

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio sperimentale delle onde stazionarie indotte  
da una schiera di cilindri in una corrente a  
superficie libera.**

Laureando:

Matteo Angelo Seganfredo

Relatore:

Prof. Andrea Defina

ANNO ACCADEMICO 2014-2015



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Studio sperimentale e risultati</b>	<b>7</b>
2.1	Descrizione delle esperienze . . . . .	7
2.2	Elaborazione dei dati . . . . .	8
2.3	Risultati e osservazioni . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>31</b>
<b>A</b>	<b>Dati sperimentali</b>	<b>33</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>39</b>



# Capitolo 1

## Introduzione

Quando una corrente a superficie libera investe una schiera di cilindri verticali e il numero di Reynolds riferito al cilindro è compreso nell'intervallo in cui si ha distacco alternato di vortici ( $47 \leq Re < 2 \cdot 10^5$ ) può svilupparsi un'onda stazionaria che oscilla in direzione trasversale al moto. L'onda è prodotta dall'azione periodica dei cilindri sul fluido associata alla forza di lift che si genera a causa del distacco alternato dei vortici e la sua ampiezza è massima quando la frequenza di distacco dei vortici  $f_v$  è prossima alla frequenza naturale dell'oscillazione trasversale  $f_n$ .

Il fenomeno descritto è stato osservato in qualche caso in natura, provocato dalla presenza di ostacoli nell'alveo di un corso d'acqua, quali pile di ponti (si veda Falvey (2003)). Più frequentemente è stato rilevato nel corso di esperimenti di laboratorio in cui si utilizzava una schiera di cilindri per simulare la vegetazione (si veda Zima e Ackermann (2002)).

Questa oscillazione trasversale prodotta dal distacco alternato di vortici a tergo di ciascun cilindro della schiera mostra delle sostanziali analogie con il fenomeno del Vortex Induced Vibration (VIV) in cui sono i cilindri che vibrano in direzione trasversale rispetto alla corrente (si veda, ad esempio, Williamson e Govardhan (2004, 2008)).

Uno degli aspetti più importanti del VIV è il cosiddetto regime di lock-in primario, che si verifica quando la frequenza di distacco dei vortici  $f_v$  è vicina alla frequenza naturale (o forzata) di oscillazione del cilindro  $f_n$ . In questa regione il

processo di distacco dei vortici è influenzato dal moto del cilindro e la frequenza di distacco viene forzata a coincidere con quella di oscillazione del cilindro.

L'analogia tra i due fenomeni, VIV e sessa trasversale, è stata riconosciuta e investigata nei lavori sperimentali di Oengoren e Ziada (1992), Ziada e Oengoren (1993), Oengoren e Ziada (1998) e Ziada e Oengoren (2000). In questi studi, focalizzati principalmente sulla valutazione delle frequenze caratteristiche del fenomeno, è stata confermata l'esistenza di una regione di lock-in in concomitanza alle condizioni di risonanza anche nel caso di onde superficiali. In questa regione il distacco di vortici si sincronizza con la sessa trasversale (vedi Figura 26 in Oengoren e Ziada (1998)) e si verificano le maggiori ampiezze d'onda.

È stato inoltre verificato (Oengoren e Ziada, 1992, Ziada e Oengoren, 1993) che la frequenza naturale dell'oscillazione trasversale può essere stimata con ottima approssimazione mediante l'impiego della teoria delle onde di piccola ampiezza. Sfortunatamente nelle ricerche effettuate da Ziada e Oengoren si trovano solo poche informazioni riguardo all'ampiezza delle onde trasversali.

Sono poche le ricerche in letteratura che trattano specificatamente della sessa trasversale prodotta da una schiera di ostacoli verticali posti in una corrente a superficie libera.

Un primo sistematico lavoro lo si deve a Zima e Ackermann (2002) che hanno condotto una serie di esperimenti da cui è emerso che le maggiori ampiezze d'onda si realizzano quando il rapporto tra le frequenze  $f_v/f_n$  è compreso tra 0,7 e 1,3, cioè in prossimità delle condizioni di risonanza che teoricamente si avrebbero per  $f_v/f_n = 1$ . In queste circostanze la massima ampiezza dell'onda trasversale misurata ha raggiunto valori anche del 35 % della profondità media della corrente. Al contrario quando il rapporto tra le frequenze è inferiore a 0,5 o superiore a 2,0 non sono state osservate onde trasversali. Zima e Ackermann hanno inoltre confermato che la teoria lineare può essere utilizzata per il calcolo della frequenza naturale dell'onda trasversale; gli autori hanno infine proposto un'equazione per stimare l'ampiezza della sessa, per il primo modo di oscillazione, imponendo l'equilibrio tra le forze di pressione in direzione trasversale e la forza di lift dovuta ai cilindri.

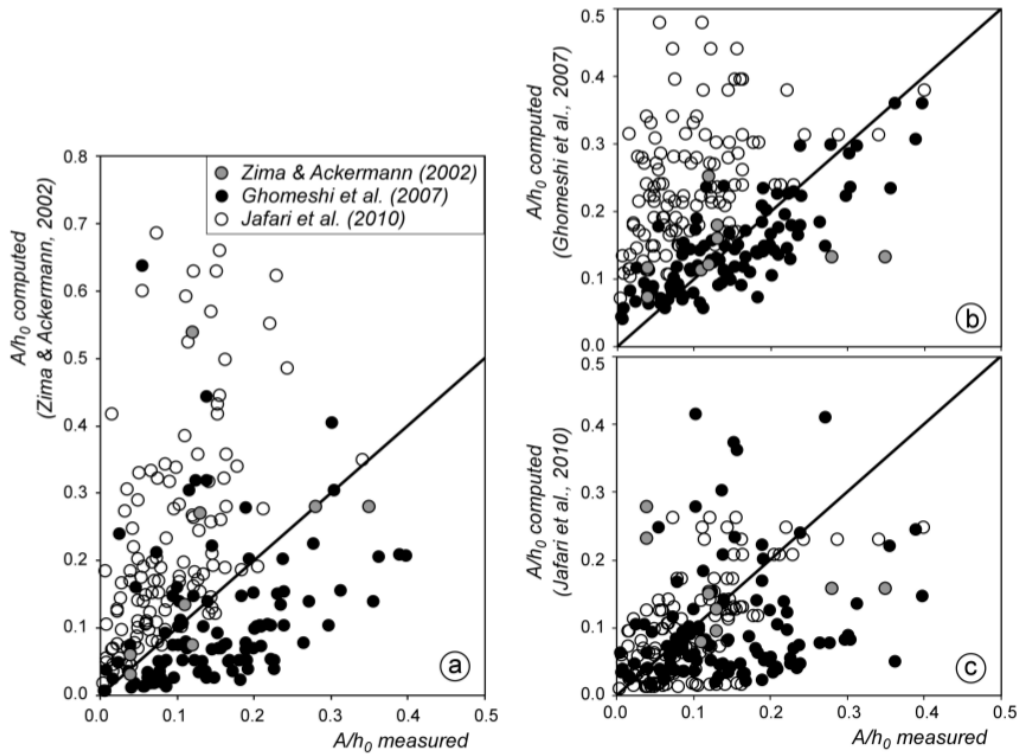


Figura 1.1: Confronto tra le ampiezze relative  $A/h_0$  misurate da Zima e Ackermann (2002) (cerchi grigi), Ghomeshi et al. (2007) (cerchi neri) e Jafari et al. (2010) (cerchi bianchi), e l'ampiezza relativa calcolata con le formule proposte da a) Zima e Ackermann, b) Ghomeshi et al. e c) Jafari et al.

Vi sono altri due lavori in letteratura (Ghomeshi et al., 2007, Jafari et al., 2010) in cui è stata effettuata una cospicua serie di indagini sperimentali, i cui risultati vengono inquadrati nell'ottica di un'analisi dimensionale. In entrambi gli studi vengono proposte delle semplici formule che legano l'ampiezza d'onda a una serie di gruppi adimensionali; le espressioni sono ricavate tramite una procedura di regressione lineare sui dati misurati. È curioso osservare che i valori calcolati applicando la formula di Ghomeshi et al. non si accordano bene con i dati misurati da Jafari et al. e vice versa (si veda la Figura 1.1).

È da segnalare che in tutti questi esperimenti l'ampiezza dell'onda è stata rilevata visualmente con l'ausilio di una scala graduata fissata alla parete esterna della canaletta: misurando i massimi e minimi livelli raggiunti dall'acqua, gli autori hanno

potuto determinare l'ampiezza  $A$  e la profondità media della corrente  $h_0$ . È dunque probabile che le misure siano affette da qualche incertezza, soprattutto per quanto riguarda le ampiezze minori, dell'ordine del millimetro, in cui si sente maggiormente l'effetto della tensione superficiale al contatto tra acqua e parete della canaletta.

Nel 2014 Defina e Pradella hanno proposto per la prima volta un modello matematico che risolvendo le equazioni delle onde lunghe in acque basse perviene ad un'espressione per la massima ampiezza d'onda in condizioni di risonanza. I risultati forniti dal modello proposto sono stati confrontati con i dati sperimentali riportati in letteratura: ne è risultato un confronto molto soddisfacente anche se gli autori evidenziano la necessità di ulteriori indagini volte ad individuare più precisi legami tra i parametri del modello e le caratteristiche geometriche ed idrauliche del sistema.

Infine, sempre nel 2014 è stato pubblicato da Zhao, Cheng e Huang uno studio riguardante proprio le oscillazioni della superficie libera che si producono in corrispondenza delle schiere di cilindri. Il lavoro si concentra soprattutto sulla determinazione della frequenza delle oscillazioni della superficie libera e propone una correzione alla formula della frequenza naturale che tenga conto della porosità dovuta alla presenza della schiera di cilindri. Gli studiosi inoltre rilevano la presenza di quattro diverse configurazioni di flusso (superficie piana con assenza di onde, onde trasversali, onde longitudinali e superficie libera disturbata), insistendo in particolare sul fatto che le onde trasversali non si presentano mai in assenza delle onde longitudinali e viceversa.

Già Zima e Ackermann, nel corso dei loro esperimenti, avevano osservato onde longitudinali progressive e battimenti si che sovrapponevano alla sessa trasversale: queste onde venivano ridotte mettendo un materiale fibroso assorbente all'estremità di valle del canale artificiale, ma *non* potevano essere completamente rimosse.

Oltre a queste osservazioni di carattere qualitativo mancano completamente in letteratura delle informazioni di carattere quantitativo sull'onda longitudinale che sempre accompagna quella trasversale.



Con il presente lavoro si è quindi portato avanti lo studio sistematico sulla sessa trasversale prodotta da una schiera di ostacoli verticali posti in una corrente a superficie libera; si è cercato inoltre per la prima volta di studiare anche il comportamento dell'onda longitudinale misurandone la lunghezza d'onda (ampiezza e periodo sono gli stessi della sessa trasversale, naturalmente) e la celerità di propagazione.



# Capitolo 2

## Studio sperimentale e risultati

### 2.1 Descrizione delle esperienze

Le esperienze di cui tratta la presente tesi sono state eseguite nel Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Idrauliche dell'Università di Padova.

Sono state sottoposte a prova due diverse configurazioni della schiera e precisamente una con cilindri allineati ed una con cilindri sfalsati; per la prima (cilindri allineati) sono state inoltre condotte delle prove dimezzando il numero di cilindri presenti. La schiera occupa una porzione di canaletta pari a 6 m ed è costituita da quattro file equispaziate; i cilindri sono in posizione verticale, sostenuti superiormente da una struttura a montanti, e il numero è variabile a seconda della densità che si vuole ottenere. I cilindri sono in PVC rigido, hanno diametro pari a 2 cm e lunghezza pari a 50 cm.

Gli esperimenti sono stati condotti in una canaletta in plexiglas a sezione rettangolare con dimensioni  $38,5 \times 50$  cm<sup>2</sup> e lunghezza 20 m; al termine della canaletta è presente una paratoia a battente che permette di regolare la profondità della corrente mentre la portata transitante è fissata e misurata per mezzo di un misuratore elettromagnetico.

Le oscillazioni della superficie libera sono state registrate per mezzo di tre sonde ad ultrasuoni collocate rispettivamente poco dopo l'inizio della schiera, in mezzeria e poco prima della fine della stessa. Le sonde hanno una frequenza di acquisizione

di 30 rilevazioni al secondo e la durata di acquisizione è stata generalmente pari a 3 minuti.

Per ogni prova la portata è stata mantenuta costante mentre si è fatto variare il livello nella canaletta modificando l'apertura della paratoia posta a valle. In tutte le prove si è partiti da condizioni di tirante modesto per cui non si avevano oscillazioni e si proceduto innalzando progressivamente il livello: al fine di ottenere una certa continuità nei dati di ogni esperimento, il passo adottato è stato assunto pari a 0,5 mm in presenza dell'oscillazione della superficie libera mentre pari a 1 mm altrimenti (durante la prima fase di esperienze per alcuni casi si è proceduto anche nel verso opposto, ossia abbassando progressivamente il tirante). Una volta impostato il livello è stato lasciato passare il tempo necessario affinché il sistema andasse a regime; una volta raggiunte le condizioni di moto permanente si è proceduto con il rilievo delle oscillazioni.

