Studio numerico avanzato sul moto di filtrazione in ambito marittimo

A cura di ***F. Dentale, B. Messina,*** Dip. di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno
E. Pugliese Carratelli, C.U.G.Ri. - Consorzio Interuniversitario per la Previsione e Prevenzione Grandi Rischi
S. Mascetti, XC Engineering, Cantù (CO)

Nel presente articolo è illustrata una nuova procedura che mediante l'utilizzo di software CAD e numerico (FLOW-3D®) permette di studiare le interazioni che si instaurano tra un'opera marittima a gettata (emersa o sommersa) ed il moto ondoso.

Introduzione

Le simulazioni sono state realizzate sulla base di un approccio innovativo: il moto di filtrazione all'interno degli interstizi, normalmente presenti nelle opere frangiflutti a gettata, non è valutato mediante l'utilizzo del coefficiente di porosità, ma direttamente, modellando la struttura così come avviene nella realtà costruttiva mediante la sovrapposizione di singoli elementi tridimensionali ed infittendo la griglia di calcolo al punto tale da avere dei nodi computazionali all'interno dei meati. Quanto implementato, strutturato in maniera similare a ciò che avviene per analoghe prove fisiche di laboratorio, rende possibile analizzare sia i parametri connessi con l'idrodinamica del fenomeno (overtopping, frangimento, risalita, riflessione, trasmissione) sia la stabilità idraulica dei massi della mantellata.

Metodologia

I buoni risultati ottenuti nell'arco degli anni mediante l'impiego della CFD hanno favorito l'utilizzo di tale tecnica anche in ambito ingegneristico ed in particolar modo in quello marittimo. Infatti, un campo applicativo di interesse internazionale si è rivelato lo studio dell'interazione tra le opere marittime ed il moto ondoso su esse incidente soprattutto come valido ausilio alla progettazione e verifica dei parametri strutturali.

Per il dimensionamento, specialmente delle barriere frangiflutti emerse o sommerse, in conseguenza della loro interazione con un sistema naturale complesso come quello del mare e delle spiagge, è ormai di consolidata esperienza non far riferimento solo alle teorie disponibili in letteratura. È pratica comune verificare l'efficienza idraulica e la stabilità dell'opera mediante l'ausilio di modellazioni numeriche o fisiche. Nella maggior parte dei casi la scelta della tipologia di simulazione da impiegare non è solo funzione dei fenomeni che si vogliono analizzare ma anche e soprattutto legata a fattori di tipo economico. Uno studio in scala modello incide in maniera sostanziale sul quadro economico di un progetto.

È pur vero però, fino a questo momento, che le modellazioni in vasca permettono di analizzare aspetti non facilmente valutabili mediante l'approccio numerico, soprattutto per le strutture a gettata composte cioè da massi o blocchi di calcestruzzo tra i quali l'acqua si incunea con moto non stazionario attraverso percorsi complessi, a volte caratterizzati anche dalla presenza di aria.

Il progettista pertanto volendo avere un valido supporto per il dimensionamento idraulico (overtopping, frangimento, risalita, riflessione, trasmissione) e strutturale in relazione soprattutto alla stabilità dei massi, ha avuto finora come unica alternativa la possibilità di realizzare delle prove fisiche.

L'approccio numerico, in particolare per problemi dalla geometria così complessa, aveva fino a poco tempo fa il difetto di non fornire indicazioni soddisfacenti, in quanto i fenomeni di interazione che si riuscivano a riprodurre erano sicuramente inadeguati alla realtà. In questo caso la costruzione della struttura non poteva rappresentare fedelmente la geometria di un'opera a gettata realizzata mediante la sovrapposizione di singoli elementi per strati (mantellata, filtro, nucleo) e quindi le maggiori limitazioni si avevano sul calcolo del moto di filtrazione.

