

# Interazione di onde con fondale poroso

Sara Corvaro<sup>1</sup>, Carlo Lorenzoni<sup>1</sup>, Elisa Seta<sup>1</sup>, Alessandro Mancinelli<sup>1</sup>, Maurizio Brocchini<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Dipartimento di Idraulica Strade Ambiente e Chimica, Università Politecnica delle Marche, Italia*

*E-mail: s.corvaro@univpm.it, c.lorenzoni@univpm.it, e.seta@univpm.it, a.mancinelli@univpm.it, m.brocchini@univpm.it.*

*Parole chiave: mezzo poroso, dissipazione, infiltrazione, pressioni interstiziali.*

**SOMMARIO.** Lo studio dell'interazione delle onde con fondale permeabile è stato affrontato attraverso una campagna sperimentale, con l'obiettivo di fornire un quadro completo della dinamica dell'intera regione fluida, che comprende sia il fluido sovrastante che quello all'interno del mezzo poroso. L'elaborazione della totalità dati sperimentali ottenuti ha permesso di analizzare la dinamica nella regione fluida libera e nella regione fluida all'interno dello strato permeabile, ponendo particolare attenzione allo strato limite al fondo. Si ritiene che le resistenze che si instaurano nel passaggio del flusso all'interno del mezzo poroso siano le maggiori responsabili della dissipazione dell'energia ondosa che si verifica durante la propagazione delle onde su un fondo permeabile. Dall'analisi della dinamica nel mezzo poroso si è ottenuto che le pressioni interstiziali misurate coincidono in modo soddisfacente con quelle teoriche solo per onde caratterizzate da una moderata non linearità. Inoltre lo studio del campo di velocità nel mezzo poroso ha evidenziato che solo la porzione superiore dello strato permeabile è interessata al flusso verticale di interscambio tra le due regioni fluide e quindi, presumibilmente, è in questa zona che si verifica la maggiore dissipazione.

## 1 INTRODUZIONE

Per studiare la propagazione delle onde su un fondale poroso sono state effettuate delle prove sperimentali presso il canale per moto ondoso del Dipartimento di Idraulica, Strade, Ambiente e Chimica dell'Università Politecnica delle Marche. Le misure effettuate nella presente sperimentazione hanno permesso di valutare l'influenza di un fondo permeabile sulla dissipazione di energia delle onde, di caratterizzare lo strato limite al fondo, i campi di velocità, la vorticità e la turbolenza nella regione fluida sovrastante il fondo permeabile; le pressioni e le velocità all'interno del mezzo poroso. In questa memoria si espongono i risultati riguardanti l'andamento delle pressioni e delle velocità nello strato permeabile; i dati di pressione sono confrontati sia con la teoria lineare che con la teoria di Stokes al 2° ordine.

Lo studio della propagazione delle onde su un fondale poroso può avere notevoli applicazioni nell'ambito dell'ingegneria costiera. L'attenuazione delle onde di gravità che si propagano su un fondo poroso è fondamentale per l'equilibrio delle spiagge ghiaiose. Inoltre l'interazione delle onde con il fondale poroso, che si genera attraverso la filtrazione e fuoriuscita dell'acqua nel fondo permeabile, è importante anche per la stabilizzazione dei sedimenti nella spiaggia poiché è nella zona di swash che avviene l'interazione tra l'onda di run-up e la falda della spiaggia.

## 2 DINAMICA IN PRESENZA DEL MEZZO POROSO

La presenza del mezzo poroso modifica il moto che si instaura nella regione fluida sovrastante,

i meccanismi principali con cui il moto oscillatorio nella regione fluida e nel mezzo poroso interagiscono, sono di seguito descritti. Nella propagazione di onde su fondo impermeabile liscio o scabro si forma uno strato limite oscillante che modifica il campo di velocità rappresentato, in genere, da un moto armonico  $u_x = U_0 \sin \omega t$  ( $u_x$  è la velocità al bordo dello strato limite,  $\omega = 2\pi/T$  è la frequenza angolare e  $U_0$  è l'ampiezza delle velocità espressa in funzione di  $A$  che rappresenta l'ampiezza dell'escursione orizzontale) per soddisfare la condizione di aderenza del fluido alla parete. Numerosi studi teorici e sperimentali sono stati effettuati per caratterizzare lo strato limite oscillante attraverso la determinazione dello spessore  $\delta$ , la velocità di attrito  $u^*$  e le tensioni tangenziali al fondo. Il fondo permeabile modifica le caratteristiche dello strato limite al fondo a causa del flusso verticale prodotto dall'oscillazione superficiale. La fase di infiltrazione avviene dopo il passaggio della cresta dell'onda di superficie (il contrario avviene al cavo) e produce uno strato con caratteristiche simili a quello "ventilato".

