

REGIONE ABRUZZO

COMUNE DI PESCARA



"DEVIAZIONE DEL PORTO CANALE DI PESCARA" (CUP D24B16000260001)
"COMPLETAMENTO DEI NUOVI MOLI GUARDIANI" (CUP D21C18000210001)
FASE A: REALIZZAZIONE DEL MOLO NORD

FASE B: INTERVENTI DI DEVIAZIONE DEL PORTO CANALE (CUP J24E21001210006)

FASE C: INTERVENTI DI COMPLETAMENTO

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

Titolo elaborato : **STUDIO IDRODINAMICO - ANALISI DELLE FASI
TRANSITORIE**

Progettazione:

Dott. Ing. Giuseppe Nicola BERNABEO
Dott. Geol. Mattia IPPOLITO
Dott. Arch. Lorenzo DI GIROLAMO

Supporto alla progettazione:

AGiS Ingegneria

Via Sabotino, 46
00195 ROMA

MODIM

Via Monte Zebio 40
00195 ROMA

Studi specialistici Idraulico-Marittimo:

Prof. Ing. Paolo DE GIROLAMO
Prof. Ing. Marcello DI RISIO (UNIVAQ – UNIVERSITÀ DELL'AQUILA)

Responsabile Unico Del Procedimento:

Dott. Ing. Tommaso IMPICCIATORE

Scala:

Dimensioni foglio:

Elaborato:

MC-24-217-A

Data	Rev.	DESCRIZIONE	Disegnato:	Controllato:	Validato:
Maggio 2024	0	EMISSIONE			

Contratto di Ricerca LIAM CT-45

Deviazione del Porto Canale di Pescara

– Analisi delle fasi transitorie –

*Studio idrodinamico
Versione R02*



Committente

Azienda Regionale Aree Produttive (ARAP)

Gruppo di Lavoro

Responsabile Scientifico: Prof. Ing. Marcello Di Risio, Ph.D.

Coordinatore Scientifico: Dott. Ing. Daniele Celli, Ph.D.

Gruppo operativo: Dott. Ing. Valerio Gianforte



<i>Revisione</i>	<i>Data</i>
R01	22.02.2024
R02	24.02.2024 (sostituisce ogni versione precedente)

Copyright © 2024 by LIAM

Contatto: marcello.dirisio@univaq.it

Si declina ogni responsabilità per i danni derivanti da un uso improprio delle informazioni contenute in questo documento, nel rispetto dell'art. 1229 del Codice Civile.

Indice

1	Premesse	1
2	Finalità dello studio, metodologia e strumenti	3
2.1	Obiettivi dello studio	3
2.2	Approccio	4
2.3	Strumenti numerici	6
2.3.1	Considerazioni generali	6
2.3.2	Propagazione del moto ondoso sotto costa	6
2.3.3	La circolazione costiera locale	8
2.4	Analisi dei risultati e comparazione	9
3	Indagine numerica	11
3.1	Implementazione dei domini di calcolo	11
3.1.1	Caratteristiche generali delle configurazioni	11
3.1.2	Fonte dei dati	11
3.1.3	Discretizzazione dei domini di calcolo	13
3.2	Selezione degli scenari	16
3.2.1	Fonte dei dati	16
3.2.2	Caratteristiche anemometriche e del moto ondoso a largo	16
3.2.3	Livelli del mare	16
3.2.4	Scenari di simulazione	17
3.3	Sintesi delle caratteristiche dell'indagine numerica	17
4	Risultati numerici e analisi comparativa	19
4.1	Descrizione qualitativa dei risultati numerici	19
4.1.1	Configurazione A1	19
4.1.2	Configurazione A2	20

4.2	Analisi comparativa	20
5	Osservazioni Conclusive	23
6	Bibliografia	24
A	Risultati Numerici: dettagli grafici	26
A.1	Circolazione costiera	27

Elenco delle figure

2-1	Schema semplificato dell'approccio modellistico utilizzato. Le linee tratteggiate indicano i fenomeni non oggetto di analisi numerica dello studio illustrato in questa relazione.	5
3-1	Caratteristiche salienti delle configurazioni riprodotte numericamente.	12
3-2	Vista d'insieme della griglia numerica implementata per la propagazione a grande scala.	14
3-3	Dettaglio della griglia in corrispondenza dell'area sottocosta.	14
3-4	Vista d'insieme della griglia numerica implementata per la riproduzione della circolazione costiera (configurazione A1).	15
3-5	Dettaglio della griglia in corrispondenza dell'area di interesse (configurazione A1).	15
4-1	Circolazione Costiera. Confronto tra i risultati ottenuti per la configurazione A1 (in alto) e per la configurazione A2 (in basso) per lo scenario M010.1 (evento con tempo di ritorno pari a 10 anni proveniente dal settore di traversia principale).	21
4-2	Circolazione Costiera. Confronto tra i risultati ottenuti per la configurazione A1 (in alto) e per la configurazione A2 (in basso) per lo scenario M010.2 (evento con tempo di ritorno pari a 10 anni proveniente dal settore di traversia secondario).	21

Elenco delle tabelle

3-1	Caratteristiche anemometriche (velocità del vento U_w) e parametri sintetici del moto ondoso (altezza d'onda significativa H_{m0} , periodo di picco T_p e direzione di provenienza ϑ_m) definite al largo del paraggio in esame.	17
3-2	Livelli caratteristici dell'oscillazione astronomica della marea. I valori sono stati ottenuti depurando la serie misurata dalle oscillazioni interannuali.	18
3-3	Livelli di marea meteorologica con associato tempo di ritorno.	18
3-4	Scenari di simulazione per la riproduzione della propagazione del moto ondoso e della circolazione costiera.	18
4-5	Circolazione costiera. Valori del livello del mare valutato puntualmente in corrispondenza della sezione terminale del fiume (η_p).	22

1 Premesse

Questo documento illustra la prima fase degli studi specialistici finalizzati alla valutazione delle caratteristiche idrodinamiche dell'area costiera posta in corrispondenza della foce del Fiume Pescara.

L'area è oggetto dell'intervento di deviazione del Porto Canale di Pescara. Esso, nel suo complesso, è suddiviso in diverse fasi, finalizzate a raggiungere la configurazione prevista dal PRP2008 del Porto di Pescara.

La successione delle fasi di realizzazione richiede l'approfondimento specialistico relativo alle fasi transitorie. Infatti, insieme all'analisi relativa all'intera realizzazione dell'intervento (diffusamente affrontati nell'ambito di definizione della configurazione del PRP2008), è necessaria la caratterizzazione fisica degli effetti transitori riconducibili alla parziale realizzazione delle opere.

In tale ambito, è pluriennale la collaborazione istituzionale dell'Azienda Regionale Attività Produttive (ARAP) e del Laboratorio di Idraulica Ambientale e Marittima (Liam) del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile-Architettura e Ambientale (DICEAA) dell'Università degli Studi dell'Aquila.

Nel passato, infatti, la collaborazione ha riguardato:

- l'analisi dell'interferenza (idrodinamica e morfodinamica) della deviazione con le strutture del Ponte del Mare;
- l'analisi dell'influenza del 1° Stralcio dei lavori (Completamento pennello di foce e scogliera di radicamento) sulla pericolosità idrauliche delle aree prossime al Fiume Pescara;

Successivamente, l'importanza e complessità dell'intervento ha suggerito di continuare la collaborazione istituzionale con il co-finanziamento di una borsa dottorale con l'obiettivo specifico di fornire alla comunità scientifica e tecnica strumenti e procedure operative finalizzate a supportare la progettazione e realizzazione di interventi di ingegneria marittima. Il caso della deviazione del Fiume Pescara, di alto interesse tecnico e scientifico, è stato selezionato quale caso studio di applicazione pratica degli strumenti in fase di sviluppo.

In particolare, le attività in corso di svolgimento hanno, tra le altre, le seguenti finalità:

- valutazione degli effetti idrodinamici della configurazione delle opere con l'obiettivo di supportare la scelta della successione delle fasi di realizzazione;
- ottimizzazione della configurazione degli interventi per minimizzare gli impatti ambientali delle fasi transitorie, con particolare attenzione alla tematica della qualità delle acque.

Questo documento ha l'obiettivo di descrivere i risultati delle analisi volte alla valutazione degli effetti idrodinamici correlati alla geometria della testata del cosiddetto "Molo Nord" (ovvero la futura sponda sinistra della deviazione della foce del fiume). Tali risultati hanno l'obiettivo principale di valutare gli effetti della totale disconnessione idraulica dell'avamposto dall'area posta immediatamente a Nord dell'area di intervento.

2 Finalità dello studio, metodologia e strumenti

2.1 Obiettivi dello studio

La finalità di questo studio è di valutare l'influenza della configurazione transitoria delle opere sull'idrodinamica locale.

In particolare, lo studio è finalizzato ad indagare gli effetti idrodinamici della chiusura del varco tra il Molo Nord e la diga foranea.

Nella sostanza, lo studio si fonda sull'analisi comparativa dell'idrodinamica locale in una configurazione di riferimento (indicata nel seguito come A1) per la quale il Molo Nord non è collegato alla diga foranea e la configurazione che prevede la chiusura del varco tra la testata del Molo Nord tramite collegamento all'esistente diga foranea (indicata nel seguito come configurazione A2).

Nel rispetto delle finalità esplicitate, lo studio è volto a:

- individuare le forzanti meteomarine;
- stimare l'idrodinamica (costiera) indotta dalle forzanti metomarine nell'area prospiciente l'attuale foce fluviale;
- stimare, tramite analisi comparativa, l'influenza della chiusura del varco tra la testata del Molo Nord e la diga foranea sui livelli del mare nella zona di avamposto.

Per quanto riguarda l'individuazione delle forzanti meteomarine, lo studio fa espresso riferimento ai risultati degli innumerevoli studi precedenti (tra cui quelli redatti nell'ambito del processo di formazione del PRP2008). In particolare, sono prese in considerazione le seguenti forzanti meteomarine:

- onde;
- livelli del mare (deterministici e stocastici);
- vento.

Per la caratterizzazione dell'idrodinamica locale, le forzanti meteomarine individuate sono utilizzate per il calcolo (tramite modellazione numerica di dettaglio) delle caratteristiche idrodinamiche che si instaurano nell'avamposto nelle due configurazioni "A1" e "A2". Tali caratteristiche sono costituite dalle seguenti informazioni:

- distribuzione dell'intensità della corrente (media sulla profondità);
- distribuzione della direzione della corrente;
- distribuzione dei livelli idrici.

2.2 Approccio

Lo studio utilizza un approccio comparativo volto all'analisi dell'influenza della configurazione delle opere sui livelli del mare nella zona dell'avamposto.

In particolare, la chiusura del varco in corrispondenza della testata del Molo Nord ha potenziale influenza:

- sulla propagazione delle onde di vento;
- sulla circolazione costiera indotta dalla propagazione delle onde.

D'altra parte, l'influenza sulla circolazione costiera si traduce in una variazione dei livelli del mare in corrispondenza della sezione terminale del fiume Pescara, rappresentandone la condizione al contorno di valle. Pertanto, in linea di principio, la modifica delle opere ha potenziale influenza anche sul deflusso fluviale.

