

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Aeronautica



Misure di entrainment rate nella regione
iniziale di un getto swirlato in regime di
precessione del vortice

Relatore: Prof. Aldo Coghe

Co-relatore: Prof. Fabio Cozzi

Tesi di Laurea di:

Mariaelena Recalcati 750956

Anno Accademico
2011 - 2012

Alla Prof. Pusineri.

Indice

Sommario	13
Abstract	15
1 Il fenomeno dell'iniezione	17
1.1 Getto stazionario in assenza di swirl	19
1.2 Getti instazionari: spray diesel	23
1.3 Flussi con swirl	24
1.3.1 Numero di swirl	24
1.3.2 Caratterizzazione dei flussi swirlati	26
2 Tecnica di misura	35
2.1 PIV: Particle Image Velocimetry	35
3 Apparato sperimentale	41
3.1 Apparato bruciatore	42
3.1.1 Iniezione dell'aria assiale e tangenziale	43
3.1.2 Piano della camera	44
3.2 Camera di combustione	44
3.3 Linea di alimentazione	46
3.4 Sistema di sincronizzazione	50
3.5 Sistema ottico	52
3.5.1 Laser	52
3.5.2 Telecamera	53
3.6 Sistema di acquisizione	54
3.7 Sistema di analisi dati	54
4 Prove sperimentali senza swirl	59
4.1 Prove sperimentali senza cappa	59
4.2 Prove sperimentali con cappa	63
5 Prove sperimentali con swirl: prima configurazione	67
5.1 Ottimizzazione	67
5.1.1 Prove sperimentali di ottimizzazione	69
5.2 Prove al variare del numero di swirl	76
5.2.1 Prove a $Re=30700$	77
5.2.2 Prove a $Re=24400$	81
5.3 Analisi di convergenza	81

6	Prove sperimentali con swirl: seconda configurazione	85
6.1	Prove a Re 30700	86
6.2	Prove a Re 24400	95
6.3	Risultati per distanze assiali fissate	103
6.4	Analisi di convergenza	105
6.5	Confronto fra le due configurazioni	107
6.6	Calcolo entrainment rate mediante velocità radiale	109
7	Precessing vortex core	115
7.1	Risultati a Reynolds 30700	117
7.2	Risultati a Reynolds 24400	124
8	Conclusioni	129
8.1	Sviluppi futuri	130
	Appendice	133
	Bibliografia	139
	Ringraziamenti	141

Elenco delle figure

1.1	Schema di un turboreattore aeronautico	17
1.2	Modello di un premiscelatore LPP	18
1.3	Entrainment per diversi fluidi: • aria in aria; + CO_2 in aria; o idrogeno in aria	20
1.4	Andamento teorico entrainment in presenza di buoyancy	21
1.5	Variazione entrainment con la distanza assiale	22
1.6	Andamento entrainment vicino efflusso	22
1.7	Mappa dell'entrainment in funzione della distanza assiale per un tempo fissato	23
1.8	Sistema di riferimento	25
1.9	Vortici di Kelvin-Helmoltz	27
1.10	Profilo di velocità assiale e tangenziale per swirl bassi	27
1.11	Approssimazione vortice di Rankine	28
1.12	Fenomeno di vortex breakdown	29
1.13	Profilo di velocità assiale e tangenziale	30
1.14	Zone di ricircolazione	30
1.15	Decadimento di velocità assiale e tangenziale	30
1.16	Conformazione a spirale del vortice	31
1.17	Andamento entrainment all'aumentare del numero di swirl	31
1.18	Andamento entrainment rate con il numero di Reynolds	32
1.19	Esempio di contenuto in frequenza	32
1.20	Conformazione a spirale avvitata	33
1.21	Profilo di velocità tangenziale in presenza di PVC	33
1.22	Distribuzione di velocità assiale in presenza di PVC	34
2.1	Disposizione strumentazione per una misurazione PIV	36
2.2	Spostamento di una particella tra due frame	36
2.3	Aree di interrogazione	37
2.4	Mappa di cross-correlazione	38
2.5	Picco di auto-correlazione	38
3.1	Laboratorio sperimentale	41
3.2	Schema generale del bruciatore e vista esterna	42
3.3	ugello aggiuntivo	42
3.4	Dimensioni piattello	43
3.5	Piastra per l'ingresso dell'aria tangenziale	43
3.6	Piano della camera di combustione	44
3.7	Camera di combustione	45
3.8	Cappa	45

3.9	Seconda camera di combustione in plexiglass	46
3.10	Linea di alimentazione	46
3.11	Schema linea alimentazione per l'aria compressa	47
3.12	Regolatori di portata assiale, tangenziale e per l'inseminazione	47
3.13	Regolatore di portata Bronkhorst	48
3.14	Sistema per nebulizzare ad aria compressa	49
3.15	Schema di funzionamento del nebulizzatore	49
3.16	Microfono	50
3.17	Filtro	50
3.18	Oscilloscopio	51
3.19	Insieme di filtro (basso), generatore TTL (centro) e oscilloscopio (alto)	51
3.20	Laser Quanta System	52
3.21	Telecamera	53
3.22	Confronto andamenti di velocità assiale 32x32 pixel-16x16 pixel.	55
4.1	Andamento di velocità assiale	60
4.2	Entrainment rate	61
4.3	Mappa vettoriale flusso in camera senza cappa	61
4.4	Lavoro di Park and Shin	62
4.5	Andamento di velocità assiale con cappa	63
4.6	Entrainment rate con cappa	64
4.7	Mappa vettoriale del flusso nella camera con cappa	64
5.1	Mappa vettoriale prima prova di ottimizzazione	70
5.2	Andamento velocità assiale prima prova di ottimizzazione	70
5.3	Mappa vettoriale seconda prova di ottimizzazione	71
5.4	Andamento velocità assiale seconda prova di ottimizzazione	71
5.5	Mappa vettoriale terza prova di ottimizzazione	72
5.6	Andamento velocità assiale terza prova di ottimizzazione	72
5.7	Mappa vettoriale quarta prova di ottimizzazione	73
5.8	Andamento velocità assiale quarta prova di ottimizzazione	73
5.9	Mappa vettoriale quinta prova di ottimizzazione	74
5.10	Andamento velocità assiale quinta prova di ottimizzazione	74
5.11	Esempio di immagine acquisita per la quinta prova di ottimizzazione . .	75
5.12	Risultati per l'ottimizzazione finale	75
5.13	Risultati prova 1 Re 30700	78
5.14	Risultati prova 5 Re 30700	78
5.15	Risultati prova 6 Re 30700	78
5.16	Risultati prova 7 Re 30700	79
5.17	Risultati prova 8 Re 30700	79
5.18	Andamento entrainment rate per tutte le prove a Re 30700	80
5.19	Errore percentuale per Re 30700	82
5.20	Errore percentuale per Re 24400	83
6.1	Mappa vettoriale di velocità prova 1	87
6.2	Risultati prova 1 Re 30700, nuova camera	87
6.3	Risultati prova 2 Re 30700, nuova camera	88
6.4	Risultati prova 4 Re 30700, nuova camera	88
6.5	Risultati prova 4 Re 30700, nuova camera	88

6.6	Mappa vettoriale di velocità prova 5	89
6.7	Risultati prova 5 Re 30700, nuova camera	89
6.8	Risultati prova 6 Re 30700, nuova camera	89
6.9	Mappa vettoriale di velocità prova 7	90
6.10	Risultati prova 7 Re 30700, nuova camera	90
6.11	Risultati prova 8 Re 30700, nuova camera	90
6.12	Mappa vettoriale di velocità prova 9	91
6.13	Risultati prova 9 Re 30700, nuova camera	91
6.14	Andamento entrainment rate per tutte le prove a Re 30700, nuova camera	92
6.15	Posizione superiore punto di ristagno della bolla di ricircolazione	93
6.16	Mappa vettoriale di velocità prova 1	96
6.17	Risultati prova 1 Re 24400, nuova camera	96
6.18	Risultati prova 2 Re 24400, nuova camera	97
6.19	Risultati prova 4 Re 24400, nuova camera	97
6.20	Risultati prova 4 Re 24400, nuova camera	97
6.21	Mappa vettoriale di velocità prova 5	98
6.22	Risultati prova 5 Re 24400, nuova camera	98
6.23	Mappa vettoriale di velocità prova 6	99
6.24	Risultati prova 6 Re 24400, nuova camera	99
6.25	Mappa vettoriale di velocità prova 7	100
6.26	Risultati prova 7 Re 24400, nuova camera	100
6.27	Mappa vettoriale di velocità prova 8	101
6.28	Risultati prova 8 Re 24400, nuova camera	101
6.29	Andamento entrainment rate per tutte le prove a Re 24400, nuova camera	102
6.30	Entrainment rate per X/D fissato	104
6.31	Entrainment rate per X/D fissato	104
6.32	Andamento entrainment rate per X/D fissati, Parck e Shin	105
6.33	Errore percentuale per Re 30700	106
6.34	Errore percentuale per Re 24400	107
6.35	Effetto di confinamento a Re 30700, prima configurazione	108
6.36	Effetto di confinamento a Re 30700, seconda configurazione	109
6.37	Schema per il calcolo di entrainment rate tramite velocità radiale	110
6.38	Risultati a Re=30700.	111
6.39	Risultati a Re=24400.	112
6.40	Entrainment rate per X/D fissato	114
6.41	Entrainment rate per X/D fissato	114
7.1	Posizione del microfono iniziale e posizione sfasata di 180°	116
7.2	Risultati a Re=30700, fase 0°	117
7.3	Mappa di velocità assiale Reynolds 30700 fase 0°	118
7.4	Risultati a Re=30700, fase 45°	118
7.5	Mappa di velocità assiale Reynolds 30700 fase 45°	119
7.6	Risultati a Re=30700, fase 90°	119
7.7	Mappa di velocità assiale Reynolds 30700 fase 90°	120
7.8	Risultati a Re=30700, fase 135°	120
7.9	Mappa di velocità assiale Reynolds 30700 fase 135°	121
7.10	Risultati a Re=30700, fase 180°	121
7.11	Mappa di velocità assiale Reynolds 30700 fase 180°	122

7.12	Variazione posizione PVC con la posizione del microfono	122
7.13	Confronto risultato medio prove in fase-risultato prova non condizionata a Re 30700 e swirl pari a 1.47.	123
7.14	Risultati a Re=30700, fase 0°.	124
7.15	Mappa di velocità assiale Reynolds 24400 fase 0°.	125
7.16	Risultati a Re=30700, fase 180°.	125
7.17	Mappa di velocità assiale Reynolds 24400 fase 180°.	126
1	Risultati prova 2 Re 30700	133
2	Risultati prova 3 Re 30700	133
3	Risultati prova 4 Re 30700	134
4	Risultati prova 9 Re 30700	134
5	Risultati prova 1 Re 24400	135
6	Risultati prova 2 Re 24400	135
7	Risultati prova 3 Re 24400	136
8	Risultati prova 4 Re 24400	136
9	Risultati prova 5 Re 24400	136
10	Risultati prova 6 Re 24400	137
11	Risultati prova 7 Re 24400	137
12	Risultati prova 8 Re 24400	137
13	Andamento entrainment rate per tutte le prove a Re 24400	138

Elenco delle tabelle

3.1	Caratteristiche misuratori e regolatori portata	48
4.1	Confronto portate	65
5.1	Portata totale a Re 30700	69
5.2	Parametri di ottimizzazione	76
5.3	Variazione di portata assiale e tangenziale a Re 30700	77
5.4	Variazione di portata assiale e tangenziale a Re 30700	81
5.5	Errori percentuali per Re 30700	83
5.6	Errori percentuali per Re 24400	83
6.1	Variazione di portata assiale e tangenziale a Re 30700	86
6.2	Portate iniziali a Reynolds 30700	94
6.3	Variazione di portata assiale e tangenziale a Re 24400	95
6.4	Portate iniziali a Reynolds 24400	103
6.5	Errori percentuali per Re 30700	106
6.6	Errori percentuali per Re 24400	107
7.1	Frequenza PVC	115
7.2	Frequenza PVC	116

Sommario

Questo lavoro di tesi si propone di analizzare il fenomeno dell'entrainment in caso di iniezione di un getto swirlato in camera di combustione, considerando in particolare di simulare l'iniezione di una miscela aria/combustibile prevaporizzato, con l'iniezione di un getto di aria in aria a freddo, per identificare meglio alcuni aspetti di questo fenomeno nelle regioni vicine all'efflusso e in diverse situazioni operative. L'apparato sperimentale è stato fornito dal Laboratorio di Combustione e Diagnostiche ottiche del Dipartimento di Energia.

Per caratterizzare l'entrainment rate dell'aria esterna si è deciso di acquisire i dati relativi al campo di moto tramite la tecnica di misura ottica PIV (Particle Image Velocimetry): in questo modo è stato possibile ottenere mappe medie del campo di moto che sono state successivamente analizzate tramite metodi numerici per stimare l'incremento di portata in direzione assiale.

In primo luogo è stato testato l'apparato sperimentale e la procedura di analisi numerica tramite iniezione di un getto non swirlato per capire se si era in grado di riprodurre i classici risultati già presenti in letteratura.

Il corpo principale della tesi riguarda l'iniezione di un getto con diversi gradi di swirl, in modo tale da evidenziare l'insorgere del fenomeno del vortex-breakdown e di valutare gli effetti sull'entrainment. L'analisi è stata limitata solo alla regione del campo di moto vicina all'efflusso in quanto è quella più significativa per i getti swirlati e non era ancora mai stata studiata in maniera approfondita.

Questi esperimenti sono stati riprodotti con due configurazioni diverse: getto confinato all'interno di una camera di combustione e getto libero.

L'entrainment rate è risultato essere maggiore con i flussi swirlati, con un evidente aumento dopo il vortex-breakdown rispetto ai casi a swirl basso o nullo. Inoltre l'andamento dell'entrainment rate con la distanza assiale è risultato essere non lineare e fortemente influenzato dal grado di confinamento imposto al getto.

Infine sono stati svolti alcuni esperimenti tramite misure in fase con il fenomeno periodico del precessing vortex core (PVC), per poter studiare come esso agisce localmente sull'entrainment rate al variare della fase. La struttura del PVC è molto complessa e per questo motivo non esistono molti lavori di riferimento, soprattutto che descrivano la relazione tra questo fenomeno e l'entrainment rate.

Nelle prove qui riportate si è concluso che il PVC localmente può favorire o contrastare il processo di entrainment rate a seconda della fase della sua rotazione periodica e questo può diventare un risultato utile per comprendere il fenomeno del mescolamento del getto con l'aria ambiente per ottimizzare la geometria delle camere di combustione.

Abstract

This work proposes to analyze the entrainment phenomenon in case of swirling jet injection in a combustion chamber. In particular the injection of a fuel/air prevaporized mixture is reproduced through the injection of air into air, in order to identify different aspects of this phenomenon in the outflow regions and in different conditions. The experimental apparatus has been provided by the "Laboratorio di Combustione e Diagnostiche ottiche" of the "Dipartimento di Energia".

The optical measuring technique PIV (Particle Image Velocimetry) was used in order to acquire data about the flow field. In this way it was possible to obtain the average maps of the velocity field, that have been subsequently analyzed by numerical methods to estimate the increase of air flow with the axial direction.

Firstly the experimental apparatus and the procedure for numerical analysis were tested by the injection of a non-swirling jet, to see if they were able to reproduce the classical results already reported in the literature.

The principal argument of this work concerns the injection of a jet with different swirl degrees, in order to show the onset of the vortex-breakdown and to evaluate his effects on the entrainment. The analysis were limited to the region of the flow field near the outflow, that is the most significant region for swirling jets and it has not been examined closely yet.

These experiments were been reproduced with two different configurations: jet confined into a combustion chamber and free jet.

The entrainment rate is found to be greater in swirling flows, with an evident increase after the vortex-breakdown. Moreover, the entrainment rate behaviour with the axial distance is found to be non-linear and strongly influenced by the confinement imposed on the jet.

Finally, phase-locked measurements of flow fields with the periodic phenomenon of the precessing vortex core (PVC) were tested, in order to study how the PVC influences locally the entrainment rate in different phases. The PVC structure is very complex and for this reason there are not many references in previous works that focus on the relationship between this phenomenon and the entrainment rate.

The conclusion is that the PVC phenomenon locally can promote or oppose the entrainment rate process depending on the phase of his periodic motion. This result is useful to understand the mixing of gaseous jets with the ambient air and to optimize the geometry of combustion chamber.

Capitolo 1

Il fenomeno dell'iniezione

L'iniezione è il fenomeno attraverso cui viene alimentata la camera di combustione e rappresenta una fase di sempre maggiore importanza nel processo di combustione nei motori aeronautici.

L'iniezione interessa infatti la zona primaria della camera di combustione, dove si cerca di miscelare in modo stechiometrico i reagenti per ottenere una temperatura di fiamma il più elevata possibile e una combustione efficiente.

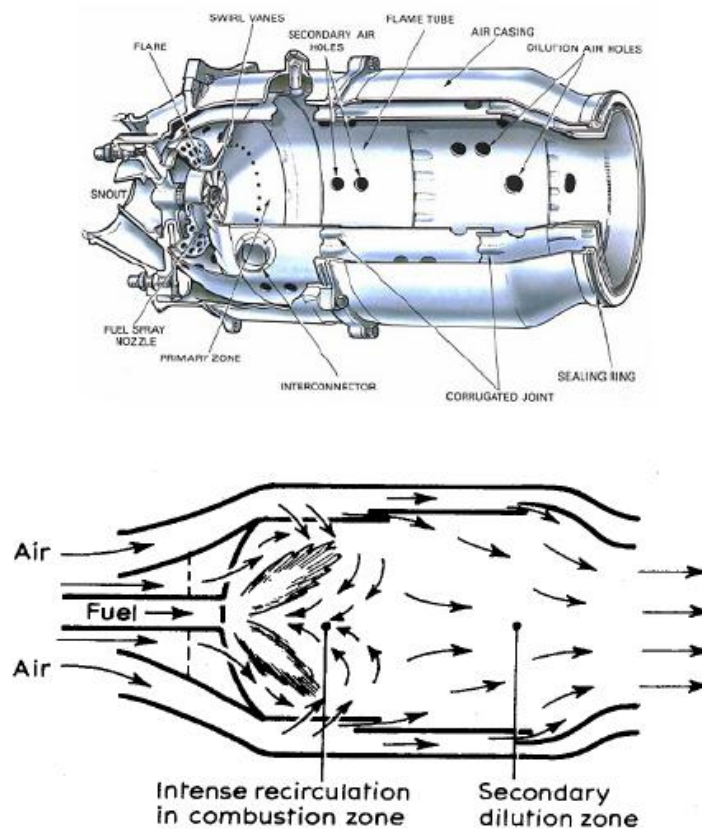


Figura 1.1: Schema di un turboreattore aeronautico

Il ruolo dell'iniezione non è semplicemente quello di introdurre il carburante in camera di combustione, ma soprattutto quello di agire in modo ottimale sul fenomeno dell' 'entrainment' dell'aria, ossia il fenomeno per cui l'aria presente in camera di combustione viene risucchiata all'interno del flusso quando quest'ultimo viene iniettato.

In tempi moderni le compagnie aeronautiche hanno fortemente appoggiato lo sviluppo degli iniettori con moto di swirl. Si prevede infatti un incremento del traffico aereo (si presume possa raddoppiarsi entro il 2020), che porterebbe ad un aumento dell'inquinamento se non si sviluppano tecniche che lo riducano, come può essere l'utilizzo di iniettori dotati di moto di swirl, in cui si migliora quindi la miscelazione e l'efficienza della combustione (Canepa, et al. [5])

I moderni iniettori aeronautici inoltre sono dotati di una tecnica di premiscelamento e prevaporizzazione: prima dell'ugello il combustibile liquido viene mescolato con aria in modo tale da formare una miscela ricca di combustibile e viene riscaldato tanto da farlo passare allo stato gassoso (Caruggi, et al. [16]). L'iniettore quindi permette di inserire una miscela già gassosa in camera di combustione, dove è presente altra aria per completare il processo. Purtroppo questi iniettori sono soggetti a fenomeni di instabilità nella combustione, di flash-back o autoignizione. Per eliminare o almeno ridurre questi svantaggi, negli iniettori prevaporizzati viene aggiunto un sistema di generazione di swirl. In particolare essi funzionano con elevato grado di swirl, che dovrebbe garantire il miglior miscelamento possibile e il raggiungimento veloce di una miscela stechiometrica (Canepa, et al. [5]).

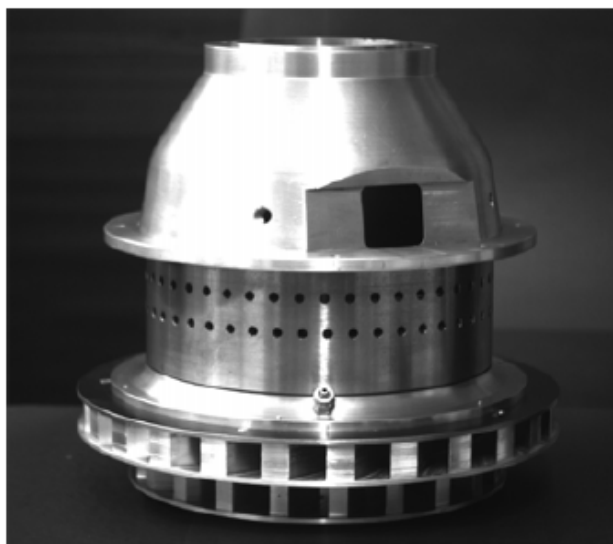


Figura 1.2: Modello di un premiscelatore LPP

Studiare, comprendere e quindi migliorare il fenomeno dell'iniezione è di fondamentale importanza nell'ottica di aumentare l'efficienza dell'intero ciclo di combustione, migliorare la miscelazione dei reagenti e la stabilità della fiamma, ridurre i consumi di carburante e ridurre l'emissione di gas di scarico inquinanti quali l'anidride carbonica (CO_2), il monossido di carbonio (CO), gli ossidi di zolfo (SO_x) e gli ossidi di azoto

(NOx) (Canepa, et al. [5]).

Nello studio del fenomeno dell'iniezione si pone particolare attenzione sull' 'entrainment' dell'aria, tramite svariati esperimenti più o meno evoluti tecnologicamente e a diverse condizioni operative di iniezione.

1.1 Getto stazionario in assenza di swirl

I primi studi relativi alla fase di iniezione di un gas in un ambiente confinato, come può essere quello di una camera di combustione aeronautica, trattavano getti privi di moto rotatorio, quindi getti privi di swirl e con ingresso di aria solo in direzione dell'asse dell'ugello (Ricou e Spalding [1]).

Getti che presentano queste caratteristiche di stazionarietà e simmetria sono più facilmente analizzabili.

L'esperimento base e di riferimento è quello svolto nel 1960 da Ricou e Spalding, che hanno misurato, con le 'scarse' tecnologie dell'epoca, l'entrainment, in un'iniezione axial-simmetrica e in condizioni stazionarie, di aria in aria e di altri gas, più pesanti e più leggeri dell'aria, in aria (Ricou e Spalding [1]), studiando in particolare un campo di moto lontano dalla sezione di efflusso, dove il profilo di velocità è divenuto autosimile. L'apparato dell'esperimento e di misura consisteva semplicemente in una camera cilindrica con pareti porose e un orificio attraverso cui iniettare il getto in direzione assiale. Ipotizzando quindi che vi sia flusso di massa in direzione radiale verso l'interno del getto e che questo fenomeno provochi un gradiente di pressione in direzione assiale, veniva introdotta nuova massa attraverso le pareti porose in modo da annullare il gradiente di pressione.

Questo sistema molto semplice risultava essere però meno affetto da incertezze rispetto a calcoli analitici derivanti dall'equazione:

$$m = \int 2\pi \bar{\rho} u y dy$$

Nel momento in cui il gradiente di pressione misurato risultava essere nullo, la quantità di aria immessa attraverso le pareti porose corrispondeva al flusso di massa in direzione radiale e quindi all'entrainment.

Le ipotesi alla base di questo esperimento erano:

- condizioni stazionarie;
- densità del fluido uniforme;
- numero di Reynolds elevato ($> 2.5 \cdot 10^4$);
- distanza assiale x dall'orificio molto maggiore rispetto al diametro dell'orificio d_0

Sulla base di queste ipotesi si è dimostrata essere valida la seguente relazione:

$$\frac{m}{xM^{\frac{1}{2}}\rho_1^{\frac{1}{2}}} = K_1$$

dove

$$M = \frac{1}{4}\pi d_0^2 \rho_0 u_0^2$$

Le densità ρ_0 e ρ_1 rappresentano rispettivamente la densità dei gas presente in camera e la densità del fluido iniettato, ovviamente uguali se si inietta aria in aria.

Da questo esperimento è stata ricavata inoltre la seguente relazione:

$$\frac{m}{m_0} = C \frac{x}{d_0}$$

dove m_0 , d_0 rappresentano rispettivamente la quantità di gas iniettato e il diametro dell'orefizio del gas iniettato. La costante C ha un valore numerico che varia a seconda della densità del gas iniettato in aria: vale 0.32 per aria in aria, 0.26 per CO_2 in aria e 1.2 per idrogeno in aria.

Utilizzando questo risultato è stato ricavato il valore della costante K_1 che mediata su diversi fluidi risulta essere pari a:

$$K_1 = 0.282$$

Riscrivendo la relazione precedente come:

$$\frac{m}{m_0} = 0.32 \frac{x}{d_0} \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

è possibile rappresentare i risultati per i diversi fluidi tramite una medesima retta di coefficiente angolare pari a 0.32, a patto di prendere in modo adatto l'ascissa, come mostrato in figura:

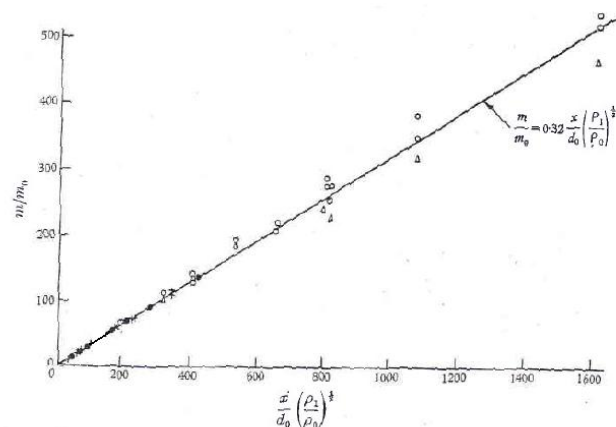


Figura 1.3: Entrainment per diversi fluidi: ● aria in aria; + CO_2 in aria; o idrogeno in aria

In questo esperimento era stato valutato l'effetto della 'buoyancy', ossia la variazione nei risultati quando la densità del fluido iniettato risultava essere diversa da quella dell'aria circostante per effetti termici.

Studi teorici avevano provato a tenere in considerazione l'effetto della buoyancy tramite il numero di Froude:

- in assenza di reazioni chimiche:

$$F = \frac{c_1 T_1}{h_0 - h_1} \frac{u_0^2}{g d_0} \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

- in presenza di reazioni chimiche:

$$F = \frac{c_1 T_1}{m_{fu} H + c_0 (T_0 - T_1)} \frac{u_0^2}{g d_0} \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

dove c indica il calore specifico del gas a pressione costante, T la temperatura assoluta dell'aria, h l'entalpia, g l'accelerazione di gravità, m_{fu} la frazione di massa di combustibile nel gas iniettato e H il potere calorifico del combustibile.

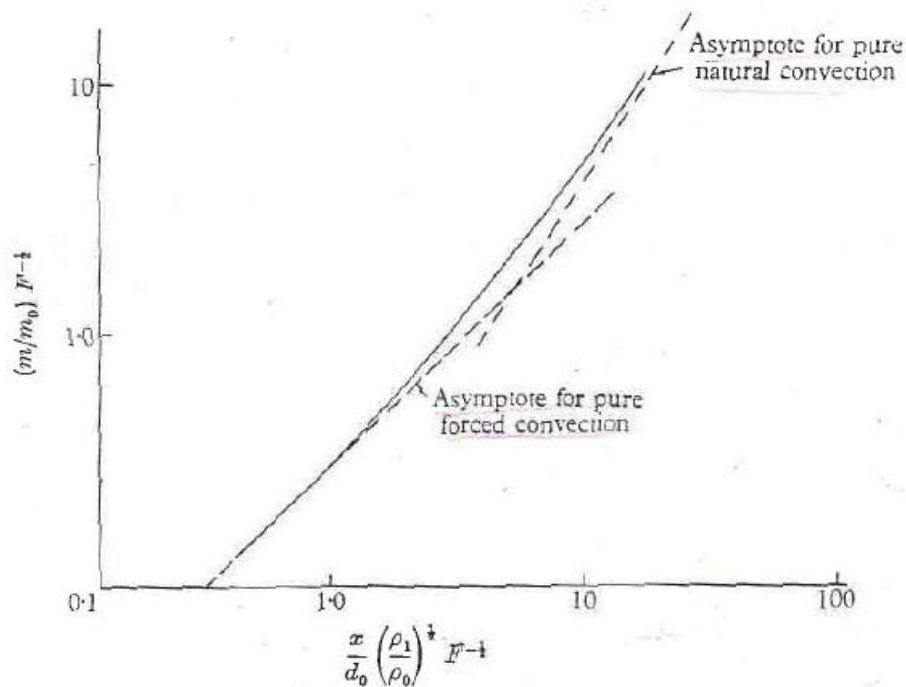


Figura 1.4: Andamento teorico entrainment in presenza di buoyancy

In generale il lavoro di Ricou e Spalding dimostra che l'entrainment per iniezioni non dotate di moto di swirl, aumenta con la distanza assiale in modo lineare.

Nel 1971 si è tenuto un esperimento molto simile a quello di Ricou e Spalding, ma finalizzato a scoprire in modo più preciso cosa succede nella regione immediatamente a valle dell'iniezione (Hill [2]).

Ricou e Spalding trovano infatti un andamento lineare dell'entrainment con la distanza assiale, ma il lavoro di B.J.Hill conferma tale dato solo per valori di $\frac{x}{d} > 13$.

Nella regione più vicina all'ugello l'entrainment aumenta con la distanza assiale in modo non lineare, come riportato in figura (fig.1.5):

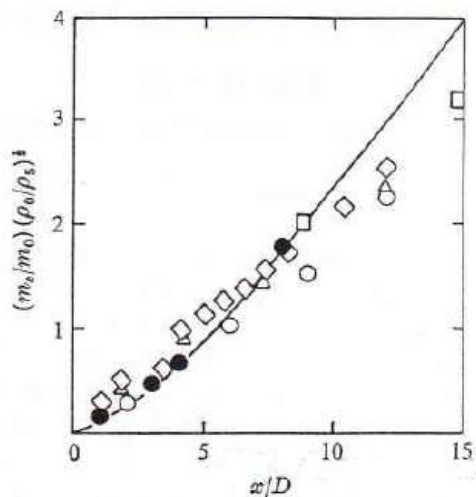


Figura 1.5: Variazione entrainment con la distanza assiale

Questo fenomeno viene successivamente confermato dal lavoro di Park and Shin ([4]), che comprende i risultati anche dell'esperimento di Hill e dell'esperimento di Trabold:

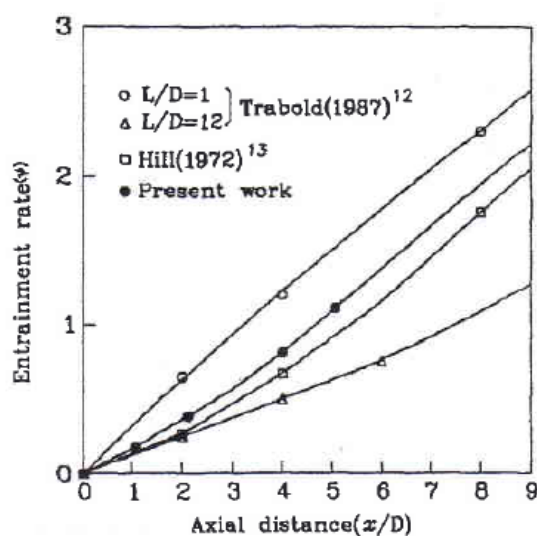


Figura 1.6: Andamento entrainment vicino efflusso

1.2 Getti instazionari: spray diesel

Negli anni successivi ai primi esperimenti sull'entrainment, sono stati studiati anche gli spray diesel, che presentano un'iniezione di tipo pulsato e quindi instazionaria. Nell'iniezione di spray diesel è necessario porre attenzione al metodo di misura, in quanto non è possibile misurare all'interno del flusso, essendo quest'ultimo liquido. Diventa necessario sviluppare un metodo di misura esterno alla regione interessata dal flusso.

