

Il problema del porto di Pescara: ipotesi di soluzione

Francesco Lalli, Stefano Corsini, Franco Guiducci, Iolanda Lisi

ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Curtatone, 3 - 00185 Roma. Email: francesco.lalli@isprambiente.it

Riassunto

In questo lavoro vengono presentati e discussi i risultati sperimentali acquisiti nell'ambito di un'indagine finalizzata alla caratterizzazione idrodinamica del deflusso delle acque del fiume Pescara in prossimità della foce. A tale scopo è stato realizzato un modello fisico in scala distorta (1:1000 sul piano orizzontale, 1:100 lungo la direzione verticale). I risultati sperimentali hanno consentito di evidenziare le caratteristiche salienti della dispersione del pennacchio fluviale in presenza delle opere portuali. Tali prove sono state svolte, per la prima volta nell'ambito degli studi sull'interazione tra deflusso fluviale e opere marittime nel sito in esame, 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.

Parole chiave: modelli fisici, pennacchio fluviale, stratificazione, qualità delle acque costiere.

Abstract

This paper describes an experimental work aimed at studying the hydrodynamic field that results from the interactions of Pescara river plume (Adriatic sea, Italy) and adjacent coastal waters, considering the influence of Pescara harbour structures. The river outlet has been recently modified and now faces a large breakwater. Unfortunately, the harbour configuration gives rise to several environmental effects, due to dispersion of fine sediments and polluted fresh water along the nearshore. The aim of the present study is to test possible improvements regarding water quality along the coast, by means of suitable modifications of the layout. The experimental model has been set up taking into account stratification effects. Several harbour configurations have been tested; results have been discussed and features of the different solutions pointed out and specified.

Keywords: physical models, river plume, stratification, coastal water quality.

Introduzione

Il progetto del porto di Pescara risale alla fine degli anni '80. Come è noto, la progettazione di opere marittime costituisce sintesi di studi integrati riguardanti le problematiche classiche dell'idrodinamica marina (formazione ondosa, correnti litoranee e interazione con immissioni fluviali, trasporto di nutrienti, inquinanti e sedimenti, manovrabilità delle navi). Gli ultimi decenni sono stati caratterizzati da notevoli sviluppi scientifici sia nel campo dei metodi di simulazione teorico-numeriche che in quello delle tecniche sperimentali in laboratorio, senza dimenticare i recenti sviluppi nel campo del telerilevamento, che attraverso l'analisi multispettrale e l'osservazione all'infrarosso consentono misure quantitative in situ impensabili nel recente passato. Per quanto concerne gli aspetti teorico-numeriche, si possono menzionare i recenti lavori di Balas e Ozhan (2000), Casulli (1990, 1999), Fadlun et al. (2000), Le e Moin (1991), Li e Wang (2000), Liska e Wendroff (1999), Lloyd e Stansby (1997a,b), Marrocu e Ambrosi (1999), Uittenbogaard e Van Vossen (2004). Dal punto di vista delle tecniche sperimentali, i lavori di Adrian (1991), Cenedese e Romano (1990), Chetverikov (2002), Erhardt Ferron (2000), Miozzi (2003) possono essere citati.

Molte problematiche rimangono comunque aperte, ad esempio gli effetti di scala nelle prove di laboratorio e la non completa affidabilità dei modelli per la viscosità turbolenta nelle soluzioni numeriche, con particolare riferimento, in ambo i casi, agli effetti del frangimento. In particolare, per quanto riguarda l'utilizzo dei metodi teorico-numeriche, è utile ricordare che oggi, grazie allo straordinario sviluppo dei mezzi di calcolo che si è verificato negli ultimi anni, i modelli di simulazione per calcoli fluidodinamici hanno trovato ampia diffusione, in virtù della loro economicità rispetto ai metodi sperimentali. In effetti, oggi la quasi totalità degli studi di impatto ambientale sono supportati da simulazioni teorico-numeriche.

Il porto di Pescara è un importante riferimento dell'Adriatico, località di consolidate tradizioni marinare e di utilizzo turistico del litorale. Negli ultimi anni alcune fasi dello sviluppo del porto sono state caratterizzate da una serie di problemi, sollevati con energia e convinzione da parte del Comune e di associazioni di cittadini.

I risultati presentati in questo lavoro sono stati ottenuti dall'APAT nell'ambito di una convenzione con il Comune nella fase iniziale (Berti et al., 2000) e successivamente (Lalli et al., 2001b, 2002b, 2004, 2005) su incarico da parte del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. L'attività dell'Agenzia ha portato (Lalli et al., 2005) alla formulazione di proposte di intervento che sono state fatte proprie dal Comune e dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. È opportuno sottolineare che le proposte progettuali APAT sono state elaborate in un contesto di "pari dignità" tra aspetti funzionali e ambientali, superando quindi il concetto di studi di impatto ambientale come corollario "a posteriori" alla progettazione, ma come parte integrante della stessa.

In estrema sintesi, la storia del porto di Pescara (Fig. 1) si può così delineare:

- 1) il porto-canale sul fiume Pescara è l'opera più antica e risale alla prima metà del '900; la configurazione delle opere marittime (moli guardiani) è rimasta invariata fino alla metà degli anni '80, quando è stato realizzato il porto turistico e sono state ristrutturare le stesse opere;
- 2) il nuovo assetto strutturale dei moli guardiani, a causa della drastica riduzione della scabrezza, ha reso molto pericoloso l'accesso al porto; immediatamente dopo è stata quindi avviata la progettazione del nuovo porto, con diga foranea e molo di levante;
- 3) nel '95 viene ultimata la diga foranea;
- 4) nel 2000 il Comune interrompe i lavori di realizzazione del molo di levante, in seguito alla preoccupazione generata dagli effetti ambientali conseguenti alla realizzazione della diga;
- 5) nel 2002 vengono ripresi i lavori e nel 2005 viene inaugurato il molo di levante;
- 6) attualmente, sono in fase di svolgimento gli studi propedeutici per la modifica del Piano Regolatore Portuale, finalizzati alla realizzazione della proposta formulata dall'APAT (Lalli et al., 2005), elaborata con l'obiettivo di eliminare il degrado ambientale della costa settentrionale e rendere più sicura e razionale la funzionalità portuale.