Si osserva che i fenomeni considerati (propagazione del moto ondoso, circolazione costiera, deflusso fluviale) sono fisicamente accoppiati. Il moto ondoso forza la circolazione costiera (correnti e livelli) che, tuttavia, influenza la propagazione del moto ondoso. I livelli del mare influenzano il deflusso fluviale che, a sua volta, influenza il livello nella zona di avamposto. Con l'obiettivo di semplificare la problematica in analisi, i fenomeni possono essere analizzati con approccio parzialmente disaccoppiato, tramite l'utilizzo di appropriati strumenti modellistici di tipo numerico. In estrema sintesi, lo studio è volto a verificare la variazione dei livelli nella zona di avamposto: se le variazioni sono limitate, lo sono verosimilmente anche quelle relative al deflusso fluviale.

Il moto ondoso è stato propagato da largo verso riva, a grande scala, ignorando la sua interazione con la circolazione costiera. L'obiettivo di questa prima modellazione è di definire le caratteristiche sintetiche del moto ondoso in corrispondenza dell'area prospiciente la diga foranea. La propagazione alla grande scala non è influenzata dalla configurazione di dettaglio delle opere. Pertanto, questo studio ripropone quanto già ottenuto nell'ambito dello studio idrodinamico (effettuato dal LIAM) relativo al 1° Stralcio dei lavori (Completamento pennello di foce e scogliera di radicamento).

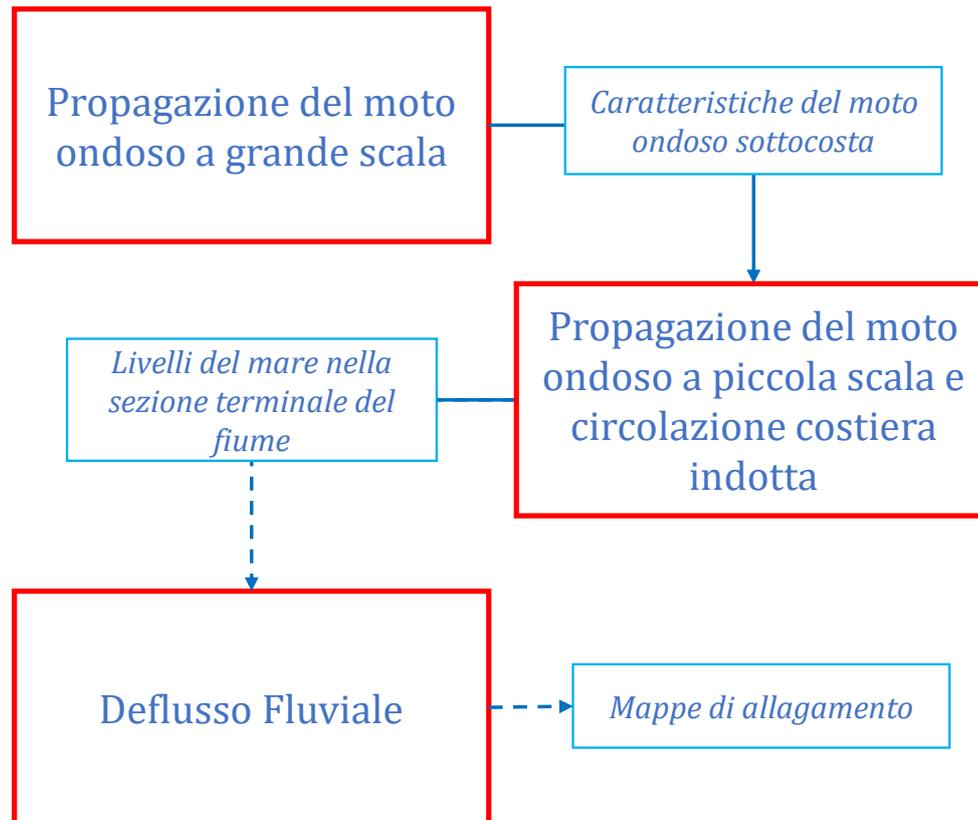


Figura 2-1: Schema semplificato dell'approccio modellistico utilizzato. Le linee tratteggiate indicano i fenomeni non oggetto di analisi numerica dello studio illustrato in questa relazione.

Successivamente, il moto ondoso sottocosta è stato propagato nell'area locale dell'avamposto considerando l'accoppiamento fisico con la circolazione costiera indotta, ma ignorando quello con il deflusso fluviale. L'obiettivo è quello di valutare la quota del livello del mare e le caratteristiche dell'idrodinamica locale dovute sia alla componente meteorologica statica, sia alla circolazione costiera.

In linea del tutto generale, lo schema di Figura 2-1 mostra l'approccio modellistico implementato.

I risultati delle analisi, ripetute sia per la configurazione A1, sia per la configurazione A2, sono stati utilizzati per effettuare l'analisi comparativa e valutare gli effetti della chiusura del varco sui livelli del mare in corrispondenza della sezione terminale dell'attuale foce fluviale.

2.3 Strumenti numerici

2.3.1 Considerazioni generali

Come anticipato, e con riferimento allo schema di Figura 2-1, lo studio si basa sull'analisi comparativa dei risultati ottenuti dall'utilizzo di una *catena modellistica* volta a caratterizzare, per entrambe le configurazioni analizzate ("A1" – varco aperto – e "A2" – varco chiuso):

- la propagazione del moto ondoso a grande scala;
- la circolazione costiera (livelli e correnti) forzata dal moto ondoso a piccola scala;
- la condizione al contorno di valle del deflusso fluviale (livello del mare).

Nel seguito si forniscono alcuni dettagli relativi ai modelli numerici utilizzati per effettuare le analisi.

2.3.2 Propagazione del moto ondoso sotto costa

La propagazione del moto ondoso a grande scala è stata mutuata dal precedente studio relativo al 1° Stralcio.

In linea generale, necessaria a trasferire le informazioni ondamiche da largo al contorno dell'area di piccola scala, è stata riprodotta utilizzando il modello numerico SWaN (*Simulating Waves Nearshore*). Sviluppato dall'Università di Delft (*Delft University of Technology*), il modello numerico risolve la cosiddetta equazione dell'azione d'onda considerando i fenomeni di rifrazione (dovuta a variazioni di fondale e alle correnti), di *shoaling* (dovute a variazioni di fondale e alle correnti), il fenomeno del *wave blocking* indotto da correnti contrarie, la trasmissione attraverso strutture costiere, la generazione di moto ondoso da vento, la dissipazione dovuta a frangimento in acqua profonda ed in acqua bassa, la dissipazione indotta da attrito sul fondo, l'interazione non lineare tra le componenti dello spettro. D'altra parte, il modello ha alcune limitazioni legate al fatto che la diffrazione è descritta in maniera empirica, non sono calcolate le correnti indotte dalle onde (che richiede la specifica applicazione di un modello di circolazione costiera), il sovrizzo indotto dal moto ondoso frangente è calcolato sulla base di un'equazione approssimata che non tiene conto delle correnti.

Utilizzando un sistema di riferimento cartesiano, l'equazione (lineare) risolta dal modello è la seguente:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(C_{gx}U)N] + \frac{\partial}{\partial x} [(C_{gy}V)N] + \frac{\partial C_{\sigma}}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_{\theta}}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

Nella quale:

- $N (= E/\sigma)$ è l'azione d'onda;
- E è la densità di energia del moto ondoso;
- σ è la frequenza angolare relativa (cioè definita rispetto al sistema di riferimento in movimento con la velocità ambientale);

- U, V sono le componenti cartesiane del campo di correnti (ambientali, cioè non calcolate dal modello numerico);
- x, y sono le coordinate spaziali;
- t è il tempo;
- C_{gx}, C_{gy} sono le componenti cartesiane della celerità di gruppo;
- $C_{\sigma}, C_{\vartheta}$ sono le componenti della celerità di propagazione nel piano (σ, ϑ) ;
- ϑ è la direzione di propagazione del moto ondoso;
- S_{tot} è il termine forzante, volto alla rappresentazione dei fenomeni di generazione/dissipazione energetica ed ai fenomeni di distribuzione energetica nel piano (σ, ϑ) .

L'equazione (1) è risolta per ogni frequenza angolare (σ_i) e direzione (ϑ) .

Nel presente studio, il modello è utilizzato ignorando la variazione temporale dell'azione d'onda ed in assenza di correnti ambientali.

Il termine forzante (S_{tot}) è esplicitato tramite una serie di formulazioni finalizzate a descrivere i seguenti fenomeni fisici:

- trasferimento energetico dal vento alle onde (generazione);
- il trasferimento energetico non lineare tra triplette e quadruplette;
- dissipazione energetica imputabile al frangimento in acqua profonda;
- dissipazione energetica dovuta all'interazione con il fondo;
- dissipazione energetica dovuta al frangimento in acqua bassa.

Da un punto di vista numerico, il modello SWaN ha la possibilità di utilizzare la discretizzazione alle differenze finite delle equazioni che governano il problema (con eventuale applicazione delle cosiddette *griglie annidate*). Tuttavia, con l'obiettivo di descrivere nel dettaglio le caratteristiche di propagazione nell'area a piccola scala, il modello è stato utilizzato sfruttando la possibilità di applicare il metodo numerico agli elementi finiti che permette la discretizzazione delle griglie di calcolo con risoluzione variabile.

Per un approfondimento tecnico sul modello numerico, si rimanda alla letteratura di settore (es. *The SWaN Team, 2019*).

2.3.3 La circolazione costiera locale

Per quanto riguarda la stima delle caratteristiche della circolazione costiera locale indotta dal moto ondoso che si propaga nella "piccola scala", è stato utilizzato il modello numerico XBeach. Sviluppato da un gruppo di ricerca costituito da ricercatori provenienti da diversi enti (l'ente di ricerca olandese Deltares, l'Università di Delft e l'Università di Miami), lo strumento numerico appartiene alla famiglia dei modelli integrati sulla verticale (2DH, bidimensionali – 2D – sul piano orizzontale – H –). Molto sinteticamente, XBeach riproduce la propagazione del moto ondoso sottocosta, la circolazione costiera indotta, il trasporto sedimentario costiero e l'evoluzione morfodinamica. Nel caso in esame, gli aspetti connessi al trasporto solido non sono stati approfonditi, nel rispetto della definizione degli obiettivi dello studio.

Senza entrare nei dettagli dell'implementazione del modello numerico, basti richiamare che la propagazione del moto ondoso è riprodotta risolvendo la stessa equazione del modello numerico SWaN (1) con alcune differenze sulle ipotesi di chiusura del termine sorgente (S_{tot}). Rispetto al modello SWaN, tuttavia, è riprodotta la mutua interazione tra le correnti indotte e la propagazione del moto ondoso. A tal fine, all'equazione di conservazione dell'azione d'onda, è accoppiata l'equazione dell'iconale:

$$\frac{\partial k_x}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial k_y}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

nella quale:

- k_x, k_y sono le componenti cartesiane del numero d'onda;
- ω è la frequenza angolare assoluta.

