



Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale  
Scali Rosciano, 6 - 57123 Livorno, Italia

R.U.P. ing. Enrico Pribaz  
D.E.C. ing. Ilaria Lotti

R.T.P.



30035 Mirano (VE)  
Viale Belvedere, 8/10  
www.fm-ingegneria.com

Tel. +39 041 5785 711  
Fax +39 041 4355 933  
portolivorno@fm-ingegneria.com



P.O. Box 1132  
3800 BC Amersfoort  
The Netherlands  
www.royalhaskoningdhv.com

Tel. +44 (0)207 222 2115  
Fax +44 (0)207 222 2659  
info@rhdhv.com



35027 Noventa Padovana (PD)  
Via Panà 56/a

Tel. +39 049 8945 087  
Fax +39 049 8707 868  
mail@hsmarinesrl.com



31027 Spresiano (TV)  
Via Tiepolo, 8  
www.gtgeo.it

Tel. +39 0422 8870 31  
Fax +39 0422 8895 89  
info@gtgeo.it

PROGETTO

**PROGETTAZIONE PRELIMINARE E DEFINITIVA DELLE  
OPERE MARITTIME DI DIFESA E DEI DRAGAGGI PREVISTI  
NELLA NUOVA PRIMA FASE DI ATTUAZIONE DELLA  
PIATTAFORMA EUROPA, COMPRESO LO STUDIO DI  
IMPATTO AMBIENTALE E LA VALUTAZIONE DI INCIDENZA  
AMBIENTALE**

EMISSIONE

**PROGETTO DEFINITIVO**

TITOLO

**D - IDRAULICA MARITTIMA**  
Studio della risospensione dei sedimenti

REV.	DATA	FILE	OGGETTO	DIS.	APPR.
1	31/10/2022	1233_PD-D-005_1.doc	Aggiornamento a seguito della caratterizzazione ambientale	N. Sguotti	T. Tassi
2					
3					
4					
5					

ELABORATO N.

**D005**

DATA: 04/09/2020	SCALA: -	FILE: 1233_PD-D-005_0.doc	J.N. 1233/'19
PROGETTO N. Sguotti	DISEGNO N. Sguotti	VERIFICA M. Tondello	APPROVAZIONE T. Tassi

Progetto:  
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:  
Progetto Definitivo

Elaborato:  
IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PD-D-005\_2.docx

## Indice generale

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE METEOMARINE</b>	<b>5</b>
2.1	DATI METEOMARINI AL LARGO DEL PARAGGIO	5
2.2	REGIME ANEMOLOGICO	7
2.3	CONDIZIONI MEDIE DI CIRCOLAZIONE	8
<b>3</b>	<b>DEFINIZIONE DEI TARGET SENSIBILI</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>LAVORAZIONI ANALIZZATE</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>ANALISI MODELLISTICA DEGLI IMPATTI DURANTE LE LAVORAZIONI</b>	<b>15</b>
5.1	SETTAGGIO DEL MODELLO	16
5.1.1	DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO	16
5.1.2	FORZANTI AMBIENTALI	18
5.1.3	CARATTERISTICHE DEL SEDIMENTO MOVIMENTATO	20
5.1.4	DEFINIZIONE DEI TERMINI SORGENTE	20
5.2	ANALISI DEI CAMPI DI CORRENTE	23
5.3	INDIVIDUAZIONE DEGLI SCENARI CRITICI	25
5.4	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	27
5.4.1	SCAVO A BENNA DEGLI IMBASAMENTI DELLE OPERE FORANEE E VENTO DI GRECALE	28
5.4.2	DRAGAGGIO DEL CANALE DI ACCESSO CON DRAGA CSD E VENTO DI GRECALE	31
5.4.3	DRAGAGGIO DEL CANALE DI INGRESSO CON DRAGA CSD E VENTO DI PONENTE	34
5.4.4	DRAGAGGIO DEL CANALE DI INGRESSO CON DRAGA CSD E CORRENTE VERSO SUD	37
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>APPENDICE – DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO 3DEF</b>	<b>42</b>

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

## Indice delle figure

Figura 2.1 - Posizione del punto (UNIGE, 10°8'38.4"E, 43°30'00"N) cui si riferiscono i dati di moto ondoso dell'Università di Genova.....	5
Figura 2.2 - Rosa delle registrazioni (in blu), delle energie (rosso) e delle altezze massime (verde) Punto UNIGE.....	6
Figura 2.3- Rosa a cannocchiale velocità media [Stazione LAMMA_COMMA-MED] .....	7
Figura 2.4- Rosa delle registrazioni anemometriche (a sx, in blu) e delle velocità massime del vento medio (a dx, in verde) [Stazione LAMMA_COMMA-MED].....	7
Figura 2.5 - Curva di durata del vento medio per i tre subsettori [Stazione LAMMA_COMMA-MED] .....	8
Figura 2.6 - Esempio di mappa delle correnti superficiali nell'alto Tirreno prodotta dal modello NEMO del servizio CMEMS Copernicus ( <a href="http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/">http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/</a> ).9	9
Figura 2.7 - Andamento della componente Nord della velocità della corrente nello strato superficiale prodotto dal modello NEMO del servizio CMEMS Copernicus ( <a href="http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/">http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/</a> ). .....	10
Figura 3.1 - Ubicazione dell'area di intervento rispetto ai limiti della ZSC Secche della Meloria, del SIC "Tursiops Truncatus" e alla mappatura della Posidonia Oceanica. ....	12
Figura 4.1 - Scavo con draga CSD (courtesy of Jan de Nul n.v.). ....	14
Figura 5.1 - Dominio del modello di calcolo tridimensionale con indicazione della ripartizione verticale degli strati e particolari delle griglie utilizzate nello stato di fatto e negli scenari in cui è stato simulato lo spargimento di sedimenti. ....	17
Figura 5.2 - Curva di durata del vento e velocità del vento impiegate per i due settori considerati rimettere figura .....	18
Figura 5.3 - Andamento della velocità della corrente longshore per l'anno 2017 (valori positivi indicano direzione verso Nord).....	19
Figura 5.4 - Curva di durata della velocità della corrente diretta verso Nord.....	19
Figura 5.5 - Curva di durata della velocità della corrente diretta verso Sud.....	20
Figura 5.6 - Campi di velocità nei quattro scenari considerati nella configurazione attuale del litorale (ante-operam). Le mappe fanno riferimento alla profondità di circa -4.0 m dalla superficie. ....	24
Figura 5.7 - Definizione delle aree di lavoro analizzate nello studio. ....	26
Figura 5.8 - Vento di Grecale, scavo di imbasamento delle opere foranee. Campo di velocità nello strato superficiale e punto di lavoro della draga a benna (in rosso) .....	28
Figura 5.9 - Vento di Grecale, scavo di imbasamento delle opere foranee. Campo di velocità alla profondità di -4.0 m e punto di lavoro della draga a benna (in rosso).....	29
Figura 5.10 - Vento di Grecale, scavo di imbasamento delle opere foranee. Campo di velocità alla profondità di -10.0 m e punto di lavoro della draga a benna (in rosso).....	29
Figura 5.11 - Vento di Grecale, scavo di imbasamento delle opere foranee. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (planimetria) .....	30
Figura 5.12 - Vento di Grecale, scavo di imbasamento delle opere foranee. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (sezione verticale) .....	30
Figura 5.13 - Vento di Grecale, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità nello strato superficiale e punto di lavoro della draga (in rosso) .....	31
Figura 5.14 - Vento di Grecale, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità alla profondità di -4.0 m e punto di lavoro della draga (in rosso) .....	32
Figura 5.15 - Vento di Grecale, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità Campo di velocità alla profondità di -10.0 m in superficie e punto di lavoro della draga (in rosso). ....	32

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

Figura 5.16 - Vento di Grecale, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (planimetria) .....	33
Figura 5.17 - Vento di Grecale, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (sezione verticale) .....	33
Figura 5.18 - Vento di Ponente, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità nello strato superficiale e punto di lavoro della draga (in rosso) .....	34
Figura 5.19 - Vento di Ponente, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità alla profondità di -4.0 m e punto di lavoro della draga (in rosso) .....	35
Figura 5.20 - Vento di Ponente, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità alla profondità di -10.0 m e punto di lavoro della draga (in rosso) .....	35
Figura 5.21 - Vento di Ponente, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (planimetria) .....	36
Figura 5.22 - Vento di Ponente, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (sezione verticale) .....	36
Figura 5.23 - Corrente diretta verso Sud, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità nello strato superficiale e punto di lavoro della draga (in rosso) .....	37
Figura 5.24 - Corrente diretta verso Sud, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità alla profondità di -4.0 m e punto di lavoro della draga (in rosso) .....	38
Figura 5.25 - Corrente diretta verso Sud, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità alla profondità di -10.0 m e punto di lavoro della draga (in rosso) .....	38
Figura 5.26 - Corrente diretta verso Sud, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (planimetria).....	39
Figura 5.27 - Corrente diretta verso Sud, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (sezione verticale) .....	39

## Indice delle tabelle

Tabella 5.1 - Caratteristiche del vento impiegato per lo studio della circolazione idrodinamica generata da vento .....	18
Tabella 5.2 - Dati di base per lo studio della torbidità generata dallo scavo di imbasamento delle opere foranee.....	21
Tabella 5.3 - Dati di base per lo studio della torbidità generata da scavo del canale d'ingresso tramite draga CSD.....	22

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto Definitivo	IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx

## 1 PREMESSA

Il presente studio è stato sviluppato a supporto della Progettazione definitiva delle opere previste dalla prima fase di attuazione della Piattaforma Europa.

Lo studio, effettuato con l'impiego di idonea modellistica matematica, è stato svolto al fine di valutare gli impatti sugli habitat presenti sui fondali durante la realizzazione dei lavori, con particolare attenzione agli effetti di variazione di torbidità (primo parametro indice delle potenziali alterazioni ambientali). Scopo delle indagini è anche l'individuazione delle zone più vulnerabili dove installare le stazioni di monitoraggio per gestire le lavorazioni e misurare l'evoluzione degli eventuali impatti.

L'impiego di modelli matematici nelle fasi progettuali degli interventi di movimentazione dei sedimenti è infatti suggerito nella recente normativa, sia come supporto alla progettazione che per indirizzare le attività di monitoraggio. Nello specifico, le norme di attuazione del D.M. 172/2016 suggeriscono che per il complesso delle scelte progettuali, in particolare per la scelta delle più opportune tecnologie di dragaggio e collocazione del materiale dragato, ci si avvalga di modelli matematici adeguatamente implementati in grado di prevedere, per i diversi scenari ipotizzati, il comportamento del sedimento nell'ambiente acquatico e i processi di dispersione e/o diffusione della contaminazione eventualmente presente. Si fa peraltro presente che, a seguito della procedura di deperimetrazione del S.I.N. in corso, l'intervento seguirà le procedure del D.M. 15/07/2016 n. 173; ciò nonostante, si farà genericamente riferimento alle indicazioni e ai principi del D.M. 172/2016 in quanto ritenuti utili e pertinenti anche per il caso di studio.

Particolarmente rilevante è al riguardo l'emanazione, da parte dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), delle linee guida per "La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere" (LG169/dicembre 2017), che forniscono indicazioni per il corretto utilizzo della modellistica, suggerendo i livelli di accuratezza e dettaglio adeguati alle tipologie di intervento previste e alle criticità ambientali da affrontare.

In particolare, il documento fornisce indicazioni sulle modalità di implementazione di un Approccio Modellistico Integrato (AMI), basato sull'utilizzo di diversi strumenti modellistici per la simulazione dei processi di trasporto dei sedimenti (risospensione, dispersione, diffusione e deposizione) indotti dalle operazioni di escavo e versamento.

L'analisi è stata condotta con riferimento alle indicazioni riportate nelle suddette Linee Guida, impiegando un modello tri-dimensionale (3DEF) che consente di descrivere la dinamica delle correnti stratificate generate dalla marea e dal vento in lagune e corpi idrici costieri, anche in ipotesi di densità variabile. Il modello consente inoltre di simulare il trasporto e la diffusione di sostanze disciolte in acqua e di sedimenti in sospensione rilasciati da sorgenti quali i mezzi di dragaggio. Esso adotta l'ipotesi idrostatica, quindi è adatto per le simulazioni cosiddette "far field" in cui la sorgente si assume puntuale, e il trasporto dei sedimenti avviene in modo passivo sulla base del campo idrodinamico, con diverse tipologie e modalità di funzionamento della sorgente stessa (fissa o mobile, con flusso di sedimenti costante o variabile nel tempo).

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

## 2 CARATTERISTICHE METEOMARINE

Di seguito si riporta una sintesi delle caratteristiche meteomarine del paraggio e la descrizione delle analisi propedeutiche alla ricostruzione dei dati, utilizzati anche per il settaggio del modello predisposto per lo studio della risospensione dei sedimenti.

### 2.1 Dati meteomarini al largo del paraggio

Per la definizione del clima ondoso al largo del paraggio di interesse sono stati acquisiti i dati risultanti da un'attività di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università di Genova. I dati (<http://www.dicca.unige.it>) sono ottenuti da una reanalisi delle condizioni meteomarine estesa da gennaio 1979 a dicembre 2018; coprono quindi un periodo di circa 40 anni e si riferiscono al punto di coordinate  $10^{\circ}8'38.4''E$ ,  $43^{\circ}30'00''N$  ("UNIGE", cfr. Figura 2.1).

La descrizione dettagliata dei dati di moto ondoso al largo del paraggio oggetto di studio è riportata nell'elaborato 1233\_PD-D-001\_0 ("Relazione idraulico marittima"). Di seguito si riporta una sintesi dei dati.

La serie storica dei dati di molto ondoso è stata opportunamente ordinata per classi di altezza significativa e direzione media di provenienza; nella successiva Figura 2.2 si riportano le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze massime relative al punto UNIGE al largo.

Si può notare che gli eventi con percentuale di apparizione più elevata e maggiore energia (con picco a  $255^{\circ}N$ ) provengono dal settore di Libeccio-Ponente. Le mareggiate caratterizzate dai valori massimi di altezza significativa sono quelle provenienti da Ponente ( $255^{\circ}N$ ), per le quali si raggiungono valori di  $H_s$  prossimi agli 8 m. Per gli altri settori i valori massimi di altezza significativa sono invece inferiori a 5 m.



Figura 2.1 - Posizione del punto (UNIGE,  $10^{\circ}8'38.4''E$ ,  $43^{\circ}30'00''N$ )  
cui si riferiscono i dati di moto ondoso dell'Università di Genova

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

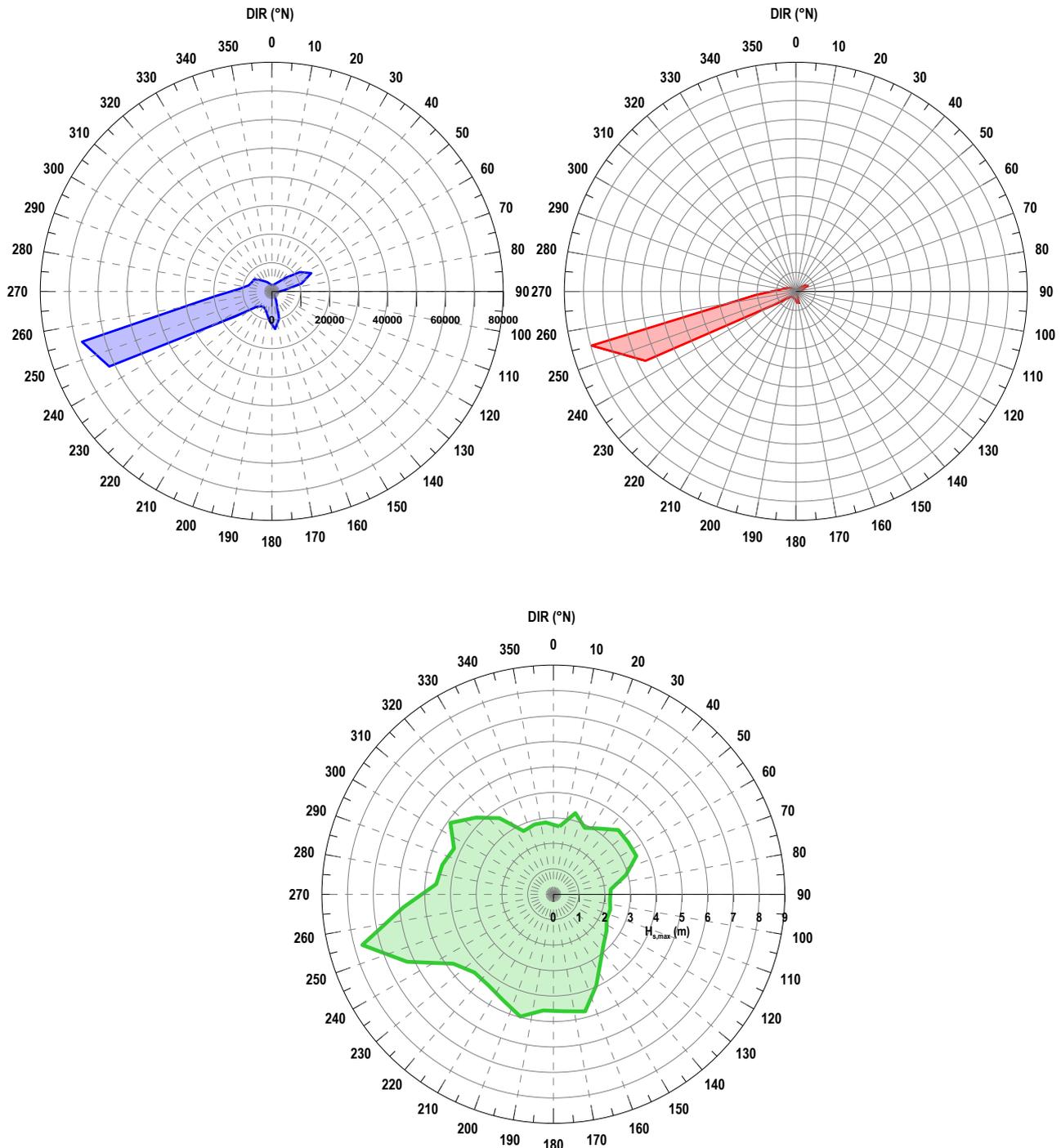


Figura 2.2 - Rosa delle registrazioni (in blu), delle energie (rosso) e delle altezze massime (verde)  
Punto UNIGE

## 2.2 Regime anemologico

Per la definizione del regime anemologico si è fatto riferimento ai dati forniti dal Consorzio LAMMA (Laboratorio di Monitoraggio e Modellistica Ambientale per lo sviluppo sostenibile - Laboratory for Meteorology and Environmental Modelling); i dati si riferiscono alla stazione LAMMA\_COMMA-MED (Codice 2416) ubicata in corrispondenza delle coordinate geografiche 43.547083°N e 10.304583°E ad una quota di circa 3 m rispetto il livello medio del mare. I dati sono stati elaborati per il periodo dal febbraio 2015 al giugno 2020 in quanto acquisiti in modo continuo e senza buchi significativi. Di seguito si riporta una sintesi delle elaborazioni.

La serie storica è stata opportunamente ordinata per classi di velocità e direzione media di provenienza; In Figura 2.4 sono riportate rispettivamente le rose delle registrazioni e delle velocità massime del vento. Si può notare che i venti regnanti provengono da Greco Levante, mentre i venti dominanti (caratterizzati da velocità massime di poco superiori ai 20 m/s) provengono da Grecale (55 °N) e Ponente (255-275 °N).