Nel presente lavoro, dopo una sintetica descrizione del sito, vengono illustrate le modalità di svolgimento delle attività di laboratorio che hanno consentito di valutare le possibili proposte di intervento e le motivazioni

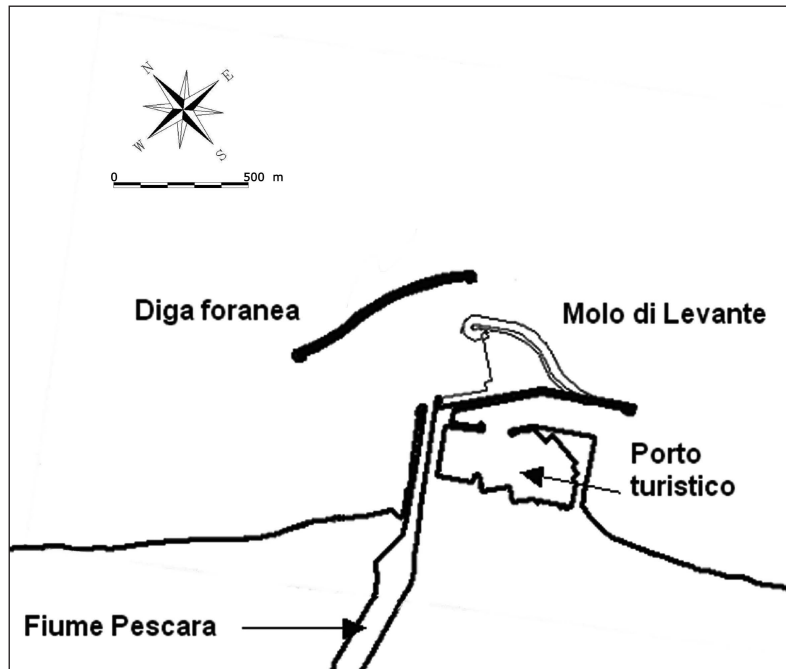


Figura 1 - Schema del porto di Pescara.

che hanno condotto alla scelta definitiva. Le prove sperimentali sono state effettuate in condizioni barocline, tenendo conto degli effetti della stratificazione sui fenomeni di espansione e galleggiamento delle acque fluviali.

Caratterizzazione del sito

Il porto di Pescara e la foce dell'omonimo fiume sono situati all'interno dell'unità fisiografica di Pescara (Barbano et al., 2008), delimitata a nord dal fiume Tronto e a sud dal promontorio di Ortona. Il fiume Pescara è caratterizzato da un bacino idrografico prevalentemente montuoso, pari a circa 3200 km², che nelle ultime decine di chilometri scorre attraverso sedimenti terrigeni su un'area densamente urbanizzata, portando in mare una quantità di sedimenti pari a circa 10⁶ tonn/anno (Desiderio et al., 2001; Russo, 2003). La zona costiera intorno alla foce, soggetta negli ultimi anni ad una forte pressione antropica, rappresenta un'area complessa e dinamica, densamente popolata e di grande interesse economico. Dai primi decenni del '900 la porzione terminale del fiume viene comunemente utilizzata come porto canale per i pescherecci dalla comunità locale. Alla fine degli anni '80, a sud della foce, è stato realizzato il porto turistico di Pescara, con imboccatura rivolta a sud-est. Inoltre, i lavori di restauro delle opere del porto canale, anch'essi effettuati negli anni '80, hanno generato problemi di sicurezza nel porto (Berti et al., 2000). Infatti, i moli guardiani, in origine realizzati su un sistema di pali affiancati, assicuravano una accettabile attenuazione del moto ondoso. I nuovi moli a parete verticale, realizzati a metà degli anni '80, si sono invece rivelati inefficaci ai fini della dissipazione dell'energia delle onde. Inoltre, la riduzione della scabrezza ha generato un aumento della velocità media del flusso fluviale, e i nuovi moli hanno quindi amplificato gli effetti di interazione onda-corrente, con conseguente aumento della ripidità delle onde penetrate all'interno del porto-canale.

Dal punto di vista evolutivo (Berti et al., 2000), a partire dal periodo di costruzione del porto-canale, si è verificata una generale tendenza alla progradazione della linea di riva. Successivamente, dall'ultimo dopoguerra in poi, si è manifestata un'azione erosiva del litorale, culminata nella prima 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 è scaturita in parte dalle importanti modifiche introdotte nel bacino idrografico del fiume, quali la captazione delle acque in più punti del corso e l'estrazione di materiali inerti in alveo.

Per arrestare, o quantomeno ridurre l'arretramento, verso la fine degli anni '70 viene costruita una prima serie di barriere parallele a protezione dei litorali di Pescara e di Francavilla, rispettivamente a nord e a sud della foce. In pochi anni, sino al 1994, nelle aree retrostanti le barriere si osserva una rapida inversione di tendenza, con avanzamento della linea di riva di 5-6 m/anno. Per contro, nei settori sprovvisti di difesa l'avanzamento del mare appare accentuato rispetto agli anni precedenti. Con la realizzazione del porto turistico di Pescara si è verificato un progressivo avanzamento della spiaggia adiacente alle strutture portuali a sud del porto ed il contemporaneo arretramento del tratto contiguo protetto dalle barriere. Infatti, poiché il trasporto solido medio nell'ambito dell'unità fisiografica di Pescara è diretto prevalentemente verso sud-est, l'azione schermante delle strutture portuali sulle onde provenienti dal settore di traversia principale di nord-ovest (Regione Abruzzo, 2003a) determina una interruzione del flusso dei sedimenti e conseguente impoverimento del litorale a sud delle opere; in aggiunta, il porto turistico impedisce la distribuzione del sedimento di origine fluviale a sud della foce. D'altra parte, infine, le onde provenienti dal settore di levante danno luogo ad accumulo a ridosso delle opere.

Le ulteriori modifiche apportate alle strutture portuali nel corso degli anni, in particolare la costruzione della già menzionata diga foranea, realizzata a metà degli anni '90 a protezione dell'imboccatura del porto canale, hanno determinato variazioni della batimetria nell'ambito dell'area portuale e lungo la costa a nord, con significativo ampliamento del tratto di spiaggia immediatamente adiacente al porto canale. Ciò evidenzia come gli apporti liquidi e solidi del fiume Pescara influenzino sia l'equilibrio sedimentologico che la qualità dell'ambiente marino costiero dei litorali interessati dall'estensione del pennacchio fluviale (Lalli et al., 2001a, 2001b, 2002a, 2002b, 2004). Campagne di misura effettuate in prossimità della foce (Regione Abruzzo 2003b), inoltre, hanno rilevato che le acque di provenienza dal fiume Pescara sono caratterizzate da un notevole carico inquinante che ha portato a classificare le acque in prossimità della foce come "molto inquinate o comunque molto alterate". Raggiunto il mare, il carico inquinante viene disperso secondo le modalità dei flussi baroclini, nell'ambiente stratificato generato dal galleggiamento delle acque dolci (più fredde e meno dense) sulle acque salate (più calde e più dense), tipico degli ambienti di transizione.

Il problema della qualità delle acque marino-costiere in prossimità della foce del fiume Pescara, che si protrae ormai da anni, è quindi di fondamentale importanza per la pianificazione di interventi connessi ai problemi di gestione della fascia costiera. Lungo il tratto di costa interessato dall'efflusso del fiume Pescara, esteso circa 3 km, i cambiamenti più evidenti si sono manifestati sulle caratteristiche chimico-fisiche delle acque (Berti et al., 2000; Lalli et al., 2001b; 2002b; 2004) con ripercussioni negative soprattutto sulla balneabilità dei litorali di Pescara e Francavilla, caratterizzati dalla presenza di numerosi insediamenti antropici e strutture ad uso turistico. Le alterazioni più significative della qualità dell'ambiente marino costiero si sono manifestate lungo il litorale di Pescara, a nord del porto. In particolare, è stata evidenziata una correlazione tra la concentrazione di coliformi totali e fecali lungo la costa e l'estensione del pennacchio fluviale (Lalli et al., 2001a,b; Regione Abruzzo, 2003b). 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. Ad oggi, invece, la presenza della diga ostacola la libera dispersione verso il mare aperto delle acque dolci fluviali e divide il pennacchio fluviale in due rami distinti (De Girolamo, 2003), il primo diretto verso sud-est e il secondo diretto verso nord-ovest. A causa della forma della diga foranea, obliqua rispetto alla linea di riva (Fig. 1), e della presenza del porto turistico, il ramo di sud-est si dirige verso il largo, mentre il ramo di nord-ovest viene deviato verso la costa, con conseguente accumulo del materiale limoso sui fondali e degrado della qualità delle acque costiere.