Infatti, fin quando il dominio di calcolo è costituito solo dalla fase liquida le applicazioni sono di semplice risoluzione e vi è ormai una consolidata esperienza. Le difficoltà, invece, nascono quando si vogliono analizzare le interazioni tra il liquido ed oggetti solidi in esso totalmente o parzialmente immersi, soprattutto quando quest'ultimi sono costituiti da elementi disgregati aventi quindi una propria porosità che, interagendo con la massa fluida, ne modifica le caratteristiche (velocità, pressione, turbolenza).

In questo caso le possibili soluzioni al problema sono generalmente trattate secondo due differenti approcci. Il primo, di semplice impiego, è basato sull'ipotesi che la geometria porosa, pur influenzando il fenomeno, non abbia un rilievo predominante sulle caratteristiche di movimento del fluido e, quindi, l'elemento solido è considerato all'interno del dominio di calcolo come un unico blocco trascurando gli effetti della porosità. Le equazioni, qualunque sia la loro forma vengono discretizzate alle differenze finite su una maglia che presenta dei nodi di calcolo nulli in corrispondenza dell'opera. Naturalmente più fitta è la griglia di calcolo, maggiori sono i punti di frontiera posizionati sulle superfici di contatto liquido-solido, maggiore è l'accuratezza del calcolo soprattutto per ciò che concerne le interazioni.

La seconda metodologia, ormai abbastanza diffusa, ritenendo invece non trascurabile l'influenza della porosità sul moto del fluido prevede che in corrispondenza della gettata le equazioni siano modificate al fine di valutare la presenza dell'oggetto poroso mediante un coefficiente (Equazioni alla Darcy).

La bibliografia su queste tematiche è troppo vasta per essere esaminata in dettaglio in questa sede; vanno tuttavia ricordate alcune pubblicazioni in cui sono raccolti interessanti esempi di come tali problematiche sono state affrontate sia dal punto di vista fisico che numerico: Karim, et al., 2009; Greben et al., 2008; Hsu et al., 2008; Lara et al., 2008; Lin et al., 2007; Lara et al., 2006; Ting et al., 2004; Hur et al., 2003; Huang et al., 2003; Hsu et al., 2002; Requejo et al., 2002; Tirindelli et al 2000; van Gent, 1995.

Nonostante le possibili alternative sono purtroppo evidenti le approssimazioni dei fenomeni investigati rispetto alle condizioni reali soprattutto quando la dimensione dei blocchi è cospicua e l'idrodinamica all'interno dei meati è caratterizzata da valori del numero di Reynolds relativamente alti.

A ciò si aggiunge il fatto che in questo caso non è facilmente valutabile, a meno di semplificazioni del problema, la stabilità dei massi. Di conseguenza le analisi di questo tipo sono state affrontate per ora essenzialmente su base sperimentale.

Tuttavia, oggi, grazie alle nuove tecnologie disponibili il gap tra le due tipologie di indagine, numerica e fisica, può essere parzialmente colmato.

Un esempio di ciò è riassunto in queste pagine dove gli autori presentano una metodologia di indagine che mediante tecniche numeriche avanzate permette di analizzare per strutture marittime a gettata, modellate sulla base delle loro geometrie reali, sia le interazioni idrodinamiche che si instaurano con il moto ondoso sia la stabilità dei singoli elementi costituenti la mantellata.

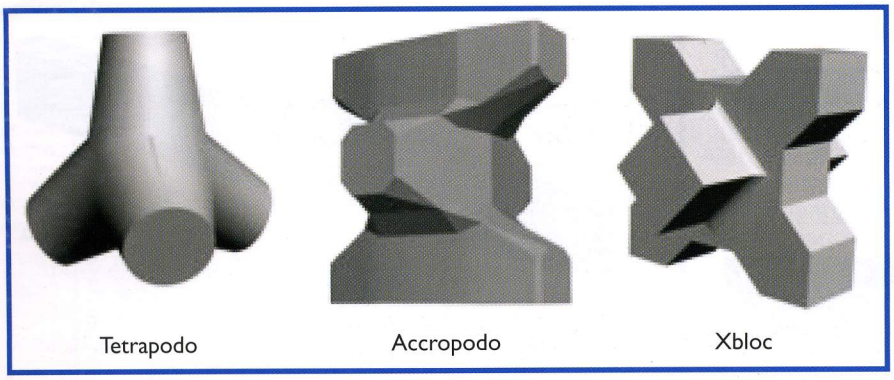


Fig. 1 - Massi artificiali 3D.

