

## Modellazione numerica del moto ondoso su barriere frangiflutti sommerse porose

Fabio Dentale <sup>1</sup>, Eugenio Pugliese Carratelli <sup>1,2</sup>, Sebastiano Pane <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile - Università degli Studi di Salerno

<sup>2</sup> C.U.G.Ri. - Consorzio inter-Universitario per la Previsione e Prevenzione Grandi Rischi

<sup>3</sup> Ingegnere Senior

### Riassunto

Nel presente lavoro sono riportati alcuni dei risultati ottenuti da modellazioni numeriche bidimensionali, realizzate allo scopo di studiare il complesso fenomeno di interazione che si instaura tra il moto ondoso regolare ed una struttura porosa a cresta bassa.

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 modello "mezzo poroso" impiegato ad esempio da Hsu et al. (2002) e Lara et al. (2006), ma integrando le equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds (RANS) all'interno dei vuoti. Pertanto la struttura è stata modellata così come avviene nella realtà costruttiva 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.

Infine, per avere una validazione preliminare della metodologia proposta, il coefficiente di trasmissione  $K_p$ , calcolato con le simulazioni numeriche, è stato confrontato con alcune teorie empiriche e dati sperimentali, dando particolare rilevanza all'influenza che può avere su tale fenomeno la geometria dell'opera.

**Parole chiave:** difesa costiera, CFD, coefficiente di trasmissione, strutture a cresta bassa, porosità.

### Abstract

*In this article, we present some of the results obtained in two-dimensional numerical modeling applied with the scope of investigating the complex interaction phenomena that occur between regular waves and a porous submerged structure.*

*Simulations were conducted using an innovative approach: filtration motion of the fluid within the interstices, which normally exist in a breakwater, is estimated by integrating Navier-Stokes equations with a RNG turbulence model, and not using classical equations for filtration (porous media). Therefore, the structure was modeled, as it happens in the full size construction, by overlapping three-dimensional elements. Computational grid for the numerical solution was thickened in such a way to have computational nodes along the flow paths among the breakwater blocks. Preliminary validation of the approach proposed was carried out by comparing the numerical transmission coefficient with empirical formulas and experimental data.*

**Keywords:** coastal defence, CFD, transmission coefficient, low-crested structures, porosity.

## Introduzione

Per studiare al meglio le interazioni che si instaurano tra il moto ondoso e le strutture marittime è indispensabile il ricorso all'uso di modelli sperimentali; negli ultimi anni però lo sviluppo delle tecniche numeriche ha reso sempre più frequente l'impiego delle modellistica matematica, spesso integrata con quella fisica in vista anche della necessità di calibrare i risultati con i dati di laboratorio.

Nonostante le semplificazioni, visti i fenomeni analizzati, i primi metodi che hanno fornito indicazioni interessanti sono sicuramente quelli che prevedevano l'impiego delle cosiddette equazioni Non Linear Shallow Water (NLSW) (Giarrusso et al., 2003) e delle equazioni di Bussinesq (Madsen et al., 1997; Carevic et al., 2009).

Tuttavia, è con l'integrazione numerica delle Navier-Stokes e sue derivate (RANS - VARANS) che si sono ottenuti i migliori risultati. Esempi, senza pretesa di completezza, si possono considerare i lavori di Karim et al. (2009), Greben et al. (2008), Hsu et al. (2008), Lara et al. (2008), Lin et al. (2007), Lara et al. (2006), Garcia et al. (2004), Ting et al. (2004), Hur et al. (2003), Huang et al. (2003), Hsu et al. (2002), Requejo et al. (2002), Tirindelli et al. (2000), Lin et al. (1998), van Gent (1995).

Alcuni aspetti, però, restano ancora difficili da studiare mediante l'approccio numerico, in particolare per le strutture a gettata, composte cioè da massi o blocchi di calcestruzzo, dove il moto all'interno dei meati è fortemente non stazionario ed, a volte, anche bifasico per la presenza di aria.

In questi casi 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 impermeabile 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. È evidente che 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 ("mezzo poroso"), ormai abbastanza diffusa, ritenendo invece non trascurabile l'influenza della porosità sulle caratteristiche idrodinamiche del fluido, prevede che in corrispondenza della gettata le equazioni siano modificate per tener conto del moto di filtrazione (Darcy o Forchheimer a seconda che si consideri la perdita di carico lineare o quadratica). In pratica, si introduce un termine aggiuntivo che riproduce le interazioni del fluido con i meati interni, mediante coefficienti omogenei per tutta l'estensione del dominio filtrante. Un esempio applicativo, in ambito marittimo, è sintetizzato in Hsu et al. (2002), successivamente implementato nel codice numerico COBRAS ed infine perfezionato da Lara et al. (2006).

Nonostante tale metodologia abbia fornito validissimi risultati è opinione degli Autori che in molte situazioni caratterizzate da massi di dimensioni tali che il numero di Reynolds raggiunga valori alti il metodo non sia completamente adeguato. Inoltre, da una parte la necessità di calibrazione dei parametri numerici legati alla risoluzione del moto all'interno del mezzo poroso, dall'altra il considerare volumi di controllo più grandi della scala dei percorsi random della gettata, porta necessariamente a trascurarne gli aspetti convettivi e la struttura della turbolenza.

Infatti, come affermato da Hsu et al. (2002): *"In studying water wave and porous-structure interactions, it is still not practical to resolve the intrinsic flow field inside pores, whose geometry is usually random. It is more manageable if the flow equations are averaged over a volume that is larger than the characteristic pore size and is much smaller than the scale of the spatial variation of the physical variables in the flow domain."*

Partendo da questa considerazione e visti i progressi della tecnologia è possibile definire un approccio più dettagliato e quindi innovativo rispetto ai precedenti: la struttura solida 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 un dominio di calcolo costituito dagli spazi vuoti delimitati dai blocchi. In questo modo è possibile valutare direttamente i fenomeni fluidodinamici all'interno dell'opera, tenendo conto degli effetti idrodinamici completi, comprensivi dei termini convettivi, ed eventualmente della turbolenza.

Pertanto, al fine di validare l'applicabilità della procedura e comprendere l'effetto della porosità sul fenomeno di interazione tra moto ondoso e struttura, per quanto riguarda la sagoma della barriera soffolta sono state considerate tre geometrie differenti (solida, completamente porosa, solida-porosa) stimando i moti turbolenti mediante il modello ReNormalization-Group (RNG) che si basa sull'approccio Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS).

Infine con i risultati ottenuti è stata condotta una validazione preliminare utilizzando alcuni parametri fondamentali, come ad esempio il coefficiente di trasmissione  $K_t$ , per il quale sono disponibili formule empiriche (Van der Meer e Daemen, 1994; D'Angramond et al., 1996; Seabrook e Hall, 1998) e dati sperimentali (Cappiotti et al., 2006).

### Modello di calcolo ed attacchi ondosi

Per le simulazioni è stato impiegato il codice numerico (FLOW-3D) che utilizza tecniche computazionali di calcolo delle grandezze fluidodinamiche e della superficie libera basate sulle equazioni RANS, insieme a diverse tecniche per la determinazione degli sforzi turbolenti, tra i quali k- $\epsilon$ , RNG o LES. Per quanto riguarda la rappresentazione dell'andamento della superficie libera nel tempo, questa viene determinata mediante il metodo VOF (Volume Of Fluid) (Hirt e Nichols, 1981). Invece, per quanto riguarda la schematizzazione delle geometrie complesse, come quelle descritte nel presente articolo, il programma si avvale della tecnica di rappresentazione FAVOR<sup>TM</sup>, Fractional Area/Volume Of Fluid.

Le capacità del software nel riprodurre i problemi di idrodinamica costiera, sono equivalenti a quelle attualmente disponibili (modello COBRAS ed altri), come evidenziato in Dentale et al. (2008).