Grado di mescolamento degli ambienti di transizione

Nelle zone costiere in prossimità di foci fluviali il campo di flusso è governato da variazioni di densità che danno origine alla circolazione baroclinica, caratterizzata da correnti di compensazione che possono avere il carattere di "contro correnti" rispetto a quelle superficiali e che sono governate, nel loro innescarsi e nel loro evolversi, dalla morfologia e dalle strutture termiche e saline più importanti, quali le stratificazioni stagionali. La circolazione baroclinica differisce dalla 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. Studi precedenti (Fischer et al., 1979; Provini et al., 1998) hanno mostrato che è possibile classificare gli ambienti di transizione in base al grado di mescolamento verticale delle acque e della distribuzione longitudinale della salinità: tali ambienti possono essere indicati come stratificati, parzialmente stratificati e non stratificati.

I diversi gradi di stratificazione possono presentarsi in uno stesso ambiente in tempi diversi, in funzione delle caratteristiche morfologiche ed idrologiche che sono soggette a variazioni, nel tempo e nello spazio, in modo regolare, a causa delle oscillazioni di marea, e in modo irregolare, a causa dei cambiamenti delle portate fluviali e delle condizioni meteo-marine. L'interazione idrodinamica fra acque fluviali e acque marine si manifesta principalmente tramite due fenomeni (Uncles e Stephens, 1996; Kourafalou, 2001; Cugier et al., 2002) denominati come effetto jet (quantità di moto della vena fluida che si espande nel recipiente finale) ed effetto buoyancy (galleggiamento dovuto alla differenza di densità tra acque dolci e acque salate). In tale contesto, i processi di diffusione e dispersione delle acque fluviali e dei sedimenti da esse mobilitati sono governati principalmente da: inerzia del flusso d'acqua effluente e diffusione turbolenta, attrito tra effluente e fondo in prossimità della bocca di foce, galleggiamento dovuto alla differenza di densità. Anche nel caso in cui l'acqua dolce sia caratterizzata da un forte trasporto solido in sospensione, l'acqua di provenienza fluviale scorre in superficie, per effetto della stratificazione di masse d'acqua a diversa salinità e temperatura, 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. In prossimità della bocca di foce si osserva 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 regime idrodinamico del sistema marino costiero (onde, maree e correnti). Quando la stratificazione è rilevante, il flusso dell'effluente risulta essere isolato dagli effetti indotti dall'attrito con il fondo. In tal modo l'effetto del galleggiamento è prevalente rispetto al mescolamento verticale e l'effluente tende a scorrere su di un'ampia area, con uno spessore che si riduce gradualmente allontanandosi dalla bocca di foce. La densità all'interfaccia tra il pennacchio fluviale ed il cuneo salino mostra generalmente un andamento irregolare dovuto alle onde interne (Ibanez et al., 1999). Sia l'estensione che il comportamento dell'effluente dipendono principalmente dal numero di Froude legato alla gravità ridotta, come di seguito meglio specificato.

Metodologia di studio

Alla luce di quanto esposto si è ritenuto opportuno riprodurre mediante un modello sperimentale la foce del Pescara per studiare la diffusione del pennacchio fluviale in mare, in assenza di forzanti meteo-marine; allo stato attuale non sono disponibili dati correntometrici misurati in situ, mentre la presenza della diga foranea giustifica l'assunzione di assenza di moto ondoso. Del resto, dal punto di vista ambientale le condizioni più gravose sono quelle di assenza di onde, nelle quali la diluizione delle acque dolci lungo la costa è molto più lenta. La simulazione sperimentale della diffusione del getto fluviale è stata effettuata tenendo conto della stratificazione, dovuta al galleggiamento delle acque fluviali sulle acque marine. La stratificazione tra i due fluidi è principalmente dovuta alla differenza di salinità delle acque, piuttosto che al loro gradiente di temperatura, poiché, nell'ambito delle oscillazioni termiche più frequenti negli ambienti di estuario, la salinità modifica la densità dell'acqua in misura maggiore rispetto alle variazioni di temperatura.

L'apparato sperimentale utilizzato consiste in un modello in scala distorta del porto di Pescara (1:1000 sul piano orizzontale e 1:100 lungo la direzione verticale), realizzato presso il laboratorio di fluidodinamica dell'ISPRA. La geometria sul piano orizzontale è stata rispettata nel dettaglio, mentre per quanto concerne la batimetria è stata assunta per semplicità una profondità costante pari a 4 m (4 cm in 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. Infatti, 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; ciò rientra nella finalità dell'indagine descritta in questo lavoro, atto allo studio del comportamento idrodinamico dello strato superiore, influenzato dalla batimetria solo indirettamente, tramite l'interazione con il fluido dello strato sottostante.

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 così lo strato di acqua salata nella vasca e consentendo un più agevole controllo delle condizioni di prova.

Oltre al numero di Reynolds ($Re=Uh/\nu$), con U velocità media nel getto, h profondità dello strato di acqua dolce e ν viscosità cinematica del fluido) e al numero di Froude ($Fr=U/\sqrt{gh}$) riveste un ruolo 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. Il parametro Fr' così definito governa il comportamento dell'interfaccia tra gli strati a diversa densità, come precedentemente descritto.

Gli esperimenti sono stati svolti con una portata del getto di 0,08 l/s, con velocità media di 10 cm/s. I corrispondenti valori dei parametri adimensionali sono pari a: $Fr' = 1,61$, $Re = 2000$. Il numero di Reynolds è piuttosto basso, rispetto a quello del caso reale (pari a circa 2×10^6), e questo è un tipico inconveniente di un laboratorio di modeste dimensioni.

Per evitare indesiderate condizioni di flusso laminare, sono stati inseriti dei chiodi nel canale di accesso, e il rilascio di vortici a valle di ognuno di essi dà luogo ad una turbolenza pressoché uniforme nella sezione di uscita del getto. In queste prove si è comunque ritenuto opportuno privilegiare la similitudine idraulica legata al parametro Fr' ; nel caso reale, ipotizzando $h=2m$, $U=1m/sec$, $g'=g(\rho_0-\rho_1)/\rho_0 \cong 0,1924$ si ottiene quindi $Fr'=1,61$; questi valori sono stati determinati sulla base di misure preliminari svolte in situ a cura dell'ARTA Abruzzo.

L'importanza degli aspetti di stratificazione è messa in evidenza dal confronto tra le Figure 2a e 2b, che mostrano il comportamento di una foce in costa rettilinea priva di opere, rispettivamente in assenza e in presenza di effetti di galleggiamento. Nel primo caso la diffusione delle acque fluviali avviene attraverso la formazione di vortici lungo la superficie di contatto tra getto e fluido ambiente (*shear flow*).

