

DISTORSIONE DELLA SUPERFICIE LIBERA GENERATA DA TURBOLENZA DI GRIGLIA

L. Chiapponi¹ & S.Longo¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura, Università degli Studi di Parma, Italia, e-mail: luca.chiapponi@unipr.it, sandro.longo@unipr.it.

SOMMARIO

In questo lavoro si analizzano i risultati sperimentali relativi alla misura del campo di moto in prossimità di un'interfaccia aria-acqua, distorta dalla turbolenza generata da una griglia oscillante in acqua. Il numero di Froude dell'interfaccia è variabile tra 0.05 e 0.35. Il dominio fluido è sempre connesso, senza inglobamento di bolle d'aria o formazione di gocce d'acqua. La velocità verticale del fluido e l'elevazione del pelo libero sono state misurate con un anemometro a film caldo e un distanziometro ad ultrasuoni. I risultati indicano l'esistenza di uno strato di superficie nel quale la velocità scala appare correlata al gradiente temporale dell'elevazione istantanea del pelo libero e la scala delle lunghezze è rappresentata da H_{rms} (H è l'altezza delle fluttuazioni del pelo libero). L'analisi dei dati ha permesso di stimare alcuni indicatori della turbolenza e lo sfasamento tra i due segnali. A bassi numeri di Froude le fluttuazioni turbolente sono in ritardo rispetto alle fluttuazioni della superficie libera, ad alti numeri di Froude sono, invece, in anticipo. Inoltre, esiste un regime di risonanza tra turbolenza e pelo libero in corrispondenza del quale le scale della turbolenza assumono valori molto più elevati.

1 INTRODUZIONE

Numerosi fenomeni di interfaccia dipendono in misura rilevante dalla struttura e dalla dinamica locale della turbolenza. Alcuni esempi sono rappresentati dallo scambio di gas e di calore negli oceani (su grande scala) e da alcune reazioni chimiche nei processi industriali e manifatturieri (su piccola scala). L'interfaccia rappresenta una frontiera del campo di moto ed impone alcune condizioni: la derivata materiale dell'interfaccia è nulla e la tensione tangenziale si annulla se il fluido sovrastante è un gas in quiete. Nel caso in cui i fluidi a contatto siano un liquido ed un gas, il grado di interrelazione tra la turbolenza e l'interfaccia dipende dall'intensità della turbolenza.

I gruppi adimensionali più rappresentativi del fenomeno sono il numero di Reynolds, il numero di Froude e il numero di Weber riferiti a scale geometriche e di velocità locali. Generalmente, per deformazioni della superficie a grande scala, la gravità bilancia le accelerazioni verticali nel fluido, mentre a scale più piccole la tensione superficiale gioca un ruolo più importante. A bassi numeri di Froude, l'interfaccia non è influenzata dalla turbolenza e impone solo una riduzione della componente normale di velocità, comportandosi come una parete rigida e piana, ma

senza la condizione di aderenza. Ad alti numeri di Froude l'interfaccia non è più piana ed interagisce anche energeticamente con il campo di moto. Lo scambio energetico è inizialmente limitato, ma diventa rilevante se l'interfaccia è localmente non connessa per la formazione di bolle d'aria o gocce d'acqua. Una descrizione dei possibili livelli di interazione tra superficie a pelo libero e turbolenza è riportata in *Brocchini & Peregrine* (2001). Gli scenari possibili sono numerosi e il trasferimento di energia può avvenire anche per generazione di onde capillari o di gravità o per la presenza di strutture coerenti. Ad esempio, la presenza di fenomeni di *bursting* favorisce gli scambi gassosi e termici all'interfaccia e il rinnovamento della superficie.

