

Gli effetti della navigazione maggiore in laguna di Venezia

di **LUCA ZAGGIA***

Ricercatore dell'Istituto di Geoscienze e Georisorse, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Padova

PREMESSA

Il tema della navigazione nella laguna di Venezia è senza dubbio un argomento piuttosto controverso e gli interessi di tipo sociale ed economico che accompagnano le discussioni sulle criticità del traffico acqueo impediscono spesso di percepire il problema nella sua globalità.

Quando si parla di "grandi navi", ad esempio, si pensa quasi sempre alle navi da crociera, forse a causa della evidente sproporzione con il contesto urbano attraverso il quale le stesse transitano per raggiungere la loro destinazione alla Stazione Marittima. Quasi che le navi commerciali, che attraversano la laguna centrale dirette al porto industriale di Marghera, non fossero altrettanto grandi, essendo fuori dalla visuale dell'osservatore comune e mancando un riferimento che consenta di percepirne la dimensione reale.

Un altro problema è la scarsa attenzione rivolta ai movimenti delle imbarcazioni minori. Il flusso turistico a Venezia supera i trenta milioni di persone all'anno e in gran

parte si tratta di presenze giornaliere. Di questi, un numero inferiore a due milioni raggiunge la città ammirandola dal ponte di una nave da crociera. I rimanenti raggiungono il centro storico di Venezia in parte attraverso la ferrovia e, soprattutto, attraverso una flotta di imbarcazioni più piccole, provenienti dall'aeroporto o dai litorali, e dirette verso la città. Anche questi natanti generano moto ondoso per la forma della loro carena, in alcuni casi decisamente inadeguata alla navigazione lagunare.

Esiste infine il traffico locale (vaporetti, motonavi e altro) che movimentata ogni giorno persone e cose all'interno della città e fra i vari terminal della terraferma-isole e la città stessa.

Una delle principali lacune nella comprensione dei fenomeni in grado di influenzare l'evoluzione morfologica della laguna è proprio la scarsa conoscenza degli impatti legati alla navigazione minore. Non esiste a oggi alcuna stima della quantità totale di energia immessa nel bacino lagunare sotto forma di onde di breve periodo dalle imbarcazioni minori. Sappiamo anche molto poco delle conseguenze di questo tipo di stress sui fondali della laguna e sulle strutture del centro storico, già indebolite da diversi altri fenomeni. L'unica eccezione in questo contesto sono degli studi effettuati alcuni decenni fa dall'Università di Padova sulla base di misure effettuate in collaborazione con l'Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ISDGM, ora CNR-ISMAR, Istituto di Scienze Marine) per conto del Comune di Venezia nei quali si consideravano il moto ondoso prodotto in laguna da diverse tipologie di natanti (Costa e Nadali, 1988; G. Liberatore, 1988; D'Alpaos e Liberatore, 1993). Ulteriori indagini svolte dal CNR-ISDGM hanno considerato anche

* Hanno contribuito anche:

F. Barbarioli, D. Bellafiore, A. Benetazzo, F. De Pascalis, C. Ferrarin, G. Manfé, G. Lorenzetti, G.M. Scarpa, L. Dametto
Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia

R. Brogliati, S. Zaghi
Istituto di Ingegneria Marina, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma

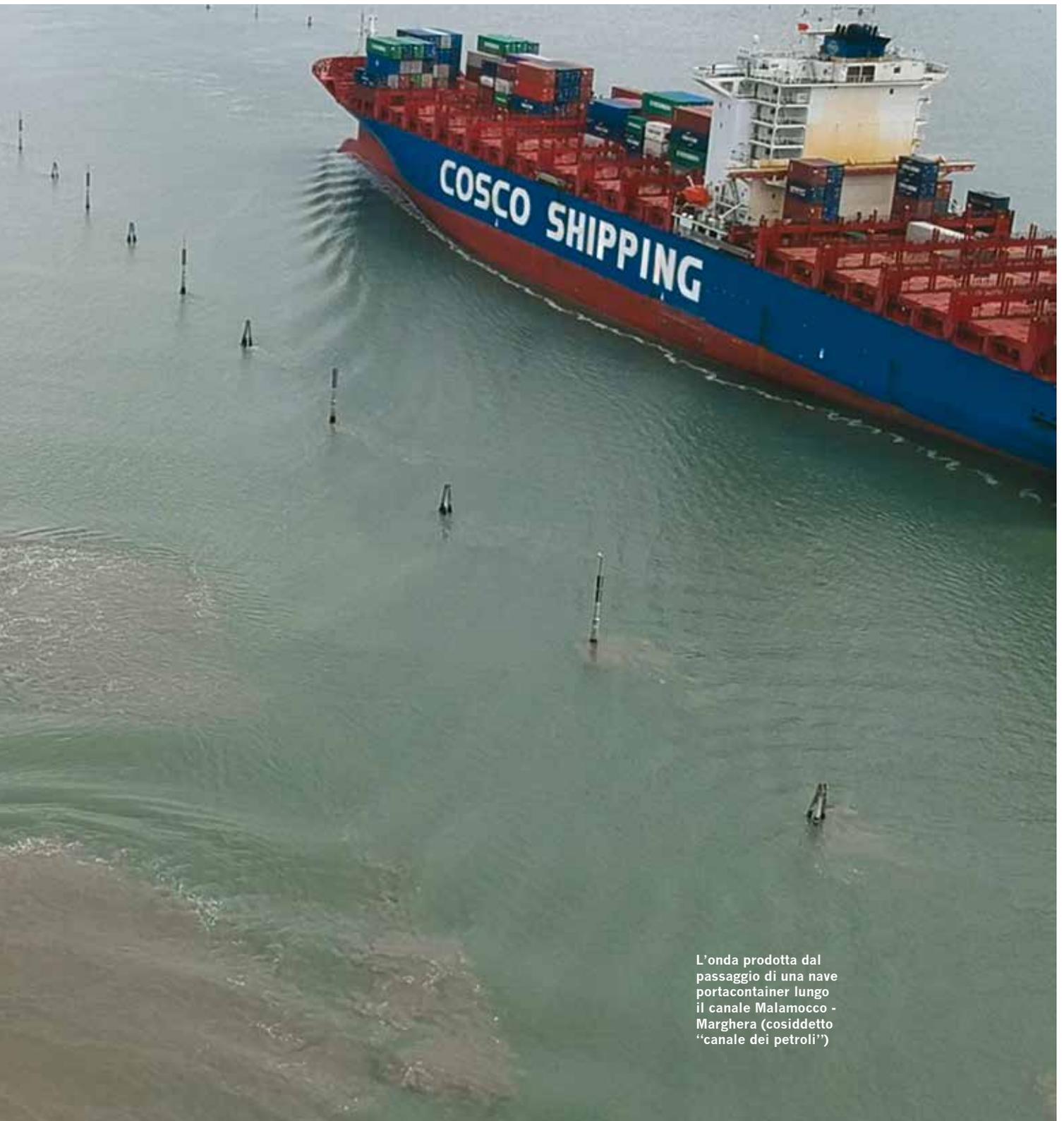
E. Molinaroli, M. Gionta
Università Cà Foscari di Venezia, Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica

F. Mauro, N. Trevisan
Università di Trieste, Dipartimento di Ingegneria e Architettura

K. Parnell, T. Soomere
Tallinn University of Technology, Estonia

J. Rapaglia
Christian Albrecht University, Kiel





L'onda prodotta dal passaggio di una nave portacontainer lungo il canale Malamocco - Marghera (cosiddetto "canale dei petroli")

le accelerazioni sulle strutture adiacenti i canali del centro storico in concomitanza al passaggio di determinate imbarcazioni (Vazzoler e Canestrelli, 1996; Canestrelli *et al.*, 2000). Si tratta di una tematica che oggi varrebbe la pena di riconsiderare, anche alla luce dell'evoluzione dei flussi turistici, consentendo finalmente di quantificare l'impatto delle diverse componenti del traffico sul sistema lagunare e sulla città.

