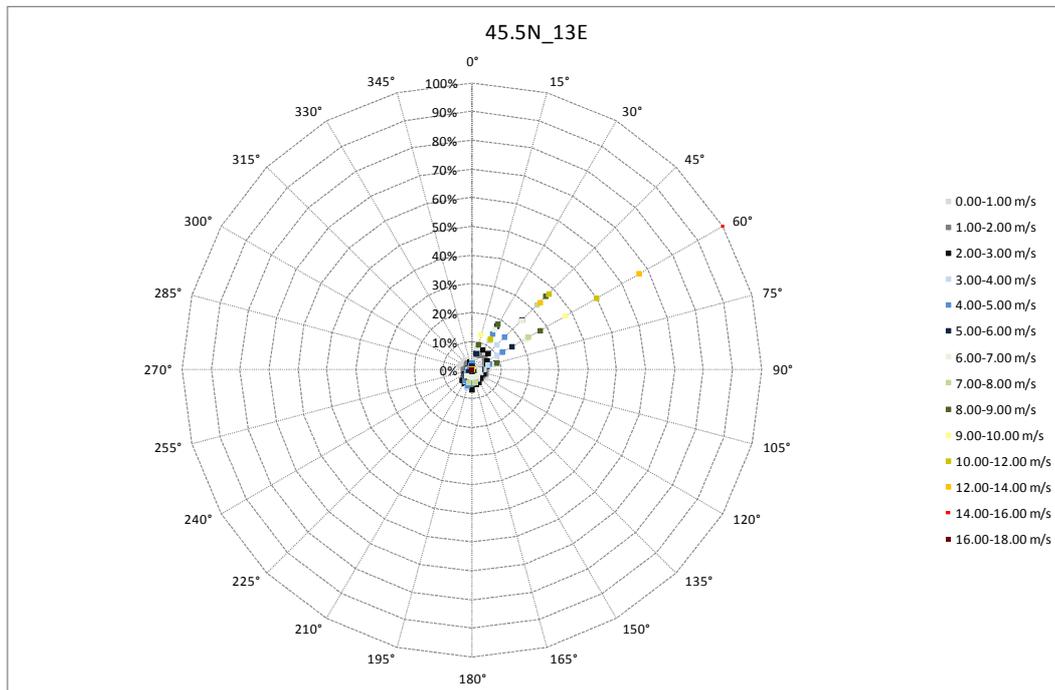


Figura 30: stazione 45.5N_13E

Dai dati rappresentati si osserva, come sia ragionevole attendersi diversi comportamenti nel regime anemometrico, a seconda della zona del mare Adriatico, a cui i relativi dati si riferiscono. In particolare:

- per quanto riguarda i punti localizzati nella parte meridionale dell'Adriatico, indicativamente compresi nella fascia di latitudine 40°-42°N, si osserva che nel quadrante di sud-est, corrispondente al vento di scirocco con direzione 135°-160°, si registrano con maggior probabilità i venti con le velocità maggiori, raggiungendo in alcuni casi, valori massimi di 16-18 m/s;
- nella parte centro settentrionale del Mare Adriatico, corrispondente a latitudini fino a 45°N in prossimità della Laguna di Venezia, è nel quadrante di nord-est (30°-60°) che si registrano, con probabilità più alte, venti con velocità che raggiungono anche valori dell'ordine dei 20 m/s;
- nei punti di calcolo più vicini all'area di progetto, risulta significativa anche la presenza dei venti di libeccio, quadrante nord-ovest 300°, con registrazioni che arrivano anche ad 8-10 m/s.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

Tutti i suindicati valori delle velocità del vento verranno applicati all'intero campo di moto, pur se si sarebbe anche potuto considerare valori in qualche misura maggiori per i venti incidenti nella porzione meridionale del mare Adriatico, quantomeno per la traversia di scirocco. La valutazione dei risultati con vento non costante sul campo di moto potrebbe costituire un approfondimento, che comunque potrà essere effettuato nei successivi sviluppi progettuali, potendo ragionevolmente ritenere che le differenze possibili, rispetto ai dati qui calcolati, non siano significative. Una tale valutazione, di fatto una anticipazione dei risultati ottenuti, è dettata anche dall'osservazione delle registrazioni dei campi di moto effettuate presso la torre CNR, che forniscono dei valori assolutamente confrontabili, con quelli qui di seguito calcolati.

Sulla base delle succitate analisi statistiche possono essere tratte importanti considerazioni al fine di impostare correttamente le analisi di moto ondoso nell'area di studio:

- i venti dominanti e regnanti (ovvero massimi per frequenza ed intensità) per il paraggio antistante la Laguna di Venezia sono quelli provenienti dal settore di Bora (NE);
- il fetch geografico massimo disponibile è quello della traversia secondaria di Scirocco (SE), con una lunghezza di circa 750 km, tuttavia è possibile da un lato che il moto ondoso si sviluppi totalmente con un fetch efficace minore (per mareggiate di durata limitata) e dall'altro che durante una mareggiata anche molto prolungata il vento non sia costante in direzione ed intensità sull'intero fetch geografico, riducendo anche in questo caso il fetch efficace;
- i settori di traversia di Libeccio (SO) e di Maestrale (NO), nonostante siano caratterizzati da venti poco intensi e frequenti, non sono trascurabili a prescindere, in quanto il terminal portuale presenta una minore protezione al moto ondoso proveniente da questi settori;
- l'analisi delle condizioni estreme del moto ondoso incidente non è sufficiente ad una completa caratterizzazione delle condizioni meteomarine nel terminal, ma si rende necessario anche verificare se condizioni meno gravose, ma con maggiore frequenza annua, influiscano sull'operatività del porto.

Per valutare le condizioni più gravose, a cui l'opera può essere soggetta, sono stati simulati eventi reali, imponendo come condizioni al contorno intensità di vento con bassissime probabilità di superamento. In seguito vengono presentati i risultati ottenuti mediante simulazioni di eventi di minore intensità e maggiore frequenza, caratterizzati da velocità del vento inferiori provenienti dai quattro quadranti oggetto di studio.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

4.2 EVENTI MASSIMALI

Vengono presi in considerazione in questa fase valori “estremi” di velocità del vento fra quelli prevedibili in tale ambito, ai fini della previsione delle più avverse condizioni meteomarine ipotizzabili. In particolare sono state analizzate, mediante il modello di previsione del moto ondoso, quattro condizioni, una per ciascun quadrante della rosa dei venti:

- vento di Bora (NE, 45°) a 20 m/s;
- vento di Scirocco (SE, 135°) a 15 m/s;
- vento di Libeccio (SO, 225°) a 10 m/s;
- vento di Maestrale (NO, 315°) a 10 m/s.

La velocità del vento a cui si fa riferimento in questi capitoli è da considerarsi come velocità orizzontale alla quota di 10 m dal livello del mare, indicata da ora come U_{10} e corrispondono ai massimi valori delle osservazioni registrate nelle varie stazioni di misura e precedentemente descritte.

Ciascuno di questi eventi viene applicato su una griglia computazionale ottenuta dall’unione delle griglie 1, 2 e 5 descritte nel Paragrafo 2.4 e nell’elaborato C5-DIS-021, in modo da avere un progressivo raffinamento della griglia di calcolo avvicinandosi all’area oggetto di studio in prossimità del terminal. Il vento viene imposto come condizione al contorno costante sull’intero dominio di calcolo, in modo da poter sfruttare completamente il fetch geografico disponibile per ogni traversia. Pur se in alcuni casi una tale valutazione può apparire eccessivamente cautelativa, particolarmente per i venti di bora sull’intero mare Adriatico, si è ritenuto comunque di procedere in tal senso.

Per ciascuno di questi casi estremi viene rappresentata graficamente la distribuzione spaziale dell’altezza d’onda significativa H_s , che indica la media aritmetica del terzo superiore della distribuzione in frequenza del gruppo d’onde, ipotizzata pari alla distribuzione statistica di *Rayleigh*.

Nei paragrafi successivi sono illustrati i risultati ottenuti per le singole griglie computazionali sopra citate ed in particolare va posta l’attenzione su quelli ottenuti per la griglia n. 5 relativa all’area del

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

terminal, per la quale l'altezza d'onda viene rappresentata con tre diverse scale cromatiche (da 0 a 6 m, da 0 a 3 m, e da 0 a 1 m), in modo da evidenziare in modo ottimale la variabilità dell'altezza d'onda.

Sulle modalità di rappresentazione dei risultati, vale la pena porre qualche considerazione. Per tutti i risultati si sempre cercato di mantenere la medesima scala grafica e cromatica, al fine di consentire confronti fra i vari casi. Attesa però la circostanza di come una tale scelta in determinate circostanze non avrebbe consentito una agevole lettura dei dati, si è ritenuto di utilizzare talora più scale per i medesimi risultati, in modo da consentire sia il confronto che la corretta lettura.

4.2.1 Traversia di grecale-bora (ne)

Nella Figura 31 (elaborato C5-DIS-023-A1) sono riportate le rappresentazioni delle altezze d'onda significative per la griglia n.1 (rappresentazione generale per l'intero Mare Adriatico), per la griglia n.2 (alto Adriatico) e per la griglia n.5 (terminal) nel caso in cui soffi un vento di Bora, proveniente da nord-est (45°N), con velocità costante $U_{10} = 20$ m/s.

L'altezza d'onda è descritta mediante una scala cromatica, da un colore blu scuro corrispondente all'altezza d'onda nulla ($H_s = 0$ m) ad un colore rosso scuro per il massimo relativo, in questo caso $H_s = 6$ m. Le gradazioni cromatiche intermedie indicano valori crescenti dell'altezza d'onda H_s , in modo da riconoscere chiaramente le porzioni del dominio in cui l'altezza è ridotta e quelle in cui essa è maggiore e da poter operare un confronto tra i vari casi.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

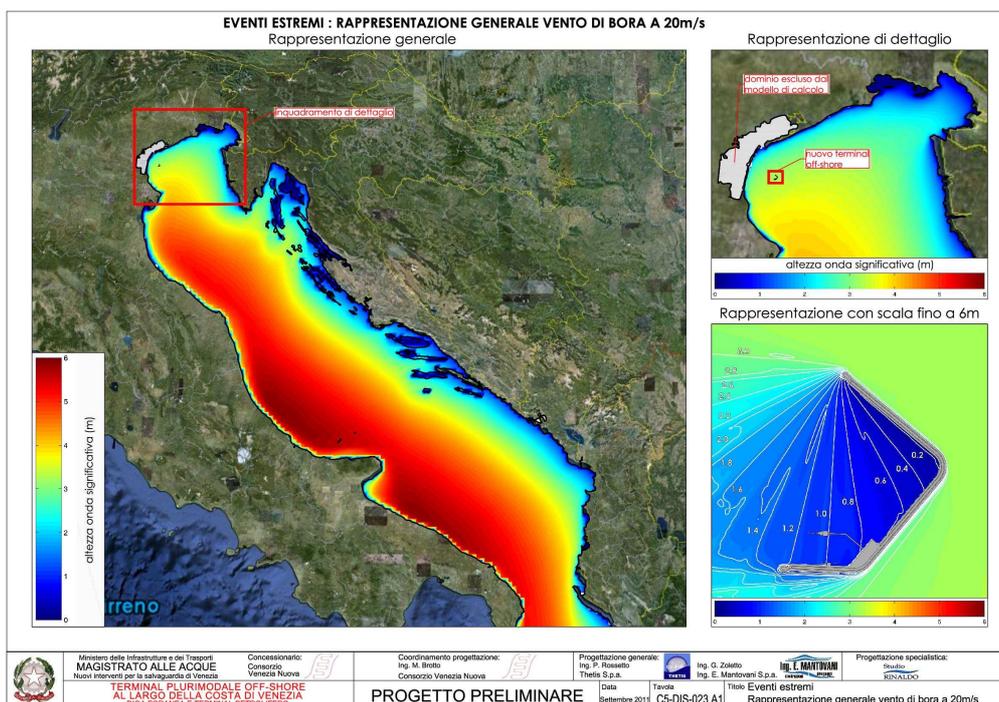


Figura 31: vento di Bora a 20 m/s - rappresentazione generale delle altezze d'onda

Si osserva che il vento di Grecale-Bora così intenso provoca un forte aumento delle altezze d'onda al largo delle coste italiane, che raggiungono valori massimi di 6 m al largo delle coste abruzzesi e pugliesi. Per quanto riguarda l'area oggetto di indagine, rappresentata negli inquadramenti di dettaglio, si nota che l'altezza d'onda calcolata al di fuori dell'opera portuale raggiunge valori di circa 3.0 m, mentre all'interno dell'area protetta raggiunge valori progressivamente minori. Il terminal risulta ben difeso dalla traversia di Bora grazie alla diga di nord-est, come si deduce anche dalla Figura 32 (elaborato C5-DIS-023-A2) anche se l'apertura in direzione nord-ovest consente una parziale propagazione e la diffrazione delle onde anche all'interno del bacino portuale.

Nella suddetta tavola si osservano altezze d'onda che vanno da circa 1.2 m (lungo la linea congiungente le testate dell'opera di difesa) fino a circa 20 cm in corrispondenza al lato interno della diga di nord-est. Con questa configurazione l'area di accosto per le petroliere (zona sud del terminal) è interessata da onde con altezza significativa da 1.2 a 0.8 m in corrispondenza alla banchina operativa.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

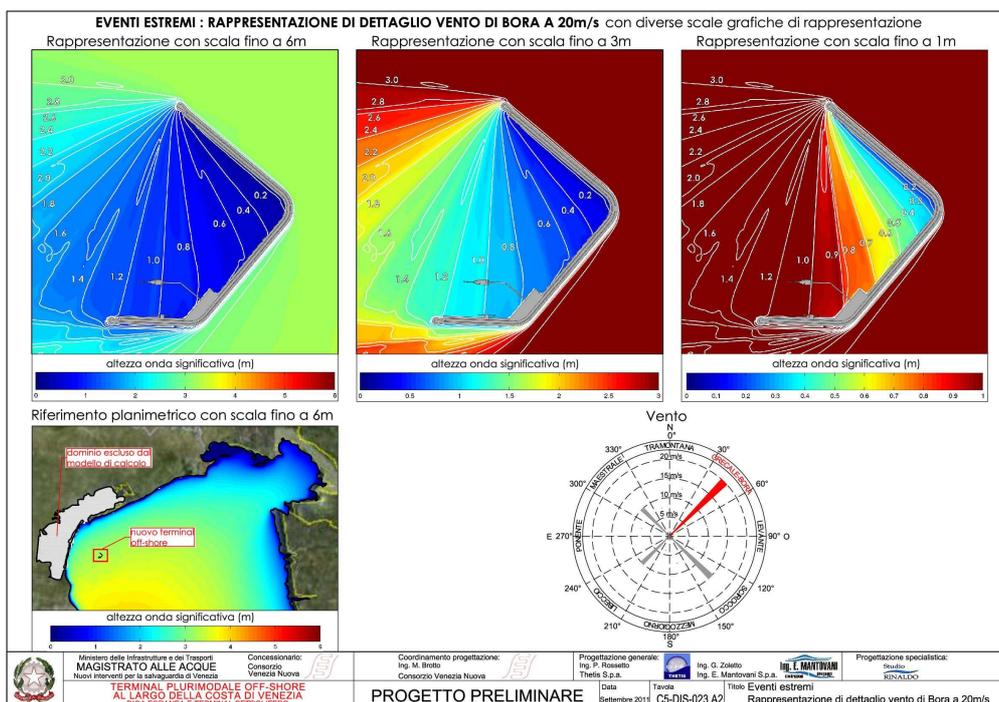


Figura 32: vento di Bora a 20 m/s - rappresentazione di dettaglio delle altezze d'onda

4.2.2 Traversia di scirocco (se)

Nella Figura 33 (elaborato C5-DIS-023-A3) sono riportate le rappresentazioni delle altezze d'onda significative per le griglia n.1, n.2 e n.5 nel caso in cui soffi un vento di Scirocco, proveniente da sud-est (135°N), con velocità costante $U_{10} = 15$ m/s.