L'idrodinamica indotta dal moto ondoso è riprodotta risolvendo le equazioni delle onde non lineari in acqua bassa (è trascurata la deviazione della distribuzione della pressione da quella idrostatica, così come sono trascurate le componenti verticali delle velocità), secondo un approccio di media generalizzata lagrangiana mediata sulla verticale (GLM):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (U^L h)}{\partial x} + \frac{\partial (V^L h)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U^L}{\partial t} + U^L \frac{\partial U^L}{\partial x} + V^L \frac{\partial U^L}{\partial y} - f_c V^L - v_h \left(\frac{\partial^2 U^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U^L}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{\rho h} (\tau_{sx} + \tau_{bx}^E + F_x) \quad (5)$$

$$\frac{\partial V^L}{\partial t} + U^L \frac{\partial V^L}{\partial x} + V^L \frac{\partial V^L}{\partial y} + f_c U^L - v_h \left(\frac{\partial^2 V^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V^L}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{\rho h} (\tau_{sy} + \tau_{by}^E + F_y) \quad (6)$$

Nella quale l'apice \cdot^L indica le grandezze lagrangiane e l'apice \cdot^E quelle euleriane (la cui differenza è data dalla deriva di Stokes). In particolare:

- t è il tempo;
- x, y sono le coordinate cartesiane;
- η è l'elevazione del livello medio (dinamico);
- h è la profondità totale;
- U, V sono le componenti cartesiane delle velocità medie sulla verticale;
- f_c è il coefficiente di Coriolis;
- ν_h è il coefficiente di viscosità di vortice orizzontale;
- τ_{sx}, τ_{sy} sono le componenti cartesiane dello sforzo tangenziale agente sulla superficie libera (ad esempio indotto dal vento);
- τ_{bx}, τ_{by} sono le componenti cartesiane dello sforzo tangenziale agente sul fondo;
- F_x, F_y sono le componenti cartesiane delle spinte indotte dal moto ondoso, comprendente il ruolo energetico del frangente.

Le equazioni sono risolte con il metodo delle differenze finite considerando l'accoppiamento tra il fenomeno di propagazione e quello idrodinamico tramite l'iterazione del modulo di propagazione e di quello di idrodinamica sino al raggiungimento della soluzione stazionaria.

Per un approfondimento tecnico sul modello numerico, si rimanda alla letteratura di settore (es. *XBeach Team, 2018*).

2.4 Analisi dei risultati e comparazione

Nel rispetto delle finalità degli obiettivi dello studio, i risultati ottenuti tramite l'implementazione della catena modellistica sono estratti e discussi nel dettaglio.

In particolare, per ognuno dei fenomeni analizzati e per ognuna delle configurazioni riprodotte, i risultati sono analizzati e sintetizzati graficamente come segue.

- Propagazione del moto ondoso a larga scala:
 - distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa a grande scala;
 - campo vettoriale di propagazione delle onde a grande scala;
 - distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa in corrispondenza di un'area prossima alla zona di interesse;
 - campo vettoriale di propagazione delle onde di un'area prossima alla zona di interesse.
- Circolazione costiera alla scala locale:

- distribuzione spaziale dell'intensità di velocità alla scala locale;
- campo vettoriale dell'idrodinamica locale;
- distribuzione spaziale dei livelli idrici.

L'analisi comparativa è effettuata, nel rispetto dell'obiettivo dello studio, in termini di caratteristiche dell'idrodinamica locale e dei livelli del mare nella zona dell'avamposto, in particolare in corrispondenza della sezione terminale dell'attuale foce fluviale.

3 Indagine numerica

3.1 Implementazione dei domini di calcolo

3.1.1 Caratteristiche generali delle configurazioni

Con riferimento allo schema di Figura 3-1, le differenze tra le configurazioni risiedono nella geometria della testata del Molo Nord. Da un punto di vista squisitamente geometrico, le caratteristiche delle opere possono essere sintetizzate come segue.

- **Pennello di foce**

Configurazione prevista dal vigente PRP2008. La quota della berma emersa raggiunge i +5.50 m lmm.

- **Completamento del Molo Nord**

Configurazione prevista dal vigente PRP2008 (quota della berma pari a +2.50 m lmm) a meno del dettaglio relativo alla testata: presenza di un varco tra la testata e l'opera foranea (configurazione A1) oppure chiusura del varco con intestazione sull'opera foranea (configurazione A2).

3.1.2 Fonte dei dati

L'implementazione dei domini di calcolo richiede la conoscenza delle profondità in corrispondenza dell'intero dominio di calcolo.

I domini di calcolo, nella fattispecie, si estendono nella grande scala sino ad una profondità di circa 100 m, e giungono sino alla piccola scala dell'asta fluviale e del centro urbano di Pescara.

Di conseguenza, le informazioni desunte da diverse fonti sono state integrate per l'implementazione delle griglie numeriche.

- **Dominio di propagazione del moto ondoso a grande scala**



Figura 3-1: Caratteristiche salienti delle configurazioni riprodotte numericamente.

- rilievo di dettaglio effettuato nell'ambito del progetto definitivo della "Deviazione del Porto Canale di Pescara – 1° Stralcio - Completamento pennello di foce e scogliera di radicamento";
- modello digitale del fondo del mare desunto dall'archivio EMODnet, con risoluzione spaziale pari a circa 115 m.

• **Circolazione costiera a piccola scala**

- rilievo di dettaglio effettuato nell'ambito del progetto definitivo della "Deviazione del Porto Canale di Pescara – 1° Stralcio - Completamento pennello di foce e scogliera di radicamento".

Per quanto riguarda le opere della configurazione A1, si è fatto riferimento alla "Planimetria di progetto" del progetto definitivo della "Deviazione del Porto Canale di Pescara – 1° Stralcio - Completamento pennello di foce e scogliera di radicamento", a meno della quota della berma (pari a +2.50 m

lmm per il Molo Nord). La chiusura del varco nella configurazione A2 è stata ottenuta semplicemente seguendo la stessa orientazione del Molo Nord sino all'opera foranea.

3.1.3 Discretizzazione dei domini di calcolo

Propagazione del moto ondoso a grande scala

Come già diffusamente anticipato, il modello di propagazione del moto ondoso a grande scala è stato utilizzando sfruttando la sua possibilità di applicare il metodo numerico agli elementi finiti. In questo caso, l'intero dominio di calcolo è discretizzato da una serie di elementi triangolari che, senza soluzione di continuità, interessa l'intera area di analisi. Ogni elemento triangolare è definito dalla posizione dei tre nodi posti ai vertici. Con l'obiettivo di trarre informazioni dettagliate nei pressi della zona di interesse, la griglia numerica è stata costruita imponendo un valore massimo dell'estensione degli elementi variabile a seconda della zona di interesse. E' stato imposto un valore massimo dell'area degli elementi pari a $50 \text{ ha} (= 5 \cdot 10^5 \text{ m}^2)$ sino a scendere ad un valore di 100 m^2 in prossimità delle opere oggetto dell'intervento. Ne è risultata una griglia numerica di **47'377** elementi triangolari e **24'097** nodi.

La griglia si estende longitudinalmente alla costa dal litorale di Roseto degli Abruzzi a Nord, sino al litorale di Rocca San Giovanni a Sud, per una lunghezza totale di circa 60 km. Lungo la direzione trasversale, la griglia si estende sino alla profondità di circa 100 m, per una distanza massima dalla costa pari a circa 27 km. L'estensione dell'intera griglia di calcolo raggiunge i $1'270 \text{ km}^2$

La Figura 3-2 mostra una visione di insieme della griglia numerica implementata. Analogamente, la Figura 3-3 mostra la configurazione della griglia in prossimità dell'area di interesse.

Circolazione costiera locale

La griglia numerica relativa alla riproduzione della circolazione costiera locale è stata implementata in accordo con il metodo delle differenze finite. Tuttavia, con l'obiettivo di cogliere con maggior dettaglio i risultati in diretta corrispondenza dell'area di interesse, in particolare in corrispondenza dell'avamposto prospiciente la foce fluviale, la griglia numerica è stata implementata con una risoluzione spaziale variabile. Al largo ed in corrispondenza dei contorni laterali la risoluzione spaziale è pari a 100 m. Il passo di discretizzazione della griglia decresce linearmente sino a raggiungere i 5 m in corrispondenza della zona di avamposto.

La griglia è costituita da **128'700** nodi computazionali. Con un'estensione lungo la direzione trasversale alla costa pari a circa 1'700 m (sino a raggiungere approssimativamente una profondità pari a 10 m) e lungo quella longitudinale pari a circa 4'200 m. L'estensione dell'intera griglia di calcolo raggiunge pertanto circa 7 km^2 .

La Figura 3-4 mostra una visione di insieme della griglia numerica implementata (nel caso della configurazione A1). Analogamente, la Figura 3-5 mostra la configurazione della griglia in prossimità dell'area di interesse (configurazione A1).

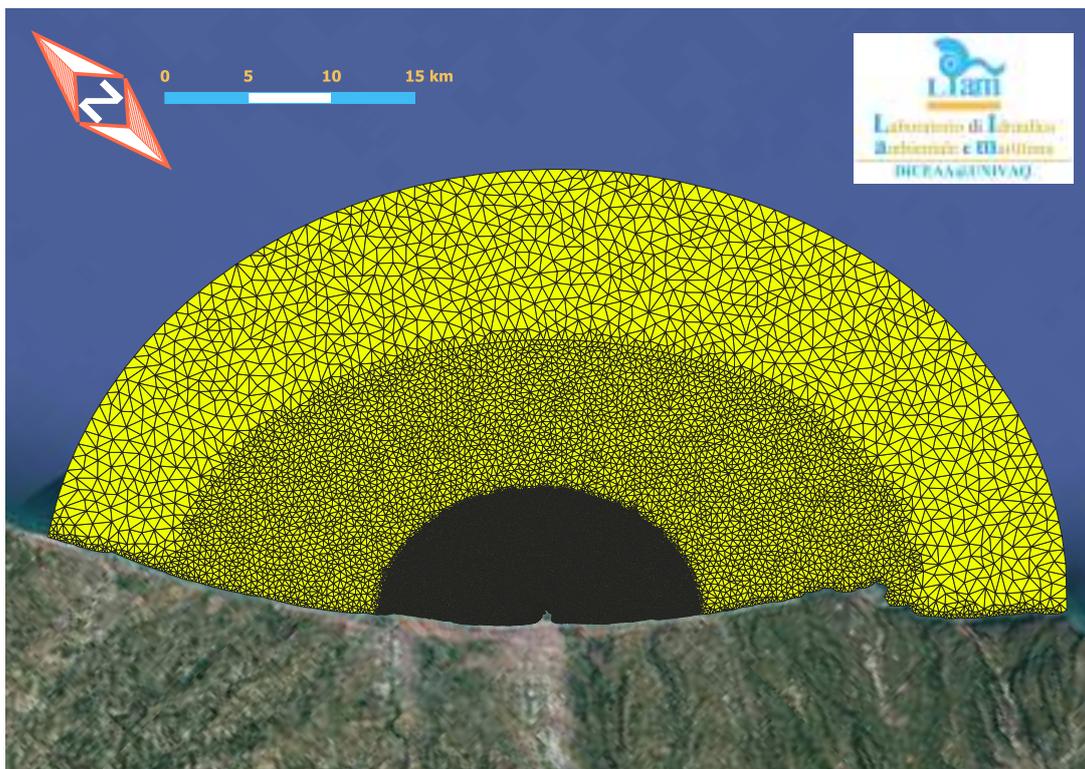


Figura 3-2: Vista d'insieme della griglia numerica implementata per la propagazione a grande scala.