Nel secondo caso, invece, la presenza di stratificazione sembra dar luogo alla sparizione delle strutture vorticosi nel piano orizzontale, e il flusso è caratterizzato da una espansione molto più ampia rispetto al caso precedente.

Per realizzare il flusso baroclino, l'impianto idraulico è alimentato da due serbatoi che possono essere

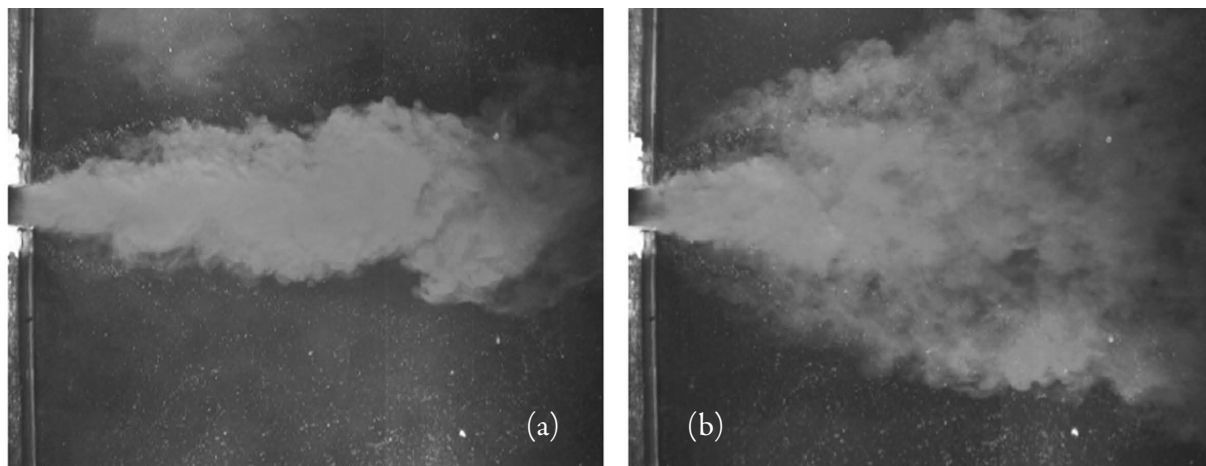


Figura 2 - Visualizzazione di un getto in assenza (a) e in presenza (b) di stratificazione (laboratorio ISPRA, costa rettilinea e batimetria costante, $Q=0,08$ l/sec, $g(\rho_0-\rho_1)/\rho_0 \cong 0,1924$).

utilizzati indipendentemente. Ciò consente di effettuare le prove sperimentali riproducendo il fenomeno di mescolamento delle acque fluviali e marine operando in due fasi distinte: nella prima vengono raggiunte condizioni di flusso stazionario nella vasca per una determinata portata del getto, utilizzando il serbatoio riempito con acqua salata; nella seconda fase, previa chiusura del serbatoio di acqua salata e apertura del serbatoio riempito con acqua dolce, si ottiene il flusso baroclinico legato al mescolamento delle acque caratterizzate da diverse densità.

L'impianto è dotato di un sistema di illuminazione ad incandescenza della superficie libera della vasca e di un sistema di ripresa di immagini del campo di moto. L'apparato di ripresa (Fig. 3) consiste in una videocamera digitale commerciale con standard DV-PAL con risoluzione 720 x 576 pixel e frequenza di acquisizione 25 Hz, che ha consentito di acquisire immagini del campo di moto con sufficiente

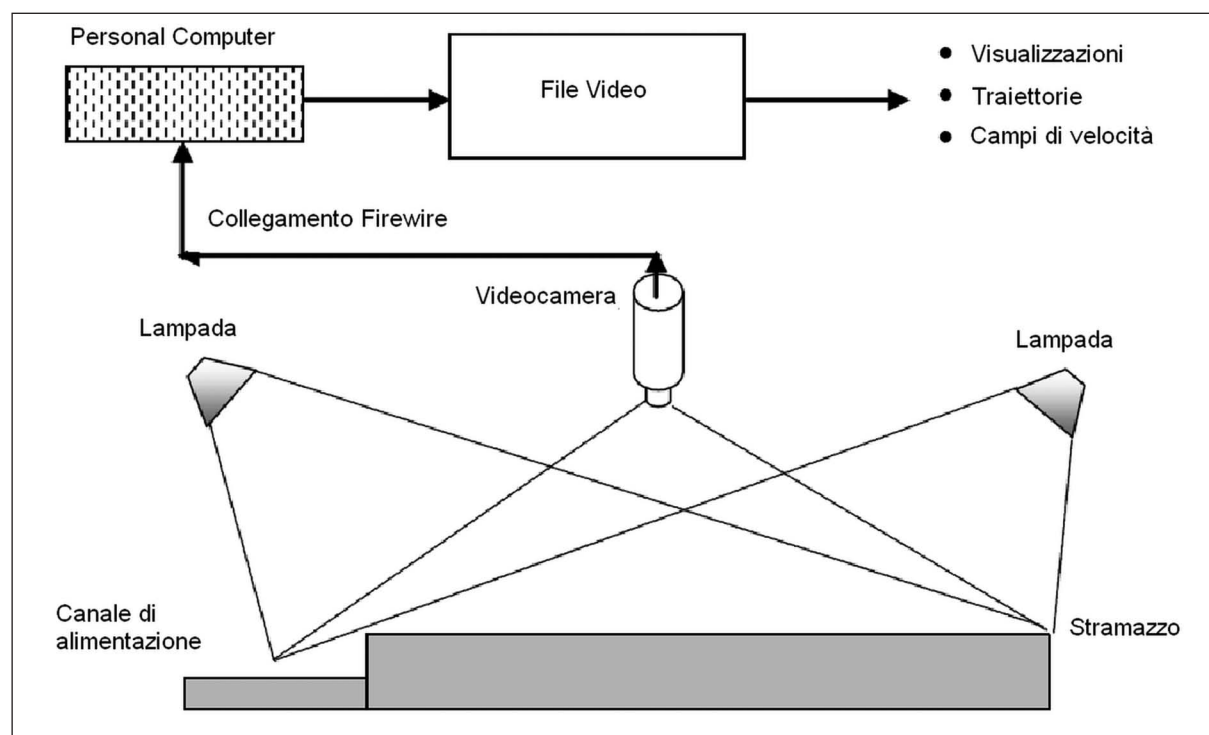


Figura 3 - Schema del sistema di acquisizione.

risoluzione temporale nel campo di valori delle velocità medie utilizzate negli esperimenti.

Le riprese effettuate dall'alto non hanno fornito indicazioni sulla dinamica in atto negli strati profondi la cui analisi, peraltro, esula dalle finalità di questo lavoro. Per visualizzare il flusso è stato immesso nel circuito idraulico un colorante (fluoresceina sodica o tempera bianca).

Nella Figura 4 viene visualizzato il flusso in corrispondenza della foce del fiume Pescara e mostrato come 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 meridionale del porto (verso destra nelle immagini), mentre il ramo secondario, caratterizzato da portate più modeste (di acque dolci e di quanto ad esse associato), rimane aderente alla diga e si dirige verso la costa settentrionale, allargandosi e perdendo progressivamente energia cinetica, con conseguente degrado ambientale del litorale a nord del Porto (Berti et al., 2000; Lalli et al., 2005).