Si osserva in questo caso che l'altezza d'onda raggiunge valori massimi di circa 4.2 m nell'area centrale dell'Adriatico, nel braccio di mare tra le Marche e la Dalmazia.

La differenza cromatica riconoscibile tra la Figura 33 e la Figura 31 indica, come le onde prodotte da questo evento abbiano altezza sensibilmente minore rispetto a quelle descritte nel paragrafo precedente, pur a fronte di una dimensione significativamente maggiore del fetch disponibile, a dimostrazione di una circostanza ovvia, legata alla dipendenza dell'altezza d'onda da più fattori, uno dei quali è il fetch.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

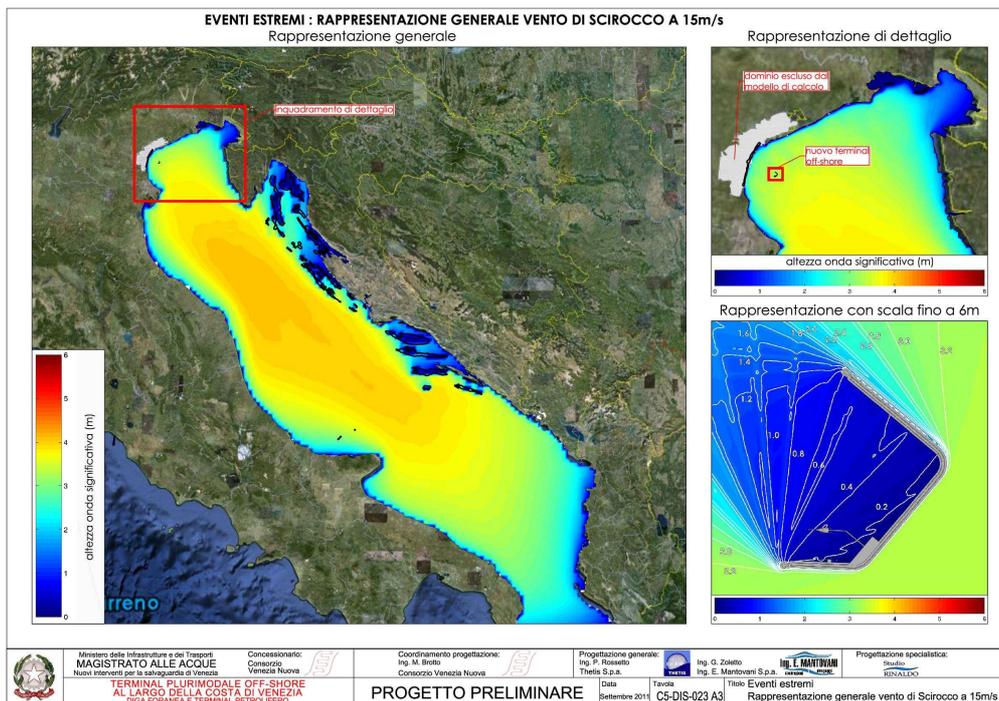


Figura 33: vento di Scirocco a 15 m/s - rappresentazione generale delle altezze d'onda

Nell'area antistante il terminal l'altezza d'onda significativa raggiunge valori di 3.2 m circa, riducendosi progressivamente all'interno dell'area protetta fino a valori di 0.2 m in prossimità della scogliera di sud-est.

Come si osserva anche in Figura 34 (elaborato C5-DIS-023-A4), il moto ondoso residuo all'interno del terminal è dovuto alla diffusione e diffrazione che le onde che provengono da sud-est subiscono in corrispondenza ai tratti terminali delle dighe a scogliera.

Dalla stessa figura si possono, inoltre, ricavare le altezze d'onda significative causate da questo evento estremo, che vanno da 60 cm a 20 cm nel bacino protetto, con valori massimi di 40 cm circa nell'area di accosto per le petroliere. Anche in questo caso si osserva una buona efficacia dei moli di protezione.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

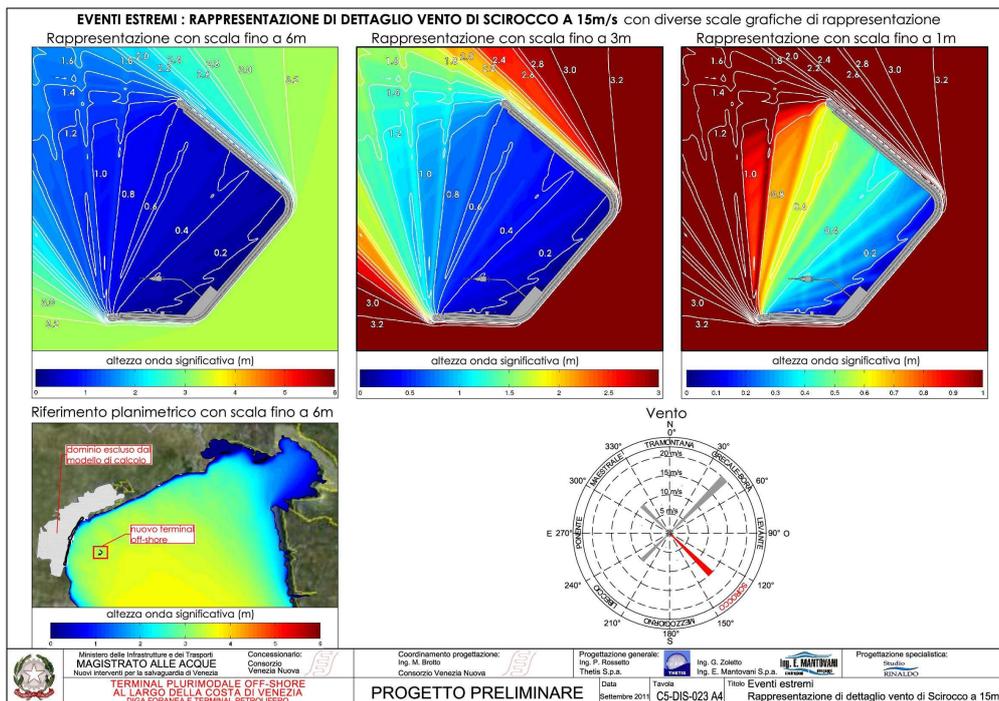


Figura 34: vento di Scirocco a 15 m/s - rappresentazione di dettaglio delle altezze d'onda

4.2.3 Traversia di libeccio (so)

Come descritto nel paragrafo introduttivo di questo capitolo vengono effettuate simulazioni anche per eventi estremi provenienti dalla traversia di Libeccio e di Maestrale, al fine di valutarne gli eventuali effetti sul moto ondoso residuo all'interno del terminal.

Il fetch relativo al settore di traversia di Libeccio è relativamente breve, pari a circa 20 km (11 NM circa), limitato a sud-ovest dal delta del Po, quindi il moto ondoso generato dal vento di 10 m/s è caratterizzato da ridotte altezze d'onda. Si osserva infatti dalla Figura 35 (elaborato C5-DIS-023-A6) che l'altezza d'onda significativa a sud del terminal è pari a circa 1.0 m, e che il tratto sud della diga foranea protegge solo parzialmente il bacino operativo del porto.

Il terminal risulta in parte esposto al moto ondoso proveniente dai settori di sud-ovest, e l'altezza d'onda residua diminuisce debolmente all'interno dello specchio operativo: l'altezza d'onda si riduce a circa 70 cm lungo la linea congiungente le testate della diga foranea, a 50 cm in corrispondenza agli accosti per le petroliere e a valori tra 30 e 40 cm.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

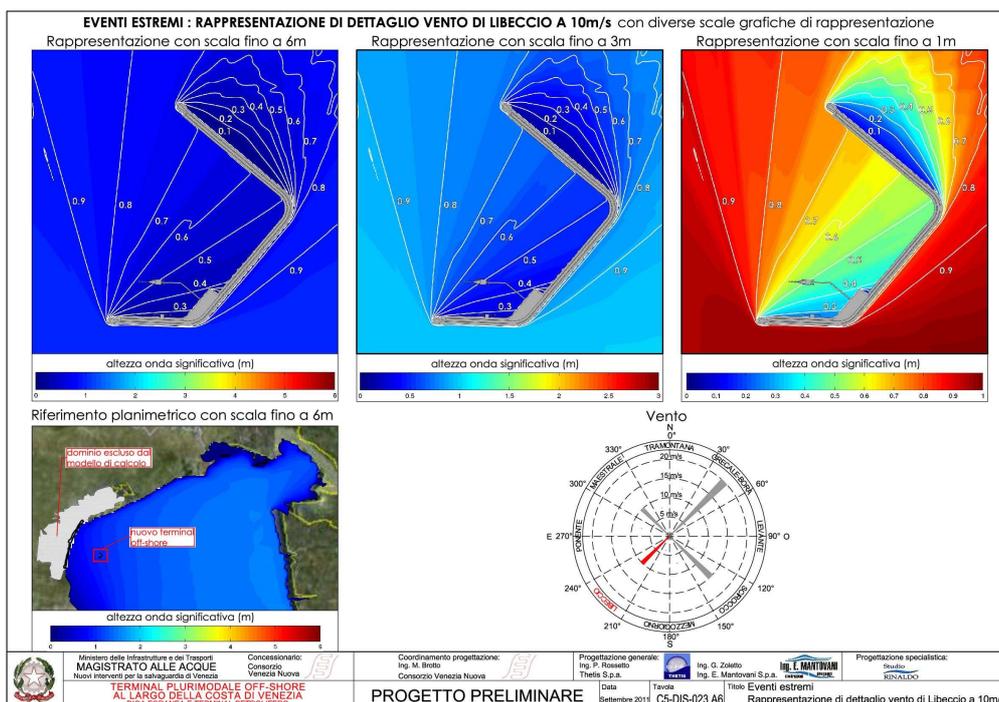


Figura 35: vento di Libeccio a 10 m/s - rappresentazione di dettaglio delle altezze d'onda

4.2.4 Traversia di maestrale (no)

Anche nel caso della simulazione relativa al vento di Maestrale il fetch geografico disponibile risulta molto ridotto, pari a circa 15 km (8 NM), e limitato a nord-ovest dal litorale di Malamocco. Per questo motivo il vento proveniente da nord-ovest, anche con velocità elevata (10 m/s), provoca altezze d'onda inferiori a quelle rilevate nelle simulazioni precedenti.

Si può infatti osservare dalla Figura 36 (elaborato C5-DIS-023-A8) che l'altezza d'onda generata da questo vento al di fuori dell'area del terminal è di poco superiore a 70 cm, e data l'assenza di strutture di difesa rivolte a nord-ovest tale altezza d'onda risulta poco ridotta all'interno del bacino operativo del porto, con valori di circa 70 cm in tutta la zona di accesso e di accosto per le petroliere, fino a valori di 60 e 50 cm nella parte nord-est del terminal.

In questo caso la diga foranea di sud-est compie un'ovvia funzione di riduzione del moto ondoso nello specchio acqueo antistante al terminal, dal lato mare, a sud e a sud-est.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

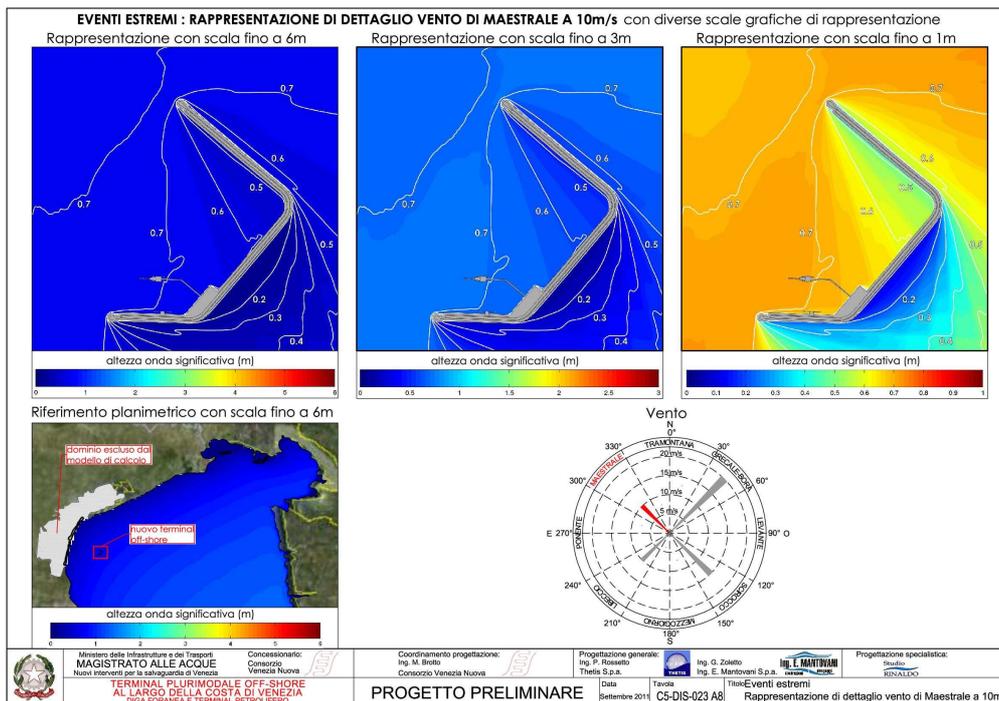


Figura 36: vento di Maestrale a 10 m/s - rappresentazione di dettaglio delle altezze d'onda

4.1 STUDIO DELLA DURATA DELLE ALTEZZE D'ONDA

Come premesso, per una completa definizione delle caratteristiche del moto ondoso in corrispondenza al terminal portuale è necessario verificare anche gli effetti di condizioni meteomarine non estreme, simulando eventi con velocità del vento minori di quelle descritte nel paragrafo precedente.

Anche nelle simulazioni di seguito riportate l'analisi è stata svolta rispetto ai quattro quadranti della rosa dei venti, corrispondenti al settore di Bora (0°-90°N), di Scirocco (90°-180°N), di Libeccio (180°-270°N), e di Maestrale (270°-360°N). Per ciascuno di questi quadranti è stata ottenuta una descrizione statistica del regime anemometrico sulla base dei dati forniti dal succitato MEDATLAS per osservazioni annue della velocità e della direzione del vento in corrispondenza alla boa di misurazione posta nell'alto Adriatico, nelle coordinate 45°N, 13°E.

Vengono di seguito riportati i risultati in forma grafica delle altezze d'onda calcolate dal modulo SWAN nell'area del terminal nelle seguenti condizioni:

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

- traversia di Grecale-Bora (NE, 45°): venti di 2, 4, 6, 8, 10, 14, 18 e 20 m/s;
- traversia di Scirocco (SE, 135°): venti di 2, 4, 6, 8, 10 e 15 m/s;
- traversia di Libeccio (SO, 225°): venti di 2, 4, 6, 8 e 10 m/s;
- traversia di Maestrale (NO, 315°): venti di 2, 4, 6, 8 e 10 m/s.