In letteratura si trovano numerose descrizioni degli effetti che un'interfaccia solida o la superficie libera hanno sulla turbolenza. L'interfaccia è spesso rappresentata come una parete liscia, indeformabile e sulla quale non agiscono sforzi. Questa descrizione ben rappresenta una superficie libera caratterizzata da numeri di Froude e di Weber molto piccoli. Con riferimento a tali condizioni, i principali casi esaminati per via sperimentale sono: (a) la turbolenza originata da una griglia che oscilla verticalmente (*Brumley & Jirka*, 1987), (b) il decadimento della turbolenza generata dal passaggio di una griglia trascinata (*Loewen et al.*, 1986) e (c) la turbolenza al fondo di un canale (*Kumar et al.*, 1998).

Raramente sono stati analizzati gli effetti che la turbolenza esercita a sua volta sul pelo libero. *Longo* (2008) ha analizzato i risultati sperimentali relativi alla misura del campo di moto in prossimità di un'interfaccia aria-acqua, con numero di Froude variabile tra 0.1 e 0.38 e interfaccia quasi piana (a bassi numeri di Froude) o al limite di areazione (numeri di Froude elevati). Il campo di moto è stato generato da uno stramazzo di Crump e le misure sono state realizzate con un profilometro Doppler a ultrasuoni (ADVP).

Per spiegare il modo in cui i vortici influenzano la forma della superficie, sono spesso chiamati in causa i vortici toroidali, sia in campo sperimentale che nella modellazione numerica. Quando un vortice toroidale si avvicina alla superficie libera, esso tende a rompersi in tubi di vortice più piccoli che terminano in prossimità dell'interfaccia (*vortex connection*). *Weigand* (1996) ha dimostrato che le massime componenti di velocità associate ai tubi di vortice coincidono con le posizioni in cui l'elevazione di superficie è minima.

Nel presente studio analizzeremo un campo di moto con turbolenza in grado di distorcere l'interfaccia, ma senza rendere sconnesso il dominio fluido, con eventuale inglobamento di bolle d'aria o formazione di gocce d'acqua. Il sistema rimane, dunque, monofasico e connesso. La turbolenza è generata da una griglia orizzontale oscillante in direzione verticale; le misure di velocità sono state eseguite con un anemometro a film caldo. Il campo di turbolenza così generato è omogeneo e isotropo nel piano orizzontale e quasi isotropo lungo la verticale (*Brumley & Jirka* (1987)).

2 DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE E DELLE MISURE

2.1 Installazione sperimentale

Gli esperimenti sono stati condotti in una vasca quadrata con spigolo interno di 0.57 m e altezza pari a 0.42 m (vedi Figura 1). Le pareti della vasca sono costituite da uno scatolare in pannelli in PVC, uniti tra loro mediante squadrette in acciaio

inossidabile. Lo scatolare è stato opportunamente contrastato per ridurre al minimo le vibrazioni ed evitare i conseguenti disturbi al campo di moto. Un traverso metallico sulla vasca supporta la griglia e il motore elettrico che ne permette il movimento. La griglia è costituita da una lamiera forata di acciaio inox dello spessore di 2 mm; i fori, quadrati e di 10 mm di lato, hanno una spaziatura asse-asse pari a 12 mm. Il rapporto area della superficie vuota su piena, pari a 0.31, è paragonabile a quello della griglia impiegata da *Brumley & Jirka* (1987), ma la dimensione della maglia è circa cinque volte inferiore. I valori del numero di Reynolds di griglia, definito come segue (*Thompson & Turner* (1975)):

$$\text{Re}_G = \frac{1/2 a f S^{1.5} M^{0.5}}{\nu} \quad (1)$$

sono dello stesso ordine di grandezza di quelli riportati in letteratura. ν è la viscosità cinematica del fluido, f è la frequenza di oscillazione della griglia, S è la corsa della griglia (il doppio dell'ampiezza di oscillazione), M è la dimensione della maglia quadrata, a è una costante circa pari a 0.1.