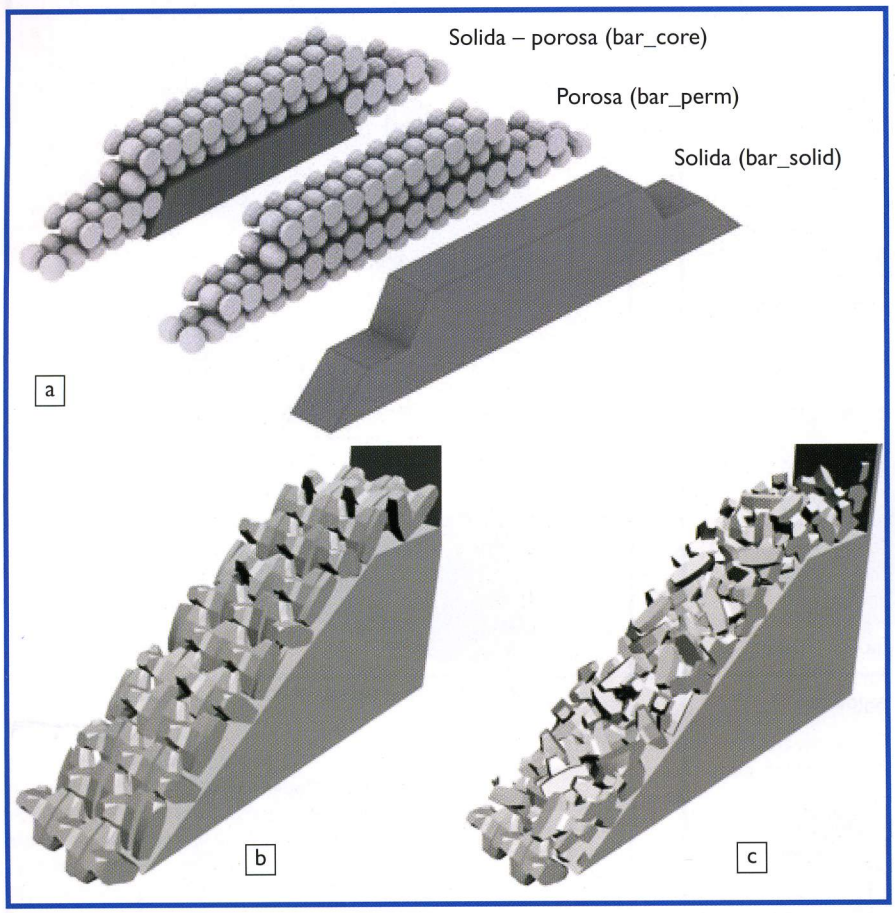


Fig. 2 - Geometrie 3D: a) barriere sommerse, b) barriera emersa accropodo regolare, c) barriera emersa accropodo random.