Per definire la geometria della barriera da introdurre nel dominio di calcolo è stato necessario scegliere a priori la profondità a cui essa è posta. Considerando la onerosità computazionale che avrebbe comportato una quota di imbasamento elevata, si è ritenuto opportuno non andare oltre i 4 m, che risulta essere una scelta frequente in molte realtà progettuali. La sommergenza ( $R_c$ ) è stata fissata ad un valore prossimo a -0.58 m mentre per quanto riguarda la lunghezza della berma e l'inclinazione dei lati obliqui si sono scelte delle dimensioni che permettono un'opportuna interazione con il moto ondoso incidente. È opportuno precisare che, per semplificazione, le pendenze dal lato mare e dal lato terra sono state scelte uguali. Sulla base delle dimensioni individuate secondo i criteri esposti in precedenza ed al fine di valutare l'effetto della porosità sono stati messi a confronto diversi schemi geometrici: barriera impermeabile, rappresenta mediante un unico blocco solido (in seguito denominata *bar\_solid*); barriera permeabile, completamente porosa con una sagoma realizzata sovrapponendo elementi sferici (in seguito denominata *bar\_perm*); ed infine, per avvicinarsi maggiormente alle realtà progettuale, è stata considerata anche una barriera parzialmente porosa che presenta una mantellata composta da due strati di sfere ed un nucleo interno di forma trapezoidale impermeabile (in seguito denominata *bar\_core*) (Fig. 1).

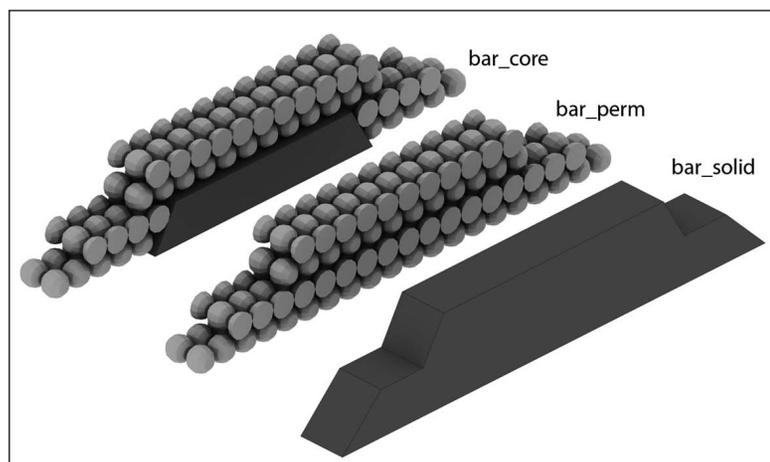


Figura 1 - Rappresentazione 3D delle tipologie di barriere utilizzate.

In questi ultimi due casi la dimensione delle sfere ( $D_{50}=0.95$  m) sono state determinate sulla base del criterio di stabilità proposto da Van der Meer (1990).

Definite le geometrie tridimensionali, si è scelto in questa fase, di realizzare delle simulazioni bidimensionali, pertanto è stato necessario sviluppare una rappresentazione 2D dei modelli geometrici.

Per quanto riguarda la barriera impermeabile chiaramente questo problema non si pone dato che presenta sezioni trasversali omogenee. Il problema risulta essere evidente per la barriera composta da sfere e per la barriera con nucleo interno e mantellata; le barriere sono state quindi sezionate trasversalmente con un piano (Fig. 2), ottenendo così un'impronta che fornisce un modello geometrico bidimensionale in cui l'opera è idealizzata mediante la sovrapposizione di cilindri e l'acqua si muove in canali con dimensioni medie rispetto a quelli ricostruiti nel modello tridimensionale. Il dominio di calcolo è analizzato con una *mesh* non uniforme (Fig. 3a), più fitta in corrispondenza della barriera dove è prevista un'idrodinamica più complessa.

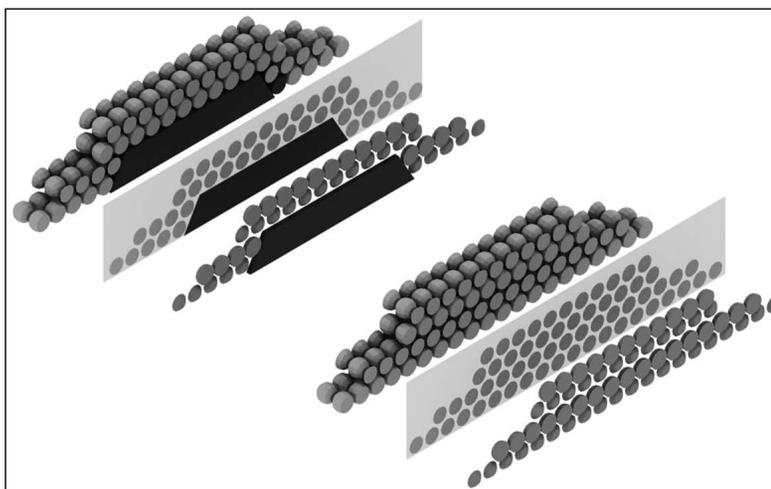


Figura 2 - Barriere permeabili sezionate per il passaggio alla rappresentazione 2D.

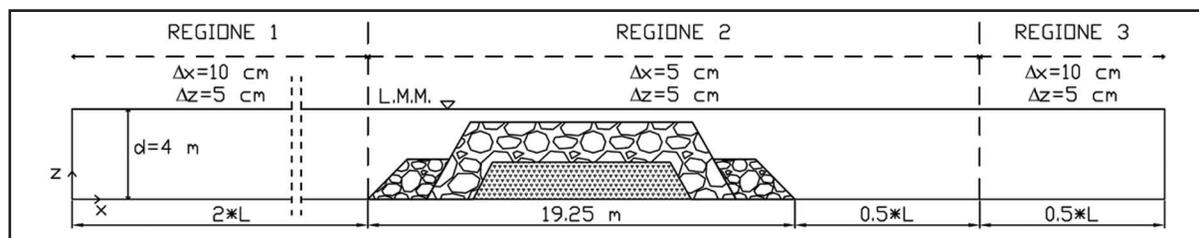


Figura 3a - Geometria del canale in presenza di barriera.

La dimensione delle celle più piccole è tale da ottenere un numero adeguato di nodi di calcolo all'interno dei meati delle strutture porose in modo da poter valutare direttamente i processi di filtrazione (Fig. 3b).

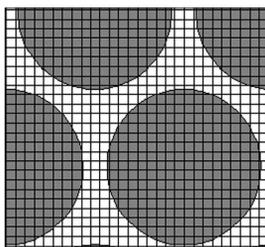


Figura 3b - Griglia di calcolo interna ai meati.

Le caratteristiche geometriche del dominio di calcolo, variabili in funzione dell'onda utilizzata, possono essere sintetizzate come segue (Tab. 1).

Tabella 1 - Grandezze del modello di calcolo 2D in presenza di ostacoli.

Profondità iniziale (d)			
4.00 m			
REGIONE 1			
<b>Lunghezza x</b>	<b>Altezza z</b>	<b>Dx</b>	<b>Dz</b>
2*L	6.25 m	10 cm	5 cm
REGIONE 2			
<b>Lunghezza x</b>	<b>Altezza z</b>	<b>Dx</b>	<b>Dz</b>
19.25m(barriera)+0.5*L	6.25 m	5 cm	5 cm
REGIONE 3			
<b>Lunghezza x</b>	<b>altezza z</b>	<b>Dx</b>	<b>Dz</b>
0.5*L	6.25 m	10 cm	5 cm

Al fine di una corretta valutazione del comportamento idrodinamico del moto ondoso su una barriera mediante il coefficiente di trasmissione è opportuno valutare l'onda incidente in assenza di barriere (Cappietti et al., 2006), pertanto, sono state effettuate analoghe modellazioni senza opere. In questo caso le caratteristiche geometriche del modello, anch'esse dipendenti dall'onda utilizzata, sono così sintetizzate:

Tabella 2 - Grandezze del modello di calcolo 2D in assenza di ostacoli.