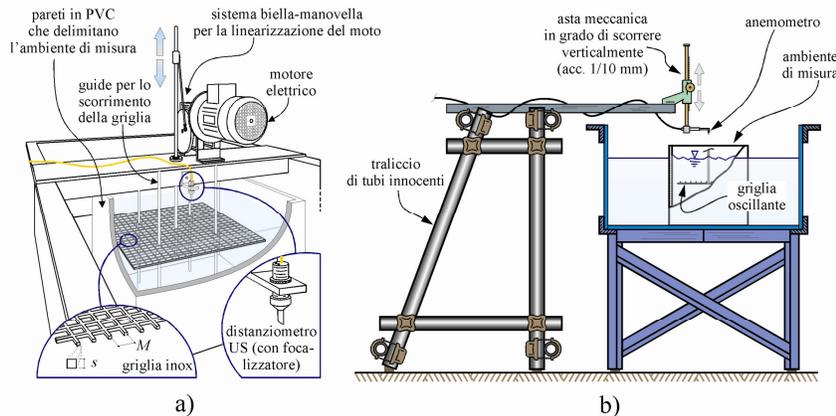


Figura 1. Schema dell'apparato sperimentale. A sinistra si osservano il dispositivo elettromeccanico per muovere la griglia, la geometria della griglia e il trasduttore di livello. A destra è rappresentato il supporto indipendente per le sonde anemometriche con il relativo sistema di movimentazione.

La griglia è vincolata ad una cornice di supporto in acciaio inossidabile, collegata ad un asse verticale che funge da biella del manovellismo azionato dal motore elettrico. Quattro steli metallici guidano lo scorrimento della griglia e del supporto, limitando la torsione e le oscillazioni trasversali. La cornice e l'asse sono accoppiati con un giunto in grado di trasmettere sforzi assiali di compressione e trazione, ma non coppie o sforzi di taglio, in modo da rendere ininfluenti piccoli errori di assemblaggio e/o allineamento. Le pareti dello scatolare in PVC sono state disposte in modo simmetrico rispetto alla griglia, al fine di minimizzare i fenomeni di ricircolo secondario.

Le regolazioni della velocità di rotazione del motore e del punto di vincolo tra il volano (manovella) e l'asse (biella) permettono alla griglia di muoversi con frequenze

comprese nell'intervallo tra 0.3 e 3.3 Hz e con corse picco-picco tra 30 e 150 mm. A fianco della vasca è stata realizzata una struttura indipendente allo scopo di sostenere l'anemometro a film caldo, per evitare che le vibrazioni del motore e della vasca si trasmettessero all'anemometro. Altri accorgimenti permettono di ridurre le possibili interferenze al campo di misura.

2.2 Misure dell'elevazione del pelo libero e di velocità del fluido

Le misure di velocità sono state eseguite con un anemometro a film caldo modello TSI 1231W. Il volume di misura è dell'ordine delle dimensioni dell'elemento sensibile, un cono di altezza di 0.5 mm e base di diametro 0.25 mm. L'asse del cono è allineato con la componente della velocità misurata, con guadagno solo nel verso orientato dal vertice alla base. La sonda può essere posizionata con incertezza al decimo di millimetro. Le misure sono possibili a partite da circa 1 mm al di sotto del pelo libero, con un'incertezza pari a ± 0.01 m/s, stimata sulla base della ripetibilità e della banda di confidenza delle numerose calibrazioni. La risposta in frequenza del sistema di misura delle velocità è di poco superiore a 5 kHz, filtrata da un dispositivo analogico prima dell'acquisizione per evitare aliasing.

L'elevazione del pelo libero è stata misurata tramite un trasduttore di distanza ad ultrasuoni avente un'incertezza pari a ± 0.2 mm. Il campo sonico generato è conico divergente, per cui l'estensione della superficie di misura varia a seconda della distanza tra trasduttore e target. Per ovviare a questo inconveniente è stato usato un focalizzatore in grado di ridurre sensibilmente l'impronta del fascio ultrasonico sul fluido. Il tempo di risposta dello strumento può essere selezionato tra 10 e 320 ms (cioè, frequenza di acquisizione fino a 100 Hz), mentre il *range* di funzionamento è compreso tra 50 e 250 mm (distanza tra sonda e *target*).