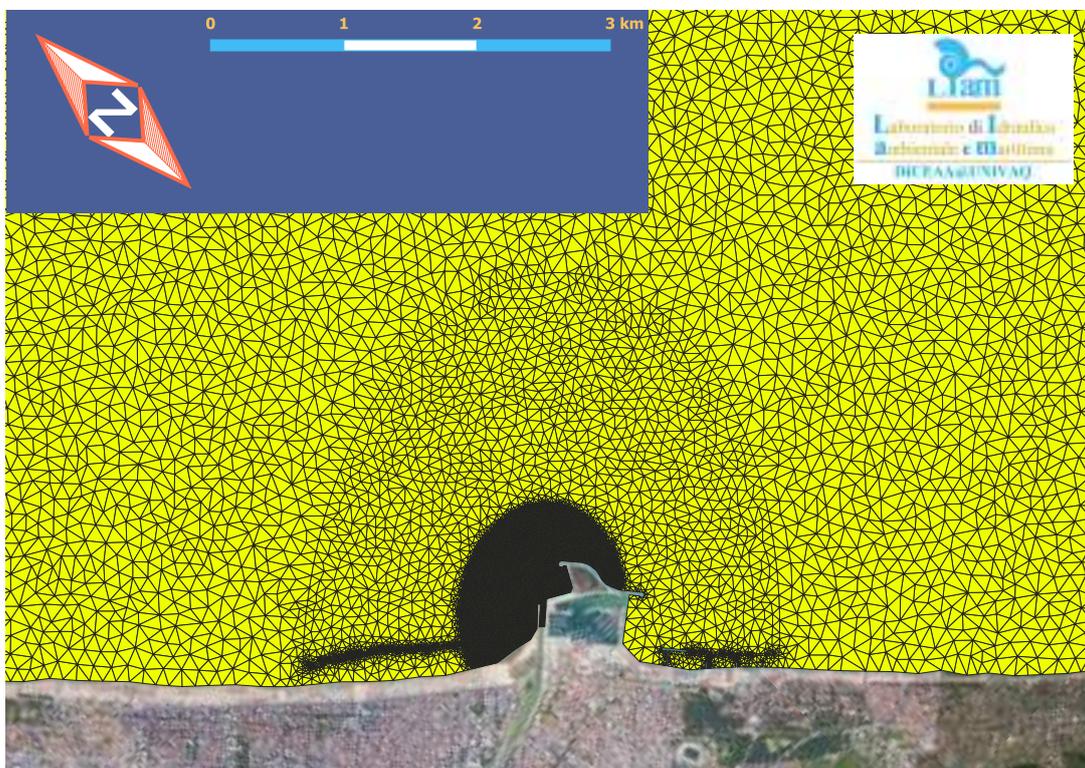


Figura 3-3: Dettaglio della griglia in corrispondenza dell'area sottocosta.

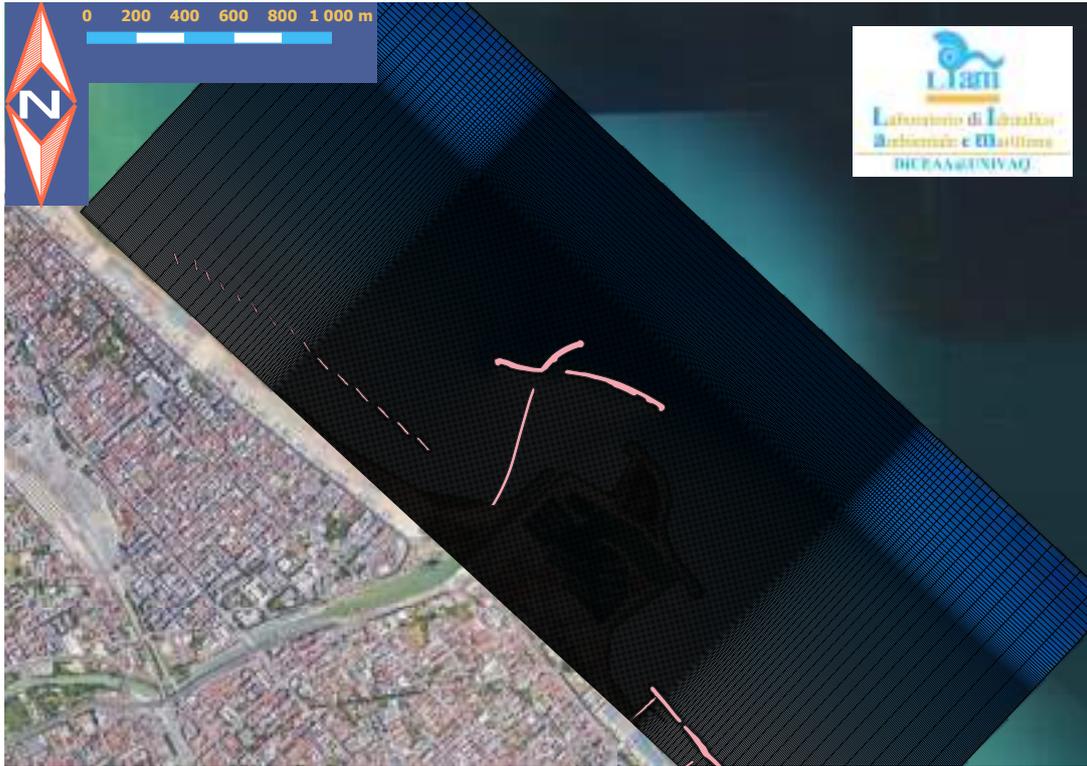


Figura 3-4: Vista d'insieme della griglia numerica implementata per la riproduzione della circolazione costiera (configurazione A1).

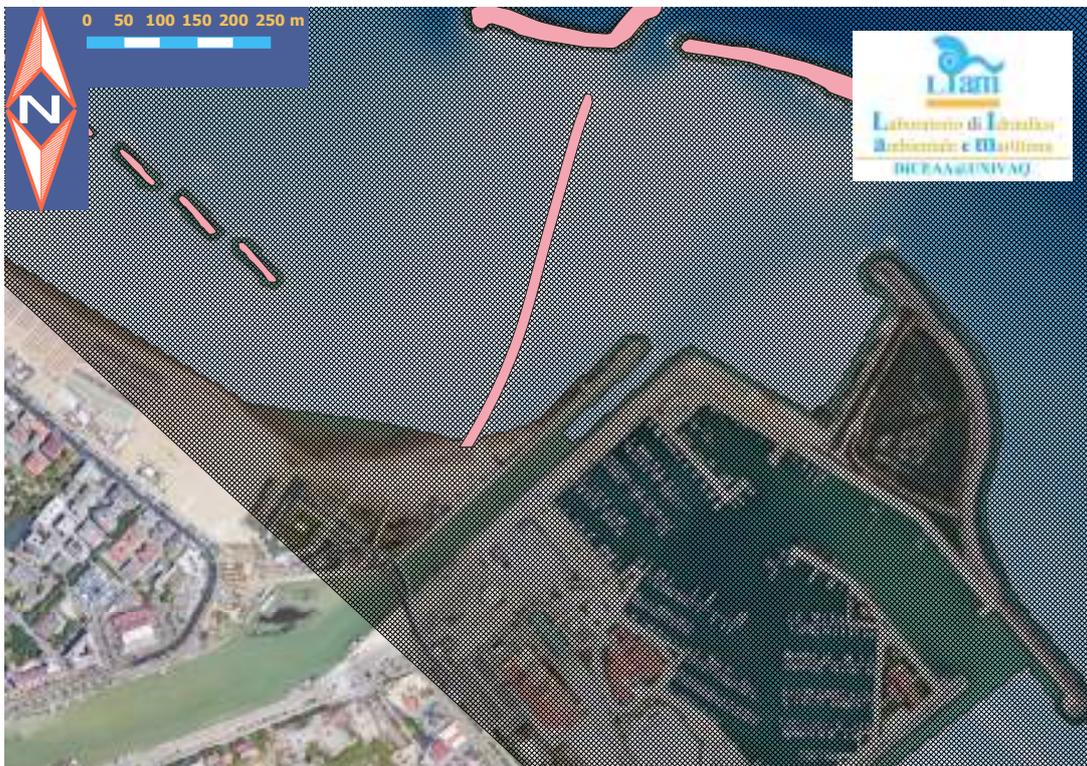


Figura 3-5: Dettaglio della griglia in corrispondenza dell'area di interesse (configurazione A1).

3.2 Selezione degli scenari

3.2.1 Fonte dei dati

L'indagine richiede una serie di informazioni relative alla definizione dei termini forzanti di ogni strumento numerico che costituisce la catena modellistica. In linea del tutto generale, la fonte dei dati è costituita dai numerosi studi pregressi, tra cui gli studi specialistici a supporto del Progetto definitivo dell'intervento in epigrafe.

Più nel dettaglio, la propagazione del moto ondoso alla grande scala e la riproduzione della circolazione costiera locale richiedono:

- la definizione delle caratteristiche sintetiche degli eventi estremi di moto ondoso al largo del paraggio in esame e le relative condizioni anemometriche, per associato tempo di ritorno;
- la stima dei livelli caratteristici dell'oscillazione astronomica di marea;
- il valore dei livelli estremi di marea meteorologica, per associato tempo di ritorno.

Tali informazioni sono state desunte direttamente dallo "Studio Meteomarino" del Progetto definitivo del 1° Stralcio. L'analisi dei livelli del mare è stata mutuata dal precedente studio idrodinamico a supporto del progetto del 1° Stralcio.

3.2.2 Caratteristiche anemometriche e del moto ondoso a largo

La Tabella 3-1 mostra le caratteristiche anemometriche (velocità del vento U_w) e parametri sintetici del moto ondoso (altezza d'onda significativa H_{m0} , periodo di picco T_p e direzione di provenienza θ_m) definite al largo del paraggio in esame, così come desunto dallo studio meteomarino del progetto del 1° Stralcio. Nella tabella sono riportati sia gli eventi (estremi) provenienti dal settore di traversia principale, sia da quello secondario di Levante. Si sottolinea che le direzioni di provenienza sono state selezionate, tra quelle considerate nell'ambito dello Studio Meteomarino, in modo da considerare la condizione peggiore in termini di penetrazione del moto ondoso attraverso l'apertura della diga foranea e con l'obiettivo di minimizzare l'effetto della rifrazione. Pertanto sono state considerate le onde provenienti dalle direzioni più prossime alla normale alla giacitura media della costa (e delle batimetriche di larga scala).

3.2.3 Livelli del mare

La Tabella 3-2 mostra i livelli caratteristici della componente armonica, stimati depurando la serie del livello totale dall'oscillazione interannuale del livello medio (dovuto a fenomeni quali la NAO, *North Atlantic Oscillation*) ottenuti con l'aggiornamento dell'analisi. Analogamente, i livelli estremali della componente meteorologica riportati in Tabella 3-3 sono stati stimati sulla base

dell'aggiornamento effettuato nell'ambito dello studio idrodinamico a supporto del progetto del 1° Stralcio.

3.2.4 Scenari di simulazione

Sulla base di quanto descritto nei paragrafi precedenti, la Tabella 3-4 sintetizza i parametri delle simulazioni effettuate in termini di propagazione del moto ondoso alla grande scala e la circolazione costiera. Nella tabella, il valore di z_w rappresenta il livello medio statico calcolato come la sovrapposizione della media delle alte maree sizigiali (MHSW, pari a +0.19 m lmm) e del livello meteorologico associato allo stesso tempo di ritorno del moto ondoso.