$T_e (s)$	<i>A largo</i>		<i>Sottocosta (d=10m)</i>	
	$H_e (m)$	$DirH (^{\circ}N)$	$H_e (m)$	$DirH (^{\circ}N)$
7.16	2.25	135	2.04	136
6.14	1.25	145	1.58	143
6.69	1.75	225	0.90	185

Per quanto concerne le caratteristiche del moto ondoso regolare (H,T), queste sono state individuate sulla base dell'ipotesi che il fenomeno del frangimento dovesse verificarsi solo durante il passaggio sulla barriera, valutando la rottura mediante il criterio semplificato ( $H/d=0.78$ ):

Tabella 3 - Caratteristiche delle onde simulate.

<i>Caso</i>	<b>H</b> [m]	<b>T</b> [s]	<b>L</b> [m]
<b>a</b>	1.00	3.43	16.65
<b>b</b>	2.00	4.85	26.91
<b>c</b>	3.00	5.94	34.37

### Coefficiente $K_t$ - Risultati

Il passaggio di un'onda su una barriera determina una dissipazione energetica che si traduce in una riduzione del moto ondoso trasmesso, la cui entità dipende sia dalle caratteristiche dell'onda incidente sia dal tipo di struttura con cui interagisce l'onda stessa.

Inizialmente, nonostante il moto ondoso incidente sia regolare, per valutare il fenomeno di interazione è stato utilizzato come parametro di analisi l'altezza d'onda  $H_{m0}$ , determinata in diverse posizioni del dominio numerico. I punti di calcolo utilizzati sono stati scelti con intervallo spaziale pari ad 1/8 della lunghezza d'onda sia

per la zona antistante le opere sia per quella a valle, mentre per quanto riguarda la zona occupata dalla barriera si sono considerati soltanto cinque punti. L'andamento delle  $H_{m0}$  per le simulazioni a, b e c è riportato nei grafici delle Figure 4÷6.

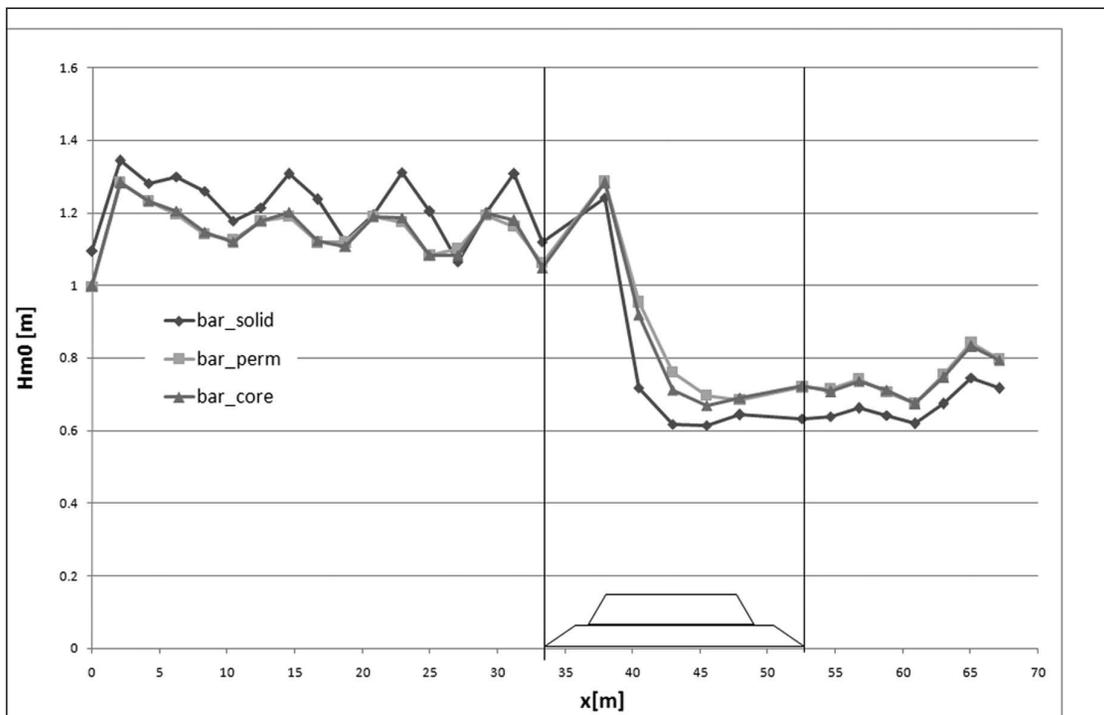


Figura 4 - Andamento l'altezza d'onda significativa  $H_{m0}$  nel caso a.

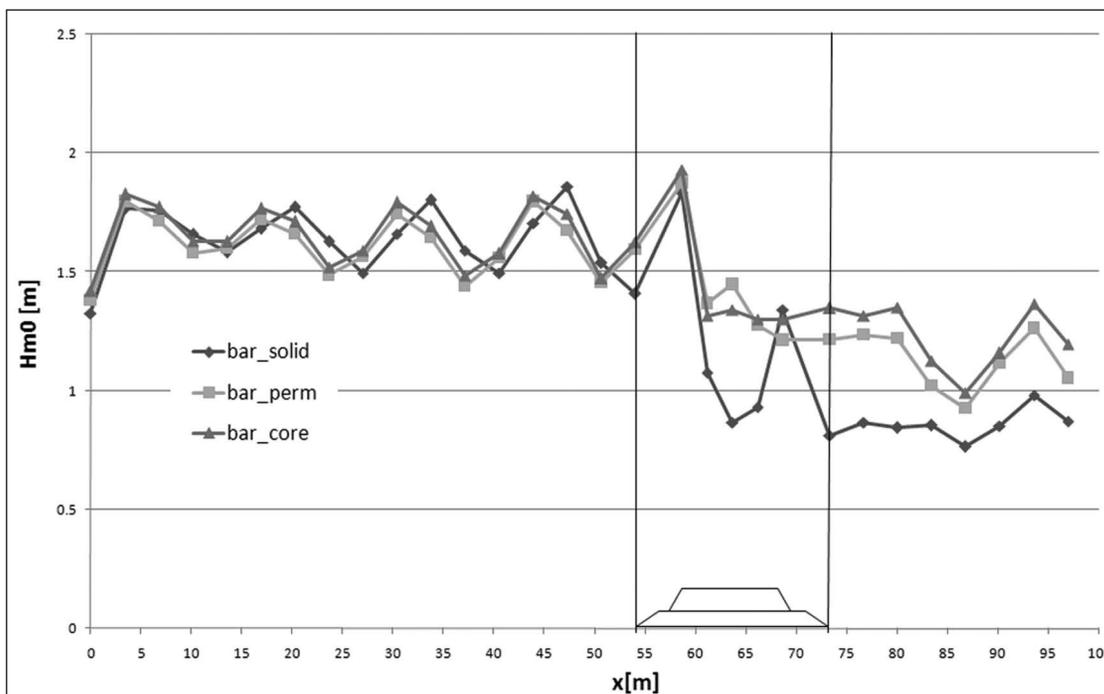


Figura 5 - Andamento l'altezza d'onda significativa  $H_{m0}$  nel caso b.

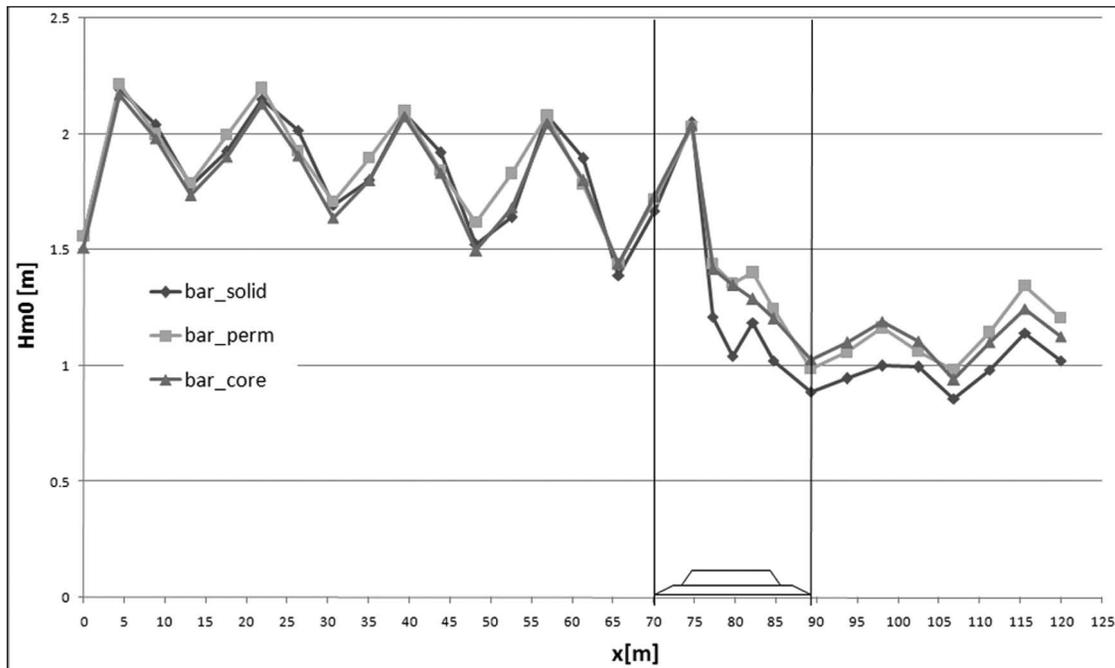


Figura 6 - Andamento l'altezza d'onda significativa  $H_{m0}$  nel caso c.