3 PROTOCOLLO E PROGRAMMAZIONE DEI TEST

Le condizioni di prova possono essere modificate agendo principalmente sui seguenti parametri: (1) frequenza di oscillazione della griglia (0.3 ÷ 3.3 Hz); (2) corsa della griglia (30 ÷ 150 mm); (3) affondamento medio della griglia R (50 ÷ 150 mm). In Figura 2 si riporta lo schema al quale far riferimento per la descrizione delle differenti condizioni di prova. I profili di velocità sono stati acquisiti per punti, partendo dalla superficie libera e spostandosi verso la griglia (Figura 3).

I punti di misura nello strato di superficie, di maggiore interesse nell'analisi condotta, hanno una spaziatura ridotta, pari a circa 1 mm, i punti con maggiore affondamento sono più spazati (spaziatura tra 2 e 10 mm). La durata minima di ciascuna acquisizione è stata pari a 150 s (300 s max.), mentre la frequenza di acquisizione dei segnali di livello e di velocità era di 10 kHz, con filtro analogico passa basso a 5 kHz. In Tabella 1 sono riportate le caratteristiche principali di tutti i test eseguiti.

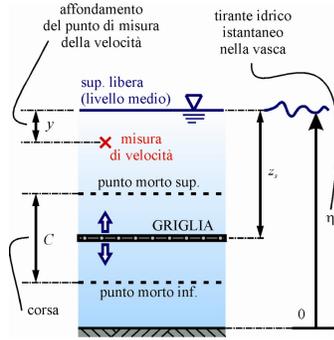


Figura 2. Schema di riferimento.

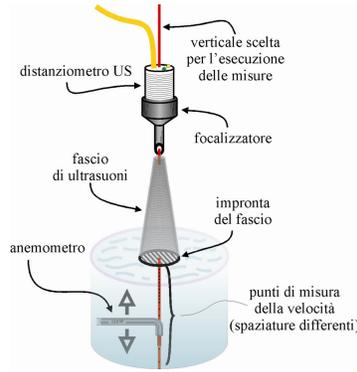


Figura 3. Strumenti utilizzati e collocazione nell'ambiente di misura.

Test (#)	f (Hz)	C (mm)	z_s (mm)	Re_G (-)	Punti No
1a	3.3	60	100	242	21
1b	1.8	60	125	132	21
1c	3.3	60	125	242	25
2a	3.3	90	115	446	22
2b	1.8	90	140	243	21
2c	3.3	90	140	446	16
3a	3.3	120	130	686	23
3b	1.8	120	155	374	23
3c	3.3	120	155	686	21

Tabella 1. Test eseguiti nel corso della sperimentazione. Sono riportati la sigla identificativa del test, i relativi parametri caratteristici e il numero dei punti che costituiscono il profilo.

4 REPORT DEI DATI

L'ipotesi che turbolenza locale e interfaccia siano strettamente correlate, suggerisce la scelta di H_{rms} quale scala delle lunghezze e di $u_s = \sqrt{(dz/dt)^2}$ quale scala delle velocità nello strato di superficie. Nel calcolo della scala delle velocità, la derivata materiale del pelo libero è approssimata dall'inerzia locale, $dz/dt \approx \partial z / \partial t$. H_{rms} e u_s sono rappresentative rispettivamente dell'ampiezza e della frequenza di oscillazione dell'interfaccia. I dati di elevazione della superficie sono stati elaborati statisticamente nel dominio del tempo con un'analisi di *zero mean value (up-)crossing* per estrarre gli altri stimatori, quali $H_{1/3}$, $H_{1/10}$ e $H_{1/20}$, inclusi i corrispondenti periodi.

