APAT

AGENZIA PER LA PROTEZIONE
DELL'AMBIENTE E PER I SERVIZI TECNICI

DISPERSIONE DEL DEFLUSSO FLUVIALE NELL'AREA PORTUALE DI PESCARA:

PROPOSTE PRELIMINARI DI INTERVENTO

Rapporto tecnico-scientifico APAT

Luglio 2005

Responsabili:

Francesco Lalli[1], *Stefano Corsini*[2], *Franco Guiducci*[3]

Collaboratori:

Claudio Cerri [2] : elaborazione delle ipotesi preliminari di progetto e collaborazione nella stesura del testo

Massimo Falchi [1] : allestimento apparato sperimentale, svolgimento delle prove in laboratorio, elaborazione delle immagini e collaborazione nella stesura del testo

Iolanda Lisi [2] : collaborazione nella stesura del testo

Lorenzo Morra [2]: collaborazione nella stesura del testo

Cristiano Ravaioli [1] : allestimento apparato sperimentale, svolgimento delle prove in laboratorio

Enzo Verrastro [2] : sviluppo degli aspetti di grafica, elaborazione delle ipotesi preliminari di progetto

1) APAT, Dipartimento Stato dell'Ambiente e Metrologia Ambientale, Servizio di Metrologia Ambientale
2) APAT, Dipartimento Tutela delle Acque Interne e marine, Servizio Difesa delle Coste
3) APAT

Indice

Introduzione

1 Caratterizzazione del sito
1.1 Generalità
1.2 Il fiume Pescara
1.3 Forzanti di moto ondoso
1.4 Forzanti anemologiche
1.5 Analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso
1.6 Caratteristiche del moto ondoso a riva

2 Gli ambienti di estuario
2.1 Generalità
2.2 Classificazione degli estuari in base al grado di mescolamento

3 L'indagine sperimentale: aspetti metodologici
3.1 Generalità
3.2 Prove in condizioni barocline

4 Descrizione delle ipotesi preliminari di intervento
4.1 Generalità
4.2 Ipotesi 1
4.3 Ipotesi 2
4.4 Ipotesi 3
4.5 Ipotesi 4
4.6 Ipotesi 5
4.7 Ipotesi 6
4.8 Ipotesi 7
4.9 Ipotesi 8
4.10 Ipotesi 9

5 Prove sperimentali
5.1 Pennello di ponente
5.2 Barriera mobile (ipotesi 1)
5.3 Apertura di modeste dimensioni nella diga foranea con deflettore (ipotesi 2,3)
5.4 Pennello di ponente modificato (ipotesi 4,5,6)
5.5 Aperture di grandi dimensioni con opere di protezione (ipotesi 7,8,9)

6 Analisi dei risultati sperimentali e ulteriori ipotesi di intervento
6.1 Generalità
6.2 Ipotesi 1
6.3 Ipotesi 2, 3
6.4 Ipotesi 4,5,6
6.5 Ipotesi 7,8,9
6.6 Commenti conclusivi sulle soluzioni proposte
6.7 Ipotesi 10
6.8 Ipotesi 11

7 Soluzioni finali proposte
7.1 Generalità
7.2 Ipotesi 10
7.3 Ipotesi 11

Conclusioni

Ringraziamenti

Bibliografia

Tavole

Schede illustrative delle prove

Introduzione

Nell'ambito della presentazione e discussione pubblica del rapporto tecnico-scientifico APAT *"Analisi delle interazioni tra deflusso fluviale e opere marittime nel porto di Pescara: indagini sperimentali, simulazioni numeriche, osservazioni in campo"* [6], tenuta a Roma il 23/11/2004, è emersa l'indicazione che l'Agenzia, sulla base degli studi fluidodinamici svolti, sviluppi ulteriori attività finalizzate a individuare ipotesi preliminari di modifica della struttura delle opere portuali, atte a impedire i fenomeni di diffusione delle acque del fiume Pescara lungo la costa settentrionale. L'APAT ha quindi riunito le competenze di settore in un GdL interdipartimentale, mantenendo attive le collaborazioni con i partner esterni (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Arta e Regione Abruzzo, Università di Roma "La Sapienza"). Come ampiamente descritto nel citato rapporto tecnico-scientifico [6], l'interazione tra deflusso fluviale e opere marittime, in particolare la diga foranea realizzata nella metà degli anni '90 per proteggere l'imboccatura del porto canale e realizzare un ampio avamporto, impedisce la libera dispersione in mare aperto delle acque fluviali, che vengono in parte deviate lungo il litorale Nord. Ciò non comporta problemi per quanto concerne lo smaltimento in condizioni di sicurezza delle portate di piena del fiume Pescara (questione sollevata a suo tempo dal CS LLPP e verificata con esito positivo su modello fisico presso ESTRAMED), ma riguarda i conseguenti effetti di natura ambientale sul litorale a Nord del porto. Questa situazione, come evidenziato in tutti i precedenti rapporti tecnici APAT [1 - 6], richiede la realizzazione di opportuni interventi mirati ad impedire la diffusione delle acque di provenienza fluviale lungo la costa settentrionale.

Anzitutto, il GdL ha redatto un programma generale di attività finalizzato all'individuazione della soluzione ottimale, nell'ambito del quale sono state individuate le risorse necessarie per una analisi completa delle problematiche. Tali attività si possono classificare secondo le seguenti tipologie:

1. incontri con le autorità locali e l'unità competente del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti;
2. indagini sperimentali presso il laboratorio di fluidodinamica APAT (modello fisico del porto di Pescara in scala 1:1000), tenendo conto dei fenomeni indotti dalla stratificazione salina;
3. simulazioni teorico-numeriche con modello idrodinamico 3D, tenendo conto della stratificazione salina;
4. campagne di osservazione e misura in situ;
5. attività sperimentale in laboratorio marittimo (modello fisico in scala opportuna);
6. progettazione preliminare di opere marittime.

Ad oggi, sono state svolte le seguenti attività:

- incontro con la Capitaneria di Porto di Pescara; in tale ambito, è stata messa a fuoco la necessità di conciliare adeguatamente le esigenze di salvaguardia ambientale con quelle di efficienza e sicurezza del porto; nella stessa occasione sono stati presi i primi accordi con l'Agenzia Regionale per la Tutela dell'Ambiente della Regione Abruzzo, al fine di programmare gli aspetti relativi alle campagne di misura in situ;
- incontro informale con gli ingegneri navali dell'Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale di Roma; in tale incontro, come nel caso precedente, sono state valutate le possibili modifiche delle opere tenendo conto delle interazioni tra le problematiche ambientali e gli aspetti di manovrabilità delle navi, con particolare riferimento alle manovre di accesso al porto;

- riunione con l'unità del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti competente per il porto di Pescara; in tale contesto sono stati evidenziati prevalentemente gli aspetti procedurali inerenti la realizzazione di modifiche dell'assetto portuale;
- realizzazione di un modello in scala 1:1000 del porto di Pescara; tale modello è stato installato presso il laboratorio di fluidodinamica APAT e sono state svolte prove sperimentali finalizzate alla valutazione degli effetti sul deflusso e dispersione in mare delle acque fluviali dovuti alla realizzazione di modifiche dell'attuale assetto portuale, tenendo conto degli effetti di galleggiamento delle acque fluviali sulle acque marine.

Infine, sulla base dei risultati ottenuti in laboratorio, a partire da una ampia rosa di possibili soluzioni, sono state elaborate ipotesi preliminari di modifica della struttura portuale; in particolare:

1. realizzazione di una barriera galleggiante mobile dall'estremità del molo Nord del porto canale al punto di flesso della diga foranea; questa ipotesi, quantunque non definitiva, è caratterizzata da bassi costi e semplicità realizzativa e potrebbe essere immediatamente messa in atto, senza ulteriori studi;
2. apertura di opportuni varchi, più o meno ampi, nella diga foranea;
3. deviazione verso il largo della corrente fluviale mediante pennello intestato a riva;
4. modifica della foce fluviale, con sbocco diretto all'esterno della diga foranea.

1. Caratterizzazione del sito

1.1 Generalità

Il problema del peggioramento della qualità dell'acqua nell'area portuale di Pescara e lungo la costa settentrionale si protrae da alcuni anni. Precedenti studi APAT [1 – 6] e campagne di misura effettuate da ARTA Abruzzo nel 2000 hanno evidenziato come la zona costiera interessata dall'efflusso del fiume Pescara (soprattutto a seguito della costruzione della diga foranea) sia piuttosto vasta (almeno 3 km). In particolare, in un precedente studio APAT [3] è stata evidenziata la correlazione tra concentrazione di coliformi lungo la costa ed estensione del plume fluviale. Gli apporti di acqua dolce hanno portato negli ultimi anni effetti significativi sull'ecosistema marino, con ripercussioni negative sulla balneabilità del litorale Nord. Tali effetti si basano sugli aspetti sedimentologici e sulle caratteristiche chimico–fisiche dell'acqua. Prima della costruzione della diga foranea il trasporto solido del fiume Pescara veniva disperso verso il mare aperto e ridistribuito naturalmente lungo la costa ad opera delle mareggiate. Oggi, invece, il materiale limoso tende ad accumularsi sui fondali antistanti la costa Nord. Ma i cambiamenti maggiori che si stanno verificando nell'area riguardano probabilmente le caratteristiche chimico – fisiche dell'acqua. Un ampio tratto della costa Nord risulta esposta alla diffusione delle acque fluviali e si genera una stratificazione (acque dolci fredde galleggianti sulle acque salate più calde); tenendo conto del carico inquinante del fiume Pescara, ciò compromette le caratteristiche di balneabilità del sito, come purtroppo le campagne di misura effettuate lungo il litorale nel corso degli anni hanno evidenziato.

In questo lavoro sono state svolte analisi idrodinamiche in merito alla dispersione del deflusso fluviale su modello in scala, al fine di proporre delle ipotesi di modifica dell'attuale lay-out portuale. Sono state anche previste campagne di misure e successive analisi dei dati, nel duplice scopo di ottenere informazioni sulla natura ed entità delle forzanti meteo-marine e precisare tutto ciò che concerne la qualità delle acque.

Sono state programmate sei campagne di monitoraggio, di cui quattro stagionali e due da effettuarsi nei periodi di massima portata fluviale. Le campagne di monitoraggio prevedono misure *in situ* dei principali parametri chimico-fisici dell'acqua (temperatura, salinità, torbidità, densità, nutrienti ecc.) e l'acquisizione dei profili batimetrici. In tal modo potrà essere monitorata la diretta influenza del fiume Pescara sulla qualità delle acque di mare nelle diverse condizioni meteo-marine e si potrà ottenere una rappresentazione dettagliata delle distribuzioni sia verticali che longitudinali dei parametri misurati. Le misure in campo sono state pianificate in modo da ottenere la migliore risoluzione spaziale e temporale per la descrizione del fenomeno del mescolamento e della stratificazione verticale delle masse d'acqua a diversa temperatura e salinità e quindi per la stima dei gradienti orizzontali di densità, necessari per la comprensione delle dinamiche del flusso baroclino. Questo studio è stato previsto allo scopo di ottenere un quadro conoscitivo completo, che consenta di svolgere i necessari approfondimenti in merito alle ipotesi preliminari di intervento descritte nel presente lavoro.

1.2 Il fiume Pescara

La stesura di questo paragrafo si è basata principalmente sullo studio [7], a cura del Servizio Idrografico e Mareografico di Pescara della Regione Abruzzo.

Il Fiume Pescara, che sfocia in Adriatico in corrispondenza dell'omonima città, è alimentato nel suo corso più alto dai deflussi degli Appennini Abruzzesi, che raggiungono le quote più elevate della catena. Il corso d'acqua, che dalla gola di Popoli si dirige, con corso poco pendente, verso la costa Adriatica con direzione pressoché normale alla costa stessa, è alimentato, a monte della gola, dalla confluenza del Fiume Aterno, che proviene da Nord-Ovest, e del fiume Sagittario, che scorre da Sud-Est. Tale conformazione, anomala per i corsi d'acqua appenninici con foce in Adriatico, deriva dalla corrispondente particolare conformazione della catena montuosa, che presenta due diversi spartiacque paralleli al mare, essendo il più prossimo alla linea costiera interrotto dalla

profonda valle rocciosa di Popoli, determinata da una faglia che separa il monte Morrone dalle propaggini meridionali del massiccio del Gran Sasso. Il primo spartiacque, orientale, è caratterizzato dalle quote più elevate che l'Appennino insulare raggiunge, col Monte Corno (Gran Sasso - 2914 m s.l.m.) e col Monte Amaro (Maiella - 2714 m s.l.m.). Il secondo spartiacque, parallelo al primo, verso occidente, raggiunge quote meno elevate (M. Sirente - 2349 m s.l.m.).

La valle tra le due catene è drenata dall'Aterno e dal Sagittario che scorrono ambedue, con diversa morfologia d'alveo, verso la gola di Popoli.

L'alveo del fiume Pescara assume configurazioni differenti nell'area esaminata, presentando una forma per tratti anastomizzata, per tratti meandriforme. L'aspetto dell'alveo fluviale comunque è stato modificato enormemente dalle opere antropiche realizzate su di esso. Infatti a causa degli sbarramenti operati ad Alanno (diga Enel presa III salto) e nelle vicinanze della stazione di Rosciano (centrale Enel presa IV salto) si sono formati a monte piccoli laghi artificiali. La presenza di numerose opere di presa ha causato significative diminuzioni delle portate fluviali. Infine, in corrispondenza della foce del fiume, la realizzazione del porto canale di Pescara ha richiesto la rettificazione di alcuni tratti del corso del fiume. Queste opere hanno modificato fortemente sia la dinamica fluviale, sia gli ambienti ad essa collegati, sia i rapporti tra il fiume, la falda e gli apporti a mare.

Il Pescara ha un bacino di circa 3200 km^2, per lo più di tipo montuoso. Solo nelle ultime decine di km scorre attraverso sedimenti terrigeni su un'area densamente urbanizzata; il trasporto solido è rilevante: il Pescara rovescia in mare una quantità di sedimenti che può essere stimata circa 10^6 tonn/anno.

La stazione idrometrica di S.Teresa, ubicata a circa 9 Km dalla foce, sottende un bacino di circa 3100 Km^2. I valori caratteristici desumibili dai dati forniti dalla stazione di S.Teresa sono:

- portata minima storica istantanea: 15 m^3/s;
- portata media giornaliera storica: 50 m^3/s;
- portata giornaliera massima annua: 380 m^3/s;
- portata massima storica istantanea: 1100 m^3/s;

Per quanto concerne l'analisi della pericolosità, vengono riportati i risultati del lavoro [8], ottenuti mediante rilevamenti di campagna finalizzati all'individuazione dei produttori, effettivi e potenziali, di inquinamento. Gli elementi da prendere in considerazione nell'analisi della pericolosità presente nella pianura del fiume Pescara sono i seguenti:

- *Utilizzazione delle risorse idriche sotterranee.* Le acquee del subalveo del fiume sono utilizzate prevalentemente a scopo industriale, irriguo e domestico. Forti prelievi in falda sono ubicati sulla destra idrografica del Pescara e legati all'attività industriale nelle zone di Chieti Scalo e Pescara. L'emungimento delle acque di subalveo per usi domestici ed irrigui risulta essere di modesta entità in quanto, per tali scopi, viene utilizzata l'acqua fornita dai consorzi di bonifica della Val Pescara. La portata d'acqua prelevata per tali scopi è difficilmente quantificabile.
- *Urbanizzazione*. I principali centri gravanti sul bacino del fiume Pescara sono i due capoluoghi di provincia, Pescara (circa 120.000 abitanti) e Chieti (circa 55.000 abitanti). Non tutti i centri urbani sono attrezzati per la depurazione delle acque di rifiuto.
- *Infrastrutture*. La vallata del fiume Pescara è interessata dalla presenza di due arterie autostradali (A25, A14), due strade a scorrimento veloce, due strade statali (Tiburina Valeria e Adriatica) e due linee ferroviarie.
- *Attività produttiva.* Nella pianura alluvionale del Fiume Pescara i maggiori insediamenti industriali sono ubicati nei pressi dei comuni di Alanno, Scafa, Chieti, S.Giovanni Teatino (Sambuceto) e Pescara. Le principali attività sono: industrie siderurgiche, metallurgiche, galvaniche e produttrici di metallo e loro leghe che possono essere causa di inquinamento da

metalli. Sono presenti industrie di vernici, materie plastiche e farmaceutiche, officine meccaniche, distributori di benzina e impianti di lavorazione delle carni. Sono inoltre presenti cave, in alcune delle quali è affiorante la falda, ed alcune discariche sepolte. Entrambe costituiscono vie di inquinamento preferenziale della falda. Infine l'attività agricola è estesa su tutto il bacino, con l'esclusione delle dorsali carbonatiche, è particolarmente intensa nella pianura alluvionale e consiste principalmente in seminativo irriguo ed alborato.

Sulla base delle precedenti considerazioni, si può quindi concludere che il rischio potenziale di inquinamento è elevato. I fenomeni di inquinamento effettivamente in atto hanno prodotto un forte degrado della qualità delle acque: quelle qualitativamente peggiori sono in prossimità della fascia costiera e delle maggiori zone industriali.

Parametri chimici	**Valori**
Temperatura dell'acqua	15°
PH	7.7
Solidi sospesi	74 mg/l
Conducibilità el. 20°	484 μS/cm
Ossigeno disciolto	9 mg/l
Saturazione	89 %
BOD5	3.5 mg/l
COD	< 10 mg/l
Durezza totale $CaCO_3$	282 mg/l
Cloruri	19 mg/l
Solfati	28.2 mg/l
Azoto Ammoniacale	1.1 mg/l
Azoto Nitroso	0.02 mg/l
Azoto Nitrico	1.02 mg/l
Azoto totale	2.5 mg/l
Ortofosfati solubili	0.087 mg/l
Fosforo totale	0.15 mg/l
Coliformi totali	300000 ufc/100 ml
Coliformi fecali	100000 ufc/100 ml
Enterococchi	400000 ufc/100 ml
Escherichia coli	500000 ufc/100 ml
Salmonella	Presenti
Clostridi solfito riduttori	Presenti

Tabella 1.1: Analisi a cura di ARTA Abruzzo; data prelievi: 8/5/2001; punto di prelievo: Comune di Pescara, 50 m a valle di Ponte D'Annunzio, sponda sn.

Campagne di misura effettuate da Legambiente nell'ambito del progetto Fiuminforma 2001 hanno portato a classificare le acque in prossimità della foce come "molto inquinate o comunque molto alterate". I risultati di analisi svolte dall'Agenzia Regionale per la Tutela dell'Ambiente nel 2001 su campioni d'acqua prelevati in prossimità della foce sono riportati nella tabella 1.1. Controlli effettuati nello stesso anno dal Comando Carabinieri per la Tutela dell'Ambiente lungo il corso del fiume, hanno portato ad identificare 4 depuratori non conformi al DL 152/99. Tali infrazioni definiscono un livello di illegalità pari al 36 % rispetto alla media generale, dimensionata al 30 %.

Si può quindi concludere che l'auspicabile intervento finalizzato ad ottenere un miglioramento delle acque che vengono scaricate a mare dal fiume Pescara comporta tempi lunghi

ed una complessa e difficile gestione delle operazioni. Pertanto, per ripristinare in modo efficace la balneabilità delle zone a Nord della foce del Pescara è necessario intervenire tempestivamente modificando le strutture del porto, che inducono attualmente un ristagno delle acque dolci fluviali in prossimità del litorale a Nord di Pescara. In aggiunta, anche ammesso di poter ottenere in tempi ragionevolmente brevi un miglioramento sensibile della qualità delle acque fluviali, è comunque opportuno evitare accumulo e ristagno di acque dolci e limacciose lungo un litorale destinato alla balneazione.

1.3 Forzanti di moto ondoso

Per la definizione del clima di moto ondoso vengono utilizzati i risultati descritti in un lavoro sviluppato da De Girolamo [9], ottenuti mediante elaborazione degli eventi misurati dalla boa ondametrica di Ortona (R.O.N.). Dall'analisi di tali risultati emerge quanto segue:

- La direzione risultante del flusso di energia è ruotata verso Nord rispetto alla normale alla linea di costa;
- Gli stati di mare estremi ($Hs > 3.5\ m$) provengono prevalentemente da un limitato settore di traversia 340-50° N, corrispondente ai venti di Maestrale e Grecale. Gli eventi che presentano un'altezza d'onda significativa $Hs > 2\ m$ sono caratterizzati da una frequenza di accadimento contenuta (minore del 5%);
- Tra gli stati del mare "significativi" (altezza d'onda $> 0.5\ m$) quelli più frequenti (circa il 37% degli eventi) sono caratterizzati da un'altezza d'onda $H < 2\ m$;
- La distribuzione degli stati di mare "significativi" (altezza d'onda $H > 0.5\ m$) non presenta sensibili variazioni stagionali, in particolare gli eventi provenienti dal settore principale sono il 76% circa in inverno ed in estate, ed il 60% circa in primavera ed autunno;

Per quanto riguarda le caratteristiche del clima d'onda nel periodo estivo, dal lavoro citato [9] emergono i seguenti elementi:

- La percentuale degli eventi caratterizzati da un'altezza $H < 0.5\ m$ (calme) è pari a circa il 67%;
- Gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda $H > 0.5\ m$ provengono per circa il 76% dal settore di traversia principale e per il rimanente 24% dalle altre direzioni;
- Gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda $H > 0.5\ m$ e provenienti dal settore di traversia principale hanno per il 73% altezza d'onda inferiore a $2\ m$.

Dallo studio di De Girolamo [9] si evince poi che gli eventi estremi di moto ondoso ricadono all'interno del settore di traversia compreso tra le direzioni di 320-130° N, ulteriormente suddivisibile in un settore di traversia principale che ricade tra le direzioni di 320-50° N ed un settore di traversia secondario che ricade tra le direzioni di 50-130° N. Dall'analisi di tali eventi emergono le seguenti conclusioni:

- Nel settore principale rientrano gli stati di mare provenienti da Maestrale e Grecale, generati in mare aperto e caratterizzati dalle massime altezze d'onda significative Hs ;
- Nel settore secondario rientrano gli stati di mare provenienti da Levante e Scirocco, generati in mare aperto e caratterizzati da altezze d'onda significative Hs di media inferiori rispetto al settore principale.

Nel paraggio in esame gli stati di mare caratterizzati da un'altezza d'onda significativa $Hs < 2\ m$ non sono stati ritenuti in grado di forzare la circolazione costiera in maniera tale da influenzare la zona prospiciente la foce. Visto che gli eventi superiori a tale soglia, per il periodo estivo, sono solo lo 0.2%, è stata evidenziata la scarsa rilevanza in termini statistici delle condizioni di moto ondoso

che possono forzare una apprezzabile circolazione costiera (correnti indotte da moto ondoso frangente) in grado di influire sulla qualità delle acque nell'intorno della foce del Pescara.

1.4 Forzanti anemologiche

La dispersione in mare delle acque del fiume Pescara può essere influenzata dalle correnti costiere generate dal vento. Per valutare tale influenza, nel lavoro di De Girolamo [9] è stato utilizzato il set di dati registrato dalla stazione mareografica di Pescara; dall'analisi di tali dati risulta che:

- I venti caratterizzati da una direzione di provenienza compresa tra 140-320°N (quindi diretti da terra verso mare) forzano la dispersione del plume fluviale verso largo e, in estate, si presentano con una frequenza percentuale di accadimento del 36.8%. I venti rilevanti hanno direzione di provenienza compresa tra 225-255°N, caratteristica dovuta alla tipica conformazione della valle del Pescara lungo la quale si incanalano i venti provenienti da terra;
- I venti caratterizzati da una direzione di provenienza compresa tra 50-140°N forzano la dispersione del plume fluviale verso il tratto di litorale ubicato a Nord del porto (litorale di Pescara) e si presentano con una frequenza percentuale di accadimento, relativa al periodo estivo, del 17.5%;
- I venti caratterizzati da una direzione di provenienza compresa tra 320-50°N tendono a far disperdere le acque del plume fluviale verso il tratto di litorale ubicato a Sud del porto e si presentano con una frequenza percentuale di accadimento, relativa al periodo estivo, del 20.9%;
- Il 24.8% degli stati di vento sono caratterizzati da una velocità inferiore ai 4 nodi (calme di vento). In questi casi la dispersione del plume fluviale è indipendente dalle condizioni anemometriche del paraggio ed è governato solo dalle caratteristiche intrinseche del getto fluviale. A tal proposito, è opportuno ricordare che, in condizioni di magra, la velocità media di efflusso è prossima a *1 m/sec*.

Nel lavoro di De Girolamo[9] è stato quindi messo in evidenza che le condizioni più sfavorevoli per la balneazione (quelle che deflettono il pennacchio fluviale verso costa) si verificano nelle ore diurne, con massimi in corrispondenza delle direzioni comprese tra i 10 e 120° N.

1.5 Analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso

Nel citato lavoro [9] è stata effettuata anche una elaborazione statistica delle misure ondametriche rilevate dalla boa di Ortona, al fine di valutare l'entità degli eventi estremi di moto ondoso. In tale studio è stato utilizzato il metodo POT che consiste nel prendere in esame il solo valore massimo di altezza d'onda (valore di picco) che si verifica nell'ambito di una singola mareggiata. L'individuazione di ciascuna mareggiata nell'ambito della serie storica è stata effettuata introducendo una soglia di altezza d'onda e considerando che il singolo evento (mareggiata) abbia inizio quando l'altezza d'onda significativa superi per la prima volta il valore di soglia prestabilito e termini quando l'altezza d'onda significativa assume per la prima volta un valore inferiore a quello di soglia oppure quando si verifica un forte scarto della direzione del moto ondoso. Gli stati di mare caratterizzati da una altezza d'onda significativa (Hs) superiore alla soglia individuata sono stati oggetto di una successiva elaborazione statistica al fine di ricavare, mediante una regolarizzazione degli eventi estremi secondo note funzioni probabilistiche, le caratteristiche del moto ondoso da associare ad assegnati tempi di ritorno.

I risultati dello studio, con suddivisione dei dati di moto ondoso registrati nei settori di traversia principale A (ricadente tra le direzioni 320°N e 50°N) e secondario B (ricadente tra le direzioni 50°N e 130°N) sono evidenziati nel seguente diagramma polare delle mareggiate con altezza d'onda superiore a *2 m*:

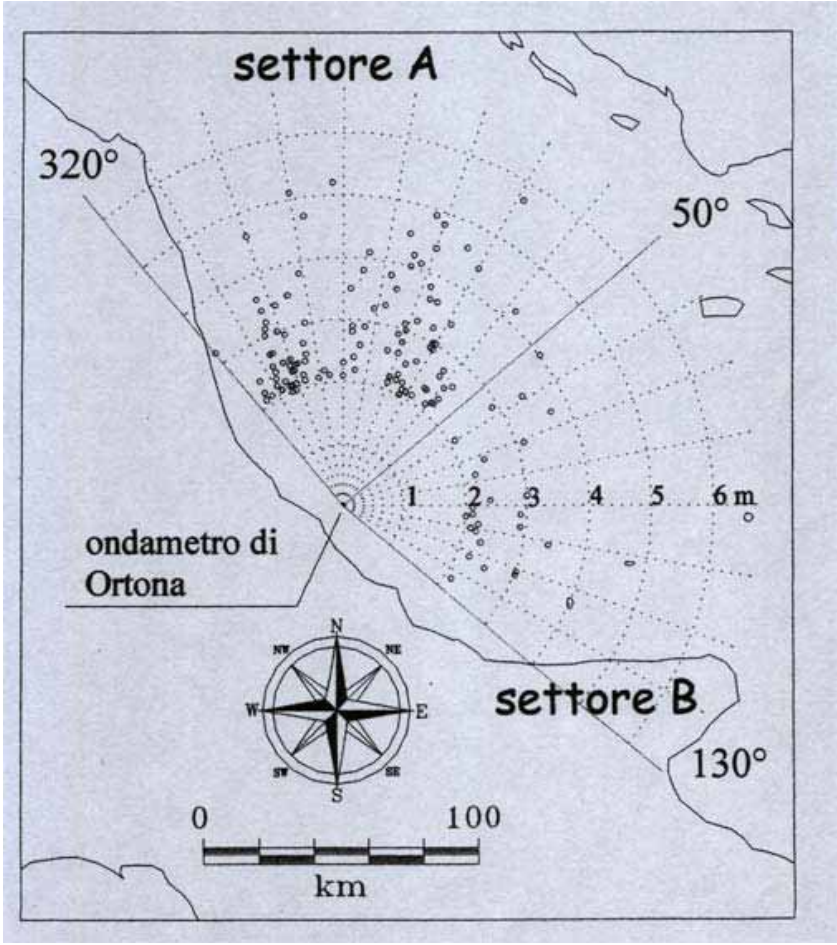


Fig. 1.1: diagramma polare delle mareggiate, registrate dalla boa di Ortona, con altezza d'onda H > 2 m.

Hs (m)	Tr (anni)	Hs (m)	Tr (anni)
2,29	0,08	3,70	0,37
2,40	0,08	3,80	0,46
2,50	0,09	4,00	0,52
2,60	0,11	4,09	0,59
2,70	0,12	4,20	0,7
2,80	0,12	4,40	0,84
2,90	0,14	4,50	0,94
3,00	0,18	4,59	1,23
3,10	0,19	4,70	1,45
3,20	0,23	4,80	1,77
3,30	0,24	4,90	2,26
3,40	0,28	5,09	3,14
3,50	0,3	5,20	5,16
3,60	0,36	5,70	14,37

Tabella 1.2: Valori dell'altezza d'onda significativa Hs e del corrispondente tempo *di ritorno Tr per il settore A*

1.6 Caratteristiche del moto ondoso a riva

Infine, nel menzionato lavoro [9] sono stati ricavati i dati di moto ondoso a riva. Il metodo seguito per ottenere le condizioni di moto ondoso in costa si è basato sull'applicazione del modello di

rifrazione inversa spettrale Merope. La propagazione inversa spettrale della serie storica è stata eseguita rispetto ad un punto antistante al porto di Pescara e ubicato sulla batimetrica 8,0 m sul l.m.m.. La serie storica propagata a riva è stata quindi analizzata per definire il clima di moto ondoso in prossimità delle opere. Tale serie storica ha permesso di ricostruire le "rose" climatiche di moto ondoso in costa per il paraggio in esame. Di seguito viene riportato un confronto tra la rosa annuale ottenuta al largo di Pescara e quella ottenuta in costa. Dai due grafici risulta chiaro l'effetto di rifrazione indotto dalla batimetria che tende a restringere in costa il settore di provenienza del moto ondoso.