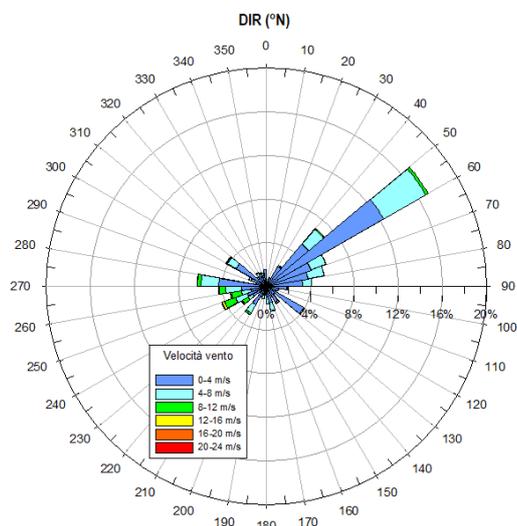


Figura 2.3- Rosa a cannocchiale velocità media [Stazione LAMMA\_COMMA-MED]

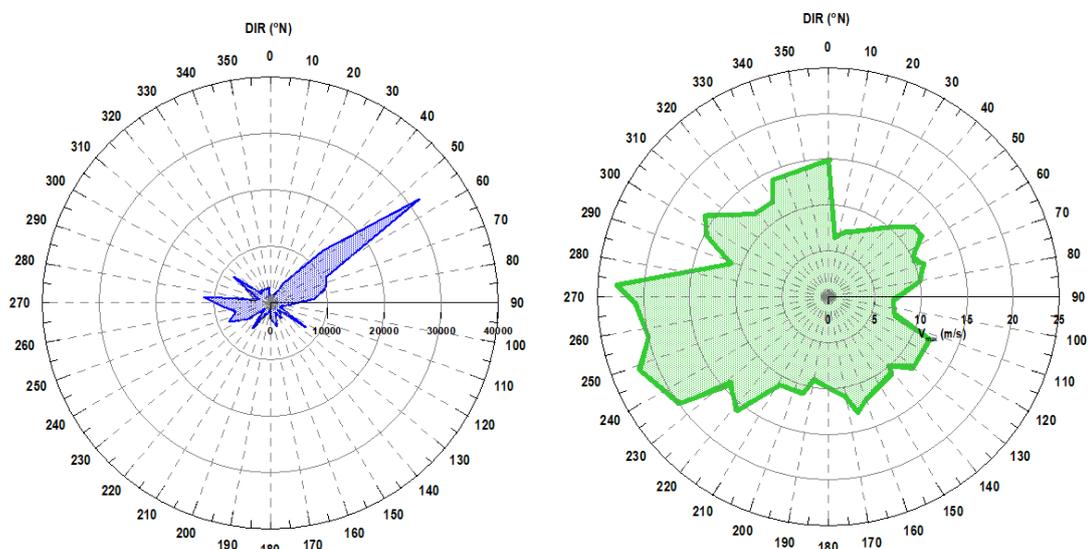


Figura 2.4- Rosa delle registrazioni anemometriche (a sx, in blu) e delle velocità massime del vento medio (a dx, in verde) [Stazione LAMMA\_COMMA-MED]

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

È stato inoltre possibile ricostruire anche la curva di durata. La curva di durata è stata ricostruita con riferimento a 3 subsettori:  $0^\circ \div 90^\circ \text{N}$ ,  $180^\circ \div 270^\circ \text{N}$  e  $270^\circ \div 360^\circ \text{N}$  (Figura 2.5). Si osserva come la velocità media di 25 nodi venga superata per 1÷2 giorni all'anno solo per il settore di Libeccio-Ponente mentre è superata solo qualche ora all'anno per il settore di Maestrale.

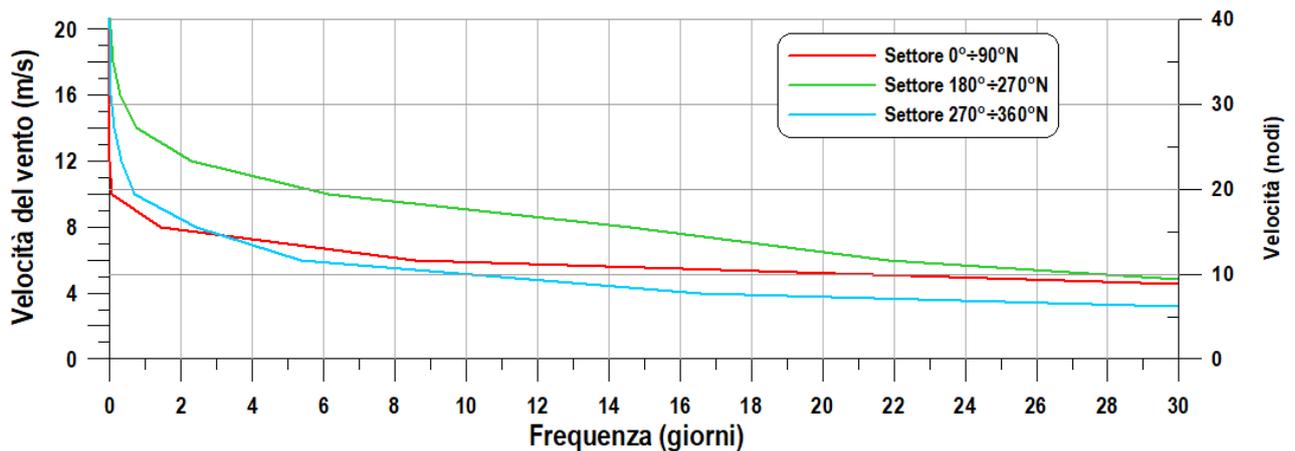


Figura 2.5 - Curva di durata del vento medio per i tre subsettori [Stazione LAMMA\_COMMA-MED]

### 2.3 Condizioni medie di circolazione

Per valutare l'assetto generale della circolazione delle correnti costiere nel braccio di mare antistante al porto di Livorno è possibile riferirsi ai modelli oceanografici attualmente operativi sul Mar Tirreno.

In particolare è possibile disporre dei dati forniti dal servizio europeo E.U. Copernicus Marine Service (CMEMS), accessibili al link: <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>. Tra questi, è disponibile un servizio di previsione delle correnti in tutto il Mediterraneo (Mediterranean Forecasting System, Med-Currents), fornito da un modello accoppiato onde-correnti. La risoluzione orizzontale del modello è di  $1/24^\circ$  (ca. 4 km), mentre la discretizzazione verticale è composta di 141 livelli.

Il modulo idrodinamico del sistema è costituito dal "Nucleous for European Modelling of the Ocean" (NEMO v3.6) mentre il moto ondoso è fornito dal modello Wave Watch-III. I risultati modellistici sono corretti da una procedura di "data assimilation" (3DVAR) basata su profili di temperatura e salinità e osservazioni satellitari.

Sono disponibili uscite a scansione oraria a partire dal 1/1/2017, scaricabili in formato NETCDF. Nel caso in esame, si sono reperiti i dati del servizio CMEMS Copernicus a scansione giornaliera per tutto l'anno 2017.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

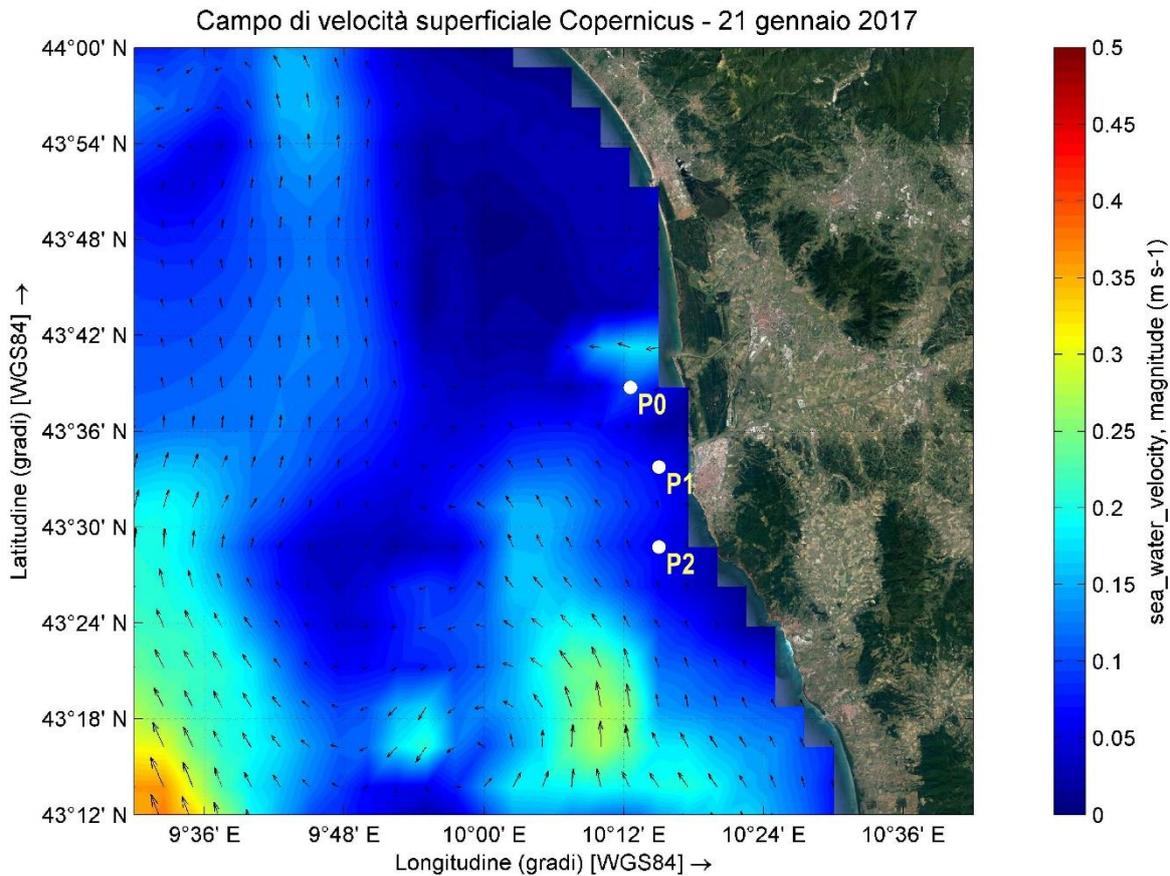


Figura 2.6 - Esempio di mappa delle correnti superficiali nell'alto Tirreno prodotta dal modello NEMO del servizio CMEMS Copernicus (<http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>).

Nel grafico di Figura 2.7 è riportato l'andamento della componente Nord della velocità della corrente (sostanzialmente diretta parallelamente alla costa) calcolato in 3 punti davanti all'area di interesse (la posizione dei punti è rappresentata in Figura 2.6).

Come si può osservare, la velocità della corrente oscilla tra valori massimi di quasi +0.2 m/s (verso Nord) e valori minimi di -0.2 m/s (verso Sud).

Le oscillazioni della velocità sono praticamente le medesime per tutti e 3 i punti considerati, e sono distribuite nel tempo secondo una sequenza irregolare, che dipende evidentemente dall'intermittente azione dei venti e delle mareggiate.

È di interesse osservare che, operando la media dei dati suddetti, non è individuabile una direzione prevalente delle correnti costiere. Una debole tendenza è identificabile solo alla scala stagionale, e vede una modesta prevalenza delle correnti dirette verso Nord nei mesi invernali e delle correnti con direzione meridionale nei mesi estivi.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

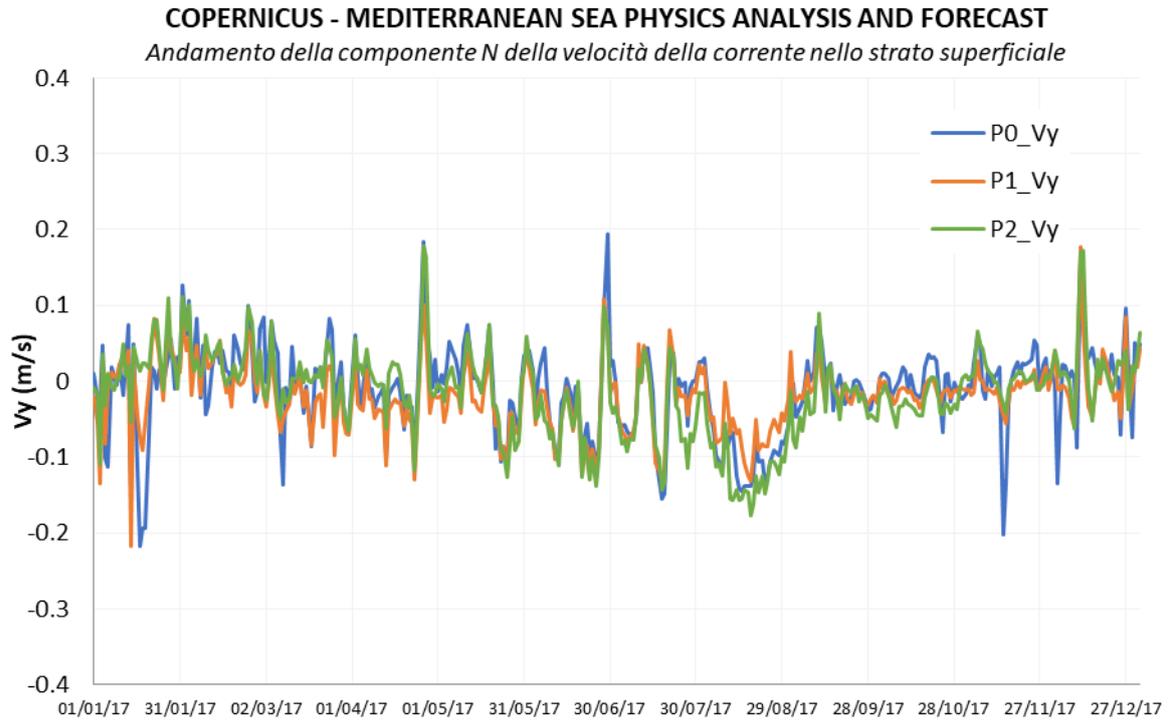


Figura 2.7 - Andamento della componente Nord della velocità della corrente nello strato superficiale prodotto dal modello NEMO del servizio CMEMS Copernicus (<http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>).

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto Definitivo	IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx

### 3 DEFINIZIONE DEI TARGET SENSIBILI

Al fine di valutare i potenziali impatti, sono stati individuati i target sensibili presenti nell'area. Nello specifico, il principale target, in relazione alle variazioni di torbidità che possono essere indotte in fase di lavorazione, è rappresentato dalle praterie di Posidonia Oceanica che si trovano nei fondali antistanti il litorale di Livorno.

Le praterie di Posidonia, in base alla più recente mappatura locale (propedeutica al presente progetto), presentano tracce di regressione sul fronte litorale. La distribuzione stessa delle praterie, estratta dalla cartografia regionale, testimonia un antagonismo tra la formazione delle praterie e la prossimità alle foci fluviali, cui si correlano elevati tassi di sedimentazione e torbidità. È più che probabile che la presenza di matte morta in prossimità dell'area di intervento possa essere correlata alla realizzazione dello scolmatore d'Arno, che sfocia sulla spiaggia di Calambrone. A Sud del porto di Livorno, invece, la prateria si avvicina considerevolmente alla riva. Va osservato che, a Sud del porto, non sono presenti foci fluviali e che la costa prevalentemente rocciosa riduce la formazione di torbidità anche durante le mareggiate; in quest'area i livelli di torbidità e sedimentazione sono oggettivamente più contenuti dei litorali a Nord del porto, dove la dinamica sedimentaria è molto diversa.

La mappatura della Posidonia sul dominio del modello (Figura 3.1) è stata costruita sulla base della cartografia regionale, integrata e corretta localmente sulla base della recente carta geomorfologica elaborata da CIBM (Dicembre 2016), verificata puntualmente con ROV eseguite nel corso dell'ultima campagna di indagine conclusa nel maggio 2022..

Oltre alla Posidonia, nella mappa di Figura 3.1 sono riportati i limiti delle aree a vincolo ambientale.

In particolare, è delimitata la Zona Speciale di Conservazione costituita dall'area marina protetta denominata «Secche della Meloria», istituita con decreto interministeriale del 21 ottobre 2009, e affidata in gestione all'Ente Parco Regionale del «Parco naturale di Migliarino, San Rossore e Massaciuccoli». L'area si estende per più di 9000 ettari delimitando un'area di elevato interesse naturalistico, per l'elevata biodiversità, presente grazie ai molteplici tipi di habitat.

In Figura 3.1 è indicato, infine, il limite del Sito di Importanza Comunitaria denominato «Tutela del Tursiops Truncatus», di recente designazione (SIC IT5160021, DCR 14/1/2020) da parte della Regione Toscana per la tutela della specie di delfino denominato tursiope. Il SIC, che è il più grande del Mediterraneo per questa specie, riguarda il triangolo che si estende tra i Comuni di Pietrasanta e Piombino e si spinge fino a comprendere le isole di Gorgona, Capraia e le Secche della Meloria, per una superficie di oltre 3740 chilometri quadrati. Il concetto di SIC discende dalla direttiva "Habitat", recepita in Italia a partire dal 1997, il cui scopo è contribuire a salvaguardare la biodiversità mediante la conservazione degli habitat naturali, nonché della flora e della fauna selvatiche, e nasce dall'idea che alla protezione delle singole specie debba necessariamente essere legata la protezione degli habitat in cui le stesse specie vivono.

Ora questa proposta di nuova designazione (pSIC) dovrà essere verificata e confermata dai competenti uffici del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare e da quelli della Commissione europea, che eventualmente procederanno, in attuazione della direttiva 92/43/CE «Habitat», al recepimento nei relativi elenchi nazionali ed europei.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

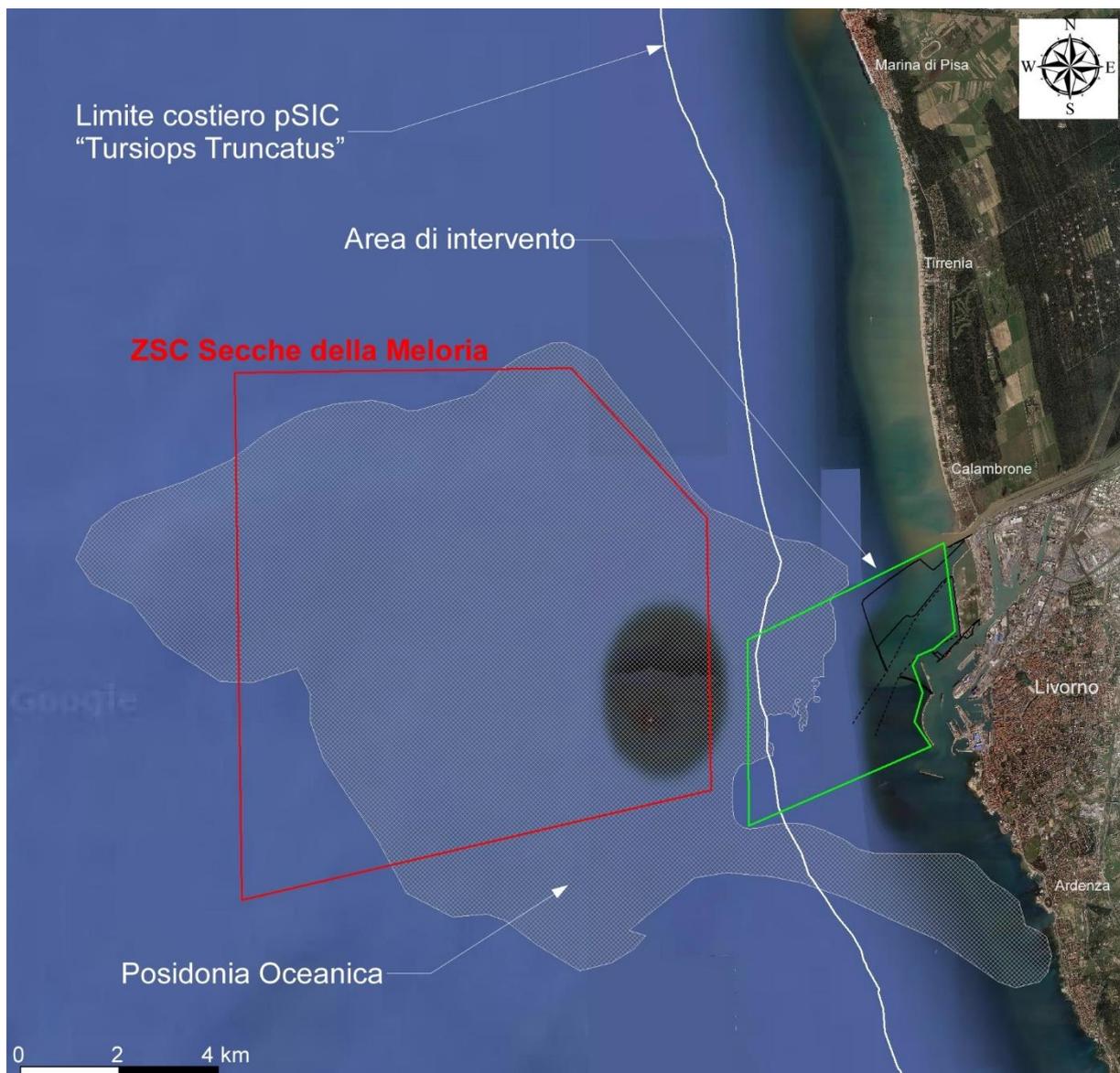


Figura 3.1 - Ubicazione dell'area di intervento rispetto ai limiti della ZSC Secche della Meloria, del SIC "Tursiops Truncatus" e alla mappatura della Posidonia Oceanica.

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto Definitivo	IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx

## 4 LAVORAZIONI ANALIZZATE

Le lavorazioni, in particolare i dragaggi, sono state organizzate a priori in modo da contenere gli impatti: la corretta definizione delle lavorazioni e delle fasi di cantiere costituisce senza dubbio lo strumento più efficiente a disposizione per tale finalità. Le misure di contenimento da applicare a lavorazioni male organizzate o che impiegano tecnologie non idonee costituiscono invece spesso un palliativo di discutibile efficacia.

In fase di progetto si è quindi cercato di massimizzare la quota parte di dragaggio da realizzare all'interno di bacini conterminati da opere foranee e, per la minima parte da realizzare in mare aperto, di adottare le tecnologie più idonee per contenere la produzione di torbidità nel punto di scavo. In particolare, è stato previsto di realizzare la quasi totalità del dragaggio, ad eccezione degli scavi di imbasamento delle opere, dopo il completamento della Diga Nord, in modo da creare una conterminazione quasi completa. Per il dragaggio è stato previsto l'utilizzo di una draga aspirante-refluente (CSD).

La sola lavorazione di dragaggio eseguita con benna all'esterno delle nuove opere foranee sarà appunto lo scavo di imbasamento delle opere foranee stesse; il sedimento prelevato sarà destinato al riempimento della colmata.