## 2.2 Elaborazione dei dati

I dati ottenuti dalle sonde rappresentano l'andamento nel tempo della superficie libera; l'utilizzo di tre sonde che rilevano contemporaneamente in sezioni diverse della schiera ha permesso di determinare anche le caratteristiche dell'onda longitudinale che accompagna sempre la sessa in direzione trasversale.

L'oscillazione  $\eta$  della superficie libera in direzione trasversale ( $y$ ) può essere descritta matematicamente da un'onda stazionaria del tipo (Fig. 2.1):

$$\eta(y, t) = a \cos(my) \sin(\omega t)$$

essendo  $a$  l'ampiezza dell'oscillazione,  $m$  il numero d'onda e  $\omega$  la pulsazione. Nel caso della sessa la lunghezza d'onda  $\lambda$  è nota in quanto funzione della larghezza  $B$  della canaletta e del modo di oscillazione  $n$ ; in particolare troviamo per il numero d'onda la seguente espressione:  $m = \frac{n\pi}{B}$ .

La presenza dell'onda longitudinale fa sì che il segnale  $\eta$  si presenti sfasato nel tempo nelle diverse sezioni della schiera; per tenere conto di questo fatto bisogna

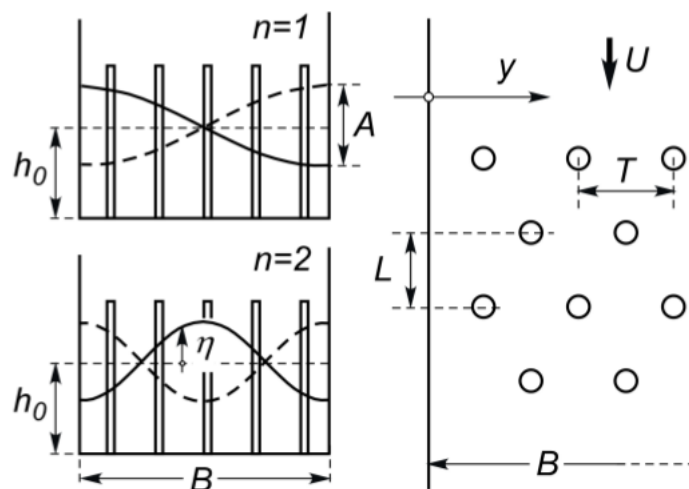


Figura 2.1: Sezione trasversale (sinistra) e pianta (destra) che mostrano le onde stazionarie in un canale rettangolare per diversi modi di oscillazione, con definizione dei parametri rilevanti.

modificare l'espressione nel modo seguente:

$$\eta(x, y, t) = a \cos(my) \sin(kx + \omega t)$$

dove  $k$  è il numero d'onda longitudinale che vale  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Assunto l'asse  $x$  positivo nella direzione del moto, l'espressione dice che l'onda longitudinale risale la corrente; inoltre, mentre i parametri  $m$  e  $\omega$  sono legati dalla relazione di dispersione, non sussiste nessun legame tra  $k$  e  $\omega$ .

Assumendo che il segnale fornito dalle sonde possa essere approssimato con la funzione armonica appena introdotta, l'elaborazione dei dati ha portato a determinare i valori dei parametri  $a$ ,  $k$  e  $\omega$ .

Osservando che l'oscillazione si manifesta attorno al livello indisturbato  $h_0$  (quindi  $\eta = h - h_0$ ) e che le sonde sono poste in prossimità delle pareti della canaletta (cioè  $y \simeq 0$ ), la funzione oggetto di calibrazione risulta essere:

$$h(x_s, t) = h_0(x_s) + a \sin(kx_s + \omega t + \varphi_0)$$

essendo  $x_s$  la coordinata della sonda considerata e  $\varphi_0$  l'angolo di fase iniziale.

Il tirante indisturbato  $h_0$  è ovviamente il valore medio del segnale di livello mentre l'ampiezza  $a$  è stata determinata operando un'analisi zero-crossing sul segnale di ciascuna sonda. I parametri  $k$ ,  $\omega$  e  $\varphi_0$  sono stati stimati in prima approssimazione ricercando la sovrapposizione tra il segnale misurato e l'onda sinusoidale, poi è stata migliorata la stima tramite una procedura di ottimizzazione che rendesse massima la correlazione tra i due segnali. Lo sfasamento iniziale  $\varphi_0$ , dato che descrive una traslazione, è un parametro inessenziale ed è stato introdotto solo per mettere in fase l'onda sinusoidale col segnale delle sonde.

Infine per alcuni casi è stata eseguita anche un'analisi di Fourier del segnale.

## 2.3 Risultati e osservazioni

La prima serie di esperienze è stata condotta su una schiera di 200 cilindri in configurazione sfalsata facendo variare la portata da 8 l/s a 20 l/s con passo pari a 2 l/s. È stata poi eseguita una seconda serie di esperienze per i medesimi valori di portata disponendo la stessa schiera in posizione allineata. Infine è stata condotta una serie di prove dimezzando il numero di cilindri presenti nella schiera in configurazione allineata; in queste condizioni sono stati esaminati solo i casi di portata pari a 8 e 15 l/s.

Di seguito verranno riportati e discussi i risultati relativi alla sola sonda posta in mezzzeria della schiera, in quanto si ritiene che in questa sezione il fenomeno sia pienamente sviluppato e non influenzato dalle condizioni al contorno.

### Cilindri sfalsati - densità massima

In Figura 2.2 sono riportati i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati. Il grafico riporta in ascissa la velocità  $U$  della corrente e in ordinata l'ampiezza relativa  $A/h$ , ovvero il rapporto tra l'ampiezza  $A$  ottenuta dall'analisi zero-crossing e il tirante medio  $h$ . Come già detto, le diverse prove sono state condotte mantenendo costante la portata e innalzando progressivamente il livello; quindi durante l'esperimento l'asse delle ascisse è stato percorso da destra verso sinistra.

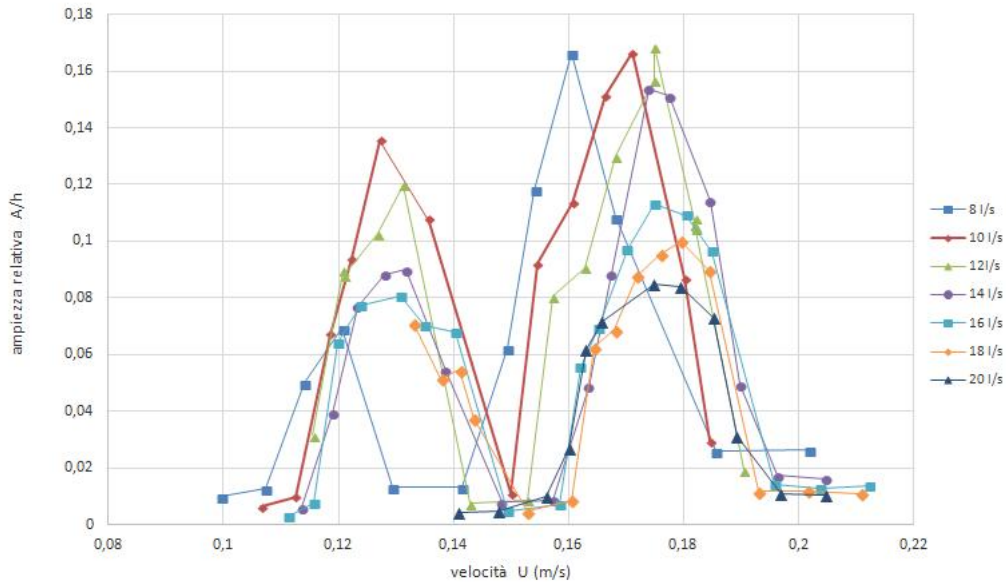


Figura 2.2: Andamento dell'ampiezza relativa  $A/h$  al variare della velocità  $U$ .

Dal grafico si osserva che esistono due intervalli di tirante in cui si manifesta il fenomeno di risonanza e che ad una modesta variazione di livello corrisponde una brusca variazione dell'ampiezza relativa non appena ci si avvicini ai suddetti intervalli. Una tale sensibilità del sistema è stata osservata direttamente in laboratorio dove anche la manovra più impercettibile era capace di cambiare in maniera evidente il fenomeno.

Un cilindro isolato immerso in una corrente è sollecitato da forze periodiche indotte dal moto del fluido; la frequenza  $f_v$  di tali forze varia linearmente con la velocità  $U$  della corrente secondo la relazione:

$$St = \frac{f_v d}{U}$$

essendo  $St$  il numero di Strouhal e  $d$  il diametro del cilindro.

Per il cilindro isolato e nel range di velocità qui operato il numero di Strouhal è costante e vale  $St = 0,205$ . È stato osservato come nel caso di una schiera di cilindri non esista un solo numero di Strouhal ma si abbia la compresenza di più numeri: in altre parole esistono diverse frequenze per la forzante che eccita il

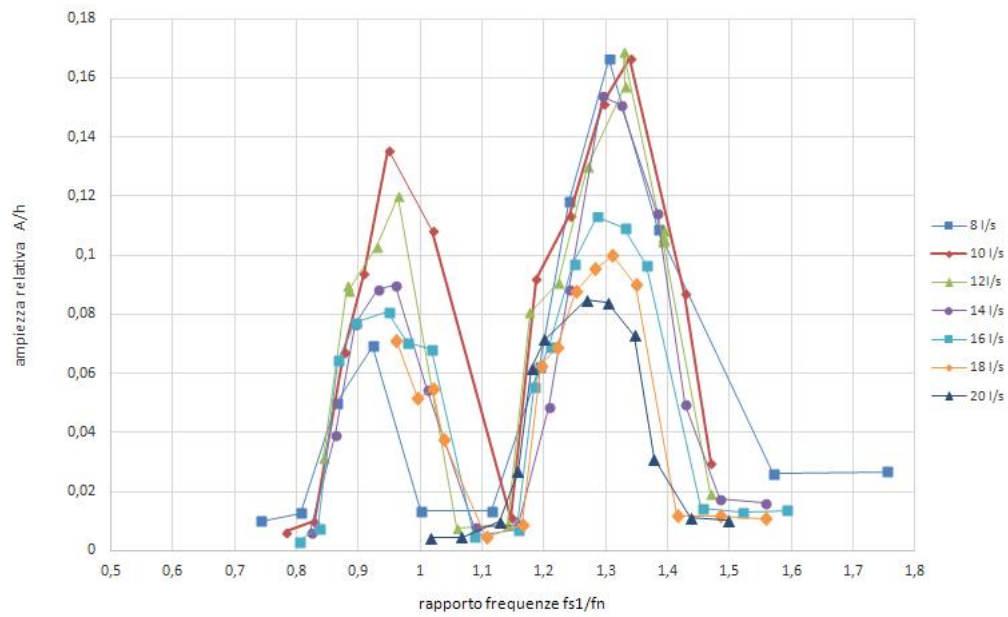


Figura 2.3: Primo intervallo di risonanza vicino a  $f_{St_1}/f_n = 1$ .

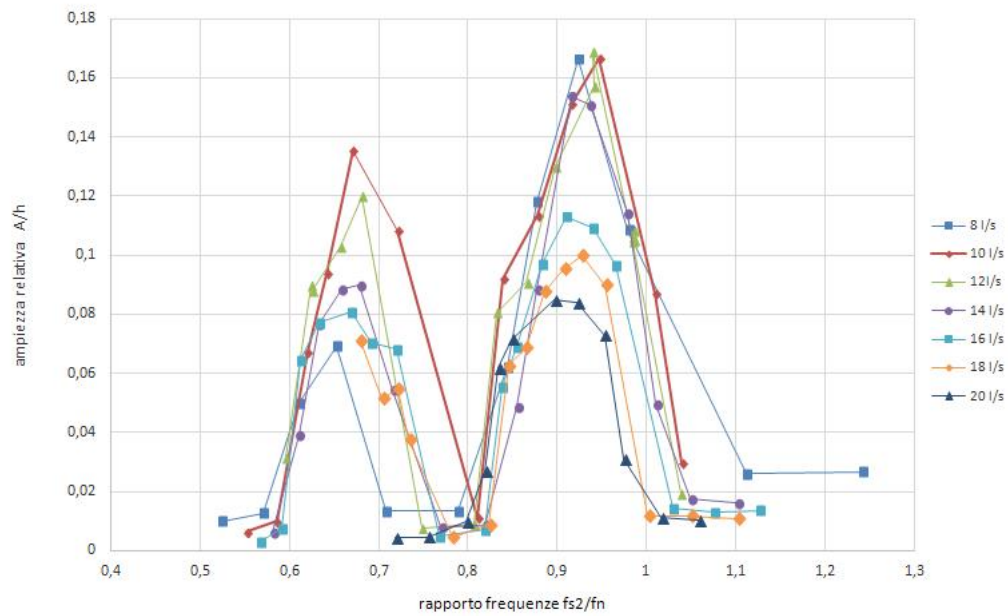


Figura 2.4: Secondo intervallo di risonanza vicino a  $f_{St_2}/f_n = 1$ .