Queste conoscenze costituirebbero la base di riferimento per valutazioni delle tendenze di medio e lungo periodo, utile non solo alla definizione di un piano morfologico della laguna di Venezia, ma anche per la manutenzione urbana, la gestione dei flussi turistici e lo sviluppo dei servizi di trasporto sostenibili da e verso la città lungo le varie direttrici.

Il panorama delle conoscenze sugli effetti del traffico navale maggiore è invece decisamente più ricco. Oltre agli studi preliminari condotti negli anni 2002-2004 (Costa e Zuliani, 2004; Adami *et al.*, 2002) nel bacino di San Marco e nei canali adiacenti durante il passaggio delle navi da crociera, esiste ormai una cospicua serie di contributi sul moto ondoso nei canali di grande navigazione con particolare riferimento al canale Malamocco-Marghera. I risultati di questi studi sono stati pubblicati in diversi contesti da un team di ricerca internazionale coordinato da CNR-ISMAR (Parnell *et al.*, 2016a; Parnell *et al.*, 2016b; Rodin *et al.* 2015; Rapaglia *et al.*, 2011; Zaggia *et al.*, 2017). Le indagini considerano i fenomeni di generazione delle perturbazioni ondose nel canale e il loro impatto sulle aree emerse e sommerse. In questo contributo si riassumono le principali evidenze auspicando che possano contribuire alla riflessione sulla sostenibilità delle scelte future e all'individuazione di criteri e azioni per la mitigazio-

ne delle cause del moto ondoso oltre che gli impatti conseguenti.

INTRODUZIONE

Per molti secoli la navigazione in laguna di Venezia ha rappresentato una sfida. Fin dalle sue origini la città "regina dei mari" ha dovuto impegnarsi in una lotta incessante per contrastare l'evoluzione morfologica del suo sistema di bocche tidali e garantire alla sua flotta commerciale un accesso al mare. L'azione del trasporto litoraneo di sabbie creava infatti delle barre sabbiose di fronte al porto di San Nicolò e piegava progressivamente a sud il canale di accesso alla laguna rendendo molto rischiosa la navigazione in presenza di venti sfavorevoli come la bora e lo scirocco. Inoltre la formazione di scanni causava il restringimento e la riduzione di profondità della sezione del canale di accesso costringendo le autorità lagunari a continui interventi sulla morfologia e l'assetto idraulico. L'interminabile successione di opere di ingegneria marittima realizzate per mitigare i fenomeni è sintetizzata nell'affascinante contributo di Lippe (1984) nel quale l'evoluzione delle bocche tidali viene descritta parallelamente all'evoluzione tecnologica delle costruzioni navali e inquadrata nel contesto storico.

Una soluzione definitiva al problema della navigabilità del porto di Lido fu raggiunta con l'unione delle tre bocche di San Nicolò, Sant'Erasmo e Treporti mediante i moli guardiani realizzati alla fine del diciannovesimo secolo. L'impulso per l'esecuzione dell'opera fu, fra le altre cose, la preoccupazione per la progressiva riduzione del ricambio idrico nel sottobacino che comprende Venezia, alla quale vennero attribuite le cause di un'epidemia di colera. Con la realizzazione dei moli guardiani la profondità del porto di Lido si stabilizzò su

quote vicine a quelle attuali e Venezia poté finalmente riprendere la sua competizione come porto commerciale, grazie anche alla realizzazione del porto industriale di Marghera che si sostituì allo scalo della Marittima, oggi destinato al solo traffico crocieristico (Costantini, 2004).

Per più di quarant'anni la rotta verso il porto industriale di Marghera passò quindi attraverso la città di Venezia, nel canale della Giudecca, per poi proseguire lungo il canale Vittorio Emanuele ricavato dall'ampliamento di un canale preesistente. Per ridurre la pressione sulla città e il rischio di incidenti, verso la fine degli anni '60 si diede inizio allo scavo del canale Malamocco-Marghera. La nuova via d'acqua diventò nota anche come canale dei Petroli: una denominazione che ben descrive la sua funzione attesa, e cioè la diversione del traffico commerciale, in particolare quello petrolifero, che comportava un rischio insostenibile per il centro storico di Venezia (una nave petroliera andò a fuoco nel porto di Marghera nel 1960 causando diverse vittime e suscitando una notevole preoccupazione per le sorti della città).

L'apertura di questo nuovo canale in laguna di Venezia fu oggetto di grandi discussioni già nella fase di progettazione. Durante il collaudo dell'opera, vi furono proteste in campo da parte delle comunità di pescatori preoccupati per l'integrità della laguna centrale che tentarono di bloccare l'ingresso di una nave petroliera. Critiche alla scelta vennero anche da una parte dall'ambiente scientifico, ma prevalsero nelle decisioni degli amministratori un concetto distorto nella gestione dell'ecosistema e cioè l'idea che le dinamiche della laguna non cambino fintantoché i volumi scavati sono compensati da altrettante opere di imbonimento (Costantini, 2004). Si trattava di un'interpretazione

distorta, com'è noto a tutti coloro che si interessano della salvaguardia dell'ambiente lagunare. A distanza di circa quarant'anni dallo scavo del Malamocco-Marghera, si è potuto infatti rilevare come la sua fase di esercizio abbia comportato una grossa perdita sedimenti nel bacino centrale della laguna con approfondimenti di circa un metro e un generale appiattimento della morfologia (Sarretta *et al.*, 2010).

Le cause di questi cambiamenti furono subito attribuite alle variazioni dell'assetto idrodinamico della laguna conseguenti alla realizzazione dell'opera. Tuttavia, in base anche ai risultati delle più recenti ricerche, sembra che almeno una parte delle trasformazioni osservate possa essere la conseguenza di un'azione diretta del traffico navale sulla morfodinamica delle aree adiacenti al canale. Negli anni in cui era stato progettato, il canale Malamocco-Marghera doveva accogliere navi di dimensioni massime intorno ai 200 metri. Oggi questo limite si è spostato verso i 300 metri con larghezze fino a 40 metri e pescaggi di 9 metri e oltre. In pratica, ci si avvicina alla metà della sezione utile in corrispondenza alla cunetta con una notevole intensificazione dei fenomeni legati al dislocamento descritti nel seguito. Si tratta di una situazione che, al di là delle ripercussioni sulla morfo-idrodinamica, dovrebbe anche suscitare qualche riflessione sugli aspetti della sicurezza. I recenti episodi avvenuti lungo il canale della Giudecca e in bacino San Marco hanno riaperto il dibattito sul futuro del traffico crocieristico e sulle soluzioni alternative auspiccate dal decreto Clini-Passera. Sulla spinta dell'emergenza, l'attenzione generale sembra ora rivolgersi verso quella che appare come l'unica soluzione realizzabile con il minimo delle risorse e in tempi relativamente brevi. Tuttavia, nonostante le recenti valu-

Figura 1. Onda di depressione registrata al margine est del canale Malamocco-Marghera durante il passaggio della Nave Cargo Abu Dhabi Star (velocità 7.7 nodi, lunghezza 183 m, larghezza 32 m, pescaggio 7.8 m), il giorno 01/04/2014 alle 15.30 (da: Zaggia et al., 2017). Sul margine ovest del canale l'ampiezza della depressione nello stesso evento ha raggiunto i 2.5 metri (Parnell et al., 2016a)

tazioni sulle capacità di traffico dimostrino la possibilità di una intensificazione dei transiti, le evidenze degli studi ambientali indicano come il canale Malamocco-Marghera sia già in condizioni critiche nella sua configurazione attuale e con l'attuale intensità dei traffici portuali. In questa nota si riassumono i principali aspetti di questa situazione di criticità alla luce dei risultati delle ricerche condotte.