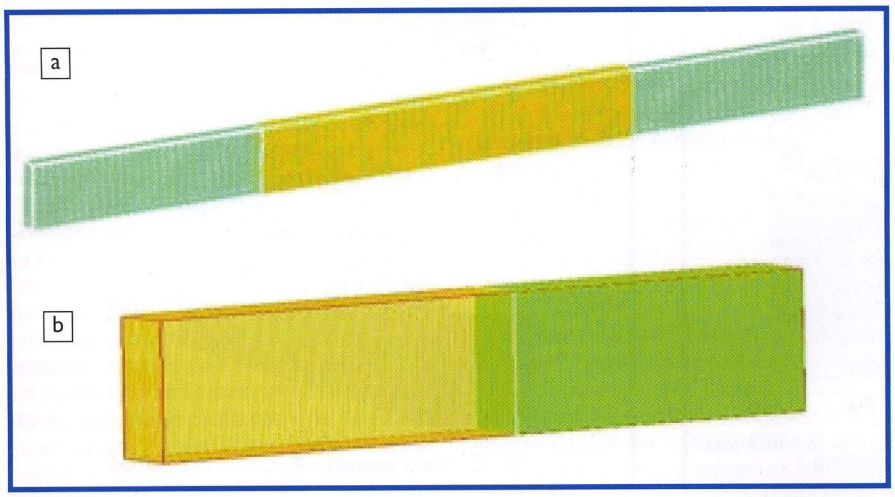


Fig. 3 - Mesh di calcolo 3D: a) barriera sommersa, b) barriera emersa.

Quanto proposto qui è, dunque, differente da quanto attualmente utilizzato per lo studio di fenomeni analoghi: la massa solida porosa con cui interagisce la corrente fluida è ricostruita all'interno del dominio di calcolo numerico mediante la sovrapposizione di singoli elementi, disposti in modo tale da formare una geometria costituita da parti piene e da spazi vuoti. In questo modo è possibile valutare l'effetto del comportamento idrodinamico completo, comprensivo dei termini convettivi, ed eventualmente degli effetti della turbolenza, cosa che non è possibile considerare con la classica schematizzazione di Darcy, evidentemente inadeguata in molte situazioni.

Costruzione dominio di calcolo

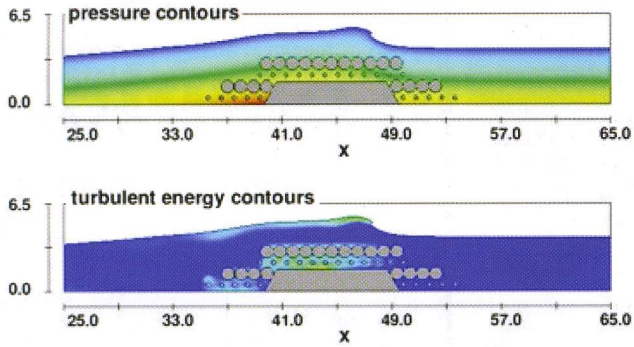
Mediante l'ausilio di software cad per la modellazione tridimensionale sono state riprodotte le diverse tipologie di massi costituenti la mantellata. Da quella naturale, che per il momento al fine di testare la bontà di quanto proposto è stata schematizzata mediante una sfera a quelle artificiali di uso comune: cubo, cubo modificato, antifer, tetrapodo, accropodo II, accropodo, coreloc, xbloc, xbloc base (fig.1).

Successivamente, sono state dimensionate e costruite alcune opere, sia emerse sia sommerse, mediante la sovrapposizione dei singoli massi secondo schemi geometrici reali, modellando la struttura così come avviene nella realtà costruttiva o in ambito fisico (fig.2).

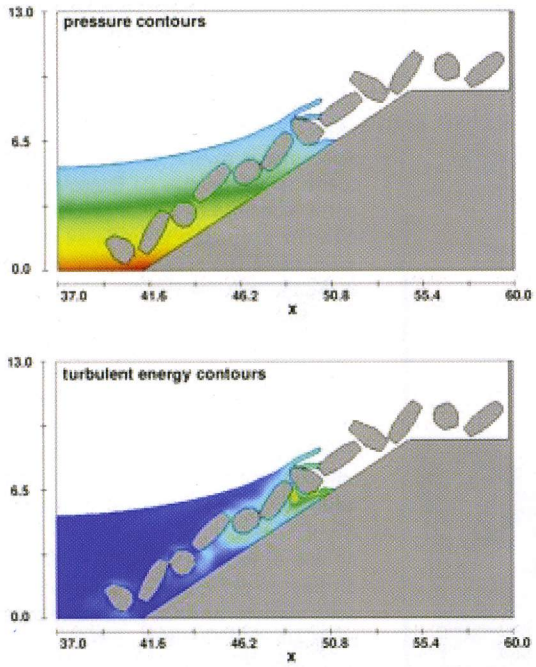
Al fine di validare la bontà della procedura proposta, per quanto riguarda la sagoma della barriera soffolta sono state considerate tre geometrie differenti: solida, porosa, solida-porosa (fig.2a), mentre per quella emersa in relazione alla disposizione degli elementi della mantellata sono state utilizzate due configurazioni: regolare e random (fig.2b – 2c).

