

**POLITECNICO DI MILANO**  
Facoltà di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Aeronautica



**ANALISI SPERIMENTALE DELL'INIEZIONE DI UN GETTO  
IN UN FLUSSO TRASVERSO IN UN CONDOTTO MEDIANTE  
TECNICHE OTTICHE ED ANEMOMETRICHE**

Relatore: Prof. Aldo S. Coghe

Tesi di Laurea di:

Claudio GALBIATI

Matr. 754896

Ottobre 2012

Anno Accademico 2011 - 2012



*La scienza non è nient'altro che una perversione se non ha come suo fine ultimo  
il miglioramento delle condizioni dell'umanità.*

*Nikola Tesla*





The author wish to acknowledge Wang Hua for  
the supplied data and precious collaboration.



Molte incredibili persone mi hanno aiutato e sostenuto durante lo sviluppo di questa tesi. A tutte loro va il mio pensiero e il mio sincero ringraziamento al termine di questo lungo percorso.

In primo luogo vorrei ricordare il Prof. Aldo Coghe per avermi permesso questa esperienza ed essermi stato accanto durante il suo svolgimento insegnandomi ad inseguire giorno per giorno un risultato sempre migliore. Grazie per aver creduto nelle mie capacità e nelle mie idee. Un grazie anche ai Prof. Lucio Araneo per la disponibilità a risolvere gli eventuali problemi tecnici riscontrati durante gli esperimenti in laboratorio e per le esaurienti spiegazioni del funzionamento degli apparati sperimentali.

Un grazie particolare va poi a Hua, con il quale ho condiviso e portato avanti gli esperimenti. Grazie per aver reso ogni giorno in laboratorio un'esperienza nuova ed entusiasmante, arricchendo il mio bagaglio personale d'esperienza personale e scientifica.

Un ringraziamento speciale va anche a tutti gli amici del corso di studi, Miriam, Gabri, Andrea, Carlo, Laura, Jho, Ema, Davide e tutti gli altri. Questi anni in università non sarebbero stati lo stesso senza di voi, e vi ringrazio per avermi sempre sostenuto ed aiutato quando più ne avevo bisogno. Grazie per avermi fatto ridere e divertire durante le troppo brevi pause pranzo accompagnate con le discussioni più stravaganti o ai giochi da tavolo più spartani.

Un ringraziamento molto speciale va a Miriam, la quale più di tutti ha mi spinto sempre più a migliorarmi fino a farmi diventare quello che sono oggi. Tu più di tutti sei riuscita a rendere questi anni indimenticabili. Grazie per tutto l'aiuto che mi hai dato, per tutto il tempo passato insieme e per il sostegno che sei riuscita a darmi. Grazie per aver continuato ogni giorno a credere in me ed a spingermi sempre più farlo.

Infine, il ringraziamento più grande va alla mia famiglia, ai miei genitori Giuliana e Giuseppe che mi hanno sempre sostenuto, ed i quali mi hanno insegnato a non arrendermi mai ed a perseguire i miei obiettivi. Grazie a mia sorella Silvia che mi ha sempre sostenuto nello studio. Un grazie va anche alle mie nonne Emilia e Teresina, le quali mi hanno sopportato e sostenuto, facendomi apprezzare la ricerca e lo studio. Grazie per tutto il bene che mi volete.

A tutti voi, amici, io dedico questo lavoro.



# Sommario

---

---

In questo lavoro di tesi verranno mostrati i risultati relativi ad un'attività sperimentale atta a caratterizzare l'interazione tra un getto iniettato in un flusso trasverso, in un dominio di prova fortemente vincolato. Le dimensioni ristrette della camera di prova, porta ad una precoce interazione con le pareti da parte del getto, influenzando l'evoluzione libera del getto e processi di mescolamento tra i due flussi. I parametri principali che caratterizzano questo tipo di fenomeno sono rappresentati dal rapporto dei flussi di quantità di moto ( $R$ ) tra il getto ed il flusso trasverso, ed il numero di Reynolds. Essi infatti permettono di valutare rispettivamente il grado di penetrazione del getto ed il livello di turbolenza che caratterizza il fenomeno, ed il loro intervallo di variazione è compreso tra 0.99 e 11.84 per quanto riguarda  $R$ , mentre il numero di Reynolds è compreso tra 366 e 2200.

Al fine di caratterizzare come avvenga l'interazione tra i due flussi in una geometria così piccola, sono state effettuate prima delle visualizzazioni del getto nel momento in cui viene iniettato all'interno del flusso trasverso, e successivamente sono state effettuate delle misure quantitative utilizzando un anemometro a filo caldo e un sistema di misura LDV.

Le visualizzazioni del getto sono state effettuate tramite la tecnica Schlieren, la quale ha messo in evidenza come il getto interagisce con le pareti della camera di prova, e di conseguenza come esso venga deflesso lungo la direzione di moto del flusso trasverso. L'analisi di queste immagini è stata effettuata mediante un software sviluppato durante il lavoro di tesi, il quale è stato in grado di elaborare adeguatamente le foto acquisite durante gli esperimenti, per poi individuare il getto e le sue caratteristiche (deflessione e interazione con le pareti). In seguito tutte queste informazioni sono state utilizzate per classificare l'evoluzione del getto al variare delle condizioni operative.

Le misure anemometriche sono state condotte in prossimità della sezione d'uscita del condotto con l'ausilio di un anemometro a filo caldo, mentre all'interno del condotto, le misure sono state effettuate con il sistema ottico di misura LDV. Queste due tecniche permettono di valutare più precisamente quanto già osservato con le visualizzazioni Schlieren, permettendo però di mettere in evidenza con maggiore precisione l'interazione tra i due flussi, e di conseguenza anche il loro grado di mescolamento.

*Parole Chiave: Flusso Trasverso, Geometria Piccola, Elaborazione Immagini, Anemometria*



# Abstract

---

---

This job will show the results of an experimental activity suited to identify the characteristics of a jet injected into a cross-flow in a small wind tunnel. The small size of the experimental setup leads the jet to an early interaction with the wall. This influences its free evolution and the mixing process between the two flows. The most important parameters used to describe this phenomenon are the momentum ratio and the Reynolds number: the first one represents the jet penetration rate ranging from 0.99 to 11.84, while the second one characterizes the turbulence level ranging from 366 to 2200.

In order to study the evolution and the interaction between the flows, three different kinds of experiments were carried out: Schlieren visualizations, anemometric measurements with hot wire, and LDV system.

The Schlieren technique allows to visualize how the jet interacts with the wall of the wind tunnel and how its deflection changes along the cross-flow direction. These pictures were elaborated with a dedicated software developed during this thesis job. It removes the noise from the pictures and identifies the jet with its characteristics. These allows to classify the jet's evolution in different operative conditions.

The anemometric measurements were carried out on the exit section of the wind tunnel with an hot wire probe, and inside the wind tunnel by means of an LDV system. These techniques allows to improve the information achieved on the first step by means of Schlieren visualizations and complete them with quantitative data.

*Keys Words: Cross-Flow, Small Wind Tunnel, Image Processing, Anemometry*





---

# Indice

---

---

Sommario

Abstract

Indice .....	I
Indice delle Figure.....	V
Indice delle Tabelle .....	XIII
1. Introduzione.....	1
1.1. Motivazioni.....	1
1.2. Obiettivi.....	4
1.3. Piano di presentazione.....	4
2. Stato dell'Arte .....	7
2.1. Inquadramento del fenomeno .....	7
2.2. Deflessione del getto .....	10
2.3. Entrainment .....	14
2.4. Vortici.....	16
2.5. Turbolenza.....	23
2.6. Analisi Numerica.....	26
2.7. Obiettivi.....	29
3. Linea Sperimentale.....	31
3.1. La Camera di Prova .....	31
3.2. Tipi di gas utilizzati .....	36
3.3. La tecnica Schlieren .....	37
3.3.1. Cenni teorici .....	37

3.3.2. Configurazione sperimentale utilizzata .....	40
3.4. Anemometria a filo caldo.....	43
3.4.1. Cenni teorici.....	43
3.4.2. Configurazione sperimentale utilizzata .....	46
3.5. Laser Doppler Velocimetry.....	48
3.5.1. Cenni teorici.....	48
3.5.2. Configurazione sperimentale utilizzata .....	57
4. Analisi delle immagini.....	65
4.1. Riconoscimento del getto.....	65
4.2. Valutazione dei vortici .....	83
4.3. Elaborazione dei dati.....	88
4.4. Evoluzione del getto .....	96
4.5. Contatto del getto .....	100
4.6. Deflessione del getto.....	103
4.7. Proprietà di mescolamento.....	106
5. Analisi delle misure anemometriche .....	109
5.1. Processo di determinazione delle scale temporali.....	110
5.2. Misure anemometriche effettuate tramite sonda a filo caldo.....	111
5.3. Campo di moto.....	119
5.4. Altre Considerazioni Fluidodinamiche .....	130
6. Conclusioni e sviluppi futuri .....	135
Bibliografia.....	141
Appendice A.....	143
Appendice B .....	145
Appendice C .....	147
Appendice D.....	149
Appendice E.....	157

Appendice F ..... 161

Lista dei Simboli ..... 165



---

# Indice delle Figure

---

Figura 1.1: Visualizzazione di un getto iniettato perpendicolarmente nel flusso principale [1].	1
Figura 1.2: Camera di combustione di un motore aeronautico (figura <i>a</i> ); paletta di un uno stadio di alta pressione di una turbina del motore aeronautico CFM56 (figura <i>b</i> ).	2
Figura 1.3: Visualizzazione del flusso uscente dai motori del velivolo Harrier durante una simulazione di volo in hovering.	3
Figura 2.1: Descrizione del getto dopo la sua penetrazione nel flusso trasverso [2].	8
Figura 2.2: Sistema di riferimento dell'esperimento condotto da Keffer e Baines [3]. Il centro degli assi è posizionato in corrispondenza del centro dell'ugello.	9
Figura 2.3: Linea centrale getto ricavata da Keffer e Baines [3]: andamento della linea centrale del getto (figura a sinistra); andamento della linea centrale del getto normalizzata rispetto ad $R^2$ (figura a destra).	11
Figura 2.4: Andamento della linea centrale del getto misurata da Kamotani e Greber [5] per $R = 4$ .	12
Figura 2.5: Andamento della linea centrale del getto misurata da Kamotani e Greber [5] per $R = 8$ .	12
Figura 2.6: Visualizzazione della interazione tra il getto ed il flusso trasverso effettuata da Margason [4] per un valore di $R$ pari a 5.07.	13
Figura 2.7: Andamento del coefficiente di trascinamento $E$ lungo la linea centrale del getto [3].	15
Figura 2.8: Visualizzazione di tutte le strutture vorticose analizzate [1].	16
Figura 2.9: Interpretazione di Kelso, ed altri [1], del vortice in Hovering a $Re = 940$ e $R = 2.3$ ; a sinistra è possibile osservare una visione laterale del flusso sulla parte anteriore del getto; a destra è presente una taglio della vista prospettica del getto.	17
Figura 2.10: Visione dei vortici anulari presenti sulla superficie del getto [1].	18

**Figura 2.11: Ri-orientamento della vorticità di mescolamento che porta alla deflessione della superficie cilindrica vorticoso [1]..... 19**

**Figura 2.12: Vista isometrica dell’interpretazione di Kelso ed altri [1] sull’interazione tra il piegamento del getto ed i vortici anulari, mostrando come questi si pieghino per convezione nella parte posteriore all’iniezione del getto..... 20**

**Figura 2.13: Visualizzazione del sistema di vortici a ferro di cavallo con  $Re = 1600$  ed  $R = 2.2$  [1]. ..... 21**

**Figura 2.14: Traiettoria dei vortici a ferro di cavallo per valori di  $Re$  bassi [1]..... 22**

**Figura 2.15: Schema riassuntivo della produzione dei diversi sistemi di vortici presenti nell’iniezione di un getto in un flusso trasverso, al variare sia di  $R$  che di  $Re$ . Nota 1: Produzione di vortici verticali più regolare per valori di  $R \approx 4$ ; Nota 3: Si veda Lim, Kelso & Perry [7]. ..... 23**

**Figura 2.16: Visualizzazione, tramite traccianti, del flusso per un valore di  $R = 4$ . Le due figure mostrano i risultati per differenti valori del numero di Reynolds [1]...... 24**

**Figura 2.17: Curve di livello dell’intensità turbolenta del flusso  $u2U_{cf}$ ; la percentuale di errore sul valore è indicato tra parentesi [11]. ..... 24**

**Figura 2.18: Profili di energia cinetica turbolenta per  $R = 0.5$  a  $z/D = 0$  (a) e  $z/D = -0.5$  (b). ..... 25**

**Figura 2.19: Doppia mappa bidimensionale della componente di velocità  $U/U_{cf}$ , e dello sforzo di Reynolds lungo le due componenti  $u'$  e  $v'$ . La parte superiore di ogni immagine rappresenta il risultato ottenuto con una mesh fine, mentre quella inferiore con una mesh lasca [14]...... 27**

**Figura 2.20: Visualizzazione delle strutture vorticoso tramite simulazione numerica [9]. ..... 28**

**Figura 3.1: CAD del condotto di prova e relativa messa in tavola con quotatura; l’unità di misura utilizzata è mm. .... 32**

**Figura 3.2: Messa in tavola del pannello su cui viene applicato l’ugello di iniezione del getto; l’unità di misura utilizzata è mm. .... 33**

**Figura 3.3: Direzione d’inclinazione del getto iniettato nel flusso trasverso per alcuni esperimenti. .... 34**

**Figura 3.4: Profilo di velocità e della deviazione standard normalizzati rispetto alla velocità asintotica, al variare dalla distanza dalla parete..... 35**

**Figura 3.5: Configurazione della tecnica Schlieren [15]. ..... 37**

<b>Figura 3.6: Configurazione della tecnica Schlieren con l'ausilio di specchi [15].</b>	<b>39</b>
<b>Figura 3.7: Schema logico della linea sperimentale per la visualizzazione del getto tramite tecnica Schlieren.</b>	<b>41</b>
<b>Figura 3.8: Esempio di background per l'elaborazione delle immagini visualizzanti il flusso.</b>	<b>42</b>
<b>Figura 3.9: Visualizzazione del flusso mediante tecnica Schlieren per un valore di <math>R = 5.92</math> e</b>	<b>42</b>
<b>Figura 3.10: Struttura dell'anemometro a filo caldo [16].</b>	<b>43</b>
<b>Figura 3.11: Schema logico della linea sperimentale per le misure effettuate tramite anemometro a filo caldo.</b>	<b>47</b>
<b>Figura 3.12: Griglia equispaziata dei punti di misura effettuata con l'anemometro a filo caldo; in blu il contorno del dominio, in rosso e verde gli assi della geometria. I punti di analisi sono posti all'intersezione delle linee nere.</b>	<b>48</b>
<b>Figura 3.13: Frange d'interferenza nel volume di misura di un anemometro laser Doppler [16].</b>	<b>49</b>
<b>Figura 3.14: Schema vettoriale dell'anemometro laser Doppler [16].</b>	<b>50</b>
<b>Figura 3.15: Anemometro laser Doppler di tipo differenziale con ricezione all'indietro [16].</b>	<b>52</b>
<b>Figura 3.16: Schema delle velocità relative tra particella e frange (immagine a sinistra) e correzione dell'ambiguità direzionale (immagine a destra) [16].</b>	<b>53</b>
<b>Figura 3.17: Segnale acquisito da un sistema di misura LDV [16].</b>	<b>55</b>
<b>Figura 3.18: Andamento del segnale di velocità nel tempo con il relativo campionamento ed il mantenimento per ogni intervallo di tempo <math>\Delta t</math>.</b>	<b>56</b>
<b>Figura 3.19: Linea sperimentale per le misure effettuate tramite tecnica LDV.</b>	<b>57</b>
<b>Figura 3.20: Direzione e verso delle componenti misurate dal sistema LDV nelle due configurazioni di misura.</b>	<b>58</b>
<b>Figura 3.21: Configurazione I di misura con il sistema di misura LDV.</b>	<b>59</b>
<b>Figura 3.22: Configurazione II con il sistema di misura LDV.</b>	<b>60</b>
<b>Figura 3.23: Configurazione I ruotata per effettuare le misure in prossimità della parete di iniezione del getto.</b>	<b>61</b>
<b>Figura 3.24: Dimensioni del volume di prova del sistema di misura LDV [16].</b>	<b>62</b>

**Figura 3.25:** Sezione normale del condotto di prova; in verde viene evidenziata la regione di misura..... 63

**Figura 4.1:** Processing dell'immagine dello sfondo per la determinazione dell'area d'indagine: immagine di sfondo mediata (a); apertura dell'immagine e conseguente binarizzazione inversa (b); immagine dello sfondo tagliata in corrispondenza dei limiti del condotto (c)..... 67

**Figura 4.2:** Differenza (a) e differenza assoluta (b) tra una singola foto e la media dello sfondo. .... 68

**Figura 4.3:** Istogramma dell'immagine (b) in Figura 4.2. .... 71

**Figura 4.4:** Integrale dell'istogramma mostrato in Figura 4.3..... 71

**Figura 4.5:** Algoritmo per la determinazione del parametro  $R^2$  per ogni livello d'intensità luminosa associata ad un esperimento. .... 73

**Figura 4.6:** Algoritmo per la ricerca del livello di sogliatura da utilizzare per la pulizia delle immagini; il risultato viene mostrato nel grafico in cui viene visualizzato l'andamento del valore medio e della deviazione di  $R^2$  al variare dell'intensità luminosa per tutti le condizioni operative indagate.. 74

**Figura 4.7:** Visualizzazione delle componenti eliminate. .... 75

**Figura 4.8:** Esempio di applicazione di un filtro mediano. Nell'immagine di sinistra è possibile osservare che l'immagine è ricca di punti che rappresentano rumore; la figura a destra invece è stata ottenuta a partire dall'immagine di sinistra a cui è stato applicato un filtro mediano..... 76

**Figura 4.9:** Immagini relative al processo di pulitura; modulo della differenza tra l'immagine e lo sfondo (a), sogliatura (b) e filtraggio degli spot luminosi rumorosi (c). .... 77

**Figura 4.10:** Chiusura dell'immagine ottenuta dal processo di pulitura. ... 78

**Figura 4.11:** Regione del getto determinata alla fine del processo di elaborazione (a) e sovrapposizione tra il contorno del getto appena evidenziato con l'immagine di partenza dell'elaborazione (b) (immagine (b) mostrata in Figura 4.2)..... 80

**Figura 4.12:** Andamento della correzione gamma di un tubo catodico..... 81

**Figura 4.13:** Processo di elaborazione di ogni singola immagine *Schlieren*; il termine  $I_{11}$  fa riferimento al valore dell'integrale dell'istogramma associato all'esperimento per la determinazione del livello di *thresholding*, mentre il  $\gamma$  è il parametro definito dall'utente per la correzione gamma..... 82

**Figura 4.18:** visualizzazione delle strutture vorticosose per due esperimenti differenti: (a)  $R = 1.97$  e  $Re = 738$ ; (b)  $R = 2.96$  e  $Re = 738$ . Le linee verdi



mettono in evidenza il bordo esterno del vortice, mentre il punto rosso identifica il suo centro.....83

Figura 4.19: visualizzazione delle strutture vorticose per  $R = 2.07$  e  $Re = 1600$ . Le linee verdi mettono in evidenza il bordo esterno del vortice, mentre il punto rosso identifica il suo centro; la linea bianca mostra il contorno del getto.....84

Figura 4.20: Posizione dei centri dei vortici per i casi mostrati in Figura 4.18 ed in Figura 4.19. Il primo punto di ogni curva rappresenta la posizione dell'estremo anteriore dell'ugello d'iniezione e non il centro di un vortice.....85

Figura 4.21: Dati sperimentali adimensionalizzati e relativa curva interpolante.....86

Figura 4.22: Andamento delle distanze dei centri dei vortici lungo le due componenti ( $x$  e  $z$ ), e distanza totale in modulo tra i centri dei vortici ( $dv$ ).87

Figura 4.23: Posizione dei centri mostrati per i casi mostrati in Figura 2.15 (foto a sinistra), in Figura 4.18 ed in Figura 4.19; tutte le posizioni sono state adimensionalizzate rispetto al diametro dell'ugello d'iniezione utilizzato durante i diversi esperimenti.....88

Figura 4.14: Visualizzazione della distinzione tra le possibili evoluzioni del getto all'interno del condotto. ....90

Figura 4.15: Esempio per la determinazione delle due linee centrali: le linee nere rappresentano il dominio di misura, quelle celesti il perimetro del getto, la verde è la linea centrale I mentre quella rossa è la linea centrale II. Le linee tratteggiate blu e viola rappresentano le rette rispettivamente con  $z = cost = z$  e  $x = cost = x$ . ....91

Figura 4.16: Algoritmo di identificazione della tipologia evolutiva del getto. Il termine  $h$  nei primi due rombi di decisione fanno riferimento alla distanza tra le due pareti visualizzati nelle foto. ....94

Figura 4.17: Linea media del getto lungo la direzione  $x$  e  $z$  (linea tratteggiata verde e rossa) e punto lungo  $z$  dove avviene il contatto con le pareti del condotto (linee tratteggiate arancio e blu) per un caso con  $R = 2.47$  e  $Re = 732.66$ . ....95

Figura 4.24: Esperimenti effettuati con la suddivisione in funzione della tipologia evidenziata.....96

Figura 4.25 Suddivisione delle tipologie trovate in funzione del grado di penetrazione.....98

<b>Figura 4.26: Distanza del contatto tra il getto e la parete opposta a quella d'iniezione per la tipologia III e V.....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 4.27: Distanza dei contatti con la parete posta dal lato d'iniezione per la tipologia V.....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 4.28: Confronto tra le linee centrali del getto misurate sperimentalmente e quelle ottenute da Keffer e Baines [3] (indicate con la sigla KB). .....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 4.29: Andamento della linea centrale del getto per il caso con <math>R = 2.47</math> e <math>Re = 732.66</math>.....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 4.30: Regressione delle linee centrali al variare del parametro <math>R</math>; i termini <math>X</math> e <math>Z</math> nella legenda sono pari rispettivamente a <math>x/(D \cdot R)</math> ed a <math>z/(D \cdot R)</math>.....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 4.31: Sovrapposizione delle regressioni delle curve sperimentali precedentemente mostrate (linee in scala di grigi) con il relativo collasso statistico (linea rossa); i termini <math>X</math> e <math>Z</math> nella legenda sono pari rispettivamente a <math>x/(D \cdot R)</math> ed a <math>z/(D \cdot R)</math>.....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 4.32: Visualizzazione delle immagini elaborate per le tipologie II, IV, VI e VII. ....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 5.1: Andamento del valore medio della scala temporali al variare della tipologia evolutiva del getto. ....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 5.2: Andamento della deviazione standard della scala temporali al variare della tipologia evolutiva del getto.....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 5.3 Andamento del valore medio della scala spaziale al variare della tipologia evolutiva del getto. ....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 5.4: Andamento dell'energia cinetica turbolenza normalizzata rispetto al moto medio del flusso trasverso, al variare della tipologia evolutiva del getto. ....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 5.5: Andamento dell'energia cinetica turbolenta al variare dell'angolo d'inclinazione del getto. La prima immagine mostra invece l'energia cinetica turbolenta con solo il flusso trasverso senza la presenza del getto.....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 5.6: Misure effettuate utilizzando la configurazione I di misura ed inseminando differentemente i flussi per <math>R</math> pari a 1.97. La mappa cromatica mostrata nelle figure rappresenta la vorticit�, espressa in <math>[s^{-1}]</math>, mentre le linee sovrapposte rappresentano le linee di flusso. Entrambi questi termini sono stati definiti a partire dai vettori velocit� nel piano misurati. ....</b>	<b>122</b>

**Figura 5.7:** Misure effettuate utilizzando la configurazione I di misura ed inseminando differentemente i flussi per R pari a 1.97. La mappa cromatica mostra l'energia cinetica turbolenta normalizzata rispetto all'energia cinetica media del flusso convettivo.....124

**Figura 5.8:** Profilo di velocità per la componente  $U_y$  normalizzata rispetto alla velocità del flusso trasverso. La linea con il rombo rappresenta la misura inseminando il getto, mentre il cerchio rappresenta la misura effettuata inseminando il flusso trasverso. I profili sono stati determinati in posizione  $Z/D = 2$ . .....125

**Figura 5.9:** Profili di velocità per la componente  $U_y$  normalizzata rispetto alla velocità del flusso trasverso. La linea con il rombo rappresenta la misura inseminando il getto, mentre il cerchio rappresenta la misura effettuata inseminando il flusso trasverso. I profili sono stati determinati in posizione  $Z/D = 5$ . .....125

**Figura 5.10:** Misure effettuate utilizzando la configurazione I di misura ed inseminando il flusso trasverso per R pari a 4.93. Le mappe cromatiche mostrate nella colonna di sinistra rappresentano l'energia cinetica turbolenta normalizzata rispetto all'energia cinetica media del flusso convettivo, mentre quelle mostrate nella colonna di destra rappresentano la vorticità del campo di moto nel piano, la cui unità di misura è  $[s^{-1}]$ .....127

**Figura 5.11:** Misure effettuate utilizzando la configurazione II di misura ed inseminando il flusso trasverso per R pari a 1.97. Le mappe cromatiche mostrate nella colonna di sinistra rappresentano l'energia cinetica turbolenta normalizzata rispetto all'energia cinetica media del flusso convettivo, mentre quelle mostrate nella colonna di destra rappresentano la vorticità del campo di moto nel piano, la cui unità di misura è  $[s^{-1}]$ .....129

**Figura 5.12:** Profilo di velocità in prossimità della sezione d'ingresso del getto. ....130

**Figura 5.13:** Confronto tra la linea centrale del getto valutata tramite la misura della velocità e la linea media ricavata dalla visualizzazione Schlieren.....131

**Figura 5.14:** Spettro di potenza del segnale ottenuto nel punto di misura posizionato nel piano x-z, con  $x = 6$  mm e  $z = -1$  mm, per un valore del parametro  $R = 1.97$  e  $Re = 738$ .....132



# Indice delle Tabelle

---

---

<b>Tabella 3.1: Tipi di gas utilizzati ed alcune loro proprietà. ....</b>	<b>36</b>
<b>Tabella 3.2: Esperimenti e gas utilizzati. ....</b>	<b>36</b>
<b>Tabella 3.3: Caratteristiche del filo caldo utilizzato per gli esperimenti. ....</b>	<b>46</b>
<b>Tabella 3.4: Coefficienti di correzione della velocità per la configurazione I di prova modificata (sonda inclinata).....</b>	<b>61</b>
<b>Tabella 3.5: Proprietà del volume di misura nelle due differenti configurazioni di misura.....</b>	<b>62</b>
<b>Tabella 4.1: Evoluzione del getto al variare di R. ....</b>	<b>100</b>
<b>Tabella 5.1: Risultati ottenuti dagli esperimenti con il filo caldo al variare dell'angolo d'iniezione. ....</b>	<b>117</b>
<b>Tabella 5.2: Dati utilizzati per la determinazione del numero di Stokes. ..</b>	<b>120</b>



# 1. Introduzione

---

---

## 1.1. Motivazioni

Molto spesso in campo ingegneristico si riscontra la necessità di dover far interagire tra loro due o più fluidi. Tale interazione può essere necessaria sia per il mescolamento di sostanze chimiche differenti delle quali si vuole ottenere una miscela omogenea, sia per permettere scambi energetici (cinetici e/o termici) tra i diversi flussi. Il problema che ci si trova ad affrontare è pertanto come attuare, e di conseguenza caratterizzare, questa interazione, in modo da determinare la condizione ottimale di funzionamento.

Tra le diverse soluzioni esistenti, ha una notevole rilevanza l'interazione tra un getto iniettato in un flusso trasverso.

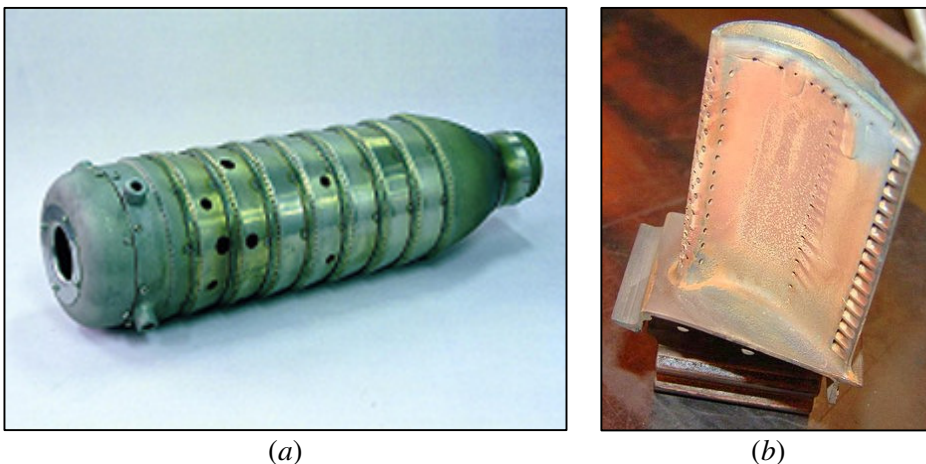


Figura 1.1: Visualizzazione di un getto iniettato perpendicolarmente nel flusso principale [1].

Il fenomeno che ne deriva è caratterizzato da un forte grado di turbolenza. L'interazione tra i due flussi genera infatti una vasta gamma di vortici

fondamentali per il mescolamento, che rendono però complesso il fenomeno portando ad una comprensione parziale od esclusivamente teorica dello stesso. Le possibili applicazioni del fenomeno sono molteplici e riscontrabili in diversi ambiti ingegneristici: dal campo aeronautico, a quello chimico, meccanico e via dicendo. Un'applicazione di questo modo di far interagire due flussi tra loro è dato dal *liner* delle camere di combustione dei motori aeronautici a reazione (riquadro (a) della Figura 1.1), in cui i fori posti sulla camera di combustione immettono aria fresca in modo da miscelarsi con i gas combusti, e di conseguenza abbassarne la temperatura prima di entrare in contatto con le palettature della turbina. Per prevenire eventuali danni a quest'ultime, su di esse sono poste dei fori che immettono aria fresca in maniera da creare un cuscinetto d'aria protettivo (riquadro (b) della Figura 1.1).

In Figura 1.1 viene mostrata nel riquadro (a) la camera di combustione



**Figura 1.2:** Camera di combustione di un motore aeronautico (figura a); paletta di uno stadio di alta pressione di una turbina del motore aeronautico CFM56 (figura b).

Oltre alle sue buone proprietà di mescolamento, l'interazione con il flusso trasverso risulta interessante dal punto di vista fluidodinamico: da questo punto di vista si vuole capire come il getto venga influenzato dalla corrente esterna e/o viceversa. Tale studio risulta particolarmente utile per i recenti velivoli militari classificati come *V/STOL* (*Vertical/Short Take-off and Landing*), di cui un esempio è il velivolo *Harrier* prodotto da una Joint Venture tra aziende del settore. Quest'ultimo esempio differisce da quelli prima citati per la forte intensità del getto, a cui è anche associato un numero di Reynolds altrettanto grande.



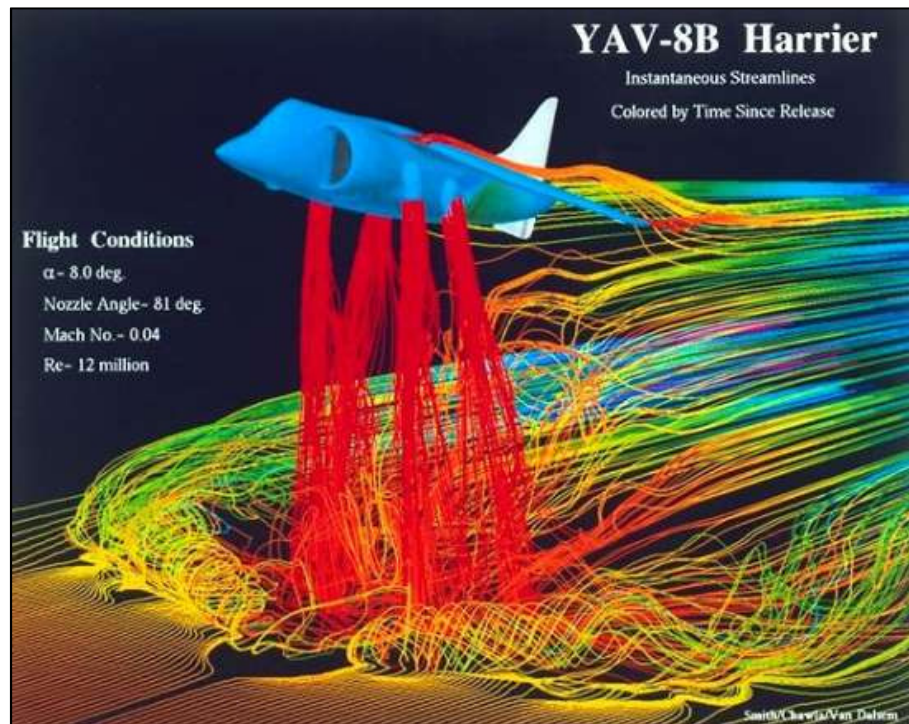


Figura 1.3: Visualizzazione del flusso uscente dai motori del velivolo Harrier durante una simulazione di volo in hovering.

In ambito motoristico il fenomeno risulta particolarmente interessante per le problematiche legate alla miscelazione dei fluidi reagenti per la combustione. Tale sistema di interazione tra due fluidi viene ad essere soprattutto utilizzato in motori alternativi funzionanti a gas naturale, dove in una camera posta precedentemente al punto d'iniezione, il combustibile gassoso viene iniettato perpendicolarmente alla mandata dell'aria. Alla fine di questa camera, i due flussi saranno opportunamente miscelati, e quindi pronti per la combustione all'interno del cilindro del motore.

Data la grande versatilità del fenomeno, risulta quindi interessante analizzare e conoscere approfonditamente le cause che ne stanno alla base: ciò permetterebbe di migliorarne l'utilizzo in svariate applicazioni pratiche.

## 1.2. Obiettivi

In questo lavoro verranno analizzate alcune proprietà dell'iniezione del getto nel flusso trasverso per bassi numeri di Reynolds, compresi tra 366 e 2200, al variare del grado di penetrazione. Altro fattore peculiare per il lavoro proposto riguarda le dimensioni del condotto di prova, piccolo rispetto a quanto normalmente riscontrabile in letteratura.

In letteratura sono presenti pochi dati sperimentali riguardanti le caratteristiche di prova indagate, per cui risulta necessario effettuare un'indagine sperimentale, la quale è stata effettuata sfruttando diverse tecniche di analisi:

- Visualizzazione mediante tecnica ottica Schlieren del fenomeno al fine di determinare l'interazione tra i due flussi;
- Caratterizzazione del livello di intensità turbolenta a valle dell'iniezione del getto trasverso tramite anemometria a filo caldo;
- Definizione del campo di moto mediante tecnica ottica LDV.

## 1.3. Piano di presentazione

Questo lavoro è composto da differenti sezioni:

- Capitolo 2: Stato dell'Arte, dove viene presentata una descrizione degli studi e dei risultati presenti in letteratura riguardo il fenomeno in esame.
- Capitolo 3: Linea Sperimentale, in cui viene delineato l'apparato sperimentale utilizzato e viene fornita una breve descrizione delle diverse tecniche impiegate durante la fase sperimentale e descrizione dell'apparato sperimentale utilizzato.
- Capitolo 4: Analisi delle Immagini, viene delineata la procedura di rielaborazione delle foto acquisite durante gli esperimenti condotti con la tecnica Schlieren.

- Capitolo 5: Analisi delle Misure Anemometriche, dove sono riportati i risultati degli esperimenti condotti che un'analisi comparativa tra le diverse misure.
- Capitolo 6: Conclusioni e Sviluppi Futuri, in cui vengono esposte le conclusioni ed i possibili sviluppi futuri del lavoro svolto.

Il lavoro di ricerca è stato condotto presso il Laboratorio di Combustione del Politecnico di Milano (Dipartimento di Energia).



## 2. Stato dell'Arte

---

---

### 2.1. Inquadramento del fenomeno

Come già anticipato nel capitolo introduttivo, l'interazione tra un getto iniettato in flusso ad esso trasverso risulta particolarmente complesso. L'alto livello di intensità turbolenta e l'articolato sistema di vortici rende difficile distinguere in maniera precisa il legame tra cause ed effetti.

Le diverse condizioni operative degli esperimenti pregressi, sono riportate in Appendice A.

L'interazione tra il getto ed il flusso trasverso non è dissimile dall'interazione tra un flusso libero e un corpo solido. Nel caso in esame, questa interazione porta il getto iniettato a piegarsi nella direzione di moto del flusso principale. Tale piegamento dipende dalla forza con cui il getto viene iniettato, e di conseguenza risulta direttamente collegato alla sua quantità di moto.

Essendo un'interazione tra due flussi, la sola quantità di moto del getto non è in grado di rappresentare pienamente il piegamento del getto, ma dipende anche dalla quantità di moto associata al flusso trasverso. Ciò implica che ogni prova sperimentale, oltre ad essere caratterizzata da parametri adimensionali quali  $Re$ ,  $M$ , ecc., risulta strettamente connessa ad un ulteriore parametro adimensionale  $R$  dato dalla radice quadrata del rapporto dei flussi di quantità di moto rispettivamente associati al getto ed al flusso trasverso, mostrato nell'espressione (2.1).

$$R = \sqrt{\frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2}} \quad (2.1)$$

Risulta evidente come il parametro definito dall'equazione (2.1) sia intrinsecamente collegato con la penetrazione e la successiva deflessione del getto: all'aumentare di  $R$  infatti la penetrazione del getto aumenta diminuendone

il rateo di piegamento. Viceversa nel caso di riduzione di  $R$ , la penetrazione del getto viene limitata, mentre la velocità di deflessione aumenta.

Il getto deflesso così ottenuto viene tipicamente rappresentato come in Figura 2.1: in prossimità dell'uscita del getto si posiziona il suo nucleo (regione I); successivamente è possibile trovare la regione di massima deflessione del getto (regione II) ed infine è possibile delineare una regione fortemente vorticoso (regione III).

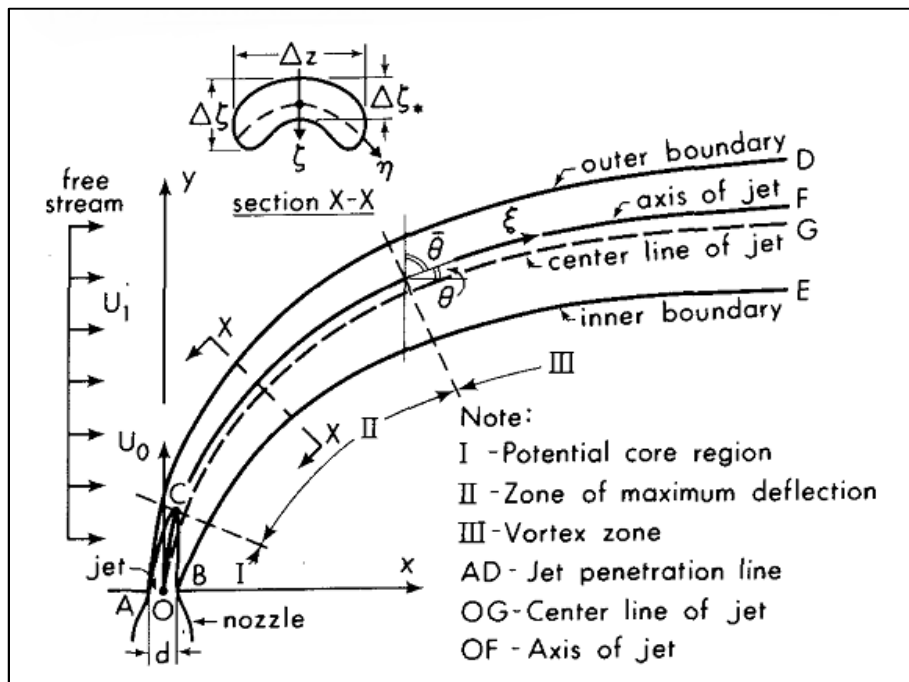


Figura 2.1: Descrizione del getto dopo la sua penetrazione nel flusso trasverso [2].

Nella Figura 2.1 è osservabile la diversità tra l'asse del getto e la sua linea centrale, qui rappresentato come due linee ben distinte. In letteratura, però, si ritrova anche una seconda scuola di pensiero che identifica la linea centrale del getto non come quella media bensì come quella posta in corrispondenza della massima velocità del flusso uscente dall'ugello, definizione associata di norma all'asse naturale del getto. Secondo questi autori, quindi, asse naturale e linea centrale coincidono per definizione. L'utilizzo dell'una o dell'altra definizione è strettamente dipendente dal tipo di esperimento effettuato: per esempio se si utilizzano delle tecniche anemometriche, è possibile definire molto facilmente il punto in cui la velocità è massima. Allo stesso modo non è possibile ottenere la medesima informazione con tecniche di visualizzazione, poichè definiscono la

linea centrale del getto, ossia una proprietà geometrica dello stesso. È importante notare però, che la differenza tra queste due linee è minima, soprattutto per quanto riguarda la regione I e II: in queste zone, infatti, la deformazione del getto è ancora incompleta, portando, per motivi di simmetria del fenomeno, ad una quasi sovrapposizione delle due linee. Nella regione III invece, iniziano a svilupparsi tutti quei fenomeni secondari, come i vortici controrotanti, che portano ad una forte deformazione del getto, allontanando così le due linee.

Il sistema di riferimento naturale tipicamente utilizzato per la descrizione del getto è quello mostrato in Figura 2.2: quello solidale con il flusso trasverso è definito dalla terna di assi  $x, y$  e  $z$ , mentre quello solidale con il getto è dato da  $\xi, \eta$  e  $\zeta$ , dove la componente  $\xi$  è parallela all'asse naturale del getto,  $\eta$  ai punti di massimo del profilo di velocità in direzione  $y$  ed infine  $\zeta$  è perpendicolare alle prime due.

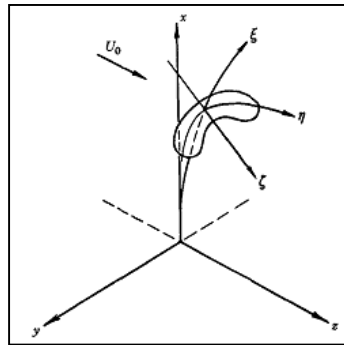


Figura 2.2: Sistema di riferimento dell'esperimento condotto da Keffer e Baines [3]. Il centro degli assi è posizionato in corrispondenza del centro dell'ugello.

Le analisi riguardanti la deflessione del getto vengono tipicamente eseguite nelle prime due regioni di Figura 2.1, per le quali, come detto, di norma non si distinguono asse e linea centrale del getto.

L'interazione tra i due flussi non si ferma però al solo piegamento del getto nella direzione di moto del flusso trasverso, ma porta anche all'erosione dello stesso e all'insorgere di un complesso sistema di vortici. L'erosione o trascinarsi, definito in inglese con il termine *entrainment*, rappresenta la capacità del flusso trasverso di trascinare con sé parte del flusso associato precedentemente al getto, portandolo, pian piano che si prosegue lungo la geometria del dominio, ad estinzione (flussi mescolati).

Altra caratteristica importante del fenomeno è data dal forte livello di turbolenza che si viene a generare: questo tipo di interazione infatti porta, insieme con il sistema di vortici, a conferire al fenomeno le proprietà di miscelamento che lo contraddistinguono. Il livello di intensità turbolenta è legato strettamente al numero di Reynolds, che nel caso in esame viene definito come:

$$Re = \frac{U_{cf}D}{\nu_{cf}} \quad (2.2)$$

dove  $U_{cf}$  e  $\nu_{cf}$  rappresentano rispettivamente la velocità e la viscosità cinematica del fluido che costituisce il flusso trasverso, mentre  $D$  rappresenta il diametro dell'ugello di iniezione. Chiaramente, tale parametro risulta importante per le analogie fluidodinamiche effettuabili tra i diversi esperimenti.

Il sistema di vortici caratterizzanti il fenomeno è molto complesso e verrà descritto nei paragrafi successivi con maggiore dettaglio.

## 2.2. Deflessione del getto

Esperimenti riguardanti la deflessione del getto sono stati condotti da diversi autori, quali Keffer e Baines [3], Margason [4] e Kamotani e Greber [5]. Keffer e Baines [3] hanno svolto indagini solo in campo fluidodinamico, mentre Kamotani e Greber [5] hanno indagato anche la sensibilità del fenomeno al variare della temperatura del getto, tipicamente superiore a quella del flusso trasverso.



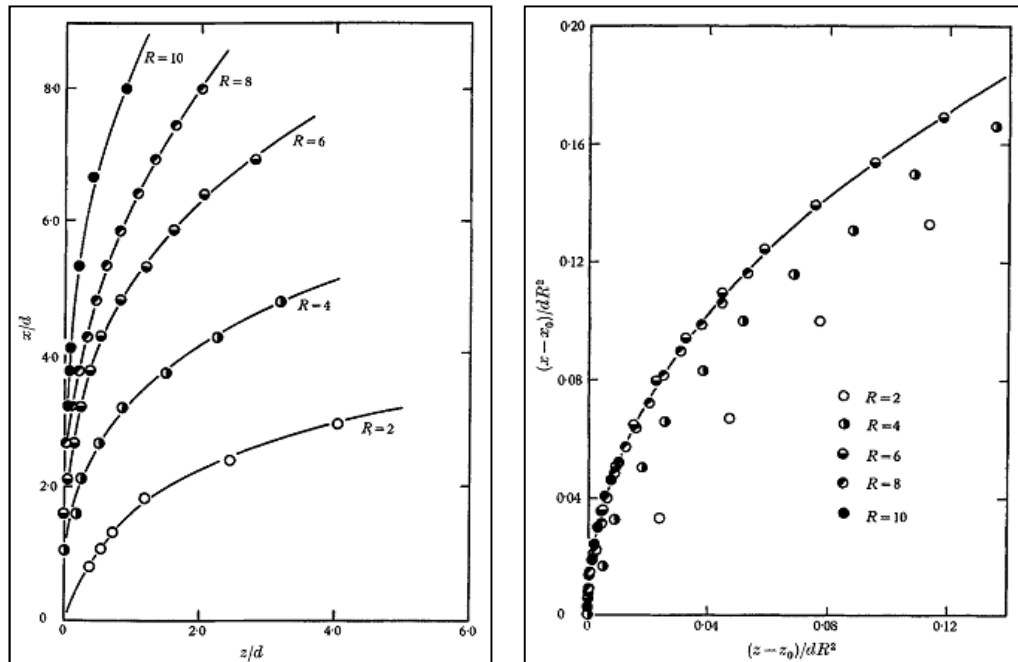


Figura 2.3: Linea centrale getto ricavata da Keffer e Baines [3]; andamento della linea centrale del getto (figura a sinistra); andamento della linea centrale del getto normalizzata rispetto ad  $R^2$  (figura a destra).

Utilizzando il sistema di riferimento mostrato Figura 2.2, è possibile affermare che, a causa della simmetria del fenomeno, la linea centrale del getto giace nel piano  $x-z$  e che è possibile trascurare possibili fluttuazioni al di fuori di tale piano.

Per ottenere risultati paragonabili al variare delle condizioni sperimentali, Keffer e Baines [3] hanno definito normalizzazioni efficaci dei parametri rappresentanti il fenomeno, sia in termini geometrici che fluidodinamici.

Per quanto riguarda i parametri geometrici, quello più rilevante è il diametro dell'ugello di iniezione, come osservabile nell'immagine sinistra di Figura 2.3.

Facendo riferimento ai parametri fluidodinamici, Keffer e Baines [3] hanno effettuato un'ulteriore contrazione degli assi tramite il quadrato del rapporto dei flussi di quantità di moto mostrato nell'equazione (2.1). Tale contrazione può essere dedotta dall'equazione di bilancio della quantità di moto per la componente normale alla direzione  $\xi$ : il rateo di cambiamento della deflessione è pari al rapporto tra la quantità di moto lungo la direzione  $\xi$  del flusso trascinato e la quantità di moto lungo la direzione  $\xi$  del getto. Tale rapporto risulta essere proporzionale a  $U_{cf}^2$  ed a  $U_j^2$ , e quindi inversamente proporzionale a  $R^2$ . Il risultato ottenuto è osservabile nella parte destra della Figura 2.3: le

diverse curve sono confrontabili tra loro e denotano uno stesso andamento, permettendo così di ricavare una legge empirica di deflessione del getto.

Kamotani e Greber [5], invece hanno effettuato sia analisi fluidodinamiche che termiche, valutando la deflessione del getto al variare della sua temperatura.

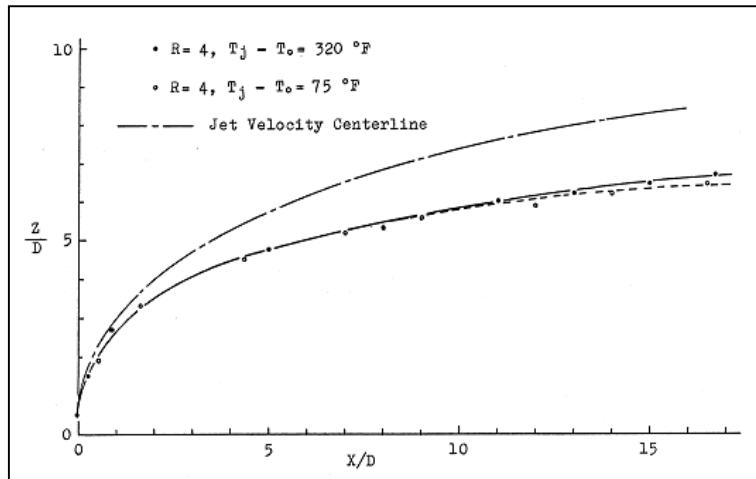


Figura 2.4: Andamento della linea centrale del getto misurata da Kamotani e Greber [5] per R = 4.

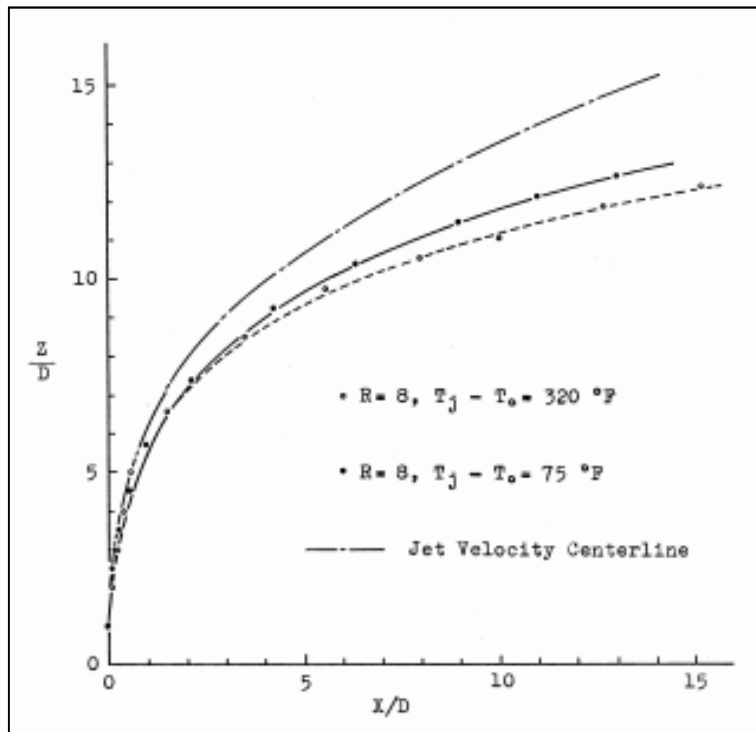


Figura 2.5: Andamento della linea centrale del getto misurata da Kamotani e Greber [5] per R = 8.

Gli esperimenti condotti con il getto riscaldato hanno evidenziato un aspetto particolare: a parità di  $R$ , è stato osservato un andamento differente della deflessione del getto, dipendente dalla diversità di densità tra il gas del getto e quello del flusso trasverso, dovuto appunto alla variazione di temperatura di quest'ultimo.

Altri autori invece hanno determinato la deflessione del getto tramite tecniche fotografiche: tra questi troviamo Margason [4], il quale ha effettuato diversi esperimenti utilizzando come getto aria compressa, e come flusso trasverso acqua. Un risultato caratteristico del suo lavoro è mostrato in Figura 2.6, dove viene evidenziata la linea media del getto.

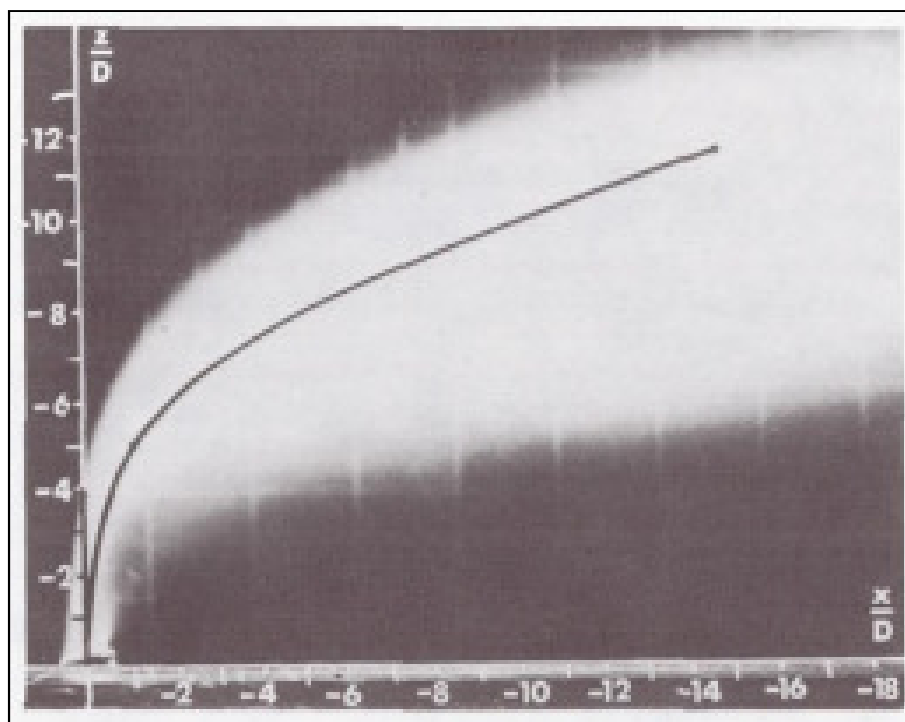


Figura 2.6: Visualizzazione della interazione tra il getto ed il flusso trasverso effettuata da Margason [4] per un valore di  $R$  pari a 5.07.