Per ciascuno dei settori considerati viene riportata l'immagine della corrispondente tavola, in cui è inserita una mappa delle altezze d'onda per ciascuno dei casi sopra elencati. In tutte queste figure la scala cromatica è costante, da 0 m (blu scuro) a 1 m (rosso scuro) ed è possibile effettuare un confronto visivo tra i risultati ottenuti con le diverse condizioni di vento.

Nelle seguenti tavole vengono inoltre indicati i punti di osservazione per i quali sono stati estratti i risultati numerici relativi alle altezze d'onda. Tali risultati sono stati utilizzati per ottenere una descrizione statistica del moto ondoso residuo all'interno del terminal, sotto forma di curve di durata delle onde, classificate secondo la loro altezza. Tale analisi è descritta in dettaglio nel §4.1.5.

4.1.1 Traversia di grecale-bora (ne)

Per quanto riguarda il settore di traversia di nord-est sono stati simulati venti di Grecale-Bora con velocità di 2, 4, 6, 8, 10, 14, 18 e 20 m/s. Si noti che l'ultima di queste prove corrisponde alla simulazione dell'evento massimale riportata nel §4.2.1.

Da questi risultati si può osservare che la distribuzione delle altezze d'onda residue rimane pressoché invariata al crescere dell'intensità del vento, mentre cambiano notevolmente i valori raggiunti da tali altezze d'onda.

Si osserva ad esempio, come con vento a velocità di 2 m/s, che secondo la descrizione statistica ottenibile dal MEDATLAS non viene superato per il 78% dell'anno, vengano generate onde di altezza massima 0.20 m nell'intorno del terminal, mentre il vento di 10 m/s (superato solo nel 3% delle ore annuali) genera onde di circa 1 m fuori dal terminal, che si riducono a circa 50 cm all'imboccatura, e tendono ad annullarsi verso la diga di difesa di nord-est.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

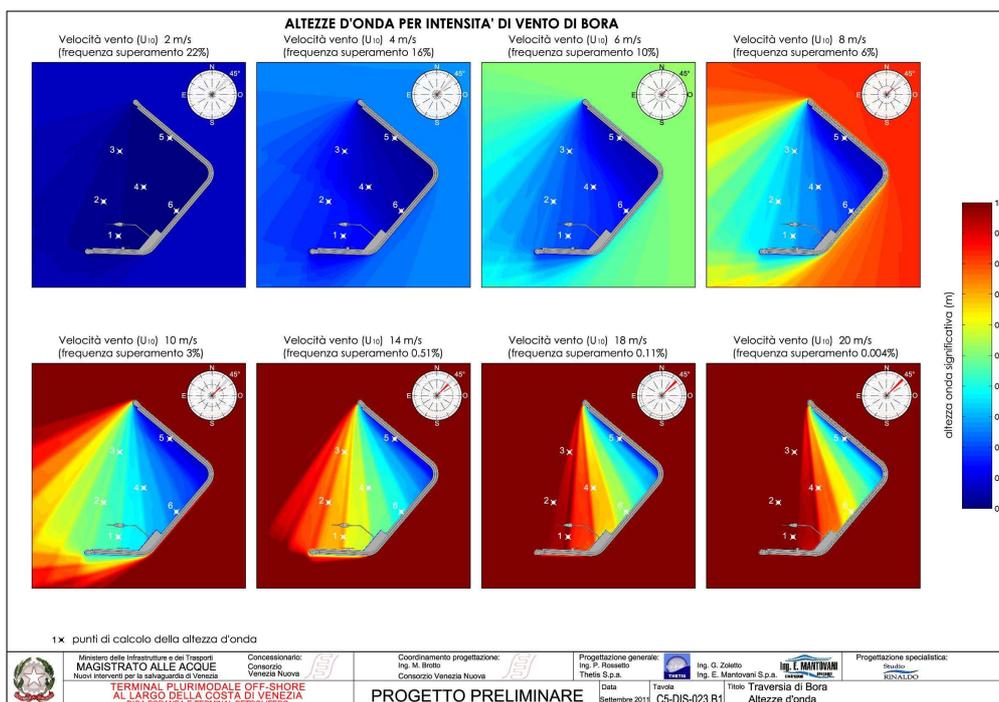


Figura 37: traversia di Bora - altezze d'onda per diverse intensità del vento

4.1.2 Traversia di scirocco (se)

Per quanto riguarda il settore di traversia di sud-est sono stati simulati venti di Scirocco con velocità di 2, 4, 6, 8, 10 e 15 m/s. Anche in questo caso l'ultima delle prove corrisponde alla simulazione dell'evento massimale riportata nel §4.2.2.

Dai risultati si osserva che il terminal risulta protetto in maniera molto efficace con riferimento a tutte le condizioni considerate, si noti a titolo di esempio che con un vento di 10 m/s l'altezza d'onda fuori dal terminal è superiore ad 1 m, mentre all'imboccatura del porto è ridotta a circa 40 cm, che si riducono ulteriormente proseguendo verso sud.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

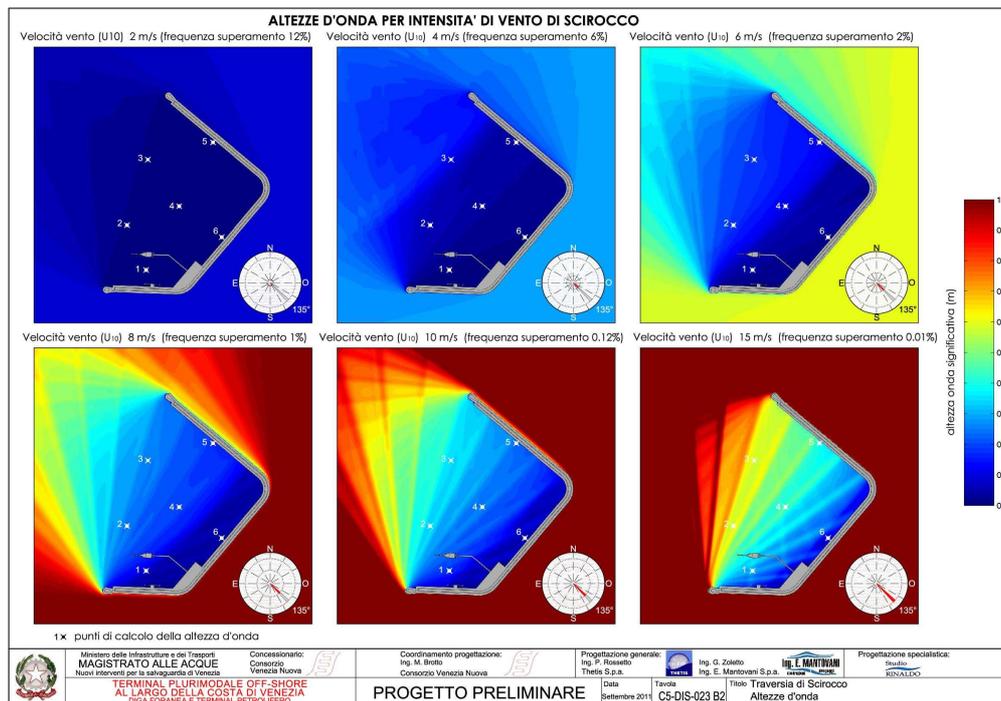


Figura 38: traversia di Scirocco - altezze d'onda per diverse intensità del vento

4.1.3 Traversia di libeccio (so)

Per quanto riguarda il settore di traversia di sud-ovest sono stati simulati venti di Libeccio con velocità di 2, 4, 6, 8 e 10 m/s.

Anche in questo caso si riconosce che l'effetto del vento a basse velocità è pressoché trascurabile, data la ridotta dimensione del fetch disponibile. Si riconosce tuttavia l'efficacia del molo sud a ridurre l'altezza d'onda nella zona degli accosti petroliferi in tutte le condizioni considerate.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

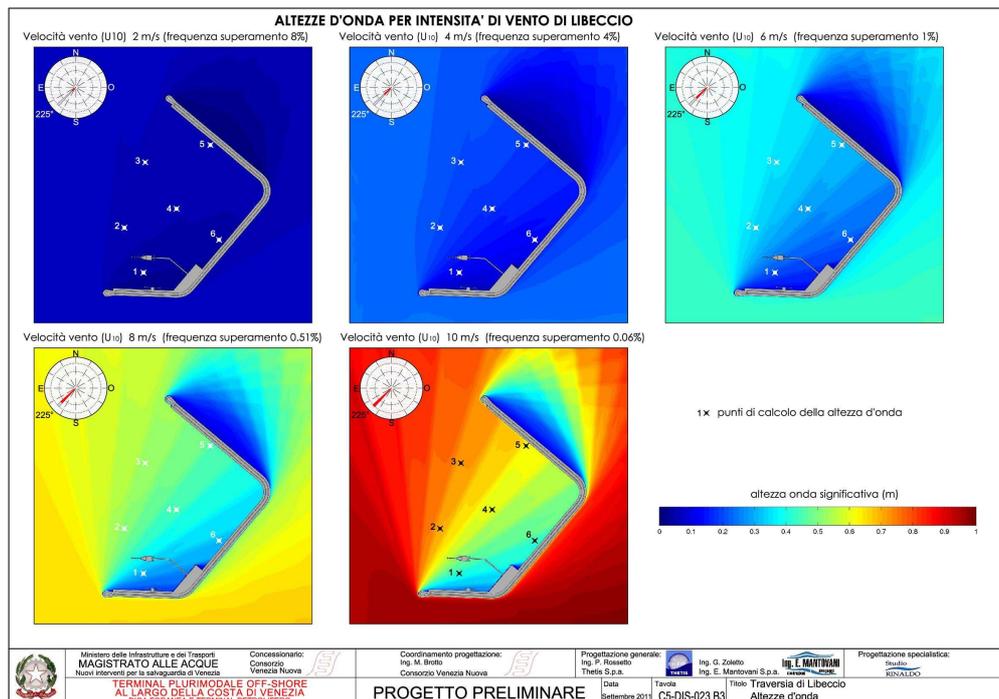


Figura 39: traversia di Libeccio - altezze d'onda per diverse intensità del vento

4.1.4 Traversia di maestrale (no)

Per quanto riguarda il settore di traversia di nord-ovest sono stati simulati venti di Maestrale con velocità di 2, 4, 6, 8 e 10 m/s. Essendo questo il settore di traversia a cui corrisponde il fetch minore, si osserva che le altezze d'onda calcolate nei vari casi sono sempre minori dei casi analoghi esposti in precedenza.

Si noti ad esempio che con un vento di 8 m/s l'altezza d'onda fuori dal terminal è circa di 50 cm, con una debolissima riduzione all'interno del bacino operativo, mentre un vento di analoga intensità ma proveniente dal settore di sud-ovest (Libeccio) provoca fuori dal terminal onde alte circa 70 cm, ed un vento proveniente dal settore di sud-est (Scirocco) provoca onde alte 1 m.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

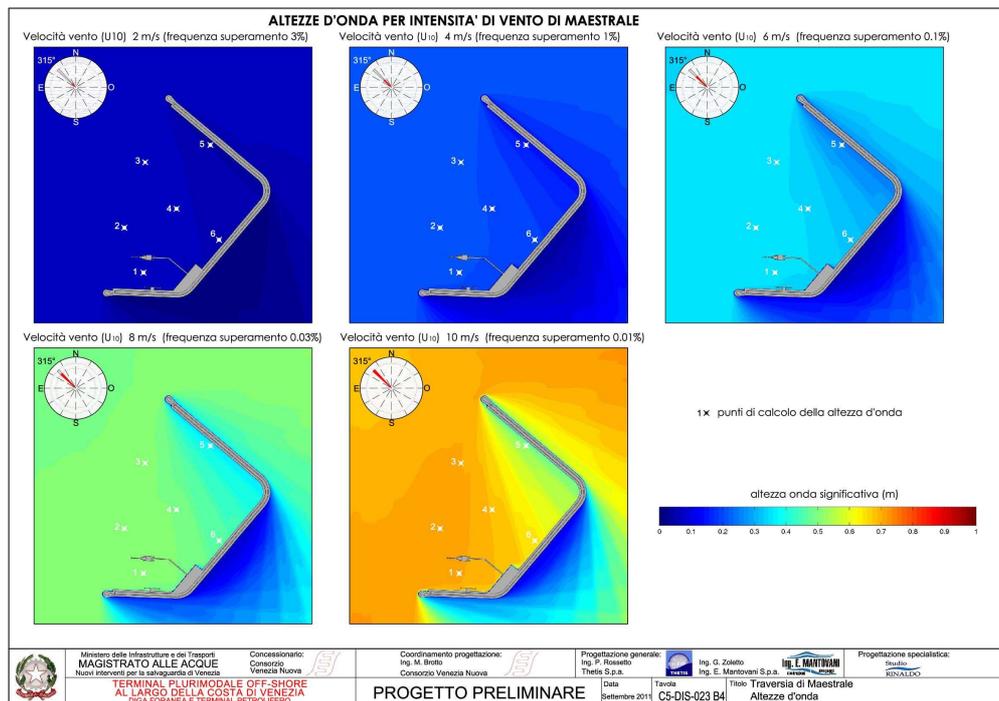


Figura 40: traversia di Maestrale - altezze d'onda per diverse intensità del vento

4.1.5 Durata delle altezze d'onda

Obiettivo dell'analisi fin qui presentata è stato la caratterizzazione statistica del moto ondoso residuo all'interno dell'area del terminal, ottenibile individuando un numero finito di punti di osservazione, distribuiti in posizioni significative nel bacino operativo, ed analizzando la correlazione fra l'altezza d'onda calcolata e le caratteristiche del vento, imposto come condizione al contorno sulla superficie marina.

In particolare, sono stati individuati 6 punti significativi agli scopi dell'analisi:

- il punto 1 è stato scelto per rappresentare le condizioni dell'area di accosto per le petroliere;
- i punti 2 e 3 si trovano invece ad $1/3$ e $2/3$ della linea congiungente le testate della diga di protezione, ovvero all'imboccatura del terminal;
- il punto 4 è posto al centro del bacino operativo del porto,
- i punti 5 e 6 sono posti in vicinanza rispettivamente della diga di nord-est e della diga di sud-est.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

Possedendo una descrizione statistica del regime anemometrico nell'area di studio, ottenuta mediante l'elaborazione dei dati forniti dal succitato MEDATLAS, è dunque possibile associare ad ogni altezza d'onda calcolata una probabilità di superamento, o la corrispondente probabilità di non superamento durante l'anno medio.

Individuando in questo modo la probabilità di non superamento relativa alle altezze d'onda di 0.10 m, 0.20 m, 0.30 m, 0.50 m, 0.75 m e di 1.00 m, è dunque possibile calcolare la frequenza di comparizione nell'anno medio delle onde di altezza compresa tra i valori citati.

È stata quindi calcolata la durata, espressa in ore annue (su un totale quindi di 8760 ore), di ciascuno dei seguenti intervalli di altezze d'onda:

- $H_s = 0.00 \div 0.10$ m;
- $H_s = 0.10 \div 0.20$ m;
- $H_s = 0.20 \div 0.30$ m;
- $H_s = 0.30 \div 0.50$ m;
- $H_s = 0.50 \div 0.75$ m;
- $H_s = 0.75 \div 1.00$ m;
- $H_s > 1.00$ m.

I risultati dell'analisi vengono riportati nelle tavole C5-DIS-024 A1÷A3, sottoforma di istogrammi in cui sono sommate le durate calcolate per ciascuno dei settori di traversia finora considerati (Bora, Scirocco, Libeccio, Maestrale), ed in forma di tabella, in cui è calcolata anche la somma delle singole componenti direzionali.