3.3 Sintesi delle caratteristiche dell'indagine numerica

Questo capitolo, di descrizione generale, si chiude con una breve sintesi dei punti di forza e delle ipotesi semplificative dell'indagine numerica, aggiungendo alcuni dettagli delle scelte modellistiche.

I punti di forza possono essere di seguito sintetizzati.

- La mutua interazione tra circolazione costiera e propagazione del moto ondoso alla piccola scala è riprodotta tramite l'utilizzo iterativo dei moduli di propagazione e idrodinamica del modello numerico utilizzato.
- L'analisi dei livelli del mare tiene conto dei recenti eventi;
- L'approccio comparativo dello studio permette di accettare senza riserve le ipotesi semplificative descritte nel seguito.

Le ipotesi semplificative sono sintetizzate come segue.

Settore di provenienza	Tempo di ritorno (anni)	SIGLA	H_{m0} (m)	T_p (s)	θ (°N)	U_w (m/s)
Principale	2	M002.1	4.9	9.3	30	17.1
Secondario	2	M002.2	4.1	8.8	90	15.1
Principale	10	M010.1	6.3	10.1	30	20.5
Secondario	10	M010.2	5.4	9.6	90	18.3
Principale	50	M050.1	7.7	10.9	30	24.0
Secondario	50	M050.2	6.6	10.2	90	21.3
Principale	100	M100.1	8.3	11.2	0	25.5
Secondario	100	M100.2	7.2	10.5	90	22.8

Tabella 3-1: Caratteristiche anemometriche (velocità del vento U_w) e parametri sintetici del moto ondoso (altezza d'onda significativa H_{m0} , periodo di picco T_p e direzione di provenienza θ_m) definite al largo del paraggio in esame.

Livello caratteristico	Valore (m)
Massima Alta Marea Astronomica (HAT)	+0.244
Media delle alte maree sizigiali (MHSW)	+0.191
Media delle alte maree in quadratura (MHNW)	+0.101
Livello medio (MSL)	-0.044
Media delle basse maree in quadratura (MLNW)	-0.101
Media delle basse maree sizigiali (MLSW)	-0.168
Minima bassa marea astronomica (LAT)	-0.207

Tabella 3-2: Livelli caratteristici dell'oscillazione astronomica della marea. I valori sono stati ottenuti depurando la serie misurata dalle oscillazioni interannuali.

Tempo di ritorno (anni)	Valore (m)
2	+0.561
10	+0.718
50	+0.934
100	+1.051

Tabella 3-3: Livelli di marea meteorologica con associato tempo di ritorno.

SIGLA	Tempo di ritorno (anni)	H_{m0} (m)	T_p (s)	θ ($^{\circ}$ N)	U_w (m/s)	Z_w (m lmm)
M002.1	2	4.9	9.3	30	17.1	+0.75
M002.2	2	4.1	8.8	90	15.1	+0.75
M010.1	10	6.3	10.1	30	20.5	+0.91
M010.2	10	5.4	9.6	90	18.3	+0.91
M050.1	50	7.7	10.9	30	24.0	+1.12
M050.2	50	6.6	10.2	90	21.3	+1.12
M100.1	100	8.3	11.2	0	25.5	+1.24
M100.2	100	7.2	10.5	90	22.8	+1.24

Tabella 3-4: Scenari di simulazione per la riproduzione della propagazione del moto ondoso e della circolazione costiera.

- Il modulo di propagazione delle onde non riproduce in maniera rigorosa il fenomeno della diffrazione e non riproduce affatto il fenomeno della riflessione; tuttavia le finalità dello studio non riguardano l'analisi dell'agitazione ondosa nella zona di avamposto.
- La mutua interazione tra deflusso fluviale e idrodinamica costiera non è riprodotta.

4 Risultati numerici e analisi comparativa

4

4.1 Descrizione qualitativa dei risultati numerici

Tutti i risultati della circolazione costiera sono riportati in Appendice A.1. Nel seguito sono discussi i risultati ottenuti. La discussione si basa sull'analisi qualitativa in funzione della direzione di provenienza del moto ondoso e della configurazione.

4.1.1 Configurazione A1

In configurazione A1, in generale, gli stati di mare provenienti dal settore di traversia principale inducono una corrente che, proveniente dal litorale Nord, interagiscono con il Molo Nord. La quota della berma (+2.50 m lmm) è tale da assicurare una parziale disconnessione idraulica con l'avampor- to. Ne consegue che la corrente proveniente da Nord viene deviata verso il largo dal radicamento. In corrispondenza della diga foranea, la corrente viene deviata verso Nord (ad aggirare la testata setten- trionale della diga foranea) e verso Sud entrando nell'area di avampor- to. La corrente viene quindi (parzialmente) drenata attraverso l'imboccatura realizzata in corrispondenza dell'opera foranea e prosegue parzialmente verso Sud interessando l'avampor- to fino a convogliarsi nel canale tra l'opera foranea del Porto Turistico e il tratto terminale meridionale dell'opera foranea.

Il moto ondoso proveniente dal settore secondario, invece, induce una corrente diretta verso Nord. Nell'avampor- to, la corrente interessa soltanto la parte più prossima alla diga foranea (per un'estensione media pari a circa 180 m), influenzata dall'estensione della sezione tra l'opera foranea del Porto Turistico e il tratto terminale meridionale dell'opera foranea. Procedendo verso Nord, la corrente esce dall'avampor- to sia attraverso l'imboccatura realizzata in corrispondenza dell'opera foranea, sia attraverso il varco tra la testata del Molo Nord e la diga foranea.

In termini di variazioni del livello medio del mare, gli stati di mare provenienti dal settore di traversia principale tendono ad indurre un sovrizzo inferiore rispetto alle onde che provengono dal settore di traversia secondario a causa dell'ostacolo rappresentato dal Molo Nord.

4.1.2 Configurazione A2

In configurazione A2, le correnti indotte dagli stati di mare provenienti dal settore di traversia principale non differiscono significativamente da quanto osservato per la configurazione A1. Ovviamente, la corrente proveniente da Nord non ha la possibilità di interessare l'avamposto a causa della chiusura del varco e, conseguentemente, tende ad aggirare la diga foranea. Tuttavia, l'area di avamposto continua ad essere interessata da una corrente che proviene esclusivamente dal canale tra l'opera foranea del Porto Turistico e il tratto terminale meridionale dell'opera foranea e che viene drenata dall'imboccatura realizzata in corrispondenza dell'opera foranea.

Nel considerare gli eventi provenienti dal settore di traversia secondario, non si osservano significative differenze qualitative, a meno dell'intensità della corrente proveniente da Sud che interessa l'avamposto e che mostra velocità più elevate.

Anche per la configurazione A2, così come osservato per la configurazione A1, in termini di variazioni del livello medio del mare, gli stati di mare provenienti dal settore di traversia principale tendono ad indurre un sovrizzo inferiore rispetto agli stati di mare provenienti dal settore di traversia secondario.

Le Figure 4-1 e 4-2 mostrano, a titolo di esempio, l'effetto delle opere di progetto sulla parziale disconnessione idraulica del sistema di correnti.

4.2 Analisi comparativa

Le simulazioni relative alla circolazione costiera sono finalizzate alla valutazione della potenziale influenza della configurazione delle opere sul deflusso fluviale.

La Tabella 4-5 riporta i valori del livello del mare valutati puntualmente (η_p) in corrispondenza della sezione terminale del fiume. Si ricorda che i livelli contengono anche la componente meteorologica a grande scala desunta dall'analisi della serie mareografica acquisita ad Ortona. L'ispezione della tabella permette di apprezzare che la chiusura del varco induce una lieve diminuzione dei livelli quando si considerano gli stati di mare che provengono dal settore di traversia principale. Al contrario, si osserva un lieve aumento dei livelli quando si considerano gli stati di mare che provengono dal settore di traversia secondario. Le variazioni massima raggiungono un valore pari a circa 3 cm per i tempi di ritorno più elevati (50 e 100 anni).

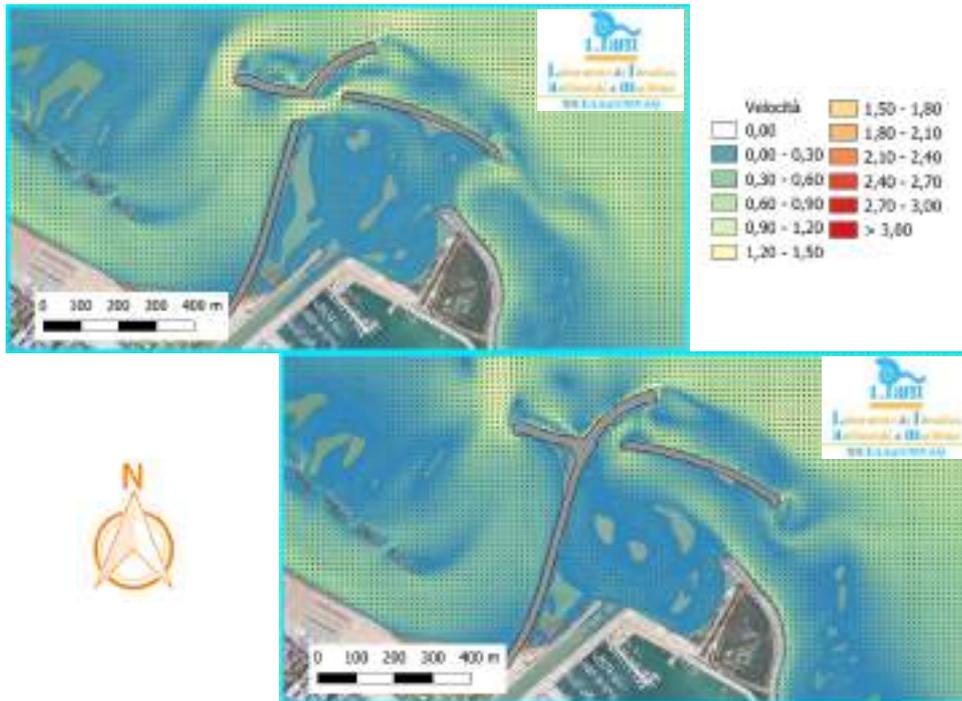


Figura 4-1: Circolazione Costiera. Confronto tra i risultati ottenuti per la configurazione A1 (in alto) e per la configurazione A2 (in basso) per lo scenario M010.1 (evento con tempo di ritorno pari a 10 anni proveniente dal settore di traversia principale).