In un esperimento condotto al Politecnico di Milano nel 1991, è stato caratterizzato l'entrainment, in una regione vicina all'efflusso, negli spray diesel tramite una tecnica di misura ottica nota come LDV: laser doppler velocimetry (Cossali, et al.[3]). La tecnica LDV è un metodo di misura diretto della velocità tramite un apparato ottico: il notevole vantaggio di un sistema di misura ottico è la non invasività dell'apparato di misura, che permette quindi di ottenere risultati più accurati. A differenza dell'esperimento di Ricou e Spalding ([1]), nell'iniezione di spray vi è una prima fase non stazionaria, che richiede quindi una trattazione matematica diversa, e successivamente il processo, anche se caratterizzato sempre da un'iniezione pulsata, assume un andamento di regime che può essere ricondotto al caso stazionario.

In questo esperimento l'entrainment rate viene calcolato tramite misure di velocità radiale lungo diverse stazioni disposte a diverse distanze assiali e da entrambi i lati della camera, in modo tale da avere una mappa delle velocità radiali che entrano dalla superficie laterale del cilindro che esemplifica la camera:

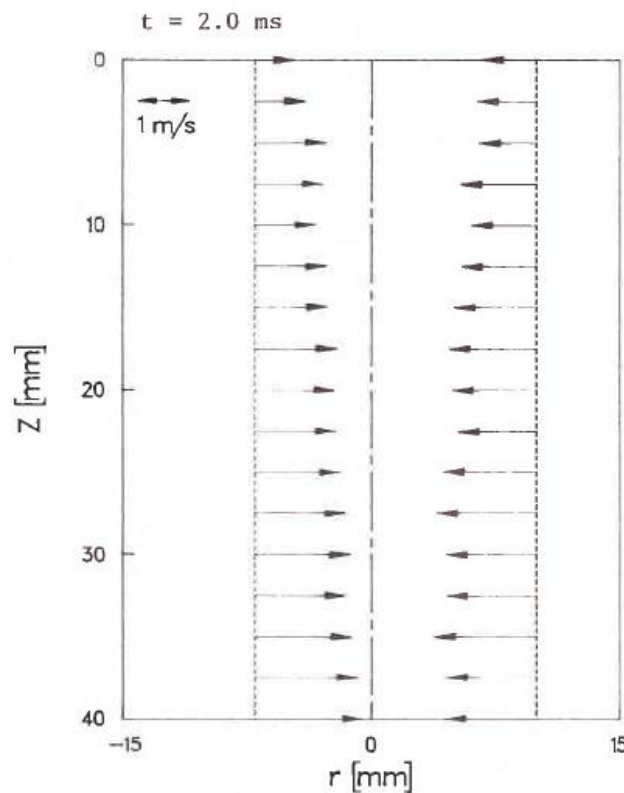


Figura 1.7: Mappa dell'entrainment in funzione della distanza assiale per un tempo fissato

Misurando la velocità radiale si ricava l'entrainment da:

$$m = \int \rho_a V_{rad} dS$$

Come già sottolineato la relazione di Ricou e Spalding ([1]) sul calcolo della costante K_1 vale solo per il caso stazionario. Ponendo invece l'attenzione sulla fase non stazionaria dell'iniezione di uno spray, si deve ridefinire la costante con:

$$\hat{K}_e = \frac{d(m_a/m_0)}{dz} d(\rho_0/\rho_a)^{\frac{1}{2}}$$

1.3 Flussi con swirl

I flussi dotati di moto di swirl, che in natura vengono esemplificati dalla formazione dei tornado, sono ampiamente utilizzati in molte soluzioni che prevedono la combustione, dai motori per i velivoli alle applicazioni puramente industriali, in quanto comportano un notevole miglioramento nel miscelamento dei reagenti, nella stabilità della fiamma, nella diminuzione delle emissioni inquinanti e quindi nell'efficienza dell'intero ciclo, con conseguente diminuzione dei consumi (Canepa, et al. [5]).

Non vi sono molti riferimenti esistenti riguardo all'entrainment e al campo di moto in presenza di swirl, e nella maggior parte di essi l'attenzione è focalizzata sul campo di moto lontano dall'efflusso dell'ugello e su fenomeni ad alto grado di swirl, al di sopra quindi di un valore che in seguito sarà riconosciuto come critico. I fenomeni che avvengono nel campo di moto vicino all'ugello e a valori di swirl attorno al valore critico non sono ancora mai stati studiati con attenzione.

Per descrivere i moti con un determinato livello di swirl si deve far riferimento al 'numero di swirl', per indicare il grado di circolazione che viene dato al flusso. Diventa quindi fondamentale provare a definire in primo luogo il numero di swirl, per poter proseguire in seguito ad una descrizione del campo di moto e dei fenomeni che caratterizzano questi flussi.

1.3.1 Numero di swirl

Il numero di swirl è una grandezza adimensionale di difficile definizione in quanto non esiste al momento un'espressione univoca per rappresentare questa entità. Si è notato infatti che le caratteristiche di un flusso swirlato dipendono fortemente dalle condizioni iniziali del campo di moto, che a loro volta dipendono dalle caratteristiche geometriche dell'ugello utilizzato. Di conseguenza anche il numero di swirl ha le medesime dipendenze e questo comporta che esperimenti condotti su geometrie diverse possano presentare medesimo numero di swirl ma comportamento del campo di moto che differisce l'uno dall'altro (Toh, et al. [9]).

Per questo motivo si presentano di seguito diverse definizioni del numero di swirl, tutte basate sul rapporto di componente tangenziale e assiale di una medesima quantità (Toh, et al. [9]). Queste definizioni si differenziano a seconda delle semplificazioni utilizzate, le quali dipendono dalla possibilità (soprattutto in termini tecnologici) di

ottenere o non ottenere misure di particolari grandezze in maniera accurata.

In figura si riporta il sistema di riferimento adottato nel definire il numero di swirl:

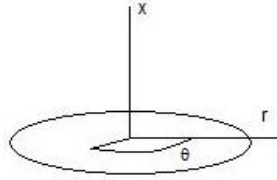


Figura 1.8: Sistema di riferimento

La definizione base per il numero di swirl è il rapporto tra i flussi di quantità di moto tangenziale e assiale:

$$S_1 = \frac{G_\theta}{G_x R}$$

Bisogna ora inserire i flussi di quantità di moto, che vengono definiti in maniera diversa a seconda di come viene studiato il campo di moto. Come suggerito da Gupta et al ([15]), si utilizza l'approssimazione di strato limite turbolento, incomprimibile e stazionario per ottenere la seguente formula:

$$S_1 = \frac{2\pi\rho \int_0^R r^2 (UW + \overline{u'w'}) dr}{2\pi\rho R \int_0^R r^2 (U^2 - \frac{1}{2}W^2 + \overline{u'^2} - \frac{1}{2}(\overline{w'^2} + \overline{v'^2})) dr}$$

dove U indica la componente assiale, V la componente radiale e W la componente tangenziale.

Solitamente gli sforzi di Reynold $\overline{u'w'}$ non sono facilmente misurabili e inoltre risultano essere di valore decisamente inferiore alla velocità media del flusso: si tende quindi a trascurare queste grandezze. Si riscontrano difficoltà anche nel misurare accuratamente i termini fluttuanti posti a denominatore (riconoscibili per la presenza dell'apice). Trascurando anche questi termini (anch'essi hanno comunque valore inferiore ai termini medi) si ottiene la seguente relazione:

$$S_{1a} = \frac{2\pi\rho \int_0^R r^2 UW dr}{2\pi\rho R \int_0^R r^2 (U^2 - \frac{1}{2}W^2) dr}$$

A questo punto la formula si differenzia di molto a seconda dei profili di velocità iniziale che vengono ipotizzati.

In molti studi la velocità tangenziale iniziale viene approssimata al profilo di corpo solido in rotazione, $W = W_0 (r/R)$, e la velocità assiale iniziale viene approssimata con il profilo a top-hat, $U = U_0$, dove i termini con i pedici indicano i valori massimi delle relative grandezze. Considerando complessivamente i due profili di velocità, si ottiene un modello di flusso chiamato 'plug-flow'.

Si giunge quindi alla versione ulteriormente semplificata del numero di swirl:

$$S_{1_b} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{W_0}{U_0} \right)}{1 - \frac{1}{4} \left(\frac{W_0}{U_0} \right)^2}$$

Questa semplificazione in realtà porta ad una buona approssimazione per numeri di swirl bassi, quando effettivamente i profili di velocità introdotti rappresentano bene la realtà, e a sottostimare l'effettivo numero di swirl per $S > 0.2$ in quanto si sviluppano fenomeni che perturbano il modello proposto e che verranno descritti in seguito.

Si propone quindi una seconda definizione del numero di swirl basata sul rapporto tra le due velocità, e non tra i flussi di quantità di moto:

$$S_2 = \frac{2W(R/2, x_0)}{U(0, x_0)}$$

Anche in questo caso si considera una distribuzione di velocità tangenziale che approssima il profilo di rotazione di corpo solido, considerando che il valore massimo di tale velocità viene raggiunto circa a metà del raggio; anche la velocità assiale viene presa nella posizione dove raggiunge il suo massimo valore.

Una terza relazione esprime il numero di swirl come rapporto tra la velocità di rotazione del getto e la velocità assiale all'uscita dell'ugello:

$$S_3 = \frac{R\Omega}{\bar{U}_0}$$

Un'ulteriore definizione si basa sul rapporto tra le quantità di moto (non più i flussi di quantità di moto quindi) tangenziale e assiale:

$$S_R = \frac{\sum \dot{m}_\theta U_\theta}{\dot{m}_x U_x}$$

Infine si può utilizzare un numero di swirl geometrico, che deve però essere ottimizzato sulla geometria di ogni ugello in esame, perdendo quindi caratteristiche di oggettività.

In questo lavoro i numeri di swirl derivano da un lavoro precedente che, tramite misure LDV, ha stimato i numeri di swirl mediante la formula S_{1_a} .

1.3.2 Caratterizzazione dei flussi swirlati

Il comportamento del flusso differisce molto a seconda del grado di swirl a cui si trova e di conseguenza anche l'entrainment dell'aria subisce variazioni, solitamente aumenta con l'aumentare del numero di swirl.

Inquadrare le caratteristiche principali del flusso ai diversi numeri di swirl e capire come variano le singole grandezze diventa utile per ottimizzare il fenomeno dell'iniezione.

Inoltre un flusso dotato di moto di swirl presenta un duplice aspetto, stazionario e instazionario, a seconda del Reynolds e del grado di swirl a cui si trova il flusso.

Nel caso di swirl nullo si nota che il profilo di velocità assiale assume la conformazione a top-hat, mentre la velocità tangenziale risulta essere nulla e la velocità radiale di molto inferiore a quella assiale (Billant, et al. [10]). L'entrainment si genera in quanto la velocità assiale decade allontanandosi dall'ugello, generando un gradiente di pressione assiale che aumenta con il diminuire della velocità assiale. Questo gradiente di pressione richiama quindi aria in direzione radiale e per questo motivo l'entrainment tende ad aumentare con la distanza assiale.

I fenomeni di instabilità a swirl nullo si manifestano lontano dall'ugello sottoforma di instabilità alla Kelvin-Helmoltz (Panda e McLaughlin [11]). Il flusso laminare si instabilizza in piccoli anelli vorticosi per effetto della differenza fra la velocità del flusso iniettato e il flusso stagnante in camera. A monte di tali vortici il flusso risulta essere laminare, a valle invece la regione diventa completamente turbolenta (Liang e Maxworthy [12]).

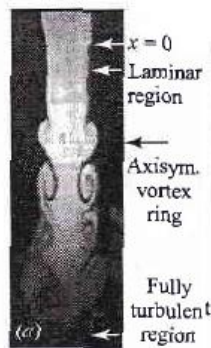


Figura 1.9: Vortici di Kelvin-Helmoltz

Al crescere del numero di swirl, rimanendo però nel campo di swirl basso (inferiore quindi ad un valore critico che verrà richiamato in seguito), il profilo di velocità assiale passa dalla conformazione precedente alla conformazione inizialmente a getto e in seguito leggermente a onda (Syred [13]) e la velocità tangenziale inizia a crescere di intensità, come mostrato in figura (fig.1.10):

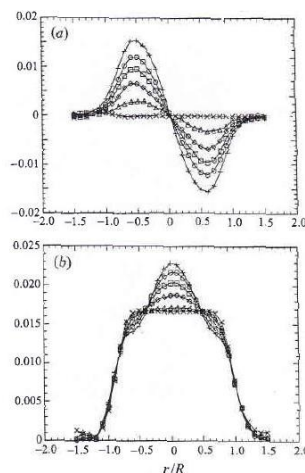


Figura 1.10: Profilo di velocità assiale e tangenziale per swirl bassi

Si può introdurre un'approssimazione per descrivere il campo di moto del flusso, che per numeri di swirl bassi rappresenta in maniera sufficientemente corretta la realtà: il flusso si comporta come un vortice di Rankine.

La distribuzione radiale (aumentando il raggio) di velocità tangenziale può quindi essere descritta tramite un vortice forzato, $W = C_1 r$, a cui si somma un vortice libero, $W = C_2/r$.

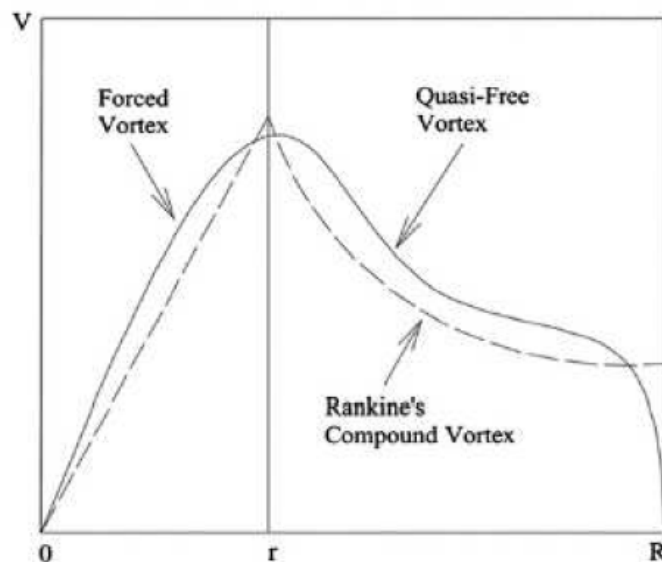


Figura 1.11: Approssimazione vortice di Rankine

Al fenomeno di decadimento della velocità assiale e aumento del gradiente di pressione assiale allontanandosi dall'ugello, si aggiunge un incremento dell'ampiezza del getto e la nascita di forze centrifughe che aumentano di intensità con l'aumentare dello swirl (Yazdabadi, et al. [14]). Si crea quindi un gradiente di pressione radiale verso l'interno del getto per equilibrare le forze centrifughe:

$$\frac{dP}{dr} = -\rho \frac{w^2}{r}$$

Tale fenomeno contribuisce fortemente ad accrescere la portata d'aria catturata in direzione radiale e quindi l'entrainment.

Per flussi dotati di numeri di swirl bassi il fenomeno di decadimento della velocità assiale non è tale da portare la velocità stessa ad annullarsi in un punto, nonostante si possa notare un deciso aumento dell'ampiezza del getto.

I fenomeni di instabilità sono caratterizzati sia dagli anelli vorticosi, ma posizionati più vicino all'ugello, sia da due zone di ricircolazione posti lateralmente al getto e chiamati CRZ (Corner Recirculation Zone), generati proprio dalla presenza di entrainment. Questo fenomeno è particolarmente visibile nei casi di getti confinati in una camera.

Quando il numero di swirl raggiunge il valore critico la velocità assiale si annulla in un punto, detto punto di ristagno (Billant, et al. [10]). Il flusso aumenta ulteriormente di ampiezza e si crea una zona di ristagno.

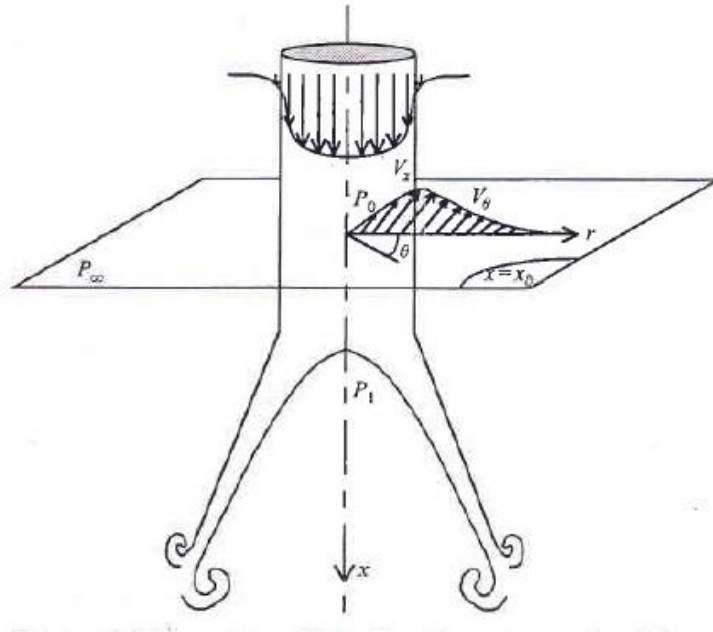


Figura 1.12: Fenomeno di vortex breakdown

Questo fenomeno prende il nome di vortex-breakdown e tuttora esistono diverse spiegazioni per giustificarlo. Negli studi di Benjamin (Billant, et al. [10]) si ipotizza che il vortex-breakdown indichi una transizione assial-simmetrica e dissipativa fra due stati inviscidi distinti, a monte e a valle del punto di ristagno. A causa del vortex breakdown la regione a monte (supercritica) presenta un flusso di quantità di moto assiale più piccolo della zona a valle (subcritica).

Altri studiosi, fra Escudier & Keller hanno smentito questa teoria e sostengono che il flusso di quantità di moto assiale deve conservarsi e questa condizione determina il fenomeno del vortex-breakdown. Inoltre all'interno della zona di ristagno tutte le velocità sono praticamente nulle (Billant, et al. [10]).

Quando il numero di swirl supera il valore critico, il campo di moto cambia radicalmente e non è più valida l'approssimazione del campo di moto a vortice di Rankine. Il profilo di velocità assiale si consolida nella forma a onda, in quanto nella zona centrale del getto, dove precedentemente il valore della velocità si era annullato, la velocità assiale assume valore negativi. La velocità tangenziale assume valori maggiori a causa dell'aumento del grado di swirl (Oberleithner [7]).

L'ampiezza del getto aumenta rispetto ai numeri di swirl minori e nella totalità il flusso si comporta come se ci fosse un corpo solido a valle dell'ugello.

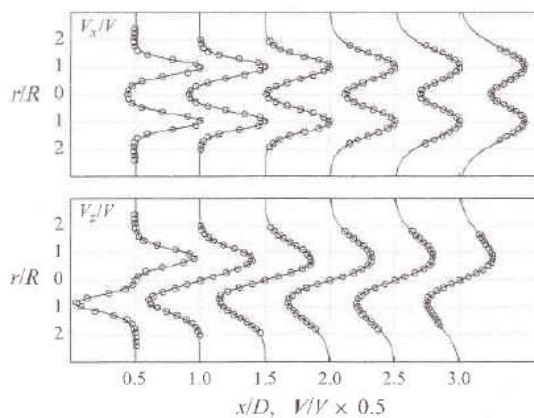


Figura 1.13: Profilo di velocità assiale e tangenziale

La zona centrale con velocità assiali negative prende il nome di CTRZ (Central Toroidal Recirculation Zone) e si aggiunge alle due zone di ricircolazione laterali presenti anche a numeri di swirl inferiori:

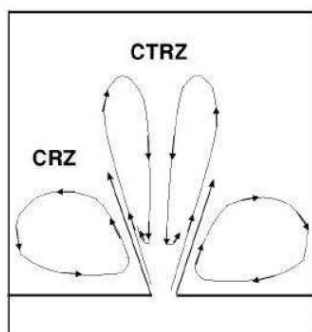


Figura 1.14: Zone di ricircolazione

L'entrainment risulta essere maggiore in quanto le forze centrifughe sono più intense e il decadimento delle velocità allontanandosi dall'ugello si verifica anche per questi numeri di swirl:

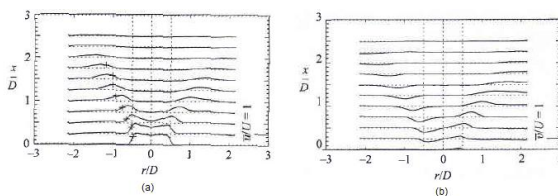


Figura 1.15: Decadimento di velocità assiale e tangenziale

La conformazione del flusso nei casi di avvenuto vortex-breakdown si divide in due tipologie, come descritto nell'esperimento di Billant, et al.: conformazione a bolla, con

il flusso che si richiude a valle del CTRZ, e conformazione a cono, con il flusso che rimane aperto a valle del CTRZ. Entrambe le conformazioni risultano essere assial-simmetriche (Billant, et al. [10]).

Inoltre facendo una fotografia nel piano meridionale si nota come il flusso assuma un andamento a spirale a due o tre rami; questo andamento viene già debolmente evidenziato per swirl bassi, ma diventa decisamente evidente dopo il vortex-breakdown.



Figura 1.16: Conformazione a spirale del vortice

L'effetto dello swirl a numero di Reynolds fissato si manifesta sull'entrainment, aumentandolo a swirl maggiori e diminuendolo a swirl inferiori; al contrario fissato il numero di swirl, aumentando il numero di Reynolds aumenta l'entrainment e l'effetto è più evidente a numeri di swirl più elevati (Park e Shin [4]):

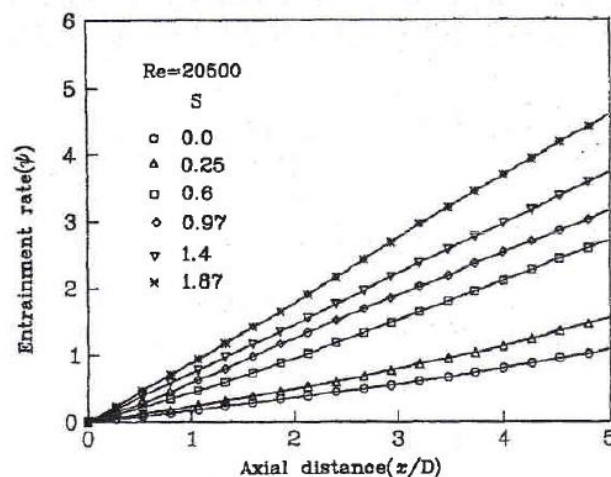


Figura 1.17: Andamento entrainment all'aumentare del numero di swirl

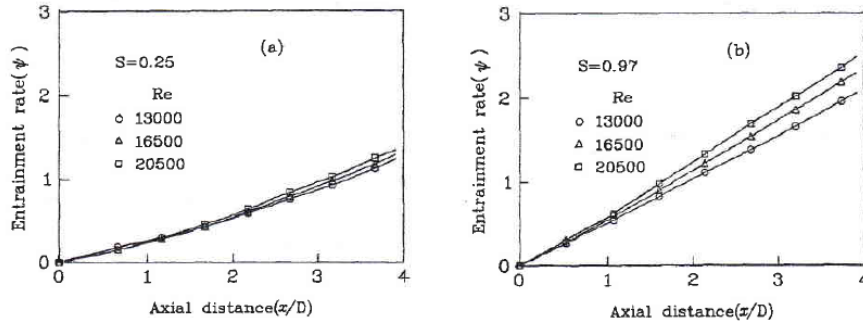


Figura 1.18: Andamento entrainment rate con il numero di Reynolds

Quando i flussi a numero di swirl elevato sono caratterizzati anche da un alto numero di Reynolds, si instaura un nuovo fenomeno chiamato PVC, precessing vortex core. Il PVC è caratterizzato dalla precessione regolare del vortice (a bolla o a cono), tipico dei flussi a elevato numero di swirl, attorno all'asse dell'ugello. La regolarità di tale fenomeno può essere riscontrata effettuando un'analisi spettrale dei profili di velocità, o eventualmente delle oscillazioni di pressione, direttamente legata alla velocità: la funzione di densità spettrale di potenza (PSD) così calcolata presenta un netto picco ad una frequenza che si assume essere quindi la frequenza caratteristica del PVC (Martinelli, et al. [6]).

La frequenza di questo fenomeno può essere misurata anche tramite analisi acustica: le fluttuazioni di pressione danno origine ad instabilità acustiche che possono essere rilevate tramite un microfono (Singh, et al. [17]). Il fenomeno del precessing vortex core rappresenta quindi un'instabilità su larga scala, completamente indipendente dalle fluttuazioni turbolente di piccola scala.

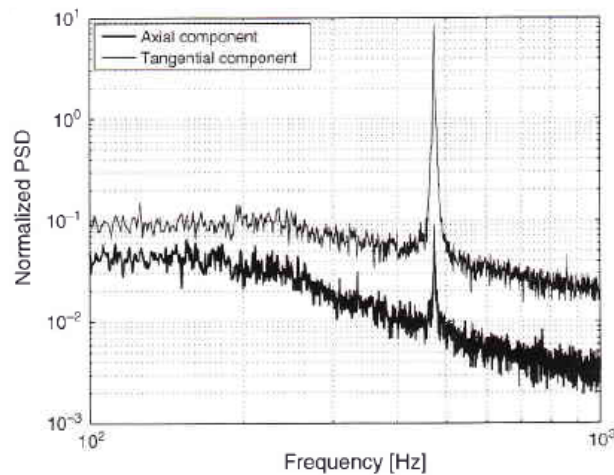


Figura 1.19: Esempio di contenuto in frequenza

Questo fenomeno è fortemente dipendente dal numero di Reynolds, in quanto la frequenza che governa questo fenomeno varia in modo direttamente proporzionale al numero di Reynolds (Singh, et al. [17])

I flussi swirlati che non presentano ancora il fenomeno del PVC possono essere considerati con buona approssimazione stazionari, ma la formazione del PVC porta anche

dei fenomeni non stazionari, in quanto molte grandezze in esame, velocità ed entrainment, dipendono dalla posizione angolare del PVC.

La presenza di questo ulteriore fenomeno cambia la caratterizzazione del flusso: la spirale presente a causa dell'elevato grado di swirl assume anche un moto rotatorio attorno all'asse e allonandosi dall'ugello si avvita su sè stessa (Cala, et al. [8]):

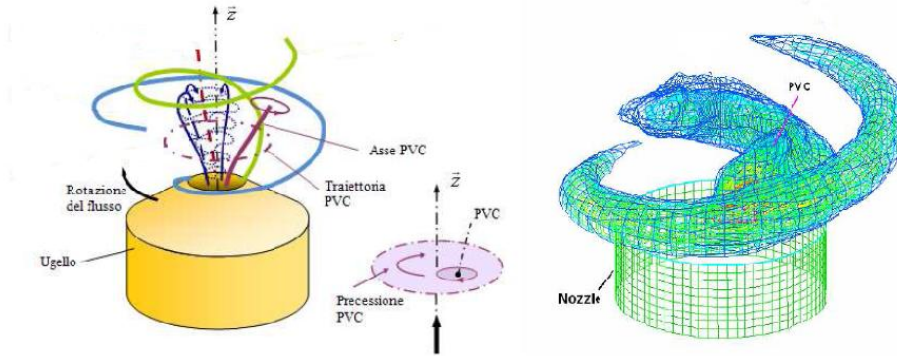


Figura 1.20: Conformazione a spirale avvitata

In presenza di precessing vortex core il flusso perde le sue caratteristiche di assial-simmetria. Ad esempio il profilo di velocità tangenziale non è più simmetrico in quanto il centro del vortice e il centro geometrico non coincidono (Yazdabadi, et al. [14]). Quindi a seconda della posizione angolare del PVC, le velocità cambiano rispetto ai profili in assenza di PVC.

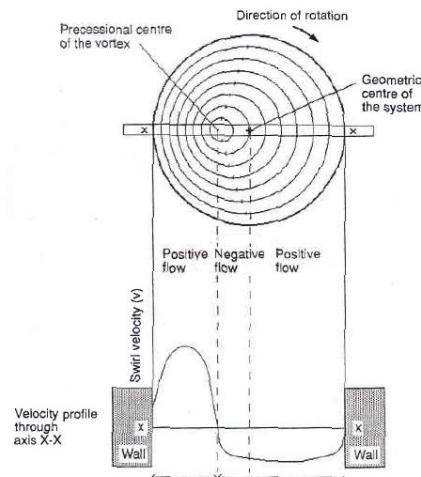


Figura 1.21: Profilo di velocità tangenziale in presenza di PVC

Diventa interessante a questo punto cercare di capire come il PVC possa influenzare l'entrainment dell'aria. Secondo il lavoro di Canepa et al. ([5]), la distribuzione di velocità assiale in direzione radiale varia a seconda della posizione del PVC, creando dei gradienti radiali di velocità assiale positivi e negativi ed una curvatura del flusso

verso l'interno o verso l'esterno del getto come rappresentato in figura (fig.1.22):

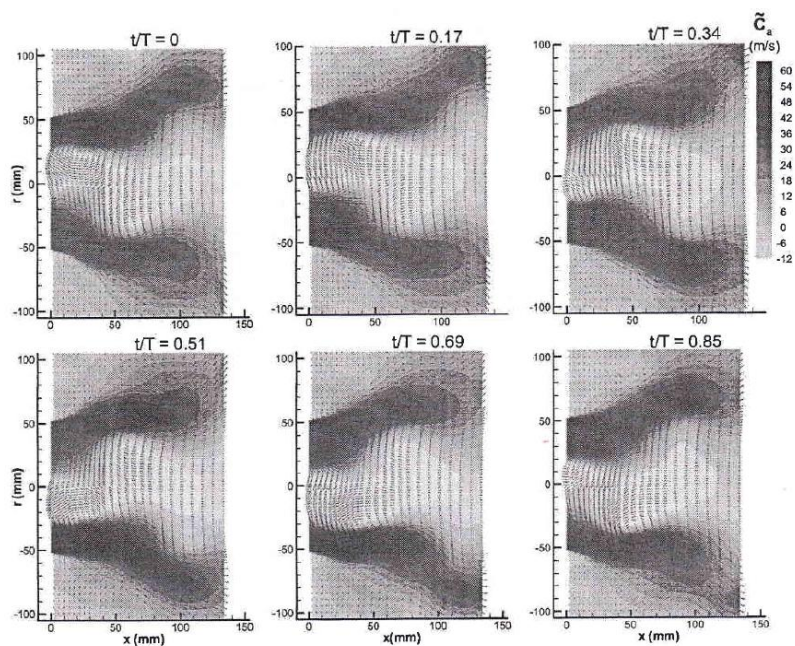


Figura 1.22: Distribuzione di velocità assiale in presenza di PVC

A questo fenomeno è legata la variazione di gradiente di pressione in direzione radiale e di conseguenza l'entrainment dovrebbe risultare favorito o sfavorito a seconda della posizione angolare del precessing vortex core.

Capitolo 2

Tecnica di misura

Le tecniche utilizzate negli esperimenti di misurazione e visualizzazione di flussi si basano, a partire dagli anni '60, sull'utilizzo del laser, ossia uno strumento caratterizzato da un 'mezzo', solido, liquido o gassoso, una cavità, racchiusa fra specchi, e una sorgente di eccitazione, solitamente rappresentata da particolari lampade. La funzione del laser è mandare una luce pulsata nella direzione del volume di misura in modo da illuminare le particelle di tracciante inserite.

Le tecniche di misura convenzionali, principalmente tubi di Pitot e anemometri a filo caldo, prevedono l'inserimento dello strumento nel volume di misura, perturbandolo e apportando quindi un errore di misura. Sono inoltre limitati nella risoluzione spaziale e temporale e presentano una sensibilità direzionale che li rende adatti a misurare solo velocità in alcune direzioni. Infine non sono adatti per flussi bifase e con reazioni di combustione, nè per flussi non stazionari e soggetti a rapide variazioni.

Al contrario le tecniche di misura ottiche non introducono alcuno strumento nel flusso e quindi la misura risulta essere non perturbata. Queste tecniche non vengono condizionate dalle condizioni del flusso (bifase o in fase di combustione) e hanno una buona risoluzione spaziale e temporale.

2.1 PIV: Particle Image Velocimetry

La tecnica di misura ottica PIV è un sistema che misura la velocità tramite la determinazione dello spostamento delle particelle traccianti tra due immagini consecutive separate da un intervallo di tempo fissato.

La luce laser, passando attraverso una lente ottica che espande il fascio, illumina un piano del flusso, in modo tale che una telecamera posta perpendicolarmente alla direzione della luce laser possa registrare l'immagine del piano del flusso.

