

STUDIO SPERIMENTALE DEL FRANGIMENTO SPILLING STAZIONARIO

M. Mossa & A.F. Petrillo

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Sezione Ingegneria delle Acque, Politecnico di Bari, Via E. Orabona, 4 – 70125 Bari; e-mail: mossa@poliba.it, petrillo@poliba.it

SOMMARIO

Il lavoro riporta i risultati di un'indagine sperimentale sul campo di moto di un frangimento di tipo spilling generato mediante l'interposizione di un profilo alare all'interno di una corrente a pelo libero. La prima parte dell'indagine è stata indirizzata alla misura dei principali parametri relativi alle onde che si generavano a valle di profili alari e alla determinazione dell'angolo d'attacco di incipiente frangimento. Successivamente, per una configurazione con presenza di frangimento, si è condotto lo studio con un sistema PIV. Ciò ha consentito di evidenziare la periodicità dei fenomeni di formazione dei vortici e di evoluzione del profilo del pelo libero. L'analisi del campo di moto ha altresì permesso di riconoscere che un frangimento spilling, al pari di un risalto idraulico, non può essere considerato un unico grosso vortice secondo la letteratura classica, ma piuttosto una regione di generazione di turbolenza, con strutture vorticosi di diverse scale caratterizzate da una frequenza di formazione ed evoluzione.

1 INTRODUZIONE

Il presente lavoro riporta i risultati di un'indagine sperimentale indirizzata allo studio del campo di moto di un frangimento stazionario di tipo *spilling* generato mediante l'interposizione di un profilo alare all'interno di una corrente a pelo libero. I primi risultati del programma di ricerca furono presentati da *Mossa et al. (2000)*.

La prima parte della presente indagine è stata rivolta alla ricerca delle configurazioni di incipiente frangimento al variare dell'angolo d'attacco di due diversi profili alari, NACA 0024 e NACA 0012, aventi entrambi una corda di 20 cm. La seconda parte è stata rivolta allo studio del campo di moto in presenza di frangimento, generato dal profilo NACA 0024 con angolo d'attacco di 10°, utilizzando un sistema PIV (*Particle Image Velocimetry*). Lo studio sperimentale della corrente a valle di un profilo alare ha conosciuto un particolare sviluppo dopo l'avvento di sofisticate tecniche di misure, come la PIV, consentendo di poter giungere a conclusioni significative sulle strutture tipiche del flusso di frangimento.

2 DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE E CONFIGURAZIONI ANALIZZATE

L'impianto sperimentale, schematicamente rappresentato in figura 1, è costituito da un canale (di sezione trasversale rettangolare, largo 0.40 m, alto 0.50 m e lungo 24.40

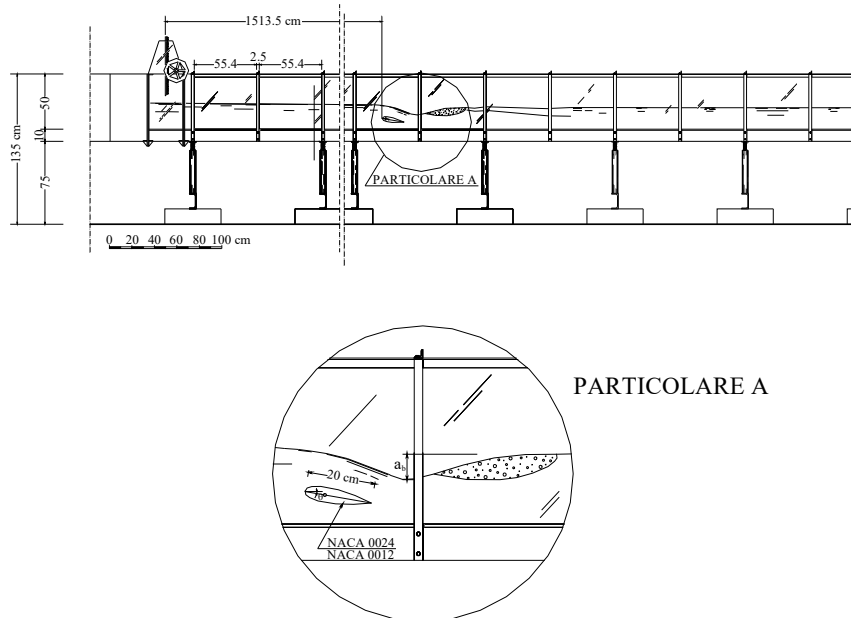


Figura 1. Vista laterale del canale e particolare del profilo alare.