Le nostre misure sperimentali [1] hanno evidenziato che lo strato limite ha uno spessore  $\delta$  di dipendenza lineare con  $A$ , che l'energia cinetica prodotta rimane confinata all'interno dello strato limite, con picchi in corrispondenza del passaggio della cresta-cavo dell'onda e che il fattore di attrito  $f_w$  (corrispondente al valore massimo di  $u^*$ ) può essere espresso dalla seguente legge:

$$f_w = 0.32 \left( \frac{A}{k_s} \right)^{-0.8}, \quad (1)$$

dove  $k_s$  rappresenta la scabrezza del fondo.

Si è ricavato che  $f_w$  ha un valore confrontabile con quello ottenuto nello strato limite impermeabile. Tali risultati dimostrerebbero che lo strato limite permeabile non modifica in modo consistente lo strato limite di parete fissa e, quindi, le maggiori dissipazioni osservate, in termini di abbattimento dell'altezza d'onda e di velocità, sarebbero dovute alle forze di Drag e di inerzia che dissipano energia nello strato poroso per l'interazione tra il flusso e la matrice solida (sfere). In seguito a tali risultati si è scelto di riportare nella presente memoria l'analisi delle grandezze dinamiche all'interno del mezzo poroso.

### 3 DESCRIZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI

Le prove sono state eseguite nel Laboratorio di Idraulica dell'Università Politecnica delle Marche (Ancona), nella canaletta per moto ondoso e modelli sperimentali marittimi. L'impianto è costituito dal canale a sezione trasversale rettangolare, attrezzato con un'apparecchiatura per la generazione del moto ondoso. Le caratteristiche dimensionali interne della struttura fissa sono: lunghezza 50m, larghezza 1m, altezza dal fondo 1.3m. Le pareti laterali della canaletta sono vetrate nei 36m centrali, ciò permette di osservare e di filmare il comportamento delle onde nei tratti attrezzati per la sperimentazione.

Nella Figura 1 è riportata la sezione del canale con la posizione del modello. Per ottenere misurazioni prive dei disturbi della componente di onda riflessa generata dal materasso assorbente posto nella parte terminale della canaletta, i modelli sono stati posti ad una distanza di circa 23m da quest'ultimo. Si noti che le condizioni di regime vengono raggiunte dopo il periodo transitorio di crescita dell'altezza dell'onda generata. Tale soluzione garantisce misure indisturbate per la durata di 15-20s. Si è anche adottata una distanza minima (oltre 15m) del modello dalla pala battente pari ad almeno due lunghezze d'onda, adeguata ad una idonea regolarizzazione delle onde generate.

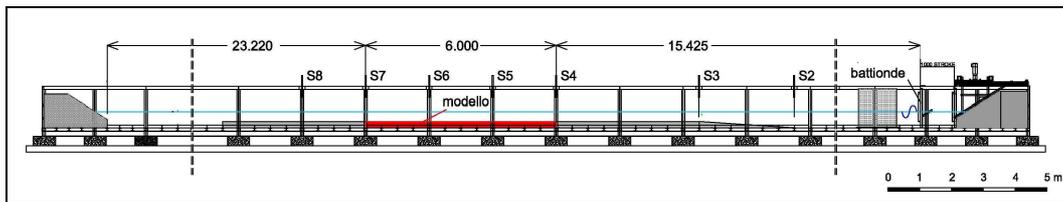


Figura 1: Canale per onde con modello.

Nella Figura 2 sono inoltre evidenziati i particolari delle tre configurazioni di fondo liscio, di fondo scabro, ottenuto con una fila di sfere di plastica riempite di sabbia del diametro di 3.6cm, ed infine di strato poroso, realizzato da sei strati delle suddette sfere per uno spessore complessivo  $d$  di 18.2cm ed una porosità  $n$  pari a 0.29. La lunghezza del fondo scabro e del fondo permeabile è di 6m, la profondità dell'acqua  $h$  utilizzata è di 30cm sopra il modello e di 51cm nella zona di generazione. Per posizionare il modello è stata realizzata una pedana in legno ricoperta da lastre di acciaio con rampa di raccordo di pendenza 1:15.



Figura 2: Configurazione di fondo impermeabile liscio (sinistra), impermeabile scabro (centro) e permeabile (destra).

Gli strumenti di misura utilizzati sono stati: n.8 sonde elettroresistive di livello (di cui quattro sopra il modello), n.2 velocimetri del tipo A.D.V. (Acoustic Doppler Velocimeter) tridimensionali. Le misure di velocità sono state incrementate con l'uso del Laser Doppler Anemometer (L.D.A.) e con il software YATS, che implementa una tecnica di F.T.-P.T.V. descritta in Miozzi [2], posizionati nella zona dello strato limite di fondo, allo scopo di caratterizzare lo sviluppo dell'energia cinetica turbolenta in assenza di frangimento. Per le misure delle pressioni sono stati utilizzati 5 trasduttori di pressione piezoresistivi collocati all'interno del mezzo poroso (denominati "P1", "P2", "P3", "P4" e "P5") e 2 all'interfaccia (denominati "P6" e "P7"). Nella Figura 3 sono riportate le posizioni di sei dei 7 pressurimetri e di due delle 8 sonde di livello utilizzate.

