



AUTORITA' DI SISTEMA PORTUALE DEL MAR TIRRENO SETTENTRIONALE

Uffici di LIVORNO

PROGETTO PRELIMINARE

LAVORI DI ATTUAZIONE DELLE PREVISIONI DI ACQUATICITA' DELLA
TORRE DEL MARZOCCO

**Studio su modello numerico dell'idrodinamica dello specchio
acqueo in progetto attorno alla Torre del Marzocco del Porto di
Livorno- GENNAIO 2016**

ALLEGATO 12

Il progettista:

Direzione Tecnica -Area progettazione-
Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale

Ing. Ilária Lotti

Coordinatore della sicurezza in fase di progettazione:

Direzione Tecnica -Area progettazione-
Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale

Arch. Raoul Raffalli

Il Responsabile Unico del Procedimento

Direzione Tecnica
Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale

Ing. Enrico Pribaz- Dirigente F.F.

AM3 SPIN-OFF

ADVANCED MODELS AND METHODS
IN MARITIME ENGINEERING



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

SPIN-OFF PARTECIPATO



STUDIO SU MODELLO NUMERICO DELLA IDRODINAMICA DELLO SPECCHIO ACQUEO IN PROGETTO ATTORNO ALLA TORRE DEL MARZOCCO DEL PORTO DI LIVORNO

Firenze, 22 Gennaio 2016

AM3 Spin-off s.r.l.

Advanced Models and Methods in Maritime Engineering

Via Madonna del Piano, 6

50019 Sesto Fiorentino (FI)

P.IVA 06375900484 REA FI 623251

AM3 SPIN-OFF s.r.l.

SPIN-OFF PARTECIPATO

DALL'UNIVERSITÀ

DEGLI STUDI DI FIRENZE

am3.unifi.spinoff@gmail.com

Via Madonna del Piano, 6

50019 Sesto Fiorentino (FI)

P. IVA / C.F. 06375900484

| CONSULENTI | VERSIONI | CONSEGNA |
|--|-------------------------------------|----------|
| Ing. L. Cappiotti, PhD Prof. Ing. P.L. Aminti Ing. A. Esposito | 21-07-15: Bozza 30-09-15: Finale | 22-01-16 |

INDICE

| | |
|---|----|
| Indice | 1 |
| Indice delle figure | 2 |
| Premessa | 5 |
| 1. Obiettivi dello studio | 5 |
| 2. Metodologia | 6 |
| 2.1. Il modello numerico utilizzato | 6 |
| 2.2. Dati utilizzati | 7 |
| 2.3. Implementazione del modello | 11 |
| 2.4. Scenari simulati | 18 |
| 3. Analisi dei risultati | 22 |
| 4. Conclusioni | 25 |
| 5. Allegato | 27 |

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|--|----|
| Figura 1- Dati batimetrici forniti dal Committente di tutta l'area del porto di Livorno e dei fondali limitrofi | 8 |
| Figura 2- Configurazione dello specchio acqueo, in progetto attorno alla torre del Marzocco, nella fase transitoria. | 8 |
| Figura 3- Configurazione dello specchio acqueo, in progetto attorno alla torre del Marzocco, nella fase definitiva..... | 9 |
| Figura 4- Dati di marea misurati dal mareografo di Livorno dal Dicembre 2013 al Dicembre 2014. | 10 |
| Figura 5 – Costruzione del modello tridimensionale del porto di Livorno. A sinistra i dati forniti dal Committente immessi nel sistema di georeferenziazione e interpolazione su maglie regolari; A destra il modello tridimensionale ricostruito con maglia regolare pari a 15mx15m da utilizzare per le simulazioni numeriche. | 13 |
| Figura 6 – Costruzione del modello tridimensionale del progetto di costruzione dello specchio acqueo intorno alla torre del Marzocco nella fase transitoria . A sinistra i dati forniti dal Committente immessi nel sistema di georeferenziazione e interpolazione su magli regolari; A destra il modello tridimensionale ricostruito con maglia regolare pari a 0.5mx0.5m da utilizzare per le simulazioni numeriche. .. | 14 |
| Figura 7 – Costruzione del modello tridimensionale del progetto di costruzione dello specchio acqueo intorno alla torre del Marzocco nella fase definitiva . A sinistra i dati forniti dal Committente immessi nel sistema di georeferenziazione e interpolazione su magli regolari; A destra il modello tridimensionale ricostruito con maglia regolare pari a 0.5mx0.5m da utilizzare per le simulazioni numeriche. .. | 15 |
| Figura 8 – Confronto tra i valori misurati dal mareografo (e utilizzati come condizione al contorno ai due ingressi del porto di Livorno) e quelli simulati davanti all'apertura dello specchio acqueo in progetto. | 16 |
| Figura 9 – Campo di correnti indotte in un determinato istante del mese di Dicembre 2013 dalla marea astronomica e meteorologica su tutto lo specchio acqueo del porto di Livorno. Questo risultato viene riportato solo a titolo di esempio, non essendo un obiettivo del presente studio, al fine di illustrare al Committente le potenzialità del modello sviluppato per eventuali ulteriori interessi tecnici da affrontare con la modellistica numerica. | 17 |
| Figura 10 – Grafico di Hjulstrom rappresentante le condizioni di trasporto, erosione e sedimentazione in funzione della velocità della corrente e del diametro dei sedimenti di fondo (in presenza di una miscela granulometricamente assortita, il come diametro rappresentativo deve essere considerato il d_{50}). | 20 |

Figura 11- Immagine qualitativa della con indicazione dei punti di pompaggio forzato A, B e C, e dei punti di monitoraggio numerico delle velocità 1, 2, 3, 4 e 5. L'indicazione della posizione delle pompe e dei punti di monitoraggio è analoga sia per la configurazione transitoria qui riportata che per la configurazione definitiva.23

Figura 12- Immagine qualitativa della configurazione transitoria con indicazione dei punti di pompaggio forzato A, B e C, e dei punti di misura delle velocità 1, 2, 3, 4 e 5.27

Figura 13- Immagine qualitativa della configurazione definitiva con indicazione dei punti di pompaggio forzato A, B e C, e dei punti di misura delle velocità 1, 2, 3, 4 e 5.28

Figura 14- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio assente, parte tombata con diametro 1.5m.29

Figura 15- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.30

Figura 16- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A e B pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.31

Figura 17- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A, B e C pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.32

Figura 18- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio assente, parte tombata con diametro 2.5m.33

Figura 19- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.34

Figura 20- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A e B pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.35

Figura 21- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A, B e C pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.36

Figura 22- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio assente, parte tombata con diametro 1.5m. .37

Figura 23- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.38

Figura 24- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A e B pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.39

Figura 25- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A, B e C pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.40

Figura 26- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio assente, parte tombata con diametro 2.5m. .41

Figura 27- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.42

Figura 28- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A e B 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.43

Figura 29- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A, B e C 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.44

PREMESSA

Con lettera di incarico del 22 Gennaio 2015 l’Autorità Portuale di Livorno (nel seguito detta Committente) ha incaricato la società AM3 Spin-off S.r.l. (nel seguito detta AM3) della realizzazione di uno studio su modello numerico della idrodinamica dello specchio acqueo in progetto attorno alla torre del Marzocco del porto di Livorno.

Durante la conduzione dello studio sono state svolte due riunioni tecniche, presso la sede del Committente, aventi come oggetto la discussione dei risultati preliminari, la finalizzazione dei dettagli inerenti alle configurazioni da analizzare e le condizioni di prova, poi trasmesse dal Committente in versione CAD con email del 31-03-15 e del 10-06-15. AM3 ha inviato la bozza della relazione conclusiva dello studio il 21 Luglio 2015.

La presente relazione consegnata in data 22 Gennaio 2016 costituisce la versione finale dello studio condotto.

1. OBIETTIVI DELLO STUDIO

L’obiettivo generale del presente studio è simulare numericamente la costruzione dello specchio acqueo in progetto attorno alla torre del Marzocco e studiare la circolazione idraulica al suo interno al fine di garantire un idoneo ricambio idrico naturale o forzato. In particolare, sono stati approfonditi i seguenti aspetti:

- 1) verifica della configurazione risultante a seguito della conclusione di una prima fase dei lavori, detta configurazione transitoria e verifica della configurazione a fine lavori detta configurazione finale;
- 2) verifica di proposte volte al miglioramento della configurazione finale;
- 3) verifica dell’efficacia di un sistema di pompaggio forzato finalizzato al ricambio idrico dello specchio acqueo.

2. METODOLOGIA

Lo studio è stato condotto mediante simulazione numerica. Sono stati ricostruiti i modelli tridimensionali delle opere in progetto, sia nella fase transitoria che nella fase definitiva e successivamente è stata simulata l'idrodinamica indotta dalla propagazione dell'onda di marea.

2.1. IL MODELLO NUMERICO UTILIZZATO

Il modello numerico utilizzato risolve le equazioni cardinali della meccanica dei fluidi (derivanti dalle equazioni di Navier-Stokes) nella approssimazione di moti non stratificati di acque basse marcatamente bidimensionali, per i quali sia quindi valida l'approssimazione idrostatica della pressione. Queste equazioni sono dette *Shallow Water Equations* (SWE) e sono riportate in eq. (1) dove:

- u: è la velocità in direzione x
- v: è la velocità in direzione y
- h: è la quota della superficie libera rispetto al livello medio mare
- H: è la profondità relativa al livello medio mare
- g: è l'accelerazione di gravità
- f: è il coefficiente di Coriolis, associato alla forza di Coriolis (che dipende a sua volta dalla rotazione angolare della terra e dalla latitudine)
- b: è il coefficiente di drag viscoso

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v &= -g \frac{\partial h}{\partial x} - b u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u &= -g \frac{\partial h}{\partial y} - b v, \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(u (H + h) \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(v (H + h) \right),\end{aligned}\quad \text{Eq. (1)}$$

A queste equazioni si uniscono le condizioni al contorno come, nel caso oggetto di questo studio, la variazione del livello, h, dovuta all'onda di marea nel punto di collegamento dello specchio acqueo in progetto con i canali portuali.

Il sistema di equazioni composto dalle SWE e dalle condizioni al contorno (es. onda di marea, pompe, ecc.) viene risolto all'interno del modello tridimensionale

ricostruito per la zona in progetto e la soluzione fornisce i valori di velocità e livelli in tutto lo specchio acqueo e al variare del tempo.

Una volta che il modello numerico è stato sviluppato e per tutte le ipotesi progettuali è stato costruito il relativo modello tridimensionale, si dispone di un potente strumento per simulare numericamente il moto delle acque e quindi prevedere cosa accadrebbe se l'intervento fosse realizzato. Per esempio, è possibile simulare sia la fase transitoria e finale di un intervento che l'effetto di pompaggio forzato, come di interesse per il caso in esame.

2.2. DATI UTILIZZATI

Come descritto nel paragrafo 2.1, per la costruzione del modello numerico alla base del presente studio sono necessari i seguenti dati:

- 1) dati batimetrici e geometrici del progetto da simulare;
- 2) dati di marea da utilizzare come condizioni al contorno;
- 3) ipotesi di portate inerenti alle pompe da simulare.

Tutti i dati batimetrici e geometrici sono stati forniti dal Committente. I dati batimetrici forniti di tutta l'area portuale del porto di Livorno e dei fondali antistanti sono evidenziati in Figura 1, mentre la configurazione geometrica dell'intervento nella fase transitoria e definitiva sono riportate in Figura 2 e in Figura 3.

L'intervento insiste su un'area intorno alla torre del Marzocco di dimensioni rappresentative pari a circa 140mx85m. Lo specchio acqueo in progetto è collegato al canale industriale tramite un'unica apertura di ampiezza pari a circa 8m.

L'intervento di realizzazione dello specchio acqueo è previsto in due fasi. Al termine della prima fase sarà realizzato un piccolo canale intorno alla torre del Marzocco avente profondità di 2.5m raccordato con un argine verticale dal lato esterno, con pendenza 1:2 nella parte interna e sezione bagnata larga circa 6m in superficie. Nella seconda fase sarà scavata anche la parte interna dell'area perimetrata nella prima fase per realizzare uno specchio acqueo tutto a profondità pari a 2.5m.



Figura 1- Dati batimetrici forniti dal Committente di tutta l'area del porto di Livorno e dei fondali limitrofi



Figura 2- Configurazione dello specchio acque, in progetto attorno alla torre del Marzocco, nella fase transitoria.

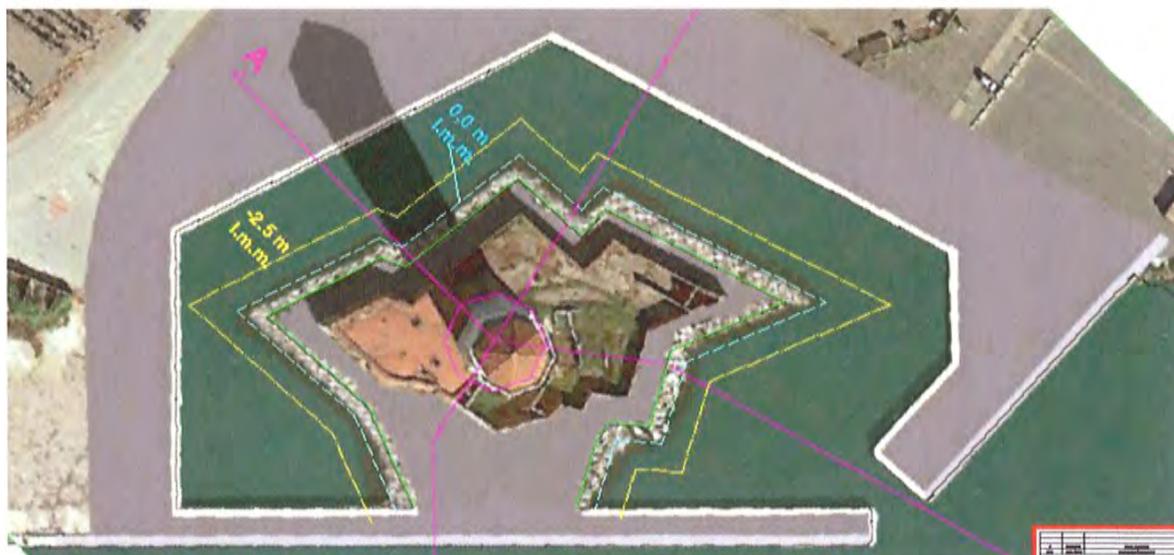


Figura 3- Configurazione dello specchio acqueo, in progetto attorno alla torre del Marzocco, nella fase definitiva.

Come dati di marea sono stati utilizzati quelli misurati dal mareografo interno al porto di Livorno e forniti dal servizio mareografico nazionale (www.mareografico.it).

Al fine della definizione delle condizioni di marea mediamente rappresentative per l'intervento in esame, sono stati utilizzati i dati dal Dicembre 2013 al Dicembre 2014 riportati in Figura 4. È evidente che, come atteso, in sovrapposizione all'onda di marea astronomica ci sono anche evidenti picchi positivi e negativi da collegarsi a fenomeni differenti e non deterministici quali principalmente basse e alte pressioni e/o *storm surge* da vento.