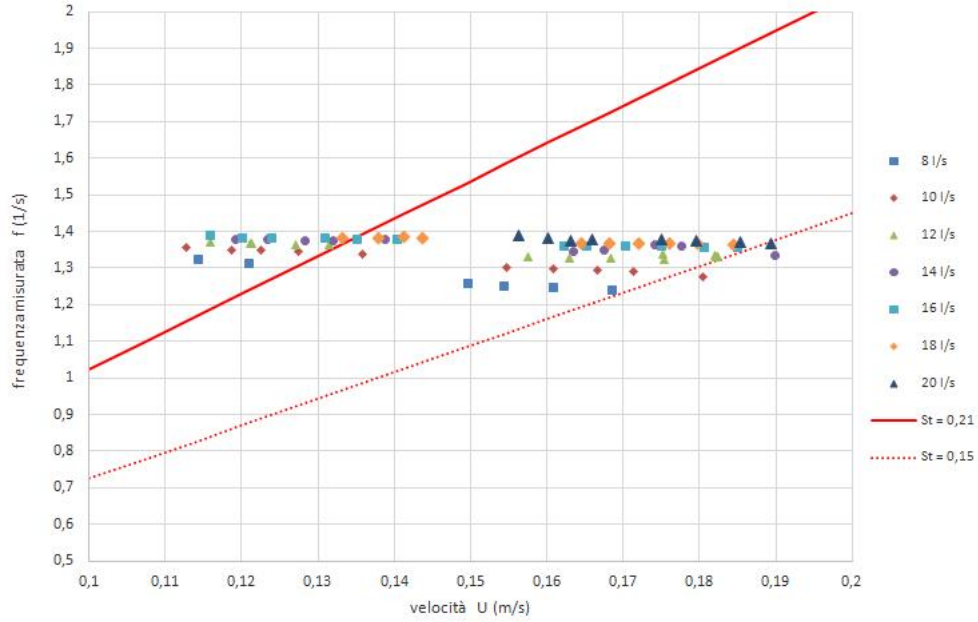


Figura 2.5: Frequenze  $f$  misurate durante le prove in funzione della velocità  $U$ .

sistema e gli effetti di ciascuna dipendono dalla posizione all'interno della schiera. In particolare sembra che i cilindri in testa alla schiera si comportino come isolati e quindi caratterizzati dal consueto numero di Strouhal  $St_1 = 0,205$ ; per il resto della schiera invece i cilindri sentono l'effetto della regione di scia che arriva da monte e hanno un numero di Strouhal caratteristico diverso (in particolare inferiore) che risulta essere pari a  $St_2 = 0,145$ .

La presenza di due intervalli in cui avviene il fenomeno di risonanza sembra quindi spiegata dalla compresenza dei due numeri di Strouhal, come evidenziato nelle Figure 2.3, 2.4 e 2.5. La frequenza naturale del sistema (massa d'acqua nella canaletta) è ben descritta in prima approssimazione dalla teoria lineare delle onde:

$$f_n = \sqrt{\frac{gn}{4\pi B} \tanh\left(\frac{n\pi h}{B}\right)}$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $n$  il modo di oscillazione,  $B$  la larghezza della canaletta e  $h$  il tirante d'acqua. Andando a rappresentare l'ampiezza relativa  $A/h$  in funzione del rapporto  $f_v/f_n$  si vede come il picco di sinistra si collochi in prossimità del valore 1 quando venga considerato il primo numero di Strouhal  $St_1$  nel calcolo

di  $f_v$  mentre il picco di destra si collochi ancora vicino al valore 1 quando venga considerato questa volta il secondo numero di Strouhal  $St_2$ .

Dal grafico si osserva ancora che l'intensità delle oscillazioni rilevate in corrispondenza del secondo numero di Strouhal è maggiore se paragonate con quelle relative al primo numero; inoltre al crescere della portata le ampiezze tendono a diminuire in entrambi i casi.

Si fa presente che per i maggiori valori di portata (18 e 20 l/s) è stato solo analizzato il secondo intervallo di risonanza a causa dei livelli sostenuti che si realizzavano fin dal principio delle esperienze.

L'esistenza di questi due distinti picchi di ampiezza relativa è una novità emersa durante questa indagine in quanto in letteratura non viene mai menzionata l'esistenza di due intervalli in cui ha luogo la risonanza.

Durante tutti gli esperimenti è stato osservato che proprio nell'intorno del rapporto  $f_v/f_n = 1$  relativo a  $St_1$  l'oscillazione mostra una certa modulazione nel tempo e tale comportamento si accentua passando da valle a monte della schiera (Fig. 2.6).

Tuttavia questo comportamento svanisce quando si entra nel vivo della risonanza e le oscillazioni sono pressoché costanti nel tempo una volta che il sistema si è portato nelle condizioni di moto stazionario (Fig. 2.7). Un comportamento analogo *non* è stato rilevato in corrispondenza del secondo numero di Strouhal.

Nel caso di segnale modulato è stato deciso di analizzare un numero di dati ridotto e in particolare quelli in cui si aveva la massima ampiezza nella sonda di mezzeria; a posteriori probabilmente questa procedura ha fornito una sovrastima dei valori di ampiezza relativa, come si vedrà in seguito.

Un altro fatto curioso è sorto lavorando con portate comprese tra 12 e 14 l/s. In questo range è stata osservata la formazione di un'onda longitudinale molto lunga e quindi si percepiva una oscillazione trasversale sincronizzata dalla seconda metà della schiera verso valle: di fatto l'onda metacronale non era visibile come nelle altre esperienze. Di questo fatto si trova conferma anche nei dati delle sonde dove si vede che i segnali rosso e verde sono praticamente in fase mentre generalmente si presentano sfasati (Fig. 2.8).

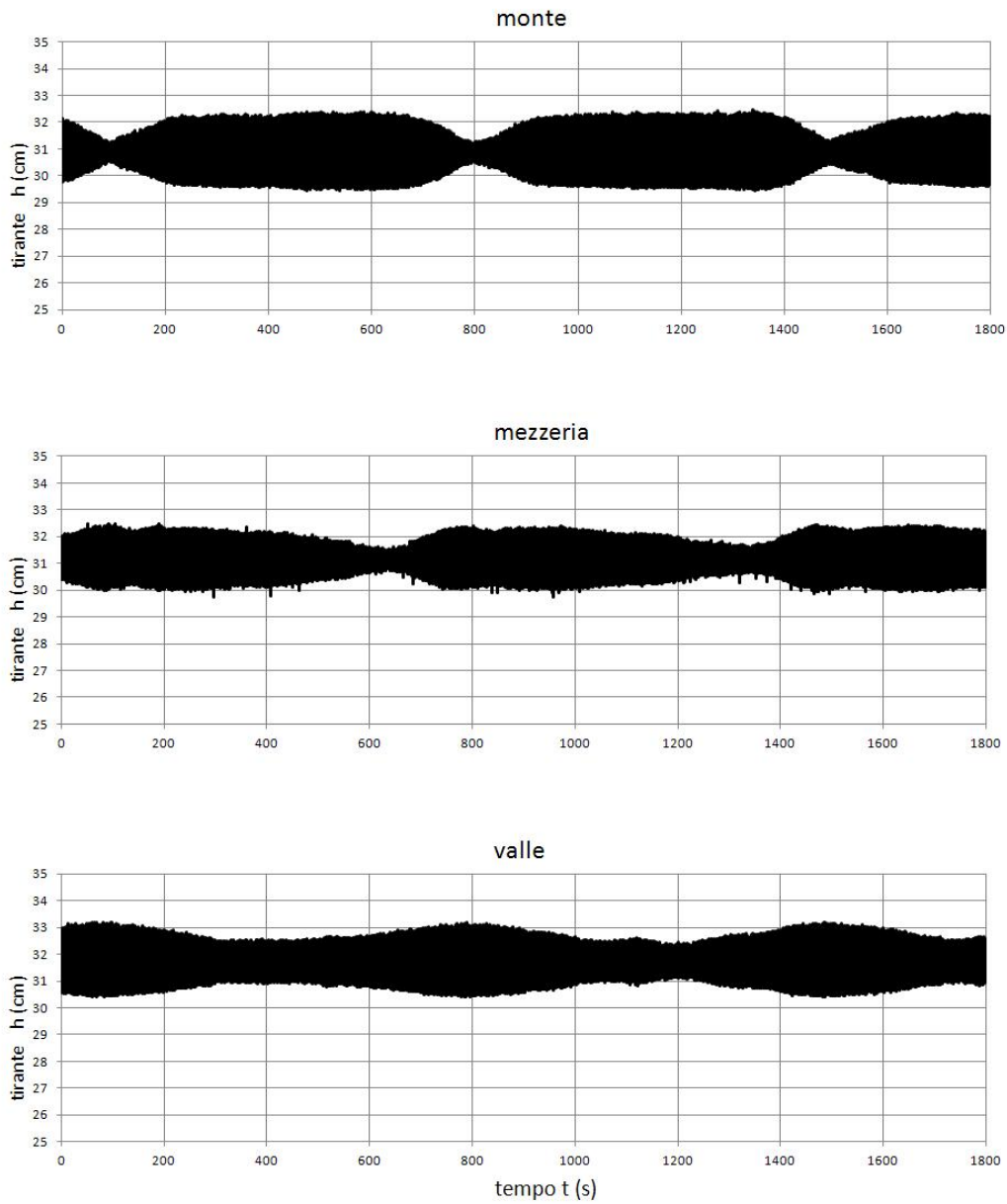


Figura 2.6: Segnale modulato quando si entra nel primo intervallo di risonanza ( $f_{St_1}/f_n = 1$ ); i dati sono relativi alla prova svolta con portata  $Q = 16$  l/s.

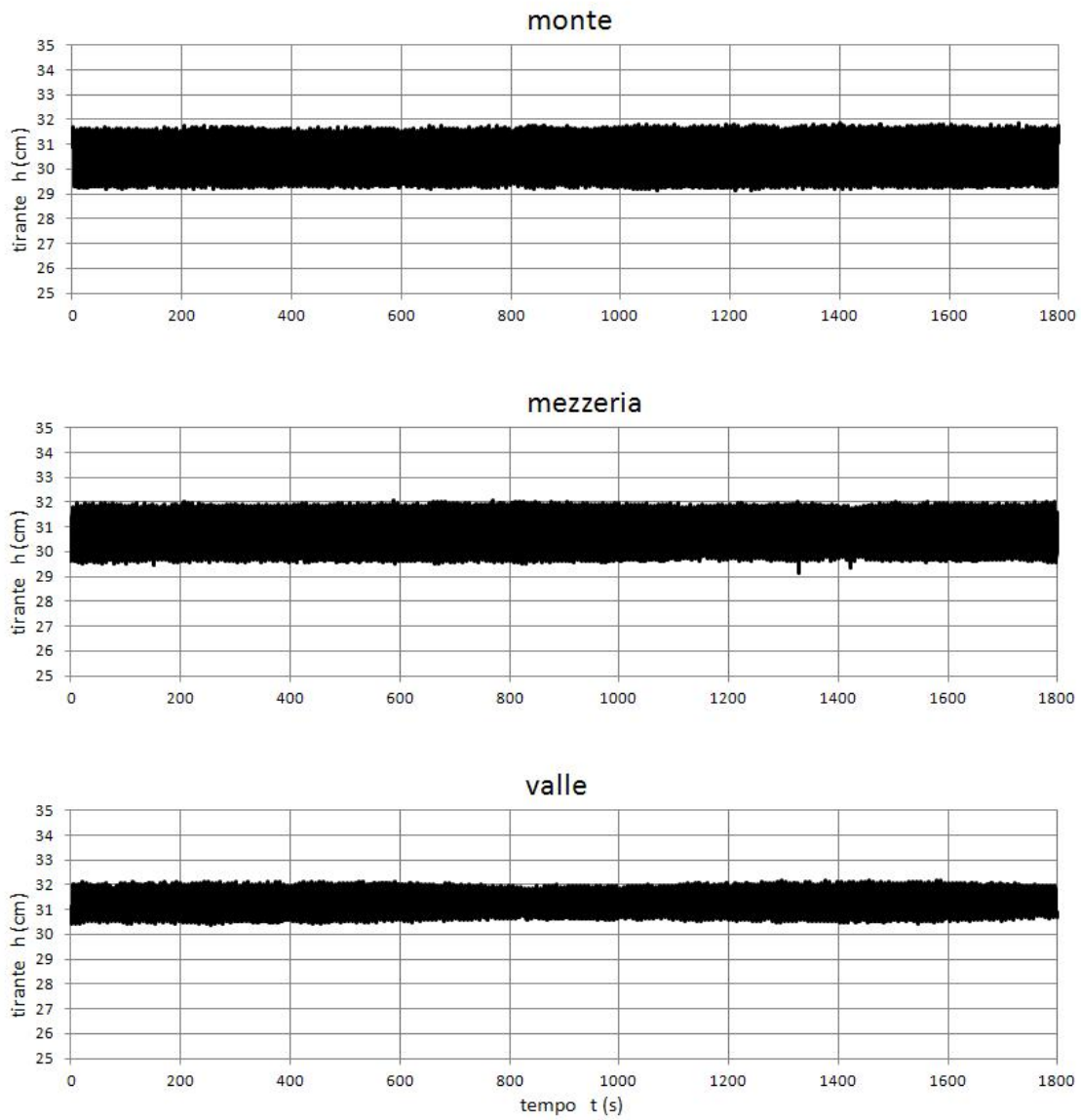


Figura 2.7: Segnale registrato durante la fase di risonanza (i dati sono relativi alla prova svolta con portata  $Q = 16$  l/s).