Le quattro sonde che misurano il livello sopra il modello (denominate "S4", "S5", "S6" e "S7") sono poste ad una distanza reciproca di 2m. In particolare S4 è posta in corrispondenza della sezione a monte del modello, S7 è invece posta in corrispondenza della sezione a valle del modello. I trasduttori di pressione P1, P2, P3 e P6 sono disposti sulla stessa verticale a profondità diverse: P1 è collocato sopra al primo strato di palline ad una profondità di 44.6cm, P2 è posto al centro del mezzo poroso (sopra il terzo strato di sfere) ad una profondità di 39.1cm, P3 è posizionato sopra il quinto strato di palline e, quindi, ad una profondità di 33.6cm e, infine, P6 è posto all'interfaccia tra il mezzo poroso e la regione fluida libera sovrastante e quindi ad una profondità pari a 30cm. Inoltre P4 e P5 sono ad una profondità di 39.1cm dal livello di quiete del pelo libero e si trovano rispettivamente in corrispondenza delle sonde di livello S5 e S6. La

distanza tra P2 e P4 è di 0.8m, mentre tra il P2 e P5 è di 1.2m. Infine P7 è collocato appena a monte del modello ad una profondità di 30cm, in corrispondenza della sonda S4.

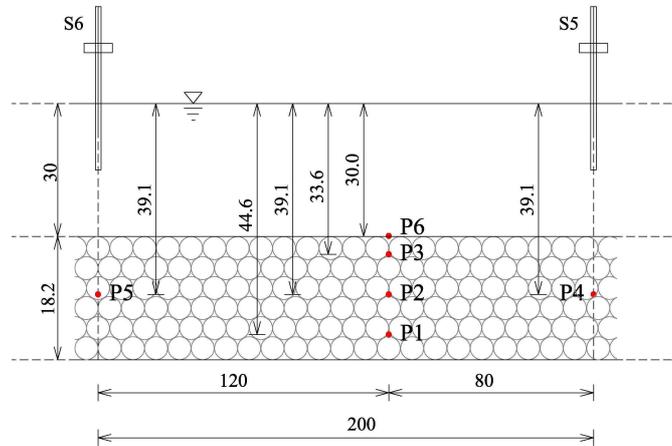


Figura 3: Schema della disposizione dei trasduttori di pressione (le misure sono in cm).

La Tabella 1 mostra le caratteristiche nella zona di generazione delle onde regolari riprodotte (altezza d'onda  $H$  e periodo  $T$ ).

ONDE REGOLARI									
Onda	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$H$ (cm)	3.58	3.58	5.00	10.00	10.00	10.00	15.00	15.00	20.00
$T$ (s)	1.00	1.50	1.50	1.50	2.00	2.50	2.00	2.50	2.50

Tabella 1: Caratteristiche delle onde regolari alla generazione.

#### 4 RISULTATI

Dall'elaborazione dei dati sperimentali di onde non frangenti è stata riscontrata una dissipazione dell'altezza d'onda del 20-30% [3], confrontabile con quella ottenuta tramite l'utilizzo di opere di difesa tradizionali a scogliera, a parità di volume delle strutture, con benefici sulla circolazione idrodinamica sottocosta [4]. Tale attenuazione è stata osservata anche per il flusso sopra il fondo permeabile, la riduzione tra inizio e fine modello delle componenti di velocità è risultata pari a circa il 40%. Ne consegue che nella propagazione di onde su fondo permeabile, anche in assenza di frangimento, si osserva una significativa dissipazione dell'energia totale, pari a circa il 50% [5].

In questa memoria sono presentati alcuni dei risultati sull'elaborazione dei dati di pressione e delle velocità nel mezzo poroso. Si riportano i dati relativi a due tipi di onde, caratterizzate da un diverso parametro di Ursell  $U_R$  ( $U_R=HL^2/h^3$ ): l'onda C ( $U_R=8.74$ ) ben riconducibile ad un'onda lineare e l'onda G ( $U_R=63.03$ ) nonlineare.

E' stato verificato che i dati misurati della superficie libera dell'onda C si approssimano bene con quelli della teoria lineare mentre quelli dell'onda G seguono in modo soddisfacente la teoria di Stokes al 2°ordine, per cui i dati sperimentali della pressione sono stati confrontati con i valori

teorici ricavati sia dall'applicazione della teoria lineare che di quella di Stokes al 2° ordine.