È opportuno sottolineare che l'obiettivo di questo studio su modello numerico è valutare comparativamente differenti soluzioni progettuali. In altre parole, non si punta alla conoscenza dell'idrodinamica indotta da un particolare evento meteo marino e per questo le condizioni di marea utilizzate per le simulazioni sono rappresentative solo di condizioni medie frequentemente presenti nel sito in esame. A questo fine è stato ritenuto sufficiente analizzare un anno di registrazione per definire la tipologia di onda di marea da utilizzare come condizione al contorno per le simulazioni numeriche.

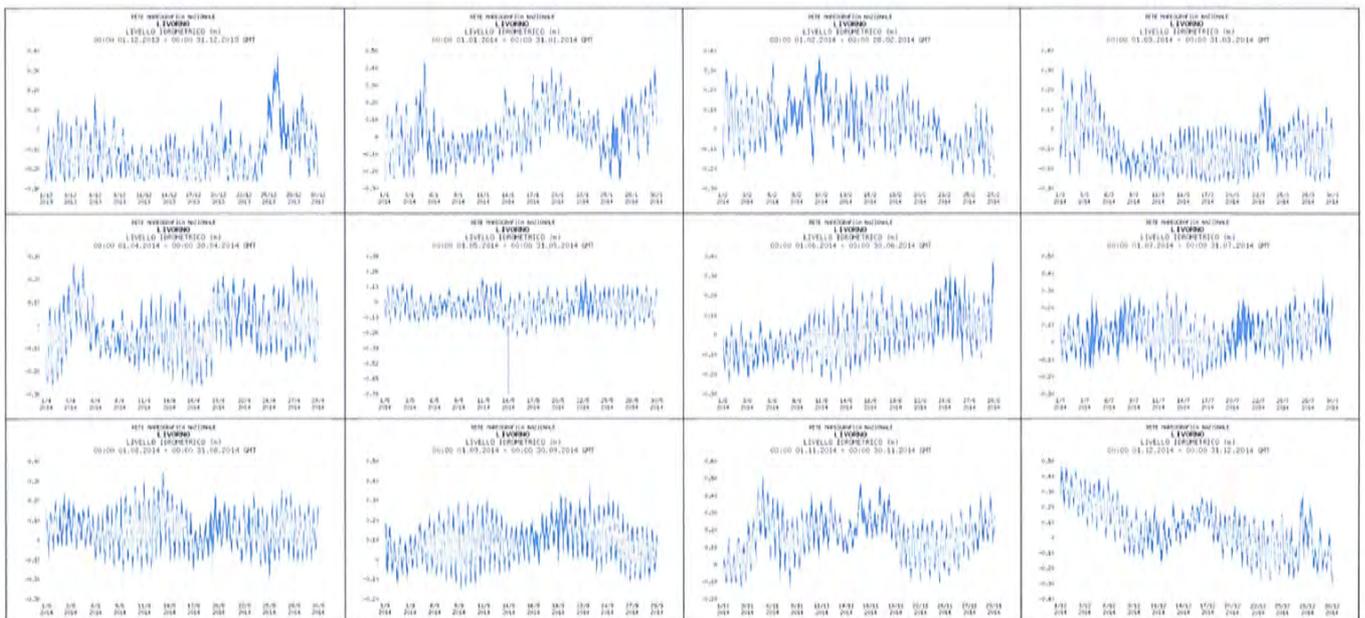


Figura 4- Dati di marea misurati dal maregrafo di Livorno dal Dicembre 2013 al Dicembre 2014.

2.3. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO

I dati batimetrici e geometrici del progetto, forniti dal Committente, sono stati utilizzati come input per il software di georeferenziazione, finalizzato all'interpolazione e creazione dei modelli tridimensionali su maglia regolare. I modelli ricostruiti per tutta l'area portuale nell'intorno della torre del Marzocco, sia per la configurazione transitoria che definitiva dell'intervento, sono riportati in Figura 5, Figura 6 e Figura 7.

Il modello dell'intera area portuale è servito per propagare l'onda di marea all'interno di tutto il porto e quindi per verificare se i valori di intensità e fase davanti all'apertura dello specchio acqueo in progetto fossero sensibilmente differenti da quelli registrati al mareografo. Sono state propagate tutte le serie di marea registrate nel periodo Dicembre 2013 – Dicembre 2014 e, come atteso, i valori di marea davanti all'ingresso dello specchio acqueo in progetto sono risultati solo leggermente differenti a quelli misurati dal mareografo. A titolo esemplificativo si riporta in Figura 8 il confronto tra i valori misurati dal mareografo (e utilizzati come condizione al contorno ai due ingressi del porto di Livorno) e quelli simulati davanti all'apertura dello specchio acqueo in progetto.

L'ispezione di tutti i valori di marea propagati nel punto davanti alla zona di interesse è servita per definire un'onda di marea rappresentativa di condizioni frequenti da utilizzare per le simulazioni numeriche inerenti allo specchio acqueo della torre del Marzocco. L'onda di marea utilizzata rappresenta la componente principale di una marea reale avente periodicità 12.40re e escursione totale pari a 30cm.

Pur non rientrando negli obiettivi del presente studio, il modello numerico dell'intera area portuale è stato sviluppato in modo adeguato alla simulazione di tutte le dinamiche marine di interesse quali per esempio: i) la propagazione di moto ondoso e dei vari modi di risonanza in tutti i punti del bacino e lungo le linee d'ormeggio, ii) la ricostruzione delle correnti indotte da marea, vento ecc. ecc. iii) i flussi di sedimenti all'interno dell'area portuale, iv) la diffusione e dispersione di inquinanti, v) la verifica di ipotesi progettuali e la relativa ottimizzazione prima della loro realizzazione. Questa applicazione viene qui commentata solo a titolo di esempio, non essendo un obiettivo del presente studio, al fine di illustrare al Committente le potenzialità del modello sviluppato per eventuali ulteriori interessi tecnici da affrontare con la modellistica numerica.

A titolo esemplificativo si riporta in Figura 9 il campo di correnti indotte dall'onda di marea astronomica e meteorologica su tutta l'area portuale durante un determinato istante del mese di Dicembre 2013. È interessante osservare, tra

l'altro, i valori di correnti nel punto di minima larghezza del canale industriale che possono raggiungere velocità pari anche a qualche decina di cm/s.

Nelle prove preliminari finalizzate all'implementazione del modello numerico sono state condotte analisi di sensitività dei risultati al variare dei seguenti parametri:

- 1) dimensione della griglia di calcolo;
- 2) valore della scabrezza al fondo;
- 3) valore del coefficiente di viscosità turbolenta;
- 4) durata del transitorio numerico oltre il quale il moto indotto dall'onda di marea si ripete ciclicamente.

A conclusione delle prove preliminari sono stati assunti i seguenti parametri:

- 1) risoluzione spaziale 0.5m x 0.5m;
- 2) scabrezza la fondo secondo Manning = $32\text{m}^{1/3}/\text{s}$;
- 3) coefficiente di viscosità turbolenta $1.0\text{m}^2/\text{s}$;
- 4) durata totale delle simulazioni pari a 4 periodi di marea (pari a 48 ore) per avere gli ultimi due periodi di moto mareale completamente sviluppato all'interno della vasca.

Una sintesi descrittiva delle caratteristiche di tutte le simulazioni condotte è riportato in Tabella 1.

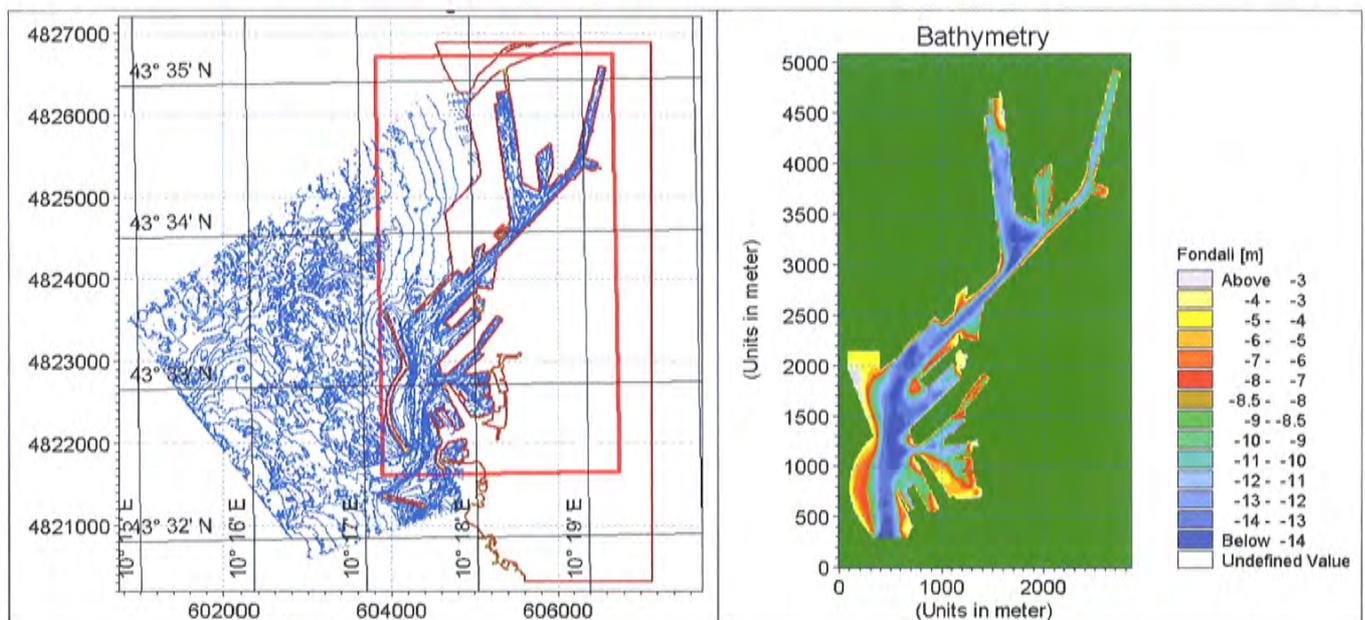


Figura 5 – Costruzione del modello tridimensionale del porto di Livorno. A sinistra i dati forniti dal Committente immessi nel sistema di georeferenziazione e interpolazione su maglie regolari; A destra il modello tridimensionale ricostruito con maglia regolare pari a 15mx15m da utilizzare per le simulazioni numeriche.

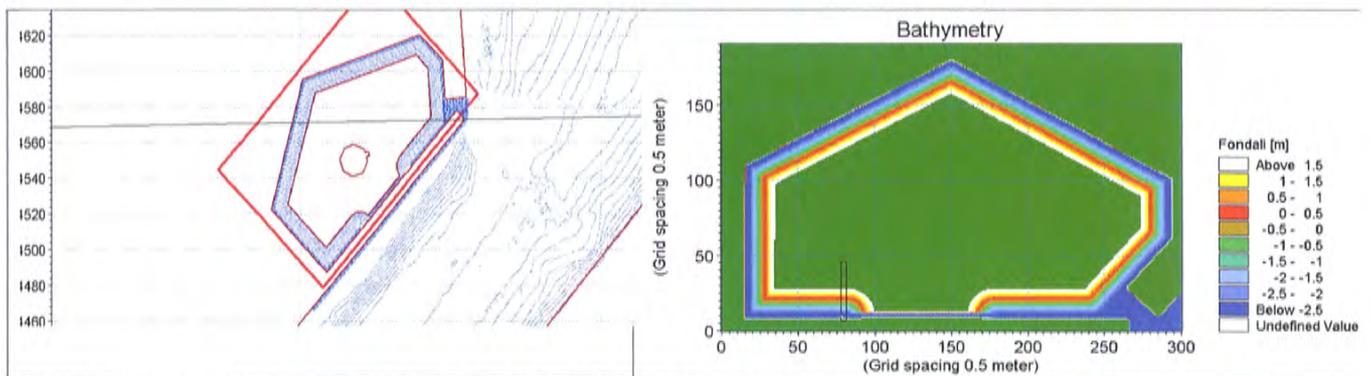


Figura 6 – Costruzione del modello tridimensionale del progetto di costruzione dello specchio acqueo intorno alla torre del Marzocco nella **fase transitoria**. A sinistra i dati forniti dal Committente immessi nel sistema di georeferenziazione e interpolazione su magli regolari; A destra il modello tridimensionale ricostruito con maglia regolare pari a 0.5mx0.5m da utilizzare per le simulazioni numeriche.

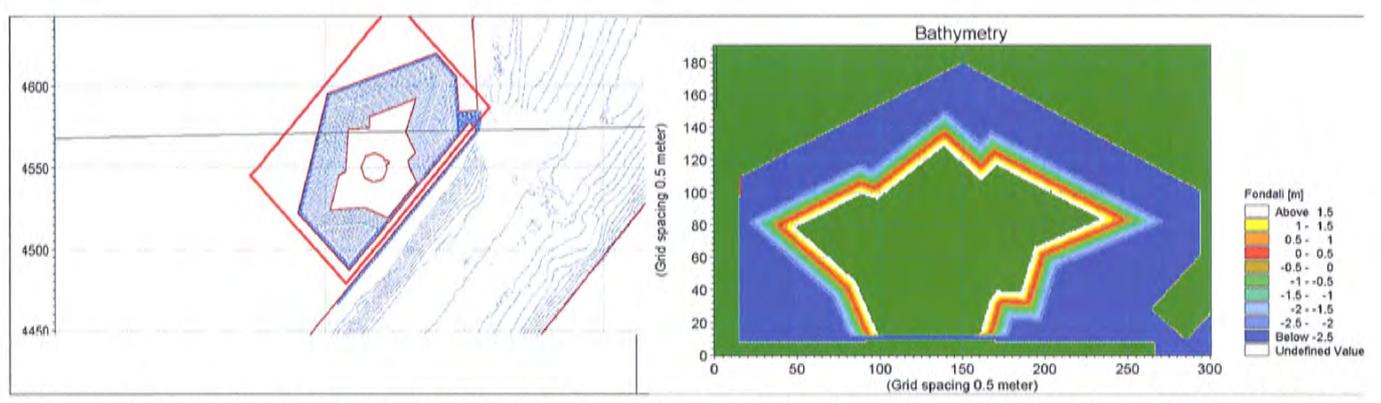


Figura 7 – Costruzione del modello tridimensionale del progetto di costruzione dello specchio acqueo intorno alla torre del Marzocco nella **fase definitiva**. A sinistra i dati forniti dal Committente immessi nel sistema di georeferenziazione e interpolazione su magli regolari; A destra il modello tridimensionale ricostruito con maglia regolare pari a 0.5mx0.5m da utilizzare per le simulazioni numeriche.