L'elaborato C5-DIS-024 A1, relativo ai punti di osservazione 1 e 2, è riportato qui di seguito nella successiva Figura 41.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

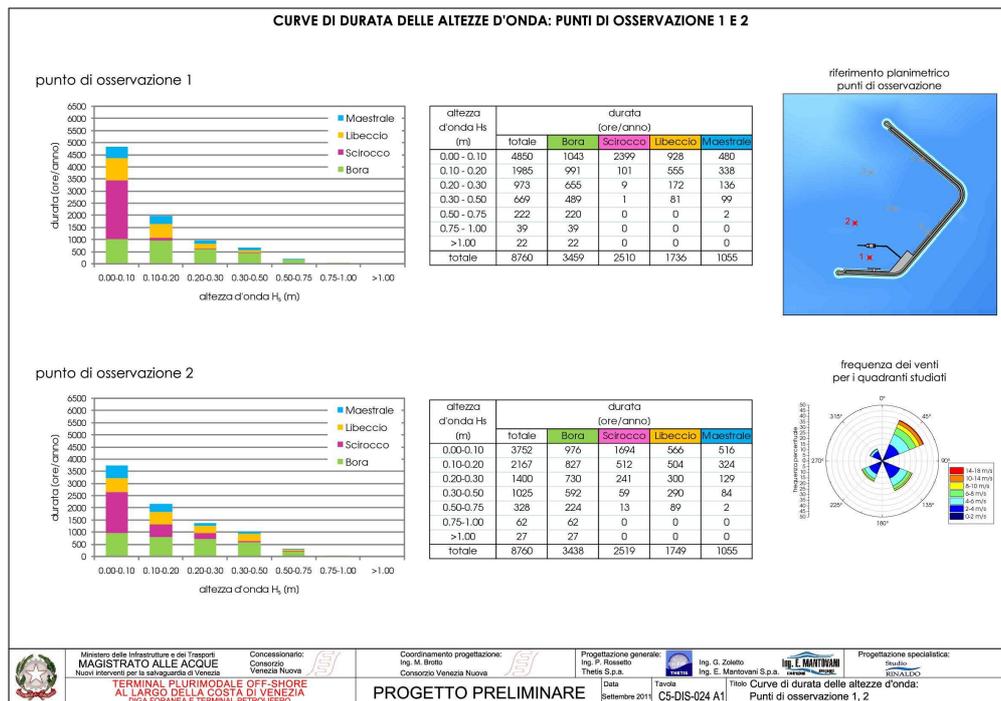


Figura 41: curve di durata delle altezze d'onda – punti di osservazione 1 e 2

Dagli istogrammi in figura si può osservare che per le onde più alte l'unica componente non trascurabile è quella provocata dal vento di Bora, mentre la componente prevalente per le onde alte fino a 10 cm è quella del settore di Scirocco.

I risultati relativi ai punti di osservazione 1 e 2 sono ripostati anche in Tabella 2 ed in Tabella 3.

altezza d'onda Hs [m]	durata [ore/anno]				
	totale	Bora	Scirocco	Libeccio	Maestrale
0.00 - 0.10	4850	1043	2399	928	480
0.10 - 0.20	1985	991	101	555	338
0.20 - 0.30	973	655	9	172	136
0.30 - 0.50	669	489	1	81	99
0.50 - 0.75	222	220	0	0	2
0.75 - 1.00	39	39	0	0	0
>1.00	22	22	0	0	0
totale	8760	3459	2510	1736	1055

Tabella 2: punto di osservazione 1

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

Da questi risultati si deduce che il punto 1, significativo delle condizioni dell'area di accosto per le petroliere, è protetto in maniera molto efficace dalle mareggiate di Scirocco, in quanto si ha una durata minima di 1 ora/anno per le altezze d'onda fino a 50 cm. Nelle stesso punto si registrano invece onde maggiori di 1 m dovute a mareggiate di Bora per un totale di 22 ore/anno, corrispondente allo 0.025% della durata complessiva dell'anno.

Il moto ondoso residuo dovuto a Libeccio e Maestrale, che hanno una minore incidenza annua, è caratterizzato da altezze d'onda fino a 50 cm per una durata inferiore a 100 ore/anno (circa 1% dell'anno).

altezza d'onda Hs [m]	durata [ore/anno]				
	totale	Bora	Scirocco	Libeccio	Maestrale
0.00-0.10	3752	976	1694	566	516
0.10-0.20	2167	827	512	504	324
0.20-0.30	1400	730	241	300	129
0.30-0.50	1025	592	59	290	84
0.50-0.75	328	224	13	89	2
0.75-1.00	62	62	0	0	0
>1.00	27	27	0	0	0
totale	8760	3438	2519	1749	1055

Tabella 3: punto di osservazione 2

Per il punto di osservazione 2 le onde fino a 10 cm hanno in totale una durata minore rispetto a quelle calcolate per il punto 1, mentre hanno durata relativamente maggiore le onde con altezza superiore a 50 cm. Risultato questo prevedibile, data la maggiore esposizione del punto 2 in particolare rispetto ai settori di Libeccio e di Maestrale.

Anche il vento di Scirocco ha un'incidenza maggiore, in quanto il punto 2 è localizzato più lontano dalla diga di protezione esposta a sud-est.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

altezza d'onda Hs [m]	durata [ore/anno]				
	totale	Bora	Scirocco	Libeccio	Maestrale
0.00-0.10	3695	1268	1345	611	471
0.10-0.20	2537	849	853	493	343
0.20-0.30	1273	612	238	282	142
0.30-0.50	916	485	70	263	98
0.50-0.75	298	205	4	87	1
0.75-1.00	33	33	0	0	0
>1.00	7	7	0	0	0
totale	8760	3459	2510	1736	1055

Tabella 4: punto di osservazione 3

altezza d'onda Hs [m]	durata [ore/anno]				
	totale	Bora	Scirocco	Libeccio	Maestrale
0.00-0.10	4853	1648	2018	691	495
0.10-0.20	2098	875	365	514	343
0.20-0.30	1114	550	117	317	129
0.30-0.50	610	341	10	173	87
0.50-0.75	85	45	0	41	0
0.75-1.00	0	0	0	0	0
>1.00	0	0	0	0	0
totale	8760	3459	2510	1736	1055

Tabella 5: punto di osservazione 4

altezza d'onda Hs [m]	durata [ore/anno]				
	totale	Bora	Scirocco	Libeccio	Maestrale
0.00-0.10	6335	3141	1922	657	614
0.10-0.20	1660	313	509	531	307
0.20-0.30	512	5	71	325	110
0.30-0.50	208	0	7	176	24
0.50-0.75	46	0	0	46	0
0.75-1.00	0	0	0	0	0
>1.00	0	0	0	0	0
totale	8760	3459	2510	1736	1055

Tabella 6: punto di osservazione 5

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

altezza d'onda Hs [m]	durata [ore/anno]				
	totale	Bora	Scirocco	Libeccio	Maestrale
0.00-0.10	5855	1899	2510	928	518
0.10-0.20	1911	1023	0	555	333
0.20-0.30	644	340	0	172	132
0.30-0.50	344	191	0	81	73
0.50-0.75	6	6	0	0	0
0.75-1.00	0	0	0	0	0
>1.00	0	0	0	0	0
totale	8760	3459	2510	1736	1055

Tabella 7: punto di osservazione 6

Dai risultati si osserva che i punti 4, 5 e 6 risultano essere protetti in maniera efficace dalle mareggiate, in particolare il punto 4 risulta esposto solo alle onde provocate da Bora e Libeccio, mentre il punto 5 è efficacemente protetto da tutti i settori ed in particolar modo da quello di Bora, e per il punto 6 è praticamente trascurabile l'influenza del settore di Scirocco, ed anche tutti gli altri venti provocano onde di altezza molto modesta.

5 IL REGIME DELLE CORRENTI

L'analisi sviluppata attraverso l'utilizzo del software Delft 3D, ha come obiettivo la caratterizzazione del regime delle correnti nell'area del realizzando terminal al largo della costa veneziana, da realizzarsi secondo le modalità descritte nell'allegato progetto preliminare.

A tal fine sono stati analizzati quattro diversi casi di studio, rappresentativi sia di condizione meteo-marine medie, che possano ben rappresentare una situazione tipica dell'operatività della struttura portuale, sia di condizioni estreme, cui potrebbero essere sottoposte le navi nelle fasi di attracco e manovra, presso la nuova struttura.

Nel seguito del presente paragrafo sono quindi descritti i risultati ottenuti, in uno con le condizioni al contorno utilizzate, in ciascuno dei seguenti quattro casi:

1. Marea di quadratura e condizioni di vento medie

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

2. Marea di sizigia e condizioni di vento medie
3. Mareggiata di Grecale-Bora
4. Mareggiata di Scirocco.

Per condizioni di vento medie sono state considerate l'assenza di vento, un vento di grecale-bora con velocità 5 m/s ed uno di scirocco a 3 m/s.

Pur se nell'analisi qui presentata è d'interesse principalmente la velocità superficiale della corrente, si rammenta che grazie all'utilizzo di un software tridimensionale come Delft 3D, è possibile calcolare anche la velocità della corrente sul fondo e nello strato centrale in cui è stato suddiviso il tirante d'acqua. Non è stato necessario incrementare il numero dei layers, per le prevedibili ridotte modifiche che verrebbero indotte sulle correnti calcolate.

A dimostrazione di ciò nella tavola C5-DIS-025, qui di seguito riprodotta in Figura 42, è riportata la rappresentazione della velocità, in corrispondenza di ciascuno dei tre layer verticali, calcolata per il medesimo istante della simulazione in condizioni di marea sizigiale.

Si osserva, pur se le differenze non sono ragguardevoli per l'intero dominio attorno al terminal, che la velocità diminuisce all'aumentare della profondità cosicché in modulo i massimi valori si riscontrano in corrispondenza del layer superficiale. Un tale risultato, in ogni caso, giustifica la scelta effettuata di considerare un numero ridotto di strati, in cui si suddivide il campo di moto.

Ad ulteriore verifica di questo comportamento si riportano le velocità calcolate nei tre layer nel punto di osservazione 1 (cfr. §4.1.5) durante la simulazione di mareggiata di Scirocco. In Figura 43 è indicata la posizione del punto 1 all'interno del terminal, in Figura 44 è invece indicato l'andamento temporale del modulo della velocità calcolata nel punto 1 nei tre differenti layer: in blu è rappresentata la velocità nel layer 1 superficiale, in verde la velocità nel layer 2 ed in rosso la velocità nel layer 3 più profondo.

Con riferimento al sesto time-step della simulazione, corrispondente alle ore 06:00 del 23/12/2010, è stato possibile tracciare il profilo verticale della velocità, rappresentato in Figura 45, in cui si nota chiaramente la variazione in modulo della velocità orizzontale. In Figura 46 sono indicate anche le due componenti x e y della velocità in funzione della profondità (assumono valori negativi, perché rivolte verso i semiassi negativi delle due direzioni coordinate). In Figura 47 è infine riportata la rappresentazione vettoriale della velocità nei 3 layer (con gli stessi colori definiti in precedenza), da cui si riconosce sia la variazione in modulo che la variazione di direzione nei tre diversi strati.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