m) con il fondo e le pareti in plexiglas. Le portate sono state misurate con uno stramazzo triangolare installato alla fine del canale dopo una vasca di calma. Per il rilievo del profilo della superficie libera, si è utilizzata un'asta idrometrica munita di nonio decimale e di un circuito elettrico in grado di valutare l'altezza mediana del profilo. Per misurare l'altezza e la lunghezza dell'onda a valle del profilo si è fatto uso di una videocamera, al fine di poter valutare nel medesimo istante i suddetti parametri per una lunghezza significativa del canale. Il sistema PIV della Dantec utilizzato è costituito da una sorgente laser Continuum Minilite pulsato a doppia cavità Nd:Yag con uscita di 20 mJ a 532 nm, ottiche per generare una lama laser, una videocamera *Double Image 700* con CCD di 768x484 pixel e obiettivo Nikon 60 mm, un processore PIV 2000 basato sulla tecnica della crosscorrelazione delle immagini, un calcolatore di processo con scheda di interfaccia National Instruments AT-GPIB/TNT e software per il set-up e acquisizione FlowManager ver. 2.01. Le sezioni oggetto delle misure sono state scelte sufficientemente distanti, sia dalla sezione d'ingresso nel canale sia dalla sezione terminale di valle, in modo da non risentire della turbolenza di ingresso nel canale o dei profili di richiamo del flusso nella vasca di misurazione della portata.

Con riferimento alle diverse configurazioni prese in esame, sono state misurate le grandezze di seguito riportate: altezza dell'acqua nel canale a 14 m dalla paratoia di monte, ossia a monte del profilo alare, h_{14} ; altezza dell'acqua nel canale a 18 m dalla paratoia di monte, dove poteva ritenersi esaurito l'effetto della presenza del profilo alare nel canale, h_{18} ; angolo d'attacco del profilo alare, positivo se la testa del profilo è rivolta verso l'alto, α ; temperatura dell'acqua nella canale, T ; portata in canale, Q ; velocità media della corrente, V . Si è quindi determinato il numero di Froude della corrente, $Fr = V/(gh_{14})^{1/2}$ e il numero di Reynolds della corrente, $Re = \rho V 4R / \mu$, dove g , ρ , μ ed R

Grandezze	Angolo d'attacco 10°	Angolo d'attacco 0°	Angolo d'attacco -2°	Angolo d'attacco -5°
h_{14} [cm]	22.5	21.0	20.5	21.0
h_{18} [cm]	19.5	19.5	20.0	19.0
T [°C]	16.4	16.4	16.4	16.4
R [m]	0.106	0.102	0.101	0.102
Q [m ³ /s]	0.06828	0.06754	0.06834	0.06714
V [m/s]	0.76	0.80	0.83	0.80
Fr	0.51	0.56	0.59	0.56
Re	292545	296321	304419	296321

Tabella 1. Grandezze misurate e calcolate con il profilo alare NACA 0024.

Grandezze	Angolo d'attacco 10°	Angolo d'attacco 5°	Angolo d'attacco 1°	Angolo d'attacco 0°	Angolo d'attacco -2°
h_{14} [cm]	22.0	21.0	20.5	21.0	21.0
h_{18} [cm]	19.5	19.0	20.0	19.5	19.5
T [°C]	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4
R [m]	0.105	0.102	0.101	0.102	0.102
Q [m ³ /s]	0.06674	0.06736	0.06903	0.06845	0.06799
V [m/s]	0.76	0.80	0.84	0.81	0.81
Fr	0.52	0.56	0.59	0.57	0.56
Re	289785	296321	308087	300025	300025

Tabella 2. Grandezze misurate e calcolate con profilo alare NACA 0012.

sono, rispettivamente, l'accelerazione di gravità, la densità e la viscosità dell'acqua, alla temperatura misurata, e il raggio idraulico del canale valutati nella sezione a monte del profilo alare. Le tabelle 1 e 2 riportano i valori dei parametri sopra menzionati relativi al profilo alare NACA 0024 e NACA 0012, rispettivamente.