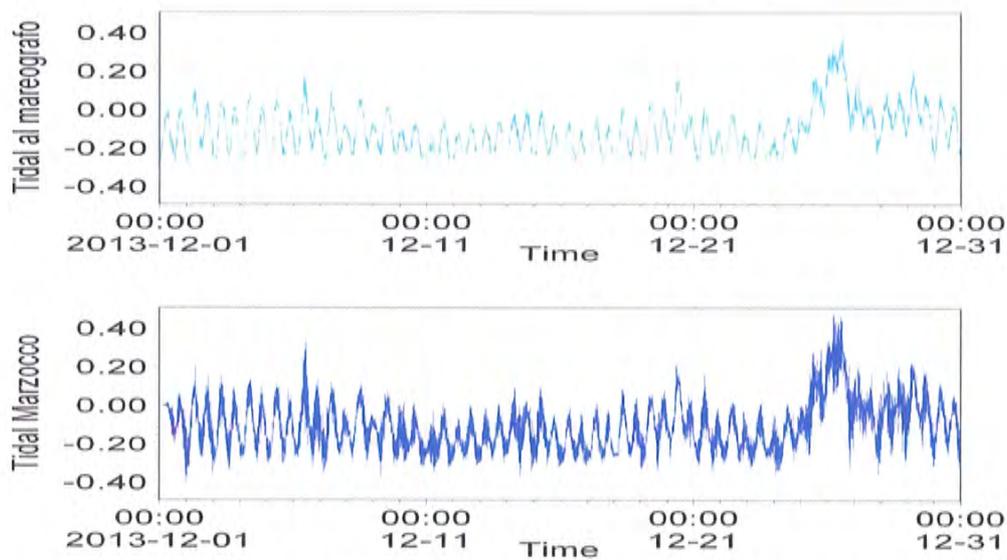


Figura 8 - Confronto tra i valori misurati dal mareografo (e utilizzati come condizione al contorno ai due ingressi del porto di Livorno) e quelli simulati davanti all'apertura dello specchio acqueo in progetto.

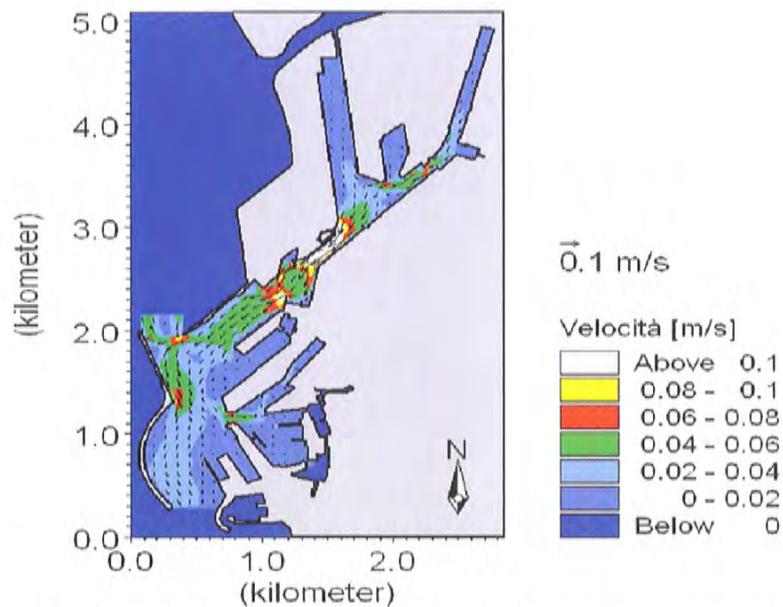


Figura 9 – Campo di correnti indotte in un determinato istante del mese di Dicembre 2013 dalla marea astronomica e meteorologica su tutto lo specchio acqueo del porto di Livorno. Questo risultato viene riportato solo a titolo di esempio, non essendo un obiettivo del presente studio, al fine di illustrare al Committente le potenzialità del modello sviluppato per eventuali ulteriori interessi tecnici da affrontare con la modellistica numerica.

2.4. SCENARI SIMULATI

Come convenuto con il Committente nella riunione di coordinamento tenutasi il 10-06-15 a Livorno durante la fase di implementazione della modellistica numerica, l'analisi dei risultati è stata finalizzata a sviluppare la migliore alternativa progettuale apportando varianti a quella fornita di base.

Per le verifiche necessarie agli obiettivi del presente studio, sono state quindi condotte numerose simulazioni inerenti sia alla configurazione transitoria sia alla configurazione definitiva.

In totale sono state studiate 16 differenti ipotesi progettuali per analizzare:

- 1) la circolazione naturale indotta dalla **sola onda di marea** che si propaga attraverso l'apertura che comunica con il canale industriale;
- 2) la circolazione forzata da **una sola pompa** con portata 400 l/s;
- 3) la circolazione forzata da **due pompe** aventi ciascuna una portata di 400l/s;
- 4) la circolazione forzata da **tre pompe** aventi ciascuna una portata da 400l/s;
- 5) l'effetto sulla circolazione sia naturale che forzata apportato **dall'allargamento della sezione tombata** da 1.5m a 2.5m di diametro.

La scelta della portata garantita da una pompa, pari a 400 l/s, è stata ipotizzata al fine di poter garantire all'occorrenza un completo ricambio idrico, nella configurazione definitiva, entro poche ore. A titolo di esempio si cita il Master Plan della Rete dei Porti Toscani - Allegato A - Elaborato 5 dove si indica come riferimento per il completo ricambio delle acque un tempo di 12-48 ore (Capo III Standard Ambientali, Art.14 - Ricambio ed ossigenazione delle acque marine). Nel caso in esame, nell'ipotesi di costruzione di un impianto di ricambio idrico forzato avente 1, 2 o 3 pompe da 400l/s, i tempi massimi necessari al ricambio idrico sarebbero pari a circa 7ore, 14ore e 21ore.

Questa capacità di ricambio delle acque fornisce al committente lo strumento operativo certamente sufficiente a garantire che all'interno dello specchio acqueo si possa contrastare all'occorrenza qualsiasi problematica derivante da eventuale decadimento della concentrazione di ossigeno e aumento di nutrienti con la conseguenza dell'esasperazione dei cicli biologici dei microorganismi algali. In particolare questa problematica è legata all'estate, caratterizzata non di rado da lunghi periodi con temperature medie elevate e alte pressioni che riducono l'idrodinamica naturale.

L'impianto così realizzato sarà certamente in grado di poter assicurare uno stato trofico "buono" come definito, per esempio, dalla recente Direttiva 2008/56/CE

(marine strategy) e la successiva legge di recepimento italiana D.Lgs. 190/2010. Ovviamente l'opera di presa dell'impianto di pompaggio dovrà essere localizzata nei punti e alle profondità opportune tali da garantire una buona qualità chimico-fisica-biologica delle acque immesse nello specchio di mare in esame.

La valutazione oggettiva dei risultati ottenuti dalle simulazioni è stata condotta intendendo come "migliore alternativa" quella che garantisce che le velocità più basse nei vari punti dello specchio acqueo siano comunque abbastanza elevate così da assicurare un effettivo ricambio in tutte le zone e allo stesso tempo nei punti di maggior velocità queste non siano troppo intense per non danneggiare il fondo vasca e gli elementi accessori.

Nel campo tecnico ingegneristico esistono numerose metodologie e formulazioni empirico-teoriche che permettono di calcolare la dimensione dei sedimenti costituenti un fondale che rimangono stabili sotto l'effetto di una corrente di acqua che scorre sopra di essi. Ai fini del presente lavoro è conveniente citare per esempio quelle formulazioni empiriche che sono espresse in funzione della velocità media della corrente, essendo questo il parametro simulato dal modello numerico. Tra tutti gli approcci presenti in letteratura qui si citano i seguenti:

- 1) Grafico di Hjulstrom (1955);
- 2) Formula di Jarocki (1963);
- 3) Formula di Neill (1967).

Hjulstrom (1955) riassume i risultati delle sue sperimentazioni nel grafico in Figura 10. Jarocki (1963) e Neill (1967) forniscono rispettivamente le equazioni empiriche Eq.2 e Eq.3.

È stato quindi definito il range di velocità compreso tra 5mm/s e 50mm/s. Con questa scelta si assicura l'assenza di zone stagnanti e la stabilità di materiale al fondo se avente densità di massa di circa 2600 kg/m³ e dimensioni dell'ordine di 1-10 mm. Ovviamente la bocca di emissione delle portate pompate nello specchio acqueo deve essere opportunamente progettata prevedendo idonea diffusione e riduzione delle velocità concentrate e/o stabilizzazione locale del fondale e delle sponde limitrofe.

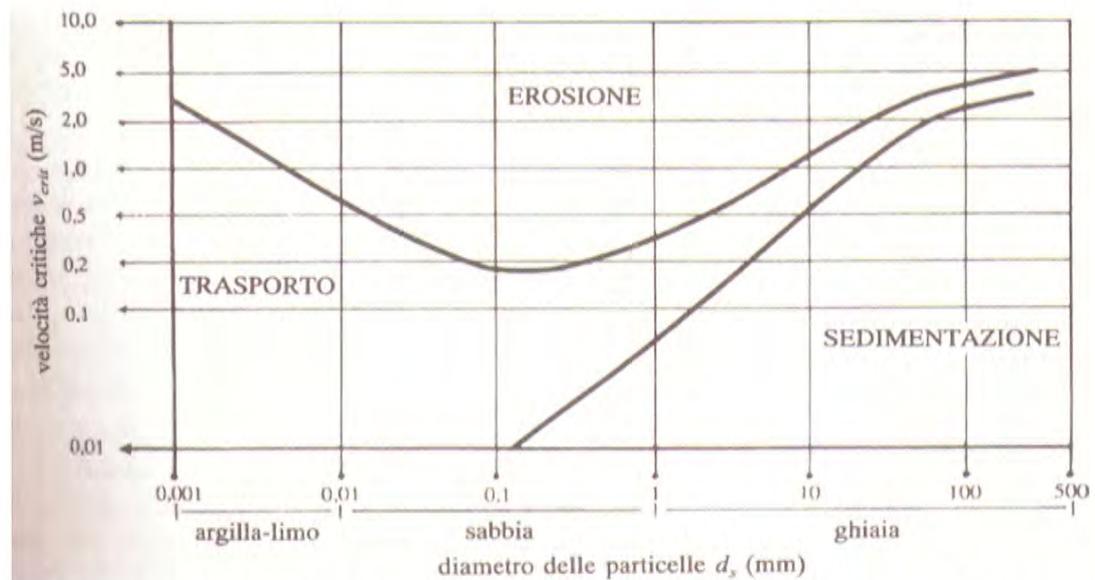


Figura 10 – Grafico di Hjulstrom rappresentante le condizioni di trasporto, erosione e sedimentazione in funzione della velocità della corrente e del diametro dei sedimenti di fondo (in presenza di una miscela granulometricamente assortita, il come diametro rappresentativo deve essere considerato il d_{50}).

$$\bar{v}_{critica} = 1.4 \cdot \sqrt{g \cdot d} \cdot \ln\left(\frac{h_{media}}{7 \cdot d}\right) \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\bar{v}_{critica} = \sqrt{2.50 \cdot \left(\frac{d}{h_{media}}\right)^{-0.20} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \cdot g \cdot d} \quad \text{Eq. (3)}$$

dove:

- d è la dimensione caratteristica delle particelle che costituiscono il letto del corso d'acqua, [m];
- h_{media} è la profondità media della corrente data dal rapporto tra l'area della sezione liquida e la larghezza della sezione liquida in sommità, [m];
- ρ_s è la densità delle particelle presenti al fondo del corso d'acqua, [Kg/m³];
- ρ_w è la densità dell'acqua, [Kg/m³];
- g è l'accelerazione di gravità, $g = 9.807 \text{ m/s}^2$;

Tabella 1: descrizione dell'impostazione di tutte le simulazioni condotte

| Configurazione simulata | Sigla Modello | Breve Descrizione |
|--|----------------------|--|
| CONFIGURAZIONE TRANSITORIA (cfr Figura 2) | Modello 1 | Circolazione indotta dalla sola onda di marea che si propaga attraverso l'unica apertura. Parte tombata con diametro pari a 1.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 2 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da una pompa con portata pari a 400 l/s in ingresso posta nel punto A. Parte tombata con diametro pari a 1.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 3 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da due pompe con portata ciascuna pari a 400 l/s in ingresso e poste nei punto A e B. Parte tombata con diametro pari a 1.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 4 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da tre pompe con portata ciascuna pari a 400 l/s in ingresso e poste nei punto A, B e C. Parte tombata con diametro pari a 1.5m Vedi Figura 11 |
| | Modello 5 | Circolazione indotta dalla sola onda di marea che si propaga attraverso l'unica apertura. Parte tombata con diametro pari a 2.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 6 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da una pompa con portata pari a 400 l/s in ingresso e posta nel punto A. Parte tombata con diametro pari a 2.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 7 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da due pompe con portata ciascuna pari a 400 l/s in ingresso e poste nei punto A e B. Parte tombata con diametro pari a 2.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 8 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da tre pompe con portata ciascuna pari a 400 l/s in ingresso e poste nei punto A, B e C. Parte tombata con diametro pari a 2.5m. Vedi Figura 11 |
| CONFIGURAZIONE DEFINITIVA (cfr Figura 3) | Modello 9 | Circolazione indotta dalla sola onda di marea che si propaga attraverso l'unica apertura. Parte tombata con diametro pari a 1.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 10 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da una pompa con portata pari a 400 l/s in ingresso posta nel punto A. Parte tombata con diametro pari a 1.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 11 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da due pompe con portata ciascuna pari a 400 l/s in |

| | | |
|--|------------|--|
| | | ingresso e poste nei punto A e B. Parte tombata con diametro pari a 1.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 12 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da tre pompe con portata ciascuna pari a 400 l/s in ingresso e poste nei punto A, B e C. Parte tombata con diametro pari a 1.5m Vedi Figura 11 |
| | Modello 13 | Circolazione indotta dalla sola onda di marea che si propaga attraverso l'unica apertura. Parte tombata con diametro pari a 2.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 14 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da una pompa con portata pari a 400 l/s in ingresso e posta nel punto A. Parte tombata con diametro pari a 2.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 15 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da due pompe con portata ciascuna pari a 400 l/s in ingresso e poste nei punto A e B. Parte tombata con diametro pari a 2.5m. Vedi Figura 11 |
| | Modello 16 | Circolazione indotta dalla onda di marea e da tre pompe con portata ciascuna pari a 400 l/s in ingresso e poste nei punto A, B e C. Parte tombata con diametro pari a 2.5m. Vedi Figura 11 |

3. ANALISI DEI RISULTATI

Ciascuna delle simulazioni condotte inerenti ai 16 casi riassunti in tabella 1 fornisce ogni secondo e mezzo, per tutte le 48 ore simulate, i valori di velocità su tutti i punti interni alla vasca equispaziati di 0.5m.

Al fine di sintetizzare nel modo più chiaro possibile i risultati di tutte le simulazioni è stato deciso di produrre le seguenti analisi grafiche:

- 1) mappe di velocità inerenti alla fase mareale in cui le velocità sono massime;
- 2) serie temporale delle velocità estratte nei 5 punti mostrati in Figura 11.

Tutte le immagini inerenti a queste analisi dei dati sono riportate nell'allegato a questa relazione.