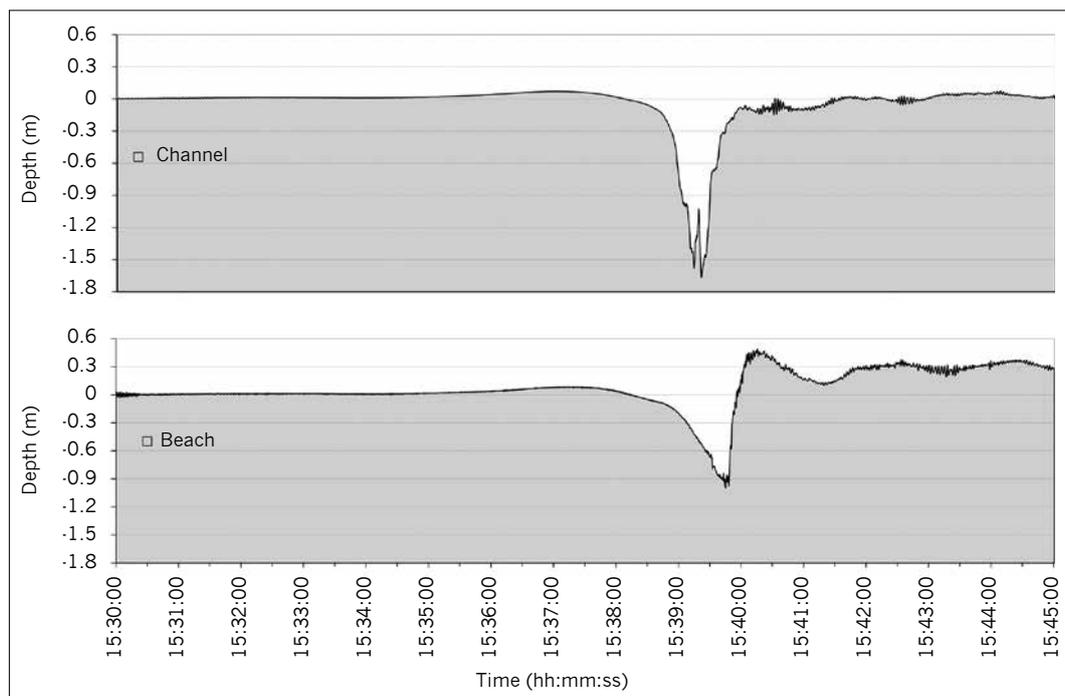
LE ONDE GENERATE DAL PASSAGGIO DEI MEZZI NAVALI

Una nave in movimento sulla superficie dell'acqua determina delle perturbazioni al campo di moto che si traducono nella formazione di onde superficiali di diverso tipo. Secondo la teoria sviluppata da Lord Kelvin (1887-1904), in condizioni di acque profonde, cioè per profondità dell'acqua molto maggiori della lunghezza d'onda della perturbazione, il sistema di onde generato è dato dalla sovrapposizione di due tipi

principali di oscillazioni: le onde trasversali che si propagano nella direzione del moto del natante e le onde divergenti (di prua e di poppa) che si propagano lateralmente allo scafo secondo un angolo caratteristico (circa 20°). I due pattern interagiscono dando luogo a fenomeni di interferenza.

Durante la navigazione in condizioni di acque basse, cioè con profondità di poco superiori al pescaggio della nave, l'acqua al di sotto dello scafo e ai lati dello stesso (nel caso di un canale navigabile) subisce un'accelerazione. In base al principio di conservazione dell'energia, questa accelerazione determina una riduzione della pressione (livello) in prossimità della parte centrale dello scafo formando un'onda a forma di "V", detta onda di Bernoulli o onda di depressione (Figura 1).

L'onda di depressione segue la nave nel suo percorso e, nel caso del transito in un canale navigabile, viene amplificata per l'interazione con il fondale ai lati del canale



(effetto di shoaling) assumendo forma cavo-cresta asimmetrica. Se la navigazione avviene a velocità molto più basse di quelle tenute in mare aperto, come dovrebbe essere per il transito di grandi navi in laguna di Venezia, lo sviluppo dei sistemi di onde divergenti risulta trascurabile rispetto alle onde di depressione che diventano invece il fenomeno dominante. Ciò che un osservatore può notare, in prossimità del margine di canale di navigazione in laguna di Venezia, è un rapido movimento dell'acqua verso il canale con un repentino abbassamento del livello seguito da un altrettanto rapido innalzamento, sovente caratterizzato da un fronte più ripido. Per le navi più grandi e per velocità sostenute (> 6 nodi) l'ampiezza di questa escursione (la differenza fra il livello imperturbato e il cavo dell'onda) nel canale navigabile Malamocco-Marghera può raggiungere e superare i due metri (Figura 2). Nel caso in cui il canale navigabile sia affiancato da aree a basso fondale, come per il canale Malamocco-Marghera, la propagazione dell'onda di depressione sulle piane tidali e le aree di sponda è influenzata da ulteriori fenomeni.

La velocità di un'onda in acque basse è essenzialmente condizionata dalla profondità ed è descritta dalla relazione:

$$v = \sqrt{gh}$$

dove g è l'accelerazione di gravità e h è la profondità.