Il dragaggio all'interno delle nuove opere foranee avverrà con draga CSD, versando il materiale all'interno della colmata.

Con questi presupposti, le fasi di lavorazione oggetto di specifica analisi, sono state individuate come quelle che si svolgono all'esterno delle nuove opere foranee. Lo studio su modello è stato quindi eseguito con riferimento alle seguenti due diverse fasi di lavorazione, ritenute rappresentative degli scenari potenzialmente più critici per gli impatti sugli habitat:

- **Scavo dei fondali per realizzazione dell'imbasamento delle opere:** il dragaggio verrà eseguito con benna bivalve e motopontoni autocaricanti: si tratta della fase iniziale delle lavorazioni, nella quale viene preparato il piano di fondazione per le opere foranee. Queste ultime verranno presumibilmente realizzate partendo da terra. Le lavorazioni procederanno quasi interamente in avanzamento, realizzando lo scavo immediatamente prima del posizionamento dell'eventuale filtro sintetico e del versamento del materiale lapideo per lo strato di fondazione. La lavorazione sarà distribuita nel tempo per poter procedere parallelamente alla sezione compiuta dell'opera foranea, prevedibilmente utilizzando i medesimi mezzi che verranno impiegati anche per il posizionamento del materiale lapideo. Nelle simulazioni si è tenuto conto del protrarsi della lavorazione per l'intero arco della giornata (24 ore): questo scenario è fortemente cautelativo, perché un ciclo di carico non durerà più di 3 ore (cui si alternano da 3 a 5 ore per i trasferimenti e lo scarico) e, vista la modesta produzione richiesta, è ragionevole ipotizzare che vi sia solo un mezzo impiegato nella lavorazione. Lo scenario è volutamente cautelativo, in quanto le simulazioni hanno anche lo scopo di individuare le zone potenzialmente più vulnerabili dei target ambientali, dove prevedere i punti di monitoraggio.
- **Dragaggio:** il dragaggio verrà eseguito con draga aspirante-refluente (CSD), utilizzando un mezzo di grandi dimensioni, in grado di garantire produzioni giornaliere particolarmente elevate e capacità di operare anche in condizioni meteomarine relativamente severe. La scelta della draga tipo CSD è legata alla minimizzazione della produzione di torbidità nella zona di prelievo.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

Per ciascuno scenario sono state individuate una o più zone di lavoro, ubicate nelle posizioni potenzialmente più a rischio per gli impatti sugli habitat. Le posizioni di lavoro più critiche sono state individuate sulla base dei campi di corrente (cfr. successivo par. 5.2).



Figura 4.1 - Scavo con draga CSD (courtesy of Jan de Nul n.v.).

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

## 5 ANALISI MODELLISTICA DEGLI IMPATTI DURANTE LE LAVORAZIONI

Come anticipato in Premessa, per lo studio della risospensione dei sedimenti è stato messo a punto un modello matematico 3D, in grado di simulare la circolazione delle correnti generate dalle principali forzanti ambientali nell'area di intervento (vento, moto ondoso) e la dinamica dei solidi sospesi (SSC), soggetta al trasporto da parte delle correnti.

Il modello, denominato *3DEF*, è stato sviluppato dal prof. A Defina dell'Università di Padova allo scopo di descrivere la dinamica delle correnti stratificate, anche a densità variabile, in ambito fluviale, marittimo-costiero e lagunare. Esso è dotato di specifici moduli per simulare il trasporto di sostanze disciolte nell'acqua e di sedimenti trasportati in sospensione dalle correnti, come nel caso dei sedimenti rilasciati nella colonna d'acqua durante le operazioni di dragaggio.

Una sintetica descrizione dei fondamenti teorici del modello è riportata in Appendice.

Operativamente, le elaborazioni modellistiche sono state implementate sulla base delle indicazioni riportate nelle Linee Guida "La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere", pubblicate da ISPRA nel 2017 (LG 169/2017), le quali suggeriscono diverse tipologie di approccio a seconda della complessità del problema e del livello della progettazione. Nel caso in esame, è da preferirsi un'analisi specifica ad alta risoluzione che si può ottenere simulando il trasporto e la diffusione delle torbide con un modello deterministico, tridimensionale e non stazionario.

Il modello impiegato è basato su di un solutore numerico ad elementi finiti, e simula la circolazione delle correnti in un dominio tridimensionale, ottenuto mediante la suddivisione della colonna d'acqua in strati quasi orizzontali. Esso adotta l'ipotesi idrostatica, quindi è adatto per le simulazioni cosiddette "far field" in cui la sorgente si assume puntuale, e il trasporto dei sedimenti avviene in modo passivo sulla base del campo idrodinamico, con diverse tipologie e modalità di funzionamento della sorgente (fissa o mobile, con flusso di sedimenti costante o variabile nel tempo).

Al riguardo, le "Linee Guida" forniscono precise indicazioni per definire il "termine sorgente" da implementare nelle simulazioni, che quantifica l'entità e l'andamento nel tempo con cui, a seconda delle modalità di dragaggio e del mezzo d'opera impiegato, i solidi sospesi residui del dragaggio sono immessi nel corpo idrico, e dei quali il modello idrodinamico simula il trasporto e la diffusione per effetto del campo idrodinamico locale.

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto Definitivo	IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx

## 5.1 Settaggio del modello

### 5.1.1 Definizione del dominio di calcolo

Nella Figura 5.1 è illustrata la porzione del dominio di calcolo relativa all'ambito interessato dagli interventi. La griglia del modello nel suo complesso copre un'area molto più vasta che si estende per circa 60 km a cavallo della foce del Calambrone, fino al porto di Viareggio, a nord, e fino al litorale di Castiglioncello, a sud. Essa si estende inoltre verso il largo per circa 25 km a partire dalla linea di costa.

La dimensione scelta per il dominio consente sia di fissare condizioni al contorno di più facile individuazione, limitando gli effetti di bordo, che di tenere conto degli elementi morfologici che possono avere influenza diretta o indiretta sulle aree di interesse. La flessibilità dello schema di calcolo, che adotta una griglia di tipo non strutturato ad elementi triangolari, permette di aumentare notevolmente la risoluzione della griglia nell'intorno delle aree oggetto d'intervento.

In particolare, come evidenziato in Figura 5.1, le dimensioni delle maglie della griglia in mare aperto, al largo delle Secche della Meloria, arrivano a 500 m di lato, mentre a ridosso della costa e nell'area di intervento, ed in particolare nell'intorno delle aree soggette al trasporto delle torbide generate dalle lavorazioni, la dimensione delle maglie si riduce fino a misure dell'ordine di qualche metro.

Complessivamente la griglia risulta composta da circa 23000 nodi e 45000 maglie. Operativamente sono state predisposte diverse griglie per schematizzare i diversi scenari presi in esame. In pratica, a partire da una griglia generale con la quale è stato schematizzato lo stato di fatto "ante operam" sono state ottenute le griglie di dettaglio che da una parte schematizzano l'avvenuta realizzazione delle opere in progetto, dall'altra incrementano opportunamente il dettaglio della schematizzazione in corrispondenza dei punti di rilascio delle torbide, dove è necessaria una maggiore accuratezza del calcolo modellistico.

La rappresentazione del campo di moto sulla verticale avviene discretizzando la colonna d'acqua in una serie di strati "quasi orizzontali". Come è illustrato in Appendice, gli strati non sono fissi ma si modificano al variare della quota della superficie libera, restando costante la quota minima del dominio di calcolo (quota del fondo) e la percentuale di colonna d'acqua di pertinenza di ciascuno strato.

Nel caso in esame, come si evince dalla stessa Figura 5.1, la colonna d'acqua è stata suddivisa in 20 strati. Di questi, i 4 strati più profondi, di spessore progressivamente decrescente, sono dedicati alla schematizzazione di circa il 73% della colonna (circa 44 m), mentre i 16 strati più superficiali, tutti della medesima dimensione, sono dedicati alla schematizzazione del 27% della colonna d'acqua più vicina alla superficie (circa 16 m). Di conseguenza, nell'area di intervento e nelle zone in cui si simulano gli spandimenti, la risoluzione verticale del modello è mediamente dell'ordine di 1 m.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

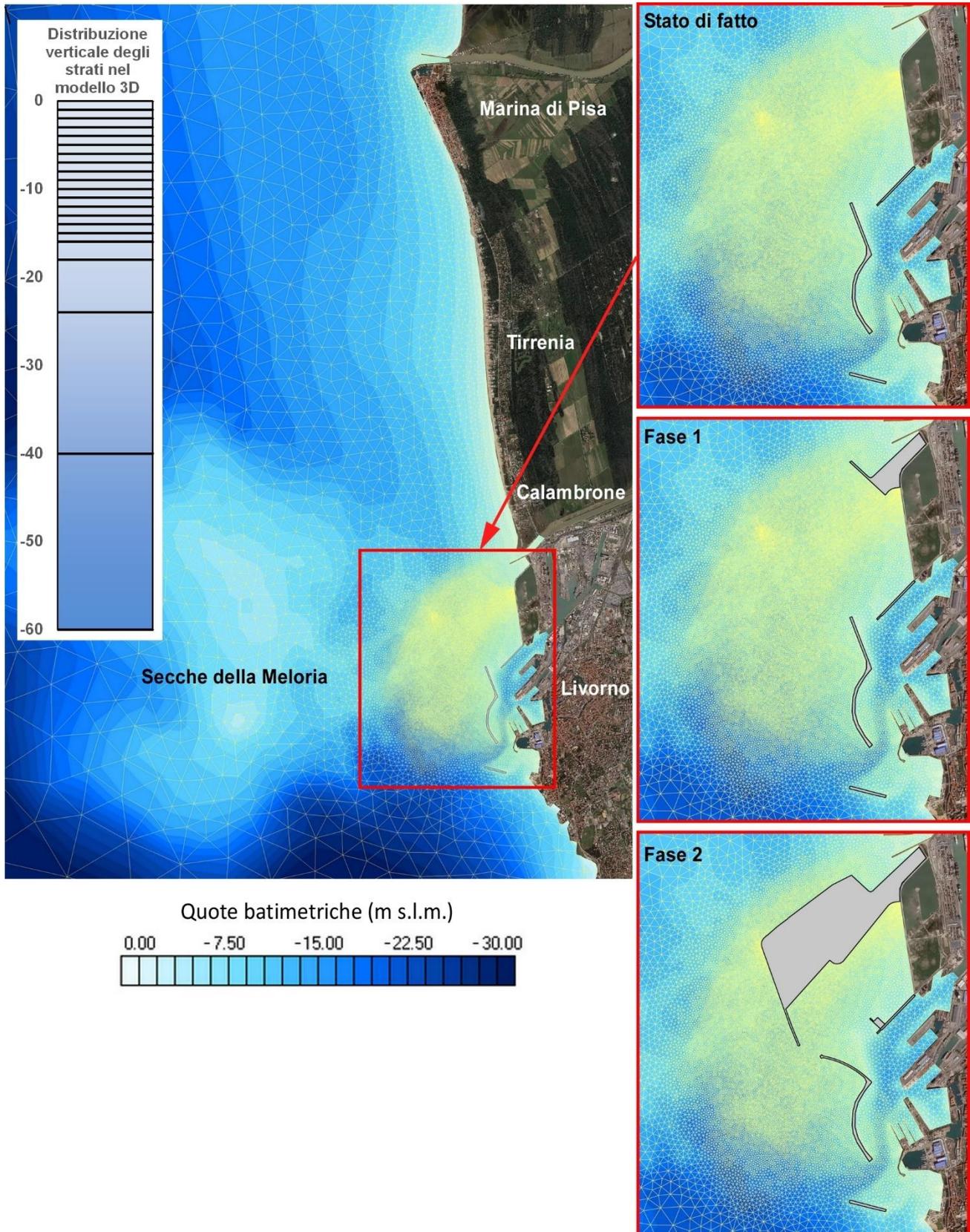


Figura 5.1 - Dominio del modello di calcolo tridimensionale con indicazione della ripartizione verticale degli strati e particolari delle griglie utilizzate nello stato di fatto e negli scenari in cui è stato simulato lo spargimento di sedimenti.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

### 5.1.2 Forzanti ambientali

Lo studio su modello è stato eseguito analizzando la dinamica delle correnti che possono essere presenti nell'ambito costiero oggetto di studio, in situazioni compatibili con lo svolgimento delle attività di dragaggio connesse con la realizzazione delle opere in progetto.

In particolare, sono stati considerati campi di corrente rappresentativi di:

- circolazione idrodinamica indotta dal vento, con riferimento ad eventi anemologici rappresentativi delle condizioni tipiche del paraggio, che potrebbero verificarsi nel corso delle lavorazioni; sono stati presi in considerazione eventi caratterizzati da una durata complessiva nell'anno pari a 15 giorni per le due direzioni di provenienza principali (Grecale e Ponente); si tratta degli eventi che, nei limiti delle condizioni operative delle lavorazioni marittime, creano le condizioni più sfavorevoli per la dispersione dei sedimenti verso i target sensibili.
- condizioni medie di circolazione costiera, per le due diverse direzioni (verso Sud e verso Nord), estratte dal database Copernicus (<https://www.copernicus.eu/it/accesso-ai-dati>), illustrato nel precedente par. 2.3.

Per le valutazioni della dispersione delle torbide generate dalle lavorazioni non sono stati considerati gli scenari di mareggiata, e quindi le correnti indotte dal moto ondoso, considerando che durante le mareggiate le lavorazioni dovranno essere sospese.

In Figura 5.2 è riportata la curva di durata dell'intensità del vento, rielaborata per i due sub-settori di interesse, Grecale ( $0^\circ \div 90^\circ N$ ) e Ponente ( $230^\circ \div 320^\circ N$  e  $270^\circ \div 360^\circ N$ ), con individuati i valori caratteristici della velocità del vento per la durata di 15 giorni all'anno. In Tabella 5.1 sono riportate le caratteristiche del vento utilizzate per la costruzione degli scenari. Si fa presente che in condizioni di vento "estreme" le lavorazioni saranno arrestate.

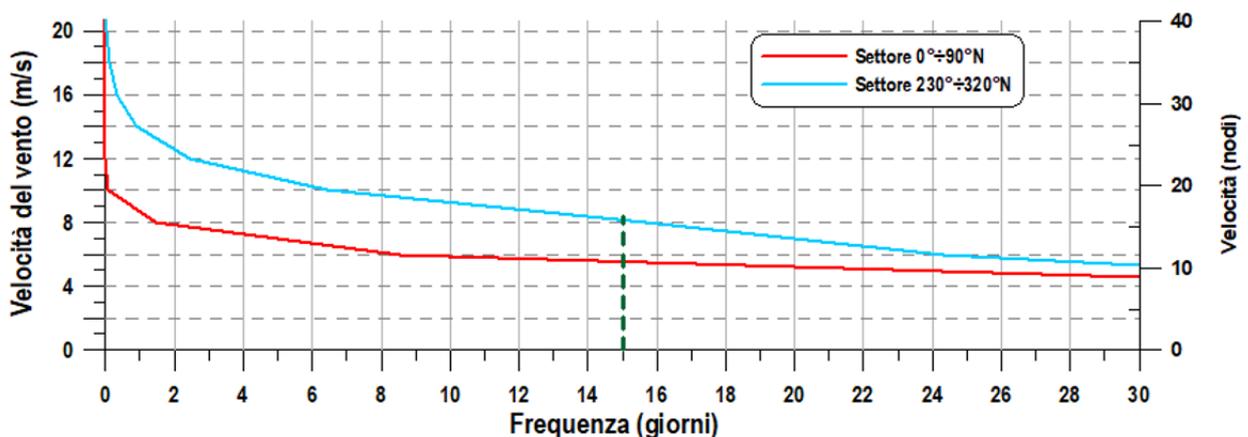


Figura 5.2 - Curva di durata del vento e velocità del vento impiegate per i due settori considerati rimettere figura

Settore	Caratteristiche	Intensità (m/s)	Direzione (°N)
Grecale	15gg/anno	5.6	55
Ponente	15gg/anno	8.1	275

Tabella 5.1 - Caratteristiche del vento impiegate per lo studio della circolazione idrodinamica generata da vento

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

Per quanto riguarda i campi di corrente derivate dal modello NEMO del servizio CMEMS Copernicus, di cui si è riferito nel precedente par. 2.3, da utilizzare come forzante ambientale per la propagazione delle torbide, essi sono stati elaborati per estrarre i valori di velocità medi giornalieri per l'intero anno 2017, nei tre punti (P0, P1, P2) indicati nella precedente Figura 2.6. Questi dati si riferiscono al primo layer del modello NEMO che corrisponde ai primi 10 m della colonna d'acqua a partire dalla superficie. Le componenti della velocità in direzione Est e Nord sono quindi state proiettate lungo una retta idealmente parallela alla linea di riva, con direzione pari a  $-7^\circ$  N.

Con questa operazione è stato possibile calcolare le velocità delle correnti "long-shore" che, in base al modello, si verificano mediamente durante l'anno. Le velocità così ricostruite sono illustrate in Figura 5.3 con riferimento ai 3 punti estratti dal modello e alla loro media. In Figura 5.4 e in Figura 5.5 sono riportate le curve di durata annuale delle correnti, rispettivamente in direzione Nord e Sud, sulle quali sono stati individuati i valori relativi alla durata di 15 giorni/anno, che sono quelli considerati per le simulazioni.

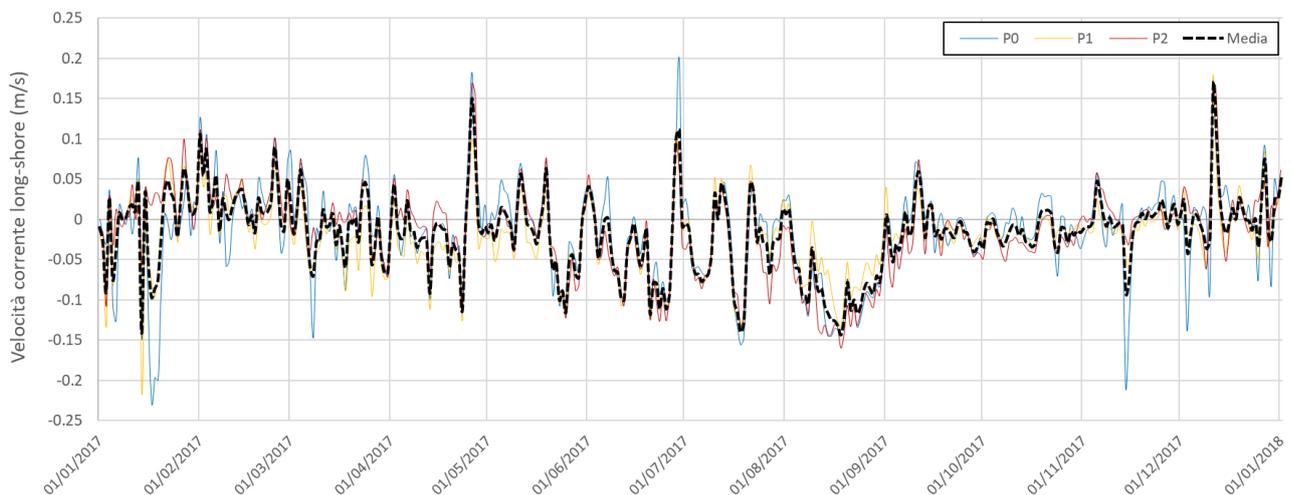


Figura 5.3 - Andamento della velocità della corrente longshore per l'anno 2017 (valori positivi indicano direzione verso Nord)

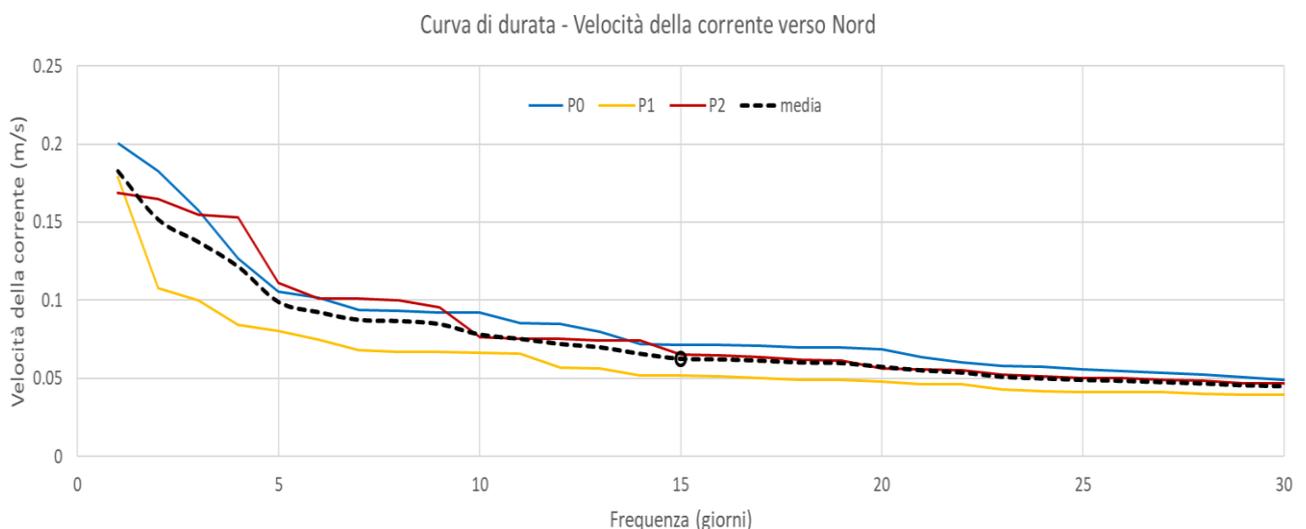


Figura 5.4 - Curva di durata della velocità della corrente diretta verso Nord

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

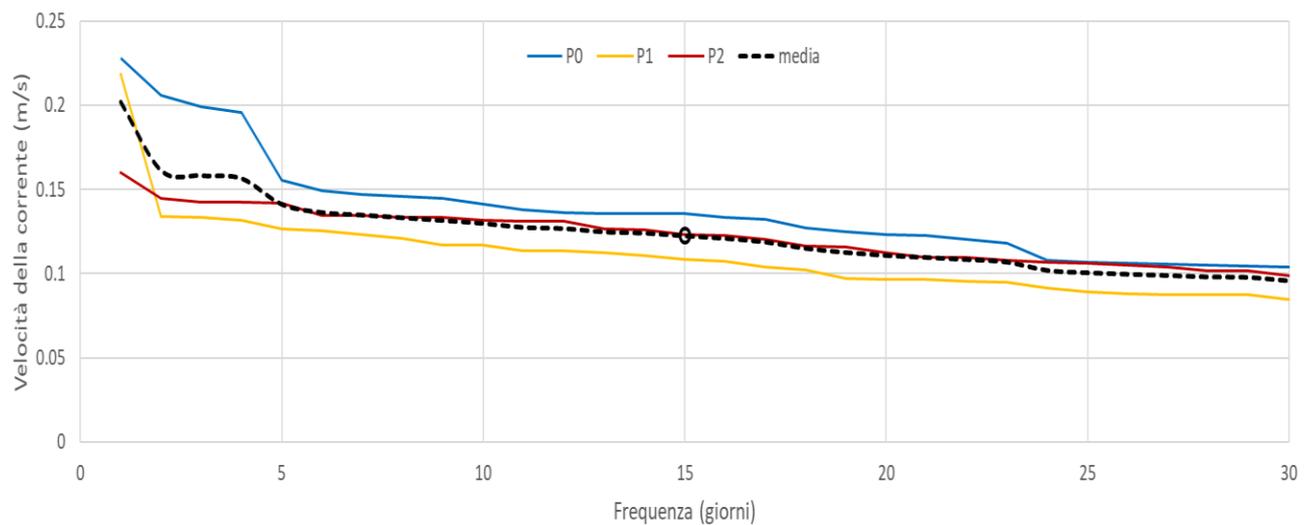


Figura 5.5 - Curva di durata della velocità della corrente diretta verso Sud

### 5.1.3 Caratteristiche del sedimento movimentato

Sulla base dei dati raccolti nell'ambito delle diverse campagne di indagine eseguite da AdSP, è stato possibile individuare la distribuzione spaziale delle caratteristiche (medie) del sedimento movimentato. In tutte le simulazioni si è cautelativamente tenuto conto della presenza nel sedimento movimentato di un contenuto pelitico pari al 40%.