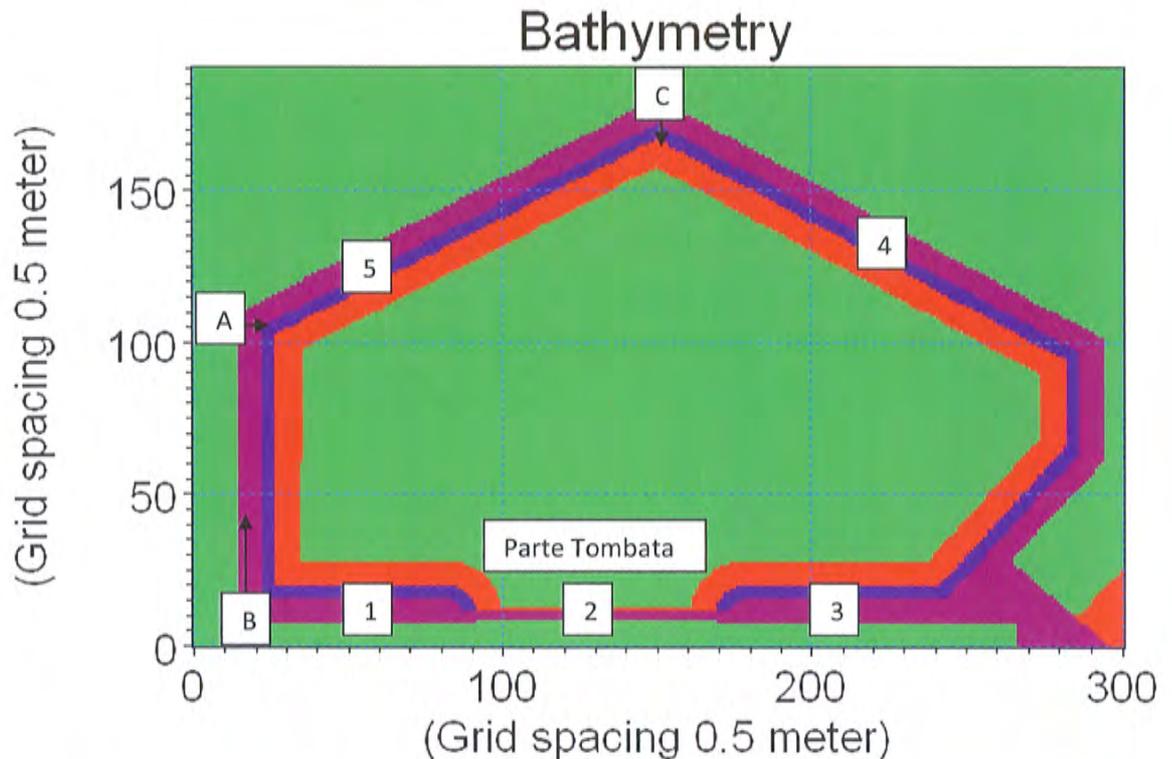


Figura 11- Immagine qualitativa della con indicazione dei punti di pompaggio forzato A, B e C, e dei punti di monitoraggio numerico delle velocità 1, 2, 3, 4 e 5. L'indicazione della posizione delle pompe e dei punti di monitoraggio è analoga sia per la configurazione transitoria qui riportata che per la configurazione definitiva.

I risultati inerenti alla circolazione naturale indotta dalla sola onda di marea nel caso della configurazione transitoria e della configurazione definitiva (Figura 14, Figura 18, Figura 22 e Figura 26) mostrano chiaramente una insufficiente circolazione.

Anche nel caso della configurazione transitoria, caratterizzata da un piccolo canale dove si attendono velocità maggiori, si evidenziano chiaramente zone della vasca sostanzialmente stagnanti dove le velocità sono addirittura minori di 0.5mm/s (Figura 14).

Le zone stagnanti aumentano notevolmente nel caso delle configurazione definitiva, perché la portata che entra dall'unica apertura dello specchio acqueo si diffonde su un volume maggiore determinando quindi minori velocità (Figura 22).

Le simulazioni con le quali si è testato l'effetto di un ingrandimento della sezione tombata, passando da un diametro rappresentativo di 1.5m ad uno pari a 2.5

(Figura 18 e Figura 26), hanno dimostrato un certo beneficio nel promuovere maggiori velocità nelle zone più stagnanti non raggiungendo tuttavia risultati sufficienti agli obiettivi prefissati. Queste simulazioni hanno quindi dimostrato l'assoluta insufficienza della circolazione naturale a garantire le velocità obiettivo dentro lo specchio acqueo in progetto. È dunque necessario provvedere al dimensionamento di un impianto di ricircolo forzato.

Sono stati quindi simulati tre differenti ipotesi di pompaggio forzato caratterizzati dal posizionamento delle bocche dell'impianto (vedi Figura 11):

- 1) nel solo punto A;
- 2) nel punto A e B;
- 3) nel punto A, B e C.

Ciascuna bocca di impianto garantisce una portata di 400 l/s e al fine di favorire la fuoriuscita dalla vasca di eventuali sostanze o oggetti indesiderati dentro lo specchio acqueo, le portate di ciascuna bocca di impianto sono in ingresso alla vasca.

I risultati inerenti alla predisposizione di una sola bocca di impianto da 400 l/s sul punto A (Figura 11) riportati in Figura 15, Figura 19, Figura 23 e Figura 27 mostrano chiaramente l'insufficienza di questa ipotesi di impianto. Le velocità su un ramo della vasca, prima stagnante, aumentano e raggiungono valori compresi tra 10 mm/s e 50 mm/s ma permane una zona di ristagno in prossimità del punto B (vedi Figura 11) dove le velocità sono inferiori a 5 mm/s. Anche la predisposizione della zona tombata con un diametro pari a 2.5m, pur contribuendo a ridurre l'area stagnante non risulta determinante per il raggiungimento degli obiettivi prefissati (Figura 19 e Figura 27).

Per favorire la circolazione nell'introno del punto B (vedi Figura 11) è stata simulata la presenza di una seconda bocca di impianto in tale punto che immette una portata di 400 l/s. L'analisi dei risultati, riassunti in Figura 16, Figura 20, Figura 24 e Figura 28 mostrano velocità quasi ovunque comprese tra 10mm/s e 50 mm/s. Permangono due aree (di colore verde in Figura 11) dove le velocità sono inferiori a 5 mm/s. Da notare che per la configurazione transitoria (Figura 16 e Figura 20), le velocità dentro la parte tombata e nelle zone della vasca adiacenti al canale industriale raggiungono valori di 20 cm/s. Tuttavia una volta realizzata la configurazione definitiva queste velocità scendono ai valori obiettivo pari a circa 5 cm/s (Figura 24 e Figura 28).

Infine è stato simulato il caso di predisposizione di tre bocche nei punti A, B e C ciascuna in grado di immettere 400 l/s dentro la vasca (Figura 17, Figura 21,

Figura 25 e Figura 29). I risultati non mostrano un significativo miglioramento della situazione interna alla vasca. Le velocità aumentano solo dove i valori garantiti dalla predisposizione di due sole bocche di impianto erano già soddisfacenti.

4. CONCLUSIONI

Con il lavoro descritto nella presente relazione tecnica riassuntiva è stata studiata, tramite simulazione numerica, la circolazione idrodinamica interna allo specchio acqueo in progetto attorno alla Torre del Marzocco.

È stata analizzata per prima la configurazione transitoria, come prevista dal progetto a seguito della conclusione di un primo stralcio dei lavori e successivamente la configurazione definitiva. Lo studio dimostra che la marea non è in grado di attivare una circolazione sufficiente a garantire il ricambio dell'acqua.

Sono state studiate alcune alternative al progetto fornito dal committente (es. aumento del diametro della sezione tombata da 1.5m a 2.5m) ma anche in questo caso le forzanti naturali non sono in grado di attivare un'ideale circolazione e lo specchio acqueo risulta sostanzialmente stagnante.

In sintesi, la circolazione naturale indotta dall'onda di marea non è da sola sufficiente a garantire una circolazione idrica che raggiunga gli obiettivi prefissati per il progetto e cioè: i) ricambio idrico in poche ore; ii) velocità comprese nell'intervallo tra 5mm/s e 50 mm/s. È necessario predisporre un adeguato impianto di ricircolo forzato.

Sono state simulate tre ipotesi di impianto di pompaggio caratterizzate rispettivamente dall'impiego di 1, 2 e 3 pompe eventi ognuna una portata di 400l/s.

La predisposizione di una sola pompa per l'impianto di ricircolo posizionata nel punto A (vedi Figura 11) non raggiunge gli obiettivi prefissati come sopra riportati.

Risultati soddisfacenti si raggiungono predisponendo due pompe con bocche di immissione nel punto A e una nel punto B. La predisposizione di una terza pompa con bocca di immissione nel punto C (Figura 11) non apporta significativi vantaggi se non ridurre il tempo di ricambio idrico dell'intero specchio acqueo dalle circa 21ore (nel caso di due bocche) a circa 14ore.

In conclusione, si ritiene che gli obiettivi prefissati in merito ai tempi di ricambio e alle velocità minime e massime possano essere raggiunti mediante la predisposizione di un impianto di ricircolo forzato composto da almeno due pompe con portata 400 l/s disposte nel punto A e una nel punto B di Figura 11 e la realizzazione delle parte tombata avente dimensione pari ad almeno 2.5m. Si noti

che in merito alla parte tombata sarebbe preferibile l'impiego di una sezione rettangolare al posto di quella circolare prevista dal progetto fornito.

L'opera di presa dell'impianto di pompaggio è consigliabile che sia localizzata nei punti e alle profondità opportune tali da garantire una buona qualità chimico-fisica-biologica delle acque immesse nello specchio di mare in esame. Ciascuna bocca di emissione delle portate pompate nello specchio acqueo deve essere opportunamente progettata prevedendo idonea diffusione e riduzione delle velocità concentrate e/o stabilizzazione locale del fondale e delle sponde limitrofe.

5. ALLEGATO

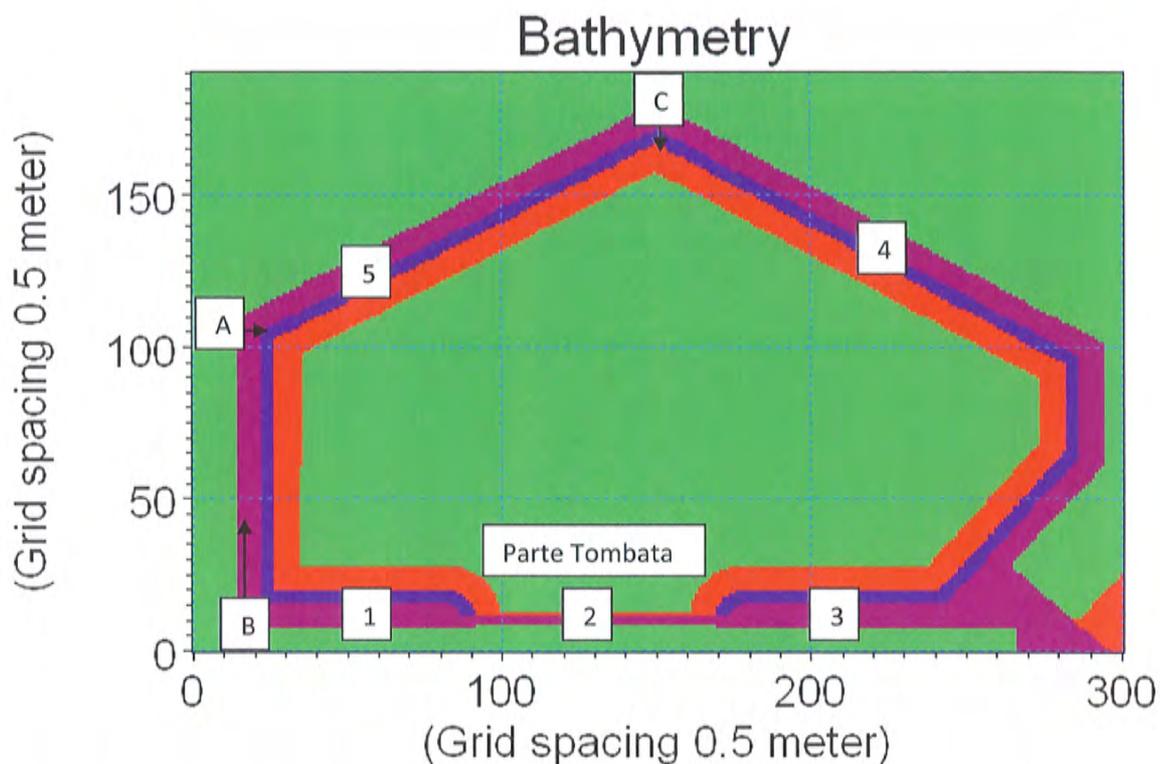


Figura 12- Immagine qualitativa della configurazione transitoria con indicazione dei punti di pompaggio forzato A, B e C, e dei punti di misura delle velocità 1, 2, 3, 4 e 5.

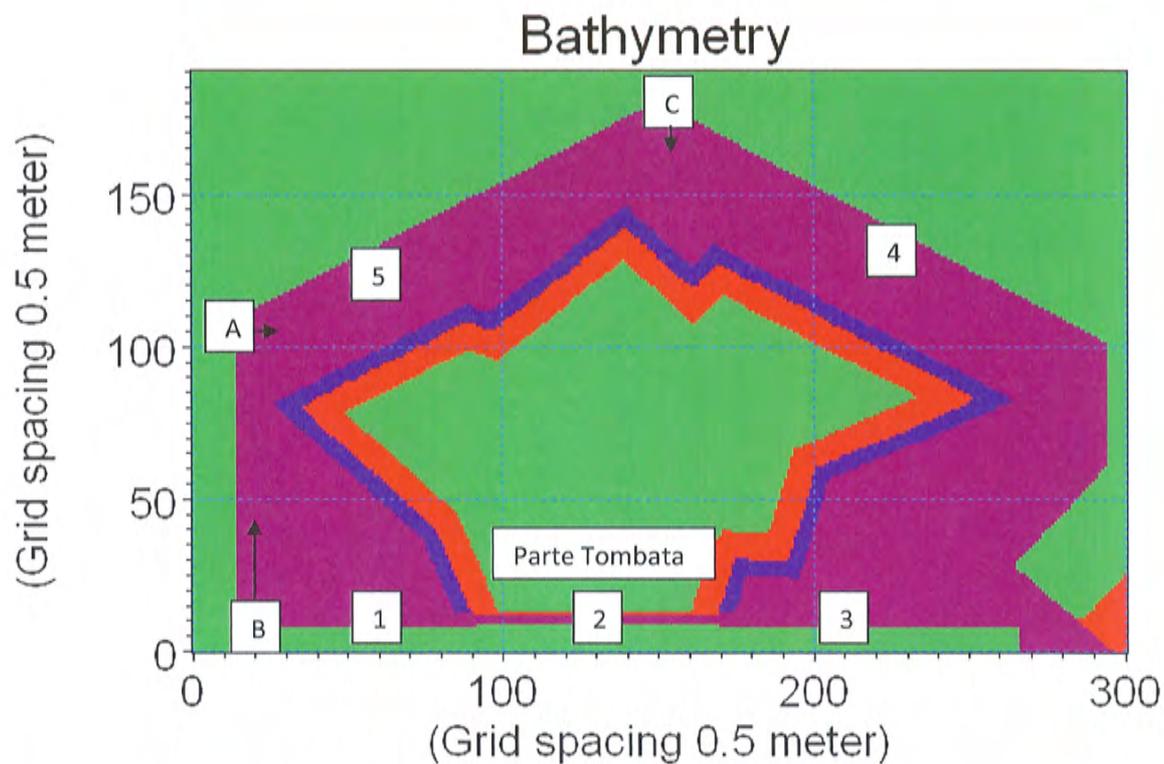


Figura 13- Immagine qualitativa della configurazione definitiva con indicazione dei punti di pompaggio forzato A, B e C, e dei punti di misura delle velocità 1, 2, 3, 4 e 5.