Nella fase di ritiro il livello dell'acqua consente alla perturbazione di propagarsi con una propria velocità. Nella successiva fase di risalita del livello la propagazione della perturbazione è invece condizionata dalla ridotta profondità e sarebbe naturalmente soggetta a un rallentamento. Tuttavia essa viene forzata dal moto della nave a spo-



starsi a una velocità superiore a quella che potrebbe avere a quella stessa profondità dando quindi origine a un fronte onduoso molto ripido (bore). Questo fenomeno, che presenta notevoli analogie con le onde di marea che, in particolari condizioni risalgono alcuni estuari, dà luogo a una forte risospensione del sedimento delle aree di sponda del canale e dei bassi fondali provocando un trasporto significativo in direzione longitudinale e una forte erosione. L'azione erosiva del fenomeno è anche intensificata dall'elevata densità della sospensione di acqua e sedimento movimentata dall'onda. Le caratteristiche di queste onde sono state studiate ampiamente nella laguna di Venezia nel corso di diverse indagini sperimentali. In queste indagini i singoli eventi sono stati associati allo specifico natante in transito utilizzando le informazioni derivanti da un sistema di monitoraggio del traffico basato sulla tecnologia AIS (Automatic Identification System). Il sistema è operativo presso la sede del CNR-ISMAR con ricevitori localizzate entro il perimetro della città e a mare, sulla piattaforma oceanografica "Acqua Alta" del Consiglio Nazionale delle Ricerche. I dati sperimentali derivanti

Figura 2. L'onda di depressione generata dal passaggio della nave Xin Qing Dao (velocità 8.1 nodi, lunghezza 279 m, larghezza 40 m, pescaggio 11 m) durante il transito in ingresso al porto del 4/6/2016. Nell'inserito è visualizzato il gruppo di bricole negli istanti immediatamente precedenti il passaggio della nave. L'ampiezza dell'onda di depressione misurata in questo evento supera i 2 metri (immagine degli autori)

Figura 3. Griglia di calcolo utilizzata per le simulazioni numeriche con la sezione del canale reale ottenuta dai dati batimetrici della parte sud della cassa di colmata B. La nave oggetto delle simulazioni ha una carena molto simile a quella della nave visualizzata nella Figura 2 (da: Trevisan, 2019)

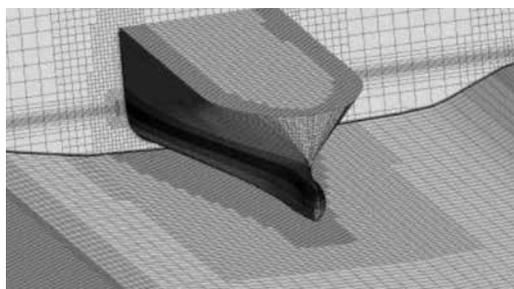
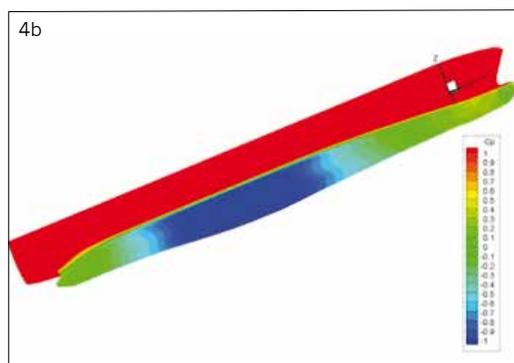
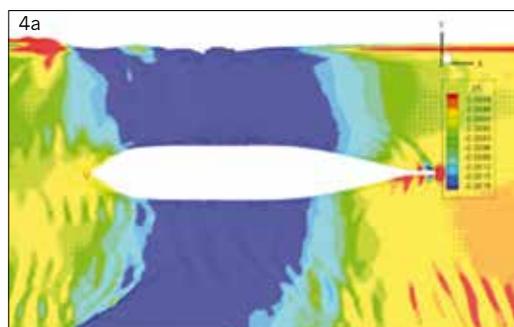


Figura 4. Elevazione del pelo libero (a) e pressione sullo scafo (b) risultanti dalla simulazione numerica con batimetria reale (da: Trevisan, 2019)



dalle indagini in campo e le elaborazioni effettuate dai partners di queste ricerche hanno permesso di effettuare diversi tipi di valutazioni sulla generazione delle perturbazioni e sui loro effetti. In questo contributo descriviamo i principali risultati in ordine non cronologico.

La generazione dell'onda di depressione e la sua propagazione sono state inizialmente studiate attraverso l'uso accoppiato di modelli matematici per effettuare delle valutazioni sull'ipotesi di un nuovo canale navigabile di raccordo fra il Malamocco-Marghera e la Stazione Marittima (ipotesi nota come

Tresse Est; Corila, 2016) e per valutare gli impatti del transito di navi da crociera nel canale Malamocco-Marghera (Bellafiore *et al.*, 2018). Le simulazioni sulle crociere sono state effettuate calibrando il modello di generazione della perturbazione sui risultati delle acquisizioni effettuate in concomitanza al passaggio delle navi nel canale industriale, in occasione della festività del Redentore. La perturbazione generata nel canale in prossimità della nave, ottenuta a partire da una geometria ipotetica della carena, è stata quindi trasferita sul basso fondale mediante un modello matematico normalmente utilizzato per lo studio dei processi naturali in laguna (SHYFEM; Umgiesser *et al.*, 2004) rendendo possibili valutazioni dell'altezza d'onda a diverse velocità.

Un'ulteriore evoluzione di questo approccio è rappresentata dallo studio dei meccanismi di generazione dell'onda che è stato effettuato in collaborazione con l'Università di Trieste. Utilizzando modelli basati sulla fluidodinamica computazionale (CFD) in grado di simulare allo stesso tempo le perturbazioni nel canale e nel basso fondale generate da una carena corrispondente a una nave cargo reale (Trevisan, 2019), è stato possibile riprodurre fedelmente il fenomeno misurato modellando la batimetria reale (Figure 3 e 4). L'uso di questa metodologia rappresenta un grosso passo in avanti nello studio dei fenomeni e un utile strumento per la gestione degli effetti. Nota la geometria di una qualsiasi tipologia di nave, diventa infatti possibile prevedere l'onda generata dalla stessa nelle diverse sezioni del canale reale (Figura 5). Utilizzando diversi scenari di velocità, livello idrico e assetto dello scafo, si può quindi individuare l'insieme di condizioni che consenta di minimizzare l'altezza dell'onda contenendo gli impatti sulla morfologia.

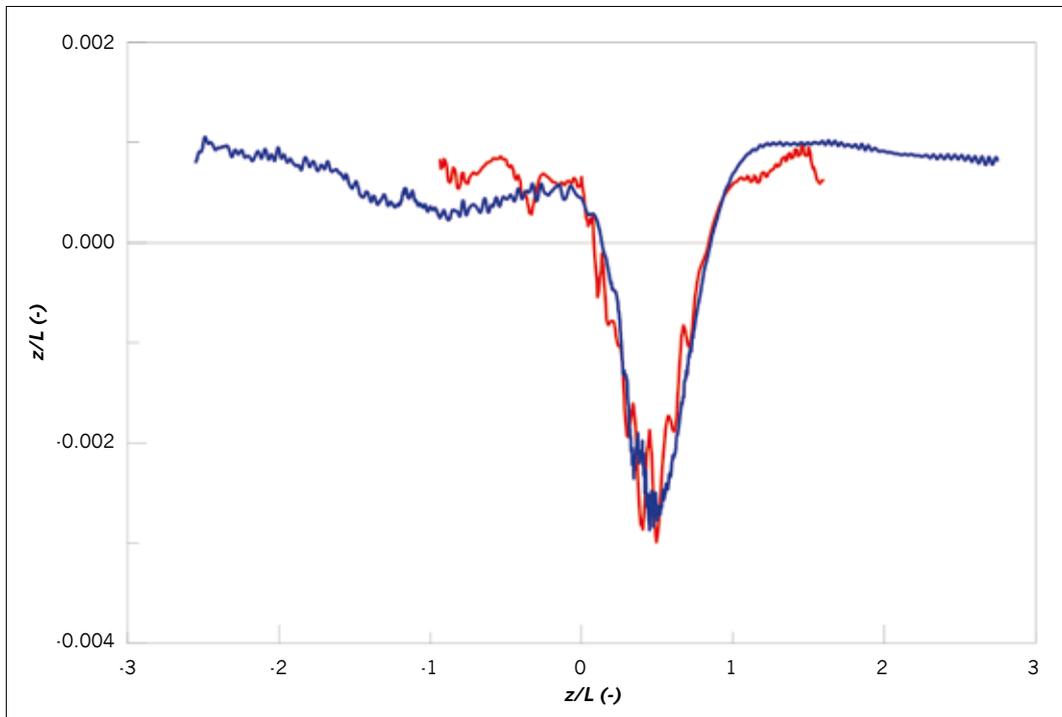


Figura 5. Confronto fra l'elevazione ondosa calcolata con il modello numerico e quella misurata (da: Trevisan, 2019)