Per le varie configurazioni analizzate, si è provveduto a misurare i parametri riportati nelle tabelle 3 e 4, ossia l'angolo di inclinazione della regione di frangimento θ , la lunghezza della regione di frangimento L , l'ampiezza dell'onda frangente a_b , la lunghezza dell'onda frangente λ_b , l'ampiezza dell'onda successiva a quella frangente a e la lunghezza dell'onda successiva a quella frangente λ . Le configurazioni analizzate sono state scelte al fine di definire le condizioni di incipiente frangimento, ossia partendo da un angolo d'attacco di 10° si sono valutati i parametri riportati nelle tabelle 3 e 4 riducendo via via l'angolo d'attacco, fino a ottenere quello limite, al di sotto del quale si realizzavano in canale condizioni di moto ondoso in totale assenza di frangimento. A tal proposito sono state effettuate delle riprese con una videocamera digitale della regione di possibile frangimento. In accordo con *Battjes e Sakai (1981)*, si osserva che per angoli di attacco di 10° la scia turbolenta dei profili alari inibiva la generazione di onde a valle dello *spilling*.

In particolare, le riprese sono state effettuate in due diverse zone del flusso: una in corrispondenza della regione del frangimento, dalla quale è stato possibile valutare dei parametri caratteristici, come angolo d'inclinazione e lunghezza della regione del frangimento; l'altra localizzata a valle, a circa 4 m dalla regione dello *spilling*, al fine di valutare l'influenza del frangimento sulle caratteristiche delle onde che si generavano. Le misure eseguite per la ricerca delle condizioni di incipiente frangimento sono state ef-

fettuate direttamente sui fotogrammi preventivamente processati al fine di ridurre l'errore dovuto alla convergenza prospettica. La scala di riduzione delle immagini è stata ricavata utilizzando elementi di dimensioni note presenti sui fotogrammi.

Grandezze	Angolo d'attacco 10°	Angolo d'attacco 0°	Angolo d'attacco -2°	Angolo d'attacco -5°
θ [deg]	14.0°	19.5°	6.0°	0.0°
L [cm]	31.5	13.1	12.1	0.0
a_b [cm]	7.8	4.5	4.6	2.9
λ_b [cm]	-	50.2	57.1	57.0
a [cm]	-	3.4	2.3	2.4
λ [cm]	-	56.9	55.5	57.9

Tabella 3. Condizioni sperimentali con profilo NACA 0024.

Grandezze	Angolo d'attacco 10°	Angolo d'attacco 5°	Angolo d'attacco 1°	Angolo d'attacco 0°	Angolo d'attacco -2°
θ [deg]	12.8°	18.5°	9.2°	8.2°	0.0°
L [cm]	19.1	15.6	13.5	5.8	0.0
a_b [cm]	8.1	5.6	3.2	4.8	1.6
λ_b [cm]	-	46.0	65.9	58.1	62.5
a [cm]	-	1.3	2.6	3.1	1.2
λ [cm]	-	48.0	38.5	49.9	60.0

Tabella 4. Condizioni sperimentali con profilo NACA 0012.

3 ANALISI DEI RISULTATI

Gli angoli al di sotto dei quali non era presente il frangimento sono stati -2° per il profilo NACA 0012 e -5° per il profilo NACA 0024. In realtà, già con angoli d'attacco prossimi a 0° , in canale non si presentava un vero e proprio frangimento *spilling*, ma piuttosto un'increspatura sulla superficie della prima onda a valle dei profili alari, legata anche a disturbi generati dalle giunzioni delle lastre di plexiglas delle pareti. Pertanto -2° e -5° sono i valori di soglia affinché, per le condizioni idrodinamiche proprie del canale, si realizzino a valle dei profili alari onde senza alcuna increspatura.