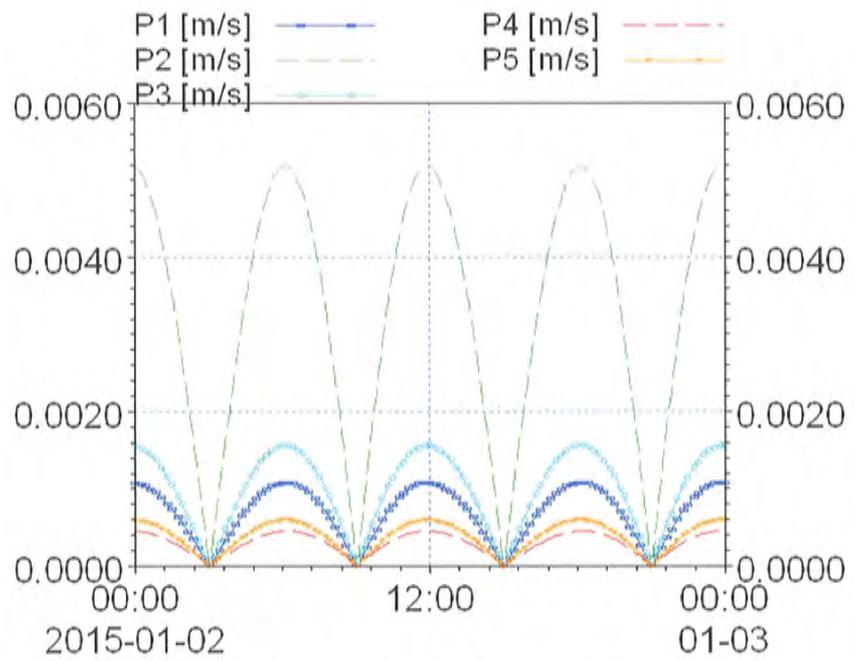
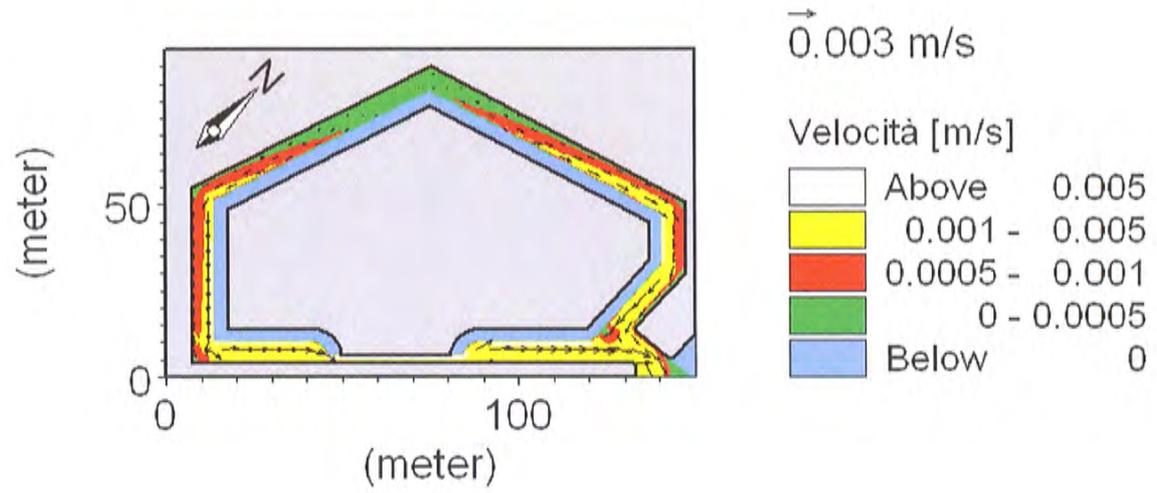


Figura 14- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio assente, parte tombata con diametro 1.5m.

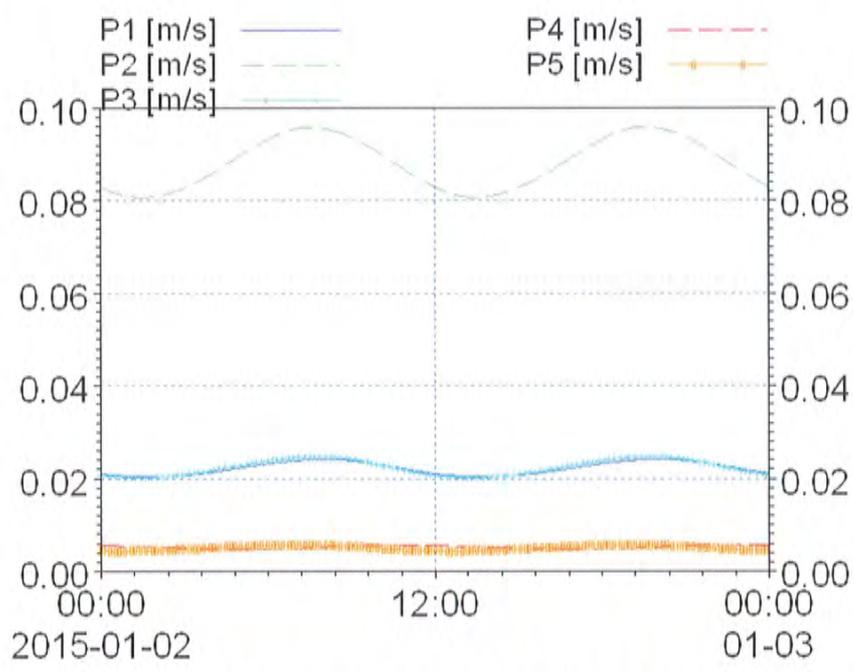
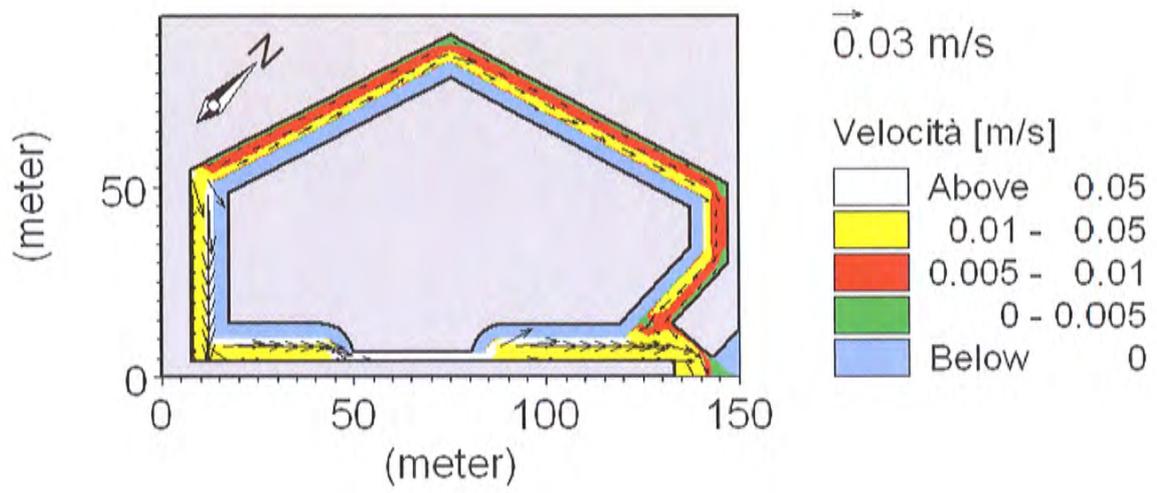


Figura 15- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.

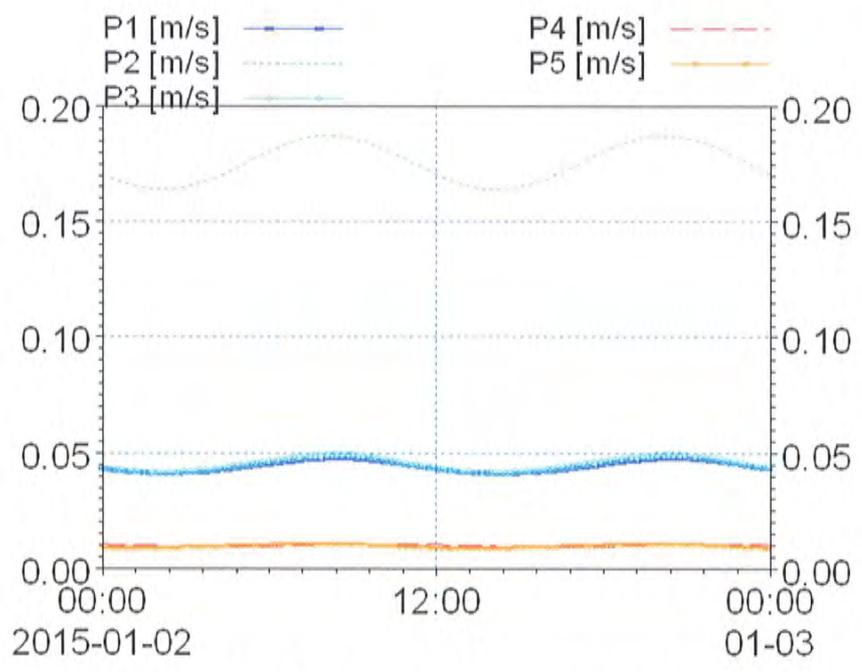
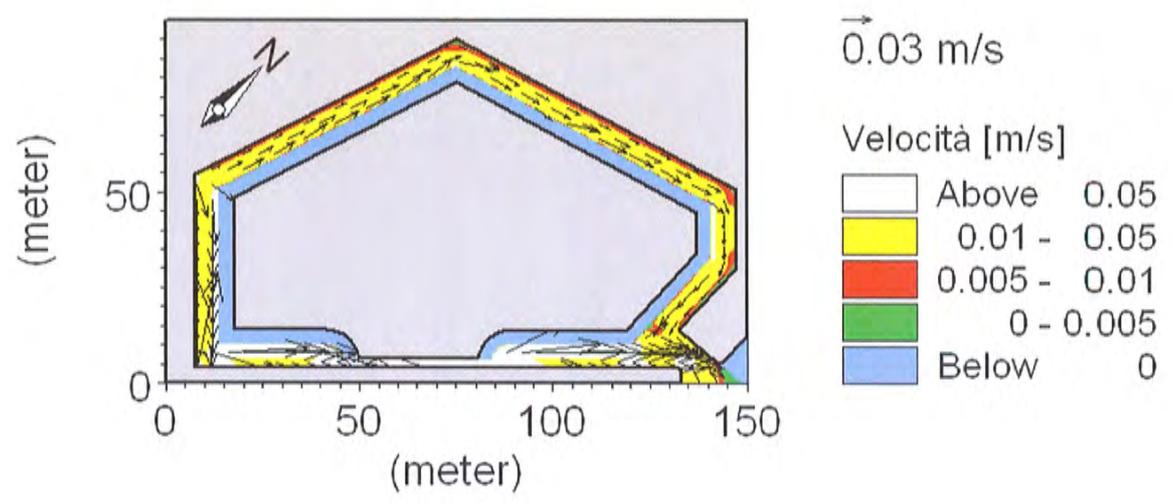


Figura 16- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A e B pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.

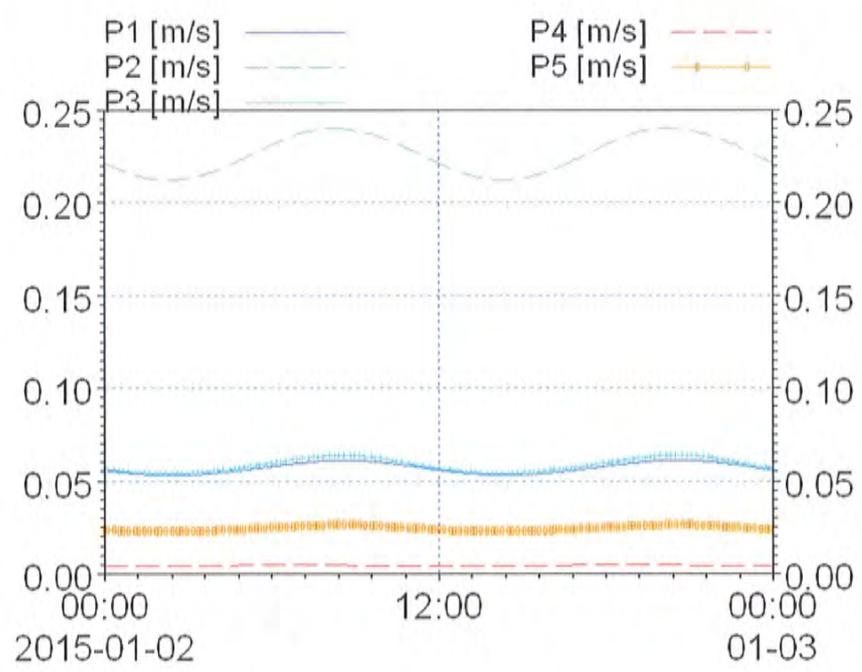
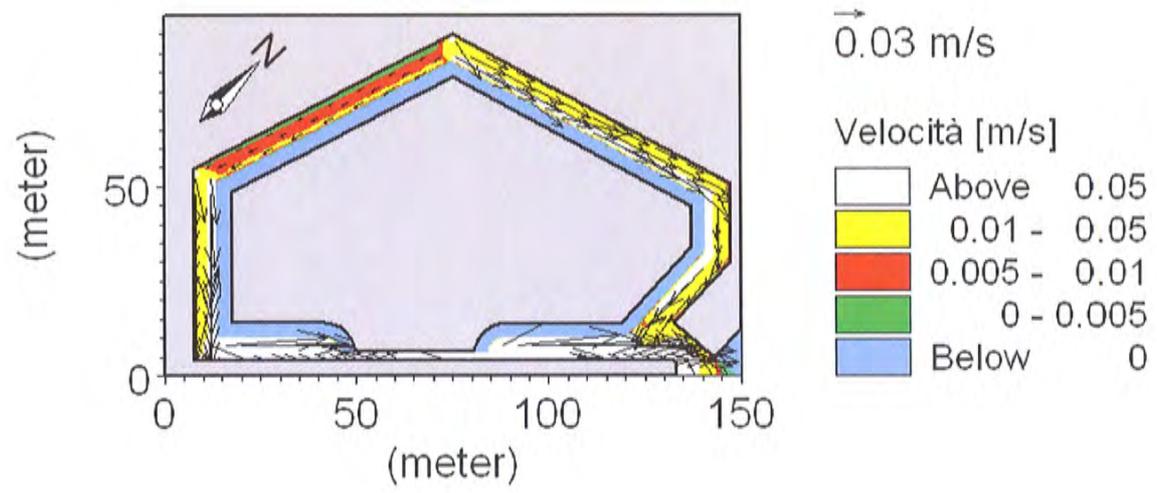


Figura 17- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A, B e C pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.