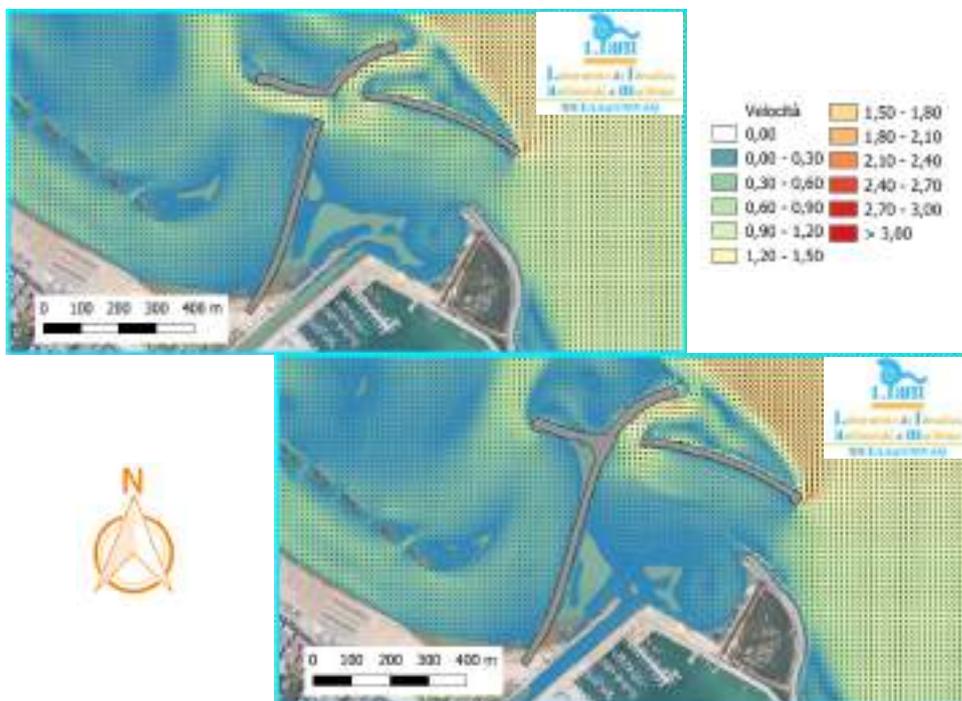


Figura 4-2: Circolazione Costiera. Confronto tra i risultati ottenuti per la configurazione A1 (in alto) e per la configurazione A2 (in basso) per lo scenario M010.2 (evento con tempo di ritorno pari a 10 anni proveniente dal settore di traversia secondario).

SIGLA	Settore di provenienza	Tempo di ritorno (anni)	η_p (m lmm)		$\Delta\eta_p$ (m)
			A1	A2	
M002.1	Principale	2	0.837	0.817	-0.020
M002.2	Secondario	2	0.860	0.869	+0.009
M010.1	Principale	10	1.043	1.025	-0.018
M010.2	Secondario	10	1.099	1.124	+0.025
M050.1	Principale	50	1.276	1.251	-0.025
M050.2	Secondario	50	1.383	1.412	+0.029
M100.1	Principale	100	1.349	1.320	-0.029
M100.2	Secondario	100	1.523	1.554	+0.031

Tabella 4-5: Circolazione costiera. Valori del livello del mare valutato puntualmente in corrispondenza della sezione terminale del fiume (η_p).

5 Osservazioni Conclusive

L'obiettivo dello studio descritto in questo documento è di valutare l'influenza della configurazione delle opere. A tal fine è stata analizzata nel dettaglio l'influenza della chiusura del varco presente tra la testata del Molo Nord e la diga foranea.

I risultati dello studio possono essere sintetizzati come segue.

- La chiusura del varco ha un'influenza marginale sulle caratteristiche dell'idrodinamica nell'avamposto.
- Gli stati di mare provenienti dal settore di traversia principale tendono ad indurre un sovrizzo inferiore rispetto alle onde che provengono dal settore di traversia secondario, sia per entrambe le configurazioni investigate.
- La chiusura del varco induce una lieve diminuzione dei livelli in corrispondenza della sezione terminale del fiume quando si considerano gli stati di mare che provengono dal settore di traversia principale; tale diminuzione è compresa tra 2 cm (per un tempo di ritorno pari a 2 anni) e circa 3 cm (per un tempo di ritorno pari a 100 anni).
- La chiusura del varco induce un lieve aumento dei livelli in corrispondenza della sezione terminale del fiume quando si considerano gli stati di mare che provengono dal settore di traversia secondario; tale incremento è compreso tra 1 cm (per un tempo di ritorno pari a 2 anni) e circa 3 cm (per un tempo di ritorno pari a 100 anni).

6 Bibliografia

- ARAP. *Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica della Deviazione del Porto Canale di Pescara. Studio Meteomarino. 2017.*
- ARTA Abruzzo. *Rapporto tecnico sulla piena del fiume Pescara verificatasi dall'1 al 6 dicembre 2013 – Osservazioni preliminari. Rev. 2 del 26 febbraio 2014. 2014.*
- Autorità dei bacini di rilievo regionale abruzzesi ed interregionali del fiume Sangro e Genio Civile di Pescara, *Attività di approfondimento tecnico svolta nell'ambito delle verifiche di sicurezza idraulica nel tratto terminale del fiume Pescara* (12 maggio 2015 prot. RA/125629 e 03 luglio 2015 prot. RA/177196). **2015.**
- Beretta, R., Ravazzani, G., Maiorano, C., e Mancini, M. *Simulating the influence of buildings on flood inundation in urban areas. Geosciences, 8(2), 77. 2018.*
- Beta Studio s.r.l. *Redazione del Piano Stralcio Difesa Alluvioni (PSDA)- Studio idrologico per la valutazione delle piene, Regione Abruzzo. 2008.*
- Beta Studio s.r.l. *Approfondimenti e implementazioni degli studi idraulici e di morfodinamica fluviale e costiera a corredo del P.R.P. di Pescara. 2016.*
- Beta Studio s.r.l. *Intervento di riduzione del rischio idraulico nel Bacino Idrografico del Fiume Aterno – Pescara. Opere di laminazione delle piene del fiume Pescara. 2016.*
- Commissario liquidatore dell'Autorità dei bacini di rilievo regionale abruzzesi ed interregionale del fiume Sangro. *Attività di approfondimento tecnico svolta nell'ambito delle verifiche di sicurezza idraulica nel tratto terminale del fiume Pescara. 2015.*
- DHI S.r.l. *Verifica di compatibilità idraulica della proposta di PRP della città di Pescara, 2015*
- The SWaN Team. *SWaN scientific and technical documentation. 2019.*

- Vetsch D., Siviglia A., Caponi F., Ehrbar D., Gerke E., Kammerer S., Koch A., Peter S., Vanzo D., Vonwiller L., Facchini M., Gerber M., Volz C., Farshi D., Mueller R., Rousselot P., Veprek R., Faeh R. *System Manuals of BASEMENT, Version 2.8*. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich. **2018**.
- XBeach Team. *XBeach Documentation. Release XBeach v1.23.5527 XBeachX FINAL*. **2018**.



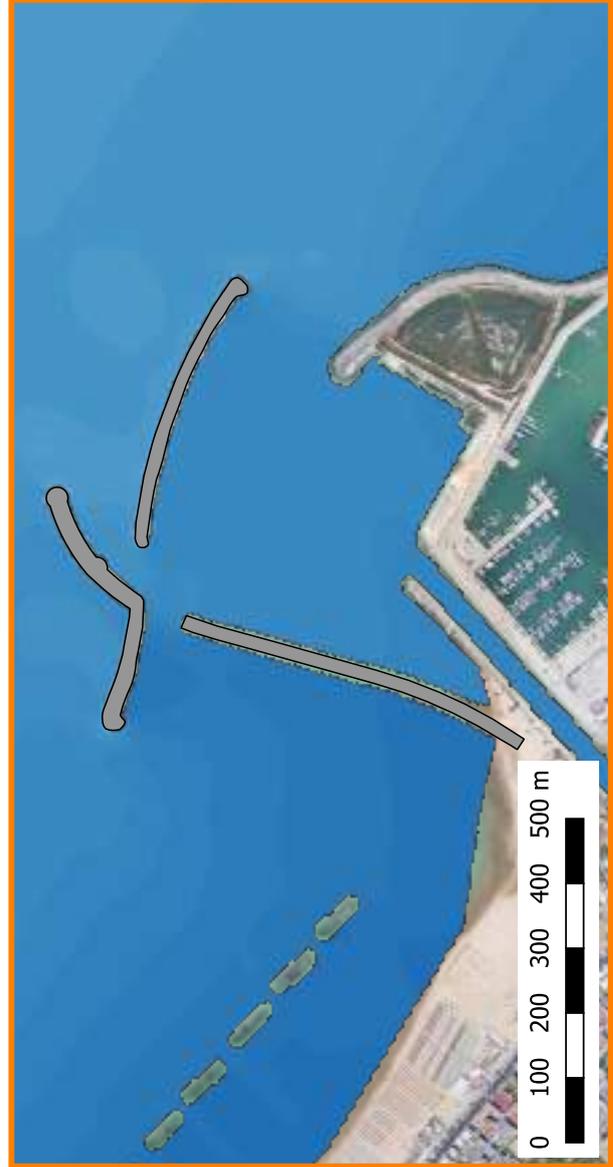
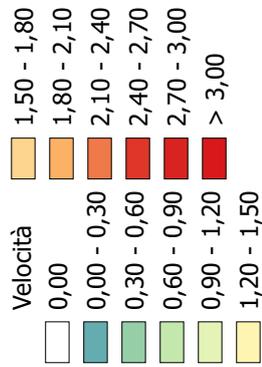
A Risultati Numerici: dettagli grafici

A.1 Circolazione costiera

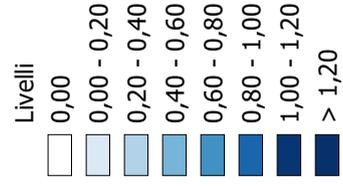


SIMULAZIONE A1
 Circolazione costiera
 M002-1 (Maestrale)

Velocità (m/s)



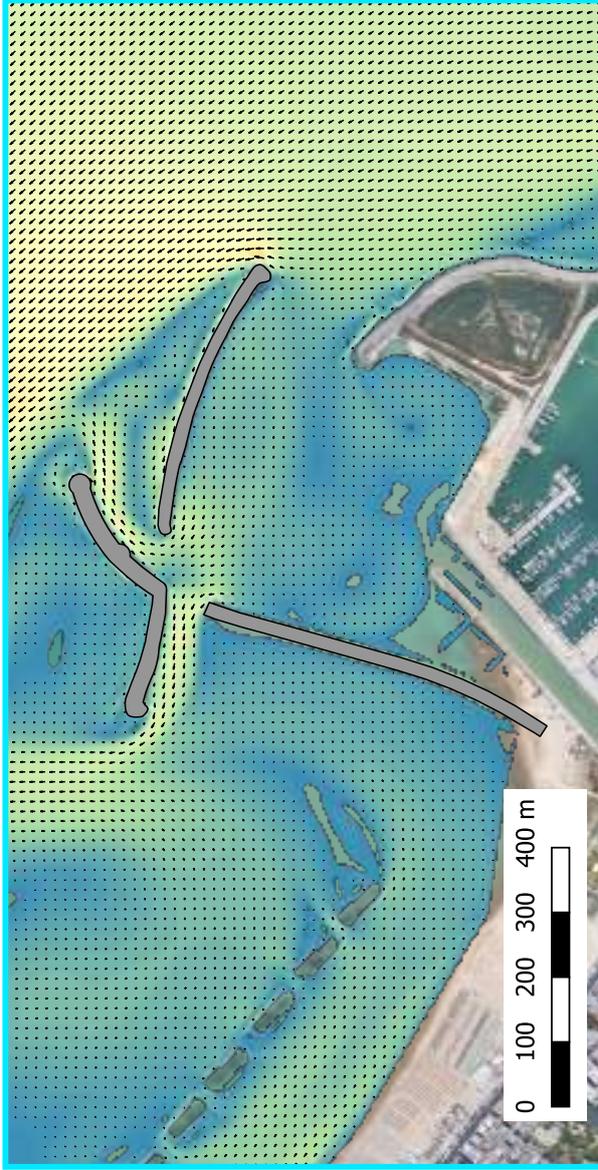
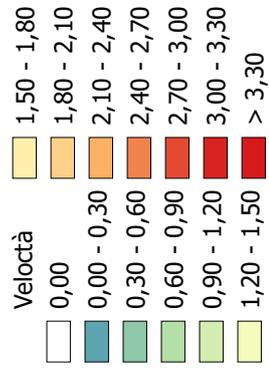
Livelli (m Imm)