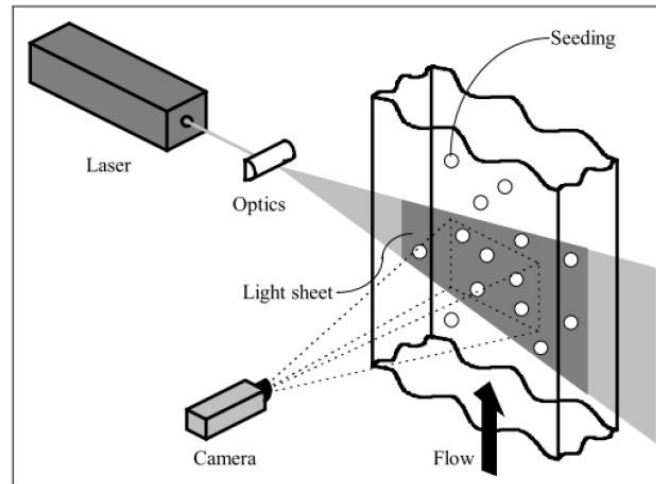


Figura 2.1: Disposizione strumentazione per una misurazione PIV

Ciascuna immagine è caratterizzata da due frame, che catturano i due impulsi laser, in modo tale che, impostando l'intervallo di tempo fra i due impulsi, possa essere calcolata la velocità misurando semplicemente lo spostamento delle particelle avvenuto fra i due frame.

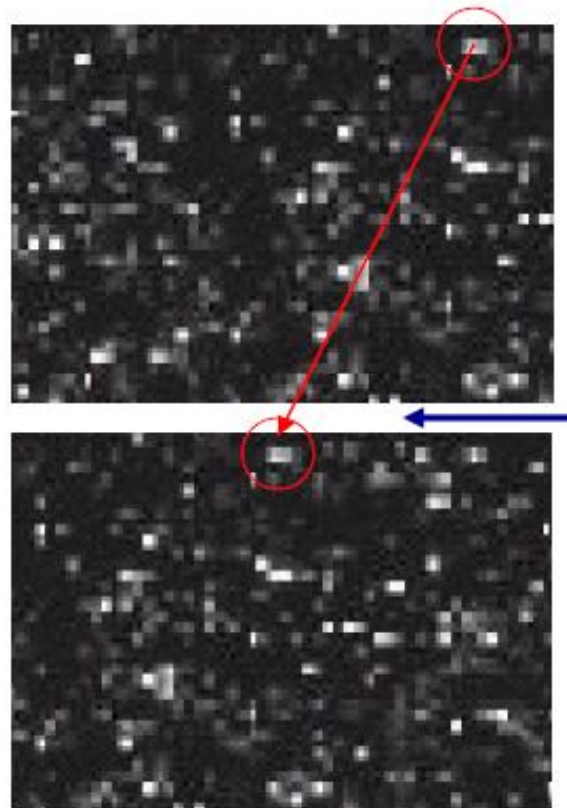


Figura 2.2: Spostamento di una particella tra due frame

Ciascuna immagine viene quindi suddivisa in aree di interrogazione, di dimensioni $M \times N$ inferiori all'immagine totale, e fra le medesime aree di interrogazione dei due frame si svolgono i seguenti calcoli:

$$V_x = \frac{dx}{dt}$$

$$V_y = \frac{dy}{dt}$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$$

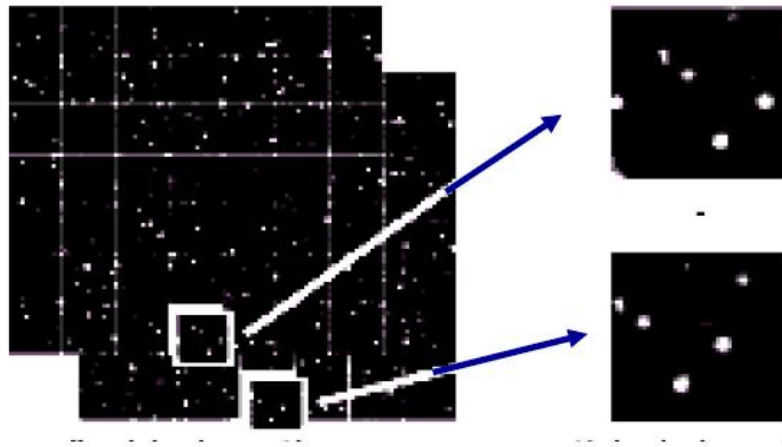


Figura 2.3: Aree di interrogazione

Per avere una misura corretta si effettua una cross-correlazione tra le due aree di interrogazione dei due frame per trovare il valore di velocità medio più probabile:

$$\Phi(m, n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_1(i, j) \bullet g_2(i + m, j + n)$$

Le funzioni g_1 e g_2 rappresentano il livello di grigio dei pixel, ossia la loro intensità luminosa. Si ipotizza che tutte le particelle di un'area di interrogazione, se sufficientemente piccola, si muovano nella medesima direzione e quindi correlando i due frame dovrebbe comparire una misura di velocità che si ripete per più particelle. A questo valore più probabile si possono affiancare misure di correlazione che evidenziano spostamenti 'spuri' o perchè vengono correlate due particelle non corrispondenti tra due frame o perchè una particella esce o entra solo in uno dei due frame. Si crea così una mappa in cui si evidenziano diversi picchi:

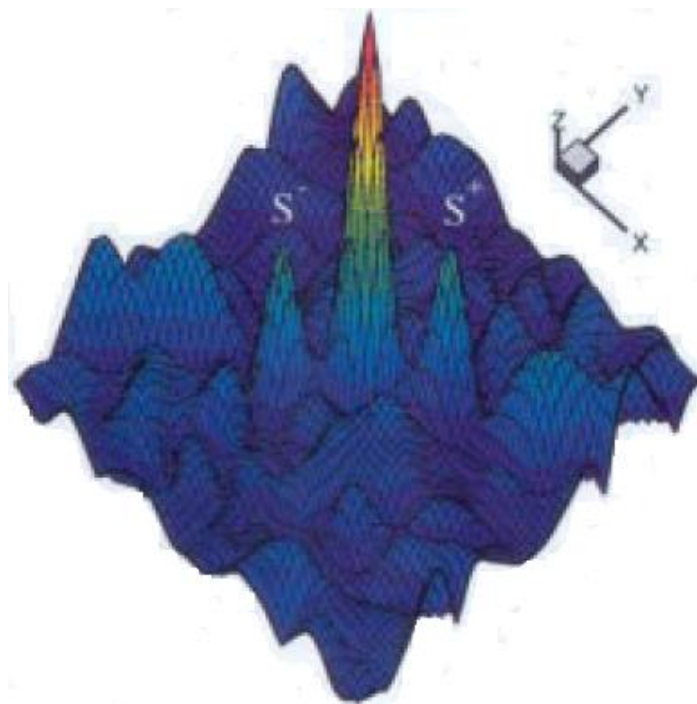


Figura 2.4: Mappa di cross-correlazione

Se tutto l'apparato è settato correttamente si evidenzia un picco nettamente più alto, che corrisponde al massimo valore della funzione Φ e anche al valore più probabile di velocità:

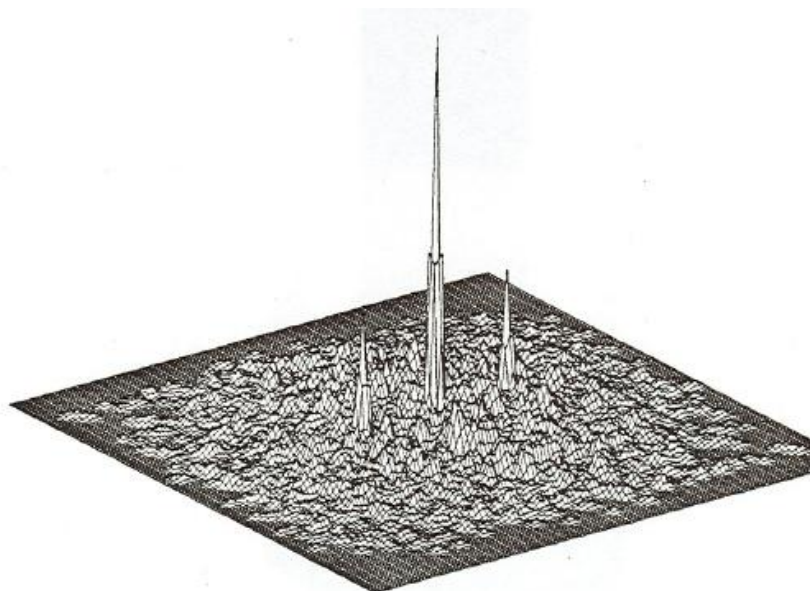


Figura 2.5: Picco di auto-correlazione

Spesso è utile utilizzare una variante della semplice cross-correlazione per ottimizzare le dimensioni dell'area di interrogazione: la correlazione adattiva.

Questo metodo si basa su cross-correlazioni ad un numero di passi fissabili dall'utente: il primo passo viene eseguito sulle aree di interrogazione di dimensioni maggiori e serve per ottenere un campo di spostamenti medio. Gli step successivi vengono eseguiti su aree di interrogazione di dimensioni decrescenti, nelle quali vengono eliminati gli errori dovuti a velocità spurie conoscendo già il campo di moto medio.

Il sistema descritto funziona in maniera ottimale anche in base alla bontà della lama laser che illumina il piano di misura. Essa deve infatti rispettare le seguenti caratteristiche:

- deve avere intensità elevata e uniforme in modo tale che la luce diffusa dalle particelle traccianti sia acquisibile dalla telecamera;
- deve avere spessore costante su tutto il piano di misura;
- deve essere sottile rispetto alla profondità di campo dell'obiettivo della telecamera, in modo che l'immagine risulti essere messa a fuoco;
- contemporaneamente deve avere spessore superiore allo spostamento medio delle particelle in direzione ortogonale alla lama fra i due frame, altrimenti risulta essere troppo elevata la perdita di particelle dal volume di misura.

La risoluzione spaziale di un sistema ottico PIV dipende fortemente dalle dimensioni delle particelle traccianti, dalle proprietà delle lenti della telecamera, in particolare l'ingrandimento ottico, e dalla dimensione minima vista dalla telecamera, che dipende a sua volta dalle dimensioni, solitamente in μm , della matrice di pixel della telecamera utilizzata (Kahler, et al. [18]). Per avere una buona risoluzione spaziale è fondamentale in primo luogo avere un ottimo allineamento dei fasci laser e della telecamera. Inoltre è necessario inseminare il campo di misura in maniera ottimale per evitare di avere o sovrapposizioni fra più particelle, se il campo di moto è troppo inseminato, o delle zone non luminose a causa della scarsa percentuale di inseminazione.

Per sistemi ben allineati e ben inseminati diventa importante il rapporto fra le dimensioni delle particelle e l'ingrandimento dato dalle lenti della telecamera: se ottimale si evitano problemi di diffrazioni o di defocusing (perdita di messa a fuoco) che possono invalidare i risultati.

Tipicamente le dimensioni delle particelle inseminanti sono di 1-2 μm ed è opportuno che le dimensioni della matrice di pixel del sensore della telecamera siano superiori alle dimensioni delle particelle: solitamente ciascun pixel della matrice ha una dimensione di 5-20 μm a seconda della telecamera utilizzata. In questo modo la dimensione di una particella sull'immagine digitale risulta essere di un pixel, o maggiore per effetto della diffrazione che aumenta la dimensione apparente delle particelle.

Diventa necessario in conclusione svolgere un lavoro di ottimizzazione dei parametri con cui lavora il sistema PIV e il sistema di acquisizione per ottenere delle immagini con una buona risoluzione.

Capitolo 3

Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale utilizzato è caratterizzato da diversi elementi, sia per effettuare l'esperimento sia per acquisire e analizzare i dati:

- apparato bruciatore;
- camera di combustione;
- linea di alimentazione;
- sistema ottico;
- sistema di acquisizione;
- sistema di analisi dati.

Si riportano nei paragrafi seguenti le descrizioni di tutti questi elementi elencati.



Figura 3.1: Laboratorio sperimentale

3.1 Apparato bruciatore

Il bruciatore è rappresentato da un modello in scala di un combustore aria-gas naturale in grado di impartire un moto di swirl tramite iniezione di aria sia in direzione assiale sia in direzione tangenziale.

Questo bruciatore è stato utilizzato per esperimenti in aria fredda, senza combustione quindi, e inserimento di particelle di olio come insemiante. Si riporta in figura (fig.3.2) lo schema generale del bruciatore:

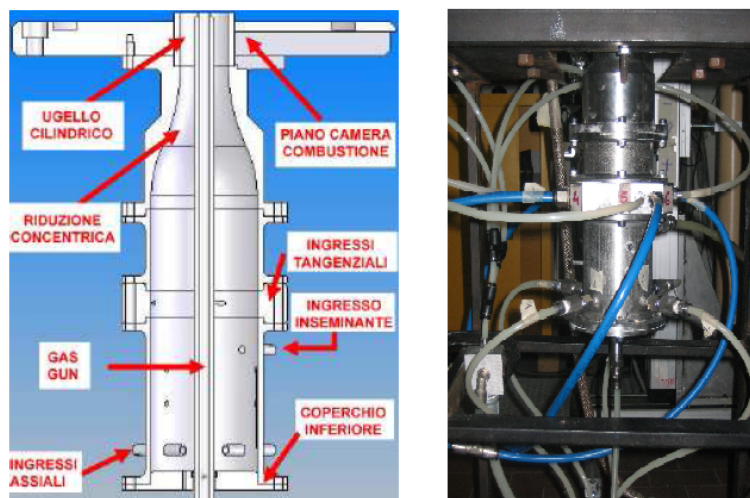


Figura 3.2: Schema generale del bruciatore e vista esterna

In questo lavoro il gas gun viene utilizzato per iniettare le particelle insemianti con un debole flusso secondario di aria e sono state utilizzate iniezioni di insemiante anche da entrate laterali. Le entrate di aria tangenziale hanno lo scopo di impartire il moto di swirl del flusso e quindi stabilendo a monte il rapporto fra le portate è possibile ottenere il grado di swirl voluto.

Sopra al piano della camera di combustione viene incastrato un secondo ugello con le seguenti caratteristiche:

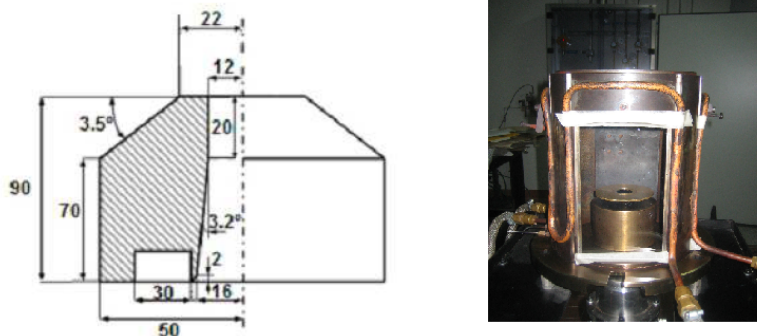


Figura 3.3: ugello aggiuntivo

Come si può notare è stato aggiunto un piattello sulla parte superiore dell'ugello, che non è riportato nella quotatura in quanto è stato posizionato sull'ugello già esistente. Esso è stato aggiunto appositamente per questo lavoro, ed è stato saldato a filo con la sezione d'uscita dell'ugello in modo tale che durante le prove non vi sia un flusso d'aria richiamato dalla regione esterna all'ugello ma inferiore al piattello. La funzione di questo piattello è quella di garantire che l'aria in prossimità dell'efflusso venga catturata in direzione esattamente radiale. Le dimensioni del piattello sono riportate in figura (fig.3.4):

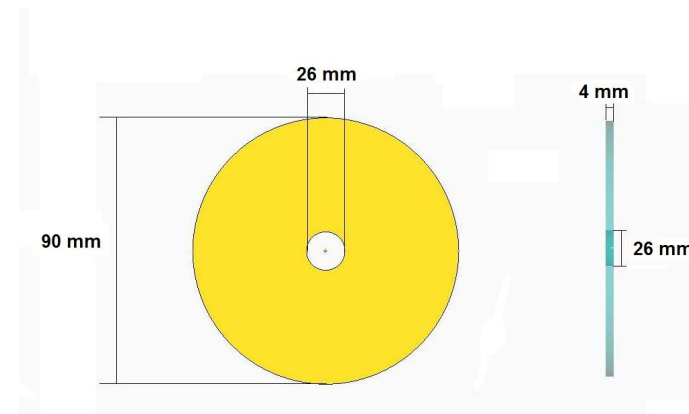


Figura 3.4: Dimensioni piattello

3.1.1 Iniezione dell'aria assiale e tangenziale

L'iniezione di aria assiale avviene nella parte inferiore del bruciatore, tramite 4 ingressi disposti lungo la circonferenza esterna. L'aria assiale entra quindi in direzione radiale ma essendo iniettata nella parte inferiore del cilindro, che ha diametro pari a 80 mm, ha la possibilità di regolarizzarsi in direzione assiale. A monte degli ingressi tangenziali viene posta anche una piastra forata che ha lo scopo di rendere completamente assiale il flusso.

L'aria tangenziale viene iniettata lateralmente attraverso una seconda piastra su cui sono stati praticati otto fori: quattro di 3 mm e posti ad una distanza di 38 mm dall'asse del condotto principale e quattro di 4 mm posti a 20 mm dall'asse.

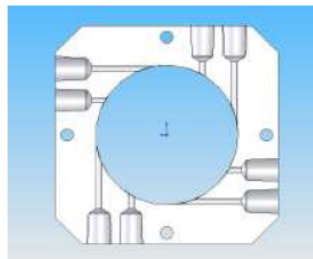


Figura 3.5: Piastra per l'ingresso dell'aria tangenziale

3.1.2 Piano della camera

La piastra superiore del bruciatore ha lo scopo di ancorare tutto il cilindro inferiore e offrire un piano orizzontale su cui è stato posizionato l'ugello convergente qui utilizzato per creare un flusso swirlato.

Si riportano in figura (fig.3.6) le dimensioni del piano della camera:

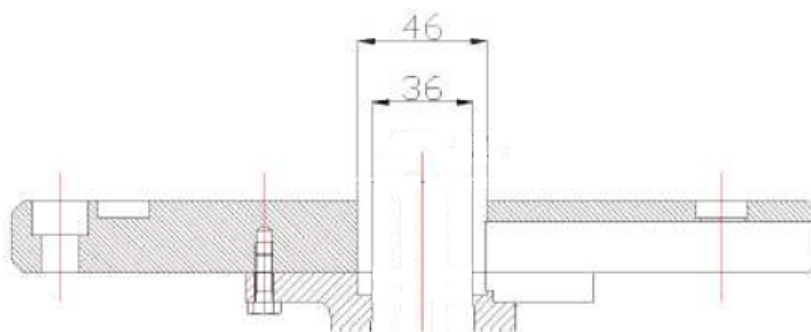


Figura 3.6: Piano della camera di combustione

3.2 Camera di combustione

Nello svolgimento delle prove sono state utilizzate due camere diverse, sia in forma sia in composizione.

La prima camera è realizzata con un rivestimento cilindrico e metallico ed è la camera di combustione del bruciatore utilizzato per generare moto di swirl. Eventualmente la camera può anche essere chiusa superiormente tramite una cappa, sempre metallica. In questo modo si possono riprodurre esperimenti in regioni confinate e quindi con elevata concentrazione di particelle insemi nanti. L'effetto del confinamento influenzerà il campo di moto all'interno della camera.

La camera di combustione presenta due accessi ottici, costituiti da due finestre in quarzo: la più piccola consente il passaggio del raggio laser e la più grande consente alla telecamera di riprendere il campo di moto. Le finestre non sono bombate cilindricamente ma sono piatte, per evitare disturbi ottici dovuti alla curvatura.

Si riportano in figura (fig.3.7) le quotature della camera di combustione e della cappa:

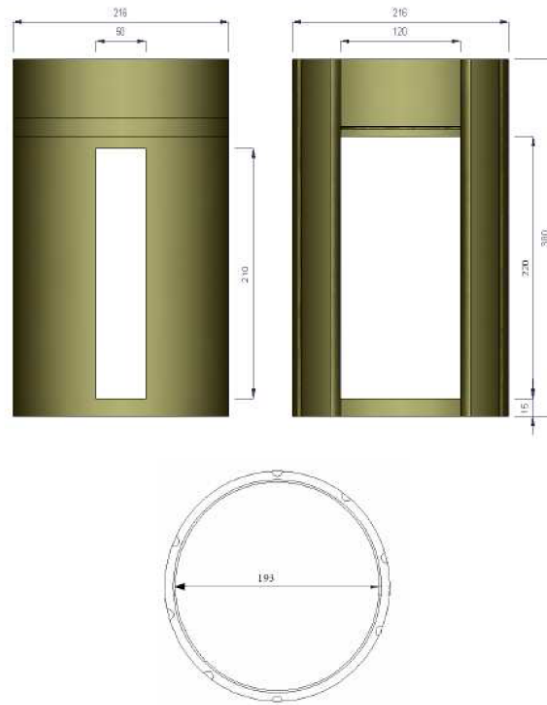


Figura 3.7: Camera di combustione

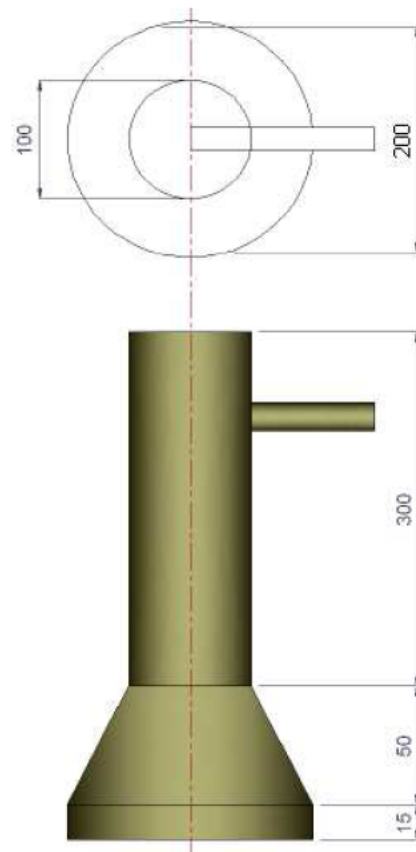


Figura 3.8: Cappa

In seguito si è deciso di utilizzare una camera composta da quattro pareti quadrate (40x40 cm) in plexiglass e quindi completamente trasparenti, eliminando il problema dell'inserimento delle finestre ottiche.

Si è scelto di utilizzare questa seconda camera in quanto si necessitava di un ingresso ottico molto più ampio affinché la telecamera potesse riprendere l'intero campo di moto.

Questa camera ha dimensioni maggiori della precedente e il campo di moto non risente più del confinamento, comportandosi quindi come un getto libero in aria. Diventa però necessario garantire una buona concentrazione di insemnante all'esterno del getto, e si rende quindi aggiunti due ingressi per l'insemnante direttamente in camera.



Figura 3.9: Seconda camera di combustione in plexiglass

3.3 Linea di alimentazione

La linea di alimentazione fornisce il flusso d'aria necessario per avere le portate di aria assiale e tangenziale e per nebulizzare in goccioline l'olio insemnante.

L'aria viene fornita dalla rete del laboratorio di combustione e diagnostiche ottiche del Dipartimento di Energia e passa attraverso una valvola riduttrice di pressione dotata di un manometro e un filtro per eliminare le impurità. L'aria viene divisa in tre condotti: assiale, tangenziale e insemnante.



Figura 3.10: Linea di alimentazione

Si riporta di seguito lo schema dell'aria compressa per evidenziare tutti gli elementi:

1. Rubinetto
2. Manometro
3. Rubinetto
4. Manometro+Filtro a condensazione
5. Filtro a condensazione+valvola riduttrice di pressione
6. Filtro a condensazione
7. Rubinetti
8. Misuratore e regolatore di portata per inseminazione
9. Misuratore e regolatore di portata per aria tangenziale
10. Misuratore e regolatore di portata per aria assiale

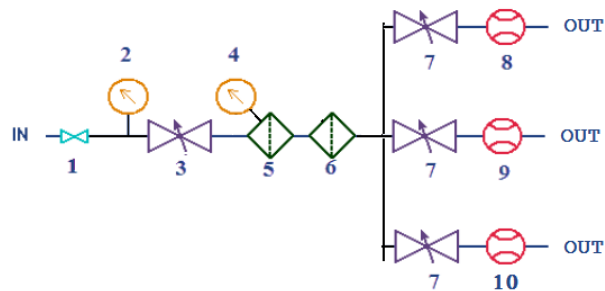


Figura 3.11: Schema linea alimentazione per l'aria compressa

Tutti i condotti di alimentazione passano attraverso dei misuratori e regolatori di portata:



Figura 3.12: Regolatori di portata assiale, tangenziale e per l'inseminazione

I misuratori e regolatori di portata hanno le seguenti caratteristiche:

Modello	Utilizzo	Fondo scala [Nl/min]
Bronkhorst in flow digital	aria assiale	1000
Bronkhorst in flow digital	aria tangenziale	500
Bronkhorst in flow digital	aria inseminazione	50

Tabella 3.1: Caratteristiche misuratori e regolatori portata

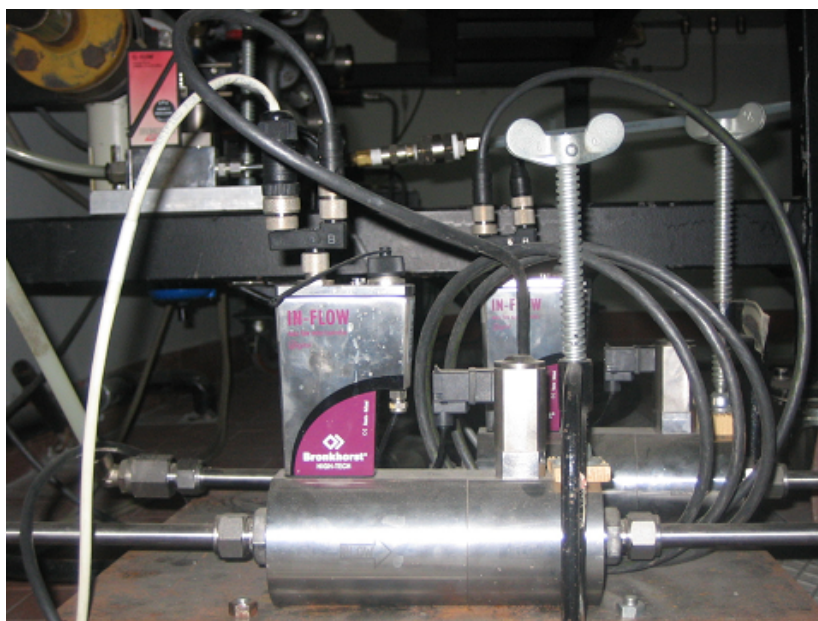


Figura 3.13: Regolatore di portata Bronkhorst

Il condotto dell'aria che alimenta l'inseminazione deve fare in modo che le particelle di inseminante rispettino le seguenti caratteristiche:

- le particelle devono seguire fedelmente il flusso;
- tutte le particelle devono riflettere la luce.

Le particelle vengono quindi ottenute tramite un nebulizzatore pneumatico ad aria compressa come quello riportato in figura (fig.3.14):



Figura 3.14: Sistema per nebulizzare ad aria compressa

L'olio viene inserito sul fondo del contenitore e viene richiamato verso l'alto dalla diminuzione di pressione causata dall'aria in ingresso che viene accelerata tramite un ugello sonico. L'olio passa attraverso un tubicino capillare che lo nebulizza nel momento in cui quest'ultimo viene in contatto con l'aria in ingresso. Le particelle nebulizzate hanno le dimensioni di 1-2 μm .

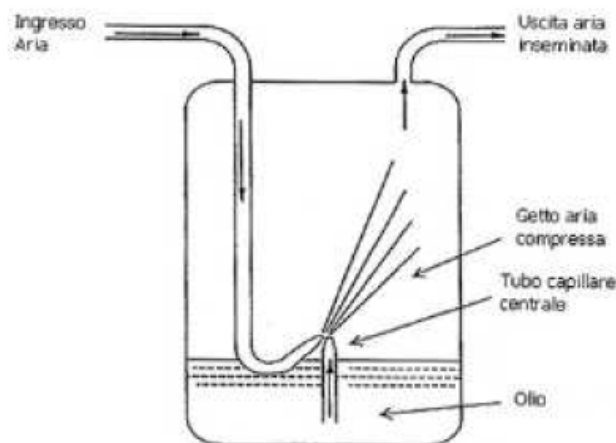


Figura 3.15: Schema di funzionamento del nebulizzatore

Il sistema ad aria compressa per la nebulizzazione delle goccioline di olio viene diviso in due rami a valle del regolatore di portata per eseguire alcuni esperimenti dove, oltre all'ingresso di insemminante direttamente nell'aria che alimenta l'ugello, si aggiungono due ingressi laterali direttamente in camera. Questo serve con la camera in plexiglass perché, avendo dimensioni maggiori alla prima tipologia di camera, risultava poco insemminata nelle regioni laterali.

Infine si utilizza la linea dell'acqua per raffreddare il laser: essa non richiede particolari valori di pressione e quindi si procede semplicemente ad aprire il rubinetto della

linea prima di eseguire le operazioni di accensione del laser, che per motivi di sicurezza deve rimanere al di sotto di una temperatura fissata.

3.4 Sistema di sincronizzazione

Il sistema di sincronizzazione è stato utilizzato per alcune prove eseguite per ottenere misure in fase con il fenomeno periodico del PVC ed ha lo scopo di misurare la frequenza caratteristica del fenomeno quasi periodico descritto come PVC, e permettere alla telecamera di acquisire immagini in fase con tale fenomeno. Per poter ottenere ciò è necessario avere:

- Microfono: il microfono acquisisce le oscillazioni periodiche di pressione che si manifestano con una frequenza ben definita nello spettro del segnale acustico, e le trasforma in segnale elettrico;



Figura 3.16: Microfono

- Filtro: il filtro è composto da due filtri, che possono essere usati collegati in cascata oppure escludendone uno dei due, e permettono di ricreare un filtro passa alto e un filtro passa basso, e quindi in definitiva un filtro passa banda; in questo modo è possibile pulire il segnale dalle frequenze che non interessano;



Figura 3.17: Filtro

- Oscilloscopio: questo strumento non agisce sul segnale ma permette di visualizzarlo e verificare l'andamento del segnale in frequenza;



Figura 3.18: Oscilloscopio

- Generatore di segnale TTL: questo apparecchio emette un segnale ogni volta che il segnale in frequenza, rappresentabile tramite una sinusoide, attraversa lo zero in fase discendente. Questo impulso viene convertito in segnale TTL, ossia un segnale che trasmette le informazioni tramite codice binario, e viene trasmesso al software che gestisce l'acquisizione delle immagini: la telecamera acquisisce quando riceve il segnale TTL.



Figura 3.19: Insieme di filtro (basso), generatore TTL (centro) e oscilloscopio (alto)

3.5 Sistema ottico

Il sistema ottico è formato dal laser e dalla telecamera.

3.5.1 Laser

Il laser è la sorgente utilizzata per generare i fasci di luce. Si tratta di un laser pulsato Quanta System a contenuto energetico pari a 200 mJ.



Figura 3.20: Laser Quanta System

Dal momento che la tecnica PIV richiede due impulsi laser per avere due frame che compongono ciascuna immagine, e che l'intervallo di tempo fra i due frame è dell'ordine dei micro-secondi, il laser è costituito da due cavità e due lampade. Con una singola cavità e una singola lampada difficilmente si possono garantire i due impulsi ravvicinati, in quanto la frequenza degli impulsi è legata al tempo di eccitazione della lampada.

I due fasci generati vengono condotti attraverso il medesimo cammino ottico grazie ad una serie di specchi, e vengono convertiti in una lunghezza d'onda nel campo del visibile pari a circa 532 nm. Infine i fasci vengono convertiti in una lama laser grazie ad una lente cilindrica, per illuminare bene la regione piana di interesse.

Il laser necessita di un sistema di raffreddamento: presenta un bacino d'acqua interno con uno scambiatore di calore e un ingresso per l'arrivo di acqua da una rete esterna.

Un parametro importante per il laser è il livello energetico, che viene impostato dall'utente in seguito ad un processo di ottimizzazione: bisogna mediare la

percentuale di inseminazione con l'intensità luminosa del raggio laser affinché l'immagine non risulti povera di particelle o troppo ricca, poco luminosa o troppo.

3.5.2 Telecamera

La telecamera rappresenta l'ottica di ricezione ed è caratterizzata da una videocamera Hamamatsu da 1344x1024 pixel con risoluzione 12 bit e obiettivo Nikkor Micro 60 mm, posizionata perpendicolarmente al piano illuminato dai fasci laser.