Una volta ottenuto sperimentalmente il profilo della deflessione del getto, sono state ricercate leggi empiriche o semi-empiriche in grado di identificarlo correttamente. Tipicamente queste leggi sono costituite da varianti della regressione a potenza del profilo così ottenuto. Tra le leggi più utilizzate, troviamo quella mostrata nell'espressione (2.3).

$$\frac{Y}{RD} = A \left( \frac{X}{RD} \right)^m \quad (2.3)$$

Altri autori hanno utilizzato ulteriori tipi di andamenti, i quali sono in grado di valutare anche fattori come la penetrazione del getto (prima che subisca la deflessione) o eventuali cambiamenti dell'angolo di iniezione (si veda [2]). Di seguito viene riportata una variante della formula (2.3) che tiene in considerazione la penetrazione del getto  $H$ :

$$\frac{Y}{RD} = A \left( \frac{X}{RD} \right)^{m1} \left( \frac{H}{D} \right)^{m2} \quad (2.4)$$

Margason [4] ha inoltre paragonato differenti risultati ottenuti tramite l'applicazione delle formule empiriche o semi-empiriche riportate in letteratura. Il risultato della comparazione non è però stato soddisfacente mostrando come le curve ottenute siano fortemente disperse tra loro, soprattutto a seguito dell'applicazione di formule semi-empiriche.

## 2.3. Entrainment

Il fenomeno del trascinamento è molto interessante per valutare come il getto venga "eroso" dal flusso trasverso e di conseguenza come si mescoli con il esso.

Un modello è stato formulato da Morton [6], il quale prevede l'utilizzo di un coefficiente definito come:

$$E = \frac{U_i}{(U_j - U_{cf})} \quad (2.5)$$

dove con  $U_i$  rappresenta la velocità sulla superficie di contatto tra il getto ed il flusso trasverso, mentre  $U_j$  e  $U_{cf}$  rappresentano rispettivamente una determinata velocità assunta dal fluido all'interno del getto e la velocità del flusso trasverso. Esso risulta molto utile per poter semplificare le espressioni che valutano la variazione di portata massica del getto in funzione della coordinata giacente sulla sua linea centrale.

$$\frac{d(\rho v)}{d\xi} = sr\rho E(\bar{U}_j - U_{cf}) \quad (2.6)$$

L'equazione (2.6) [3], rappresenta la scrittura in forma esplicita del bilancio di portata massica lungo la direzione di evoluzione del getto. Oltre al termine di trascinamento  $E$ , essa dipende anche da altri fattori tra cui il raggio effettivo della regione occupata dal getto  $r^1$  lungo  $\xi$ , la densità del fluido in esame  $\rho$ , il fattore di forma  $s^2$  del getto e la differenza tra la media delle velocità del getto e la velocità del flusso trasverso. In questa formula per di più non compare la singola componente di velocità presente all'interno del getto, ma compare la media sulla sezione trasversale del getto delle velocità ad esso associate ( $\bar{U}_j$ ).

Nella Figura 2.7 è possibile osservare i risultati sperimentali ottenuti da Keffer e Baines [3] per la valutazione del coefficiente di *entrainment*: il valore di quest'ultimo cresce muovendosi lungo la linea del getto verso valle, mettendo in evidenza la riduzione delle dimensioni trasversali del getto lungo il dominio dovute dal trascinamento.

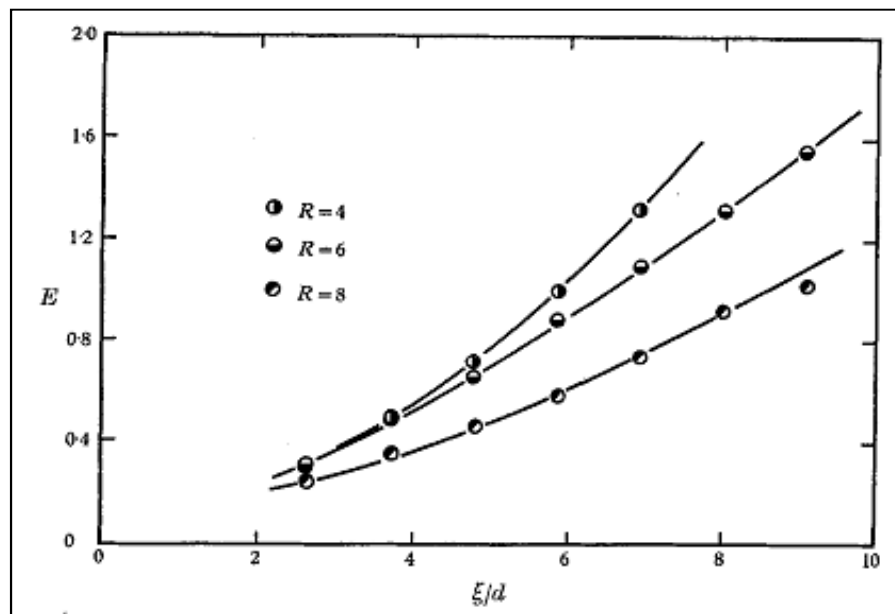


Figura 2.7: Andamento del coefficiente di trascinamento  $E$  lungo la linea centrale del getto [3].

<sup>1</sup> Il raggio effettivo è definito come  $\sqrt{A}$ , dove  $A$  rappresenta la superficie della sezione normale del getto.

<sup>2</sup> Il fattore di forma è definito dal rapporto  $\sqrt{A}/C$  (quindi pari  $r/C$ ), dove  $A$  rappresenta la superficie della sezione normale del getto e  $C$  il suo perimetro.

## 2.4. Vortici

Il sistema di vortici è stato molto indagato fin dall'inizio della sperimentazione, sia per la gran quantità di strutture vorticose presenti che per la forte relazione che lega l'una all'altra. Molti autori si sono cimentati nella comprensione delle strutture vorticose prodotte, sia tramite indagini sperimentali [1] [7] [8], che numeriche [9].

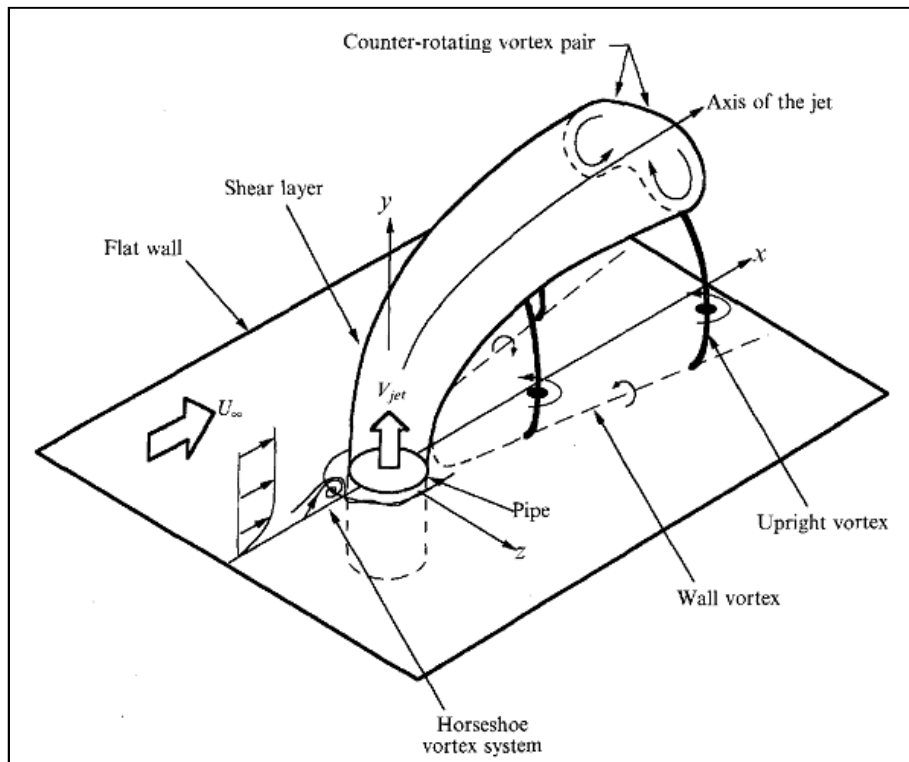


Figura 2.8: Visualizzazione di tutte le strutture vorticose analizzate [1].

Nella Figura 2.8 è possibile osservare l'insieme dei più importanti vortici prodotti in fase di iniezione, soprattutto nella struttura finale del dominio del getto (regione III in Figura 2.1).

Non tutti vortici riportati sono presenti al variare delle condizioni operative, come è stato osservato da Fric e Roshko [8] in una campagna di esperimenti atti ad evidenziare le strutture vorticose generate dall'interazione tra un flusso

trasverso ed un cilindro e quelle generate dall'interazione di un flusso trasverso ed un getto. I risultati ottenuti da questa indagine mostrano come il sistema di vortici risulti essere fortemente dipendente dal numero di Reynolds e che nel caso del getto iniettato perpendicolarmente nel flusso trasverso, questa produzione sia legata anche al rapporto di quantità di moto  $R$ . È stato infatti evidenziato che per bassi valori di numero di Reynolds e del parametro  $R$ , gli unici vortici che sono visibili sono quelli a ferro di cavallo alla base del getto, il vortice definito in *Hovering* e la coppia di vortici contro-rotanti situati nella regione III della Figura 2.1. Incrementando il valore di questi due parametri, è possibile visualizzare modifiche nella struttura delle vecchie componenti vorticosi e notare la comparsa di nuovi elementi turbolenti, tra cui quelli situati nella regione di scia (vortici a parete, verticali, ecc.).

Kelso, Lim e Perry [1] hanno effettuato diversi esperimenti, divisi tra visualizzazioni dei flussi tramite tracciante e anemometrie a filo caldo, facendo variare sia il numero di Reynolds che il parametro  $R$ . Un primo risultato ottenuto con un valore di  $Re$  pari a 940, mette in evidenza la presenza di un vortice definito in "*Hovering*": questa definizione deriva dal fatto che esso è posizionato nella regione frontale del getto, poco al di sopra del punto di iniezione, e mantiene questa posizione nel tempo. Lateralmente questo vortice segue la forma del nucleo potenziale del getto, arrotolandosi poi verso l'alto, come mostrato nella Figura 2.9.

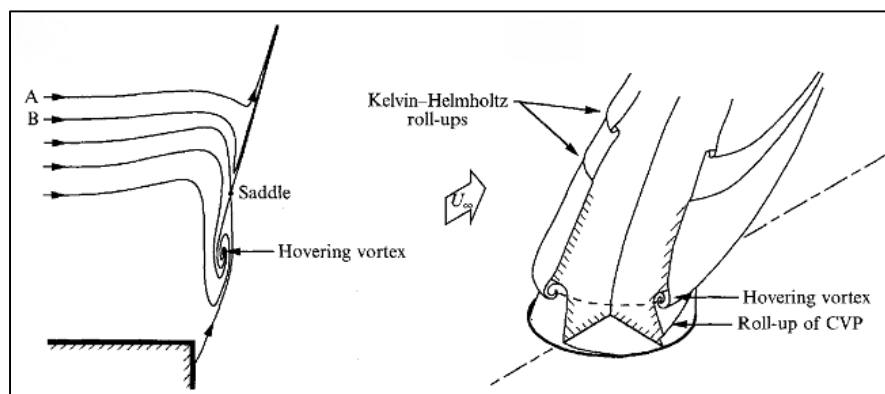


Figura 2.9: Interpretazione di Kelso, ed altri [1], del vortice in *Hovering* a  $Re = 940$  e  $R = 2.3$ ; a sinistra è possibile osservare una visione laterale del flusso sulla parte anteriore del getto; a destra è presente una taglio della vista prospettica del getto.

La causa che porta alla produzione di questo vortice risulta essere ancora poco chiara sebbene Kelso, Lim e Perry ipotizzino essere collegata al distacco del getto dalle pareti dell'ugello poco prima di essere iniettato.

Ciò risulta collegato con la coppia di vortici contro-rotanti che si sviluppa in scia. Nella regione superiore del vortice in *Hovering*, sempre rimanendo sulla parte frontale del getto, l'interazione tra i due flussi diventa instabile, generando sulla superficie di contatto tra i due fluidi, instabilità del tipo Kelvin-Helmholtz. La posizione in cui queste iniziano a svilupparsi è circa 3 diametri dopo la sezione d'ingresso dell'ugello, seguendo la linea centrale.

Aumentando il numero di Reynolds per valori superiori a 940, la posizione in cui le instabilità di Kelvin-Helmholtz vengono prodotte, si avvicina sempre più alla sezione d'ingresso del getto ( $\xi = 0$ ). Sotto queste condizioni il vortice in *Hovering* diviene instabile: esso viene prodotto periodicamente e non mantiene la sua posizione sopra la sezione d'iniezione. Una volta prodotto, esso viene trasportato dal getto verso valle fino ad un punto in cui viene completamente eroso dalle sistema di vortici e dall'alto livello di turbolenza. Oltre alla sua posizione, esso ha anche cambiato la sua evoluzione nel flusso trasverso: mentre prima il vortice proseguiva verso valle senza mai chiudersi, ora ogni vortice rimane in prossimità della superficie laterale del getto chiudendosi su se stesso, come è possibile osservare in Figura 2.10, generando così una serie continua di vortici anulari. La definizione del vortice in *Hovering* in questo caso viene a cadere, non mantenendo più la propria struttura stabile nel tempo e nello spazio. Essa può però essere rivalutata considerando una media temporale dei vortici prodotti nella regione iniziale di penetrazione del getto.

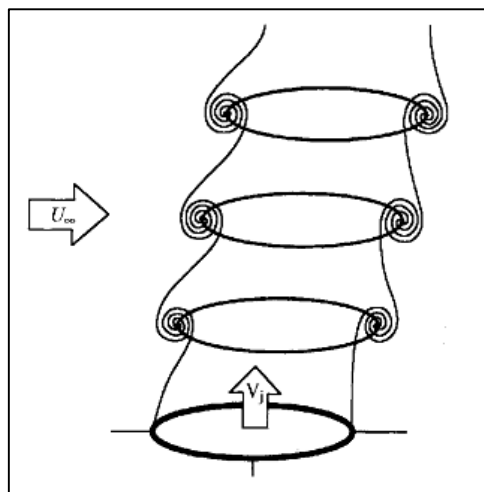


Figura 2.10: Visione dei vortici anulari presenti sulla superficie del getto [1].



Il più importatene sistema di vortici prodotto dall'interazione tra il getto ed il flusso trasverso è dato dalla coppia di vortici contro-rotanti presenti nella regione III mostrata in Figura 2.1. Questa struttura vorticoso è stata analizzata da diversi autori, i quali però hanno fornito solo ipotesi su motivo della sua origine: infatti essa risulta connessa a molteplici cause che si sovrappongono, tra cui si trova il vortice in *Hovering*.

Fin dai primi studi, le caratteristiche dei vortici contro-rotanti sono apparse connesse ad  $R$ , soprattutto per quanto riguarda la deflessione del getto. Infatti è stato osservato che se il getto è più penetrante (alti valori di  $R$ ), i vortici contro-rotanti si sviluppano poco dopo la posizione di iniezione, mentre per valori di  $R$  piccoli la produzione di questi vortici è molto ritardata, ed in alcuni casi non è stata nemmeno visualizzata.

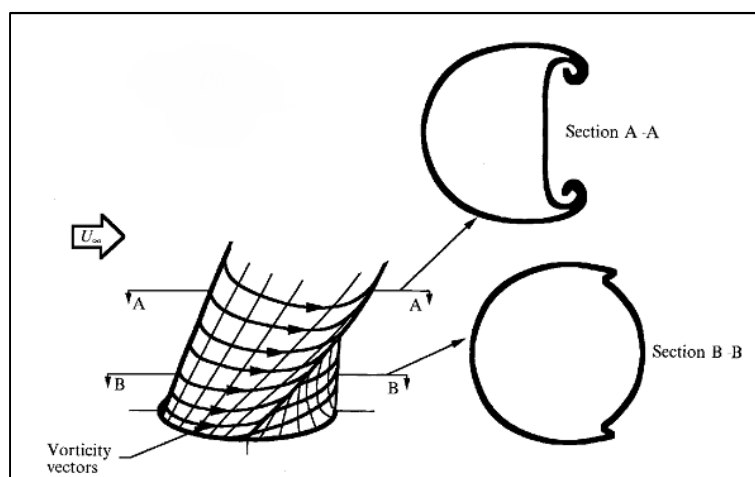


Figura 2.11: Ri-orientamento della vorticità di mescolamento che porta alla deflessione della superficie cilindrica vorticoso [1].

In Figura 2.11 viene mostrato il ri-orientamento dei vortici di mescolamento in prossimità della superficie esterna del getto. Questo risultato è ottenuto dopo che il getto entra in contatto con il flusso trasverso, inducendone la deflessione. La variazione del vettore della vorticità porta (o per lo meno contribuisce) alla produzione della coppia di vortici contro-rotanti. Infatti, sempre nella Figura 2.11, viene mostrato come l'interazione tra i due flussi, porta il getto ad arrotolarsi nella parte posteriore, mettendo ancor più in evidenza la connessione tra i vortici contro-rotanti e la deflessione del getto (parte destra della figura).

I vortici anulari prodotti ciclicamente dall'instabilità del vortice in *Hovering* per alti valori di  $Re$  ( $>940$ ) e la deflessione del getto con conseguente ri-

orientamento dei vettori di vorticità sulla superficie di contatto tra il getto ed il flusso trasverso, non sono stati ancora messi in relazione tra loro. Eppure tra essi esiste un forte legame dato che la deflessione del getto comporta anche una variazione della superficie di contatto tra i due flussi; di conseguenza anche i vortici anulari sono influenzati da questa variazione di orientamento del getto. Secondo Kelso, Lim e Perry [1], i vortici anulari vengono piegati in due parti: la parte anteriore viene piegata seguendo la curvatura di deflessione del getto, mentre la parte posteriore segue la direzione di evoluzione dello stesso. Il risultato della teoria di Kelso, Lim e Perry riguardante il piegamento dei vortici anulari appena descritto viene mostrato nella Figura 2.12: verso la parte finale della regione II (mostrata in Figura 2.1), è possibile osservare come le due parti del vortice tendano ad avvicinarsi, contribuendo ad alimentare i vortici contro-rotanti.

Prove sperimentali portate a termine da altri autori, quali Moussa [10], Andreopoulos [11], Sykes [12] ed altri, hanno fornito ulteriori prove a sostegno di quanto fin qui brevemente descritto.

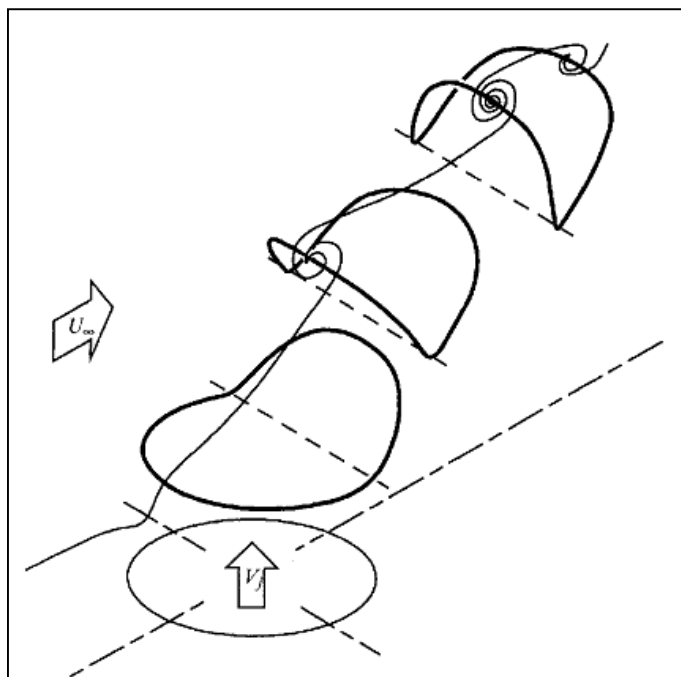


Figura 2.12: Vista isometrica dell'interpretazione di Kelso ed altri [1] sull'interazione tra il piegamento del getto ed i vortici anulari, mostrando come questi si pieghino per convezione nella parte posteriore all'iniezione del getto.

In prossimità del punto di iniezione del getto è possibile trovare anche una struttura di vortici denominata a ferro di cavallo: essa si sviluppa in seguito all'interazione tra strato limite del flusso trasverso con la parte iniziale del getto (regione I). Kelso, Lim e Perry [1], hanno valutato tramite delle visualizzazioni (di cui un estratto è mostrato nella Figura 2.13), l'andamento del flusso nella parte anteriore del getto ed il suo evolversi nella parte posteriore.

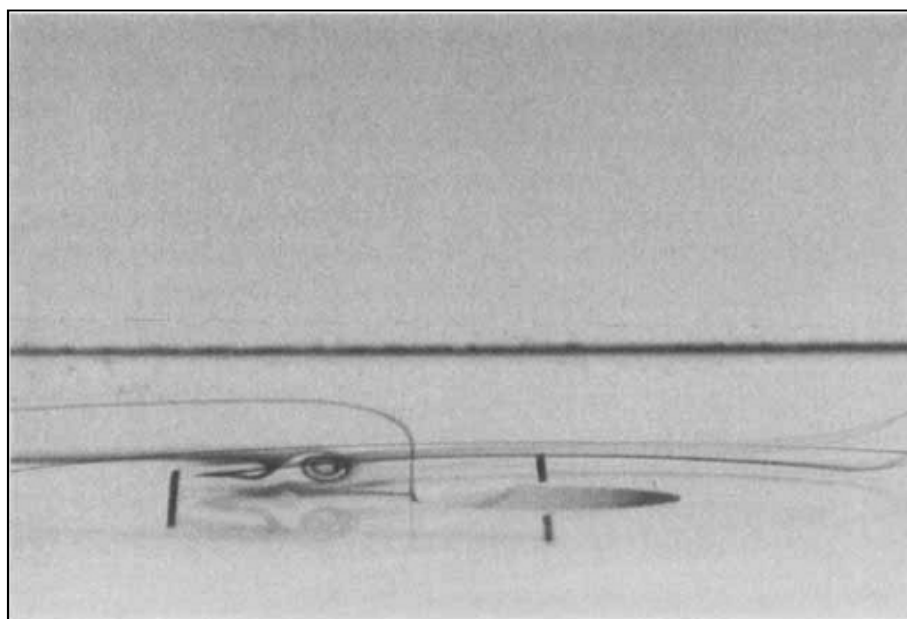


Figura 2.13: Visualizzazione del sistema di vortici a ferro di cavallo con  $Re = 1600$  ed  $R = 2.2$  [1].

I risultati di queste indagini mostrano l'insorgere di due gruppi di vortici nella parte anteriore: uno composto da due vortici con direzione di rotazione opposta ad  $y^3$ , ed uno composto da un solo vortice più piccolo, localizzato tra i due vortici precedenti e la parete inferiore, con senso di rotazione concorde con  $y$ . In Figura 2.14 vengono mostrate le linee di flusso con i relativi vettori di velocità e di rotazione dei vortici a partire dalle visualizzazioni fluidodinamiche con l'ausilio di traccianti (Figura 2.13). Nella figura in questione è possibile osservare due tipi di vortici che si vengono a produrre dopo l'ugello d'iniezione: il primo gruppo, nel proseguire lungo la direzione del flusso trasverso, rimane adeso alla parete inferiore, mentre il secondo viene trascinato verso l'alto per poi essere assorbito dalla coppia di vortici contro-rotanti.

<sup>3</sup> Si veda il sistema di riferimento mostrato nella Figura 2.2.

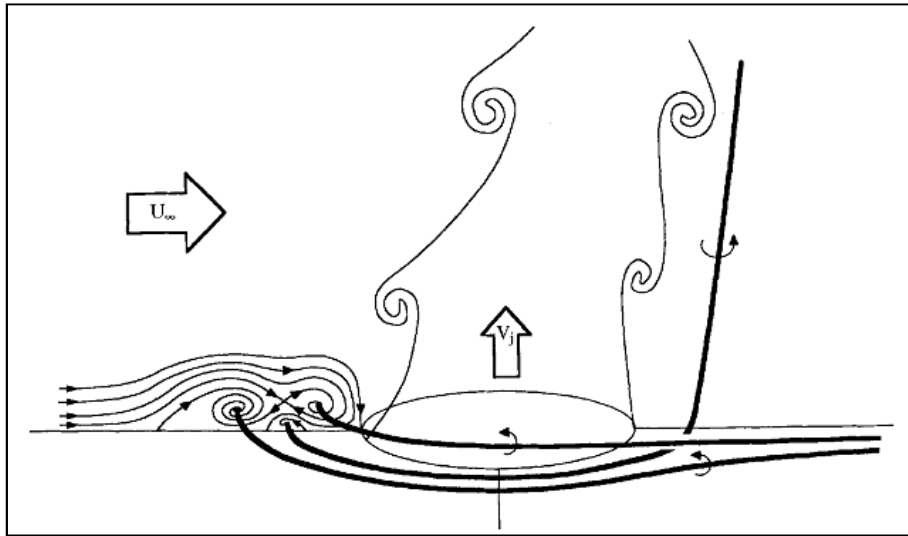


Figura 2.14: Traiettoria dei vortici a ferro di cavallo per valori di  $Re$  bassi [1].

Altri sistemi vorticosi sono stati osservati nella parte posteriore del getto, tra cui quelli di parete e verticali. I primi si ipotizza siano creati a partire dai forti gradienti di pressione negativi presenti in scia, i quali connessi allo strato limite, permettono l'insorgenza di questa struttura vorticoso: si ipotizza che siano connessi anche ai vortici controrotanti, ma questa teoria non è stata ancora verificata.

I secondi invece sono generati in presenza di numeri di Reynolds grandi e congiungono i vortici di parete con quelli contro-rotanti [1].

Da quanto qui mostrato risulta evidente come il fenomeno sia complesso e soprattutto come esso sia intrinsecamente legato al variare del numero di Reynolds e di  $R$ .

Nel tentativo di semplificare la comprensione delle strutture vorticoso, quindi, Kelso, Lim e Perry [1], hanno prodotto il grafico mostrato in Figura 2.15, il quale rappresenta la genesi delle diverse strutture turbolente analizzate in funzione di  $Re$  ed  $R$ .

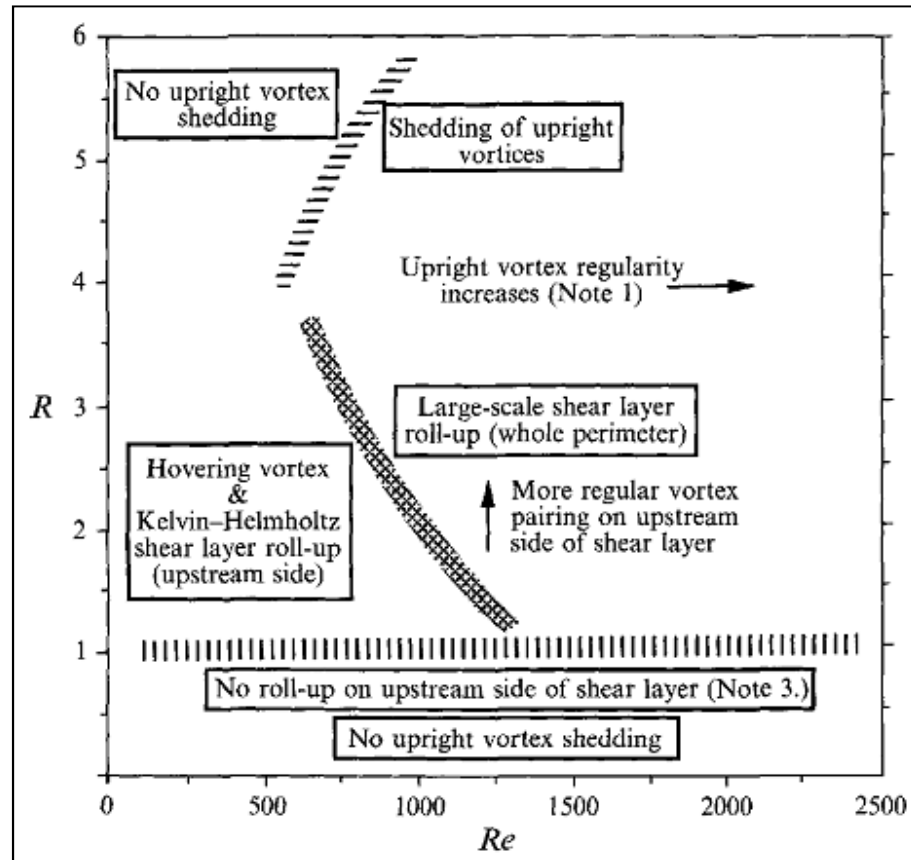


Figura 2.15: Schema riassuntivo della produzione dei diversi sistemi di vortici presenti nell'iniezione di un getto in un flusso trasverso, al variare sia di  $R$  che di  $Re$ . Nota 1: Produzione di vortici verticali più regolare per valori di  $R \approx 4$ ; Nota 3: Si veda Lim, Kelso & Perry [7].

## 2.5. Turbolenza

A causa delle sue ottime proprietà di mescolamento, il fenomeno del getto in un flusso trasverso è stato studiato approfonditamente al fine di indagare la turbolenza associata e le sue implicazioni sulle caratteristiche dello stesso.

E' stato verificato che aumentando il numero di Reynolds del fenomeno, mantenendo inalterato il valore di  $R$ , si ottiene una maggiore dispersione del getto nel flusso trasverso (si veda la Figura 2.16) [1].

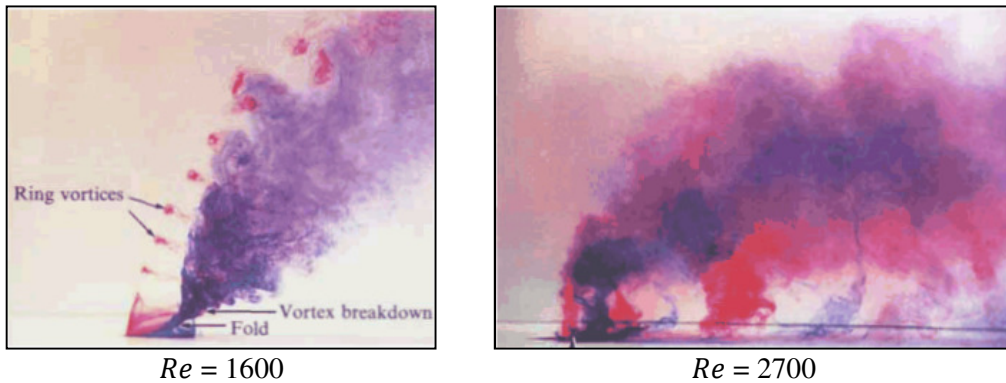


Figura 2.16: Visualizzazione, tramite traccianti, del flusso per un valore di  $R = 4$ . Le due figure mostrano i risultati per differenti valori del numero di Reynolds [1].

Andreopoulos e Rodi [13] hanno effettuato dei test in galleria con l'ausilio di un anemometro a filo caldo a tre direzioni. La Figura 2.17 mostra l'andamento dell'intensità turbolenta nel piano di mezzeria del dominio (piano  $x - z$  del sistema di riferimento mostrato in Figura 2.2), mostrando come più ci si allontani dal punto di iniezione, più tale valore diminuisce.

I grafici mostrati di seguito sono rappresentati usando un differente sistema di riferimento: l'asse parallelo al flusso trasverso è l'asse  $x$ , mentre quello perpendicolare alla parete d'iniezione, entrante nel condotto, è l'asse  $y$ ; l'asse  $z$  è perpendicolare a questi due.

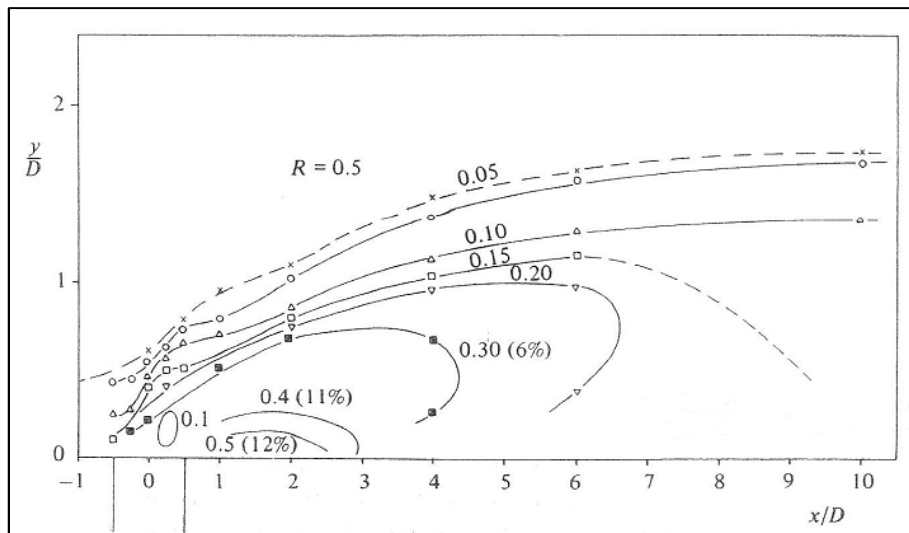


Figura 2.17: Curve di livello dell'intensità turbolenta del flusso  $\sqrt{u^2}/U_{cf}$ ; la percentuale di errore sul valore è indicato tra parentesi [11].

Andreopoulos e Rodi [13] hanno inoltre determinato dei profili di energia cinetica turbolenta in diverse posizioni, mostrate nella Figura 2.18.

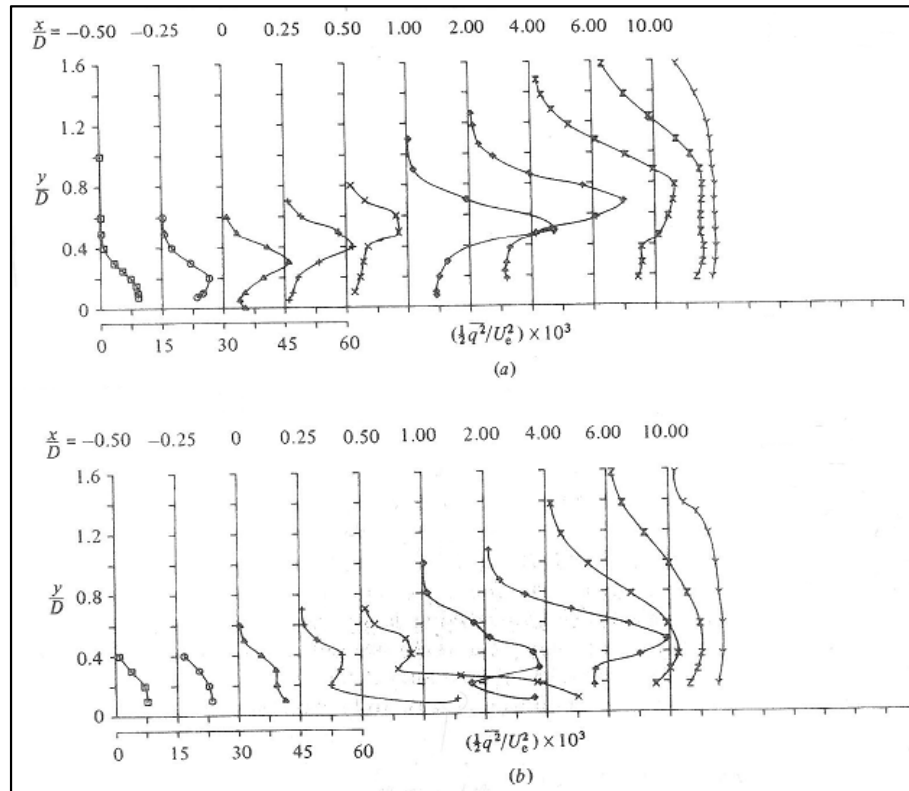


Figura 2.18: Profili di energia cinetica turbolenta per  $R = 0.5$  a  $z/D = 0$  (a) e  $z/D = -0.5$  (b).

I risultati ottenuti mostrano come il livello di energia cinetica turbolenta sia più alto nella regione centrale rispetto alle zone laterali. Nel caso di valori  $Y/D$  molto bassi, invece, anche lateralmente i valori ottenuti sono significativamente più alti. Tale risultato è dato dal fatto che iniziano a farsi sentire tutte quelle strutture vorticosi mostrate nel paragrafo 2.4, che portano ad incrementare il livello di turbolenza del flusso.

Esperimenti simili sono stati condotti anche da Keffer e Baines [3] ottenendo risultati simili.

## 2.6. Analisi Numerica

Nell'ultimo decennio molte indagini sono state condotte non più tramite degli esperimenti, ma mediante analisi numeriche. A differenza dell'approccio sperimentale, esse non richiedono apparecchiature e sistemi di prova specifici, ed offrono il vantaggio di poter analizzare tutto ciò che avviene in ogni punto della geometria. D'altra parte però, risulta complicato ed oneroso riprodurre numericamente il fenomeno reale: ciò implica infatti la necessità di indagini sperimentali parallele. Per semplificare le operazioni calcolo in ogni punto della griglia che caratterizza il dominio d'indagine infatti, le equazioni della fluidodinamica vengono semplificate; in altri casi invece, viene semplicemente ridotto il numero di punti. Entrambe queste soluzioni, portano ad introdurre errori: nel primo caso perché non si considera l'effetto che alcuni termini possono avere sul risultato finale, nel secondo caso perché non si riesce a rappresentare adeguatamente quello che succede su scale molto piccole.

La scelta quindi del modello numerico<sup>4</sup> e della discretizzazione delle geometria è importante e viene tipicamente accettato un compromesso tra discretizzazione e semplificazione fluidodinamica.

L'analisi numerica è molto utile se eseguita prima di un'indagine sperimentale. Essa consente infatti di evidenziare caratteristiche peculiari del fenomeno fornendo la possibilità di tarare la sperimentazione in modo corretto. In altri casi invece essa risulta necessaria per studiare fenomeni in condizioni non adeguatamente accessibili mediante tecniche sperimentali odierne.

Come detto in precedenza, particolare attenzione deve essere data alla creazione della mesh, ed alla scelta del modello numerico: nel caso dell'interazione tra un getto con flusso trasverso, la discretizzazione del dominio deve essere particolarmente fine, a causa del complesso sistema di vortici e del forte livello di turbolenza generato dall'interazione dei due flussi. Un'analisi condotta da Galeazzi et al. [14], mostra come i risultati siano differenti al variare delle discretizzazione del dominio. Sono state create infatti due tipi di grigliatura: una definita "fine", composta da un numero elevato di elementi (7.5 milioni), ed una definita "lasca" che ne contiene un numero inferiore (1.5 milioni). Il modello

---

<sup>4</sup> Per modello numerico si fa riferimento al sistema di equazioni prese in considerazione e alle loro semplificazioni.

---



numerico utilizzato per l'analisi è basato sulla tecnica LES per la descrizione della turbolenza.

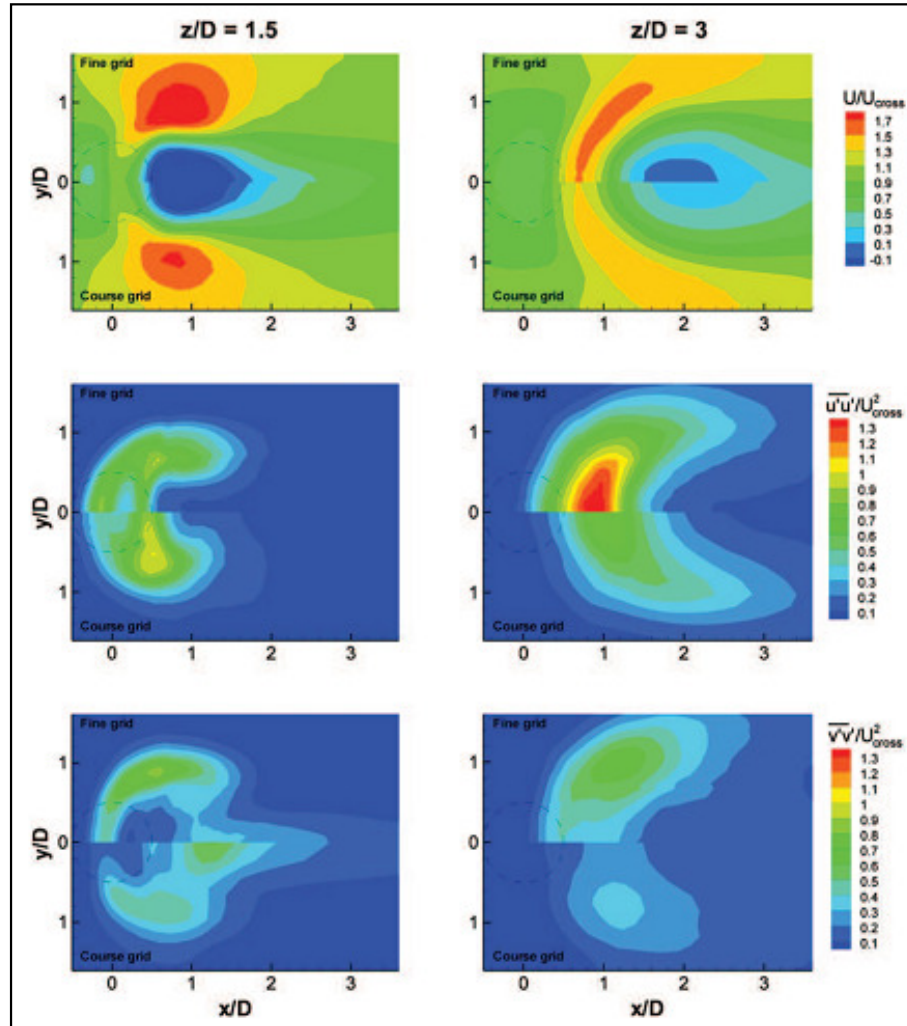


Figura 2.19: Doppia mappa bidimensionale della componente di velocità  $U/U_{cf}$  e dello sforzo di Reynolds lungo le due componenti  $u'$  e  $v'$ . La parte superiore di ogni immagine rappresenta il risultato ottenuto con una mesh fine, mentre quella inferiore con una mesh lasca [14].

I risultati di quest'analisi sono mostrati in Figura 2.19, dove nella prima coppia di immagini è riportata la componente di velocità parallela al flusso trasverso e normalizzata rispetto alla velocità di quest'ultimo, mentre la seconda e terza coppia rappresentano i livelli di sforzo di Reynolds nelle due direzioni del piano visualizzato<sup>5</sup>. Ogni immagine a sua volta è divisa in due parti: quella superiore

<sup>5</sup> Piano paralleli al piano x-y del sistema di riferimento mostrato in Figura 2.2.

rappresenta il risultato ottenuto con la mesh fine, mentre in quella inferiore con la mesh lasca. È possibile notare come fino ad una distanza pari a 1.5 diametri a valle del punto di iniezione (prima colonna della Figura 2.19), i risultati, sia in termini di velocità che degli sforzi di Reynolds nelle due componenti, risultino simili (in termini di distribuzione e di valore), mentre per una distanza maggiore essi siano differenti. Tale risultato mostra come una discretizzazione non troppo curata porti a non rappresentare adeguatamente il fenomeno turbolento nella regione finale del getto (regione III).

Un'analisi più raffinata è stata effettuata da Bagheri et al. [9], i quali hanno realizzato simulazioni numeriche dirette, basate sulle equazioni di Navier-Stokes. La condizione indagata è quella in cui il rapporto  $R$  è pari a 3 e con un numero di Reynolds pari a 165. In questa simulazione sono state eseguite differenti indagini, tra cui quella dei modi di vibrare necessaria a valutare la stabilità del flusso. I risultati ottenuti risultano coerenti con quelli sperimentali di Kelso et al. [1]. In particolare sono stati osservati sia la coppia di vortici controrotanti sia i vortici a ferro di cavallo, mentre gli altri sistemi di vortici non sono stati visualizzati, coerentemente con quanto osservato da Fric e Roshko [8] su esperimenti condotti a pari condizioni operative. Una visualizzazione del flusso così ottenuto è mostrato nella Figura 2.20.

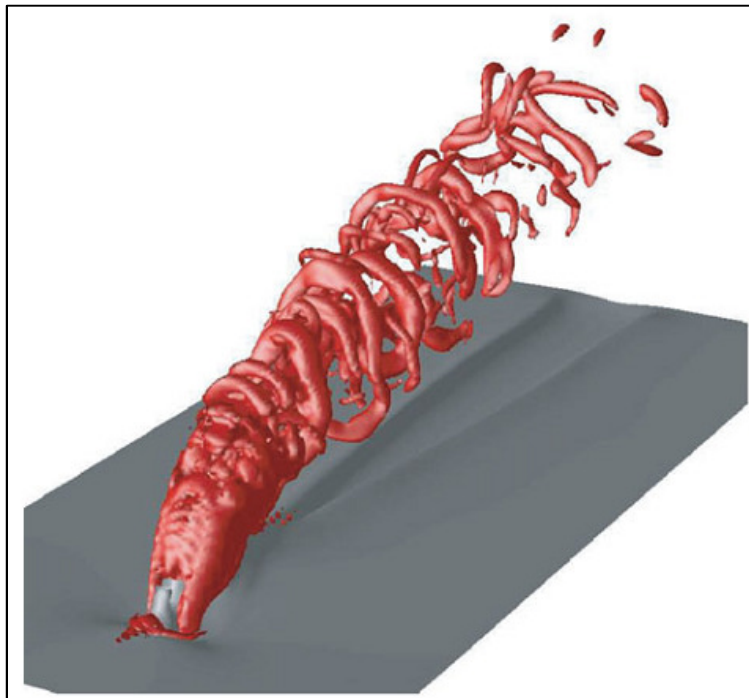


Figura 2.20: Visualizzazione delle strutture vorticosse tramite simulazione numerica [9].

All'interno del dominio, i ricercatori hanno posizionato due sonde virtuali, le quali hanno mostrato un'oscillazione periodica della componente di velocità parallela al flusso trasverso: una sonda è stata posta 3 diametri sopra il punto di iniezione del getto, ed una invece è stata posizionata 3 diametri a valle in prossimità della parete. Queste oscillazioni periodiche si presentano attraverso una frequenza costante, con la quale è stato possibile determinare il numero di Strouhal, definito come:

$$St = \frac{fD}{U_j} \quad (2.7)$$

Per la prima sonda è stato trovato un valore di 0.17, mentre per la seconda un valore di 0.016. Tali oscillazioni sono date dal sistema di vortici che si vengono a creare in corrispondenza di quelle regioni: nella prima è data dai vortici in Hovering, mentre il secondo dai vortici a ferro di cavallo congiuntamente a quelli contro-rotanti.

## 2.7. Obiettivi

Gli esperimenti ed i relativi risultati mostrati in questo capitolo, sono stati effettuati utilizzando delle gallerie di prova con dimensioni relativamente grandi, le cui caratteristiche geometriche insieme al tipo di esperimento e le condizioni operative, sono riportate nella Tabella A.1 in Appendice A. Particolarmente interessante risulta studiare lo stesso fenomeno in un dominio fortemente confinato, valutando i cambiamenti che ne derivano. Nei casi precedenti infatti il getto era libero di evolversi all'interno del flusso trasverso, senza nessuna azione da parte di agenti esterni. In questo caso invece le pareti della galleria limitano il suo naturale sviluppo, cambiandone la struttura e le proprietà di mescolamento. Per questo motivo, non essendo presente in letteratura dei dati relativi ad esperimenti simili, di seguito vengono affrontati diversi esperimenti atti a caratterizzare l'evoluzione del getto e le proprietà di mescolamento.



## 3. Linea Sperimentale

---

---

Le indagini sperimentali sono state condotte utilizzando tre differenti tecniche:

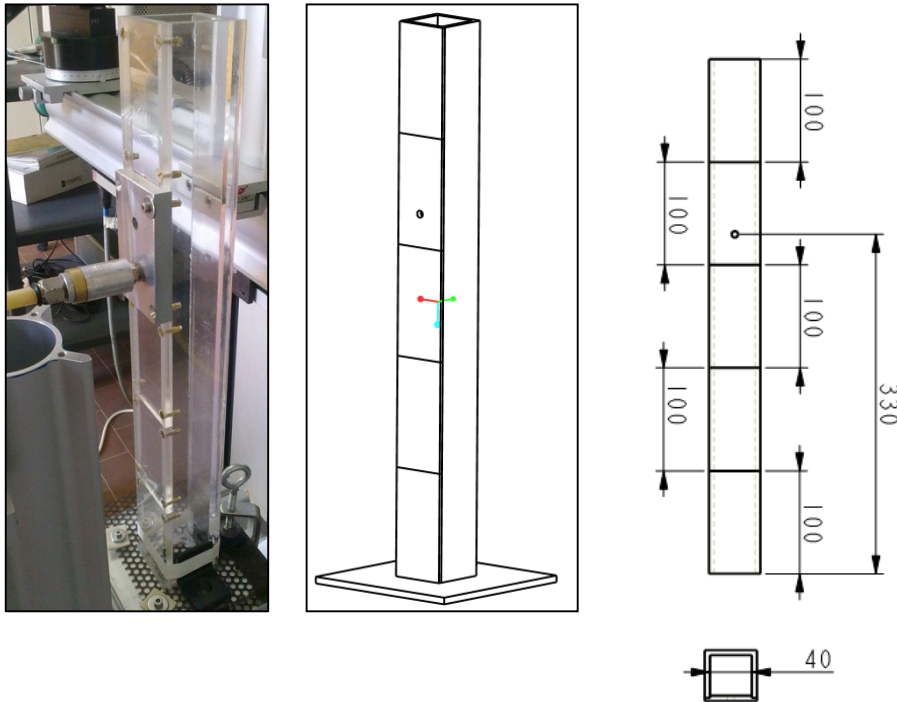
- Visualizzazione del getto nel flusso trasverso mediante tecnica Schlieren;
- Valutazione della distribuzione dell'intensità turbolenta e delle dimensioni delle scale temporali e spaziali turbolente del flusso all'uscita della sezione di prova mediante anemometro a filo caldo;
- Misurazione del campo di moto del getto e del flusso trasverso tramite tecnica ottica LDV.

Una tabella riassuntiva con le condizioni operative analizzate è riportata in Appendice B.

### 3.1. La Camera di Prova

Gli esperimenti sono stati effettuati utilizzando un condotto di dimensioni ridotte rispetto alle solite camere di prova (ad aria o ad acqua) sfruttate in passato per determinare le caratteristiche di interazione tra il getto ed il flusso trasverso. In questo caso infatti la camera di prova è un prisma a base quadrata, con lato di base pari a 40 mm, e profondità pari a 500 mm (Figura 3.1). Le dimensioni della camera risultano essere notevolmente inferiori a quelle utilizzate in precedenza da altri autori (Tabella A.1), mettendo in evidenza come il lavoro presentato in questa tesi, mostri dei risultati unici nel loro genere.

La camera è stata posta in verticale per facilitare la visualizzazione del flusso di gas con la tecnica Schlieren. Così facendo il flusso trasverso è stato introdotto dalla parte inferiore del condotto, mentre in uno delle pareti laterali della camera è stato posizionato l'ugello. Tale configurazione è stata poi utilizzata per tutte le altre tipologie di misura.

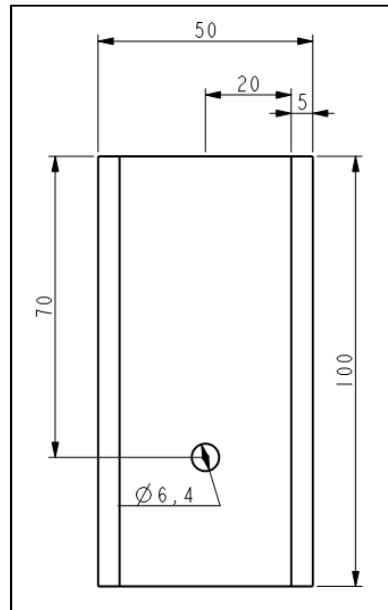


**Figura 3.1:** CAD del condotto di prova e relativa messa in tavola con quotatura; l'unità di misura utilizzata è mm.

L'indagine sperimentale prevede di poter accedere visivamente a quello che accade all'interno della camera di prova. Questo per poter effettuare delle visualizzazioni tramite tecnica Schlieren e per poter effettuare misure anemometriche effettuate con la tecnica LDV. Per questo motivo il condotto è stato costruito con un materiale plastico (Plexyglass) di buona qualità ottica.

Durante il lavoro è stato utilizzato un ugello di sezione circolare, con diametro pari a 6.4 mm. Il lato sul quale viene ad essere posizionato l'ugello è composto da 5 pannelli di altezza pari a 100 mm vincolati alla camera di prova tramite delle viti. Uno di questi pannelli presenta un foro per il posizionamento dell'ugello. Nella Figura 3.2 viene mostrata la messa in tavola del pannello con il foro per l'iniezione. Le dimensioni del pannello, non considerando il posizionamento del foro e le sue dimensioni, sono le medesime dei pannelli rimanenti.