Definite le opere, la configurazione geometrica realizzata è stata importata in FLOW-3D®, ampiamente collaudato per lo studio sulla propagazione del moto ondoso (Dentale et al 2008, Chopakatla S. C. et al 2008) al fine di valutare le interazioni idrodinamiche.

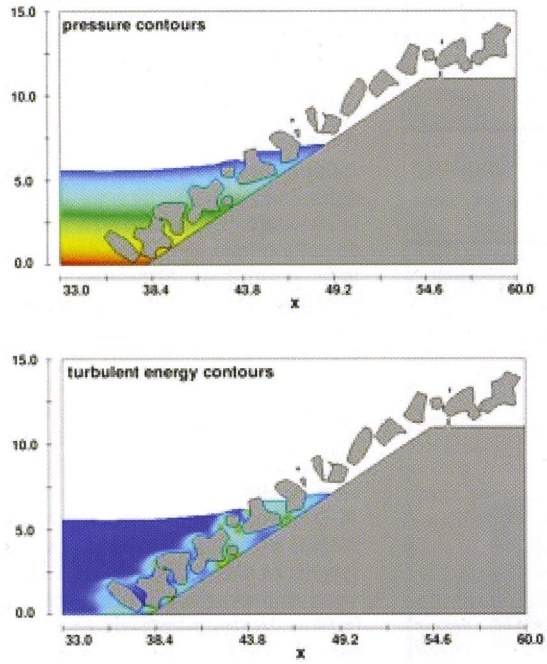
Le simulazioni sono state realizzate integrando sulla griglia di calcolo, strutturata sulla base del principio di "nesting", le equazioni di Navier-Stokes in forma completa (3D) accoppiate al modello di turbolenza RNG. Lo spazio numerico tridimensionale, per entrambe le tipologie di strutture analizzate, è stato creato mediante due blocchi di mesh innestati (generale, localizzata). Per la barriera sommersa (dominio di calcolo 90m x 1.9m x 6.5m) la mesh generale è stata realizzata con 46200 elementi di dimensione pari a 0.30 x 0.27x 0.30, mentre quella localizzata in corrispondenza della struttura con 2353412 elementi di dimensione pari a 0.061 x 0.055 x 0.061m. Lo stesso principio (figg. 3) è stato adottato per la barriera emersa (dominio di calcolo 90m x 5.0m x 15.0m): mesh generale (150000 elementi – dimensione 0.50 x 0.20 x 0.30), localizzata (2025000 elementi – dimensione cubica 0.10m).