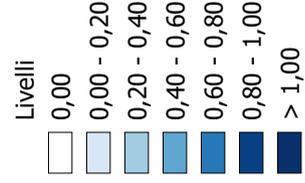
A.1

SIMULAZIONE A1
 Circolazione costiera
 M002-2 (Levante)

Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)

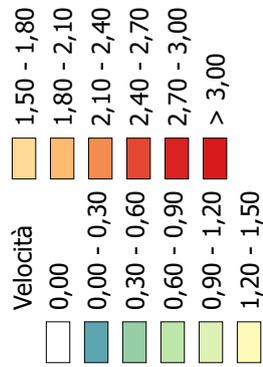


A.1

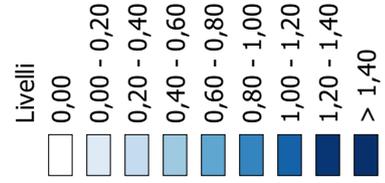


SIMULAZIONE A1
Circolazione costiera
M010-1 (Maestrale)

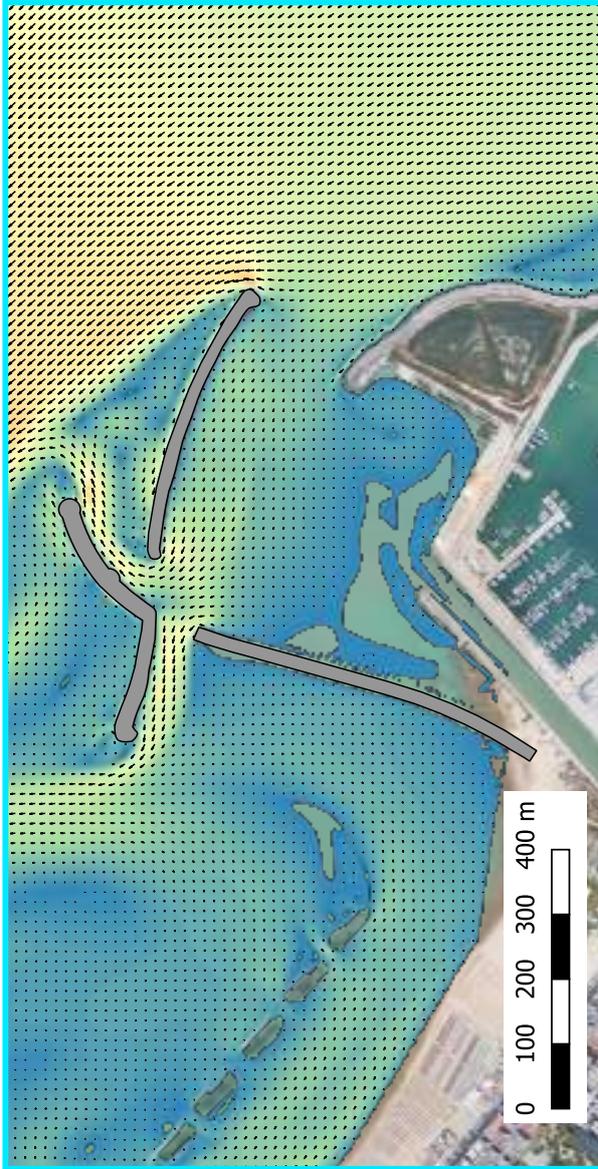
Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)

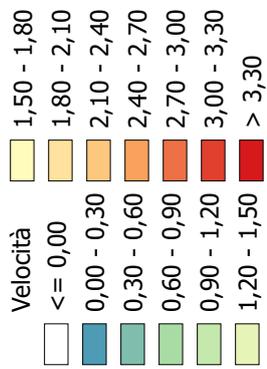


A.1

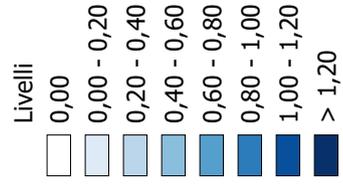


SIMULAZIONE A1
Circolazione costiera
M010-2 (Levante)

Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)

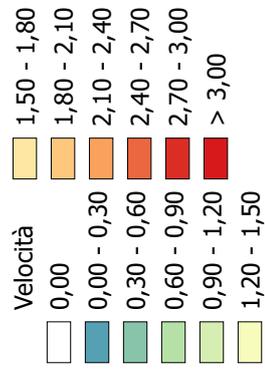


A.1

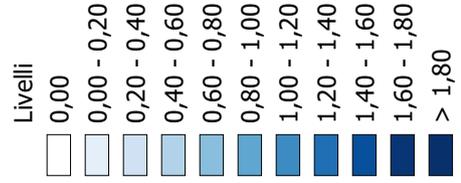


SIMULAZIONE A1
Circolazione costiera
M050-1 (Maestrale)

Velocità (m/s)

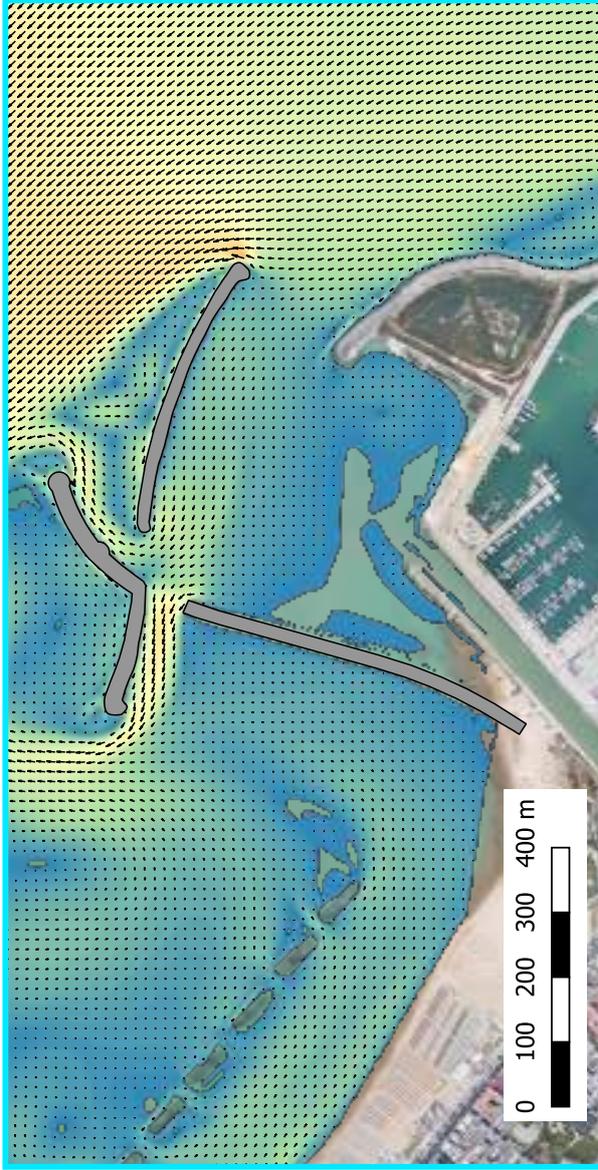


Livelli (m Imm)

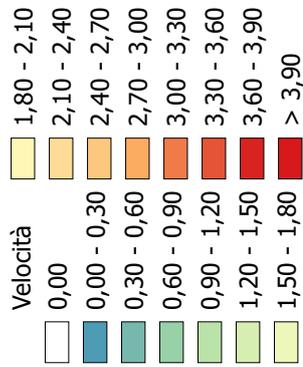


A.1

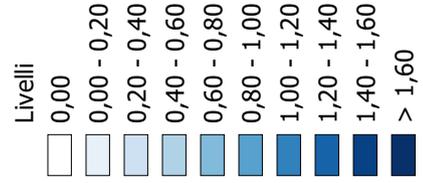
SIMULAZIONE A1
Circolazione costiera
M050-2 (Levante)



Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)

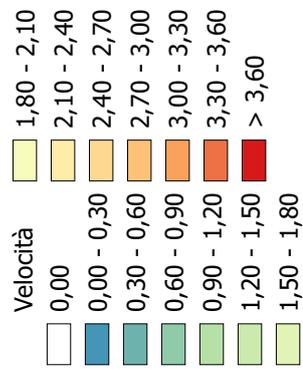


A.1

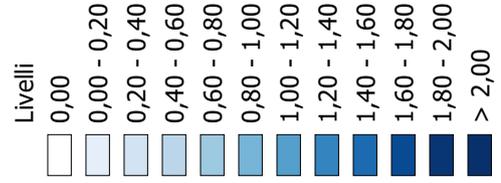


SIMULAZIONE A1
Circolazione costiera
M100-1 (Maestrale)

Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)

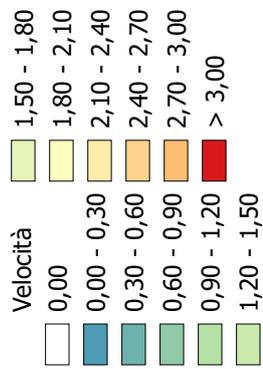


A.1

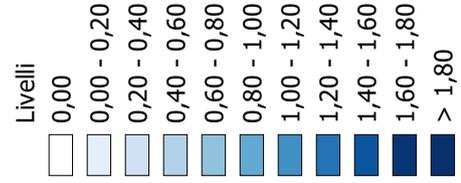


SIMULAZIONE A1
Circolazione costiera
M100-2 (Levante)

Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)

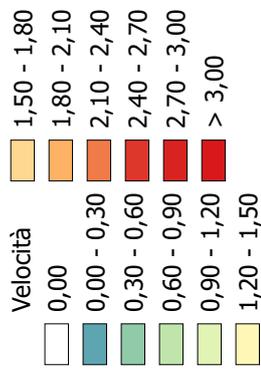


A.1

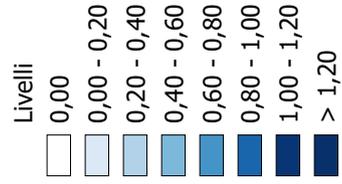


SIMULAZIONE A2
Circolazione costiera
M002-1 (Maestrale)

Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)

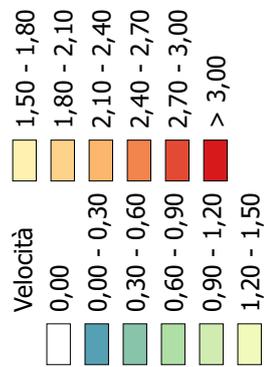


A.1

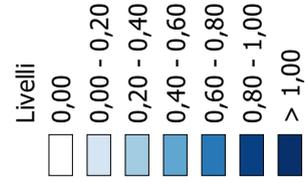


SIMULAZIONE A2
Circolazione costiera
M002-2 (Levante)

Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)