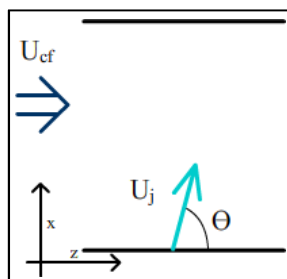
Il sistema di riferimento utilizzato per le diverse prove è il medesimo mostrato nella Figura 2.2, la cui origine giace nel centro dell'ugello d'iniezione: l'asse z è parallelo al flusso trasverso, l'asse x è entrante nella camera di prova e l'asse y mutuamente ortogonale agli altri due.



**Figura 3.2:** Messa in tavola del pannello su cui viene applicato l'ugello di iniezione del getto; l'unità di misura utilizzata è mm.

Il fatto di avere il lato di iniezione suddiviso in sezioni ha permesso di posizionare correttamente il punto di iniezione, sia per far sì che il flusso trasverso sia completamente sviluppato nel momento in cui il getto viene iniettato, sia per facilitare le misure dei diversi esperimenti. Tenendo in considerazione questi due aspetti, l'ugello è stato posizionato nel 4° pannello partendo dal basso, per una distanza complessiva tra il punto di ingresso del flusso trasverso e quello di iniezione del getto pari 330 mm, come mostrato in Figura 3.1.

Alcuni esperimenti sono stati condotti inclinando il getto, per valori dell'angolo d'inclinazione pari a  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . Tale angolo giace nel piano x-z, con asse di rotazione concorde con l'asse y e viene misurato a partire dall'asse z (come mostrato in Figura 3.3).



**Figura 3.3: Direzione d'inclinazione del getto iniettato nel flusso trasverso per alcuni esperimenti.**

Alla base del condotto, in prossimità della sezione d'ingresso del flusso trasverso, è stata posizionata una griglia metallica con grado di porosità pari al 60.5% per aumentarne l'omogeneità.

Le portate volumetriche dei due flussi sono state controllate tramite l'ausilio di due flussimetri a galleggiante, dei quali viene mostrata la correzione del valore letto in Appendice C.

Per mostrare quanto le dimensioni influiscano sull'esperimento, viene riportata in Figura 3.4 la misura dello strato limite del flusso trasverso che investe il getto, valutato con il sistema di misura LDV, per una condizione tipica di prova con numero di Reynolds pari a 738.



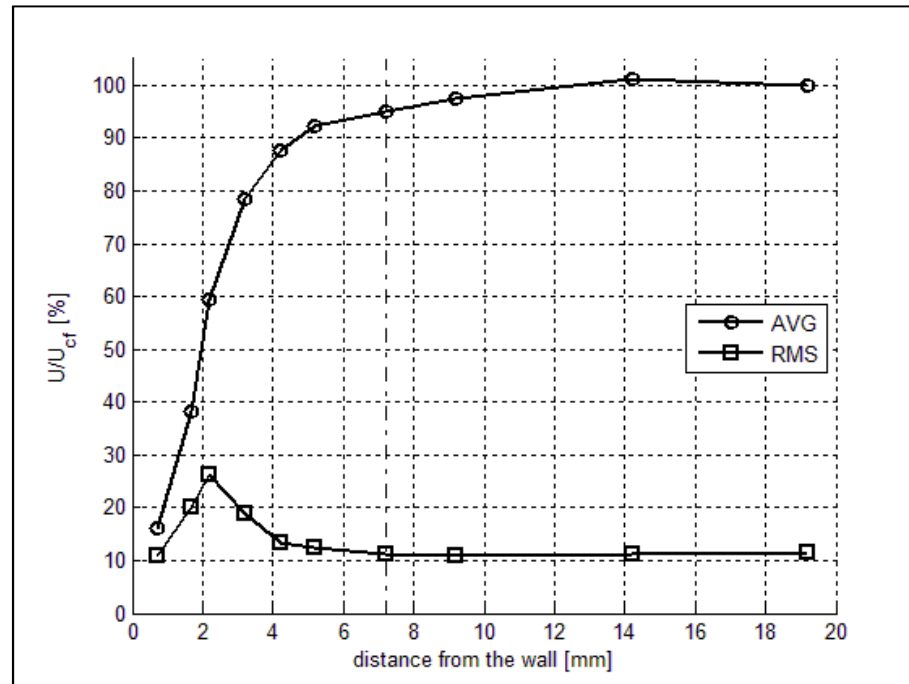


Figura 3.4: Profilo di velocità e della deviazione standard normalizzati rispetto alla velocità asintotica, al variare dalla distanza dalla parete.

Scegliendo uno spessore dello strato limite in cui la velocità misurata sia il 95% della velocità asintotica, tale larghezza risulta pari a 7.2 mm. Questo risultato è molto importante ai fini delle condizioni fluidodinamiche dell'esperimento. Infatti negli esperimenti pregressi, come già mostrato, le camere di prova hanno delle dimensioni più grandi rispetto a quella utilizzata durante questo indagine, e solo lo strato limite che si sviluppa sulla parete d'iniezione influisce nell'evoluzione del getto. In questo caso invece, essendo il getto vincolato in un condotto a base quadrata di lato pari a 40 mm, lo strato limite influenza anche il getto nel momento in cui esso si avvicina alle altre pareti. Con uno spessore dello strato limite pari a 7.2 mm, infatti si ottiene che solo un'area, idealmente quadrata, di lato pari a 25.6 mm posta nel centro del condotto mostri un flusso uniforme, ottenendo solo una regione indisturbata del flusso trasverso pari al 40.96% rispetto a quella del condotto.

## 3.2. Tipi di gas utilizzati

Durante la sperimentazione sono stati utilizzati gas differenti, mentre il flusso trasverso è sempre stato aria, il getto entrante è stato ottenuto tramite sostanze diverse a seconda della tecnica in analisi.

Per la Schlieren ad esempio risulta necessario utilizzare gas con densità differenti per permettere la visualizzazione del fenomeno di interesse.

Per questo motivo si è scelto di utilizzare per il getto anidride carbonica di cui i dati relativi, insieme a quelli dell'aria, vengono riportati in Tabella 3.1.

**Tabella 3.1: Tipi di gas utilizzati ed alcune loro proprietà.**

Tipi di gas utilizzati ed alcune loro proprietà		
Gas	Densità	Indice di rifrazione
Aria	1.225	1.0002926
Anidride Carbonica - $CO_2$	1.98	1.0004500

Negli esperimenti con l'anemometro a filo caldo ed il sistema LDV, l'utilizzo di gas differenti invece non è risultato un parametro critico.

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva con i diversi gas utilizzati nei differenti test.

**Tabella 3.2: Esperimenti e gas utilizzati.**

Esperimenti e gas utilizzati		
Tecnica di misura	Gas flusso trasverso	Gas getto
Schlieren	Aria	Anidride carbonica ( $CO_2$ )
Anemometro a filo caldo	Aria	Anidride carbonica ( $CO_2$ )
LDV	Aria	Aria

Dovendo mettere in relazione i risultati ottenuti dalle diverse tecniche sperimentali, gli esperimenti sono stati condotti mantenendo inalterato il valore di  $R$ . Per la tecnica LDV invece sono stati indagati solo tre casi caratteristici, che però sono stati anch'essi indagati precedentemente con le altre tecniche.

## 3.3. La tecnica Schlieren

### 3.3.1. Cenni teorici

La tecnica Schlieren è una tecnica utilizzata per visualizzare i gradienti di densità in un mezzo trasparente [15] [16]. Lo schema di funzionamento tipico è quello mostrato in Figura 3.5.

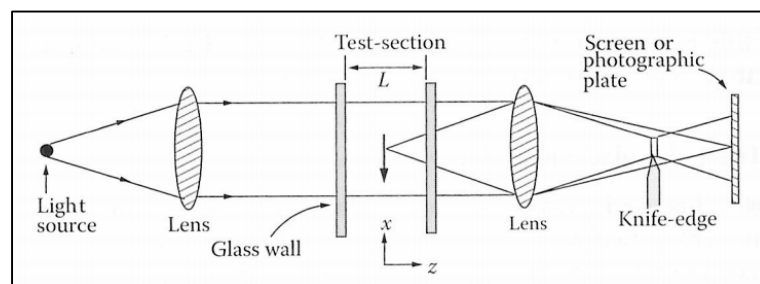


Figura 3.5: Configurazione della tecnica Schlieren [15].

La luce proveniente da una sorgente luminosa viene fatta collimare dalla prima lente e successivamente viene fatta passare nella regione di prova. Successivamente il fascio luminoso viene fatto passare attraverso una seconda lente, che permette la proiezione dell'immagine su di uno schermo. Nel punto focale della seconda lente viene posta una lama, costituita da un corpo opaco, per eliminare parte della luce. La luce che oltrepassa la lama viene proiettata su uno schermo, il quale deve essere ben illuminato per ottenere un buon risultato. Per ottenere ciò viene modificata opportunamente la posizione della lama, in modo tale da ottenere che la metà della luce sia in grado di passare quando non è in atto l'esperimento.

Durante le prove sperimentali, i raggi vengono deflessi allo stesso modo di un raggio passante in un prisma: essi, infatti, oltrepassano una regione in cui è presente un gradiente di densità, normale alla direzione della luce. Chiaramente, la deflessione dipende dai tipi di gas utilizzati e dal gradiente di densità che ne deriva, la cui variazione in modulo e in segno influenzano considerevolmente i risultati. Il risultato così ottenuto in prossimità dello schermo consiste in un'immagine in scala di grigi, in cui la presenza o meno del gas a differente densità viene messa in evidenza da una differente luminosità. Infatti, dove la

concentrazione del gas a differente densità è alta, nell'immagine sarà visualizzata una regione ad alta intensità luminosa (regione di colore bianco), mentre dove il gas non è presente, nell'immagine sarà visualizzata una regione completamente nera. Dove la presenza del gas in questione non è presente in grande quantità, nell'immagine visualizzata sarà presente una regione grigia. La variazione della scala dei grigi dipenderà appunto dalla concentrazione del gas: il grigio più chiaro (gradazione più vicina al colore bianco) indica una maggiore concentrazione, mentre un grigio più scuro (gradazione più vicina al nero) rappresenta una minore concentrazione.

La spiegazione di questo risultato è insito nel fatto che la luce rifratta dal gas riesce a superare il corpo opaco posto in corrispondenza del punto focale della seconda lente, mentre dove il raggio non viene deviato, e quindi non interagisce con il gas da visualizzare, non riesce ad oltrepassare la lama.

Dalla teoria ondulatoria della luce, è noto che la variazione della velocità del fronte d'onda varia in maniera inversamente proporzionale con l'indice di rifrazione del mezzo nel quale la essa viaggia. Quindi, per un dato fronte d'onda, il raggio luminoso varierà la propria direzione di moto nel momento in cui incontra una variazione dell'indice di rifrazione  $n$ ; diversamente il raggio luminoso non viene deviato.

Il raggio di curvatura  $w$  della deflessione del fascio di luce è proporzionale all'inverso del gradiente dell'indice di rifrazione  $n$  del gas:

$$\frac{1}{w} = \text{grad}(n) \quad (3.1)$$

La variazione totale dell'angolo di deflessione  $\epsilon$  del raggio luminoso passante nella regione di prova di larghezza  $L$ , è pari a:

$$\epsilon = \frac{L}{w} = L \text{ grad}(n) \quad (3.2)$$

Facendo riferimento al sistema di riferimento mostrato in Figura 2.2, nella configurazione adottata il fascio luminoso si muove in direzione  $y$ , mentre il gradiente di densità si sviluppa nel piano  $x - z$ .

Utilizzando l'equazione empirica di Gladstone-Dale [15], la quale fornisce un legame tra l'indice di rifrazione e la densità del gas in esame, e scomponendo l'espressione (3.2) lungo gli assi  $x$  ed  $y$  si ottiene quindi:

$$\epsilon_x = LK \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (3.3)$$

$$\epsilon_z = LK \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (3.4)$$

dove il termine  $K$  rappresenta la costante di Gladstone-Dale [15], la quale dipende dal tipo di gas in questione.

I risultati mostrati nelle espressioni (3.3) e (3.4) mostrano come la deflessione del raggio luminoso dipenda dalla derivata prima della densità.

Le lenti utilizzate quindi non devono essere particolarmente pregiate sotto l'aspetto della qualità, ma devono avere distanze focali grandi per poter correggere adeguatamente la posizione della lama in funzione dei problemi mostrati in precedenza. Oltre a questo, la distanza focale è importante anche per ottenere un'immagine finale con le dimensioni richieste. Le dimensioni delle lenti definiscono invece la grandezza della regione di prova che verrà visualizzata.

Soluzione alternativa all'utilizzo delle lenti è quella dell'uso di una coppia di specchi concavi, che risulta essere vantaggiosa, sia dal punto di vista economico, che dal punto di vista pratico per la facilità di allineamento.

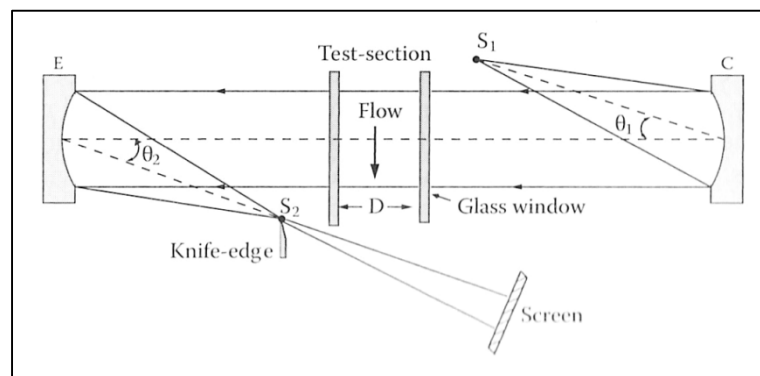


Figura 3.6: Configurazione della tecnica Schlieren con l'ausilio di specchi [15].

Gli angoli di inclinazione della fonte luminosa rispetto allo specchio  $C$  ( $\theta_1$ ), e l'angolo tra lo specchio  $E$  e lo schermo ( $\theta_2$ ), devono assumere valori il più prossimi possibile per ottenere una buona qualità dell'immagine finale.

### 3.3.2. Configurazione sperimentale utilizzata

Gli esperimenti condotti con la tecnica Schlieren sono stati effettuati utilizzando la soluzione a specchi concavi con diametro pari a 130 mm. Dato che queste dimensioni non permettono di osservare ciò che succede all'interno di tutto il condotto, il volume di prova è stato collocato in modo tale da concentrare l'attenzione solo sulla regione in prossimità del punto di iniezione.

Come fonte luminosa è stata utilizzata una lampada stroboscopica in grado di accendersi ad intervalli regolari di 0.5 s. L'immagine finale è stata acquisita da una fotocamera che forniva in uscita un'immagine ad un solo canale (immagine in scala di grigi), la cui dimensione massima raggiunge un valore pari a 1280x1024 pixels. La lampada e la fotocamera sono state sincronizzate durante la fase di acquisizione grazie all'utilizzo di un generatore di funzione adeguatamente impostato.

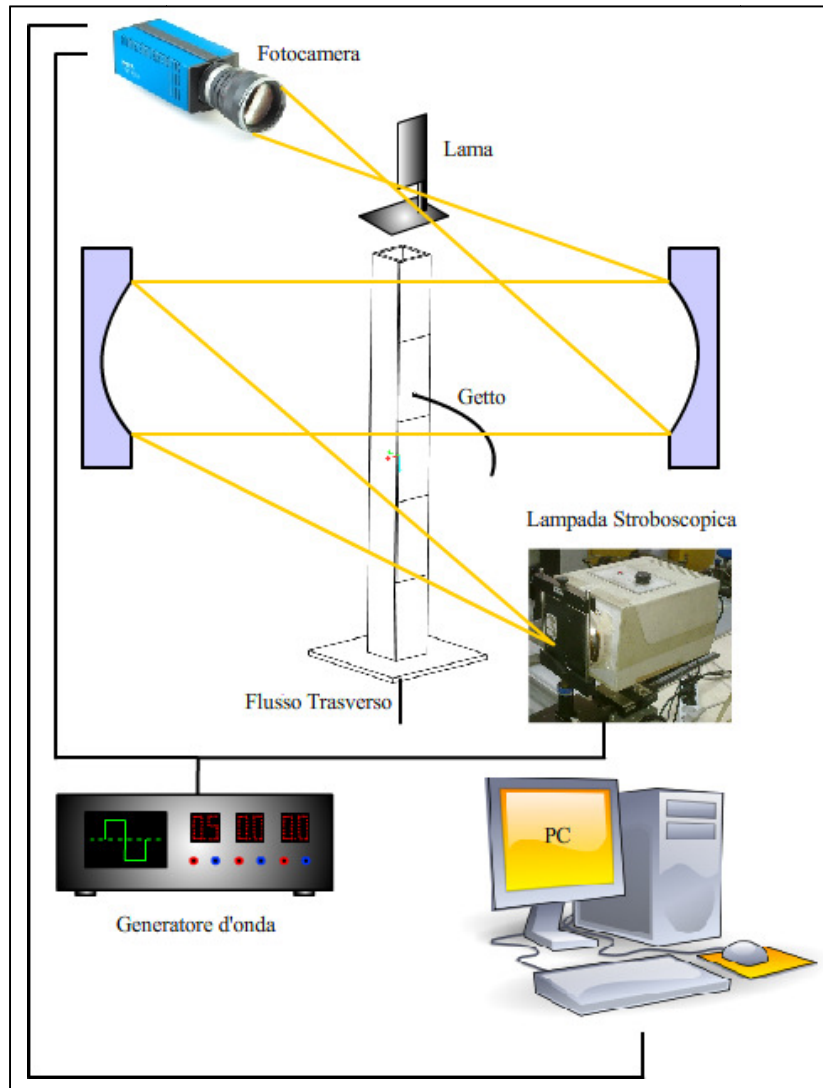


Figura 3.7: Schema logico della linea sperimentale per la visualizzazione del getto tramite tecnica Schlieren.

Il condotto è stato posto tra i due specchi in modo tale che la parete da cui il getto viene iniettato e la parete opposta risultassero paralleli ai raggi luminosi. In questo modo è stato possibile osservare il fenomeno dell'iniezione lateralmente, permettendo di valutare meglio l'interazione tra il getto ed il flusso trasverso, sia per quanto riguarda la sua deflessione, che per quanto riguarda altri aspetti, tra cui il grado di mescolamento.

Durante le diverse prove, sono state acquisite 100 immagini per ogni test, oltre 20 immagini rappresentanti lo sfondo (*background*), da utilizzare in fase di rielaborazione delle foto. Esso è stato acquisito con il solo passaggio dell'aria

nel condotto e con le portate del caso in esame. Nella Figura 3.8 e Figura 3.9 vengono evidenziati rispettivamente un esempio di *background* e di analisi del getto, specificatamente di  $CO_2$ , visualizzabile nella regione inferiore dell'immagine.



Figura 3.8: Esempio di background per l'elaborazione delle immagini visualizzanti il flusso.



Figura 3.9: Visualizzazione del flusso mediante tecnica Schlieren per un valore di  $R = 5.92$  e  $Re = 732$ . L'ellisse di colore rosso mette in evidenza la presenza del getto nel punto d'iniezione.



## 3.4. Anemometria a filo caldo

### 3.4.1. Cenni teorici

L'anemometro a filo caldo permette la misura del modulo della velocità di un fluido attraverso la determinazione dello scambio termico convettivo tra un filo, riscaldato elettricamente, ed il fluido in moto [16] [17]. Il filo metallico ha dimensioni ridotte, sia in termini di lunghezza (tipicamente 1÷2 mm) che di diametro (tipicamente 5÷10  $\mu\text{m}$ ), per poter essere sensibile alle più piccole fluttuazioni termiche, grazie alla bassa inerzia termica, nonché per poter effettuare misure con buona risoluzione spaziale.

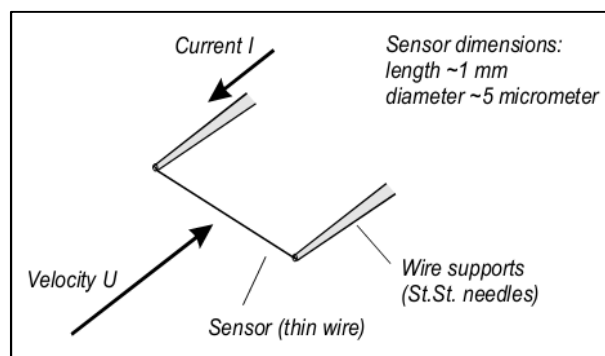


Figura 3.10: Struttura dell'anemometro a filo caldo [16].

Il filo viene riscaldato per effetto Joule, attraverso la circolazione di corrente elettrica, ad una temperatura superiore a quella del fluido di cui si vuole misurare la velocità (convenzionalmente intorno ai 200° C).

La trasmissione di calore dal filo all'ambiente circostante avviene tramite 3 termini: conduttivo, convettivo e radiativo. Di questi tre solo il termine convettivo è legato alla velocità del fluido, mentre gli altri due costituiscono un disturbo sulla misura; in quanto meno significativi, quindi, essi possono essere trascurati in prima approssimazione.

In condizione di equilibrio l'equazione di bilancio energetico per il filo può essere scritta come:

$$I^2 R_w = ha(T_w - T_f) \quad (3.5)$$

dove  $I$  rappresenta la corrente circolante del fluido,  $R_w$  e  $T_w$  rispettivamente la resistenza e la temperatura del filo,  $T_f$  la temperatura del fluido,  $h$  il coefficiente di scambio convettivo ed  $a$  la superficie di scambio termico.

La connessione tra velocità del fluido e lo scambio termico è racchiusa nel termine  $h$ . Tale collegamento è esprimibile tramite il numero di Nusselt ( $Nu$ ), il quale a sua volta dipende dalle caratteristiche del filo e del fluido attraverso un gran numero di parametri, geometrici e fisici, raggruppabili in grandezze dimensionali:

$$Nu = \frac{hd}{k_f} = f \left[ Re, Pr, \frac{T_w - T_f}{T_f}, \frac{L}{D}, \theta \right] \quad (3.6)$$

con  $L$  e  $d$  lunghezza e diametro del filo,  $k_f$  è il coefficiente di scambio termico conduttivo del fluido alla temperatura  $T_f$  e  $\theta$  angolo tra la direzione del moto e l'asse del filo. Da sottolineare come esistano diverse formulazioni semi-empiriche per la determinazione del coefficiente di scambio convettivo.

A questo punto, dopo aver messo in evidenza la comparsa del modulo della velocità del flusso nell'espressione (3.6), risulta necessario determinare la variazione di resistenza  $R_w$  del filo. Essa varia in funzione dello scambio termico che avviene tra il filo ed il fluido in moto: tipicamente per i materiali utilizzati (platino e tungsteno), il legame tra la variazione di temperatura e resistenza del filo è di tipo lineare come mostrato nella seguente espressione:

$$\hat{R}_w = \hat{R}_{w0} [1 + \alpha (T_w - T_{w0})] \quad (3.7)$$

Sperimentalmente il valore viene determinato in maniera accurata da un ponte di *Weatstone*, una cui resistenza è costituita dallo stesso filo caldo. Dopo averlo bilanciato nelle condizioni di riferimento, in fase di misura della velocità, la variazione di resistenza viene tradotta in una variazione del livello di tensione. Tramite la variazione di questo valore, è possibile determinare, dopo una corretta calibrazione dello strumento, la velocità del flusso indagato.

In commercio esistono due tipi anemometri a filo caldo: quelli a temperatura costante e quelli a corrente costante. La prima tipologia di anemometri varia il valore della corrente elettrica circolante, in modo tale da far sì che la temperatura del filo rimanga inalterata anche in seguito ad una variazione del suo valore di resistenza elettrica. La seconda invece, mantiene inalterato il

valore della corrente elettrica circolante, permettendo così di far variare la temperatura del filo.

Utilizzando quindi un anemometro a corrente costante, la variazione di tensione valutata dal ponte di *Weatstone* è direttamente proporzionale alla variazione di velocità. In particolare, considerando il valore di velocità istantanea come la somma tra la componente media e la fluttuazione di velocità:

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (3.8)$$

Al variare di  $U(t)$  si ottiene anche una variazione di  $R_w(t)$  esprimibile nello stesso modo come somma di una componente media e di una fluttuazione attorno a questo valore. Dato che la corrente di alimentazione del filo è costante, e tramite la prima legge di Ohm, è possibile ricavare l'espressione della tensione ai capi del ponte.

$$V(t) = \bar{V} + v(t) \quad (3.9)$$

Valutare la fluttuazione di velocità dipende quindi dalla capacità del sistema di acquisizione di misurare la fluttuazione di tensione elettrica: lo strumento deve avere pertanto una risposta dinamica sufficiente a descrivere il fenomeno. Essa viene valutata come il tempo necessario alla sonda per adeguarsi ad una sollecitazione esterna: in questo caso il tempo viene valutato come la capacità del filo di raffreddarsi/riscaldarsi.

Nel caso dell'anemometro a corrente costante si ottiene una risposta a bassa frequenza, dell'ordine di 160 Hz.

Differente invece è la risposta in frequenza dell'anemometro a temperatura costante. Esso è costituito da un amplificatore a retroazione che compensa automaticamente lo sbilanciamento del ponte dovuto alle variazioni di velocità agendo sulla corrente di alimentazione. In tal modo viene mantenuta costante la resistenza e quindi la temperatura del sensore. La struttura di compensazione di sbilanciatura del ponte porta ad avere una banda passante dello strumento intorno ai 50 kHz. Questo tipo di sonda risulta essere privilegiata rispetto ad un anemometro a corrente costante, in quanto permette di visualizzare correttamente ogni eventuale fluttuazione turbolenta del flusso. Mantenendo costante la resistenza del filo e modificando invece l'intensità di corrente, è

possibile ottenere una variazione di tensione come quella mostrata nell'equazione.

Il tipo di anemometro utilizzato nelle prove qui descritte (sia che si parli della tipologia a corrente o a temperatura costante) è caratterizzato dall'aver un solo filo e non permette di determinare né la direzione, né il verso del flusso. In commercio esistono altri tipi di sonde a filo caldo, costituiti da più fili ed in diverse configurazioni, che permettono di risolvere questi problemi. Non vengono qui presi in considerazione, poiché non impiegati in questo lavoro di tesi.

### 3.4.2. Configurazione sperimentale utilizzata

L'anemometro a filo caldo è stato utilizzato per definire prevalentemente l'intensità di turbolenza e le dimensioni delle scale spaziali e temporali associate al mescolamento in prossimità sezione di uscita del condotto. Per questo tipo di esperimento, le sonde più adatte sono quelle a temperatura costante, in quanto hanno una dinamica migliore rispetto a quelle a corrente costante.

In questo caso è stata utilizzata una sonda di Platino, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 3.3.

**Tabella 3.3: Caratteristiche del filo caldo utilizzato per gli esperimenti.**

Proprietà del filo caldo utilizzato per gli esperimenti	
$\hat{R}_w$	3.31 $\Omega$
$T_w$	20° C
$a_w$	0.0036 C <sup>-1</sup>
$\tau_w$	20 $\mu$ s
$f_w$	50 kHz

La linea sperimentale della prova è mostrata nella Figura 3.11: dopo aver posizionato il filo caldo nel punto di misura, il segnale viene elaborato dal sistema di controllo in retroazione per il mantenimento della temperatura costante del filo.

Il segnale così ottenuto è però ancora analogico e per essere rielaborato facilmente da un calcolatore, è necessario convertirlo in un segnale digitale. Dopo questo passaggio, il segnale così ottenuto è pronto per le operazioni di salvataggio e rielaborazione.

Non dovendo valutare l'informazione associata al valore della velocità, ma solo le dimensioni delle scale, non è stata fatta una calibrazione del filo caldo. I tempi caratteristici del fenomeno di mescolamento sono, infatti, ricavabili dal solo segnale nel dominio del tempo: le fluttuazioni di velocità si traducono in fluttuazioni di tensione senza nessuna variazione sulla dinamica associata.

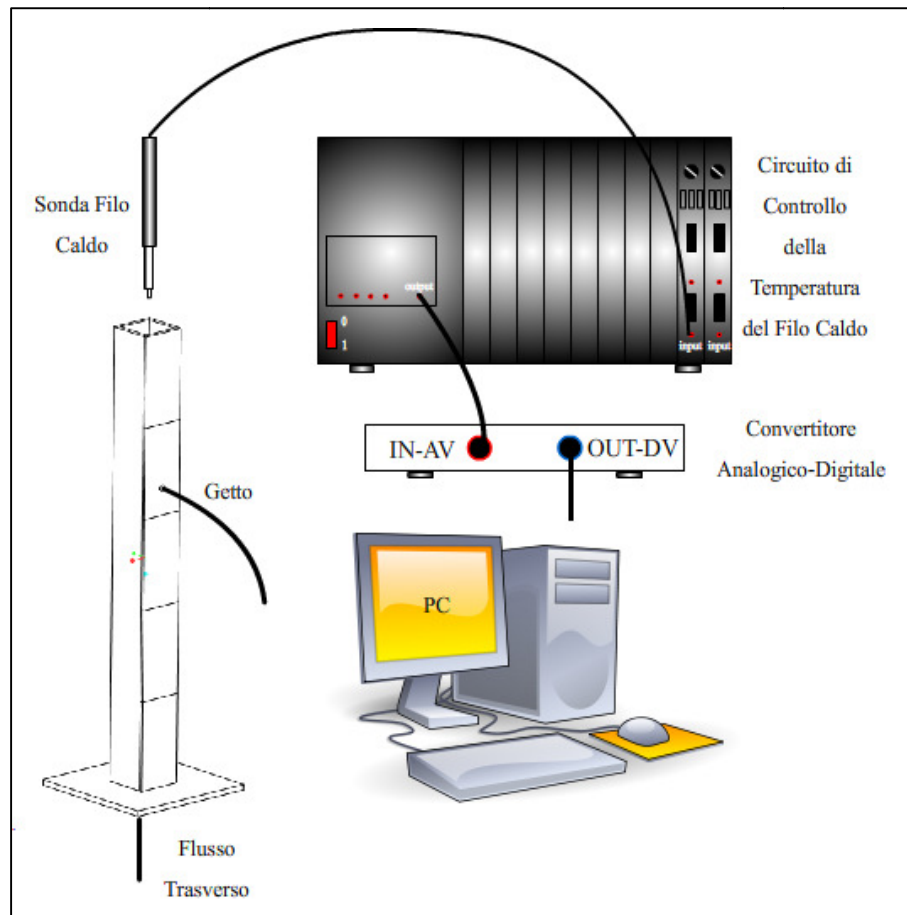


Figura 3.11: Schema logico della linea sperimentale per le misure effettuate tramite anemometro a filo caldo.

Le misure sono state effettuate su una griglia di punti equispaziati di 5 mm, per un totale di 49 punti di misura, giacenti su un piano perpendicolare all'asse z di sviluppo del condotto. Tale piano è posto in prossimità della sezione d'uscita, distante 170 mm dal punto d'iniezione. In alcuni test l'analisi è stata riferita ai soli assi geometrici della sezione, evidenziati con la linea di colore rosso e verde nella Figura 3.12, riducendo così i punti di misura a 13.

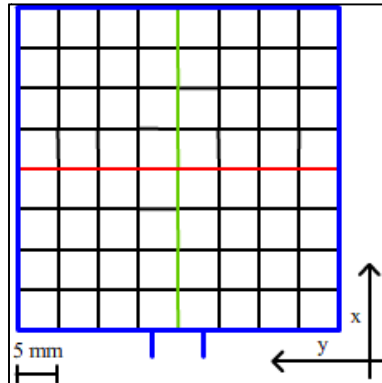


Figura 3.12: Griglia equispaziata dei punti di misura effettuata con l'anemometro a filo caldo; in blu il contorno del dominio, in rosso e verde gli assi della geometria. I punti di analisi sono posti all'intersezione delle linee nere.

## 3.5. Laser Doppler Velocimetry

### 3.5.1. Cenni teorici

L'LDV (Laser Doppler Velocimetry) è uno strumento di misura ottica che permette la definizione della velocità istantanea di particelle traccianti che attraversano un volume di misura definito dall'intersezione di due fasci laser [15] [16] [17].

Una misura diretta della velocità media richiede la determinazione dello spazio  $\Delta s$  percorso da un oggetto in un prefissato intervallo di tempo  $\Delta t$ :

$$U = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (3.10)$$

Chiaramente per determinare una velocità puntuale il volume di prova dev'essere sufficientemente piccolo: tale livello di risoluzione spaziale viene raggiunto dall'utilizzo di tecniche ottiche. Anche la particella usata come tracciante deve avere dimensioni molto piccole, tipicamente dell'ordine del  $\mu\text{m}$ . La tecnica LDV, nella sua versione differenziale, realizza questo principio mediante un sistema di frange d'interferenza generate dall'incrocio di due fasci laser piani polarizzati e coerenti. Quando una particella attraversa il sistema di frange alterne chiaro-scure, l'intensità della luce diffusa risulta modulata a una

frequenza uguale alla componente normale della velocità, divisa per l'intervallo spaziale tra due frange contigue (effetto Doppler):

$$f_D = \frac{U}{\Delta s} \quad (3.11)$$

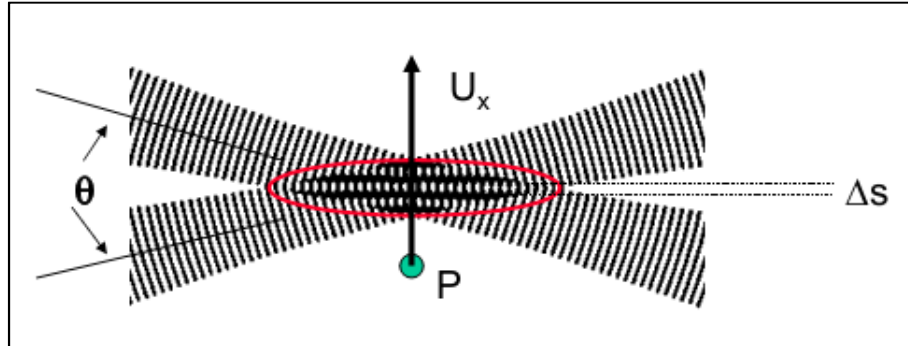


Figura 3.13: Frange d'interferenza nel volume di misura di un anemometro laser Doppler [16].

La spaziatura tra due frange  $\Delta s$  può essere determinata con le leggi dell'ottica geometrica:

$$\Delta s = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3.12)$$

dove  $\lambda$  e  $\theta$  rappresentano rispettivamente la lunghezza d'onda e l'angolo tra i due fasci laser.

Essendo la spaziatura determinata per via analitica, non rimane che determinare la variazione di frequenza della luce che viene riflessa dalla particella tracciante. Questo avviene per effetto Doppler, secondo il quale un fascio di luce laser emesso da una sorgente fissa, viene percepito da una particella  $P$  ad una frequenza diversa da quella originale:

$$\omega_p = \omega_i - \vec{k}_i \cdot \vec{U} \quad (3.13)$$

$|\vec{k}| = \frac{\omega}{c} \hat{r}$  (con  $c$  pari alla velocità della luce);  $\omega_i$  e  $\omega_p$  rappresentando rispettivamente la pulsazione del fascio emesso dalla sorgente laser e quella percepita dalla particella.

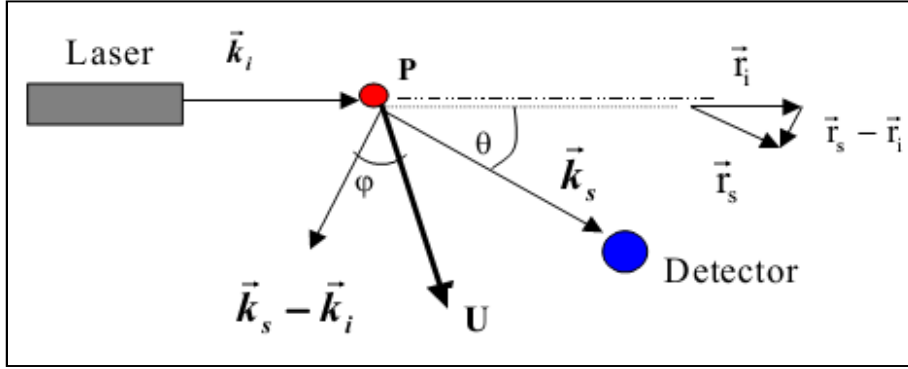


Figura 3.14: Schema vettoriale dell'anemometro laser Doppler [16].

Per misurare la pulsazione  $\omega_p$ , e quindi la frequenza, è necessario introdurre un sensore, che non può ovviamente essere inserito all'interno della particella. Tuttavia questa diffonde la luce laser e la frazione della radiazione diffusa verso un fotorecettore subisce un secondo effetto Doppler, con segno opposto perché questa volta la sorgente è in moto rispetto all'osservatore fisso:

$$\omega_s = \omega_p + \vec{k}_s \cdot \vec{U} \quad (3.14)$$

In questo modo l'osservatore, ossia il foto ricevitore, rileva una frequenza  $\omega_s$  diversa da quella emessa dal laser:

$$\omega_s = \omega_i + (\vec{k}_s - \vec{k}_i) \cdot \vec{U} \quad (3.15)$$

La differenza tra le due frequenze, chiamata *Doppler Shift*, dipende dalla velocità della particella e dalla differenza tra i due vettori d'onda.

Essa può essere riscritta introducendo i versori mostrati in Figura 3.14: la frequenza Doppler misurata è quindi pari a:

$$\omega_D = \omega_s - \omega_i = \left( \frac{\omega_s}{c} \vec{r}_s - \frac{\omega_i}{c} \vec{r}_i \right) \cdot \vec{U} \quad (3.16)$$

Dato che nelle condizioni di prova tipiche di esperimenti fluidodinamici  $|\vec{U}| \ll c$ , è possibile semplificare l'espressione precedente ottenendo così:

$$\omega_s - \omega_i = \frac{4\pi n}{\lambda_0} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot |\vec{U}| \cos \phi \quad (3.17)$$



Nell'espressione (3.17) il termine  $n$  indica il indice di rifrazione del mezzo, che nel caso dell'aria è pari a 1, mentre  $\lambda_0$  rappresenta la lunghezza d'onda del fascio laser nel vuoto (o in aria).

La frequenza Doppler così ricavata risulta essere direttamente proporzionale al modulo di una componente della velocità della particella individuata dal sistema ottico. Tale frequenza però assume valori troppo piccoli (inferiori a 100 MHz) rispetto alla frequenza del fascio laser (dell'ordine di  $10^{14}$  Hz) per poter essere risolta con strumenti ottici.

Al fine di rilevare la variazione di frequenza, viene tipicamente utilizzata un'eterodina ottica: essa si ottiene sovrapponendo la radiazione diffusa dalla particella ad una frazione del fascio laser originale. Ciò ha portato all'affermarsi della configurazione differenziale, dove i due fasci provenienti dalla stessa sorgente laser vengono focalizzati in un punto comune e, sovrapponendosi, determinano il volume di misura. La particella che lo attraversa diffonde la radiazione luminosa di entrambi i fasci in tutte le direzioni secondo una distribuzione complessa e deducibile dalla teoria della diffusione di luce (*scattering*). Sulla superficie sensibile di un foto ricevitore, posto in un punto qualsiasi dello spazio, si sovrappongono le due radiazioni diffuse della particella, ciascuna con una frequenza modificata per l'*effetto Doppler*. Scomponendo il campo elettrico della radiazione elettrica diffusa dalla particella è possibile osservare differenti termini, di cui un solo termine è dato dalla differenza di frequenza: tale termine viene percepito dai moderni fotomoltiplicatori, mentre i rimanenti termini sono caratterizzati da frequenze ottiche troppo elevate per essere percepite. Il risultato così ottenuto è identico formalmente all'espressione (3.17), con l'unica differenza che la componente di velocità misurata ora risulta essere quella normale alla bisettrice dell'angolo formato dai due fasci laser e giace nel loro stesso piano, indipendentemente dalla posizione angolare del foto ricevitore. Tale configurazione viene definita eterodina ottica e consente un'interpretazione del funzionamento del Velocimetro Laser Doppler più corretta del modello a frange di interferenza. Infatti la particella non percepisce le frange nel volume di misura, ma solo i campi elettromagnetici della radiazione.

Il volume di misura nella configurazione differenziale è chiaramente definito dalla regione di sovrapposizione dei due fasci e può essere ridotto aumentando l'angolo  $\theta$ , mentre il foto ricevitore può anche essere posto all'indietro nella

configurazione detta in *backscattering* richiedendo un solo accesso ottico alla camera di prova (Figura 3.15) e semplificando di fatto l'architettura del sistema.

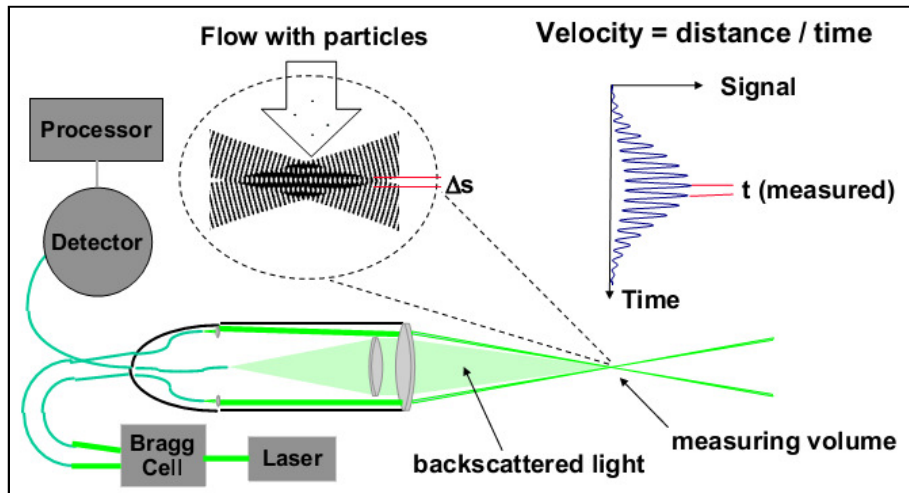


Figura 3.15: Anemometro laser Doppler di tipo differenziale con ricezione all'indietro [16].

Utilizzando questa configurazione quindi, tutti gli elementi ottici possono essere raggruppati in un unico blocco, rendendo lo strumento robusto, insensibile ad eventuali vibrazioni e facilmente mobile per eseguire traverse di misura.

La misura così fatta però, fornisce solo il modulo della velocità lungo la direzione precedentemente definita, ma non fornisce alcuna informazione riguardante il verso. Tale problema viene risolto se in sede del sistema di riferimento costituito dalla frange stazionarie nel volume di misura, viene inserito un sistema mobile rappresentabile da frange che scorrono a velocità costante e in direzione nota all'interno del volume di misura fisso nello spazio. Esistono diverse soluzioni per effettuare la traslazione delle frange: la più utilizzata prevede di variare la frequenza di uno dei fasci laser di una quantità fissata  $f_{shift}$ ; in questo modo le frange iniziano a scorrere con verso e modulo noti (Figura 3.16).

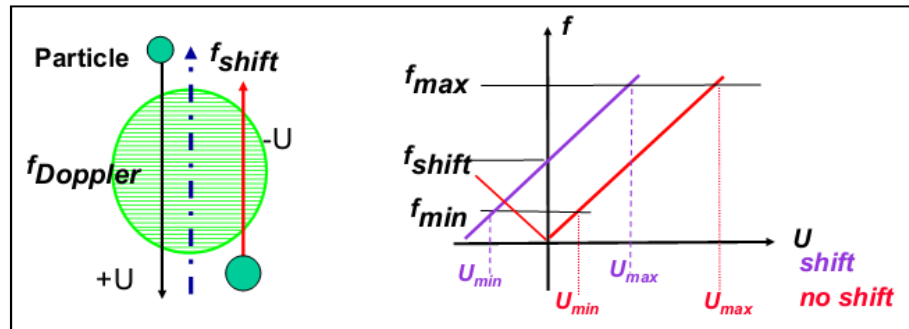


Figura 3.16: Schema delle velocità relative tra particella e frange (immagine a sinistra) e correzione dell'ambiguità direzionale (immagine a destra) [16].

La velocità della particella misurata dal foto rilevatore sarà positiva quando la frequenza del segnale è superiore a quella di traslazione, e negativa per valori inferiori. Questo cambiamento di frequenza di uno dei fasci laser viene effettuato tramite un modulatore elettro-ottico denominato *cella di Bragg*, il quale viene inserita lungo il cammino di uno dei due fasci laser originale.

La misura può essere effettuata solo su particelle sferiche (liquide o solide) che permettono la corretta rifrazione del laser, per cui non è possibile effettuare alcuna misura di velocità tramite il sistema LDV in un gas. Per questo motivo nel flusso in analisi viene inserito un tracciante, composto tipicamente da goccioline d'olio, le cui dimensioni devono essere sufficientemente piccole da permettergli di seguire anche la più piccola fluttuazione turbolenta. Un modo per valutare che ciò avvenga, è quello di determinare il numero di Stokes, dato dal rapporto tra il tempo di rilassamento della particella e la scala temporale della fluttuazione turbolenta, come mostrato nell'espressione (3.18).

$$Sto = \frac{\tau_p}{T_U} \ll 1 \quad (3.18)$$

Il tempo di rilassamento  $\tau_p$  della particella viene definito come:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_f} \quad (3.19)$$

dove  $\rho_p$ ,  $d_p$  e  $\mu_f$  sono rispettivamente la densità, il diametro della particella e la viscosità del fluido di cui la particella deve seguire il moto.

Se il numero di Stokes assume valore minore dell'unità, allora la particella è in grado di seguire ogni più piccola fluttuazione turbolenta, altrimenti l'inerzia della particella porterebbe ad aumentare eccessivamente il tempo di rilassamento. Tale fenomeno mette in evidenza un comportamento analogo a quello di un filtro passa basso, caratterizzato da una funzione di trasferimento come mostrata nell'Equazione (3.20).

$$\frac{U_p}{U_f} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_p^2}} \quad (3.20)$$

dove  $U_p$  ed  $U_f$  rappresentano rispettivamente la velocità della particella tracciante e quella del fluido, mentre  $\omega$  rappresenta la pulsazione delle fluttuazioni turbolente del fluido.

Un altro effetto, dovuto alla dinamica del trasporto delle particelle, può indurre un errore sistematico (*bias error*) nella determinazione delle grandezze statistiche: valore medio, deviazione standard e densità di probabilità della velocità del fluido. L'errore deriva dal fatto che in un flusso turbolento, caratterizzato da ampie fluttuazioni di velocità, la probabilità di transito delle particelle, anche se esse sono originariamente distribuite in modo omogeneo nel fluido, è correlata al modulo della velocità,  $U$ , dalla relazione:

$$\dot{n} = \eta NUA \quad (3.21)$$

dove  $\dot{n}$  è pari al numero di particelle che attraversano il volume di misura nell'unità di tempo,  $N$  rappresenta la concentrazione in numero delle particelle nel flusso,  $A$  la sezione del volume di misura normale alla direzione media del flusso e  $\eta$  la percentuale di particelle che forniscono un segnale valido.

Negli istanti in cui la velocità è più alta passano più particelle e viceversa. Se un campione di  $M$  misure, ve ne saranno di più in corrispondenza delle velocità più alte ed il valore medio, dedotto dalla media aritmetica, risulterà sovrastimato. Questo effetto sarà tanto maggiore quanto più sono ampie le fluttuazioni turbolente ed introduce un errore che è necessario rendere minimo con qualche criterio correttivo. Il problema è stato molto dibattuto e sono state proposte diverse soluzioni, tutte basate sull'introduzione di un fattore peso da attribuire a ciascuna misura nella valutazione dei parametri statistici. Pertanto la stima della

velocità media su un insieme di  $M$  misure viene eseguita con la relazione mostrata nell'espressione (3.22).

$$\bar{U} = \frac{\sum_1^M g_i U_i}{\sum_1^M g_i} \quad (3.22)$$

dove i  $g_i$  pesi possono assumere valori diversi, in funzione del modello prescelto per pesare le velocità. Ovviamente  $g_i = 1$  corrisponde alla situazione in cui non si introduce nessuna correzione. Considerazioni teoriche e simulazioni numeriche su dati sintetici, nell'ipotesi di traccianti uniformemente distribuiti nella corrente fluida, indicano che è più corretto utilizzare come peso il tempo di transito (*transit time*) della particella nel volume di misura, perché questo è inversamente proporzionale al modulo del vettore velocità, indipendentemente dalla componente che viene effettivamente misurata. Il tempo di transito è facilmente determinabile perché equivale alla durata del segnale Doppler di ogni singola particella e tutti gli strumenti LDV sono programmati per memorizzare questo tempo unitamente alla velocità. La correzione è valida indipendentemente dalla frequenza media di campionamento (data rate) e risulta tanto più significativa quanto maggiore è l'intensità delle fluttuazioni turbolente; essa va applicata anche al calcolo della deviazione standard che corrisponde all'intensità di turbolenza, degli sforzi di Reynolds e della funzione di distribuzione delle velocità (PDF).

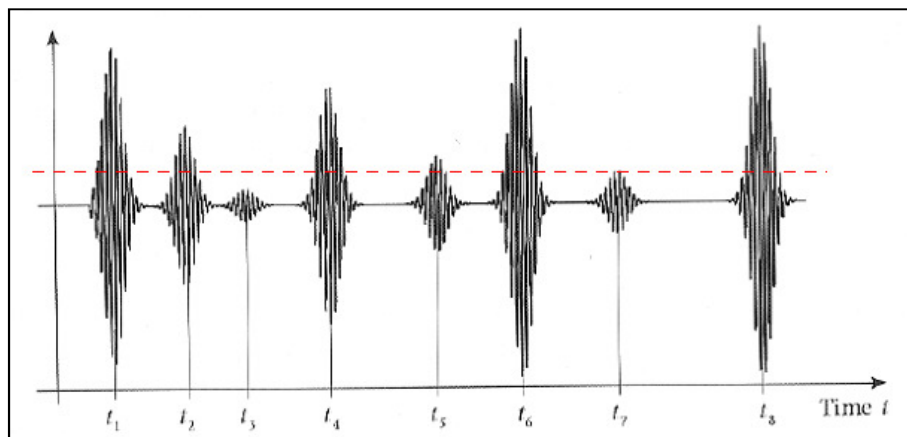


Figura 3.17: Segnale acquisito da un sistema di misura LDV [16].

La distribuzione casuale nel tempo delle misure LDV, di cui un esempio viene riportato in Figura 3.17, implica l'impossibilità di applicare direttamente

l'algoritmo della trasformata di Fourier veloce (FFT) alla sequenza temporale dei valori registrati e rende impossibile definire una frequenza di Nyquist. La procedura più semplice e conveniente è quella di ricampionare i dati a frequenza costante, con una procedura detta di "sample and hold" che seleziona un solo campione per ogni intervallo di campionamento, di cui viene mostrato un esempio in Figura 3.18. Nel caso ci siano intervalli vuoti, in essi viene conservato il valore dell'intervallo precedente. A questo punto si può applicare la FFT. Questa procedura è valida se è verificata la condizione mostrata nell'espressione (3.23).

$$\dot{n}T_E > 5 \quad (3.23)$$

dove  $T_E$  rappresenta la scala integrale della turbolenza.

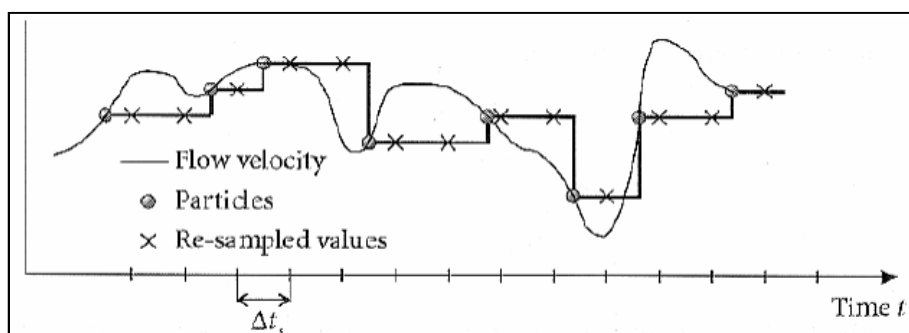


Figura 3.18: Andamento del segnale di velocità nel tempo con il relativo campionamento ed il mantenimento per ogni intervallo di tempo  $\Delta t_s$ .

### 3.5.2. Configurazione sperimentale utilizzata

La linea sperimentale utilizzata per questo tipo di misura è mostrata nella Figura 3.19.