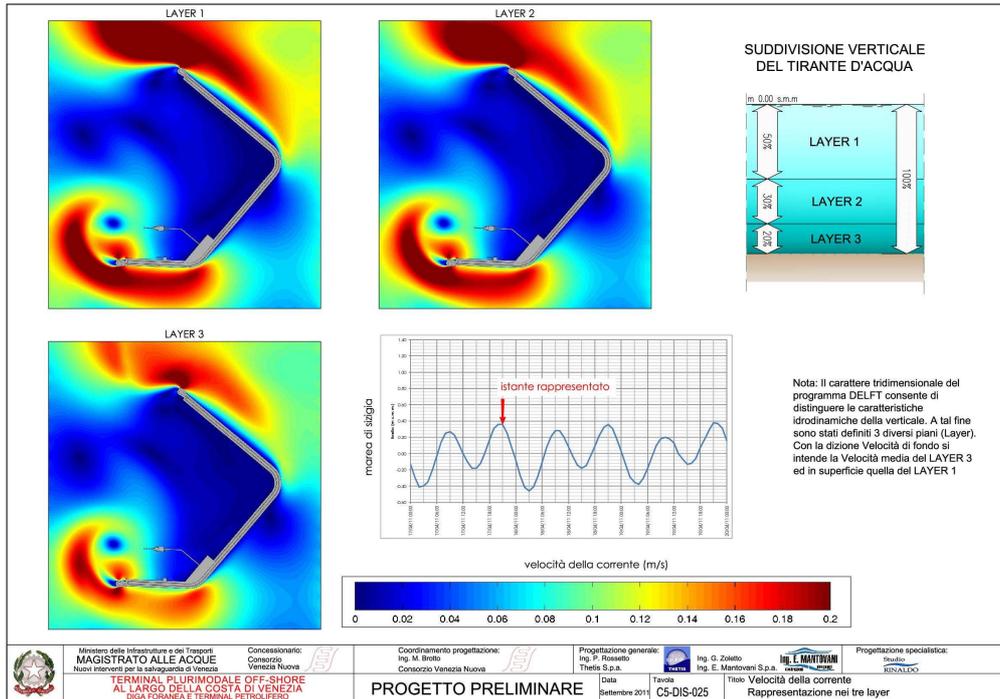


Figura 42: velocità nei tre layer

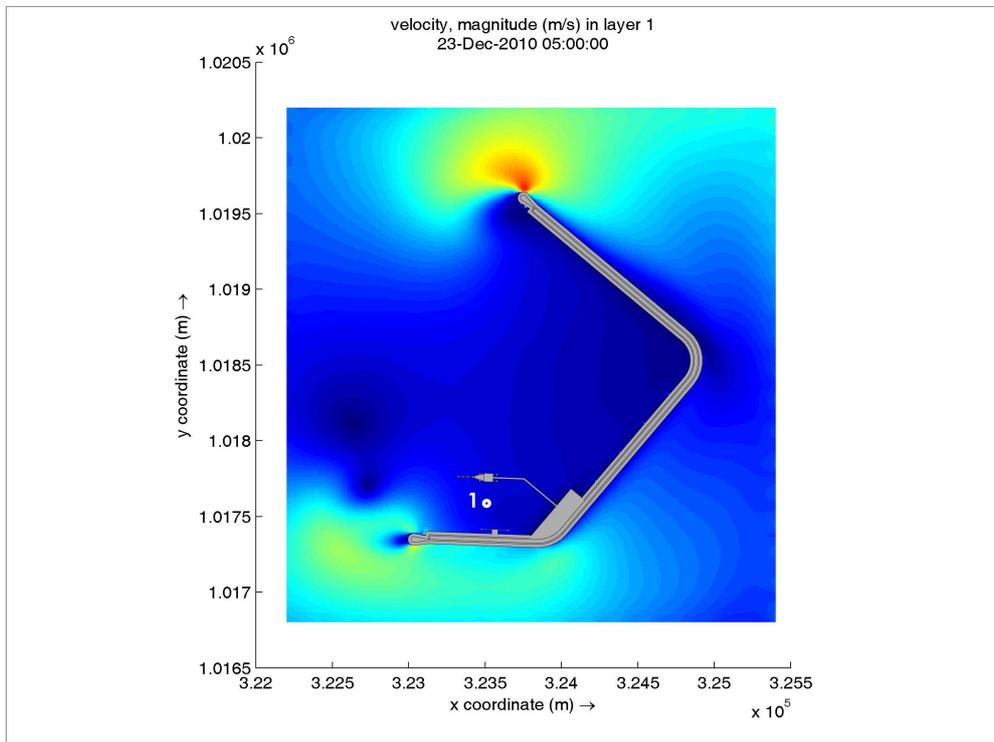


Figura 43: punto di osservazione 1

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

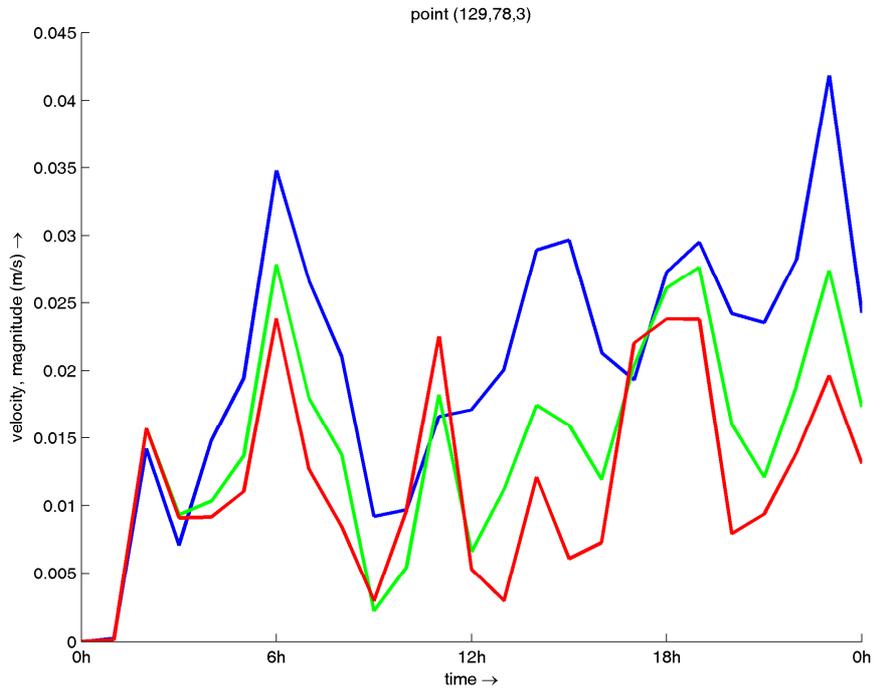


Figura 44: andamento temporale della velocità nel punto 1 per i 3 layer

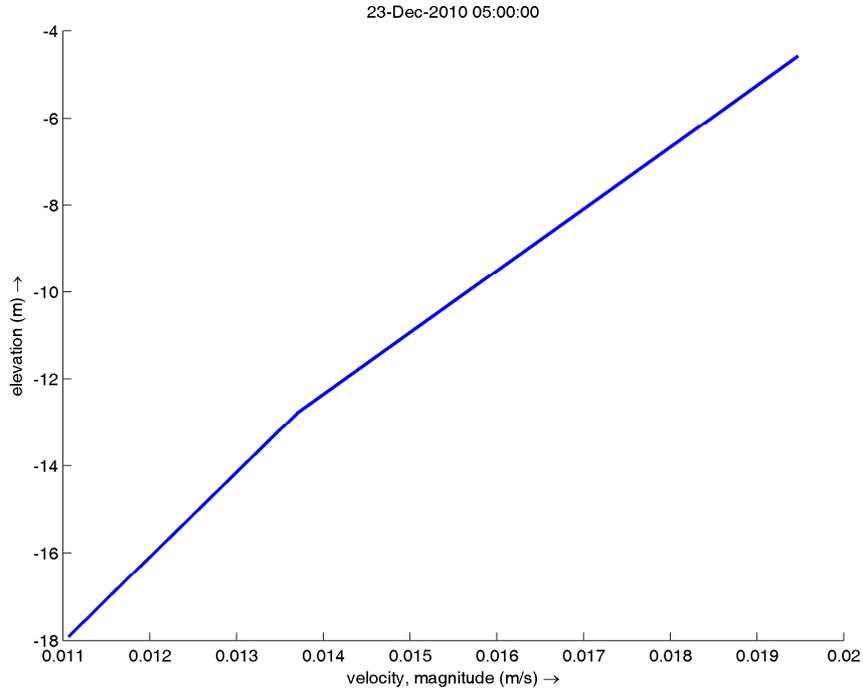


Figura 45: andamento della velocità lungo la verticale nel punto 1

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

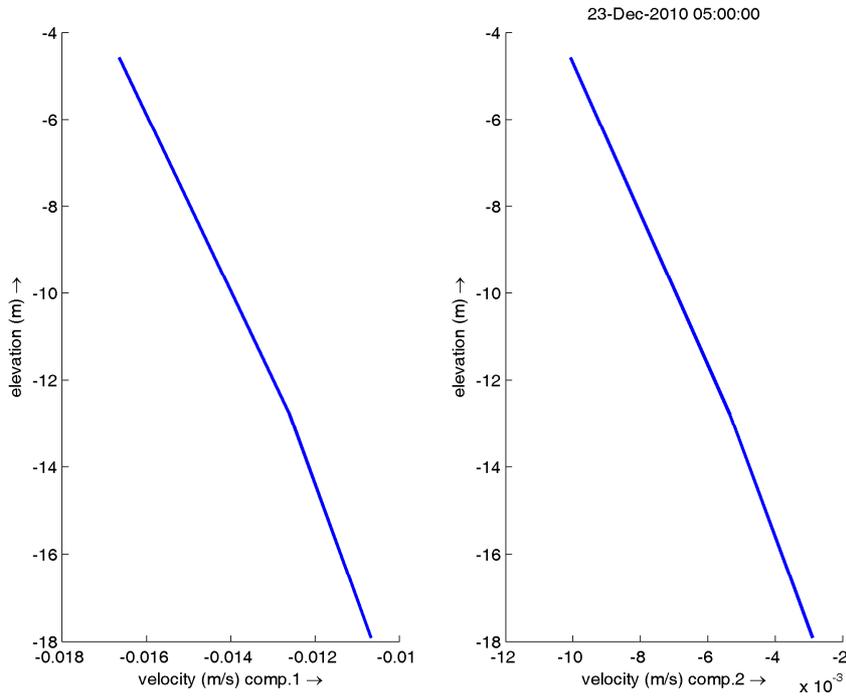


Figura 46: andamento delle componenti x e y della velocità lungo la verticale nel punto 1

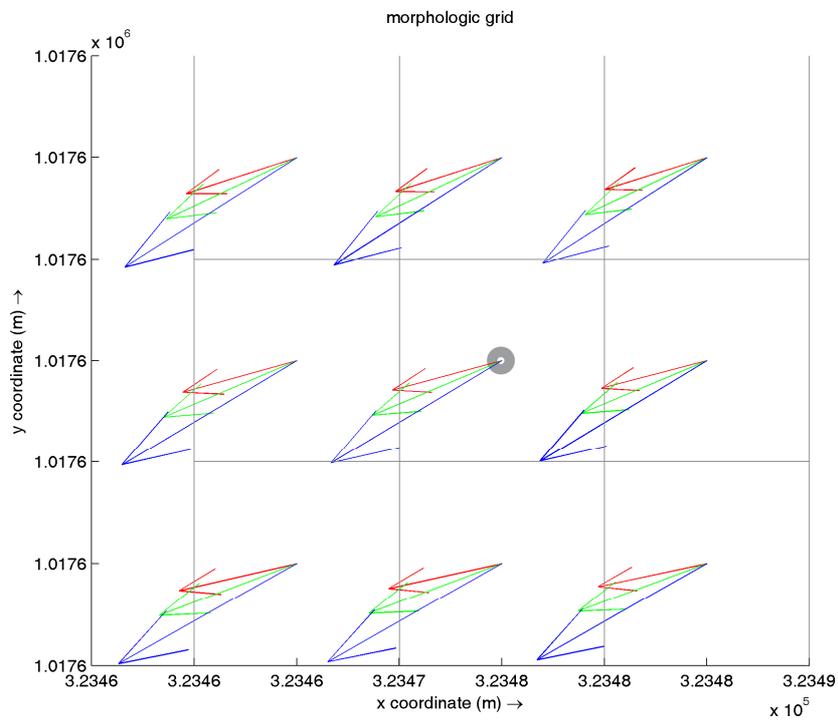


Figura 47: rappresentazione vettoriale della velocità nel punto 1 per i 3 layer

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

5.1 CASO 1 – MAREA DI QUADRATURA

Le maree di quadratura sono quelle caratterizzate da ridotte escursioni, nelle condizioni del cosiddetto ‘morto d’acqua’.

Come condizione al contorno del primo caso è stata utilizzata l’escursione di marea registrata dalla stazione di Ravenna della RMN tra il 24 ed il 27 aprile 2010, come di seguito rappresentata in Figura 48. Si osserva come il livello di marea in questo caso oscilli fra circa +0.20 m s.m.m. e -0.20 m s.m.m..

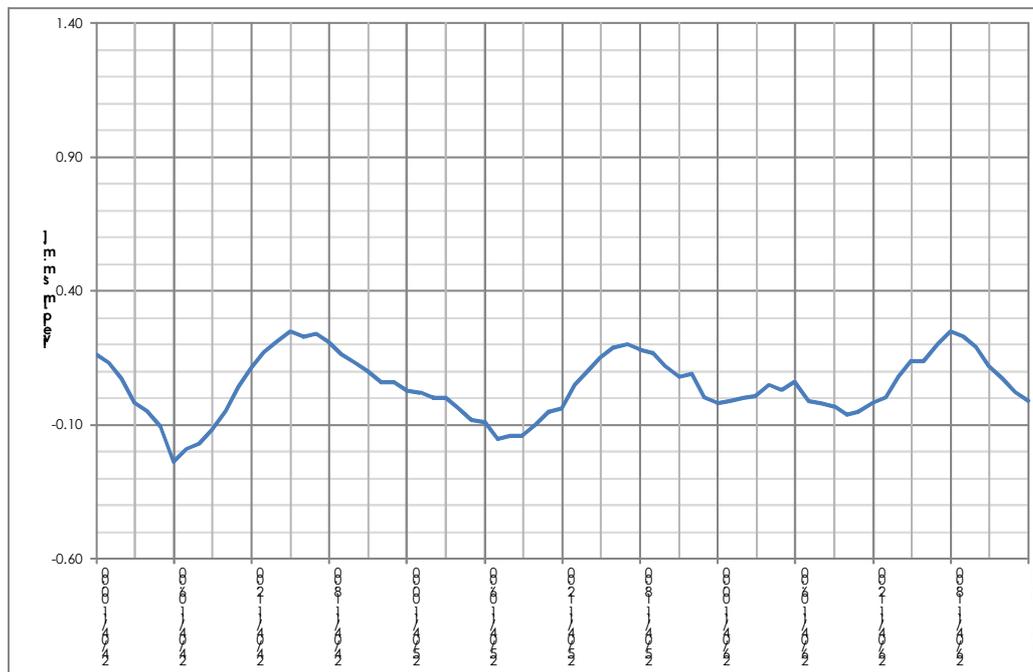


Figura 48: livelli di marea per la stazione mareografica di Ravenna nel periodo 24/04/2011 - 27/04/2011

Il set di condizioni al contorno utilizzate in questo primo caso è rappresentato in un apposito elaborato denominato C5-DIS-026-A1.

Il caso di assenza di vento e marea di quadratura è di seguito rappresentato in Figura 49, che riproduce l’elaborato C5-DIS-026-A2. Nell’area di pertinenza del terminal la velocità superficiale raggiunge valori non superiori a circa 0.15 m/s pur se internamente, nella zona di operatività delle imbarcazioni, lo specchio acqueo risulta in questo caso particolarmente protetto, senza che possa essere considerata alcuna penalizzazione sulla operatività del terminal.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

Il programma, per i punti interni alla struttura, ha infatti calcolato una velocità della corrente molto bassa, ovvero compresa nell'intervallo 0.06-0.08 m/s. Esternamente alla mantellata del terminal si riscontrano valori di velocità maggiori ma comunque ricompresi nel range di 0.15 m/s, anche in questo caso quindi non significativi.

Se si osserva la distribuzione della velocità della corrente sull'area vasta, appare evidente come la presenza della Laguna di Venezia è assolutamente significativa al fine di una corretta rappresentazione della circolazione della corrente nell'area di nostro interesse.

Come noto attraverso le bocche di porto vi è un'intensa circolazione della corrente, che dipende evidentemente dall'estensione del bacino lagunare a monte delle stesse, la cui attività influenza il regime delle velocità in corrispondenza del terminal.

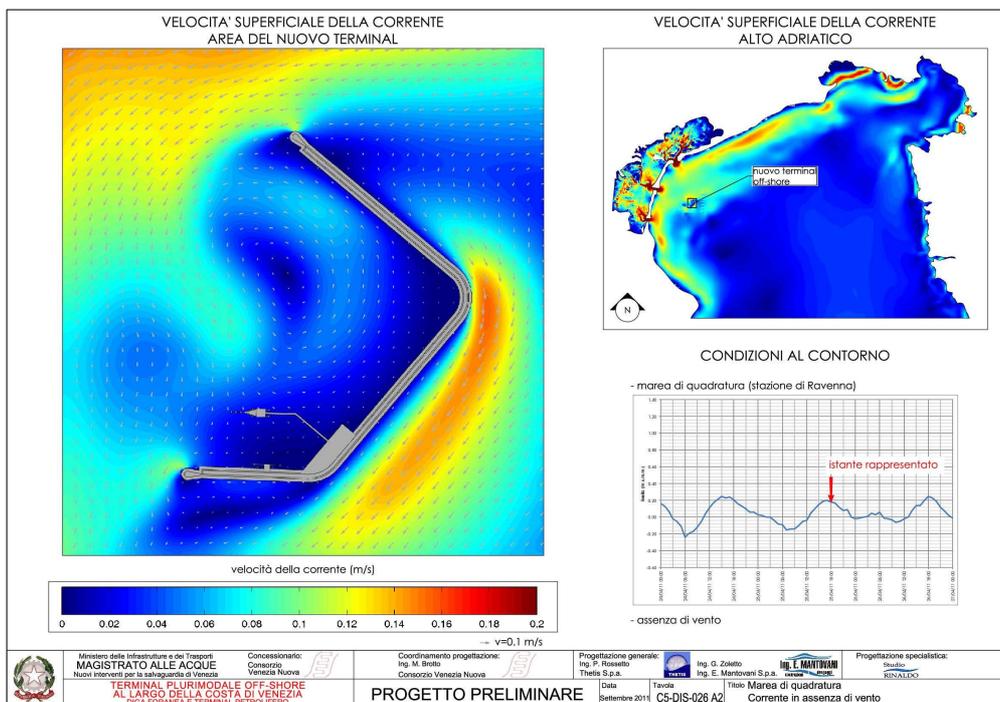


Figura 49: velocità della corrente in assenza di vento – marea di quadratura

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

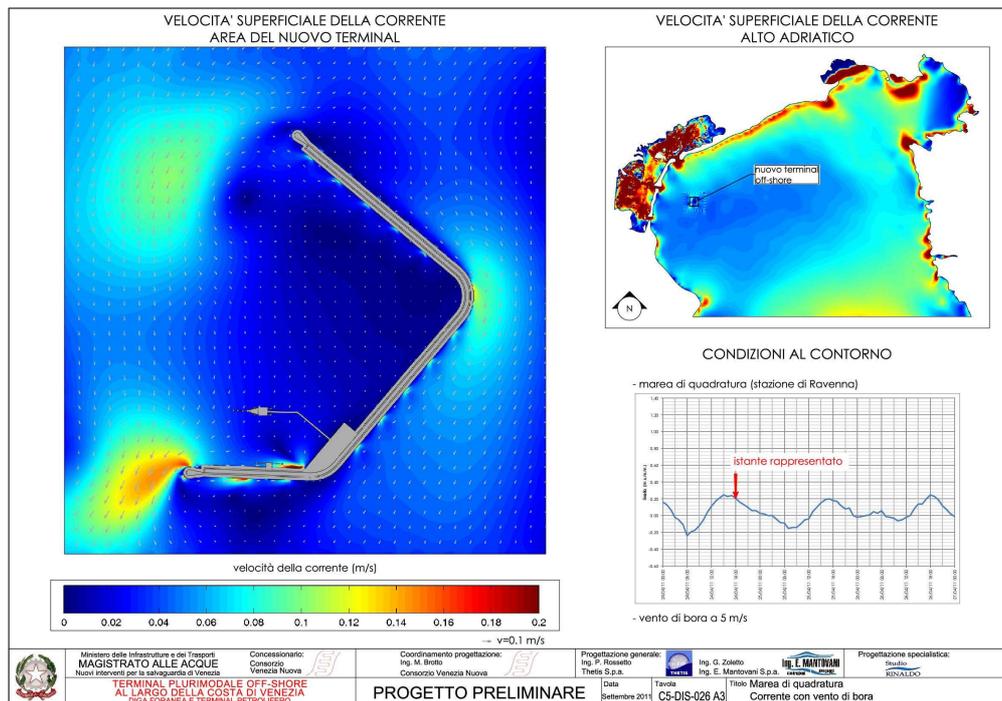


Figura 50: velocità della corrente con vento di bora – marea di quadratura

Nella precedente Figura 50, che riproduce l'elaborato C5-DIS-026-A3, è invece rappresentato il caso della marea di quadratura con vento di bora. Date le condizioni medie sia di marea che di vento, anche in questo caso il regime delle velocità all'interno del terminal petrolifero ha valori molto bassi, dell'ordine degli 0.02-0.04 m/s.