Containership
Xin Yan Tian
Loa = 280 m
Lpp = 263 m
 $v = 4.58$ m/s
 $Fn = 0.09$

— Simulation
— Observation

LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE DI DEPRESSIONE E L'EROSIONE DEI FONDALI

La propagazione delle perturbazioni generate dal transito delle navi nel canale Malamocco-Marghera e i fenomeni erosivi sono stati studiati in collaborazione con l'Università di Venezia nell'ambito di diverse indagini, a partire dal 2009. Diverse metodologie sperimentali sono state utilizzate in campo, fra queste: reti di sensori di pressione e torbidità, strumenti per la misura delle correnti nel canale e nei bassi fondali adiacenti, autocampionatori per la raccolta di volumi d'acqua per la determinazione della concentrazione di sedimenti in sospensione, indagini batimetriche, misure delle trasformazioni morfologiche sul fronte di erosione delle casse di colmata. Indagini dettagliate con metodologie remote sono state inoltre condotte in campo, con velivoli autonomi, e a computer integrando in ambiente GIS le

immagini aeree e satellitari disponibili per le aree della laguna centrale interessate dai fenomeni.

Uno dei risultati più importanti delle indagini sperimentali è la descrizione dei processi connessi alla propagazione delle onde sulla piana tidale a est del canale navigabile. Ciò che si osserva normalmente è che l'onda, che ha una forma a "V" simmetrica in prossimità della nave e della sponda del canale, interagendo con il basso fondale diminuisce progressivamente in ampiezza. Contemporaneamente l'onda diventa asimmetrica con un fronte posteriore molto ripido e genera una serie di ondulazioni secondarie legate a fenomeni di frangimento. A una distanza di circa 650 metri dal margine del canale l'altezza dell'onda diminuisce fino a circa 15-20 cm indipendentemente dall'altezza iniziale e, pur rimanendo ancora un'onda piuttosto ampia per il tipo di fondale, il suo potenziale erosivo si riduce significativa-

In basso
Figura 6. Propagazione dell'onda di depressione sul basso fondale a est del canale Malamocco-Marghera. Sul basso fondale, dopo il passaggio del primo fronte ripido, si osserva la formazione di un gruppo di ondulazioni secondarie, non visibili al margine del canale, e legate ai fenomeni di interazione con il fondale. La ripresa evidenzia chiaramente l'area interessata dalla propagazione della perturbazione (immagine degli autori)

Nella pagina di destra, in alto
Figura 7. Propagazione dell'onda di depressione (in alto) generata dal passaggio della nave F/b Hellenic Spirit (velocità 10.7 nodi, lunghezza 204 m, larghezza 26 m, pescaggio 6.5 m) il giorno 01/05/2016. Posizione delle stazioni di misura del livello (sensori di pressione) lungo il margine del canale (al centro). Serie temporali della torbidità (in basso) registrata nelle stazioni 2,4,6,8). I codici colore delle diverse curve nei due pannelli sono corrispondenti. Le batimetrie acquisite nel 2000 e nel 2016 sono riportate per visualizzare l'entità dell'erosione al margine del canale.

Nella pagina di destra, in basso
Figura 8. Evoluzione della batimetria lungo un profilo trasversale a partire dalla sponda ovest del canale navigabile verso il bassofondo a est. La sezione è localizzata in prossimità della cassa di colmata B (da: Corila, 2016)

mente, come dimostrato anche dall'andamento della torbidità a distanza del canale. La conseguenza delle trasformazioni osservate è che l'energia della perturbazione iniziale viene quasi completamente dissipata per l'interazione col fondale nei primi 500-600 metri (Figure 6 e 7). Ciò si traduce in una movimentazione dei sedimenti e quindi in erosione (Figura 8).

Successivamente al transito della nave la concentrazione del sedimento in sospensione si mantiene elevata, ben al di sopra dei valori naturali, per un lungo intervallo di tempo. Il materiale può essere quindi allontanato dalle correnti di marea determinando una perdita netta nell'area.

Si è inoltre osservato che nella fase iniziale dell'onda di depressione, in corrispondenza all'abbassamento del livello si instaura una corrente piuttosto forte ($> 2 \text{ m s}^{-1}$) diretta verso il canale che causa il trasporto del materiale sospeso nel bassofondo verso l'alveo del canale navigabile. Questo fenomeno diventa particolarmente critico in corrispondenza a passaggi ravvicinati

di natanti di grandi dimensioni quando la corrente diretta verso il canale richiama dal bassofondo i materiali messi in sospensione dal transito immediatamente precedente. L'effetto a lungo termine di questi processi è un movimento intermittente (*stepwise*) dei materiali della piana tidale verso il canale che va quindi incontro a un progressivo interrimento (Rapaglia *et al.*, 2011; Rapaglia *et al.*, 2015; Corila, 2016). Questa tendenza trova un riscontro anche nell'assetto dei fondali del canale navigabile rivelato dalle indagini batimetriche ad alta risoluzione, effettuate da CNR-ISMAR, nelle quali si evidenzia la presenza di strutture erosive simili a solchi calanchivi sulle sponde del canale e tracce degli interventi di dragaggio sul fondale proprio in corrispondenza alla base del pendio al margine, dove evidentemente si accumulano maggiormente i materiali erosi dal bassofondo e dalle sponde (Madricardo *et al.*, 2019).

Lungo la sponda ovest del canale navigabile è presente un tratto di spiaggia generatosi in seguito all'erosione del margine delle