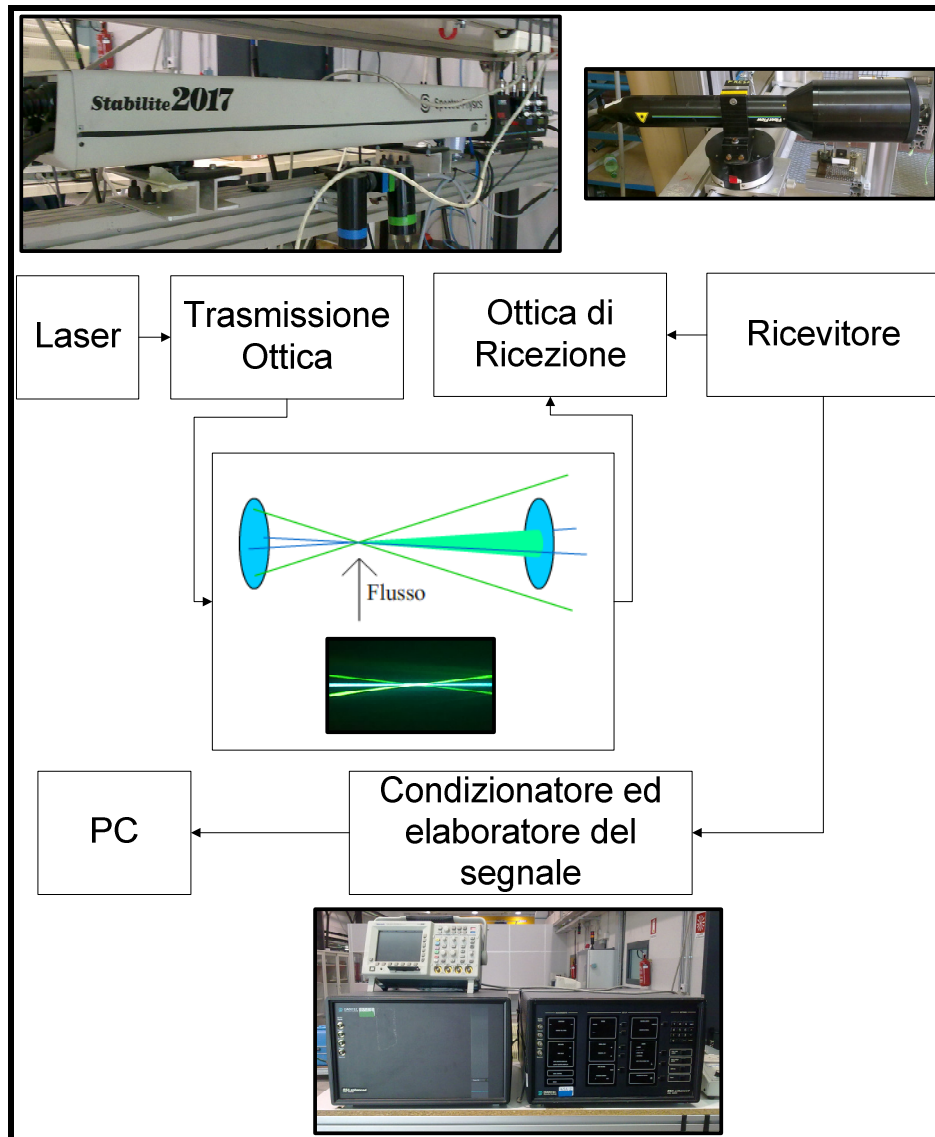


Figura 3.19: Linea sperimentale per le misure effettuate tramite tecnica LDV.

Il fascio laser, dopo essere stato prodotto, viene convogliato tramite fibre ottiche, al sistema di trasmissione, il quale divide il fascio laser in due coppie con differenti frequenze d'onda. I fasci laser ottenuti hanno colorazione blu e

verde di lunghezza d'onda rispettivamente pari a 488 nm e 514.5 nm. Un fascio laser per coppia viene poi traslato in frequenza per poter avere la risoluzione sul verso del moto della particella. I segnali ricevuti vengono processati dal sistema di acquisizione che provvederà ad inviare le misure di velocità al computer.

La sorgente laser utilizzata è a ioni di argon, mentre le particelle per la misura sono composte da goccioline d'olio del diametro medio di 2  $\mu\text{m}$ . L'utilizzo del tracciante è indispensabile per questa misura, in quanto i soli fasci laser non producono alcuna variazione di frequenza. L'inseminazione è stata fatta sia inseminando nel flusso trasverso che nel getto, ma non contemporaneamente. Questo per valutare eventuali diversità delle condizioni di analisi, soprattutto nella regione di iniezione del getto.

Il sistema di misura LDV a disposizione è in grado di misurare due componenti di velocità tra loro perpendicolari. Non potendo caratterizzare completamente il campo fluidodinamico tridimensionale con una sola misura, queste sono state effettuate facendo variare l'orientamento della sonda e mantenendo inalterata la condizione di prova. Una prima serie di misure è stata realizzata facendo passare i fasci laser dalla sezione d'uscita del condotto, ottenendo le componenti di velocità giacenti in piani paralleli ad  $x - y$  della Figura 2.2 (configurazione I); la terza componente di velocità (parallela all'asse  $z$ ) è stata misurata facendo passare i fasci luminosi dalla parete laterale del condotto (configurazione II), dato che esso è costituito con materiale trasparente. Le modalità di prova appena descritte sono mostrate in Figura 3.21 e in Figura 3.22.

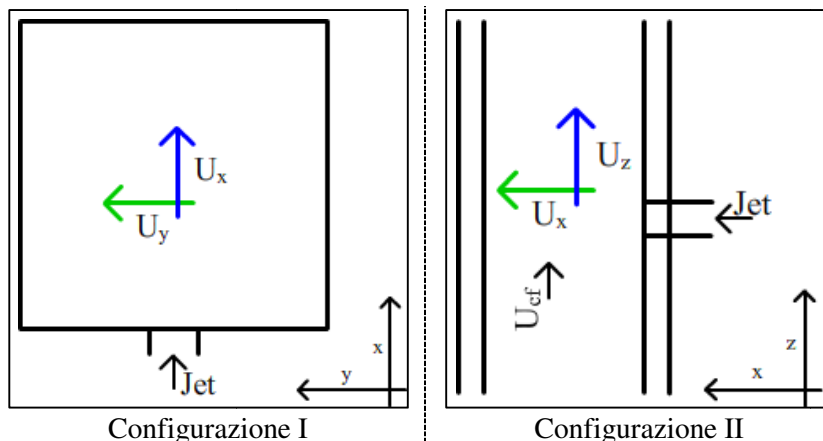


Figura 3.20: Direzione e verso delle componenti misurate dal sistema LDV nelle due configurazioni di misura.



La direzione delle componenti misurate nelle due configurazioni sono mostrate nella Figura 3.20

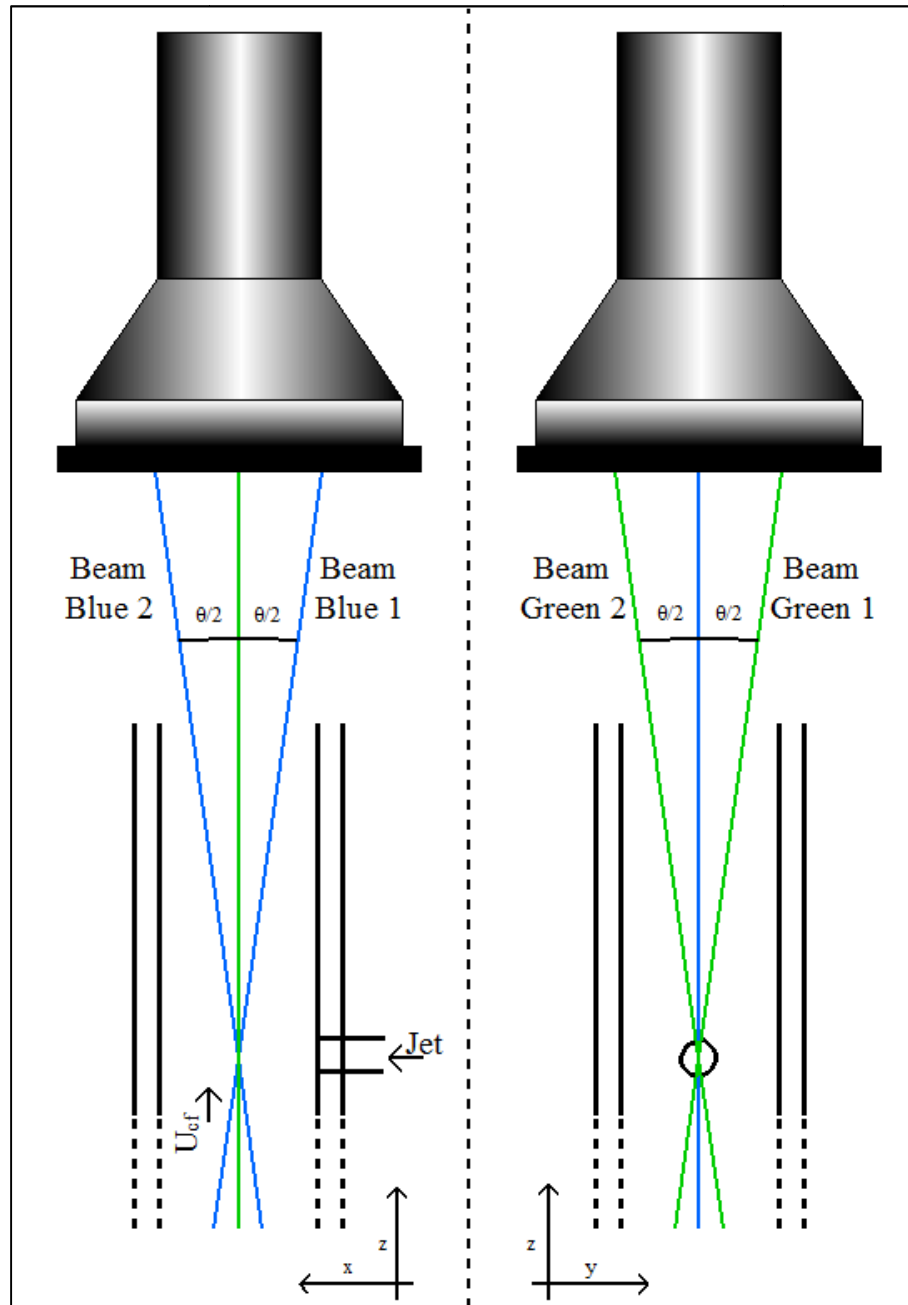


Figura 3.21: Configurazione I di misura con il sistema di misura LDV.

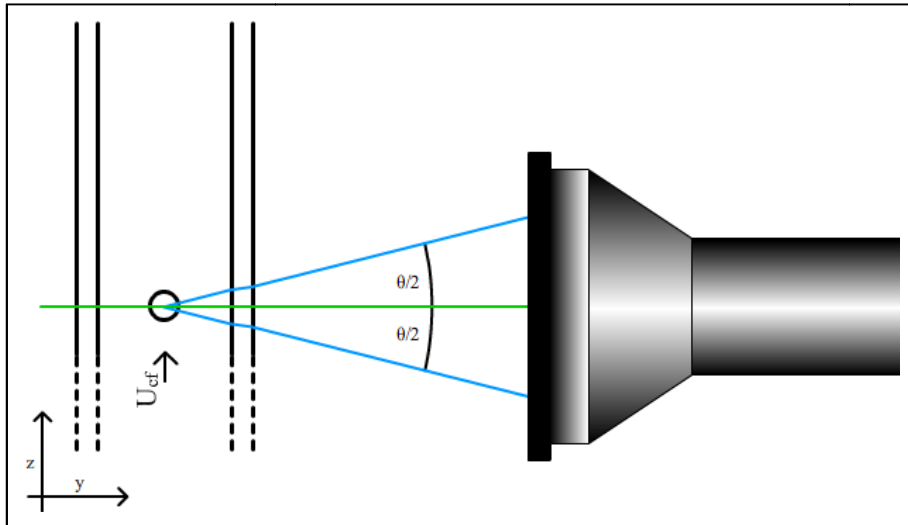


Figura 3.22: Configurazione II con il sistema di misura LDV.

Utilizzando una configurazione differenziale del sistema di misura, i raggi risultano inclinati rispetto alle pareti del condotto. Così facendo si è in grado di misurare solo la parte centrale del condotto e non le zone in prossimità delle pareti. Infatti un eventuale contatto tra i fasci laser e le pareti della camera di prova, porterebbe ad annullare la misura impedendo di fatto la determinazione della velocità. Nel caso in esame però risulta particolarmente interessante valutare ciò che accade in prossimità della parete d'iniezione del getto: entrando nello specifico, problematica è la misura effettuata dal gruppo di fasci perpendicolari alla parete in esame (fasci blu della configurazione I), mentre per quelli paralleli (fasci verdi) non sussiste alcun problema. Per questo motivo, la sonda ottica è stata inclinata nel piano  $x$ - $z$  in modo tale che il fascio blu numero 1 risulti parallelo alla parete. Adottando questa tecnica però si ha lo svantaggio di limitare ulteriormente la regione d'indagine nella direzione  $x$ . Di conseguenza, per ottenere un volume di interesse più ampio è stata utilizzata una lente con una lunghezza focale elevata. In questo modo l'angolo di apertura dei fasci ( $\theta$ ), risulta essere piccolo, ottenendo però un volume di misura deformato lungo la direzione  $z$ . Questa modalità di prova è visualizzata nella Figura 3.23. La misura così ottenuta non è più giacente in un piano parallelo agli assi  $x - y$  del sistema di riferimento mostrato in Figura 2.2, ma risulta inclinato di un angolo pari a  $\theta/2$ . La velocità quindi deve essere corretta per essere riportata nel sistema di riferimento assoluto.

Tabella 3.4: Coefficienti di correzione della velocità per la configurazione I di prova modificata (sonda inclinata).

Coefficiente di correzione della velocità per i fasci inclinati	
x	0.9995
z	-0.0317

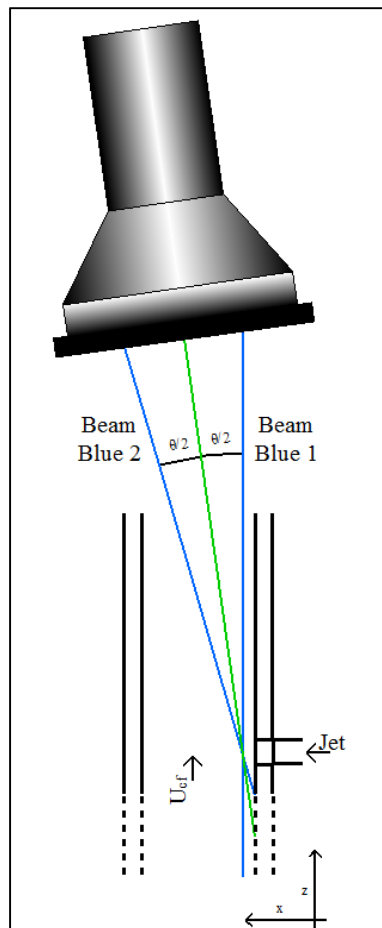


Figura 3.23: Configurazione I ruotata per effettuare le misure in prossimità della parete di iniezione del getto.

Per quanto riguarda la configurazione II, non sono state effettuate variazioni sull'angolo dei due fasci a causa dei vincoli strutturali del sistema di prova. Nella Tabella 3.5 sono riportate le caratteristiche del volume di prova nelle due configurazioni; le dimensioni del volume di lavoro fanno riferimento alla Figura 3.24.

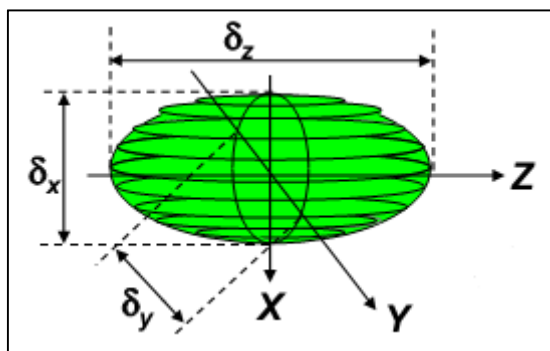


Figura 3.24: Dimensioni del volume di prova del sistema di misura LDV [16].

Tabella 3.5: Proprietà del volume di misura nelle due differenti configurazioni di misura.

## Proprietà del volume di misura nelle due differenti configurazioni di misura

	Configurazione I		Configurazione II	
	Blu	Verde	Blu	Verde
F [mm]	600		310	
Diametro del raggio laser [mm]	1.350		1.350	
Espansione del raggio laser	1		1.95	
$\delta_x$ [mm]	0.276	0.291	0.074	0.078
$\delta_y$ [mm]	0.276	0.291	0.074	0.078
$\delta_z$ [mm]	8.725	9.199	0.617	0.650
N° di frange	35		35	
$\Delta s$ [ $\mu m$ ]	7.709	8.128	2.056	2.168
$\frac{\theta}{2}$ [deg]	1.814		6.815	

La sonda ottica è stata spostata tramite un sistema di traslazione motorizzato con una risoluzione di 0.5 mm. Sia questo sistema di traslazione della sonda, che l'acquisizione sono stati gestiti tramite l'ausilio di un computer.

Per le due configurazioni di prova sono state create diverse griglie di punti di misura. Per la configurazione I, i punti sono stati equispaziati di 3 mm in piani paralleli ad x-y, distanti 0, 1, 2, 5 e 10 diametri dal punto di iniezione, per un totale di 5 piani. Il numero totale di punti di misura per ogni piano è stato di 72. La regione di misura è evidenziata nella Figura 3.25.

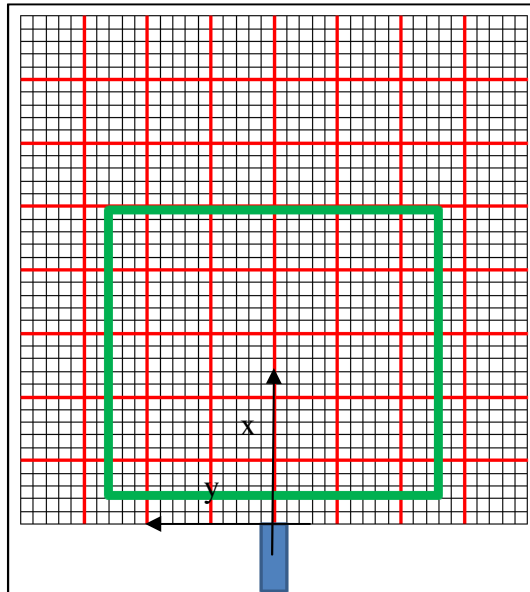


Figura 3.25: Sezione normale del condotto di prova; in verde viene evidenziata la regione di misura.

Per ottenere un campo tridimensionale delle velocità, i punti di misura nella configurazione II sono stati i medesimi della configurazione I, con la differenza che non è stato possibile indagare la linea di punti in prossimità della parete d'iniezione, a causa dell'interferenza dei laser con le pareti del condotto. I punti di misura lungo la componente  $x$  sono stati fatti partire da 5 mm dalla parete, in modo tale che la prima fila di punti lungo  $y$  sia sovrapposta con la seconda fila delle misure nella configurazione I. Non essendo stata girata l'ottica di acquisizione, la regione di misura è risultata confinata nella parte centrale del condotto, portando così ad avere delle misure anche a distanze maggiori da quelle raggiunte con la configurazione I di misura.

Gli esperimenti sono stati effettuati inizialmente con la configurazione I e successivamente con la configurazione II: con la prima è stato osservato una simmetria del fenomeno rispetto all'asse  $x$ , per cui sono state effettuate misure solo nella parte sinistra del condotto. Il numero totale di punti di misura per ogni piano è stato pari a 40.



## 4. Analisi delle immagini

---

---

La visualizzazione del getto mediante la tecnica Schlieren permette di valutarne il comportamento nel momento in cui interagisce con il flusso trasverso, al variare del numero di Reynolds e del parametro  $R$ . L'attenzione è stata concentrata sul rateo di deflessione del getto ed i punti di contatto con le pareti, per esperimenti con iniezione normale del getto al flusso trasverso. Oltre a questo vengono anche presentate delle analisi relative alla produzione di vortici visibili nelle foto Schlieren di alcuni esperimenti.

Le immagini relative agli esperimenti però sono ricche di elementi di disturbo, che non mettono chiaramente in evidenza il solo getto. Per questo motivo è stato elaborato un algoritmo di pulizia del rumore presente nelle foto, al fine di ottenere un'ottima identificazione del getto e delle relative caratteristiche tra cui il suo piegamento ed il contatto con le pareti del condotto. La scrittura dell'algoritmo è stata effettuata cercando di limitare il più possibile l'intervento di un operatore esterno, per minimizzare le possibili variazioni sulla misura finale connessa a parametri soggettivi. L'intero algoritmo è stato implementato nell'ambiente di programmazione tecnico scientifica offerta da Matlab, il quale offre una buona quantità e qualità di strumenti atti all'elaborazione delle immagini e che quindi ben si presta a quest'analisi. Come testi di riferimento sono stati utilizzati [18] e [19].

### 4.1. Riconoscimento del getto

Come già anticipato nel capitolo precedente, durante questa prova sono state acquisite due serie di immagini: una rappresentante il solo sfondo, ossia la camera di prova in cui scorre solo il flusso trasverso, ed una in cui viene effettuato l'esperimento vero e proprio, dove è presente anche il getto nelle condizioni desiderate.

Il numero di immagini acquisite per ogni serie è differente: con il solo flusso trasverso non è necessario acquisire un numero elevato d'immagini, infatti è

stato sufficiente acquisirne 20, mentre per l'esperimento è fondamentale acquisirne molte di più, per avere a disposizione un numero maggiore di dati per l'indagine statistica.

Per il *background* sarebbe stato sufficiente acquisire anche una sola immagine, dato che in queste condizioni nulla cambia nella regione di prova. Questo risulta essere vero per l'esperimento in sé, ma non per l'acquisizione immagini: infatti a causa del punto e dei transitori di formazione della scintilla nella lampada stroboscopica, l'intensità luminosa delle immagini risulta variare da una foto alla successiva. Per cui l'acquisizione di una serie di immagini ha permesso di determinare una media della loro luminosità tale da poter comparare poi in un secondo momento con le immagini fatte durante gli esperimenti.

Dopo aver ottenuto un'immagine dello sfondo mediata in termini di luminosità, è stata fatta una ricerca della regione di reale interesse: le immagini infatti mostrano sia la parte interna del condotto, ossia la regione obiettivo delle nostre indagini, che l'ambiente circostante. Analizzare anche parte dell'immagine in cui non è presente nessun contenuto informativo utile, risulta essere deviante per la visualizzazione delle informazioni che si vogliono realmente estrarre, oltre che aggravare il costo computazionale dell'intero processo di rielaborazione e di interpretazione. Le immagini sono state di conseguenza tagliate, e tale procedura è stata anch'essa effettuata in maniera completamente automatica: basandosi sull'immagine dello sfondo appena ottenuta, sono state ricercate le pareti del condotto, che risultano essere ben visibili nelle immagini, di cui un esempio viene mostrato nel riquadro (a) della Figura 4.1. La loro posizione è stata resa visibile grazie prima ad una apertura dell'immagine dello sfondo seguita da una binarizzazione<sup>6</sup> inversa. La prima rappresenta un'operazione morfologica complessa, la quale rende più omogenei i contorni degli oggetti e ne elimina le piccole interruzioni; la seconda invece, permette di ottenere un'immagine in bianco a nero a partire da una in scala di grigi: ogni pixel con intensità luminosa inferiore al valore di soglia  $t$  viene portato a saturazione, che in termini logici viene indicato con il numero 1 (colore bianco), se invece risulta essere superiore a tale valore viene portato a 0 (colore nero). La funzione di selezione e di modifica dell'intensità luminosa del pixel appena descritta viene riportata nella funzione (4.1), mentre il risultato finale di questa elaborazione viene mostrato nell'immagine (b) della Figura 4.1.

---

<sup>6</sup> Tale termine viene utilizzato in quanto i colori presenti nell'immagine sono solo due: bianco (1) e nero (0).

---



$$I_{binaria}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } I_{originale}(t) > soglia \\ 1 & \text{se } I_{originale}(t) \leq soglia \end{cases} \quad (4.1)$$

Con la procedura di elaborazione dell'immagine dello sfondo è stato possibile mettere in evidenza correttamente le pareti del condotto, di cui poi sono state ricavate le relative posizioni. Queste sono state ricavate effettuando una ricerca dei pixel bianchi a partire dalla mezzeria dell'immagine, lungo la larghezza dell'immagine<sup>7</sup>. La linea mediana infatti si trova in corrispondenza della regione interna del condotto, per cui se ci si sposta verso l'esterno il primo elemento che si trova sono proprio le pareti. Dato che la regione interna del condotto è completamente nera, mentre le pareti ora sono evidenziate in bianco, la loro posizione sarà pari a quella dei pixel con la medesima colorazione. Con queste informazioni è stato possibile tagliare l'immagine e quindi limitare l'analisi alla sola regione d'interesse. La riduzione però non è stata effettuata in corrispondenza della posizione precedentemente trovata, ma è stato lasciato un bordo di 10 pixel, necessario nelle operazioni successive di *processing* delle immagini relative agli esperimenti. Il risultato finale è mostrato nell'immagine (c) della Figura 4.1.

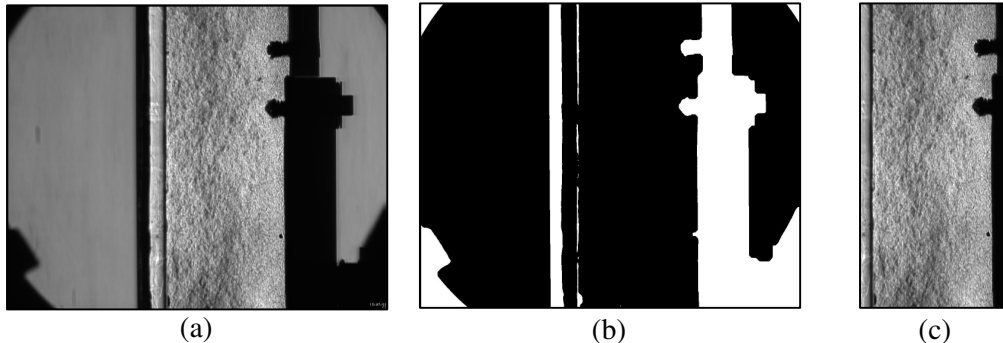


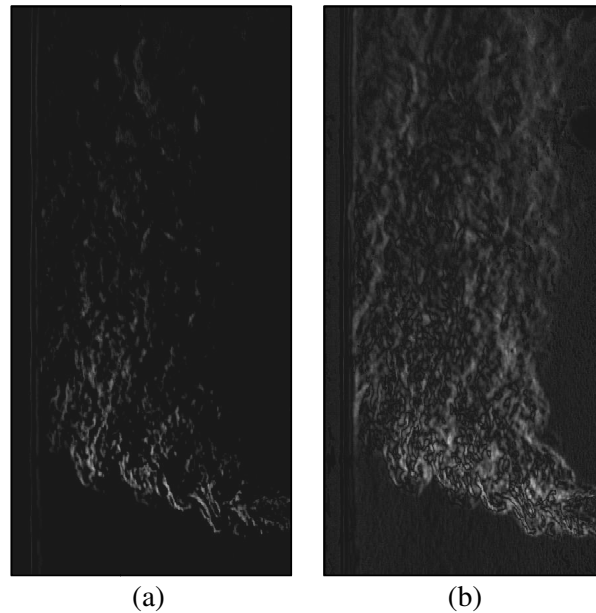
Figura 4.1: Processing dell'immagine dello sfondo per la determinazione dell'area d'indagine: immagine di sfondo mediata (a); apertura dell'immagine e conseguente binarizzazione inversa (b); immagine dello sfondo tagliata in corrispondenza dei limiti del condotto (c).

Avendo ora a disposizione un'immagine di sfondo con un'intensità media ed avendo ridotto il campo di analisi alla sola regione racchiusa tra le pareti, si è passati all'identificazione del getto.

La prima procedura dell'analisi delle immagini consiste nell'andare ad effettuare la differenza tra la foto acquisita durante l'esperimento, opportunamente tagliata

<sup>7</sup> La larghezza della foto qui considerata è identificata dalla lunghezza del lato perpendicolare alle due pareti del condotto.

con i vincoli prima trovati, con l'immagine del *background* media, di cui un esempio viene mostrato nell'immagine (a) della Figura 4.2.



**Figura 4.2:** Differenza (a) e differenza assoluta (b) tra una singola foto e la media dello sfondo.

Con il termine differenza si intende una differenza aritmetica dei valori d'intensità luminosa tra i pixel delle due immagini nelle stesse coordinate. In questo modo è stato possibile valutare la variazione di luminosità tra le due immagini, a cui è associata la presenza del getto. L'immagine così ottenuta non mostra un contorno ben definito e soprattutto evidenzia ancora dei punti di debolezza della procedura utilizzata. Osservando infatti sempre l'immagine (a) della Figura 4.2, è possibile notare come le regioni luminose siano tra loro distaccate, non permettendo di evidenziare correttamente il getto. Tale problema è legato alle regioni scure che si vengono a creare: esse infatti sono associate sia ad un effetto della tecnica ottica utilizzata<sup>8</sup>, sia al livello d'intensità luminosa che caratterizza ogni immagine, la quale risulta essere in alcuni casi inferiore a quella del *background*. Facendo infatti una differenza aritmetica tra un pixel a bassa intensità luminosa, con uno ad una maggiore intensità, si ottiene un pixel di colore nero. Questo risultato è associato alle proprietà del formato dell'immagine: essa infatti è caratterizzata dall'aver un solo canale (in questo

---

<sup>8</sup> Non tutti i raggi luminosi diffranti dopo essere passati per la regione di prova vengono ad essere visualizzati nelle foto. Questo perché i raggi in questione vengono ad essere bloccati dalla lama posizionata in corrispondenza del fuoco del secondo specchio concavo.

caso rappresentante una scala di grigi), i cui pixel sono in grado di rappresentare 256 variazioni di colore (immagini ad 8 bit senza segno), i cui valori sono compresi tra 0 e 255: i pixel più luminosi assumono valore prossimo a 255, quelli più scuri a 0, mentre i valori intermedi variano gradualmente intensità luminosa fino a raggiungere i valori dei due estremi. Utilizzando quindi lo stesso formato per l'immagine finale, non sarà possibile avere dei pixel con intensità inferiore a 0<sup>9</sup>, come appunto si otterrebbe dalla differenza sopra citata, ottenendo dei pixel neri, ossia pari a 0. Così facendo si creano molte regioni nere, dove però il getto è presente ma non viene visualizzato, impendendone la sua corretta identificazione. Per questo motivo, si è scelto di utilizzare non più una differenza aritmetica, ma una differenza assoluta, la quale porta ad avere sempre dei valori positivi come risultato della differenza, riuscendo a mettere in evidenza anche le regioni più scure. Il risultato di questa operazione viene mostrato nell'immagine (b) in Figura 4.2: osservando questa immagine e mettendola a confronto con l'immagine (a) nella stessa figura, è possibile notare come sia maggiormente visibile il getto in ogni sua parte, ricoprendo ora un'area uniforme e non più segmentata come in precedenza.

La regione esterna al getto è caratterizzata da una componente di rumore, che se non eliminata, comprometterebbe la corretta identificazione del getto. Osservando attentamente questa regione, si nota che questo rumore è caratterizzato da un'intensità luminosa molto bassa e da una localizzazione a punti molto densa. Di conseguenza per pulire l'immagine è stata applicata prima una sogliatura (*thresholding*), seguita dall'applicazione di un filtro morfologico mediano.

La prima operazione consiste nell'andare a valutare ogni singolo pixel dell'immagine e confrontarlo con un valore di soglia  $t$ : se il valore risulta inferiore, il pixel viene portato al valore minimo (0), altrimenti non viene in nessun modo modificato (funzione (4.2)).

$$I_{binaria}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } I_{originale}(t) < \text{soglia} \\ I_{originale} & \text{se } I_{originale}(t) \geq \text{soglia} \end{cases} \quad (4.2)$$

L'applicazione di un livello di *thresholding* però necessita del livello di soglia  $t$  che deve essere opportunamente scelto. Infatti se tale fosse troppo alto, verrebbero eliminate anche delle componenti luminose associate al getto, degradando la qualità dell'immagine. Al contrario invece non eliminerebbe il

<sup>9</sup> Un'immagine a 8 bit senza segno permette di memorizzare solo numeri interi compresi tra 0 e 255.

rumore presente nell'immagine. Tale livello non risulta però essere costante tra le diverse immagini, a causa della variazione di luminosità prodotta dalla lampada stroboscopica che mette, a seconda dei casi più o meno in evidenza il getto. Risulta necessario quindi determinare il valore di  $t$  per ogni singola immagine, il quale però viene ricercato a partire dall'intero set di foto a disposizione: in particolare vengono considerate tutte le foto associate ad ogni esperimento. I dati così ottenuti verranno poi messi a confronto con quelli ottenuti dagli altri esperimenti per ricavare il valore di *thresholding* da applicare. Procedendo con ordine, l'obiettivo di questa indagine consiste nel poter determinare un algoritmo che permetta di applicare una sogliatura dinamica al cambiare della luminosità delle immagini. Per fare ciò, si è partiti dal presupposto che se un'immagine ha una media luminosa bassa, l'area visibile associata al getto risulta essere inferiore al caso in cui tale media sia più alta (si veda l'esempio riportato in Appendice F). Nel caso in esame infatti, il getto è definito come un corpo la cui luminosità dipende direttamente dalla fonte luminosa: meno intensa è quest'ultima, meno si chiaramente si riusciranno a vedere le regioni in cui è presente il gas associato al getto; al contrario invece se la fonte luminosa è intensa, si riusciranno a vedere anche queste regioni. Per questo motivo, si è cercata una relazione di tipo lineare tra la media luminosa dell'intera immagine con l'area evidenziata in corrispondenza di un determinato livello di *thresholding*. Per essere più precisi, vengono ora date le definizioni di queste due componenti e come le si ricavano: la prima rappresenta la media di intensità luminosa di tutti i pixel presenti nell'immagine ottenuta dopo la differenza in termini assoluti: l'area del getto invece viene definita partendo dall'istogramma  $HI$  dell'immagine: esso fornisce il numero di pixel per ogni livello d'intensità luminosa. Per cui se si effettua l'integrale ( $Is_h$ ) dell'istogramma, con estremo inferiore variabile  $t$  compreso tra 0 e 254, ed estremo superiore fissato pari a 255 (colore bianco), è possibile determinare l'area del solo getto<sup>10</sup>. L'espressione analitica di quanto appena detto relativa al calcolo dell'area viene mostrato di seguito:

$$Is_h(t) = \int_t^{255} HI(t)dt \text{ con } t \in [0,255] \quad (4.3)$$

---

<sup>10</sup> Area luminosa dell'immagine.

---

Nella Figura 4.3 è possibile osservare l'istogramma dell'immagine (b) mostrata nella Figura 4.2, mentre nella Figura 4.4 è presentato l'integrale dell'istogramma appena definito.

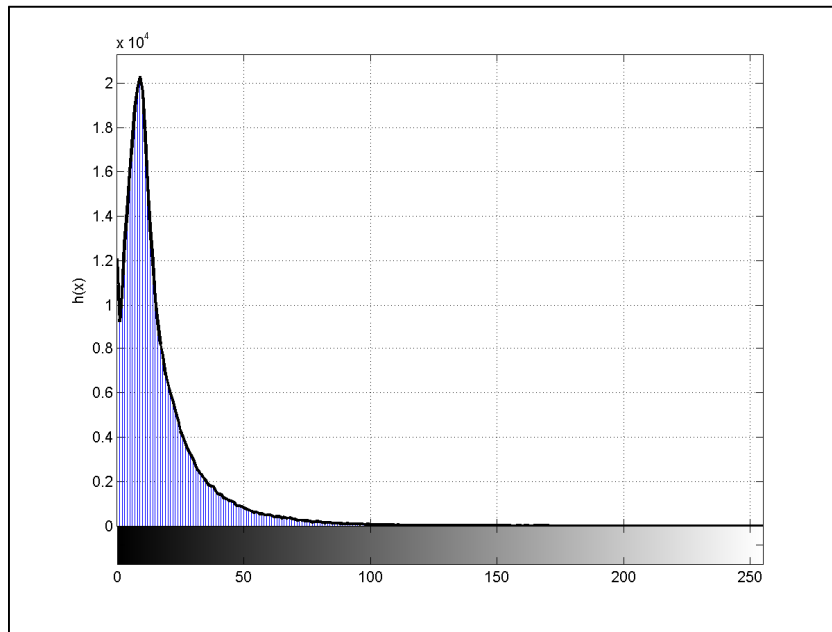


Figura 4.3: Iistogramma dell'immagine (b) in Figura 4.2.

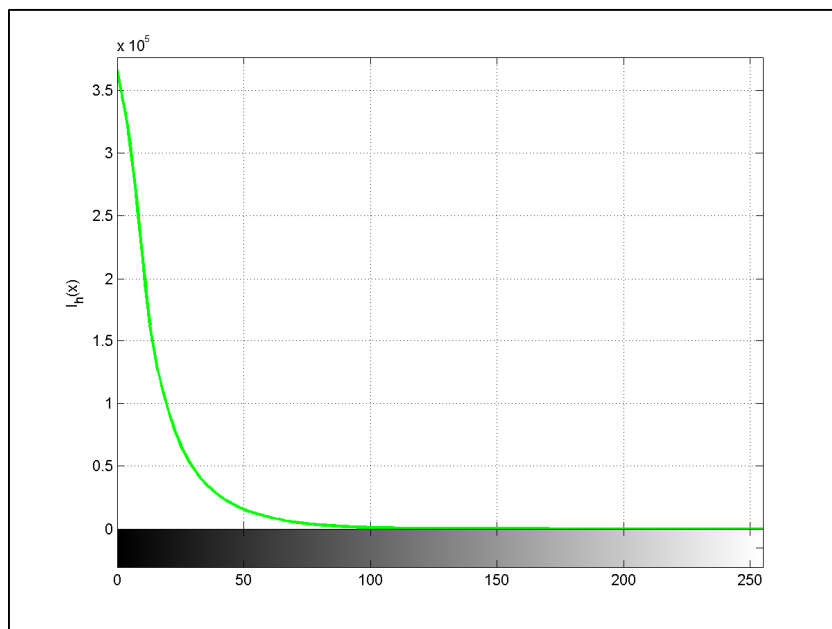


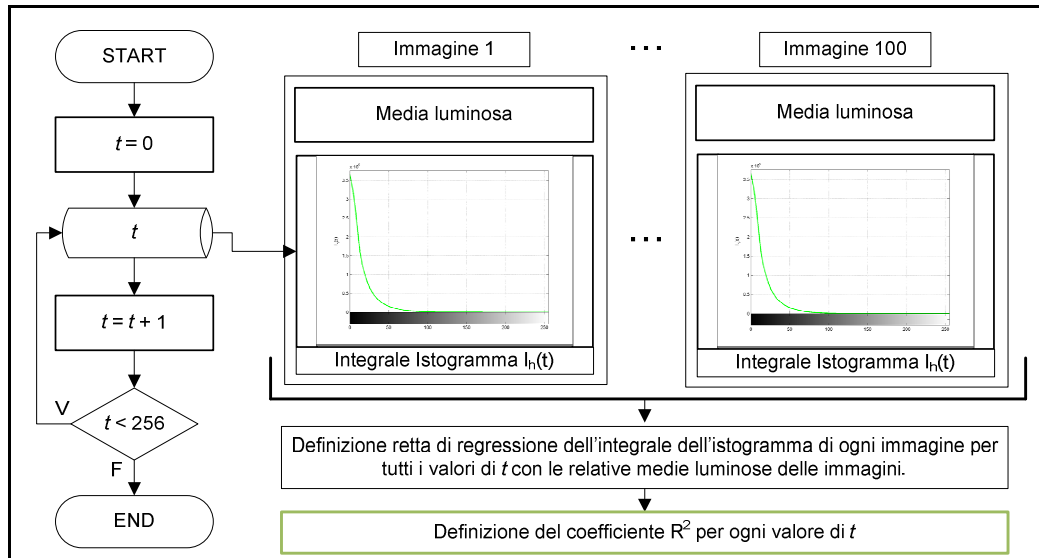
Figura 4.4: Integrale dell'istogramma mostrato in Figura 4.3.

Essendo che la luminosità delle immagini non rimane costante e non avendo l'informazione precisa dell'area che deve assumere il getto, è stata condotta un'indagine che analizza tutte le foto scattate e che ricava il valore dell'integrale dell'istogramma per ogni valore di  $t$ . Ogni valore così ottenuto viene messo in relazione con la media luminosa dell'immagine tramite una funzione di tipo lineare. Dato che tra gli esperimenti condotti esistono sostanziali differenze relative all'area del getto ed alla luminosità media dell'intero set di foto scattate, tale relazione è stata ricercata tra le immagini associate ad ogni singolo esperimento. Se la regressione dei dati è buona, il valore dell'indice di adattamento dei dati ( $R^2$ ) sarà prossimo all'unità; al contrario questo indice assumerà valori bassi ( $<0.6$ ). L'intero processo di determinazione di questo parametro viene riassunto nel diagramma mostrato in Figura 4.5: il valore di soglia viene inizializzato da un valore di partenza pari a 0 ed incrementato di una unità alla volta fino ad assumere il valore massimo raggiungibile pari a 255. Per ogni valore assunto da  $t$  viene determinato il valore dell'integrale<sup>11</sup> di ogni immagine associata all'esperimento: tale valore insieme, alla media luminosa, definisce la coordinata di un punto, che insieme a quelli ottenuti da tutte le altre immagini, crea un set di dati di cui poter valutare il legame lineare. Per ogni immagine è possibile ottenere idealmente 256 valori differenti dell'area associata al getto (255 se non si considera  $t$  pari a 255), di cui vengono determinate altrettante regressioni lineari. Per ognuna di queste regressioni è stato poi calcolato l'indice di adattamento dei dati.

---

<sup>11</sup> Calcolato a partire dall'espressione (4.3).

---



**Figura 4.5:** Algoritmo per la determinazione del parametro  $R^2$  per ogni livello d'intensità luminosa associata ad un esperimento.

Dopo aver valutato la retta di regressione con il relativo indice di bontà per ogni valore di  $t$  e per ogni esperimento, è stato possibile rintracciare il valore da utilizzare per la pulizia dell'immagine. Le rette di regressione appena ricavate in funzione di  $t$  permettono di individuare il livello di soglia che mette in evidenza il getto al variare dell'intensità della fonte luminosa, eliminando la maggior parte della componente rumorosa. Tale valore è posizionato in corrispondenza del valore di  $t$  che garantisce il più alto valore dell'indice di adattamento dei dati, ricavato a partire dalla media e deviazione standard di  $R^2(t)$ . Questi due valori sono ricavati utilizzando gli indici di adattamento dei dati di tutti gli esperimenti in corrispondenza di ogni  $t$ . Una volta ricavato questo livello di *thresholding*, è stato possibile definire l'area associata al getto visualizzato in ogni immagine. La superficie in questione però varia al variare dell'intensità della fonte luminosa, ottenendo così valori differenti tra foto appartenenti allo stesso esperimento. Come valore di riferimento quindi viene considerato quello definito come la media tra le aree evidenziate in tutte le immagini appartenenti al singolo esperimento. L'area media del getto così ottenuta rappresenta il termine da utilizzare per le operazioni di pulizia delle immagini: ogni foto infatti dovrà mostrare lo stesso numero, o al più inferiore, di pixel luminosi, a cui quindi è associata una dimensione simile del getto.

In Figura 4.6 viene riassunto l'algoritmo seguito per la determinazione del valore dell'area del getto di ogni esperimento: dopo aver fissato il valore di  $t$ ,

dove anche in questo caso assume valori compresi tra 0 e 255, vengono considerati i valori di  $R^2(t)$  determinati nei diversi esperimenti da cui è stato possibile valutarne la media e la deviazione standard. Sempre in Figura 4.6 è possibile osservare il grafico mostrandone il risultato finale di questo processo di analisi: in corrispondenza del livello d'intensità luminosa di soglia pari ad 11 è stato ricavato il più alto valore dell'indice di bontà di regressione, a cui è anche connesso il più basso valore della deviazione standard. Applicando quindi il livello di thresholding appena trovato, è stato possibile determinare l'area del getto visibile in ogni immagine. Questa verrà poi mediata con le aree visualizzate nelle foto appartenenti al medesimo esperimento. Tale valore così ricavato viene indicato con il termine  $I_{11}$ , ad indicare il valore dell'integrale dell'istogramma per  $t = 11$ .

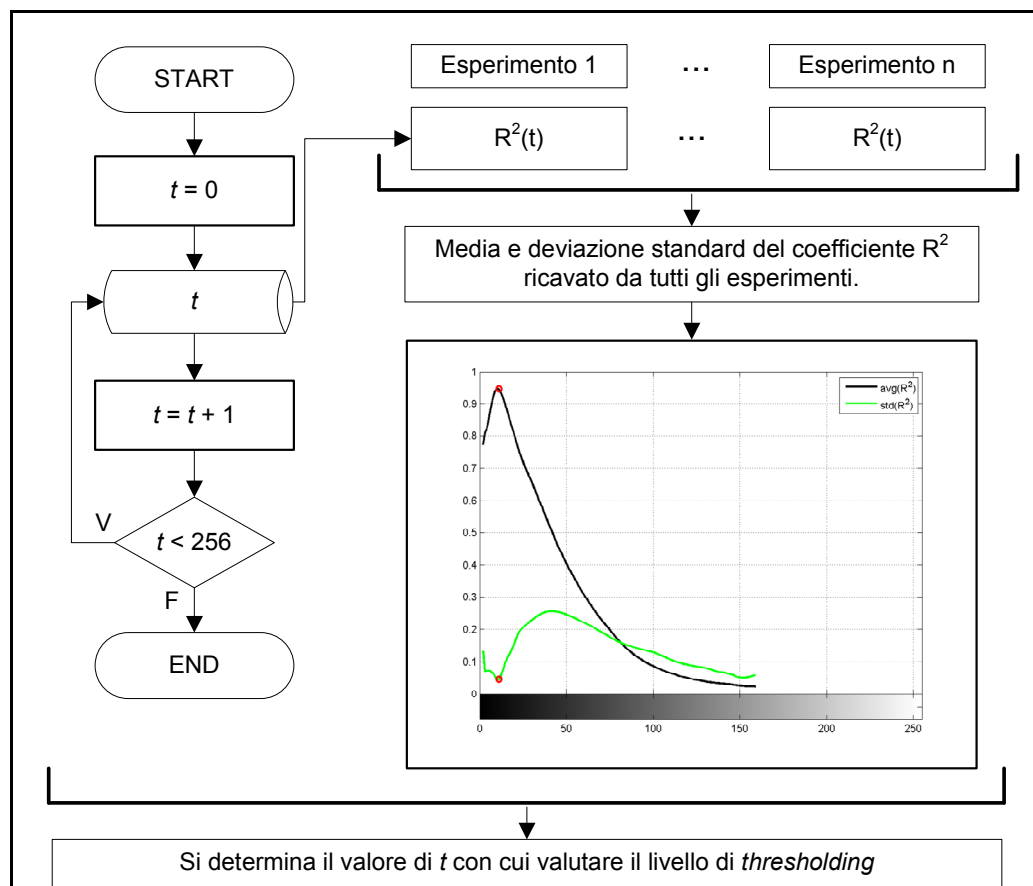


Figura 4.6: Algoritmo per la ricerca del livello di soglia da utilizzare per la pulizia delle immagini; il risultato viene mostrato nel grafico in cui viene visualizzato l'andamento del valore medio e della deviazione di  $R^2$  al variare dell'intensità luminosa per tutte le condizioni operative indagate.



Il risultato finale del processo di *thresholding* dell'immagine (b) mostrata in Figura 4.2, viene mostrata nella Figura 4.7 dove vengono evidenziate con una colorazione più chiara le componenti eliminate.

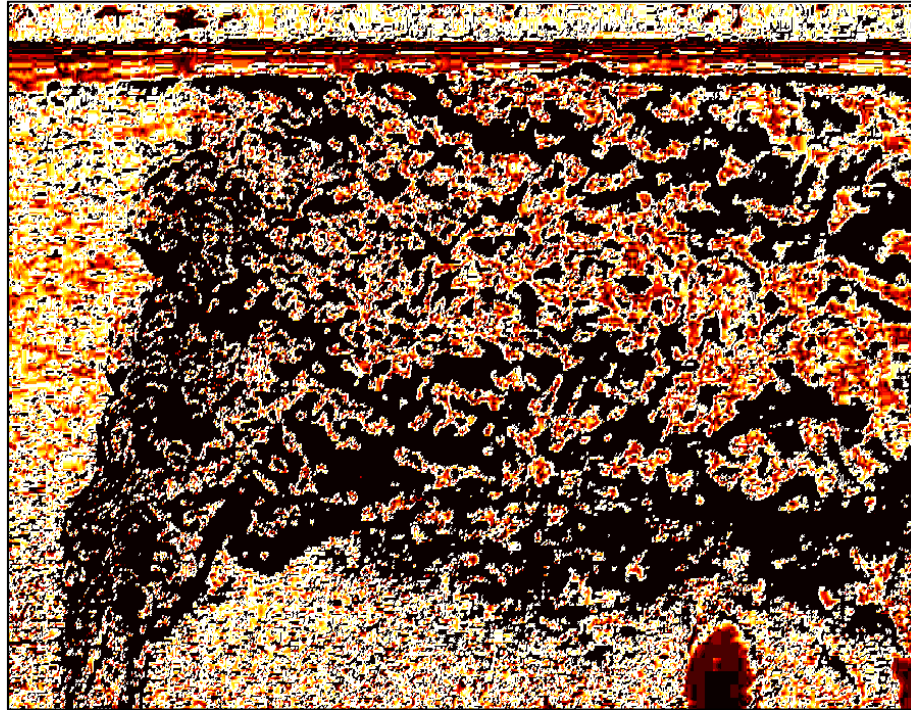


Figura 4.7: Visualizzazione delle componenti eliminate.

Il risultato così ottenuto conferma come vengano giustamente eliminate le componenti al di fuori del getto, ma a causa del basso livello d'intensità luminosa, vengono scartate anche delle componenti all'interno del getto. La loro eliminazione non compromette l'identificazione finale del getto, ma compromette la qualità dell'area evidenziata. Per questo motivo, i "buchi" così formati verranno poi ricoperti durante le fasi successive di elaborazione dell'immagine.

Dopo questa fase di sogliatura, rimangono comunque presenti delle componenti rumorose che hanno un livello d'intensità luminosa superiore a quella di filtratura. Osservandole attentamente è possibile notare che tale rumore si presenta come una serie di punti isolati, la cui distanza tra loro è pari alla loro grandezza. Per questa tipologia di rumore viene tipicamente adottato un filtro mediano, il quale è in grado di eliminare correttamente il disturbo in questione.

Esso seleziona una regione simmetrica attorno al pixel indagato, preleva il valore dei pixel in questa area e li ordina in maniera crescente: il valore che si trova esattamente a metà di questa scala (mediana dell'insieme di dati) sarà impostato come valore finale del pixel selezionato.



**Figura 4.8:** Esempio di applicazione di un filtro mediano. Nell'immagine di sinistra è possibile osservare che l'immagine è ricca di punti che rappresentano rumore; la figura a destra invece è stata ottenuta a partire dall'immagine di sinistra a cui è stato applicato un filtro mediano.

Nella Figura 4.8 è possibile osservare un semplice esempio di applicazione di questo filtro: nell'immagine di sinistra è presente un rumore che ne degrada la qualità, ma applicando il filtro mediano si ottiene l'immagine riportata a destra della medesima figura.

L'intero processo di pulitura dell'immagine viene mostrato nella Figura 4.9. I colori sono stati cambiati, insieme all'orientamento ed al formato per rendere più visibile il processo di eliminazione del rumore di fondo.

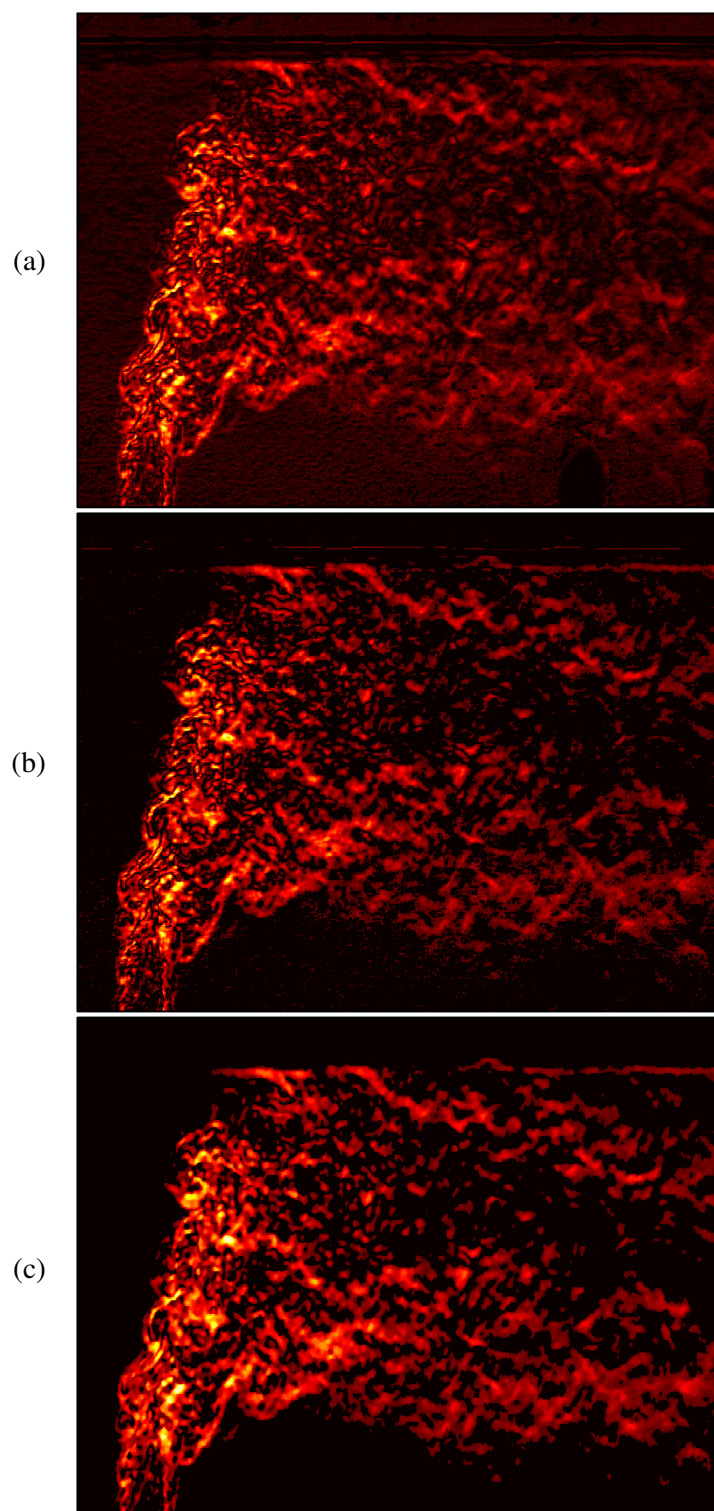
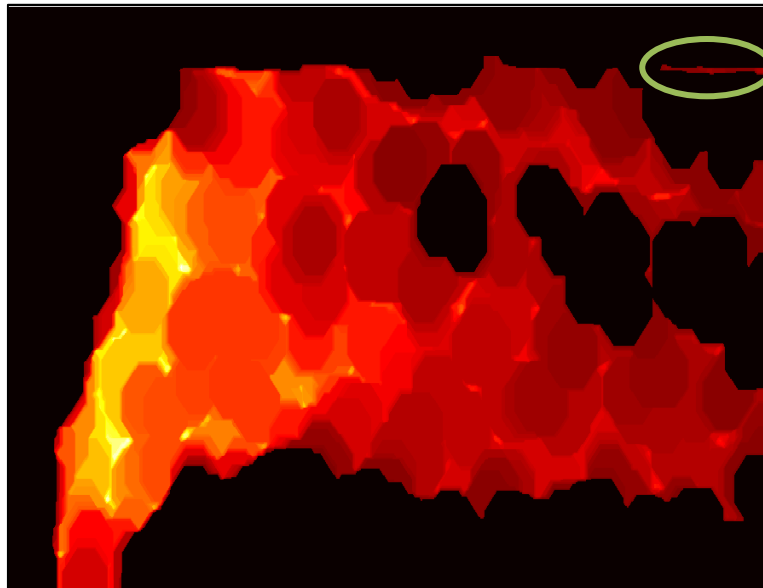


Figura 4.9: Immagini relative al processo di pulitura; modulo della differenza tra l'immagine e lo sfondo (a), sogliatura (b) e filtraggio degli spot luminosi rumorosi (c).