La pressione dinamica ( $P_d$ ) si ottiene dalla differenza della pressione totale ( $P$ ) e quella idrostatica ( $-\gamma z$ ), dove  $\gamma$  è il peso specifico dell'acqua e  $z$  è l'asse verticale che ha come origine il livello di quiete dell'acqua e valori positivi verso l'alto. La componente del 2° ordine della fluttuazione del carico di pressione, data dal rapporto tra  $P_d$  e  $\gamma$ , si ottiene mediante la seguente espressione, dove per  $P_d''$  si intende la componente dinamica della pressione al 2° ordine,  $\Phi'$  la funzione potenziale al 1° ordine e  $\Phi''$  la funzione potenziale al 2° ordine [6]:

$$\frac{P_d''}{\gamma} = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi''}{\partial t} - \frac{1}{2g} \left[ \left( \frac{\partial \Phi'}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi'}{\partial z} \right)^2 \right], \quad (2)$$

la quale può essere scritta nella forma:

$$\frac{P_d''}{\gamma} = \frac{P_{d1}''}{\gamma} + \frac{P_{d2}''}{\gamma}, \quad (3)$$

con

$$P_{d1}'' = \frac{\gamma}{16} H^2 \frac{\sigma^2}{g} \left\{ \frac{3}{\sinh^4(kh)} \cosh[2k(h+z)] \cos[2(kx - \sigma t)] + \frac{1}{\sinh^2(kh)} \right\} \quad (4)$$

$$P_{d2}'' = -\frac{\gamma}{4} H^2 \frac{\sigma^2}{g} \frac{1}{\tanh(kh) \sinh(2kh)} \cdot \left\{ \cosh^2[k(h+z)] \cos^2[(kx - \sigma t)] + \sinh^2[k(h+z)] \sin^2[(kx - \sigma t)] \right\} \quad (5)$$

Le espressioni teoriche della pressione si basano sull'ipotesi di propagazione su un fondo impermeabile. Per poter effettuare un confronto con i valori sperimentali è stato necessario adattare le relazioni teoriche alla situazione di fondo permeabile, tenendo conto che la lunghezza d'onda si modifica (aumenta) per effetto del fondo permeabile [7].

I dati di pressione sono stati elaborati eseguendo una media dei valori misurati relativi a determinate fasi dell'onda di pressione definite come segue:  $\varphi=0^\circ$  (fase corrispondente alla cresta dell'onda);  $\varphi=90^\circ-270^\circ$  (fasi corrispondenti rispettivamente al down-crossing ed all'up-crossing, con "down-crossing" ed "up-crossing" si intendono i punti di nullo del segnale di pressione  $P(t)$  rispettivamente a derivata negativa e positiva);  $\varphi=180^\circ$  fase corrispondente al cavo dell'onda e  $\varphi=45^\circ-135^\circ-225^\circ-315^\circ$  fasi intermedie.

Sono state ricostruite le distribuzioni verticali di pressione dai dati teorici e da quelli sperimentali, rilevati dai 4 trasduttori di pressione posti lungo la stessa verticale (P1, P2, P3 e P6). Vengono riportati gli andamenti delle pressioni verticali (teorici e sperimentali) per le 2 onde prese in esame (onda C ed onda G) in corrispondenza della fase di cresta ( $\varphi=0^\circ$ ) e del cavo ( $\varphi=180^\circ$ ) dell'onda di pressione.

Dall'elaborazione dei dati di pressione è stato ricavato che l'onda di pressione che si instaura all'interno del mezzo poroso è, con buona approssimazione, in fase con l'onda di superficie [5], per cui la fase di cresta dell'onda di pressione ( $\varphi=0^\circ$ ) equivale alla cresta dell'onda di superficie,

allo stesso modo la fase di cavo dell'onda di pressione ( $\varphi=180^\circ$ ) equivale al cavo dell'onda di superficie.

Nella Figura 4 vengono riportate le distribuzioni verticali di pressione relative alla cresta ed al cavo dell'onda per l'onda C con  $U_R=8.74$  e, quindi, assimilabile ad un'onda lineare. I dati di pressione teorici sono stati ricavati applicando la teoria lineare, tenendo conto della lunghezza d'onda modificata per la presenza del fondo permeabile.