Dalle Figure 4÷6 si evince che la struttura impermeabile tende ad interagire maggiormente con il moto ondoso incidente determinandone una riduzione superiore rispetto all'opera permeabile o parzialmente permeabile. Le oscillazioni, antistanti la barriera, possono essere dovute alla riflessione indotta dalla presenza dell'opera e quindi ad un effetto fisico riprodotto dal calcolo.

Successivamente, sempre al fine di comprendere al meglio il comportamento di quanto numericamente simulato, si è passati alla valutazione del coefficiente  $K_t$  definito come il rapporto tra l'altezza d'onda  $H_{m0t}$  trasmessa nella zona protetta dalla struttura e l'altezza d'onda incidente  $H_{m0i}$ , quest'ultima valutata attraverso l'analisi del moto in assenza di ostacoli (Cappietti et al., 2006) in corrispondenza della probe posizionata ad una distanza pari  $2L$  dall'origine del modello numerico (Tab. 4).

Tabella 4 - Caratteristiche del moto ondoso incidente.

<i>Onda incidente</i> <b>caso</b>	$H_{m0i}$ [m]	$T_{si}$ [s]
a	1.397	3.42
b	1.840	4.78
c	1.937	5.60

Per quanto riguarda, invece, la posizione geometrica a cui valutare l'onda trasmessa  $H_{m0t}$  questa è stata calcolata nella zona protetta a diverse distanze dal piede della struttura. È importante considerare che, nell'immediata vicinanza dell'opera, l'onda in uscita presenta uno stato turbolento che non permette uno studio significativo del fenomeno stesso. Per questo motivo si è deciso di fissare il primo punto di analisi del parametro  $K_t$  ad una distanza dalla struttura pari ad  $1/2$  della lunghezza dell'onda in oggetto, mentre i successivi punti sono stati individuati con un passo uguale  $1/8$  della lunghezza d'onda. Anche con questa tipologia di analisi risulta che utilizzando un'opera completamente impermeabile si determinano maggiori interazioni con il moto ondoso al

punto tale che si potrebbe pensare ad una maggiore capacità dissipativa da parte di tali strutture. Conferma di ciò è riscontrabile dalla successiva elaborazione effettuata, sintesi dei risultati ottenuti, in cui si è valutato un  $K_t$  medio tra quelli riscontrati nelle diverse posizioni.

Nella Figura 7 è evidente una maggiore trasmissione di moto ondoso da parte delle strutture che presentano una certa porosità.

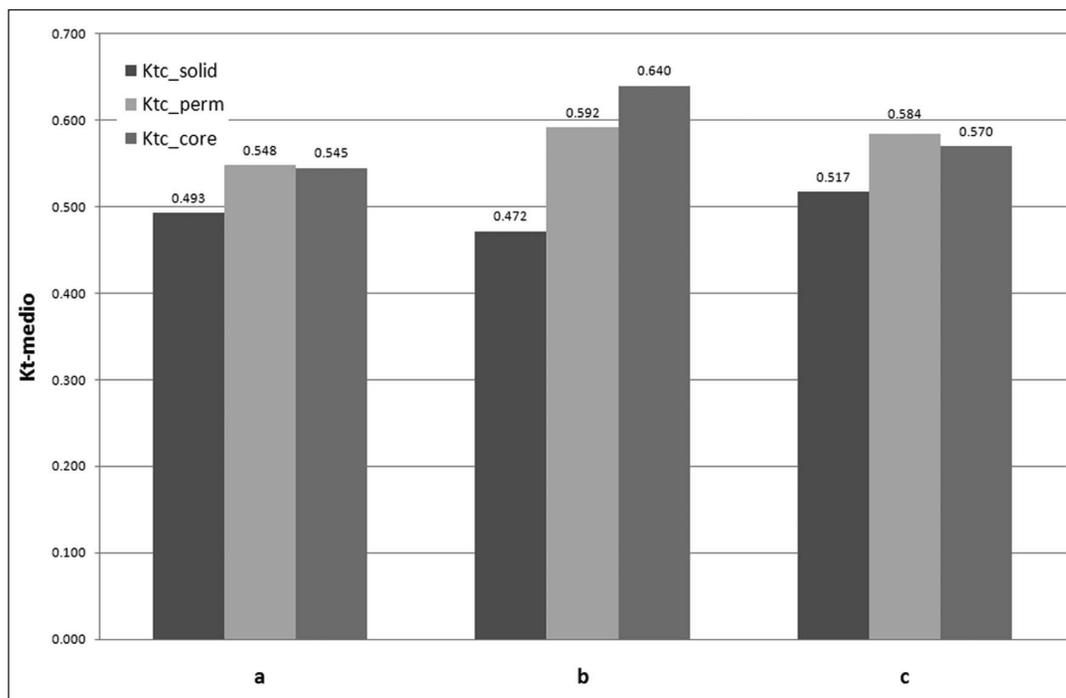


Figura 7 - Confronto dei valori di  $K_t$  medi a tergo della struttura per le diverse caratteristiche d'onda e per le diverse tipologie di strutture.

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. Tali risultati trovano conferma in alcune pubblicazioni in cui è stato studiato l'effetto che comporta la porosità di strutture sia emerse che sommerse sui coefficiente di riflessione  $K_R$ , trasmissione  $K_t$  e dissipazione energetica  $K_D$ .

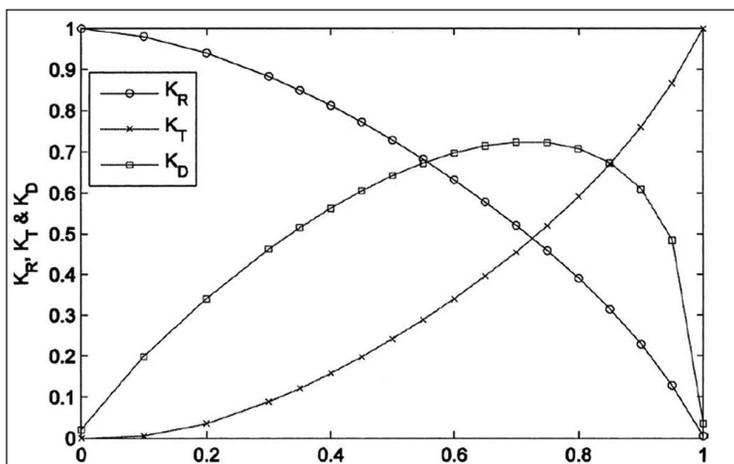


Figura 8 - Effetti della porosità sul coefficiente di riflessione, trasmissione e dissipazione di energia per  $a/h = 2,0$  e  $d_{50}/h = 0,02$  (Fonte: Lin et al., 2007).