I dati riportati nelle tabelle 3 e 4 evidenziano un andamento crescente dell'ampiezza a_b e della lunghezza d'onda λ al frangimento in funzione dell'angolo d'attacco α . Si osserva, altresì, un andamento lineare di a_b in funzione di $L \sin \theta$, ossia della componente verticale della lunghezza della regione di frangimento, in accordo con *Duncan (1981)*.

Come già detto, dopo aver valutato le condizioni per le quali si presentava l'incipiente frangimento, si sono analizzati i risultati per il caso di onda frangente generata dal profilo alare NACA 0024 con angolo d'attacco di 10° (proseguo dello studio di *Mossa et al., 2000*). Relativamente a questa parte, il lavoro è stato condotto con l'ausilio della strumentazione PIV, la quale ha consentito la determinazione dei campi di velocità e vorticità a valle del profilo alare. In figura 2 si riportano le aree di flusso che sono state analizzate con il sistema PIV. I campi di vorticità sono riferiti alla sola componente ω_z del vettore di vorticità, perpendicolare al piano del moto rilevato con la PIV. La vorticità è assunta positiva se antioraria. A titolo di esempio, nelle figure 3a, 3b, 3c e 3d sono rappresentati

alcuni campi vettoriali istantanei di velocità con i relativi campi di vorticità. I campi di velocità, acquisiti ad intervalli di 0.5 s per un periodo di misurazione complessivo di 25 s, sono sovrapposti alle corrispondenti immagini della corrente. In figura 3a, 3b e 3c sono riportati i campi di velocità e vorticità dell'area D di figura 2, relativi agli intervalli di tempo $t=6.5$ s, 8.0 s e 11.5 s dall'inizio dei rilievi. L'analisi dettagliata dei campi di velocità e vorticità, oltre che della superficie libera, ha evidenziato una ciclicità dei parametri idrodinamici. Infatti, focalizzando l'attenzione sulle figure 3a e 3c, è possibile notare una similitudine dei due campi di velocità e vorticità e della superficie libera, a evidenziare la ripetitività del fenomeno.

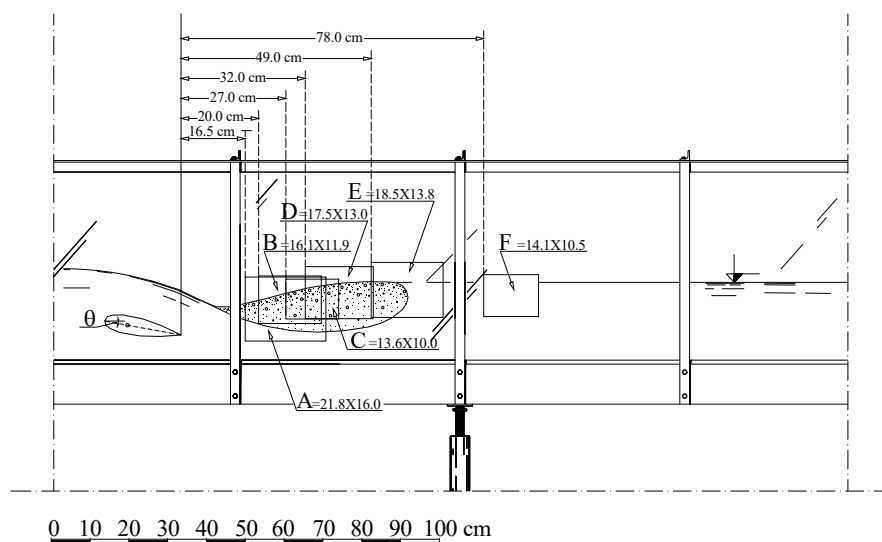


Figura 2. Regioni di flusso analizzate con la strumentazione PIV.

Una tale alternanza dei parametri idrodinamici è stata anche riscontrata da *Mossa e Petrillo (1997)* e da *Mossa (1999)*, analizzando un risalto idraulico, a conferma che, fra i due fenomeni, è possibile riscontrare un unico comune denominatore (*Peregrine e Svendsen, 1978*). L'analisi e le conclusioni sopra indicate sono supportate anche dai campi di velocità e vorticità ottenute dalla strumentazione PIV. Ciò ha permesso di evidenziare la presenza di fenomeni ciclici anche relativamente alle componenti di velocità e, dunque, di vorticità. In particolare, l'analisi dell'area D delle figure 3a, 3b e 3c hanno mostrato che i campi di velocità e vorticità, nonché il profilo di superficie, presentano una quasi periodicità con un pseudo-periodo di circa 5 s.