Il diametro caratteristico di riferimento per la pelite è stato assunto pari a 10  $\mu\text{m}$ , corrispondente al diametro mediano della frazione pelitica dei campioni.

### 5.1.4 Definizione dei termini sorgente

Le simulazioni sono state eseguite considerando delle caratteristiche tipiche dei mezzi impiegati, in dimensioni e capacità produttiva coerente con le lavorazioni da effettuare e con il cronoprogramma previsto dei lavori.

Per ciascuno scenario, sono state individuate le lavorazioni più critiche in termini di tipologia e ubicazione dell'intervento, rispetto alla possibilità che la propagazione delle torbide interferisca con i target sensibili individuati.

Di seguito sono sintetizzati i parametri di input impiegati per lo studio dei diversi scenari, che sono stati determinati in accordo con quanto riportato nelle Linee guida 169/2017 dell'ISPRA, in particolare per quanto riguarda la quantificazione del termine sorgente.

La prima lavorazione analizzata è lo scavo meccanico per la preparazione dell'imbasamento delle opere foranee. Si tratta di una lavorazione potenzialmente critica, perché verrà realizzata in ambiente non conterminato e perché una parte dell'area di lavoro si trova a poca distanza dai target sensibili.

La quantificazione del termine sorgente, in linea con quanto previsto nelle citate Linee Guida, è stata effettuata considerando il versamento accidentale di sedimenti fini che avviene ad ogni bennata eseguita dal mezzo escavatore. In accordo con le indicazioni di letteratura (Becker et al., 2015), la massa dispersa ad ogni ciclo di scavo può essere stimata nell'ordine del 3% di quella contenuta nella benna. Nota la percentuale di sedimento fine presente nel volume della bennata, e nota la durata del singolo ciclo di bennata, è quindi possibile definire il flusso di massa di sedimento fine rilasciato. Assumendo che

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

la perdita accidentale di sedimenti avvenga in modo continuo durante l'operazione, tale flusso di massa è stato equidistribuito su tutta la verticale del punto di lavoro della draga. I principali parametri valutati per simulare lo scenario descritto sono riportati in Tabella 5.2.

In questa fase si ipotizza che lavorino motopontoni della capacità di 1200 m<sup>3</sup> con un ciclo completo di 6-8 ore, di cui 3 di scavo effettivo. In via cautelativa, si è ipotizzato che le operazioni nel punto di scavo possano succedersi con continuità, impiegando più pontoni della medesima capacità. Pertanto è stata ipotizzato che il rilascio delle torbide avvenga con continuità, per tutto l'arco della giornata.

In relazione alle fasi di avanzamento dell'opera, questa simulazione è stata effettuata sulla griglia di calcolo che rappresenta lo stato di fatto ante-operam. Lo scenario si riferisce infatti alle fasi iniziali dello scavo, quando le opere foranee dovranno ancora essere realizzate.

<b>SORGENTE DA SCAVO MECCANICO</b>		
voce	quantità	unità di misura
% fine	40% -	percentuale di sedimento fine presente in situ
Volume Benna	6 m <sup>3</sup>	volume lordo escavato da una singola bennata
rho_0	2650 kg/m <sup>3</sup>	densità dei sedimenti
n	0.35 -	indice dei vuoti
rho_dry	1722.5 kg/m <sup>3</sup>	densità dei sedimenti asciutti
massa asciutta di fine	4.134 t/ciclo	massa di sedimento fine sollevata da una singola bennata
massa persa di fine	124.02 kg/ciclo	massa di sedimento fine persa durante l'esecuzione della bennata (3%)
ore lavoro draga	3 h	ore di lavoro necessarie alla produzione (durata immissione di sedimento fine)
produzione draga	1200 m <sup>3</sup>	volume di sedimenti escavati per un ciclo del mezzo
durata ciclo	54 s	durata della singola bennata
intensità sorgente	2297 g/s	intensità media del termine sorgente, da distribuire su tutta la colonna d'acqua

Tabella 5.2 - Dati di base per lo studio della torbidità generata dello scavo di imbasamento delle opere foranee

La seconda lavorazione analizzata è lo scavo del canale di accesso al porto, che sarà effettuata con dragaggio idraulico. La quantificazione del termine sorgente di torbidità è stata effettuata considerando la risospensione e la perdita di sedimento fine che avviene durante l'aspirazione idraulica dei sedimenti da dragare, sempre secondo le indicazioni contenute nelle citate Linee Guida ISPRA.

In questo caso, la massa persa durante la risospensione del materiale di fondo è stata valutata pari al 5% di quella oggetto di lavorazione. Nelle simulazioni, la sorgente di torbidità è stata posta nei pressi del fondo, assumendo che il pennacchio dovuto alla diffusione dei sedimenti persi sia concentrato nell'intorno della testa dragante e sia generato in modo continuo durante il dragaggio. I parametri adottati sono riportati in Tabella 5.3.

Progetto:  
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:  
Progetto Definitivo

Elaborato:  
IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PD-D-005\_2.docx

### SORGENTE DA DRAGAGGIO IDRAULICO

voce	quantità	unità di misura	descrizione
% fine	0.40	-	percentuale di sedimento fine presente in situ
rho_0	2650.00	kg/m3	densità dei sedimenti
n	0.35	-	indice dei vuoti
rho_dry	1722.50	kg/m3	densità dei sedimenti asciutti
produzione	30000.00	m3	produzione giornaliera di sedimenti
n ore	24.00	h	ore di lavoro necessarie alla produzione (durata immissione di fine
massa sedimento fine	20670.00	t/giorno	massa asciutta di sedimenti fini scavata al giorno
massa fine disperso	1033.50	t/giorno	massa di fine dispersa in acqua durante lo scavo 5% secondo Becker
intensità sorgente	11962	g/s	flusso di sedimenti fini rilasciato in mare

Tabella 5.3 - Dati di base per lo studio della torbidità generata da scavo del canale d'ingresso tramite draga CSD.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

## 5.2 Analisi dei campi di corrente

Il modello idrodinamico è stato utilizzato in primo luogo per determinare i campi di corrente associati alle diverse forzanti ambientali considerate. Per la definizione di tali forzanti si rimanda al precedente paragrafo 5.1.2.

Il modello idrodinamico impiegato è di tipo tridimensionale multi-strato, per cui le correnti sono differenziate lungo la colonna d'acqua. Per una completa rappresentazione dei campi di corrente sarebbe necessario, pertanto, rappresentare il risultato modellistico alle diverse profondità. Per semplicità, i campi di moto corrispondenti ai diversi scenari e rappresentati nelle figure seguenti (Figura 5.6) sono riferiti alla profondità di -4.0 m, che rappresentativa della profondità media a cui si sviluppano i fenomeni di trasporto indagati.

I campi di corrente determinati dal vento sono stati ottenuti forzando il modello con un vento distribuito uniformemente su tutto il dominio di calcolo, con intensità e direzione pari a quelle determinate nel precedente par. 5.1.2 (venti di Grecale e Ponente con intensità mediamente superata per 15 giorni/anno).

Nel caso degli scenari con la corrente litoranea (correnti verso nord e verso sud dedotte dal modello Copernicus, di intensità mediamente superata per 15 giorni/anno), le correnti stesse sono state ottenute combinando opportunamente la distribuzione delle condizioni di livello sui contorni del dominio di calcolo e applicando una forzante di vento fittizia, calibrata in modo da ottenere un buon accordo tra i valori della velocità di riferimento e quelli forniti dalla modellazione.

In quest'ultimo caso la distribuzione verticale delle velocità è più uniforme, mentre nel caso del vento, in particolare di quello di Grecale, si possono verificare localmente anche inversioni della direzione, con gli strati superficiali che seguono il vento, mentre quelli più profondi procedono in direzione contraria. Di conseguenza, il destino del plume generato a diverse profondità, per il medesimo scenario, può risultare anche sostanzialmente diverso. Per questa ragione, nelle simulazioni relative al trasporto dei sedimenti (par. 5.4), i risultati della modellazione sono stati estratti anche a diverse profondità.

In Figura 5.6 sono rappresentati i campi di velocità per i quattro scenari considerati; di questi, tre producono una corrente parallela alla costa, mentre il Grecale produce localmente, nella zona del porto di Livorno, una corrente diretta verso il largo, che quindi potrebbe essere più critica considerando la posizione delle sorgenti di torbidità (zone di lavoro) rispetto ai target ambientali (Posidonia e Secche della Meloria).

Le mappe di Figura 5.6 evidenziano che in tutti i 4 casi considerati le velocità della corrente sono quasi ovunque modeste, poiché non superano i 0.25 m/s. Le zone in cui la velocità è massima sono quelle in cui le correnti si concentrano, in prossimità del porto di Livorno e in generale nel canale tra le Secche della Meloria e la costa, e all'esterno delle Secche stesse. Si evidenzia inoltre che gli scenari che danno origine alle correnti più intense nelle zone delle lavorazioni sono quelli corrispondenti al Vento di Ponente e alla corrente litoranea verso sud. La corrente verso nord e il vento di Grecale danno origine a correnti molto più deboli che sono al massimo dell'ordine di 0.10 m/s.

Si fa presente che le aree in prossimità delle Secche della Meloria in cui la mappa riporta velocità nulla (colore blu scuro), corrispondono ad aree con profondità inferiore ai 4.0 m, in cui quindi il modello non fornisce risultati essendo tale quota quella a cui si riferiscono i risultati stessi.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

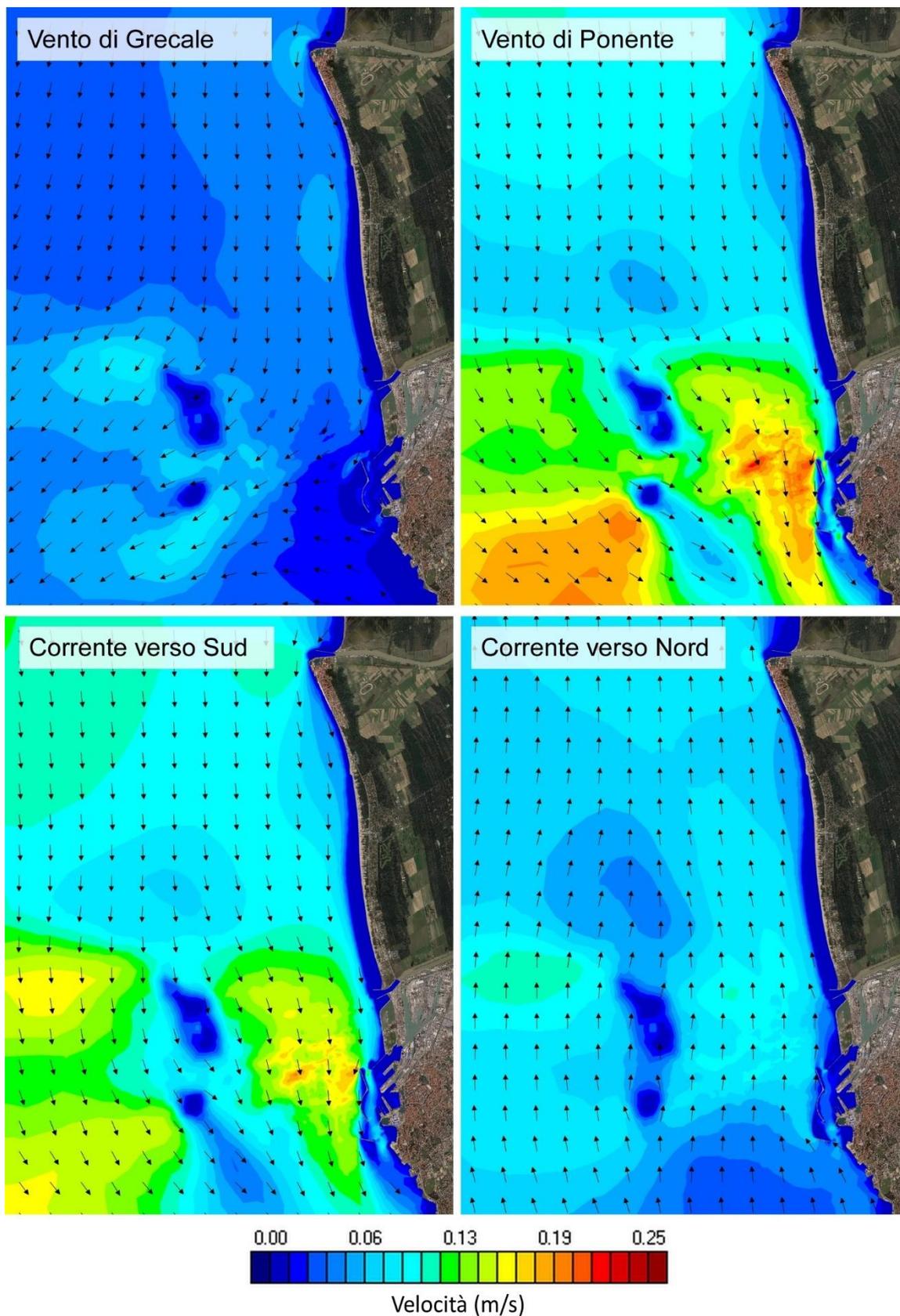


Figura 5.6 - Campi di velocità nei quattro scenari considerati nella configurazione attuale del litorale (ante-operam). Le mappe fanno riferimento alla profondità di circa -4.0 m dalla superficie.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

### 5.3 Individuazione degli scenari critici

Come anticipato in Premessa, la finalità del presente studio è sia quella di valutare gli impatti delle lavorazioni sui target sensibili che di individuare le zone più vulnerabili dove collocare le stazioni di monitoraggio per gestire le lavorazioni e misurare l'evoluzione degli eventuali impatti.

Gli scenari critici sono quindi individuati abbinando le lavorazioni potenzialmente più impattanti ai campi di corrente ritenuti più sfavorevoli rispetto alla propagazione del plume di sedimenti finemente trasportato in sospensione in direzione dei bersagli sensibili.

Sulla base delle analisi sviluppate per le correnti e delle tipologie di lavoro analizzate sono stati individuati i 4 scenari critici di seguito descritti:

- a) Scavo con benna degli imbasamenti delle opere foranee in presenza di vento di Grecale: si tratta dello scavo effettuato con benna bivalve e motopontone autocaricante all'estremità della Diga Nord, nel tratto più prossimo alla prateria di Posidonia e alle zone SIC e ZSC. Il termine sorgente è definito nel precedente paragrafo 5.1.4; la generazione del plume avviene lungo tutta la colonna d'acqua. Allo spandimento dovuto alla lavorazione è associato il campo di corrente generato dal vento di Grecale.
- b) Dragaggio del canale di ingresso con draga CSD in presenza di vento di Grecale: si tratta dello scavo con draga aspirante-refluente (CSD) all'estremità esterna del canale di accesso al porto, nel tratto più prossimo alla prateria di Posidonia e alle zone SIC e ZSC. Il termine sorgente è definito nel precedente paragrafo 5.1.4; la generazione del plume avviene al fondo. Alla lavorazione viene associato il campo di corrente generato dal vento di Grecale.
- c) Dragaggio del canale di ingresso con draga CSD in presenza di vento di Ponente: si tratta di uno scenario analogo al precedente, ma associato al campo di corrente generato dal vento di Ponente.
- d) Dragaggio del canale di ingresso con draga CSD con corrente verso Sud: si tratta di uno scenario analogo al precedente, ma associato al campo generale di corrente diretto verso Sud determinato in base ai dati del modello Copernicus.

La simulazione degli effetti dello scavo con benna (scenario a) è stata effettuata considerando la configurazione di progetto di prima fase, in cui è completata solo la prima parte della conterminazione della colmata sul lato nord del porto.

Le altre simulazioni (scenari b, c, d) sono state effettuate considerando la configurazione di progetto di seconda fase, in cui è completata la realizzazione di tutta la conterminazione della colmata sul lato nord del porto. I fondali nell'area di progetto sono stati considerati invariati rispetto alla situazione ante operam per considerare scenari corrispondenti alle fasi iniziali delle attività di dragaggio del canale di ingresso, che sono maggiormente critici rispetto alla dinamica del plume di sedimenti generato dalle lavorazioni. Le configurazioni della griglia di calcolo del modello nei diversi casi sono rappresentate nella precedente Figura 5.1.

La Figura 5.7 riporta l'ubicazione dei punti di dragaggio e di scavo individuati per le simulazioni degli scenari sopra elencati. I punti sono stati scelti in modo da massimizzare il potenziale impatto rispetto ai target sensibili e alle forzanti assunte, e ottenere quindi delle valutazioni cautelative.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

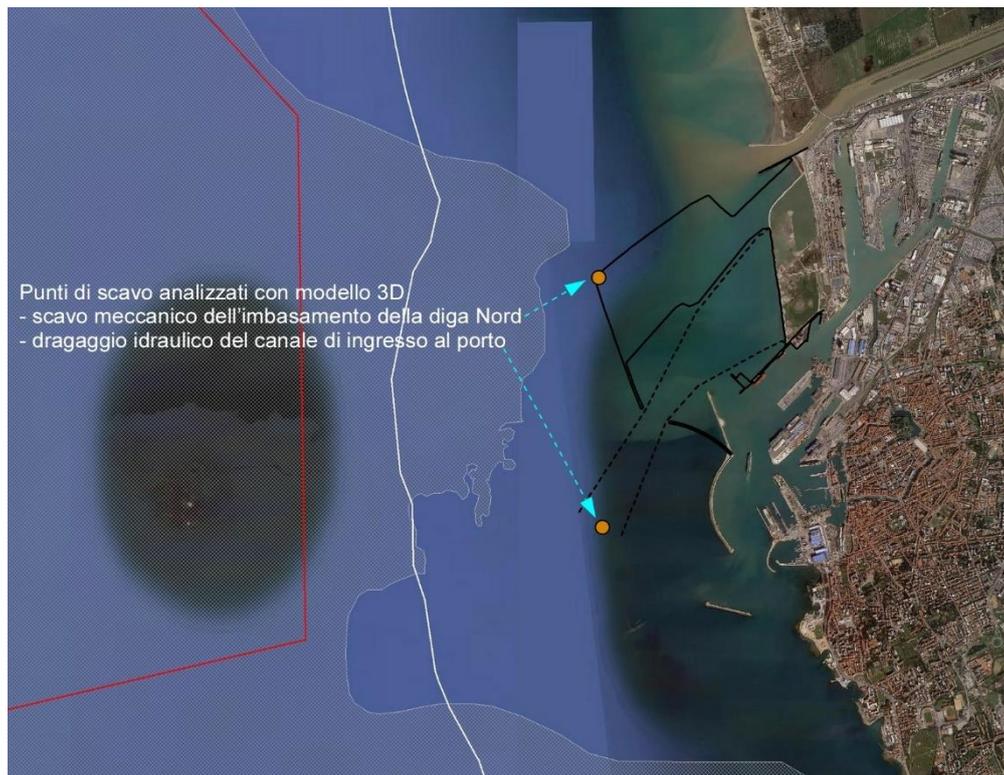
Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx



*Figura 5.7 - Definizione delle aree di lavoro analizzate nello studio.*

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

## 5.4 Risultati delle simulazioni

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati ottenuti dallo studio su modello per i diversi scenari analizzati e descritti in precedenza.