In corrispondenza all'estremità occidentale del terminal si ha un aumento localizzato della velocità, che comunque si mantiene entro valori dell'ordine di 0.15 m/s.

Infine nell'elaborato C5-DIS-026 A4 è riprodotto uno degli istanti in cui spira il vento di scirocco, potendo riproporre considerazioni del tutto analoghe ai casi precedenti, ovvero che la velocità della corrente nella zona di accosto delle petroliere non supera i 0.02-0.04 m/s.

Ne consegue che le escursioni di marea in condizioni di quadratura, per condizioni di vento ordinarie, non sono tali da indurre condizioni di criticità per quanto attiene il regime idrodinamico, non arrecando pregiudizio alcuno sull'operatività del terminal.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

5.2 CASO 2 – MAREA DI SIZIGIA

Nel secondo caso è stata riprodotta una marea di sizigia con le medesime condizioni di vento medie per il paraggio oggetto d'indagine. Nella successiva Figura 51 è riportata l'escursione di marea posta a base delle simulazioni, compresa tra +0.40 m s.m.m. e -0.40 m s.m.m., che costituisce la condizione al contorno per la simulazione del caso 2, rappresentata nell'apposita Tavola C5-DIS-026-B1.

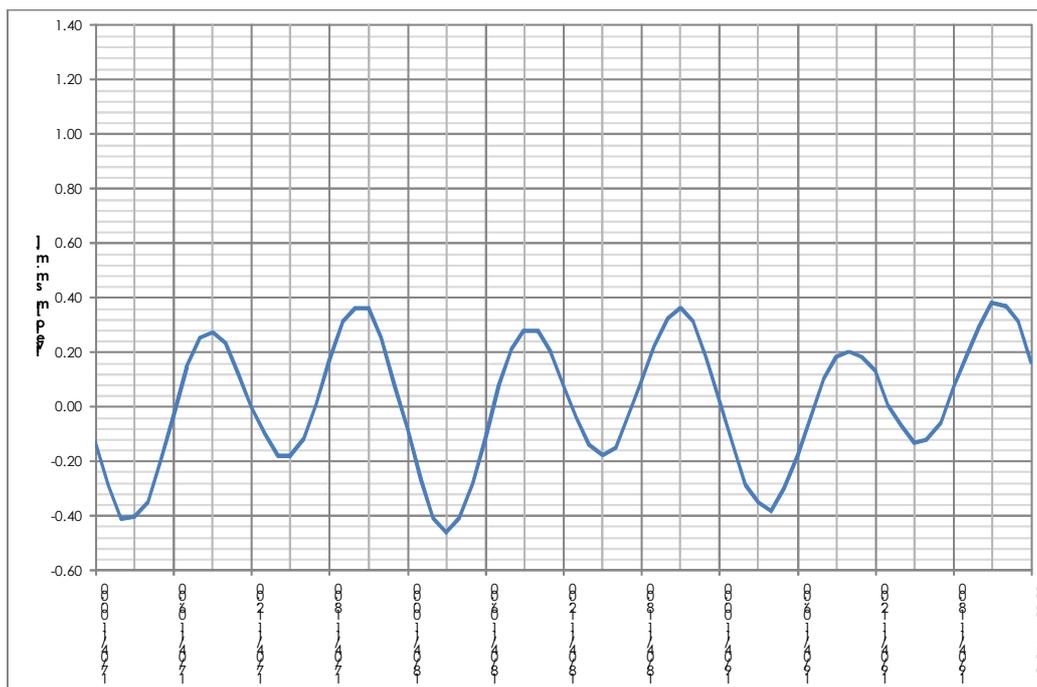


Figura 51: livelli di marea per la stazione mareografica di Ravenna nel periodo 17/04/2011 - 20/04/2011

L'elaborato C5-DIS-026 B2 contiene le mappe delle velocità della corrente per l'area del terminal e per l'Alto Adriatico con marea di sizigia ed assenza di vento. Generalmente, si osserva un aumento delle velocità in corrispondenza delle estremità della struttura con valori massimi di 0.18-0.20 m/s.

La presenza del vento di bora è invece riportata nella tavola C5-DIS-026 B3, riprodotta nella precedente Figura 52.

In questo caso si osserva un aumento generalizzato dei valori della corrente, comunque sempre compresa nell'intervallo dei valori 0-0.2 m/s, al di fuori dello specchio acqueo del terminal tanto da poter concludere che gli accosti delle navi non risentano di tale regime.

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

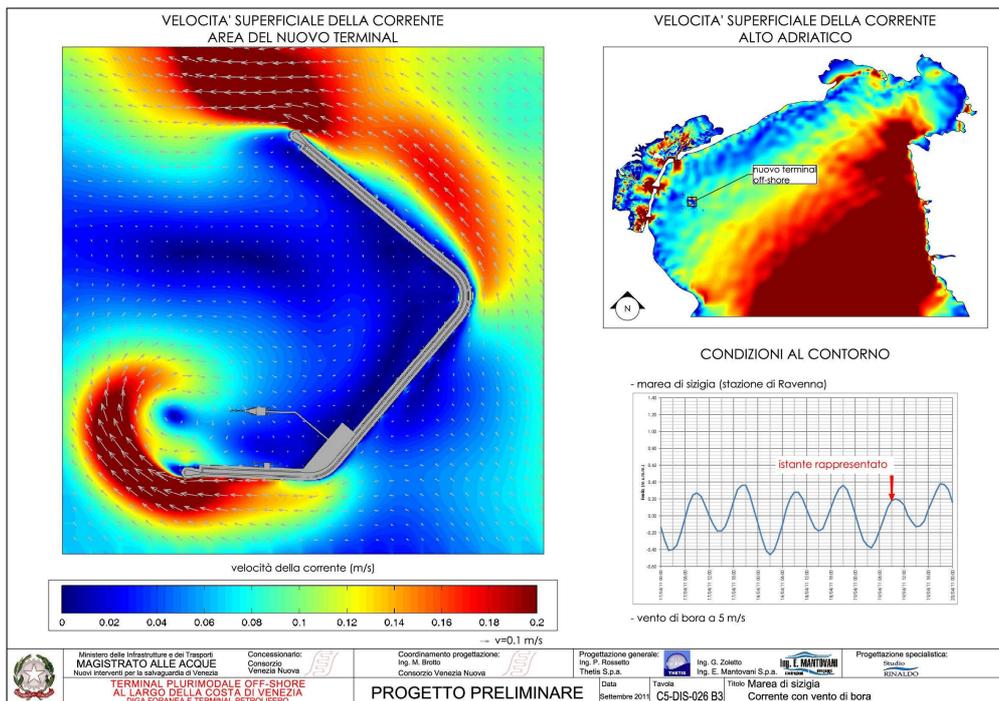


Figura 52: velocità della corrente con vento di bora – marea di sığida

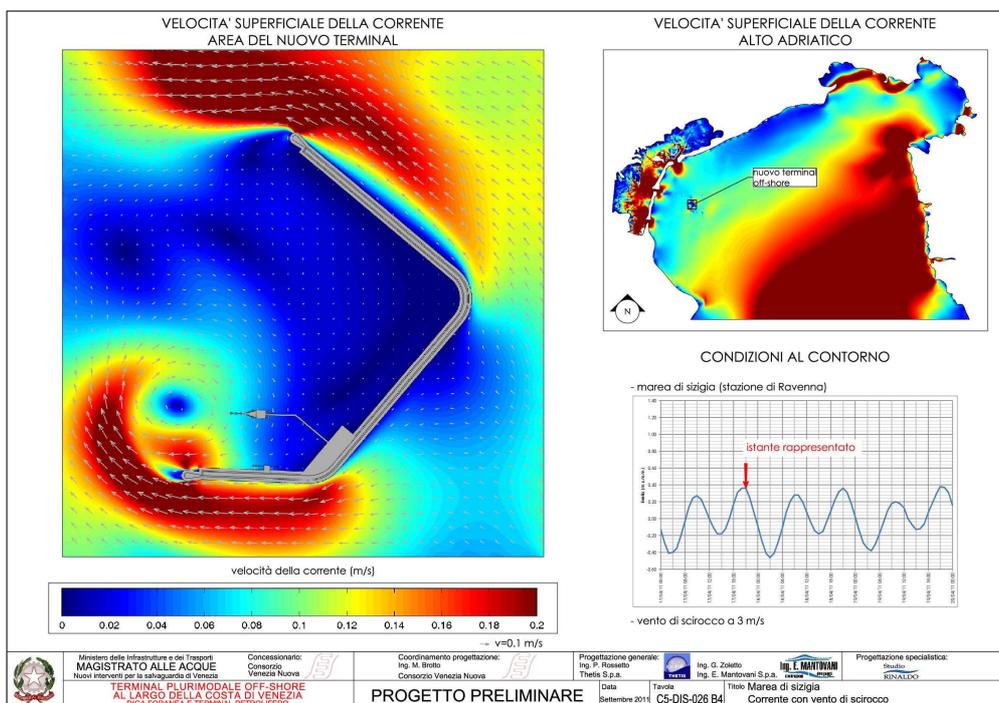


Figura 53: velocità della corrente con vento di scirocco – marea di sığida

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

Situazione del tutto simile si riscontra nel caso del vento di scirocco (cfr. C5-DIS-026 B4) qui riprodotto nella precedente Figura 53 con una situazione estremamente variabile localmente, in corrispondenza dell'estremità occidentale del terminal.

I valori riscontrati, (comunque al di sotto dei 0.2 m/s) non destano comunque preoccupazione sia per quanto riguarda le operazioni di attracco che per le manovre delle imbarcazioni anche in considerazione della loro stazza.

5.3 CASO 3 – MAREGGIATA DI BORA

Con il caso n.3 è stata rappresentata un'intensa mareggiata realmente registrata tra il 28 febbraio e il 3 marzo 2011 nella zona di Venezia.

In tale occasione, come si osserva nel grafico polare di Figura 54, il vento ha raggiunto picchi di velocità fino a 24 m/s provenienti dalla traversia di grecale-bora, direzioni nord-nordest, nordest ed est-nordest (cfr. Figura 55).

La sequenza temporale delle velocità del vento, registrate dalla stazione mareografica di Venezia, in corrispondenza all'evento di mareggiata, è di seguito rappresentata in Figura 56. Si osserva come per circa 25 ore sul totale della registrazione di 72 ore, il vento supera in intensità i 15 m/s.

La registrazione del livello di marea presso la stazione di Ravenna, in corrispondenza alle giornate dell'evento di mareggiata è di seguito rappresentata in Figura 57, ed è stata utilizzata come condizione al contorno del modello idrodinamico per questo caso.

L'oscillazione massima nelle 72 ore osservate è compresa nell'intervallo -0.10/+0.70 m s.m.m..

Il set completo delle condizioni al contorno è contenuto nell'elaborato C5-DIS-026-C1, dal quale si evince che, ai fini delle simulazioni idrodinamiche sono state considerate solo le 24 ore centrali della mareggiata in quanto più gravose rispetto alle altre.

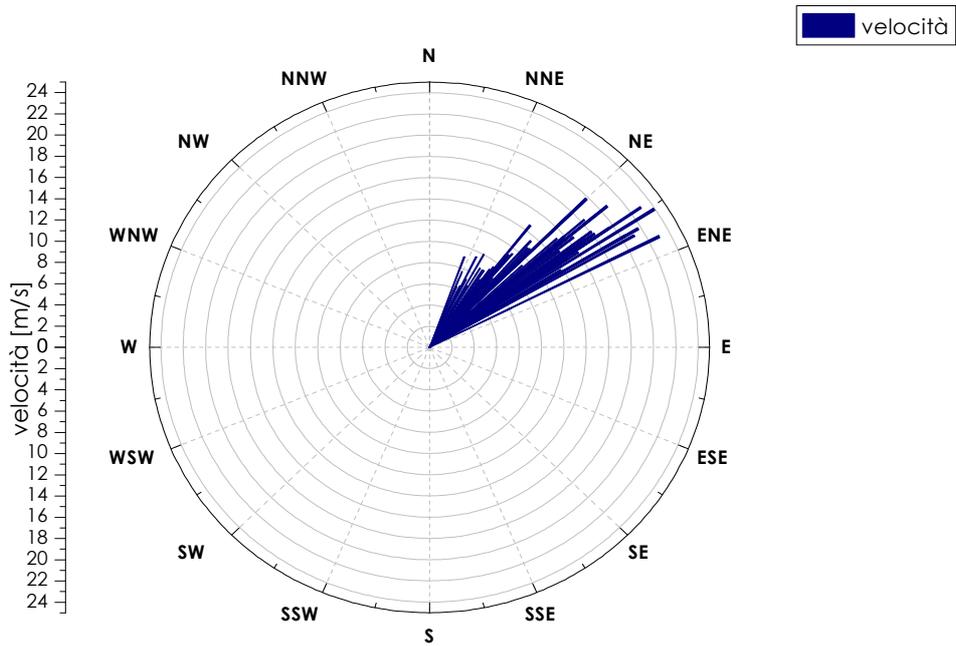


Figura 54: intensità e direzione dei venti registrati dalla stazione mareografica di Venezia 28/02/2011 - 03/03/2011