Anche dai dati rilevati nell'area B di figura 2 (non riportate per ragioni di brevità) si nota una struttura coerente principale che si ripete con una certa periodicità. Questa struttura è rappresentata da un vortice antiorario posizionato all'interno della regione del frangimento. La periodicità di evoluzione di questa struttura è paragonabile a quella evidenziata per l'area D. Ossia anche nel caso dell'area B è possibile individuare un pseudo-periodo di circa 5 s.

Nell'ambito di ciascun periodo risultano ben visibili le variazioni della corrente all'interno della regione di frangimento. Per quanto non siano state effettuate delle misurazioni di pressione è possibile ritenere che anche queste presentano delle

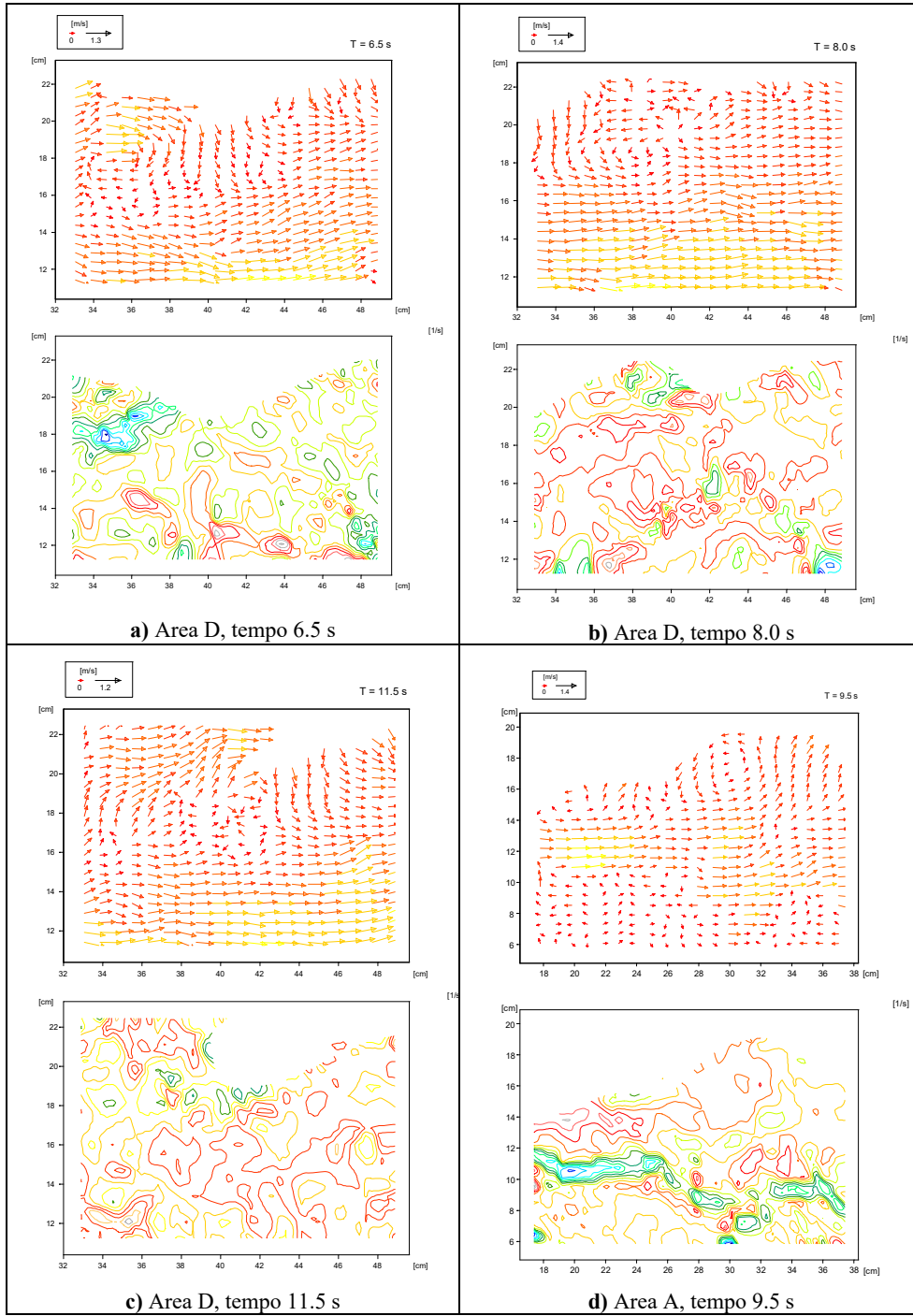


Figura 3. Immagini di alcuni campi di velocità e vorticità delle aree D ed A.

fluttuazioni, la cui conoscenza è di fondamentale importanza per le sollecitazioni che inducono sul fondo (Fiorotto & Rinaldo, 1992; Di Santo et al., 1995). Nell'area B si sono anche evidenziati degli *eddies* obliqui inclinati a 45° rispetto al fondo, a conferma di quanto osservato da Nadaoka et al. (1989).

Continuando l'indagine del frangimento *spilling* e analizzando l'area C, posta ancora più a valle della B, si osserva la zona del flusso che alcuni autori, come Battjes e Sakai (1981), hanno ritenuto essere simile ad uno strato di mescolamento. Nella sequenza dei 50 campi istantanei di velocità e vorticità acquisiti ad intervalli di 0.5 s, ancora una volta, a conferma di quanto già individuato e detto precedentemente, si ritrova una periodicità di apparizione dei vortici con un pseudo-periodo di circa 5 s. Tuttavia, in questo caso, l'individuazione dei fenomeni periodici non è molto evidente, come nei casi precedenti, a causa sia della scarsa presenza, nelle immagini, della superficie libera (di grande utilità per l'individuazione di fenomeni ciclici) sia della maggior distanza dal profilo alare. L'analisi del campo di moto dell'area C, tuttavia, ha evidenziato la presenza periodica di un vortice antiorario, a circa 32 cm dalla coda del profilo alare, di intensità massima compresa fra 80 s^{-1} e 100 s^{-1} . Un'ulteriore osservazione interessante è la persistente presenza di vorticità negativa, di