Sulla base delle due scale, definiamo i seguenti gruppi adimensionali:

$$Fr_s = \frac{u_s}{\sqrt{gH_{rms}}}, \quad Re_s = \frac{u_s H_{rms}}{\nu} \quad (2)$$

Il numero di Froude è rappresentativo del rapporto tra energia cinetica e gravitazionale associata alle fluttuazioni dell'interfaccia; il numero di Reynolds caratterizza il campo di moto turbolento nello strato limite di superficie. Il pedice s indica che le scale introdotte si riferiscono allo strato di superficie. In Tabella 2 si riportano alcuni stimatori statistici e il valore dei gruppi adimensionali per tutti i test eseguiti.

Test (#)	H_{rms} (mm)	T_{mean} (s)	$H_{1/3}$ (mm)	$H_{1/10}$ (mm)	$H_{1/20}$ (mm)	H_{max} (mm)	u_s (mm/s)	Onde (No)	Re_s (-)	Fr_s (-)
1a	1.2	0.30	1.7	2.0	2.2	2.6	9.8	496	12	0.090
1b	1.9	0.55	2.0	2.1	2.1	2.2	8.0	272	15	0.058
1c	1.1	0.31	1.5	1.8	1.9	2.3	8.7	575	9	0.083
2a	3.8	0.25	5.3	8.3	10.4	17.5	38.9	581	147	0.203
2b	3.4	0.53	3.6	3.7	3.8	3.9	14.2	280	44	0.077
2c	1.6	0.33	2.2	2.8	3.1	4.6	15.2	543	25	0.121
3a	2.2	0.28	3.0	3.7	4.0	5.4	20.2	520	50	0.139
3b	5.0	0.53	5.5	6.0	6.2	7.7	22.1	281	110	0.099
3c	5.5	0.22	6.9	14.5	19.6	30.6	66.6	819	367	0.287

Tabella 2. Statistica delle elevazioni di superficie e gruppi adimensionali definiti con riferimento alle nuove grandezze scala. Per ciascun test sono riportati i valori medi.

5 ANALISI DEI RISULTATI

5.1 Distribuzione spettrale

Per ciascuna acquisizione è stata calcolata la densità spettrale di potenza della velocità verticale (w' è la fluttuazione). Un esempio rappresentativo degli spettri ottenuti è riportato nel grafico in scala bi-logaritmica di Figura 4. Nel grafico sono evidenziate alcune frequenze particolari: con la lettera G è indicata la frequenza di oscillazione della griglia (quindi, della forzante del sistema); la lettera R individua la frequenza di rete (50 Hz) mentre K indica la frequenza di taglio di Kolmogorov. Sono presenti alcuni picchi, indicati dalla lettera V, che presumibilmente sono associati a residue vibrazioni meccaniche trasmesse allo strumento di misura. Nella turbolenza tridimensionale una pendenza dello spettro pari a $-5/3$ è rappresentativa del regime inerziale. Nei test eseguiti la pendenza è circa -3 . Ciò è da attribuire al fatto che in prossimità della superficie libera il campo di moto si sviluppa prevalentemente in direzione verticale (a causa della fluttuazione del pelo libero) e il flusso tende ad essere bidimensionale. Per la turbolenza bidimensionale nel regime inerziale lo spettro è proporzionale a f^{-3} (Batchelor, 1969). Brumley & Jirka (1987) hanno usato una sonda a film caldo (in movimento lungo una traiettoria circolare) per misurare la turbolenza di griglia al di sotto del pelo libero. Lo spettro è ricavato nel dominio del numero d'onda ed ha pendenza pari a $-5/3$ nella regione lontana dal pelo libero, -3 e -2 in prossimità del

pelo libero (-2 alle basse frequenze). Tali risultati non sono direttamente confrontabili con quelli dei test eseguiti, ma confermano i trend in prossimità dell'interfaccia.