Un esempio sono gli studi numerici su barriere emerse compiuti da Lin et al., nel 2007 (Fig. 8). In tale grafico il valore di porosità  $n=0$  si riferisce a strutture impermeabili mentre  $n=1$  a strutture completamente trasparenti, inoltre i rapporti tra la larghezza di berma ( $a$ ) e il diametro dei massi ( $d_{50}$ ) con la profondità a cui è posta la barriera ( $h$ ) sono stati rispettivamente fissati a  $a/h=2.0$  e  $d_{50}/h=0.02$ . Dalla Figura 8 è evidente che con l'aumentare di  $n$  il coefficiente di riflessione diminuisce mentre il coefficiente di trasmissione aumenta. Risultati simili sono stati ottenuti sperimentalmente per un frangiflutti poroso con sommergenza della cresta pari a zero da Dattatri et al.(1978), in cui risulta evidente che la trasmissione del moto ondoso aumenta con la porosità.

Per ciò che concerne barriere sommerse, Ting et al.(2004), studiando sperimentalmente gli effetti della porosità sulla trasformazione del moto ondoso che si propaga su tali opere, sono giunti alle stesse conclusioni. È interessante notare che una barriera con porosità molto piccole o molto grandi dissipa meno energia rispetto a frangiflutti con porosità medie. La dissipazione di energia da parte di frangiflutti con porosità molto piccole è piccola, perché la maggior parte dell'energia del moto ondoso si riflette indietro. D'altro canto, frangiflutti con grande porosità trasmettono quasi completamente il moto ondoso. Una spiegazione potrebbe consistere nel fatto che sotto un certo diametro, l'aumento del diametro provoca sia un aumento dei vuoti e quindi della trasmissione, sia un aumento delle rugosità e quindi della dissipazione, mentre sopra una certa soglia, un aumento di diametro comporta un forte aumento dell'energia trasmessa e contemporaneamente una riduzione dell'energia dissipata e di quella riflessa. Andamenti simili dei tre coefficienti prima citati in funzione del rapporto  $B/D_{50}$  ( $B$  larghezza di berma e  $D_{50}$  diametro caratteristico di massi artificiali) sono stati trovati anche da Numata (1976).

Una conferma dell'effettiva capacità di riprodurre il fenomeno investigato in tutti i suoi aspetti è riportato nelle Figure 9 ÷ 11.

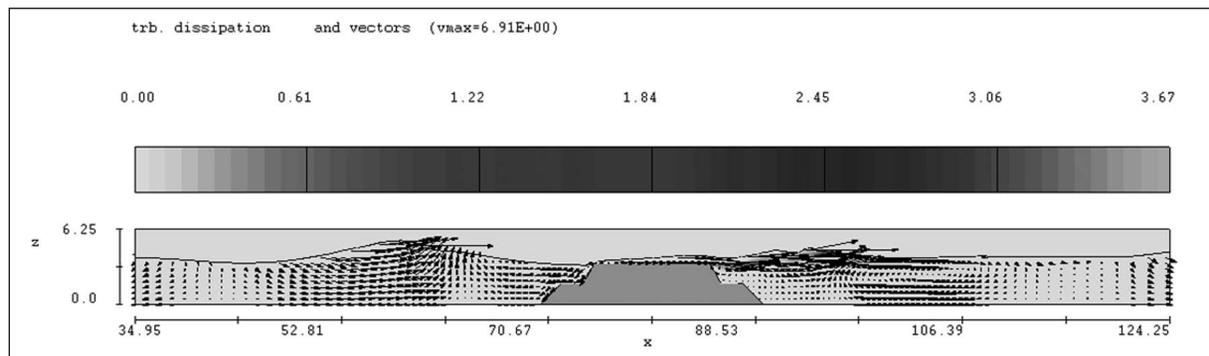


Figura 9 - Campo di velocità e dissipazione di energia cinetica turbolenta determinata dalla bar\_solid nell'istante 32.4 s.

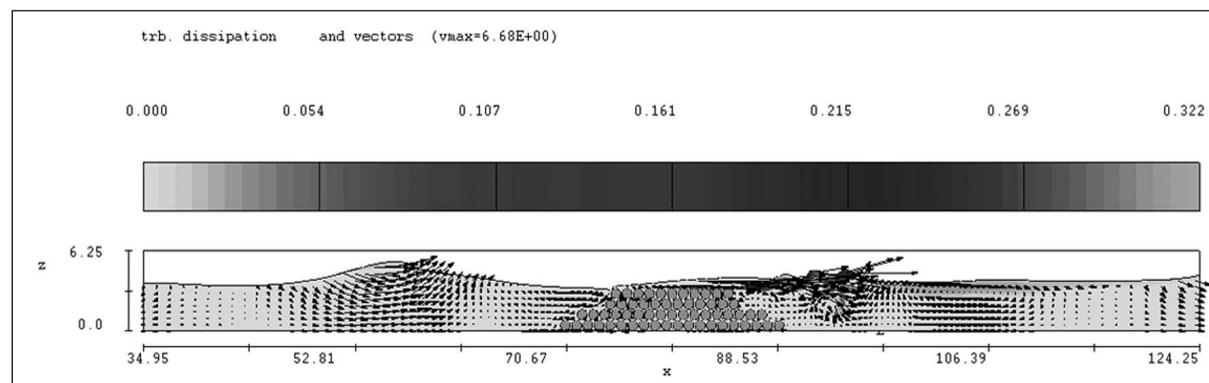


Figura 10 - Campo di velocità e dissipazione di energia cinetica turbolenta determinata dalla bar\_perm nell'istante 32.4 s.

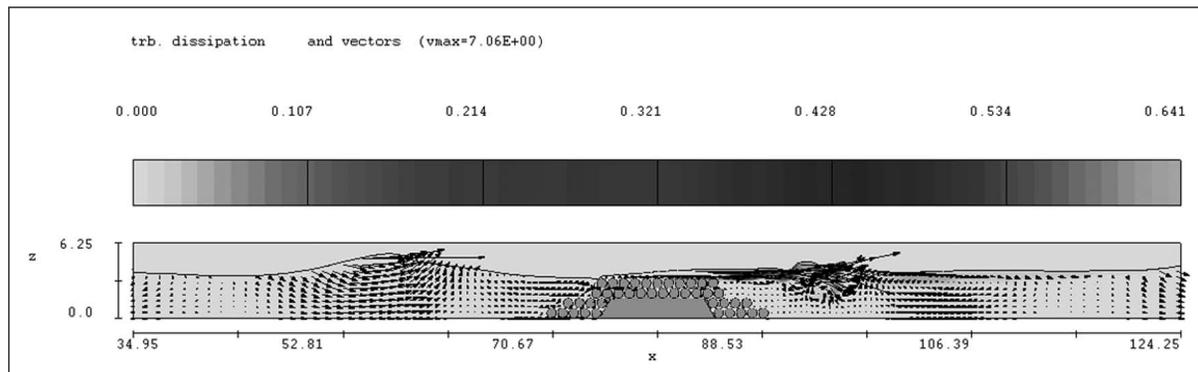


Figura 11 - Campo di velocità e dissipazione di energia cinetica turbolenta determinata dalla bar\_core nell'istante 32.4 s.

È evidente, per l'istante temporale considerato ( $t=32.4$  s), la presenza di un'onda incidente e di una seconda onda in uscita attenuata in seguito alla propagazione sulla barriera.

Si sottolinea la differenza riscontrabile nei campi di velocità e nelle strutture vorticosi che si generano nella zona protetta a causa delle diverse barriere utilizzate.

Inoltre da tali immagini, in cui viene riportata la dissipazione di energia cinetica turbolenta è nuovamente confermata la maggiore capacità dissipativa della struttura impermeabile.

Per quanto concerne la simulazione numerica dei moti interni alle barriere porose e della capacità di riproduzione dei diversi aspetti connessi con il fenomeno di filtrazione, nella Figura 12 sono riportati l'evoluzione del campo di velocità all'interno e nei pressi della barriera permeabile e l'energia cinetica turbolenta calcolata con il modello RNG.