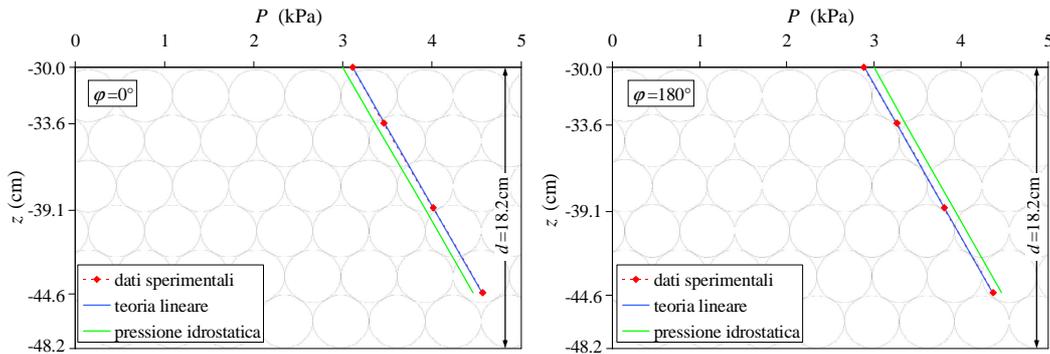


Figura 4: Distribuzione verticale di velocità relativa alla cresta dell'onda,  $\varphi=0^\circ$  (pannello di sinistra) ed al cavo dell'onda,  $\varphi=180^\circ$  (pannello di destra) dell'onda C. Confronto tra i dati sperimentali (rosso) e teorici (blu). La curva in verde indica la pressione idrostatica.

Si osserva come i dati sperimentali seguano l'andamento della pressione teorica sia per la cresta che per il cavo dell'onda.

Nella Figura 5 vengono riportate le distribuzioni verticali delle pressione relative alla cresta dell'onda ( $\varphi=0^\circ$ ) ed al cavo dell'onda ( $\varphi=180^\circ$ ) per l'onda G con  $U_R=63.03$  e, quindi, nonlineare. I dati di pressione teorici sono stati ricavati applicando la teoria lineare e la teoria di Stokes al 2° ordine.

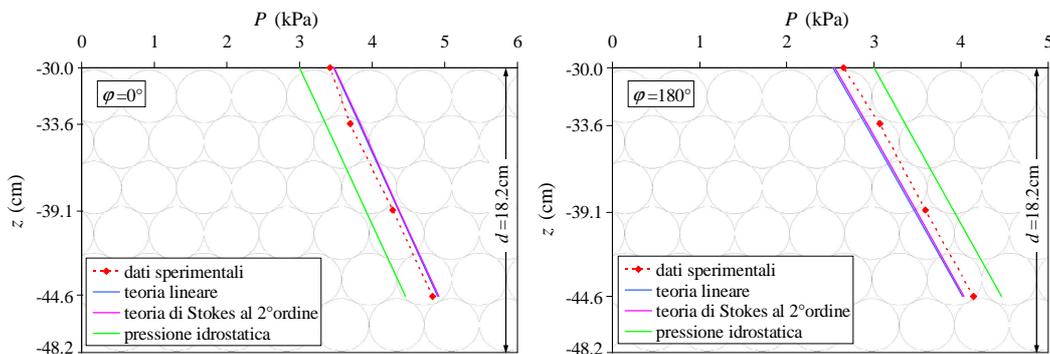


Figura 5: Distribuzione verticale di velocità relativa alla cresta dell'onda,  $\varphi=0^\circ$  (pannello di sinistra) ed al cavo dell'onda,  $\varphi=180^\circ$  (pannello di destra) dell'onda G. Confronto tra i dati sperimentali (rosso) e quelli della teoria lineare (blu) e della teoria di Stokes al 2° ordine (magenta). La curva in verde indica la pressione idrostatica.

Dall'applicazione della teoria al 2° ordine si è ricavato che la componente dinamica della

pressione offre un contributo sempre positivo sia alla cresta che al cavo dell'onda. Il rapporto tra  $h/L$  delle onde in esame comporta che il contributo  $P_{d1}$  sia prevalente su  $P_{d2}$ , pertanto l'effetto risultante si manifesta con un aumento della cresta dell'onda di pressione ed una riduzione del cavo.

E' stato osservato che l'applicazione della teoria di Stokes al 2° ordine comporta un miglioramento nella previsione della pressione nella fase "cavo" dell'onda, ma un peggioramento nella previsione della pressione nella fase "cresta" rispetto alla teoria lineare. In sintesi, dall'analisi dei risultati ottenuti si è dedotto che è possibile prevedere con buona approssimazione il campo di pressione all'interno del mezzo poroso per le sole onde caratterizzate da un moderato valore del parametro di Ursell, così da poter calcolare le pressioni con la teoria lineare, mentre l'applicazione di teorie di ordine superiore ad onde nonlineari non comporta, nel complesso, miglioramenti nella previsione delle pressioni interstiziali. Tali risultati sono in accordo con quelli ricavati da Chang et al. [8]: per onde di piccola intensità le pressioni misurate e quelle teoriche sono quasi coincidenti, come l'onda diventa più intensa, si osserva che la pressione teorica sovrastima quella misurata, soprattutto per la fase "cresta" dell'onda.