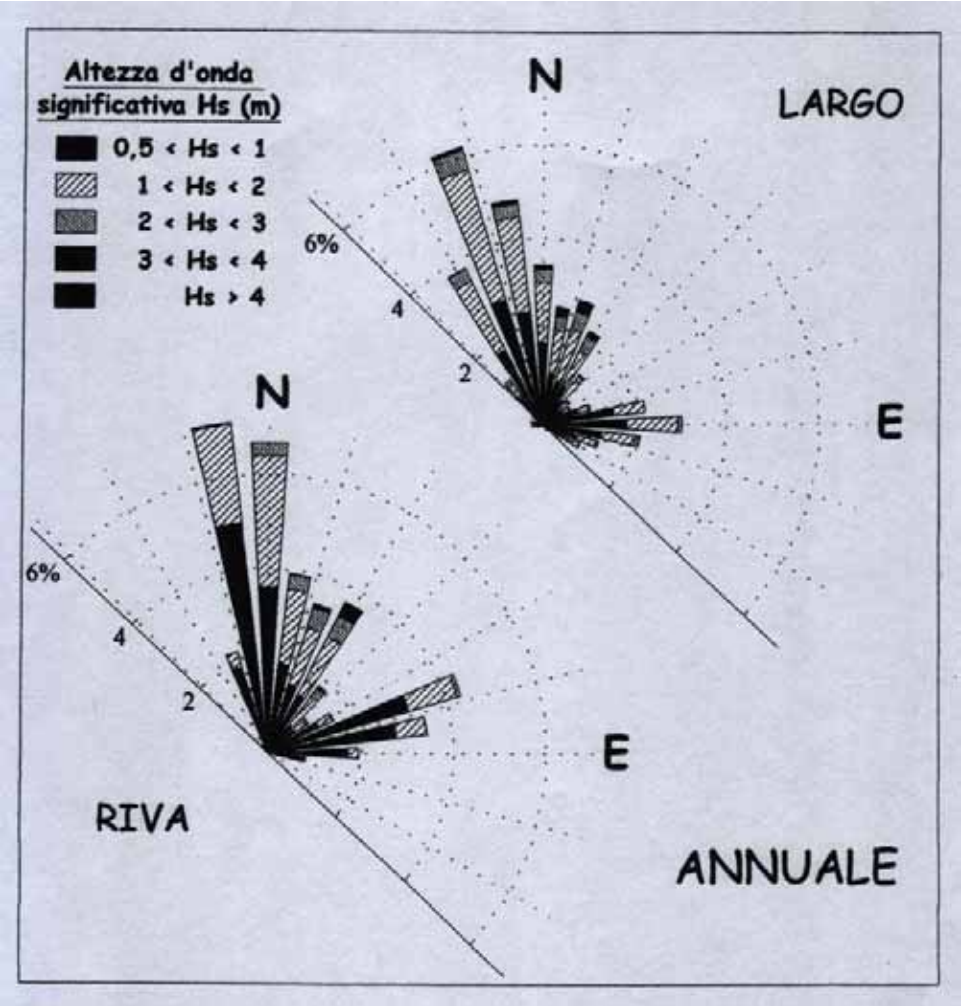


Fig. 1.2: rose della distribuzione direzionale annuale degli eventi di moto ondoso al largo e in prossimità della costa.

2. Gli ambienti di estuario

2.1 Generalità

Gli ambienti di estuario (acque di transizione) differiscono tra loro sia per la geometria delle rive e del fondo sia per le caratteristiche della circolazione, soggette a variabilità nello spazio e nel tempo a causa delle maree, dei cambiamenti di portata del fiume e delle condizioni meteorologiche.

L'interazione idrodinamica fra acque fluviali e acque marine si manifesta principalmente tramite l'effetto di espansione del flusso e l'effetto di galleggiamento dovuto alla differenza di densità tra acque dolci e acque salate. La corrente, abbandonando il canale, continua a fluire nella massa idrica del bacino per inerzia e si espande; i filetti turbolenti si allontanano tra loro e, ai margini della corrente, si ha la mescolanza diffusiva con l'acqua marina circostante. Si dissipa così energia: diminuiscono la velocità e la capacità di trasporto ed il sedimento grossolano sedimenta. Il carico di fondo tende a concentrarsi sull'asse del canale, dove si forma una secca sabbiosa, mentre la parte più grossolana del carico sospeso forma degli argini subacquei ai lati. In genere, la secca tende a far dividere la corrente in due rami. Nel caso in esame, la realizzazione di argini caratterizzati da bassa scabrezza, con restringimento della sezione, ha fatto sì che la velocità sia piuttosto elevata in corrispondenza della foce e la deposizione del sedimento avviene prevalentemente nell'ambito dell'avamporto.

Anche se carica di sedimento, l'acqua dolce galleggia sull'acqua di mare più densa e scorre in superficie, formando pennacchi torbidi che perdono la loro individualità verso il largo molto gradualmente. La progressiva mescolanza di acqua dolce e salata consente la *flocculazione* delle particelle colloidali.

A ridosso della barra di foce abbiamo così una stratificazione di densità, con un cuneo di acqua dolce in superficie che si assottiglia verso il mare e un sottostante *cuneo salino* che termina verso terra. Gli spessori e le posizioni reciproche tra i due cunei variano a seconda del rapporto tra portata fluviale e livello di marea. Quanto maggiore è la differenza di densità tra le due masse idriche tanto più è facilmente individuabile il cuneo salino.

Come tutti i movimenti dei fluidi, anche le correnti che hanno origine negli ambienti di transizione sono governate dal principio di continuità, secondo il quale una massa d'acqua spostata dalla sua giacitura non può lasciare vuoti dietro di sé: uscendo da un determinato intorno spaziale, una particella liquida viene immediatamente sostituita da un'altra per cui, allo spostamento di masse d'acqua da un determinato livello, per esempio quello superficiale, deve corrispondere un richiamo d'acqua di pari quantità dagli strati circostanti e/o da quelli profondi. In tal modo si generano le correnti di compensazione che possono avere anche il carattere di "contro correnti" (rispetto a quelle superficiali) e che sono controllate nel loro innescarsi e nel loro evolversi dalla morfologia e dalle strutture termiche e saline più importanti, quali le stratificazioni stagionali.

La classificazione degli estuari si basa sulle caratteristiche dei principali fattori di diffusione delle acque effluenti e della successiva dispersione dei sedimenti da esse mobilitati, mettendoli in relazione con l'intensità di tre importanti fattori, quali:

a) inerzia del flusso d'acqua effluente e diffusione turbolenta (dinamica del getto);
b) attrito tra effluente e fondo in prossimità della bocca di foce;
c) galleggiamento, dovuto alla differenza di densità tra il flusso di acqua dolce su quella salata.

L'acqua di provenienza fluviale, in generale meno densa e più fredda, fluisce su quella di mare, salata, più densa e più calda, generando la stratificazione di masse d'acqua a diversa salinità e temperatura. Nel caso in cui il cuneo salino appare ben sviluppato il flusso dell'effluente risulta essere isolato dagli effetti indotti dall'attrito con il fondo. In tal modo l'effetto del galleggiamento ha la meglio sul mescolamento verticale e l'effluente tende a scorrere su di un'ampia area, con uno spessore che si riduce man mano che ci si allontana dalla bocca di foce. La diminuzione della

velocità dell'effluente è dovuta alla risalita dell'acqua di mare attraverso la regione di interfaccia che si trova tra le masse d'acqua a diversa densità. La densità all'interfaccia tra il plume ed il cuneo salino mostra generalmente un andamento irregolare dovuto alle onde interne.

Il fenomeno è governato dal numero di Froude legato alla gravità ridotta $Fr' = U^2/\gamma' gh'$, in cui:

U = velocità media del flusso di *outflow* nello strato superiore
g = accelerazione di gravità
h' = profondità dello strato superiore
$\gamma' = 1 - (\rho_1 / \rho_0)$
ρ_1 = densità dell'acqua fluviale
ρ_0 = densità dell'acqua salata

In particolare si ha che: al crescere di Fr' dominano le forze inerziali, accompagnate da un incremento della diffusione turbolenta; al decrescere di Fr' la stratificazione risulta più stabile, a parità di condizioni di marea.

2.2 Classificazione degli estuari in base al grado di mescolamento

Il fenomeno di stratificazione delle masse d'acqua a salinità diversa consente di classificare gli estuari in base al grado di mescolamento verticale delle acque e della distribuzione longitudinale della salinità. Si riconoscono essenzialmente tre tipi di estuario:

- Tipo "A": estuari non stratificati; il mescolamento interessa tutta la colonna d'acqua e la salinità decresce gradualmente procedendo dalla foce verso l'interno.
- Tipo "B": estuari parzialmente stratificati; è presente una stratificazione parziale di due masse d'acqua a salinità diversa. La salinità varia sia in superficie che in profondità, aumentando progressivamente mano a mano che si procede verso il mare aperto.
- Tipo "C": estuari stratificati; è presente una marcata, stabile stratificazione e le caratteristiche delle masse d'acqua superficiale e di quelle profonde sono molto differenti. Il mescolamento delle acque continentali con le acque marine avviene in una fascia superficiale molto ristretta lungo tutto l'estuario così che, mentre nello strato superficiale la salinità aumenta progressivamente nella direzione del mare, nello strato profondo rimane costante con valori prossimi a quelli marini.

Un numero adimensionale che definisce i tre gradi di mescolamento è il seguente:

$$E_D = \frac{P_T Fr^2}{Q_f T}$$

nella quale: P_t è il prisma di marea (volume di acqua marina che entra nell'estuario durante l'alta marea); Q_f è la portata fluviale; T è il periodo di marea; Fr è il numero di Froude, definito in termini di velocità massima all'altezza della bocca, profondità media e accelerazione di gravità. Si ha che:

caso "A" $10 \leq E_D$
caso "B" $1 < E_D < 10$
caso "C" $E_D \leq 1$

I tre tipi di stratificazione possono presentarsi in uno stesso estuario in tempi diversi, in funzione delle variazioni della portata fluviale. Nel caso in esame, almeno durante il periodo estivo, sembra ragionevole ipotizzare una situazione di tipo "C", anche se al momento non sono disponibili dati completi ed esaurienti.

Se si analizza una tipica sezione trasversale di un estuario stratificato o parzialmente stratificato, si nota che le linee di uguale salinità pendono con la parte superiore verso il mare e

tendono all'orizzontale procedendo dalla bocca di foce verso il largo; la pendenza delle isolinee implica un gradiente di pressione che, in assenza di altre forze, genera una corrente che tende a disporre le isolinee lungo l'orizzontale.

La tipica circolazione estuarina è caratterizzata da una corrente di superficie diretta verso il mare e da una di fondo diretta verso terra. I flussi interni che sono guidati da variazioni di densità danno origine alla così detta circolazione baroclina, a differenza della circolazione barotropica che si presenta in flussi a densità costante, o, più in generale, quando il gradiente di densità risulta parallelo al gradiente di pressione nel fluido.

Lo stress del vento può andare a favore o opporsi alle correnti di densità. Fenomeni di "down-welling" sono favoriti quando il vento forza nella stessa direzione la regione dove vi sono le correnti costiere indotte dal plume, mentre fenomeni di "up-welling" sono favoriti dal vento che spira in direzione opposta alla direzione della corrente costiera.

3. L'indagine sperimentale: aspetti metodologici

3.1 Generalità

L'impianto sperimentale dell'APAT è ampiamente descritto nel precedente rapporto tecnico-scientifico [6], nel quale sono illustrati e discussi i dati ottenuti relativamente ad una configurazione semplificata del porto di Pescara, opportunamente studiata al fine di rappresentare adeguatamente i fenomeni idrodinamici in gioco. I risultati ottenuti in questo precedente studio si riferiscono inoltre al caso di fluido omogeneo, trascurando quindi gli effetti di galleggiamento delle acque fluviali sulle acque marine salate. Queste approssimazioni (geometria semplificata e densità uniforme) potevano essere considerate sufficienti in quanto lo scopo della precedente attività era quello di analizzare gli aspetti di interazione getto-parete, di natura essenzialmente barotropica, al fine di valutare gli effetti ambientali del molo di levante e compiere analisi preliminari in merito agli interventi mitigatori per quanto concerne gli effetti ambientali della diga foranea.

L'obiettivo del presente lavoro è invece più preciso: si tratta di prospettare una rosa di ipotesi di soluzioni operative. Allo scopo di ottenere informazioni più accurate, è stato quindi realizzato un modello in scala del porto di Pescara (1:1000 sul piano orizzontale e 1:100 lungo la direzione verticale). Le strutture sono state realizzate in cemento e l'ambiente di estuario, caratterizzato dal mescolamento tra acque dolci e acque marine salate come illustrato nel precedente capitolo, è stato realizzato con 2 serbatoi di alimentazione del circuito idraulico. La geometria sul piano orizzontale è stata rispettata nel dettaglio, mentre per quanto concerne la batimetria è stato assunto per semplicità un fondale costante (*4 cm* nella scala di laboratorio). Questa semplificazione si giustifica tenendo conto che nel presente studio l'attenzione viene focalizzata sugli effetti di galleggiamento dovuti alla stratificazione salina. Si può ipotizzare che il fluido più denso, posto nello strato inferiore e quindi a stretto contatto con il fondo, sia animato da una dinamica più blanda rispetto al fluido sovrastante, che si comporta come un getto galleggiante, risentendo quindi poco della batimetria; in effetti, in questo caso, ciò che interessa è proprio il comportamento idrodinamico dello strato superiore, influenzato dalla batimetria solo indirettamente, tramite l'interazione con il fluido dello strato sottostante. A proposito degli effetti di galleggiamento, è opportuno precisare che le acque marine sono più pesanti delle acque fluviali a causa della salinità, nonostante le acque del fiume siano più fredde, soprattutto in estate, raggiungendo escursioni termiche rispetto alle acque marine costiere fino a 10°. La componente di salinità, infatti, modifica la densità dell'acqua in misura maggiore rispetto alle variazioni di temperatura.

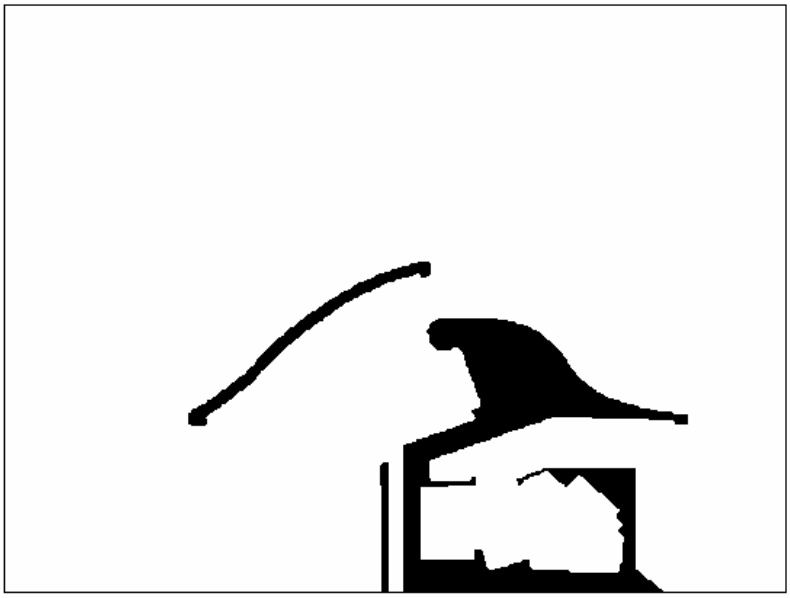


Figura 3.1. Modello fisico del porto di Pescara nella vasca di prova del laboratorio APAT.

In figura 3.1 viene rappresentato il modello inserito nella vasca di prova, di dimensioni *2x1.5 m*: si può osservare come le dimensioni del modello del porto siano state scelte in maniera che la parete sinistra della vasca (NO) non sia troppo vicina alle opere. La parete destra è vicina alla estremità del porto turistico, sormontato dalla mole del molo di levante, ma la struttura del flusso in questa zona risulta di scarso interesse, in quanto il molo di levante devia decisamente verso il largo la componente della portata fluviale che defluisce attraverso l'imboccatura Sud.

Il modello in scala 1:1000 risulta piccolo, tenendo conto dei problemi della similitudine di Reynolds, che, tipicamente, non viene rispettata negli esperimenti su modello fisico; particolari accorgimenti sono stati quindi utilizzati per assicurare condizioni di turbolenza sviluppata nel getto.

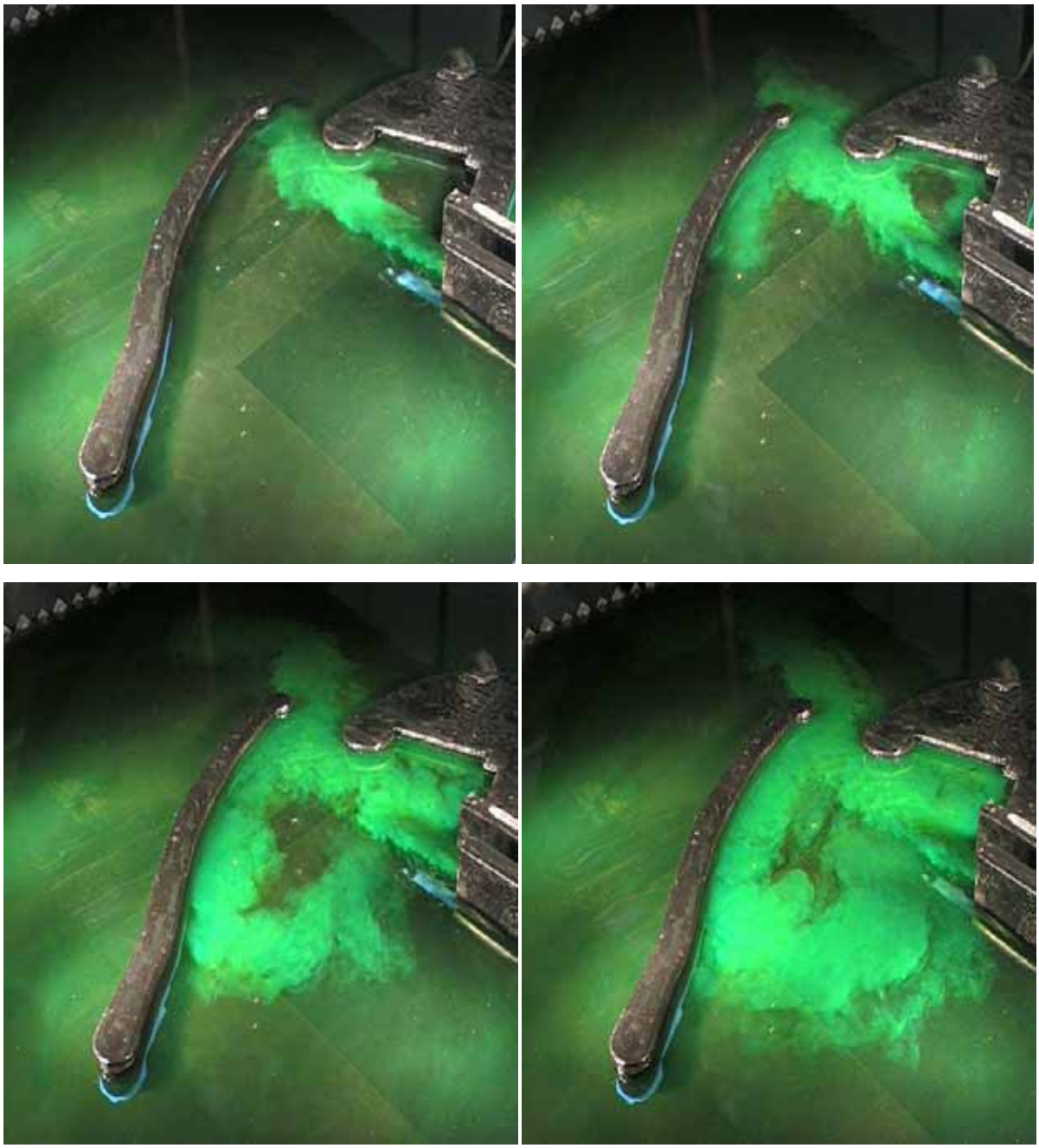


Figura 3.2a. Simulazione in laboratorio del deflusso fluviale nel porto di Pescara in assenza di stratificazione: sequenza temporale.

Le figure 3.2a e 3.2b mostrano rispettivamente la simulazione in laboratorio e con il modello teorico-numerico APAT del deflusso fluviale nel porto di Pescara in assenza di stratificazione. In questo caso la vena fluida rimane compatta e la zona della diga foranea interessata dall'impatto con il getto fluviale è limitata (dell'ordine di *100 m* in scala reale). L'ottimo accordo tra soluzione numerica e modello fisico risulta evidente. In questo caso la portata è pari a 0.*3 l/sec*, con velocità media nel getto di *18.75 cm/sec* (con sezione *4x4 cm*); il numero di Reynolds corrispondente è *7500* e il numero di *Froude 0 .3*.

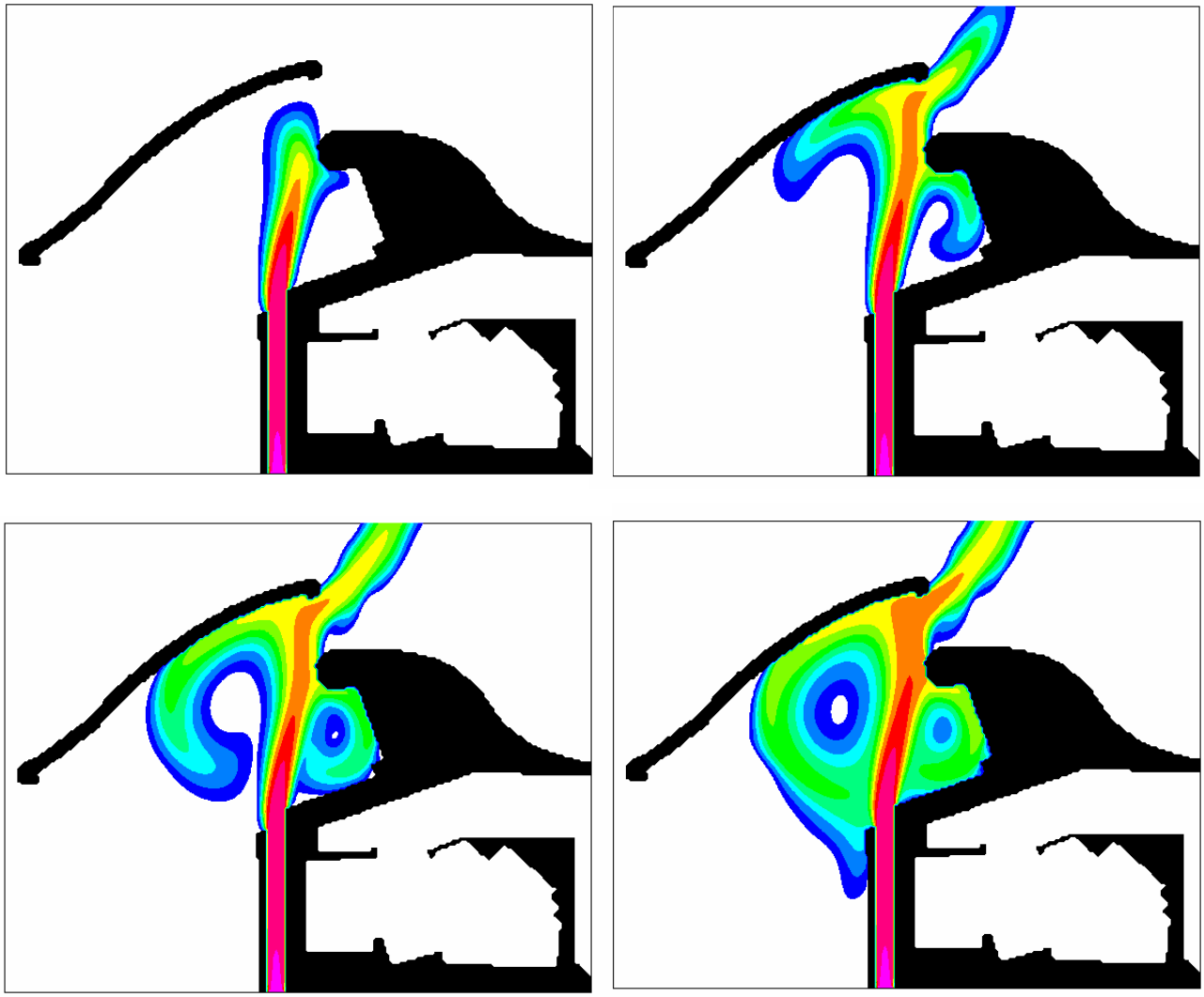


Figura 3.2b. Come in figura 3.2a: simulazione teorico-numerica
(modello "shallow water" SASHA sviluppato presso APAT).

Risultati teorico-numerici di questo tipo sono stati presentati e discussi nel precedente rapporto tecnico-scientifico APAT [6].

L'importanza degli aspetti di stratificazione, trascurati in tutti i precedenti studi sinora svolti sul porto di Pescara, è messa in evidenza dal confronto tra le figure 3.3a e 3.3b, che mostrano il comportamento di una foce in costa rettilinea in assenza di opere, rispettivamente in assenza e in presenza di galleggiamento. Nel primo caso (fluido omogeneo: foce di un fiume in un lago) la diffusione delle acque fluviali avviene attraverso la formazione di vortici lungo la superficie di contatto tra getto e fluido ambiente, che danno una forma complessivamente sinuosa al getto. Nel caso invece della foce in mare (figura 3.3b) le acque del fiume sono più leggere e galleggiano sulle acque marine salate dando luogo ad una stratificazione, secondo le modalità precedentemente

descritte: le strutture vorticose nel piano orizzontale sembrano scomparire e il flusso è caratterizzato da una espansione molto più ampia rispetto al caso precedente.

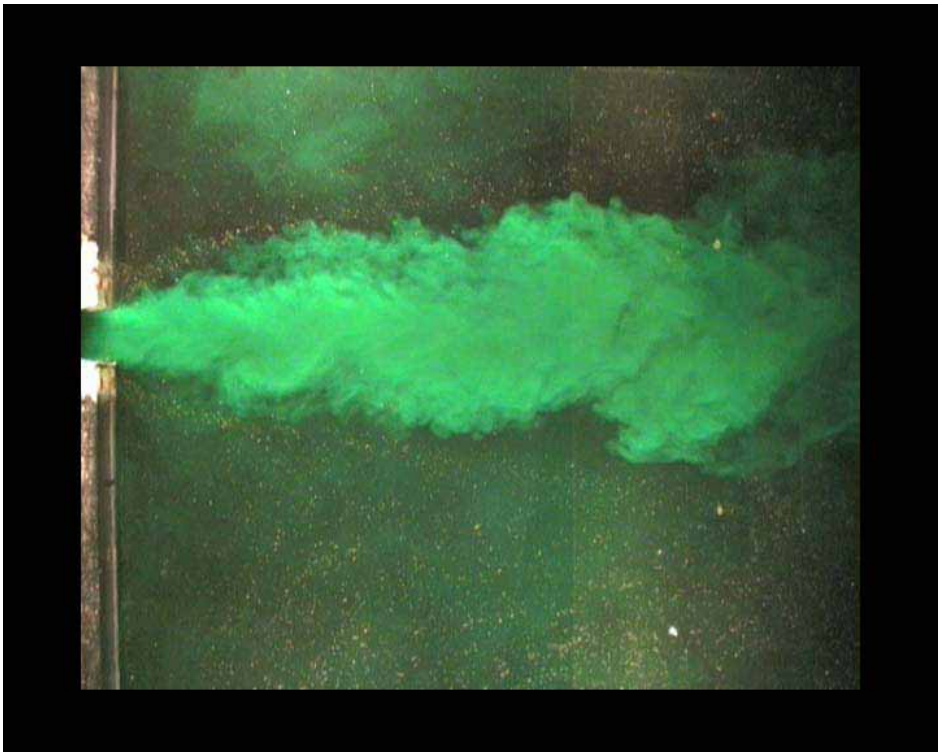


Figura 3.3a. Simulazione sperimentale di un getto in assenza di stratificazione (laboratorio APAT, costa rettilinea e batimetria costante).

Figura 3.3b. Come in figura 3.3a con stratificazione.

3.2 Prove in condizioni barocline

Per realizzare le prove della diffusione del getto tenendo conto della differenza di densità è stata inserita una soglia in corrispondenza della foce, allo scopo di sollevare il getto stesso ad una quota di 2 cm dal fondo ed evitare il mescolamento all'interno del canale di accesso, proteggendo quindi lo strato di acqua salata nella vasca e consentendo un più agevole controllo delle condizioni di prova. Oltre al numero di Reynolds (definito $\mathrm{Re} = Uh/\nu$ con U velocità media nel getto, h profondità dello strato di acqua dolce e ν viscosità cinematica del fluido) e al numero di Froude (definito $Fr = U/\sqrt{gh}$) è importante il numero di Froude definito mediante la gravità ridotta, $Fr' = U/\sqrt{g'h}$, nella quale $g' = g(\rho_0 - \rho_1)/\rho_0$, con ρ_0 densità dell'acqua salata e ρ_1 densità dell'acqua dolce; tale parametro governa il comportamento dell'interfaccia tra gli strati a diversa densità, come già illustrato nel precedente capitolo. Gli esperimenti sono stati svolti con una portata pari a *.08 l/sec*, (inferiore al valore utilizzato per il flusso barotropico descritto in figura 3.2a) con velocità media nel getto (che risulta di dimensioni ridotte, *4x2 cm*, a causa della presenza della soglia) *10 cm/sec* ; per quanto riguarda i corrispondenti parametri adimensionali: *Fr' = 1.61*, *Re = 2000*. Il numero di Reynolds è certamente basso, rispetto a quello del caso reale (pari a circa $2x10^6$), e questo è un tipico inconveniente di un laboratorio di modeste dimensioni. A questo proposito sono stati adottati degli accorgimenti per assicurare condizioni di turbolenza sviluppata nel getto. In queste prove si è comunque ritenuto opportuno privilegiare la similitudine idraulica legata al parametro *Fr'*; nel caso reale, ipotizzando *h=2m*, *U=1m/sec*, $g' = g(\rho_0 - \rho_1)/\rho_0 \cong .1924$ si ottiene quindi *Fr' = 1.61*; questi valori sono stati scelti sulla base di misure preliminari svolte in situ in collaborazione con l'ARTA Abruzzo, che necessitano comunque di ulteriori conferme.