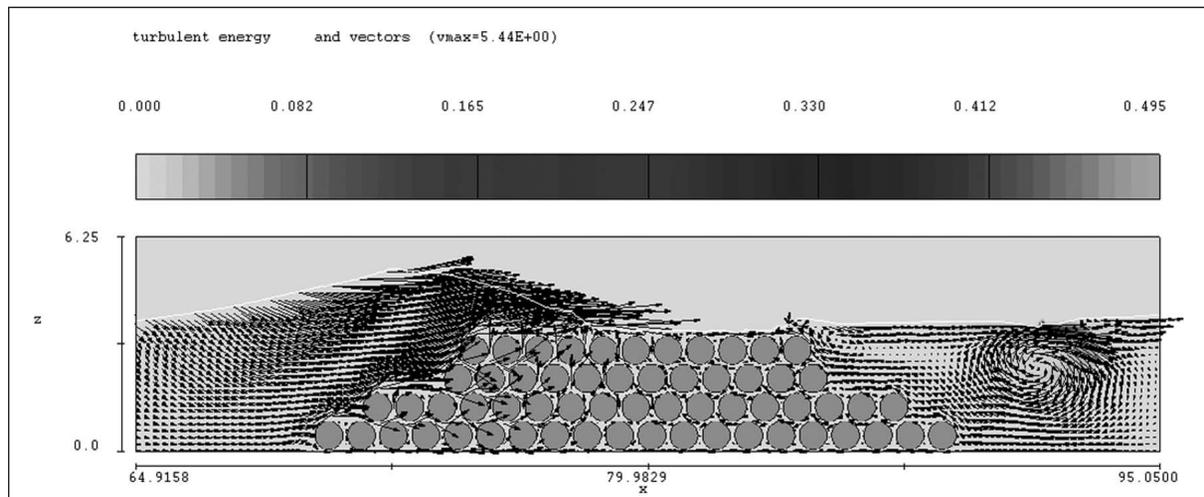


Figura 12 - Campo di velocità ed energia cinetica turbolenta all'interno e nei pressi della bar\_perm nell'istante 29.4 s.

Si nota 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. Inoltre, si riscontra che nella zona protetta (destra della barriera) si generano delle strutture vorticosi ed un innalzamento medio del livello del mare che determina un flusso di ritorno sia all'interno della barriera che al di sopra della cresta.

### Confronto con le formule empiriche

Le proprietà previsionali di una procedura così complessa che prevede l'integrazione numerica delle equazioni RANS non può essere verificata solo attraverso il confronto con i parametri forniti dalle semplici e collaudate formule empiriche. Però, visto l'obiettivo del lavoro, che è quello di migliorare la comprensione degli aspetti idrodinamici interni agli strati porosi costituenti l'opera, è opportuno realizzare una verifica dell'attendibilità della metodologia paragonando i risultati ottenuti con quelli di alcune delle principali formule empiriche disponibili in letteratura ed alcuni recenti dati sperimentali.

Utilizzando le caratteristiche di onde incidenti trovate precedentemente ed introducendo nelle formule di Van der Meer-Daemen (1994), D'Angremond et al.(1996), Seabrook e Hall (1998) i parametri caratteristici della barriera permeabile, sono stati trovati i seguenti valori del coefficiente di trasmissione  $K_t$ :

Tabella 5 - Coefficienti KT calcolati con formule empiriche.

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
<b><math>K_t(\text{VM\_D})</math></b>	0.277	0.371	0.415
<b><math>K_t(\text{D'Ang\_c=0.64, permeabile})</math></b>	0.423	0.431	0.445
<b><math>K_t(\text{D'Ang\_c=0.8, impermeabile})</math></b>	0.487	0.507	0.526
<b><math>K_t(\text{S\_H})</math></b>	0.333	0.330	0.333

I risultati fin qui ottenuti sulla minore trasmissione del moto ondoso da parte di strutture impermeabili sembrano andare in contrasto con la teoria di D'Angremond et al.(1996) la quale all'interno della formula attribuisce un valore di  $c=0.8$  per le strutture impermeabili ed un valore di  $c=0.64$  per le strutture permeabili, conferendo a quest'ultime una maggiore capacità dissipativa.

Per quanto riguarda, invece, il confronto con i dati ottenuti dalle simulazioni numeriche si è scelto di utilizzare come parametro di comparazione l'errore quadratico medio (RMSE) così definito (1):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{N=3} (K_{tp} - K_{tc})^2}{N}} \quad (1)$$

$K_{tp}$  = valori previsti dalle formule empiriche

$K_{tc}$  = valori calcolati attraverso i risultati delle simulazioni

e la differenza percentuale  $r$  tra i due risultati (2):

$$r = \frac{K_{tc} - K_{tp}}{K_{tp}} \cdot 100\% \quad (2)$$

I risultati riassunti nelle Tabelle 6 + 9 mostrano che la formula di D'Angremond et al.(1996) presenta il migliore accordo con i risultati numerici, pur mantenendo un'incongruenza di fondo basata sul coefficiente  $c$  che prevede una maggiore attenuazione del moto ondoso da parte delle barriere permeabili (Van der Meer et al., 2005). Con le formule di Seabrook et Hall (1998) e Van der Meer-Daemen (1994), invece, si ottengono valori di  $K_t$  più bassi rispetto a quelli ricavati con le simulazioni.

È ipotizzabile che tale incongruenza, per quanto riguarda VdM-D, sia dovuta al fatto che la formula si basa su dati sperimentali che riguardano prevalentemente strutture a cresta stretta, quindi, poco affidabili nel calcolo della trasmissione per opere a cresta larga, come nel caso fin qui analizzato, ciò è evidenziato anche dagli studi numerici compiuti da Chiranjeevi Rambabu et al. (2005).

Tabella 6 - Calcolo del RMSE, per i valori di  $K_T$  medi.

	<i>bar_solid</i>	<i>bar_perm</i>	<i>bar_core</i>
	RMSE	RMSE	RMSE
VM_D	0.149	0.224	0.237
D'Ang_c=0.64 permeabile	0.063	0.143	0.158
D'Ang_c=0.8 impermeabile	0.021	0.069	0.088
S_H	0.163	0.243	0.256

Tabella 7 - Differenza percentuale del  $K_T$  medio nel caso di *bar\_solid*.

<i>bar_solid</i>	a	b	c
VM_D	77.80%	27.10%	24.55%
D'Ang_c=0.64 perm	16.68%	9.64%	16.27%
D'Ang_c=0.8 imp	1.31%	-6.83%	-1.69%
S_H	48.12%	42.95%	55.21%

Tabella 8 - Differenza percentuale del  $K_T$  medio nel caso di *bar\_perm*.

<i>bar_perm</i>	a	b	c
VM_D	97.63%	59.41%	40.69%
D'Ang_c=0.64 perm	29.70%	37.51%	31.34%
D'Ang_c=0.8 imp	12.61%	16.86%	11.06%
S_H	64.65%	79.29%	75.32%

Tabella 9 - Differenza percentuale del  $K_T$  medio nel caso di *bar\_core*.

<i>bar_core</i>	a	b	c
VM_D	96.55%	72.34%	37.32%
D'Ang_c=0.64 perm	28.99%	48.66%	28.19%
D'Ang_c=0.8 imp	12.00%	26.33%	8.39%
S_H	63.74%	93.83%	71.12%

### Confronto con dati sperimentali

Il confronto con i dati sperimentali è stato effettuato utilizzando alcuni risultati pubblicati da Cappietti et al. (2006). L'indagine di laboratorio, strutturata al fine di valutare l'influenza della larghezza della berma sulla trasmissione del moto ondoso a tergo di strutture lievemente sommerse ed emerse per verificare se l'applicazione delle formule esistenti (Van der Meer et al., 2005; D'Angremond et al., 1996; Van der Meer e Daemen, 1994; Seabrook e Hall, 1998; Calabrese et al., 2002; Van der Meer, 1990) sia ancora possibile in caso di strutture a cresta larga, ha riscontrato che:

- 1) per le strutture sommerse a berma stretta con  $B/H_i \leq 5$  le formule portano a valori poco differenti tra loro ma a volte molto differenti dai dati misurati per esempio per  $H_i = 9.81$  cm;
- 2) in generale la formula di D'Angremond et al. (1996), è quella che segue più accuratamente i dati di laboratorio.