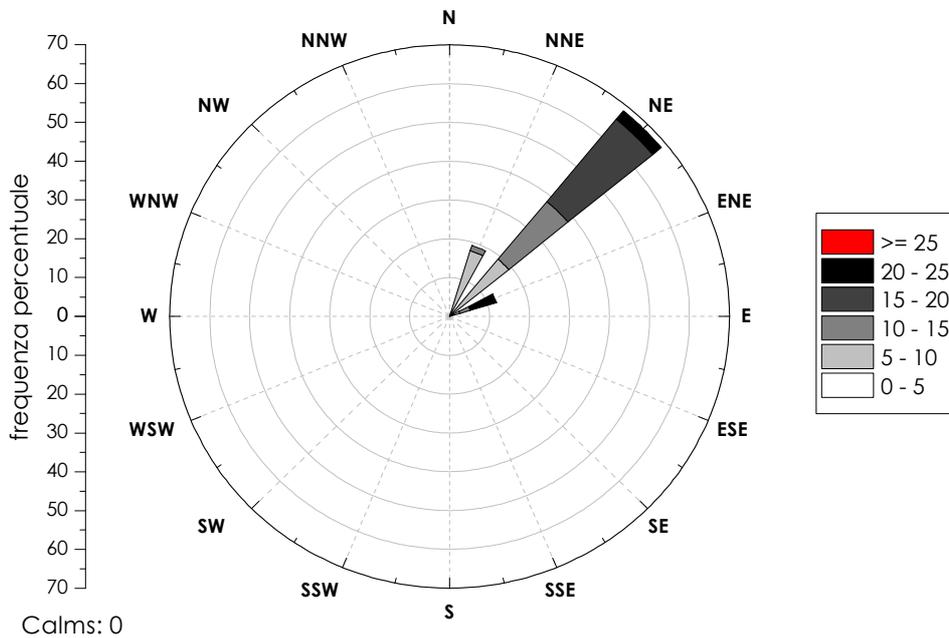


Figura 55: frequenza dei venti registrati dalla stazione mareografica di Venezia 28/02/2011 - 03/03/2011

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

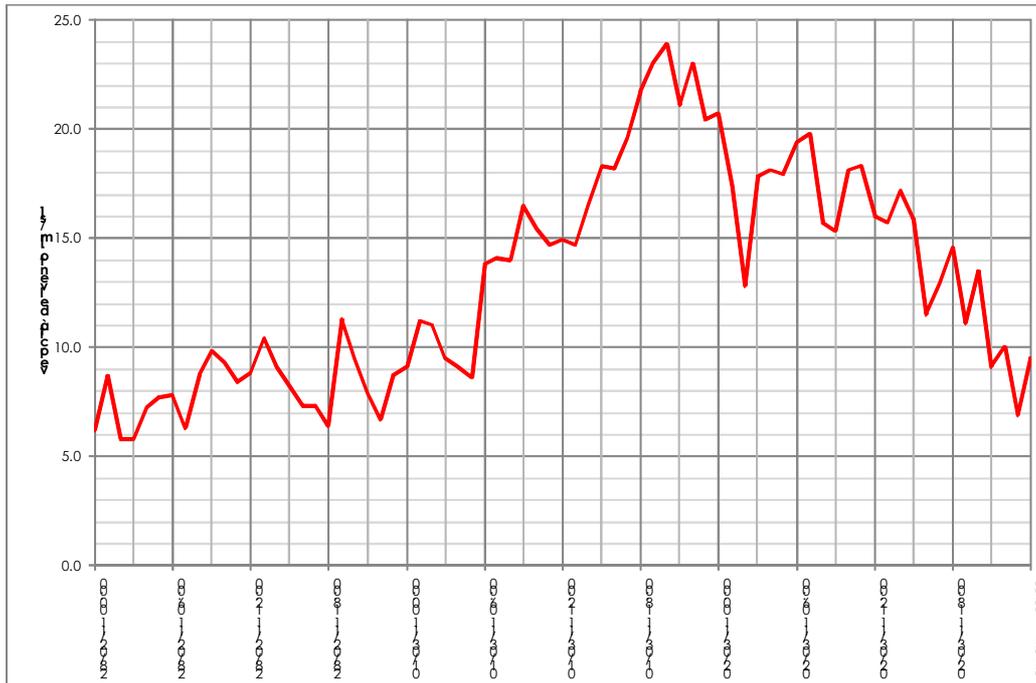


Figura 56: velocità del vento per la stazione mareografica di Ravenna 28/02/2011 - 03/03/2011

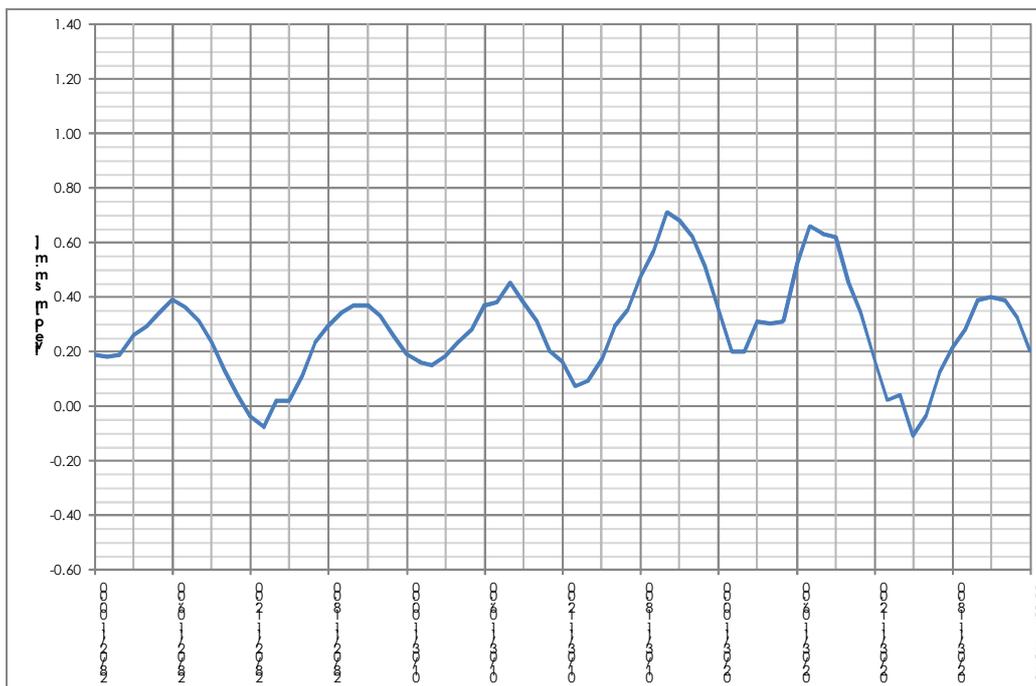


Figura 57: livelli di marea per la stazione mareografica di Ravenna 28/02/2011 - 03/03/2011

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

La rappresentazione dei risultati è contenuta negli elaborati C5-DIS-026 C2-3-4, dove, in ragione del diverso regime delle correnti rispetto al caso precedente, è stata utilizzata una scala cromatica di rappresentazione tra 0 e 1 m/s. E' questo l'unico caso in cui è stata adottata una tale scala grafica.

In particolare nella successiva Figura 58 (cfr. Tavola C5-DIS-026 C2) si riporta il caso di marea calante e vento di bora pari a 17 m/s. All'interno dell'area portuale la velocità della corrente è dell'ordine di 0.2-0.5 m/s, con i valori più alti in corrispondenza dell'area degli accosti delle imbarcazioni.

I valori più elevati della velocità superficiali (dell'ordine del metro al secondo) sono stati calcolati lungo il bordo esterno della struttura con direzione parallela alla stessa; tale aspetto andrà considerato anche in sede di dimensionamento della struttura.

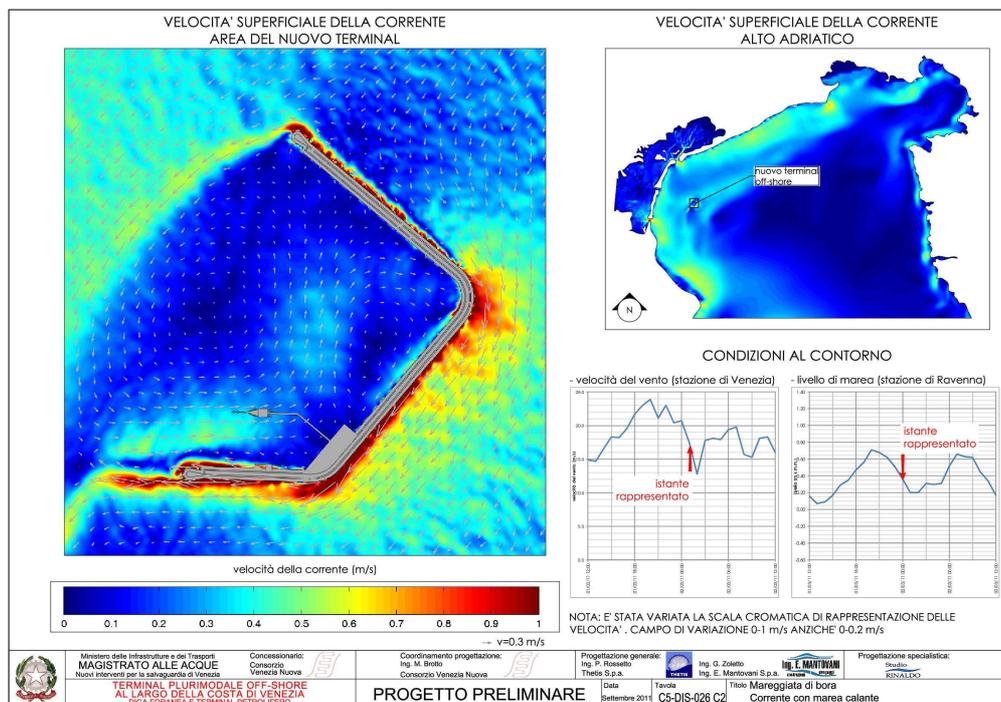


Figura 58: velocità della corrente con mareggiata di bora – marea calante

Nella successiva Figura 59 (cfr. Tavola C5-DIS-026 C3) è invece mostrato il risultato ottenuto in una fase di marea crescente con una velocità del vento pari a 18 m/s. Anche in questo caso è presente una componente della corrente esterna al terminal posta parallelamente alla struttura con valori dell'ordine del metro al secondo.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

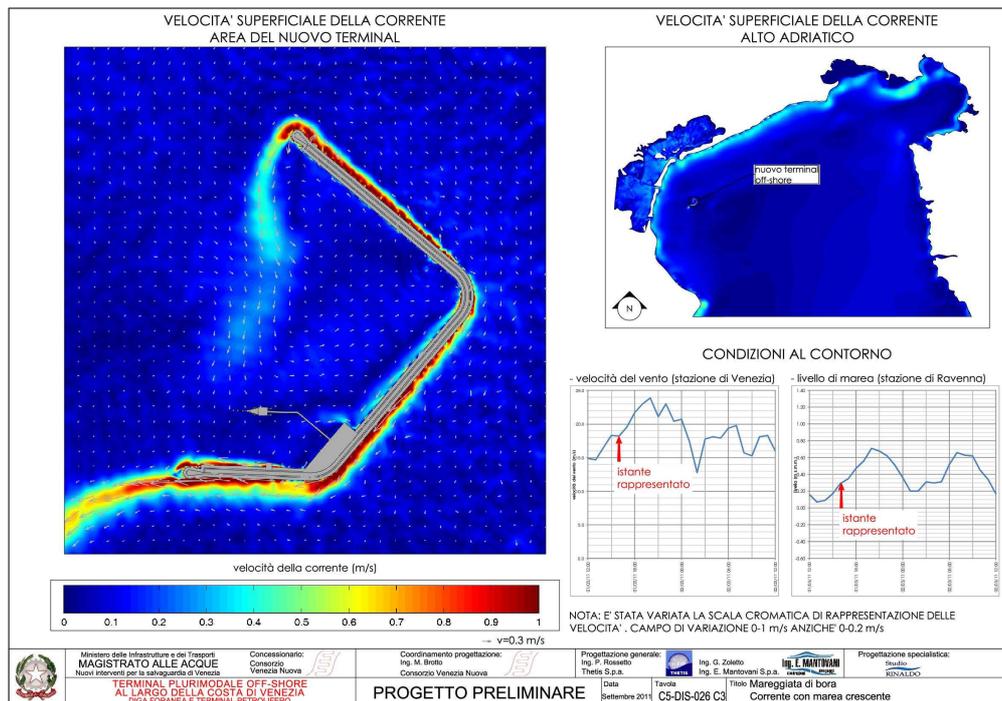


Figura 59: velocità della corrente con mareggiata di bora – marea crescente

Per quanto riguarda lo spazio acqueo a servizio della funzionalità del terminal, si osserva in questo caso una distribuzione più uniforme rispetto al caso precedente con valori compresi tra 0.1 e 0.2 m/s.

Considerazioni analoghe possono essere poste a commento del caso con marea massima e vento alla massima intensità (24 m/s), corrispondente alla Tavola C5-DIS-026 C4, pur se in corrispondenza alla testata settentrionale del terminal si riscontrano localmente valori pari a circa 0.5 m/s.

5.4 CASO 4 – MAREGGIATA DI SCIROCCO

L'ultimo caso analizzato è la mareggiata di scirocco, registrata dalla stazione mareografica di Venezia tra il 22 e il 25 dicembre 2010, in occasione della quale diffusi sono stati i danni indotti sui litorali veneti e della provincia di Venezia in particolare. Dall'osservazione dei grafici polari di Figura 60 e Figura 61 è possibile trarre le caratteristiche anemometriche dell'evento simulato: venti di intensità fino a 10 m/s provenienti dai settori da nord a sud-sudest.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

La sequenza temporale dei venti registrati lungo l'intera durata dell'evento di mareggiata (cfr. Figura 62) mostra che per 18 ore consecutive l'intensità del vento si è mantenuta tra 5 e 10 m/s.