Le misure di pressione sono state inoltre utilizzate per ricavare il campo di velocità nello strato permeabile, applicando le teorie valide per lo studio di un flusso all'interno di un mezzo poroso. In condizioni di moto turbolento e non stazionario si utilizza, solitamente, l'equazione estesa di Forchheimer, in cui compare il termine aggiuntivo inerziale:

$$-\frac{\nabla P_d}{\rho g} = a\bar{q} + b\bar{q}|\bar{q}| + c\frac{\partial \bar{q}}{\partial t}, \quad (6)$$

dove  $\bar{q}$  è il vettore della velocità media nel mezzo poroso, i coefficienti  $a$  (s/m),  $b$  (s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) e  $c$  (s<sup>2</sup>/m) sono dimensionali e determinabili con formule empiriche e semi-empiriche derivanti da misurazioni sperimentali [9, 10, 11]. Scrivendo l'equazione di Forchheimer nella direzione  $x$  (principale direzione di propagazione del moto) e  $z$  si ottiene:

$$-\frac{1}{\gamma}\left(\frac{\partial P_d}{\partial x}\right) = au_s + bu_s|u_s| + c\frac{\partial u_s}{\partial t}; \quad -\frac{1}{\gamma}\left(\frac{\partial P_d}{\partial z}\right) = aw_s + bw_s|w_s| + c\frac{\partial w_s}{\partial t}, \quad (7)$$

dove  $u_s$  e  $w_s$  sono rispettivamente le componenti medie di velocità orizzontale e verticale nel mezzo poroso in direzione  $x$  e  $z$ . Ipotizzando che il mezzo poroso sia isotropo, i coefficienti di resistenza  $a$ ,  $b$ ,  $c$  possono essere posti uguali nelle due direzioni  $x$  e  $z$  ( $a=0.38$ s/m,  $b=222.66$ s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> e  $c=0.70$ s<sup>2</sup>/m).

Le Figure 6 e 7 mostrano gli andamenti nel tempo di  $u_s$  e  $w_s$  per quattro diverse profondità all'interno del mezzo poroso ( $t/T=0$  e  $t/T=0.5$  corrispondono, rispettivamente, alle fasi  $\varphi=0^\circ$  e  $\varphi=180^\circ$ ). Si fa notare che  $z=-h$  corrisponde all'interfaccia tra la regione fluida libera e lo strato permeabile, mentre  $z=-(h+d)$  corrisponde al fondo del mezzo poroso.

Si nota come la componente orizzontale  $u_s$  mantenga un'intensità pressoché costante con la profondità all'interno del mezzo poroso, contrariamente a quanto accade per la componente verticale della velocità  $w_s$ . I valori di  $w_s$  sono confrontabili con quelli di  $u_s$  in prossimità dell'interfaccia, mentre verso il fondo del mezzo poroso la componente orizzontale è predominante. Da questo risultato si deduce che il flusso è essenzialmente bidimensionale nella parte superiore del mezzo poroso [ $z < -(h+0.25d)$ ], dove l'effetto dell'onda di superficie genera un flusso verticale di interscambio tra le due regioni fluide, che influisce maggiormente sull'intensità

della componente verticale di velocità. Si osserva inoltre che l'andamento di  $w_s$  nel tempo non è costante al variare della profondità nel mezzo poroso, contrariamente a quanto avviene per  $u_s$ . La velocità verticale è sfasata di  $\Pi$  rispetto all'onda di superficie per  $z < -(h+0.25d)$ , per profondità maggiori, invece, si osserva che lo sfasamento diminuisce ed è circa pari a  $\Pi/4$ .