Come si è detto, gli scenari sono stati costruiti considerando da una parte le attività di dragaggio e di versamento dei sedimenti potenzialmente impattanti rispetto ai target sensibili, dall'altra i campi di corrente maggiormente critici in relazione a tali impatti, dall'altra ancora la configurazione delle opere (ossia lo stato di avanzamento dell'intervento) in cui i possibili impatti potrebbero verificarsi.

Il calcolo per ciascuno scenario è stato effettuato lanciando due simulazioni in successione:

- una prima simulazione, della durata di alcuni giorni, necessaria per portare a regime il campo idrodinamico applicando la forzante (vento o corrente) nella configurazione degli interventi prevista per lo scenario;
- una seconda simulazione, della durata di 24 ore, a partire dalle condizioni iniziali determinate con la prima simulazione, effettuata mantenendo il campo idrodinamico stazionario e sovrapponendo ad esso l'immissione del flusso di sedimenti fini come previsto per la lavorazione considerata.

Il modello 3DEF utilizzato per i calcoli funziona con un intervallo di calcolo variabile, che si adatta nel corso della simulazione per ottimizzare i tempi di calcolo. Nel caso in esame il passo di calcolo adottato è stato dell'ordine di 10 s.

Nei paragrafi che seguono, per ciascuna simulazione sono riportati:

- i campi di velocità nello strato superficiale del modello (primo metro dalla superficie) e alle profondità di circa -4.0 m e -10.0 m dalla superficie, per gli scenari considerati nella specifica fase di lavorazione; questi scenari sono stati selezionati in modo da individuare le condizioni maggiormente critiche rispetto ai possibili impatti sui target sensibili;
- l'inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (SSC) raggiunta nel dominio di calcolo nel corso della simulazione (valore nello strato in prossimità del fondo);
- l'inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (SSC) raggiunta nel corso della simulazione lungo la verticale, in un transetto materializzato lungo l'asse di massimo spostamento del plume.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

#### 5.4.1 Scavo a benna degli imbasamenti delle opere foranee e vento di Grecale

Lo scavo a benna genera torbidità lungo tutta la colonna d'acqua, per cui nella modellazione si è ipotizzato che la sorgente sia distribuita in modo uniforme su tutti i nodi che stanno sulla verticale del punto di lavoro, dalla superficie libera fino al fondo. Come anticipato, in via cautelativa si è ipotizzato che la sorgente, di intensità pari a circa 2.3 kg/s, funzioni in modo continuo anche se i mezzi di lavoro nella realtà funzioneranno in modo intermittente (Tabella 5.2); i mezzi infatti, una volta completato il carico, dovranno spostarsi verso la colmata per il conferimento. In questo modo la diffusione del plume dei sedimenti in sospensione si espande progressivamente fino a raggiungere una condizione stazionaria, che corrisponde alla condizione di massima espansione del plume stesso.

La simulazione è stata effettuata considerando la configurazione senza opere, in quanto è stata analizzata la fase dello scavo dell'imbasamento delle opere, che è risultata potenzialmente la più critica. È stata considerata solo la presenza della conterminazione relativa alla prima fase di avanzamento lavori.

In tali condizioni il vento di Grecale induce una circolazione che, dalla zona di escavo, porta verso il largo e quindi verso i target sensibili; i campi di corrente alle diverse profondità sono riportati da Figura 5.8 a Figura 5.10). In Figura 5.11 e Figura 5.12 è riportato l'involuppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione, rispettivamente in planimetria e lungo la sezione verticale orientata nella direzione del plume. Le figure evidenziano che la dispersione del plume è coerente con la direzione della corrente; la sezione evidenzia una maggiore propagazione a metà della colonna d'acqua, legata al fatto che in superficie la concentrazione di solidi sospesi SSC diminuisce rapidamente per effetto del moto di caduta delle particelle, e che in prossimità del fondo le correnti sono sostanzialmente assenti.

I risultati hanno inoltre evidenziato come il plume di sedimenti, il cui limite grafico è identificato dal valore di concentrazione SSC di 10 mg/l, si espande fino ad una distanza di circa 1700 m dal punto di escavo (Figura 5.11). Esso si spinge fino al limite delle aree occupate dalla Posidonia Oceanica, su fondali di circa 12 m, interessandole marginalmente con valori di concentrazione SSC compresi tra 10 e 20 mg/l.

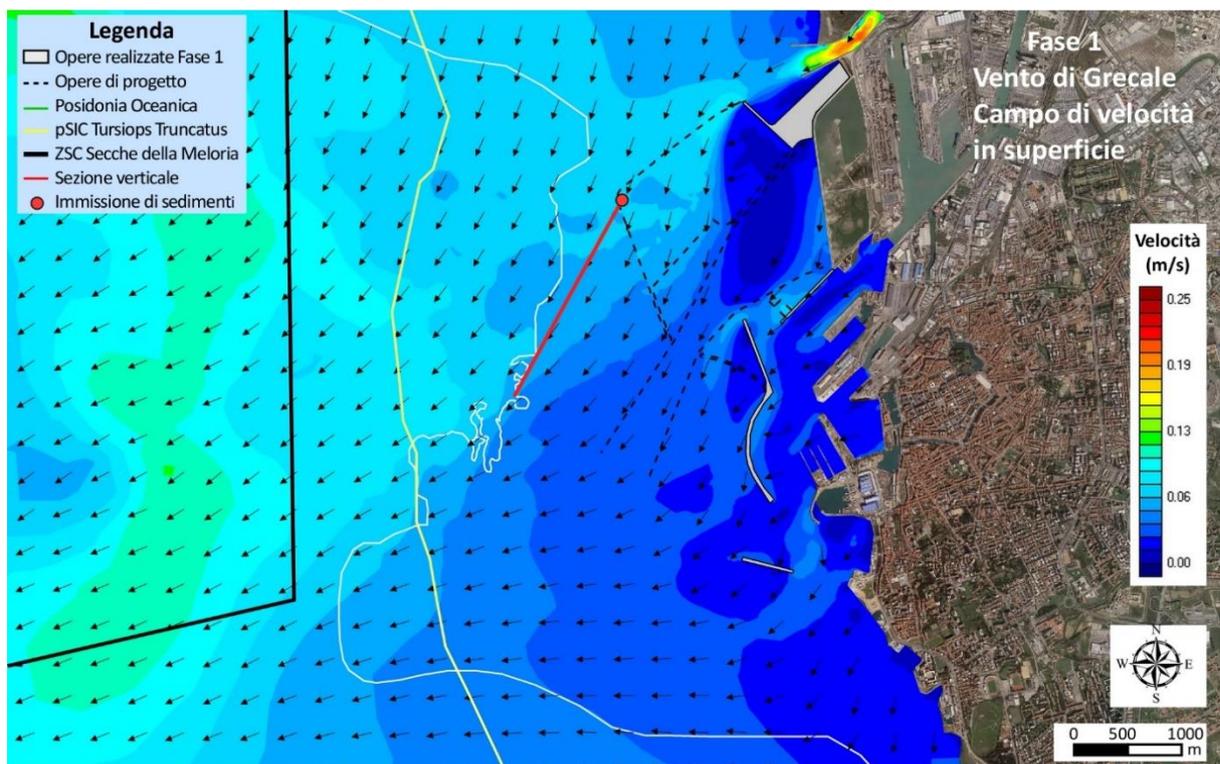


Figura 5.8 - Vento di Grecale, scavo di imbasamento delle opere foranee.

Campo di velocità nello strato superficiale e punto di lavoro della draga a benna (in rosso)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

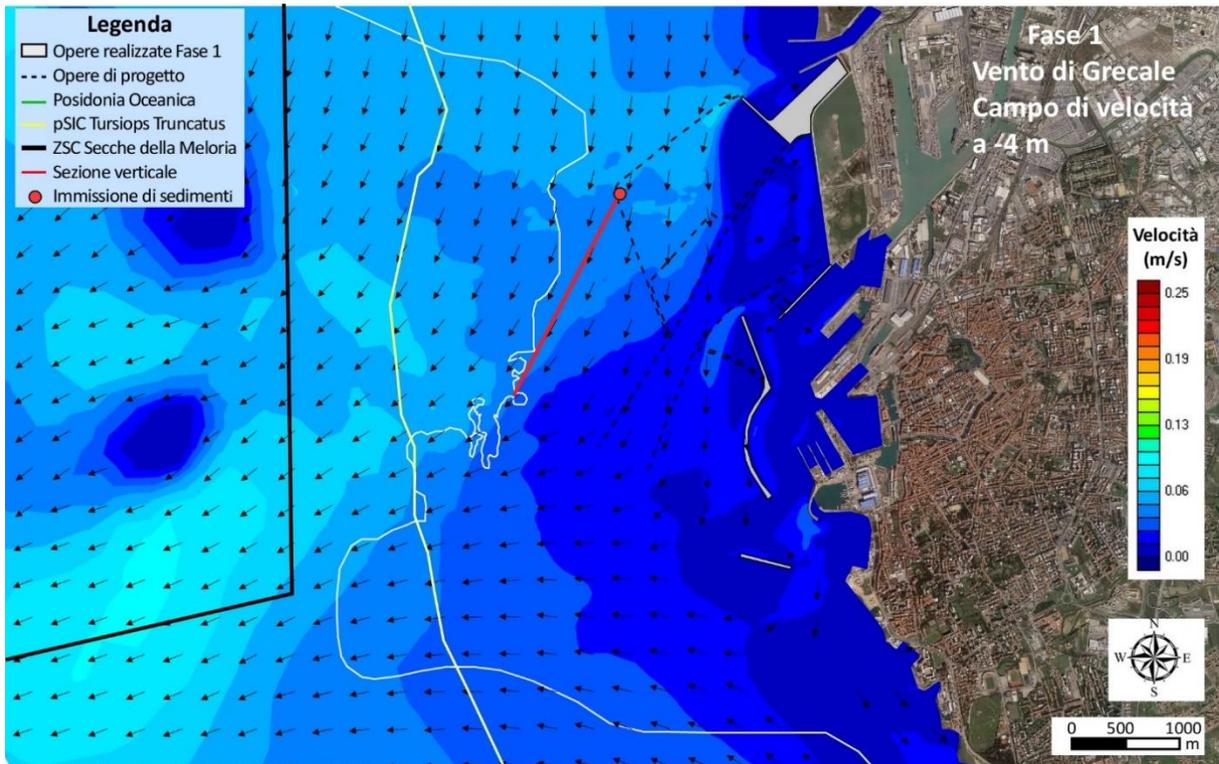


Figura 5.9 - Vento di Grecale, scavo di imbasamento delle opere foranee.  
Campo di velocità alla profondità di -4.0 m e punto di lavoro della draga a benna (in rosso)

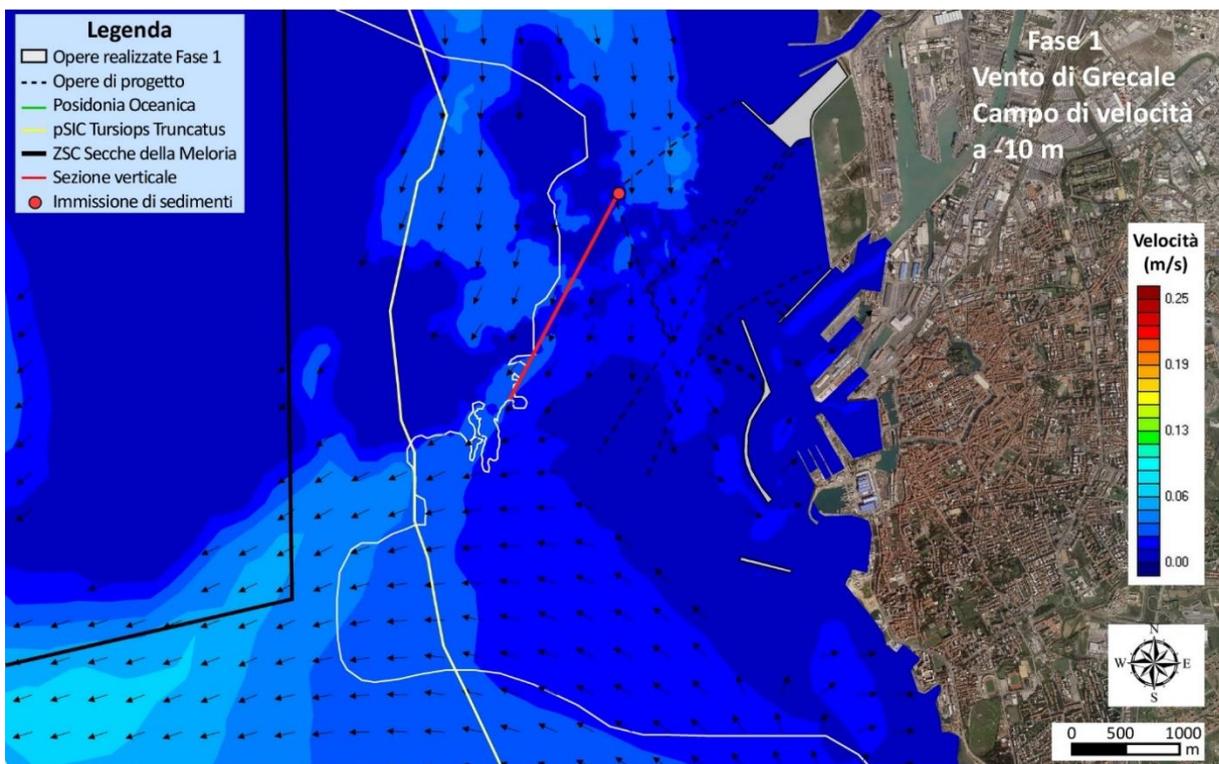


Figura 5.10 - Vento di Grecale, scavo di imbasamento delle opere foranee.  
Campo di velocità alla profondità di -10.0 m e punto di lavoro della draga a benna (in rosso)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

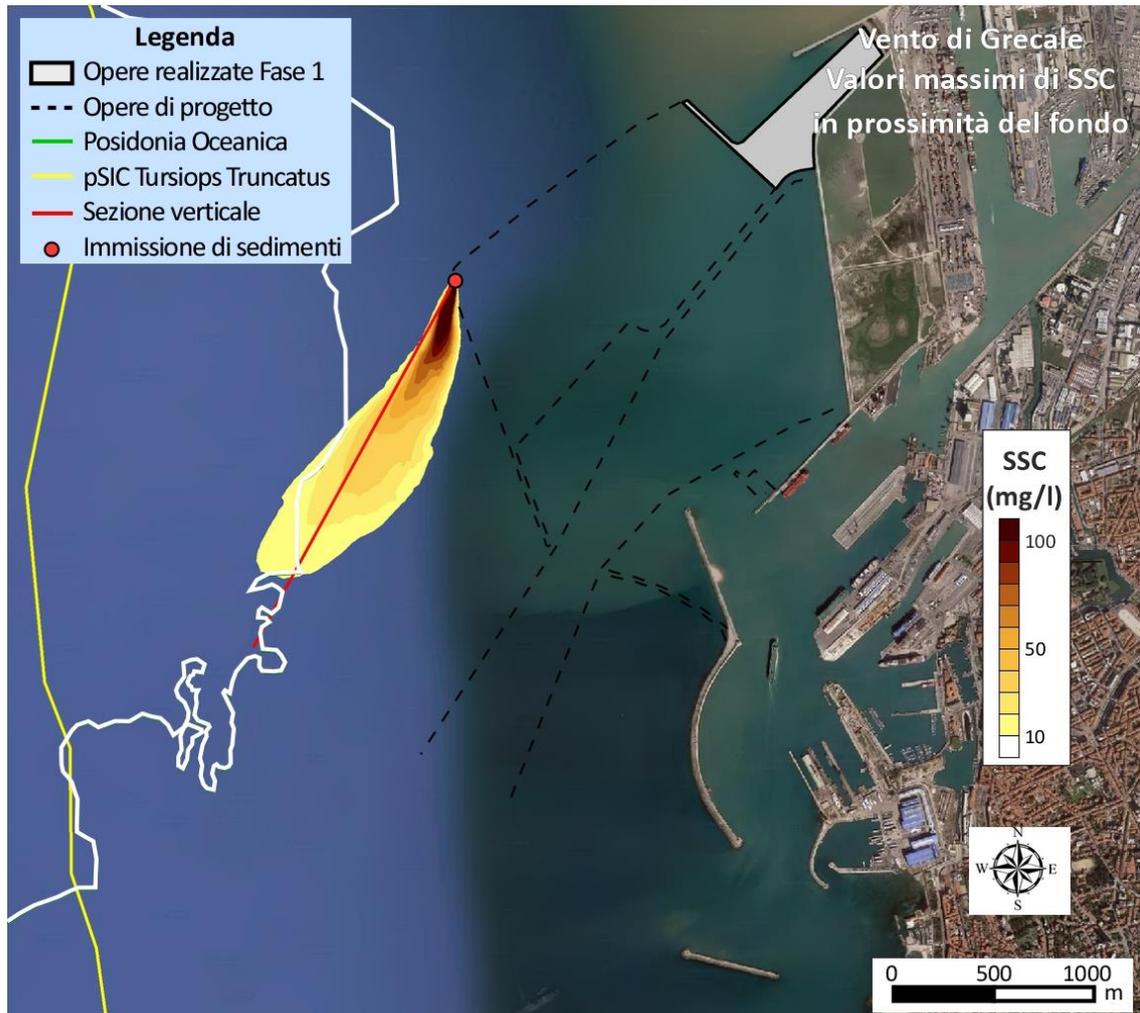


Figura 5.11 - Vento di Grecale, scavo di imbasamento delle opere foranee.  
Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (planimetria)

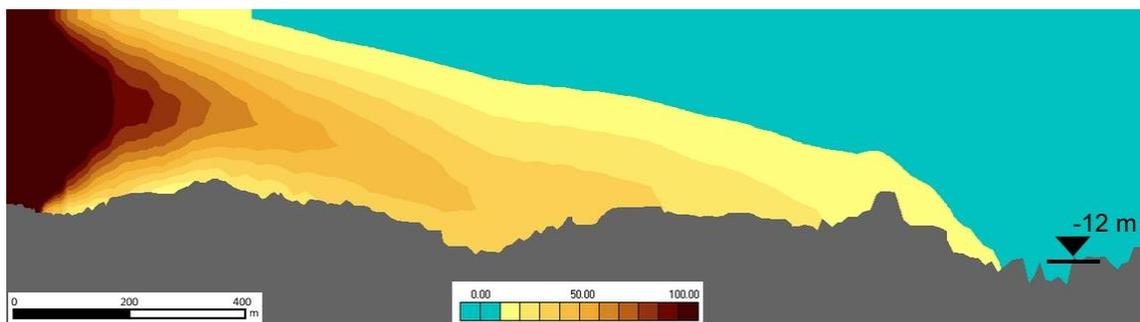


Figura 5.12 - Vento di Grecale, scavo di imbasamento delle opere foranee.  
Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (sezione verticale)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

#### 5.4.2 Dragaggio del canale di accesso con draga CSD e vento di Grecale

Tutte le operazioni di dragaggio dei canali e dei bacini interni avverranno ad opere completamente realizzate. Il dragaggio del canale di accesso sarà effettuato con draga aspirante-refluente (CSD) di grandi dimensioni in grado di realizzare produzioni molto elevate. Le caratteristiche del termine sorgente sono elencate nella precedente Tabella 5.3. In questo caso l'entità del flusso di sedimenti fini messo in sospensione dalla draga è ampiamente superiore a quello generato dalla benna dello scavo meccanico (12 kg/s). Inoltre in questo caso l'attività della draga si svolge senza interruzioni. Tuttavia, trattandosi di dragaggio idraulico, le torbide sono confinate agli strati più profondi della colonna d'acqua e quindi si diffondono meno del caso precedente, sia per la minore intensità delle correnti al fondo, sia per il minore tempo necessario ai sedimenti per raggiungere il fondo. Nel modello, il rilascio di torbida è stato schematizzato come un'immissione distribuita sui 3 m più profondi della colonna d'acqua.

I risultati ottenuti mostrano come il campo di moto in superficie sia diretto verso il largo mentre quello in prossimità del fondo, di debole intensità, si muova anche in direzione contraria, ovvero dal largo verso la costa (Figura 5.13÷Figura 5.15).