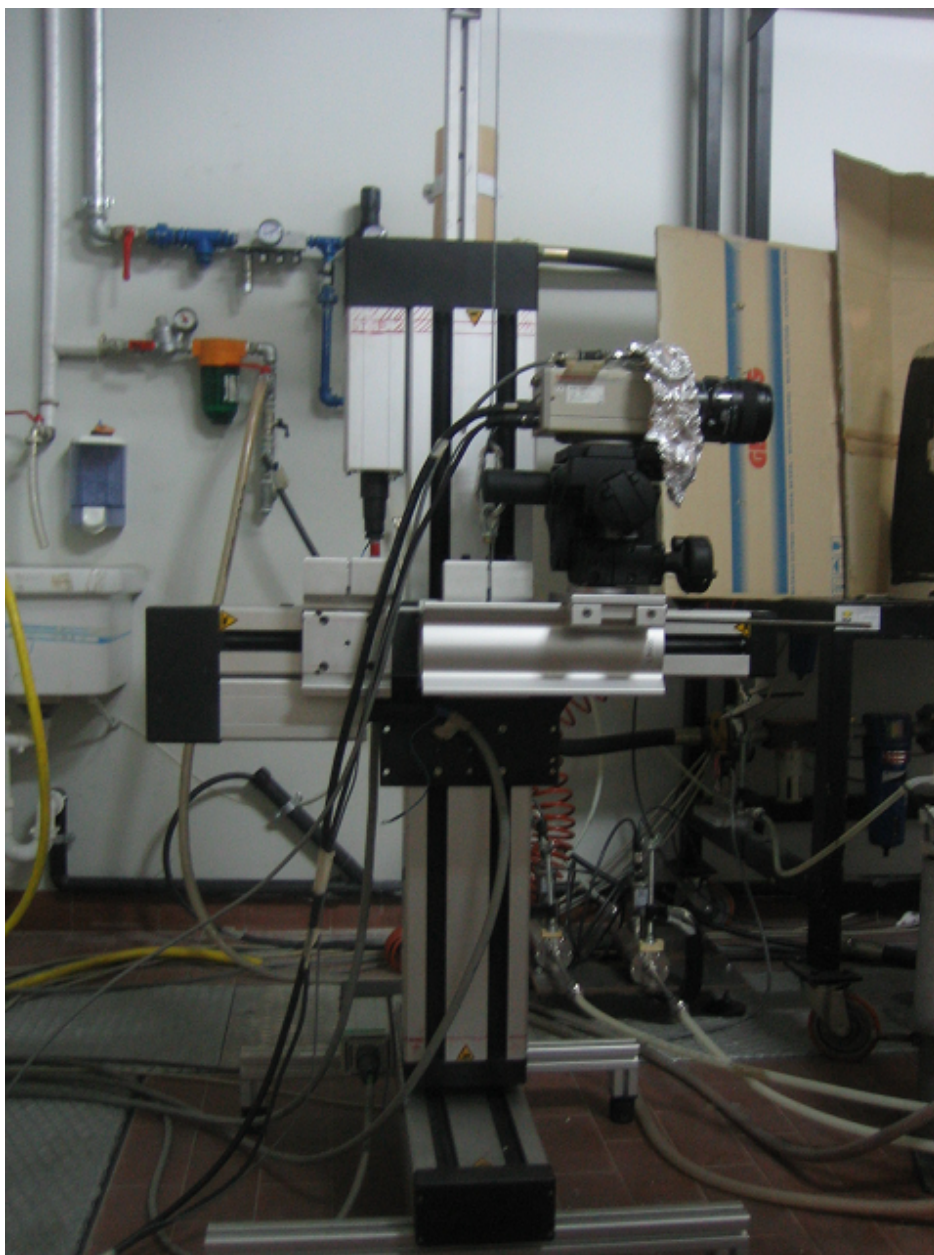


Figura 3.21: Telecamera

Il vero e proprio sistema ottico che acquisisce l'immagine è formato da una matrice di diodi che trasformano il segnale luminoso in segnale elettrico e da una matrice di celle di immagazzinamento in cui il segnale viene memorizzato in formato elettronico.

L'attivazione della matrice viene sincronizzato con i fasci laser tramite il sistema di acquisizione che coordina tutte gli elementi.

3.6 Sistema di acquisizione

Le immagini vengono acquisite tramite il programma DynamicStudio della Dantec, che permette sia di coordinare gli strumenti di acquisizione e sincronizzare la telecamera con gli impulsi laser, sia di salvare e post-processare i dati sottoforma di pixel.

La sincronizzazione fa in modo che il primo fascio laser venga attivato alla fine della prima finestra di acquisizione (primo frame) e il secondo appena la matrice di diodi viene riattivata (secondo frame), quindi all'inizio della seconda finestra di acquisizione. Inoltre è possibile stabilire il tempo fra i due frame, parametro che in caso di esperimenti a swirl nullo è stato impostato a $30 \mu s$ e in caso di esperimenti con elevato grado di swirl è stato ottimizzato, come si vedrà in seguito. Questo programma permette la calibrazione del campo visivo, tramite acquisizione di un'immagine di un provino di calibrazione a carta millimetrata illuminato tramite una normale lampada. In questo modo si ricava la calibrazione mm-pixel.

3.7 Sistema di analisi dati

Il programma DynamicStudio permette di post-processare i dati acquisiti, creare immagini medie e vettoriali, cross-correlare i frame e restituire una tabella con i valori di velocità alle diverse coordinate.

La sequenza logica delle operazioni da effettuare segue inizialmente un ordine pre-stabilito: le immagini acquisite vengono salvate, a queste immagini viene sottratto il background, ossia l'immagine fatta senza iniezione e senza flusso d'aria ma solo con il laser in funzione, per togliere parte delle impurità delle immagini; a questo punto è possibile effettuare la cross-correlazione fra i due frame di tutte le immagini, in particolare si adotta una correlazione adattiva; si ottengono così le mappe vettoriali corrispondenti a tutte le immagini ed è possibile effettuare la media di queste immagini vettoriali per averne una sola.

Ciascuna di queste operazioni può essere eseguita nuovamente fissando dei parametri diversi, e a queste operazioni se ne possono aggiungere altre per affinare l'elaborazione dei dati.

I parametri vengono fissati in modo tale da rispettare alcune richieste intrinseche del sistema PIV, a iniziare dalla scelta delle dimensioni massime e minime delle aree di interrogazione.

La dimensione massima dell'area di interrogazione deve essere tale da garantire:

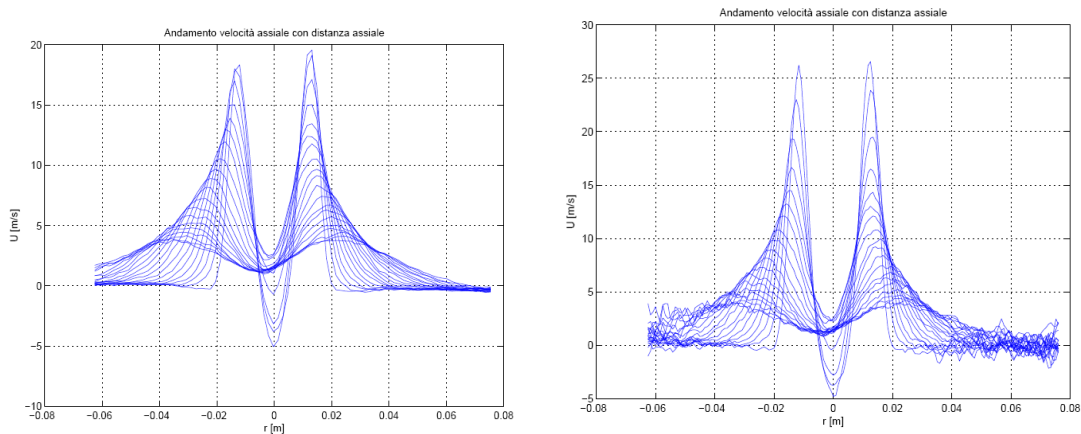
$$\left\| \frac{du}{u} \right\| < 0.2$$

La dimensione minima invece dipende dal valore massimo di velocità che ci si attende nel campo di moto. Per ottenere una buona correlazione infatti è necessario che la maggior parte delle particelle catturate nel primo frame non esca dall'immagine nel secondo frame, e quindi la dimensione minima viene stimata nel seguente modo:

$$L_{IA_{min}} = NSd_{pix} = 4U_{max}\Delta t$$

dove N è il numero di pixel che compongono ciascun lato dell'area di interrogazione, S è il rapporto di ingrandimento, d_{pix} è la distanza tra i centri dei pixel sul rilevatore della telecamera e Δt è l'intervallo di tempo fissato tra i due frame.

Per il campo di moto previsto per un flusso dotato di swirl come quello analizzato in questo lavoro, sono sufficienti aree di interrogazione che partono da 64x64 pixel e arrivano a 32x32 pixel. Con queste dimensioni si ottengono delle mappe vettoriali finali in cui i vettori velocità sono distanziati di circa 1.5 mm nelle due direzioni radiale e assiale. Dopo una breve analisi su un'immagine con aree di interrogazione finale pari a 16x16 pixel, si è concluso che le dimensioni ottimali per avere immagini con buona risoluzione e poco rumorose sono effettivamente pari a 32x32 pixel.



(a) *Andamento velocità assiale 32x32 pixel.*

(b) *Andamento velocità assiale 16x16 pixel.*

Figura 3.22: Confronto andamenti di velocità assiale 32x32 pixel-16x16 pixel.

In seguito è necessario stabilire dei criteri di validazione per rimuovere quei valori di velocità spuri che vengono rappresentati dai picchi più bassi presenti nella mappa di correlazione.

- altezza relativa del picco: il picco massimo si dovrebbe presentare come nettamente superiore ai picchi del rumore, ma è necessario stabilire un valore

minimo che ci deve essere fra il picco massimo e gli altri picchi:

$$\frac{\Phi_{max}}{\Phi} \geq k$$

dove k assume valore pari a 1.18.

- range validation: consiste nel rimuovere quei valori di velocità che sono al di sopra di un valore massimo che ci si può aspettare sulla base di esperimenti precedenti.

$$|v_{ax}| < v_{axlim}$$

$$|v_{rad}| < v_{radlim}$$

- moving average: il vettore velocità di un punto non deve scostarsi più di un valore prestabilito dalla media calcolata sui vettori velocità dei punti circostanti. Se tale valore viene superato il vettore in questione viene scartato:

$$\left| v(\vec{x}, y) - v(\vec{x}, y) \right| < lim$$

Se un vettore viene scartato, esso viene sostituito con la media dei vettori circostanti.

Infine si usa anche Matlab per continuare l'analisi dei dati, principalmente per leggere la tabella dei valori finali di velocità alle varie coordinate e calcolare i valori di portata alle diverse distanze dall'efflusso dell'ugello. Tali valori vengono calcolati tramite la formula:

$$\dot{m} = 2\pi \int U r dr$$

che viene approssimata numericamente tramite un'integrazione con il metodo dei trapezi.

Per le prove senza swirl e con swirl, senza misure in fase, è possibile supporre la simmetria del flusso e considerare solo metà profilo di velocità e quindi moltiplicare per 2π . Per le prove in presenza di PVC e con misure in fase, non è più possibile supporre l'assial-simmetria del flusso e quindi l'integrale viene diviso in due facendo partire il sistema di riferimento dal centro della zona di ricircolazione. Perdendo la simmetria non è possibile ricavare informazioni riguardo gli andamenti di velocità assiale nelle regioni al di fuori del piano di misura. La portata calcolata rappresenta quindi un'approssimazione che assume la velocità assiale uniforme sulla semi-corona circolare.

La portata calcolata rappresenta la somma della portata in ingresso con la portata catturata:

$$\dot{m} = M_{entrainment} + M_0$$

Si calcola quindi un parametro adimensionale ψ che rende più agevole l'interpretazione dei dati:

$$\psi = \frac{\dot{m}}{M_0} - 1 = \frac{M_{\text{entrainment}}}{M_0}$$

dove M_0 viene data in Nl/min e deve quindi essere corretta in base al valore di temperatura che si ha all'efflusso. La conversione da normal-litri a metri cubi passa infatti attraverso i Nm^3 che vengono definiti tali per una condizione di $T = 273.15K$:

$$M_0 = \frac{M_{0_{m^3}} (273.15 + T_{\text{vera}})}{273.15}$$

Un ultimo accorgimento riguarda lo zero relativo: i dati vengono analizzati a partire da una distanza assiale che non considera i primi 4 mm dall'ugello, che sono stati scartati perchè affetti da errori dovuti alle riflessioni sul piattello che circonda l'ugello; per questo motivo il primo valore di entrainment non risulta essere nullo. Dei dati relativi ai primi 4 mm si calcola quindi la portata ed essa viene presa come zero di riferimento.

Capitolo 4

Prove sperimentali senza swirl

Le prime prove effettuate con l'apparato sperimentale descritto vengono eseguite per un caso di swirl nullo e $Re = 30700$ e quindi una portata nominale di ingresso pari a $500\text{Nl}/\text{min}$ in direzione solo assiale.

Lo scopo di queste prove è testare la qualità dell'apparato sperimentale riproducendo prove già eseguite in esperimenti presenti in letteratura e confrontarne quindi i risultati e verificare se è preferibile eseguire tutte le prove con camera di combustione chiusa tramite la cappa o aperta nella parte superiore.

Il campo di moto che viene investigato in questi esperimenti, sia senza swirl sia con swirl, si trova nella regione iniziale, vicino all'ugello, per studiare il comportamento a pochi diametri di distanza dall'efflusso. Di conseguenza il confronto di queste prove a swirl nullo con le prove del lavoro di Park and Shin [4] riguarda sia i valori raggiunti dall'entrainment rate alle medesime distanze assiali, sia l'andamento della relativa curva, che dovrebbe essere poco lineare nella regione vicino all'efflusso.

4.1 Prove sperimentali senza cappa

Le prove senza cappa vengono eseguite con la parte superiore della camera di combustione metallica aperta. I parametri che non vengono fissati nel sistema di acquisizione devono essere ottimizzati su ogni singolo esperimento e quindi la condizione in cui si trova la camera di combustione in questo esperimento influenza il processo di ottimizzazione, soprattutto nella scelta della percentuale di insemnante da inserire. La quantità di insemnante inserito influisce sulla regolazione del laser per evitare di avere un piano esageratamente luminoso. Infine i valori di velocità attesi e la loro distribuzione nel campo di moto influiscono sulla scelta dell'intervallo di tempo fra i due frame. I valori attesi non superano i $30\text{m}/\text{s}$ e sono tutti diretti in direzione assiale.

I parametri vengono quindi ottimizzati nel seguente modo:

- % insemiante= 18% F.S.;
- regolazione laser=650;
- t fra i due frame=30 μ s

Si riportano di seguito (fig.4.1 e fig.4.2) i risultati della prova: le velocità assiali vengono calcolate mediando i valori contenuti in 3 righe (corrispondenti a 3 quote consecutive distanziate di 1.6 mm) consecutive della matrice delle velocità restituita dal software di acquisizione ed elaborazione e l'entrainment rate viene calcolato considerando la correzione della portata entrante per una temperatura effettiva all'efflusso di 15°.

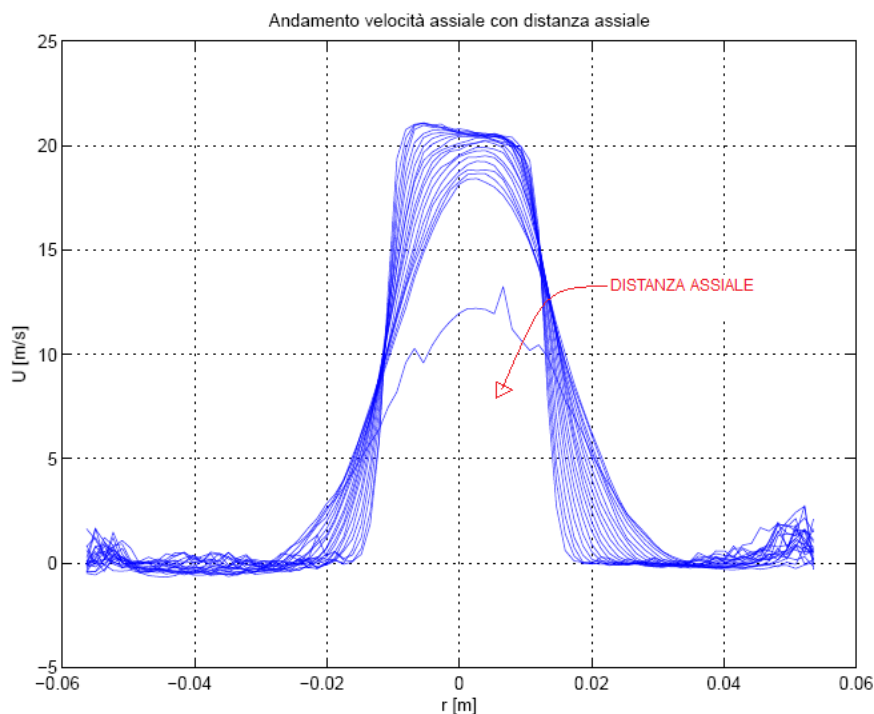


Figura 4.1: Andamento di velocità assiale

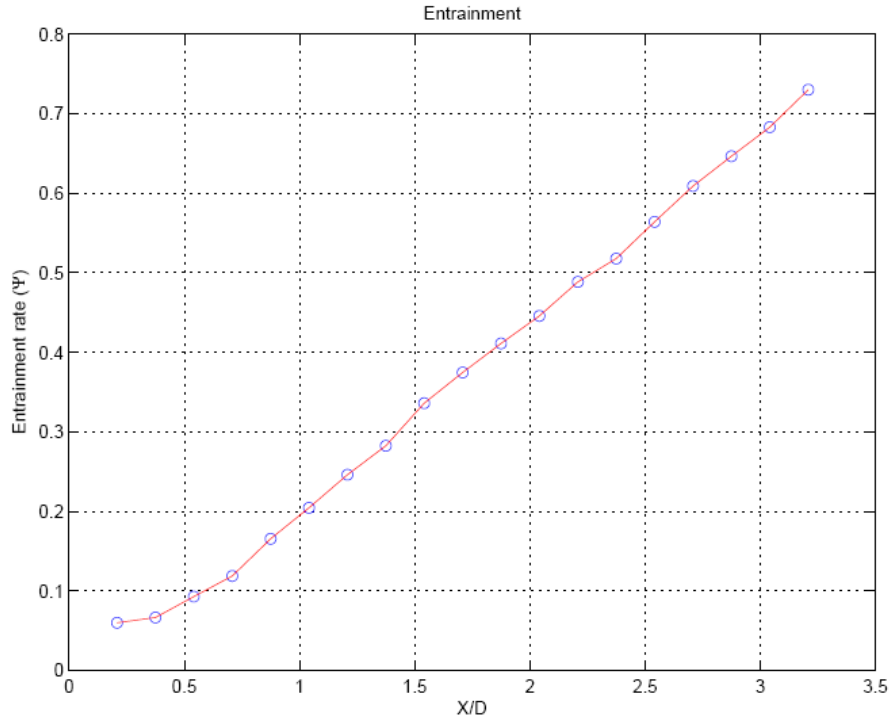


Figura 4.2: Entrainment rate

Si riporta (fig.4.3) anche la mappa vettoriale del flusso, nella quale si può notare come il flusso sia completamente chiuso e confinato intorno all'asse dell'ugello:

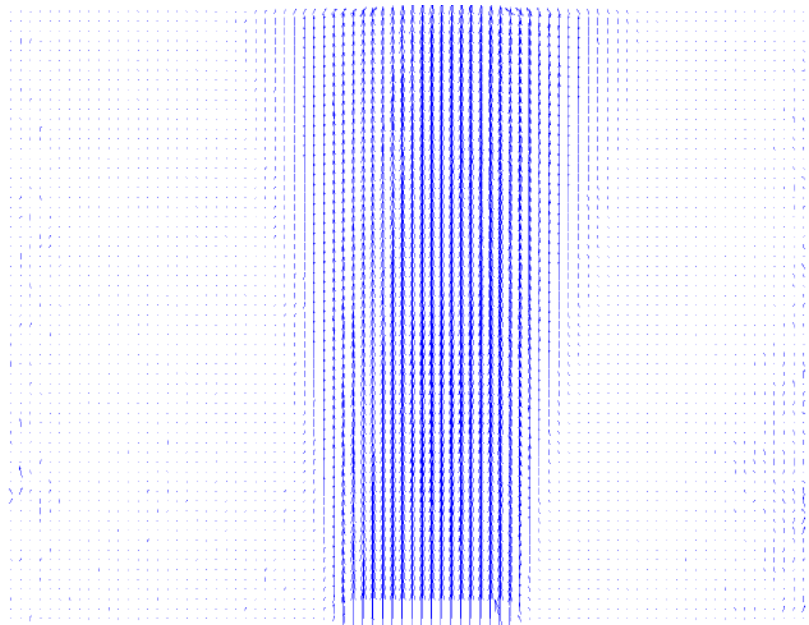


Figura 4.3: Mappa vettoriale flusso in camera senza cappa

Per quanto riguarda l'andamento della velocità assiale con l'aumentare della distanza assiale dall'ugello si nota che il profilo assunto è assimilabile ad un profilo top-hat come da aspettativa e si nota anche una diminuzione dei valori massimi

contenuta nell'ordine dei $3m/s$. Il profilo che si abbassa di più è quello relativo alla massima distanza assiale e viene scartato in quanto affetto da errori generati da problemi ottici e di insemminazione nella zona fra la parte superiore della finestra ottica e l'inizio della parte metallica della camera di combustione.

Per quanto riguarda l'entrainment rate si nota una decisa non linearità molto vicino all'efflusso e un andamento che si linearizza allontanandosi.

Confrontando tale andamento con il lavoro di Hill ([2]) si trova che la linearità della curva viene raggiunta per valori di X/D inferiori rispetto a quanto teorizzato da Hill.

Risulta preferibile effettuare un confronto con un lavoro più recente, prendendo in esame l'esperimento di Park and Shin ([4]), anche se effettuato con tecniche di misura Schlieren meno moderne di quelle utilizzate nel presente lavoro e in ambiente non confinato.

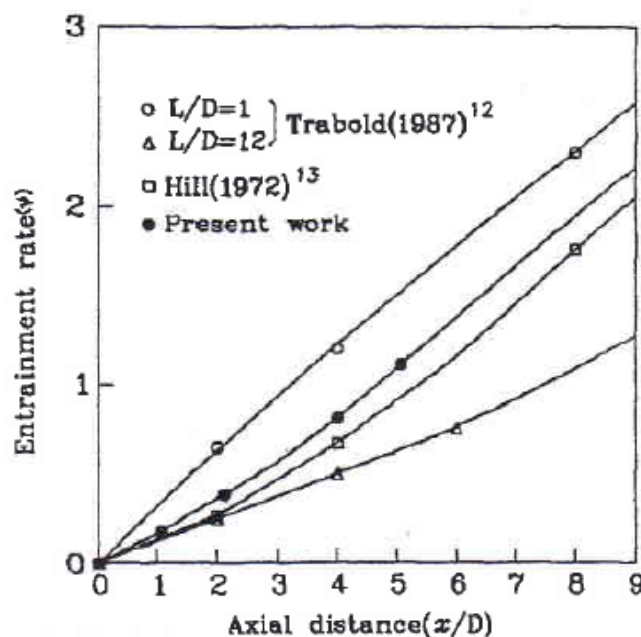


Figura 4.4: Lavoro di Park and Shin

Si nota un ottimo accordo fra i due risultati, sia in termini di andamento sia in termini di valori raggiunti dall'entrainment rate alle medesime distanze assiali vicine all'ugello.

Si può quindi concludere che il presente apparato sperimentale senza la cappa della camera di combustione produce risultati accettabili e può quindi essere utilizzato, tenendo presente che risulterà necessaria una seconda verifica di funzionalità per gli esperimenti a elevato grado di swirl.

4.2 Prove sperimentali con cappa

Le prove con presenza di cappa vengono eseguite con la camera di combustione metallica parzialmente chiusa nella sua parte superiore. Anche in questo caso è necessario ottimizzare i parametri della prova, soprattutto ipotizzando che nelle prove con la cappa le particelle di insemillante rimangano più confinate dentro al campo di misura. Per questo motivo l'ottimizzazione viaggia nella direzione di diminuire la percentuale di insemillante, aumentando eventualmente la regolazione del laser. I parametri risultano settati nel seguente modo:

- % insemillante= 9% F.S.;
- regolazione laser=700;
- t fra i due frame=30 μ s

Non è stato cambiato il tempo fra i due frame in quanto non ci aspetta una variazione considerevole sui valori di velocità.

Si riportano di seguito (fig.4.5 e fig.4.6) i grafici di velocità assiale e di entrainment rate per l'esperimento con cappa. La temperatura misurata per la correzione dei normal litri è pari a 15°.

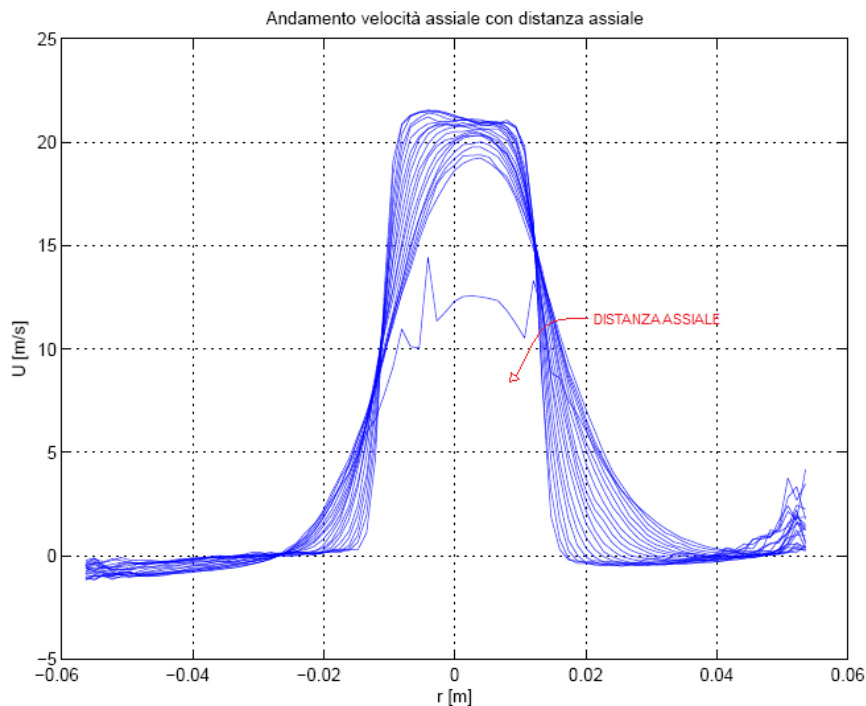


Figura 4.5: Andamento di velocità assiale con cappa

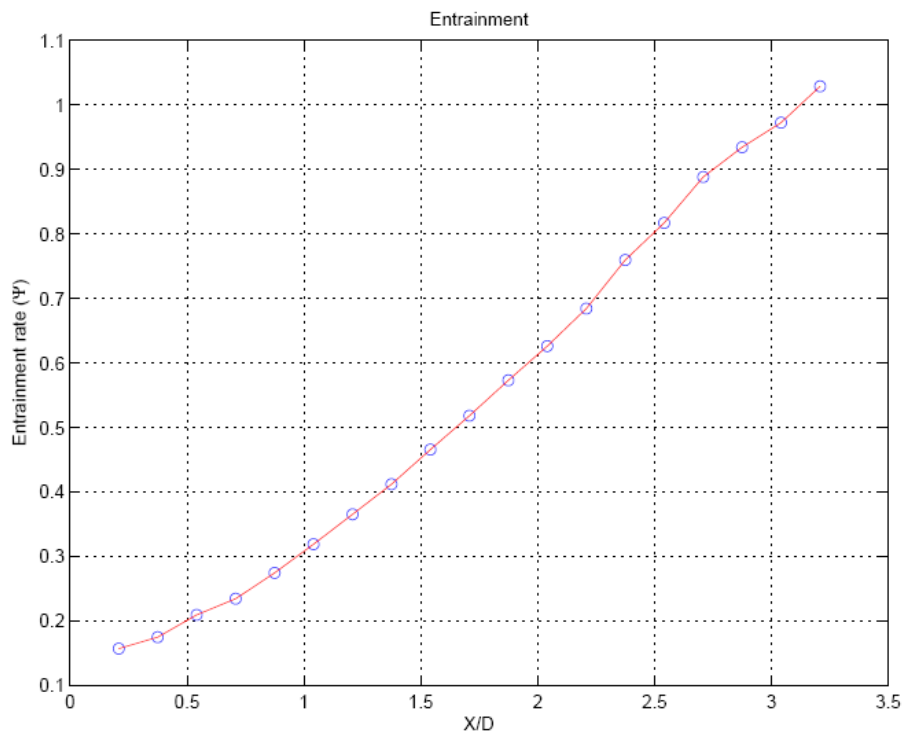


Figura 4.6: Entrainment rate con cappa

Anche in questo caso si riporta (fig.4.7) la mappa vettoriale del flusso, che si presenta confinato nella regione attorno all'asse dell'ugello.

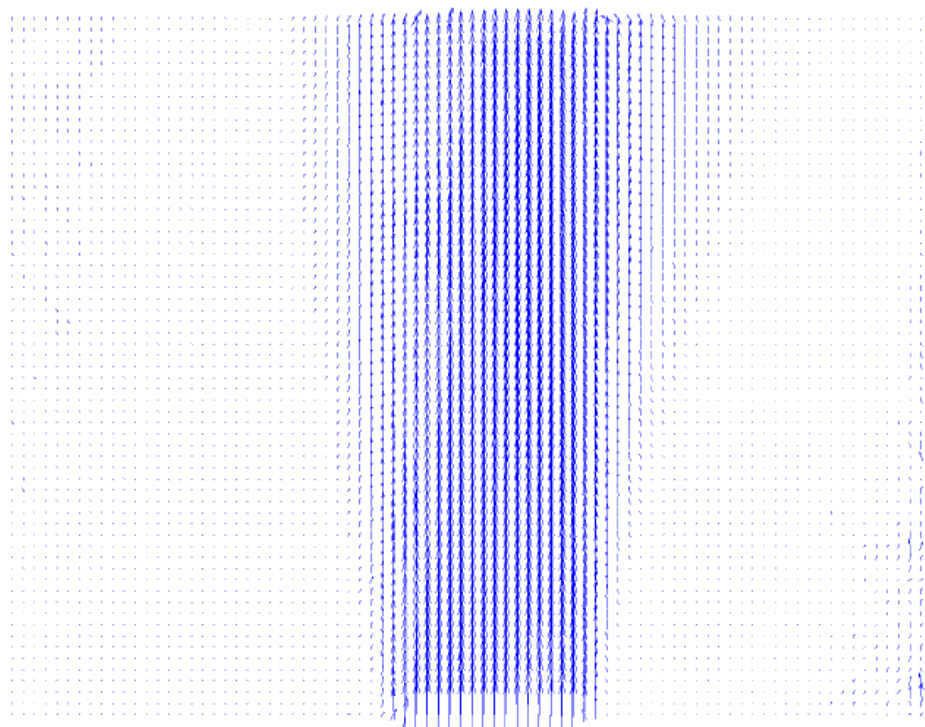


Figura 4.7: Mappa vettoriale del flusso nella camera con cappa

Si può notare che l'entrainment rate nel caso di camera di combustione chiusa risulta essere maggiore rispetto al caso senza cappa. Una regione maggiormente confinata facilita il risucchio di aria in senso radiale, promuovendo la miscelazione dell'aria con quanto viene iniettato.

Anche questi risultati possono essere confrontati con quelli ottenuto da Park and Shin ([4]), ritrovando nuovamente un buon accordo fra i due lavori.

In conclusione l'iniezione in camera di combustione a swirl nullo risulta essere più efficiente per camere chiuse e quindi in ambienti maggiormente confinati.

Si riporta infine il confronto fra la portata che viene calcolata come zero relativo e la portata che viene data in ingresso dai flussimetri:

M_0 [m^3/s]	m_0 senza cappa [m^3/s]	m_0 con cappa [m^3/s]
0.0083	0.0118	0.0108

Tabella 4.1: Confronto portate

Le portate calcolate nei primi 4 mm dall'efflusso, considerate come zero relativo, sono in buon accordo con la portata che viene data in ingresso dai flussimetri. Questo è indice della correttezza delle misure effettuate ed elaborate in queste prove.

Capitolo 5

Prove sperimentali con swirl: prima configurazione

Lo scopo delle prove sperimentali effettuate impartendo un moto di swirl al flusso, è quello di visualizzare e analizzare l'entrainment rate nella regione vicina all'efflusso, in particolare facendo variare il numero di swirl per poter cogliere anche il momento di formazione del vortex breakdown.