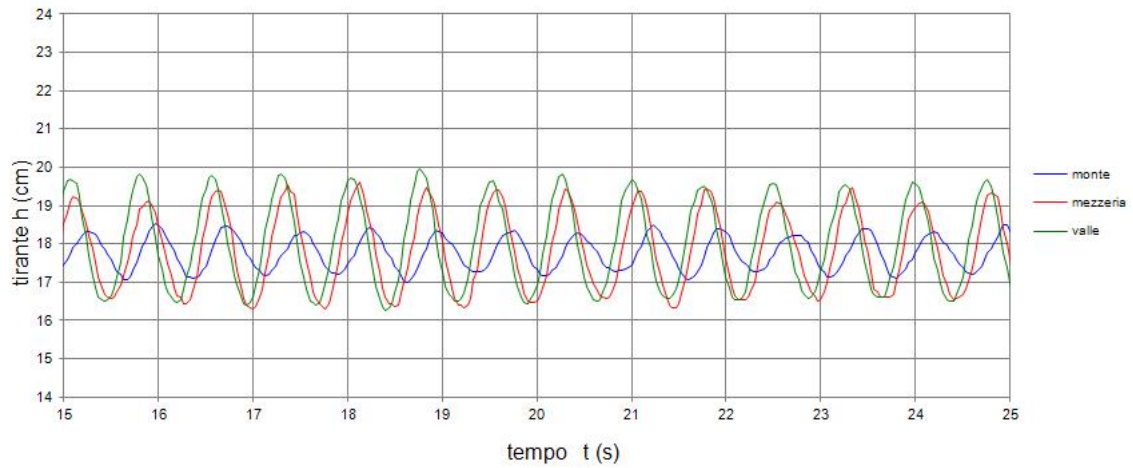


Figura 2.8: Segnale registrato in presenza di onda lunga dalla mezzeria della schiera alla paratoia (i dati sono relativi alla prova svolta con portata  $Q = 12$  l/s).

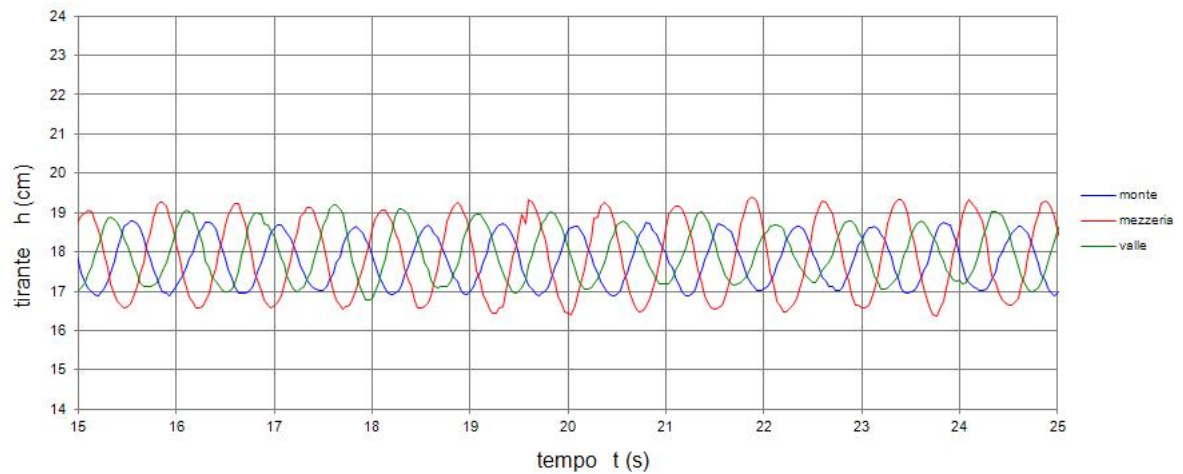


Figura 2.9: Segnale registrato dopo aver perturbato il campo di moto; le tre sonde presentano un segnale sfasato e quindi è comparsa l'onda longitudinale ( $Q = 12$  l/s).

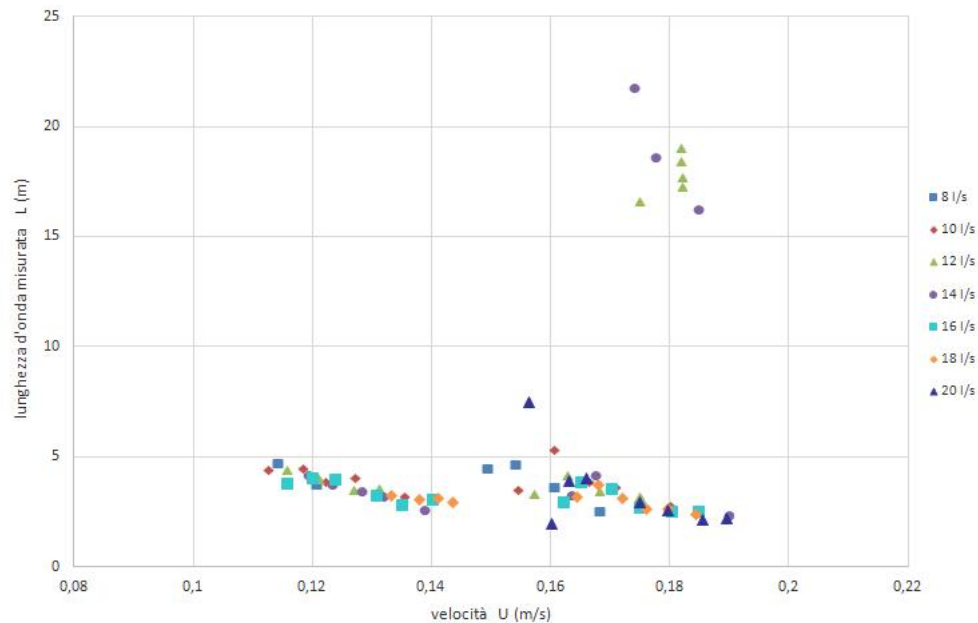


Figura 2.10: Lunghezze d'onda misurate in funzione della velocità  $U$ .

Tuttavia si ritiene essere questo un comportamento anomalo per due motivi: primo, perturbando il campo di moto il sistema non tornava verso le condizioni di oscillazione sincronizzata ma compariva la consueta onda metacronale (Fig. 2.9); secondo, raggiungendo le stesse condizioni di livello abbassando il tirante non sono stati osservati comportamenti insoliti.

Durante tutte le prove svolte si è sempre riscontrato la presenza di un'onda longitudinale. Questo conferma che quando il sistema entra in risonanza l'onda trasversale stazionaria è sempre accompagnata da un'onda longitudinale progressiva che risale la corrente; questa onda non può essere un disturbo in quanto la sua celerità di propagazione non è descrivibile tramite la teoria delle onde di piccole ampiezza. Si pensa piuttosto che essa sia generata da una imperfetta sincronizzazione longitudinale del distacco dei vortici.

Come già detto, per la prima volta si è cercato di studiare le caratteristiche di questa onda progressiva; osservato che ampiezza e periodo non possono che essere identici a quelli dell'onda trasversale è rimasto da determinare il parametro lun-

ghezza d'onda. La Figura 2.10 riporta le lunghezze dell'onda longitudinale misurate durante le esperienze; essendo l'onda presente durante la fase di risonanza, anche qui i punti si raccolgono in due gruppi distinti corrispondenti ai due numeri di Strouhal che caratterizzano il fenomeno.

A parte l'incertezza a cavallo dei due gruppi, si osserva in particolare come le caratteristiche dell'onda longitudinale *non* cambino al variare della portata: infatti i punti sono raccolti attorno a valori comuni e sembra che la lunghezza tenda a diminuire al crescere della velocità della corrente.

Il gruppo di punti isolati in alto a destra fa riferimento al caso di onda longitudinale molto lunga e per tanto sono da considerare come dati anomali per quanto già detto in merito.

### Cilindri allineati - densità massima

Molte delle caratteristiche osservate durante le prove svolte con i cilindri sfalsati sono state riscontrate durante gli esperimenti con i cilindri in linea.

In Figura 2.11 sono riportate le diverse ampiezze relative  $A/h$  in funzione della velocità  $U$  della corrente. Dal grafico si osserva che esistono sempre due intervalli di tirante in cui ha luogo il fenomeno di risonanza e naturalmente questo è sempre legato alla compresenza dei due numeri di Strouhal. Infatti andando a rappresentare le frequenze misurate in funzione della velocità (Fig. 2.12) i punti si raccolgono in due gruppi distinti: il primo posizionato in prossimità della retta  $St_1$ , il secondo posizionato invece in prossimità della retta  $St_2$ . Rappresentazioni analoghe sono quelle delle Figure 2.13 e 2.14.

Anche nel caso di cilindri in linea si osserva che l'intensità delle oscillazioni rilevate in corrispondenza del secondo numero di Strouhal è maggiore e che al crescere della portata le ampiezze relative tendono a diminuire.

Anche durante questo ciclo di prove è stato osservato che nell'intorno del rapporto  $f_v/f_n = 1$  relativo a  $St_1$  l'oscillazione mostra una certa modulazione nel tempo e tale comportamento si accentua passando da valle a monte della schiera (Fig. 2.15); questo comportamento comunque svanisce quando si entra nel vivo della risonan-

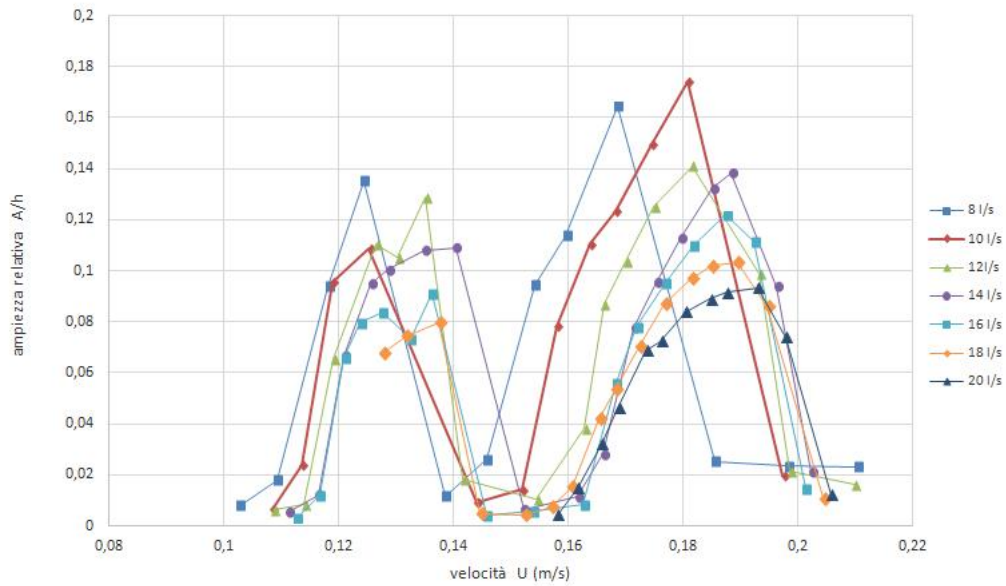


Figura 2.11: Andamento dell'ampiezza relativa  $A/h$  al variare della velocità  $U$ .

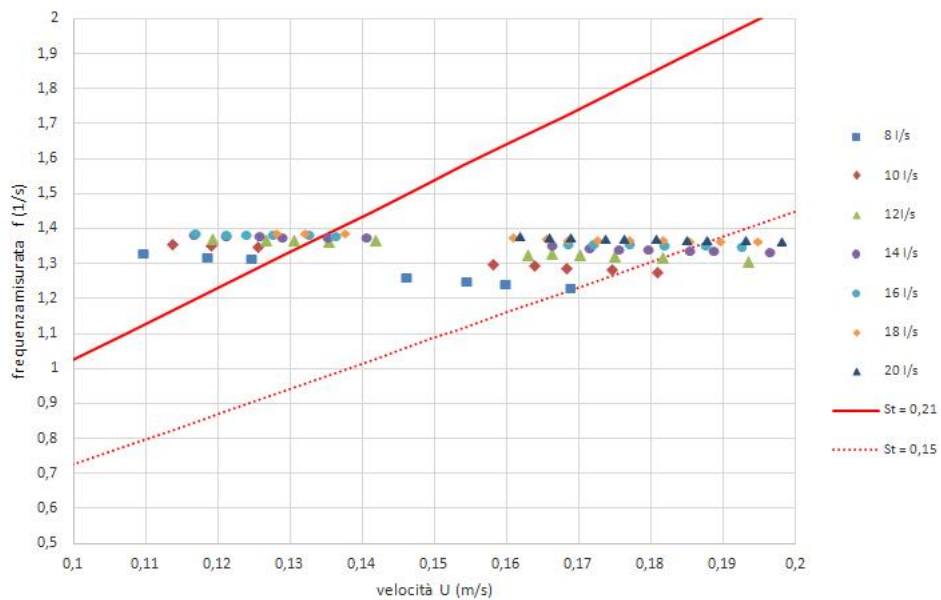


Figura 2.12: Frequenze  $f$  misurate durante le prove in funzione della velocità  $U$ .