Il confronto con l'immagine ottenuta nell'ambito di un volo di ricognizione effettuato dal Comando dei

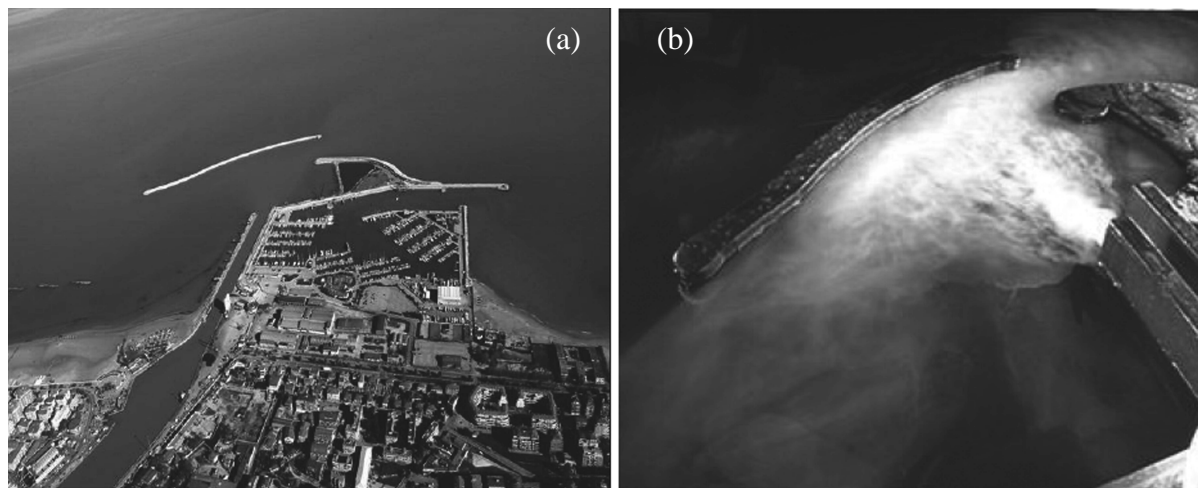


Figura 4 - a) Foto aerea del deflusso fluviale nel porto di Pescara (Comando dei Carabinieri per la Tutela dell'Ambiente, novembre 2004); b) visualizzazione effettuata su modello in scala 1:1000 presso il laboratorio ISPRA ($Q=0,08$ l/sec, $g(\rho_0-\rho_1)/\rho_0 \cong 0,1924$).

Carabinieri per la Tutela dell'Ambiente (Fig. 4a), evidenzia l'efficacia della riproduzione in laboratorio del fenomeno reale (Fig. 4b) tenendo conto della presenza della stratificazione salina. È opportuno evidenziare che la simulazione in laboratorio del flusso in condizioni barotropiche conduce ad una sottostima della propagazione delle acque fluviali lungo il litorale settentrionale.

Risultati delle prove

Sono state provate in laboratorio 9 possibili ipotesi di modifica della configurazione del porto (Lalli et al., 2005); nel presente lavoro vengono descritte solo quelle più significative. Nella prima ipotesi (Fig. 5) si è cercato anzitutto di ostacolare la dispersione superficiale delle acque dolci di provenienza fluviale verso le vicine spiagge, senza intaccare la struttura della diga, mediante l'installazione di una panna galleggiante lunga circa 400 m che collega l'estremità del molo settentrionale del porto canale con la diga foranea, a circa 150 m dalla testata nord. Il funzionamento della barriera è ipotizzato soltanto nel periodo estivo, in cui forti mareggiate sono molto poco probabili, rendendo quindi secondarie le esigenze di accesso al porto dal lato nord (è opportuno ricordare che la Direzione Marittima di Pescara prescrive, nella attuale configurazione portuale, il mantenimento dell'ingresso dal lato nord, in quanto le mareggiate di Bora rendono problematico l'ingresso dal lato sud, che avviene, in corrispondenza di tali eventi, con il mare al traverso). La quota di sommergezza proposta è pari a 2 m, tenendo conto che le misure di stratificazione effettuate in campo dall'ARTA Abruzzo hanno fornito livelli non superiori a 1,5 m per lo strato superficiale di acque dolci. Sono state condotte prove sperimentali con due quote di sommergezza: una barriera che copre una profondità pari al 125% dello spessore della vena di acqua dolce nel canale di alimentazione blocca completamente il deflusso verso settentrione, mentre se lo spessore della barriera è pari al 100% dello strato superficiale il deflusso al di sotto di essa è molto modesto, pressoché trascurabile. Questa realizzazione, di basso costo, sicura efficacia e rapida esecuzione, consente di mitigare gli effetti ambientali della diga foranea, riguardanti le alterazioni della qualità delle acque marine lungo la costa settentrionale, conseguenti ai fenomeni di dispersione e diffusione delle acque del fiume Pescara (Berti et al., 2000; Lalli et al., 2005; Regione Abruzzo, 2003b) e di proseguire quindi le indagini diagnostiche finalizzate alla progettazione di opere di maggiore impegno.

La seconda ipotesi prevede la realizzazione di un'apertura nella diga foranea, per una lunghezza di 50 m, in corrispondenza del primo flesso partendo da nord (Fig. 6).

L'apertura è limitata alla profondità di 2 m per contenere la trasmissione dell'onda, mentre un deflettore, lungo 100 m, ha lo scopo di favorire l'uscita delle acque di provenienza fluviale oltre la diga foranea.



Figura 5 - Introduzione di una barriera galleggiante per impedire il deflusso delle acque fluviali lungo la costa a nord del porto di Pescara; immersione della struttura nella prova: 2,5 cm (2,5 m al vero).

L'apertura, inoltre, consente il ricambio delle acque nello specchio portuale.

La visualizzazione del flusso evidenziata in Figura 6 mostra però che, quantunque l'apertura consenta il parziale deflusso delle acque fluviali verso il mare aperto, gli effetti complessivi non possono essere considerati soddisfacenti, in quanto una componente significativa del deflusso è rivolta verso il litorale settentrionale.

Un'ulteriore soluzione consiste nell'inserimento del deflettore, appena descritto, in corrispondenza del primo flesso che la diga foranea forma partendo da nord (Fig. 7), e di un pennello posto circa 200 m a nord della testata settentrionale della diga, che si protende verso il mare per circa 530 m fino alla batimetrica -5,5 m. In questo caso però la presenza del deflettore, 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 dal pennello radicato a riva, a nord della diga foranea. Tale pennello, previsto al di fuori della zona d'ombra della diga foranea, ha la funzione di separare fisicamente la costa settentrionale dall'area portuale e intercettare il trasporto solido proveniente da nord.

La struttura, inoltre, permette l'ingresso del moto ondoso nell'area compresa tra il porto canale e la zona



Figura 6 - Apertura nella diga foranea con deviatore di flusso per facilitare il deflusso delle acque fluviali verso il largo.