Con le prove senza swirl si è sperimentata la bontà dell'apparato sperimentale, convalidando il corretto funzionamento dell'apparato bruciatore e verificando gli andamenti dell'entrainment a seconda del livello di confinamento imposto alla camera di combustione.

Anche in questo caso le prove sarebbero dovute essere effettuate senza cappa e con cappa, ma alla fine delle prove senza cappa sono emerse alcune problematiche, descritte più avanti, che hanno portato all'abbandono della camera di combustione metallica a favore di quella con le pareti in plexiglass, con cui in pratica si realizza una configurazione non confinata.

5.1 Ottimizzazione

Tutte le prove considerate valide, sia per il caso non swirlato sia per quello swirlato, sono state precedute da una fase di ottimizzazione dei parametri. Sono state quindi effettuate prove complete per ciascuna variazione dei parametri del sistema di acquisizione e del laser, e per ciascuna prova è stata valutata la qualità delle immagini.

Solo dopo aver ottenuto un'ottimizzazione soddisfacente si è potuto eseguire un insieme di prove al variare del numero di swirl che risultarono valide per l'analisi del campo di moto.

Il parametro di cui si è tenuto conto per studiare la qualità delle immagini è stato il numero di vettori sostituiti nella correlazione adattiva. Come spiegato

in precedenza, la correlazione adattiva tiene conto di alcuni criteri di validazione che, se non soddisfatti, portano alla sostituzione del vettore velocità in esame. Se il numero di sostituiti è compreso fra il 10% e il 20%, le immagini sono ritenute accettabili, ma al di sopra di questa soglia si ritiene che la qualità della mappa non sia accettabile.

Questo concetto può essere anche espresso visivamente effettuando una media di tutte le mappe vettoriali per ottenere il campo di moto medio: se questa operazione viene eseguita senza considerare i sostituiti, si può notare un campo di moto molto disturbato ma che rappresenta maggiormente la realtà dell'esperimento; al contrario se la media viene eseguita considerando anche i sostituiti, si ottiene un campo di moto abbastanza regolare in quanto i sostituiti sono dei vettori che mediano i valori dei vettori circostanti.

La prima tipologia di media quindi offre un riscontro visivo riguardo la qualità dell'immagine del campo di moto ed è quella utilizzata per le prove in fase di ottimizzazione. La seconda tipologia viene invece utilizzata per le prove già ottimizzate per due motivi:

- la mappa vettoriale media con i sostituiti non si discosta molto da quella effettuata senza sostituiti quando tutti i parametri sono ottimizzati al meglio;
- la sua maggiore regolarità la rende più adatta ad analisi tramite software esterni;

Le prove di ottimizzazione vengono tutte effettuate per flusso al più alto grado di swirl. Con il sistema di misura PIV utilizzato effettivamente non è possibile calcolare il numero di swirl in quanto non si ha a disposizione la velocità tangenziale del campo di moto. Per questo motivo si fa riferimento al lavoro di Tesi di Martinelli ([19]) in cui si riportano i valori di portata assiale e tangenziale da inserire nel flusso per avere un determinato numero di swirl ad un determinato Reynolds.

Il grado di swirl massimo impartito al flusso per due Reynolds del valore di 30700 e 24400 è pari a 1.47 e 1.5 rispettivamente.

Si riportano quindi i risultati delle varie ottimizzazioni per il Reynolds pari a 30700 e numero di swirl pari a 1.47. Dal valore del Reynolds si ricava la portata totale da inserire:

$$Re = \frac{UD_{ugello}}{\nu}$$

dove

$$U = \frac{\dot{m}_{tot}}{\rho A}$$

e

$$A = \frac{\pi}{4} D_{ugello}^2$$

In tabella si riportano i valori da inserire e il valore di portata ottenuto:

$\rho(T = 0^\circ C)$	1.2939 Kg/m^3
ν	$14.35 * 10^{-6} m^2/s$
D_{ugello}	24 mm
Q_{tot}	500 Nl/min

Tabella 5.1: Portata totale a Re 30700

Dal numero di Reynolds si ricava quindi U, da cui si ricava m_{tot} conoscendo la viscosità cinematica e la densità dell'aria a temperatura pari a $0^\circ C$. Viene preso il valore a temperatura pari a $0^\circ C$ in quanto il sistema permette di inserire una portata in camera espressa in Nl/min e i normal-litri sono riferiti ad una condizione standard di temperatura di $0^\circ C$. Ottenuta quindi la portata in Kg/s si converte facilmente in Nl/min .

I valori di portata assiale e tangenziale per avere quel determinato grado di swirl sono:

$$Q_{ax} = 88 Nl/min$$

e

$$Q_{tg} = 402 Nl/min$$

Si nota che la somma delle due è inferiore alla portata totale effettiva, di 500 Nl/min per Reynolds 30700. Nel calcolo totale deve essere considerata anche la percentuale di insemiante, che rappresenta una portata che si aggiunge alle portate assiale e tangenziale. La percentuale di insemiante viene posta pari al 10% del fondo scala del regolatore di portata, pari a 50 Nl/min .

Tale ottimizzazione risulta essere valida anche per le prove a Reynolds pari 24400.

5.1.1 Prove sperimentali di ottimizzazione

Si riportano di seguito le prove eseguite per ottimizzare i parametri del sistema di acquisizione e del laser, partendo da una prima prova che ripropone i parametri della prova a swirl nullo senza cappa.

– prova 1: i parametri sono settati nel seguente modo:

- * regolazione laser=650;
- * t fra i due frame=30 μs

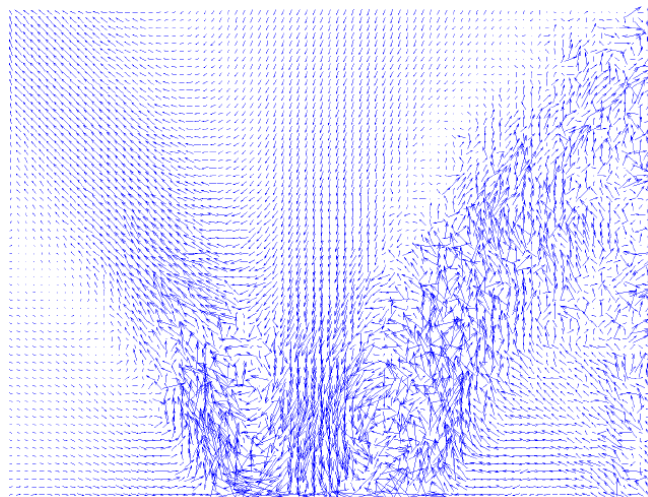


Figura 5.1: Mappa vettoriale prima prova di ottimizzazione

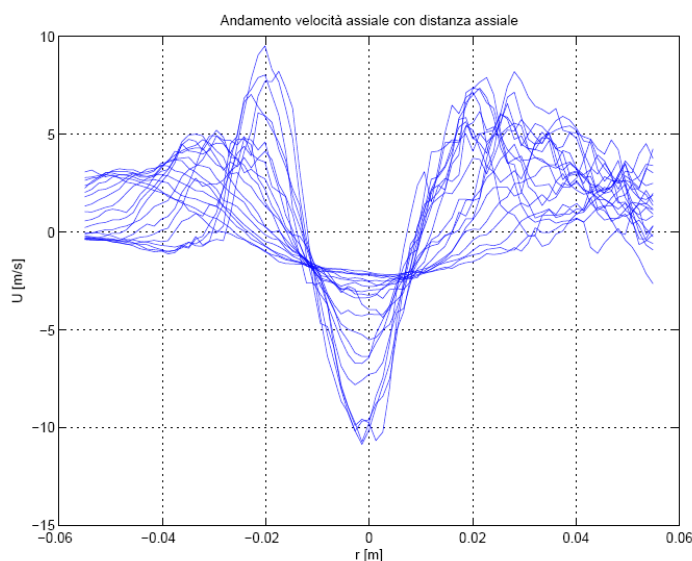


Figura 5.2: Andamento velocità assiale prima prova di ottimizzazione

In questa prima prova il numero di vettori sostituiti, che quindi non hanno passato i criteri di validazione, è pari a circa 3000 su 5229, quindi il 57%. La mappa vettoriale risulta visibilmente irregolare, sia nella zona vicino all'efflusso, sia per tutto il ramo del getto nella parte destra dell'immagine. Tale irregolarità è visibile anche nelle mappe di velocità assiali, i cui andamenti non sono accettabili. Nonostante si riesca a notare che vi è un'ampia zona centrale di ricircolazione con velocità assiale negativa, tipica dei flussi swirlati, l'andamento risulta in generale troppo irregolare.

– prova 2: i parametri sono settati nel seguente modo:

- * regolazione laser=700;
- * t fra i due frame=30 μs

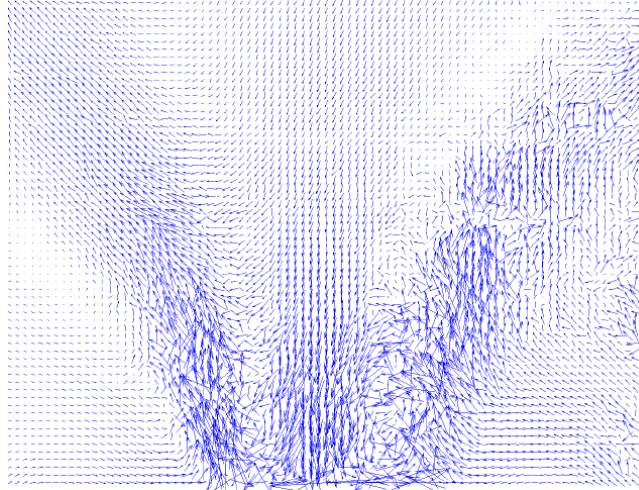


Figura 5.3: Mappa vettoriale seconda prova di ottimizzazione

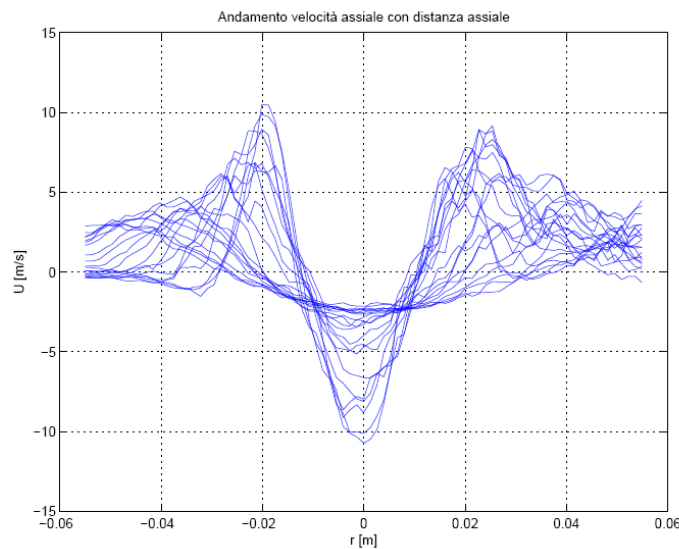


Figura 5.4: Andamento velocità assiale seconda prova di ottimizzazione

In questa prova è stata aumentata l'energia degli impulsi del laser, per avere un piano di misura illuminato meglio. Le mappe vettoriali risultano comunque molto irregolari, con un numero di sostituiti pari a circa 2600, quindi il 49.7% del totale. L'immagine risulta migliorata rispetto al caso precedente e si può pensare che sia comunque preferibile tenere più alta la regolazione del laser.

Questo accorgimento non permette di ritenere accettabile la prova, in quanto l'andamento delle velocità assiali è ancora troppo irregolare.

– prova 3: i parametri sono settati nel seguente modo:

- * regolazione laser=700;
- * t fra i due frame=10 μs

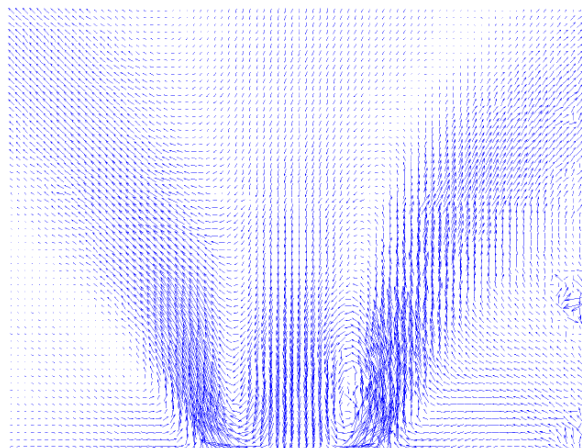


Figura 5.5: Mappa vettoriale terza prova di ottimizzazione

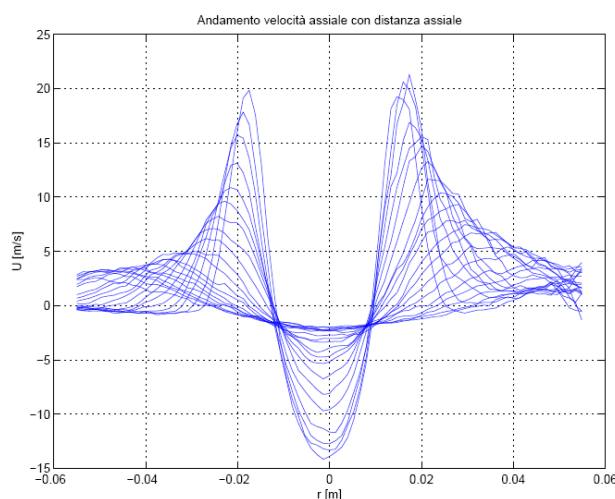


Figura 5.6: Andamento velocità assiale terza prova di ottimizzazione

In questa prova è stato cambiato l'intervallo di tempo fra i due frame. Rispetto al caso non swirlato in cui le particelle erano più facilmente catturabili in entrambi i frame in quanto il campo di moto era molto regolare e in una sola direzione, con flusso swirlato le particelle si possono spostare in direzione perpendicolare al piano della lama laser per effetto della rotazione del flusso e uscire dall'area di interrogazione tra un frame e l'altro. Risulta indispensabile diminuire l'intervallo di tempo: il numero di sostituiti scende a circa 1200, quindi il 23% del totale, e la mappa vettoriale è molto più regolare e la zona di ricircolazione centrale è ben visibile. Nonostante ciò il numero di sostituiti è ancora ad di sopra della soglia accettabile e si prosegue con ulteriori prove.

– prova 4: i parametri sono settati nel seguente modo:

- * regolazione laser=700;
- * t fra i due frame=5 μs

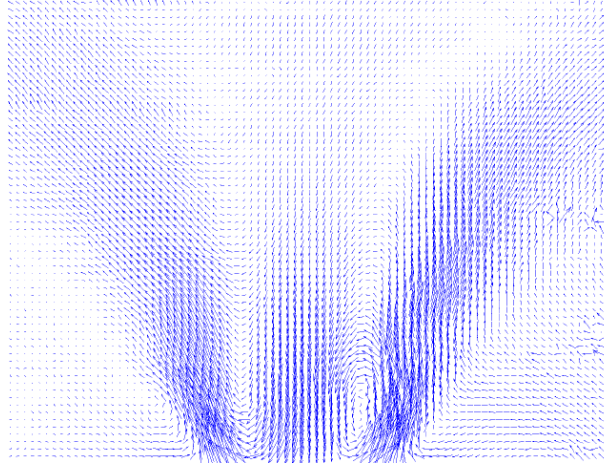


Figura 5.7: Mappa vettoriale quarta prova di ottimizzazione

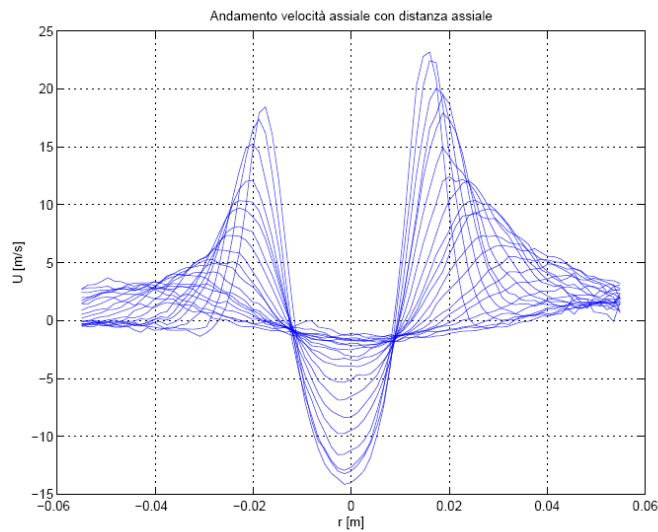


Figura 5.8: Andamento velocità assiale quarta prova di ottimizzazione

In questa prova si è deciso di diminuire ulteriormente il tempo fra i due frame, portandolo a 5 μs . Il numero dei vettori sostituiti cala ulteriormente, attestandosi a circa 1000, ossia il 19% del totale.

La regolarità della mappa vettoriale non è visibilmente diversa rispetto alla prova precedente ma nell'andamento della velocità assiale si nota una leggera asimmetria fra i due picchi che nella prova precedente non compariva. Si preferisce quindi svolgere ancora una prova tenendo fisso il tempo fra i due frame, sia perchè pare ben ottimizzato, sia perchè non è possibile scendere al di sotto di tale valore, e si aumenta l'energia degli impulsi del laser.

– prova 5: i parametri sono settati nel seguente modo:

- * regolazione laser=750 MW;
- * t fra i due frame=5 μ s

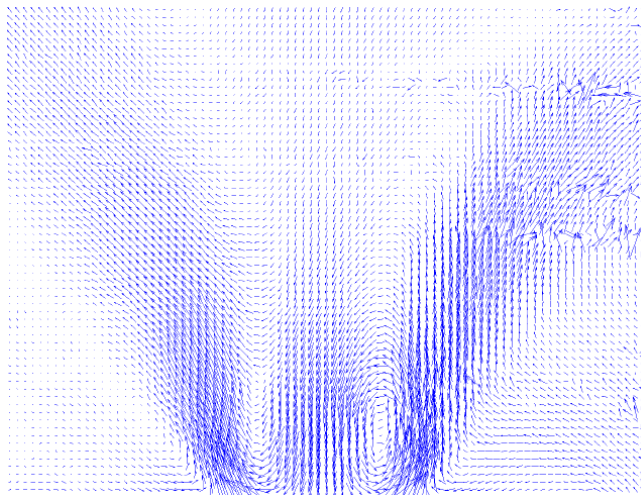


Figura 5.9: Mappa vettoriale quinta prova di ottimizzazione

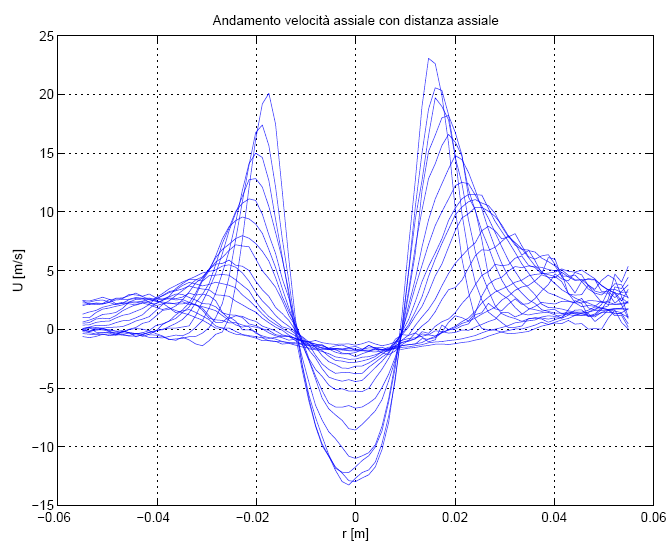


Figura 5.10: Andamento velocità assiale quinta prova di ottimizzazione

I risultati ottenuti da questa prova non sono soddisfacenti in quanto aumenta leggermente il numero di sostituiti, portandosi a 1100 (21% del totale), e compaiono anche delle irregolarità nella mappa vettoriale, che si riflettono sull'andamento della velocità assiale e non eliminano il problema della differenza fra i due picchi.

Queste irregolarità si presentano lungo delle linee quasi perfettamente orizzontali: questo fa pensare che il problema non nasca da una cattiva ottimizzazione dei parametri ma da una distorsione del fascio laser dovuta a deposito di goccioline d'olio sulla finestra ottica attraverso cui passa il fascio.

Questa conclusione può essere confermata dalle immagini acquisite:

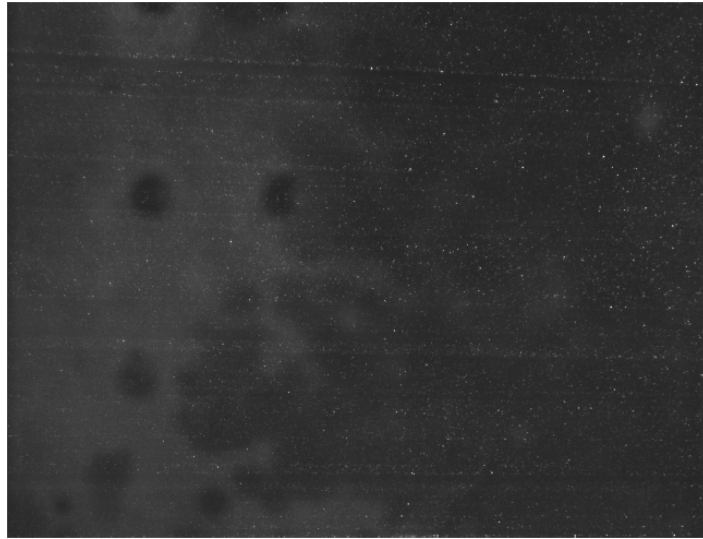
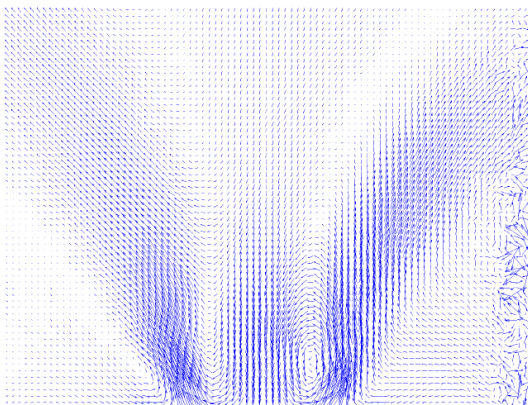


Figura 5.11: Esempio di immagine acquisita per la quinta prova di ottimizzazione

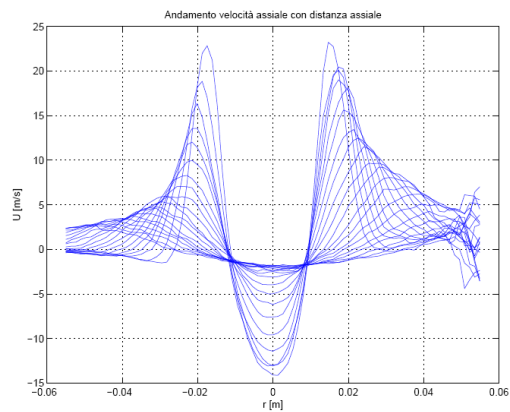
Si decide di svolgere un'altra prova con i medesimi parametri, preceduta dalla pulizia della finestra, che risultava effettivamente intrisa di particelle di olio insemiante.

– prova 6: i parametri sono settati nel seguente modo:

- * regolazione laser=750;
- * t fra i due frame=5 μs
- * pulizia finestre



(a) Mappa vettoriale sesta prova di ottimizzazione.



(b) Andamento velocità assiale sesta prova di ottimizzazione.

Figura 5.12: Risultati per l'ottimizzazione finale

Questa prova dimostra quanto sia importante tenere pulite le finestre di ingresso ottico: i sostituiti scendono a circa 700, ossia il 13% del totale, e quindi numero accettabile per considerare le prove valide.

Spariscono le irregolarità orizzontali e il campo di moto effettivo risulta ben regolare, anche se compaiono delle irregolarità nell'estremo destro dell'immagine, che si riflettono in una oscillazione della velocità assiale ad una estremità. Questo andamento non risulta problematico, in quanto l'estremo sinistro risulta regolare e quindi eventualmente è possibile scegliere la metà sinistra per calcolare la portata e poi raddoppiarla supponendo la simmetria del flusso.

Prova	Laser	t [μs]	pulizia	% <i>sostituiti</i>
1	650	30	no	57%
2	700	30	no	49.7%
3	700	10	no	23%
4	700	5	no	19%
5	750	5	no	21%
6	750	5	si	13%

Tabella 5.2: Parametri di ottimizzazione

I parametri vengono quindi ottimizzati nel seguente modo:

- regolazione laser=700;
- $t = 5[\mu s]$
- frequente pulizia delle finestre.

5.2 Prove al variare del numero di swirl

Queste prove partono dal grado di swirl più elevato per entrambi i Reynolds e proseguono facendo decrescere il grado di swirl, ossia aumentando la portata assiale in ingresso e diminuendo quella tangenziale, in modo tale che la somma delle due rimanga costante e venga conservato il Reynolds a cui si sta lavorando.

Dal momento che il sistema di misurazione PIV che si utilizza non è in grado di restituire il numero di swirl, si decide per una variazione arbitraria di 50 Nl/min per volta delle portate. Le visualizzazioni vettoriali del campo di moto permettono di capire qualitativamente in quale regime di swirl il flusso si trovi ad essere e in questo modo si riesce a cogliere il passaggio del vortex breakdown se si notano dei punti in cui la velocità assiale si annulla o quasi. A numeri di swirl decrescenti, quando ci si trova a vortex breakdown avvenuto il flusso è molto aperto con un'evidente zona di velocità assiale negativa attorno all'asse dell'ugello; quando ci si trova in assenza di vortex breakdown il flusso si presenta chiuso e scompare

la zona di ricircolazione centrale. Nel caso in cui si noti una forte differenza fra i campi di moto di una prova e la seguente, ossia con un passaggio netto da flusso con zona di ricircolazione e flusso senza, vengono eseguite delle prove a valori di portata intermedi per meglio analizzare la fase di transizione.

5.2.1 Prove a $Re=30700$

Le prove a Reynolds pari a 30700 prevedono una portata totale pari a 500 Nl/min, che viene suddivisa in assiale e tangenziale:

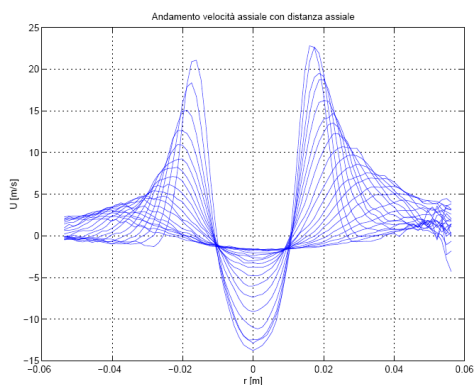
N° prova	$Q_{ax}[Nl/min]$	$Q_{tg}[Nl/min]$	S
1	88	402	$S = 1.47$
2	138	352	$S = 1.29$
3	188	302	$S = 1.1$
4	238	252	$S = 0.92$
5	288	202	$S = 0.74$
6	338	152	$S_{critico} = 0.56$
7	348	142	$S = 0.52$
8	363	127	$S = 0.46$
9	388	102	$S = 0.37$

Tabella 5.3: Variazione di portata assiale e tangenziale a Re 30700

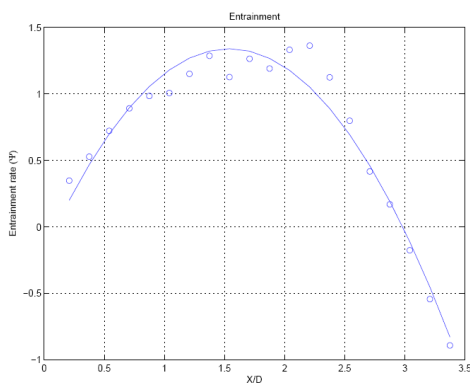
Si identifica con valore di swirl critico la prova per cui è possibile verificare che si sia innestato il fenomeno del vortex breakdown. Di queste prove era noto il valore di swirl massimo ([19]) e ovviamente il grado di swirl nullo. Nonostante dalle misure PIV di questo lavoro non era possibile calcolare il numero di swirl, ma è noto che esso varia quasi linearmente con la variazione delle portate, è stato possibile calcolare in maniera approssimativa i valori di swirl di tutte le prove.

Si riportano quindi i risultati delle prove in termini di velocità assiale ed entrainment rate per alcune delle prove descritte in tabella, ricordando che il set dei parametri corrisponde a quello trovato con l'analisi di ottimizzazione, cambiando solo l'intervallo di tempo fra i due frame quando lo swirl è molto basso, in quanto tale parametro è legato alla possibilità che una particella esca dall'area di interrogazione fra un frame e l'altro e ciò è più probabile a swirl alti. Le prove riportate sono le più significative, le altre, qualitativamente simili ai risultati riportati di seguito, si trovano in appendice.

– Prova 1



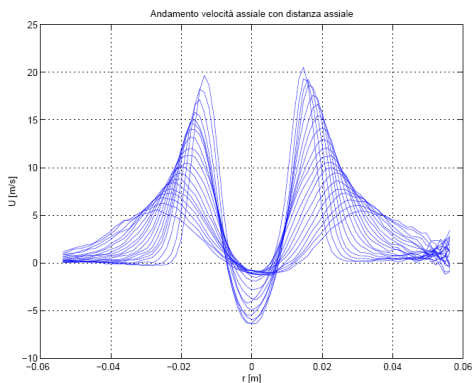
(a) *Andamento velocità assiale.*



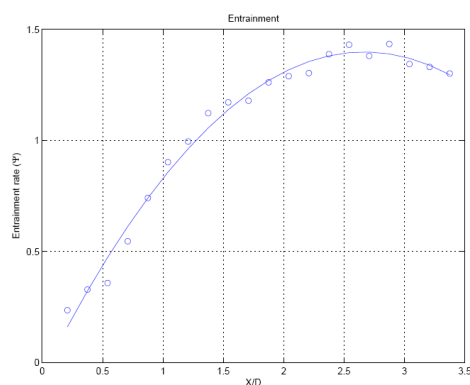
(b) *Entrainment rate.*

Figura 5.13: Risultati prova 1 Re 30700

– Prova 5



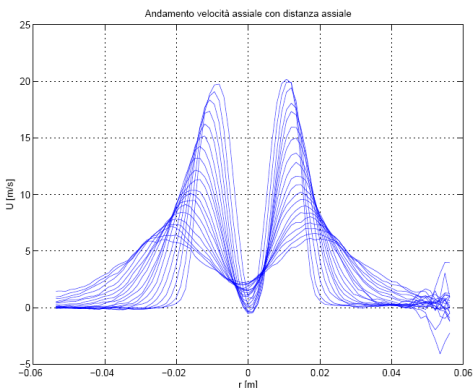
(a) *Andamento velocità assiale.*



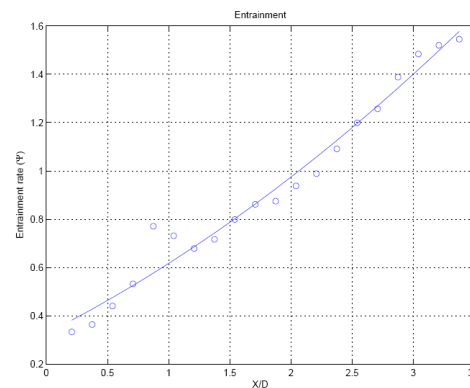
(b) *Entrainment rate.*

Figura 5.14: Risultati prova 5 Re 30700

– Prova 6



(a) *Andamento velocità assiale.*



(b) *Entrainment rate.*

Figura 5.15: Risultati prova 6 Re 30700

– Prova 7

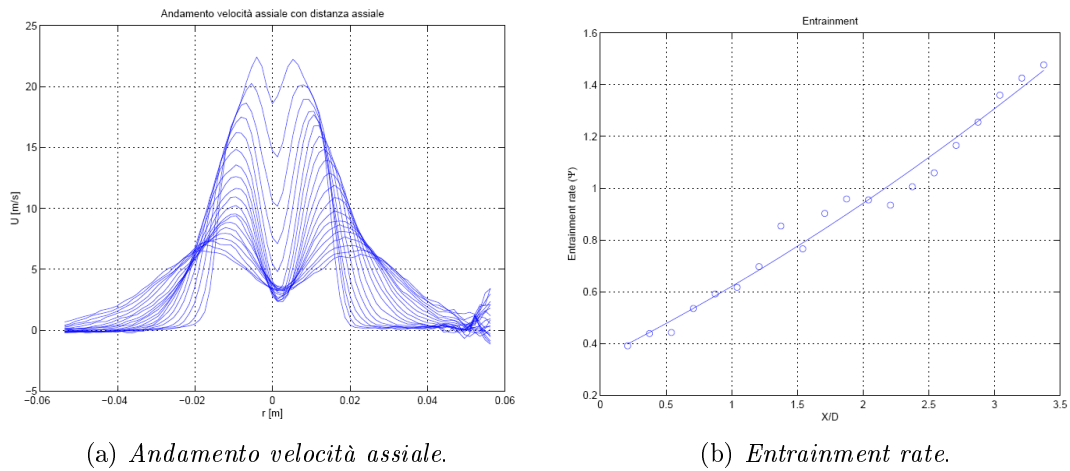


Figura 5.16: Risultati prova 7 Re 30700

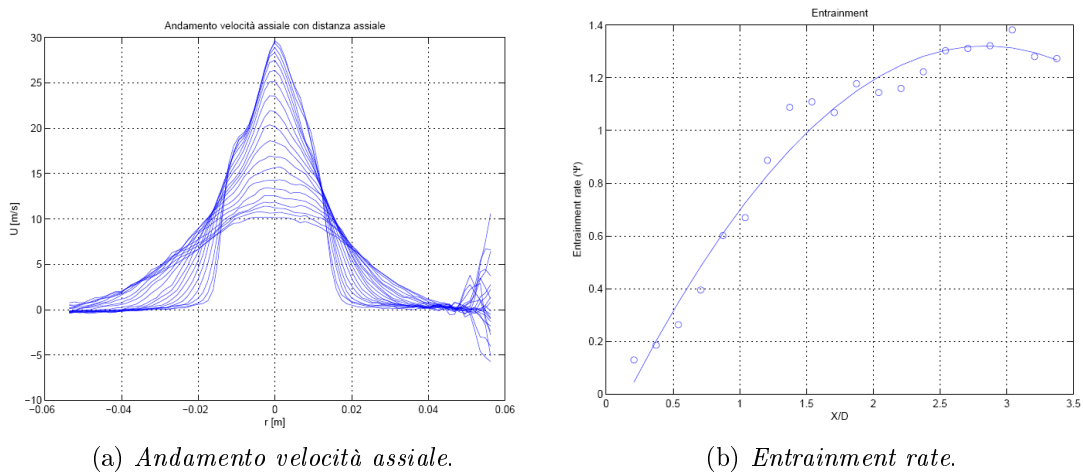
 – Prova 8: il tempo fra i due frame è stato portato a $10 \mu s$


Figura 5.17: Risultati prova 8 Re 30700

L'analisi delle prove effettuate mette in luce un problema che non risultava evidente a partire dalle sole immagini acquisite.