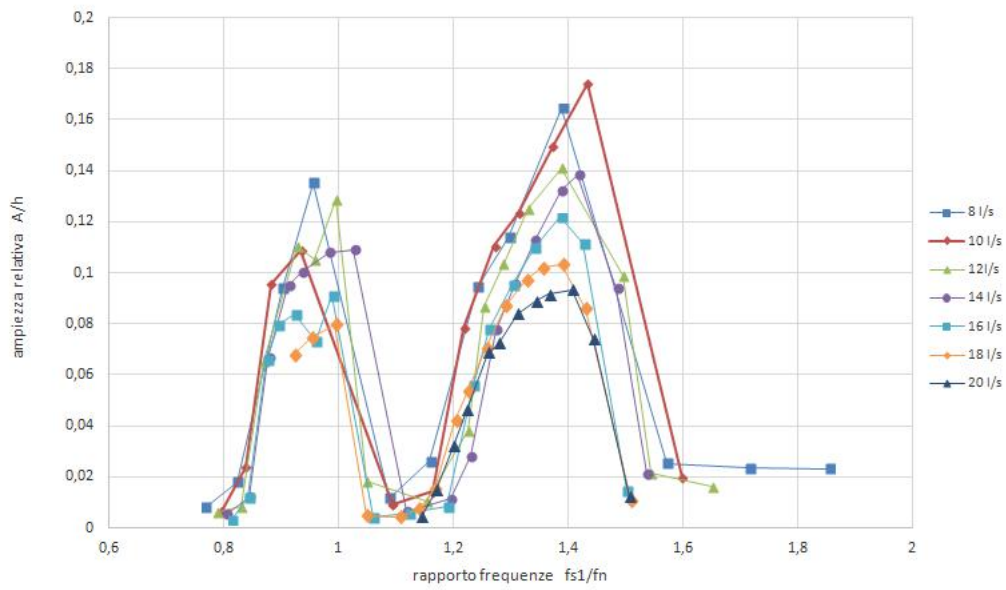


Figura 2.13: Primo intervallo di risonanza vicino a  $f_{st_1}/f_n = 1$ .

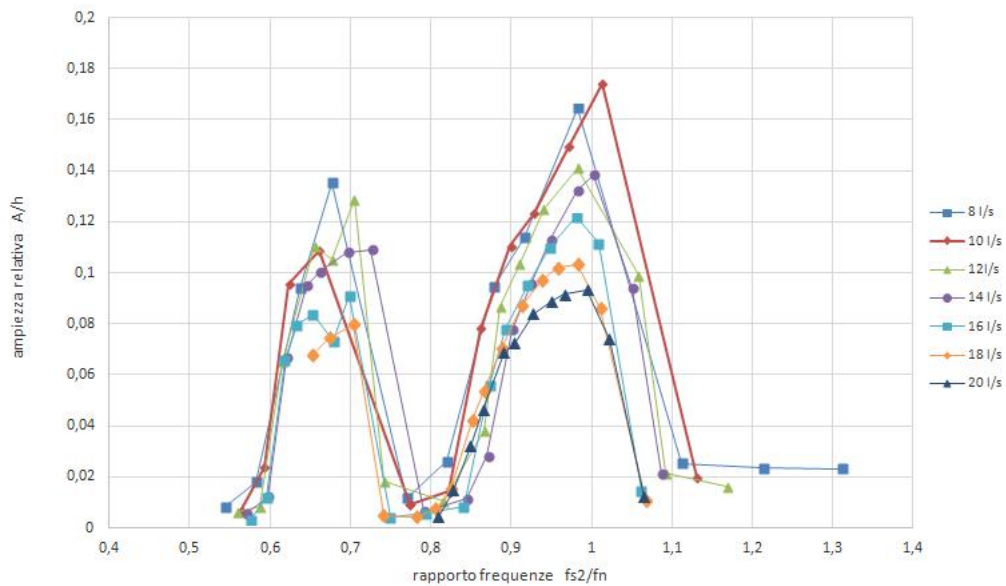


Figura 2.14: Secondo intervallo di risonanza vicino a  $f_{st_2}/f_n = 1$ .

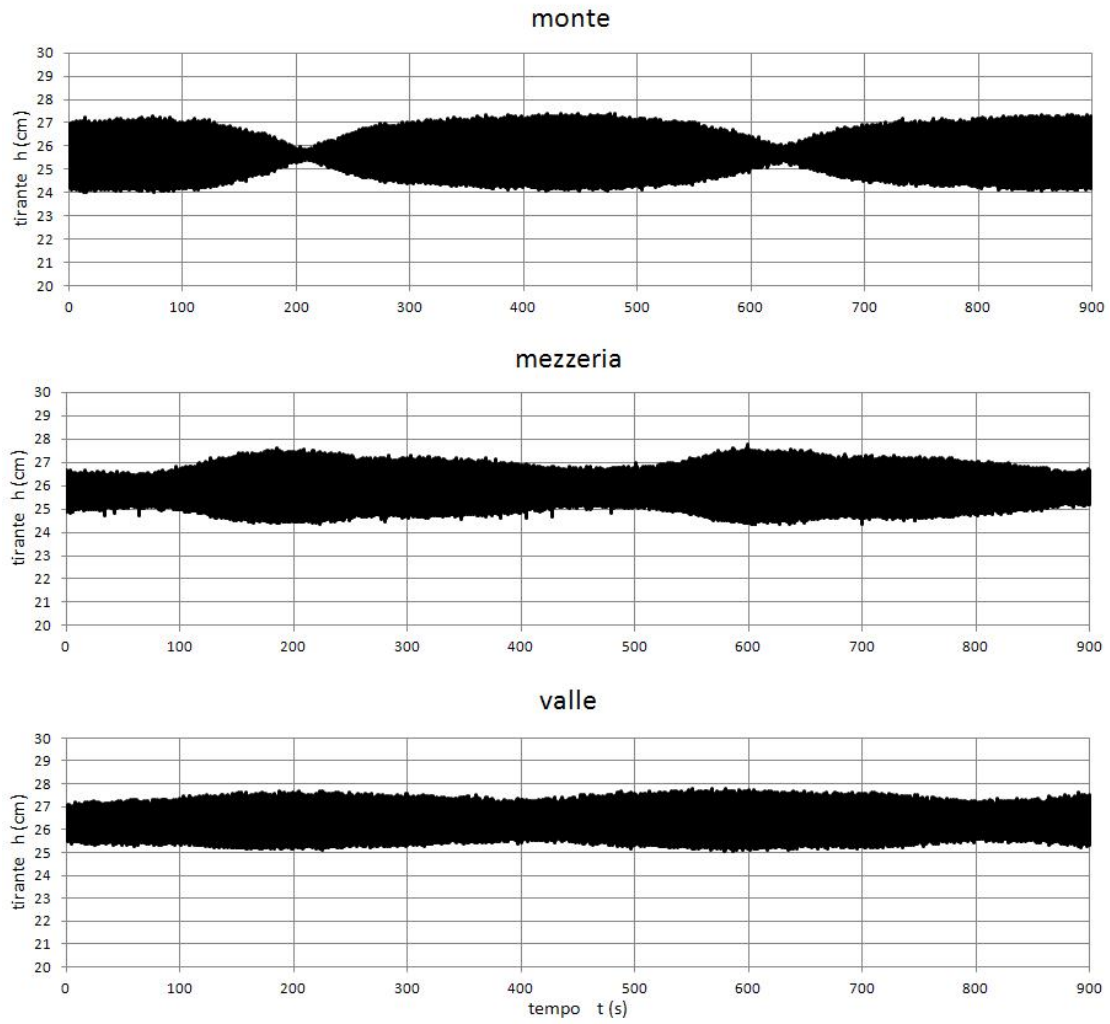


Figura 2.15: Segnale modulato quando si entra nel primo intervallo di risonanza ( $f_{St_1}/f_n = 1$ ); i dati sono relativi alla prova svolta con portata  $Q = 14$  l/s.

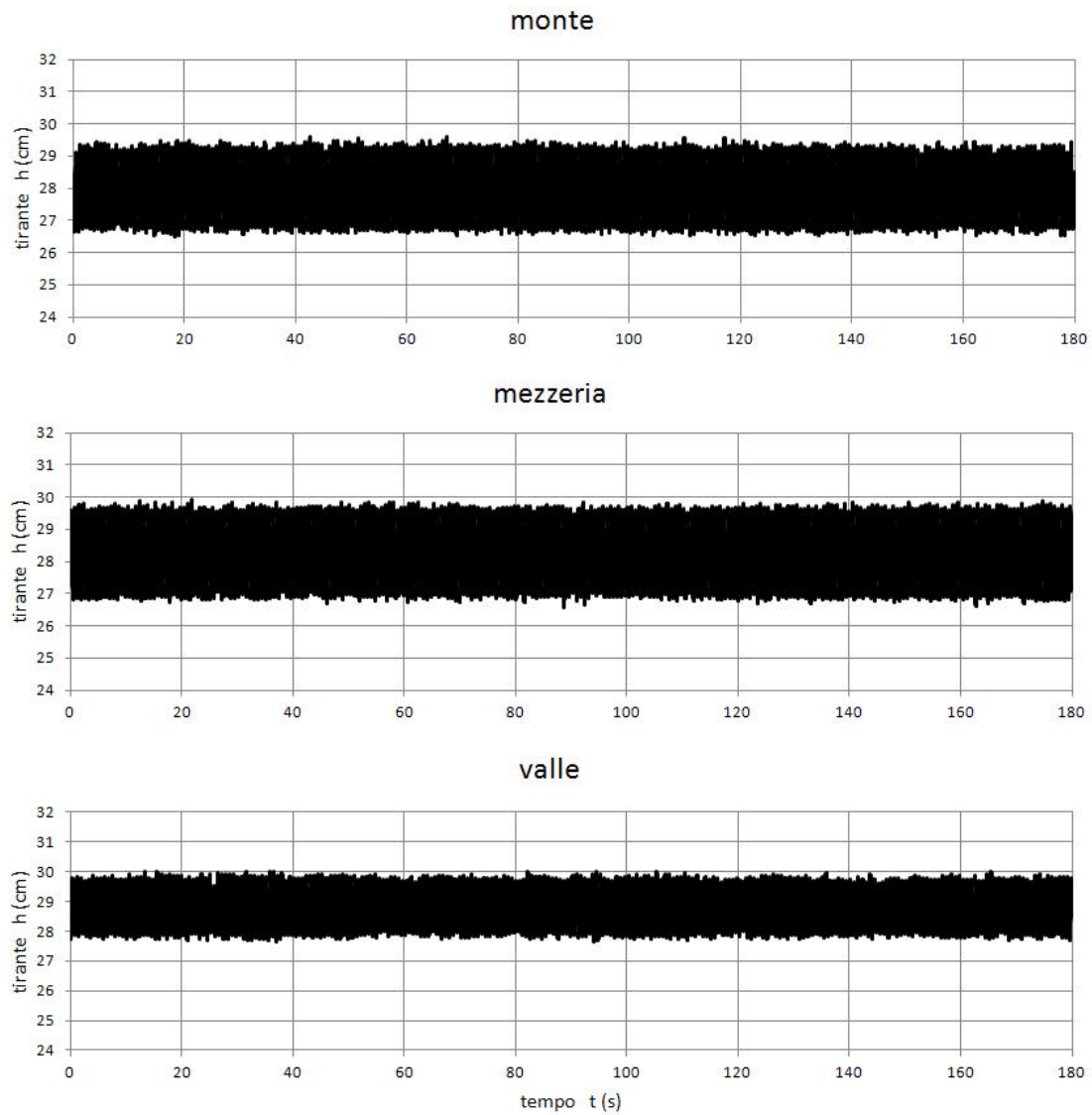


Figura 2.16: Segnale registrato durante la fase di risonanza (i dati sono relativi alla prova svolta con portata  $Q = 14$  l/s).

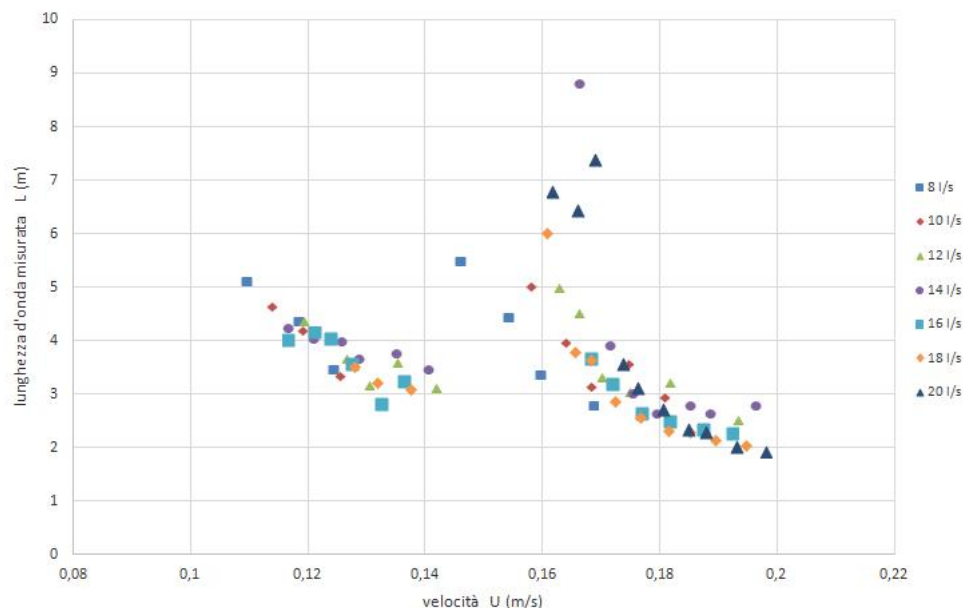


Figura 2.17: Lunghezze d'onda misurate in funzione della velocità  $U$ .

za, come già osservato in precedenza (Fig. 2.16). L'unica differenza che è stata riscontrata durante le prove è il tempo necessario al sistema per maturare questo andamento modulato, tempo molto più lungo nella configurazione in linea rispetto a quella sfalsata. È stato con questi dati che la procedura di isolare le massime ampiezze ha portato a risultati poco soddisfacenti, come si può notare esaminando l'andamento dei punti relativi al primo picco (vedi la Figura 2.11).