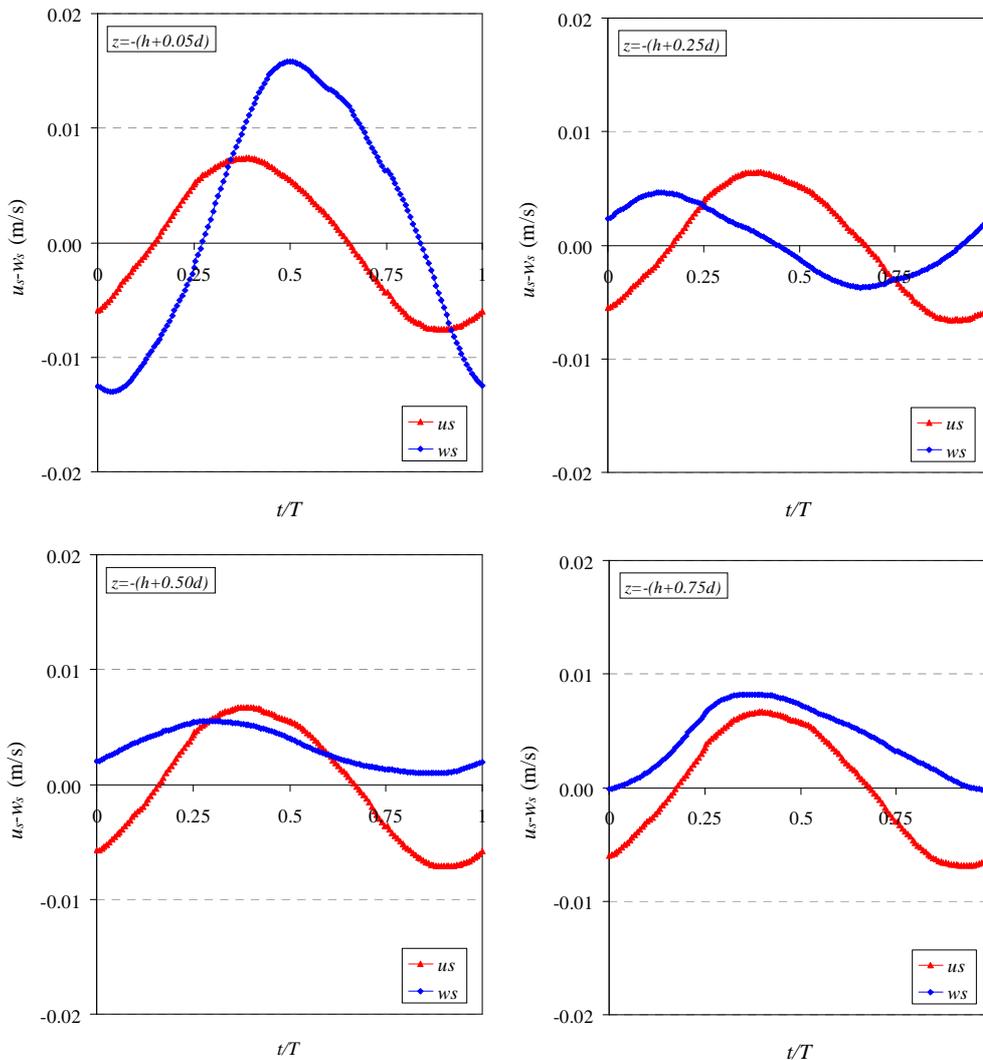


Figura 6: Confronto tra la componente orizzontale  $u_s$  (rosso) e verticale  $w_s$  (blu) di velocità nel mezzo poroso, a profondità  $z = -(h+0.05d)$ ,  $z = -(h+0.25d)$ ,  $z = -(h+0.50d)$  e  $z = -(h+0.75d)$ . Onda C.