Nella figura 3.4a viene illustrata una sequenza temporale relativa alla simulazione con la situazione attuale: porto canale con diga foranea e molo di levante. In questo caso l'esperimento è stato realizzato seguendo la seguente procedura (prova di tipo A):

1. l'impianto idraulico è dotato di 2 serbatoti di alimentazione (cfr [6]): il 1° viene riempito con acqua salata e il 2° con acqua dolce colorata con fluoresceina sodica (verde), con i rapporti tra le densità regolati in modo che risulti $g' = .1924$;
2. viene avviato il flusso utilizzando l'acqua salata e si raggiungono condizioni di regime;
3. si cambia istantaneamente l'alimentazione del circuito idraulico, passando dall'acqua salata a quella dolce colorata: il filmato che si ottiene descrive quindi la diffusione dell'acqua dolce in un ambiente costiero con salinità uniforme (assenza iniziale di stratificazione); naturalmente la ripresa, effettuata dall'alto, non è in grado di fornire alcuna indicazione sulla dinamica in atto negli strati profondi (acque salate).

In sintesi, la prova di tipo A riproduce il seguente scenario: diffusione delle acque fluviali dopo un evento di mareggiata (che distrugge la stratificazione e produce una distribuzione pressoché uniforme di salinità nelle acque marine costiere).

Nelle prime 4 immagini si osserva la I fase del fenomeno: la fase di espansione del getto, con trasformazione del flusso dalle condizioni barotropiche iniziali (riconoscibili nella prima immagine, non molto dissimile dalla prima della sequenza della figura 3.2a) a quelle barocline. In questa prima fase si verifica quindi una espansione pressoché radiale, e il fluido galleggiante mostra la tendenza ad occupare tutta la superficie della vasca. Nella seconda sequenza di immagini si osserva la II fase del fenomeno, allorquando il processo di espansione raggiunge una condizione di parziale equilibrio: l'acqua dolce ha completamente invaso la zona compresa tra la diga foranea e la costa, e il deflusso delle acque fluviali, evidenziato dalle particelle di legno, avviene in una zona molto più ristretta rispetto a quella interessata dalla presenza della stratificazione (evidenziata dal colorante). In sintesi, la prova di tipo A pone in risalto 2 fasi: la prima caratterizzata dalla espansione dell'acqua dolce nell'area circostante e la seconda caratterizzata da condizioni di

regime, in cui il deflusso delle acque fluviali in direzione Nord, come già messo in evidenza nel precedente studio [6], avviene in una zona ristretta aderente alla diga foranea.

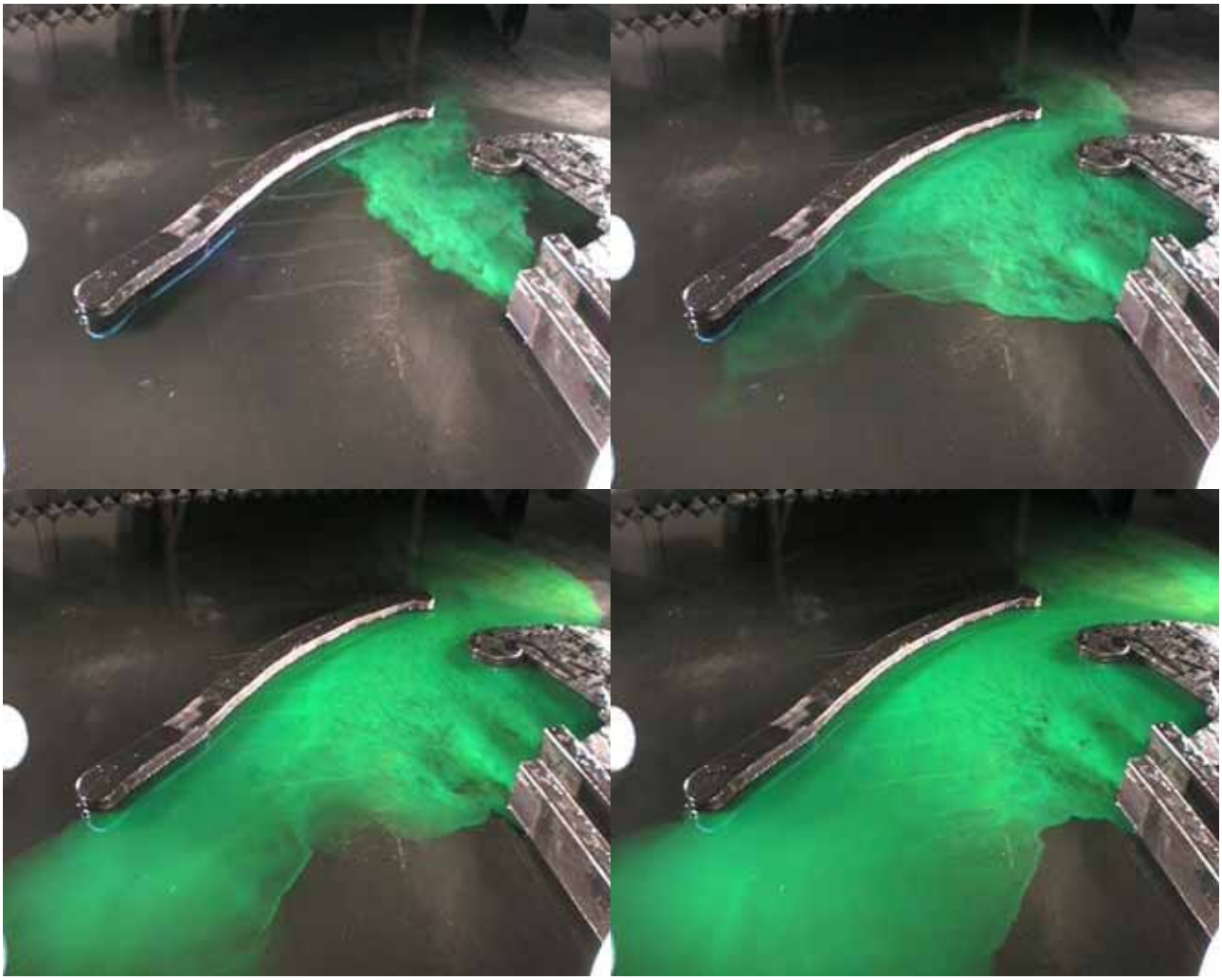


Figura 3.4a. Simulazione sperimentale della diffusione del getto fluviale (acque dolci) in mare (acque salate). Configurazione portuale attuale (protocollo A: sequenza temporale della fase iniziale di espansione del getto).

La descrizione dell'esperimento suggerisce alcuni commenti di natura ambientale:

- la presenza degli effetti del galleggiamento rende quasi impossibile la completa eliminazione della presenza di stratificazione (e quindi di acque dolci nello strato superficiale) nelle zone in prossimità della foce, a meno di rimuovere completamente la diga foranea; altrimenti, una eliminazione totale delle acque dolci dalla zona destinata alla balneazione può essere ottenuta mediante separazione fisica dell'aera portuale dal litorale Nord (infatti, come più volte ricordato nei precedenti studi [6], il litorale meridionale risulta sufficientemente schermato dalle opere marittime già presenti);
- la fase di espansione iniziale, legata al contenuto di energia potenziale di galleggiamento, si esaurisce in tempi brevi, in quanto la diffusione della stratificazione nella zona circostante bilancia molto rapidamente il gradiente idrostatico, che non è quindi in grado di alimentare una corrente continua verso Nord; la fase che si osserva in condizioni di locale equilibrio di stratificazione è caratterizzata dal contenuto di energia cinetica del getto fluviale che, anche in assenza di forzanti meteomarine, è in grado di alimentare la suddetta indesiderata corrente

lungo la costa settentrionale. A prescindere quindi dalla fase iniziale di espansione, l'obiettivo delle modifiche dell'assetto portuale è quello di eliminare la menzionata corrente continua: ciò equivale ad ottenere che il deflusso fluviale interessi il litorale settentrionale solo in presenza di eventi non-stazionari, ossia variazioni di portata, mareggiate, forzanti meteo-marine.

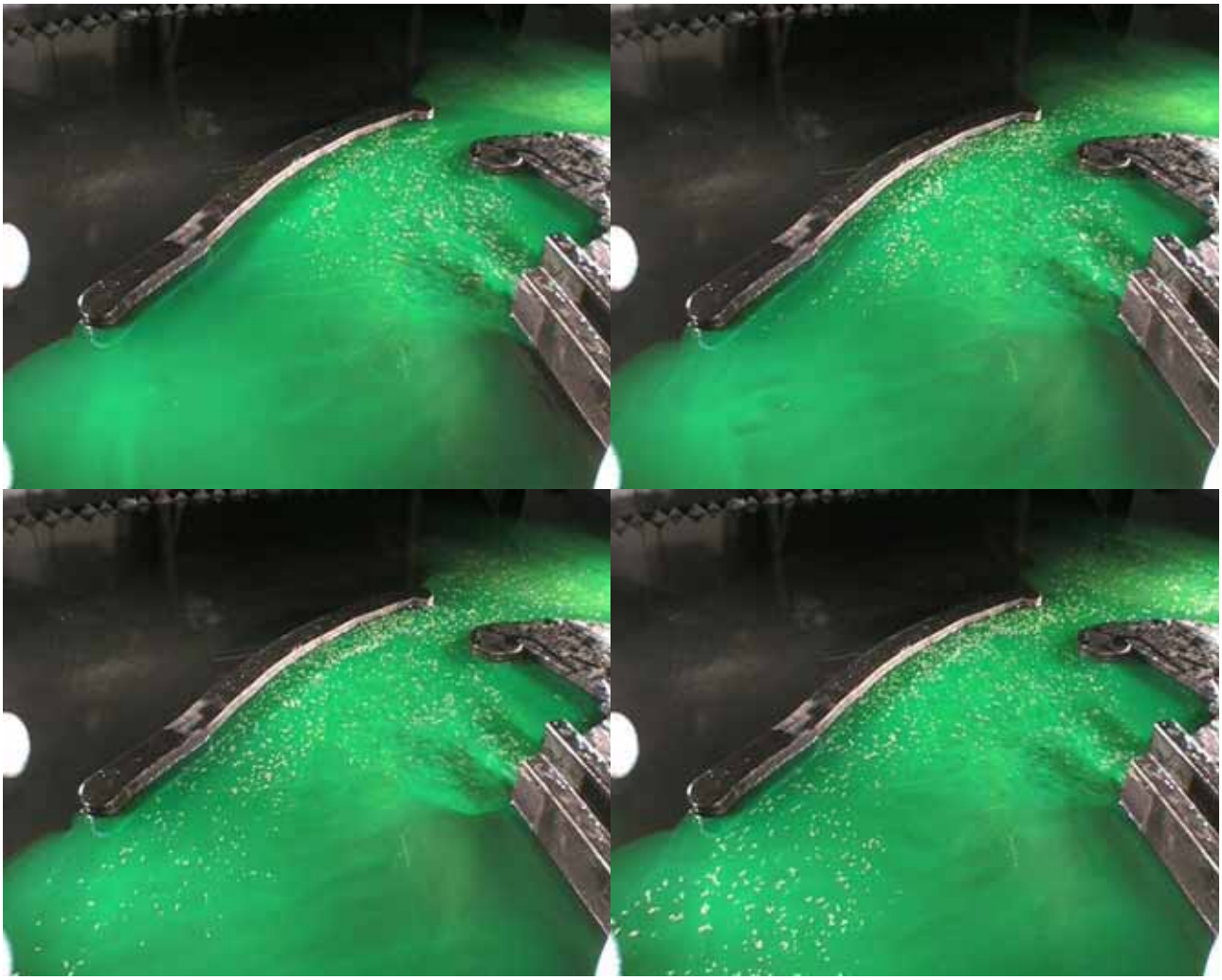


Figura 3.4a'. Come in figura 3.4a (protocollo A: sequenza temporale nella fase di regime).

Le considerazione appena svolte trovano maggior risalto nella sequenza della figura 3.4b, in cui viene riproposto lo scenario della figura 3.4a', ma con una diversa procedura sperimentale (prova di tipo B):

1. a differenza della prova di tipo A, il 2° serbatoio viene riempito con acqua dolce non colorata;
2. viene avviato il flusso utilizzando l'acqua salata e si raggiungono condizioni di regime;
3. si cambia istantaneamente l'alimentazione del circuito idraulico, passando dall'acqua salata a quella dolce, analogamente alla prova di tipo A; in questo caso però, poiché l'acqua dolce non è colorata, il fenomeno della espansione iniziale non risulta visibile;
4. dopo un certo tempo viene immesso nel circuito un colorante bianco; l'istante di immissione coincide con quello in cui vengono immesse le particelle di legno nella prova di tipo A descritta nella figura 3.4a'; il filmato che si ottiene descrive quindi la fase di regime, in cui si osserva la corrente costante, alimentata dall'energia cinetica del getto fluviale, diretta

verso Nord; anche in questo caso, naturalmente, la ripresa effettuata dall'alto non fornisce indicazioni sulla dinamica in atto negli strati profondi.

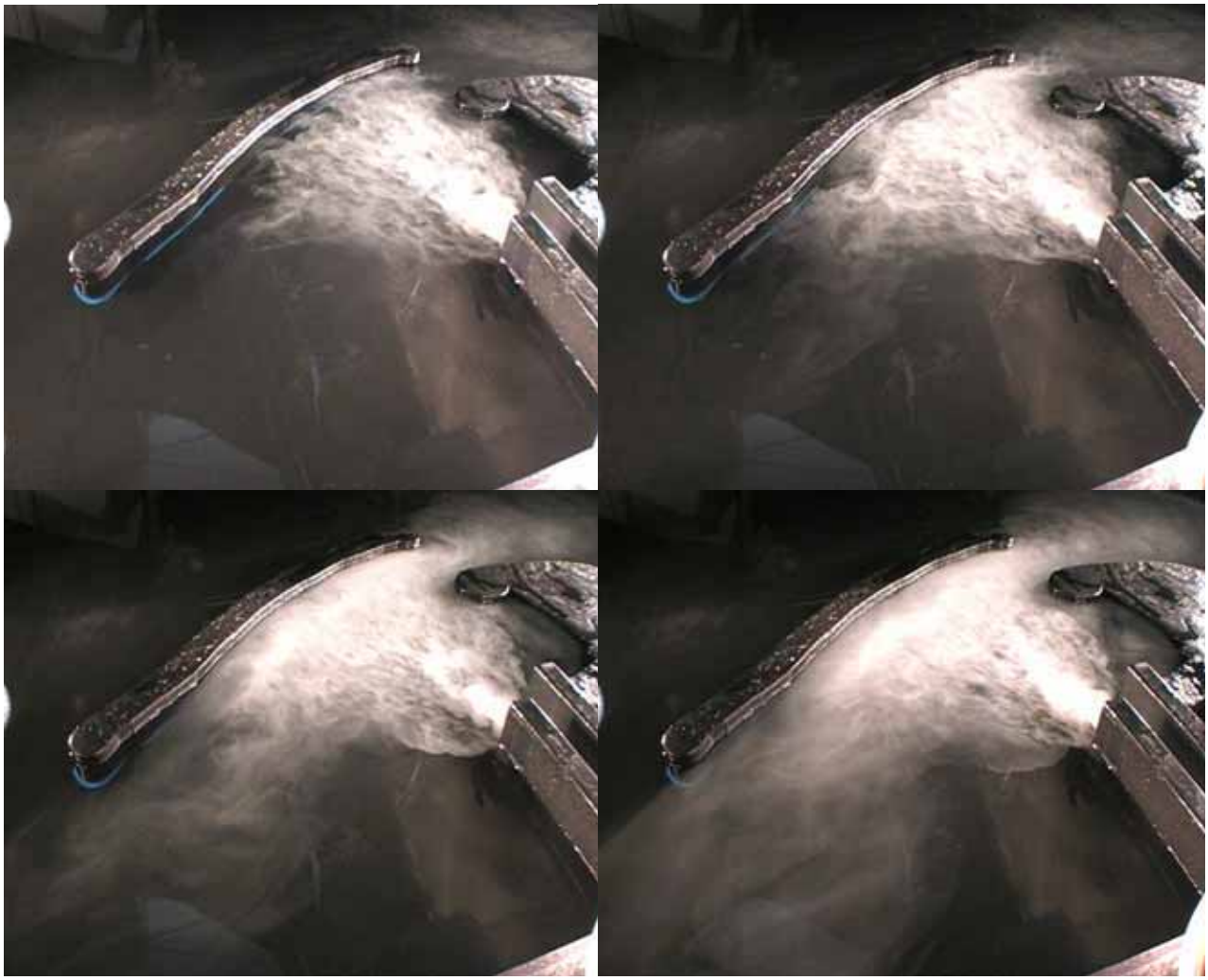


Figura 3.4b. Come in figura 3.4a' (protocollo B).

In sintesi, la prova di tipo B fornisce indicazioni sul flusso in condizioni di regime, e verrà prevalentemente utilizzata per descrivere le prove effettuate in questo studio, in quanto dà luogo a risultati più "leggibili" rispetto alla prova di tipo A, tenendo comunque presente che l'assenza del colorante bianco non è indice di corrispondente assenza di acqua dolce. La sua totale assenza, come già osservato in precedenza, può essere garantita solo da una separazione fisica della foce e della zona portuale dal litorale balneabile.

L'immagine della figura 3.5, ottenuta nell'ambito di un volo di ricognizione effettuato con l'elicottero del Comando dei Carabinieri per la Tutela dell'Ambiente, da confrontare con le figura 3.4a' e 3.4b, evidenzia l'efficacia della riproduzione in laboratorio del fenomeno reale. La tendenza del getto alla espansione in presenza di differenza di densità comporta che la vena fluida si allarghi notevolmente rispetto al caso barotropico illustrato nelle figure 3.2a e 3.2b. Di conseguenza, la zona della diga interessata dall'impatto con il getto fluviale è molto più ampia (circa *400 m*). Tale aspetto è stato tenuto nel dovuto conto nella elaborazione delle ipotesi preliminari di intervento. Nel prossimo capitolo vengono descritte le configurazioni elaborate sulla base dei risultati ottenuti in una serie preliminare di prove.

Figura 3.5. Foto aerea del deflusso fluviale nel porto di Pescara (immagine ottenuta dall'elicottero del Comando dei Carabinieri per la Tutela dell'Ambiente).

4. Descrizione delle ipotesi preliminari di intervento

4.1 Generalità

Le motivazioni del presente studio si riferiscono alla sostenibilità ambientale del porto di Pescara. Gli esperimenti, svolti secondo le modalità descritte nel capitolo precedente, sono tutti finalizzati allo studio di modifiche del lay-out portuale atte ad impedire la dispersione delle acque fluviali lungo la costa settentrionale, oggetto di fruizione turistica. Tuttavia, poiché ci si propone di formulare ipotesi preliminari di intervento, è inevitabile prendere in considerazione altri aspetti che tipicamente concorrono nella generalità degli studi prodromici alla elaborazione progettuale, in particolare gli aspetti legati al trasporto di sedimenti lungo la costa e alla sicurezza della navigazione.

Per quanto riguarda gli aspetti di natura sedimentologica, si ripropongono alcune considerazioni sviluppate in precedenti studi APAT [1,3]. L'equilibrio della fascia costiera situata nei pressi della foce del fiume Pescara è il risultato della concomitante azione di molteplici fattori tra loro interconnessi: interazione del moto ondoso con la morfologia costiera (opere marittime incluse) e conseguente generazione di correnti indotte dal frangimento, portata e contenuto di sedimento del fiume. Sino ai primi decenni del '900, periodo in cui venne costruito il porto-canale, i dati sinora reperiti mostrano una generale tendenza alla progradazione della linea di riva, seppure con brevi periodi di stasi o temporanee fasi di arretramento. Successivamente, in modo particolare dall'ultimo dopoguerra in poi, si rende manifesta un'azione erosiva del litorale, che culmina nella metà degli anni '70 con l'attacco delle strutture balneari e del lungomare a Nord del fiume, registrando tassi medi di arretramento annuo compresi fra *2* e *3 m*. La tendenza erosiva potrebbe essere stata condizionata dalle importanti modifiche introdotte nel bacino idrografico del fiume, con la costruzione di diverse dighe, la captazione delle acque in più punti del corso, l'estrazione di materiali inerti in alveo. Per arrestare tale arretramento verso la fine degli anni'70 venne costruita una prima serie di barriere frangiflutti sia a Nord che a Sud della foce. In pochi anni, sino al 1994, nelle aree retrostanti le barriere, si registra una rapida inversione di tendenza, con la spiaggia che guadagna spazio al ritmo di *5-6 m/anno*. Nei settori sprovvisti di difesa, invece, prosegue l'avanzamento del mare con tassi forse superiori a quelli precedenti. Verso la metà e la fine degli anni '80 viene realizzato il porto turistico, che intrappola i sedimenti trasportati verso NO dalla corrente di fondo, determinando il progressivo insabbiamento del settore a Sud della nuova struttura portuale, l'espansione dell'adiacente spiaggia nonché il contemporaneo arretramento del tratto contiguo protetto dalle barriere. La presenza della diga foranea (metà anni '90) ha determinato modifiche della batimetria nell'ambito dell'area portuale e lungo la costa a Nord di essa, con significativo ampliamento del tratto di spiaggia immediatamente adiacente al porto-canale; si notano variazioni del fondale sino a *2 m* ed oltre nell'area portuale, tali da compromettere la sicurezza delle manovre di ingresso da ambo i lati in condizioni di mareggiata. Nel contempo, si osserva un avanzamento della linea di riva di *70-80 m* dal 1994 al maggio 2000 nei primi *150-200 m* a Nord del molo del porto canale; è comunque necessario, in questo caso, ricordare la presenza delle barriere frangiflutto.

In ogni caso la dinamica descritta, ricordando anche l'arretramento della linea di riva a Sud, successivo alla realizzazione del porto turistico, pone in evidenza l'importanza del contributo dell'apporto solido del fiume e del trasporto litoraneo.

La realizzazione del molo di levante, come evidenziato in precedenti studi APAT [5,6], non porta come effetto collaterale un incremento della diffusione delle acque fluviali lungo la costa Nord, ma è possibile ipotizzare, sulla base della evoluzione recente della costa e dei fondali, un incremento delle esigenze di dragaggio del porto, con particolare riferimento all'area delimitata dalla nuova opera.

Per quanto concerne il problema della sicurezza della navigazione, come risulta dal voto del CS LLPP III Sez. n. 360 del 16/1/02:

"L'ampliamento del piazzale operativo proposto nel corso delle riunioni citate ed inserito in perizia si sviluppa a levante del piazzale del progetto base. ... La variante comporta uno sviluppo maggiore del molo di levante che passa dai 380 m ai 580 m della variante, con un raccordo più graduale con l'esistente molo del porto turistico e senza modificare né l'aggetto previsto del nuovo molo né la conformazione della nuova imboccatura portuale. Il maggior costo dovuto all'aumento delle quantità è però compensato dalla sostituzione della mantellata in tetrapodi con quella in blocchi Antifer già costruiti per la protezione del porto turistico e reimpiegati per il nuovo molo. L'ampliamento del piazzale rende possibile la realizzazione di una cassa di colmata molto ampia…"

Ma la modifica della forma del molo di levante ha reso più problematico l'ingresso in porto dall'imboccatura Sud durante eventi di mareggiata provenienti da Nord, a causa dell'orientamento e della maggiore estensione della superficie riflettente, rispetto al progetto originario, in cui il molo di levante termina sostanzialmente a punta. Infatti, la forma triangolare originaria è stata sostituita da una forma pressoché trapezoidale. Le difficoltà all'ingresso in presenza di mareggiate provenienti da Nord sembrano suggerire il mantenimento del doppio ingresso. Infatti le note della Capitaneria di Porto del 14/12/2001 prot. 41758 e del 10/02/2002 prot. 287 esprimono perplessità in merito alla proposta del pennello di ponente (discussa ampiamente in [6] per gli aspetti ambientali), poiché formulata in modo da non consentire l'accessibilità al porto da ambo i lati. In aggiunta, la delibera n. 262 seduta del 21/12/2001 del Comune di Pescara recita:*"le opere di mitigazione devono garantire prioritariamente la sicurezza dell'accessibilità da entrambi gli ingressi dell'area portuale"*.

In merito a quest'ultimo aspetto, in anticipo sulle riflessioni proposte nel seguito, si osserva che il mantenimento della doppia entrata non è l'unico modo possibile per garantire la sicurezza della navigazione. Si potrebbe, ad esempio, prolungare la diga foranea verso Sud; tale intervento:

1. riduce (o elimina) il problema della riflessione dell'onda sul molo di levante;
2. consente di effettuare le manovre di ingresso in corrispondenza di più alti fondali;
3. consente un ampliamento dell'imboccatura.

Di seguito vengono descritte le ipotesi di modifica della configurazione portuale provate nel laboratorio di fluidodinamica APAT. Caratteristica comune di tutte le ipotesi è il breve prolungamento del molo Nord, tale da ottenere un porto canale simmetrico. Ciò pone in evidenza le caratteristiche di espansione del getto baroclino: il prolungamento del molo Nord fa sì che parte dell'energia potenziale legata al galleggiamento venga impiegata nell'espansione della vena fluida verso Sud. Naturalmente non è possibile prolungare eccessivamente il molo Nord perché costituirebbe ostacolo per la navigazione.

4.2 *Ipotesi 1*

La prima ipotesi di soluzione consiste nella installazione di una panna galleggiante, con sommergenza *2 m*, dall'estremità del molo Nord fino al primo punto di inflessione, partendo da Nord, della diga foranea. In tal modo si intende ostacolare fortemente la dispersione superficiale verso le vicine spiagge delle acque dolci di provenienza fluviale, senza intaccare la struttura della diga. Negli esperimenti successivamente descritti sono state provate immersioni della barriera di *2.5* e *2 cm*, con un livello dello strato di acqua dolce nel canale di immissione pari a *2 cm*. Nel caso reale, anzitutto è necessario ripetere le misure di stratificazione già effettuate in precedenza, che fornivano un livello mai superiore a *1.5 m* per lo strato superficiale di acque dolci. Sembra comunque ragionevole proporre una barriera immersa fino a *2 m* di profondità. Il periodo di funzionamento della barriera è limitato alla stagione estiva, in cui le mareggiate intense sono poco probabili e le esigenze di navigazione sono limitate dal blocco della pesca. Le navi di grandi

dimensioni (traghetti), che tipicamente utilizzano l'entrata Sud, non sono ostacolate nelle manovre di entrata e uscita dalla barriera (Tavola n°1).

4.3 *Ipotesi 2*

In questa seconda ipotesi si è pensato di realizzare un'apertura nella diga foranea in corrispondenza del primo flesso partendo da Nord. Il varco si estende in direzione Sud, per una lunghezza di *50 m* misurati all'altezza del pelo dell'acqua, pari alla metà della lunghezza dell'onda significativa (L = *100 m*). Per ostacolare l'energia del moto ondoso in ingresso nell'apertura creata nella struttura si prevede l'utilizzo di una struttura sommersa permeabile. Inoltre, un deflettore di lunghezza pari a *100 m* argina il flusso in direzione Nord e invita le acque provenienti dal Pescara verso l'apertura descritta, permettendo così la fuoriuscita di parte di esse al di là della diga (Tavola n°2).

4.4 *Ipotesi 3*

In questa soluzione, identica alla precedente, l'unico elemento aggiuntivo è costituito dalla presenza, durante il periodo estivo, della panna galleggiante che congiunge l'estremità del molo Nord del porto canale con il deflettore a ridosso della diga foranea (Tavola n°3).

4.5 *Ipotesi 4*

Questa soluzione prevede la presenza del deflettore in corrispondenza del primo flesso che la diga foranea forma partendo da Nord, come nelle ipotesi 2 e 3. In questo caso però tale struttura, orientata verso il molo settentrionale del fiume Pescara, ha la funzione di deviare il deflusso delle acque fluviali direttamente verso la costa, in modo che possano essere successivamente intercettate e deviate verso il largo da un pennello radicato alla riva, a Nord della diga foranea. Tale pennello ha la funzione di separare fisicamente la costa settentrionale dall'area portuale e intercettare il trasporto solido proveniente da Nord. Questa struttura trasversale raggiunge una batimetrica di circa *5.5 m* e dista circa *200 m*, nella direzione parallela alla costa, dalla testata Nord della diga foranea (Tavola n°4).

4.6 *Ipotesi 5*

In aggiunta alla precedente soluzione in questo caso è previsto un varco di *50 m* praticato a ridosso del deflettore sulla diga foranea, secondo le modalià descritte nell'ipotesi 2. Tale apertura è stata prevista allo scopo di migliorare il deflusso verso il largo delle acque provenienti dal fiume, consentendo a parte di esse il drenaggio direttamente attraverso la diga (Tavola n°5).

4.7 *Ipotesi 6*

Questa soluzione prevede un'apertura del tutto uguale a quella dell'ipotesi precedente. In questo caso però, il tratto di diga foranea a Nord del varco è ruotato in senso anti-orario e indirizzato verso il porto canale, in modo da costituire ostacolo alle acque provenienti dal fiume. Il tratto di diga ruotato svolge quindi la funzione del deflettore descritto nelle ipotesi 4,5. In questa soluzione il pennello trasversale alla costa è più vicino alla foce del fiume, posto ad una distanza di *200 m* dal punto più settentrionale della diga foranea (Tavola n°6).

4.8 *Ipotesi 7*

Questa ipotesi modifica sostanzialmente la diga foranea a protezione del porto di Pescara. Infatti con questa soluzione si propone di aprire un grosso varco sulla struttura e di proteggere il nuovo ingresso ottenuto con due moli convergenti protesi verso il largo. I due moli ostacolano l'ingresso del moto ondoso incidente e facilitano l'ingresso delle imbarcazioni verso il porto (Tavola n°7).