Come già anticipato, le operazioni di eliminazione del rumore di fondo hanno portato ad avere un'immagine più pulita, ma hanno anche eliminato alcune regioni all'interno del getto, peggiorando la qualità dell'area evidenziata<sup>12</sup>. Per questo motivo viene applicata un'operazione di chiusura dell'immagine: essa è un'operazione morfologica complessa che elimina i dettagli più scuri e rende le sezioni di un contorno più omogeneo riempiendo i vuoti. Questo può essere fatto solo nelle regioni in cui è chiaramente visibile il getto, mentre dove già i due flussi si sono mescolati e quindi risulta più difficile distinguerli (regione III mostrata in Figura 2.1) tale operazione non riesce a riempire l'intera regione del getto. Il risultato è possibile osservarlo in Figura 4.10: nella parte destra dell'immagine è possibile osservare come il getto tenda ad aprirsi in due rami; tale problematica influirebbe sulla determinazione della linea centrale, ma non su eventuali contatti con le pareti. Infatti è stato osservato che quando si è in presenza di un risultato come quello mostrato in Figura 4.10, il getto entra in contatto con la parete opposta a quella d'iniezione molto prima che il getto non sia più visibile. Dato che la deflessione del getto viene valutata solamente nel caso in cui il getto è libero (ossia il caso in cui non è entrato in contatto con le pareti della camera di prova) l'immagine così ottenuta non crea alcun problema per le analisi successive.



**Figura 4.10:** Chiusura dell'immagine ottenuta dal processo di pulitura.

---

<sup>12</sup> Il getto sarebbe caratterizzato da un bordo molto più frastagliato e da un corpo centrale composto da molte regioni nere, che per il programma corrispondono a regioni esterne al getto.

---

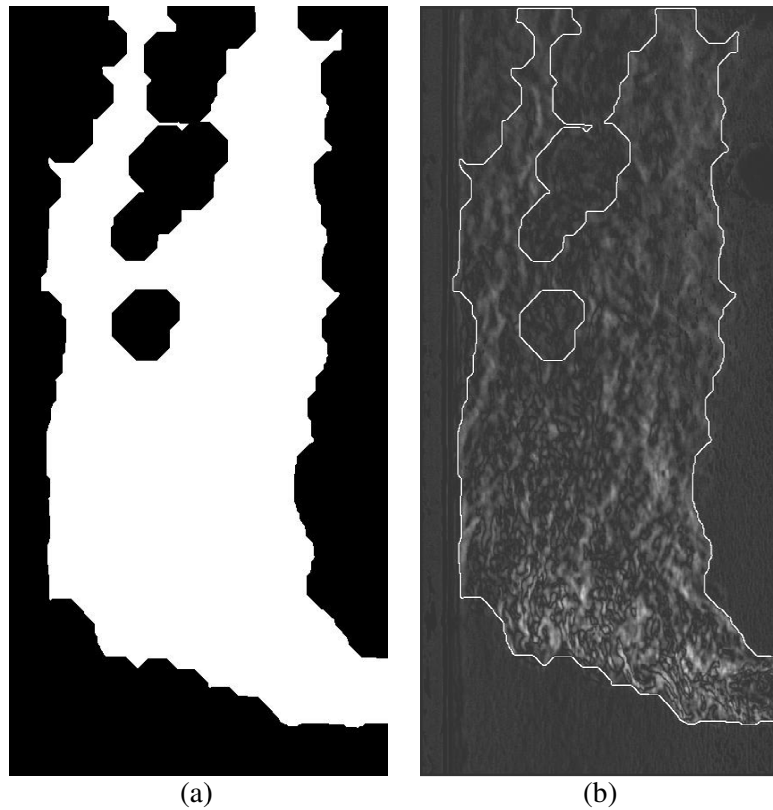
Sempre osservando la Figura 4.10, è possibile notare come rimangano delle componenti estranee al getto, come quella evidenziata con l'ellisse di colore verde. Tale criticità compare anche in presenza di eventuali scritte di colore bianco che vengono salvate insieme alle foto durante il procedimento di acquisizione. Per mettere in evidenza quindi solo il getto, l'immagine è stata binarizzata in maniera diretta, come descritto nella funzione (4.4), in modo tale da avere regioni totalmente uniformi in termini cromatici, e successivamente tramite un algoritmo di riconoscimento delle regioni, è stato possibile distinguere il getto da tutto il resto.

$$I_{binaria}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } I_{originale}(t) < soglia \\ 1 & \text{se } I_{originale}(t) \geq soglia \end{cases} \quad (4.4)$$

Il criterio di selezione del getto è basato sulle sue dimensioni: è stato osservato che a questo punto del *processing* dell'immagine, l'area più grande è quella sempre associata al getto, mentre tutte le altre risultano essere di dimensioni notevolmente inferiori. Nel caso in esame, l'eliminazione della componente evidenziata non comporta dei cambiamenti dei risultati, dato che per il caso in esame, la definizione della linea centrale viene arrestata nel punto in cui il getto entra in contatto con la parete opposta a quella d'iniezione, ma esistono condizioni per cui risulta necessario effettuarla. Un esempio è il caso in cui si abbia un elemento rumoroso che non viene eliminato durante la fase di pulizia dell'immagine, il quale però non risulta connesso al getto, ma che comunque comporterebbe degli errori in fase di *post-processing*, come ad esempio l'individuazione di contatti o semplicemente una variazione sulla definizione della linea centrale.

Avendo ora identificato il getto, è stato possibile riconoscerne il contorno. Per fare ciò, risulta necessario utilizzare un'immagine che mostri che metta in evidenza il contorno del getto tramite un solo gradiente luminoso, in modo tale da poter sfruttare gli algoritmi già esistenti di *edge-detection*. Quanto mostrato in Figura 4.10 non è quindi utilizzabile in quanto mostra diversi gradienti luminosi, i quali comprendono sia il contorno effettivo del getto che variazioni di luminosità interne al getto stesso. Per selezionare quindi il solo perimetro, risulta necessario avere un getto con stessa intensità luminosa: pertanto l'immagine che meglio si presta a questo processo di elaborazione dei contorni è

quella binarizzata utilizzata per la selezione del getto, la quale viene visualizzata nella parte sinistra della Figura 4.11 (immagine (a)).



**Figura 4.11:** Regione del getto determinata alla fine del processo di elaborazione (a) e sovrapposizione tra il contorno del getto appena evidenziato con l'immagine di partenza dell'elaborazione (b) (immagine (b) mostrata in Figura 4.2).

Per la determinazione del contorno del getto è stato utilizzato l'algoritmo di Canny, il cui risultato viene mostrato nell'immagine (b) in Figura 4.11, in cui il perimetro appena trovato è stato sovrapposto all'immagine elaborata (immagine (b) in Figura 4.2). Tuttavia il risultato così ottenuto però non è esente da una correzione da parte dell'utente: infatti a seconda delle variazioni di luminosità delle prove, non tutte le imperfezioni sono state eliminate automaticamente. Per questo motivo è stata inserita all'interno della routine di elaborazione una correzione gamma: essa consiste in una trasformazione non lineare usata per codificare e decodificare la luminosanza. La correzione gamma è, nel caso più semplice, definita dalla legge mostrata nell'espressione (4.5).

$$I_{out} = I_{in}^{\gamma} \quad (4.5)$$

Nella Figura 4.12 viene mostrato invece un esempio di correzione gamma utilizzata all'interno di un tubo catodico. Utilizzando un valore di  $\gamma < 1$  ciò che accade è che, data la componente a bassa luminosità in ingresso, si ottiene in uscita una componente con un'intensità più alta. Sempre nelle stesse condizioni, le componenti ad alta intensità invece vengono sì aumentate d'intensità, ma non nello stesso modo in cui vengono alzate quelle a bassa intensità. Al contrario invece accade con  $\gamma > 1$ .

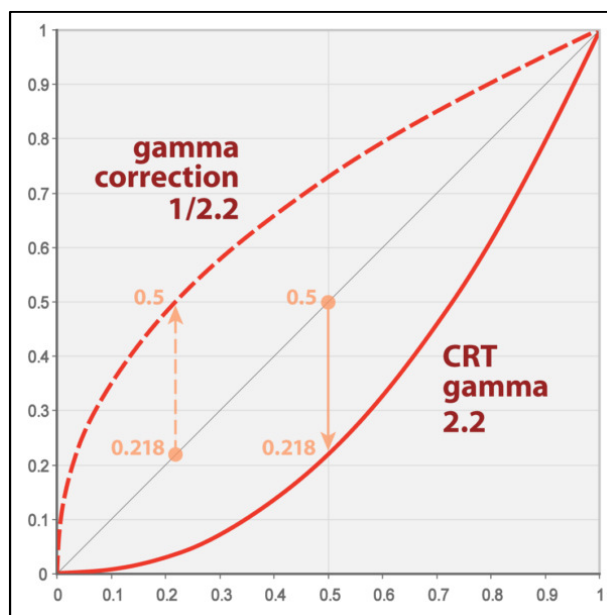


Figura 4.12: Andamento della correzione gamma di un tubo catodico.

Il principio di funzionamento appena mostrato per la correzione dell'immagine in uno schermo a tubo catodico è il medesimo per le immagini digitali. In questo modo è possibile eliminare delle correzioni di luminosità in modo semplice, limitando i parametri da variare al solo termine  $\gamma$ .

In Figura 4.13 viene riassunto l'intero processo di rielaborazione di ogni singola foto *Schlieren* appena descritta.

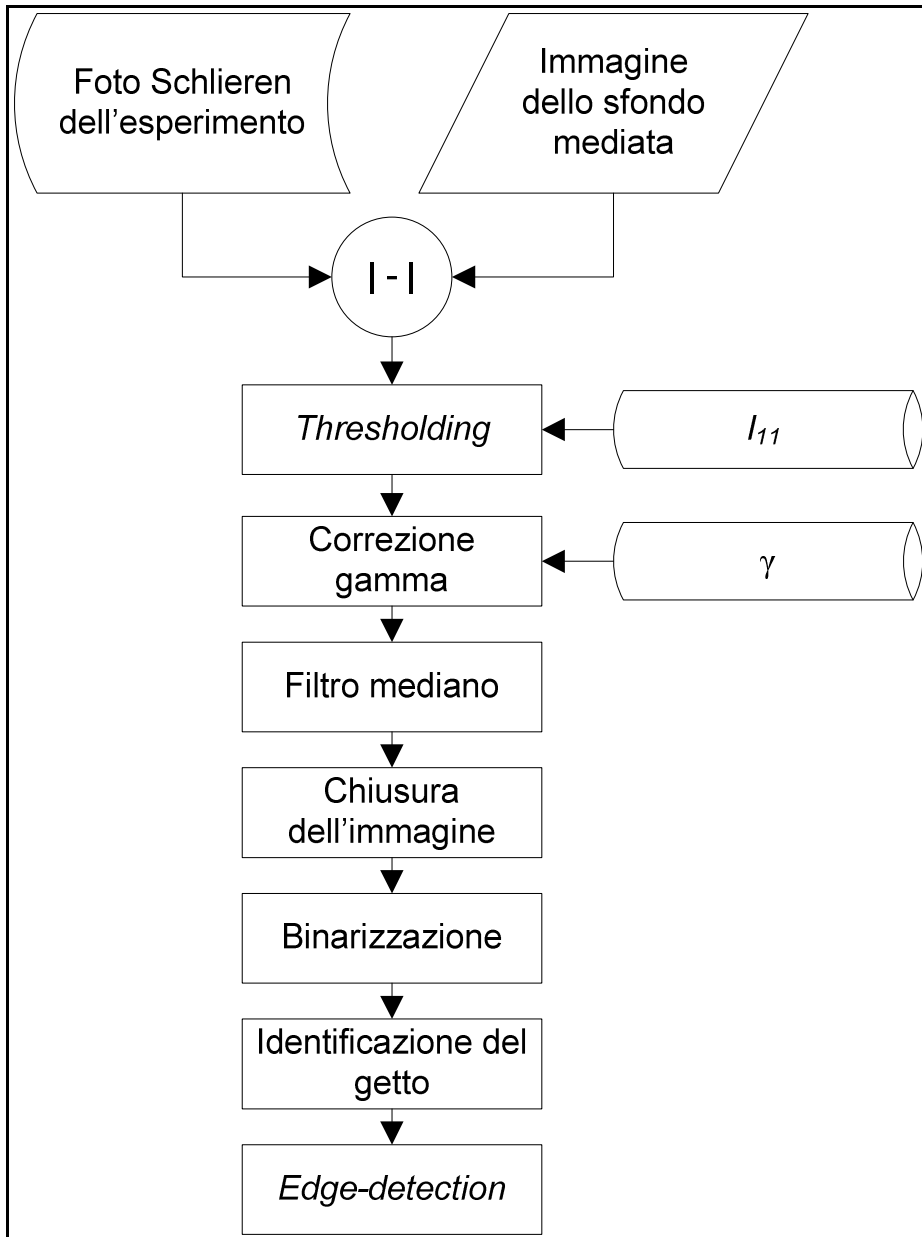


Figura 4.13: Processo di elaborazione di ogni singola immagine *Schlieren*; il termine  $I_{11}$  fa riferimento al valore dell'integrale dell'istogramma associato all'esperimento per la determinazione del livello di *thresholding*, mentre il  $\gamma$  è il parametro definito dall'utente per la correzione gamma.



## 4.2. Valutazione dei vortici

Avendo ora a disposizione un'immagine che mostra solamente il getto, è stato possibile valutare la presenza o meno di alcune strutture vorticosi evidenziate in precedenza nel paragrafo 2.4, oltre che alla proprietà di mescolamento del getto. In Figura 4.14 è possibile visualizzare il risultato ottenuto dall'elaborazione delle immagini per due esperimenti effettuati entrambi con un numero di Reynolds pari a 738, e per valori di  $R$  pari a 1.97 e 2.96. Le immagini mettono in evidenza la presenza dell'instabilità di Kelvin-Helmholtz sulla parte frontale del getto, il che risulta essere coerente con quanto esposto da Kelso et al. [1] e riassunto nel grafico mostrato in Figura 2.15.

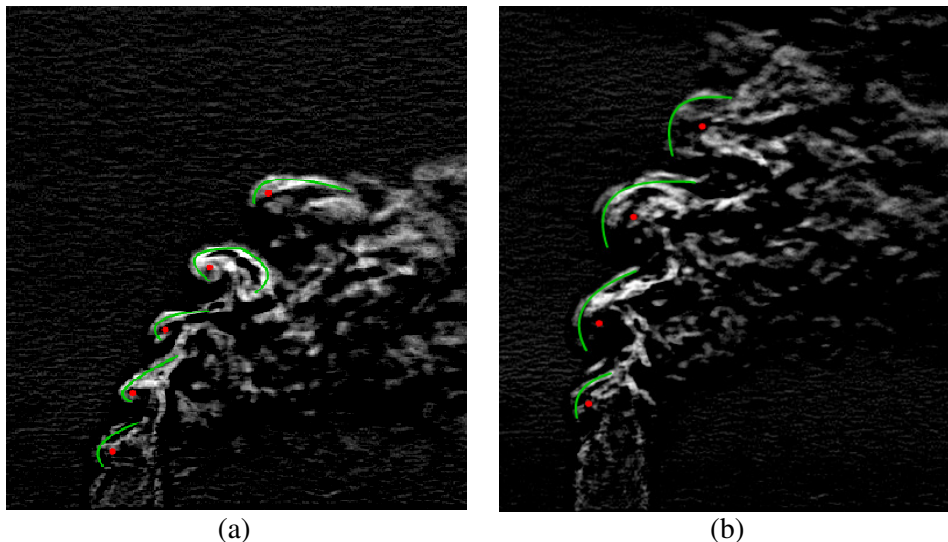
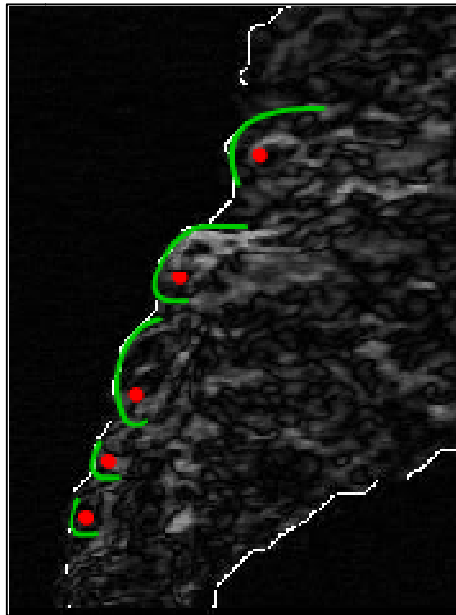


Figura 4.14: visualizzazione delle strutture vorticosi per due esperimenti differenti: (a)  $R = 1.97$  e  $Re = 738$ ; (b)  $R = 2.96$  e  $Re = 738$ . Le linee verdi mettono in evidenza il bordo esterno del vortice, mentre il punto rosso identifica il suo centro.

Effettuando un esperimento con valore del numero di Reynolds pari a 1600 e del parametro  $R$  pari a 2.07, si ottiene una configurazione di vortici non più associabile alle instabilità di Kelvin-Helmholtz, ma ai vortici denominati anulari, come mostrato in Figura 4.15



**Figura 4.15:** visualizzazione delle strutture vorticoso per  $R = 2.07$  e  $Re = 1600$ . Le linee verdi mettono in evidenza il bordo esterno del vortice, mentre il punto rosso identifica il suo centro; la linea bianca mostra il contorno del getto.

L'aumento del numero di Reynolds, modifica radicalmente la struttura di mescolamento, che in questo caso si ripercuote sulla qualità dell'immagine, che non risulta più essere ben definita come nei casi precedenti.

Partendo dalle immagini appena ricavate, è stato possibile definire l'andamento del centro dei vortici e in relazione con le condizione operative degli esperimenti. Il risultato di questo tipo di analisi viene mostrato in Figura 4.16, dove le curve sono state adimensionalizzate rispetto al diametro degli esperimenti: per quanto riguarda i casi con valore di  $R$  pari a 1.97 e 2.07 è possibile osservare come le due curve siano molto prossime tra loro, il che rende evidente l'indipendenza della posizione dei vortici dal numero di Reynolds.

All'aumentare del parametro  $R$  risulta chiaro l'aumento del grado di penetrazione del getto, mettendo in evidenza, come per la linea centrale del getto, la posizione del centro dei vortici con il rapporto dei flussi di quantità di moto.

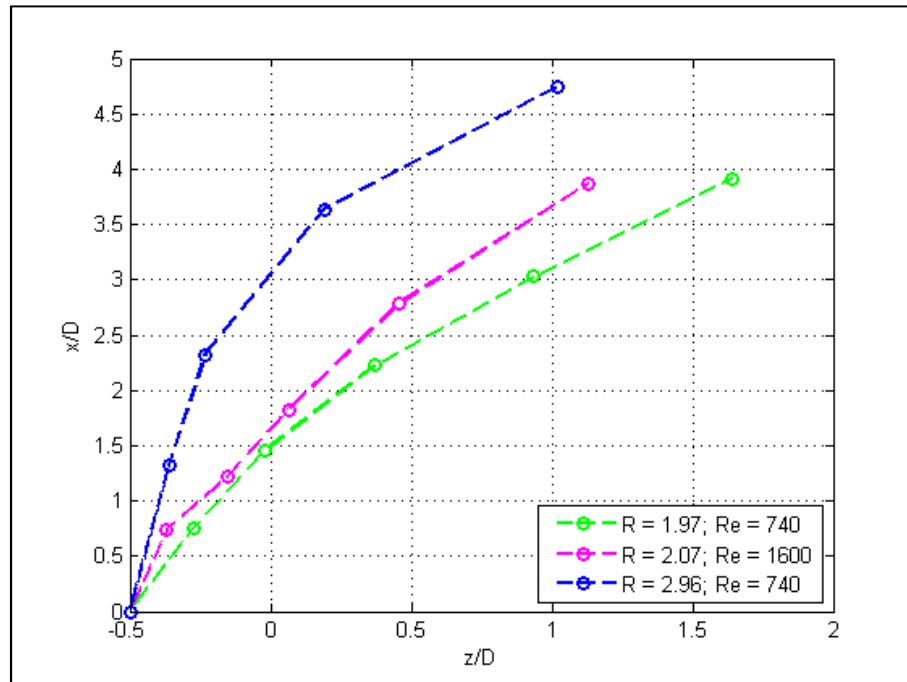


Figura 4.16: Posizione dei centri dei vortici per i casi mostrati in Figura 4.14 ed in Figura 4.15. Il primo punto di ogni curva rappresenta la posizione dell'estremo anteriore dell'ugello d'iniezione e non il centro di un vortice.

Adimensionalizzando quindi le curve rispetto al diametro ed al parametro  $R$  è possibile ricavare quindi un set di curve tra loro paragonabili, di cui è possibile anche quindi valutare una curva rappresentante la loro posizione come quella per la linea centrale (espressione (2.3)). La determinazione della linea viene però effettuata considerando un sistema di riferimento identico a quello utilizzato in precedenza, ma posizionato in corrispondenza del punto estremo anteriore dell'ugello d'iniezione<sup>13</sup>. In Figura 4.17 è possibile osservare i risultati di questa adimensionalizzazione: i dati risultano essere prossimi tra loro, ottenendo così una buona curva interpolante.

<sup>13</sup> Il sistema di riferimento locale è identico a quello utilizzato fino ad ora, ma ha l'origine posizionato nel punto di coordinate  $[0, 0, -D/2]$  rispetto al sistema di riferimento del getto.

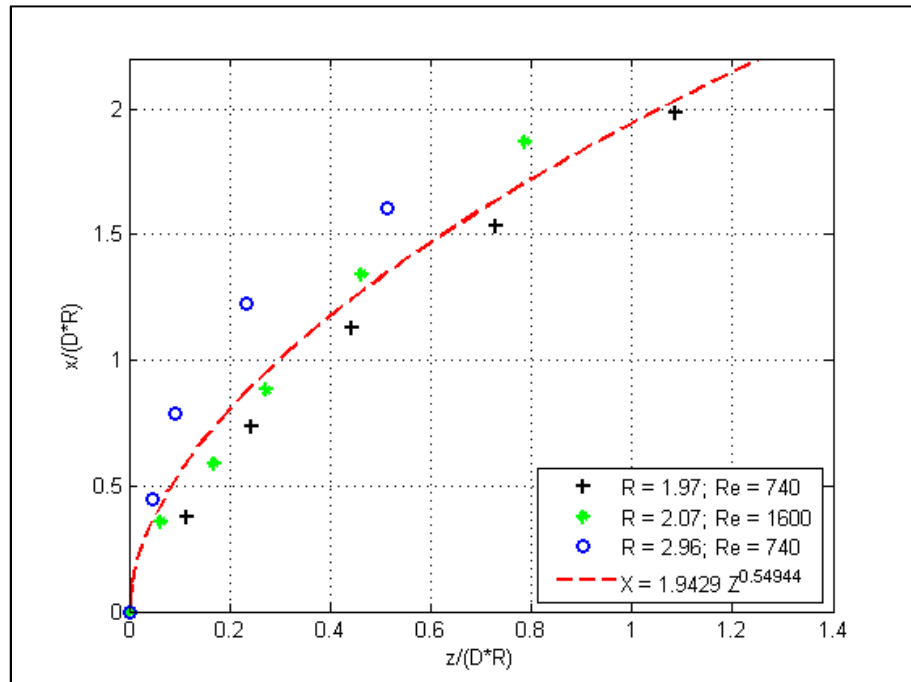


Figura 4.17: Dati sperimentali adimensionalizzati e relativa curva interpolante.

Considerando le distanze tra i diversi vortici appartenenti allo stesso esperimento, è possibile visualizzare l'eventuale costanza nella loro produzione o eventuali effetti dati dalla presenza del flusso trasverso che ne cambiano il comportamento. Le misure relative alla distanza tra i vortici vengono mostrate in Figura 4.18, dove sono presenti nella parte sinistra della figura i grafici relativi alle distanze lungo le due componenti dei centri dei vortici, mentre nel grafico a destra viene mostrata la distanza totale (somma tra le componenti). Osservando la distanza che intercorre tra un vortice ed il successivo lungo le due componenti, è possibile riscontrare una crescita delle distanze, con un rateo inferiore per quanto riguarda la componente lungo x, mostrando addirittura per i due casi con numero di Reynolds pari a 738 una distanza quasi costante. Essendo il getto iniettato con valori di  $R$  ben al di sopra dell'unità, si osserva una maggiore distanza tra i centri dei vortici lungo la componente x, che non lungo z. Osservando invece la distanza assoluta tra i centri dei vortici, si nota un netto aumento, mettendo in evidenza come man mano che il getto penetra all'interno del flusso trasverso, i vortici vengano trascinati a valle più rapidamente, incrementando il loro distacco.

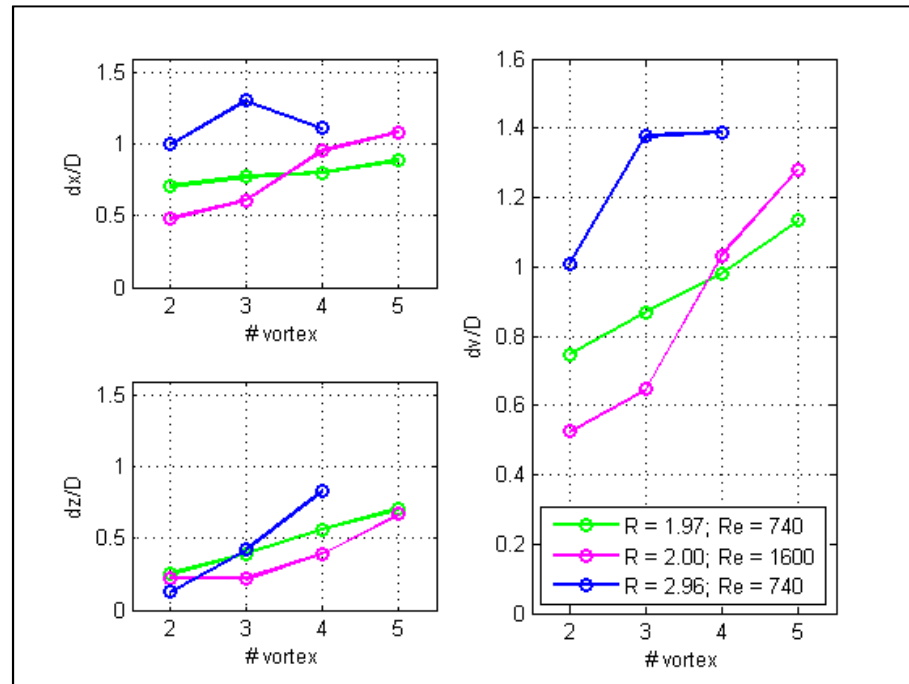


Figura 4.18: Andamento delle distanze dei centri dei vortici lungo le due componenti (x e z), e distanza totale in modulo tra i centri dei vortici (dv).

Utilizzando le foto scattate durante le visualizzazioni del flusso mediante tracciante effettuate da Kelso, Lim e Perry [1], è stato possibile determinare la posizione dei centri dei vortici. La foto in questione è quella mostrata nella parte sinistra della Figura 2.15: in questo caso le condizioni operative dell'esperimento sono completamente differenti dalla precedenti per quanto riguarda il valore del parametro  $R$ , mentre per quanto riguarda il numero di Reynolds è simile a solo un caso. Avendo un valore del parametro  $R$  ben più alto degli esperimenti appena mostrati (pari a 4), ci si aspetterebbe una maggiore penetrazione del getto all'interno del flusso trasverso rispetto ai casi precedenti. Vista l'indipendenza dal numero di Reynolds da parte degli esperimenti per valori di  $R$  così bassi, non ci si aspetterebbe nessuna variazione dalla teoria. I risultati ottenuti però risultano essere completamente in contrasto con quanto appena detto. Osservando infatti il grafico mostrato in Figura 4.19, dove anche in questo caso le misure sono state adimensionalizzate rispetto al diametro di ogni esperimento per poter essere confrontate, la curva associata ai dati estratti dalla foto presente in letteratura risulta essere completamente sovrapposta a quella ottenute per  $R$  pari a 1.97. Tale incoerenza di questo risultato può essere connesso alla modalità con cui è stata effettuata la foto: di essa infatti non si

conosce la posizione in cui si trovava la macchina fotografica nel momento in cui è stata scattata la foto. Infatti se l'apparato fotografico non è stato posizionato in modo tale da essere perfettamente perpendicolare al piano di mezzeria del getto (piano  $x-z$ ), il soggetto della foto risulta essere distorto, compromettendo la corretta determinazione della posizione del centro dei vortici. Per questo motivo e per il fatto che non si conoscono eventuali scalature dell'immagine durante l'impaginazione, non sono state condotte ulteriori studi per verificare e capire la causa di questo risultato.

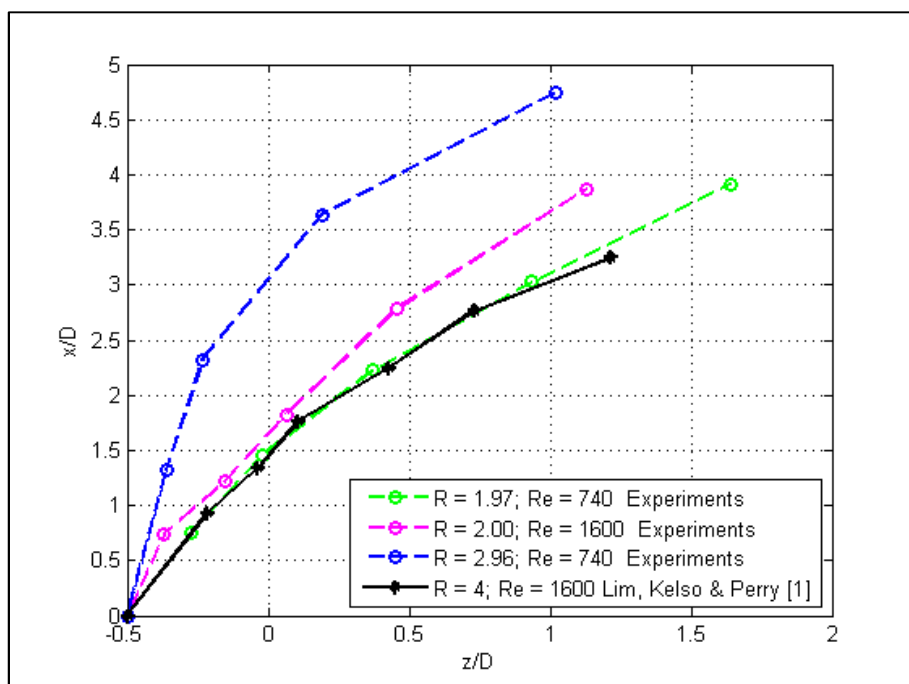


Figura 4.19: Posizione dei centri mostrati per i casi mostrati in Figura 2.15 (foto a sinistra), in Figura 4.14 ed in Figura 4.15; tutte le posizioni sono state adimensionalizzate rispetto al diametro dell'ugello d'iniezione utilizzato durante i diversi esperimenti.

### 4.3. Elaborazione dei dati

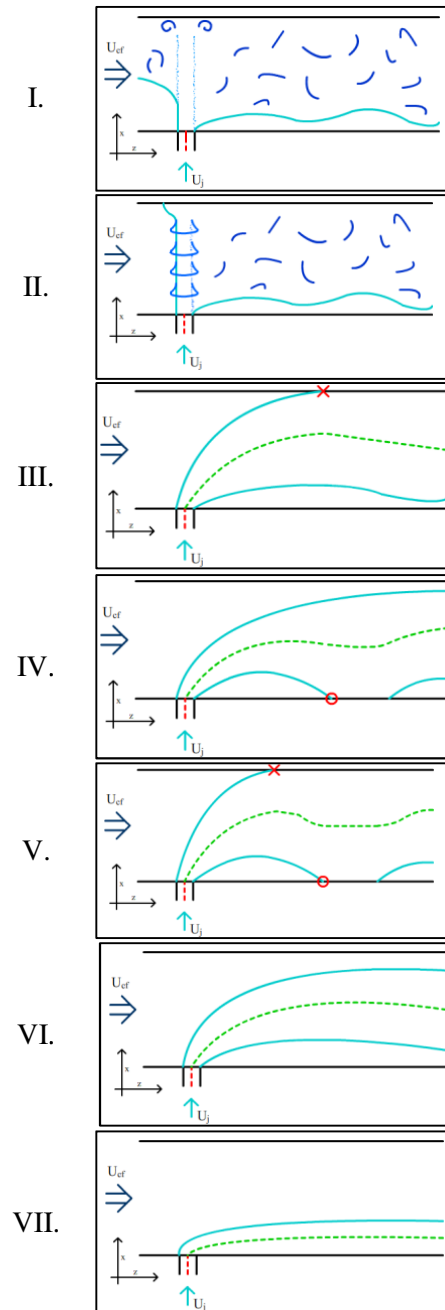
Con l'informazione relativa al perimetro del getto, è stato possibile definire la linea centrale del getto, oltre che ogni eventuale contatto con le pareti. Al variare del parametro  $R$  e del numero di Reynolds il getto evolve all'interno del flusso trasverso in maniera differente. Infatti per valori di  $R$  molto alti, il getto risulta essere talmente forte, da non essere nemmeno deflesso. Sempre rimanendo in

questo caso, è possibile anche ottenere un livello di ricircolo nella regione frontale del getto con diversi livelli d'intensità. Nel momento in cui invece viene deflesso, esso può evolversi lungo il condotto senza alcuno contatto, oppure toccando la parete superiore o quella inferiore. Tale contatto risulta essere importante per la definizione della linea centrale: infatti essa è stata sempre valutata in condizione di getto libero, ossia dove il suo moto non risulta essere direttamente influenzato dalle pareti del condotto. Per questo motivo, la definizione della linea del getto deve avvenire tra il punto d'iniezione (centro dell'ugello) ed il primo punto di contatto con le pareti.

Come appena mostrato esistono diverse tipologie di casi che portano a risultati completamente differenti: l'analisi quindi è stata condotta solo dopo aver riconosciuto il tipo di evoluzione del getto. Le tipologie così evidenziate sono:

- I: getto molto energetico che non viene deflesso; come per il caso 1, si crea una zona di ricircolo nella parte anteriore del getto, ma non rimane in prossimità della parete, arrivando fino ad occupare quasi tutta la sezione di passaggio del flusso trasverso.
- II: getto energetico che non viene deflesso; in corrispondenza del punto di contatto con la parete opposta a quella d'iniezione, si viene a creare una piccola regione di ricircolo nella zona anteriore del getto, ma sempre confinata in prossimità della parete.
- III: getto deflesso con conseguente contatto con la parete opposta a quella d'iniezione.
- IV: getto deflesso con conseguente contatto sulla parete d'iniezione.
- V: getto deflesso con contatto su entrambi le pareti.
- VI: getto deflesso senza alcun contatto con le pareti.
- VII: getto poco energetico che rimane adeso, lungo tutto il suo sviluppo nel condotto, alla parete d'iniezione.

In Figura 4.20 viene illustrata una rappresentazione di questa suddivisione per tipologia di casi, mentre in Appendice E è possibile trovare invece un esempio relativo alla classificazione appena esposta applicata alle immagini elaborate.



**Figura 4.20:** Visualizzazione della distinzione tra le possibili evoluzioni del getto all'interno del condotto.



Si rammenta che i risultati mostrano solo ciò che accade in un tratto di circa 100 mm dal punto d'iniezione, di conseguenza ogni eventuale evoluzione successiva non è stata considerata.

La linea centrale del getto è stata valutata come media tra i lati del getto: dovendo ancora ricavare la deflessione del getto, la linea centrale viene considerata come media del perimetro del getto lungo le componenti  $x$  e  $z$ . In Figura 4.21 viene mostrato un esempio per la definizione di due punti appartenenti alle due linee. La prima, denominata linea I, viene determinata fissando il valore della coordinata  $z$ , rappresentata nell'esempio in figura dalla coordinata  $\bar{z}$ . Successivamente vengono determinati i punti d'intersezione tra la retta di equazione  $z = cost = \bar{z}$  (linea tratteggiata blu), con il perimetro del getto, identificati in figura con le lettere B e C. La media di questi due punti viene effettuata solo lungo la componente  $x$ . Il punto così ricavato è il punto E, la cui coordinata  $z$  è pari a  $\bar{z}$ , mentre lungo  $x$  è pari a  $(x_B + x_C)/2$ . La seconda linea centrale, denominata linea II, viene determinata con la medesima procedura per la precedente, con l'unica differenza che le due coordinate sono invertite: in questo caso infatti viene fissato il valore di  $x$ , e vengono determinati i punti d'intersezione della retta di equazione  $x = cost = \bar{x}$  (linea tratteggiata viola) con il perimetro del getto, identificati in figura dai punti A e B. La media di questi due punti viene effettuata solo lungo la componente  $z$ , ottenendo il punto D la cui coordinata  $z$  è pari a  $(z_A + z_B)/2$ , mentre lungo  $x$  è pari a  $\bar{x}$ .

Tra le due linee appena ricavate, solo la linea I sarà utilizzata come media effettiva del getto, dato che mostra avere molte più caratteristiche in comune con la linea centrale del getto.

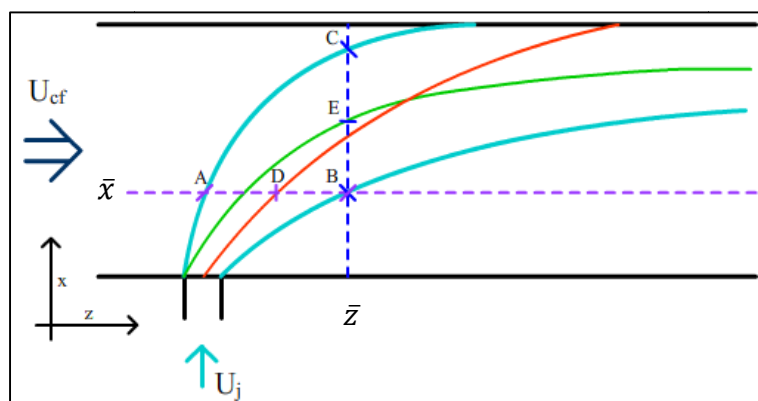


Figura 4.21: Esempio per la determinazione delle due linee centrali: le linee nere rappresentano il dominio di misura, quelle celesti il perimetro del getto, la verde è la linea centrale I mentre quella rossa è la linea centrale II. Le linee tratteggiate blu e viola rappresentano le rette rispettivamente con  $z = cost = \bar{z}$  e  $x = cost = \bar{x}$ .

Valutando la posizione lungo  $x$  del primo punto della linea I è stato possibile effettuare una distinzione tra la tipologia I, II e tutti gli altri casi. Infatti se esso è locato in prossimità della parete opposta a quella d'iniezione vuol dire che viene evidenziata la tipologia II (linea di demarcazione posizionata a  $2/3$  dell'altezza del condotto a partire dalla parete d'iniezione); se esso è ubicato verso la parte centrale del condotto, viene evidenziata la tipologia I. Nel caso in cui questo punto invece si trovi in corrispondenza della parete d'iniezione, siamo in presenza di uno dei casi rimanenti. Per la tipologia I e II, la posizione lungo  $z$  è importante per distinguere questi casi da eventuali casi di penetrazione con contatto ma con grado di deflessione molto bassa (ricadente nella tipologia III o V). Per le altre tipologie il primo punto della linea I mostra il lato anteriore dell'ugello d'iniezione, per cui conoscendo il valore del diametro, è possibile valutarne il centro.

Il contatto con la parete opposta a quella d'iniezione viene valutata come intersezione del perimetro del getto con le pareti del condotto. Queste sono state determinate durante la fase preliminare di analisi dello sfondo descritta all'inizio del paragrafo 4.1. Tra il perimetro e la parete in questione possono esserci più intersezioni, di conseguenza il punto considerato per le analisi successive è il primo muovendosi lungo la direzione  $z$ .

La determinazione del contatto tra il getto e la parete posta sul lato d'iniezione risulta essere invece più complicata. Infatti da questo lato della geometria del condotto si ha l'ingresso del getto e stimare quindi semplicemente le intersezioni non permetterebbe di capire se si stia valutando il punto d'iniezione o il contatto del getto dopo la sua iniezione. Risulta necessario pertanto utilizzare un procedimento che permetta di rilevare il contatto del getto con la parete dopo la sua iniezione e successiva deflessione. Per questo motivo è stata utilizzata la linea II: se la posizione del primo punto lungo  $z$  (con  $x = 0$ ) si avvicina in un intorno del centro stimato precedentemente con la linea I (centro dell'ugello d'iniezione), allora il contatto che si viene a creare è dato solo dall'iniezione del getto (ricadendo nel getto di tipologia III). Se al contrario la posizione di questo punto è oltre la posizione del centro del diametro stimato, allora è presente un contatto dovuto alla deflessione del getto. In questo caso, la valutazione dell'intersezione è stata effettuata a partire dal punto appena individuato per determinare il punto di contatto, evidenziando quindi una tipologia evolutiva del getto IV.

La tipologia V viene ad essere determinata quando sono stati trovati contatti con entrambe le pareti, mentre la tipologia VII la si trova quando è presente

un'intersezione continua con le pareti d'iniezione a partire dall'ugello d'iniezione.

Nel caso in cui sia presente una deflessione del getto, ma non ci sia alcun contatto con le pareti, oltre a quello posizionato in corrispondenza dell'iniezione, il getto viene catalogato sotto la tipologia VI.

Per ogni immagine quindi vengono determinate le linee medie, ed i punti di contatto, che verranno successivamente mediati sull'intero set di immagini. In questo modo è possibile determinare delle linee medie molto più smussate e non comprensive di fluttuazioni che potrebbero creare dei problemi nella determinazione della regressione finale. Allo stesso modo anche gli eventuali contatti sono stati mediati per compensare anche in questo eventuali fluttuazioni. L'intero processo di identificazione della tipologia evolutiva del getto viene mostrato in Figura 4.22: nella colonna denominata "INPUT" vengono mostrati i dati necessari per l'analisi in corrispondenza di ogni selezione del programma. Al variare del risultato della decisione, verrà identificata una determinata tipologia evolutiva del getto, che viene mostrata nella colonna di destra denominata "END - OUTPUT".

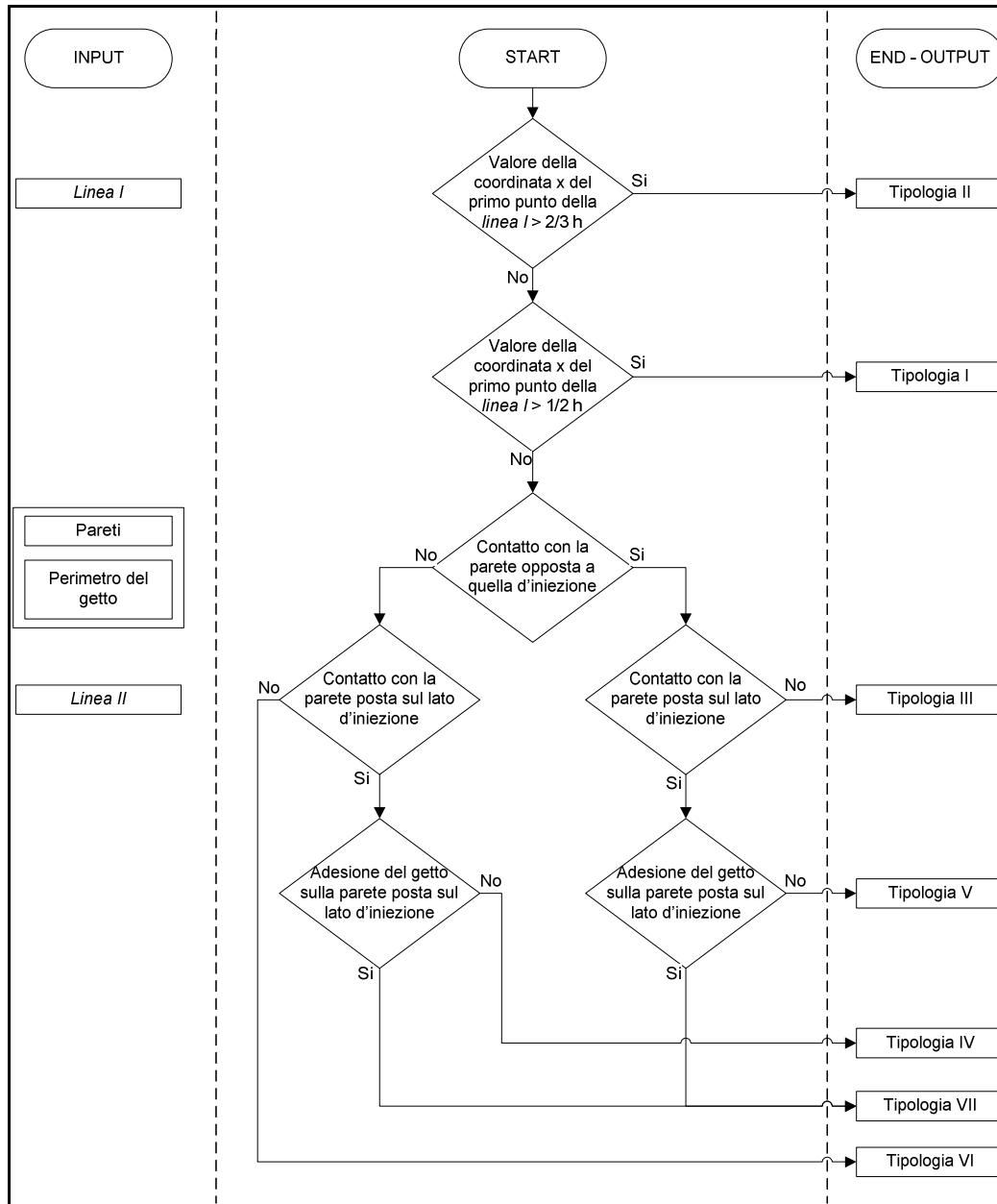


Figura 4.22: Algoritmo di identificazione della tipologia evolutiva del getto. Il termine h nei primi due rombi di decisione fanno riferimento alla distanza tra le due pareti visualizzati nelle foto.

Utilizzando come riferimento il caso mostrato durante il processo di elaborazione delle immagini, viene presentata in Figura 4.23 il risultato di questo processo di determinazione della linea centrale con conseguente catalogazione del caso mostrato in Figura 4.3.

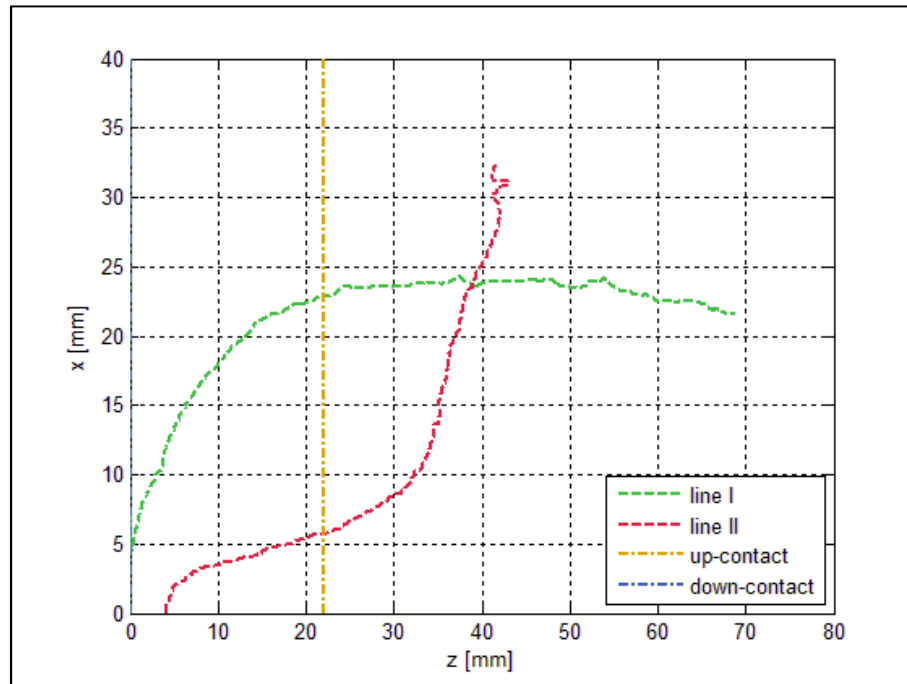


Figura 4.23: Linea media del getto lungo la direzione  $x$  e  $z$  (linea tratteggiata verde e rossa) e punto lungo  $z$  dove avviene il contatto con le pareti del condotto (linee tratteggiate arancio e blu) per un caso con  $R = 2.47$  e  $Re = 732.66$ .

In questo caso, è stato evidenziato un contatto solo tra il getto e la parete opposta a quella d'iniezione, catalogando il caso con la tipologia III (come peraltro evidente osservando la Figura 4.3).

Questa distinzione nell'evoluzione del getto, è importante per valutare nelle fasi successive di analisi l'eventuale legame con il livello di mescolamento del getto nel flusso trasverso.

Dopo aver effettuato la distinzione tra le diverse tipologie del getto, ed avendo poi determinato i contatti per i casi che lo richiedevano, è stata valutata l'interpolazione a potenza (mostrata nell'espressione (2.3)) della linea del getto per tipologie diverse dalla I, II e VII. Per queste due tipologie risulta chiaro che la definizione della linea centrale del getto non assume alcun significato rilevante, in quanto la penetrazione del getto è talmente forte da non essere influenzata dal flusso trasverso se non dopo il contatto con la parete del condotto. Per il caso VII invece non assume nessuna informazione utile valutare la linea media del getto in quanto un lato risulta essere dato dalla parete, non mostrando quindi la condizione di getto libero.

La tipologia del getto, gli eventuali contatti ed i parametri  $A$  ed  $m$  dell'interpolazione a potenza ricavati, sono stati tutti salvati per poter essere analizzati nella fase di *post-processing* dei dati.

## 4.4. Evoluzione del getto

Dopo aver analizzato ogni caso, ed aver definito la tipologia di evoluzione del getto, sono state fatte differenti analisi sui risultati così ottenuti.

La prima analisi è stata quella di valutare la ricorrenza delle diverse tipologie di evoluzione del getto, per poterne predire, in termini di parametro  $R$  e del numero di Reynolds, la comparsa.

Tale analisi però non è risultata essere soddisfacente, in quanto non è stato possibile indagare casi con gli stessi rapporti dei flussi di quantità di moto  $R$  al variare del numero di Reynolds, a causa dei limiti imposti dai flussimetri utilizzati durante gli esperimenti. L'intero set di dati a disposizione viene riportato in Figura 4.24, dove ogni singolo esperimento è descritto dal numero di Reynolds e dal rapporto tra i flussi di quantità di moto e suddiviso per via simbolica e cromatica al variare del caso.

A partire da questi dati è stato possibile mettere in evidenza la transizione dei diversi casi al variare del rapporto tra i flussi di quantità di moto.

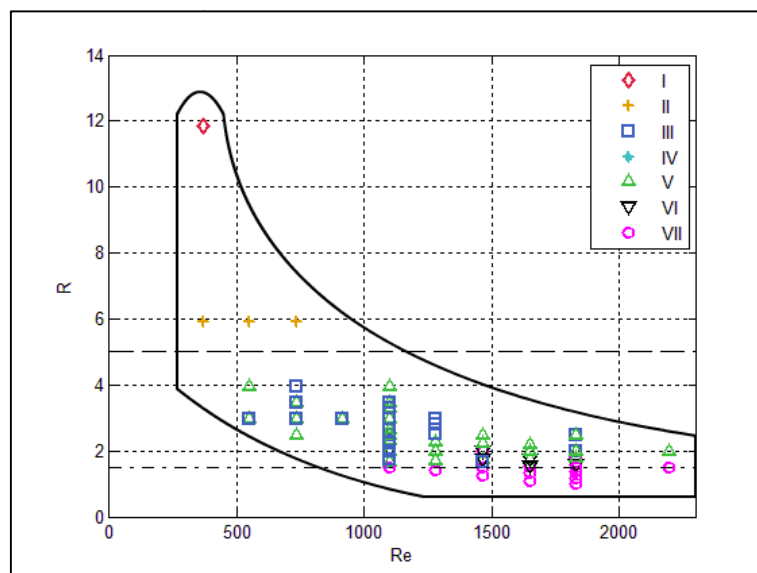


Figura 4.24: Esperimenti effettuati con la suddivisione in funzione della tipologia evidenziata.