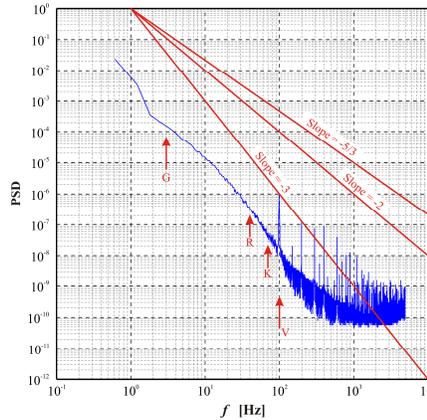


Figura 4. Densità spettrale di potenza della componente verticale di velocità. Test 1a.

5.2 Profili di velocità e numero di Froude della superficie libera

In Figura 5 sono rappresentati i profili delle fluttuazioni di velocità (sola componente verticale, w') per tutti i test eseguiti. In ordinata è riportata la distanza del punto di misura rispetto all'origine virtuale della griglia, (z_s-y) . Con tale sistema di coordinate la posizione del pelo libero varia per ogni test in funzione della corsa C e di z_s . Per bassi livelli di agitazione del pelo libero o in assenza di oscillazioni dello stesso, l'interfaccia smorza le fluttuazioni di velocità, che tendono ad annullarsi all'interno di uno strato limite di superficie. Per livelli di agitazione elevati lo strato limite di superficie, con scale controllate dalla viscosità, non è presente o, quanto meno, non è rilevabile con le tecniche di misura adottate. Le fluttuazioni di velocità, dalla griglia verso il pelo libero hanno un andamento monotono, ma in prossimità della superficie cambiano comportamento in funzione di Fr_s . Nella Figura 6 sono rappresentati i valori adimensionali di w' rispetto ai corrispondenti valori di Fr_s .

Per numero di Froude pari a 0.12, le fluttuazioni di velocità sono particolarmente esaltate, facendo ipotizzare un fenomeno di risonanza. Si osservi, nel merito, che i test relativi a $Fr_s < 0.12$ rivelano un trend monotono crescente per la fluttuazione di velocità verticale verso il pelo libero, mentre i test per $Fr_s > 0.12$ rivelano fluttuazioni decrescenti a partire da un livello intermedio verso il pelo libero.

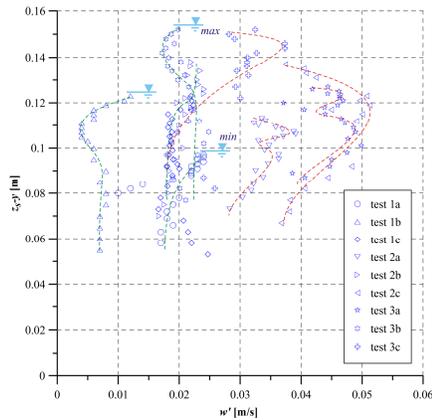


Figura 5. Profili della componente fluttuante della velocità verticale.

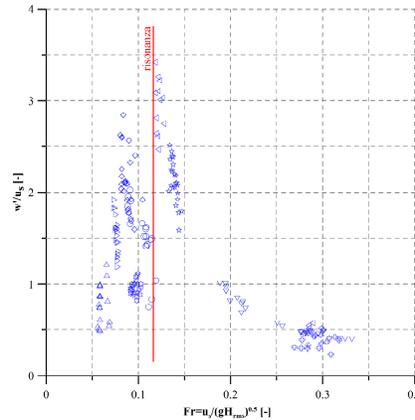


Figura 6. Relazione tra fluttuazioni turbolente (adimensionali) e Fr_s .