Naturalmente anche durante queste prove si è constatata l'esistenza di un'onda longitudinale progressiva accanto alla sessa trasversale durante la fase di risonanza; vengono quindi analizzate le lunghezze dell'onda longitudinale misurate durante le esperienze. In Figura 2.17 si possono osservare le stesse caratteristiche delineate in precedenza: i punti si raccolgono sempre in due gruppi distinti corrispondenti ai due numeri di Strouhal che caratterizzano il fenomeno; ancora una volta le caratteristiche dell'onda longitudinale *non* cambiano al variare della portata in quanto i punti sono raccolti attorno a valori comuni che sembrano diminuire al crescere della velocità della corrente.

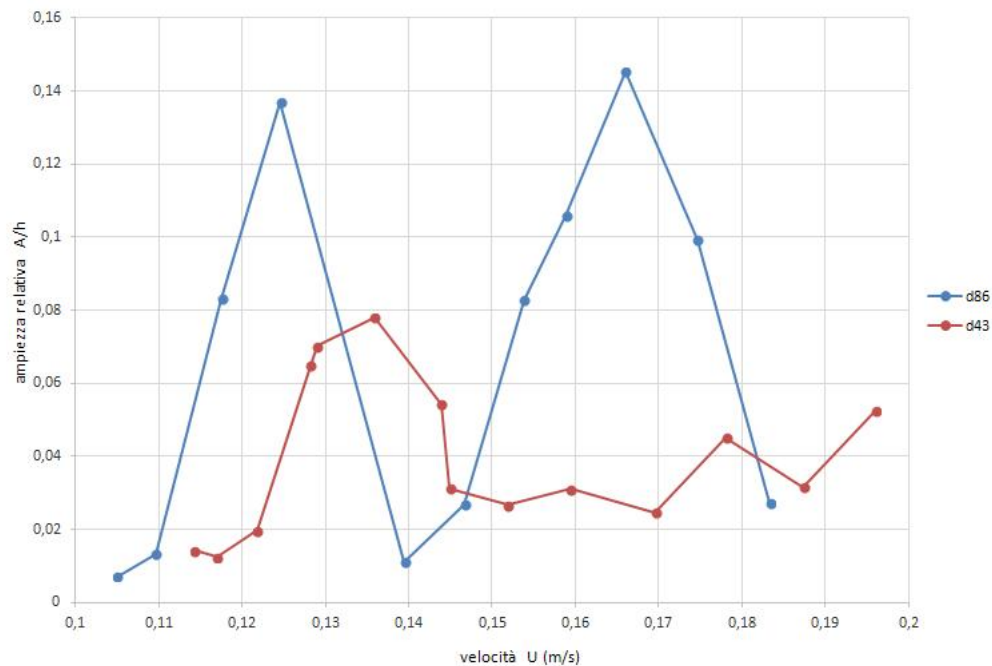


Figura 2.18: Andamento dell'ampiezza relativa  $A/h$  prodotto da schiera con 200 cilindri e da una con 100 cilindri ( $Q = 8$  l/s).

### Cilindri allineati - densità dimezzata

Si è cominciato ad indagare il possibile effetto esercitato dal numero di cilindri presenti nella schiera; nel seguito verranno presentati i risultati degli esperimenti svolti con portata pari a 8 l/s.

In Figura 2.18 sono messe a confronto le ampiezze relative nel caso di massima densità e di densità dimezzata. Quello che risulta evidente è la scomparsa dell'intervallo di risonanza comandato dal secondo numero di Strouhal mentre rimane sempre quello legato al numero di Strouhal del cilindro isolato, sebbene l'intensità del fenomeno appaia ridotta.

Per questo ciclo di prove è stata condotta un'analisi di Fourier sui segnali ottenuti in aggiunta alla consueta elaborazione dei parametri  $a$ ,  $\omega$  e  $k$ . In Figura 2.19 sono riportati gli spettri ottenuti dalla suddetta analisi.

Partendo da condizioni in assenza di oscillazioni e innalzando progressivamente il livello si osserva l'instaurarsi di un'oscillazione a modo 2 con ampiezze veramente

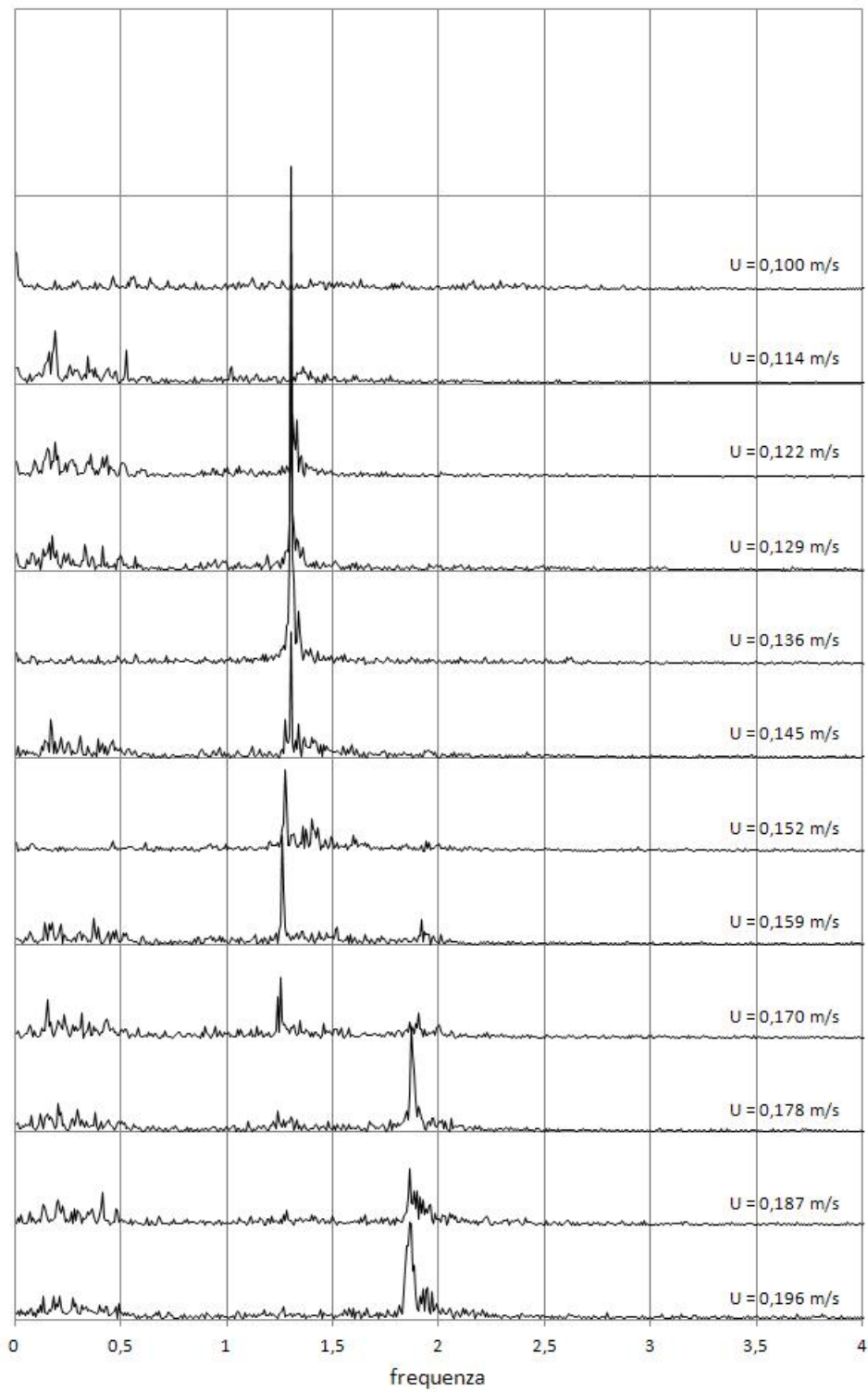


Figura 2.19: Analisi di Fourier sui segnali registrati (prova con portata  $Q = 8$  l/s).

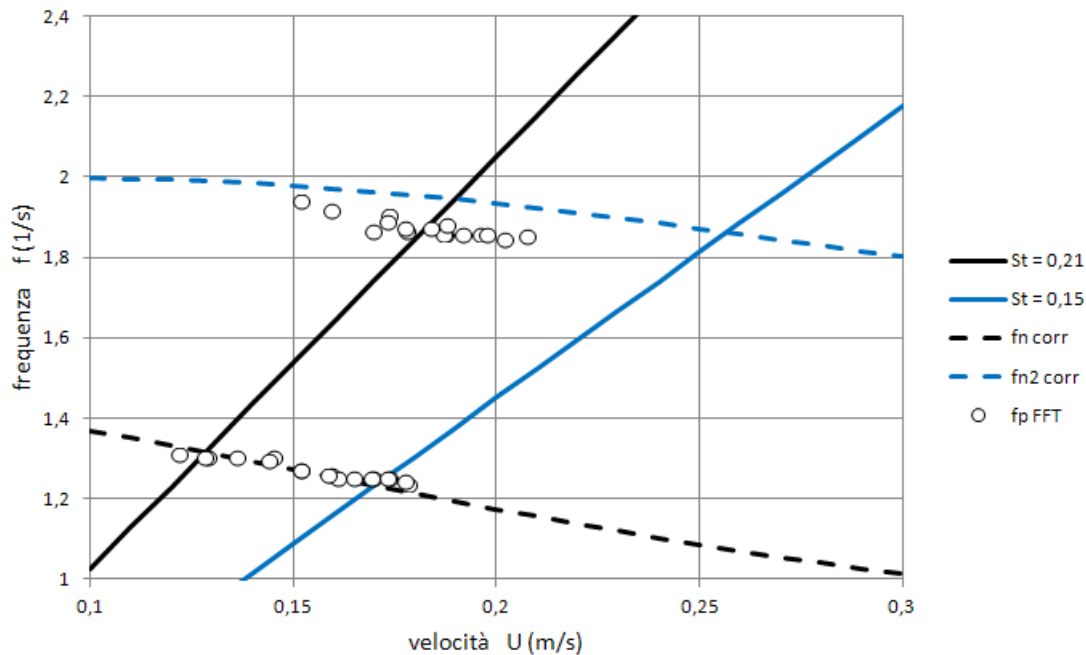


Figura 2.20: Frequenze dei picchi ottenute dall'analisi di Fourier ( $Q = 8$  l/s).

modeste; questo modo di oscillare era chiaramente visibile in canaletta anche se non ben definito in quanto presentava momenti di rinforzo seguiti da momenti di attenuazione. Questa oscillazione a modo 2 permane per un certo intervallo come si vede dagli spettri ( $U = 0,196 - 0,178$  m/s) che presentano un unico picco con frequenza pari circa a 1,85 Hz. Innalzando ancora il livello ( $U = 0,170$  m/s) si osserva il passaggio dell'oscillazione dal modo 2 al modo 1 (ancora con movimenti modesti) e il picco negli spettri si porta su una frequenza circa pari a 1,25 Hz. Continuando a crescere i livelli si assiste ad un intensificarsi del modo 1 fino al momento della risonanza che avviene con velocità  $U = 0,129$  m/s (lo spettro presenta un picco di intensità nettamente superiore a tutti gli altri rappresentati in figura); proseguendo il fenomeno tende rapidamente a sparire.

Le frequenze in corrispondenza dei picchi negli spettri sono state riportate in Figura 2.20; nella stessa figura sono inoltre tracciate le rette relative ai due numeri di Strouhal caratteristici assieme alle curve che descrivono la frequenza naturale di oscillazione sia a modo 1 che a modo 2.