Quello che ci si aspetterebbe da un grafico di questo genere, è quello di mostrare l'insorgere di un caso rispetto ad un altro, permettendo di prevedere l'evoluzione del fenomeno al variare delle condizioni operative.

Non potendo però effettuare un'analisi esaustiva del fenomeno a causa dei problemi citati in precedenza, è stato possibile formulare a partire da una base teorica e dai dati a disposizione, un andamento dell'evoluzione del fenomeno.

Facendo delle pure assunzioni fluidodinamiche, partendo da un valore di  $R$  molto alto e facendolo diminuire gradualmente, si dovrebbe vedere un'evoluzione del getto che inizia dal forte impatto con la parete opposta a quella d'iniezione (tipologia I), fino al non distacco da quella d'iniezione (tipologia VII).

Per valori di  $R$  molto alti infatti, la penetrazione del getto è elevata, portandolo ad impattare con la parete opposta a quella d'iniezione (tipologia I e II). Diminuendo il rapporto tra i flussi di quantità di moto, il contatto con le pareti diviene sempre meno intenso, a causa dell'inferiore grado di penetrazione del getto ed il conseguente piegamento nella direzione di moto del flusso trasverso. L'evoluzione del getto nel condotto lo porta inizialmente ad avere un contatto con la parete opposta a quella d'iniezione (tipologia III); la transizione successiva consiste nel non avere nessun tipo di interazione visibile del getto con le pareti (tipologia VI), passando poi ad avere dei semplici contatti con la parete da cui il getto viene iniettato ed infine la completa adesione del getto alla parete in questione a causa del basso rapporto tra il flusso delle quantità di moto raggiunto.

Il risultato ottenuto non appare distante da quanto appena formulato: è infatti possibile distinguere in Figura 4.24 tre regioni, differenziate in funzione di  $R$ , in cui è possibile distinguere queste diverse fasi dell'evoluzione del getto. Per valori di  $R$  superiori a 5, il getto penetra fino ad impattare con la parete opposta a quella d'iniezione (tipologia I e II), mentre per valori inferiori a 1.5 il getto non riesce a propagarsi all'interno del condotto (tipologia IV). Per la tipologia I e II, a causa del numero limitato di casi evidenziati, non è possibile definire con chiarezza il passaggio da un caso all'altro ed è per questo motivo che vengono lasciate raggruppate insieme.

Nella fascia intermedia si ritrovano le tipologie in cui sono presenti sia il solo contatto con la parete d'iniezione e la sua opposta ed il caso in cui non è presente nessun contatto (tipologia III, IV e VI). Oltre a questi è stata osservata

un'ulteriore struttura evolutiva del getto, consistente in un doppio contatto consecutivo del getto prima con la parete opposta a quella d'iniezione e poi con quella d'iniezione (tipologia V). La comparsa di quest'ultima tipologia è connessa al livello di turbolenza del flusso e di conseguenza al numero di Reynolds. E' già stato valutato in precedenza infatti che esiste una differenza nell'evoluzione del getto nel flusso trasverso a parità del parametro  $R$  ma differente  $Re$ , tra cui quella mostrata in Figura 2.16. Per rendere più chiara questa suddivisione, il grafico mostrato in Figura 4.24 è stato suddiviso in 4 grafici differenti, presentati in Figura 4.25, mostrando diversamente le tipologie individuate; un grafico a parte è stato fatto per il getto indisturbato.

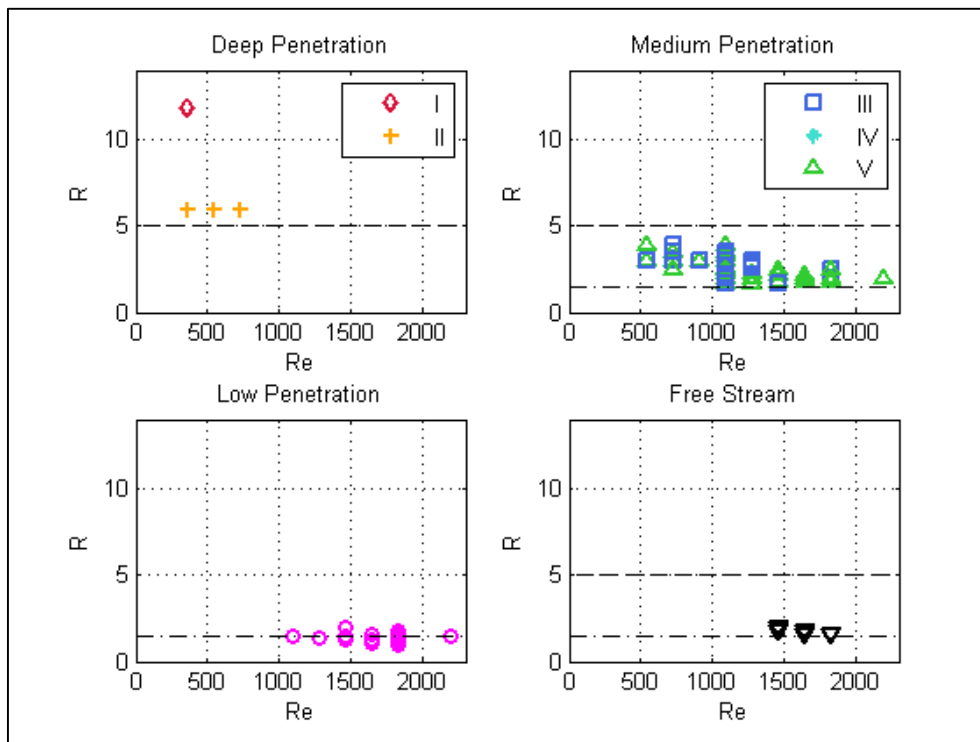


Figura 4.25 Suddivisione delle tipologie trovate in funzione del grado di penetrazione.

Il passaggio da una tipologia ad un'altra per il *range* di valori di  $R$  compresi tra 1.5 e 5 non risulta seguire l'andamento previsto, ma anzi mostra una totale casualità nel presentarsi. Per meglio capire cosa succede, sono state analizzate delle immagini campione estratte per ogni caso in questione al fine di valutare una qualche possibile fonte di rumore o eventualmente di errore. La prima cosa ad essere stata notata è che la tipologia IV è stata rilevata in un numero molto limitato di casi. Andando ad analizzare attentamente il risultato



dell'elaborazione delle immagini, è capitato molto spesso che la qualità delle immagini nella regione in prossimità della parete d'iniezione fosse troppo degradata. Tale degrado è dovuto alla presenza del pannello d'iniezione in alluminio, il quale riflette parzialmente la luce della lampada creando una banda luminosa proprio in corrispondenza del piastra, a cui si sommano anche i riflessi dovuti alla presenza del sistema di fissaggio dei pannelli. Oltre a questo problema di tipo tecnico è presente anche una forte riduzione della luminosità del getto: infatti a valle del punto d'iniezione, ma sempre rimanendo in prossimità della parete, si viene a sviluppare quel complesso sistema di vortici che aumentano le proprietà di mescolamento dell'intero fenomeno. Così facendo la concentrazione del gas associato al getto diminuisce drasticamente, portando il livello di luminosità ad essere paragonabile con il rumore di fondo dell'immagine. Di conseguenza, gli elementi luminosi che definiscono il getto non sono più distinguibili dal rumore dell'immagine, e di conseguenza vengono trattati come se lo fossero, ossia eliminati.

Questo problema non risulta però essere vincolato alla sola tipologia IV, ma interessa tutte le altre tipologie diversa dalla I e dalla II. Infatti, non riuscendo correttamente a distinguere la presenza del contatto con la parete posta dal lato dell'iniezione, con conseguente difficoltà nella distinzione tra la tipologia III e la V.

Per quanto riguarda il primo caso di incertezza sulla classificazione, risulta chiaro come il non poter rilevare il contatto sulla parete posta sul lato dell'iniezione, porti un caso ad essere catalogato come tipologia III e non V, dato che quest'ultima è proprio derivata dalla combinazione della tipologia III e IV. Questa mancata distinzione permetterebbe di spiegare come mai non è presente una distinzione evidente tra i due casi. Infatti a parità di condizioni operative, ossia stesso valore di  $R$  e di  $Re$ , casi differenti sono stati catalogati sia sotto la tipologia III che V. Per valutare l'appartenenza ad una categoria piuttosto che ad un'altra, sono state osservate manualmente le immagini, mostrando però anche in questo caso una notevole difficoltà nella classificazione a causa dell'alto livello di degrado delle immagini in questa regione. Non potendo confermare la presenza del contatto con la parete posta sul lato d'iniezione, non è stata modificata la tipologia di appartenenza del caso nelle analisi successive.

In Tabella 4.1 viene riportata una situazione riassuntiva delle diverse tipologie evolutive del getto all'interno del condotto al variare di  $R$ .

**Tabella 4.1: Evoluzione del getto al variare di  $R$ .**

Tipologia	$R$
VII	$< 1.5$
III, IV, V e VI	Tra 1.5 e 5
I e II	$> 5$

I risultati fin qui proposti, mostrano come il programma sia effettivamente in grado di catalogare ogni esperimento secondo la distinzione scelta. Non è stato possibile effettuare una suddivisione al dettaglio, però è stata messa in evidenza una prima suddivisione dei casi, ossia sottolineando i casi con un'alta penetrazione, i casi in cui il getto viene deflesso e continua la sua propagazione all'interno del condotto ed i casi in cui la penetrazione del getto è molto bassa. Allo stesso modo non è stato possibile effettuare una distinzione simile per il numero di Reynolds a cui però si rimanda per un possibile sviluppo futuro.

## 4.5. Contatto del getto

La classificazione utilizzata per distinguere le diverse tipologie di evoluzione del getto all'interno del condotto, ha permesso anche di mettere in evidenza delle caratteristiche del contatto legate alle condizioni operative. Infatti tramite le immagini Schlieren è stato possibile determinare la distanza tra il contatto del getto e le pareti della camera di prova. I dati che verranno ora mostrati riguardano solo la tipologia III e V; non verranno infatti mostrati i dati relativi alla tipologia IV in quanto gli esperimenti catalogati sotto questa categoria sono troppo pochi per poter valutare criticamente ciò che avviene.

Per quanto riguarda quindi il contatto con la parete opposta a quella d'iniezione quello che ci si aspetta è che all'aumentare del parametro  $R$ , e di conseguenza della penetrazione, la distanza tra il punto d'iniezione ed il contatto diminuisca; viceversa diminuendo il rapporto tra i flussi di quantità di moto, la distanza in questione aumenti.

In Figura 4.26 viene mostrato un grafico in cui sono riportate le distanze in funzione di  $R$ , sia per la tipologia III che per la tipologia V. L'andamento che si ottiene risulta concorde con la teoria sopra esposta, infatti è possibile osservare come all'aumentare del rapporto tra i flussi di quantità di moto, la distanza del punto di contatto decresca.

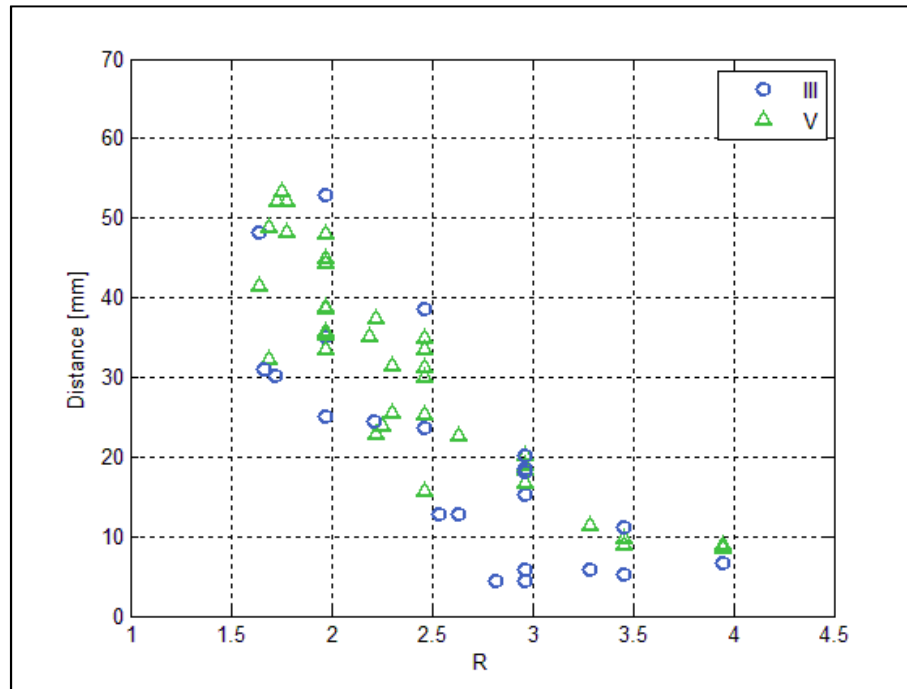


Figura 4.26: Distanza del contatto tra il getto e la parete opposta a quella d'iniezione per la tipologia III e V.

Sempre osservando il grafico mostrato in Figura 4.26 è possibile notare come i risultati di entrambe le tipologie risultino essere sovrapposti, non permettendone una distinzione. Come si può vedere nel paragrafo 4.4, esistono delle incoerenze tra i risultati ottenuti tra le due tipologie in questione a causa della bassa qualità dell'immagine utilizzata per l'elaborazione delle informazioni. Il fatto quindi che i risultati risultino sovrapposti poco stupisce e conferma l'ipotesi che la comparsa di un eventuale contatto con la parete posta sul lato d'iniezione risulta omesso per i motivi precedentemente citati. A causa del set di dati a disposizione non è stato possibile mettere in evidenza la dipendenza dal numero di Reynolds, di cui però si ipotizza non essercene alcuna per questo contatto.

L'influenza di questo parametro invece risulta essere importante per il contatto con la parete posta sul lato dell'iniezione. Per valori del numero di Reynolds superiori a 2000 infatti il flusso diventa fortemente turbolento, aumentando le proprietà di mescolamento e portando ad un contatto precoce con la parete in questione. Dato che gli esperimenti sono stati condotti con valori del numero di Reynolds che raggiungono al massimo la soglia di 2200, e che il numero di questi esperimenti è molto basso, non è stato possibile mettere in evidenza questa particolarità del flusso.

E' risultato interessante invece analizzare, in termini di distanza, dopo quanto il getto entra in contatto con la parete posta sul lato dell'iniezione, dopo aver toccato l'altra. In Figura 4.27 viene rappresentata questa distanza per gli esperimenti catalogati sotto la tipologia V.

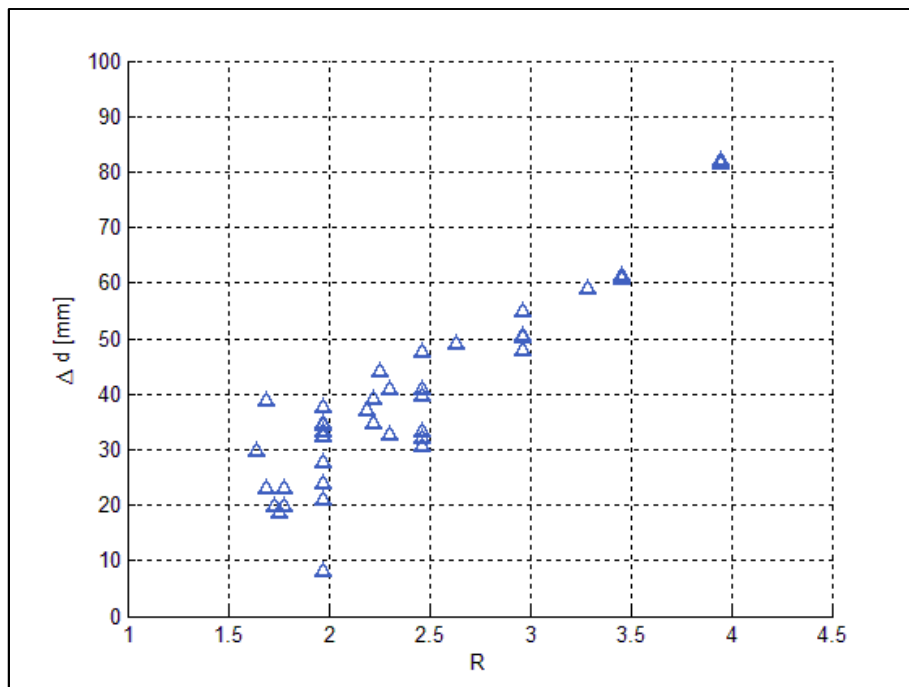


Figura 4.27: Distanza dei contatti con la parete posta dal lato d'iniezione per la tipologia V.

Il risultato di quest'analisi mostra come ci sia un incremento della distanza del punto di contatto con il rapporto tra i flussi di quantità di moto; ciò implica che per alti valori di  $R$ , il getto impatta ancora troppo forte con la parete opposta, e successivamente viene trascinato dal flusso trasverso rimanendo in prossimità di questa parete ritardando il contatto con la parete d'iniezione.

Per valori di  $R$  bassi invece il getto riesce a propagarsi nel condotto in maniera quasi simmetrica, portando il getto a contatto con la parete d'iniezione poco dopo il primo contatto con la parete opposta. Per valori alti invece del rapporto tra i flussi di quantità di moto, il getto prosegue lungo la sua direzione di moto, senza aprirsi eccessivamente prima del contatto con la parete opposta a quella d'iniezione.

## 4.6. Deflessione del getto

Sempre grazie alla differenziazione dei casi, è stato possibile caratterizzare la deflessione del getto prima che il vincolo delle pareti ne influenzi il piegamento nel caso di contatto.

La prima analisi ad essere effettuata è stata quella di mettere a confronto l'evoluzione della linea centrale del getto con i risultati ottenuti da Keffer e Baines [3], mostrati in Figura 2.13 nel riquadro di sinistra. In questa occasione sono stati considerati solo i casi con valore di  $R$  prossimi a quelli utilizzati per gli esperimenti di confronto, adimensionalizzando le coordinate della linea centrale in funzione del solo diametro.

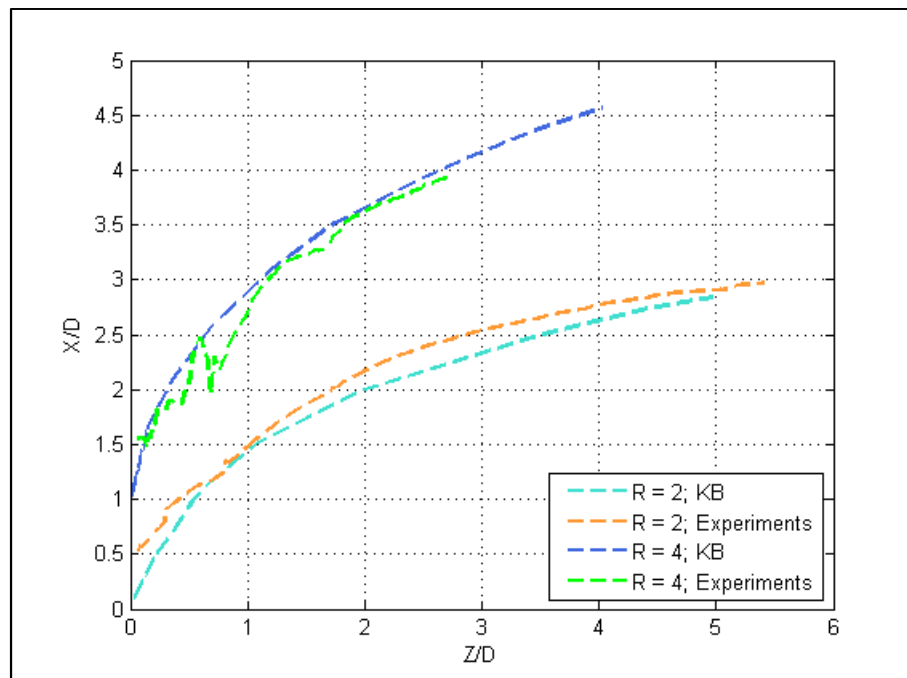


Figura 4.28: Confronto tra le linee centrali del getto misurate sperimentalmente e quelle ottenute da Keffer e Baines [3] (indicate con la sigla KB).

Osservando i risultati mostrati in Figura 4.28 è possibile osservare come ci sia una buona tendenza delle curve sperimentalmente ricavate rispetto a quelle ricavate in precedenza da Keffer e Baines [3]. Tale risultato mette in evidenza come le misure effettuate con questa procedura di elaborazione delle immagini risulti essere coerente con quelle effettuate per via anemometrica. Oltre a questo, tale

risultato mette anche in luce il fatto che anche se in presenza di una certa aleatorietà della misura a causa della correzione gamma imposta dall'utente, il risultato risulta essere in ogni modo fedele.

Successivamente è stata valutata la regressione della linea media ricavata per ogni caso, utilizzando l'espressione (2.3). Nella Figura 4.29 viene rappresentata la linea di regressione del caso mostrato durante l'elaborazione delle immagini, sovrapposta alla linea sperimentale ricavata.

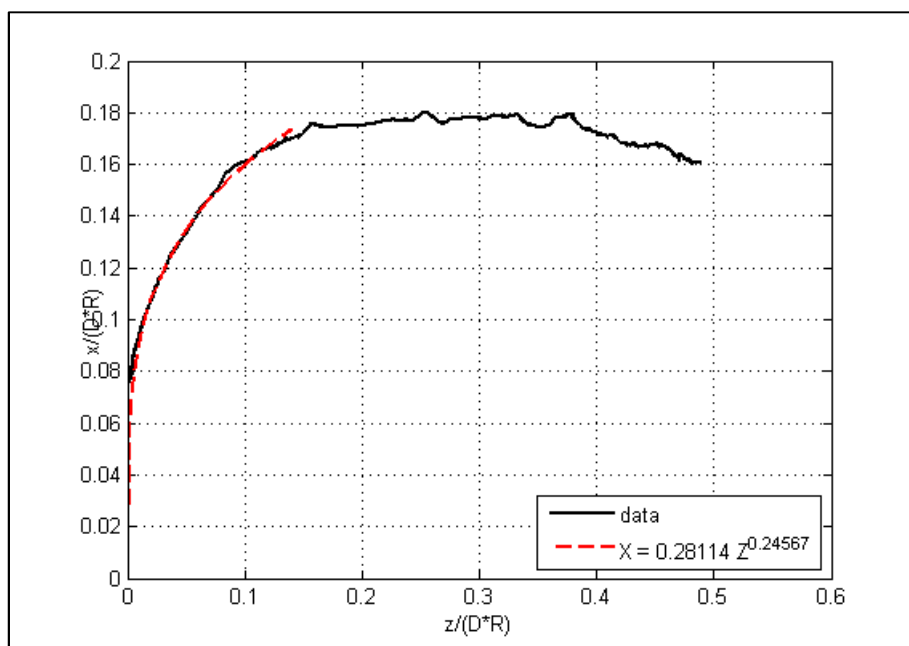


Figura 4.29: Andamento della linea centrale del getto per il caso con  $R = 2.47$  e  $Re = 732.66$ .

Tramite la regressione utilizzata i dati ottenuti risultano essere adimensionalizzati in modo tale da poter essere paragonati tra di loro, anche al variare delle condizioni operative, come mostrato in Figura 2.3. A causa del forte vincolo geometrico della camera di prova, le analisi sono state possibili solo per esperimenti con valore del parametro  $R$  compreso tra 1.5 e 5, in cui quindi ricade la tipologia III, IV, V e VI.

Prendendo in considerazione una suddivisione della linea centrale al variare del parametro  $R$  in tre gruppi (tra 1 e 2, tra 2 e 3 e tra 3 e 4), si ricava l'andamento mostrato in Figura 4.30, in cui vengono riportate anche le barre d'errore sulla posizione della linea media. Questa è stata ricavata utilizzando la funzione t-student, con una probabilità del 95%.

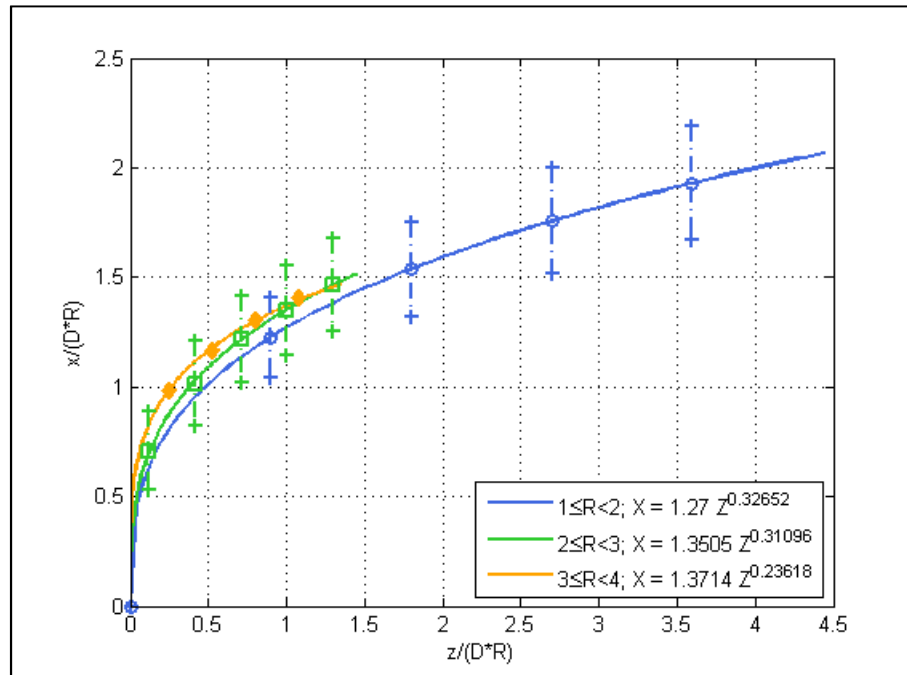


Figura 4.30: Regressione delle linee centrali al variare del parametro  $R$ ; i termini  $X$  e  $Z$  nella legenda sono pari rispettivamente a  $x/(D^*R)$  ed a  $z/(D^*R)$ .

Il risultato della regressione mostra come anche variando le condizioni operative sui due flussi, la tendenza della linea centrale del getto non cambia sostanzialmente la propria struttura. Facendo riferimento al paragrafo 4.5, anche in questo caso è possibile osservare la presenza del contatto del getto. Infatti la linea centrale per valori di  $R$  compresi tra 1 e 2 mostra come i dati sperimentali disponibili siano presenti per valori di  $z$  più grandi rispetto ai rimanenti casi con  $R$  più alto, dove il contatto del getto con la parete opposta a quella d'iniezione avviene prima.

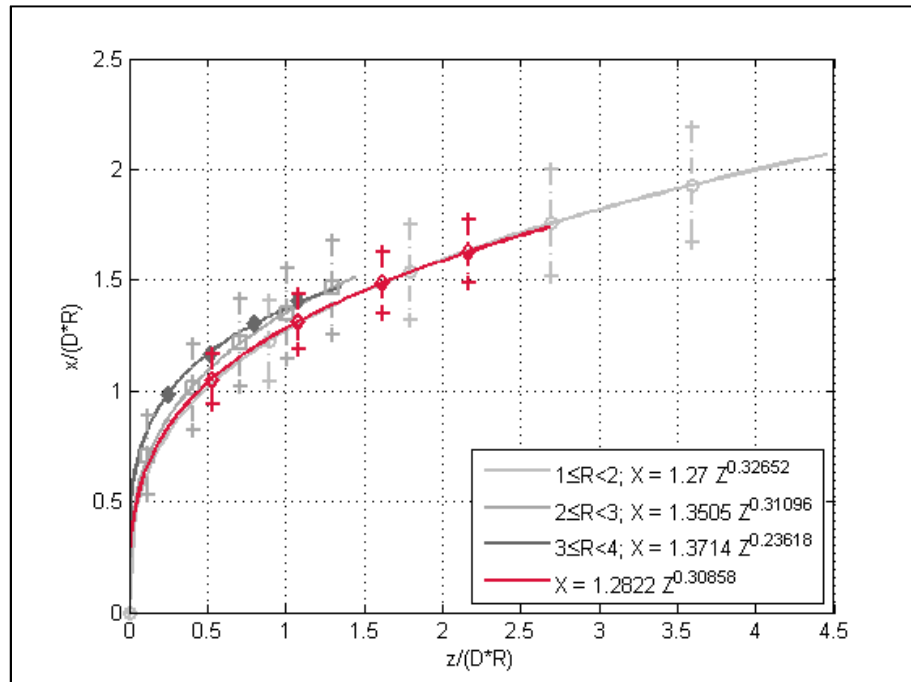


Figura 4.31: Sovrapposizione delle regressioni delle curve sperimentali precedentemente mostrate (linee in scala di grigi) con il relativo collasso statistico (linea rossa); i termini X e Z nella legenda sono pari rispettivamente a  $x/(D \cdot R)$  ed a  $z/(D \cdot R)$ .

Utilizzando tutti i punti sperimentali a disposizione dalle diverse misure e senza effettuare nessuna distinzione al variare del parametro  $R$ . In questo modo è possibile valutare come un eventuale influenza di questo parametro sull'andamento delle curve. Il risultato di questa elaborazione viene mostrato in Figura 4.31, dove facendo un confronto con le curve ricavate in precedenza, si vede come queste ricadano perfettamente nell'intervallo d'incertezza della curva finale.

## 4.7. Proprietà di mescolamento

Facendo riferimento alle immagini appena elaborate, è possibile valutare anche le proprietà di mescolamento dei due flussi. Infatti in presenza di un buon processo di mescolamento, la concentrazione del gas associato al getto si riduce con l'effetto di essere meno visibile nelle immagini finali. Questo risultato è ben visibile osservando le immagini campione riportate in Appendice E, di cui alcune di queste immagini vengono riportate in Figura 4.32 per diverse tipologie



evolutive del getto. Come spiegato nel paragrafo 4.4, ad ogni tipologia è stato associato un differente *range* di valori possibili del rapporto tra i flussi di quantità di moto, mettendo quindi in evidenza una dipendenza del comportamento del getto al variare di questo parametro. Quello che si nota è che per le tipologie III, IV e V, dove il getto entra in contatto con le pareti del condotto dopo aver subito una deflessione, la distinzione tra i due flussi non risulta essere evidente nel tratto finale della foto, tanto che il programma di elaborazione delle immagini ha considerato quella regione come rumore o una parte completamente distaccata dal corpo centrale, e quindi eliminata. Per la tipologia VI, ossia il caso in cui il getto non entra in contatto con le pareti del condotto, è possibile visualizzare una maggiore propagazione fino quasi ad entrare in contatto con la parte finale (estrema destra) dell'immagine. Passando invece alla tipologia VII con valore di  $R$  molto basso si nota come il getto raggiunga molto facilmente questa regione. Unica eccezione a questa tendenza al diminuire del parametro  $R$  sono le tipologie I e II. Infatti per queste tipologie ci si aspetterebbe un'ottima proprietà di mescolamento che porterebbero ad avere delle immagini dove la distinzione tra i due flussi non sia più possibile fin dopo poco la sua iniezione. Per queste tipologie invece è possibile visualizzare il getto per la maggior parte di entrambe le foto, con una maggiore concentrazione del gas associato al getto in prossimità della parete opposta a quella d'iniezione. Questo fenomeno è forse connesso al fatto che il valore del parametro  $R$  è molto più alto rispetto agli altri casi ed il valore del numero di Reynolds è basso (inferiore a 500), diminuendo l'effetto dell'*entrainment* da parte del flusso trasverso, portando il getto a ricircolare nella regione dell'iniezione e rendendo visibile il getto fino alla sezione posteriore della foto. In questi casi non è possibile affermare che con valori del parametro  $R$  molto alti le proprietà di mescolamento migliorino, dato anche che la casistica a disposizione è limitata a pochi esperimenti e che quanto visualizzato non risulta essere concorde con la tendenza mostrato per le altre tipologie. Per quanto riguarda quindi le proprietà di mescolamento per rapporti tra i flussi di quantità di moto alti, sono stati condotti degli esperimenti con tecniche anemometriche, le quali hanno fornito maggiori delucidazioni a riguardo.

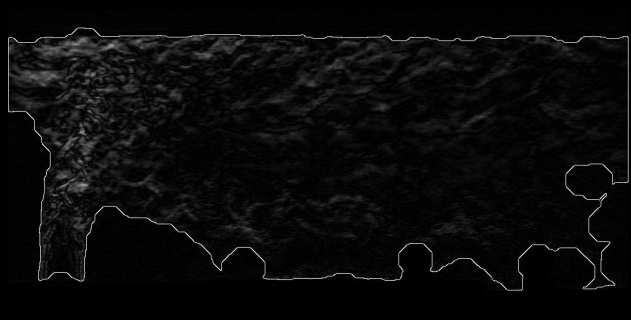
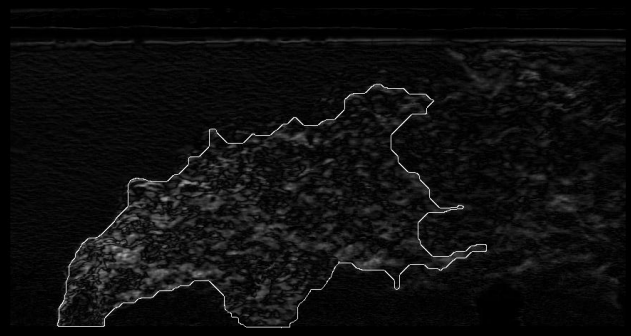
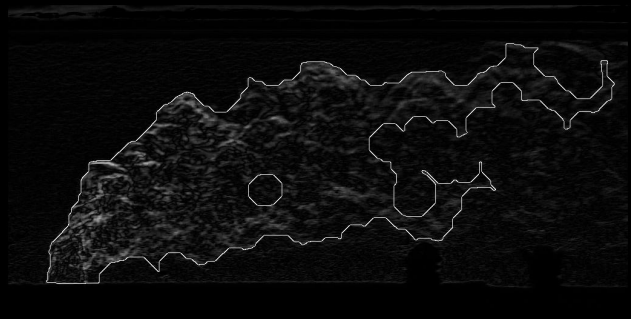
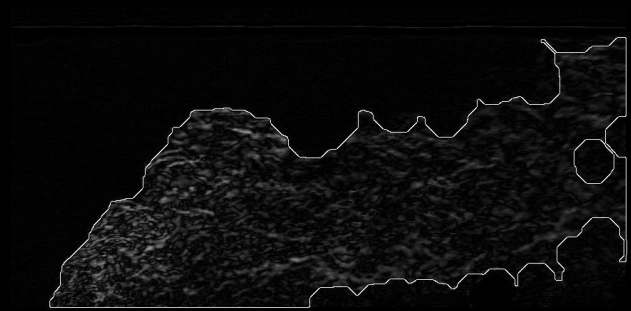
Tipologia	Esempio
II	
IV	
VI	
VII	

Figura 4.32: Visualizzazione delle immagini elaborate per le tipologie II, IV, VI e VII.

# 5. Analisi delle misure anemometriche

---

---

In questo capitolo vengono messi a confronto i risultati ottenuti tramite le diverse tecniche utilizzate per analizzare il fenomeno dell'iniezione di un getto all'interno di un flusso trasverso.

Per quanto riguarda l'analisi delle immagini effettuate con la tecnica Schlieren, i risultati sono stati già visualizzati e commentati nel capitolo precedente: gli esiti così ottenuti sono stati però messi in relazione con le misure effettuate con l'anemometro a filo caldo per determinare il livello delle scale temporali e spaziali sulla sezione d'uscita ed il livello di mescolamento tra i due flussi. Tale processo viene valutato considerando l'energia cinetica turbolenta: essa rappresenta l'energia introdotta dal getto all'interno del flusso trasverso. Se quindi è presente una regione con un alto valore di energia cinetica turbolenta, implica che i due flussi sono poco mescolati, in quanto è ancora possibile visualizzare la presenza del getto. Viceversa, se il livello di energia cinetica turbolenta fosse uniforme, implicherebbe che l'energia introdotta dal getto è stata completamente trasmessa al flusso trasverso, non potendo più identificare il getto.

La determinazione delle scale temporali ci permette anche di valutare il numero di Stokes per le dimensioni delle particelle traccianti utilizzate negli esperimenti con la strumentazione LDV.

Nella parte finale del capitolo viene riportato il campo di moto misurato con la tecnica LDV per condizioni operative aventi diverso rapporto tra i flussi di quantità di moto  $R$  ma operanti con lo stesso numero di Reynolds.

## 5.1. Processo di determinazione delle scale temporali

La determinazione delle scale temporali di un fenomeno turbolento possono essere calcolate tramite l'analisi dello spettro del segnale, ossia il modulo al quadrato delle fluttuazioni turbolente  $u(t)$  (come mostrata nell'espressione (3.8) [20]) rappresentate nel dominio delle frequenze mediante la fast Fourier trasfor (FFT). In condizioni di stazionarietà del flusso, il valore medio di  $u^2(t)$  risulta essere costante indipendentemente dall'intervallo di misura su cui viene eseguita la media, e può essere determinato considerando la somma dei contributi relativi a tutte le frequenze di fluttuazioni e si può esprimere come mostrato nell'espressione (5.1).

$$\overline{u^2} = \int_0^{\infty} E_n(f) df \quad (5.1)$$

dove  $E_n(f)df$  rappresenta la frazione di energia contenuta dell'intervallo di frequenza  $df$ .

G.I. Taylor nel 1938 ha dimostrato per primo che per un modello monodimensionale la funzione di densità spettrale dell'energia  $F(f)$ , data dal rapporto tra l'energia  $E_n(f)$  e la fluttuazione  $\overline{u^2}$ , è correlata alla trasformata di Fourier del coefficiente di autocorrelazione Euleriano, la cui definizione è mostrata nell'espressione (5.2).

$$R_E(\tau) = \frac{\overline{u(t) \cdot u(t - \tau)}}{\overline{u^2}} \quad (5.2)$$

La correlazione che ne risulta è mostrata nell'espressione (5.3).

$$F(f) = 4 \int_0^{\infty} R_E(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (5.3)$$

Tramite queste due entità, appena definite, è possibile esprimere le scale temporali caratteristiche di un fenomeno turbolento, la cui definizione viene mostrata nell'espressione (5.4).

$$T_E = \int_0^{\infty} R_E(\tau) dt \quad (5.4)$$

Sempre utilizzando il coefficiente di autocorrelazione e la funzione di densità spettrale dell'energia è possibile ricavare anche la scala dissipativa, come mostrato nell'espressione (5.5).

$$\frac{1}{T_E^2} = 2\pi^2 \int_0^{\infty} f^2 F(f) df \quad (5.5)$$

Come appena mostrato, risulta molto importante definire i valori di  $F(f)$  e  $R_E(\tau)$ , il cui calcolo diretto in alcuni casi risulta essere molto pesante. Avendo però a disposizione i dati del segnale in forma digitale di un fenomeno stazionario in cui i valori medi non sono dipendenti dal tempo, è possibile applicare la trasformata di Fourier rapida (Fast Fourier Transform) dei dati di velocità memorizzati. Applicando infatti due volte di seguito la FFT del segnale si ottiene la densità spettrale dell'energia, e successivamente è possibile ricavare il coefficiente di autocorrelazione.

## 5.2. Misure anemometriche effettuate tramite sonda a filo caldo

Tramite le misure effettuate con l'anemometro a filo caldo è stato possibile valutare le dimensioni delle scale temporali e spaziali del fenomeno in esame in corrispondenza della sezione d'uscita del condotto.

Le scale temporali ricavate, mettono in evidenza il tempo caratteristico associato alla dimensione spaziale dei vortici trascinati dal moto convettivo, che in questo caso è rappresentato dal flusso trasverso. Le scale spaziali e quindi le dimensioni dei vortici, sono date dal prodotto delle scale temporali per il moto medio del flusso trasverso. I vortici visualizzati, rappresentano la classe di vortici compresa tra i vortici presenti sulle macroscale e le micro scale turbolente (scale di Kolmogorov). Le prime sono limitate dalla geometria del condotto, le seconde invece lo sono dagli effetti di dissipazione viscosa dei fluidi. Non cambiando la geometria dell'esperimento, e non cambiando nemmeno i gas utilizzati per gli esperimenti, ciò che ci si aspetta alla fine di quest'analisi è che

le dimensioni delle scale non varino in maniera sensibile al modificarsi delle condizioni operative dell'esperimento.

I risultati ottenuti in termini di scale temporali-spaziali, e di energia cinetica turbolenta, al variare delle condizioni operative con cui sono stati condotti gli esperimenti, sono stati messi in relazione con i risultati ottenuti precedentemente con l'analisi delle immagini Schlieren. In particolare, i risultati sono stati suddivisi in funzione della classificazione del getto, come mostrato nel paragrafo 4.4.

In questo caso però ciò che è stato ottenuto dai diversi esperimenti è stato valutato in termini di valori medi e deviazione standard spaziali per ogni esperimento, considerando cioè la media tra i valori ottenuti in corrispondenza di ogni punto della griglia di misura. Ognuno di questi valori è stato poi mediato con tutti gli altri valori ricavati per casi associati alla stessa tipologia evolutiva del getto.

I risultati che verranno mostrati non comprendono la visualizzazione di quelli della tipologia I, in quanto è stato evidenziato un solo caso e quindi poco rappresentativo.

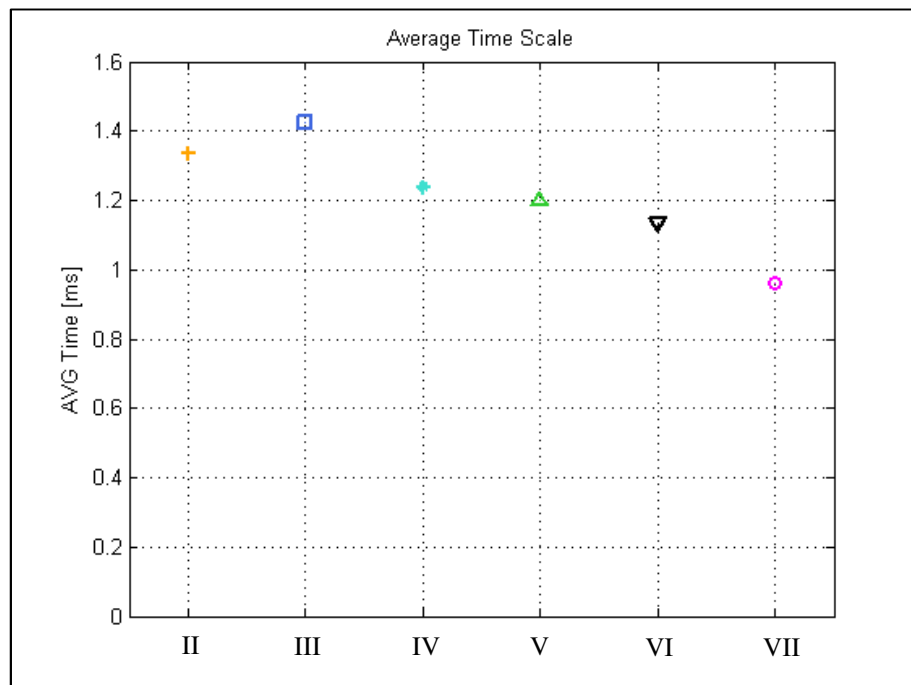


Figura 5.1: Andamento del valore medio della scala temporali al variare della tipologia evolutiva del getto.

In Figura 5.1 è possibile osservare che non esiste una grande variazione sulle scale temporali del fenomeno, in quanto esse sono tutte comprese tra 0.9 e 1.5 ms. Esistono tuttavia delle piccole variazioni che mettono in evidenza una tendenza a diminuire della scala temporale passando dalla tipologia II alla VII. Per mettere in evidenza questa variazione, sono state calcolate le deviazioni standard delle scale temporali: a partire dal valore della misura della scala temporale, è stata determinata la deviazione standard delle scale temporali associate a tutti i punti di misura di ogni esperimento. Come per la media, questo valore è stato associato ad una differente tipologia evolutiva del getto all'interno del condotto, di conseguenza per ognuna di esse è stata valutata una deviazione standard media, definita come la radice quadrata della media delle varianze. I risultati così ottenuti sono visibili in Figura 5.2, dove è possibile osservare come ci sia una netta diminuzione del valore delle scale temporali al diminuire del valore di  $R$ . Passando infatti dalla tipologia II alla VII è presente una diminuzione di quasi un ordine di grandezza sulla misura finale.

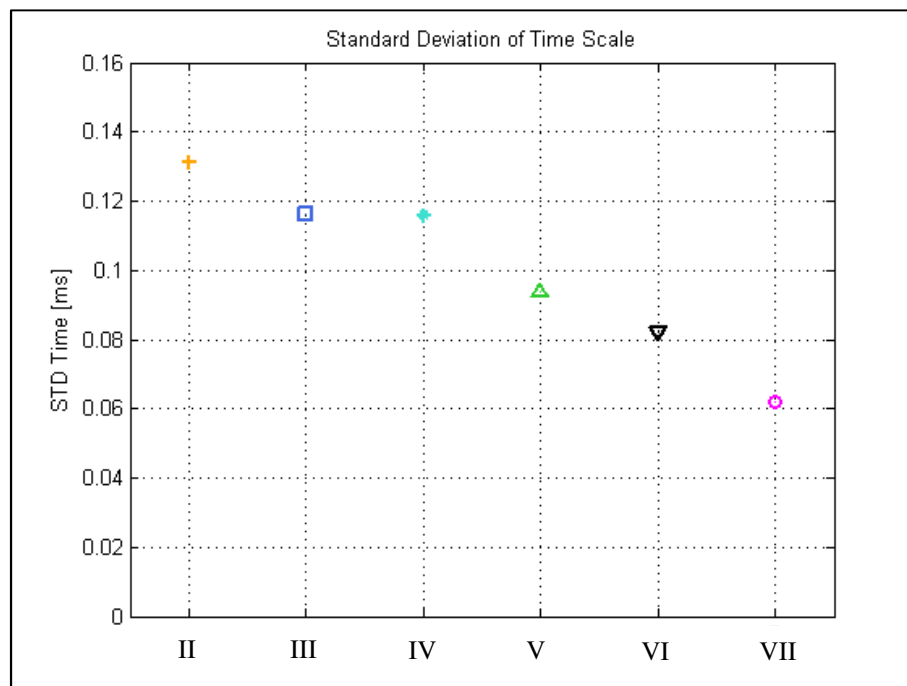


Figura 5.2: Andamento della deviazione standard della scala temporali al variare della tipologia evolutiva del getto.

Il fatto che per la tipologia VI e VII si ottengono dei valori tendenzialmente più piccoli è anche connesso al numero di Reynolds associato all'esperimento.

Infatti per queste tipologie, soprattutto per la VII, gli esperimenti sono stati condotti solo per valori del numero di Reynolds che ricoprono la fascia alta del *range* indagato, mentre per le altre tipologie evolutive del getto sono state condotte con valori del numero di Reynolds sempre più piccoli. Tale risultato mette pertanto in evidenza il contributo di entrambi questi fenomeni: la variazione della tipologia del getto (per ora legata solo al parametro  $R$ ) e la variazione del numero di Reynolds.

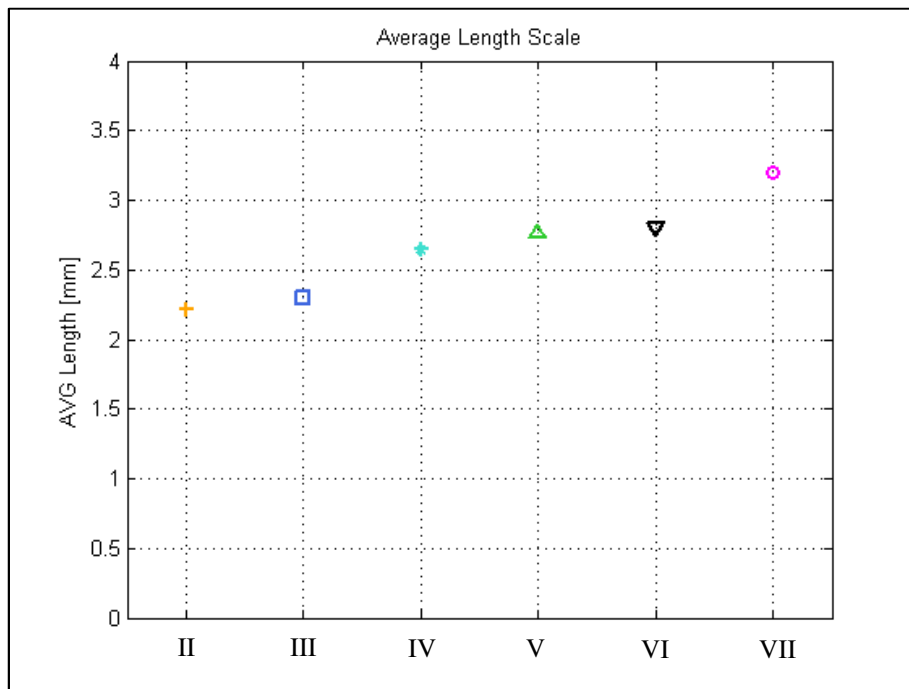


Figura 5.3 Andamento del valore medio della scala spaziale al variare della tipologia evolutiva del getto.

In Figura 5.3 viene riportato invece il livello delle scale spaziali ricavate a partire dalla determinazione da quelle temporali il grafico mostra come le macroscale spaziali assumano in valore molto prossimo tra loro, ricoprendo un *range* compreso nell'intervallo tra i 2 ed 3.5 mm.

Rispetto alle scale temporali, è però possibile osservare una leggera tendenza all'aumentare delle scale spaziali al diminuire del valore del rapporto tra i flussi di quantità di moto, visualizzato in funzione della tipologia evolutiva del getto (nel paragrafo 4.4 è stata messa in evidenza la suddivisione al variare di  $R$ ). Questo andamento permette di visualizzare la qualità del mescolamento al variare della classificazione del getto, mettendo in evidenza come per getti



molto energici, in cui è presente un forte impatto con la parete opposta a quella d'iniezione, le proprietà di mescolamento siano, seppur di poco, migliori rispetto ai casi il cui grado di penetrazione sia più basso. Se infatti le scale spaziali determinate sono piccole, implica che le dimensioni dei vortici intermedi visualizzati saranno piccole, e quindi il livello di mescolamento si sposta sempre più verso le scale più piccole. Questo fenomeno può essere connesso al fatto che con un alto grado di penetrazione, il getto si comporta quasi esattamente come un cilindro solido, le cui caratteristiche geometriche iniziano a cambiare sensibilmente in prossimità della parete opposta a quella d'iniezione. Tale geometria porta ad un incremento del livello di turbolenza del fenomeno subito a valle del getto, migliorando le proprietà di mescolamento.

Sempre tramite le misure effettuate con l'anemometro a filo caldo, è stato possibile valutare il livello di energia cinetica turbolenta del fenomeno. I risultati verranno però mostrati in termini adimensionali: per quanto riguarda l'energia cinetica turbolenta viene ad essere normalizzata rispetto all'energia cinetica media del flusso trasverso, come mostrato nell'espressione (5.6).

$$TKE = \frac{u'^2}{\overline{U}_{cf}^2} \quad (5.6)$$

Osservando il livello di energia cinetica turbolenta normalizzata rispetto all'energia del moto medio, al variare della classificazione del getto, è possibile arrivare alle stesse conclusioni di omogeneità del flusso. In Figura 5.4 viene mostrato questo risultato, in cui l'energia cinetica turbolenta è compresa nell'intervallo tra 0.7 e 1.5 % dell'energia cinetica media del flusso trasverso.

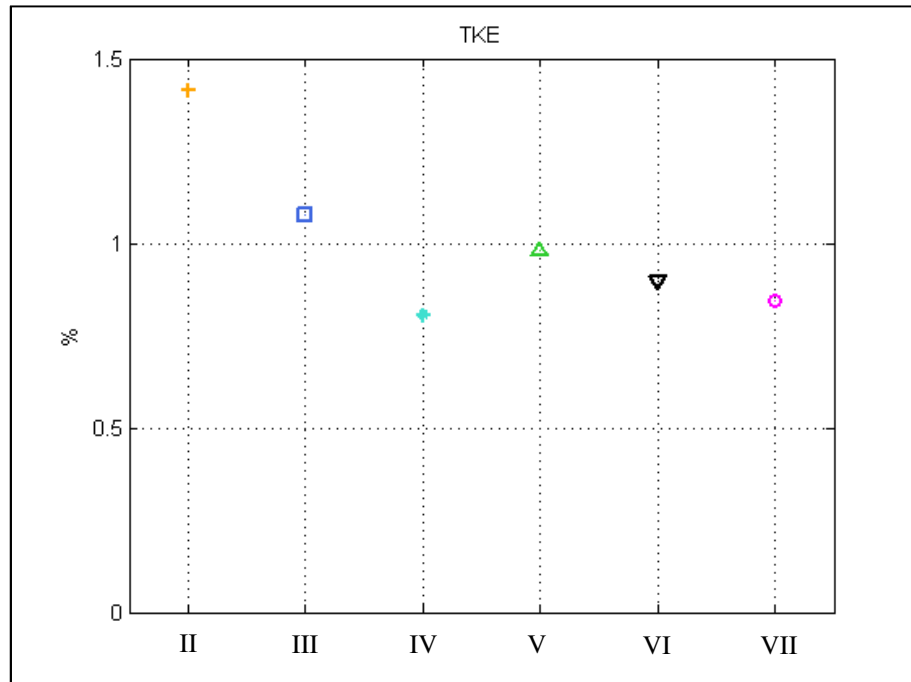


Figura 5.4: Andamento dell'energia cinetica turbolenta normalizzata rispetto al moto medio del flusso trasverso, al variare della tipologia evolutiva del getto.