4.9 *Ipotesi 8*

Con questa soluzione si propone di effettuare una modifica sulla diga foranea aprendo un varco da *200 m* intorno al punto di ristagno individuato nel precedente rapporto tecnico APAT [6]. La nuova

imboccatura viene protetta mediante una ulteriore diga posta più al largo, e con una lunghezza tale da proteggere il porto dalle onde provenienti dal settore di traversia principale (ricadente tra le direzioni 320°N e 50°N) e particolarmente dal settore caratterizzato dalle onde più elevate (ricadente tra le direzioni 20°N e 40°N) (Tavola n°8).

4.10 Ipotesi 9

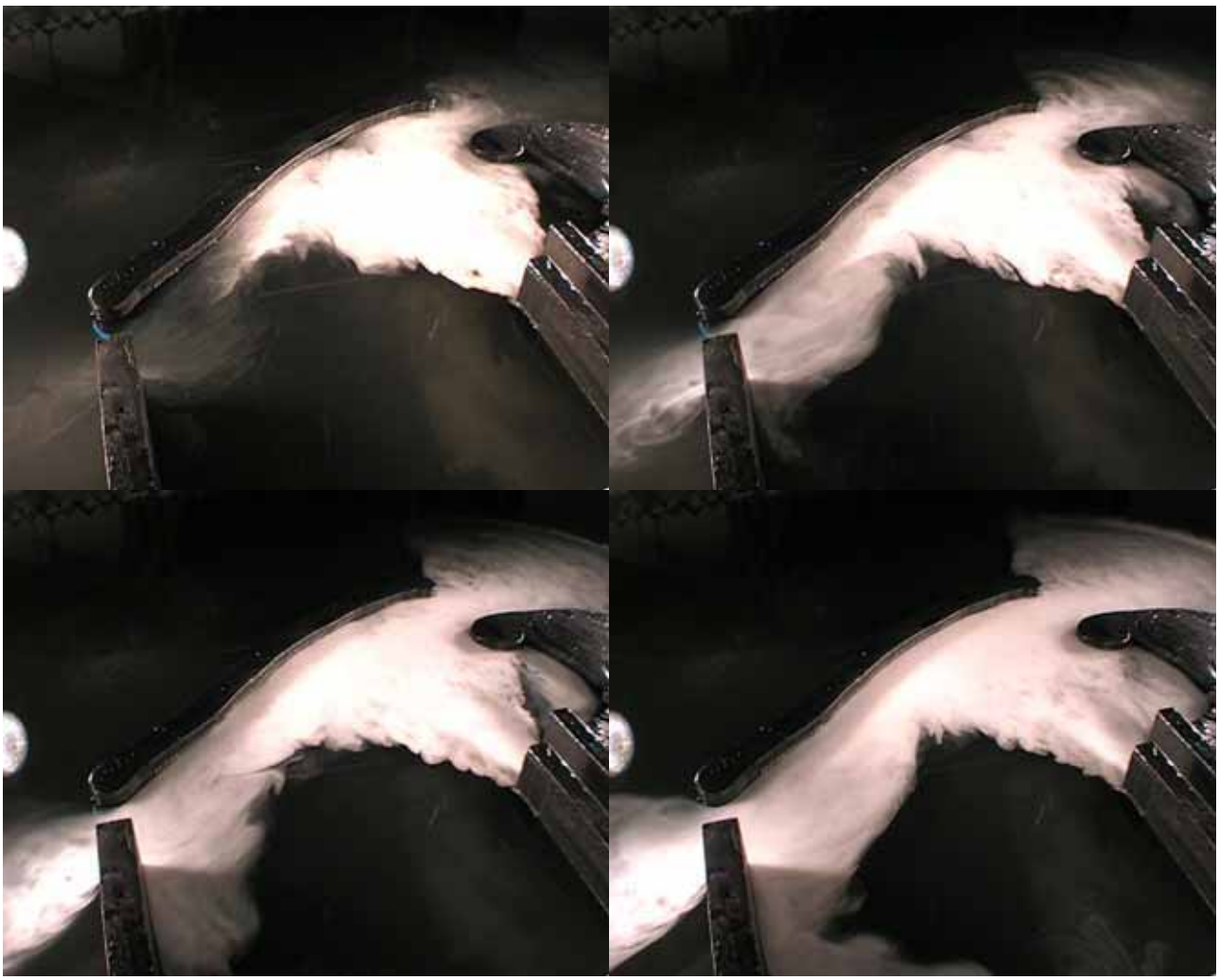
La soluzione n°9 consiste nel creare nella diga due varchi ampi *100 m*, distanziati della stessa lunghezza. Per proteggere l'area poruale, tali aperture vengono dotate di strutture permeabili di attenuazione del moto ondoso (Tavola n°9).

.

5. Prove sperimentali

5.1 Pennello di Ponente

Il primo esperimento si riferisce al comportamento idrodinamico dell'opera denominata "pennello di ponente", già discussa nel precedente rapporto tecnico-scientifico APAT [6]. In figura 5.1 viene mostrata una sequenza temporale della simulazione svolta secondo il protocollo B (descritto nel cap. 3): i risultati evidenziano che l'opera, così concepita, non può ottenere alcun effetto mitigatorio. Infatti la corrente alimentata dal deflusso fluviale rivolta a Nord risulta presente, e l'accumulo di acque dolci (e di quanto ad esse associato) in una zona protetta dal moto ondoso e quindi dal ricambio, non opportuno. Tuttavia, poiché i benefici di un'opera di questo tipo possono essere significativi, l'ipotesi del pennello è stata ripresa e modificata, come già indicato nel cap. 4.



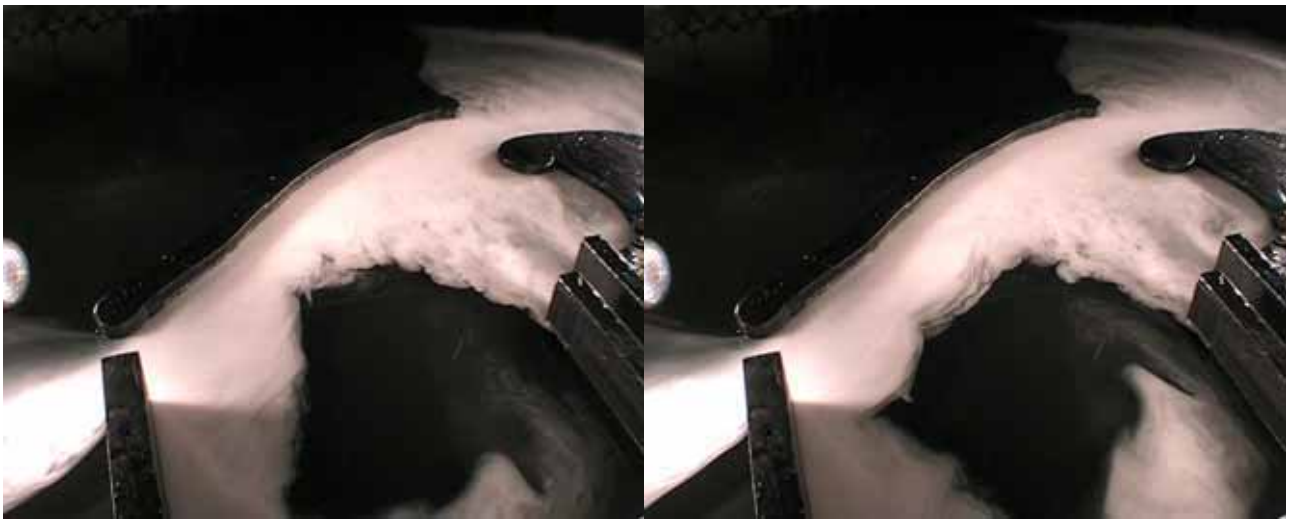


Figura 5.1 Simulazione sperimentale della diffusione del getto fluviale in mare . Configurazione portuale attuale con pennello di ponente (protocollo B).

5.2 Barriera mobile (ipotesi 1)

Una soluzione, che potrebbe essere realizzata in tempi molto brevi e costi minimi, può essere quella di fissare, durante il periodo estivo, una barriera mobile in materiale plastico (panna galleggiante), dalla punta del molo Nord del porto canale fino al punto di inflessione della diga foranea (figura 5.2.a). Questa struttura dovrebbe separare la zona portuale dalla regione costiera dedicata alla balneazione, dalla superficie del mare fino ad una profondità di circa *2 m*. La sequenza temporale della figura 5.2.b, con la barriera di protezione estesa fino a *2.5 cm* di profondità nella scala del modello, pari al *62.5 %* della profondità della vasca (ricordando che lo spessore del getto fluviale è pari a *2 cm*), dimostra una totale mancanza di deflusso verso Nord, mentre riducendo leggermente la profondità (*2 cm*, *50 %* della profondità della vasca) si osserva un deflusso pressoché trascurabile (figura 5.2.b).

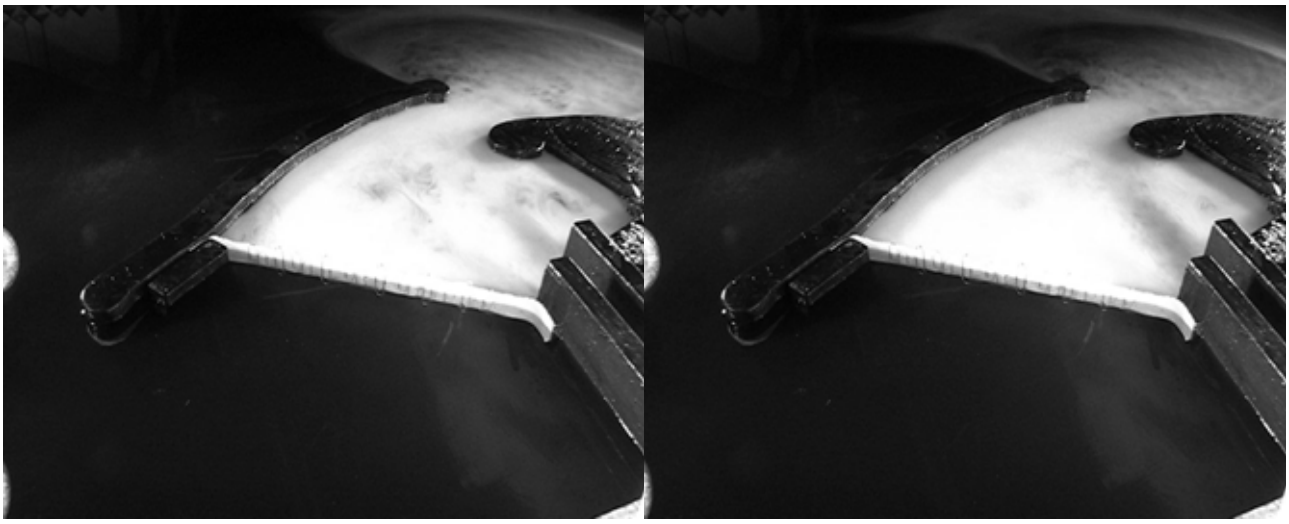


Figura 5.2.a Simulazione sperimentale della diffusione del getto fluviale in mare . Configurazione portuale attuale con panna galleggiante immersa fino a 2.5 cm (62.5 % della profondità della vasca). Protocollo B.

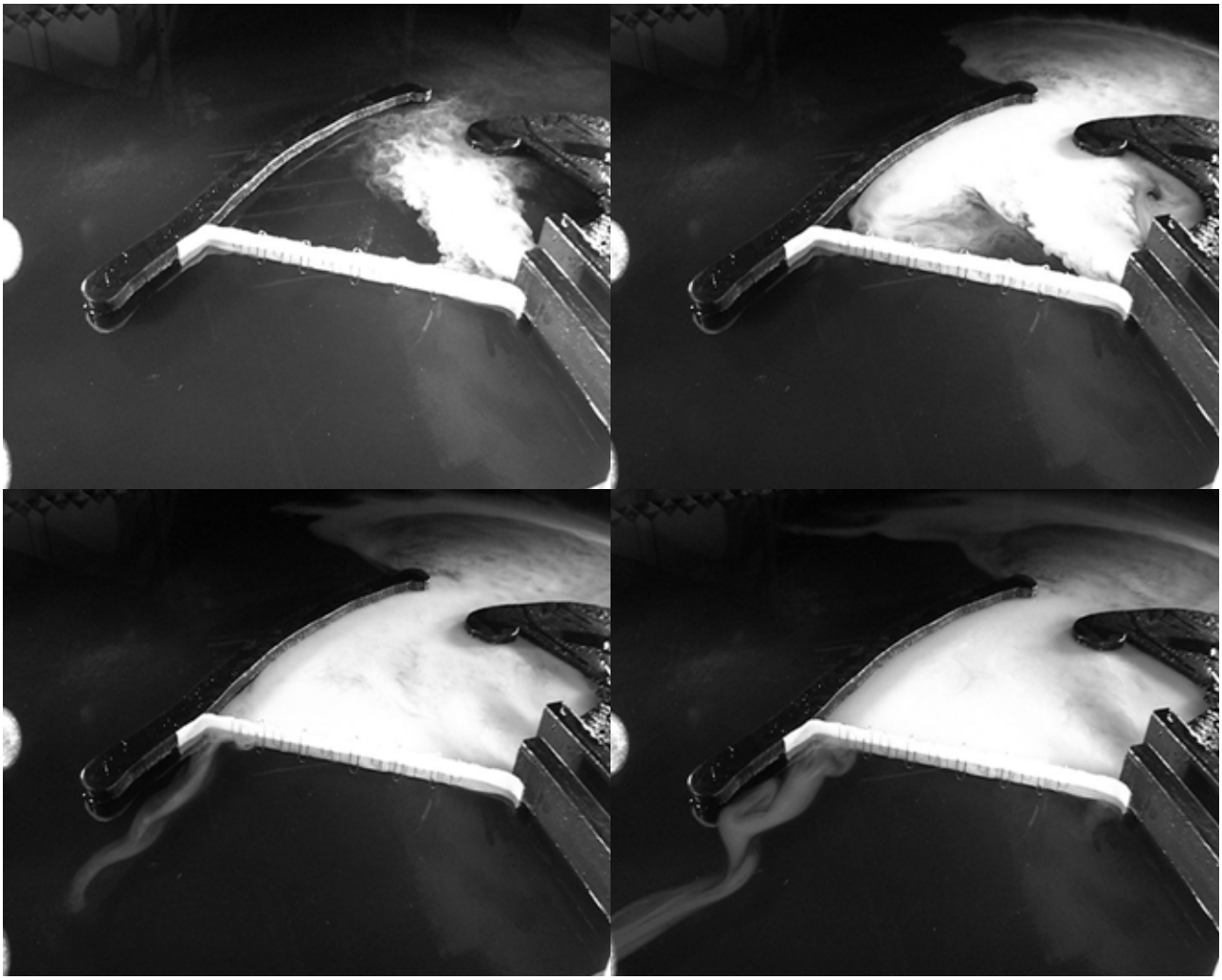


Figura 5.2.b.Come in figura 5.2.a, con panna galleggiante immersa fino a 2 cm (50 % della profondità della vasca). Protocollo B.

E' utile riproporre (figura 5.2.c) l'esperimento con barriera mobile con il protocollo A, che fornisce indicazioni più "severe" rispetto al protocollo B (cfr cap. 3). Il caso con profondità *2.5 cm*, che nell'esperimento in modalità B indica assenza totale di deflusso al di sotto della paratia, mostra in questo caso che una certa quantità di acqua dolce di provenienza fluviale passa al di sotto della barriera ma, una volta stabilito un equilibrio idrostatico, il deflusso cessa, e l'acqua dolce che attraversa la paratia non possiede l'energia cinetica per dare luogo ad una corrente diretta verso Nord. In altri termini, la panna galleggiante, anche se non chiude completamente l'apertura verso Nord, genera una perdita di energia tale da ostacolare in maniera efficace il deflusso delle acque fluviali verso la costa settentrionale.

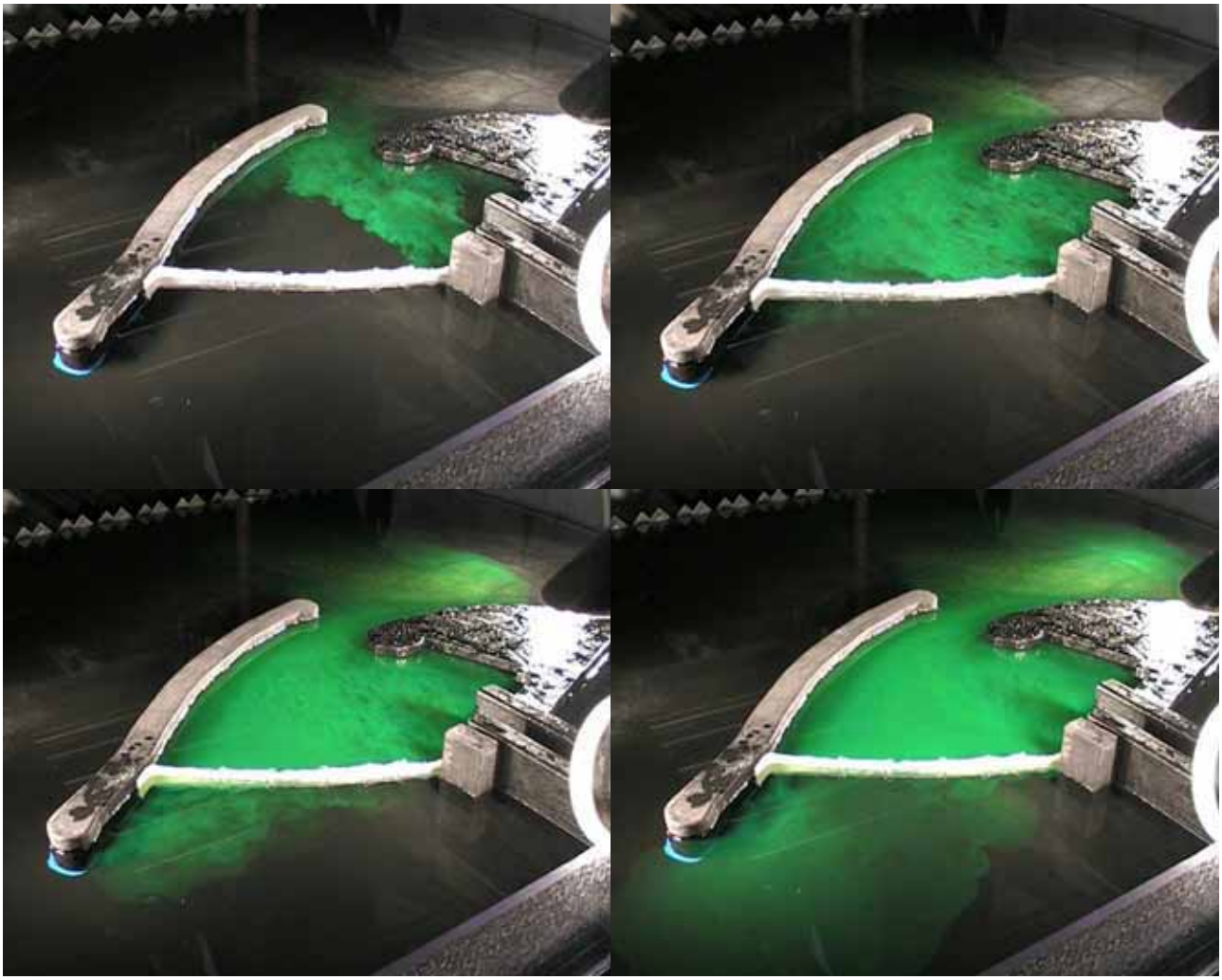


Figura 5.2.c. Dati come in figura 5.2.a. Protocollo A.

5.3 Apertura di modeste dimensioni nella diga foranea con deflettore (ipotesi 2,3)

La barriera mobile, per sua natura, è destinata all'uso durante il periodo estivo. Può essere utile integrare la sua funzione con modifiche della diga foranea di moderata entità, tali da non comprometterne le caratteristiche di protezione dal moto ondoso. Si tratta di realizzare un'apertura nella diga, all'altezza del flesso, di circa *50 m*, della profondità di *2 m*, accoppiata ad un'opera di modesto sviluppo (*100 m*), finalizzata a facilitare il drenaggio delle acque attraverso l'apertura. Questa soluzione, anche se da sola non è sufficiente a mitigare in maniera accettabile gli effetti ambientali della diga foranea, costituisce comunque una possibilità di ricambio per le acque portuali e un ostacolo per la corrente verso Nord che perde così intensità. Il confronto tra la sequenza di

figura 5.3a con quella di figura 3.4b mostra un ritardo non trascurabile nella propagazione verso Nord delle acque fluviali. Infatti, l'apertura nella diga consente un parziale deflusso verso il largo, mentre il deflettore, oltre a convogliare le acque attraverso l'apertura, genera una deviazione più marcata verso la costa e conseguente perdita di energia.

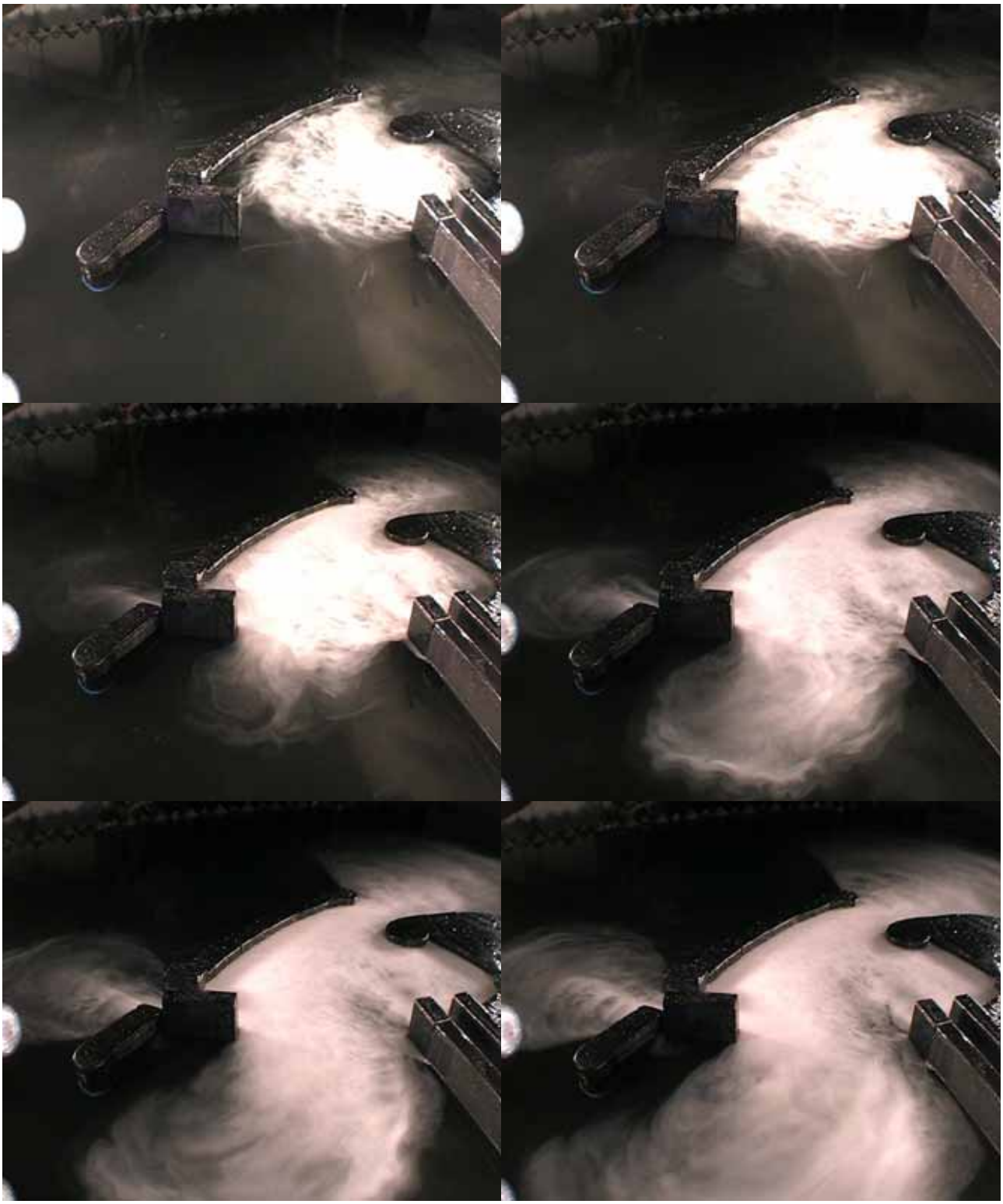


Figura 5.3a Configurazione portuale con apertura nella diga foranea di 5 cm, con soglia 2 cm (in scala al vero 50 m e 2 m) con deflettore lungo 100 m. Protocollo B.

Nella figura 5.3.b viene mostrato l'accoppiamento della soluzione proposta con la barriera mobile, secondo il protocollo A. Il confronto con la figura 5.2.c mostra il miglioramento di efficienza della panna galleggiante in presenza dell'apertura.

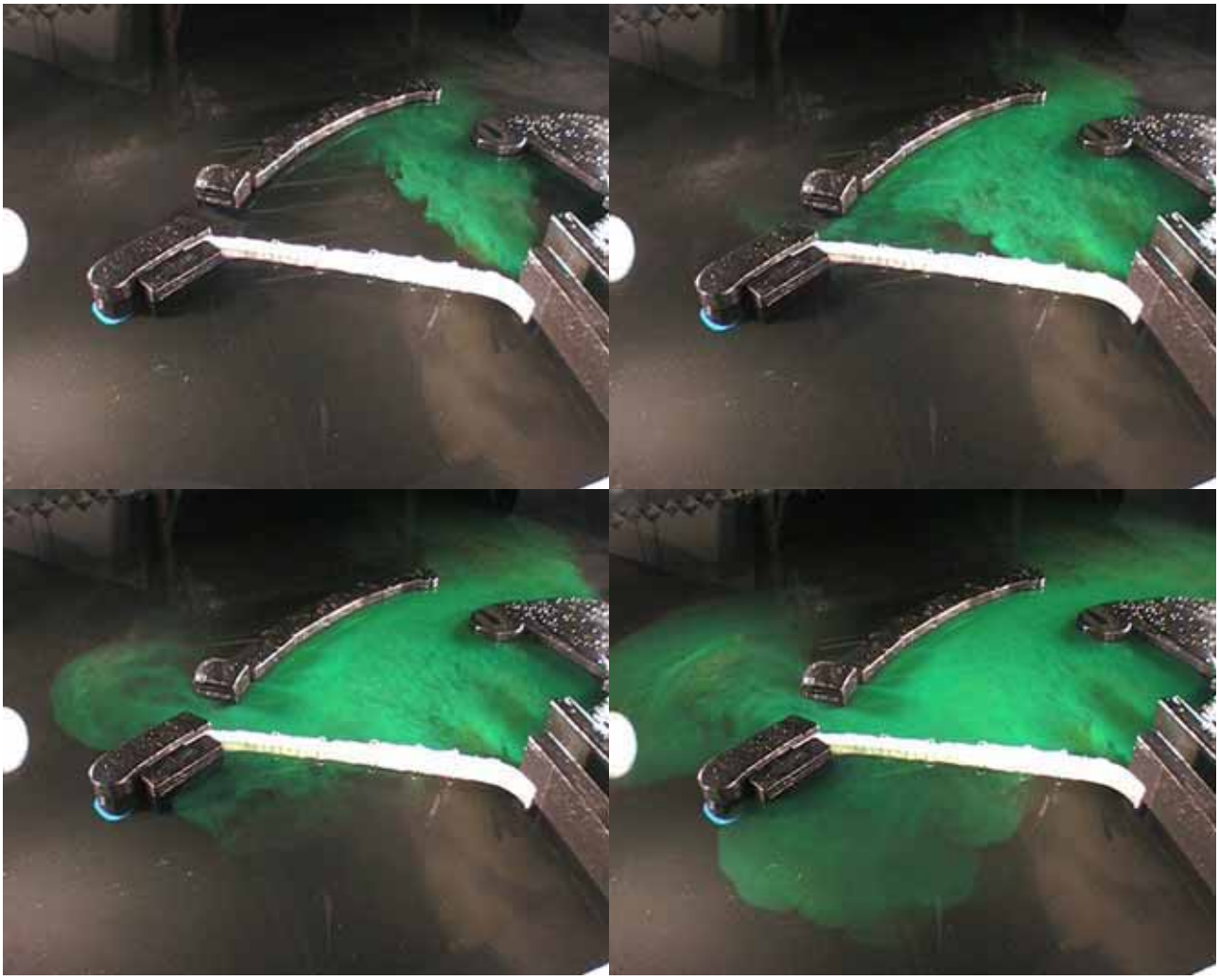


Figura 5.3.b Dati come in figura 5.3a con aggiunta di panna galleggiante immersa fino a 2.5 cm (62.5 % della profondità totale). Protocollo A.

5.4 Pennello di Ponente modificato (Ipotesi 4,5,6)

Nella figura 5.4 viene descritto l'andamento della corrente costiera alimentata dal getto fluviale (caso della figura 3.4b precedentemente descritto): la configurazione geometrica della diga fa sì che il flusso devi verso la costa e prosegua in direzione Nord. Questa traiettoria suggerisce che, facendo in modo di orientare il getto riflesso dalla diga ancor più verso riva (riducendo quindi lo spessore della corrente litoranea), dovrebbe essere possibile deviare l'intero deflusso verso il largo, prima che lo stesso interessi la zona destinata alla balneazione. Questa deviazione verso il mare aperto può essere ottenuta realizzando il pennello di ponente spostato verso Nord rispetto alla posizione originaria, con l'aggiunta di un deflettore intestato sulla diga foranea (cfr figura 5.3a). La figura 5.4a descrive l'efficacia di questa soluzione, che mostra come unico difetto la necessità di "sacrificare" un tratto di costa nella funzione di "intercapedine" tra il porto e il litorale Nord. Un rimedio a questo inconveniente può essere quello di modificare la forma della estremità Nord della diga foranea: anziché inserire il deflettore, si può ricostruire l'ultimo tratto in maniera che risulti più direttamente orientato verso la costa, come mostrato nel capitolo precedente (ipotesi 6), riducendo l'ingombro verso Nord della diga. In aggiunta, è utile osservare che un pennello più lungo può

essere posto più vicino alla foce. Infine. La figura 5.4b mostra come l'apertura di un piccolo varco nella diga (cfr figura 5.3a) può aumentare l'efficienza del sistema, aiutando anche il ricambio all'interno dell'avamporto.