La scelta del dato da utilizzare per il confronto è stata effettuata utilizzando alcuni parametri adimensionali, come riportato nella Tabella 10:

Tabella 10 - Confronto parametri dimensionali.

	Modello Sperimentale	Modello Numerico
$B/D_{50}$	3.45 ÷ 72.41	10.53
$R_c/H_{m0i}$	0.31 ÷ 0.45	0.30 ÷ 0.42
$H_{m0i}/D_{50}$	2.31 ÷ 3.38	1.47 ÷ 2.04
$R_c/d$	0.166	0.145

I risultati ottenuti sono stati inseriti sui grafici proposti da Cappiotti et al.(2006) in cui si confrontano i dati sperimentali del coefficiente di trasmissione con quelli empirici (Fig. 13 ÷ 15).

Dalla comparazione si evince che la procedura numerica implementata definisce dei  $K_t$  congrui con le esperienze di laboratorio e come per quest'ultimi i valori risultano maggiori rispetto a quelli determinabili mediante le formule empiriche di letteratura (Fig. 13 ÷ 15), in accordo anche con lo studio di Calabrese et al.(2005).

### Ulteriori studi e sviluppi

Studi analoghi a quelli fin qui descritti in dettaglio sono stati compiuti realizzando strutture emerse costituite da Accropodi, allo scopo di analizzare i fenomeni di riflessione, run-up ed overtopping. In tali simulazioni tridimensionali sono state utilizzate due diverse configurazioni in relazione alla disposizione degli elementi della mantellata: regolare e random (Fig.16). Le simulazioni sono state realizzate integrando sulla griglia di calcolo le equazioni di Navier-Stokes (3D) accoppiate al modello di turbolenza RNG.

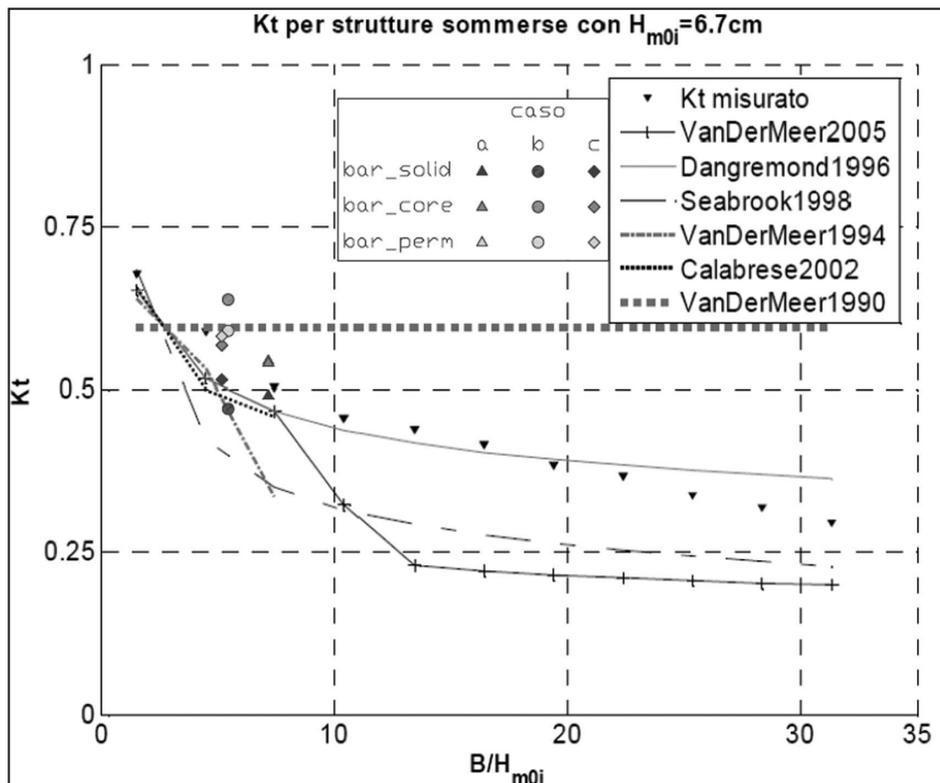


Figura 13 - Kt medi, risultati degli esperimenti di Cappiotti et al. (2006) e formule empiriche.

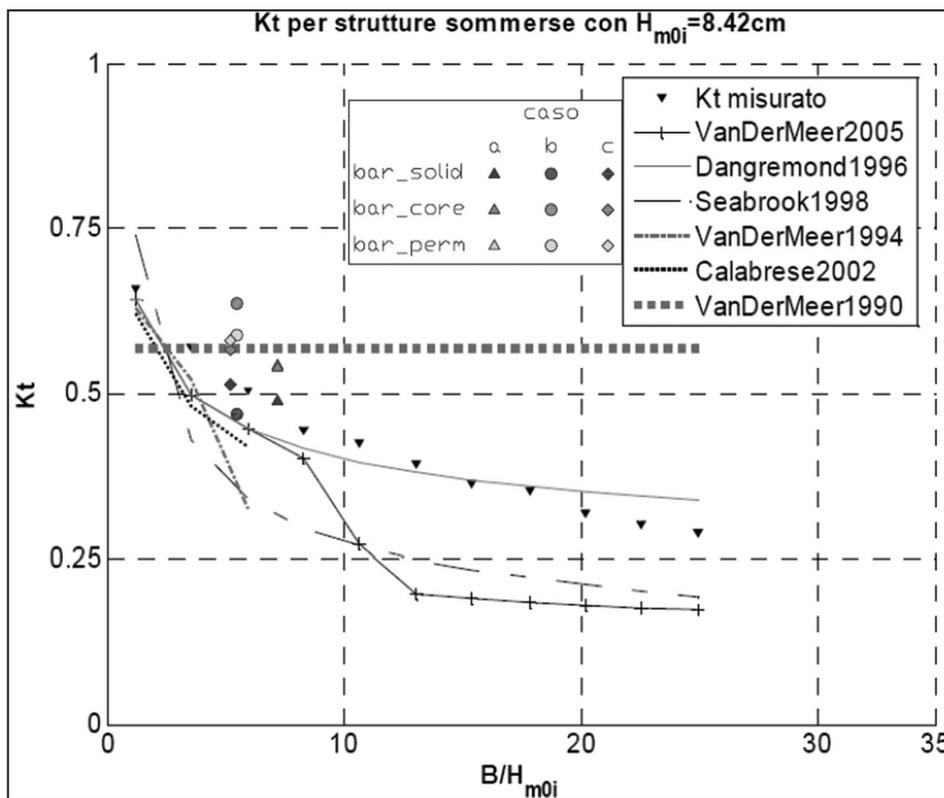


Figura 14 - Kt medi, risultati degli esperimenti di Cappiotti et al. (2006) e formule empiriche.

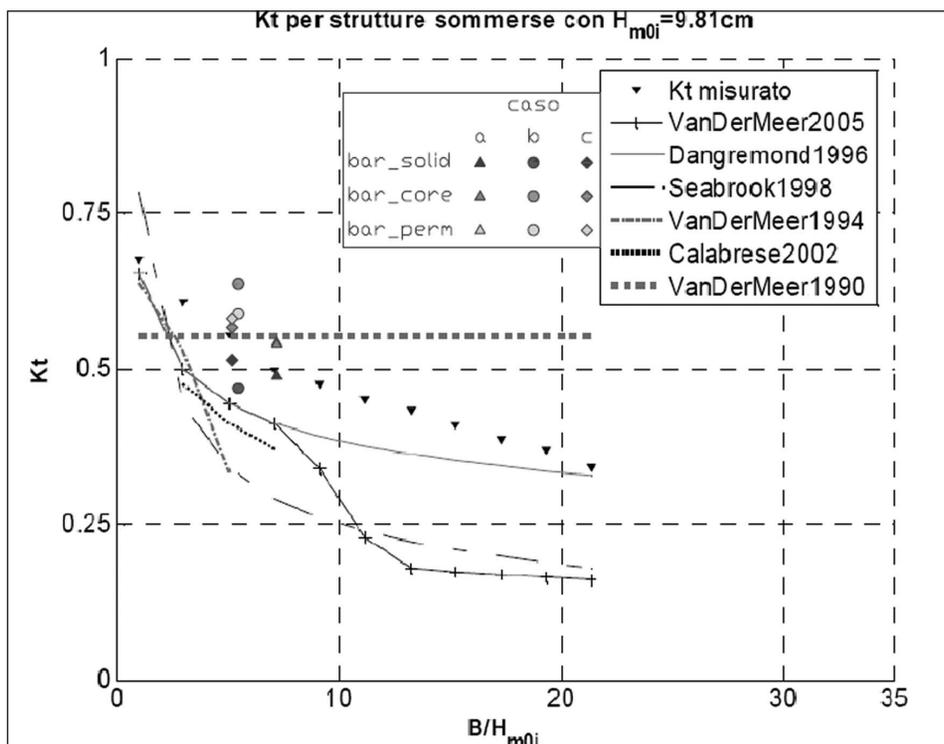


Figura 15 - Kt medi, risultati degli esperimenti di Cappiotti et al. (2006) e formule empiriche.