Sempre valutando il livello di energia cinetica turbolenta è possibile osservare come ci sia una sua diminuzione al diminuire del parametro  $R$ : tale risultato mette in evidenza il livello di energia introdotta all'interno del flusso trasverso, che per valori di  $R$  alti risulta essere alta e viceversa per valori di  $R$  bassi.

Dopo aver valutato la distinzione tra le tipologie evolutive del getto ed i risultati ottenuti con il filo caldo, è stata valutata un'eventuale differenza tra i risultati al variare dell'angolo d'iniezione. Avendo mostrato in precedenza come non ci siano grandi variazioni al variare della tipologia evolutiva del getto mantenendo costante l'angolo d'iniezione, tutti gli esperimenti effettuati sono stati raggruppati tra di loro in funzione del solo angolo d'iniezione.

Per quest'analisi è stato valutato un ulteriore parametro, dato dalla deviazione standard delle velocità medie definita in ogni punto della griglia di misura ( $\overline{U}'$ ). Anche questo valore è stato normalizzato rispetto al moto medio dell'intero flusso ( $\overline{U}$ ), ed espresso quindi in termini percentuali. All'aumentare della dispersione delle velocità medie, ciò che si osserva è che il flusso sulla sezione d'uscita risulta essere poco mescolato, mostrando una differenza di velocità anche a livello macroscopico, e non solo sulle scale più piccole. Ad un valore

piccolo di questa dispersione invece è associata ad una buona omogeneità del flusso.

**Tabella 5.1: Risultati ottenuti dagli esperimenti con il filo caldo al variare dell'angolo d'iniezione.**

$\Theta$	Scala spaziale [mm]	TKE [%]	$\frac{\bar{u}'}{\bar{u}}$ [%]
90	2.64	0.88	0.42
60	2.49	1.62	0.78
45	2.52	2.05	1.27

In Tabella 5.1 sono presentati i risultati ottenuti al variare dell'angolo d'iniezione in termini di scale spaziali, energia cinetica turbolenta adimensionale e dispersione della velocità media sulla sezione d'uscita. Osservando la dimensione dei vortici medi si nota come essi siano molto prossimi tra loro, mettendo in evidenza come benché cambiando la configurazione d'iniezione, non ci siano delle variazioni sensibili, mettendo quindi in evidenza la coerenza dei risultati con quanto espresso dalla teoria.

Il livello di energia cinetica turbolenta invece cresce al diminuire di  $\theta$ . Tale risultato mostra come, inclinando il getto lungo la direzione di moto, l'interazione tra i due flussi risulti essere meno intensa, portando quindi a delle proprietà di mescolamento peggiori. Lo stesso risultato lo si può vedere considerando la dispersione delle velocità medie.

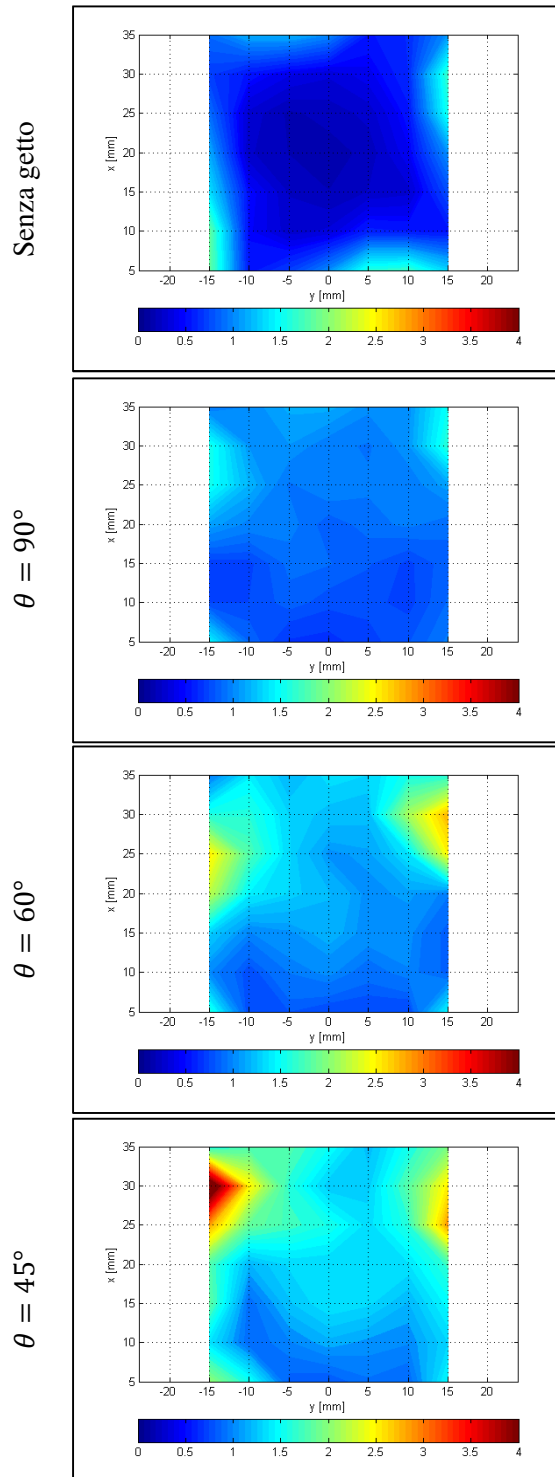


Figura 5.5: Andamento dell'energia cinetica turbolenta al variare dell'angolo d'inclinazione del getto. La prima immagine mostra invece l'energia cinetica turbolenta con solo il flusso trasverso senza la presenza del getto.

In Figura 5.5 vengono riportati i casi riguardanti il livello di energia cinetica turbolenta normalizzata al variare dell'angolo d'iniezione, mantenendo costante il valore di  $R$  pari a 2.47 e numero di Reynolds pari a 1100. Nella prima immagine in alto, viene riportato il livello di energia cinetica turbolenta nel caso in cui il getto non venga iniettato ma sia presente solo il flusso trasverso: in questo caso è possibile vedere come i valori siano molto bassi ed omogenei in tutta la regione analizzata. Introducendo il getto, oltre a vedere un livello di energia sensibilmente più alto, è possibile distinguere due regioni: una localizzata nella parte alta delle immagini (vicino alla parete opposta a quella d'iniezione), ed una nella parte bassa. Nella parte alta è presente il getto, che rimane in prossimità della parete dopo il suo contatto con essa; nella parte bassa invece è possibile notare come ci sia un buon livello di mescolamento, aiutato dai vortici di scia che ne migliorano le qualità. Diminuendo l'angolo d'iniezione del getto, si osserva come la regione nella parte alta tenda ad aumentare, mettendo in evidenza una peggior condizione di mescolamento. Questo fenomeno è connesso al fatto che inclinando il getto lungo la direzione di moto del flusso trasverso, i fenomeni di mescolamento associati all'*entrainment* diminuiscono, ma molto probabilmente anche il sistema di vortici presentato nel paragrafo 2.4 tende ad essere meno intenso non essendo il getto iniettato perpendicolarmente nel flusso trasverso.

### 5.3. Campo di moto

Tramite l'anemometria LDV è stato possibile visualizzare il campo di moto del flusso. Al contrario degli esperimenti precedenti, non sono stati analizzati un numero elevato di condizioni operative, ma ne sono state analizzate solo 3, in cui il flusso trasverso è stato mantenuto costante ma è stata variata la portata associata al getto, ottenendo come valore del rapporto dei flussi di quantità di moto pari a 1.97, 2.96 e 4.93. Per tutti e tre questi casi il valore del numero di Reynolds invece è stato mantenuto costante e pari a 738. Sono state scelte queste tre tipologie in quanto esse rappresentano l'evoluzione del getto partendo da una configurazione in cui il getto stesso entra in contatto con la parete opposta a quella d'iniezione (tipologia III) con diversi gradi d'intensità. Infatti per  $R = 1.97$  il contatto avviene ad una distanza molto più grande di quella raggiunta per  $R = 4.93$ , dove il getto assume un'evoluzione all'interno del

flusso trasverso molto prossima alla tipologia II. Per i casi in cui  $R$  vale 1.97 e 2.96 i test sono stati condotti cambiando anche il flusso inseminato con le particelle traccianti per valutare eventuali differenze sulle misure finali.

Prima di passare però a mostrare i risultati, è stato valutato il numero di Stokes per valutare se il tracciante utilizzato fosse in grado di seguire le fluttuazioni almeno delle scale intermedie. Avendo ora a disposizione il valore della scala temporale della fluttuazione turbolenta, nonché di tutti i dati che caratterizzano il fluido tracciante ed il fluido utilizzato per gli esperimenti (di cui i valori vengono riportati in Tabella 5.2), è stato possibile ricavare il valore del numero di Stokes che risulta essere pari a 0.0098. Tale valore risulta essere ben al di sotto dell'unità, mostrando come le particelle traccianti utilizzate siano in grado di seguire adeguatamente ciò che accade sulle scale temporali e spaziali che caratterizzano il fenomeno indagato.

**Tabella 5.2: Dati utilizzati per la determinazione del numero di Stokes.**

Dati utilizzati per la determinazione del numero di Stokes	
$d$ [ $\mu\text{m}$ ]	2
$\rho_p$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	900
$\mu_a$ [ $\text{Pa s}$ ]	1.78e-5
$T_U$ [ $\text{ms}$ ]	1.1478

I primi esperimenti condotti sono stati fatti utilizzando la configurazione I di prova, ed inseminando differentemente i flussi.

In Figura 5.6 è possibile osservare l'andamento delle linee di flusso e del livello di vorticità (rappresentato come mappa cromatica) nei diversi piani di misura.

In questa figura è possibile osservare come per i primi piani di misura a partire dal punto d'iniezione, inseminando il flusso trasverso, è possibile effettuare le misure in tutto il dominio in cui può essere posizionato il volume di prova, differentemente dal caso in cui sia il getto ad essere inseminato. In questo piano infatti il processo di mescolamento non è ancora iniziato e di conseguenza la presenza del tracciante è localizzata in prossimità del getto. Tale aspetto mette fin da subito in evidenza una sostanziale differenza tra le due modalità d'inseminazione, ossia la capacità di localizzare il getto. Per la prima modalità infatti, risulta difficile distinguere fin da subito i due flussi, mentre per la seconda risulta chiaro come esso sia molto più facile osservando solo il numero di particelle rilevate dal sistema ottico di misura.

Oltre a variazioni sul numero di punti di misura in cui è stato possibile rilevare il transito di una particella, nel piano posto a  $Z/D = 0$  è possibile osservare altre differenze a livello fluidodinamico. A causa infatti del basso livello di mescolamento, per il caso in cui è stato iniettato il flusso trasverso, non è stato possibile visualizzare l'alto livello di vorticità causata dall'iniezione del getto. Nel caso in cui invece venga iniettato il getto, non è possibile visualizzare lo spostamento del flusso trasverso conseguente all'iniezione del getto.

I risultati ottenuti invece per i piani posti ad  $Z/D = 1$ ,  $Z/D = 2$  e  $Z/D = 5$  dal punto d'iniezione risultano essere molto simili tra le due modalità di prova, sia in termini di linee di flusso che di vorticità, mettendo così in evidenza il fatto che i due flussi si sono mescolati al punto da mostrare lo stesso comportamento, almeno a livello macroscopico, del fenomeno.

Per le misure effettuate a 10 diametri invece risultano esserci anche per questo caso delle differenze: infatti per il caso in cui è il flusso trasverso ad essere iniettato, i risultati riescono ad evidenziare chiaramente la regione del getto, mentre nell'altro caso il flusso risulta essere talmente ben mescolato da non delineare la presenza del getto tramite le linee di flusso.

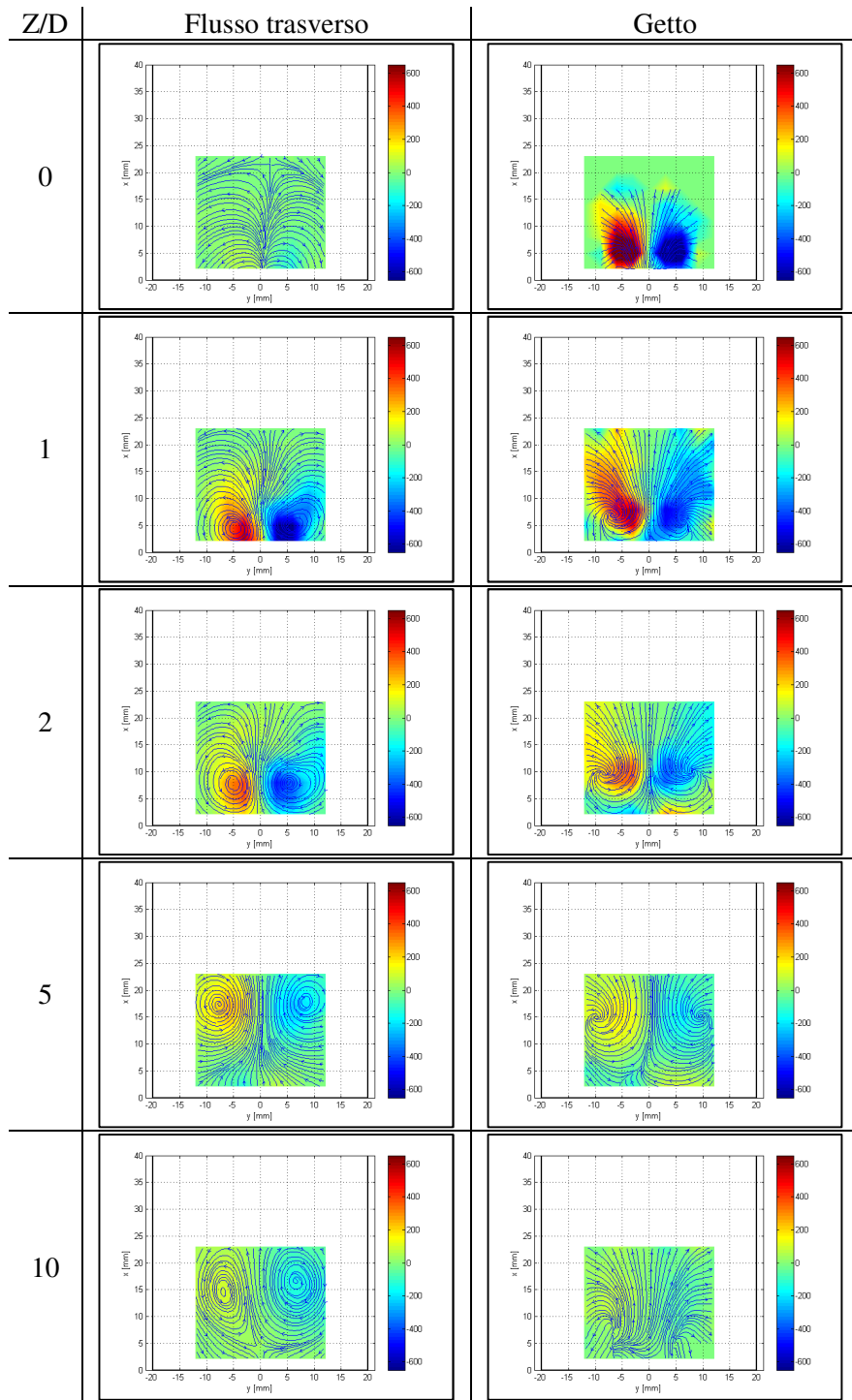


Figura 5.6: Misure effettuate utilizzando la configurazione I di misura ed inseminando differentemente i flussi per R pari a 1.97. La mappa cromatica mostrata nelle figure rappresenta la vorticità, espressa in  $[s^{-1}]$ , mentre le linee sovrapposte rappresentano le linee di flusso. Entrambi questi termini sono stati definiti a partire dai vettori velocità nel piano misurati.



Valutando la vorticità mostrata nelle immagini in Figura 5.6 è possibile osservare due sistemi di vortici. Il primo è possibile osservarlo nella mappa ottenuta inseminando il getto alla posizione di  $Z/D = 0$ : i vortici presentati rappresentano il vortice in *Hovering*. Passando invece a delle distanze maggiori dal punto d'iniezione, è possibile vedere l'insorgenza della coppia di vortici controrotanti caratteristici del fenomeno (visibili sia inseminando il getto che il flusso trasverso).

Per lo stesso esperimento è stata valutata anche l'energia cinetica turbolenta, normalizzata rispetto all'energia cinetica convettiva associata al flusso trasverso medio:

$$q = \frac{(u'_x{}^2 + u'_y{}^2)}{\bar{U}_{cf}^2} \quad (5.7)$$

dove  $u'_x$  e  $u'_y$  rappresentano le fluttuazioni di velocità lungo la direzione  $x$  ed  $y$ .

Il risultato di quest'analisi viene mostrato in Figura 5.7 dove è possibile notare maggiormente il processo di mescolamento dei due flussi. Partendo infatti dalla posizione  $Z/D = 0$  e spostandosi verso valle, concentrando l'attenzione solo per gli esperimenti in cui è il getto ad essere inseminato, è possibile vedere come l'energia cinetica turbolenta raggiunga il valore massimo nella regione di massima deflessione (ossia a  $Z/D = 1$  e  $2$ ) e vada poi a diminuire fino ad ottenere una regione completamente uniforme alla distanza di 10 diametri. Inseminando invece il flusso trasverso è possibile vedere come ci sia un incremento dell'energia cinetica turbolenta spostandoci a valle, ma il livello rimanga comunque nettamente inferiore a quanto osservato inseminando il getto. Questo risultato è coerente con la trasmissione dell'energia del getto al flusso trasverso, ma la differenza tra i due risultati rimane comunque alta.

Nel piano di misura posto a  $Z/D = 0$  invece è possibile visualizzare una netta distinzione tra i due esperimenti. Inseminando il getto infatti si può vedere l'energia del getto durante la penetrazione nel flusso trasverso. La stessa misura effettuata inseminando il flusso trasverso non è possibile ottenerla, a causa del basso livello di mescolamento come già mostrato in precedenza.

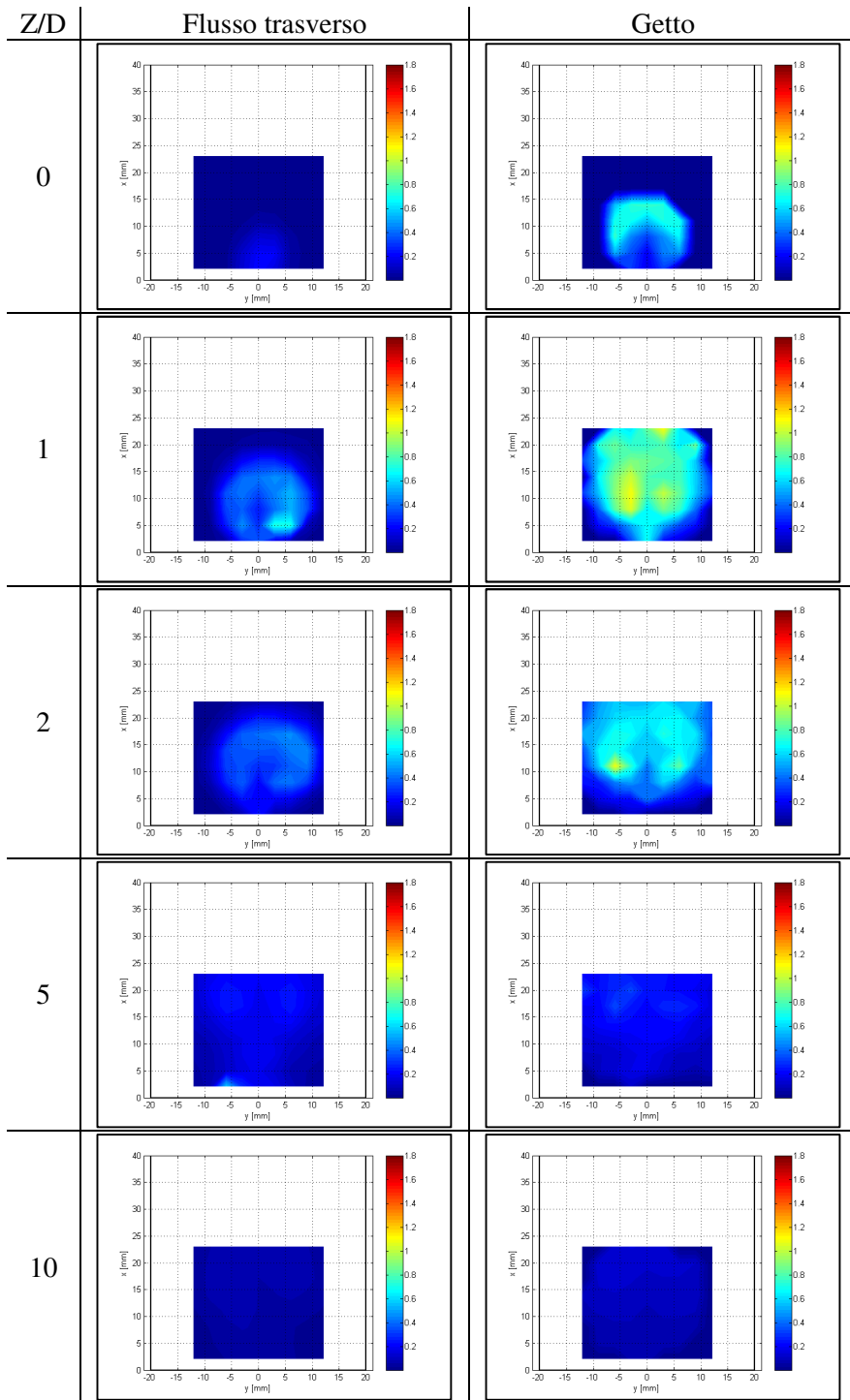


Figura 5.7: Misure effettuate utilizzando la configurazione I di misura ed inseminando differentemente i flussi per R pari a 1.97. La mappa cromatica mostra l'energia cinetica turbolenta normalizzata rispetto all'energia cinetica media del flusso convettivo.

Per meglio mettere in evidenza delle eventuali differenze riguardanti i due campi di moto, vengono riportati in Figura 5.8 ed in Figura 5.9 le componenti di velocità parallele all'asse  $y$ , per il caso appena mostrato per valori di  $Z/D$  pari a 2 e 5. Per ottenere dei grafici più chiari, in queste figure vengono mostrati i profili di velocità per valori di  $Y/D$  pari a 0.94, 0 e -0.94.

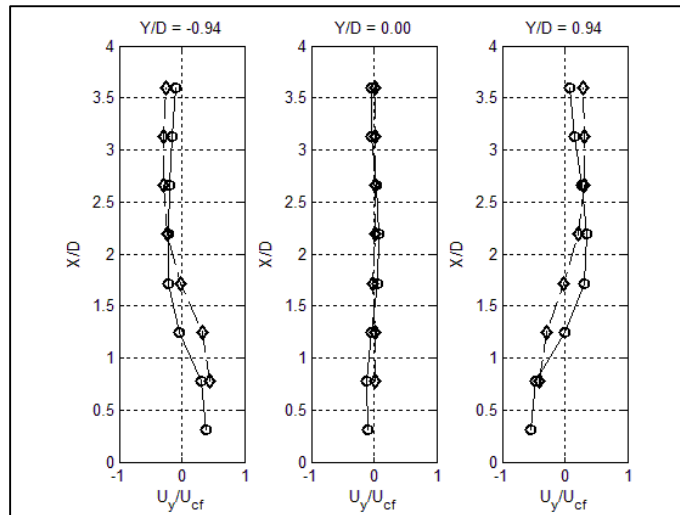


Figura 5.8: Profilo di velocità per la componente  $U_y$  normalizzata rispetto alla velocità del flusso trasverso. La linea con il rombo rappresenta la misura inseminando il getto, mentre il cerchio rappresenta la misura effettuata inseminando il flusso trasverso. I profili sono stati determinati in posizione  $Z/D = 2$ .

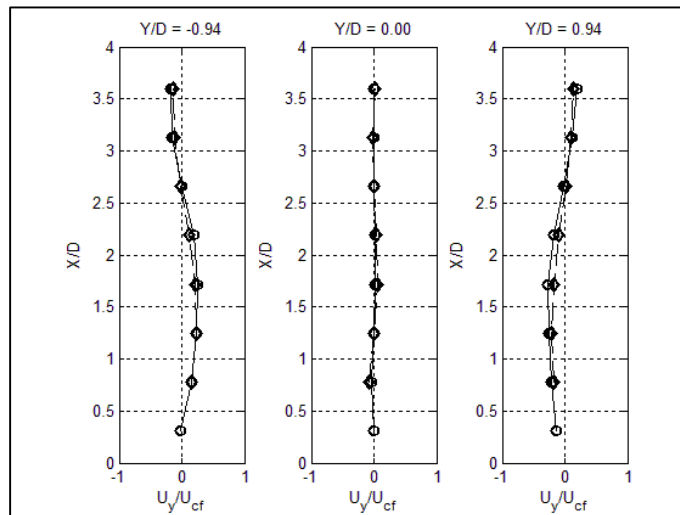


Figura 5.9: Profili di velocità per la componente  $U_y$  normalizzata rispetto alla velocità del flusso trasverso. La linea con il rombo rappresenta la misura inseminando il getto, mentre il cerchio rappresenta la misura effettuata inseminando il flusso trasverso. I profili sono stati determinati in posizione  $Z/D = 5$ .

I grafici appena riportati mostrano come le misure della velocità risultano essere molto prossime tra loro, ma rimane comunque presente il forte distacco tra le energie cinetiche turbolente determinate. Tale differenza risulta correlata al fatto che se viene iniettato il flusso trasverso ciò che si riesce a visualizzare è la sua interazione con il getto, di cui però si è in grado di rappresentare correttamente solo il moto medio. Iniettando il getto invece è possibile apprezzare correttamente tutta l'energia del getto e, di conseguenza, osservando la sua evoluzione lungo il condotto, è possibile visualizzare la sua diminuzione a causa del processo di mescolamento.

Lo stesso tipo di analisi è stata condotta per il caso di in cui  $R$  sia pari a 2.96, ed i risultati mostrano lo stesso andamento ottenuto per il caso precedentemente indagato. Le mappe di confronto per questo caso vengono di conseguenza riportate in Appendice D.

L'esperimento con  $R$  pari a 4.93 è stato analizzato solo iniettando il flusso trasverso i cui risultati sono riportati in Figura 5.10. Per questo caso, oltre alle misure effettuate alle posizioni  $Z/D$  precedentemente investigate, sono state effettuate delle misure anche a 3 ed a 4 diametri dal punto d'iniezione. I risultati riportati arrivano fino alla posizione di  $Z/D = 3$ , in quanto per distanze maggiori, si ritrova lo stesso andamento, sia dell'energia cinetica turbolenta che della vorticità. Tale risultato viene raggiunto in quanto per valori di  $R$  così alti, il contatto con la parete opposta a quella d'iniezione è molto intenso, facendo sì che il getto rimanga vicino alla parete in questione. In questa regione però non è stato possibile effettuare la misura a causa della configurazione sperimentale utilizzata. Facendo riferimento all'energia cinetica turbolenta, si nota come i risultati siano ben uniformi e con valori molto bassi, mettendo in evidenza già come il getto si sia ben mescolato con il flusso trasverso, e quindi confermando quanto trovato in precedenza tramite l'analisi delle immagini Schlieren, ossia che all'aumentare del rapporto dei flussi di quantità di moto le proprietà di mescolamento migliorano.

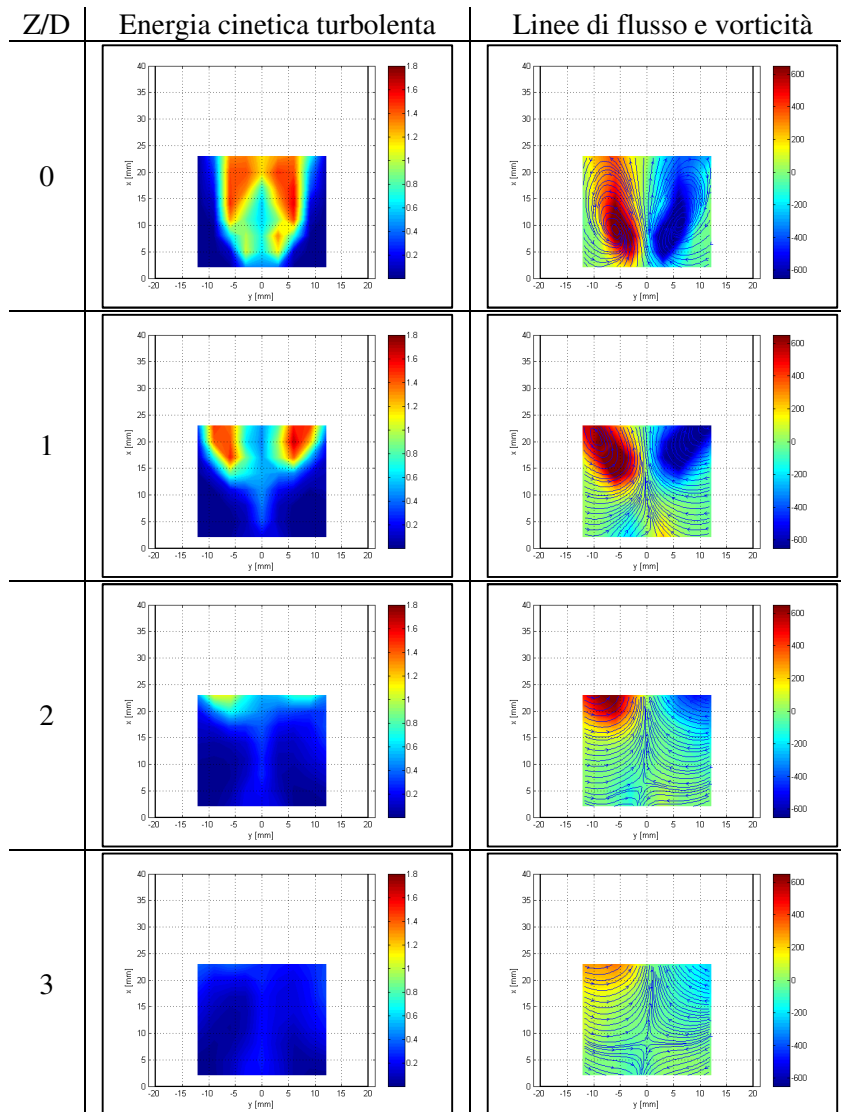


Figura 5.10: Misure effettuate utilizzando la configurazione I di misura ed insemiando il flusso trasverso per  $R$  pari a 4.93. Le mappe cromatiche mostrate nella colonna di sinistra rappresentano l'energia cinetica turbolenta normalizzata rispetto all'energia cinetica media del flusso convettivo, mentre quelle mostrate nella colonna di destra rappresentano la vorticità del campo di moto nel piano, la cui unità di misura è  $[s^{-1}]$ .

Avendo osservato che insemiando il getto si ottengono dei risultati più chiari per quanto riguarda il miscelamento e l'evoluzione del getto stesso all'interno del flusso trasverso, le misure effettuate utilizzando la configurazione II sono state ottenute solo con questa modalità di insemiamento. Oltre a questo, come già anticipato nel paragrafo 3.5.2, i risultati mostrati in precedenza presentano una simmetria dei risultati rispetto al punto d'iniezione del getto, per cui per

ridurre il numero di punti da misurare è stata indagata solo la regione con valori di  $y$  positivi. La riduzione del numero di punti, oltre a rendere la misura più rapida, permette anche di non sporcare eccessivamente le pareti del condotto durante ogni singolo esperimento, facendo sì che la qualità della prova non degradi con il procedere dell'esperimento. Il tracciante infatti, interagendo con le pareti si deposita su di esse, creando delle goccioline che potrebbero porsi sul cammino del fascio laser, aumentando il rumore sulla misura finale.

In Figura 5.11 è possibile osservare le misure effettuate utilizzando la configurazione II di prova per il caso con  $R$  pari 1.97, mostrando i risultati in piani paralleli al piano  $x - z$ .

Questi ultimi evidenziano come il nucleo energetico risulti essere ben visibile nel piano di mezzeria del condotto ( $y = 0$  mm), mentre allontanandosi da esso lungo  $y$  risulti sempre meno visibile. Osservando invece le linee di flusso è possibile notare come sia ben visibile il piegamento del getto nel piano di mezzeria, mentre per distanze maggiori ( $y = 12$  mm) il flusso risulti essere poco disturbato, mostrando un buon parallelismo con l'asse  $z$  del condotto.

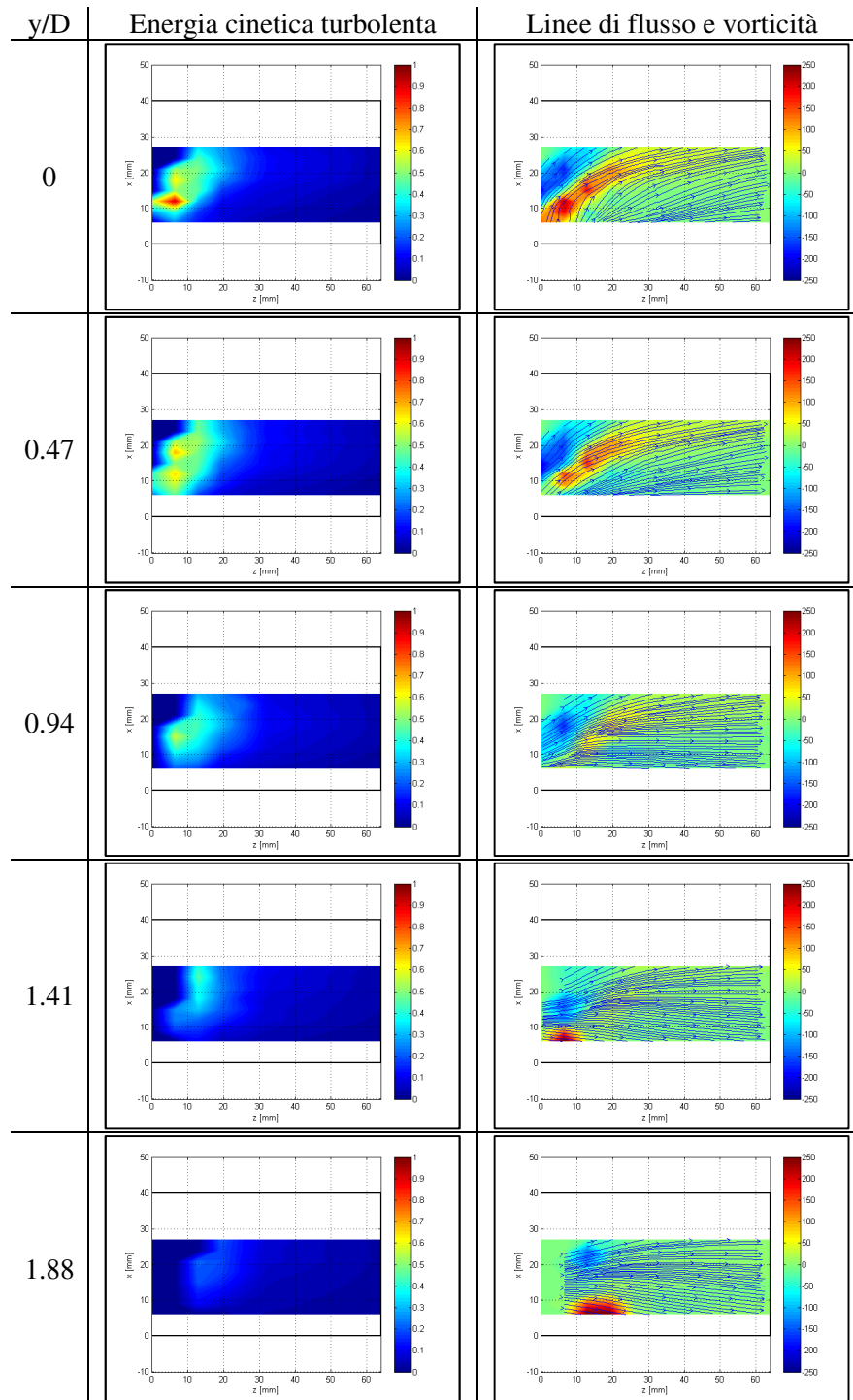


Figura 5.11: Misure effettuate utilizzando la configurazione II di misura ed inseminando il flusso trasverso per  $R$  pari a 1.97. Le mappe cromatiche mostrate nella colonna di sinistra rappresentano l'energia cinetica turbolenta normalizzata rispetto all'energia cinetica media del flusso convettivo, mentre quelle mostrate nella colonna di destra rappresentano la vorticità del campo di moto nel piano, la cui unità di misura è  $[s^{-1}]$ .

## 5.4. Altre Considerazioni Fluidodinamiche

Un'ulteriore misura effettuata con il sistema LDV riguarda la definizione del profilo di velocità in prossimità della sezione d'ingresso del getto nel condotto, il cui risultato è possibile osservarlo in Figura 5.12. La componente della velocità visualizzata è quella parallela all'asse  $x$ , misurata utilizzando la configurazione I ed inseminando il getto con le particelle traccianti. La componente di velocità misurata risulta essere quella predominante in questa regione: in questo punto del dominio infatti è presente il nucleo potenziale del getto, la cui velocità è diretta proprio lungo la componente  $x$ . In figura viene riportata la condizione operativa con  $R$  pari a 1.97 e numero di Reynolds pari a 738. Nel momento in cui è stato misurato il solo getto, la sua componente di velocità è stata mantenuta inalterata, mentre è stata posta a zero quella del flusso trasverso.

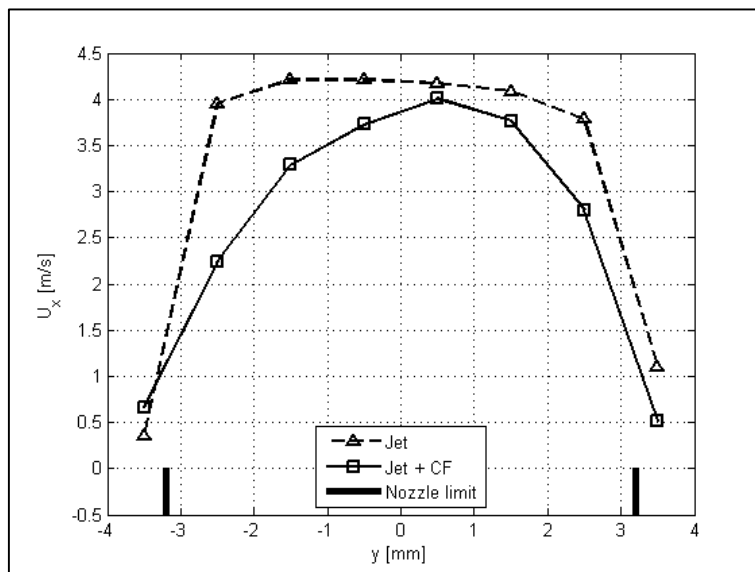


Figura 5.12: Profilo di velocità in prossimità della sezione d'ingresso del getto.

Nel caso in cui sia presente solo il getto è stato ottenuto un profilo di velocità che mette in evidenza l'ottenimento di un flusso turbolento completamente sviluppato nel momento in cui viene iniettato per la condizione indagata. Tale



condizione viene visualizzata dalla presenza di un profilo pressoché piatto nella quasi totalità della sezione d'iniezione. Nel momento in cui invece è presente anche il flusso trasverso, il getto viene fin da subito deflesso, non mostrando più il profilo determinato in precedenza. In questo caso è possibile osservare che in prossimità delle pareti dell'ugello, il getto viene maggiormente trascinato dal flusso trasverso a causa della loro interazione. Il risultato così ottenuto mostra ancora la medesima velocità determinata in precedenza per il punto centrale ( $y = 0$  mm), mentre ai lati di tale valore si ottiene una rapida decrescita della velocità.

A partire dalle misure di velocità effettuate nel piano x-z, è stato possibile ricavare la linea centrale del getto, determinata in corrispondenza della velocità massima. In Figura 5.13 è possibile osservare l'andamento della curva con la relativa espressione interpolante, dove viene messa a confronto con i risultati ottenuti dalle visualizzazioni Schlieren nelle medesime condizioni ( $R = 1.97$ ,  $Re = 738$ ).

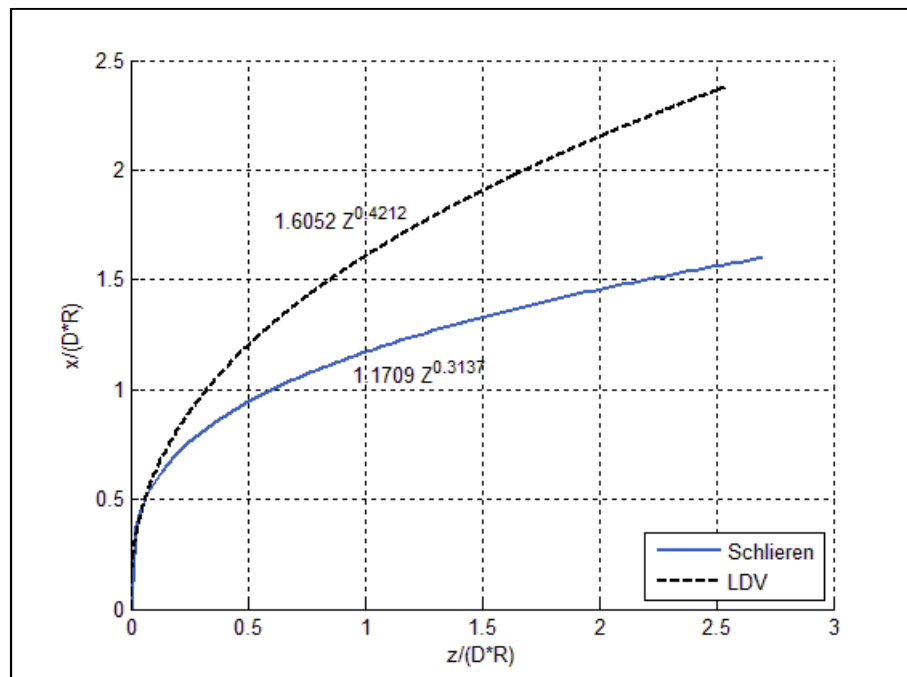


Figura 5.13: Confronto tra la linea centrale del getto valutata tramite la misura della velocità e la linea media ricavata dalla visualizzazione Schlieren.

I due risultati sono tra loro molto differenti: il motivo di questa differenza è legato al fatto che il profilo di velocità massimo utilizzato risulta essere molto

prossimo al contorno superiore del getto e non tiene in considerazione eventuali cambiamenti di direzione del flusso nella parte posteriore, cosa che è possibile invece osservare tramite le visualizzazioni Schlieren. Oltre a questo, è possibile che ci sia anche un legame tra il rapporto tra le densità dei gas utilizzati. Infatti è stato osservato da Kamotani e Greber [5] ed anche da Margason [4], come esista una variazione sulla linea centrale del getto causata dalla diversa densità tra i due flussi. Il getto ed il flusso trasverso erano però costituiti dallo stesso gas, di cui però era stata incrementata la temperatura del getto, a cui conseguentemente è connessa una variazione di densità. In questo caso invece i due flussi sono completamente differenti ma si trovano alla stessa temperatura. Per cui il fenomeno appena mostrato potrebbe in qualche modo essere connesso ai risultati trovati in letteratura, ma necessita comunque di uno studio approfondito per valutare le differenti prestazioni al variare dei gas utilizzati.

Un'ultima analisi è stata condotta valutando lo spettro del segnale della misura di velocità ricavata lungo la componente parallela all'asse  $z$ , per la misura con valore di  $R$  pari a 1.97 e  $Re = 738$ . Il punto di misura è posizionato circa un diametro sopra il punto d'iniezione e spostato a monte di un millimetro per posizionarci sulla superficie di contatto tra il getto ed il flusso trasverso.

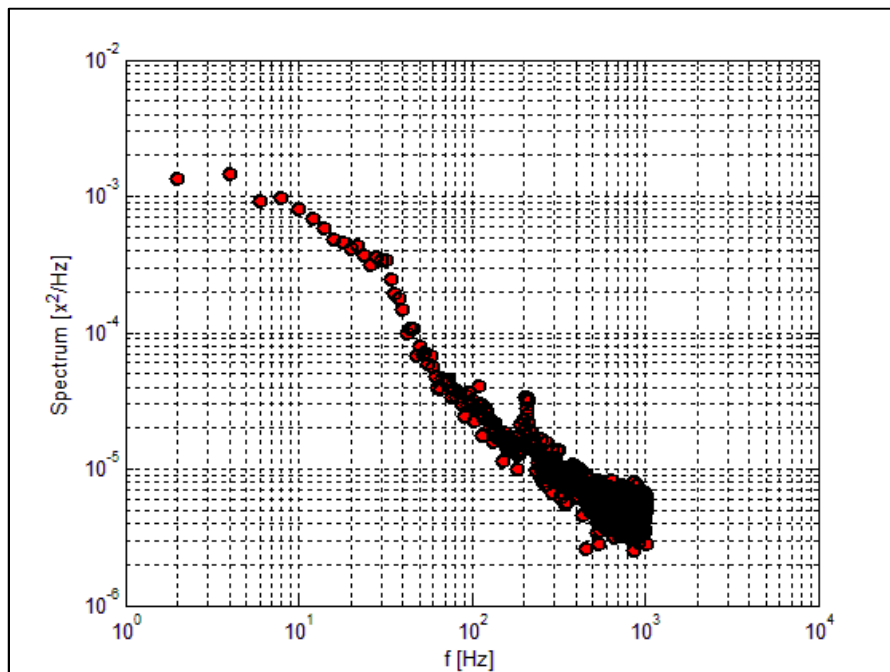


Figura 5.14: Spettro di potenza del segnale ottenuto nel punto di misura posizionato nel piano  $x-z$ , con  $x = 6$  mm e  $z = -1$  mm, per un valore del parametro  $R = 1.97$  e  $Re = 738$ .

Facendo riferimento alla Figura 2.15 riferito alla produzione di vortici dovuta all'iniezione di un getto in flusso trasverso, è possibile vedere che in corrispondenza delle condizioni operative imposte durante questo esperimento è possibile osservare come i tipi di vortici che si vengono a creare sono quello in Hovering e quelli generati dalle instabilità di Kelvin-Helmholtz. Da questo tipo di esperimenti quindi ci si aspetta la presenza di una componente dominante data appunto dallo schema di vortici che si viene a creare.

In Figura 5.14 viene mostrato lo spettro di potenza del segnale acquisito, in cui è possibile osservare come si presentino due componenti principali: una meno visibile alla frequenza di 100 Hz ed una maggiormente visibile a 200 Hz. Utilizzando questi valori di frequenza è stato possibile ricavare il numero di Strouhal, che nel primo caso risulta essere pari a 0.195 e 0.390. Il primo valore ricavato risulta essere coerente con quanto ricavato anche nelle analisi numeriche effettuate da Shattler et al [9], i quali hanno ricavato un valore simile a quello appena trovato (0.17). La seconda armonica, anche se ben più evidente in questo esperimento, non è stata visualizzata in nessun altro esperimento trovato in letteratura (sia in ambito numerico che sperimentale). Il fatto che sia esattamente pari al doppio della frequenza con la quale si ottiene un numero di Strouhal simile a quanto già trovato. Questo mette in evidenza un forse dipendenza della seconda armonica dalla prima: in questo caso, la seconda sarebbe un sintomo della comparsa della frequenza a 100 Hz, rappresentante l'armonica fondamentale, che però risulta essere disturbato da un alto livello di rumore. Tale teoria necessita però di maggiori approfondimenti e studi per essere validata, a cui quindi si rimanda ad un ulteriore sviluppo futuro.



## 6. Conclusioni e sviluppi futuri

---

---

Durante questo lavoro di tesi è stata effettuata l'analisi dell'iniezione del getto in un flusso trasverso, presente all'interno di una camera di prova di dimensioni molto piccole rispetto a quanto già indagato precedentemente.

La presenza di questo forte vincolo geometrico negli esperimenti, ha cambiato radicalmente l'evoluzione del getto all'interno del flusso trasverso ma soprattutto in termini di mescolamento.

Prima di tutto è stata fatta una visualizzazione del getto, ottenuta tramite la tecnica ottica Schlieren. Le foto acquisite durante questi esperimenti, sono state rielaborate tramite un programma automatico, il quale dopo averle pulite dal rumore di fondo, ha identificato il getto. Una volta identificato, il programma lo ha classificato secondo una tipologia evolutiva precedentemente formulata, ed ogni caso è stato poi suddiviso in funzione del rapporto tra i flussi di quantità di moto e del numero di Reynolds. A causa della mancanza di esperimenti al variare del numero di Reynolds data da vincoli sperimentali, non è stato possibile delineare un andamento della tipologia evolutiva del getto al variare di questo parametro. Sempre durante questa classificazione non è stato possibile verificare la distinzione tra la tipologia III (getto che entra in contatto con la parete opposta a quella d'iniezione) e V (getto che entra in contatto con la parete posta sul lato d'iniezione e la sua opposta), a causa dell'eccessiva impurità del materiale delle pareti del condotto che hanno introdotto un eccessivo rumore di fondo in prossimità della parete posta dal lato dell'iniezione. Tale problema ha anche avuto delle ripercussioni sulle tipologie IV (getto che entra in contatto con la parete posta sul lato d'iniezione) e VI (getto che non entra in contatto con le pareti del condotto). Dopo questa classificazione, per le tipologie III e V sono state ricavate le distanze tra il primo contatto del getto con la parete opposta a quella d'iniezione, ed è stato possibile metterla in relazione con il valore del parametro  $R$ . Per la tipologia V è stato possibile valutare anche la distanza tra il primo punto di contatto con la parete posta dal lato d'iniezione e quella opposta.

Da quest'analisi è stato possibile ricavare anche in questo caso una dipendenza da  $R$ .

Per tutte le tipologie evolutive del getto è stato valutata la deflessione del getto, chiaramente considerando tutti gli eventuali contatti con le pareti, considerando la linea centrale del getto ricavata come linea media del perimetro. I dati sperimentali così ottenuti sono stati poi messi a confronto con quanto già ottenuto in passato nelle medesime condizioni operative, mostrando delle buone somiglianze tra la due serie di dati.

Successivamente, le coordinate della linee centrali così ottenute sono state adimensionalizzate in funzione del diametro e del rapporto tra i flussi di quantità di moto, in modo tale da poter determinare la regressione a potenza della curva. Questa procedura è stata possibile solo per le tipologie III, IV, V e VI, dove è presente una regione di deflessione del getto senza che interagisca con le pareti del condotto.

I risultati ottenuti dalla regressione sono state poi suddivise in gruppi al variare del parametro  $R$ , in modo tale da mettere in evidenza eventuali differenze tra i risultati al variare di questo termine. Le curve appartenenti ad ogni gruppo sono state fatte collassare in un'unica curva caratteristica, di cui è stata valutata anche l'incertezza. Il risultato di questo tipo di analisi mostra come non ci siano grandi differenze tra le diverse curve al variare del rapporto dei flussi di quantità di moto. Di conseguenza è stata valutata un'unica curva definita a partire da tutti i dati sperimentali a disposizione.

Per quanto riguarda queste visualizzazioni, sono state condotte anche delle analisi riguardanti il sistema di vortici che si vengono a creare nella parte anteriore del getto e delle valutazioni rispetto al grado di mescolamento tra i due flussi.

Dopo aver visualizzato con la tecnica Schlieren l'evoluzione del getto all'interno della camera di prova, sono state effettuate delle misure con l'anemometro a filo caldo sulla sezione d'uscita del condotto. Tali misure hanno permesso di determinare le scale temporali e spaziali dei vortici intermedi associate al moto convettivo del fenomeno. Le scale spaziali determinate hanno mostrato una sostanziale somiglianza tra loro al variare della configurazione d'iniezione (cambiando l'angolo o il rapporto tra i flussi di quantità di moto). Oltre alla determinazione di queste scale, con l'anemometro a filo caldo è stato possibile valutare anche l'energia cinetica turbolenta sulla sezione d'uscita, la quale ha permesso di verificare il completo miscelamento o meno tra i due

flussi. Il risultato di quest'analisi ha mostrato che se il getto è maggiormente inclinato nella direzione di moto del flusso trasverso, le proprietà di miscelamento peggiorano, mostrando ancora parte dell'energia cinetica turbolenta del getto in corrispondenza delle sezione d'uscita. Al contrario iniettando il getto normalmente al flusso trasverso, sulla sezione d'uscita del condotto si ottiene in flusso maggiormente mescolato. Per quest'ultimo caso sono stati condotti diversi esperimenti, i cui risultati sono suddivisi in funzione della classificazione determinata durante l'analisi della visualizzazioni delle foto Schlieren. Il risultato di questo tipo d'indagine mostra come ci sia una tendenza a determinare dei vortici intermenti più piccoli per valori del parametro  $R$  più alti, e diminuendo questo valore si ottiene un incremento delle dimensioni. Tuttavia, anche se presente questa tendenza al variare tra i flussi di quantità di moto, l'escursione rimane piccola portando ad avere valori molto prossimi tra loro.

Per quanto riguarda l'energia cinetica turbolenta, si nota una diminuzione facendo decrescere il valore di  $R$ . Questo risultato è coerente con quanto ci si aspetta dalla teoria in quanto per valori dei rapporti tra i flussi di quantità di moto piccoli, l'energia che viene introdotta dal getto nel flusso trasverso è piccola, e di conseguenza meno visibile in prossimità della sezione d'uscita.