Figura 5.4. Dati come in figura 3.4b: particolare della corrente fluviale diretta lungo la costa Nord.

Figura 5.4a Deviazione verso il largo della corrente fluviale mediante deflettore e pennello di ponente spostato (200 m a Nord della testata settentrionale della diga)

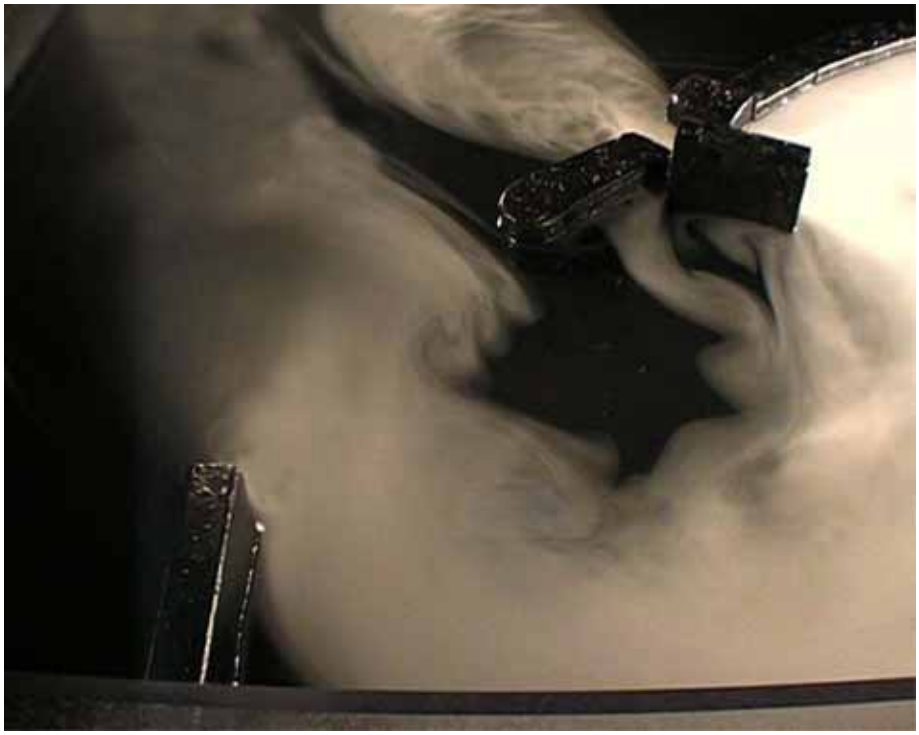


Figura 5.4b Come in figura 5.4a, con aggiunta di apertura nella diga foranea di 5 cm, con soglia 2 cm (in scala al vero 50 m e 2 m)

5.5 Aperture di grandi dimensioni con opere di protezione (ipotesi 7,8,9)

Come già evidenziato in precedenza, nell'ambito della descrizione delle caratteristiche generali di un getto baroclino, la principale conseguenza dell'espansione della vena della corrente fluviale è l'ampio fronte d'impatto del getto sulla diga foranea. Una soluzione radicale, nell'ottica di ricostituire una condizione di libera diffusione della foce fluviale verso il mare aperto, potrebbe essere quella di realizzare ampie aperture nella diga. Naturalmente, in questo caso è necessario prevedere ulteriori opere di protezione dal moto ondoso; inoltre, l'ipotesi di modificare in modo significativo la configurazione delle opere potrebbe suggerire di unire la possibilità di risolvere i problemi ambientali con quella di migliorare le condizioni di sicurezza di accesso al porto durante le mareggiate provenienti da Nord.

Sono state effettuate numerose prove, variando la posizione lungo la diga di un'apertura pari a *200 m*. I risultati ottenuti mostrano che la posizione più conveniente, dal punto di vista della capacità di drenaggio, risulta essere quella con l'apertura incentrata nel punto di ristagno, situato a circa *200 m* dalla testata Sud (cfr [6]). Vengono di seguito descritti i risultati per alcune ipotesi di opere di protezione.

La sequenza temporale della figura 5.5a mostra i risultati ottenuti con un'apertura molto ampia, protetta da opere in modo tale da realizzare un porto a moli convergenti, che consente un ampio ingresso su fondali più profondi di quelli attuali. Tuttavia, dal punto di vista della capacità di drenaggio verso il mare aperto, il risultato è assolutamente insoddisfacente, tenendo conto che si tratta di opere di notevole impegno.

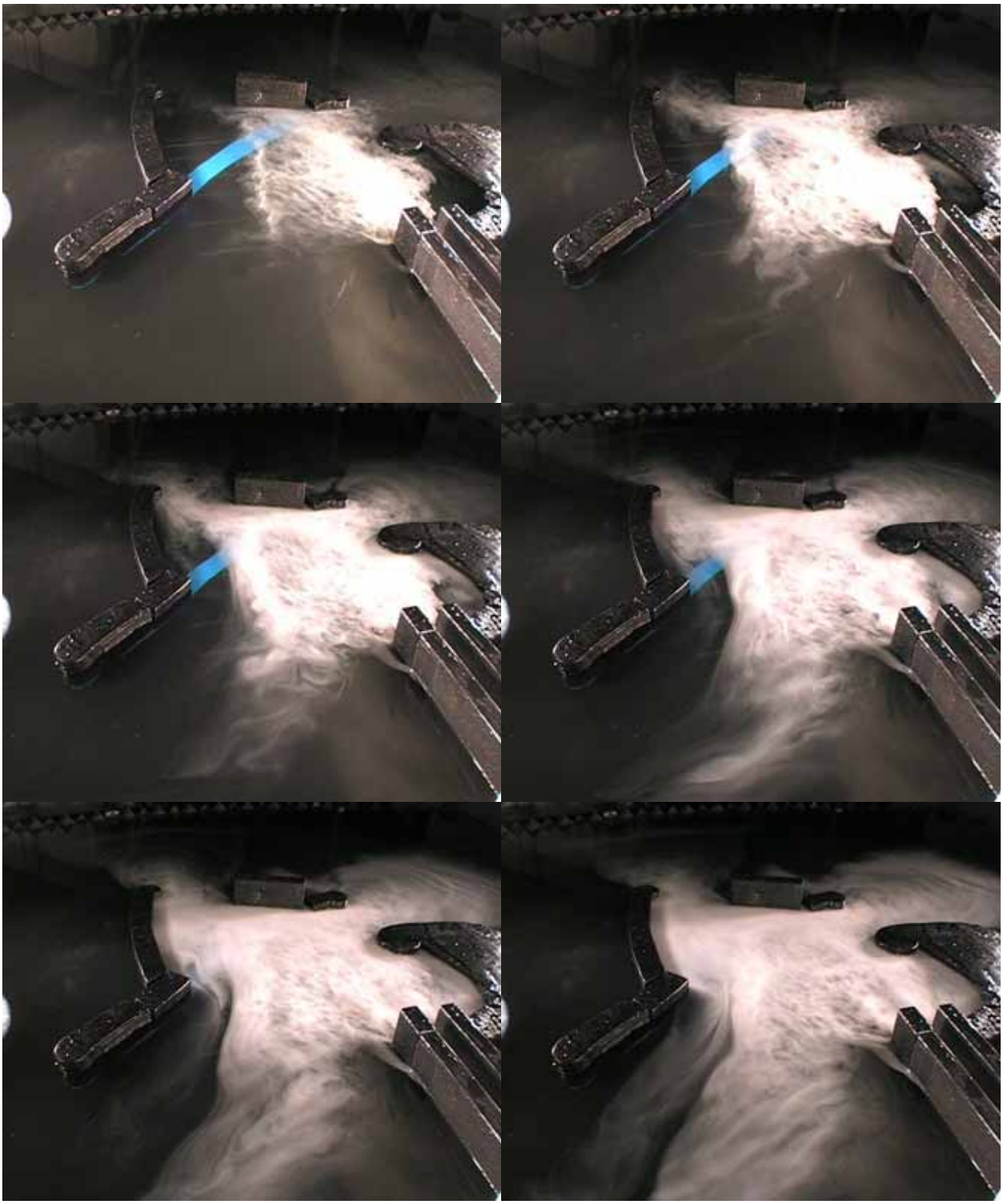


Figura 5.5. Configurazione portuale con ampia apertura nella diga foranea e opere di protezione. Protocollo B.

E' utile confrontare i deludenti risultati di figura 5.5a con quelli di figura 5.3a: questi ultimi mostrano come opere molto meno impegnative possono comunque ottenere un effetto di deviazione e ritardo della corrente.

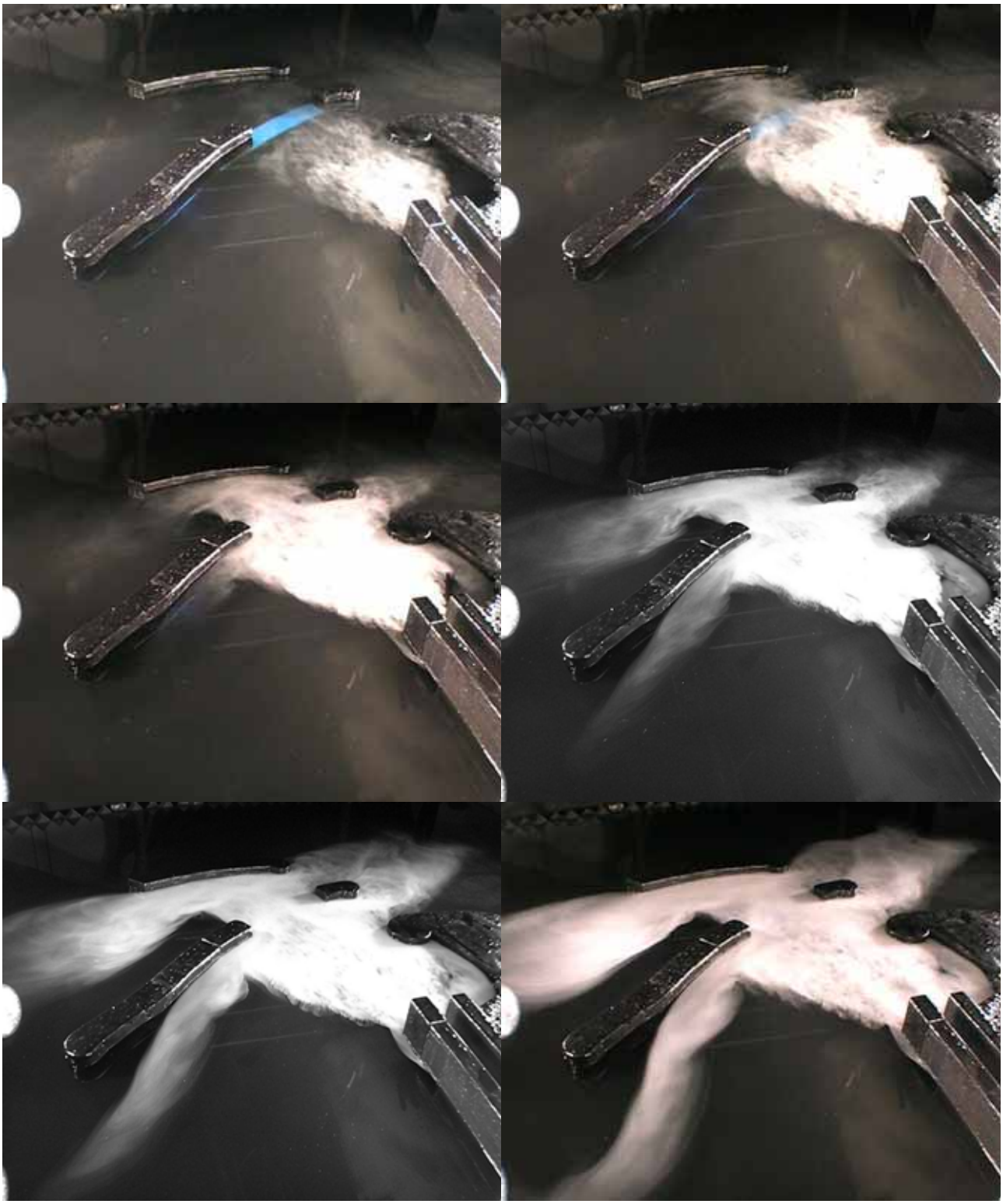


Figura 5.5b Configurazione portuale con ampia apertura (200 m) nella diga foranea e protezione mediante antemurale. Protocollo B.

La figura 5.5b mostra che la realizzazione di un secondo antemurale più al largo è il modo più efficace per proteggere l'apertura nella diga, in quanto l'opera, opportunamente distanziata, non costituisce ulteriore ostacolo per il drenaggio delle acque fluviali verso il largo, come accade invece nel caso precedente, nel quale le opere di protezione danno luogo ad una ricircolazione che genera ritorno verso terra delle acque fluviali. In questo caso invece il rientro è minimo.

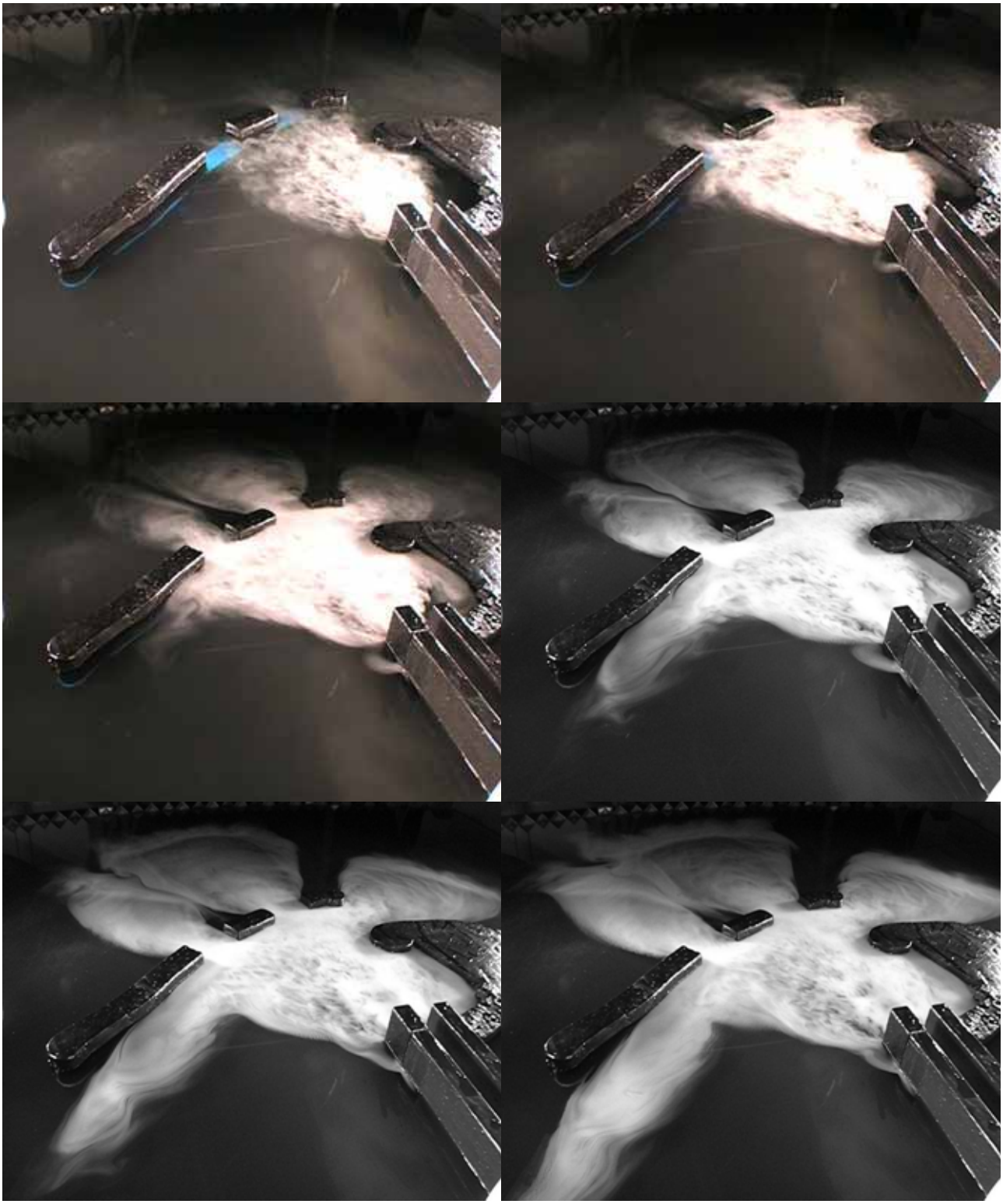


Figura 5.5c Configurazione portuale con2 aperture di 100 m nella diga foranea. Protocollo B.

Inoltre, l'antemurale può costituire protezione da eventuali forzanti meteo-marine di ostacolo per il deflusso verso il largo attraverso l'apertura nella diga foranea. Non si può tuttavia escludere che la configurazione descritta in figura 5.5a (moli convergenti) possa essere migliorata, tramite diverse inclinazioni e orientamenti delle opere; tuttavia, nel caso si decida di realizzare modifiche sostanziali nella diga si ritiene più conveniente e opportuno preferire la configurazione con

antemurale descritta in figura 5.5b, anche perché consente un miglioramento davvero notevole delle condizioni di ingresso, dal punto di vista dell'ampiezza, dell'orientamento e dei fondali.

Infine, in figura 5.5c viene mostrato l'effetto della realizzazione di due aperture di *100 m*, distanziate della stessa quantità. Ciò che rende interessante questo caso è che le due aperture separate richiedono opere di protezione meno impegnative, ottenendo un effetto drenante paragonabile, anche se inferiore, a quello visibile nella figura 5.5b. In questo caso non è possibile ottenere un nuova imboccatura del porto.

6. Analisi dei risultati sperimentali e ulteriori ipotesi di intervento

6.1 Generalità

In precedenti studi APAT riguardanti il porto di Pescara [1 - 6] sono stati analizzati e discussi in dettaglio gli effetti ambientali indotti dalla diga foranea realizzata a protezione del porto canale nel 1995, che, costituendo ostacolo alla dispersione delle acque del fiume verso il largo, induce, a causa dell'orientamento del tratto a Nord, una corrente formata dal deflusso fluviale e orientata verso la costa settentrionale. Tale corrente, presente anche in assenza di forzanti meteo-marine in quanto legata alla presenza della foce, è responsabile degli effetti di degrado delle acque marine lungo la costa a Nord del porto. L'APAT, in seguito alla presentazione e discussione pubblica del rapporto tecnico-scientifico [6], ha sviluppato un programma di attività e svolto indagini preliminari, di natura sperimentale, presso il proprio laboratorio di fluidodinamica.

In particolare, sono state svolte prove su modello fisico del porto di Pescara in scala 1:1000, finalizzate ad ottenere indicazioni qualitative sugli effetti della diffusione delle acque fluviali in mare in assenza di forzanti meteo-marine, tenendo conto degli effetti di galleggiamento delle acque fluviali sulle acque marine, più pesanti a causa della salinità. La stratificazione tra i due fluidi è dovuta infatti principalmente alla differente salinità delle acque, piuttosto che al loro gradiente di temperatura, poiché la salinità modifica la densità dell'acqua in misura maggiore rispetto alle variazioni di temperatura (nell'ambito delle oscillazioni termiche più frequenti negli ambienti di estuario).

In tutti gli studi in precedenza effettuati sul Porto di Pescara gli aspetti relativi alla stratificazione non erano mai stati presi in considerazione.

I risultati più evidenti e significativi ottenuti da questo tipo di prove sono sostanzialmente due:

1. le acque dolci si espandono lungo il litorale Nord fino al raggiungimento di uno stato di equilibrio e, una volta raggiunta tale condizione, il flusso del fiume Pescara avviene in un'area confinata che dipende dalla forma delle opere presenti all'esterno della foce: la conseguenza di questo comportamento è che, con l'attuale ampio varco a Nord del porto, è possibile, con opportuni interventi sulla diga foranea e con opere aggiuntive, eliminare il continuo apporto sul litorale di acque fluviali (e di quanto ad esse associato), ma non è possibile eliminare del tutto la presenza di uno strato di acqua dolce sovrapposto all'acqua marina lungo la costa Nord, almeno nella zona più prossima al porto;
2. l'espansione del getto fluviale alla foce rende problematico il controllo del flusso con interventi limitati alla sola diga foranea. I risultati mostrano infatti che per ottenere un effetto mitigatorio significativo è necessario salpare parte della diga foranea e realizzare un antemurale al largo, oppure impostare un deviatore del flusso nell'intradosso della diga foranea e costruire un pennello radicato a riva, con la testata posta circa *200 m* a Nord della testata settentrionale della diga stessa.

Alla luce di quanto osservato nelle prove sul modello fisico ed in particolare dei due elementi evidenziati in precedenza, solo la chiusura del varco verso Nord tra la diga foranea e la foce è in grado di eliminare in maniera completa e definitiva il fenomeno della propagazione delle acque dolci lungo il litorale settentrionale.

Tale soluzione risulta in contrasto con il voto n. 360 del 16/1/02 del CS LLPP che, in conformità alle indicazioni della Capitaneria di Porto, pone come presupposto per le opere mitigatorie il mantenimento dell'imboccatura portuale a Nord della diga foranea. La valutazione della Capitaneria di Porto è ovviamente legata alla attuale configurazione delle opere. Nella ipotesi di mantenere un'unica imboccatura per il Porto di Pescara aperta verso Sud, questa deve essere ottimizzata in modo da aumentare la sicurezza dell'ingresso con modifiche della configurazione

planimetrica. Si potrebbe ad esempio prolungare verso Est la diga foranea, a partire dalla testata meridionale, e/o modificare la sagoma del tratto del molo di levante in corrispondenza della imboccatura in modo da evitare che le onde da esso riflesse vadano ad interessare la zona di accesso. Lo schema di questa soluzione e la sua possibile evoluzione nel tempo sono descritti nel paragrafo 6.7.

La separazione tra l'area portuale e la costa settentrionale dedicata alla balneazione è suggerita anche da un'altra ragione. Infatti, per quanto riguarda il trasporto solido litoraneo, sulla base della dinamica del litorale Nord sembra ragionevole ipotizzare una componente diretta da Nord a Sud. E' certamente opportuno intercettare tale componente, con il duplice scopo di impedire che il materiale proveniente da Nord, di ottima qualità, venga contaminato dai limi di provenienza fluviale e rimanga disponibile per l'arenile, piuttosto che contribuire all'interrimento del porto (generato principalmente dal trasporto solido del fiume).

Sulla base delle precedenti considerazioni, vengono descritti, caso per caso, i risultati delle prove. Inoltre, tenendo conto dei tempi necessari per portare a completamento ciascuna soluzione si è anche ipotizzato un percorso realizzativo.

6.2 Ipotesi 1 (Tavola 1, figure 5.2a, 5.2b, 5.2c)

La barriera mobile ha fornito risultati molto incoraggianti: una panna galleggiante immersa fino ad una profondità pari al *125%* dello spessore della vena di acqua dolce nel canale di alimentazione blocca completamente il deflusso verso Nord, mentre se lo spessore è pari al *100%* dello spessore il deflusso è molto modesto, pressoché trascurabile. Nella Tavola 1 è stata indicata una profondità al vero pari a *2 m:* questa quantità dovrebbe essere meglio precisata mediante misure di stratificazione nel porto canale e nell'avamporto. L'esecuzione di tali misure può essere rapidamente ed efficacemente messa in atto da ARTA Abruzzo e la barriera potrebbe essere realizzata in tempi brevissimi. Come già osservato in precedenza, il periodo di funzionamento della barriera è limitato al periodo estivo, in cui forti mareggiate sono poco probabili, rendendo quindi secondarie le esigenze di accesso al porto dal lato Nord. L'installazione di una panna galleggiante non richiede ulteriori studi, oltre alle menzionate misure di stratificazione. L'ipotizzata barriera si estende per circa *400 m*, dall'estremità del molo nord del porto canale fina alla diga foranea a circa *150 m* dalla testata nord. Questa realizzazione, di basso costo, sicura efficacia e rapida esecuzione, consente di mitigare gli effetti ambientali della diga foranea e proseguire quindi le indagini diagnostiche finalizzate alla progettazione di opere di maggiore impegno.

6.3 Ipotesi 2, 3 (Tavole 2,3, figure 5.3a, 5.3b)

Nella ipotesi di protrarre nel tempo l'uso della barriera mobile, se ne potrebbe migliorare l'efficacia realizzando nella diga foranea un varco di *50 m*, immediatamente a Sud dell'attacco della barriera. L'apertura potrebbe essere limitata alla profondità *-2 m* per contenere la trasmissione dell'onda. L'intervento sarebbe completato da un pennello deflettore perpendicolare alla diga dello sviluppo di *100 m* costruito a Nord del varco, in corrispondenza dell'attacco della barriera. Le due opere sono finalizzate ad aiutare lo smaltimento di parte della portata fluviale in presenza della barriera mobile e, anche in sua assenza, favoriscono un allontanamento verso il largo delle acque fluviali, oltre a favorire il ricambio delle acque nello specchio portuale. Le due realizzazioni sono compatibili anche con la soluzione ipotizzata per la fase successiva.

6.4 Ipotesi 4,5,6 (Tavole 4,5,6, figure 5.4a, 5.4b)

Le ipotesi 4,5,6 sono accomunate dalla presenza di un pennello posto circa *200 m* a Nord della testata settentrionale della diga e che si protende verso mare per circa *530 m*. Tale pennello, previsto al di fuori della zona d'ombra della diga foranea, permette l'ingresso del moto ondoso nell'area che si estende fino al porto canale, evitando la formazione di una inopportuna zona di ristagno, che sarebbe soggetta ad invasione da parte delle acque di provenienza fluviale e priva di possibilità di ricambio. Come si evince dalle figure 5.4.a e 5.4.b, un pennello così configurato completa

efficacemente l'azione mitigatoria delle opere fisse relative alle ipotesi 2 e 3. In particolare, l'opera offre i seguenti vantaggi:

- intercetta e devia verso il mare aperto le acque fluviali, preventivamente deviate verso riva dal deflettore previsto nell'intradosso della diga foranea; nelle ipotesi 5,6 la presenza di un'apertura nella diga aiuta lo smaltimento della portata fluviale, anche grazie al fenomeno di interazione tra i getti (figura 5.4b): il getto proveniente dall'apertura nella diga esercita attrazione sul getto deviato dal pennello, compattandone la vena;
- intercetta il materiale che, oggi, durante le mareggiate da Nord si accumula a ridosso del porto canale, evitando quindi che questo venga a contatto con le acque e i limi di provenienza fluviale;
- consente l'ingresso al porto dall'imboccatura Nord.

Il pennello pone in evidenza la necessità di separare fisicamente il tratto di litorale utilizzato per la balneazione dall'area portuale; infatti, il repentino allargamento del getto fluviale immediatamente a valle dello sbocco nell'avamporto rende problematico il controllo del deflusso. L'eventuale presenza di forzanti meteo-marine può dare maggior risalto allo scenario di rischio ambientale, e rafforza l'idea della necessità di realizzare una separazione tra le due zone a diversa destinazione d'uso. L'opera prevista dà luogo però alla creazione di una zona "morta" di circa *200 m*, che funge da "intercapedine" tra l'area portuale e quella balenabile: in questa zona avviene il naturale mescolamento tra acque dolci e salate e viene deposto il sedimento fluviale. La necessaria ossigenazione delle acque è garantita dalla penetrazione del moto ondoso (il pennello si trova infatti al di fuori della zona d'ombra della diga). Per guadagnare un tratto di litorale, anziché realizzare un deflettore nell'intradosso della diga, si può modificarne il tratto terminale (ultimi *150-200 m* sul versante Nord, tavola 6), consentendo così di avvicinare il pennello al molo Nord del porto canale. La realizzazione di queste ipotesi richiede ulteriori studi, al fine di precisare estensione e orientamento del deflettore e lunghezza del pennello, ma non richiede un lungo iter progettuale ed approvativo. Infatti l'intervento non interferisce con la funzionalità del porto di Pescara e può rientrare nell'ambito degli interventi di difesa del litorale ed essere progettato, approvato e realizzato in tempi brevi.

6.5 Ipotesi 7,8,9 (Tavole 7,8,9, figure 5.5a, 5.5b, 5.5c)

In tempi più lunghi è possibile ipotizzare interventi sostanzialmente migliorativi dello stato attuale del litorale a Nord del porto o che possano eliminare in maniera definitiva il problema, anche al fine di ottenere una migliore gestione degli spazi, rispetto alle ipotesi 4,5,6, nonché della funzionalità del porto. Tali interventi prevedono modifiche delle attuali strutture portuali e potrebbero richiedere varianti del Piano Regolatore Portuale. Ne consegue che i tempi necessari per il completamento della loro realizzazione sono superiori a quelli richiesti per gli interventi in precedenza indicati. Le ipotesi descritte in questo paragrafo sono quindi accomunate dal fatto che prevedono opere di notevole impegno.

L'ipotesi 7 prevede la rimozione della parte centrale della diga foranea e la realizzazione di moli convergenti: questa soluzione (cfr figura 5.5a), in apparenza molto promettente, si è rivelata tuttavia inefficace, in quanto la riduzione del deflusso delle acque fluviali verso Nord è davvero minima, tenendo conto dell'impegno dell'opera. Probabilmente una diversa forma e orientamento dei moli convergenti, fatta salva la necessità di proteggere la nuova imboccatura dalle mareggiate, potrebbe migliorare il drenaggio del deflusso fluviale verso il largo; infatti, nella configurazione 7 il getto fluviale impatta sul molo convergente meridionale e genera un vortice che induce un riflusso delle acque dolci verso la costa. Quindi, un diverso orientamento della nuova imboccatura individuata dai moli convergenti potrebbe forse migliorare le cose. I risultati degli esperimenti mostrano comunque che questa via, in linea di principio percorribile, richiede un'ottimizzazione

molto accurata della geometria dei moli di protezione, tenendo conto di tutte le forzanti idrodinamiche e meteo-marine in gioco.