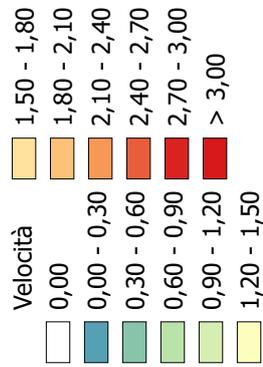


A.1

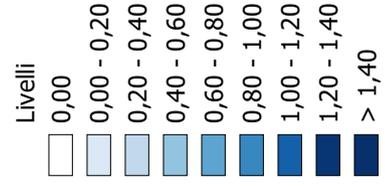


SIMULAZIONE A2
 Circolazione costiera
 M010-1 (Maestrale)

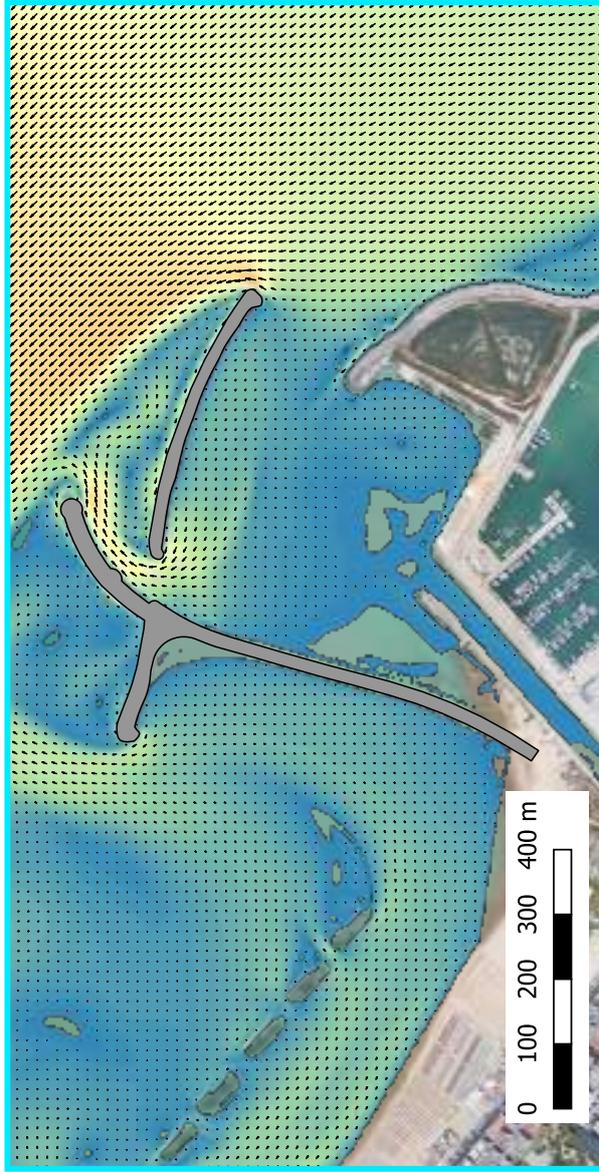
Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)

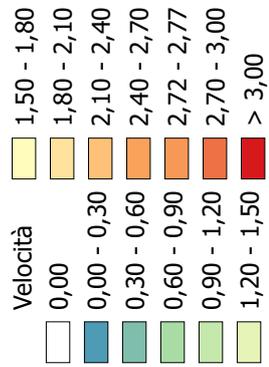


A.1

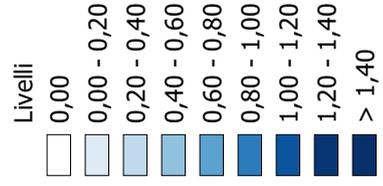


SIMULAZIONE A2
Circolazione costiera
M010-2 (Levante)

Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)

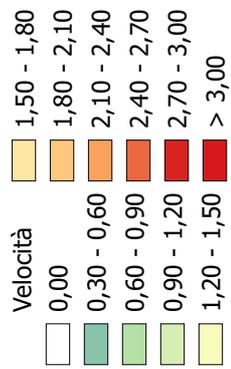


A.1

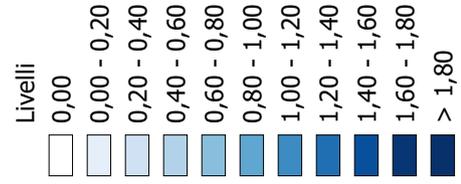


SIMULAZIONE A2
Circolazione costiera
M050-1 (Maestrale)

Velocità (m/s)



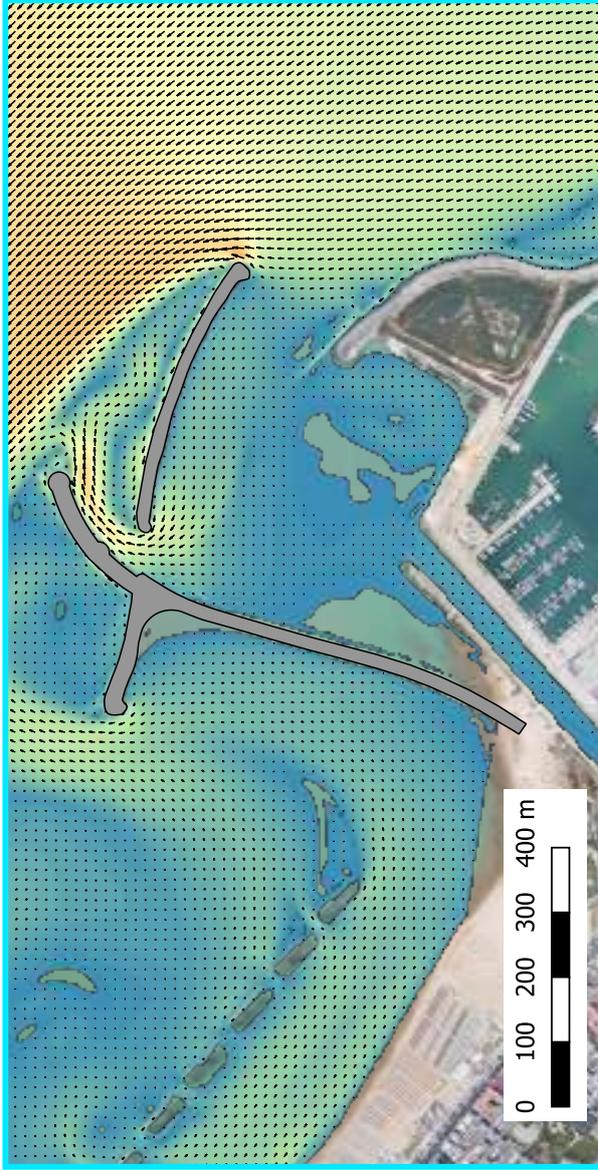
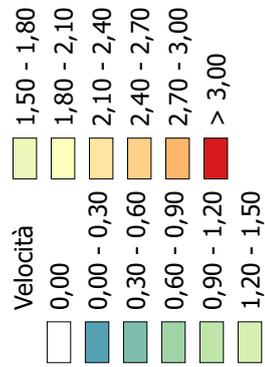
Livelli (m lmm)



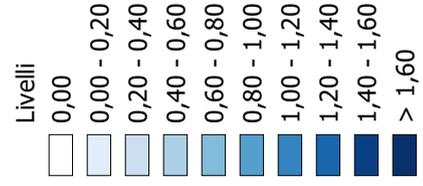
A.1

SIMULAZIONE A2
Circolazione costiera
M050-2 (Levante)

Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)

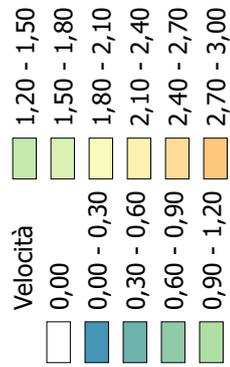


A.1

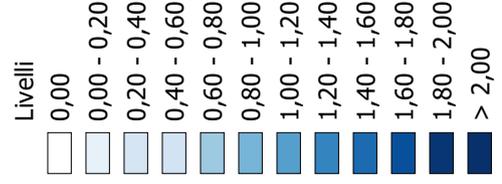


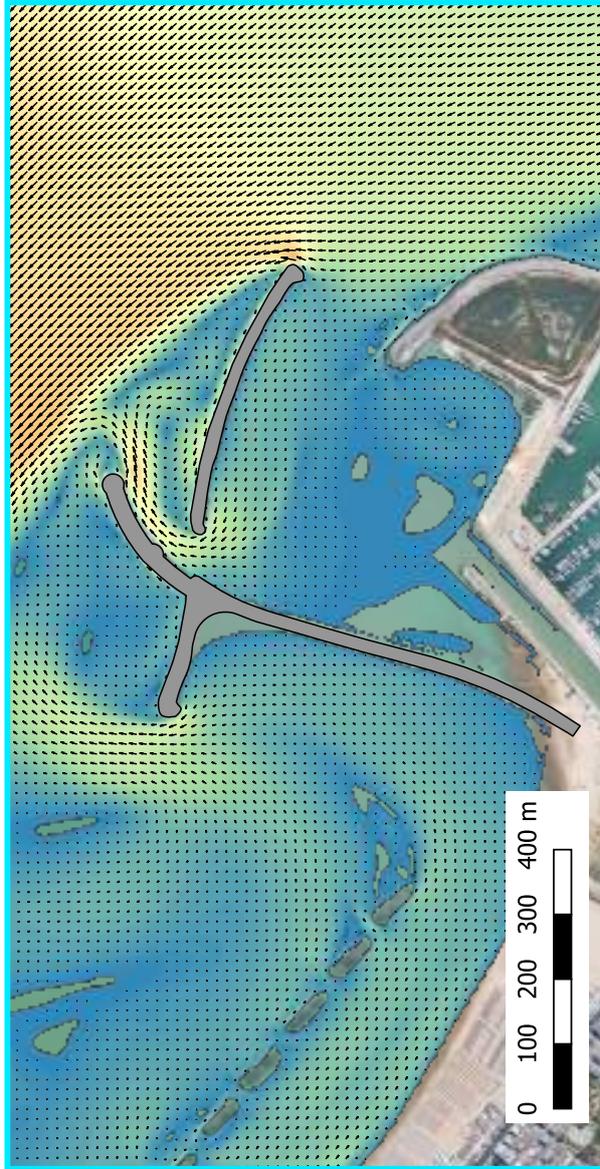
SIMULAZIONE A2
Circolazione costiera
M100-1 (Maestrale)

Velocità (m/s)



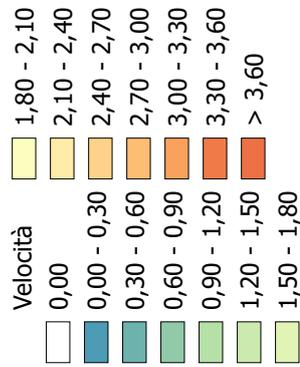
Livelli (m Imm)



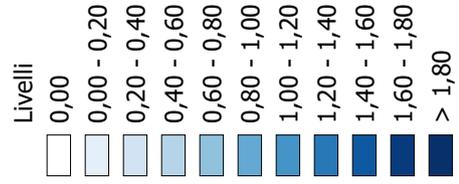


SIMULAZIONE A2
Circolazione costiera
M100-2 (Levante)

Velocità (m/s)



Livelli (m Imm)



A.1