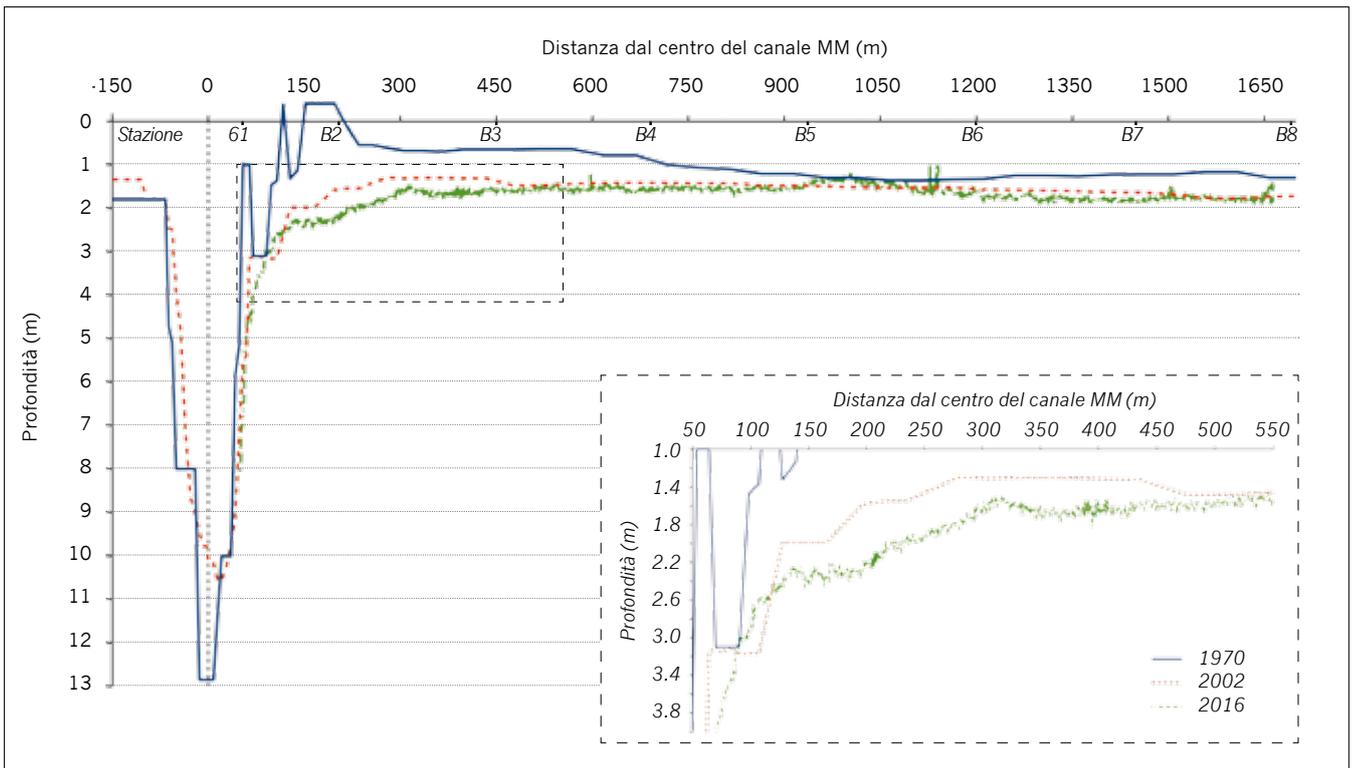
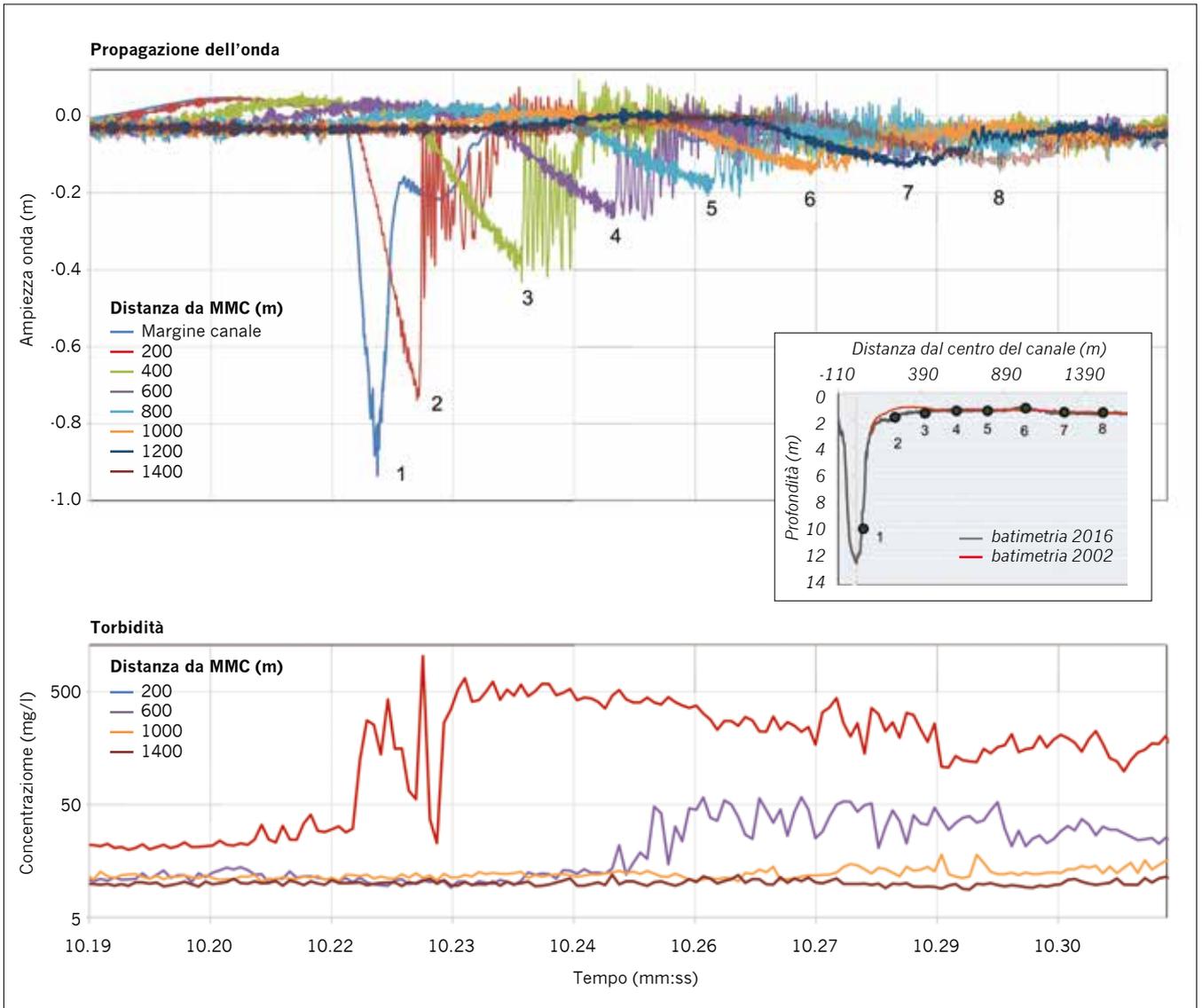




Figura 9. Arretramento complessivo della linea di riva delle casse di colmata A e B. La prima linea riportata per la cassa A è del 1987, mentre per la cassa B è del 1974. L'ultima linea di riva rappresentata è invece per entrambe le casse è relativa alla situazione del 2018

casse di colmata (denominate A, B, D-E). Questo margine artificiale era posizionato inizialmente a una distanza di circa 50 metri dal canale ed era protetto da una sponda rigida costituita da massi e palificate. Questa protezione è stata progressivamente smantellata a causa della continua azione delle onde di depressione che avrebbero rimosso il materiale fine (sabbie e limi) dalla base e dal retro della sponda provocandone il progressivo collasso su un fronte che, in tempi diversi, si è esteso all'intero tracciato nord-sud del canale Malamocco-Marghera (Figura 9). Successivamente al cedimento delle opere di protezione l'azione erosiva delle onde delle navi ha provocato la rimozione progressiva dei materiali della colmata (limi-argille provenienti dallo scavo del canale industriale e scarti industriali) facilitata anche dalla sequenza deposizionale dei materiali dell'area e che è costituita dal substrato

sabbioso-limoso del sistema di barene e vecchi apparati di foce del fiume Brenta sul quale sono stati impostati gli interventi di colmata. Le sabbie vengono facilmente erose dalla base del margine della colmata dall'azione delle correnti longitudinali associate all'onda di depressione determinando lo scalzamento del piede della scarpata e il franamento di zolle del materiale sovrastante (Figure 10 e 11). Il materiale franato inibisce l'arretramento ulteriore del margine finché non viene completamente rimosso dall'azione delle onde. Il processo può quindi riprendere con le modalità descritte determinando una progressione a impulsi e una notevole variabilità spaziale e temporale del fenomeno di arretramento.