Le immagini risultano essere buone ma per molti valori di swirl, a partire dal più alto fino al grado di swirl che precede la prova con breakdown, il campo di moto acquisito non è completo. I flussi swirlati infatti tendono ad aprirsi attorno alla bolla di ricircolazione e sono tanto più aperti quanto più il getto è confinato nella camera. Quando lo swirl diminuisce invece il getto risulta essere più chiuso.

Per la camera usata il getto altamente swirlato causa un'estensione del campo di moto eccessiva, tanto che parte di esso si trova ad essere fuori dal campo visivo offerto dalle finestre ottiche e quindi la telecamera non è in grado di vederlo.

Questa situazione risulta evidente dagli andamenti di velocità assiale: la zona centrale viene acquisita in maniera corretta e l'andamento è quello tipico di un flusso swirlato con una zona centrale a velocità assiale negativa, ma sui bordi si

nota che la velocità non va a zero ma rimane di un valore finito nei profili di velocità alle distanze dall'ugello più grandi, dove il flusso è maggiormente aperto. Si nota anche come l'andamento risulti troncato dalla fine della finestra di acquisizione.

Dal numero di swirl critico fino al caso con swirl più basso invece il flusso risulta molto più chiuso e gli andamenti di velocità assiale risultano essere completi.

Avere a disposizione un campo di moto non completo si riflette direttamente sul calcolo dell'entrainment rate: l'andamento risulta essere assolutamente non coerente con la teoria e gli esperimenti precedenti, in quanto l'entrainment dovrebbe aumentare con la distanza assiale e invece in queste prove esso diminuisce in corrispondenza di quei profili, più distanziati dall'ugello, per i quali non è disponibile l'intero campo di moto; inoltre è fisicamente impossibile che esso assuma valori negativi.

I dati per i flussi ad alto swirl risultano essere validi fino a valori di X/D pari a circa 2 (a basso swirl risultano validi anche per X/D maggiori), per i successivi valori il calcolo dell'entrainment rate non ha alcun senso.

In figura (fig.5.18) si riportano gli andamenti di entrainment rate per tutte le prove a Reynolds 30700, limitatamente alla regione in cui possono ritenersi corretti:

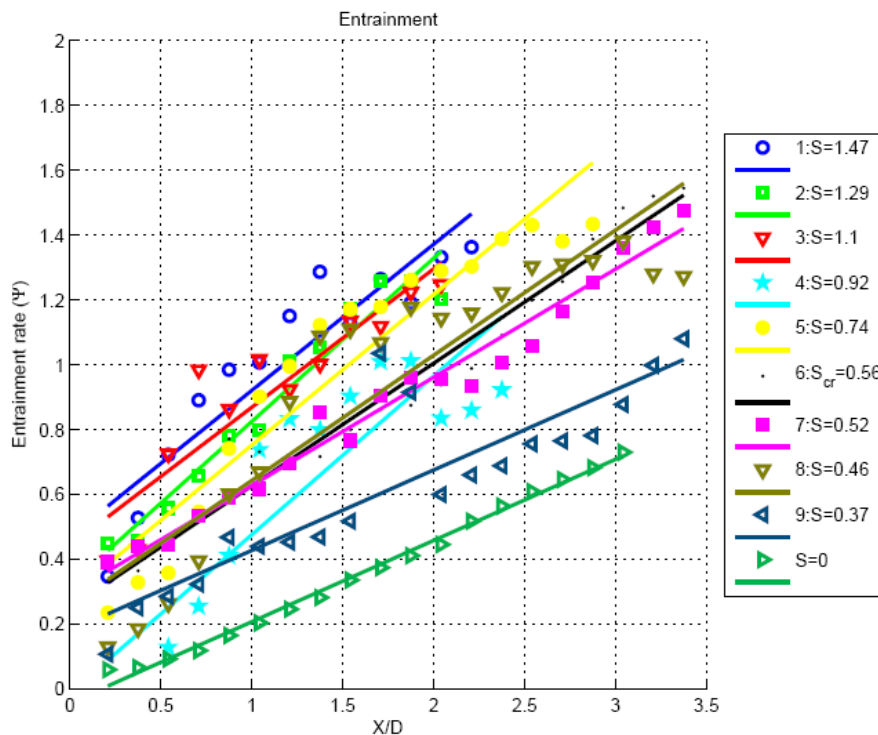


Figura 5.18: Andamento entrainment rate per tutte le prove a Re 30700

Si può notare la tendenza generale delle curve a diminuire all'abbassarsi del grado di swirl, ma si evidenzia come le curve attorno a quella di swirl critico non rispecchino esattamente questo andamento. Sicuramente la formazione del vortex breakdown non può essere rappresentata da un singolo valore di swirl, ma esso si distribuisce su gradi di swirl vicini fra di loro. Si deduce che anche le curve delle

prove 4 e 5 risultano essere affette dai fenomeni fortemente instabili causati dal vortex breakdown.

I valori di swirl corrispondenti alla fase del vortex breakdown non sono ancora mai stati studiati in modo approfondito, quindi non si è ancora giunti a particolari conclusioni su quanto accada durante il breakdown. Da quanto si può dedurre da queste prove l'entrainment rate continua a mantenere il medesimo andamento in direzione assiale, ma non rispecchia la regola che a gradi di swirl inferiori esso assuma valori inferiori. Si potrebbe ipotizzare che il getto invece che aprirsi in maniera netta in corrispondenza del valore critico di swirl, si apra e si chiuda in direzione radiale per tutti quei valori di swirl attorno al valore critico, a seguito di un processo altamente instabile.

5.2.2 Prove a $Re=24400$

Le prove a Re pari a 24400 prevedono una portata totale pari a 400 Nl/min , che viene suddivisa in assiale e tangenziale nel seguente modo:

N° prova	$Q_{ax}[Nl/min]$	$Q_{tg}[Nl/min]$	S
1	38	352	$S = 1.5$
2	88	302	$S = 1.3$
3	138	252	$S = 1.08$
4	188	202	$S = 0.87$
5	238	152	$S = 0.65$
6	263	127	$S_{critico} = 0.55$
7	273	117	$S = 0.5$
8	288	102	$S = 0.44$

Tabella 5.4: Variazione di portata assiale e tangenziale a Re 30700

I risultati di queste prove sono riportati in appendice, in quanto qualitativamente non si differenziano dai risultati delle prove a Reynolds pari a 30700, ad eccezione del fatto che i valori di entrainment validi arrivano solo a valori di X/D pari a 1.5.

5.3 Analisi di convergenza

Nonostante le difficoltà riscontrate in queste prove si decide di svolgere un'analisi di convergenza, ossia si studia il numero di immagini minimo affinché i valori di velocità calcolati con il sistema PIV si assestino attorno ad un valore medio.

Le prove di ottimizzazione sono state effettuate con 200 immagini acquisite, in quanto non interessavano i valori di velocità ma gli andamenti qualitativi delle

mappe vettoriali e dal momento che il sistema PIV richiede dei tempi di elaborazione dell'ordine dei minuti, si è deciso per un numero relativamente basso di immagini per velocizzare le operazioni.

Il numero di immagini acquisite per le prove effettive sale a 400 e si valuta la convergenza dei valori di velocità nei casi di vortex-breakdown e nei casi appena precedenti e successivi al vortex-breakdown e per entrambi i Reynolds. Sulla base degli andamenti delle velocità assiali analizzati in precedenza ci si aspetta una minore convergenza ai bordi dove vi sono evidenti oscillazioni e dove è stato tagliato il campo di moto.

Si riportano le immagini degli andamenti degli errori percentuali rispetto al valore medio finale, calcolati in diverse zone del flusso: centrale, esterna a destra ed esterna a sinistra. A seconda del regime del flusso si riportano solo le immagini delle regioni più interessanti. Nelle tabelle si riporta invece a quale numero di immagini l'errore percentuale, rispetto al valore di velocità media finale della singola prova, scende al di sotto di una soglia posta inizialmente al 5%. In realtà per alcune prove ai due valori di Reynolds e per le due zone esterne tale soglia deve essere alzata (fino ad un massimo del 15%), a confermare quanto ci si aspettava nei confronti della convergenza ai bordi del campo di moto ripreso.

- Reynolds 30700: si riportano in figura (fig.??) gli andamenti degli errori percentuali per la zona centrale in caso di regime critico, e per le zone esterne nei due regimi subcritico e supercritico:

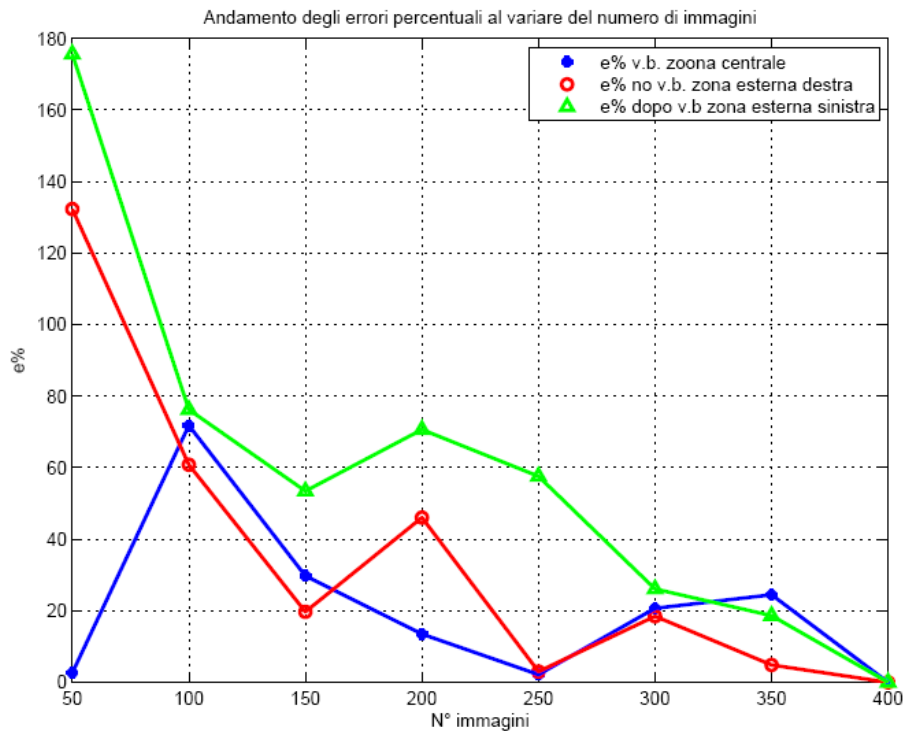


Figura 5.19: Errore percentuale per Re 30700

Regione	Vb	no Vb	dopo Vb
Centro	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 250$	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 100$	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 250$
Ext dx	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 250$	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 250$	$e < 10\%$ per $N_{imm} = 350$
Ext sx	$e < 15\%$ mai	$e < 10\%$ per $N_{imm} = 350$	$e < 15\%$ mai

Tabella 5.5: Errori percentuali per Re 30700

- Reynolds 24400: si riportano in figura (fig.5.20) gli andamenti degli errori percentuali per la zona centrale in caso di regime critico, e per le zone esterne nei due regimi subcritico e supercritico:

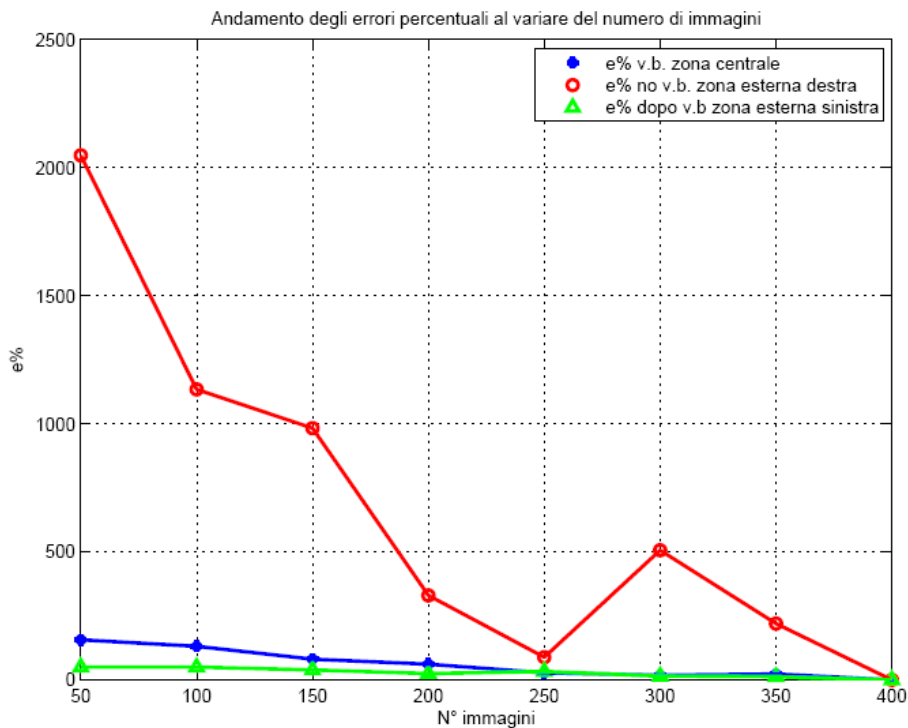


Figura 5.20: Errore percentuale per Re 24400

Regione	Vb	no Vb	dopo Vb
Centro	$e < 15\%$ mai	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 350$	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 300$
Ext dx	$e < 15\%$ mai	$e < 15\%$ mai	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 350$
Ext sx	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 350$	$e < 10\%$ per $N_{imm} = 300$	$e < 15\%$ per $N_{imm} = 300$

Tabella 5.6: Errori percentuali per Re 24400

Capitolo 6

Prove sperimentali con swirl: seconda configurazione

La necessità di utilizzare una camera diversa nasce in base ai risultati ottenuti usando una camera con le pareti metalliche, necessariamente limitata anche per la geometria cilindrica della camera. Si è notato che per alti valori di swirl e con la prima configurazione, il getto si apre molto, tanto da spostare gli estremi esterni del campo di moto in una zona non più visibile dalla telecamera.

L'effetto dell'alto confinamento unito al ristretto campo lasciato visibile dagli ingressi ottici rende inutilizzabili le prove già svolte.

La scelta per la nuova camera deve privilegiare la formazione di un flusso meno confinato e deve rispettare delle esigenze di 'visibilità': per questo motivo si sceglie di costruire una camera con quattro pareti di plexiglass di alta qualità in termini di trasparenza e di dimensioni maggiori alla camera precedente.

Dal momento che viene cambiata la geometria della camera (la camera è quadrata e più ampia), si prevede che il flusso risulti influenzato da questo cambiamento: in particolare con una camera più grande, il flusso risulta meno confinato e di conseguenza meno aperto ad alti numeri di swirl. Inoltre gran parte dei risultati disponibili in letteratura per getti assial-simmetrici con e senza swirl sono riferiti a situazioni non confinate: anche per questo motivo risulta interessante utilizzare questa configurazione.

Il punto di partenza per questi nuovi esperimenti è sempre il rapporto fra portata assiale e tangenziale che determina il grado di swirl massimo.

Non si può però ipotizzare che i profili di velocità siano gli stessi misurati con la precedente configurazione, in quanto in presenza di geometria diversa il campo di moto si presenta diverso. Come con la prima configurazione, noto il numero di swirl massimo e quello nullo, è possibile approssimare linearmente l'andamento del numero di swirl al variare della portata tangenziale, con questa seconda configurazione meno confinante è possibile svolgere la medesima analisi, ma il valore di swirl critico potrebbe risultare diverso.

Le portate vengono poi fatte variare di 50 Nl/min per volta, o con salti inferiori in prossimità del vortex-breakdown.

6.1 Prove a Re 30700

La portata totale per avere un flusso a Reynolds pari 30700 è di 500 Nl/min. Le prove riproducono le prove al medesimo Reynolds con la camera precedente e quindi si parte dal caso a swirl massimo e si diminuisce il grado di swirl variando di 50 Nl/min le portate.

N° prova	$Q_{ax}[Nl/min]$	$Q_{tg}[Nl/min]$	S
1	88	402	$S = 1.47$
2	138	352	$S = 1.29$
3	188	302	$S = 1.1$
4	238	252	$S = 0.92$
5	263	227	$S_{cr} = 0.83$
6	288	202	$S = 0.74$
7	338	152	$S = 0.56$
8	388	102	$S = 0.37$
9	500	0	$S = 0$

Tabella 6.1: Variazione di portata assiale e tangenziale a Re 30700

Come per le prove con la prima configurazione, il numero di swirl è stato calcolato tramite interpolazione lineare tra il valore massimo e il valore minimo. Questa seconda configurazione però influenza il campo di moto, in particolare esso risulterà meno aperto, e quindi il valore di swirl critico cambia rispetto alla prima configurazione di camera.

I parametri del sistema di acquisizione seguono l'ottimizzazione delle prove con la camera precedente: viene però ridotta la regolazione del laser a 700.

Il tempo fra i due frame viene è di 5 μs ad alto swirl e nelle prove a basso swirl viene aumentato.

Si riportano quindi i risultati delle singole prove in termini di velocità assiale ed entrainment rate, e per alcune delle prove più significative si riportano anche le mappe vettoriali restituite dal programma di analisi PIV.

– Prova 1: $S=1.47$

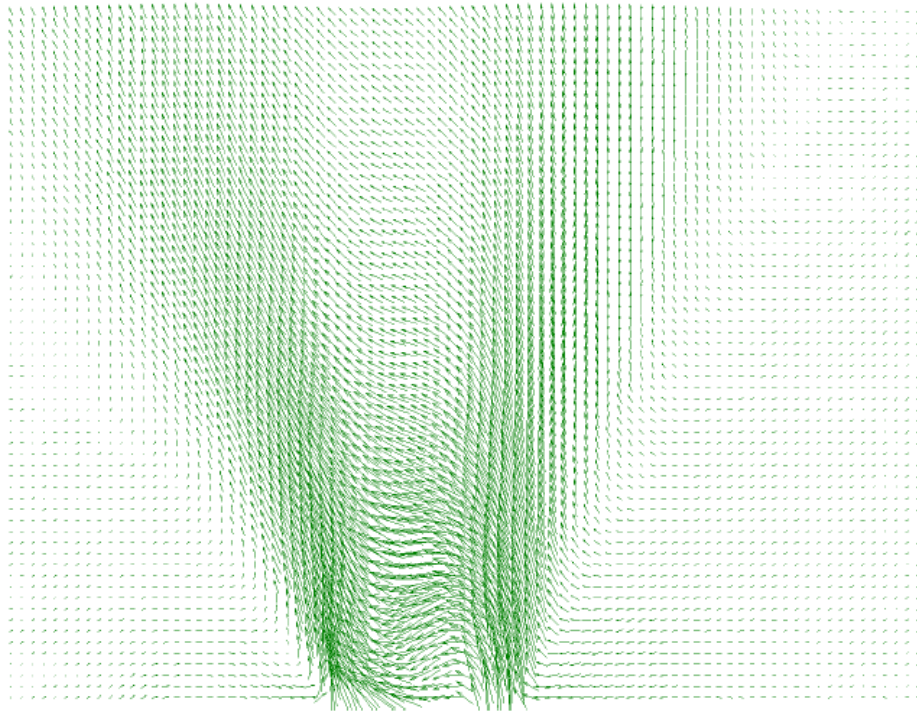
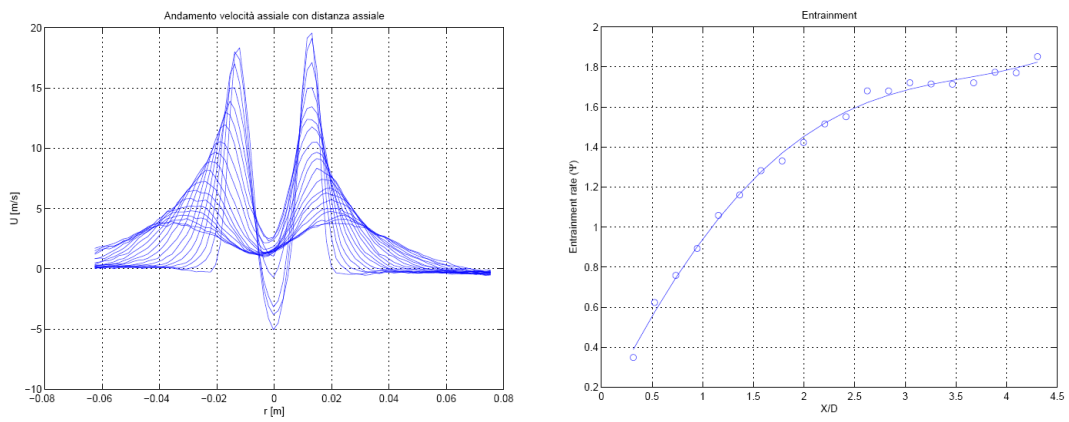


Figura 6.1: Mappa vettoriale di velocità prova 1

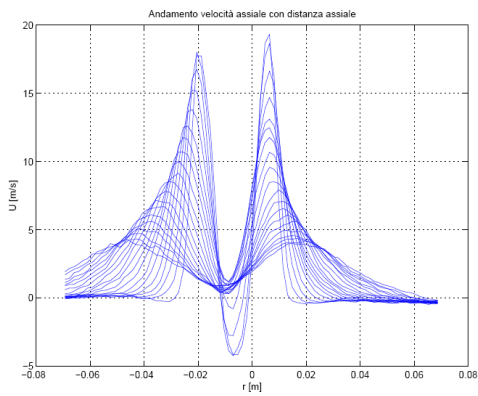


(a) *Andamento velocità assiale.*

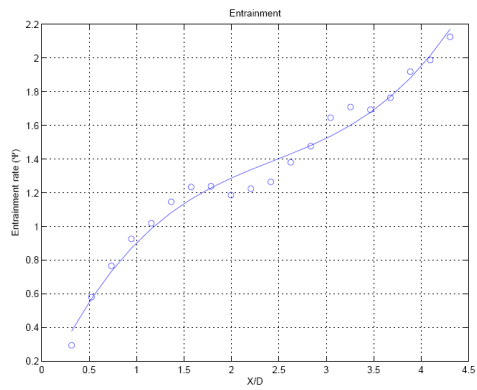
(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.2: Risultati prova 1 Re 30700, nuova camera

– Prova 2: $S=1.29$



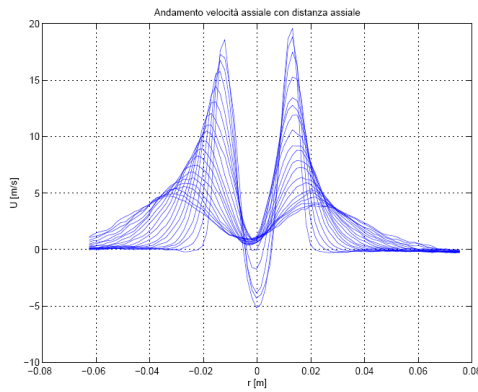
(a) *Andamento velocità assiale.*



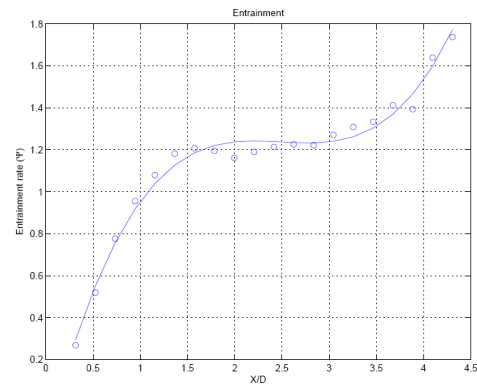
(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.3: Risultati prova 2 Re 30700, nuova camera

– Prova 3: $S=1.1$



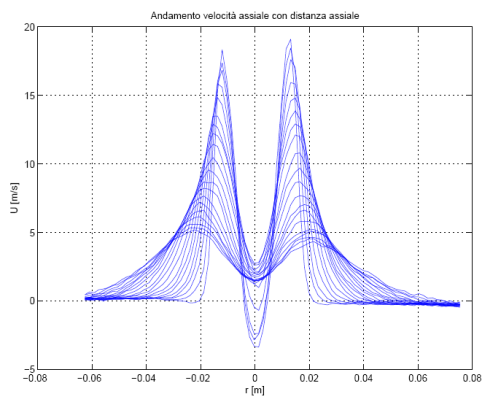
(a) *Andamento velocità assiale.*



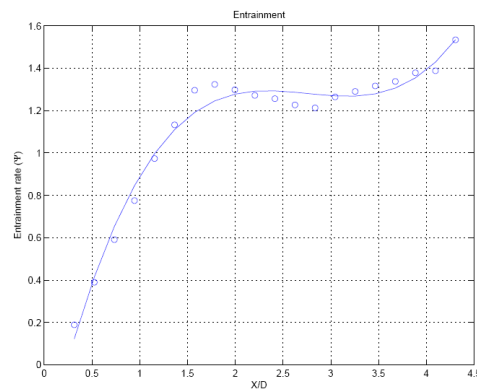
(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.4: Risultati prova 4 Re 30700, nuova camera

– Prova 4: $S=0.92$



(a) *Andamento velocità assiale.*



(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.5: Risultati prova 4 Re 30700, nuova camera

– Prova 5: $S=0.83$

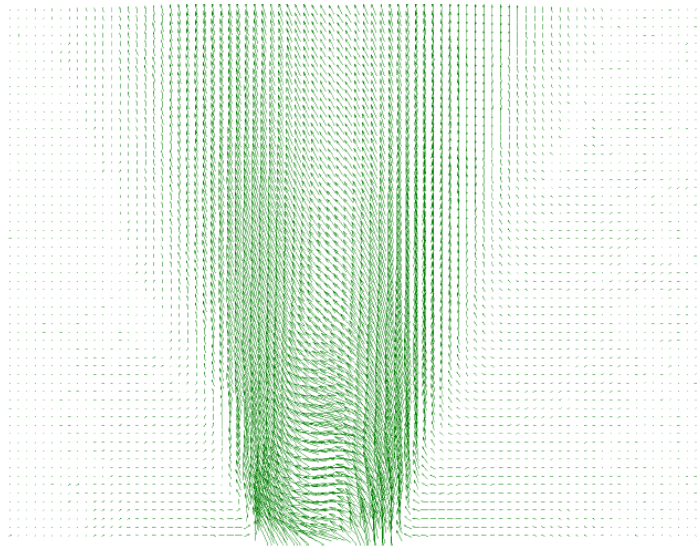


Figura 6.6: Mappa vettoriale di velocità prova 5

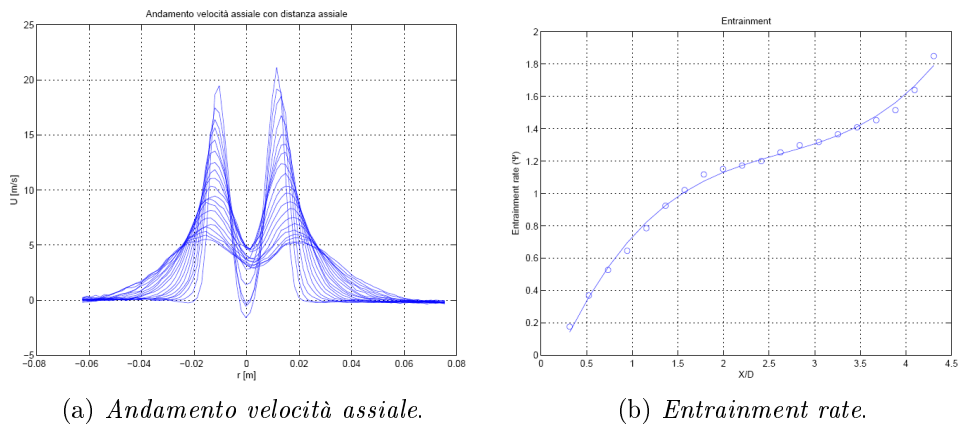


Figura 6.7: Risultati prova 5 Re 30700, nuova camera

– Prova 6: $S=0.74$

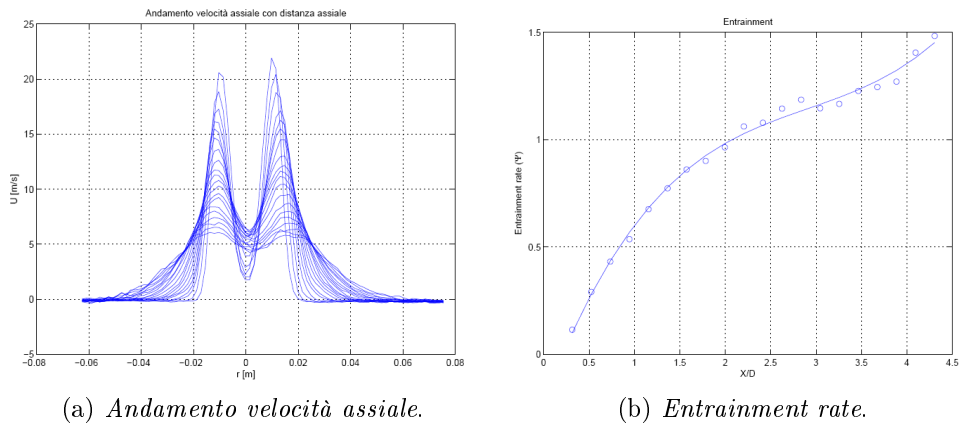


Figura 6.8: Risultati prova 6 Re 30700, nuova camera

– Prova 7: $S=0.56$; $t=15 \mu s$

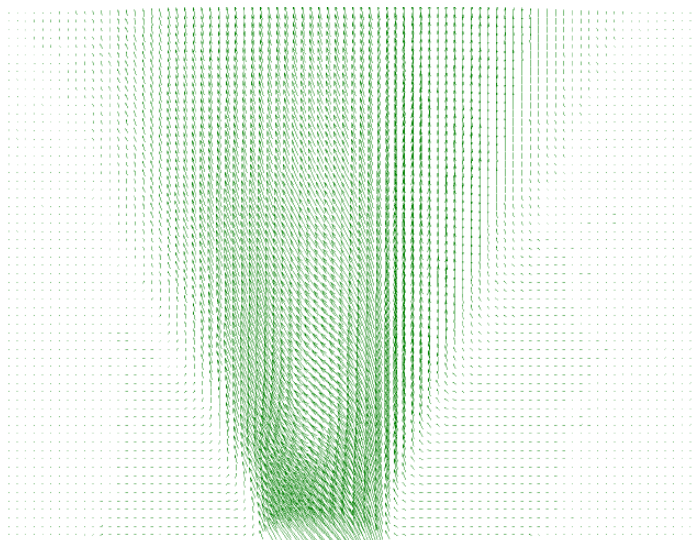
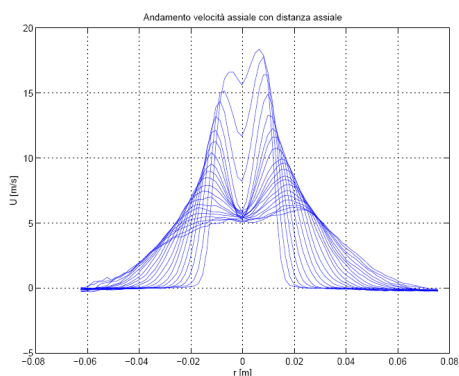
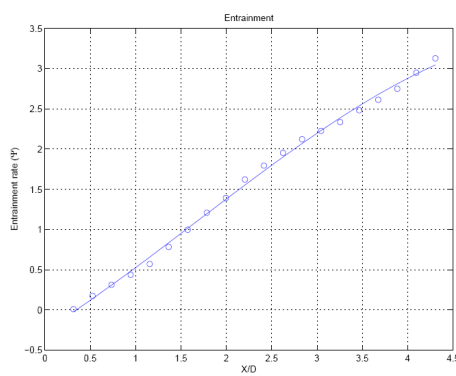