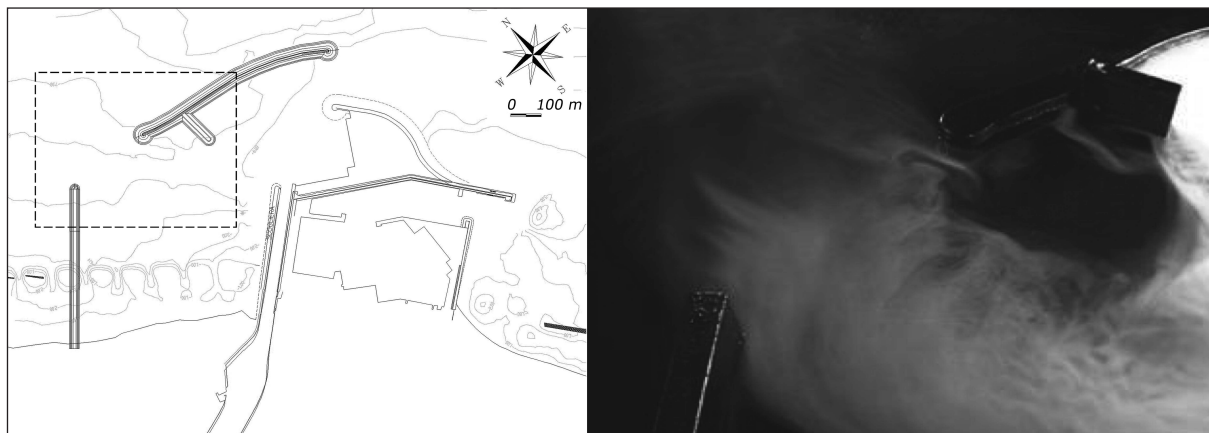


Figura 7 - Deviatore di flusso e pennello intestato a riva per impedire il deflusso delle acque fluviali lungo la costa a nord del porto di Pescara.

balneabile a nord del porto, evitando il ristagno delle acque fluviali e la deposizione del sedimento da esse trasportate, senza alterare il naturale mescolamento tra acque dolci e salate e la necessaria ossigenazione delle acque.

Questa prova, confrontata con tutte le altre, evidenzia come la separazione fisica del tratto di litorale utilizzato per la balneazione dall'area portuale risulti essere l'unico modo per ottenere la completa e definitiva soluzione del problema della qualità delle acque nella fascia costiera a nord del porto.

L'efficacia di questa soluzione potrebbe essere migliorata introducendo l'apertura nella diga foranea descritta in Figura 6.

Le ulteriori soluzioni proposte (Lalli et al., 2005) prevedono modifiche sostanziali della diga foranea; si tratta di opere molto onerose, rispetto a quelle previste nelle precedenti soluzioni, e richiedono quindi notevole cautela nell'analisi dei risultati e relativi costi/benefici.

In questo lavoro viene descritta l'ipotesi che contempla la rimozione della parte centrale della diga foranea e la realizzazione di due moli convergenti protesi verso il largo a protezione del nuovo ingresso così ottenuto (Fig. 8).

Tuttavia, nonostante l'ampiezza notevole dell'apertura, questa soluzione comporta una riduzione davvero minima del deflusso delle acque fluviali verso nord.

Infatti, le visualizzazioni sperimentali mostrano che il getto fluviale impatta sul molo convergente settentrionale e genera una circolazione che induce un ritorno delle acque dolci verso la costa. Probabilmente una diversa forma e orientamento dei moli convergenti potrebbe migliorare il drenaggio del deflusso fluviale verso il largo, fatta salva la necessità di proteggere la nuova imboccatura dalle mareggiate tenendo conto di tutte le forzanti idrodinamiche e meteo-marine in gioco.

Conclusioni

In questo lavoro sono descritti i risultati delle indagini sperimentali, svolte presso il laboratorio di fluidodinamica dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, finalizzate allo studio della dispersione del deflusso fluviale nel porto di Pescara. Gli esperimenti sono stati compiuti per diverse configurazioni delle opere portuali. I risultati hanno fornito indicazioni qualitative, ma determinanti per la definizione di soluzioni in grado di mitigare o risolvere il problema ambientale del litorale a nord del porto di Pescara.

Le esperienze condotte hanno ben evidenziato che la presenza del forzante baroclinico, legato agli effetti di galleggiamento delle acque fluviali su quelle marine più dense, rende molto difficile il controllo del flusso. Infatti, le soluzioni che prevedono aperture nella diga foranea, quantunque consentano il libero deflusso delle acque fluviali verso il largo, non possono impedire l'espansione dello strato di acqua dolce in tutte le direzioni,

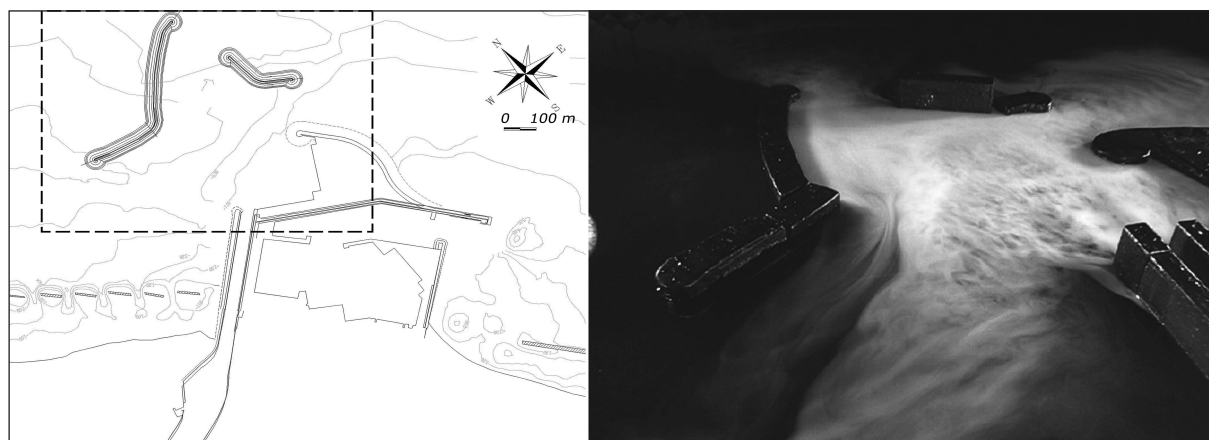


Figura 8 - Realizzazione di un'ampia apertura nella diga foranea, protetta con moli convergenti.

a meno che l'ampiezza dell'apertura non sia tale da consentire una fuoriuscita estremamente rapida delle acque fluviali dall'area portuale.

Nella configurazione attuale il deflusso del fiume Pescara è fortemente condizionato dalle opere presenti immediatamente a ridosso della foce. Le prove sperimentali hanno evidenziato che, tra gli interventi proposti, quelli che mantengono l'apertura del porto sul lato nord sono in grado di limitare il deflusso di acque fluviali (e di quanto ad esse associato) lungo la costa settentrionale, ma non di eliminarlo completamente. Ad esempio, le soluzioni analizzate che prevedono la realizzazione di aperture, anche ampie, nella diga foranea, non garantiscono una soluzione soddisfacente del problema della qualità delle acque. Inoltre, la realizzazione di aperture nella diga foranea richiede opere permeabili finalizzate a contrastare la penetrazione del moto ondoso nel porto; l'efficienza (dal punto di vista del drenaggio delle acque fluviali) di aperture così "attrezzate" richiede, quindi, ulteriori verifiche.