4a - Barriera sommersa

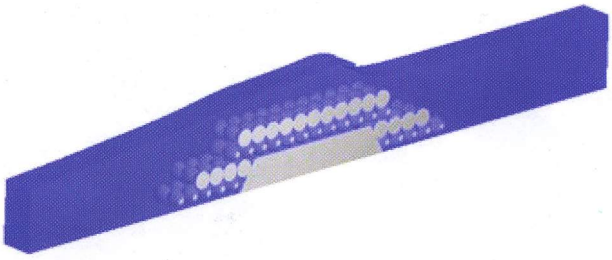


4b - Barriera emersa – Accropodo regolare

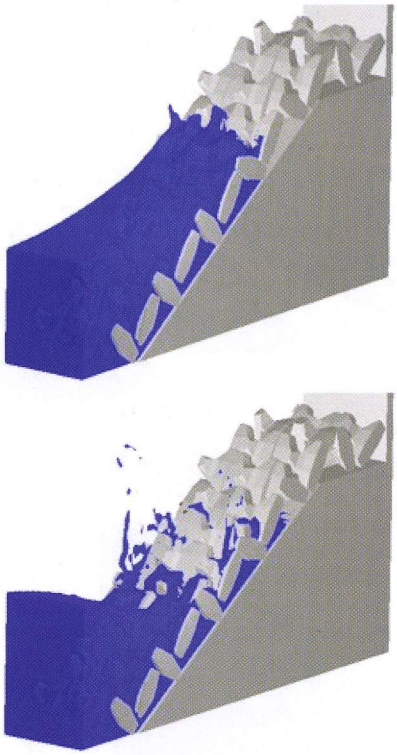


4c - Barriera emersa – Accropodo random

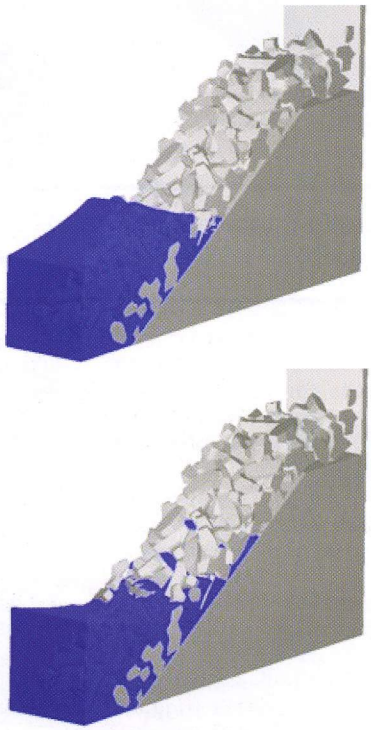
Fig. 4 - Risultati 2D.



5a - Barriera sommersa



5b - Barriera emersa – Accropodo regolare



5c - Barriera emersa – Accropodo random

Fig. 5 - Risultati 3D.