Figura 6.9: Mappa vettoriale di velocità prova 7



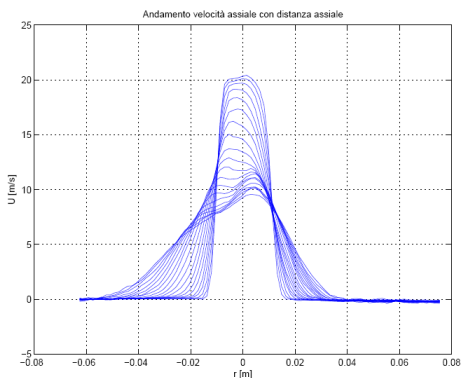
(a) *Andamento velocità assiale.*



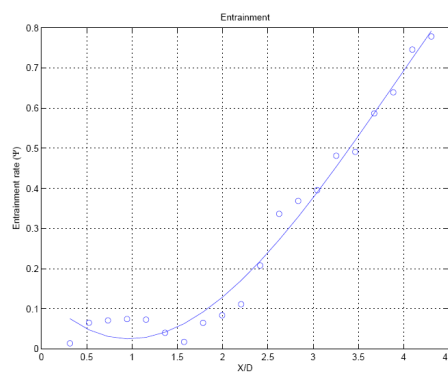
(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.10: Risultati prova 7 Re 30700, nuova camera

– Prova 8: $S=0.37$; $t=15 \mu s$



(a) *Andamento velocità assiale.*



(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.11: Risultati prova 8 Re 30700, nuova camera

– Prova 9: $S=0$; $t=20 \mu s$

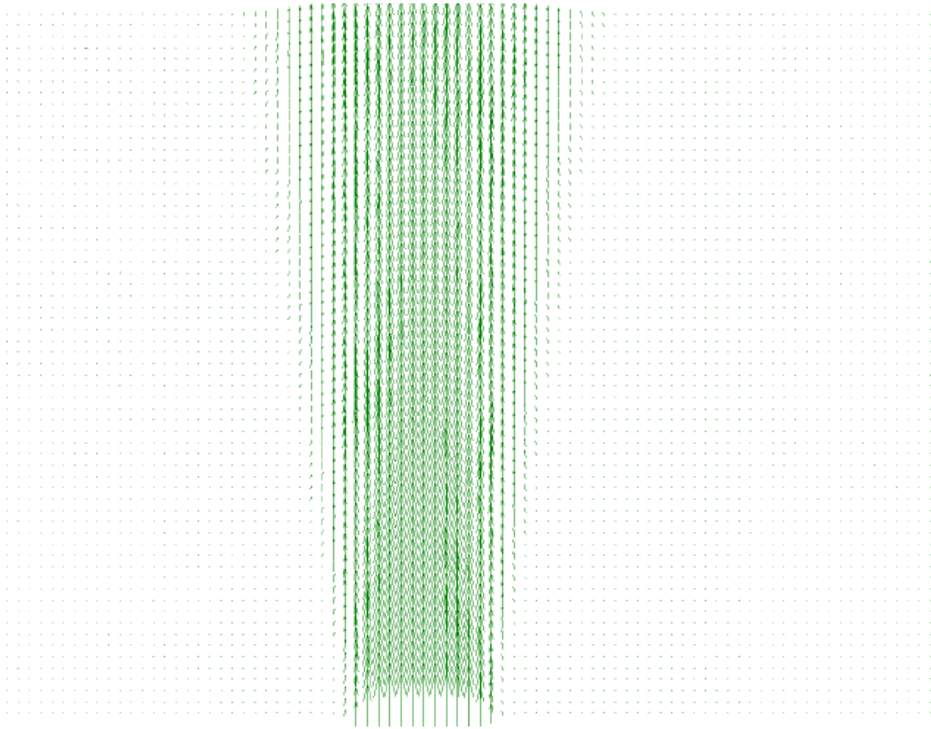
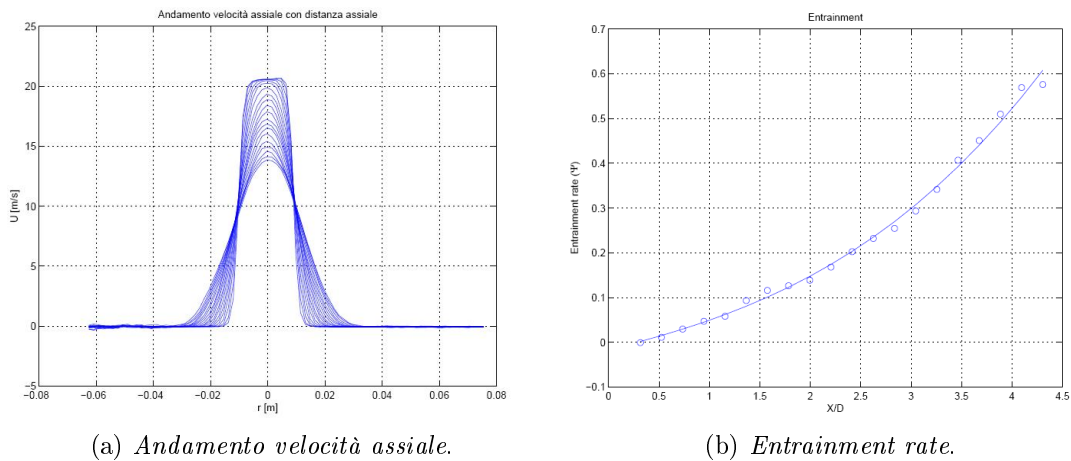


Figura 6.12: Mappa vettoriale di velocità prova 9



(a) *Andamento velocità assiale.*

(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.13: Risultati prova 9 Re 30700, nuova camera

In queste prove il numero dei sostituiti nell'analisi di correlazione è pari a circa il 13% del totale, e quindi le immagini risultano molto regolari. Inoltre spariscono le oscillazioni presenti precedentemente nei profili di velocità lungo il bordo destro della finestra dell'immagine e che erano causati da un allineamento dei due fasci laser non perfetto.

Analizzando le immagini dei profili di velocità assiale si nota che almeno da un lato rispetto allo zero del sistema di riferimento, le velocità tendono regolarmente a zero. Nonostante ciò è sufficiente avere metà profilo completo, in quanto è possibile assumere un'ipotesi di simmetria attorno all'asse e studiare quindi solo metà

profilo, raddoppiando quindi i valori di portata che vengono calcolati tramite integrazione su metà profilo.

Gli andamenti delle velocità sono coerenti con il grado di swirl impartito a ciascun flusso: a swirl elevati c'è una zona a velocità assiali negative e diminuendo il grado di swirl le velocità assiali diventano completamente positive, anche se di valore inferiore sempre nella zona centrale, fino ad assumere un profilo a getto a swirl molto basso e un profilo a 'top-hat' a swirl nullo.

Per quanto riguarda gli andamenti dell'entrainment rate, essi sono concordi con la teoria, secondo cui l'entrainment aumenta con la distanza assiale e risultano essere fortemente non lineari, soprattutto a valori di swirl elevato. Esperimenti precedenti (Park e Shin, [4]) dimostrano come la non linearità sia confinata in una regione molto vicina all'ugello e all'aumentare del numero di swirl essa praticamente sparisce, lasciando andamenti di entrainment rate lineari. In questo esperimento invece si nota come tutti i gradi di swirl presentino un andamento non lineare, che a swirl bassi si raccorda, allontanandosi dall'ugello, ad un andamento lineare, in accordo quindi con i lavori precedenti, mentre a swirl alti tale non linearità risulta essere enfatizzata.

In figura (fig.6.29) si riportano gli andamenti di entrainment rate per tutte le prove al medesimo Reynolds:

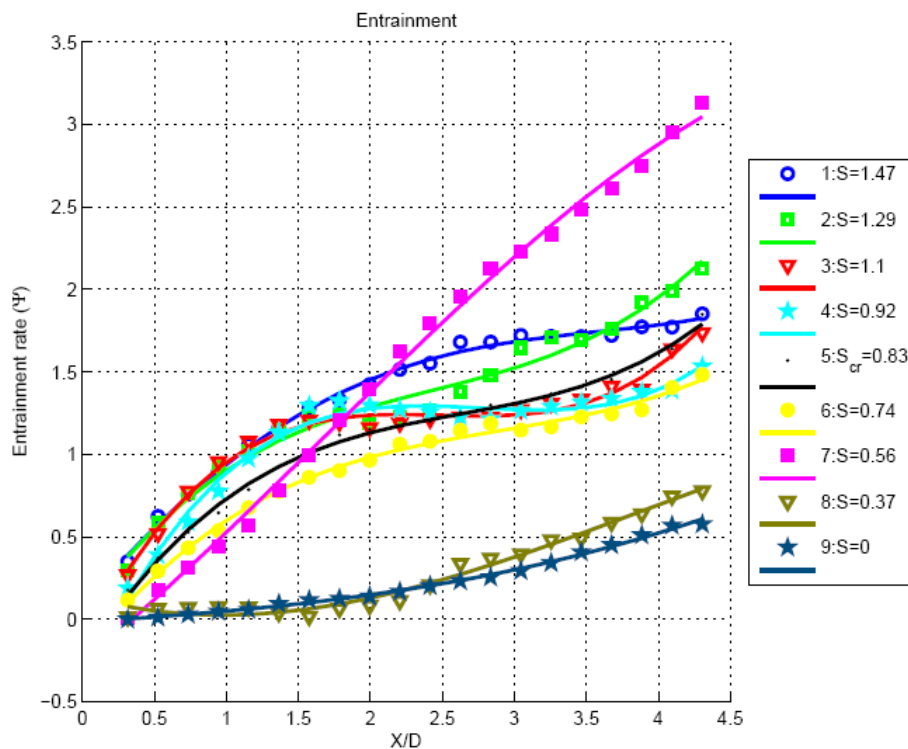


Figura 6.14: Andamento entrainment rate per tutte le prove a $Re\ 30700$, nuova camera

Da questa rappresentazione è possibile trarre altre considerazioni riguardo alla non linearità che caratterizza le curve a swirl alto: per i massimi valori di X/D quasi tutte le curve hanno una leggera flessione in diminuzione per poi tornare ad avere andamento crescente e tendenzialmente lineare. Questo comportamento

potrebbe essere spiegato dal fatto che gli esperimenti vengono condotti in una camera che confina poco il getto, facendolo richiudere sopra la bolla di ricircolazione (dove la velocità assiale assume valore negativo) a swirl alti. L'effetto della chiusura della bolla di ricircolazione si riflette sull'entrainment tramite la leggera flessione in diminuzione. L'andamento poi torna a crescere e in modo tendenzialmente lineare in quanto il flusso sopra la chiusura della bolla di ricircolazione risulta poco perturbato dagli effetti di swirl.

Si riporta l'andamento della dimensione assiale della bolla, già presente all'efflusso, il cui estremo è definito dal punto di ristagno, che si estende al massimo solo per circa un diametro:

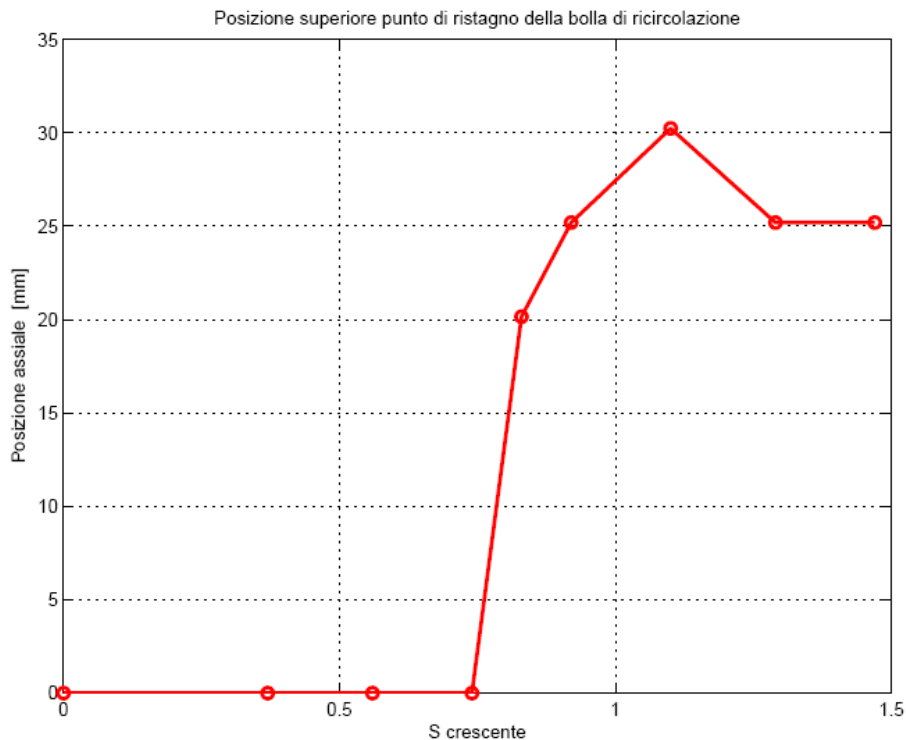


Figura 6.15: Posizione superiore punto di ristagno della bolla di ricircolazione

Per numeri di swirl inferiori al valore critico le velocità assiali non assumono valori negativi: alcuni profili hanno una conformazione a onda, dove la velocità assiale attorno all'asse dell'ugello diminuisce di valore, ma non si è ancora creata una vera e propria bolla di ricircolazione. In quei casi quindi la dimensione assiale della bolla risulta essere nulla. La bolla di ricircolazione appare nella fase di transizione attorno a $S=0.5$ e si estende fino a circa 30 mm per poi diminuire e stabilizzarsi a 25 mm ai valori di swirl più alti.

Infine, come per gli esperimenti condotti con la camera circolare, si nota che diminuendo il numero di swirl generalmente gli andamenti entrainment rate diminuiscono di valore, ma vi sono dei comportamenti contrari a questo principio per le curve a numeri di swirl attorno al valore critico, a dimostrazione ancora una volta che il vortex-breakdown non si manifesta per un unico valore di swirl e che porta delle instabilità nella conformazione del flusso che si manifesta

anche nell'andamento dell'entrainment rate.

In particolare la prova in questione è la numero 7, per cui non si è ancora formata la bolla di ricircolazione ma che presenta delle leggere irregolarità e asimmetrie nel profilo di velocità assiale: in questa prova il grado di swirl non è ancora quello critico ma la conformazione della velocità assiale è a 'onda', mentre nelle prove successive vi è una conformazione e getto o a 'top-hat'. Tale conformazione dimostra che si stanno creando delle zone di ricircolazione, le CRZ, che causano un aumento dell'entrainment rate per effetto di un equilibrio radiale. Nonostante quindi non vi sia ancora un effettivo punto di ristagno nella velocità assiale, l'instaurarsi delle prime configurazioni di ricircolazione e di instabilità potrebbe causare un improvviso aumento di entrainment rate. Dal momento che il metodo numerico di integrazione presuppone la simmetria del profilo assiale, è possibile che la mancanza di tale simmetria renda il calcolo integrale non valido; per capire meglio se l'analisi della prova 7 sia sbagliata, si rimanda la discussione alla sezione di calcolo di entrainment rate tramite velocità radiale.

Si riportano i valori delle portate iniziali, ossia delle portate considerate come zero relativo nel metodo di calcolo, in confronto con una portata data in ingresso dai flussimetri pari a $0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$:

Prova	N° Swirl	$m_0 \text{ [m}^3/\text{s]}$
1	1.47	0.0101
2	1.29	0.01
3	1.1	0.0105
4	0.92	0.0104
5	0.83	0.0089
6	0.74	0.0091
7	0.56	0.0090
8	0.37	0.0089
9	0	0.0084

Tabella 6.2: Portate iniziali a Reynolds 30700

Si nota che a swirl alti vi è la maggiore differenza fra le portate iniziali e quella data in ingresso e questo è dovuto a diversi fattori: la bolla di ricircolazione a swirl alto rientra anche nell'ugello e quindi una parte del campo di moto non viene ripresa dalla telecamera; nella zona all'efflusso vi è un gradiente di velocità $\|du/u\|$ di poco inferiore a 0.2 e quindi la risoluzione potrebbe non essere perfetta; infine la densità dell'aria viene ipotizzata uniforme in tutto il campo di moto, ipotesi in realtà non valida nella zona interessata dalla bolla di ricircolazione.

A valori di swirl più bassi invece la portata iniziale si avvicina, anche di molto, al valore della portata in ingresso: non vi è perfetta congruenza perchè la portata iniziale è la media calcolata nei primi 4 mm dall'efflusso.

6.2 Prove a Re 24400

La portata totale per avere un flusso a Re pari 24400 è di 400 Nl/min. Le prove riproducono le prove al medesimo Reynolds con la camera precedente e quindi si parte dal caso a swirl massimo e si diminuisce il grado di swirl variando di 50 Nl/min le portate.

N° prova	$Q_{ax}[Nl/min]$	$Q_{tg}[Nl/min]$	S
1	38	352	$S = 1.5$
2	88	302	$S = 1.3$
3	138	252	$S = 1.08$
4	163	227	$S = 0.97$
5	188	202	$S_{cr} = 0.87$
6	238	152	$S = 0.65$
7	288	102	$S = 0.44$
8	400	0	$S = 0$

Tabella 6.3: Variazione di portata assiale e tangenziale a Re 24400

Anche per queste prove si sono mantenuti i parametri delle prove a Re 30700, con l'accortezza di aumentare il tempo fra i due frame al decrescere del numero di swirl.

Si riportano i risultati delle singole prove in termini di velocità assiale ed entrainment rate, con qualche mappa vettoriale di velocità per le prove più significative.

– Prova 1: $S=1.5$

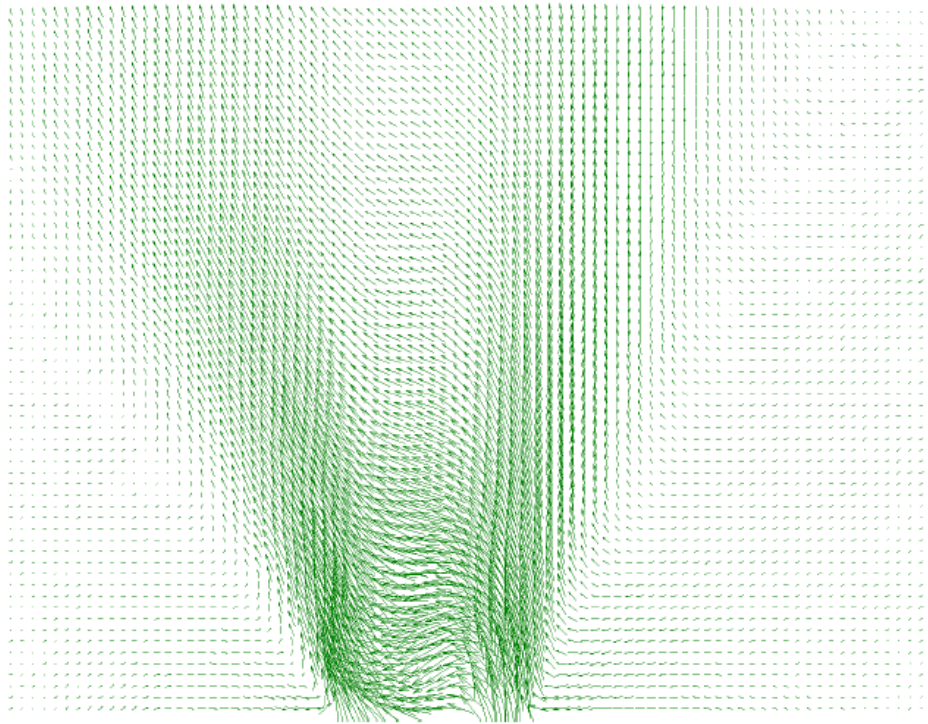
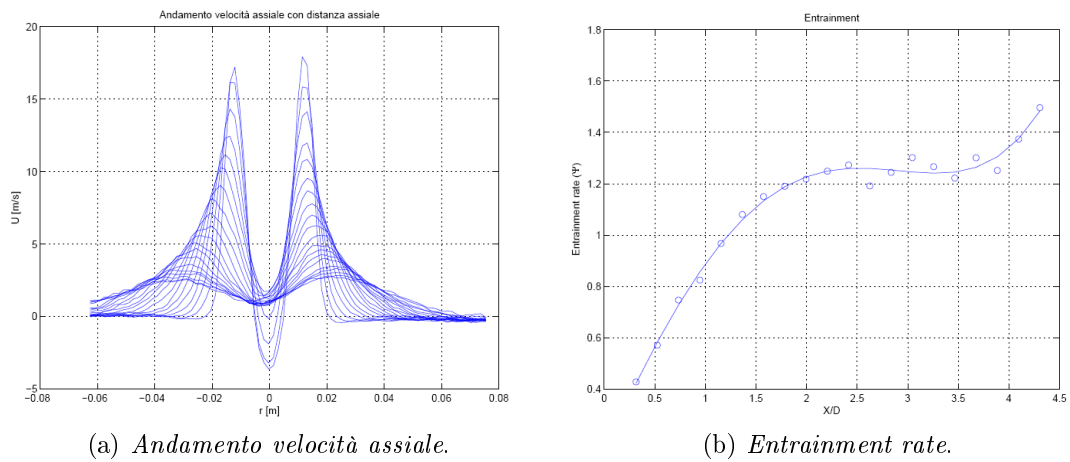


Figura 6.16: Mappa vettoriale di velocità prova 1

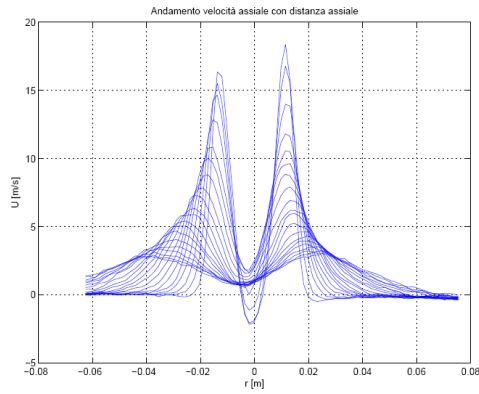


(a) *Andamento velocità assiale.*

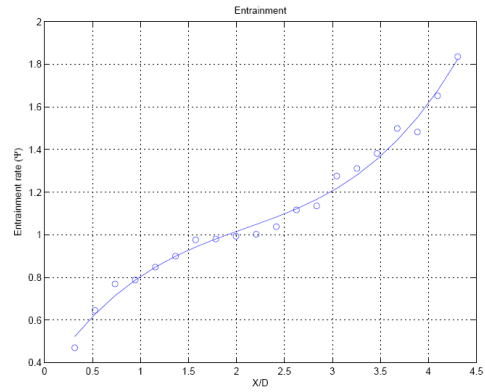
(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.17: Risultati prova 1 Re 24400, nuova camera

– Prova 2: $S=1.3$



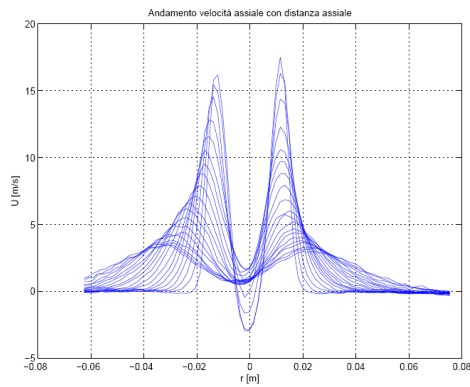
(a) *Andamento velocità assiale.*



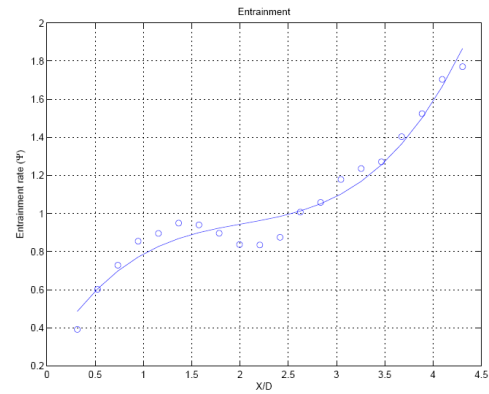
(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.18: Risultati prova 2 Re 24400, nuova camera

– Prova 3: $S=1.08$



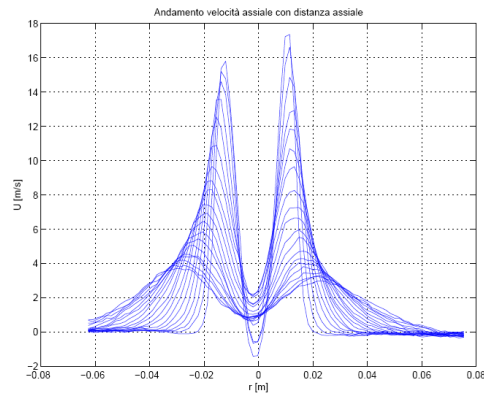
(a) *Andamento velocità assiale.*



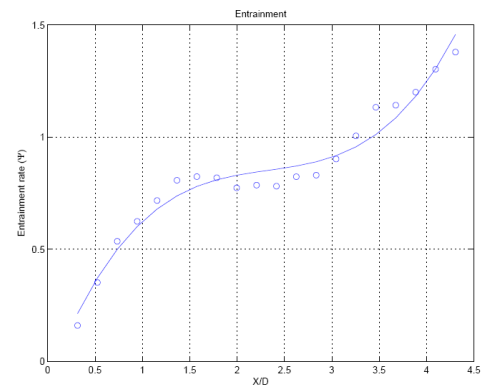
(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.19: Risultati prova 4 Re 24400, nuova camera

– Prova 4: $S=0.97$



(a) *Andamento velocità assiale.*



(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.20: Risultati prova 4 Re 24400, nuova camera

– Prova 5: $S=0.87$

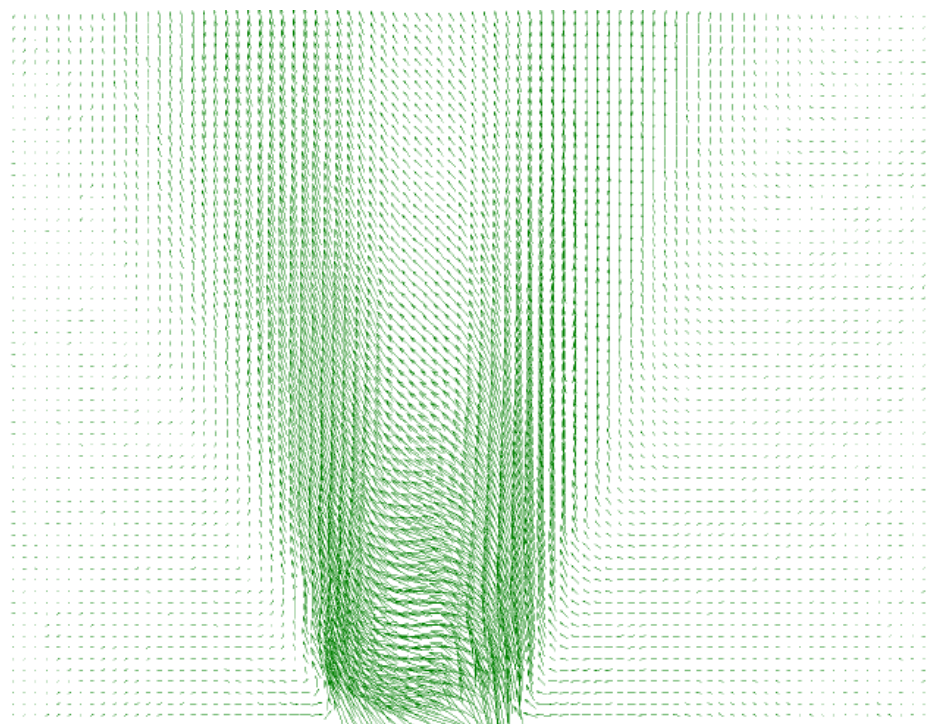
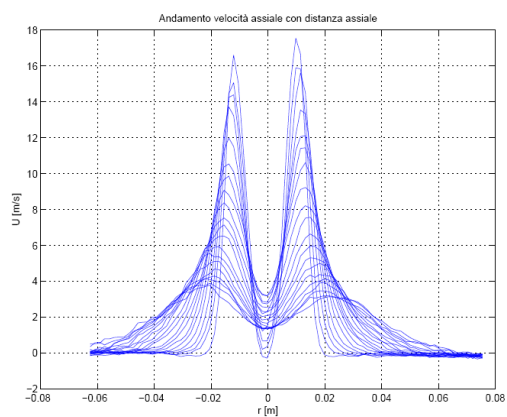
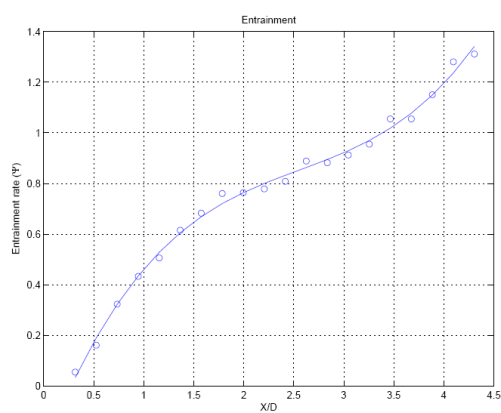


Figura 6.21: Mappa vettoriale di velocità prova 5



(a) *Andamento velocità assiale.*



(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.22: Risultati prova 5 Re 24400, nuova camera