Poiché lo scavo con draga CSD genera torbidità solamente al fondo, la dispersione del plume è coerente con la direzione della corrente al fondo. Conseguentemente, come si può vedere dalle Figura 5.16 e Figura 5.17, il plume si propaga per circa 650 verso NE, cioè verso il porto, e la torbidità generata dalla draga idraulica resta confinata in prossimità del fondale.

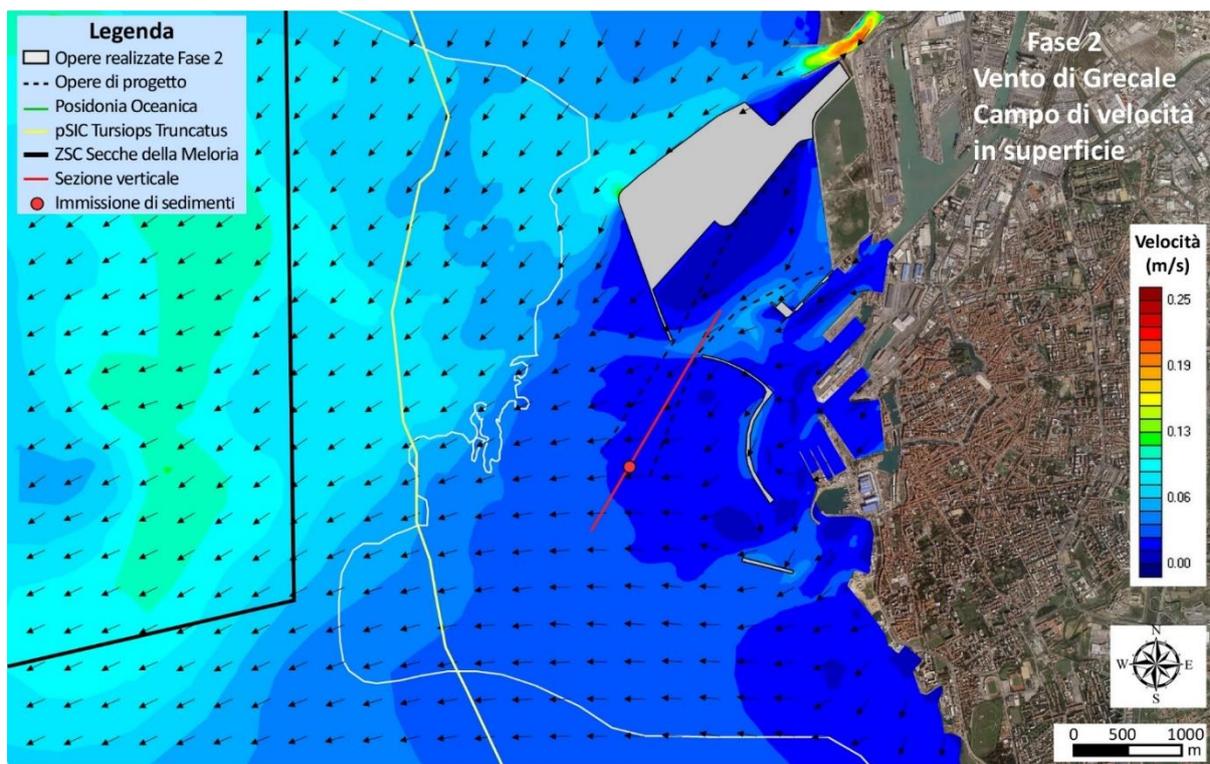


Figura 5.13 - Vento di Grecale, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità nello strato superficiale e punto di lavoro della draga (in rosso)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

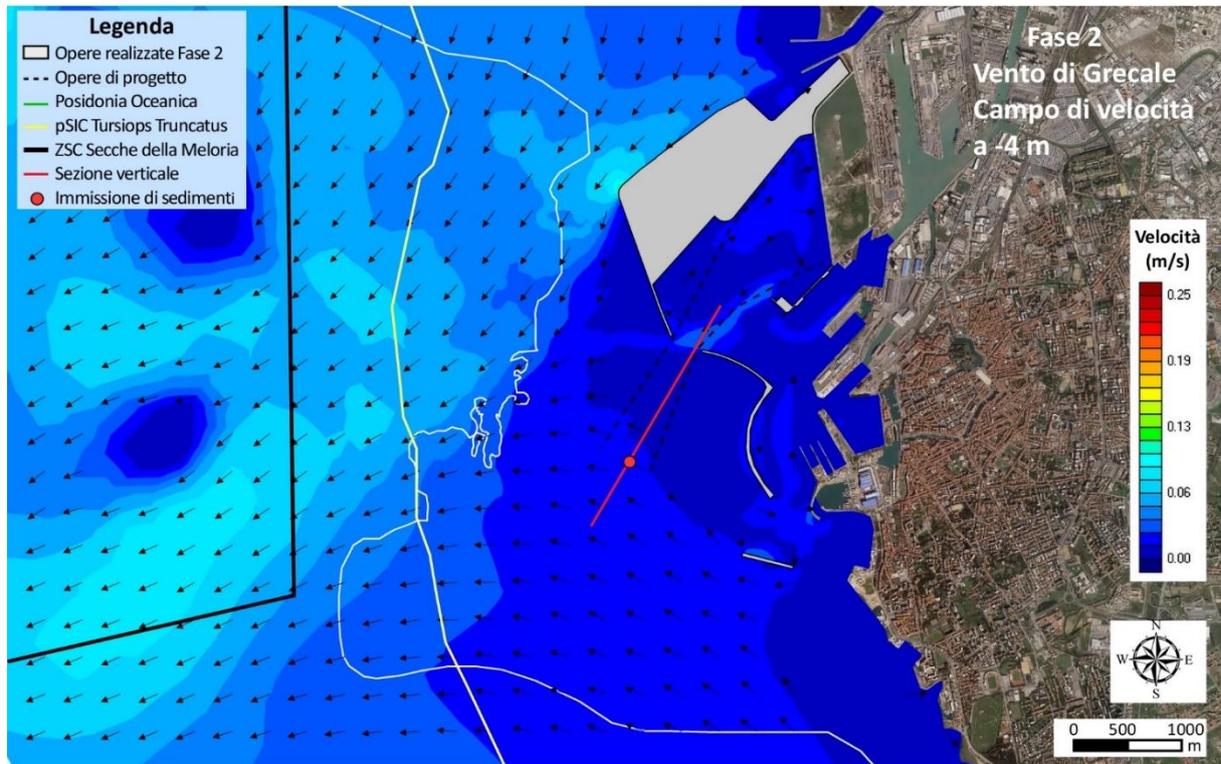


Figura 5.14 - Vento di Grecale, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità alla profondità di -4.0 m e punto di lavoro della draga (in rosso)

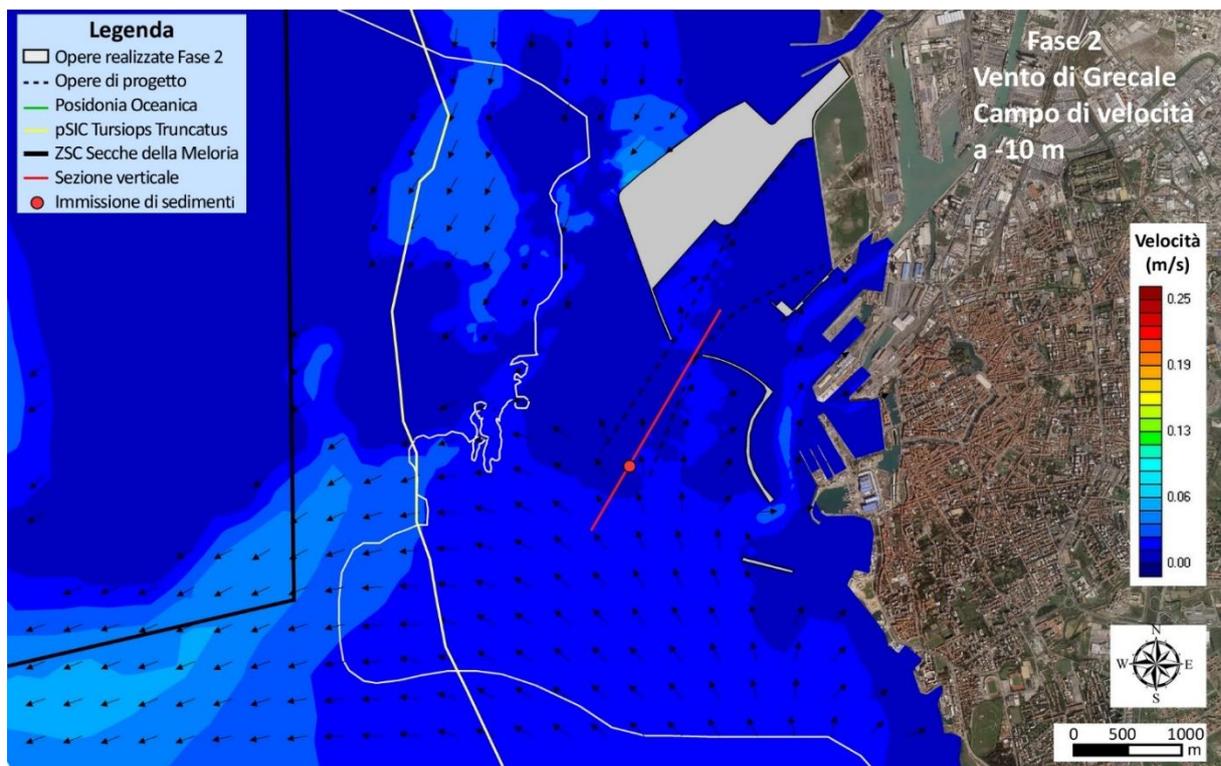


Figura 5.15 - Vento di Grecale, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità alla profondità di -10.0 m in superficie e punto di lavoro della draga (in rosso).

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx



Figura 5.16 - Vento di Grecale, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (planimetria).

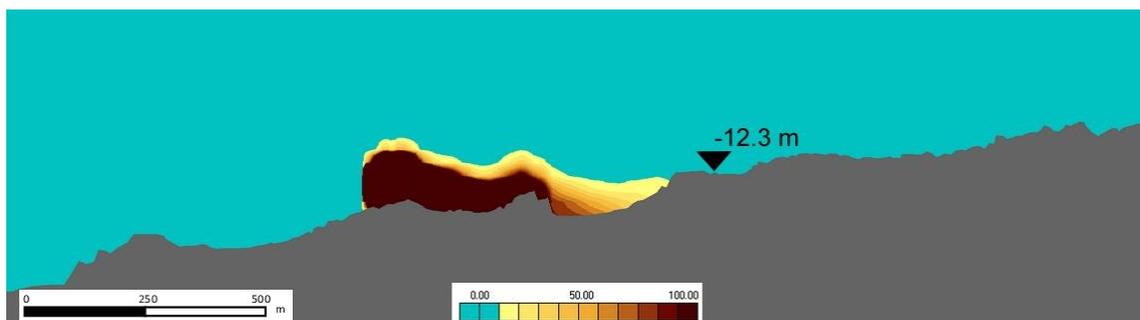


Figura 5.17 - Vento di Grecale, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (sezione verticale)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

#### 5.4.3 Dragaggio del canale di ingresso con draga CSD e vento di Ponente

La stessa configurazione del caso precedente, sia in termini di tipologia di dragaggio che di configurazione delle opere in progetto, è stata ri-analizzata per valutare gli impatti delle lavorazioni con vento di Ponente, che è in grado di attivare delle correnti più intense rispetto a quelle attivate dal vento di Grecale.

In questo caso, le mappe riportate nelle figure (da Figura 5.18 a Figura 5.20) evidenziano come le correnti siano relativamente intense (circa 25 cm/s) negli strati superficiali della colonna d'acqua, e si intensifichino, in particolare, in prossimità della Diga Nord. Anche negli strati più profondi, tuttavia, le correnti mantengono una significativa intensità ed una direzione coerente con quella in superficie.

In questo caso, le maggiori intensità delle correnti al fondo producono un maggiore allontanamento del plume di sedimenti fini in sospensione rispetto al caso precedente; questo spostamento si sviluppa prevalentemente in direzione SE, coerentemente con la direzione delle correnti indotte dal vento.

Come si evince dalle Figura 5.21 e Figura 5.22, in questo caso lo scavo con draga CSD genera una torbidità sostanzialmente confinata in prossimità del fondale e che si propaga fino ad una distanza di circa 2.2 km rispetto al punto di lavoro. L'area interessata da torbidità superiore alla soglia di rappresentazione fissata (10 mg/l) si mantiene comunque a distanza dalle zone che sono state identificate come target sensibili (praterie di Posidonia, aree SIC e ZSC).

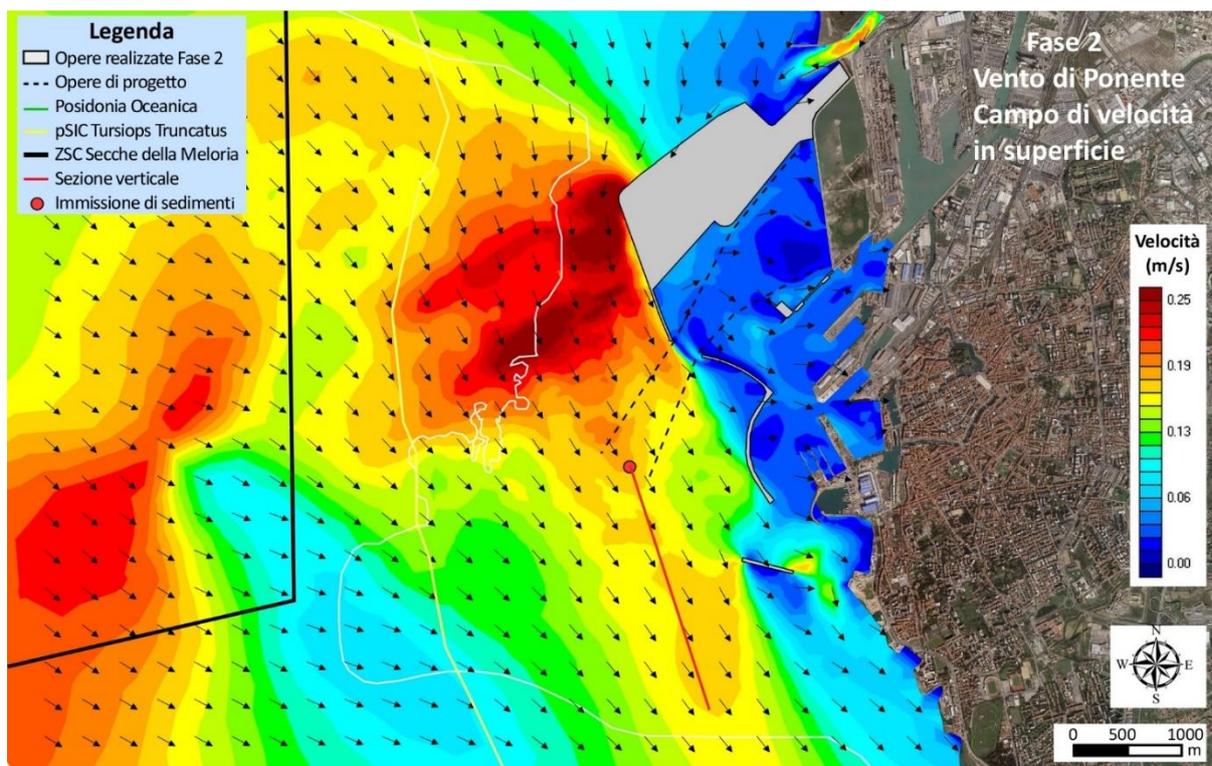


Figura 5.18 - Vento di Ponente, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità nello strato superficiale e punto di lavoro della draga (in rosso)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

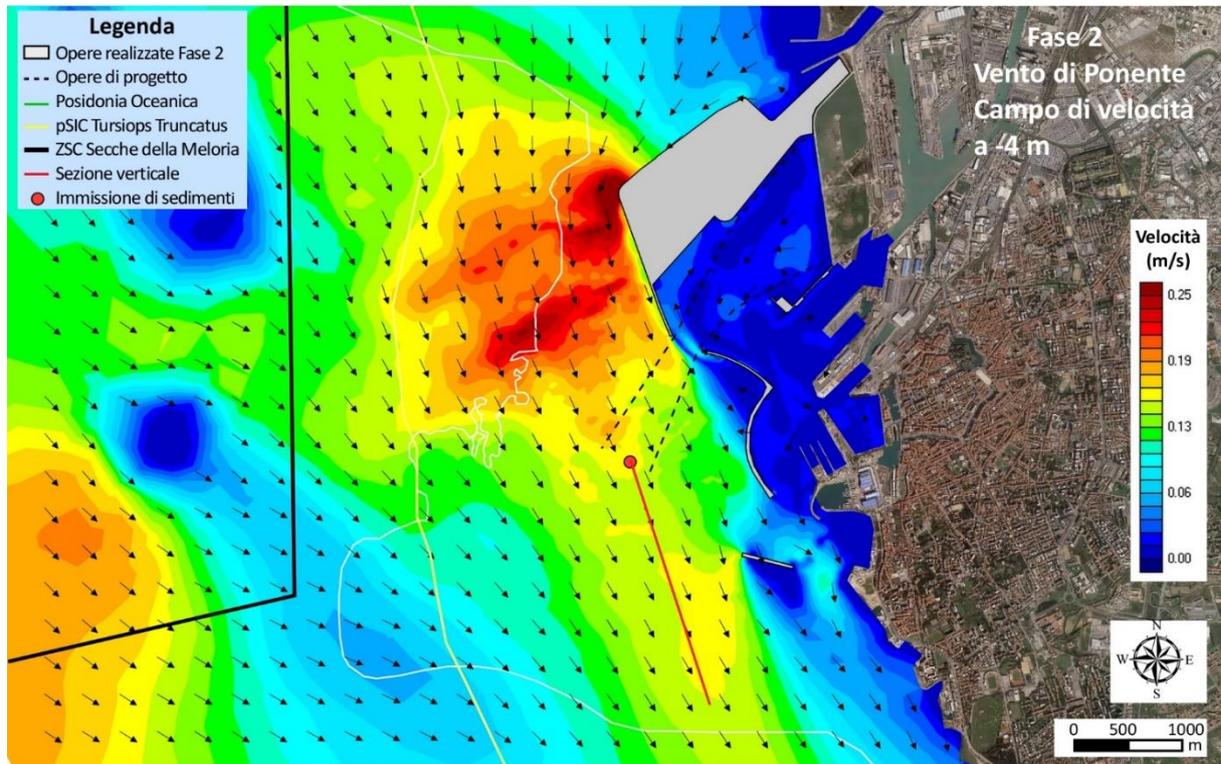


Figura 5.19 - Vento di Ponente, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità alla profondità di -4.0 m e punto di lavoro della draga (in rosso)

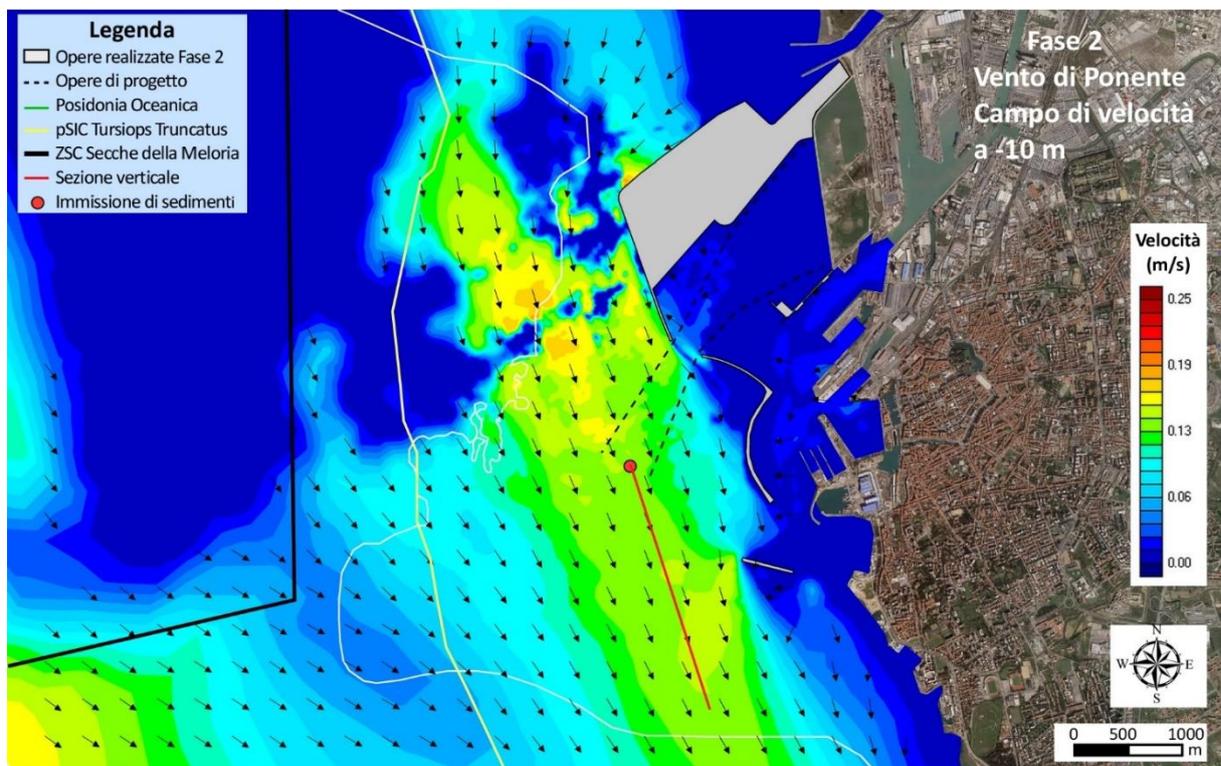


Figura 5.20 - Vento di Ponente, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità alla profondità di -10.0 m e punto di lavoro della draga (in rosso)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx



Figura 5.21 - Vento di Ponente, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (planimetria)

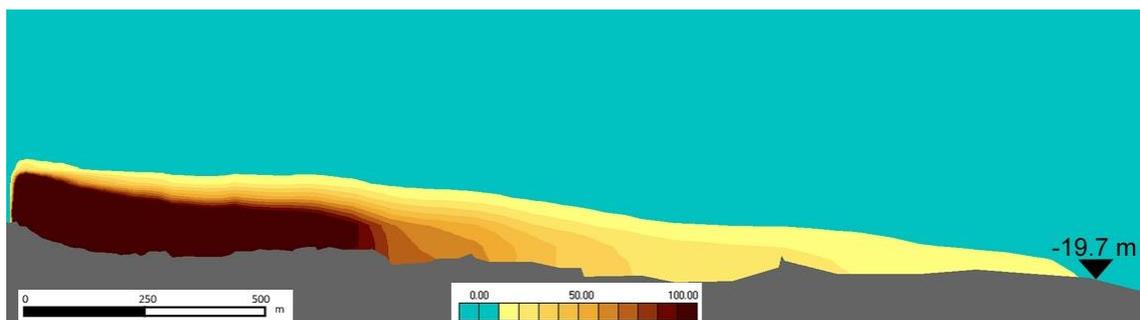


Figura 5.22 - Vento di Ponente, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (sezione verticale)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

#### 5.4.4 Dragaggio del canale di ingresso con draga CSD e corrente verso Sud

Un'ulteriore simulazione relativa al dragaggio idraulico nel canale di accesso è stata effettuata considerando la corrente diretta verso Sud, valutata con il modello 3DEF per riprodurre i dati forniti dal database Copernicus.