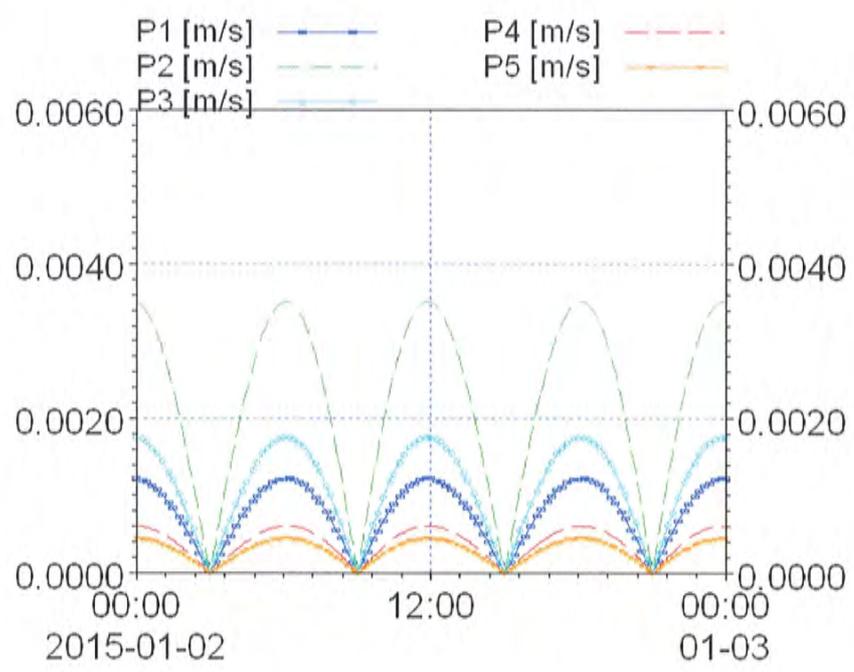
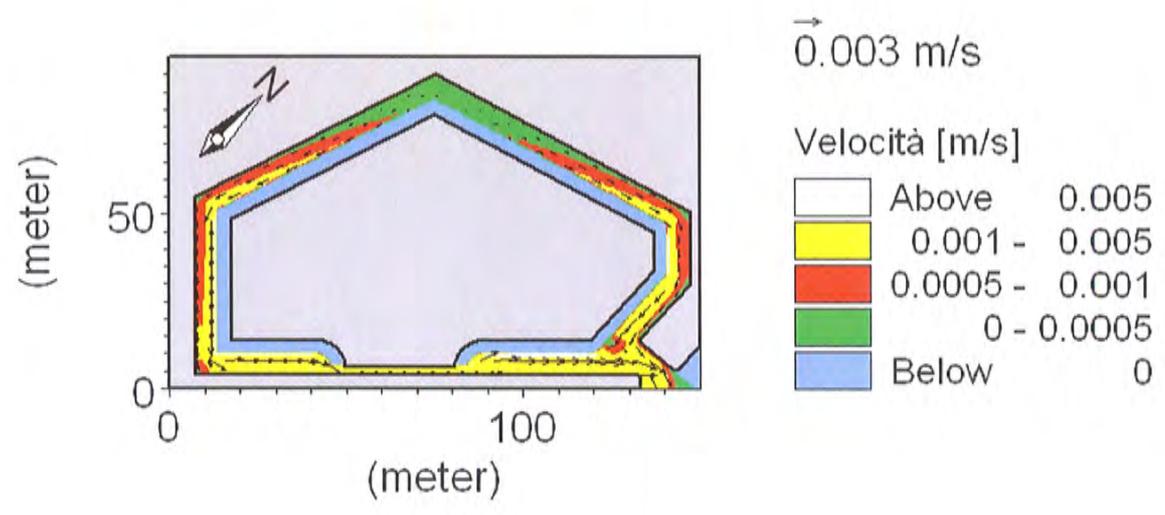


Figura 18- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio assente, parte tombata con diametro 2.5m.

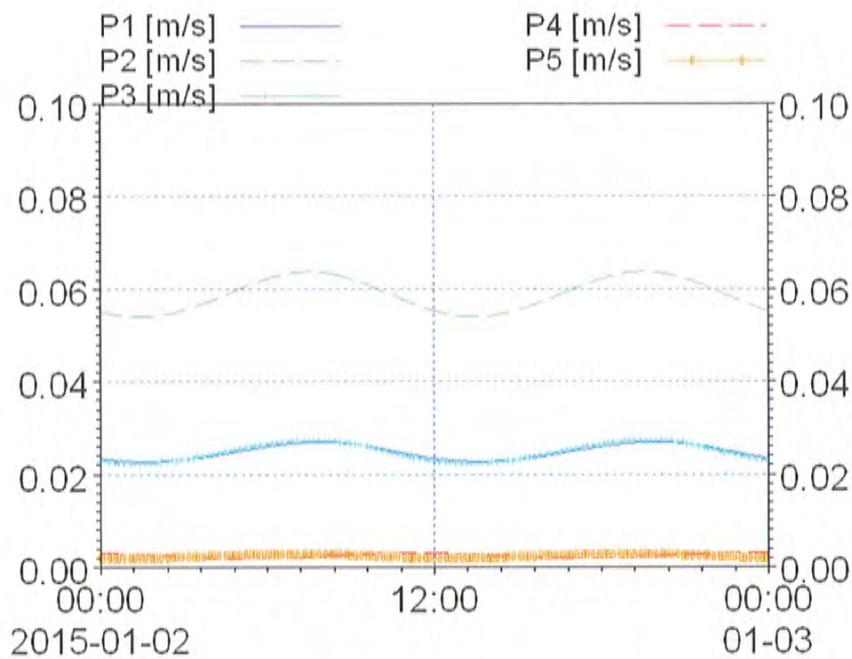
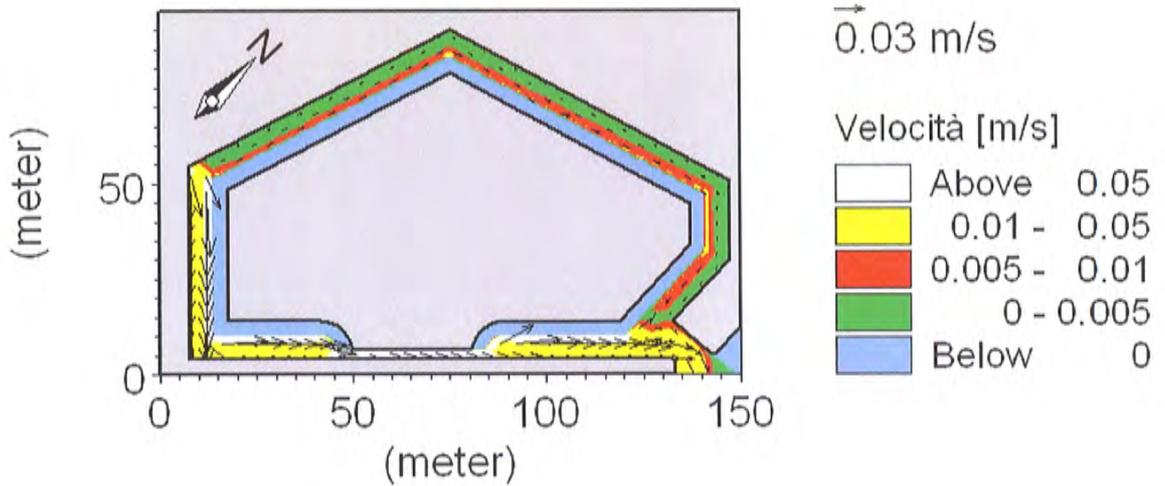


Figura 19- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.

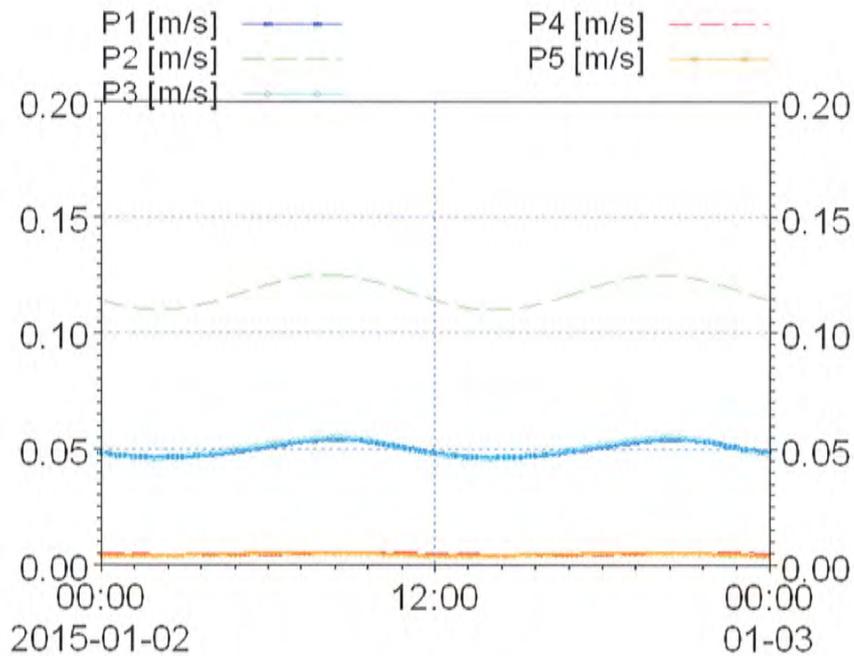
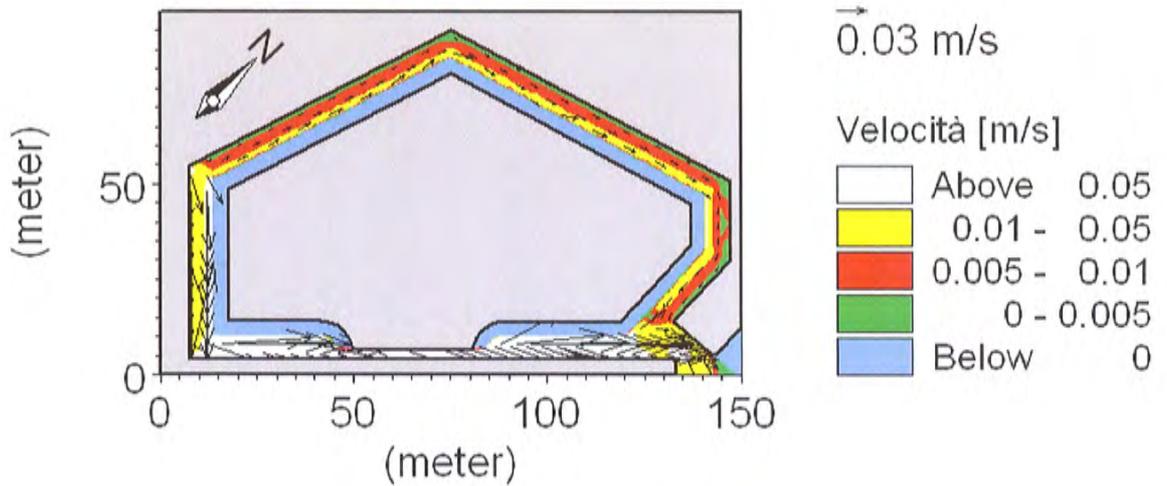


Figura 20- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A e B pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.

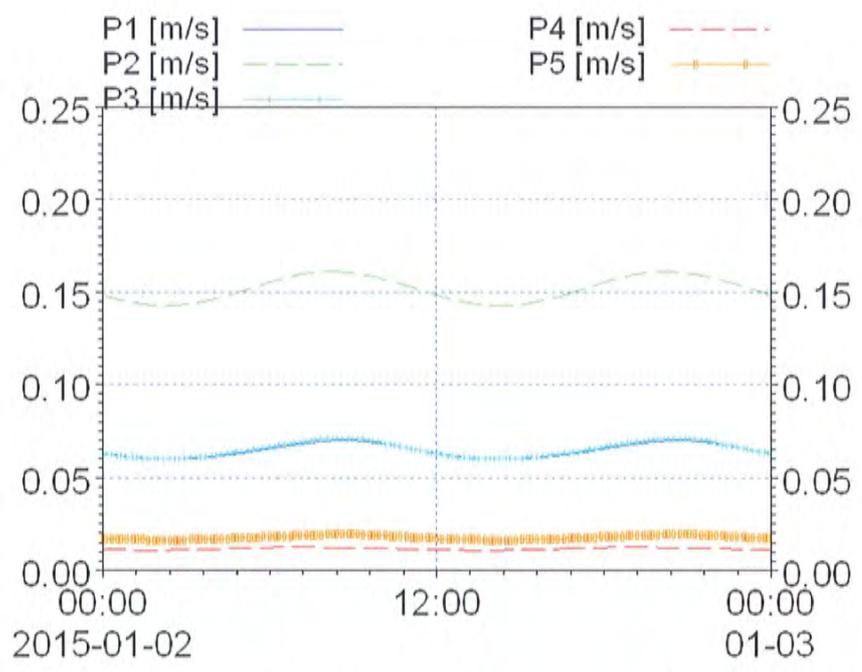
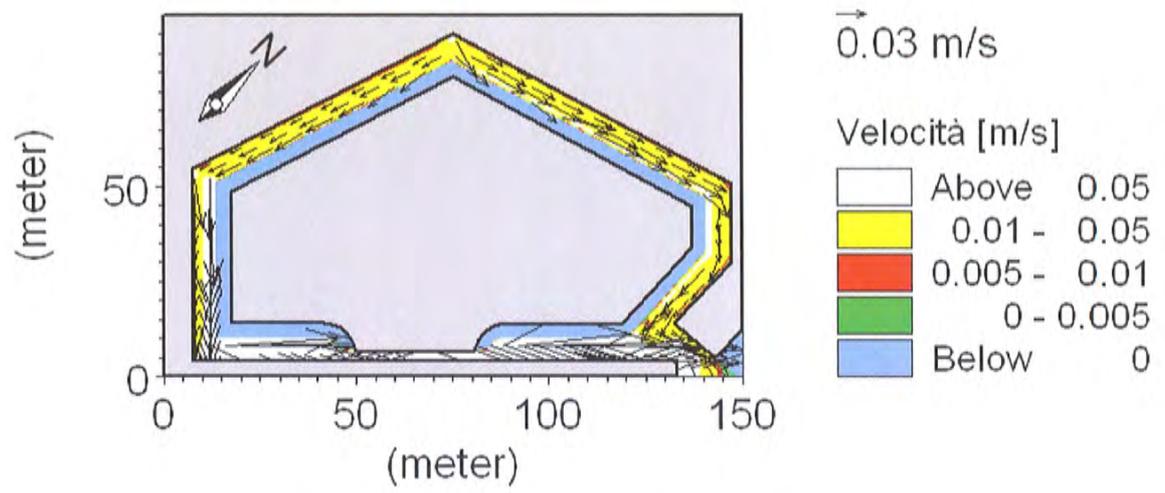


Figura 21- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione transitoria, pompaggio forzato in A, B e C pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.