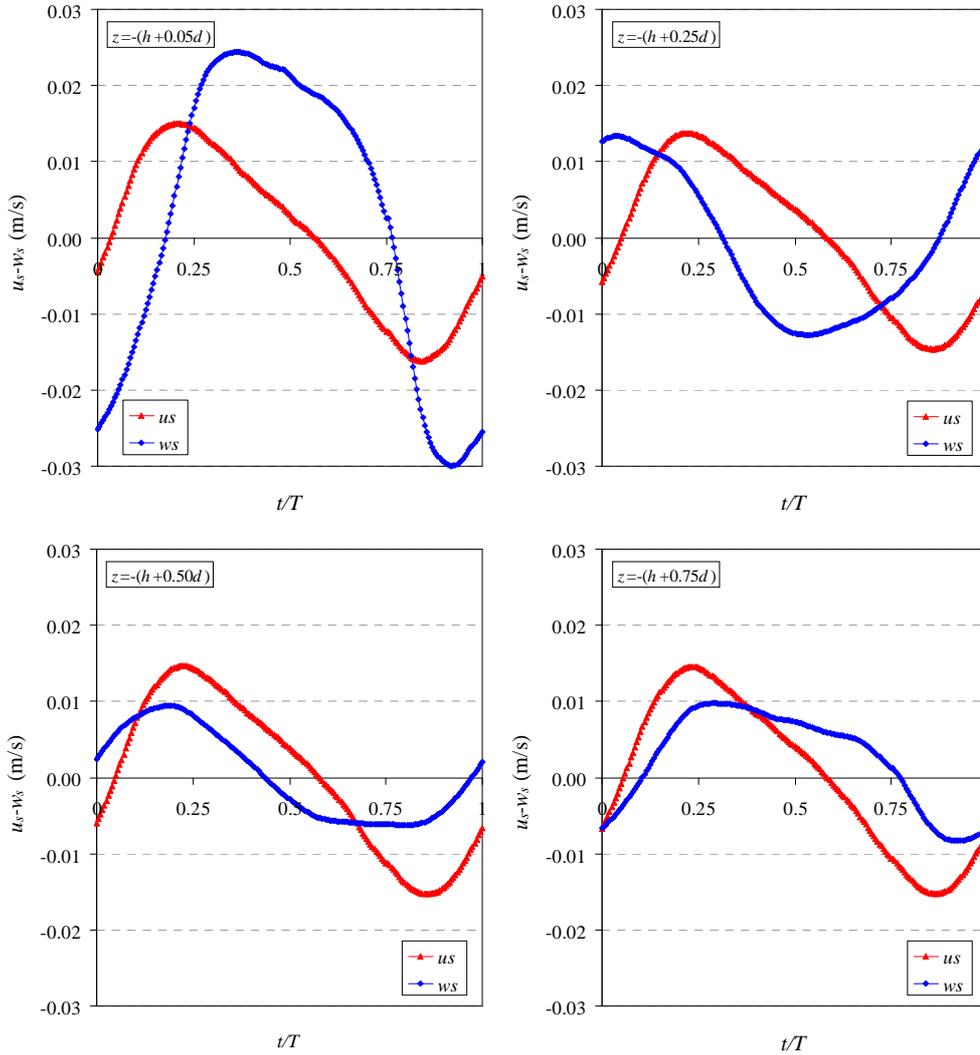


Figura 7: Confronto tra la componente orizzontale  $u_s$  (rosso) e verticale  $w_s$  (blu) di velocità nel mezzo poroso, a profondità  $z=-(h+0.05d)$ ,  $z=-(h+0.25d)$ ,  $z=-(h+0.50d)$  e  $z=-(h+0.75d)$ . Onda G.

## 5 CONCLUSIONI

L'andamento delle pressioni misurate all'interno del mezzo poroso dipende dal parametro di Ursell, e, quindi, dal grado di linearità delle onde presenti; all'aumentare della non linearità dell'onda, si osserva che la pressione teorica, seppure calcolata applicando teorie di grado superiore, sovrastima (in valore assoluto) quella misurata, soprattutto per la fase "cresta" dell'onda.

Per quanto riguarda le velocità si evidenzia che il flusso verticale è concentrato nella parte superiore dello strato poroso [ $z < -(h+0.25d)$ ]. In questa porzione del mezzo permeabile si osserva che le componenti verticali di velocità sono sfasate di  $\pi$  rispetto all'onda di superficie. Da questo

risultato si può dedurre che al passaggio della cresta dell'onda di superficie si genera un flusso entrante nel mezzo poroso (infiltrazione), il contrario avviene dopo il passaggio del cavo dell'onda. La zona superiore dello strato permeabile, in cui si ha lo scambio di flusso verticale tra le due regioni fluide, è soggetta ad un moto più intenso, e quindi, presumibilmente, è la zona in cui si verifica la dissipazione maggiore.

#### References

- [1] Seta, E., Corvaro, S., Brocchini, M. & Mancinelli, A., "Wave Flow on a Porous Medium. Part 2. The Nearbed Dynamics", *Journal of Fluid Mechanics*, (submitted), (2009).
- [2] Miozzi, M., "Particle Image Velocimetry using Feature Tracking and Delaunay tessellation", in *Proc. 12th Int. Symp. Applied Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon (2004).
- [3] Corvaro, S., Lorenzoni, C., Mancinelli, A., Postacchini, M. & Seta, E., "Prove sperimentali in canale per onde su fondo permeabile", *Atti del 31° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche* (2008).
- [4] Corvaro, S., Lorenzoni, C., Postacchini, M., Seta, E., Soldini, L., Brocchini, M. & Mancinelli, B., "Some experimental studies on the sea wave dissipation over different seabeds", *Atti del XIX Congresso dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata*, Ancona, Italy, (2009).
- [5] Corvaro, S., Seta, E., Mancinelli, A. & Brocchini, M., "Wave Flow on a Porous Medium. Part 1. The Internal Flow Dynamics". *Journal of Fluid Mechanics*, (submitted), (2009).
- [6] Boccotti, P. *Idraulica Marittima*. UTET. (1997).
- [7] Liu, P.L.-F & Darlymple, R.A., "The damping of gravity waves due to percolation", *Coastal Engineering*, 8, 33-49 (1984).
- [8] Chang, S.C., Lin, J.G., Chien, L.K. & Chiu, Y.F., "An experimental study on non-linear progressive wave-induced dynamic stresses in seabed", *Ocean Engineering*, 34, 2311-2329 (2007).
- [9] Bear, J., *Dynamics of fluids in Porous Media*, American Elsevier, New York (1972).
- [10] Van Gent, M.R.A., *Wave interaction with Permeable Coastal Structures*. Ph.D Thesis, Delft University (1995).
- [11] Burcharth, H.F. & Andersen, O.H., "On the one-dimensional steady and unsteady porous flow equations", *Coastal Engineering*, 24, 233-257 (1995).