Le misure dell'erosione di sponda effettuate lungo il margine della cassa di colmata B su un periodo di circa un anno e su un orizzonte temporale di diversi decenni, utilizzando immagini aeree e satellite, hanno rivelato velocità di arretramento che raggiungono frequentemente i 4 metri all'anno per un arretramento totale di 130 metri, nel caso della cassa B. In alcuni casi nella cassa A, le velocità di arretramento della sponda possono largamente superare il valore di 10 metri all'anno.

Nel caso della cassa di colmata D-E, i rilievi in corso, effettuati nell'ambito del progetto Venezia2021, dimostrano inoltre che l'efficacia degli interventi di protezione dei margini del canale, pur realizzati in epoche più recenti e quindi con moderne tecnologie, sia comunque molto limitata (Figura 12).

Un destino simile caratterizza anche la scogliera realizzata a protezione del basso fondale a est del canale Malamocco-Marghera nell'area antistante la cassa di colmata B. L'erosione del fondale fra il canale e la scogliera e la rimozione dei materiali dalla base della scogliera, stanno determinando

Figura 10. Erosione del margine della cassa di colmata B. La rimozione del materiale sabbioso dalla base della scarpata di erosione provoca il collasso del suolo soprastante e la caduta degli alberi



Figura 11. Erosione del margine della cassa di colmata B. Nell'immagine sono visibili un fronte di crollo e i livelli sabbiosi alla base dei depositi di materiale (limo-argilla) refluito dai mezzi di dragaggio per la realizzazione della colmata



Figura 12. Dettaglio del modello digitale di superficie della cassa di colmata D-E (da: progetto Venezia2021, Linea 1.1). Si evidenzia l'intensa erosione dovuta alle onde di depressione. Lo smantellamento delle protezioni è conseguente allo scalzamento del substrato sul quale le stesse sono impostate. Una volta cedute le protezioni l'erosione può propagarsi verso l'interno della cassa di colmata determinando il progressivo degrado morfologico dell'area



Figura 13. L'onda di depressione creata da una nave traghetto nel canale Malamocco-Marghera in transito a una velocità prossima a 10 nodi.

La depressione si estende fino a oltre la scogliera di protezione del basso fondale, posta a circa 120 metri dal canale, e richiama un flusso d'acqua e sedimenti verso il canale stesso.

Per effetto del continuo asporto dei materiali dalla base della scogliera e delle forti correnti generate dalle stesse perturbazioni, la struttura ha ceduto in diverse posizioni. Il fondale della piana tidale a ovest della scogliera (verso il canale) è circa 1 metro più profondo di quello a est della struttura. In corrispondenza ai pali delle bricole e alla stazione mareografica è evidenziata (freccie) l'evoluzione della direzione del trasporto durante il passaggio della nave

il progressivo smantellamento della protezione per collasso dei materiali in mancanza del substrato. La scogliera non è più in grado di esercitare la sua azione protettiva e consente la movimentazione di acqua e sedimenti della piana tidale a est della protezione in corrispondenza al passaggio delle onde di depressione create dalle navi in transito (Figura 13).

Il risultato più interessante di queste indagini sulle trasformazioni morfologiche è che la velocità di arretramento media del margine delle casse di colmata non sembra diminuire nel tempo, e quindi anche con l'aumentare della distanza fra la scarpata di erosione e il margine del canale (Zaggia *et al.*, 2017). Questo significa che il profilo trasversale del canale, a distanza di circa 50 anni dalla sua realizzazione, pur essendo stato lasciato libero di adattarsi alle forzanti, non ha ancora raggiunto una configurazione "stabile" in cui la sua forma si possa considerare in equilibrio con la pressione del traffico attuale.

Questo risultato porta a due conclusioni principali. La prima è che l'attuale canale Malamocco-Marghera nel tratto compreso fra il porto di San Leonardo e l'area industriale è un sistema che versa in condizioni critiche con il volume e la condotta del traffico attuale. Ulteriori aumenti, in particolare dei transiti di natanti di grosso tonnellaggio, non saranno sostenibili se non attraverso interventi di protezione e continue operazioni di manutenzione e ripristino. La seconda conclusione è che la sezione attuale del canale di navigazione, determinata dalle trasformazioni descritte, non può essere utilizzata come base di riferimento per la progettazione di interventi (canali di raccordo con la Stazione Marittima e altro). Le evidenze sperimentali indicano infatti che non si tratta di una configurazione di equilibrio.

Il mancato raggiungimento di una sezione stabile nella morfologia del canale è probabilmente dovuto a diversi fattori. Uno di questi è senza dubbio l'aumento della



pressione del traffico sia per il numero di transiti sia per le dimensioni massime dei natanti.

È quindi fondamentale iniziare a pensare a un sistema di gestione del traffico che consideri non solo le variabili del profitto, ma anche la possibilità di minimizzare i costi ambientali delle attività di salvaguardia. Un notevole miglioramento in questa direzione si potrebbe avere da subito, semplicemente intervenendo sulla condotta dei mezzi e riducendo le velocità entro limiti tecnicamente sostenibili fatti salvi i criteri minimi di sicurezza anche in funzione del livello di marea.

Si è potuto verificare, attraverso le registrazioni AIS, come la maggior parte delle navi, soprattutto quelle nella classe di lunghezze comprese fra i 150 e i 200 metri, transiti nella zona delle casse di colmata a velocità comprese fra gli 8 e gli 11 nodi con una frequenza massima fra i 9 e 10 nodi (Corila, 2016). È quindi probabilmente possibile contenere almeno gli estremi di velocità più elevati entro i valori minimi della classe di maggior frequenza attualmente osservati. I risultati delle ricerche descritte hanno dimostrato che è possibile prevedere l'altezza dell'onda di depressione e gli effetti di risospensione sui bassi fondali sulla base di variabili quali la velocità di navigazione, la geometria dello scafo in relazione alla sezione del canale (coefficiente di blocco), e l'altezza di marea (Rapaglia *et al.*, 2011; Rapaglia *et al.*, 2015). Si è potuto verificare, ad esempio, come l'impatto non sia lo stesso per tutte le navi, anche a parità di dimensioni. Il contenimento dei fenomeni di risospensione potrebbe quindi essere possibile semplicemente evitando i passaggi molto ravvicinati di navi di grosso tonnellaggio e riducendo la velocità di un valore accettabile (entro il 15%) per i soli natanti

che hanno un impatto significativo sulla risospensione e cioè per un numero di navi inferiore al 40% del totale (Rapaglia *et al.*, 2011).