intensità anche paragonabile a quella positiva (circa $60\text{-}80 \text{ s}^{-1}$), sotto forma di strutture di dimensioni inferiori a quelle rilevate in superficie. Come già evidenziato da Battjes e Sakai (1981) e da Mossa et al. (2000), nel fenomeno di frangimento stazionario tipo *spilling* è possibile individuare due zone caratteristiche, una simile a quella di uno strato di mescolamento, che comprende il frangimento *spilling* propriamente detto, ed una più a valle, simile ad un flusso di scia. L'analisi delle immagini dell'area C ha evidenziato che essa rappresenta proprio la zona di passaggio fra le due condizioni. Anche nell'area C è risultata visibile la presenza degli *eddies* obliqui a 45° dal fondo del canale.

L'analisi dei campi di velocità e vorticità dell'area E di figura 2 confermano la presenza di una scia, come osservato da Mossa et al. (2000), resa visibile dalla presenza delle bolle d'aria all'interno dell'acqua. La zona di scia tende ad ispessirsi, anche se con una certa riduzione della concentrazione delle bolle stesse, come accade nei fenomeni di diffusione. Il confronto tra il campo di vorticità dell'area E con quelle precedentemente analizzate evidenzia una frammentazione in diverse strutture con valori di vorticità compresi fra -40 s^{-1} e 40 s^{-1} , ossia con moduli minori di quelli delle aree più prossime al profilo alare. Per quanto riguarda la periodicità di evoluzione dei parametri idrodinamici, che, come già detto, caratterizza la zona prossima al frangimento, nell'area E essa non è più rilevabile.

L'area F di figura 2, distante circa 78 cm dalla coda del profilo alare e 10 cm dal fondo del canale, rappresenta la regione più a valle tra quelle indagate. In questa zona si ritrovano ancora le condizioni osservate nell'area E, sia per quanto riguarda la vorticità sia per l'assenza di fenomeni alternativi osservabili con la strumentazione usata. Un aspetto peculiare dell'area F è legato al campo di velocità, il quale tende ad assumere l'andamento tipico di una corrente in canale, caratterizzata da una leggera riduzione di velocità in prossimità della superficie libera. Questa osservazione porta ad affermare che nell'area F il campo di moto inizia a non risentire della presenza del profilo alare.