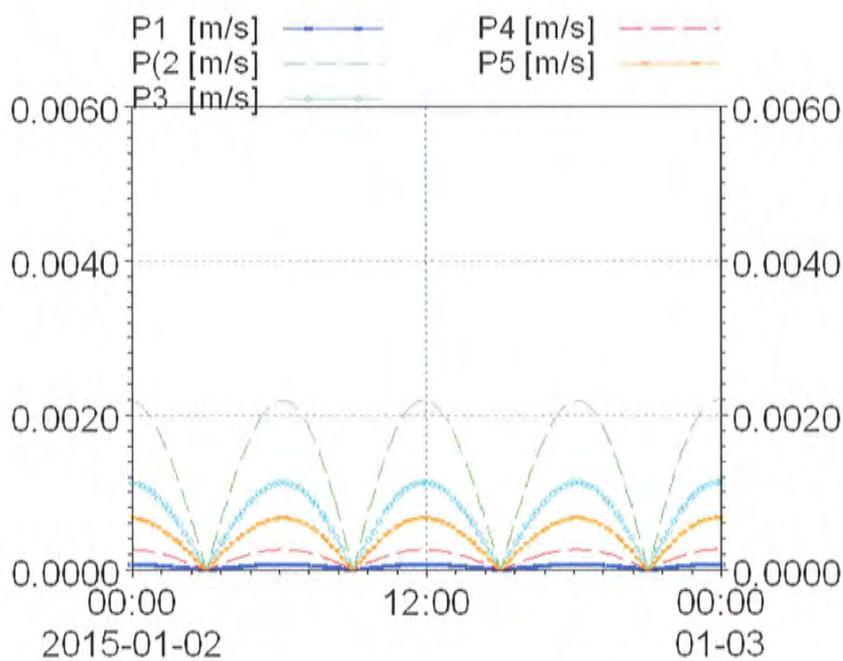
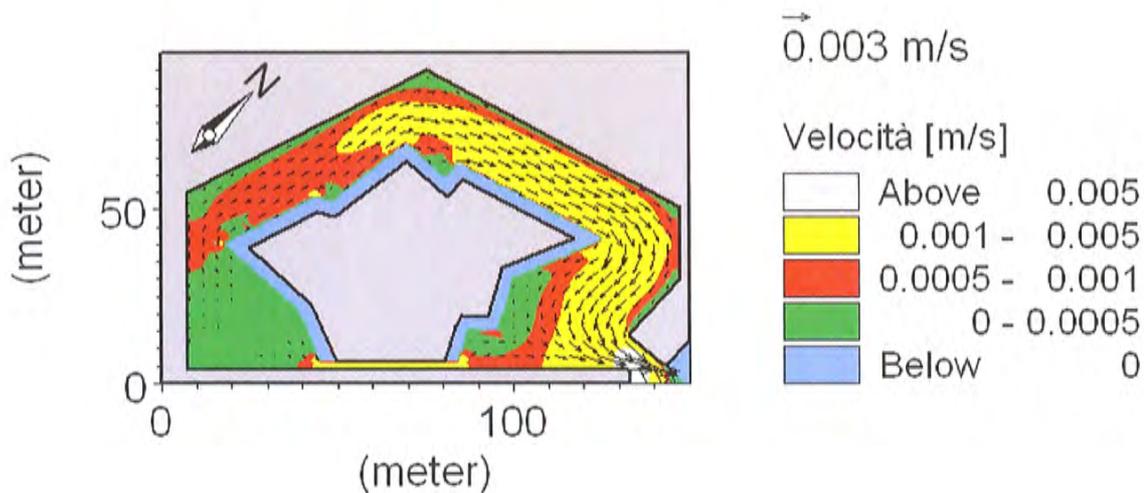


Figura 22- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio assente, parte tombata con diametro 1.5m.

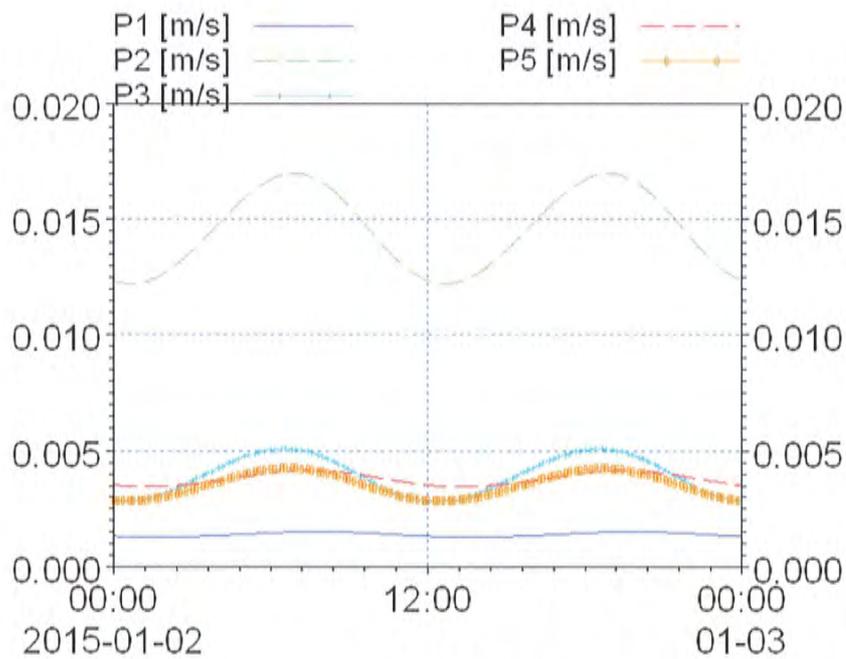
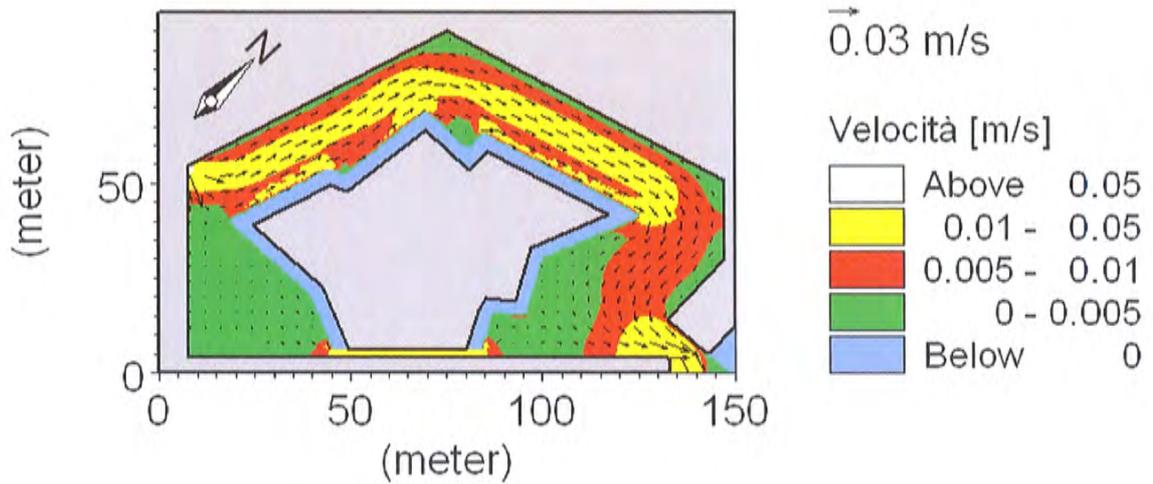


Figura 23- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.

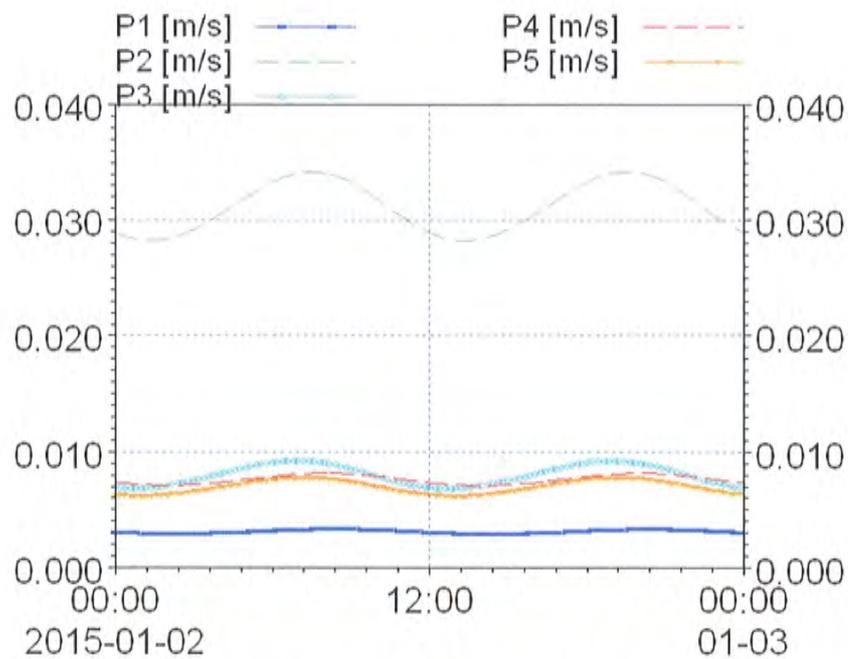
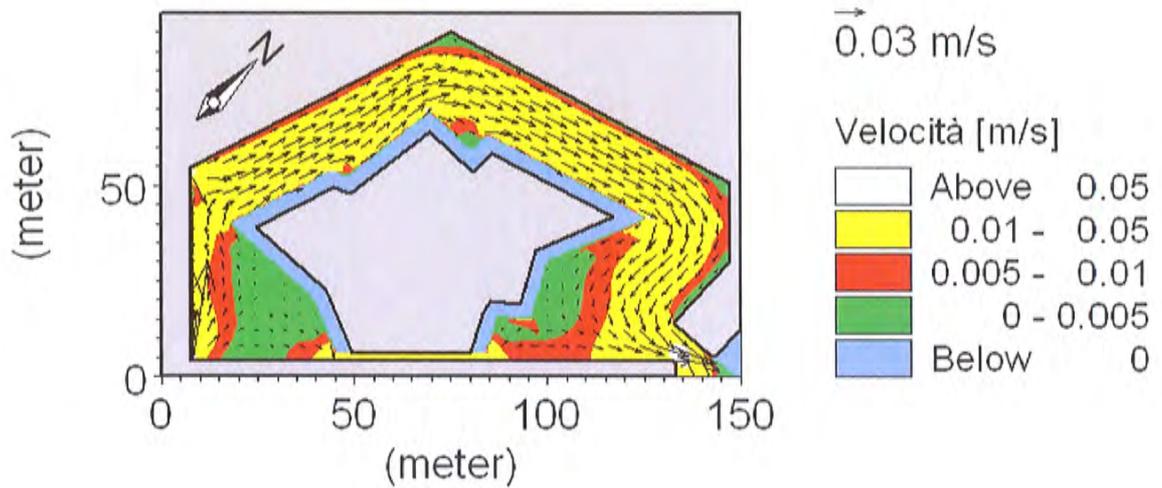


Figura 24- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A e B pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.

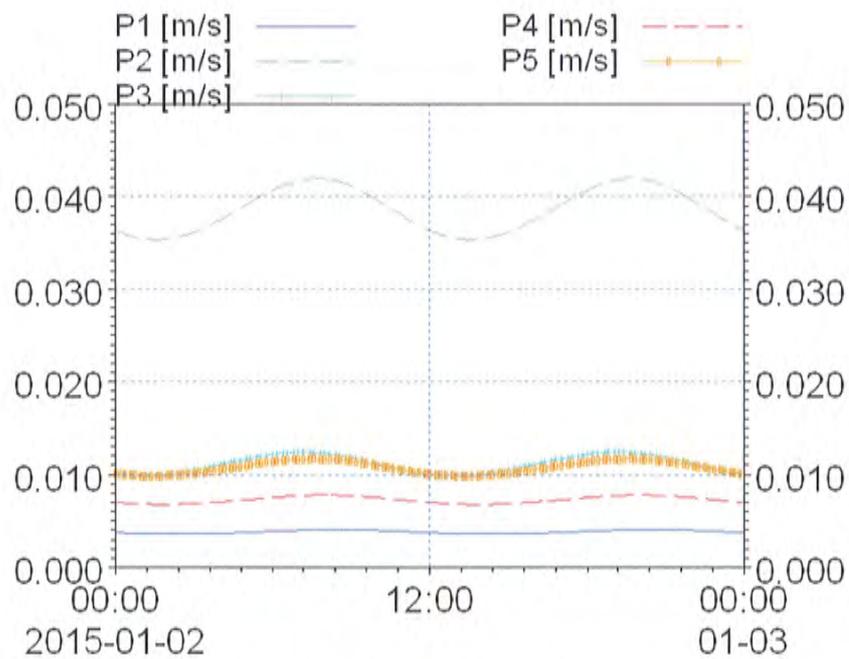
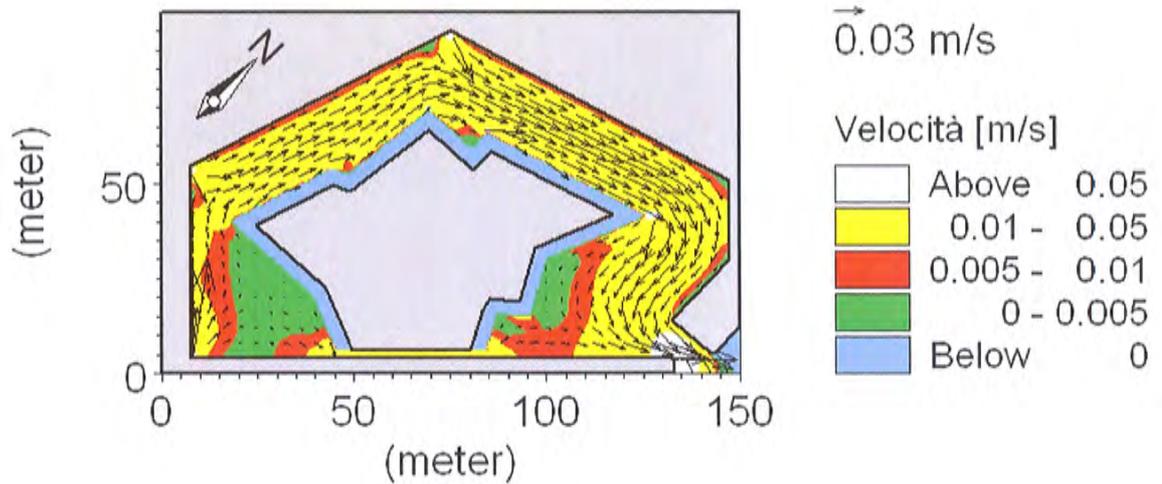


Figura 25- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A, B e C pari a 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 1.5m.