5.3 Correlazione tra la superficie libera e le fluttuazioni di velocità

Nelle Figure 7 e 8 si riportano due parametri statistici rappresentativi della correlazione tra l'elevazione di superficie e le fluttuazioni di velocità. In generale la coerenza tra due variabili a e b è definita come segue:

$$c = \frac{P_{ab}^2}{P_{aa} P_{bb}} \quad (5)$$

dove P_{ab} è la densità di potenza cross-spettrale, mentre P_{aa} e P_{bb} sono le densità di potenza auto-spettrali. Nei diagrammi della Figura 7 sono riportate le mappe di coerenza con la fluttuazione verticale w' per tutti i test eseguiti; nei diagrammi della Figura 8 si riportano le mappe dello sfasamento. Valori positivi dello sfasamento indicano che il pelo libero è in ritardo rispetto alle fluttuazioni di velocità.

La coerenza tra pelo libero e w' assume valori molto variabili da un test all'altro, con un massimo compreso tra 0.1 e 0.8 in prossimità della frequenza di oscillazione della griglia. Talvolta, si individuano due massimi, con il secondo picco in corrispondenza del doppio della frequenza di griglia. Nella maggior parte delle prove, ciò si manifesta all'interno di uno strato di fluido superficiale, il cui spessore è dell'ordine di $10 \div 15 H_{rms}$. Per elevati valori di Fr_s (test 2a, 3a, 3b e 3c) a cui corrispondono anche elevati valori di H_{rms} , lo sfasamento temporale è positivo, cioè le fluttuazioni di velocità precedono le fluttuazioni del pelo libero. Viceversa, lo sfasamento è negativo per tutte le prove caratterizzate da bassi valori del numero di Froude della superficie.

Osservando la Figura 6, si evince che lo sfasamento negativo è per i test con $Fr_s < 0.12$, mentre i test con $Fr_s > 0.12$ presentano tutti uno sfasamento positivo. Quanto detto vale nel dominio ove si registrano i valori massimi di coerenza. Una possibile spiegazione suggerisce che le fluttuazioni di livello agiscano da forzanti delle fluttuazioni di velocità fino ad un determinato valore del rapporto tra l'energia cinetica e

l'energia potenziale del pelo libero. Oltrepastata tale soglia, i ruoli si invertono ed è netto il trasferimento di energia dalle strutture turbolente verso il pelo libero.

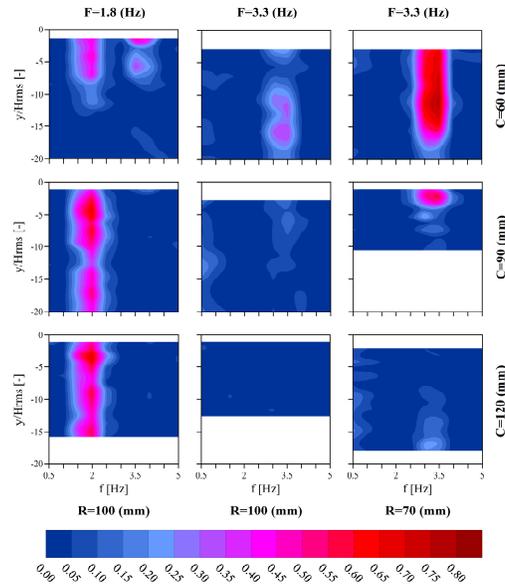


Figura 6. Mappe di coerenza. R è il ricoprimento, C è la corsa.