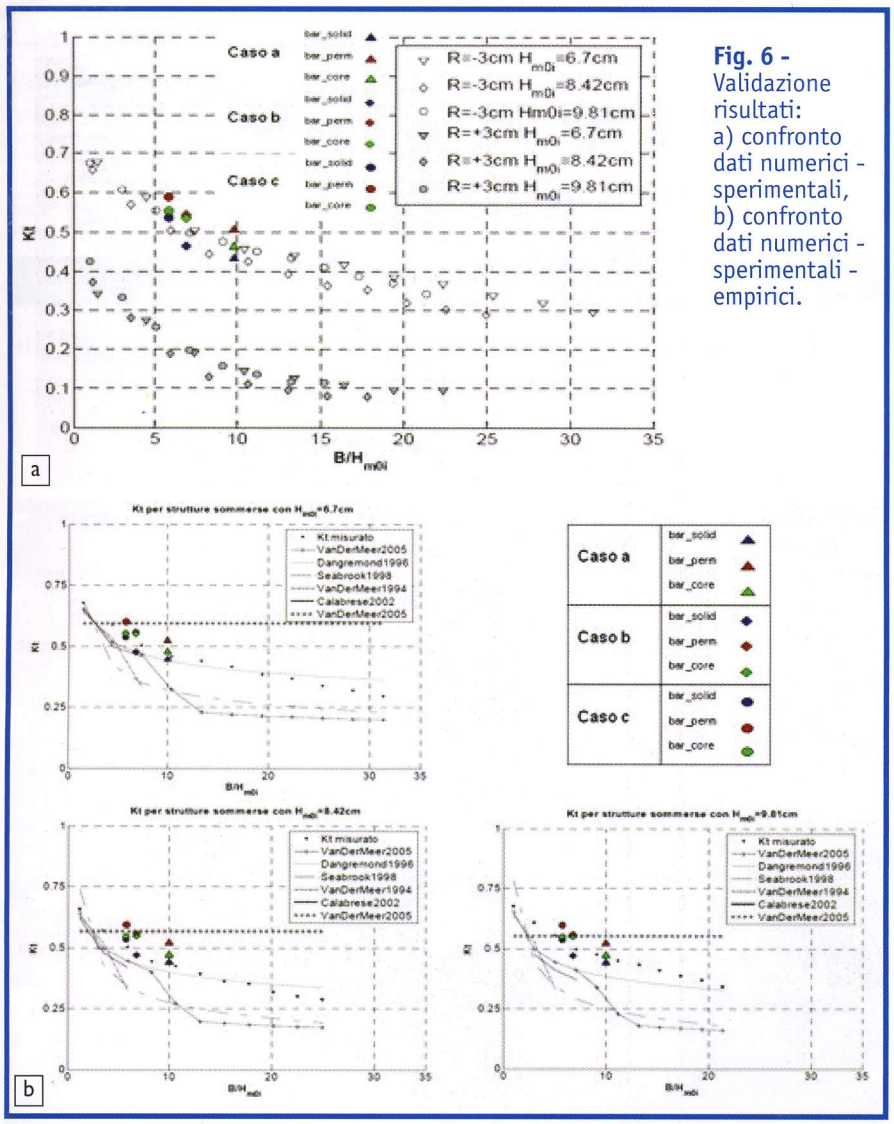


Fig. 6 - Validazione risultati: a) confronto dati numerici - sperimentali, b) confronto dati numerici - sperimentali - empirici.

Risultati

Alcuni dei risultati ottenuti sono riassunti nelle immagini seguenti. Nelle figure 4 è stato rappresentato l'andamento della pressione e dell'energia turbolenta lungo una sezione bidimensionale del dominio 3D. Mentre nelle figure 5 sono riportate le configurazioni tridimensionali della superficie libera, catturati in diversi istanti di tempo.

È possibile notare, sia per la barriera emersa che per quella sommersa, come la griglia di discretizzazione numerica utilizzata permetta di stimare in maniera adeguata la variazione delle grandezze idrodinamiche sia nei meati che lungo il contorno solido dei singoli elementi della mantellata. Tale condizione è maggiormente visibile nella ricostruzione tridimensionale della superficie libera (figg.5) dove possono essere visualizzati con maggior dettaglio gli effetti del moto ondoso sull'opera.

Inoltre, la validazioni di alcuni dati mediante il confronto con formulazioni empiriche e lavori sperimentali ha fornito interessanti analogie. In particolare per quanto concerne ad esempio la funzionalità di un'opera sommersa, valutabile mediante il Kt (figg.6), (coefficiente di trasmissione, definito come rapporto tra altezza d'onda trasmessa ed incidente), i risultati ottenuti sono stati inseriti sui grafici proposti da Cappietti et al (2006) in cui si confrontano i dati sperimentali del coefficiente di trasmissione con quelli empirici (fig.6a). Dalla comparazione si evince che la procedura numerica implementata definisce dei Kt congrui con le esperienze di labaoratorio e come per quest'ultimi i valori risultano maggiori rispetto a quelli determinabili mediante le formule empiriche di letteratura (fig. 6b).

Infine, l'analisi della variazione del coefficiente di trasmissione con la porosità reale ha evidenziato che i valori di Kt aumentano man mano che si passa da una barriera impermeabile (bar_solid) ad una struttura con il solo nucleo interno impermeabile (bar_core) ad una struttura totalmente porosa (bar_perm).

Se questo risultato corrispondesse alla realtà, una progettazione che non tenesse conto dell'effetto di permeabilità della struttura andrebbe incontro ad una sottostima dell'onda trasmessa, a svantaggio di sicurezza.

Conclusioni

Nel lavoro è stata illustrata una nuova metodologia di impiego delle tecniche numeriche per la simulazione delle interazioni tra un'opera marittima a gettata, sia sommersa sia emersa ed il moto ondoso. Come si evince dai risultati ottenuti la procedura implementata, basata sull'impiego di tecnica cad e numeriche, nel caso specifico software fluidodinamico che utilizza la tecnica VOF (FLOW-3D®), consente di valutare in maniera adeguata il moto di filtrazione che si verifica all'interno dei meati della struttura.

Generalmente, dal punto di vista numerico, volendo considerare i vuoti che costituiscono un'opera a gettata si fa riferimento al coefficiente di porosità non sempre idoneo a rappresentare i fenomeni reali specialmente quando il flusso del fluido si sviluppa ad alti Reynolds.