Infine è stato visualizzato il campo di moto del flusso utilizzando la tecnica LDV. La visualizzazione del fenomeno è stata effettuata utilizzando due modalità di iniezione: una che prevede l'iniezione del flusso trasverso, ed una il getto. Per mettere in evidenza le differenze tra queste due modalità d'iniezione, sono stati effettuati due diversi esperimenti con differente valore di  $R$  ma ugual numero di Reynolds. I risultati di quest'analisi hanno mostrato come non ci siano sostanziali differenze del campo di moto a livello macroscopico, ma ci siano delle sostanziali differenze a livello microscopico. Tale differenza viene messa in luce dal livello di energia cinetica turbolenta visualizzata, che nel caso d'iniezione del getto risulta essere ben più percepibile che non iniettando il flusso trasverso.

Quanto presentato in questo lavoro di tesi quindi si può tradurre in una indagine del fenomeno di interazione tra un getto iniettato in un flusso trasverso, utilizzando sia tecniche qualitative, come la visualizzazione con la tecnica Schlieren, sia quantitative ossia le tecniche anemometriche a filo caldo e laser Doppler.

Per quanto riguarda l'analisi delle immagini, il programma elaborato necessita di migliorie nel campo sia dell'elaborazione delle immagini (pulizia e migliore definizione del getto) che nel riconoscimento del getto. Tutto questo per permettere anche un minore intervento da parte di un utente esterno per l'estrazione del dato finale, rendendo così la misura maggiormente automatica e meno sensibile a fattori umani (vista, stanchezza e sensibilità dell'utente). L'analisi effettuata non teneva in considerazione la variazione dei risultati al variare del numero di Reynolds, a causa dei limiti imposti dalla linea sperimentale. Tale dipendenza potrebbe essere molto importante e potrebbe mettere in evidenza comportamenti particolari del fenomeno, a cui quindi si rimanda per un possibile sviluppo futuro.

Per quanto riguarda le misure quantitative, risulta invece particolarmente interessante valutare il campo di moto dell'intero flusso, effettuando misure di velocità anche in prossimità della parete opposta a quella d'iniezione e per più diametri a valle dal punto d'iniezione. In questo modo sarà possibile mettere in evidenza eventuali comportamenti locali del getto e mostrare meglio come il fenomeno evolva all'interno del condotto.

Tutte e tre le tipologie di esperimenti hanno messo in evidenza le ottime proprietà di mescolamento del particolare tipo d'interazione tra i due flussi: la visualizzazione delle immagini Schlieren ha messo in evidenza tale proprietà con l'incapacità di visualizzare/riconoscere il getto a valle del punto d'iniezione. Questo perché le proprietà di mescolamento abbassano la concentrazione del livello del gas associato al getto, che nelle immagini si traduce in un minore livello d'intensità luminosa. Le altre due tecniche hanno confermato le ottime proprietà di mescolamento, dove già in corrispondenza di 5 diametri a valle del punto d'iniezione non è stato più possibile riconoscere il getto in maniera evidente. Oltre a questo è stato osservato che le proprietà di mescolamento peggiorano inclinando l'ugello d'iniezione lungo la direzione di moto del flusso trasverso. Sono assenti delle misure in cui l'ugello viene inclinato lungo la direzione opposta, che invece risulterebbero particolarmente interessanti per valutare come variano le proprietà di mescolamento tra i due flussi.







# Bibliografia

---

---

- [1] T.T. Lim and A.E. Perry R.M. Kelso, "An experimental study of round jets in cross-Flow," *J. Fluid. Mech.*, vol. 306, pp. 111-144, 1996.
- [2] N. Rajaratnam, *Developments in water science 5*. Amsterdam, Olanda: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [3] J.F. Keffer & W.D. Baines, "The Round Turbulent Jet in a Cross-Wind," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 15, pp. 481-496, 1963.
- [4] R.J Margason, "The Path of a Jet Directed at Large Angles to a Subsonic Free Stream," NASA, Washington D.C., TN D-4919, 1968.
- [5] Y.Kamotani and I. Greber, "Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow," *AIAA Journal*, vol. 10, no. 11, pp. 1425-1429, Novembre 1972.
- [6] B.R Morton, "On a Momentum-Mass Flux Diagram for Turbulent Jets, Plumes and Wakes.," *J. Fluid. Mech.*, vol. 10, pp. 101-112, 1961.
- [7] Kelso R.M. and Perry A.E. Lim T.T., "A study of a round jet in cross-flow at different velocity ratios," in *Proc. 11th Australian Fluid echanics Conf.*, Habart, Australia, 1992, pp. 1089-1092.
- [8] T.F. Fric and A. Roshko, "Vortical structure in the wake of a trasverse jet," *J. Fluid Mech.*, vol. 279, pp. 1-47, 1994.
- [9] P. Schlatter, P.J. Schmid and D.S. Henningson S. Bagheri, "Global stability of a jet in crossflow," *J. Fluid Mech.*, vol. 624, pp. 33-44, 2009.
- [10] J.W. Trischka and S. Eskinazi Z.M. Moussa, "The near field in the mixing of a round jet with a cross-stream," *J. Fluid Mech.*, vol. 80, pp. 49-80, 1977.
- [11] J. Andreopoulos, "On the structure of jets in crossflow," *J. Fluid Mech.*, vol. 157, pp. 163-197, 1985.
- [12] W.S. Lewellen and S.F. Parker R.I. Sykes, "On the vorticity dynamics of a turbulent jet in a crossflow," *J. Fluid Mech.*, vol. 80, pp. 49-80, 1986.
- [13] J. Andreopulos and W. Rodi, "Experimental investigation of jets in a crossflow," *J. Fluid. Mech.*, vol. 138, pp. 93-127, 1984.

- [14] P. Habisreuther and N. Zarzalis F.C.C. Galeazzo, "Large Eddy Simulations of a Jet in Crossflow," *High Performance Computing in Science*, vol. 10, pp. 327-337, 2011.
- [15] E. Rathakrishnan, *Instrumentation, Measurements, and Experiments in Fluids*. New York, U.S.A.: CRC Press, 2007.
- [16] A.S. Coghe, *Appunti del corso di laurea "Sperimentazione su propulsori"*. Milano, 2010.
- [17] Ernest O. Deoebelin, *Strumenti e metodi di misura*, Seconda ed., Michele Gasparetto Alfredo Cigada, Ed. Milano: McGraw-Hill, 2008.
- [18] R.E.Woods and Eddins R.C.Gonzalez, *Digital Image Processing Using MATLAB*, 2nd ed.: Gatesmark Publishing, 2009.
- [19] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, *Digital Image Processing*, 2nd ed. Upper Saddle River (N.J.): Prentice Hall, 2002.
- [20] G. Brunello e F. Calderini A. Coghe, "Analisi spettrale dell'energia turbolenta in un motore alternativo sperimentale trascinato," in *XXXVIII Congresso nazionale dell'associazione termotecnica italiana (ATI)*, Bari, 1983.
- [21] R. Jordinson, "Flow in a Jet Directed Normal to the Wind," Ministry of Supply, British Aeronautical Research Council, Londra, 1958 1958.

# Appendice A

---

In questa appendice vengono riportate le caratteristiche geometriche e di prova di esperimenti pregressi per poterle poi confrontare con i risultati ottenuti durante questo lavoro. Nella Figura A.1 sono indicate le dimensioni della camera di prova, i cui valori sono riportati nella Tabella A.1.

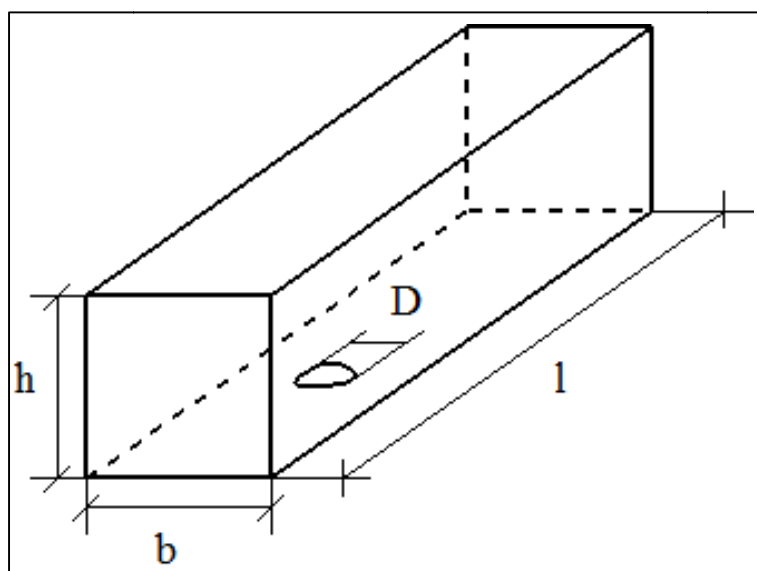


Figura A.1: Geometria delle camere di prova.

Tabella A.1: Tabella riassuntiva delle tecniche di prova e delle condizioni operative degli esperimenti pregressi.

Tabella riassuntiva delle tecniche di prova e delle condizioni operative degli esperimenti pregressi						
Autore	Geometria [m] b x h x l	D [mm]	Metodo sperimentale	Informazioni aggiuntive	R	Re
Jordison [21]	0.30 x 1.52	12.7 25.4	Misura di pressione	Esperimenti con inclinazione del getto tra 60° e 120°	1.40, 4.76	-
Keffer & Baines [3]	1.22 x 2.44 x 10.98	9.5	Anemometria a filo caldo ad un filo	-	2.00, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00	-
Margason [4]	2.13 x 3.05	25.4	Misure di pressione  Visualizzazione del getto	Esperimento con aria come getto ed acqua come flusso trasverso; inclinazione del getto	1.17-10.00	-
Andreoulos & Rodi [13]	1.50 x 1.50 x 6.00	50.0	Anemometro a filo caldo a 3 fili	Camera di prova a sezione ottagonale	0.50, 1.00, 2.00	-
Kamotani & Greber [5]	0.71 x 0.71	6.4	Anemometro a filo caldo  Termocoppia	Getto riscaldato	4, 80	2800 - 4200
Kelso, Lim & Perry [1]	-	25.0	Visualizzazione con tracciante	Esperimento con acqua	2.00 - 6.00	440 - 6200
	1.20 x 0.90	95.5	Anemometro a filo caldo	Esperimento in aria		

# Appendice B

Tabella B. 1: Tabella riassuntiva delle condizioni analizzate.

Condizioni operative per i diversi esperimenti effettuati						
Metodo sperimentale	Geometria [m] b x h x l	D [mm]	Gas	R	Re	$\theta$ [deg]
Visualizzazione Schlieren	0.04 x 0.04 x 0.50	3.2,	CO <sub>2</sub>	1.00-	366.00-	90
Anemometria a filo caldo ad un filo		6.4		17.76	2200.00	
				0.00,	366.00-	45, 60,
Misure anemometriche con strumentazione LDV		6.4	Aria	1.97, 2.96, 4.93	740.00	90

Per le dimensioni si faccia riferimento alla Figura A.1.





# Appendice C

---

---

La portata volumetrica di un flussimetro cambia al variare delle condizioni operative (pressione e temperatura) e del tipo di gas utilizzato. Infatti un flussimetro viene tipicamente calibrato utilizzando un opportuno gas in determinate condizioni di prova; ogni eventuale variazione di questi parametri influisce sulla portata volumetrica letta.

Il valore di portata letta deve essere quindi corretto in funzione delle variazioni di densità, temperatura e pressione del fluido che si sta utilizzando, rispetto a quello di riferimento.

$$C_\rho = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \quad (\text{C.1})$$

$$C_T = \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (\text{C.2})$$

$$C_P = \sqrt{\frac{P}{P_0}} \quad (\text{C.3})$$

Le espressioni dalla C.1 alla C.3 rappresentano i coefficienti di correzione rispettivamente per variazioni di densità, temperatura e pressione. I termini il cui pedice è 0 rappresentano i valori di riferimento con cui è stato calibrato il flussimetro.

Il valore reale della portata  $\dot{V}_R$  è pari quindi al prodotto della portata letta sul flussimetro ( $\dot{V}$ ) per il coefficiente di correzione  $C_C$  (espressione (C.4)).

$$\dot{V}_R = \dot{V} \cdot C_C \quad (\text{C.4})$$

Dove  $C_C$  è pari al prodotto dei coefficienti mostrati nelle espressioni (C.1), (C.2) e (C.3).

$$C_C = C_\rho \cdot C_T \cdot C_P \quad (\text{C.4})$$

Durante gli esperimenti sono stati utilizzati due differenti flussimetri per quanto riguarda il controllo del getto mentre uno solo per il flusso trasverso. Nelle tabelle che seguono sono mostrati i coefficienti di correzione delle portate volumetriche al variare del gas utilizzato con il corrispondente flussimetro.

**Tabella C. 1: Coefficiente di correzione delle portate volumetriche.**

Coefficients di correzione delle portate volumetriche							
	Condizioni operative			Condizioni di calibrazione			$C_c$
	Gas	T [K]	P [bar]	Gas	T [K]	P [bar]	
<b>Getto</b>	$CO_2$	288.15	1.25	Aria	293.15	1.01	0.6410
	$CO_2$	288.15	1.25	$CH_4$	293.15	1.02	0.4798
	$He/N$						0.7957
	Aria						0.5917
<b>Flusso trasverso</b>	Aria	288.15	1.5	Aria	293.15	1.01	0.6640

# Appendice D

---

---

In questa appendice vengono riportati alcuni risultati aggiuntivi relativi alle misure effettuate con il sistema LDV.

In Figura D. 1 ed in Figura D. 2 vengono presentati i risultati relativi al caso con  $R$  pari 2.96, in cui vengono messe a confronto i risultati ottenuti inseminando il flusso trasverso o il getto con le particelle traccianti. Le immagini mostrano lo stesso andamento visualizzato per il caso con  $R$  pari 1.97, discusso nel paragrafo 5.3.

In Figura D. 3 ed in Figura D. 4 vengono invece riportate le curve di livello relative alla presenza del getto all'interno del condotto per valori di  $R$  pari a 1.97 e 2.96. La valutazione della presenza viene valutata in termini di numero di particelle rilevate nell'arco di tempo di un minuto. Per il caso con  $R$  più basso, è possibile visualizzare interamente il perimetro del getto per le misure effettuate in prossimità del punto d'iniezione, mentre per distanze maggiori è possibile vedere come il getto si apra fino a non essere più riconoscibile interamente il suo perimetro. Per il caso con  $R$  più alto questo fenomeno è visibile fin da subito, a causa del maggiore grado di penetrazione e quindi la fuoriuscita del getto dal campo di misura.

In Figura D. 5 ed in Figura D. 6 sono stati raggruppate le misure relative alla vorticità del flusso associate sempre ai casi già citati in precedenza.

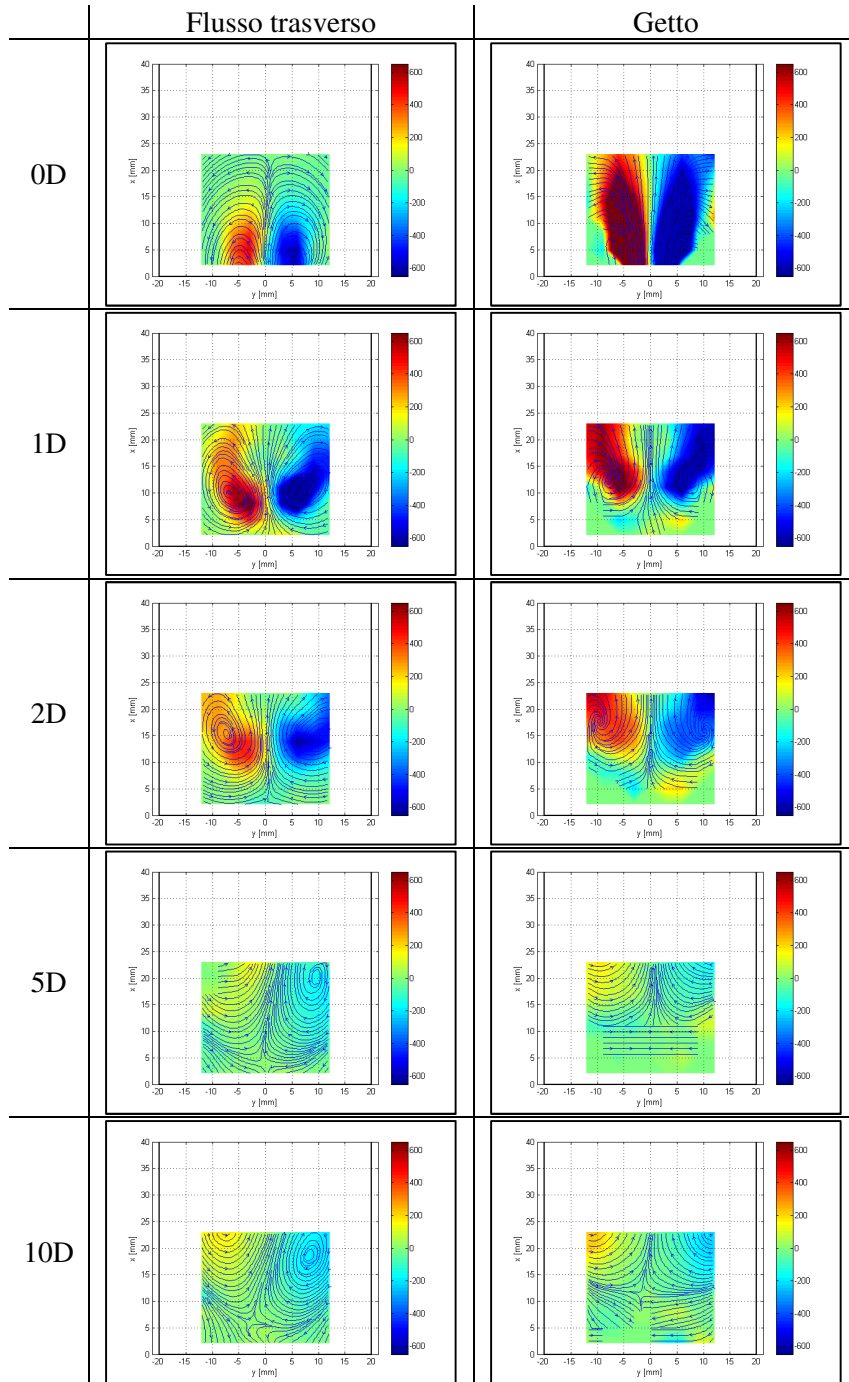


Figura D. 1: Misure effettuate utilizzando la configurazione I di misura ed inseminando differemente i flussi per R pari a 2.96. La mappa cromatica mostrata nelle figure rappresenta la vorticit , espressa in  $[s^{-1}]$ , mentre le linee sovrapposte rappresentano le linee di flusso. Entrambi questi termini sono stati definiti a partire dai vettori velocit  nel piano misurati.

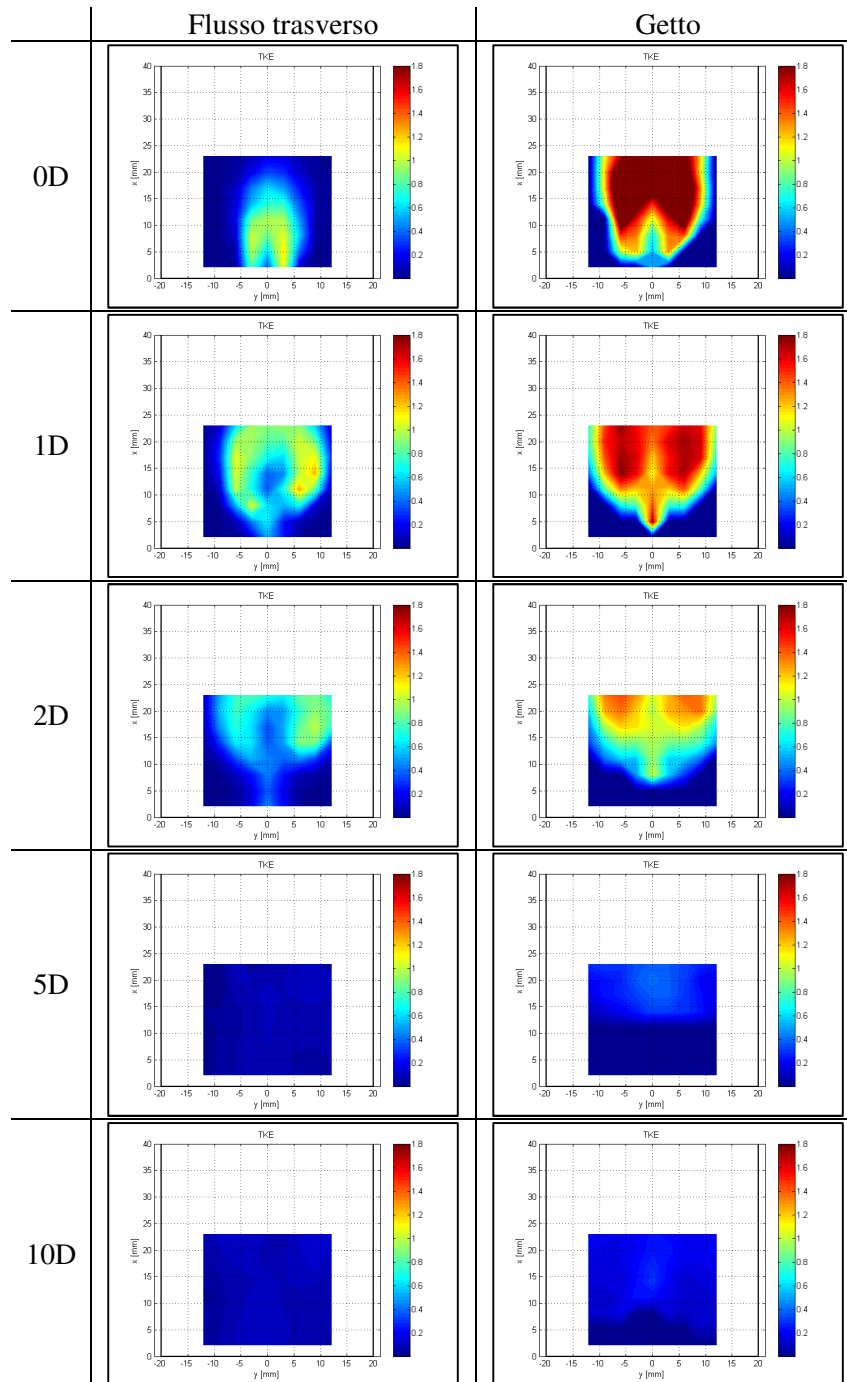
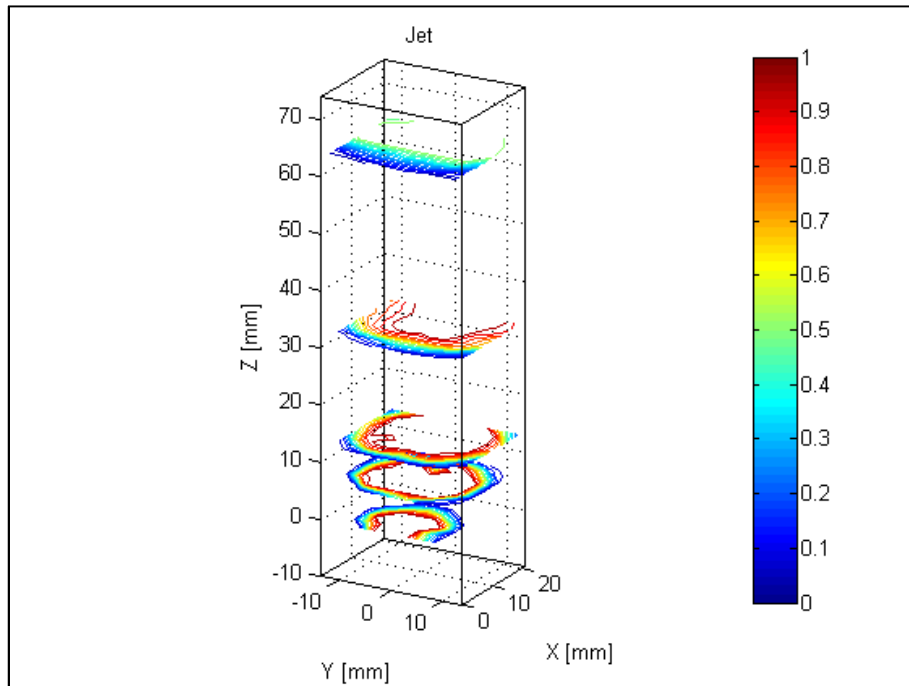
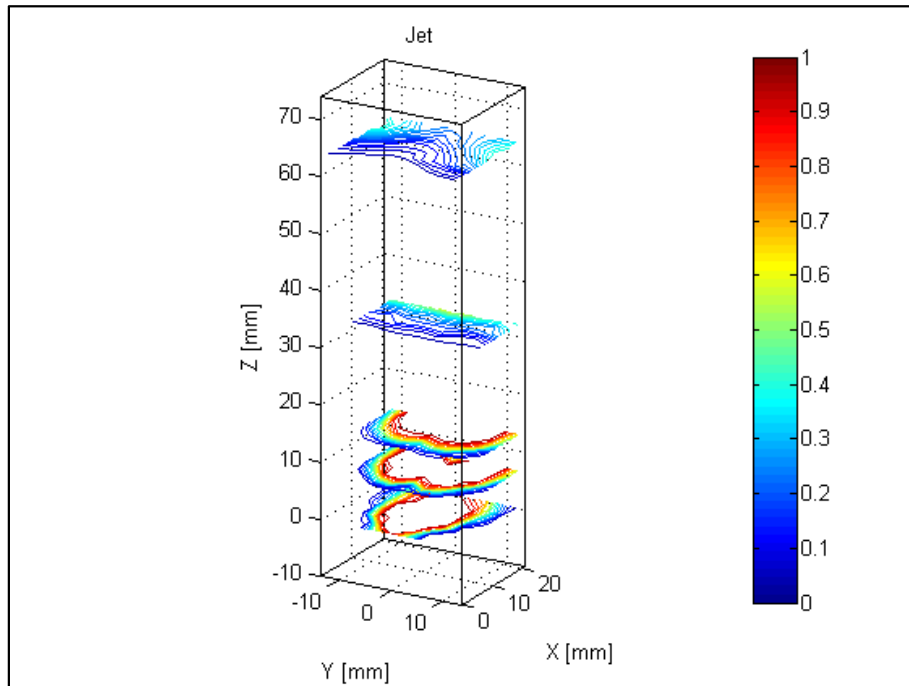


Figura D. 2: Misure effettuate utilizzando la configurazione I di misura ed insemiando differientemente i flussi per  $R$  pari a 2.96. La mappa cromatica mostra l'energia cinetica turbolenta normalizzata rispetto all'energia cinetica media del flusso convettivo.



**Figura D. 3:** Curve di livello mostranti la presenza del getto su una scala compresa tra 0 (assente) e 1 (presenza del solo getto), in piani paralleli al piano x-y per l'esperimento condotto con R pari a 1.96.



**Figura D. 4:** Curve di livello mostranti la presenza del getto su una scala compresa tra 0 (assente) e 1 (presenza del solo getto), in piani paralleli al piano x-y per l'esperimento condotto con R pari a 2.97.

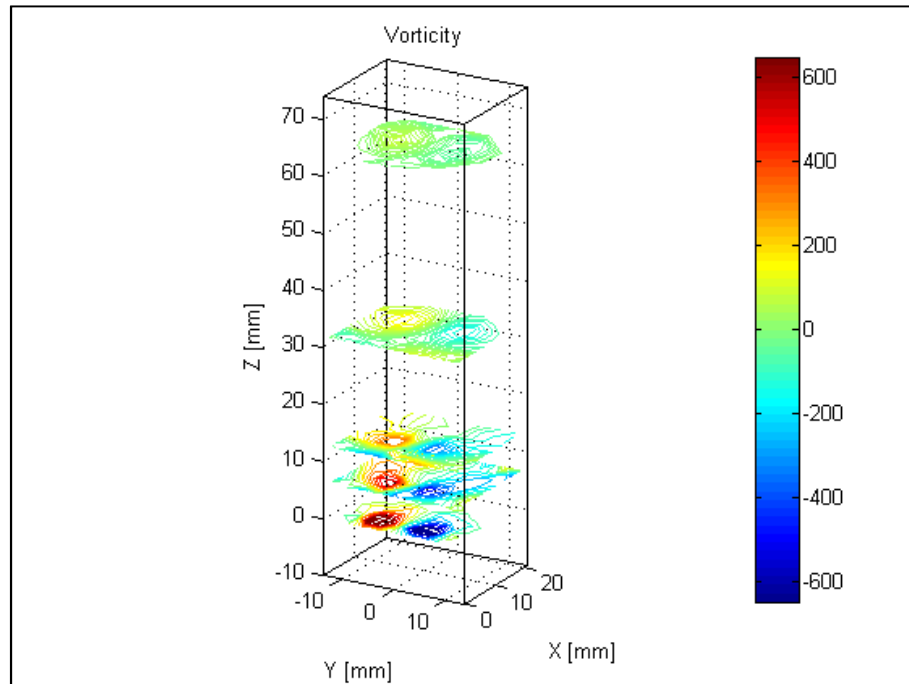


Figura D. 5: Curve di livello mostranti la vorticità del getto determinate insemiando il getto, in piani paralleli al piano x-y per l'esperimento condotto con R pari a 1.96.

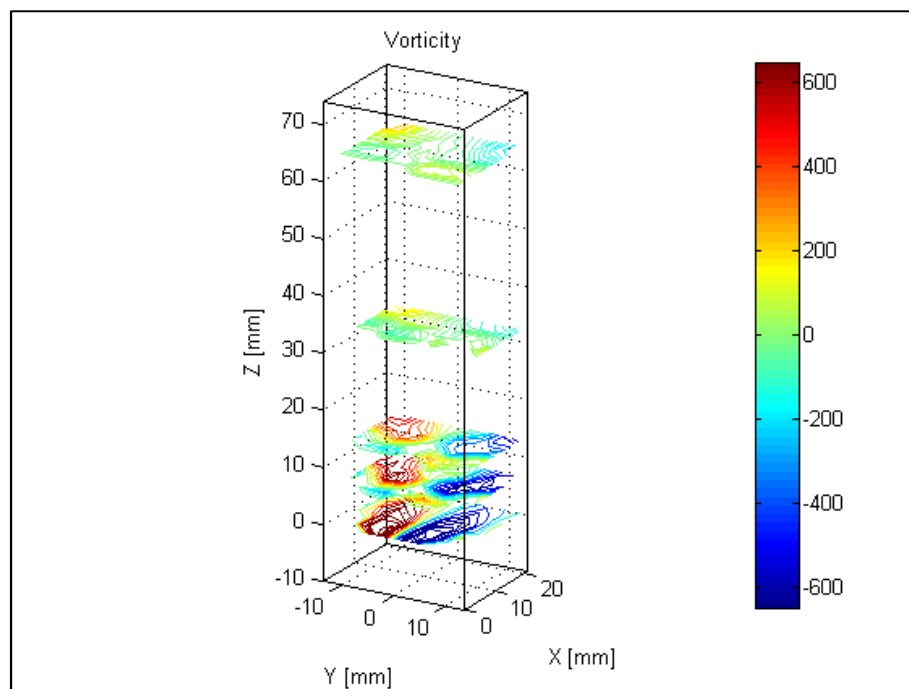


Figura D. 6: Curve di livello mostranti la vorticità del getto determinate insemiando il getto, in piani paralleli al piano x-y per l'esperimento condotto con R pari a 2.97.

In Figura D. 7 è possibile osservare l'andamento del vettore velocità giacente in piani paralleli al piano x-z del sistema di riferimento mostrato in Figura 2.2. Valutando la misura ottenuta in corrispondenza proprio di questo piano ( $y = 0$ ), quello che si denota è la presenza del getto nella parte sinistra dell'immagine, a partire proprio dal punto d'iniezione. Nella parte posteriore invece è possibile osservare una componente di velocità nettamente inferiore, mettendo in evidenza la regione di scia del getto. Man mano che ci si allontana da punto d'iniezione verso la parte laterale del getto ( $y > 0$ ) si osserva come la presenza del getto si sempre meno evidente, mentre è possibile osservare come la componente a valle cresca in valore assoluto. Tale comportamento è legato al fatto che in presenza del getto, a valle si creano tutti i vortici evidenziati nel paragrafo 2.4. Nella parte esterna invece il campo di moto è dominato dal flusso trasverso che è di poco influenzato dai vortici appena menzionati, mantenendo così la propria direzione, come mostrato nella Figura 5.11 dove sono rappresentate le linee di flusso.



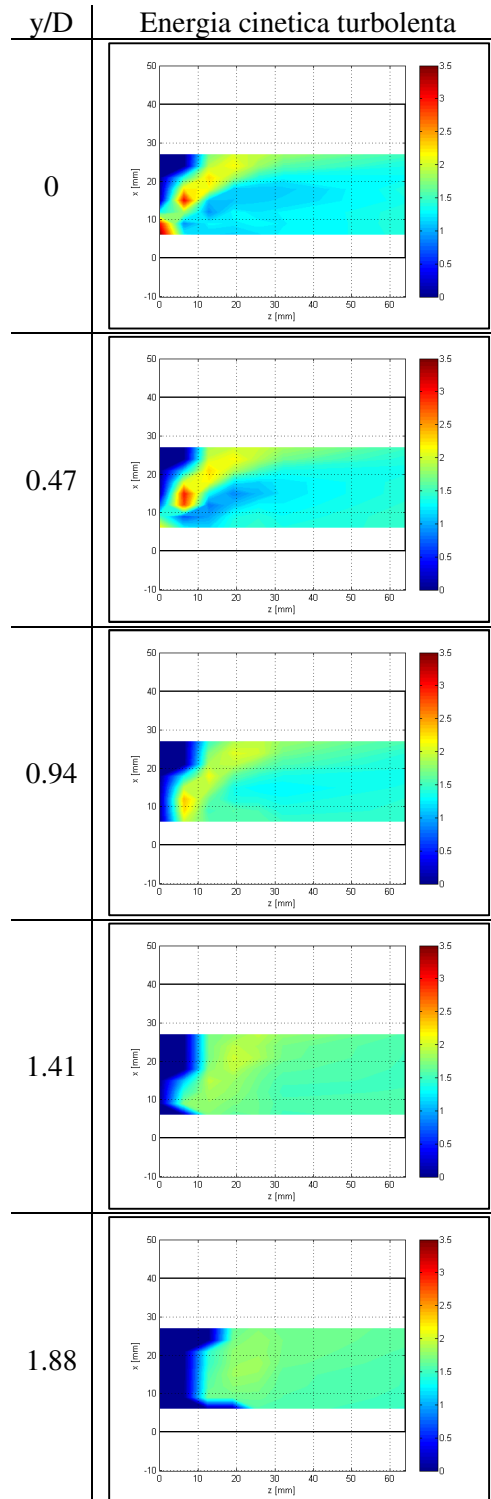


Figura D. 7: Misure effettuate utilizzando la configurazione II di misura ed insemiando il flusso trasverso per R pari a 1.97. La mappa cromatica rappresenta il modulo del vettore velocità nei piani paralleli al piano x-z del sistema di riferimento utilizzato. La scala utilizzata è data in m/s.



# Appendice E

---

---

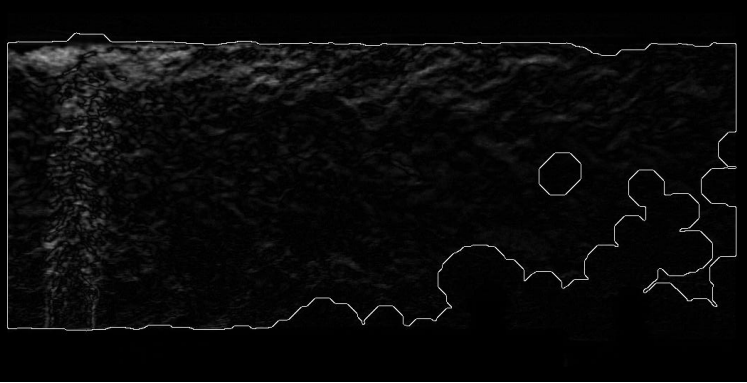
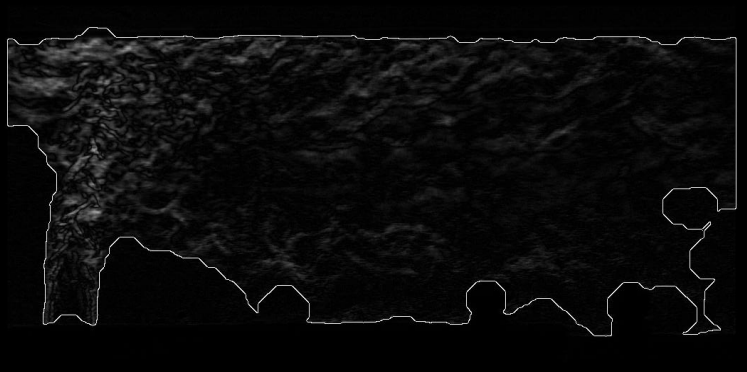
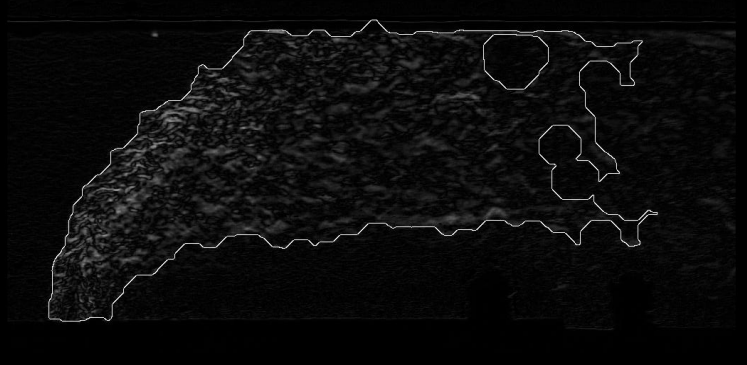
Tipologia	Esempio
I	
II	
III	

Figura E. 1: Visualizzazione dell'immagine elaborata per le tipologie I, II, III dell'evoluzione del getto all'interno del condotto.

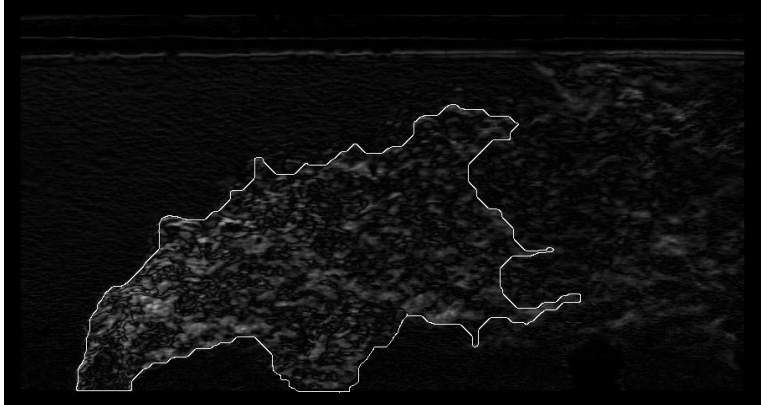
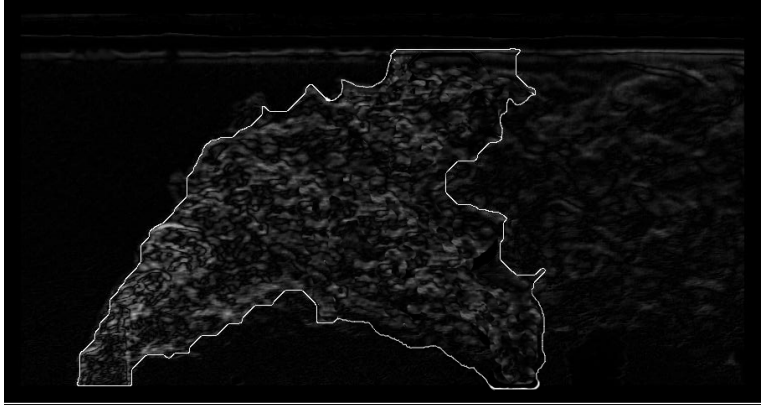
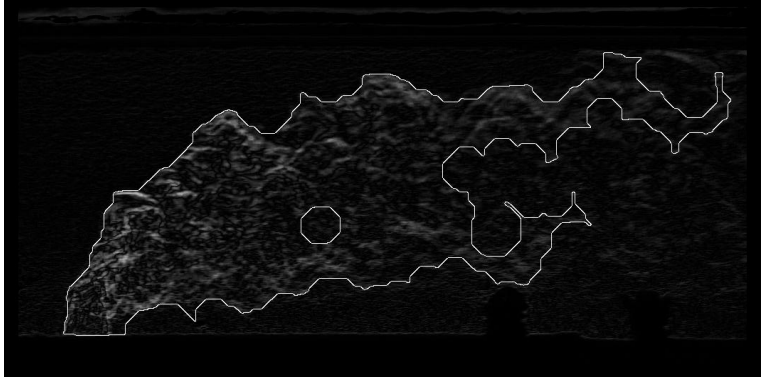
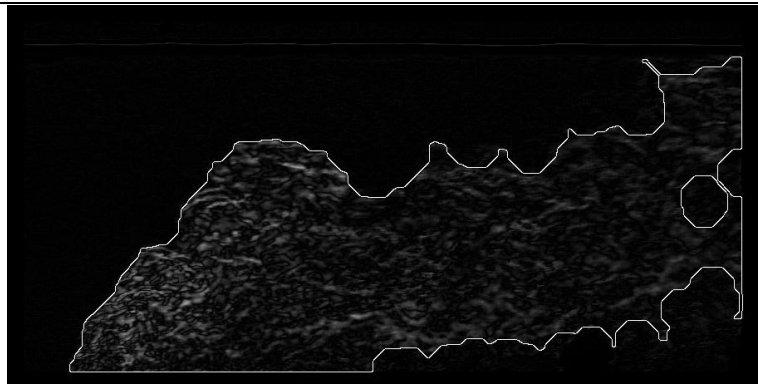
Tipologia	Esempio
IV	
V	
VI	

Figura E. 2: Visualizzazione dell'immagine elaborata per le tipologie IV, V, VI dell'evoluzione del getto all'interno del condotto.

Tipologia	Esempio
VII	

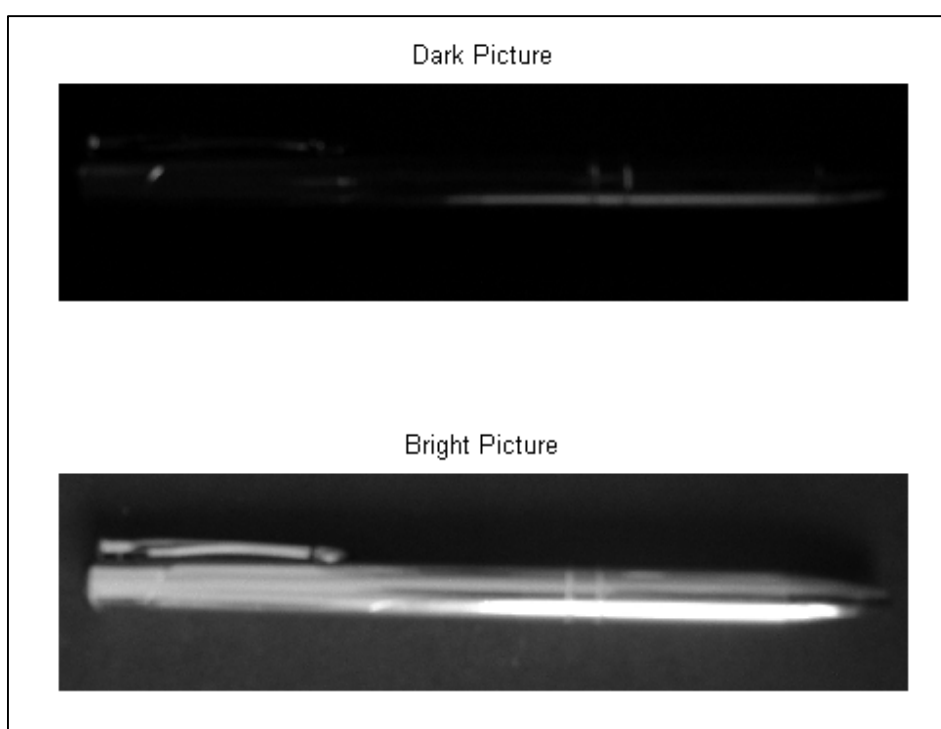
**Figura E. 3** Visualizzazione dell'immagine elaborata per la tipologia VII dell'evoluzione del getto all'interno del condotto.



# Appendice F

---

In questa appendice viene riportata un esempio relativo alla variazione di luminosità dell'intera immagine, con relativo cambiamento della definizione del soggetto visibile.



**Figura F. 1:** Foto in scala di grigi rappresentanti la medesima penna; le due foto sono state scattate con differenti livelli di luminosità dell'ambiente circostante.

In figura vengono riportate due foto in bianco e nero che ritraggono la medesima penna. Le modalità con cui sono state scattate le due foto risultano essere completamente differenti: per la prima in alto infatti, la luminosità dell'ambiente circostante è molto inferiore rispetto alla seconda immagine. Il risultato qui mostrato mette in evidenza che in presenza di una minore luminosità, il contorno e parte dell'oggetto sono meno visibili rispetto a quella con una migliore illuminazione. Lo stesso fenomeno si ripresenta durante l'acquisizione delle foto

Schlieren: i transitori di accensione della lampada stroboscopica non permettono un perfetto sincronismo con l'apparato fotografico comportando quindi una variazione di luminosità tra le immagini.

In Figura F. 2 vengono mostrati gli istogrammi relativi alle foto visualizzate in precedenza: per quanto riguarda l'immagine scura è possibile osservare una maggiore concentrazione della componente luminosa a bassa intensità, mentre per quanto riguarda l'immagine più luminosa si osserva una distribuzione dei pixel luminosi in un *range* compreso tra 10 e 70.

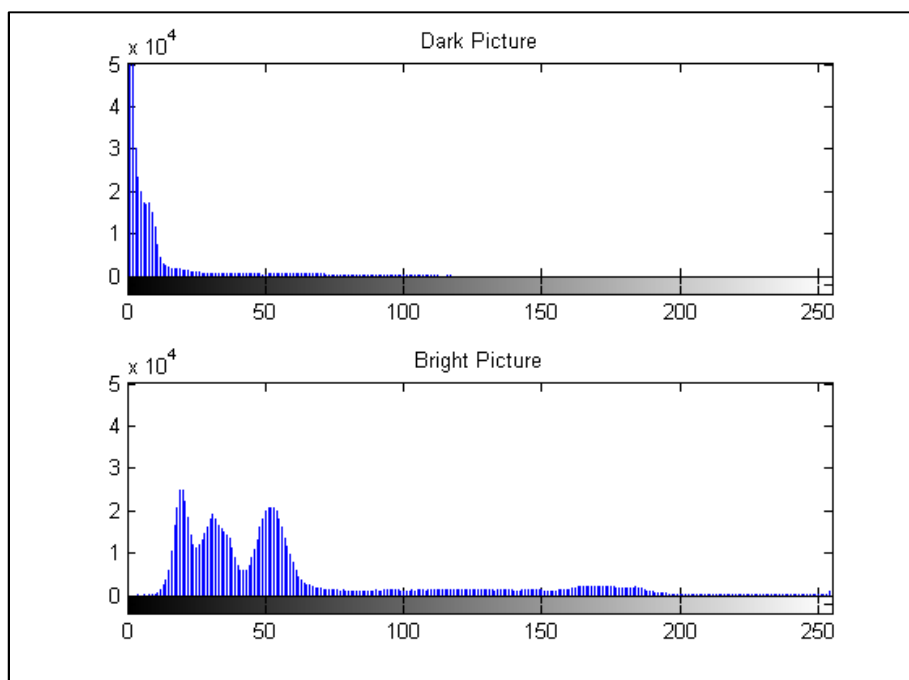


Figura F. 2: Istogramma delle foto mostrate in Figura F. 1.

Non essendo presente una forte componente rumorosa nelle due immagini, le uniche componenti luminose sono quelle date dalla luce riflessa dalla penna.

In Tabella F. 1 vengono riportati i valori dell'area associata alla penna (in pixel) ottenuta con il medesimo livello di *thresholding*, e la media della luminosità dell'immagine di partenza: osservando i dati così ottenuti è possibile riscontrare un'area visibile più ampia per l'immagine con media luminosa più alta. Viceversa viene visualizzata un'area più piccola in corrispondenza della luminosità media più bassa.



**Tabella F. 1: Area visibile con un livello di *thresholding* pari a 50 e media luminosa per le foto mostrate in Figura F. 1**

	Area [pixels]	Media luminosa
<b>Dark Picture</b>	10895	3.4191
<b>Bright Picture</b>	303473	63.3835

Essendo questo semplice esempio costituito solo da due foto, effettuare la regressione dei dati non avrebbe nessun senso, dato che per due punti verrebbe interpolata una retta con valore dell'indice  $R^2$  unitario. Per questo motivo, in questo caso il valore di sogliatura viene imposto pari a 50, dove in entrambi i casi è possibile osservare completamente o in parte il soggetto delle foto. Con questo valore di *thresholding* è stata valutata l'area media associata alla penna con la quale verrà poi definita la pulizia dell'immagine. In tab è possibile osservare i valori relativi all'area di riferimento ed i valori delle aree visualizzate nelle immagini di partenza (Figura F. 1) in seguito all'applicazione del livello di sogliatura.

**Tabella F. 2: Area media di riferimento e superfici visibili nelle due immagini mostrate in Figura F. 1 dopo il processo di sogliatura.**

	Area [pixels]
<b>Area media</b>	157184
<b>Dark Picture</b>	156263
<b>Bright Picture</b>	147366

Applicando quindi il livello di *thresholding* che garantisca la visualizzazione dell'area determinata in precedenza, seguita da tutte le operazioni mostrate nel diagramma di flusso mostrato in Figura 4.13 è possibile visualizzare l'intero corpo delle due penne (Figura F. 3) di cui successivamente è possibile valutarne il contorno.



**Figura F. 3:** Area evidenziata alla fine del processo di elaborazione dell'immagine per la penna presente nelle due foto a differente luminosità mostrate in Figura F. 1.

# Lista dei Simboli

Simboli Latini		
$A$	-	Coefficiente del modello empirico di deflessione
$a$	$[m^3]$	Superficie
$c$	$[m/s]$	Velocità della luce
$D$	$[m]$	Diametro dell'ugello
$d$	$[m]$	Diametro del filo caldo
$E$	-	Coefficiente di Entrainment
$E_n$	$[J/Hz]$	Energia per unità di frequenza
$f$	$[Hz]$	Frequenza
$H$	$[m]$	Penetrazione del getto
$HI$	-	Istogramma dell'immagine
$h$	$[W/Km^2]$	Coefficiente di scambio termico convettivo
$I$	-	Intensità luminosa
$I_{11}$	-	Integrale istogramma immagine con <i>thresholding</i> pari a 11
$Is$	-	Integrale istogramma immagine
$K$	$[m^3/kg]$	Costane di Gladstone-Dale
$k$	$[W/Km]$	Coefficiente di scambio termico conduttivo
$L$	$[m]$	Larghezza della camera di prova
$m$	-	Esponente del primo modello empirico di deflessione
$m1, m2$	-	Esponenti del secondo modello empirico di deflessione
$N$	$[n. particelle/m^3]$	Concentrazione di particelle
$n$	-	Indice di rifrazione della luce
$\dot{n}$	$[n. particelle/s]$	Numero di particelle al secondo
$Pr$	-	Numero di Prandtl
$r$	$[m]$	Raggio dell'area equivalente
$R$	-	Radice quadrata del rapporto tra le quantità di moto
$\hat{R}$	$[\Omega]$	Resistenza elettrica
$r$	$[m]$	Distanza
$R^2$	-	Indice di determinazione lineare
$Re$	-	Numero di Reynolds
$R_E$	-	Coefficiente di autocorrelazione
$s$	-	Fattore di forma della sezione normale del

LISTA DEI SIMBOLI

---

		getto lungo il suo asse naturale
$St$	-	Numero di Sthroual
$Sto$	-	Numero di Stokes
$T$	[K]	Temperatura
$T_E$	[s]	Scala temporale turbolenta
$t$	-	Livello di soglia della luminosità per i pixel
$U$	[m/s]	Velocità assoluta
$\bar{U}$	[m/s]	Velocità media
$u$	[m/s]	Fluttuazione delle velocità attorno al valore medio
$V$	[V]	Tensione assoluta
$\bar{V}$	[V]	Tensione media
$v$	[V]	Fluttuazione della tensione attorno al valore medio
$w$	[m <sup>-1</sup> ]	Raggio di curvatura
$x$	-	Coordinata verticale cartesiana
$y$	-	Coordinata laterale cartesiana
$z$	-	Coordinata di profondità cartesiana

**Simboli Greci**

$\gamma$	-	Coefficiente di correzione gamma delle immagini
$\epsilon$	[°]	Angolo di deflessione della luce diffranta
$\eta$	-	Percentuale particelle utilizzabili per la misura LDV
$\lambda$	[m]	Lunghezza d'onda
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densità
$\tau$	[s]	Tempo di rilassamento
$\mu$	[kg/ms]	Viscosità dinamica
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	Viscosità cinematica
$\omega$	[rad/s]	Pulsazione

**Pedici**

$e$		Laser emesso
$f$	-	Fluido
$h$	-	Istogramma delle immagini
$i$	-	Perimetro del getto lungo il suo sviluppo
$j$	-	Getto
$cf$	-	Flusso trasverso
$p$	-	Particella tracciante
$s$	-	Sonda (Rilevatore)
$x$	-	Componente lungo la direzione verticale
$y$	-	Componente lungo la direzione laterale
$w$	-	Filo
$z$	-	Componente lungo la direzione relativa alla profondità

---

**Abbreviazioni**

<b><i>FFT</i></b>	-	Fast Fourier Trasform
<b><i>TKE</i></b>	-	Turbolent Kinetic Energy
<b><i>V/STOL</i></b>	-	Vertical/Short Take-off and Landing