6 CONCLUSIONI

A distanze dalla griglia superiori a $z_s/2$ (metà della distanza tra l'origine virtuale della griglia e la superficie libera), le scale più idonee per descrivere il campo di moto sono H_{rms} per le lunghezze e u_s per le velocità. Le scale sono legate tra loro da una relazione lineare che risente debolmente della frequenza di oscillazione della griglia. È presente un regime di risonanza delle fluttuazioni turbolente in corrispondenza di $Fr_s = 0.12$. Rispetto a tale valore del numero di Froude, si osservano comportamenti differenti dei profili di w' , fluttuazione della componente verticale di velocità. A piccoli valori di Fr_s corrisponde un aumento di w' verso la superficie libera, mentre per valori più grandi di Froude il trend è invertito. Esiste uno strato superficiale (di spessore pari a circa $10-15 H_{rms}$) all'interno del quale è presente un'elevata coerenza tra fluttuazioni turbolente e fluttuazioni del pelo libero. Ciò accade per frequenze prossime a quella della forzante. Nello stesso strato, il pelo libero è sfasato in ritardo o in anticipo rispetto alla turbolenza, sulla base del valore del numero di Froude. Per piccoli valori di Fr_s , quando l'energia potenziale del pelo libero ha un peso relativo maggiore rispetto all'energia cinetica dello stesso, è plausibile che buona parte della turbolenza sia generata dalle fluttuazioni del pelo libero. Viceversa, per valori maggiori di Fr_s , è la turbolenza che torna ad eccitare la superficie libera del fluido. Il meccanismo di generazione delle onde ad opera della turbolenza potrebbe essere quello analizzato da *Teixeira & Belcher* (2006), con una forzante rappresentata dalle fluttuazioni di

pressione.

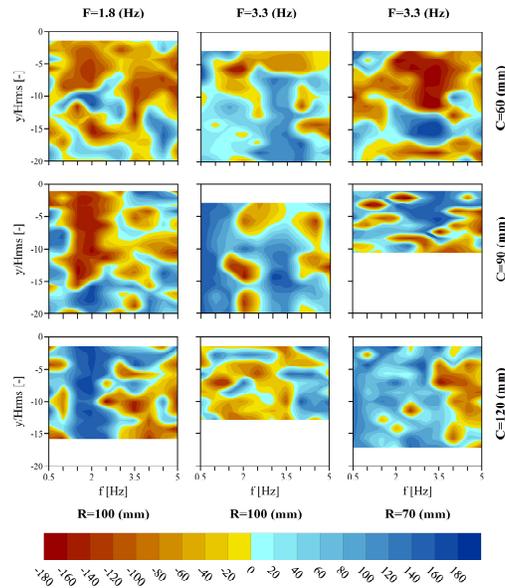


Figura 7. Mappe di sfasamento. R è il ricoprimento, C è la corsa. Valori positivi indicano che il pelo libero è in ritardo rispetto alle fluttuazioni di velocità verticale.

BIBLIOGRAFIA

- G.K. Batchelor. Computation of the energy spectrum in homogeneous two-dimensional turbulence. *Phys.Fluids*, 12:233-239, 1969.
- M. Brocchini and D.H. Peregrine. The dynamics of strong turbulence at free surfaces. *J. Fluid Mech.*, 449:225-254, 2001.
- B.H. Brumley and G.H. Jirka. Near-surface turbulence in a grid-stirred tank. *J. Fluid Mech.*, 183:235-263, 1987.
- S. Kumar, R. Gupta, & S. Banerjee. An experimental investigation of the characteristics of free-surface turbulence in channel flow. *Phys.Fluids*, 10:437-456, 1998.
- S. Loewen, B. Ahlborn, and A.B. Filuk. Statistics of surface flow structures on decaying grid turbulence. *Phys. Fluids*, 29:2388-2397, 1986.
- S. Longo. La turbolenza all'interfaccia aria-acqua. *Atti del 31 Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Perugia, Italia, 2008.
- M. Petti and S. Longo. Turbulence experiments in the swash zone. *Coast. Engrng*, (43):1-24, 2001.
- M.A.C. Texeira and S.E. Belcher. On the initiation of surface waves by turbulent shear flow. *Dyn. Atmos. Oceans*, 41:1-27, 2006.
- S.M. Thompson and Turner J.S. Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. *J. Fluid Mech.*, 67:349-368, 1975.
- A. Weigand. Simultaneous mapping of the velocity and deformation field at a free surface. *Exp. Fluids*, 20:358-364, 1996.