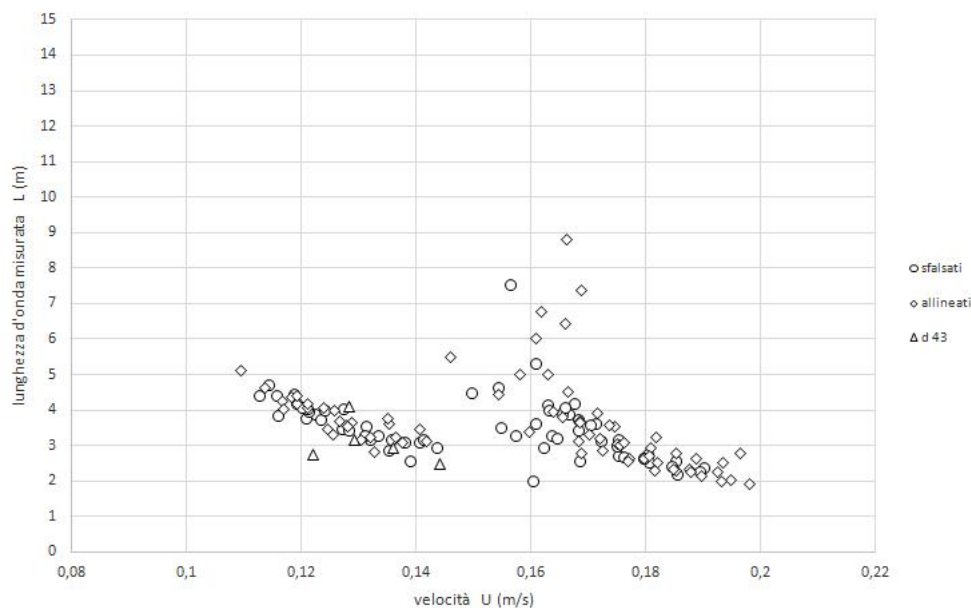


Figura 2.21: Lunghezze d'onda misurate in funzione della velocità  $U$  (sono riportati tutti i dati raccolti durante l'indagine sperimentale).

Da questo grafico si nota chiaramente che l'oscillazione a modo 2 rilevata dall'analisi di Fourier è comandata dal primo numero di Strouhal  $St_1 = 0,205$ ; poi al crescere del livello (quindi riducendo la velocità  $U$ ) compare il modo 1 comandato dal secondo numero di Strouhal come già riscontrato nelle prove precedenti sebbene in questo caso non sia in grado di mandare in risonanza il sistema. Infine la risonanza si raggiunge quando i punti si avvicinano alla retta  $St_1$  e tutto si svolge in accordo a quanto osservato nelle precedenti esperienze.

Ancora, la figura mostra come nel calcolo delle frequenze (curve in tratteggio) la correzione apportata alla teoria delle onde di piccola ampiezza produca valori realistici nel caso di oscillazione a modo 1 mentre i valori sono sovrastimati quando l'oscillazione avviene col modo 2.

Per quanto riguarda l'onda longitudinale, durante la fase a modo 2 e di transizione a modo 1 non è stato possibile acquisire informazioni essendo difficilmente individuabile la sua presenza; una volta instauratosi il modo 1 comandato dal primo numero di Strouhal ed entrati in risonanza le caratteristiche rilevate sembrano in



accordo con gli esperimenti precedenti dato che i punti cadono sempre nella stessa zona, in particolare nel gruppo di sinistra (Fig. 2.21).

Infine si è tentato di adimensionalizzare la lunghezza dell'onda longitudinale andando a ricercare una possibile lunghezza scala che facesse collassare i punti; le possibili lunghezze candidate a tale scopo sono: la profondità della corrente  $h$ , l'interasse  $P$  che caratterizza la disposizione dei cilindri, il diametro  $d$  dei cilindri stessi e la larghezza  $B$  della canaletta.

Adimensionalizzando con la profondità  $h$  i punti tendono a disperdersi e quindi questa lunghezza di riferimento è da scartare; analogamente è da scartare anche l'interasse  $P$  in quanto la Figura 2.21 mostra che la geometria della schiera non ha alcun effetto sull'onda longitudinale. Rimangono valide come alternative il diametro  $d$  e la larghezza  $B$ , che essendo quantità costanti andrebbero semplicemente a riscalarlo il grafico di Figura 2.21; quindi non è possibile definire quale di queste due grandezze sia corretto assumere.



# Capitolo 3

## Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di portare avanti lo studio che riguarda la formazione di una sessa trasversale prodotta da una schiera di cilindri posti in una corrente a superficie libera.

Le indagini sperimentali hanno confermato l'esistenza del fenomeno di risonanza con la formazione di un'onda stazionaria in direzione trasversale al moto; in particolare poi è emerso per la prima volta l'esistenza dei due picchi di ampiezza relativa che segnalano l'esistenza di due frequenze caratteristiche per questo fenomeno.

Le prove condotte hanno inoltre confermato la presenza di un'onda longitudinale progressiva che accompagna sempre la sessa trasversale; per la prima volta si è cercato di studiare quantitativamente le caratteristiche di questa onda. Si è osservato che l'onda risale sempre la corrente e si pensa che sia generata da una sincronizzazione longitudinale imperfetta del distacco dei vortici (quindi non è un disturbo).



# Appendice A

## Dati sperimentali

Le colonne delle tabelle riportano nell'ordine i seguenti valori:

1. picco 1 se alla frequenza di  $St_1$  o picco 2 se alla frequenza di  $St_2$ ;
2. valore medio del tirante;
3. densità dei cilindri ( $86,58 = 200$  cilindri;  $43,29 = 100$  cilindri);
4. portata;
5. velocità media della corrente;
6. frequenza misurata col segnale delle sonde;
7. frequenza naturale della sessa calcolata con la teoria lineare (modo 1);
8. frequenza di Strouhal calcolata con  $St_1 = 0,205$ ;
9. rapporto tra frequenza di Strouhal e frequenza naturale;
10. numero d'onda misurato col segnale delle sonde;
11. lunghezza d'onda calcolata;
12. numero di Froude della corrente;
13. ampiezza relativa nell'intervallo di risonanza.

picco	$h$ (cm)	$n_c$ (1/m <sup>2</sup> )	$Q$ (1/s)	$U$ (m/s)	$f_{mis}$ (1/s)	$f_n$ (1/s)	$f_{St_1}$ (1/s)	$f_{St_1}/f_n$	$k$ (1/m)	$\lambda$ (m)	$F_R$	$A/h$
2	12,355	86,58	8	0,168	1,243	1,245	1,724	1,384	2,421	2,595	0,153	0,109
2	12,949	86,58	8	0,16	1,25	1,261	1,645	1,304	1,725	3,642	0,142	0,166
2	13,485	86,58	8	0,154	1,255	1,274	1,579	1,24	1,343	4,678	0,134	0,118
2	13,907	86,58	8	0,149	1,26	1,283	1,532	1,193	1,395	4,505	0,128	0,062
1	17,223	86,58	8	0,121	1,317	1,34	1,237	0,923	1,652	3,804	0,093	0,069
1	18,227	86,58	8	0,114	1,327	1,353	1,169	0,864	1,322	4,752	0,085	0,05
2	14,419	86,58	10	0,18	1,284	1,294	1,846	1,427	2,266	2,773	0,151	0,087
2	15,192	86,58	10	0,171	1,296	1,309	1,753	1,339	1,717	3,66	0,14	0,166
2	15,614	86,58	10	0,166	1,3	1,316	1,705	1,295	1,602	3,922	0,134	0,151
2	16,175	86,58	10	0,161	1,305	1,325	1,646	1,242	1,174	5,35	0,128	0,113
2	16,811	86,58	10	0,155	1,308	1,335	1,584	1,186	1,775	3,539	0,12	0,092
1	19,167	86,58	10	0,136	1,343	1,363	1,389	1,019	1,96	3,206	0,099	0,108
1	20,428	86,58	10	0,127	1,351	1,374	1,303	0,949	1,543	4,072	0,09	0,136
1	21,249	86,58	10	0,122	1,354	1,38	1,253	0,908	1,606	3,913	0,085	0,094
1	21,926	86,58	10	0,118	1,357	1,384	1,214	0,877	1,398	4,494	0,081	0,067
1	23,1	86,58	10	0,112	1,363	1,391	1,153	0,828	1,418	4,43	0,075	0,01
2	17,15	86,58	12	0,182	1,339	1,339	1,863	1,391	0,33	19,068	0,14	0,106
2	17,124	86,58	12	0,182	1,338	1,339	1,866	1,393	0,364	17,28	0,14	0,108
2	17,13	86,58	12	0,182	1,338	1,339	1,865	1,393	0,341	18,435	0,14	0,105
2	17,128	86,58	12	0,182	1,338	1,339	1,865	1,393	0,354	17,732	0,14	0,105
2	17,832	86,58	12	0,175	1,344	1,348	1,792	1,329	0,377	16,658	0,132	0,169
2	17,813	86,58	12	0,175	1,329	1,348	1,794	1,331	1,965	3,198	0,132	0,157
2	18,546	86,58	12	0,168	1,332	1,356	1,723	1,27	1,813	3,466	0,125	0,13
2	19,157	86,58	12	0,163	1,333	1,363	1,668	1,224	1,499	4,191	0,119	0,091
2	19,835	86,58	12	0,157	1,336	1,369	1,611	1,177	1,888	3,328	0,113	0,08
1	23,772	86,58	12	0,131	1,369	1,395	1,344	0,964	1,753	3,584	0,086	0,12
1	24,585	86,58	12	0,127	1,371	1,398	1,3	0,929	1,785	3,52	0,082	0,103
1	25,749	86,58	12	0,121	1,373	1,403	1,241	0,885	1,57	4,003	0,076	0,088
1	25,806	86,58	12	0,121	1,373	1,403	1,238	0,883	1,544	4,071	0,076	0,09
1	26,972	86,58	12	0,116	1,377	1,406	1,184	0,842	1,415	4,441	0,071	0,031
2	19,16	86,58	14	0,19	1,34	1,363	1,945	1,428	2,612	2,406	0,138	0,049
2	19,705	86,58	14	0,185	1,364	1,368	1,892	1,383	0,387	16,254	0,133	0,114
2	20,49	86,58	14	0,177	1,367	1,374	1,819	1,324	0,337	18,661	0,125	0,151
2	20,909	86,58	14	0,174	1,367	1,377	1,783	1,294	0,288	21,796	0,121	0,154
2	21,727	86,58	14	0,167	1,353	1,383	1,716	1,24	1,493	4,21	0,115	0,088
2	22,256	86,58	14	0,163	1,352	1,386	1,675	1,208	1,901	3,306	0,111	0,049
1	26,231	86,58	14	0,139	1,382	1,404	1,421	1,012	2,4	2,618	0,086	0,054
1	27,607	86,58	14	0,132	1,38	1,408	1,35	0,959	1,962	3,202	0,08	0,09
1	28,4	86,58	14	0,128	1,381	1,41	1,312	0,931	1,819	3,454	0,077	0,088
1	29,504	86,58	14	0,123	1,382	1,412	1,263	0,895	1,66	3,785	0,072	0,077

*Continua nella prossima pagina*

picco	$h$ (cm)	$n_c$ (1/m <sup>2</sup> )	$Q$ (1/s)	$U$ (m/s)	$f_{mis}$ (1/s)	$f_n$ (1/s)	$f_{St_1}$ (1/s)	$f_{St_1}/f_n$	$k$ (1/m)	$\lambda$ (m)	$F_R$	$A/h$
1	30,55	86,58	14	0,119	1,384	1,414	1,22	0,863	1,489	4,221	0,069	0,039
2	22,479	86,58	16	0,185	1,361	1,388	1,895	1,365	2,42	2,596	0,125	0,096
2	23,035	86,58	16	0,18	1,364	1,391	1,849	1,33	2,443	2,572	0,12	0,109
2	23,764	86,58	16	0,175	1,366	1,395	1,793	1,285	2,27	2,768	0,115	0,113
2	24,428	86,58	16	0,17	1,367	1,397	1,744	1,248	1,741	3,609	0,11	0,097
2	25,172	86,58	16	0,165	1,367	1,4	1,692	1,208	1,595	3,938	0,105	0,069
2	25,648	86,58	16	0,162	1,365	1,402	1,661	1,184	2,105	2,985	0,102	0,056
1	29,636	86,58	16	0,14	1,384	1,412	1,437	1,018	2,013	3,122	0,082	0,068
1	30,778	86,58	16	0,135	1,385	1,414	1,384	0,979	2,178	2,885	0,078	0,07
1	31,769	86,58	16	0,131	1,386	1,416	1,341	0,947	1,894	3,318	0,074	0,081
1	33,584	86,58	16	0,124	1,387	1,418	1,268	0,895	1,558	4,034	0,068	0,077
1	34,662	86,58	16	0,12	1,388	1,419	1,229	0,866	1,534	4,095	0,065	0,064
1	35,919	86,58	16	0,116	1,395	1,42	1,186	0,835	1,621	3,875	0,062	0,008
2	25,362	86,58	18	0,184	1,371	1,401	1,89	1,349	2,551	2,463	0,117	0,09
2	26,048	86,58	18	0,179	1,373	1,404	1,84	1,311	2,36	2,662	0,112	0,1
2	26,582	86,58	18	0,176	1,374	1,405	1,803	1,283	2,321	2,707	0,109	0,095
2	27,207	86,58	18	0,172	1,374	1,407	1,761	1,252	1,993	3,153	0,105	0,088
2	27,84	86,58	18	0,168	1,373	1,409	1,721	1,222	1,665	3,773	0,102	0,069
2	28,446	86,58	18	0,164	1,373	1,41	1,685	1,195	1,948	3,225	0,098	0,063
1	32,589	86,58	18	0,143	1,39	1,417	1,47	1,038	2,116	2,97	0,08	0,038
1	33,149	86,58	18	0,141	1,39	1,417	1,446	1,02	1,968	3,193	0,078	0,055
1	33,94	86,58	18	0,138	1,388	1,418	1,412	0,996	2,016	3,117	0,076	0,052
1	35,126	86,58	18	0,133	1,387	1,419	1,364	0,961	1,898	3,311	0,072	0,071
2	27,457	86,58	20	0,189	1,373	1,408	1,939	1,378	2,738	2,295	0,115	0,031
2	28,054	86,58	20	0,185	1,375	1,409	1,898	1,347	2,805	2,24	0,112	0,073
2	28,954	86,58	20	0,179	1,379	1,411	1,839	1,303	2,351	2,673	0,106	0,084
2	29,724	86,58	20	0,175	1,381	1,413	1,791	1,268	2,08	3,021	0,102	0,085
2	31,335	86,58	20	0,166	1,38	1,415	1,699	1,201	1,527	4,114	0,095	0,072
2	31,883	86,58	20	0,163	1,378	1,416	1,67	1,18	1,565	4,016	0,092	0,062
2	32,47	86,58	20	0,16	1,384	1,417	1,64	1,158	3,096	2,029	0,09	0,027
2	33,277	86,58	20	0,156	1,393	1,417	1,6	1,129	0,83	7,571	0,086	0,01