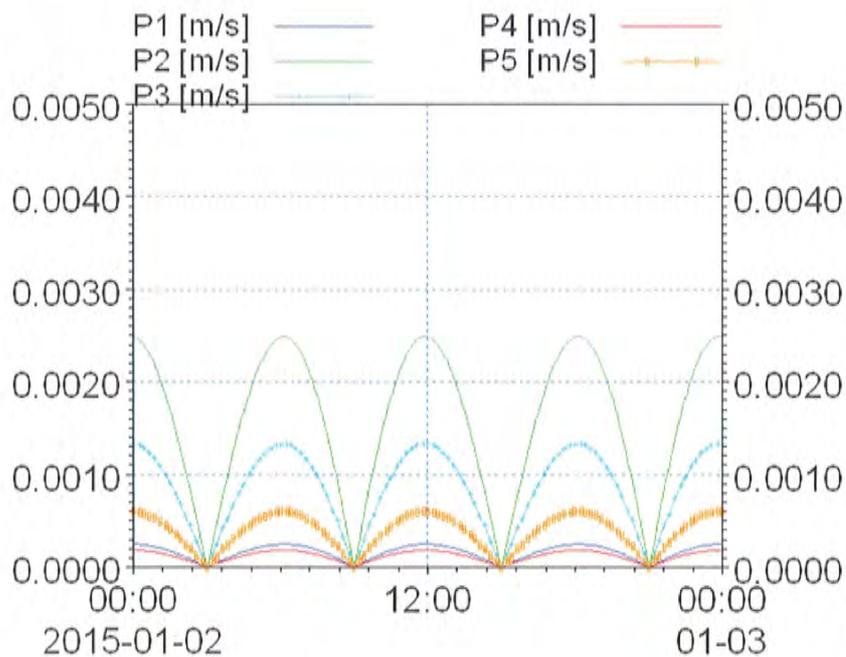
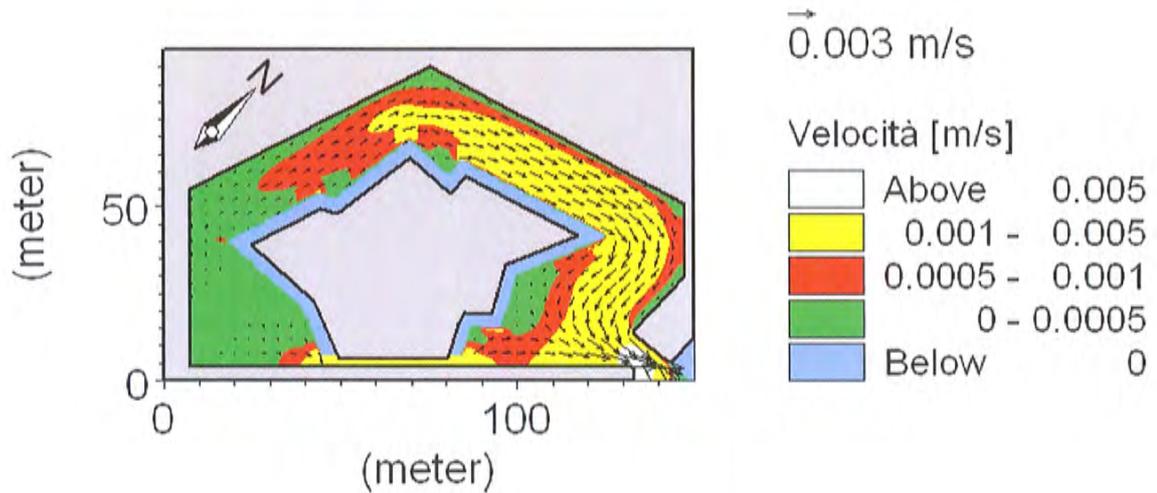


Figura 26- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio assente, parte tombata con diametro 2.5m.

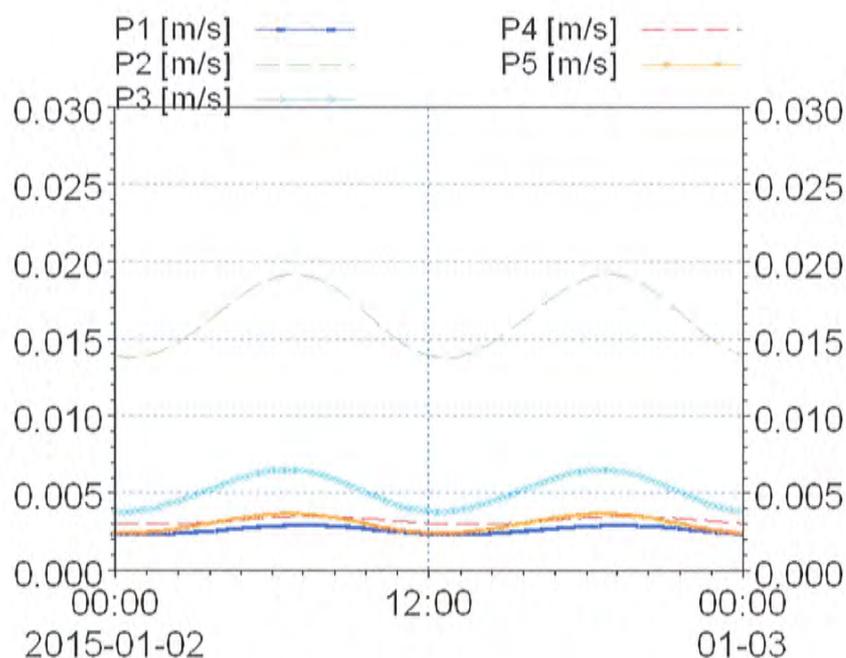
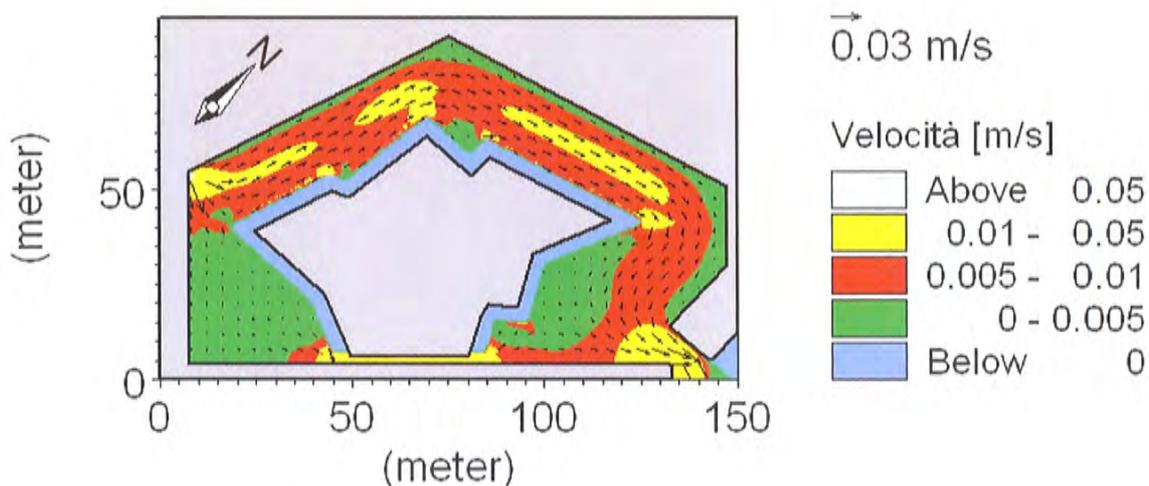


Figura 27- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.

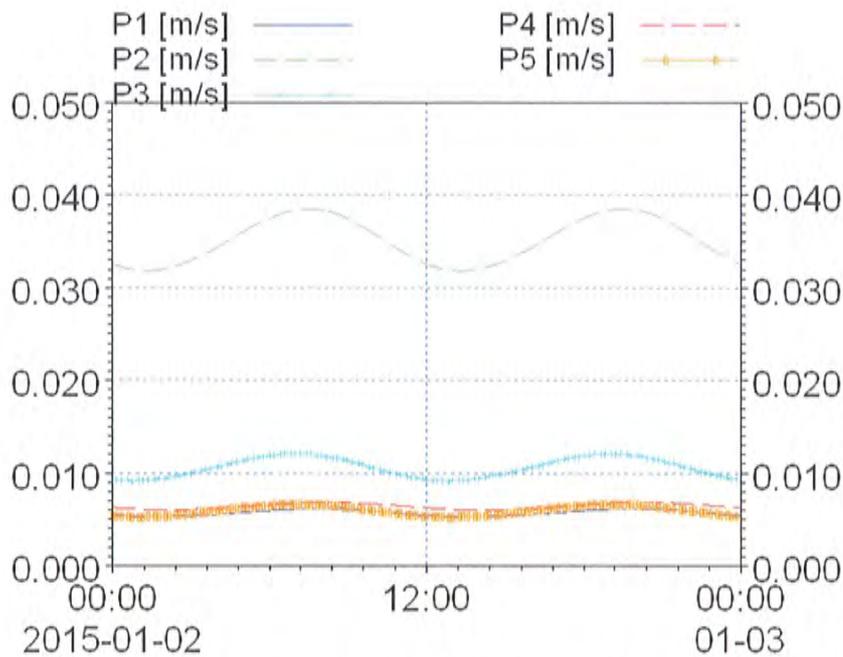
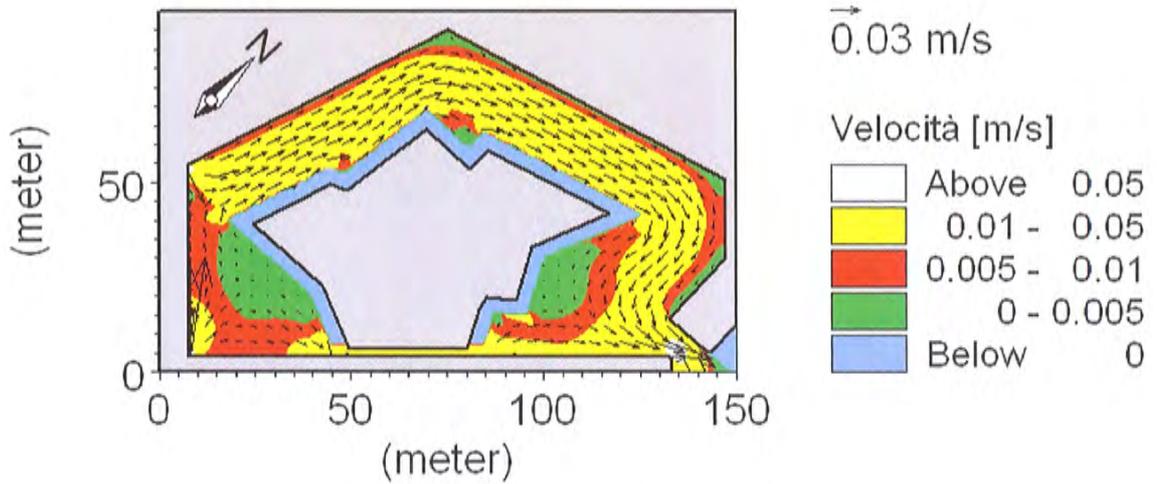


Figura 28- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A e B 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.

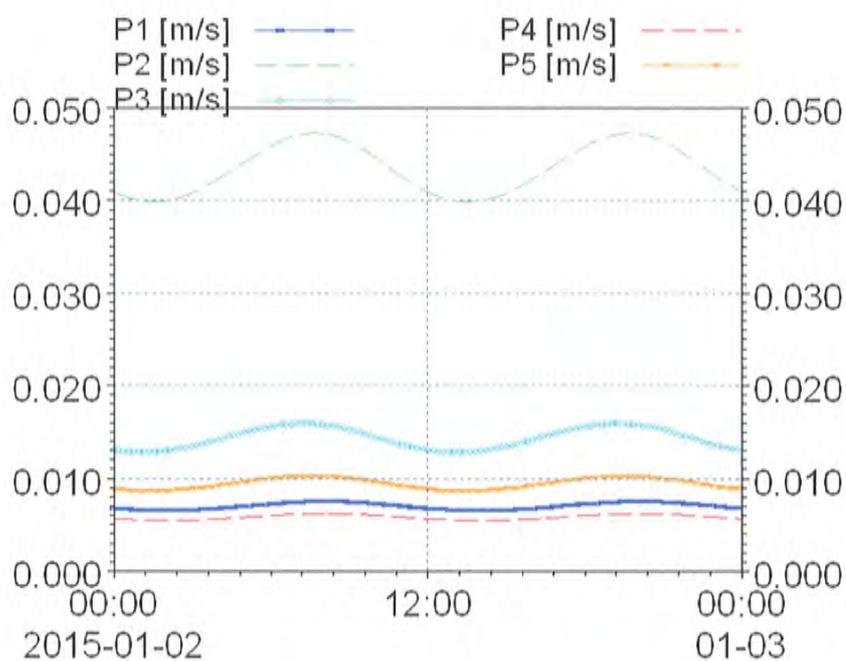
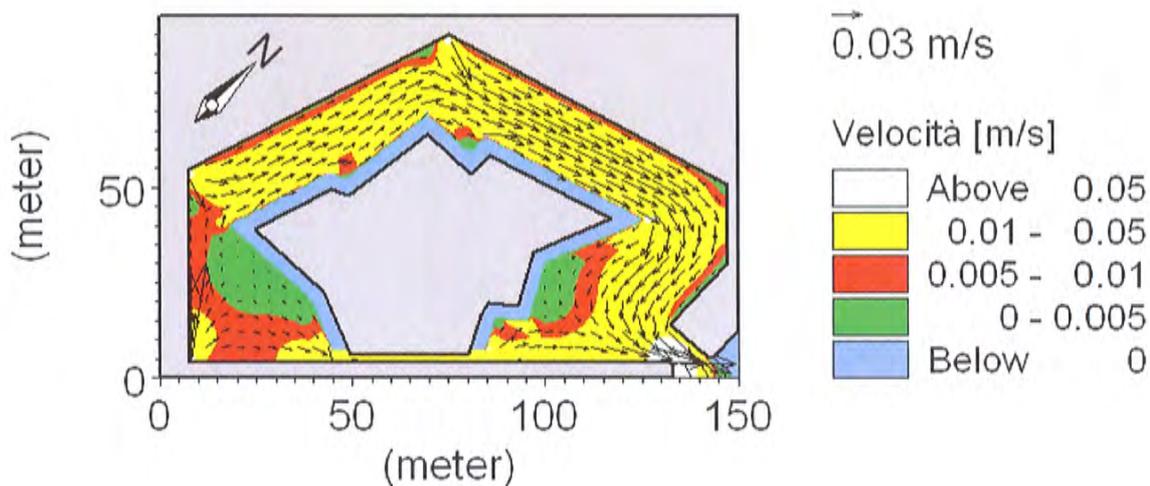


Figura 29- Mappa delle velocità nell'istante dei maggiori valori (in alto) e andamento temporale delle velocità nei 5 punti osservati (in basso); Configurazione finale, pompaggio forzato in A, B e C 400 l/s in ingresso, parte tombata con diametro 2.5m.