Alla luce di quanto osservato, solo la chiusura del varco a 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. A tal proposito, la barriera galleggiante 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.

Come possibile soluzione definitiva è stata proposta la configurazione descritta in Figura 9, con la quale si propone di risolvere le problematiche ambientali 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. In primo luogo 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. La portualità di Pescara viene razionalizzata e suddivisa in bacini separati, con miglioramento dell'utilizzo delle aree a terra e degli specchi acquei. Il porto commerciale può disporre di una banchina lato terra più lunga e di maggiori spazi ricavati dalla colmata dell'attuale porto canale. Inoltre, la pesca può trovare una stabile collocazione in un'area esclusivamente destinata alle sue attività con possibilità di sviluppo e miglioramento. Infine, il problema dell'insabbiamento dei bacini portuali potrà essere ricondotto alla sola interazione tra il trasporto solido litoraneo e le strutture portuali, eliminando tutte le problematiche relative alla sedimentazione dei materiali del fiume all'interno delle darsene. Tale problematica, comunque, dovrà essere approfondita nel prosieguo dell'*iter* progettuale.

Nella ipotesi di mantenere un'unica imboccatura per il porto di Pescara aperta verso sud, questa deve essere

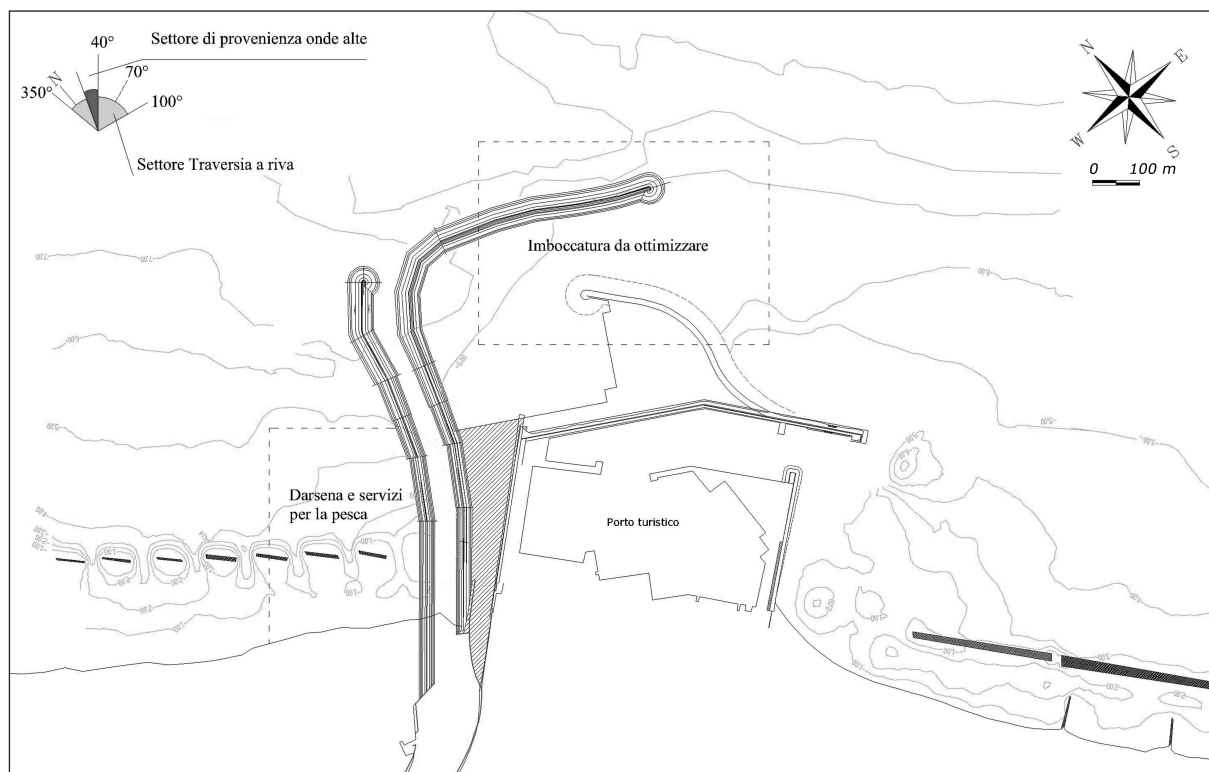


Figura 9 - Soluzione definitiva proposta: realizzazione di argini e modifica della diga foranea per consentire il libero deflusso delle acque fluviali verso il mare aperto.

ottimizzata in modo da aumentare la sicurezza dell'ingresso con modifiche della configurazione planimetrica. Si potrebbe avanzare l'ipotesi di 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.

E' opportuno osservare che la separazione tra l'area portuale e la costa settentrionale dedicata alla balneazione è suggerita anche dalla dinamica litoranea locale, caratterizzata da un trasporto solido lungo costa diretto prevalentemente da nord a sud. L'intercettazione di tale componente impedisce 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). Gli esperimenti, pur avendo consentito una prima selezione delle possibili ipotesi di intervento, non possono essere considerati esaustivi 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 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'avamposto, mentre l'efficienza del deflusso attraverso un'eventuale apertura della diga, allorché gran parte dell'energia cinetica della foce risulta ormai dissipata, dipende molto dalle condizioni esterne.

Ai fini di un esame completo delle ipotesi proposte si ritengono pertanto necessari ulteriori studi.

In particolare, si ritiene opportuno svolgere le seguenti indagini:

- 1) campagne di osservazione e misura *in situ*:
 - correntometria fluviale e marittima;

- stratificazione termica e salina alla foce e nell'area portuale;
 - dati batimetrici; contenuto e distribuzione dei sedimenti in sospensione;
 - qualità delle acque in prossimità della foce; portate del fiume, dati di vento e livelli marini;
- 2) simulazioni con modelli teorico-numeriche 3D, finalizzati alla verifica e all'ottimizzazione delle soluzioni individuate.

Ringraziamenti

Questo lavoro è dedicato alla memoria del Sottosegretario del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti On.le Nino Sospiri, che gli autori ringraziano per la fiducia riposta, l'apprezzamento per i risultati raggiunti e l'incoraggiamento profuso nella promozione delle attività dell'APAT, avviata nel 2000 su iniziativa del Prof Giovanni Damiani. Le attività in campo sono state svolte in collaborazione con la Regione Abruzzo, l'Agenzia Regionale per la Tutela dell'Ambiente Abruzzo, che ha messo a disposizione imbarcazioni e strumentazione, la Direzione Marittima di Pescara e il Comando dei Carabinieri per la Tutela dell'Ambiente. Gli autori ringraziano infine Claudio Cerri, Massimo Falchi, Lorenzo Morra, Cristiano, Ravaioli, Enzo Verrastro per la collaborazione offerta durante lo svolgimento del lavoro.