Nel caso specifico, invece, la struttura è stata modellata così come avviene nella realtà costruttiva quindi mediante la sovrapposizione di singoli elementi tridimensionali e la griglia di calcolo numerico è stata infittita al punto tale da avere dei nodi computazionali all'interno dei meati in modo da valutare direttamente i moti di filtrazione che si instaurano nella struttura.

In queste prime applicazioni, l'interesse è stato rivolto soltanto a ciò che accade all'interno della mantellata, definendo delle barriere semplificate. Però, non esistono limitazioni circa la possibilità di costruire l'opera sia essa sommersa che emersa in tutte le sue parti caratteristiche (filtro, protezione al piede).

Inoltre, attraverso il modello GMO implementato nel software, sarà possibile analizzare il movimento dei singoli massi sottoposti all'azione del moto ondoso, valutandone così la stabilità come accade per le sperimentazioni fisiche.

Bibliografia

- Karim, M.F., Tanimoto, K., Hieu, P.D., 2009. Modelling and simulation of wave transformation in porous structures using VOF based two-phase flow model. Applied Mathematical Modelling 33, 343–360.
- Chopakatla S. C., Lippmann, T.C., Richardson, J.E. (2008), Field verification of a computational fluid dynamics model for wave transformation and breaking in the surf zone, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 134, n. 2
- Dentale F., Monaco M., Pugliese Carratelli E. 2008. A numerical assessment of scale effects on wave breaking modelling. 3rd SCACR International Short Course and Workshop on Applied Coastal Research, LECCE (ITALY) 2-4 June 2008.
- Greben, J.M., Cooper, A.K., Gledhill, I., de Villiers, R., 2008. Numerical modelling of structures of dolosse and their interaction with waves.
- Hsu, T.W., Chang, J.Y., Lan, Y.J., Lai, J.W., Ou, S.H., 2008. A parabolic equation for wave propagation over porous structures. Coastal Engineering 55, 1148–1158.
- Lara, J.L., Losada, I.J., Guanche, R., 2008. Wave interaction with low-mound breakwaters using a RANS model. Ocean Engineering 35, 1388– 1400.
- Lin, P., Karunarathna, S.A.S.A., 2007. Numerical study of solitary wave interaction with porous breakwaters. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering Sep/Oct2007, 352-363.
- Cappietti L., Moro E. e Aminti P. (2006) - Studio sperimentale dell'influenza della larghezza di berma sulla trasmissione di moto ondoso sottoflutto a scogliere sommerse. XXX° Congresso di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, IDRA 2006.
- Lara, J.L., Garcia, N., Losada, I.J., 2006 RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. Coastal Engineering 53, 395–417.
- Ting, C.L., Lin, M.C., Cheng, C.Y., 2004. Porosity effects on non-breaking surface waves over permeable submerged breakwaters. Coastal Engineering 50, 213–224.
- Huang, C.J., Chang, H.H., Hwung, H.H., 2003. Structural permeability effects on the interaction of a solitary wave and a submerged breakwater. Coastal Engineering 49, 1-24.
- Hur, D.S., Mizutani, N., 2003. Numerical estimation of the wave forces acting on a three-dimensional body on submerged breakwater. Coastal Engineering 47, 329–345.
- Hsu, T.J., Sakakiyama, T., Liu, P.L.F., 2002. A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater. Coastal Engineering 46, 25–50.
- Requejo, S., Vidal, C., Losada, I.J., 2002. Modelling of wave loads and hydraulic performance of vertical permeable structures. Coastal Engineering 46, 249–276
- Tirindelli, M., Lamberti, A., Paphitis, D., Vidal, C., Hawkins, S., Morchella, P., Sanchez-Arcilla, A. (2000), Wave action on rubble mound breakwaters: the problem of scale effect, DELOS EVK3-CT-2000-00041
- van Gent, M.R.A., 1995. Porous flow through rubble-mound material. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering May/June1995, 176-181.