Come si può vedere dai campi di velocità alle diverse profondità, riportati da Figura 5.23 a Figura 5.25, la corrente è molto simile a quello del caso precedente. Nel punto di lavoro, in particolare, le correnti hanno medesima direzione, ma risultano leggermente meno intense; a Sud del punto di lavoro sono ancora meno intense e leggermente ruotate verso Sud.

Come si può evincere dalle Figura 5.26 e Figura 5.27, ne risulta che il plume di sedimenti trasportati in sospensione ha sostanzialmente la medesima forma ed un'estensione leggermente inferiore a quella del caso precedente (circa 2.1 km). Anche in questo caso l'area interessata da torbidità superiore alla soglia di rappresentazione fissata (10 mg/l) resta distante dalle zone identificate come target sensibili.

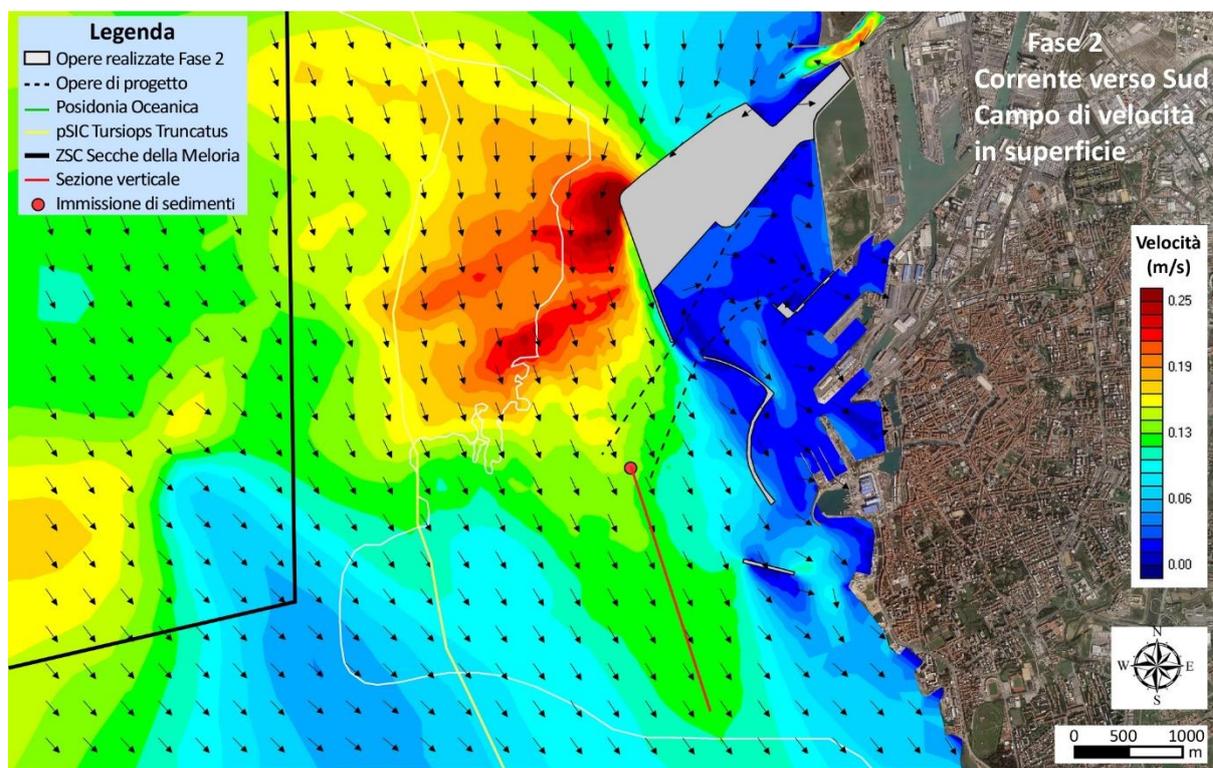


Figura 5.23 - Corrente diretta verso Sud, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità nello strato superficiale e punto di lavoro della draga (in rosso)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

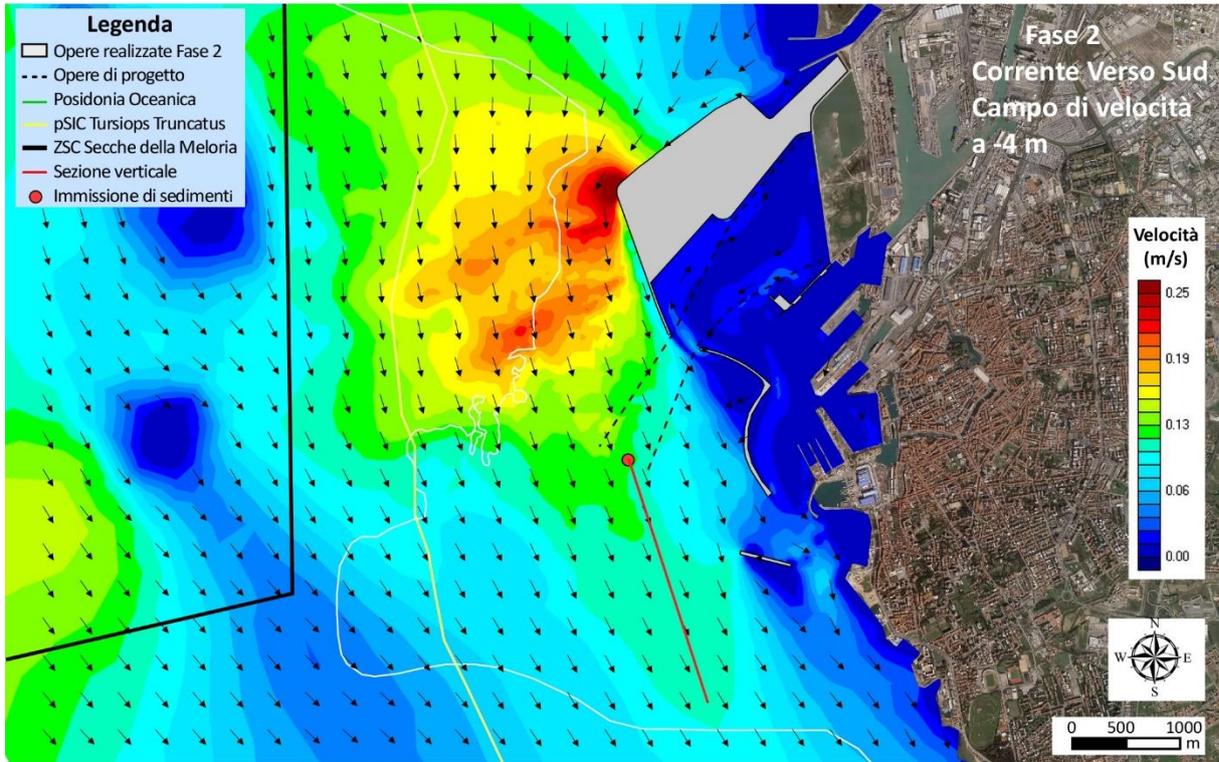


Figura 5.24 - Corrente diretta verso Sud, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità alla profondità di -4.0 m e punto di lavoro della draga (in rosso)

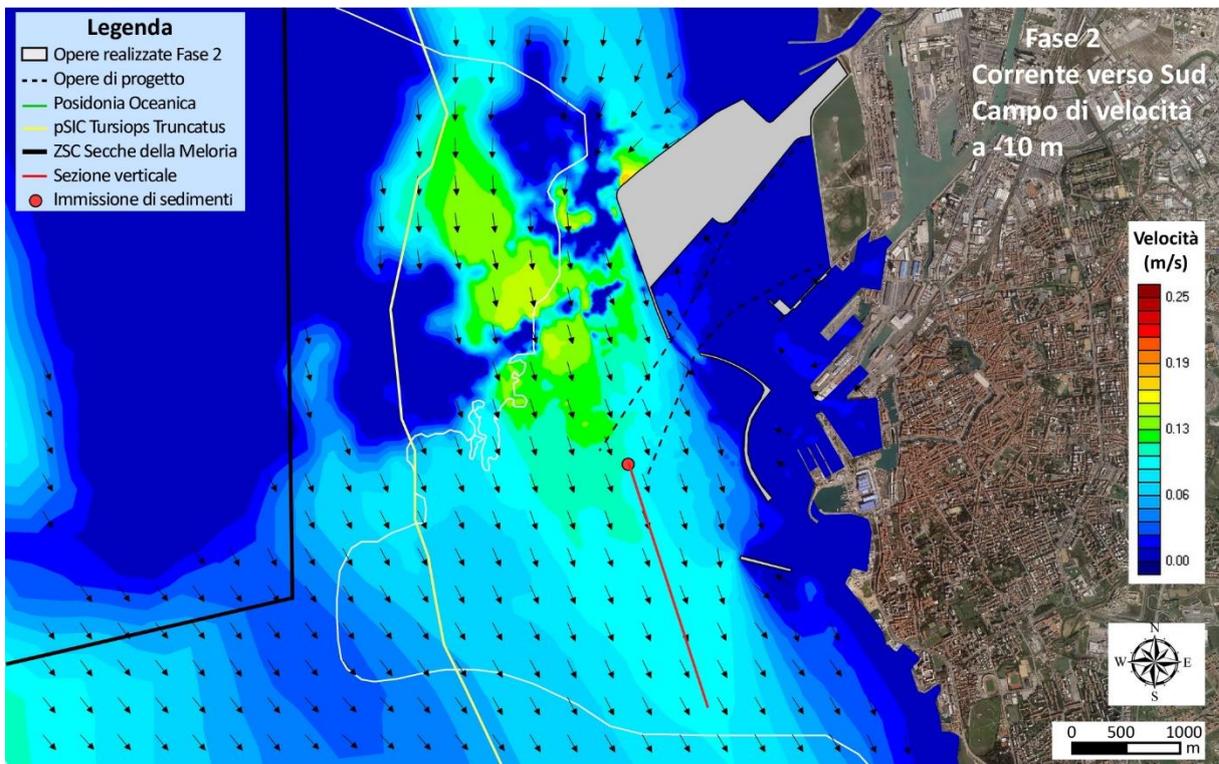


Figura 5.25 - Corrente diretta verso Sud, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Campo di velocità alla profondità di -10.0 m e punto di lavoro della draga (in rosso)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx



Figura 5.26 - Corrente diretta verso Sud, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (planimetria)

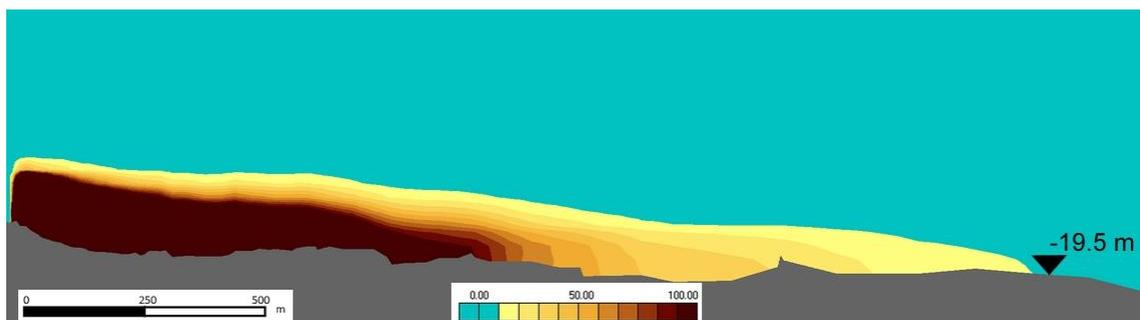


Figura 5.27 - Corrente diretta verso Sud, dragaggio del canale di ingresso con draga CSD. Inviluppo della massima concentrazione di sedimenti in sospensione (sezione verticale)

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

## 6 CONCLUSIONI

Le simulazioni, effettuate con un modello 3D multistrato, hanno consentito di ottenere ragionevoli stime delle variazioni di torbidità prodotte durante le lavorazioni di dragaggio: scavi di bonifica dell'imbasamento delle opere e dragaggio del canale di ingresso.

Gli scenari considerati hanno permesso di valutare i potenziali impatti rispetto ai target sensibili, che, nel caso in esame, riguardano i seguenti ambiti:

- Areale delle praterie di Posidonia Oceanica
- Zona Speciale di Conservazione "Secche della Meloria"
- Sito di Importanza Comunitaria "Tursiops Truncatus"

Tenendo presente che le operazioni di dragaggio non saranno effettuate durante eventi meteomarini intensi, gli scenari di simulazione hanno riguardato situazioni in cui il trasporto e la diffusione dei sedimenti in sospensione è principalmente governato dalle correnti indotte dal vento e dalle correnti litoranee tipiche del litorale toscano.

L'approccio adottato per le simulazioni modellistiche e le condizioni al contorno sono stati definiti sulla base delle indicazioni contenute nelle recenti Linee Guida dell'ISPRA "La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere" (LG169/dicembre 2017). Dalle Linee Guida sono state recepite, in particolare, le indicazioni per definire l'entità e le modalità di applicazione del "termine sorgente", ossia del flusso di sedimenti che, in relazione alle caratteristiche dei sedimenti stessi, del mezzo d'opera impiegato e delle sue modalità operative, è rilasciato in acqua e può essere trasportato dalle correnti anche a grande distanza dal punto di versamento.

Pur nei limiti inevitabilmente insiti in una modellazione come quella in esame, che riguarda un fenomeno estremamente complesso governato da forzanti ambientali che, almeno in parte, sono di incerta determinazione, i calcoli modellistici hanno fornito una serie di indicazioni utili alle scelte progettuali, in particolare per quanto riguarda la scelta delle più opportune tecnologie di dragaggio e la collocazione del materiale dragato.

Le simulazioni effettuate hanno dimostrato, in particolare, come le modalità di trasporto e diffusione delle torbide indotte dai dragaggi siano fortemente dipendenti dalle condizioni al contorno, e, in particolare, risentano della struttura del campo idrodinamico che, nell'intorno dell'ambito portuale, è fortemente condizionato dalla geometria delle terre emerse e dalle variazioni dei fondali in corrispondenza delle Secche della Meloria. Un ruolo tutt'altro che secondario è assunto dalla stratificazione del campo di moto che, soprattutto per i campi di corrente indotti dal vento, può determinare diverse direzioni di propagazione delle torbide a seconda che queste siano rilasciate su tutta la colonna d'acqua (come nel caso del dragaggio meccanico) o solo in prossimità del fondo (caso del dragaggio idraulico).

Negli scenari caratteristici presi in esame non si è riscontrata significativa interferenza tra il plume prodotto dalle attività di escavo e le aree sensibili, dal momento che il percorso seguito dai sedimenti trasportati in sospensione prima della loro completa ricaduta sul fondale è risultato generalmente troppo breve per raggiungere i limiti di tali aree. Il solo caso dello scavo a benna degli imbasamenti delle opere foranee con vento di Grecale è in grado di sviluppare un plume in grado di interferire marginalmente con il limite dell'areale della Posidonia. Si tratta comunque di una fase di durata molto ridotta in relazione allo sviluppo temporale complessivo del cantiere, durante la quale la concomitanza di vento di Grecale non sarà nemmeno la norma.

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto Definitivo	IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx

Le situazioni di massima espansione del plume sono risultate essere, in generale, tutte quelle relative agli scenari con correnti dirette verso Sud, che sono, tra quelle considerate, quelle di massima intensità. In tali casi la distanza massima raggiunta dai sedimenti trasportati in sospensione è stata stimata dal modello in circa 2 km rispetto al punto di risospensione.

La situazione in cui il plume si è avvicinato maggiormente ai target sensibili è risultata essere, come si è detto, quella costituita dallo scavo meccanico dell'imbasamento delle opere in presenza di vento di Grecale. In tale situazione, la corrente indotta dal vento è risultata essere prevalentemente diretta verso il largo e quindi potenzialmente in grado di indirizzare il plume dei sedimenti in sospensione verso le praterie di Posidonia e verso le Secche della Meloria. In questo caso le simulazioni sono state effettuate adottando ipotesi molto cautelative sull'entità degli spandimenti durante il dragaggio e si è verificato che, anche con tali ipotesi, gli impatti sui target sensibili sono risultati assolutamente trascurabili. Nel caso peggiore considerato, l'interferenza tra il plume e l'area occupata dalla Posidonia avviene con valori della concentrazione al fondo compresi tra 10 e 20 mg/l.

In definitiva, lo studio modellistico ha consentito di ottenere utili valutazioni sui potenziali impatti, legati alle variazioni di torbidità, che possono essere attesi sugli habitat prossimi all'area di intervento durante la realizzazione dei lavori. Lo strumento modellistico che è stato predisposto ha inoltre supportato valutazioni funzionali allo sviluppo del piano di monitoraggio, come ad esempio l'individuazione delle zone più idonee per l'installazione delle stazioni di monitoraggio. I dati raccolti con il piano di monitoraggio, a loro volta, potranno consentire non solo di supportare la gestione delle lavorazioni e misurare sul campo l'evoluzione degli eventuali impatti, ma anche di ampliare il dataset disponibile per la calibrazione e la validazione del modello idraulico, che potrà divenire un efficace ed affidabile strumento di supporto al controllo ambientale durante la realizzazione delle opere.

In particolare, l'appaltatore già individuato ha sviluppato il software proprietario ECOPLUME® che permette di pianificare di lavoro in anticipo in base alle condizioni meteomarine previste nell'area. L'applicazione di tale software potrà fare tesoro di tutte le analisi modellistiche e dei dati rilevati in fase di progettazione.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

## 7 APPENDICE – DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO 3DEF

### Struttura del solutore bidimensionale

Il modello 3DEF costituisce un'evoluzione del modello bidimensionale 2DEF, sviluppato dai proff. A. Defina e L. D'Alpaos dell'Università di Padova. 2DEF è basato su di uno schema numerico ad elementi finiti che risolve, in un dominio bidimensionale, le equazioni differenziali del moto di una corrente a superficie libera su bassi fondali, formulate in modo da poter essere applicate anche ad aree parzialmente asciutte o che possono essere allagate o prosciugate durante l'evoluzione del fenomeno indagato. Esso consente, tra l'altro, l'accoppiamento di elementi bidimensionali e unidimensionali (schema 2D-1D), utilizzando gli uni nelle zone in cui la direzione della velocità nel piano orizzontale non è a priori individuabile, gli altri per descrivere il funzionamento dei canali e dei corsi d'acqua minori presenti nel dominio di calcolo. È possibile, inoltre, inserire nella schematizzazione anche speciali elementi unidimensionali in grado di descrivere localmente il funzionamento idraulico di manufatti come soglie, traverse, botti a sifone, dispositivi controllati da paratoie, impianti idrovori, ecc. Il modello matematico dispone di una serie di moduli aggiuntivi. Con essi è possibile simulare la propagazione del moto ondoso e le correnti da esso indotte, il trasporto di sedimenti al fondo e in sospensione, e l'evoluzione dei fondali indotta dalle correnti di marea e da quelle generate dal moto ondoso, il trasporto e la diffusione di sostanze rilasciate in acqua, e quindi i tempi di residenza, con approccio sia euleriano che lagrangiano.