Bibliografia

- Adrian R. J. (1991) - *Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics*. Annual Reviews of Fluid Mechanics, 23: 261-304.
- Balas L. e Ozhan E. (2000) - *An Implicit three-Dimensional Numerical Model to Simulate Transport Processes in Coastal Water Bodies*. Journal of Computational Physics, 34: 307-339.
- Barbano A., Corsini S., Lisi I., Bruschi A., Del Gizzo M., Archina M. e Paone M. (2008) - *Caratteristiche della Costa Italiana: le Unità Fisiografiche e le Profondità di Chiusura*. Atti della I Conferenza Nazionale Coste: Prevenire, Programmare, Pianificare, Maratea, 9: 359-368.
- Berti D., Lalli F., Mozzi M., Miscione F., Porfidia B., Vittori E., De Girolamo P. (2000) - *Effetti delle opere antropiche recenti sull'equilibrio naturale dell'area circostante il porto-canale di Pescara*. Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, ANPA, Roma, pp. 8.
- Casulli V. (1990) - *Semi-implicit Finite Difference Methods for the Two-Dimensional Shallow Water Equations*. Journal of Computational Physics, 86: 56-74.
- Casulli V. (1999) - *A Semi-Implicit Finite Difference Method for Non-Hydrostatic Free-Surface Flows*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 30: 425-440.
- Cenedese A. e Romano G. P. (1990) - *PIV: a new technique in flow velocity measurements*. Excerpta, 5: 57-97.
- Chetverikov D. (2002) - *Particle image velocimetry by feature tracking*. Computer Analysis of Images and Patterns, LNCS, Springer Verlag, 2124: 325-332.
- Cugier P. e Le Hir P. (2002) - *Development of a 3D Hydrodynamic Model for Coastal Ecosystem Modelling. Application to the Plume of the Seine River (France)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 55: 673-695.
- 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 Tecnico Conclusivo, Roma.
- Desiderio G., Nanni T. e Rusi S. (2001) - *La pianura alluvionale del fiume Pescara (Abruzzo): idrogeologia e vulnerabilità dell'acquifero*. Mem. Società Geologica Italiana, 56: pp. 197-211.
- Erhardt F.A. (2000) - *Theory and applications of digital image processing*. University of applied Sciences Offenburg: pp. 1-48.
- Fadlun E.A., Verzicco R., Orlandi P., Mohd-Yusof J. (2000) - *Combined Immersed-Boundary Finite-Difference Methods for Three-Dimensional Complex Flow Simulation*. Journal of Computational Physics,

161: 35-60.

- Fischer H.B., List J.E., Koh R.C.Y., Imberger J. e Brooks N.H. (1979) - *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, Inc., pp. 511.
- Ibanez C., Saldana J e Prat N. (1999) - *A Model to Determine the Advective Circulation in a Three Layer, Salt Wedge Estuary: Application to the Ebre River Estuary*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48: 271-279.
- Kourafalou V.H. (2001) - *River plume development in semi-enclosed Mediterranean regions: North Adriatic Sea and North western Aegean Sea*. *Journal of Marine Systems*, 30: 181-205.
- Lalli F., Berti D., Miozzi M., Miscione F., Porfidia B., Serva L., Vittori E. e Romano G.P. (2001a) - *Analysis of Breakwater-Induced Environmental Effects at Pescara (Adriatic Sea, Italy) Channel-Harbor*. Proc. 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway, 2: 404-408.
- Lalli F., Berti D., Miozzi M., Miscione F., Porfidia B., Vittori E. e De Girolamo P. (2001b) - *Porto di Pescara: analisi degli effetti indotti sul litorale dal nuovo molo di levante*. In "Porto di Pescara, Comitato per un nuovo porto in sintonia con la città e l'ambiente", a cura dell'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, ANPA, Roma: <http://www.portodipescara.com>.
- Lalli F., Miozzi M. e Romano G. P. (2002a) - *Some remarks on river mouth flow*. Proc. 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, 3: 659-664.
- Lalli F., Miozzi M. e De Girolamo P. (2002b) - *Aspetti idrodinamici e ambientali del porto-canale di Pescara: simulazioni numeriche e indagini sperimentali*. Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e Servizi Tecnici dello Stato, APAT, Roma.
- Lalli F., Falchi M., De Antoniis L. e Romano G.P. (2004) - *Analisi delle interazioni tra deflusso fluviale e opere marittime nel porto di Pescara: indagini sperimentali, simulazioni numeriche, osservazioni in campo*. Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e Servizi Tecnici dello Stato, APAT, Roma.
- Lalli F., Corsini S., Guiducci F., Cerri C., Falchi M., Lisi I., Morra L. e Verrastro E. (2005) - *Dispersione del deflusso fluviale nell'area portuale di Pescara: proposte preliminari di intervento*. Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e Servizi Tecnici dello Stato, APAT, Roma, pp. 72.
- Le H. e Moin P. (1991) - *An improvement of Fractional Step Methods for the Incompressible Navier-Stokes Equations*. *Journal of Computational Physics*, 92: 369-379.
- Li C.W. e Wang J.H. (2000) - *Large Eddy Simulation of Free Surface Shallow Water Flow*. *International Journal for Numerical Methods in Fluid.*, 34: 31-46.
- Liska R. e Wendroff B. (1999) - *Two Dimensional Shallow Water Equation by Composite Scheme*. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 30: 461-479.
- Lloyd P.M. e Stansby P.K. (1997a) - *Shallow-water flow around model conical islands of small side slope. Part I: Surface piercing*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123: 1057-1067.
- Lloyd P.M. e Stansby P.K. (1997b) - *Shallow-water flow around model conical islands of small side slope. Part II: Submerged*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123: pp. 1068-1077.
- Marrocu M. e Ambrosi D. (1999) - *Mesh Adaptation Strategies for Shallow Water Flow*. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 31: 497-512.
- Miozzi M. (2003) - *Advanced particle tracking velocimetry using feature tracking*. Dipartimento Idraulica, Trasporti e Strade, Università La Sapienza, Roma. pp. 12
- Provini A., Galassi S. e Marchetti R. (1998) - *Ecologia Applicata*. UTET, pp. 1190
- Russo M. (2003) - *Il fiume Pescara: caratteristiche idrologiche del bacino*. In "Porto di Pescara, Comitato per un nuovo porto in sintonia con la città e l'ambiente", a cura del Servizio Idrografico e Mareografico di Pescara, <http://www.portodipescara.com>.
- Regione Abruzzo, Servizio Opere Marittime e Qualità delle Acque Marine. (2003a) - *Progetto Esecutivo per i lavori di riqualificazione ambientale e di difesa delle aree della fascia costiera litoranea di Martinisicuro, Pescara Sud-Francavilla a Mare, Fossacesia, Casalbordino, Vasto, Montesilvano e Pineto-Silvi*.

- In "Progetto Esecutivo, Relazioni Tecniche Specialistiche: B3 Studio Morfologico", a cura della Regione Abruzzo, l'Aquila, pp. 62.
- Regione Abruzzo (2003b) - *Rapporto sullo stato dell'ambiente 2001*. In "Rassegna documenti regionali 1/2003", a cura della Struttura Speciale di Supporto Stampa della Giunta Regionale d'Abruzzo, Edigrafital S.p.A., Teramo, 1, pp. 319.
- Uittenbogaard, R.E., Van Vossen, B. (2004) - *Subgrid-scale model for quasi-2D turbulence in shallow water*. Shallow Flows, Jirka & Uijtewaal eds, Taylor & Francis Group, London, pp. 575-582.
- Uncles R. J. e Stephens J. A. (1996) - *Salt Intrusion in the Tweed Estuary*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 43: 271-293.

Ricevuto il 03/06/2009, accettato il 09/09/2009.