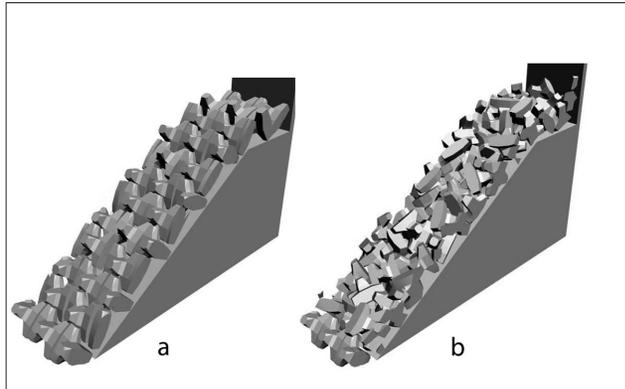


Figura 16 - a) barriera emersa accropodo regolare; b) barriera emersa accropodo random.

Nella ricostruzione tridimensionale della superficie libera (Fig. 17) è possibile osservare con dettaglio gli effetti di risalita del moto ondoso sull'opera. 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 in tutte le sue parti caratteristiche (filtro, protezione al piede).

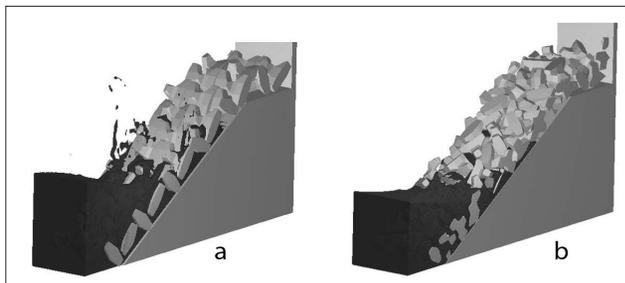


Figura 17 - a) interazione moto ondoso e barriera emersa accropodo regolare; b) interazione moto ondoso e barriera emersa accropodo random.

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

### Conclusioni

Nel presente articolo sono stati presentati alcuni risultati di uno studio numerico che utilizza un approccio innovativo per quanto riguarda la modellazione del moto di filtrazione all'interno di un'opera a gettata. Generalmente, dal punto di vista numerico, volendo considerare i vuoti che costituiscono la struttura 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 (sfere) 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 nell'opera.

I risultati ottenuti, validati utilizzando sia le principali formulazioni empiriche sul coefficiente di trasmissione che alcuni dati sperimentali hanno mostrato una buona accuratezza nella riproduzione dei fenomeni investigati. In particolare per quanto concerne il  $K_t$  si sono riscontrati valori maggiori man mano che si è passati da una barriera impermeabile ad una struttura con solo nucleo interno impermeabile ed infine ad una struttura totalmente porosa. Tale risultato è congruente con le formule empiriche che considerano la permeabilità dell'opera anche se parzialmente smentito da alcuni autori (Lara et al., 2006).

Lo scopo principale del presente lavoro è stato quello di sviluppare una metodologia di analisi per individuare con maggior dettaglio gli aspetti fluidodinamici all'interno degli interstizi delle opere a gettata.

### Bibliografia

- 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.
- Carevic D., Prsic M. e Ocvirk E. (2009) - *Modelling of wave interaction with submerged breakwaters using MIKE 21-BW*. International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ohrid/Macedonia -5 September 2009.
- Calabrese M., Vicinanza D., Buccino M. (2002) - *Large scale experiments on the behaviour of low crested and submerged breakwaters in presence of broken waves*. Proc. of 28<sup>th</sup> Int. Conf. On Coastal Engineering: 1900-1921.
- Calabrese M., Buccino M., Zanuttingh B., Cappietti L., Vicinanza D. (2005) - *Riflessione e trasmissione ondosa a tergo di scogliere a cresta bassa*. Studi Costieri n. 9, 2002: 75-95.
- Chiranjeevi Rambabu A., Mani J.S. (2005) - *Numerical prediction of performance of submerged breakwaters*. Ocean Engineering, 32, 1235 -1246.
- D'Angremond K., Van der Meer J.W., De Jong R.J. (1996) - *Wave transmission at low-crested structures*. 25° International Conference on Coastal Engineering, 1996.
- Dattatri J., Raman H., e Shankar N. J. (1978) - *Performance characteristics of submerged breakwaters*. Proc., 16th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, New York: 2153 -2171.
- Dentale F., Monaco M., Pugliese Carratelli E. (2008) *A numerical assessment of scale effects on wave breaking modeling*, 3rd SCACR International Short Course and Workshop on Applied Coastal Research, Lecce, pp.177-188.
- Flow Science Inc. (2009) - *FLOW-3D® Theory Manual*, Santa Fe, New Mexico, USA.
- Garcia N., Lara J.L., Losada I.J. (2004) - *2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested breakwaters*. Coastal Engineering 51 (10): 991-1020.
- Giarrusso C. C., Dentale F., Pugliese Carratelli E. (2003). - *On the Stability of Protected Beaches*. Coastal Engineering VI: Computer Modelling and Experimental Measurements of Seas and Coastal Regions WIT press, Southampton. ISBN: 1-85312-977-1 2003.
- Greben J.M., Cooper A.K., Gledhill I., de Villiers R. (2008) - *Numerical modelling of structures of dolosse and their interaction with waves*.
- Hirt C.W., Nichols B.D. (1981) - *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*. J. Comp. Physics 39: 201 - 225.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lara J.L., Losada I.J., Guancho 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/Oct 2007: 352-363.
- Lin P., Liu P.L.-F. (1998) - *A numerical study of breaking waves in the surf zone*. Journal of Fluid Mechanics, 359: 239-264.
- Madsen P.A., Sørensen O.R., Schäffer H.A. (1997) - *Surf zone dynamics simulated by a boussinesq type model. part i. model description and crossshore motion of regular waves*. Coastal Engineering, 32: 255-287.
- Numata A. (1979) - *Laboratory formulation for transmission and reflection at permeable breakwaters of artificial blocks*. Coastal Engineering in Japan, vol. 19: 47-58.
- Requejo S., Vidal C., Losada I.J. (2002) - *Modelling of wave loads and hydraulic performance of vertical permeable structures*. Coastal Engineering, 46: 249 - 276.
- Seabrook S.R., Hall K.R. (1998) - *Wave transmission at submerged rubble mound breakwater*. Proc. of 26th. Int. Conf. On Coastal Engineering, 2000-2013, 1998.
- 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.
- 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 der Meer J. W., Deamen I.F.R. (1994) - *Stability and wave transmission at low-crested rubble-mound structures*. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 120: 1994.
- Van der Meer J.W., Briganti R., Zanuttigh B. e Wang B. (2005) - *Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change*. Special Issue of Journal of Coastal Engineering, Elsevier, 52 (2005): 915 - 929.
- Van der Meer J.W. e Pilarczyk K.W. (1990) - *Stability of low-crested and reef breakwaters*. Proc. 22th. ICCE, Delft.
- Van Gent M.R.A. (1995) - *Porous flow through rubble-mound material*. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, May/June 1995: 176 -181.

Ricevuto il 15/09/2009, accettato il 23/10/2009.