Inoltre, utilizzando strumenti più sofisticati, come i modelli numerici precedentemente descritti, risulterebbe possibile prevedere l'altezza dell'onda di depressione della specifica nave e i suoi effetti in funzione della velocità e del livello di marea. Per questo approccio è ovviamente necessario conoscere nel dettaglio la morfologia del canale, che è già oggetto di monitoraggio da parte delle istituzioni, e la geometria delle carene in modo da simulare gli effetti del passaggio precedentemente all'ingresso in laguna e disporre quindi di criteri oggettivi per la condotta dei mezzi.

Non è certamente facile reperire informazioni sulle carene di tutte le navi che accedono al porto, ma in molti casi le geometrie sono assimilabili per alcune categorie di natanti. Inoltre, questo requisito potrebbe in futuro diventare un criterio ambientale per l'autorizzazione al transito entro la laguna delle navi al di sopra di una determinata stazza, analogamente a quanto accade in alcuni porti per il rispetto delle norme antiinquinamento fissate sui carburanti. Una sorta di certificazione ambientale per l'accesso in laguna che consentirebbe al porto di Venezia di attuare una gestione sostenibile del traffico salvaguardando interessi economici e morfologia lagunare. Un valore aggiunto non trascurabile di questa buona prassi è una maggiore durata nel tempo delle opere di contenimento degli impatti e un sensibile risparmio nei costi di dragaggio. In quest'ottica è ovviamente necessaria una costante verifica degli effetti delle strategie di gestione basata anche sull'apporto della ricerca scientifica, tendenzialmente orientata a considerare un orizzonte temporale più este-

so, anche alla luce degli scenari attesi di innalzamento del livello marino nei prossimi decenni. Quale sarà infatti l'utilità e l'efficacia della pianificazione morfologica e degli interventi di salvaguardia dell'habitat lagunare in assenza di protocolli e criteri per la mitigazione degli impatti del traffico in una laguna in continua trasformazione? Certamente si tratta di investire nell'immediato sulla conoscenza, e sul monitoraggio dei fenomeni, ma con la garanzia di un ritorno economico ed ambientale sul medio-lungo periodo a beneficio della città, della sua laguna e delle stesse attività portuali.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Adami, A., Comola, Venuti, A., (2001). *Studio sugli effetti idrodinamici nei canali di Venezia dovuti al moto ondoso provocato dal transito dei natanti*. Convenzione di ricerca per Autorità Portuale di Venezia, Protecno Srl.

Bellafiore, D., Zaggia, L., Broglia, R., Ferrarin, C., Barbariol, F., Zaghi, S., Lorenzetti, G., Manfè, G., De Pascalis, F., Benetazzo, A., (2018). *Modeling ship-induced waves in shallow water systems: The Venice experiment*. *Ocean Engineering*, 155, 227-239, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.039>.

Canestrelli P., Vazzoler S., Zotti I., (2000). *Experimental research and measures to reduce the wash generated by high speed motorboats in Venice*. International Conference on Hydrodynamics of High Speed Craft - Wake Wash & Motions Control, Londra.

Corila, (2016). *Stato ambientale della Laguna di Venezia ed elementi per la pianificazione sostenibile delle attività portuali: Attività 3 e 4 - Valutazione degli effetti del moto ondoso*

da natanti e analisi idro-ecologica. Relazione finale, Giugno 2016, p. 149.

Costa, F., Nadali, G.P., (1988). *Prove sperimentali su natanti per la rilevazione del moto ondoso*. CNR – Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Comune di Venezia, Commissione Tecnica per lo Studio del Moto Ondoso, Ufficio Traffico Acqueo – Rapporto Tecnico.

Costa, F., Zuliani, A., (2004). *Analisi degli effetti idrodinamici indotti nei Rii di San Basilio, San Martin, Ponte Piccolo e Sant'Eufemia, in corrispondenza del passaggio delle grandi navi da crociera nel Canale della Giudecca e in Bacino San Marco*. CNR - Istituto di Scienze Marine, Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, *Relazione di Sintesi*. Incarico del Comune di Venezia: Determinazioni n. 1979 del 13.08.2003 e n. 3035 del 12.12.2003.

Costantini, M., (2004). *Porto navi e traffici a Venezia 1700-2000*. Marsilio editori, Venezia, p. 158.

D'Alpaos, L., Liberatore, G., (1993). *Prove sperimentali di onde generate da natanti*. Convenzione di ricerca per Comune di Venezia, Università di Padova.

Liberatore, G., (1988). *Prove sperimentali di onde generate da natanti; elaborazioni preliminari*. Convenzione di ricerca applicata, Università di Padova.

Lippe, E., (1984). *Porto di Lido ed i suoi fondali: confronto dei rilievi batimetrici eseguiti dal 1800 a oggi*. Studi di idraulica marittima e lagunare 93-118.

Madricardo, F., Fogliani, F., Campiani, E., Grande, V., Catenacci, E., Petruzzo, A., Kruss,

- A., Toso, C., and Trincardi, F., (2019). *Assessing the human footprint on the sea-floor of coastal systems: the case of the Venice Lagoon, Italy*. Scientific Reports, 9:6615. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43027-7>.
- Parnell, K.E., Soomere, T., Zaggia, L., Rodin, A., Lorenzetti, G., Rapaglia, J.P., and Scarpa G. M., (2016a). *Ship-induced solitary Riemann waves of depression in Venice Lagoon*. Physics Letter A, 379, 555-559.
- Parnell, K.E., Zaggia, L., Soomere, T., Lorenzetti, G., and Scarpa G. M., (2016b). *Depression Waves Generated by Large Ships in the Venice Lagoon*. Journal of Coastal Research, 75, 907-911.
- Rapaglia, J., Zaggia, L., Parnell, K.E., Lorenzetti, G., and Vafeidis, A.T., (2015). *Ship-wave induced sediment remobilization: Effects and proposed management strategies for the Venice Lagoon*. Ocean & Coastal Management 110, 1-11.
- Rapaglia, J., Zaggia, L., Ricklefs, K., Gelinias, M., and Bokuniewicz, H., (2011). *Characteristics of ships' depression waves and associated sediment resuspension in Venice Lagoon, Italy*. Journal of Marine Systems, 85 (1-2), 45-56.
- Rodin, A.; Soomere, T., Parnell, K.E., and Zaggia, L., (2015). *Numerical simulation of the propagation of ship-induced Riemann waves of depression into Venice Lagoon*. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 64 (1), 22-35.
- Sarretta, A., Pillon, S., Molinaroli, E., Guerzoni, S. & Fontolan, G., (2010). *Sediment budget in the Lagoon of Venice, Italy*. Continental Shelf Research, 30, 934-949.
- Trevisan, N., (2019). *Observation and modelling of the ship wave pattern in a navigation channel of the Venice Lagoon*. Tesi di Laurea: Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Navale, p. 143.
- Umgiesser, G., Melaku Canu, D., Cucco, A., Solidoro C., (2004). *A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation*. Journal of Marine Systems 51, 123-145.
- Vazzoler S., Canestrelli P., (1996). *Moto ondoso nei canali di Venezia*. Atti dell'Istituto Veneto di Scienze Lettere e Arti, Venezia, 329-374.
- Zaggia, L., Lorenzetti, G., Manfé, G., Scarpa, G.M., Molinaroli, E., Parnell, K.E., Rapaglia, J.P., Gionta, M., Soomere, T., (2017). *Fast shoreline erosion induced by ship wakes in a coastal lagoon: Field evidence and remote sensing analysis*. PlosOne, PLoS ONE 12(10): e0187210. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187210>.