Si sono lasciate per ultime le valutazioni relative all'area di indagine A di figura 2. A tal riguardo si faccia riferimento alla figura 3d. L'area A è la più grande tra quelle indagate e, dunque, consente di avere un'indicazione del flusso prossimo al profilo alare per una significativa estensione, anche se ciò comporta una perdita in termini di risoluzione

dell'immagine e dunque dei campi di velocità. L'analisi dei campi di velocità e vorticità dell'area A ha consentito di evidenziare la periodicità di apparizione dei vortici e della forma del pelo libero, in accordo con le precedenti osservazioni. Inoltre, il campo di velocità dell'area A ha permesso di giungere alle seguenti particolari conclusioni:

- la regione dello *spilling* non può essere identificata come un semplice *roller*, secondo la classica definizione, ma, piuttosto, come una regione sorgente di turbolenza;
- una regione di flusso caratterizzata da alti valori di vorticità è quella prossima all'inizio del frangimento, dove la pendenza del pelo libero è particolarmente elevata.

La seconda delle suddette conclusioni è avallata dall'analisi della figura 3d, dove il maggior valore assoluto di vorticità (-160 s^{-1}) è presente all'inizio dello *spilling*.

4 CONCLUSIONI

Il presente studio riporta una sintesi dei risultati sperimentali su un frangimento di tipo *spilling*, generato dall'interposizione di profili alari nella corrente di un canale. Si sono indagati i principali parametri delle onde generate dai profili, individuando la condizione di incipiente frangimento. I parametri ottenuti presentano un particolare andamento, confermando i risultati disponibili in letteratura. Per la configurazione con il profilo alare NACA 0024 e angolo d'attacco di 10° , i rilievi condotti con il sistema PIV hanno evidenziato fenomeni di periodicità dei campi di velocità, vorticità e della superficie libera, in modo simile a quelli già evidenziati dagli scriventi per un risalto idraulico. Inoltre l'analisi del campo di vorticità di una regione sufficientemente estesa del flusso immediatamente a valle del profilo alare ha permesso di avallare la teoria di *Peregrine e Svendsen (1978)*, secondo la quale il frangimento *spilling* non può essere considerato come un unico grosso vortice, ma piuttosto come una sorgente di turbolenza costituita da una serie di strutture vorticosi. Il presente studio ha altresì evidenziato che tali strutture presentano una quasi periodicità di formazione ed evoluzione.

BIBLIOGRAFIA

- Battjes, J.A. & Sakai, T. Velocity field in a steady breaker, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 111, pp. 421-437, 1981.
- Di Santo, A., Petrillo, A.F. & Piccinni, A.F. Experimental studies on the stability of lining slabs in hydraulic jump stilling basins, *Excerpta*, vol. 9, pp. 161-179, 1995.
- Duncan, J.H. An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil, *Proc. R. Soc. Lond.*, A337, pp. 331-348, 1991.
- Dabiri, D. & Gharib, M. Experimental investigation of the vorticity generation within a spilling water wave, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 330, pp.113-139, 1997.
- Fiorotto, V. & Rinaldo, A. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, vol. 30, no. 4, 1992.
- Mossa, M. On the oscillating characteristics of hydraulic jumps, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, vol. 37, no.4, pp. 541-558, 1999.
- Mossa, M., Petrillo, A.F. & Rinaldi, A. Studio del campo di moto generato da un frangimento di tipo *spilling*, *XXVII Conv. di Idr. e Costr. Idr.*, Genova, vol. IV, 195-203, 2000.
- Nadaoka, K., Hino, M. & Koyano, Y. Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone, *J. Fluid Mech.*, vol. 204, pp. 359-387, 1989.
- Peregrine, D.H. & Svendsen, I.A. Spilling breakers, bores and hydraulic jumps, *Coastal Engineering*, vol. 30, pp. 540-550, 1978.