Tabella A.1: Schiera con cilindri sfalsati

picco	$h$ (cm)	$n_c$ (1/m <sup>2</sup> )	$Q$ (1/s)	$U$ (m/s)	$f_{mis}$ (1/s)	$f_n$ (1/s)	$f_{St_1}$ (1/s)	$f_{St_1}/f_n$	$k$ (1/m)	$\lambda$ (m)	$F_R$	$A/h$
2	12,324	86,58	8	0,169	1,233	1,244	1,728	1,389	2,231	2,817	0,153	0,164
2	13,017	86,58	8	0,16	1,244	1,263	1,636	1,296	1,847	3,402	0,141	0,114
2	13,479	86,58	8	0,154	1,252	1,274	1,58	1,241	1,407	4,466	0,134	0,094
2	14,245	86,58	8	0,146	1,261	1,291	1,495	1,159	1,139	5,516	0,123	0,026
1	16,709	86,58	8	0,124	1,316	1,333	1,275	0,956	1,797	3,496	0,097	0,135
1	17,573	86,58	8	0,118	1,32	1,345	1,212	0,901	1,433	4,386	0,09	0,094
1	19,004	86,58	8	0,109	1,331	1,361	1,121	0,823	1,222	5,143	0,08	0,018
2	14,369	86,58	10	0,181	1,281	1,293	1,853	1,433	2,123	2,959	0,152	0,174
2	14,883	86,58	10	0,175	1,287	1,303	1,789	1,373	1,762	3,566	0,144	0,15
2	15,438	86,58	10	0,168	1,293	1,313	1,725	1,313	1,997	3,147	0,137	0,123
2	15,86	86,58	10	0,164	1,298	1,32	1,679	1,271	1,578	3,981	0,131	0,111
2	16,442	86,58	10	0,158	1,304	1,329	1,619	1,218	1,25	5,026	0,124	0,079
1	20,719	86,58	10	0,125	1,351	1,376	1,285	0,934	1,881	3,34	0,088	0,109
1	21,828	86,58	10	0,119	1,356	1,384	1,22	0,881	1,494	4,206	0,081	0,096
1	22,863	86,58	10	0,114	1,36	1,39	1,164	0,838	1,351	4,651	0,076	0,024
2	16,123	86,58	12	0,193	1,308	1,325	1,982	1,496	2,466	2,548	0,154	0,099
2	17,169	86,58	12	0,182	1,32	1,34	1,861	1,389	1,937	3,243	0,14	0,141
2	17,824	86,58	12	0,175	1,323	1,348	1,792	1,33	2,046	3,072	0,132	0,125
2	18,332	86,58	12	0,17	1,326	1,354	1,743	1,287	1,88	3,343	0,127	0,104
2	18,756	86,58	12	0,166	1,33	1,358	1,703	1,254	1,386	4,535	0,123	0,087
2	19,139	86,58	12	0,163	1,326	1,362	1,669	1,225	1,252	5,018	0,119	0,038
1	21,998	86,58	12	0,142	1,369	1,385	1,452	1,049	1,993	3,153	0,096	0,018
1	23,057	86,58	12	0,135	1,367	1,391	1,386	0,996	1,736	3,619	0,09	0,129
1	23,915	86,58	12	0,13	1,369	1,395	1,336	0,957	1,971	3,188	0,085	0,105
1	24,633	86,58	12	0,127	1,371	1,398	1,297	0,928	1,698	3,701	0,081	0,111
1	26,166	86,58	12	0,119	1,373	1,404	1,221	0,87	1,427	4,404	0,074	0,066
2	18,519	86,58	14	0,196	1,335	1,356	2,013	1,484	2,241	2,803	0,146	0,094
2	19,291	86,58	14	0,188	1,34	1,364	1,932	1,417	2,37	2,651	0,137	0,138
2	19,645	86,58	14	0,185	1,341	1,367	1,897	1,388	2,251	2,791	0,133	0,132
2	20,256	86,58	14	0,18	1,343	1,372	1,84	1,341	2,369	2,653	0,127	0,113
2	20,732	86,58	14	0,175	1,346	1,376	1,798	1,306	2,077	3,025	0,123	0,095
2	21,216	86,58	14	0,171	1,349	1,38	1,757	1,273	1,603	3,921	0,119	0,077
2	21,886	86,58	14	0,166	1,358	1,384	1,703	1,23	0,712	8,824	0,113	0,028
1	25,897	86,58	14	0,14	1,378	1,403	1,439	1,026	1,806	3,48	0,088	0,109
1	26,943	86,58	14	0,135	1,38	1,406	1,383	0,984	1,666	3,772	0,083	0,108
1	28,245	86,58	14	0,129	1,381	1,41	1,32	0,936	1,71	3,675	0,077	0,1
1	28,956	86,58	14	0,126	1,381	1,411	1,287	0,912	1,568	4,006	0,075	0,095
1	30,056	86,58	14	0,121	1,382	1,413	1,24	0,878	1,546	4,063	0,07	0,067
1	31,227	86,58	14	0,116	1,387	1,415	1,194	0,844	1,474	4,261	0,067	0,012
2	21,604	86,58	16	0,192	1,354	1,382	1,972	1,426	2,754	2,282	0,132	0,112

*Continua nella prossima pagina*



picco	$h$ (cm)	$n_c$ (1/m <sup>2</sup> )	$Q$ (1/s)	$U$ (m/s)	$f_{mis}$ (1/s)	$f_n$ (1/s)	$f_{St_1}$ (1/s)	$f_{St_1}/f_n$	$k$ (1/m)	$\lambda$ (m)	$F_R$	$A/h$
2	22,162	86,58	16	0,188	1,357	1,386	1,922	1,387	2,667	2,356	0,127	0,122
2	22,863	86,58	16	0,182	1,358	1,39	1,863	1,34	2,494	2,519	0,121	0,11
2	23,486	86,58	16	0,177	1,36	1,393	1,814	1,302	2,364	2,657	0,117	0,095
2	24,168	86,58	16	0,172	1,362	1,396	1,763	1,262	1,96	3,205	0,112	0,078
2	24,682	86,58	16	0,168	1,362	1,399	1,726	1,234	1,7	3,696	0,108	0,056
1	30,491	86,58	16	0,136	1,385	1,414	1,397	0,988	1,924	3,265	0,079	0,091
1	31,355	86,58	16	0,133	1,386	1,415	1,359	0,96	2,205	2,849	0,076	0,073
1	32,571	86,58	16	0,128	1,386	1,417	1,308	0,923	1,748	3,595	0,071	0,084
1	33,573	86,58	16	0,124	1,386	1,418	1,269	0,895	1,545	4,066	0,068	0,079
1	34,339	86,58	16	0,121	1,386	1,418	1,24	0,875	1,504	4,179	0,066	0,066
1	35,614	86,58	16	0,117	1,391	1,419	1,196	0,843	1,559	4,03	0,062	0,012
2	24,024	86,58	18	0,195	1,364	1,396	1,995	1,429	3,067	2,049	0,127	0,086
2	24,678	86,58	18	0,189	1,366	1,399	1,942	1,389	2,906	2,162	0,122	0,103
2	25,264	86,58	18	0,185	1,367	1,401	1,897	1,354	2,73	2,302	0,118	0,102
2	25,772	86,58	18	0,181	1,368	1,403	1,859	1,326	2,707	2,321	0,114	0,097
2	26,456	86,58	18	0,177	1,368	1,405	1,811	1,289	2,441	2,574	0,11	0,087
2	27,118	86,58	18	0,172	1,369	1,407	1,767	1,256	2,183	2,878	0,106	0,07
2	27,783	86,58	18	0,168	1,37	1,408	1,725	1,225	1,715	3,663	0,102	0,054
2	28,273	86,58	18	0,165	1,371	1,41	1,695	1,202	1,65	3,807	0,099	0,042
2	29,104	86,58	18	0,161	1,379	1,411	1,647	1,167	1,042	6,028	0,095	0,015
1	34,007	86,58	18	0,137	1,388	1,418	1,409	0,994	2,027	3,1	0,075	0,08
1	35,469	86,58	18	0,132	1,388	1,419	1,351	0,952	1,942	3,236	0,071	0,075
1	36,561	86,58	18	0,128	1,388	1,42	1,311	0,923	1,778	3,534	0,068	0,068
2	26,247	86,58	20	0,198	1,369	1,404	2,029	1,445	3,255	1,93	0,123	0,074
2	26,922	86,58	20	0,193	1,371	1,406	1,978	1,406	3,113	2,019	0,119	0,093
2	27,683	86,58	20	0,188	1,372	1,408	1,923	1,366	2,744	2,29	0,114	0,091
2	28,118	86,58	20	0,185	1,372	1,409	1,894	1,344	2,668	2,355	0,111	0,089
2	28,781	86,58	20	0,18	1,374	1,411	1,85	1,311	2,296	2,737	0,107	0,084
2	29,492	86,58	20	0,176	1,375	1,412	1,805	1,279	2,017	3,115	0,104	0,073
2	29,923	86,58	20	0,174	1,376	1,413	1,779	1,259	1,756	3,577	0,101	0,069
2	30,788	86,58	20	0,169	1,381	1,414	1,729	1,223	0,851	7,386	0,097	0,046
2	31,348	86,58	20	0,166	1,381	1,415	1,699	1,2	0,973	6,458	0,095	0,032
2	32,148	86,58	20	0,162	1,384	1,416	1,656	1,17	0,925	6,792	0,091	0,015
1	14,444	43,29	8	0,144	1,3	1,295	1,475	1,139	2,509	2,505	0,121	0,054
1	15,297	43,29	8	0,136	1,306	1,311	1,392	1,062	2,139	2,937	0,111	0,078
1	16,106	43,29	8	0,129	1,304	1,324	1,322	0,999	1,98	3,173	0,103	0,07
1	16,213	43,29	8	0,128	1,304	1,326	1,314	0,991	1,525	4,119	0,102	0,065
1	17,06	43,29	8	0,122	1,313	1,338	1,248	0,933	2,276	2,76	0,094	0,02

Tabella A.2: Schiera con cilindri allineati



# Bibliografia

- [1] Defina A. and Pradella I. “Vortex induced cross-flow seiching in cylinder arrays”, *Advances in Water Resources*, 2014, 71, 140–148.
- [2] Falvey, H. T. “Discussion of Wave Generation in Open Channels by Vortex Shedding from Channel Obstructions by Laura Zima and Norbert Ackermann”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129, 919.
- [3] Ghomeshi, M., Mortazavi-Dorcheh S. A., and Falconer R. “Amplitude of Wave Formation by Vortex Shedding in Open Channels”, *Journal of Applied Sciences*, 2007, 7, 3927–3934.
- [4] Jafari, A., Ghomeshi M., Bina M., and Kashefipour S.M. “Experimental study on ten modes of transverse waves due to vertical cylinders in open channels”, *Journal Food Agric. Environ.*, 2010, 8, 949–955.
- [5] Norbert, C. “Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements”, *Journal of Fluids and Structures*, 2003, 17, 57–96
- [6] Oengören, A. and Ziada S. “Vorticity shedding and acoustic resonance in an in-line tube bundle. Part II: acoustic resonance”, *Journal of Fluids and Structures*, 1992, 6, 293–309.
- [7] Oengören, A. and Ziada S. “An in-depth study of vortex shedding, acoustic resonance and turbulent forces in normal triangle tube arrays”, *Journal of Fluids and Structures*, 1998, 12, 717–758.

- [8] Williamson, C.H.K. and Govardhan R. “Vortex-induced vibrations”, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2004, 36, 413–455.
- [9] Williamson, C.H.K. and Govardhan R. “A brief review of recent results in vortex-induced vibrations”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96, 713–735.
- [10] Zhao K., Cheng N.S., Huang Z. “Experimental study of free-surface fluctuations in open-channel flow in the presence of periodic cylinder arrays”, *Journal of Hydraulic Research*, 2014, 52, 465–475.
- [11] Ziada, S. and Oengören A. “Vorticity shedding in an in-line tube bundle with large tube spacings”, *Journal of Fluids and Structures*, 1993, 14, 197–219.
- [12] Ziada, S. and Oengören A. “Flow periodicity and acoustic resonance in parallel triangle tube bundles”, *Journal of Fluids and Structures*, 2000, 7, 661–687.
- [13] Zima, L., and Ackermann N. L. “Wave Generation in Open Channels by Vortex Shedding from Channel Obstructions”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 128, 596–603.