L'ipotesi 8 (salpamento di un tratto di *200 m* della diga foranea e costruzione di antemurale) è frutto di un'ottimizzazione idrodinamica (tenendo conto solo della forzante del getto fluviale): serie sistematiche di prove effettuate nel laboratorio APAT hanno mostrato che:

- per ottenere un significativo deflusso delle acque fluviali attraverso la diga è necessario realizzare un varco pari almeno a *200 m* (misurato all'altezza della superficie libera);
- il migliore effetto viene ottenuto posizionando l'apertura a circa *100 m* dalla testata Sud; ciò risulta in perfetto accordo con i risultati di un precedente studio APAT [6]: osservazioni in campo in condizioni di calma hanno mostrato che il punto di ristagno (ossia il punto della diga in cui la pressione esercitata dal getto fluviale assume il massimo valore) giace proprio al centro dell'apertura individuata dagli esperimenti in laboratorio.

Gli esperimenti mostrano anche che la protezione dell'apertura mediante antemurale non ostacola il drenaggio delle acque fluviali. Questa soluzione consente di mitigare in maniera efficace e decisiva la propagazione delle acque fluviali verso la costa Nord. L'antemurale protegge l'apertura da onde e vento, che possono essere di ostacolo alla diffusione verso il largo della corrente fluviale, e offre la possibilità di realizzare un ingresso assolutamente sicuro, sia per ampiezza e orientamento che per i fondali. Questa ipotesi comporta la realizzazione di opere di notevole impegno: l'antemurale, per sviluppo e posizione, richiede infatti quantitativi di materiale paragonabili a quelli impiegati per la realizzazione della attuale diga foranea. La soluzione può essere realizzata anche in aggiunta a quelle illustrate in precedenza (ipotesi 1-6).

Infine, l'ipotesi 9 consiste nel salpamento di due tratti della diga foranea, ciascuno lungo *100 m*. Il più a Sud dei due tratti inizia a *100 m* dalla testata meridionale della diga e la distanza tra i due tratti è di *100 m*. Le aperture che si realizzano devono essere opportunamente protette per impedire la penetrazione del moto ondoso ma devono allo stesso tempo consentire il drenaggio del getto fluviale. Nei varchi devono essere quindi inserite strutture frangiflutti permeabili come ad esempio piattaforme sommerse, strutture forate, ecc.). I due varchi non sono navigabili e l'eventuale miglioramento delle condizioni di ingresso al porto devono essere ricercate con altre realizzazioni, come, ad esempio, un prolungamento della diga foranea a partire dalla testata Sud. Anche questa soluzione può essere realizzata in aggiunta a quelle precedentemente illustrate (ipotesi 1-6).

6.6 Commenti conclusivi sulle soluzioni proposte

I risultati degli esperimenti svolti per analizzare le soluzioni sinora descritte hanno posto in evidenza la sostanziale difficoltà del controllo del getto fluviale baroclino. Gli effetti di galleggiamento costituiscono il forzante principale del getto: qualsiasi modifica delle opere portuali, a meno di rimuovere completamente la diga foranea e ottenere quindi il massimo spazio per il deflusso verso il largo, non può impedire la diffusione delle acque fluviali in tutte le direzioni. Infatti le soluzioni che danno migliori risultati sono in definiva quelle che prevedono la separazione fisica tra l'area portuale e la zona di costa destinata alla balneazione (ipotesi 4,5,6).

Queste considerazioni suggeriscono 2 ulteriori ipotesi, di seguito descritte, entrambe basate sull'idea della chiusura totale e definitiva dell'attuale ampio varco a Nord tra la costa e la diga foranea. La seconda ipotesi, pensata come successiva evoluzione della prima, prevede la separazione del corso del fiume Pescara dalle aree portuali e il trasferimento di tutti gli approdi al di fuori del corso d'acqua. Questa soluzione consente di ottenere il massimo vantaggio dal punto di vista ambientale, paragonabile alla totale rimozione della diga foranea. Con la configurazione finale prospettata, si realizza una separazione netta tra l'alveo fluviale, la zona del litorale destinata alla balneazione e l'area portuale, la cui potenzialità verrebbe notevolmente incrementata. L'intervento proposto, eliminando l'ingresso al porto da Nord richiede un miglioramento delle condizioni di

ingresso che potrebbe essere risolto mediante prolungamento della diga foranea a partire dalla testata Sud e con eventuali opere di sistemazione dell'imboccatura.

6.7 Ipotesi 10 (Tavola 10)

Questa ipotesi è basata sull'idea di arginare completamente il flusso di acque dolci provenienti dal fiume Pescara. Si dispone dunque una struttura protettiva che, partendo da terra, arrivi fino al primo flesso che la diga esistente forma partendo dalla testata settentrionale. Questo pennello, di sezione crescente man mano che si allontana dalla linea di riva, ha, nella parte finale, una sezione uguale a quella della diga foranea e si collega a quest'ultima con un raccordo curvilineo. Questo è necessario per difendere la parte retrostante dal moto ondoso proveniente da Nord. Il nuovo ingresso al porto dovrà essere successivamente definito in dettaglio. Tra il pennello e il molo Nord del fiume Pescara, è stato previsto un terrapieno la cui destinazione d'uso verrà definita in seguito.

6.8 Ipotesi 11 (Tavola 11)

L'ultima ipotesi individuata, naturale evoluzione della precedente, consiste nel deviare il fiume Pescara intercettando il suo corso all'altezza dell'attuale linea di riva a Nord del porto. Con questa soluzione, che prevede che il fiume venga accompagnato oltre l'attuale diga foranea con due argini, non hanno più ragion d'essere le idee di deflettori e varchi finalizzati ad impedire il deflusso delle acque del fiume lungo la costa Nord, in quanto la deviazione dell'ultimo tratto corrisponde, dal punto di vista ambientale, alla totale rimozione della diga foranea. Rispetto alla soluzione precedente, che pure impedisce ogni contatto tra la zona di costa destinata alla balneazione e l'area portuale, questa soluzione evita l'accumulo del sedimento fluviale all'interno del porto. E' possibile prevedere inoltre un'area di darsena e servizi per la pesca a ridosso del molo settentrionale del fiume.

7. Soluzioni finali proposte

7.1 Generalità

Nel precedente capitolo sono stati analizzati i risultati ottenuti con le simulazioni sperimentali svolte nel laboratorio di fluidodinamica dell'APAT. L'analisi ha consentito di individuare, tra le diverse soluzioni provate, quelle in grado di fornire un miglioramento sostanziale della qualità delle acque lungo il litorale a Nord della foce del fiume Pescara e quelle in grado di risolvere completamente il problema ambientale. Le soluzioni risultate efficaci sono state ordinate secondo un percorso che vede la possibilità di effettuare interventi successivi nel tempo con una progressiva riduzione dell'impatto negativo indotto dal deflusso delle acque fluviali verso il litorale a Nord del porto.

Le esperienze condotte hanno ben evidenziato che sono principalmente due gli aspetti della propagazione delle acque del fiume che interessano il litorale.

Il primo è legato alla diffusione dell'acqua dolce su quella salata: la prima si espande formando uno strato galleggiante sulla seconda, fino al raggiungimento, ad una certa distanza dalla foce, del completo mescolamento. L'estensione dello strato superficiale di acqua dolce di origine fluviale è determinata dalla portata del fiume e dalle forzanti meteo-marine. Tale condizione di equilibrio viene modificata in occasione di mareggiate che provocano il rimescolamento delle acque o di eventi di piena che aumentano sensibilmente l'entità dell'apporto fluviale lungo il litorale.

Il secondo aspetto è quello del deflusso continuo di acque di provenienza fluviale; tale deflusso avviene in una zona ristretta, evidenziata nella figura 3.5: il getto del fiume si allarga ad imbuto immediatamente a valle della foce, impatta sull'opera foranea e si divide in 2 rami. Il ramo principale defluisce attraverso l'imboccatura Sud del porto, mentre il secondo, caratterizzato da portate più modeste, rimane aderente alla diga e si dirige verso la costa settentrionale, allargandosi e perdendo progressivamente energia cinetica. Tale continuo deflusso è responsabile del degrado ambientale del litorale a Nord del porto.

Tutti gli interventi mitigatori individuati e descritti in precedenza che mantengono l'apertura del porto sul lato Nord sono in grado di incidere sul secondo degli aspetti ma quasi nulla possono per eliminare gli effetti del primo. Le soluzioni in grado di incidere sulla diffusione delle acque dolci lungo la costa settentrionale, e che possono definitivamente eliminarne la presenza, sono quelle che prevedono la chiusura dell'attuale apertura verso Nord.

Tra queste la barriera mobile tra il molo Nord del porto canale e la diga foranea ha mostrato la sua efficienza ma è evidente che tale tipo di intervento non può che essere limitato alla stagione estiva. Ne deriva che, per la soluzione del problema, si deve ricorrere ad una ipotesi progettuale che, a partire dalla funzionalità della barriera galleggiante, preveda una realizzazione definitiva e che fornisca impatti positivi per tutti gli aspetti connessi con le interazioni tra il fiume, il porto ed il litorale adiacente.

La ricerca di tale soluzione ha portato alla individuazione delle ipotesi 10 e 11 (tavole 10,11); dato il carattere degli studi fin qui svolti, tali soluzioni richiedono ulteriori approfondimenti come indicato nel precedente capitolo e più ampiamente illustrato nelle conclusioni. La soluzione 10 costituisce un passo intermedio nel raggiungimento della configurazione finale e fornisce risposta ai problemi ambientali, mentre la seconda (soluzione 11) risponde a tutte le problematiche presenti nell'area e fin qui esaminate.

7.2 Ipotesi 10

La soluzione 10 prevede il salpamento del tratto Nord della diga foranea, il collegamento della nuova estremità settentrionale della diga così ottenuta alla riva in prossimità della radice dell'attuale molo Nord del porto canale. In questo modo il porto commerciale assume le caratteristiche di un porto a moli sovrapposti con unica bocca orientata ad Est. A fronte della eliminazione del varco Nord è previsto che vengano realizzate opere all'imboccatura portuale finalizzate a migliorare le

attuali condizioni di accesso al porto. La configurazione di tali opere dovrà essere ottimizzata attraverso il ricorso a prove su modello fisico e modelli matematici di manovrabilità. Indicativamente è previsto un allungamento della diga foranea e la realizzazione di un pennello in prosecuzione del gomito del molo di levante in modo da evitare che le onde riflesse dal molo stesso si propaghino nell'area di accesso al porto. A tergo della bocca del porto si estende un'area di espansione del moto ondoso e un cerchio di evoluzione di circa 330 m. Dal cerchio di evoluzione le navi commerciali possono dirigersi alle banchine del molo di levante mentre le imbarcazioni da pesca possono procedere verso il porto canale. In questa nuova configurazione lo spazio tra il nuovo molo radicato a terra e il molo nord del porto canale, una volta colmato, è destinato ad area di servizio.

Questa soluzione elimina gli aspetti negativi legati alla diffusione delle acque fluviali sul litorale a Nord del porto e assicura condizioni di ingresso al porto migliori delle attuali. Essa non è tuttavia in grado di eliminare i problemi legati alla qualità delle acque nel bacino portuale e i problemi legati all'insabbiamento del bacino stesso. Rimedio a quest'ultimo inconveniente può essere il ricorso a periodici dragaggi, mentre si potrebbe mitigare il secondo mediante circolazione forzata delle acque nello specchio portuale e/o prevedendo una sufficiente permeabilità per le nuove opere.

La realizzazione di questa soluzione, una volta completate quelle indicate nei punti 1 e 2 del precedente capitolo, è possibile con aggiustamenti che potranno essere esaminati e precisati in fase progettuale.

7.3 Ipotesi 11

La soluzione 11 è stata individuata come possibile soluzione finale. Essa rappresenta uno sviluppo della soluzione 10 e si propone di risolvere le problematiche che la precedente soluzione non è in grado di eliminare, deviando il fiume Pescara al di fuori dell'area portuale. A tale scopo è prevista la realizzazione di un pennello di contenimento a Nord dell'opera di collegamento tra la diga foranea e la riva, l'apertura della connessione tra i due pennelli e il fiume Pescara, il riempimento dell'attuale porto canale e la possibile realizzazione di una darsena per la pesca a nord del nuovo pennello. I benefici indotti da questa soluzione sono molteplici:

a) il deflusso del fiume Pescara avviene in condizioni analoghe a quelle che si avevano in assenza della diga foranea eliminando quindi i problemi di qualità delle acque lungo il litorale settentrionale legati all'interazione tra il deflusso delle acque dolci e l'opera foranea;
b) la portualità di Pescara viene razionalizzata e suddivisa in bacini separati, con miglioramento dell'utilizzo delle aree a terra e degli specchi acquei;
c) il problema dell'insabbiamento dei bacini portuali, che dovrà essere comunque approfondito nel prosieguo dell'iter progettuale, viene ricondotto all'interazione spiaggia – bacini portuali eliminando tutte le problematiche relative alla sedimentazione dei materiali del fiume all'interno delle darsene;
d) l'accesso al bacino commerciale viene migliorato e reso più sicuro;
e) il porto commerciale può disporre di una banchina lato terra più lunga e di maggiori spazi ricavati dalla colmata del porto canale;
f) la pesca può trovare una stabile collocazione in un'area esclusivamente destinata alle sue attività con possibilità di sviluppo e miglioramento.

I tempi di approfondimento degli studi (tra i quali verifica idraulica in merito alla capacità di smaltimento delle portate di piena nella nuova configurazione della foce), progettazione, approvazione e realizzazione possono essere lunghi e i costi complessivi rilevanti, ma sono pienamente giustificati dai risultati conseguibili.

Conclusioni

La conformazione della diga foranea del porto di Pescara induce la propagazione delle acque fluviali (e di quanto ad esse associato) verso il litorale Nord, con conseguente degrado ambientale di quel tratto di costa. L'APAT ha svolto numerosi studi sull'argomento [1 - 5] e, in seguito alla presentazione e discussione pubblica del rapporto tecnico-scientifico [6], relativo alla prima serie di esperimenti svolti presso il laboratorio di fluidodinamica, ha avviato attività di studio finalizzate alla definizione di possibili soluzioni per la soluzione del problema ambientale. Anzitutto è stato sviluppato un programma delle attività indispensabili per ottenere le informazioni e i dati necessari per individuare e definire la soluzione ottimale. Sono stati organizzati incontri con le autorità competenti ed è stata effettuata una seconda serie di prove presso il laboratorio dell'Agenzia su modello fisico del porto di Pescara in scala 1:1000. Tali prove sono state svolte, per la prima volta nell'ambito degli studi sull'interazione tra deflusso fluviale e opere marittime, tenendo conto degli effetti di galleggiamento delle acque fluviali sulle acque marine. Gli esperimenti hanno fornito indicazioni qualitative ma determinanti per la definizione preliminare di soluzioni in grado di mitigare o risolvere il problema ambientale del litorale di Pescara. Sono state infatti ipotizzate e provate più soluzioni e sono state quindi individuate, come risultato delle indagini sperimentali, quelle più efficienti che sono state ordinate in funzione del tempo di realizzazione, secondo un percorso che prevede la possibilità di interventi progressivi e coerenti.

In particolare, è stato individuato il seguente possibile percorso:

1. realizzazione immediata di una barriera mobile (panna galleggiante, tavola 1) attiva durante la stagione balneare; l'individuazione di un intervento efficace da realizzarsi in tempi brevi e costi minimi, anche se con effetti mitigatori non definitivi e limitati nel tempo, è un elemento di rilievo nella salvaguardia del litorale, perché risolve il problema della balneabilità e consente la prosecuzione degli studi finalizzati alla progettazione di interventi più radicali e definitivi;
2. realizzazione di un varco di *50 m* nella diga foranea con soglia a *–2 m*, unito ad un deflettore lungo *100 m* (tavola 2): questa realizzazione consente di mitigare parzialmente gli effetti ambientali della diga foranea e migliora l'efficienza della barriera mobile;
3. realizzazione di un pennello a circa *200 m* dalla testata Sud della diga foranea (tavole 4,5): questa opera consente la soluzione totale e definitiva del problema ambientale della costa Nord, in quanto separa le zone costiere a diversa destinazione d'uso, ma comporta un utilizzo non ottimale della zona di riva, in quanto dà luogo ad un'area "morta" compresa tra il pennello e il molo Nord del porto canale, nella quale avviene il mescolamento tra le acque fluviali e marine e la deposizione del sedimento fluviale, anche se le mareggiate ristabiliscono periodicamente la salinità e consentono la necessaria ossigenazione delle acque;
4. l'inconveniente precedentemente descritto può essere attenuato adottando l'ipotesi 6, che permette un più razionale utilizzo degli spazi, ma la soluzione che si propone come definitiva è quella di seguire le ipotesi 10 e 11 (tavole 10, 11): i vantaggi di questo ultimo percorso progettuale e operativo sono ampiamente illustrati nel cap. 7.

I primi 3 passaggi non comportano interventi sostanziali sulla diga foranea e modifiche del lay-out portuale, che rimane pressoché invariato mantenendo il doppio ingresso; l'ultimo (in particolare l'ipotesi 11) implica modifiche significative in merito all'assetto e utilizzo del porto, che comportano varianti del Piano Regolatore Portuale e costi rilevanti. Le opere descritte nelle tavole 10, 11 richiedono un notevole impegno per la progettazione, e trascendono la pura e semplice mitigazione degli effetti ambientali indotti dalla diga foranea, riguardando anche i problemi della sicurezza e delle prospettive di sviluppo del porto.

Per quanto concerne infine le altre soluzioni analizzate (ipotesi 7,8,9), che prevedono la realizzazione di ampie aperture nella diga foranea senza necessariamente separare la costa Nord dall'area portuale, si può concludere quanto segue:

a) ipotesi 7 (moli convergenti, tavola 7): i risultati delle prove sperimentali sono molto interessanti e utili: essi mostrano che un'apertura nella diga foranea, anche molto ampia, non garantisce necessariamente la soluzione soddisfacente del problema ambientale riguardante la costa Nord;
b) ipotesi 8 (antemurale, tavola 8); questa è la soluzione (tra quelle che non prevedono la separazione fisica tra il porto e il litorale Nord) che mostra i risultati migliori, ma con il percorso progettuale più complesso e oneroso, tra tutti quelli prospettati;
c) ipotesi 9 (2 aperture, tavola 9): questa soluzione sembra promettente, ma richiede progettazione e verifica di opere permeabili finalizzate a contrastare la penetrazione del moto ondoso nel porto attraverso le aperture previste: l'efficienza (dal punto di vista del drenaggio delle acque fluviali) di aperture così "attrezzate" richiede inoltre ulteriori verifiche.

Gli esperimenti svolti presso il laboratorio di fluidodinamica dell'APAT descritti in questa nota, pur avendo fornito indicazioni preliminari utili e significative, che hanno consentito una prima selezione nell'ambito delle possibili ipotesi di intervento, non possono essere considerati sufficienti per valutazioni comparative esaurienti e definitive in merito alle ipotesi formulate. Infatti negli esperimenti realizzati viene simulata l'interazione tra deflusso fluviale e opere marittime, tenendo conto degli effetti della stratificazione salina (ciò costituisce l'aspetto innovativo del presente lavoro), ma trascurando la eventuale presenza di forzanti meteo-marine. Questa approssimazione risulta solo in parte giustificata dalla elevata energia cinetica della corrente del fiume in prossimità della foce, anche perché ciò risulta vero nello studio del campo idrodinamico all'interno dell'avamporto, mentre l'efficienza del deflusso attraverso un'apertura della diga, allorché gran parte dell'energia cinetica della foce risulta ormai dissipata, dipende molto dalle condizioni esterne. Non va dimenticato inoltre che le condizioni di lay-out per gli esperimenti necessitano di conferme tramite misure in campo e, infine, la realizzazione di aperture di notevoli dimensioni nella diga foranea richiede accurate valutazioni sulla penetrazione del moto ondoso all'interno del porto, mediante studi su modello fisico in un laboratorio che consenta la realizzazione di modelli in scala opportuna (1:100).

Ai fini di un esame completo delle ipotesi proposte si ritengono pertanto necessari ulteriori studi. In particolare, si ritiene opportuno svolgere le seguenti indagini.

Campagne di osservazione e misura in situ

1. correntometria fluviale e marittima con tecniche non intrusive di tipo ottico (Particle Image Velocimetry e Particle Tracking Velocimetry) già utilizzate nel laboratorio di fluidodinamica APAT; le riprese con telecamera digitale estese all'aera dell'avamporto potranno essere effettuate tramite elicottero del CCTA;
2. correntometria fluviale e marittima con tecniche intrusive;
3. stratificazione termica e salina alla foce e nell'area portuale;
4. dati batimetrici;
5. contenuto e distribuzione dei sedimenti in sospensione;
6. qualità delle acque in prossimità della foce;
7. portate del fiume, dati di vento e livelli marini (rilevati sistematicamente a Pescara dalla Regione Abruzzo).

Tali misure consentiranno di individuare le condizioni critiche da impiegare nelle verifiche su modello fisico e teorico-numerico, attraverso revisione e aggiornamento degli studi dei venti, correnti, onde, portata fluviale, batimetria, sedimentologia, materiale in sospensione, diffusione, ecc. (analisi stagionale e annuale).

Simulazioni con modello teorico-numerico 3D

Tali calcoli verranno svolti tenendo conto:

1. delle condizioni di stratificazione misurate;
2. delle condizioni di criticità individuate nell'analisi dei dati, ottenuti dalle campagne di misura in situ, relativi alle forzanti meteo-marine;

e saranno finalizzati alla verifica e ottimizzazione delle soluzioni individuate

Attività sperimentale in laboratorio marittimo (modello fisico in scala opportuna)

Tali esperimenti saranno finalizzati alla verifica su modello fisico in scala opportuna (dell'ordine di 1:100) del progetto preliminare presso un laboratorio dotato di attrezzature delle dimensioni adeguate e della necessaria esperienza di settore per la generazione e misura di onde.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio On.le Altero Matteoli e il Sottosegretario del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti On.le Nino Sospiri per la fiducia riposta, l'apprezzamento per i risultati raggiunti e l'incoraggiamento profuso nella promozione delle attività descritte in questo lavoro, che è stato svolto in seguito alla presentazione e discussione pubblica del rapporto tecnico-scientifico APAT *"Analisi delle interazioni tra deflusso fluviale e opere marittime nel porto di Pescara: indagini sperimentali, simulazioni numeriche, osservazioni in campo"*, avvenuta in data 23/11/2004.

Le prove sperimentali sono state effettuate presso il laboratorio di fluidodinamica dell'APAT di Castel Romano, realizzato con finanziamenti del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, grazie al particolare interessamento da parte del Dott. Silvio Di Virgilio, Direttore del Dipartimento per la Navigazione e il Trasporto Marittimo e Aereo, che fin dall'inizio ha sempre apprezzato, incoraggiato e supportato la collaborazione con l'APAT. Il Prof. Paolo De Girolamo, consulente del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, fin dall'inizio ha seguito e partecipato attivamente al lavoro dell'Agenzia, anche nella veste di co-autore in alcuni dei rapporti tecnico-scientifici sinora prodotti.

Gli autori ringraziano l'Ing. Giorgio Cesari, Direttore Generale dell'Agenzia, l'Ing. Antonio De Maio, Direttore del Dipartimento Stato dell'Ambiente e Metrologia Ambientale, l'Ing. Roberto Mussapi, Direttore del Dipartimento Tutela delle Acque Interne e Marine e la Dott.ssa Maria Belli, responsabile del Servizio Metrologia Ambientale, per il supporto nell'ulteriore sviluppo del laboratorio, l'incoraggiamento, il supporto organizzativo e il coordinamento necessario per consentire lo svolgimento delle attività.

Gli autori rivolgono un sentito ringraziamento al Dott. Leonello Serva, Direttore del Dipartimento Difesa del Suolo, al Dott. Eutizio Vittori, responsabile del Servizio Rischi Naturali e a tutti i colleghi Geologi che hanno dato avvio alle attività dell'Agenzia sul porto di Pescara agli inizi del 2000 (con particolare riferimento agli aspetti sedimentologici, contributo ampiamente citato nel presente lavoro) collocando sin dall'inizio le attività nella giusta ottica metodologica, ponendo quindi le basi per un'agevole prosecuzione del lavoro.

Durante lo svolgimento del lavoro è stato effettuato un volo di ricognizione con l'elicottero del Comando dei Carabinieri per la Tutela Ambientale, svolto grazie al coordinamento del Gen. Filippo Palomba; gli autori esprimono la propria gratitudine in quanto le immagini ottenute hanno consentito di completare e arricchire notevolmente il lavoro, offrendo inoltre nuovi spunti per gli ulteriori sviluppi dal punto di vista delle attività in campo. Queste ultime sono state svolte in collaborazione con l'Agenzia Regionale per la Tutela dell'Ambiente Abruzzo, che ha messo a disposizione imbarcazioni e strumentazione; gli autori ringraziano in particolare il Dott. Giuseppe Ferrandino per la disponibilità e la fattiva collaborazione. Inoltre, gli autori ringraziano vivamente il CV Carlo Paternuosto, Comandante della Capitaneria di Porto, per tutte le informazioni e il supporto forniti durante lo svolgimento del lavoro.

Un particolare ringraziamento è dovuto al Prof. Giovanni Paolo Romano, Ordinario di fluidodinamica presso il Dipartimento di Meccanica e Aeronautica dell'Università di Roma "La Sapienza", per il contributo fornito durante lo svolgimento delle attività sperimentali (che sono state anche oggetto di tesi di laurea) e durante la fase di ideazione e progettazione del laboratorio di fluidodinamica dell'Agenzia.

Durante lo svolgimento del lavoro sono stati effettuati incontri con gli ingegneri navali dell'Istituto Nazionale Studi ed Esperienze di Architettura Navale di Roma; gli autori ringraziano in particolare gli Ingg Marcello Costanzo, Salvatore Mauro e Giovanni Senatore per le discussioni e i consigli in merito agli aspetti di sicurezza della navigazione.

Infine, gli autori ringraziano vivamente l'Ing. Mario Russo della Regione Abruzzo, sempre presente, fin dall'inizio dello svolgimento delle attività dell'APAT, con i suoi preziosi suggerimenti e consigli.

Bibliografia

[1] ANPA (2000): "Effetti delle opere antropiche recenti sull'equilibrio naturale dell'area circostante il porto-canale di Pescara", rapporto tecnico ANPA.
[2] Lalli F., Berti D., Miozzi M., Miscione F., Porfidia B., Serva L., Vittori E., Romano G.P. (2001): "Analysis of Breakwater-Induced Environmental Effects at Pescara (Adriatic Sea, Italy) Channel-Harbor", 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway
[3] Lalli F., Berti D., Miozzi M., Miscione F., Porfidia B., Vittori E., De Girolamo, P. (2001): "Porto di Pescara: analisi degli effetti indotti sul litorale dal nuovo molo di levante", Rapporto Tecnico Gruppo di Lavoro ANPA-Ministero delle Infrastrutture.
[4] Lalli F., Miozzi M., Romano G. P., (2002): "Some remarks on river mouth flow", 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan.
[5] Lalli F, Miozzi M, De Girolamo P (2002): "Aspetti idrodinamici e ambientali del porto-canale di Pescara: simulazioni numeriche e indagini sperimentali", rapporto tecnico APAT.
[6] Lalli F, Falchi M, De Antoniis L, Romano GP (2004): "Analisi delle interazioni tra deflusso fluviale e opere marittime nel porto di Pescara: indagini sperimentali, simulazioni numeriche, osservazioni in campo", rapporto tecnico APAT.
[7] Russo M. (2003): "Il fiume Pescara: caratteristiche idrologiche del bacino", Rapporto Tecnico del Servizio Idrografico e Mareografico di Pescara, Regione Abruzzo.
[8] Desiderio G., Nanni T., Rusi S. (2001) :"La pianura alluvionale del fiume Pescara (Abruzzo): idrogeologia e vulnerabilità dell'acquifero". Società Geologica Italiana vol. 56.
[9] De Girolamo P. (2003): "Studio dell'idrodinamica della foce del fiume Pescara con modello numerico per lo svolgimento dei lavori di completamento variante P.R.P.- 2° fase", rapporto conclusivo.