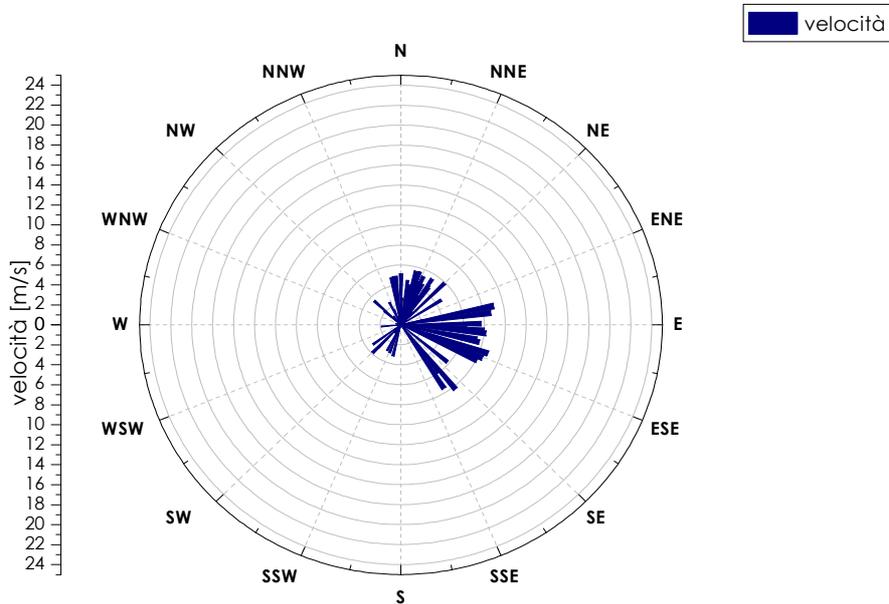


Figura 60: intensità e direzione dei venti registrati dalla stazione mareografica di Venezia 22/12/2010 - 25/12/2010

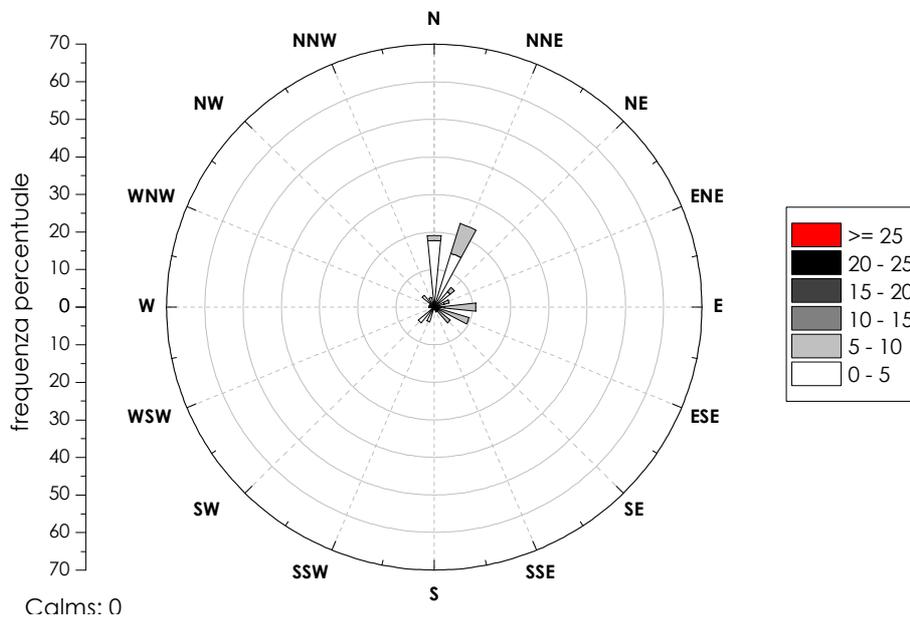


Figura 61: frequenza dei venti registrati dalla stazione mareografica di Venezia 22/12/2010 - 25/12/2010

**TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta
DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO
PROGETTO PRELIMINARE**

Relazione Modello Idrodinamico

Settembre 2011

C4-REL-004

Rev.0

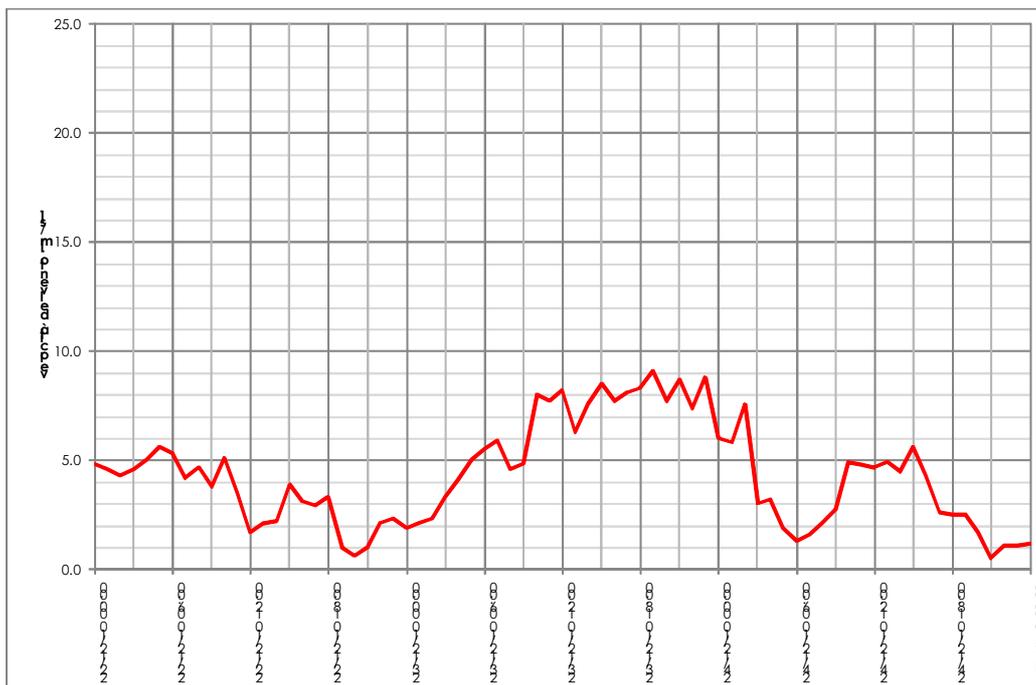


Figura 62: velocità del vento per la stazione mareografica di Ravenna 22/12/2010 - 25/12/2010

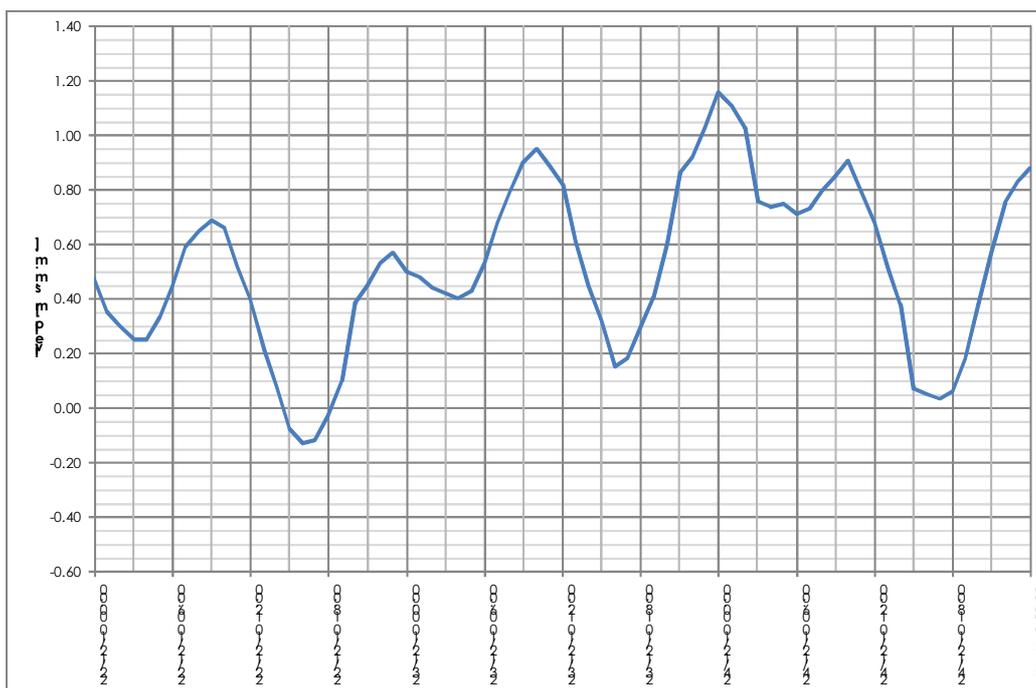


Figura 63: livelli di marea per la stazione mareografica di Ravenna 22/12/2010 - 25/12/2010

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

Per quanto riguarda i livelli di marea registrati nei medesimi giorni (cfr. Figura 63), si osservano picchi di poco inferiori a 1.20 metri e valori minimi di poco inferiori allo zero. Il set delle condizioni al contorno utilizzato per questa simulazione è riportato nell'elaborato C5-DIS-026 D1.

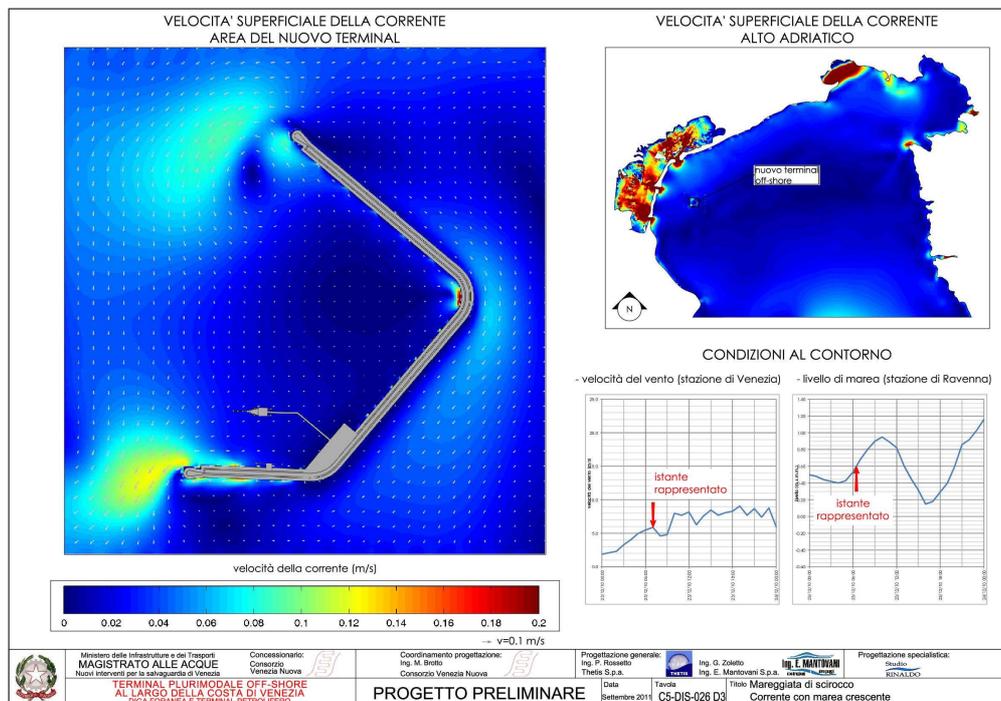


Figura 64: velocità della corrente con mareggiata di scirocco – marea crescente

L'analisi del regime della corrente, in corrispondenza dell'area operativa del terminal, presenta per primo il caso della marea calante con vento di intensità 7 m/s.

Nell'elaborato corrispondente a tale scenario (cfr. C5-DIS-026 D2) si osserva una sostanziale uniformità nei valori di velocità della corrente con valori medi tra 0.02 e 0.04 m/s. Solamente in corrispondenza dell'estremità meridionale del terminal è presente una corrente localizzata di intensità non superiore a 0.2 m/s.

Nella precedente Figura 64, che riproduce la Tavola C5-DIS-026 D3, è invece rappresentata una situazione in cui la marea sta crescendo ed il vento è pari a circa 6 m/s. Anche in questo caso si osserva una corrente in corrispondenza del faro di segnalazione meridionale, orientata da est a ovest, con intensità fino a 0.2 m/s mentre nel resto dello spazio acqueo a servizio della realizzanda struttura, la velocità della corrente non supera i 0.04 m/s.

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

Nella successiva Figura 65 (cfr. C5-DIS-026 D4), è infine rappresentato il caso di marea massima con vento a 5 m/s. Anche in questo caso si osserva che la zona interna al porto è stabile dal punto di vista della velocità superficiale della corrente mentre in questo caso la corrente riscontrata negli altri due casi, lungo il faro sud, è di intensità minore ovvero si attesta su valori di 0.1-0.12 m/s.

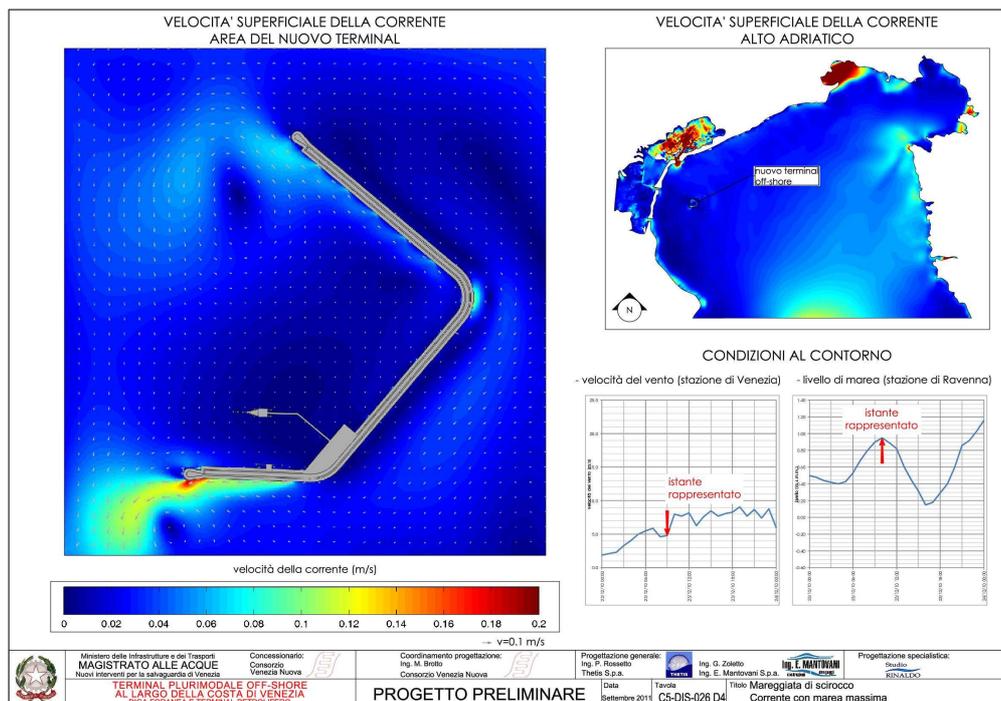


Figura 65: velocità della corrente con mareggiata di scirocco – marea massima

6 CONCLUSIONI

Oggetto del presente studio è la caratterizzazione idrodinamica dell'ambito oggetto d'intervento, ottenuta attraverso l'implementazione di un'applicazione del modello idrodinamico tridimensionale Delft 3D.

Le analisi condotte possono essere sintetizzate nei seguenti punti:

- l'altezza d'onda incidente, calcolata con tempo di ritorno cinquantennale sulla base dei dati registrati alle torre CNR, è da stimarsi pari a circa 3.9 m per la traversia di Scirocco e 4.3 m per quella di Bora;

TERMINAL PLURIMODALE OFF-SHORE al largo della Costa Veneta DIGA FORANEA E TERMINAL PETROLIFERO PROGETTO PRELIMINARE		
Relazione Modello Idrodinamico		
Settembre 2011	C4-REL-004	Rev.0

- l'altezza d'onda significativa incidente, calcolata simulando eventi reali verificatisi di recente, è pari a circa 3 m per la traversia di Bora e 3.5 m per quella di Scirocco, mentre è molto minore per le traversie di Libeccio e di Maestrale, pari a circa 0.90 m e 0.70 m;
- il moto ondoso residuo all'interno dello specchio acqueo protetto risulta caratterizzato da altezze d'onda significative con valori massimi all'imboccatura di circa 1.30 m nel caso di mareggiata di Bora, e di circa 70 cm con riferimento agli altri settori di traversia;
- nelle aree operative del terminal il moto ondoso residuo risulta compatibile con le varie attività portuali: in corrispondenza agli accosti per le petroliere nella zona sud l'altezza d'onda residua assume valori superiori a 30 cm per meno di 1000 ore all'anno (punto di osservazione 1), mentre in prossimità della banchina operativa a sud-est assume valori superiori a 30 cm per circa 350 ore all'anno (punto di osservazione 6), indicando così la completa compatibilità delle condizioni meteomarine con le attività portuali;
- il regime delle correnti nello spazio acqueo a servizio dell'operatività del realizzando terminal offshore, sono compatibili con le operazioni di accosto e manovra delle imbarcazioni, sia in condizioni medie, per i quali è stato calcolato un valore medio di circa 0.2 m/s, che in occasione di eventi di mareggiata con punte di velocità pari a 0.5 m/s.