Per quanto riguarda gli aspetti idrodinamici, le equazioni che governano il moto in ipotesi di fondali lentamente erodibili sono formulate in modo da poter essere applicate anche ad aree parzialmente asciutte o che possono essere allagate o prosciugate durante l'evoluzione del fenomeno (Defina, 2000).

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{d(q_x/Y)}{dt} + \frac{q_x |\mathbf{q}|}{K_s^2 \cdot H^{10/3}} - \frac{\tau_{wx}}{\gamma Y} - Re_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{g} \frac{d(q_y/Y)}{dt} + \frac{q_y |\mathbf{q}|}{K_s^2 \cdot H^{10/3}} - \frac{\tau_{wy}}{\gamma Y} - Re_y = 0 \quad (2)$$

$$\eta(h) \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} = 0 \quad (3)$$

Nelle equazioni precedenti,  $h$  indica la quota idrometrica,  $x, y$  sono le ascisse spaziali orizzontali correnti,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $K_s$  è il coefficiente di scabrezza secondo Strickler,  $t$  è il tempo,  $\mathbf{q}=(q_x, q_y)$  è la velocità integrata sulla verticale,  $\tau_{wx}$  e  $\tau_{wy}$  sono i termini che descrivono l'effetto sulla circolazione delle eventuali azioni del vento e/o del moto ondoso,  $Re_x$  e  $Re_y$  sono gli sforzi adimensionali di Reynolds nel piano orizzontale, calcolati mediante le seguenti relazioni:

$$Re_x = \frac{v_T}{g} \left( \frac{\partial^2(\frac{q_x}{Y})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\frac{q_x}{Y})}{\partial y^2} \right) \quad Re_y = \frac{v_T}{g} \left( \frac{\partial^2(\frac{q_y}{Y})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\frac{q_y}{Y})}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Il coefficiente di viscosità cinematica turbolenta  $v_T$  che compare nelle precedenti relazioni, è determinato utilizzando come schema di chiusura il modello suggerito da *Smagorinsky* successivamente perfezionato da *Stansby*.

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

Nelle equazioni precedenti compaiono inoltre i termini  $\eta$ ,  $Y$  e  $H$  i quali, nell'istante generico, indicano, rispettivamente, la frazione locale di dominio allagato, il volume d'acqua per unità di superficie ed un'altezza d'acqua equivalente introdotta per descrivere correttamente l'effetto dei termini dissipativi. Tali termini sono dati dalle espressioni seguenti:

$$\eta(h) = \frac{1}{2} [1 - \operatorname{erf}(2Y_a / a_r)] \quad (5)$$

$$Y = \int_{-\infty}^h \eta \cdot dz = a_r \left\{ \eta \frac{Y_a}{a_r} + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-4(Y_a/a_r)^2} \right\} \quad (6)$$

$$H \cong Y + 0.27 \sqrt{Y \cdot a_r} \cdot e^{-2Y/a_r} \quad (7)$$

in cui  $\operatorname{erf}()$  è la funzione errore,  $Y_a = h - h_f$ , essendo  $h_f$  l'altezza media locale del fondo e  $a_r$  indica la ampiezza massima delle ondulazioni locali del terreno.

I termini  $\tau_{wx}$  e  $\tau_{wy}$  che compaiono nelle equazioni precedenti descrivono, come si è detto, l'effetto delle eventuali azioni del vento e/o del moto ondoso. L'azione del vento è valutata mediante le seguenti relazioni

$$\begin{aligned} \tau_{wx} &= \tau_w \cos(\mathcal{G}_w) & \tau_{wy} &= \tau_w \sin(\mathcal{G}_w) \\ \tau_w &= c_w \rho_a w_w^2 & c_w &= 0.0015 (1 - e^{-0.1w_w}) \end{aligned} \quad (8)$$

in cui  $w_w$  e  $\mathcal{G}_w$  sono la velocità e la direzione del vento e  $\rho_a$  è la densità dell'aria.

Al contributo dovuto al vento può essere sommato quello prodotto dal moto ondoso, determinato dalle variazioni spaziali dei radiation stress:

$$\tau_{wx} = - \left( \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \right) \quad \tau_{wy} = - \left( \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \right) \quad (9)$$

in cui le componenti  $R_{xx}$ ,  $R_{xy}$  e  $R_{yy}$  dei radiation stress sono eventualmente valutate tramite un modulo che risolve l'equazione differenziale che governa la conservazione dell'azione d'onda nell'ipotesi di onda monocromatica, tramite la formulazione di *Longuet-Higgins e Stewart*.

Si osserva, nelle equazioni precedenti, che l'accelerazione convettiva è, di fatto, considerata in modo lagrangiano, dato che la variazione nel tempo delle velocità mediate lungo la verticale è rappresentata da una derivata totale.

Per la discretizzazione di questo termine si è adottata una tecnica alle differenze finite trascurando, perché piccola, la variazione temporale dell'altezza d'acqua  $Y$ . In queste ipotesi, ad esempio, la derivata totale della velocità nella direzione  $x$ , è calcolata come segue:

$$\frac{d(q_x/Y)}{dt} \cong \frac{(q_x/Y)' - (q_x/Y)'_0}{\Delta t} \quad (10)$$

essendo le grandezze con apice riferite all'istante di calcolo precedente. Conseguentemente la derivata totale delle velocità, calcolata nel generico punto  $P$  del campo di moto, si scrive come differenza tra la velocità  $(q_x/Y)'$  calcolata nello stesso punto  $P$  e la velocità  $(q_x/Y)'_0$  calcolata, invece, nel punto  $P_0$  che si determina per integrazione a ritroso nel tempo lungo la "linea di fumo" passante per  $P$ .

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

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

### Modulo 3D multistrato a densità variabile

Un'ipotesi adottabile per lo studio della circolazione in presenza di deboli variazioni della velocità sulla verticale è quella che considera in direzione verticale distribuzione idrostatica delle pressioni. Con queste assunzioni è possibile simulare il campo idrodinamico tridimensionale tenendo conto anche della variazione della densità e simulando perciò la dinamica delle "correnti di densità" generate da variazioni di temperatura o di salinità.

Sulla base di tale ipotesi le equazioni che descrivono, per ciascuno strato, il moto della corrente possono essere scritte come segue (Defina et al., 1996):

$$\begin{aligned}
\frac{dU_i}{dt} + g \frac{\Delta_i}{\Delta z_i} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\Delta z_i \cdot \rho_0} (T_{zx_{i+1}} - T_{zx_i}) &= -g \frac{\Delta_i}{\Delta z_i} \frac{\partial S_i}{\partial x} \\
\frac{dV_i}{dt} + g \frac{\Delta_i}{\Delta z_i} \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\Delta z_i \cdot \rho_0} (T_{zy_{i+1}} - T_{zy_i}) &= -g \frac{\Delta_i}{\Delta z_i} \frac{\partial S_i}{\partial y} \\
\theta(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \sum_i \Delta z_i U_i + \frac{\partial}{\partial y} \sum_i \Delta z_i V_i &= 0 \\
\frac{\partial \Delta_i}{\partial t} + \frac{\partial \Delta z_i U_i}{\partial x} + \frac{\partial \Delta z_i V_i}{\partial y} + \Omega_{i+1} - \Omega_i &= 0 \\
\frac{\partial \Delta_i C_{\Delta i}}{\partial t} + \frac{\partial \Delta z_i U_i C_{\Delta i}}{\partial x} + \frac{\partial \Delta z_i V_i C_{\Delta i}}{\partial y} + F_{C_{i+1}} - F_{C_i} - \nabla \mathbf{D} \nabla \Delta_i C_{\Delta i} &= 0
\end{aligned} \tag{11}$$

essendo  $i=1,N$  con  $N$  numero degli strati in cui è suddiviso il campo di moto lungo la verticale.

Le variabili nelle equazioni (11) sono mediate in fase all'interno dell'area elementare e integrate lungo la verticale dal limite inferiore  $\zeta_i$  al limite superiore  $\zeta_{i+1}$  del singolo strato il cui spessore è, pertanto,  $\Delta z_i = \zeta_{i+1} - \zeta_i$ .

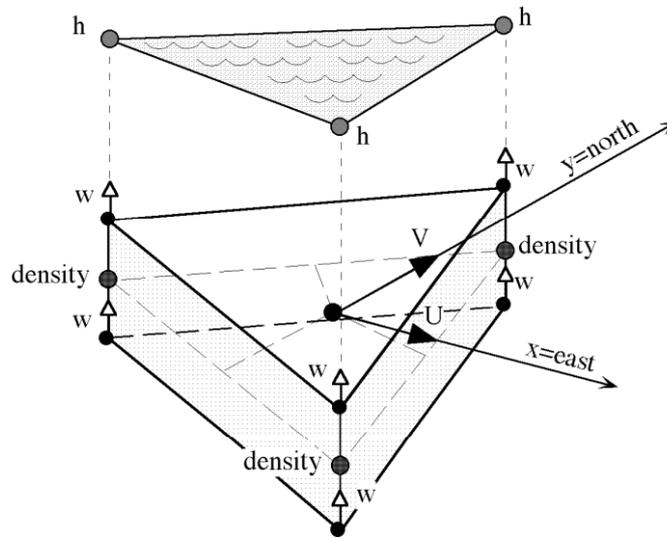
Definito con  $\theta$  la porzione di area occupata dalla fase fluida per unità di superficie, le variabili contenute in (11) sono definite come segue:

$$\begin{aligned}
\Delta_i &= \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} \theta(z) dz & S_i &= \frac{1}{\rho_0 \Delta z_i} \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} \int_z^h \theta(\rho - \rho_0) d\zeta dz \\
U_i &= \frac{1}{\Delta z_i} \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} U(z) dz & V_i &= \frac{1}{\Delta z_i} \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} V(z) dz & C_{\Delta i} &= \frac{1}{\Delta_i} \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} C(z) dz
\end{aligned} \tag{12}$$

dove  $U(z)$  e  $V(z)$  sono le componenti della velocità lungo gli assi coordinati  $x$  e  $y$ ;  $z$  è la coordinata verticale;  $\rho$ ,  $\rho_0$  sono, rispettivamente, la densità attuale e media;  $t$  è il tempo;  $h$  è l'elevazione della superficie libera;  $\mathbf{D}$  il tensore della diffusione e  $C(z)$  denota alternativamente la salinità o la temperatura.  $\Omega_i$  e  $F_{C_i}$  sono i flussi verticali per unità di superficie che attraversano l'interfaccia di separazione tra lo strato  $i-1$  e lo strato  $i$ , mentre gli sforzi di attrito  $T_{zx_i}$  e  $T_{zy_i}$  sono valutati come:

$$\begin{aligned} Tzx_i &= \rho_0 \mathfrak{R} \Xi_i |\Delta \mathbf{V}_i| (U_i - U_{i-1}) \\ Tzy_i &= \rho_0 \mathfrak{R} \Xi_i |\Delta \mathbf{V}_i| (V_i - V_{i-1}) \end{aligned} \quad (13)$$

in cui  $|\Delta \mathbf{V}_i| = \left[ (U_i - U_{i-1})^2 + (V_i - V_{i-1})^2 \right]^{1/2}$ ,  $\sqrt{\Xi}$  è la lunghezza adimensionale di mescolamento e  $\mathfrak{R} = (1 - Ri)^{1/6}$  tiene conto dello smorzamento della turbolenza dovuto alla stratificazione, essendo  $Ri$  il numero di Richardson. La definizione delle variabili è riprodotta schematicamente anche nella figura seguente.



*Variabili del campo di moto di una corrente stratificata tridimensionale*

Le equazioni (11) sono risolte utilizzando uno schema standard agli elementi finiti seguendo un approccio di tipo Lagrangiano per valutare le derivate totali presenti, mentre i termini a destra del segno di uguaglianza sono assunti costanti all'interno del generico passo di calcolo temporale (approssimazione Barotropica). In questo modo le prime due delle equazioni possono essere scritte in forma matriciale come

$$[\mathbf{A}][\mathbf{U}] = [\mathbf{B}] \frac{\partial h}{\partial x} + [\mathbf{B}_x] \quad (14)$$

$$[\mathbf{A}][\mathbf{V}] = [\mathbf{B}] \frac{\partial h}{\partial y} + [\mathbf{B}_y]$$

Le equazioni (14) risolte danno:

$$U_i = \psi_i \frac{\partial h}{\partial x} + \varphi_{xi} \quad V_i = \psi_i \frac{\partial h}{\partial y} + \varphi_{yi} \quad i = 1, N \quad (15)$$

mentre la terza delle equazioni (11), tenendo conto delle (15), diventa:

$$\theta(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \psi \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \psi \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

dove:

$$\psi = \sum_i \Delta z_i \cdot \psi_i ; \quad \varphi_x = \sum_i \Delta z_i \cdot \varphi_{xi} ; \quad \varphi_y = \sum_i \Delta z_i \cdot \varphi_{yi} \quad (17)$$

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

Si noti che l'equazione(16), contenendo la sola incognita  $h$ , è formalmente identica all'equazione che descrive l'andamento della superficie libera per il moto bidimensionale di una corrente omogenea. Ciò consente di utilizzare la medesima procedura numerica per ottenere la soluzione utilizzata per il modello 2D.

Una volta valutata l'elevazione della superficie libera in ogni nodo del reticolo di calcolo, sostituendo a ritroso  $h$  in (15), si ottiene il campo orizzontale di velocità. I flussi verticali sono valutati, infine, attraverso la quarta delle equazioni (11).

A questo punto la quinta delle (11), ossia l'equazione del trasporto e diffusione, è risolta per ottenere la concentrazione  $C$  utilizzando uno schema alle differenze in avanti (schema upwind).

Se le simulazioni sono condotte a salinità variabile, si assume che la concentrazione  $C$  possa essere direttamente sostituita con la densità del fluido, variabile per effetto della salinità.

Nel caso del trasporto di altri costituenti, come nel caso dei solidi in sospensione generati dal dragaggio, l'equazione di trasporto è modificata per tener conto della velocità di caduta delle particelle, che dipende dalla legge di Stokes (sedimenti non coesivi):

$$w_s = \frac{(\rho_s - \rho_w)gd^2}{18\mu}$$

in cui  $\rho_s$  e  $\rho_w$  indicano la densità dei granuli di sedimento e la densità dell'acqua,  $d$  è il diametro medio dei sedimenti,  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $\mu$  è la viscosità dell'acqua.

Per quanto riguarda la discretizzazione in direzione verticale, due sono sostanzialmente le tecniche normalmente utilizzate nei modelli tridimensionali. La prima prevede uno schema a griglia fissa, sezionando il dominio mediante una successione di piani orizzontali. La seconda, prevede una discretizzazione verticale variabile nello spazio e nel tempo. In pratica, per ogni verticale, il dominio fluido compreso tra il fondo e la superficie libera si suddivide in un certo numero di tratti verticali. Questa discretizzazione, quindi, si adatta istante per istante al valore attuale della quota della superficie libera.

Entrambi questi metodi, però, non sono molto adatti in situazioni di acque molto basse e fondali ad andamento irregolare in quanto introducono una notevole diffusione di tipo numerico.

Nel modello 3DEF è stata preferita una discretizzazione diversa dalle due precedenti, la quale in qualche modo include i pregi di entrambe cercando di limitarne i difetti. Si tratta di una discretizzazione verticale simile a quella di secondo tipo ma che assume come limite, verso il basso, non la quota del fondo ma una quota fissa, di riferimento, in modo analogo alla discretizzazione di primo tipo (vedi figure seguenti).

Si è verificato che in tal modo si riduce sensibilmente la diffusione verticale di tipo numerico.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

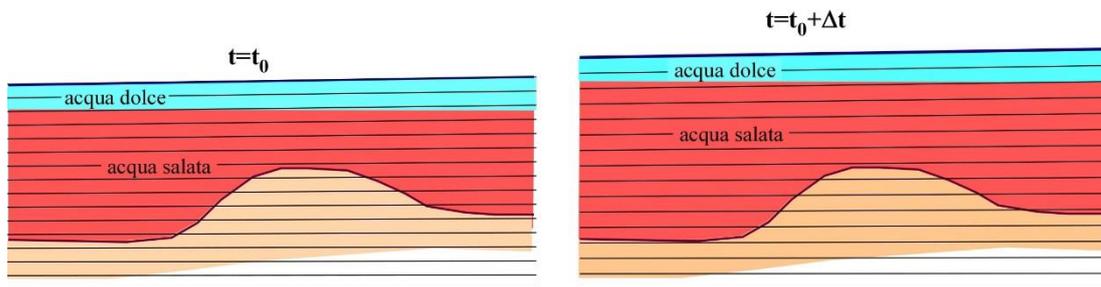
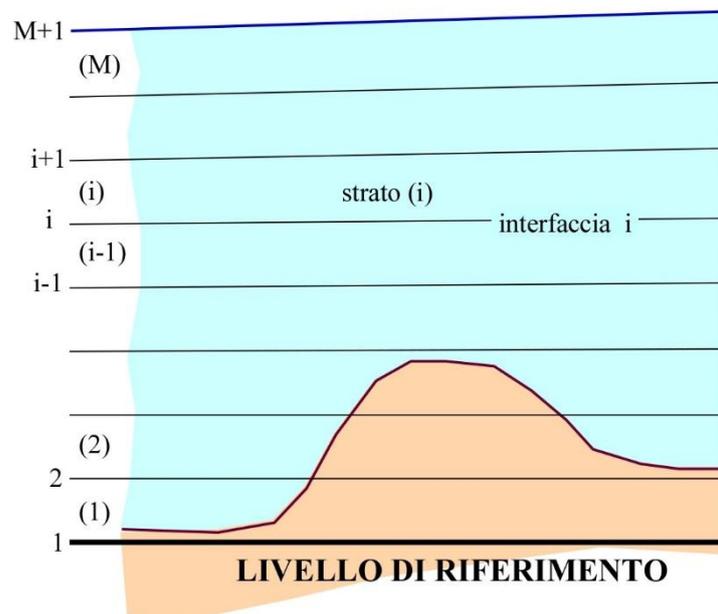
Progetto Definitivo

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PD-D-005\_2.docx

### SUPERFICIE LIBERA



### Bibliografia

- [1] D'Alpaos L., Defina A., 1993. Venice Lagoon Hydrodynamic Simulation by Coupling 2D and 1D Finite Elements Models. VII International Conference on Finite Elements in Fluids, Barcelona.
- [2] Defina A., D'Alpaos L., Matticchio B., 1994. A new set of equations for very shallow water and partially dry areas suitable to 2D numerical models. In Proceedings of the Specialty Conference on "Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas", edited by P. Molinaro and L. Natale, Milan, 29 June-1 July 1994. New York ASCE; p. 72-81.
- [3] D'Alpaos, L. and A. Defina, 1995. Modellazione matematica del comportamento idrodinamico di zone a barena solcate da una rete di canali minori. Estratto da Rapporti e Studi - Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della Laguna e della Città di Venezia, Ist. Veneto di Scienze, Lettere ed Arti.
- [4] Defina A., 1996. Modelling of Tidal Flow in Very Shallow Lagoons. XI Int. Conf. Comput. Methods Water Resour., Cancun (Mexico).
- [5] D'Alpaos L., Defina A., Matticchio B., 1996. Multilayer Model for Shallow Water Flows and Density Currents applied to a Lagoon in the River Delta. XI Int. Conf. Comput. Methods Water Resour., Cancun (Mexico).

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto Definitivo	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA  1233_PD-D-005_2.docx
--	---	---

- [6] Defina A., 2000. *Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas*. *Water Resour Res* 2000;36:3251. doi:10.1029/2000WR900167.
- [7] Carniello, L., A. Defina, S. Fagherazzi, L. D'Alpaos, 2004. *A combined wind wave–tidal model for the Venice lagoon, Italy*. *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, f04007, 2004. <http://dx.doi.org/10.1029/2004jf000232>.
- [8] D'Alpaos, L., Defina, A., 2007. *Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon*. *Comput. Geosci.* 33, 476–496. doi:10.1016/j.cageo.2006.07.009
- [9] Carniello, L., Defina, A. and D'Alpaos, L., 2009. *Morphological evolution of the Venice Lagoon: evidence from the past and trend for the future*. *J. Geophys. Res.-Earth Surface*, 114, F04002, doi:10.1029/2008JF001157.
- [10] L. D'Alpaos and L. Carniello, 2010. *Sulla reintroduzione di acque dolci nella laguna di Venezia. XXVI giornata dell'Ambiente. La Salvaguardia di Venezia e della sua Laguna, in ricordo di Enrico Marchi, Roma 5 giugno 2008. ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI, Atti dei Convegni - 255 - pp. 113-146.*
- [11] Carniello, L., D'Alpaos, A. and Defina, A., 2011. *Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins*. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, 92, 263-276.
- [12] Carniello, L., A. Defina and L. D'Alpaos, 2012. *Modeling sand-mud transport induced by tidal currents and wind waves in shallow microtidal basins: Application to the Venice Lagoon (Italy)*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 102, 105-115.
- [13] Viero, D.P., Defina, A., 2016. *Water age, exposure time, and local flushing time in semi-enclosed, tidal basins with negligible freshwater inflow*. *J. Mar. Syst.* 156, 16–29. doi:10.1016/j.jmarsys.2015.11.006.