TAVOLE

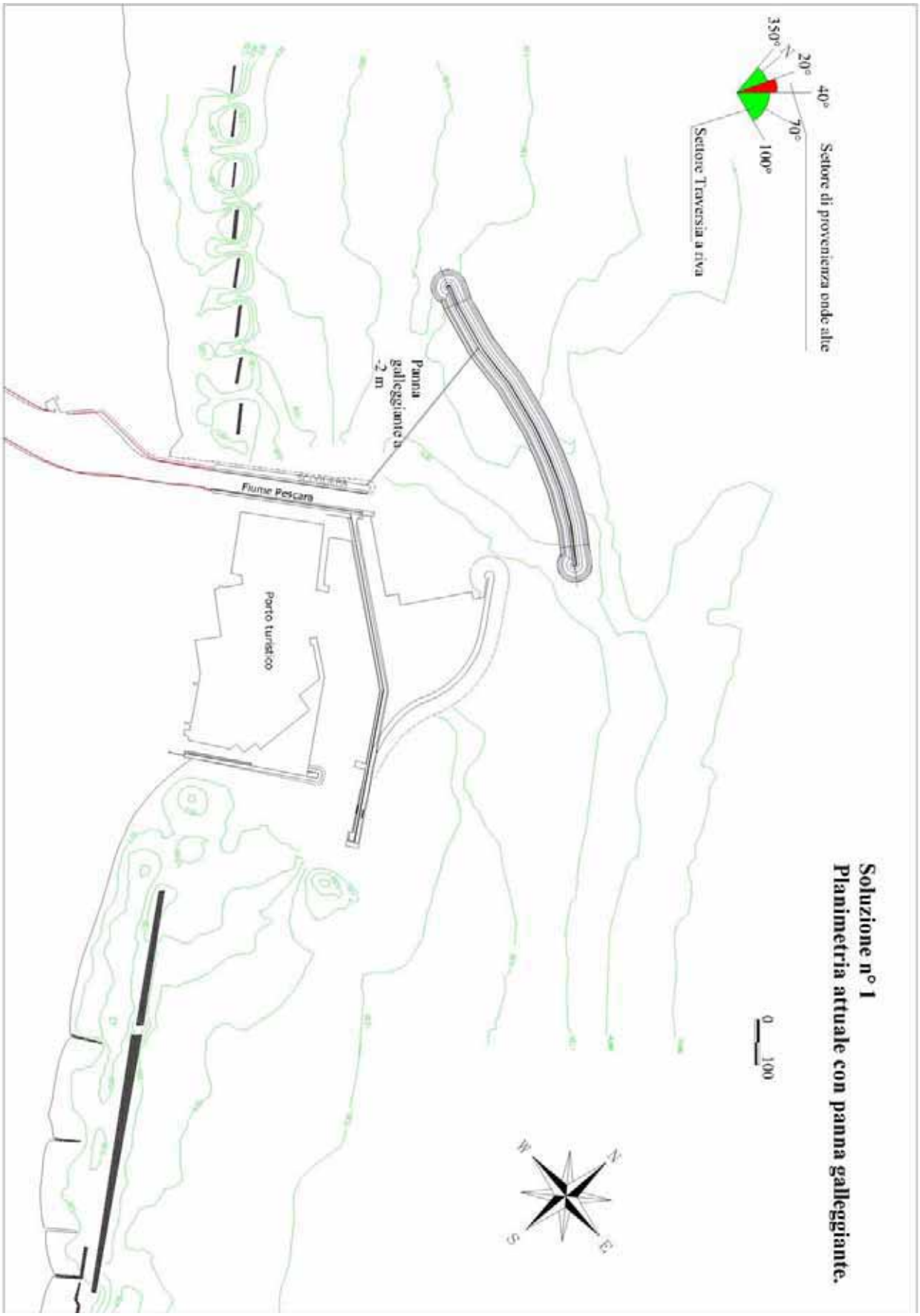

Soluzione n° 1
Planimetria attuale con panna galleggiante.
0
100
N
E
S
W
Settore di provenienza onde alte
40°
20°
350°
70°
100°
Settore Traversia a riva
Panna
galleggiante a
-2 m
Fiume Pescara
Porto turistico

TAVOLA 1

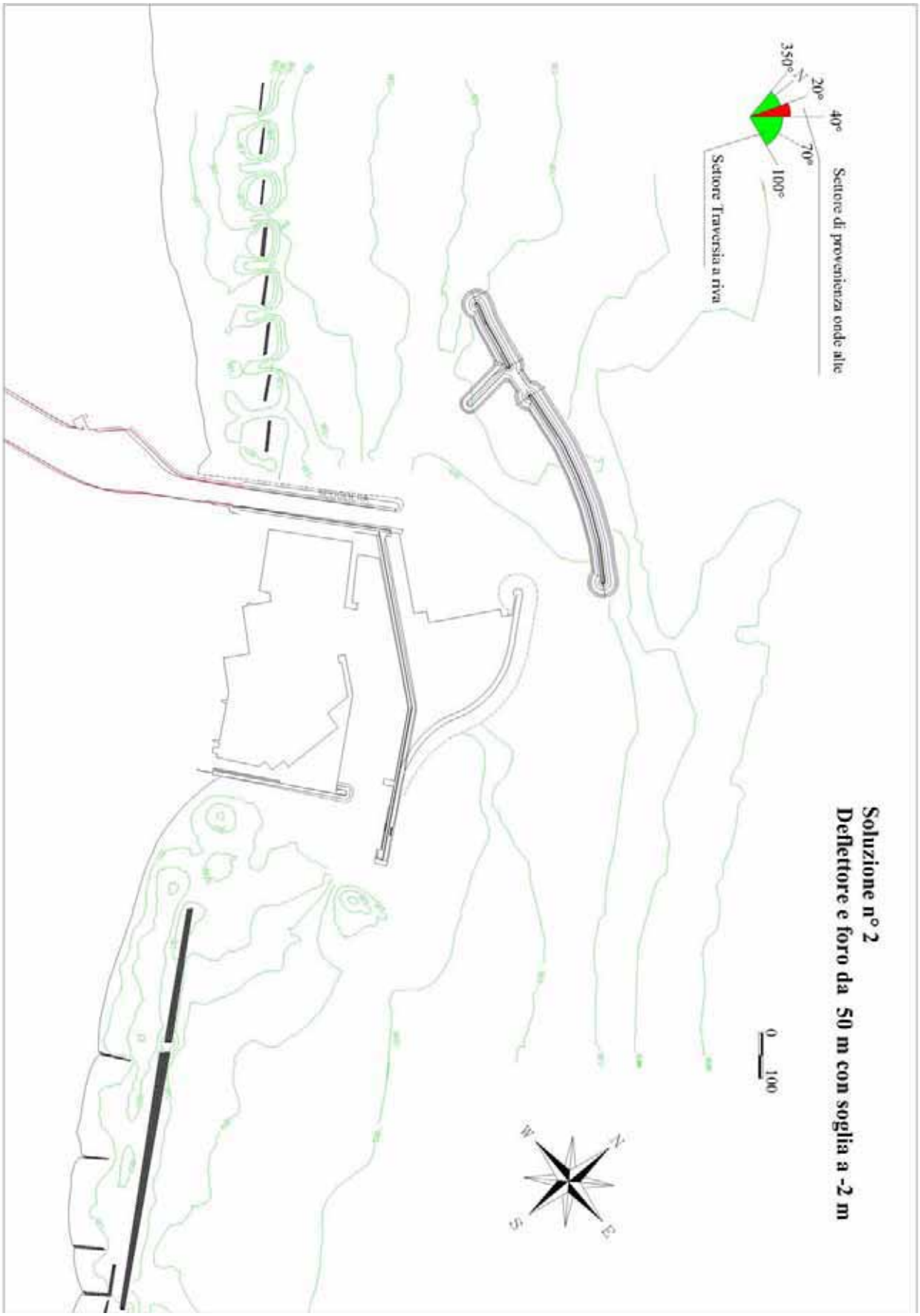

Soluzione n° 2
Deflettore e foro da 50 m con soglia a -2 m
0
100
N
E
S
W
Settore di provenienza onde alte
350°
20°
40°
70°
100°
Settore Traversia a riva

TAVOLA 2

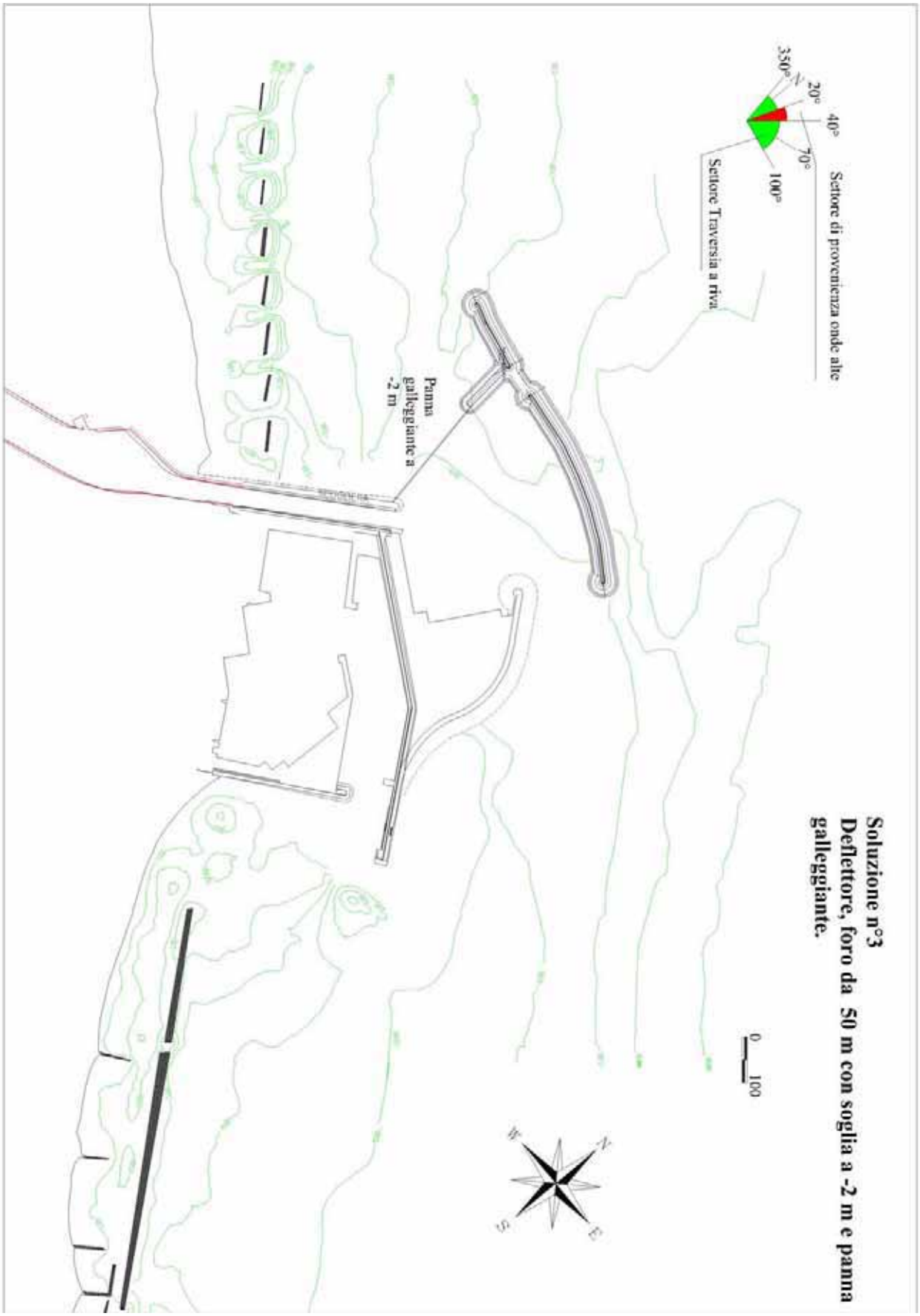

Soluzione n°3
Deflettore, foro da 50 m con soglia a -2 m e panna galleggiante.
0 100
N
E
S
W
Settore di provenienza onde alte
350°
N
20°
40°
70°
100°
Settore Traversia a riva
Panna galleggiante a -2 m

TAVOLA 3

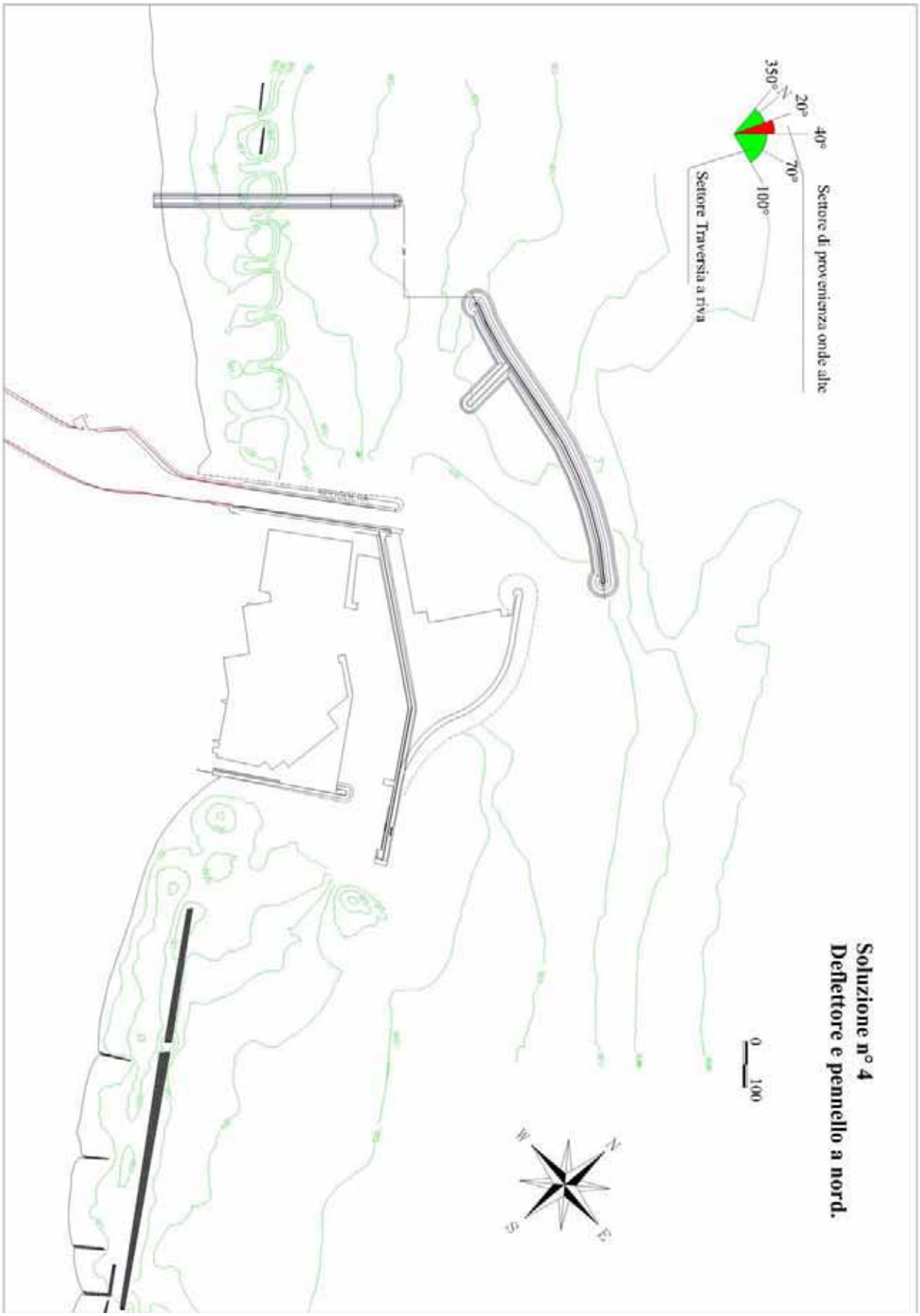

Soluzione n° 4
Deflettore e pennello a nord.
0
100
N
E
S
W
Settore di provenienza onde alte
350°
20°
40°
70°
100°
Settore Traversia a riva

TAVOLA 4

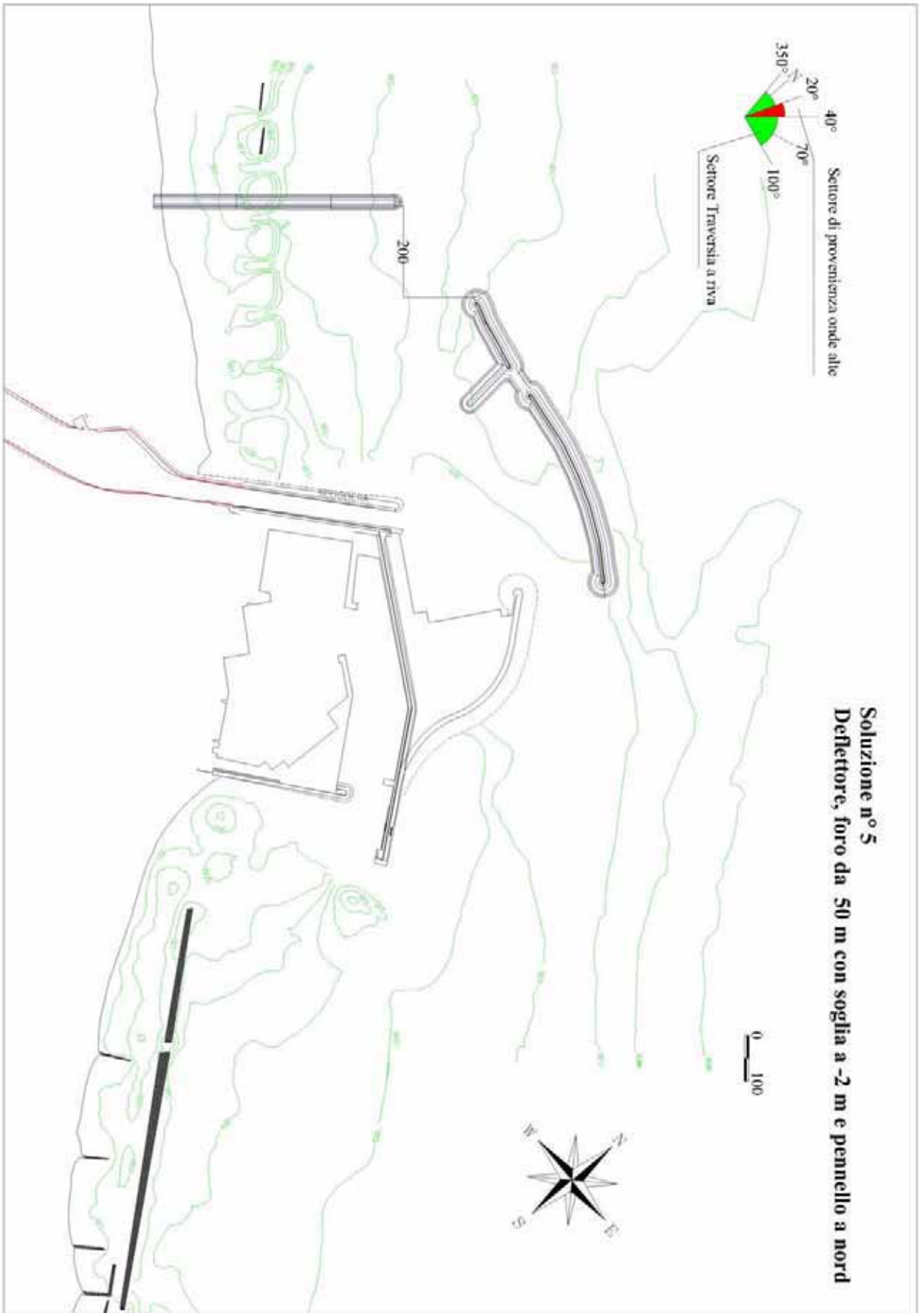

Soluzione n° 5
Deflettore, foro da 50 m con soglia a -2 m e pennello a nord
0
100
N
E
S
W
Settore di provenienza onde alte
40°
20°
350°
70°
100°
Settore Traversia a riva
200

TAVOLA 5

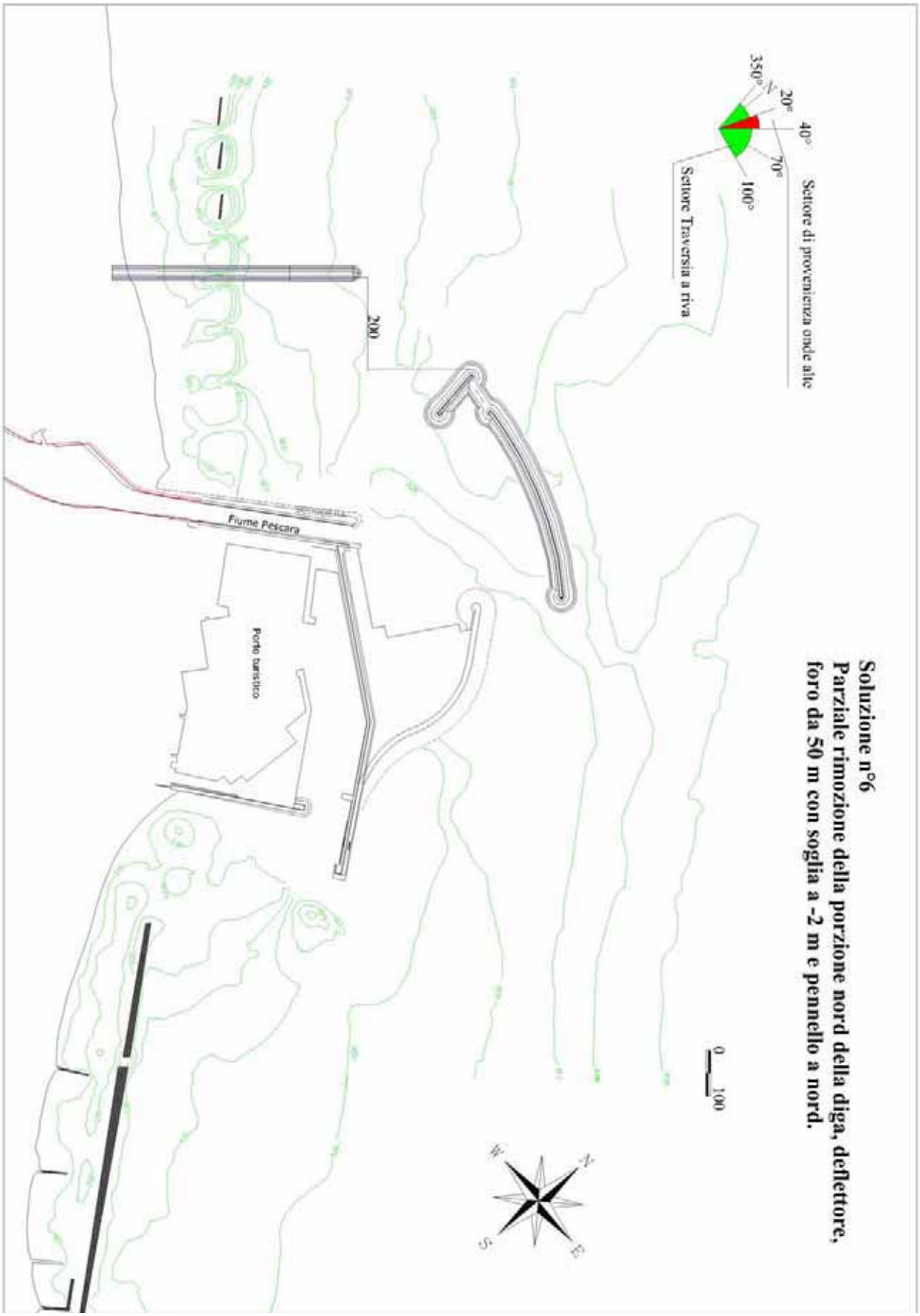

Soluzione n°6
Parziale rimozione della porzione nord della diga, deflettore, foro da 50 m con soglia a -2 m e pennello a nord.
0
100
N
E
S
W
Settore di provenienza onde alte
20°
40°
70°
100°
350°
Settore Traversia a riva
200
Fiume Pescara
Porto turistico

TAVOLA 6

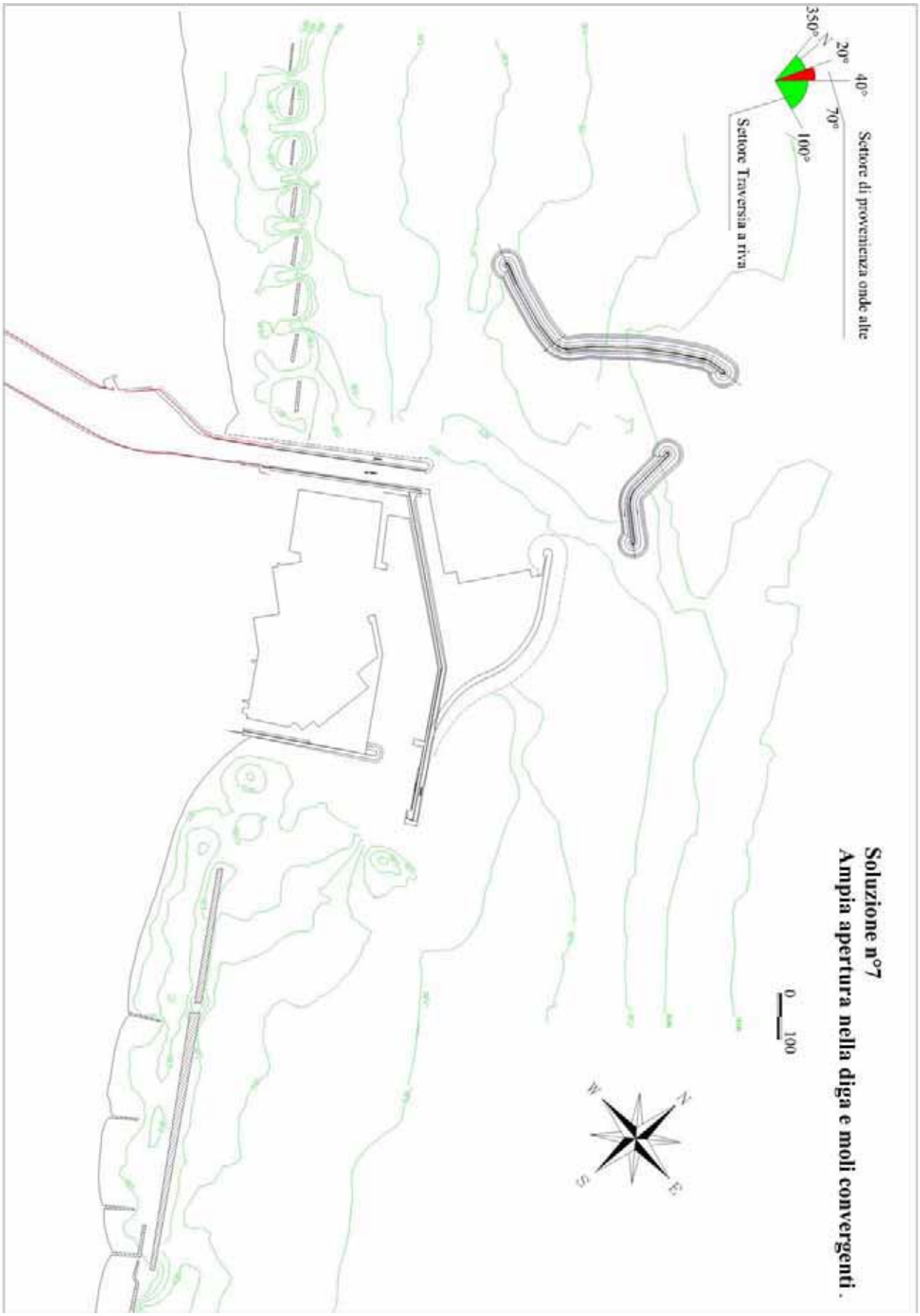

Soluzione n°7
Ampia apertura nella diga e moli convergenti.
0 100
N
E
S
W
Settore di provenienza onde alte
350°
20°
40°
70°
100°
Settore Traversia a riva

TAVOLA 7

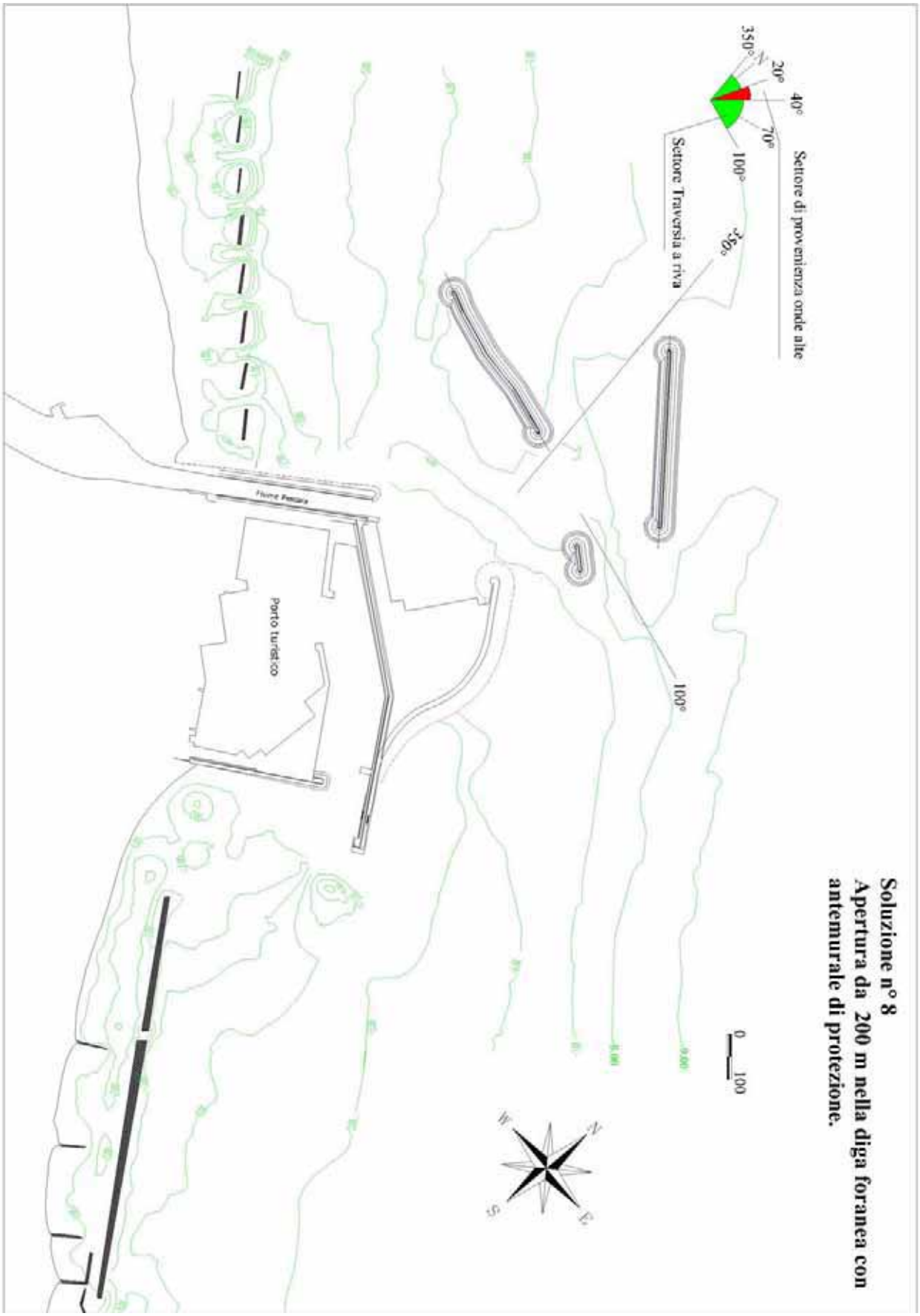

Soluzione n° 8
Apertura da 200 m nella diga foranea con antemurale di protezione.
Settore di provenienza onde alte
Settore Traversia a riva
350°
20°
40°
70°
100°
350°
100°
Porto turistico
0
100
N
E
S
W

TAVOLA 8

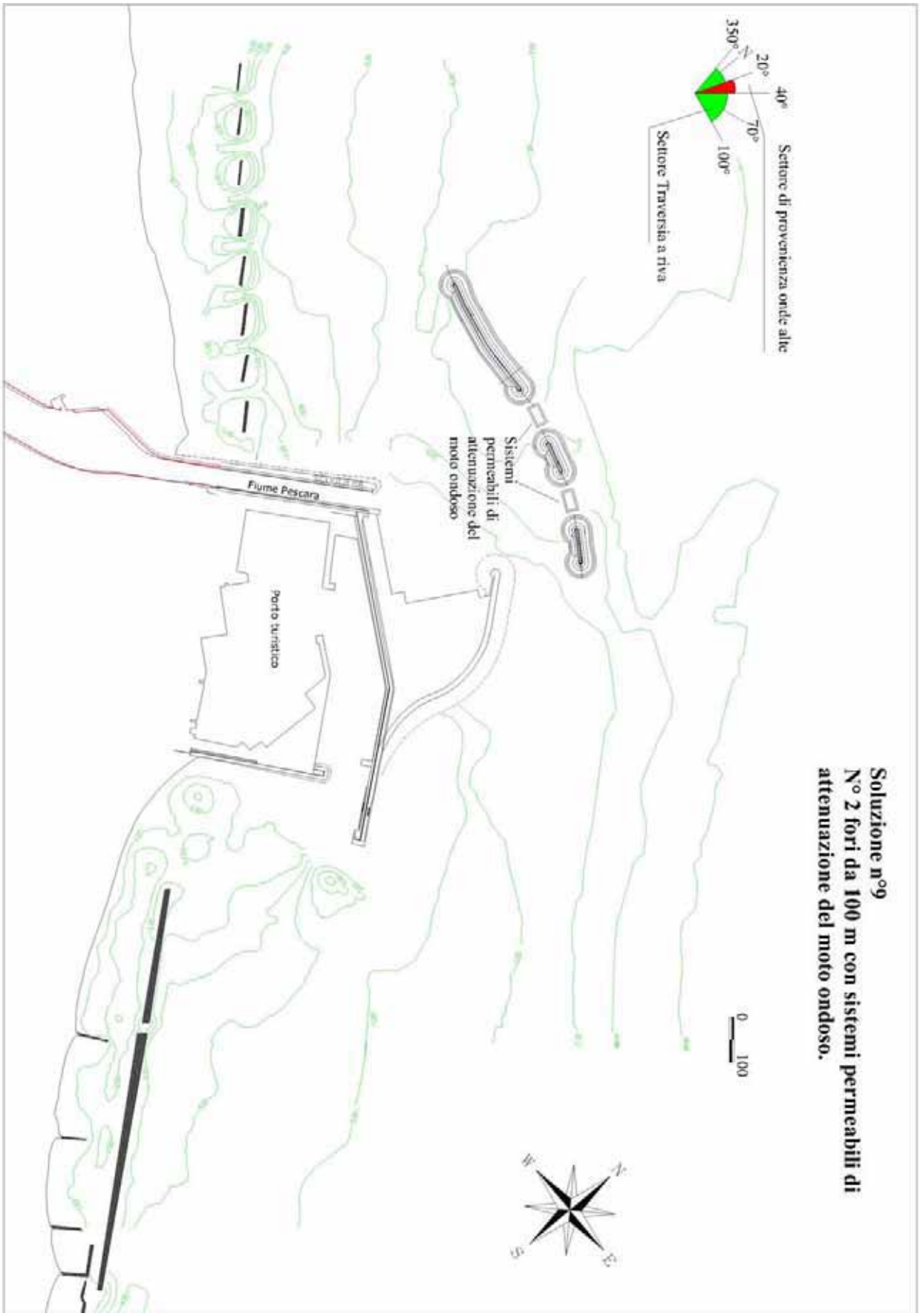

Soluzione n°9
N° 2 fori da 100 m con sistemi permeabili di attenuazione del moto ondoso.
0
100
N
E
S
W
Settore di provenienza onde alte
40°
20°
350°
70°
100°
Settore Traversia a riva
Sistemi permeabili di attenuazione del moto ondoso
Fiume Pescara
Porto turistico

TAVOLA 9

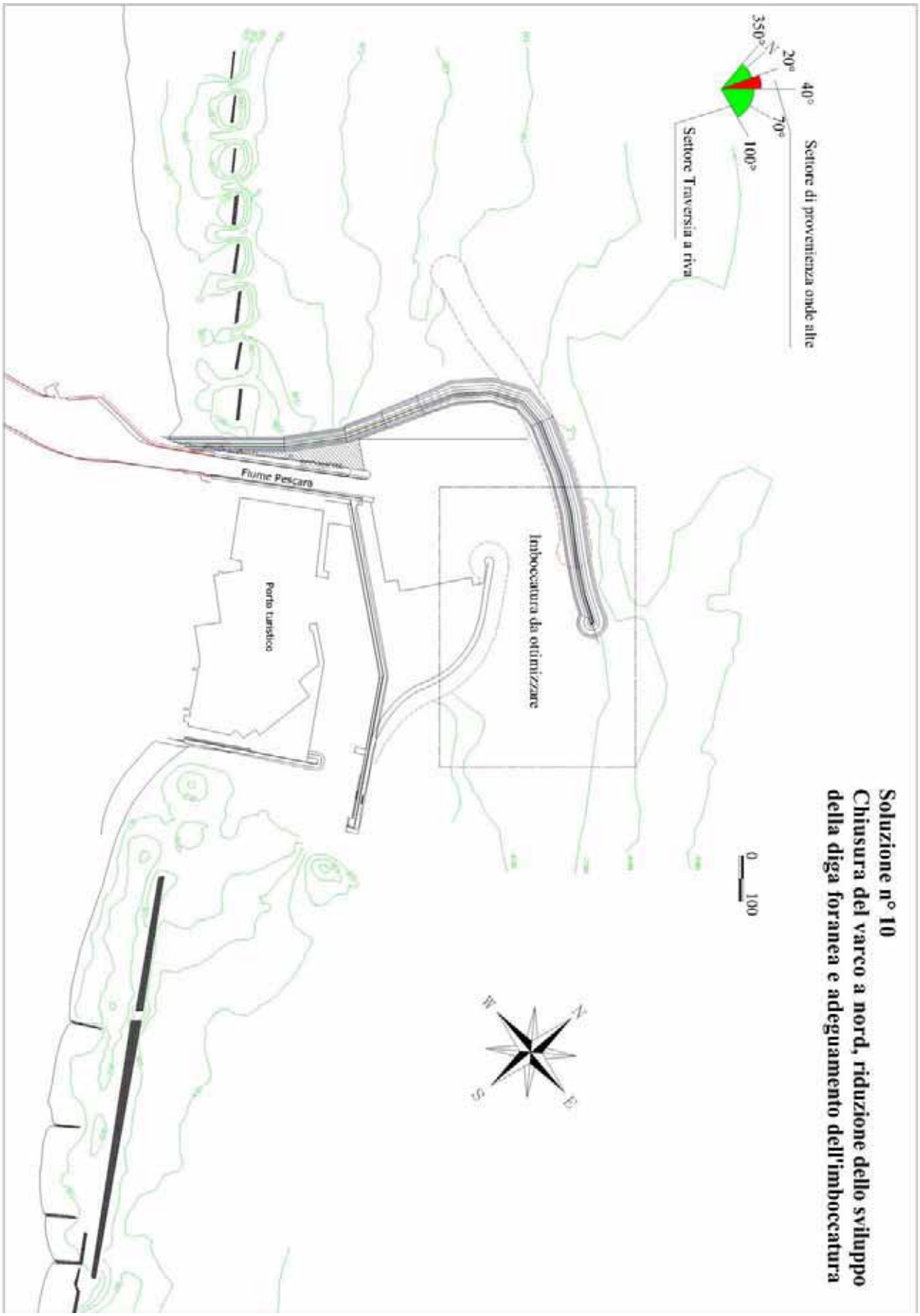

Soluzione n° 10
Chiusura del varco a nord, riduzione dello sviluppo
della diga foranea e adeguamento dell'imboccatura
0
100
N
E
S
W
Settore di provenienza onde alte
40°
20°
350°
70°
100°
Settore Traversia a riva
Imboccatura da ottimizzare
Fiume Pescara
Porto turistico

TAVOLA 10

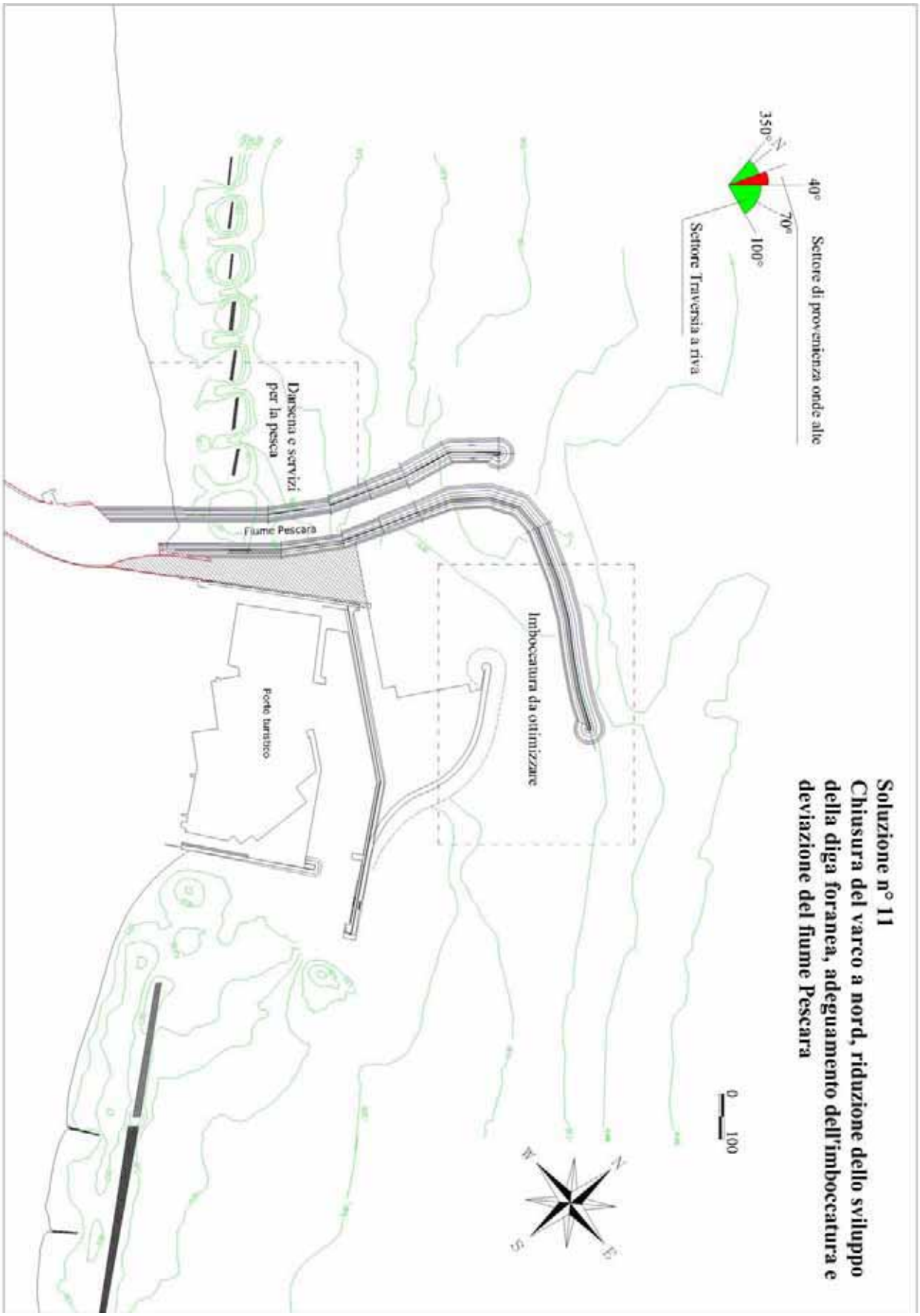
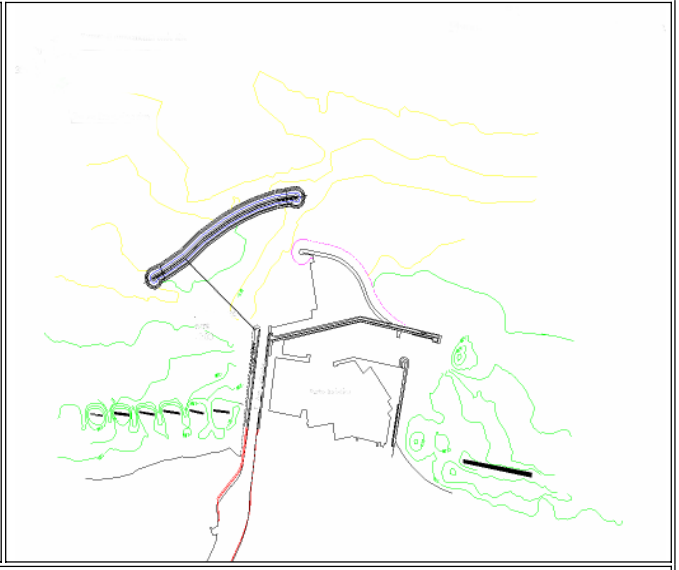

Soluzione n° 11
Chiusura del varco a nord, riduzione dello sviluppo della diga foranea, adeguamento dell'imboccatura e deviazione del fiume Pescara
0
100
N
E
S
W
Imboccatura da ottimizzare
Porto turistico
Fiume Pescara
Darsena e servizi per la pesca
Settore Traversia a riva
Settore di provenienza onde alte
350°
40°
70°
100°

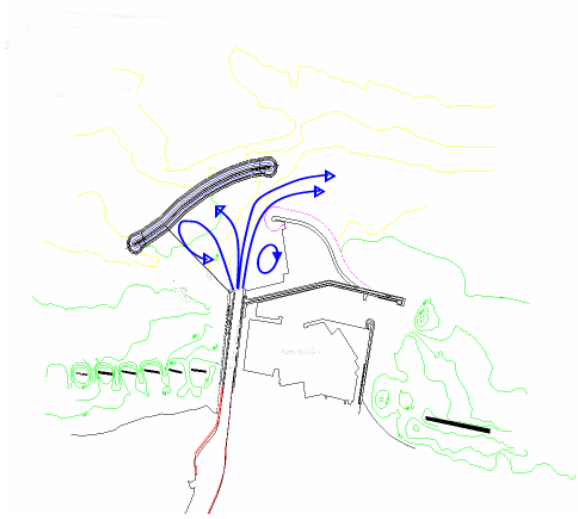
TAVOLA 11

SCHEDE ILLUSTRATIVE DELLE PROVE

Test n° 1 – Ipotesi 1

Caratteristiche	Planimetria
Planimetria attuale con panna galleggiante. Immersione della barriera: • 2 cm (100 % della profondità della vena di acqua dolce nel canale di immissione, immagine sinistra) • 2.5 cm (125 % della profondità della vena di acqua dolce nel canale di immissione, immagine destra)	

Visualizzazione

Schema del flusso	Descrizione
	• Efficace effetto di protezione • Costi minimi • Applicazione limitata al periodo estivo (mantenimento del doppio ingresso per la rimanente parte dell'anno)

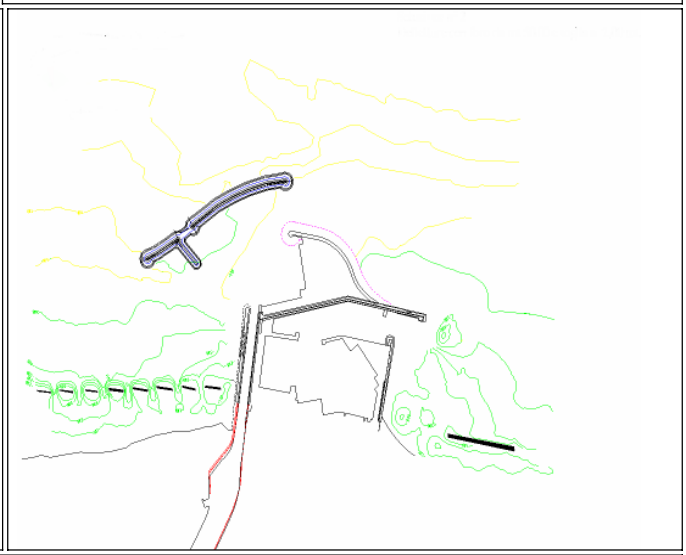
Test n° 2 – Ipotesi 2

Caratteristiche

- Apertura nella diga foranea all'altezza del flesso:
  larghezza: 50 m
  profondità 2 m

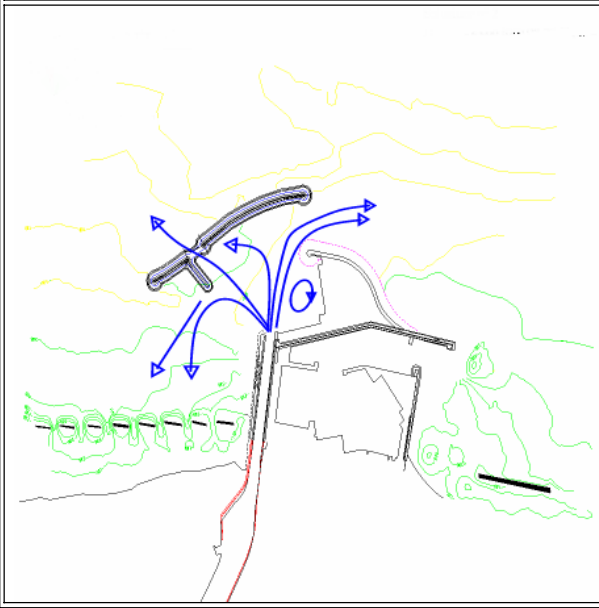
- Deflettore a ridosso dell'apertura
  lunghezza: 100 m

Planimetria



Visualizzazione

Schema del flusso



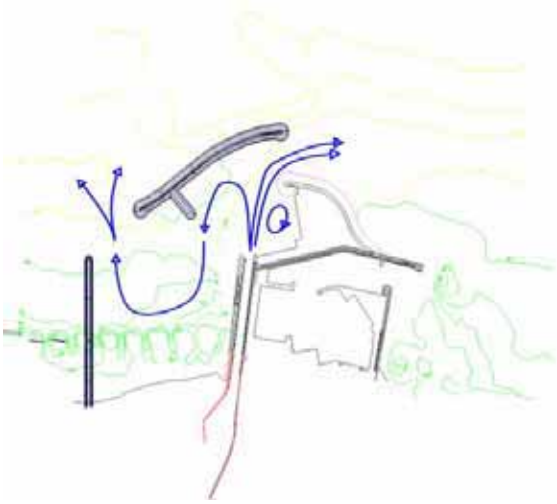
Descrizione

- Smaltimento di parte della portata fluviale attraverso l'apertura
- Possibilità di ricambio nell'area portuale
- Mantenimento doppio ingresso
- Protezione non sufficiente del litorale nord: possibile integrazione con panna galleggiante nel periodo estivo (ipotesi 3)

Test n°3 – Ipotesi 4

Caratteristiche	Planimetria
• Deflettore a ridosso dell'apertura lunghezza: 100 m • Pennello a Nord distanza 200 m dalla testa Nord della diga	

Visualizzazione

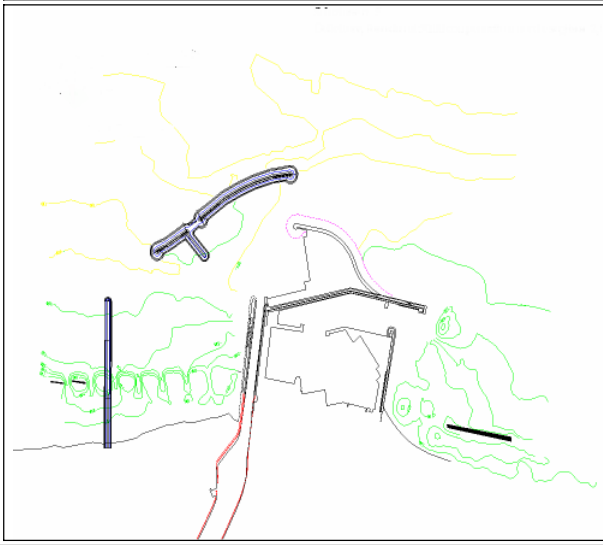
Schema del flusso	Descrizione
	• Deviazione dell'intero deflusso fluviale verso il mare aperto: ottima protezione del litorale Nord • Mantenimento del doppio ingresso • Generazione di una zona morta, non utilizzabile, tra molo nord e pennello: gestione non ottimale dello spazio.

Test n° 4 – Ipotesi 5

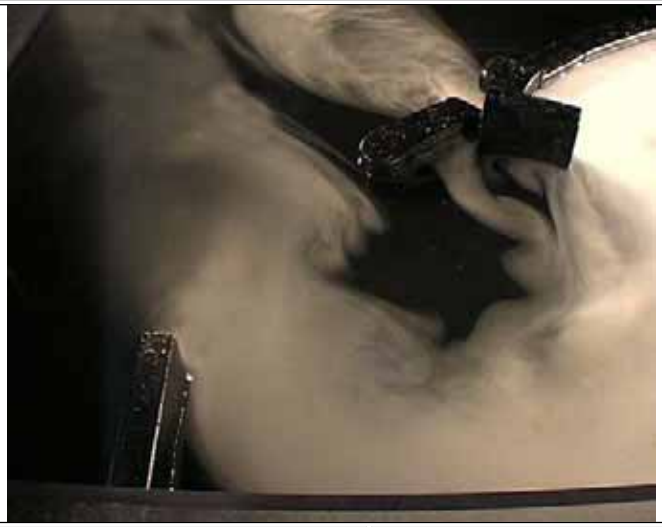
Caratteristiche

- Deflettore a ridosso dell'apertura
  lunghezza: 100 m
- Pennello a Nor
  distanza 200 m dalla testa Nord della diga
- Apertura nella diga foranea all'altezza del flesso:
  larghezza: 50 m
  profondità 2 m

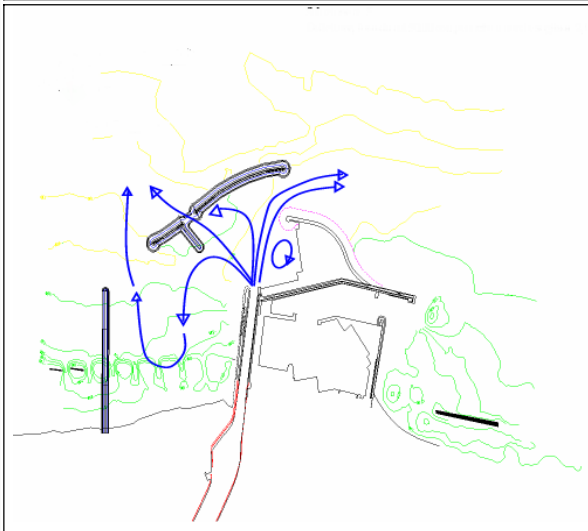
Planimetria



Visualizzazione



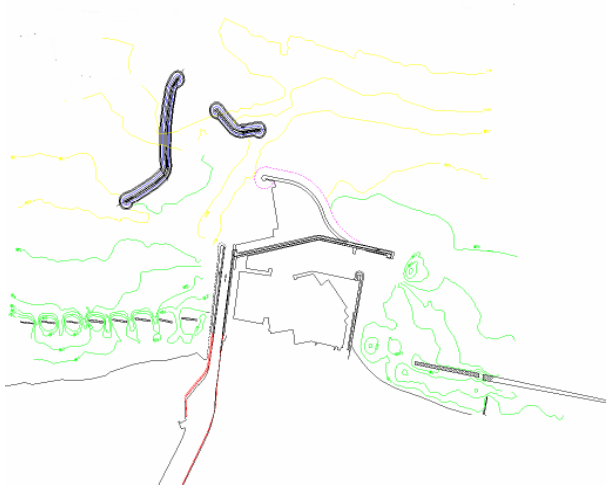
Schema del flusso



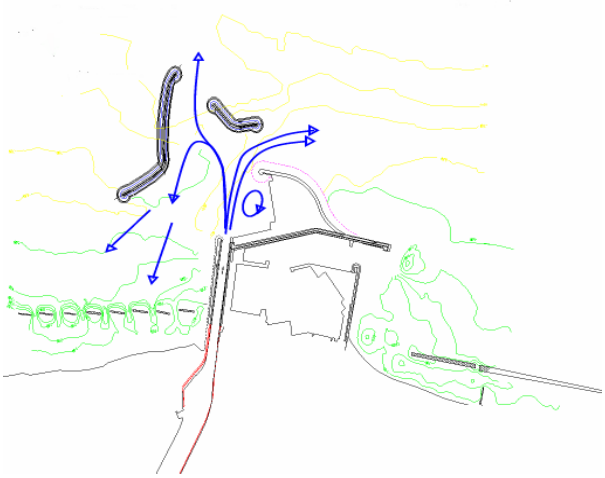
Descrizione

- Deviazione dell'intero deflusso fluviale verso il mare aperto (l'apertura aumenta l'efficienza del deflusso e consente ricambio nell'area portuale): ottima protezione del litorale Nord
- Mantenimento del doppio ingresso
- Generazione di una zona morta, non utilizzabile, tra molo nord e pennello: gestione non ottimale dello spazio.

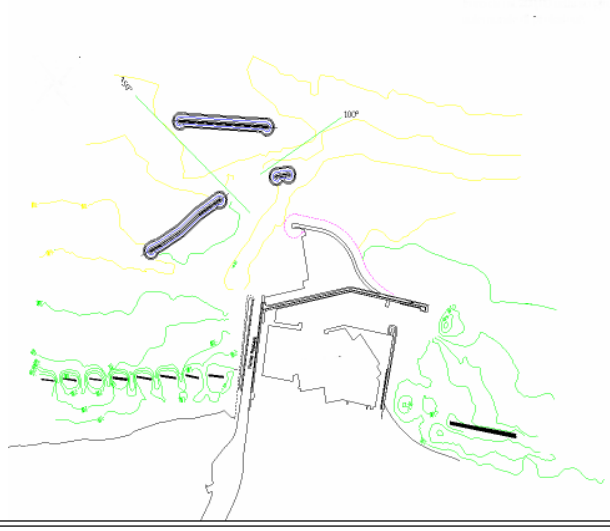
Test n° 5 – Ipotesi 7

Caratteristiche	Planimetria
Ampia apertura nella diga foranea, protetta da moli convergenti	

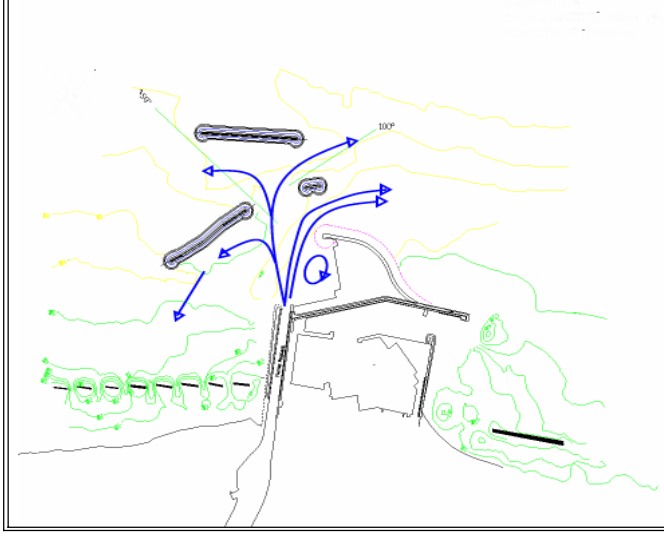
Visualizzazione

Schema del flusso	Descrizione
	• Realizzazione di un terzo ingresso al porto • Smaltimento di parte del deflusso fluviale verso il largo • Modesta mitigazione del deflusso lungo la costa Nord

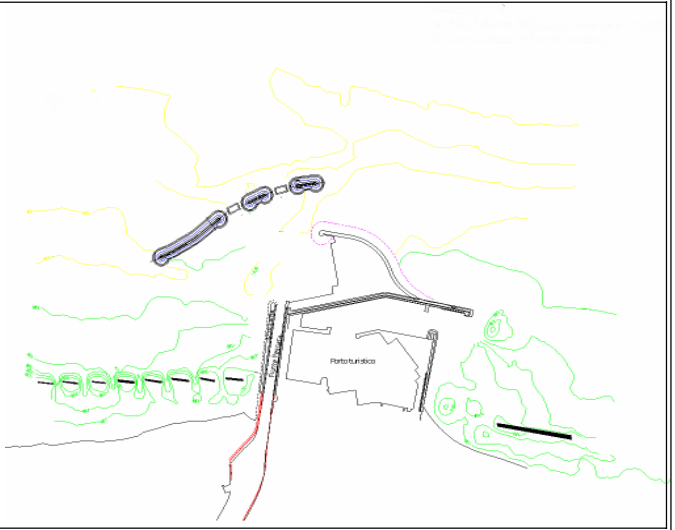
Test n° 6 – Ipotesi 8

Caratteristiche	Planimetria
Apertura di 200 m nella diga foranea protetta da antemurale	

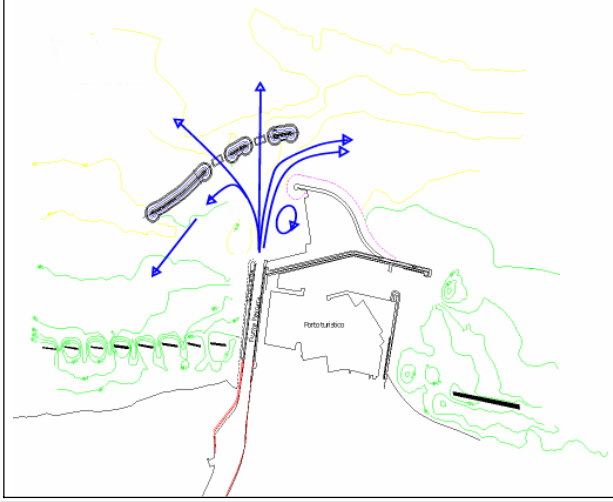
Visualizzazione

Schema del flusso	Descrizione
	• Realizzazione di un terzo ingresso al porto • Smaltimento di parte del deflusso fluviale verso il largo • Buona mitigazione del deflusso lungo la costa Nord

Test n° 7 – Ipotesi 9

Caratteristiche	Planimetria
2 aperture da 100 m, distanziate della stessa quantità, nella diga foranea, con opere di protezione permeabili	

Visualizzazione

Schema del flusso	Descrizione
	• Smaltimento di parte del deflusso fluviale verso il largo • Discreta mitigazione del deflusso lungo la costa Nord