– Prova 6: $S=0.65$; $t=10 \mu s$

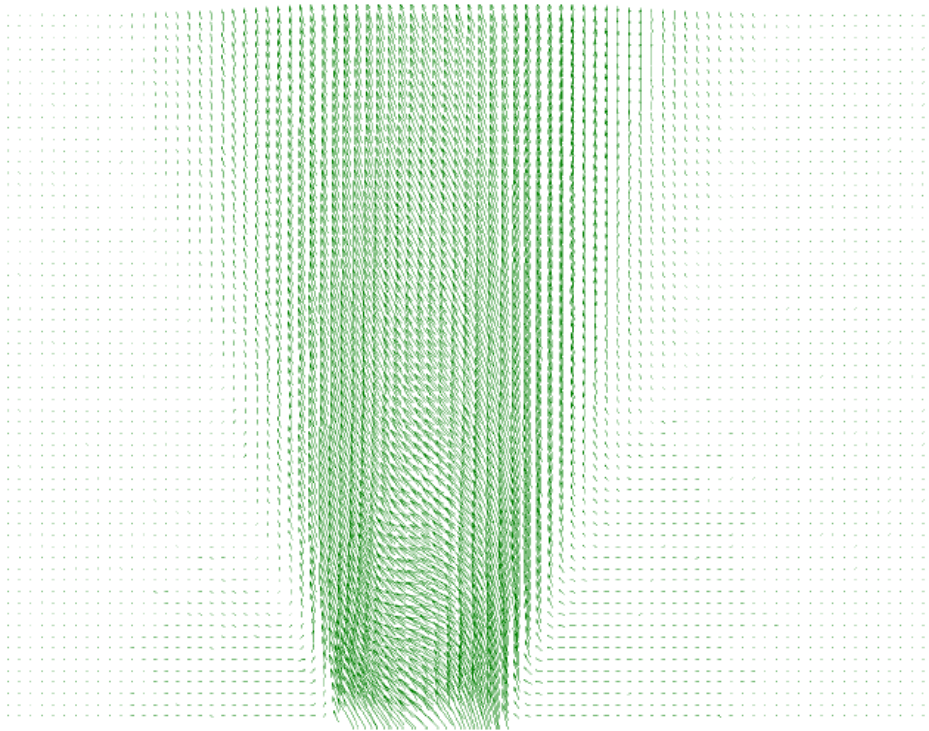
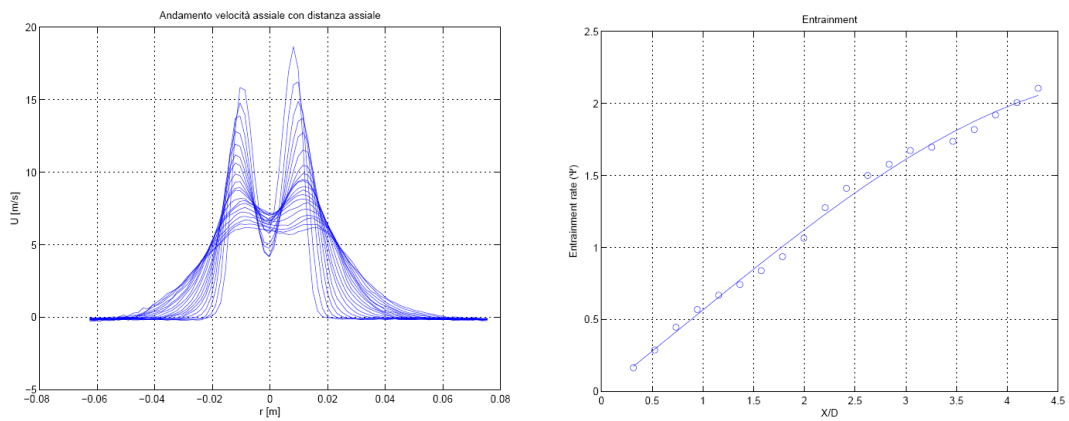


Figura 6.23: Mappa vettoriale di velocità prova 6



(a) *Andamento velocità assiale.*

(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.24: Risultati prova 6 Re 24400, nuova camera

– Prova 7: $S=0.44$; $t=15 \mu s$

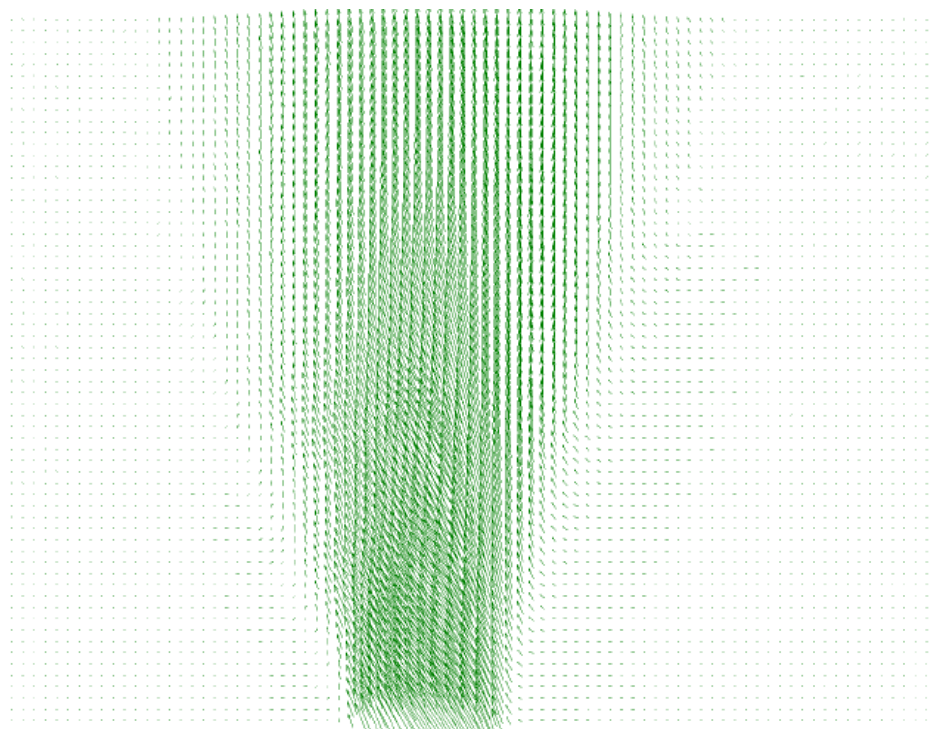
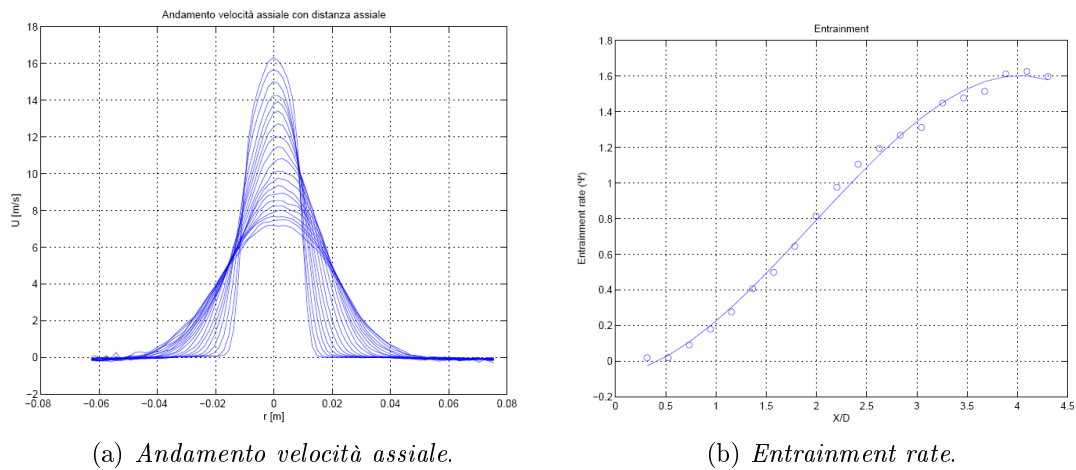


Figura 6.25: Mappa vettoriale di velocità prova 7



(a) *Andamento velocità assiale.*

(b) *Entrainment rate.*

Figura 6.26: Risultati prova 7 Re 24400, nuova camera

– Prova 8: $S=0$; $t=20 \mu s$

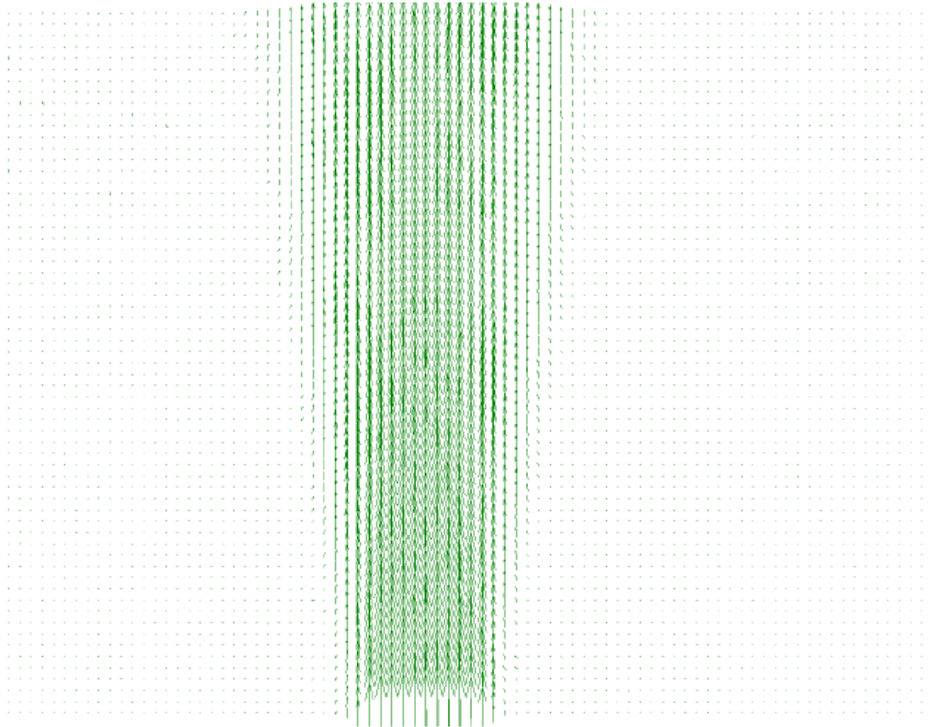


Figura 6.27: Mappa vettoriale di velocità prova 8

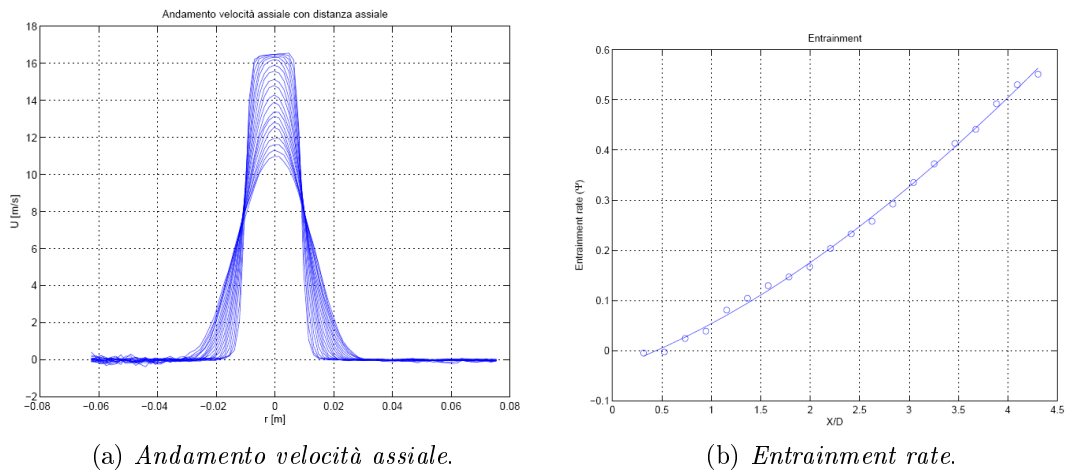


Figura 6.28: Risultati prova 8 Re 24400, nuova camera

I risultati a Reynolds pari a 24400 sono qualitativamente confrontabili con quelli a Reynolds 30700: gli andamenti delle velocità assiali rispecchiano quanto trovato negli esperimenti al Reynolds maggiore e gli andamenti di entrainment rate presentano anch'essi delle forti non linearità, che si attenuano, sia a distanze assiali maggiori, sia a valori di swirl inferiori. Anche in questo caso la bolla di ricircolazione presente a swirl alti si richiude, lasciando il flusso che si trova a distanze assiali superiori poco perturbato dagli effetti dello swirl.

In figura (fig.??) si riportano gli andamenti di entrainment rate per tutte le prove a Reynolds 24400:

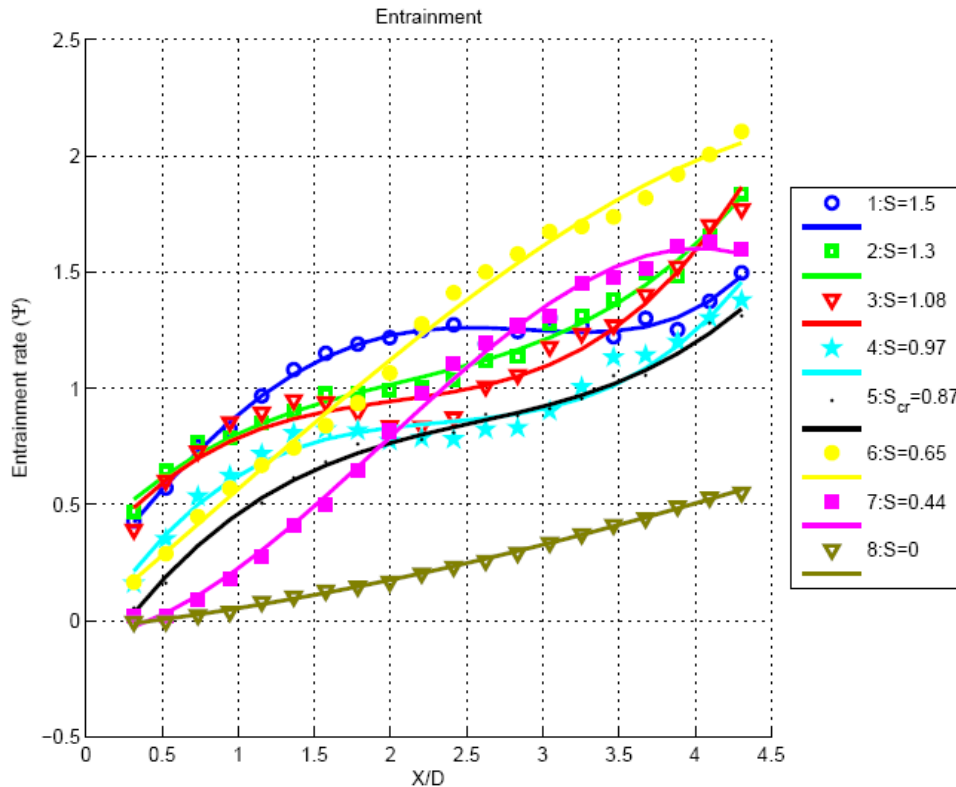


Figura 6.29: Andamento entrainment rate per tutte le prove a Re 24400, nuova camera

Anche nel caso di Reynolds 24400 si manifestano degli andamenti strani: in questo caso sono interessate due prove consecutive, 6 e 7 a swirl pari a 0.65 e 0.44 rispettivamente, che presentano un andamento di velocità assiale simile a quello della prova 7 a Reynolds 30700. la conformazione del profilo assiale è a onda, senza ancora arrivare ad un punto di ristagno: è la condizione per cui si creano le prime ricircolazioni laterali e alcune instabilità e asimmetrie nel profilo. Come per l'andamento a Reynolds 30700, si rimanda la discussione di questo strano andamento alla sezione di calcolo dell'entrainment rate tramite velocità radiale.

Anche a Reynolds 24400 si riportano le portate calcolate all'efflusso, considerate come zero relativo nel metodo di calcolo, in confronto con una portata data in ingresso dai flussimetri pari a $0.00667 \text{ m}^3/\text{s}$:

Prova	N° Swirl	m_0 [m^3/s]
1	1.5	0.0089
2	1.3	0.0082
3	1.08	0.0082
4	0.97	0.0083
5	0.87	0.0075
6	0.65	0.0073
7	0.44	0.0067
8	0	0.0067

Tabella 6.4: Portate iniziali a Reynolds 24400

Come già sottolineato per le prove a Reynolds 30700, le maggiori differenze si trovano agli swirl alti, dove la portata iniziale rappresenta un'approssimazione dovuta al fatto che la bolla di ricircolazione rientra dentro all'ugello, che la risoluzione potrebbe non essere perfetta in una zona dove i gradienti di velocità sono di poco inferiori alla soglia posta a 0.2 e che la densità viene ipotizzata uniforme.

6.3 Risultati per distanze assiali fissate

Per comprendere meglio il comportamento dell'entrainment rate al variare del numero di swirl, si riportano i medesimi risultati di entrainment rate in un grafico dove è stata fissata la distanza assiale e viene fatto variare il grado di swirl in maniera crescente. Questo si traduce nel fissare un valore di X/D dai grafici precedenti di entrainment rate, e riportare il valore di Ψ per ciascuna prova, ordinando le prove al contrario rispetto a quanto riportato nelle tabelle (tab. 6.1 e tab.6.3) in modo tale da avere una variazione crescente del grado di swirl.

Vengono analizzate le distanze assiali corrispondenti a $X/D = 1$ e $X/D = 2$ per entrambi i Reynolds, ricordando che la prova 7 e le prove 6 e 7 rispettivamente a Reynolds 30700 e Reynolds 24400 assumono dei valori più alti rispetto ad altre prove a swirl superiori.

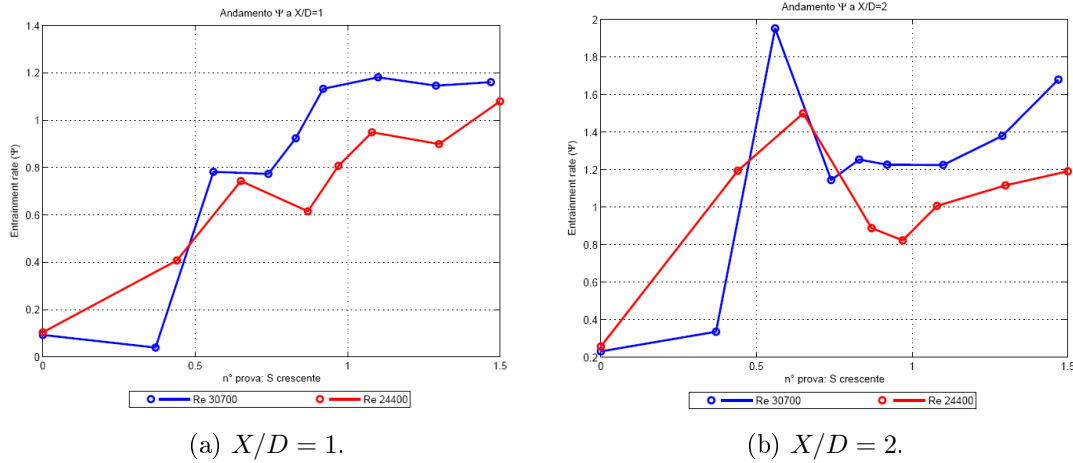


Figura 6.30: Entrainment rate per X/D fissato

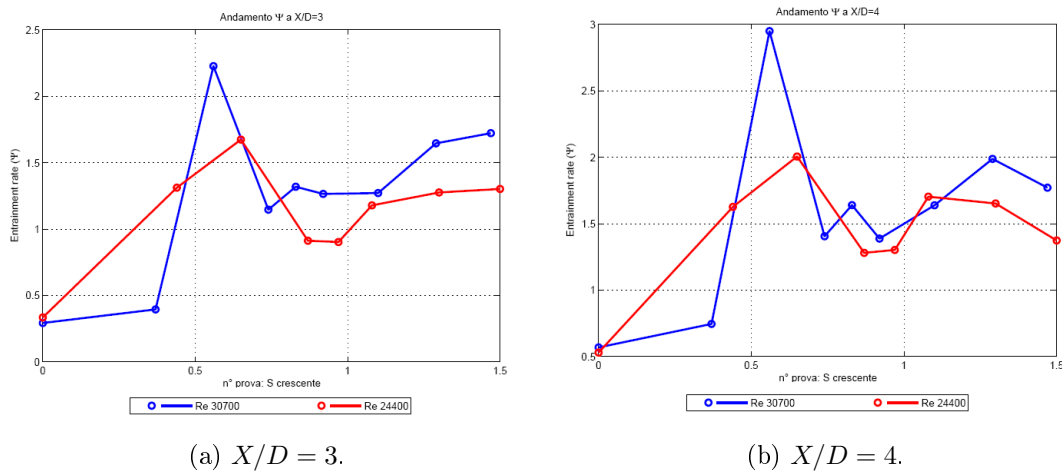


Figura 6.31: Entrainment rate per X/D fissato

La prima distanza assiale presa in considerazione rappresenta una quota molto vicina all'efflusso, dove gli andamenti di entrainment rate non presentano delle particolarità rispetto a quanto ci si aspetta: questo può essere confermato anche dai grafici di entrainment rate al variare della distanza assiale riportati in precedenza per i due Reynolds. Questa distanza è quindi poco significativa.

A distanze assiali maggiori invece gli andamenti delle prove prima sottolineate crescono di molto e fissando una distanza assiale superiore a due diametri presentano un repentino aumento del valore di entrainment rate, che subito dopo diminuisce per stabilizzarsi su un andamento classico di aumento con il numero di swirl. Questi andamenti sono relativi a quelle prove che hanno un numero di swirl appena inferiore al valore critico: è quindi evidente anche da queste analisi che attorno al valore critico nascono delle instabilità che si riflettono sull'elaborazione delle relative prove.

Gli andamenti per tutte le altre prove sono conformi a quanto ci si aspetta da uno studio teorico del fenomeno di entrainment rate, sottolineando anche che tendenzialmente i valori a Reynolds 24400 sono inferiori ai valori a Reynolds 30700. Diventa invece molto utile un confronto con i valori di entrainment rate calcolati tramite velocità radiale per le prove considerate 'critiche', soprattutto per coor-

dinate assiali lontane dall'ugello.

Si riporta di seguito uno dei risultati ottenuti da Park e Shin ([4]): vengono riportati gli entrainment rate al crescere del numero di swirl e per diversi valori di X/D . Come detto in precedenza il campo di moto in presenza di formazione di vortex-breakdown non è stato studiato nei lavori precedenti e quindi l'andamento di entrainment rate relativo ai valori di swirl critico viene semplicemente ricordato con i valori successivi:

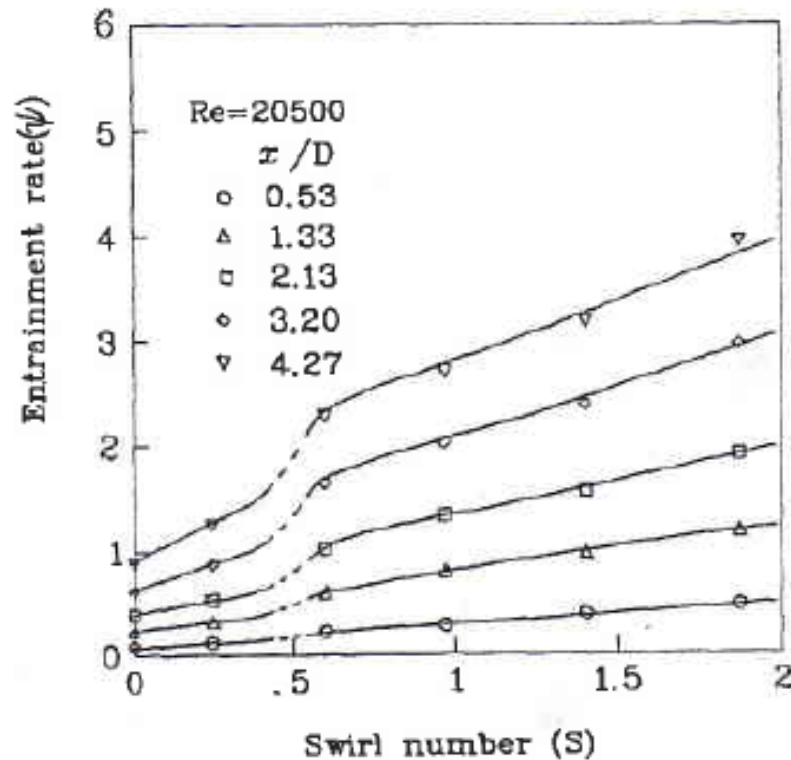


Figura 6.32: Andamento entrainment rate per X/D fissati, Parck e Shin

6.4 Analisi di convergenza

Viene svolta un'analisi di convergenza anche per le prove eseguite con la seconda configurazione, ricordando che il numero di immagini acquisite sale a 500.

Esattamente come per l'analisi di convergenza sulla prima configurazione, si valuta l'errore percentuale relativo al valore medio finale e in particolare si valuta quando esso scende al di sotto di una soglia. Per semplicità nelle immagini non si riportano tutti gli andamenti degli errori percentuali, ma solo quelli di alcune regioni di interesse a seconda del regime di moto. In tabella invece si riportano tutti i valori nei tre regimi di moto (subcritico, critico e supercritico) e nelle tre regioni di interesse (esterne al flusso e interne alla zona di ricircolazione)

- Reynolds 30700: si riportano in figura (fig.6.33) gli andamenti degli errori percentuali per la zona centrale in caso di regime critico, e per le zone esterne nei due regimi subcritico e supercritico:

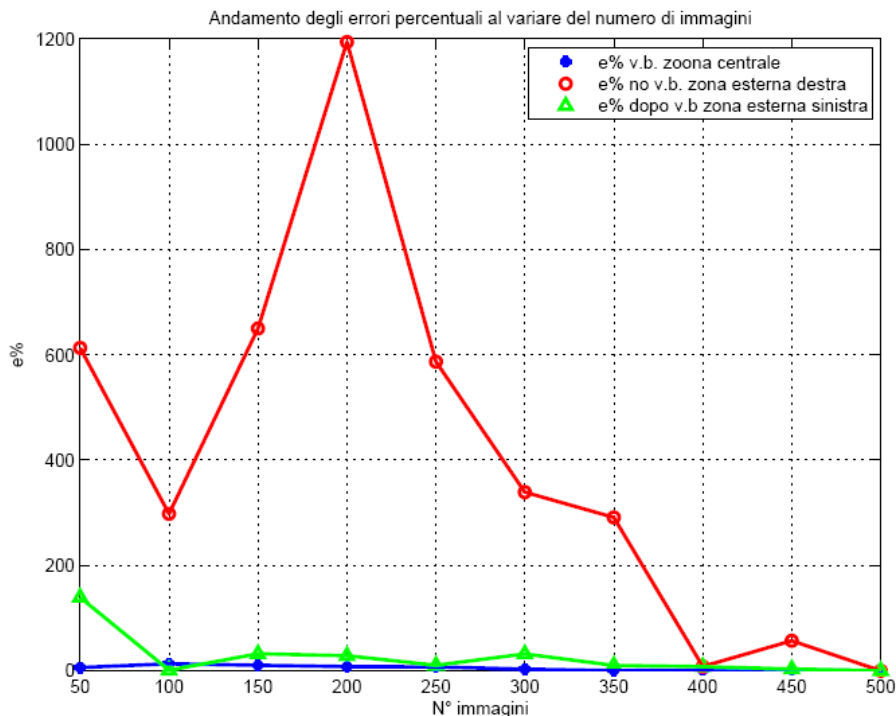


Figura 6.33: Errore percentuale per Re 30700

Regione	Vb	no Vb	dopo Vb
Centro	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 300$	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 250$	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 250$
Ext dx	$e < 15\%$ per $N_{imm} = 150$	$e < 10\%$ per $N_{imm} = 400$	$e < 15\%$ mai
Ext sx	$e < 15\%$ mai	$e < 15\%$ mai	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 450$

Tabella 6.5: Errori percentuali per Re 30700

- Reynolds 24400: si riportano in figura (fig.6.34) gli andamenti degli errori percentuali per la zona centrale in caso di regime critico, e per le zone esterne nei due regimi subcritico e supercritico:

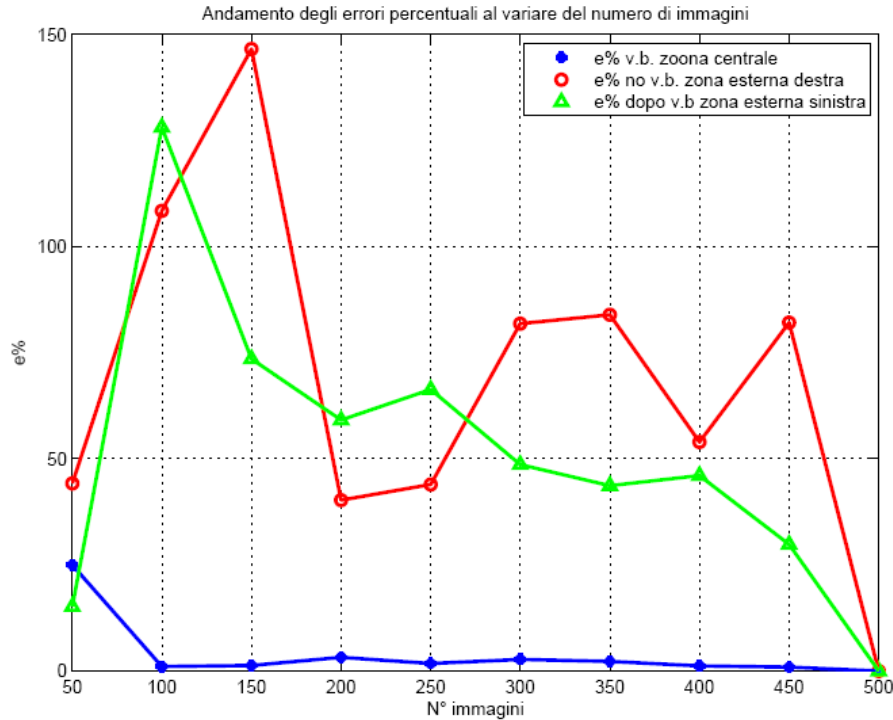


Figura 6.34: Errore percentuale per Re 24400

Regione	Vb	no Vb	dopo Vb
Centro	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 100$	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 50$	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 350$
Ext dx	$e < 15\%$ per $N_{imm} = 300$	$e < 15\%$ mai	$e < 5\%$ per $N_{imm} = 400$
Ext sx	$e < 10\%$ per $N_{imm} = 250$	$e < 15\%$ mai	$e < 15\%$ mai

Tabella 6.6: Errori percentuali per Re 24400

6.5 Confronto fra le due configurazioni

La prima notevole differenza fra le prove con la camera metallica e le prove con la camera trasparente è la completezza dei profili di velocità assiale nel secondo caso, che permette di calcolare l'entrainment correttamente e verificare che esso aumenti con la distanza assiale. In questo modo viene confermata ulteriormente l'ipotesi che i dati di entrainment ottenuti con la camera metallica fossero sbagliati non a causa di errori di calcolo, ma proprio per mancanza di informazioni.

Le prove con la camera metallica possono comunque fornire informazioni riguardo all'influenza del confinamento su un getto swirlato. Questa camera era più piccola rispetto alla seconda, e quindi il getto risultava essere maggiormente confinato.

Questo si traduce in un comportamento differente del flusso: flussi swirlati maggiormente confinati creano delle bolle di ricircolazione più ampie e di conseguenza i due getti laterali caratterizzati da velocità assiali positive risultano essere più aperti; le forze centrifughe sono quindi più intense e di conseguenza anche il gradiente di pressione radiale, che deve equilibrare gli effetti centrifughi. Al contrario il getto meno confinato tende anche a rimanere più chiuso attorno ad una bolla di ricircolazione centrale più piccola, e di conseguenza il fenomeno del vortex breakdown si manifesta per valori di portata assiale e tangenziale per i quali con la prima camera si era già manifestato. Diretta conseguenza di quanto detto è il fenomeno per cui nei primi esperimenti la bolla di ricircolazione rimaneva aperta fino al confine superiore della camera e quindi i profili di velocità assiale alle distanze maggiori continuano ad assumere valori negativi nella zona centrale; al contrario nella nuova camera si nota che la bolla di ricircolazione centrale si richiude (fig.??) e i profili di velocità assiale da quella distanza in poi non assumono più valori negativi nella zona centrale.

L'effetto di confinamento è ben visibile sia dalle mappe vettoriali sia dagli andamenti di velocità assiali, che raggiungono valori inferiori in negativo per la seconda configurazione proprio per effetti di fenomeni di ricircolazione meno intensi:

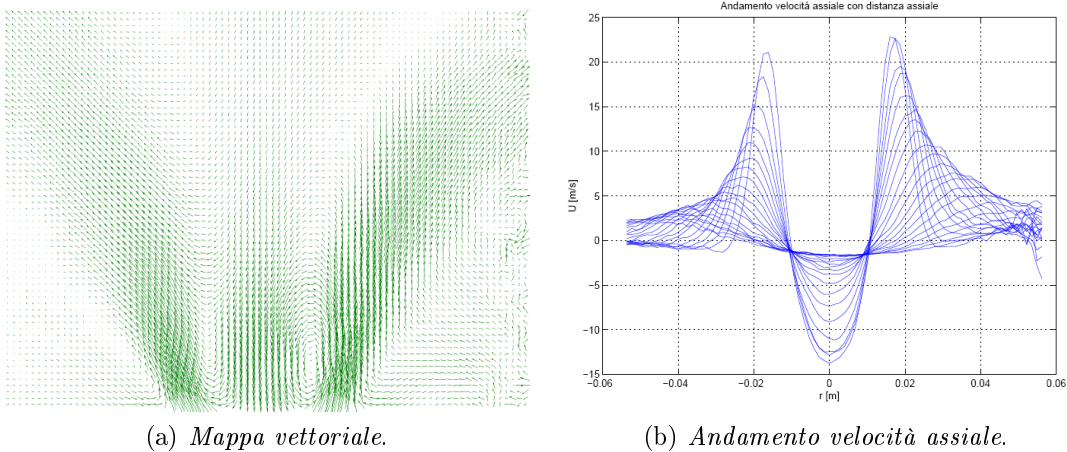


Figura 6.35: Effetto di confinamento a $Re\ 30700$, prima configurazione

E per confronto si riportano le immagini per la seconda configurazione al medesimo Reynolds e grado di swirl:

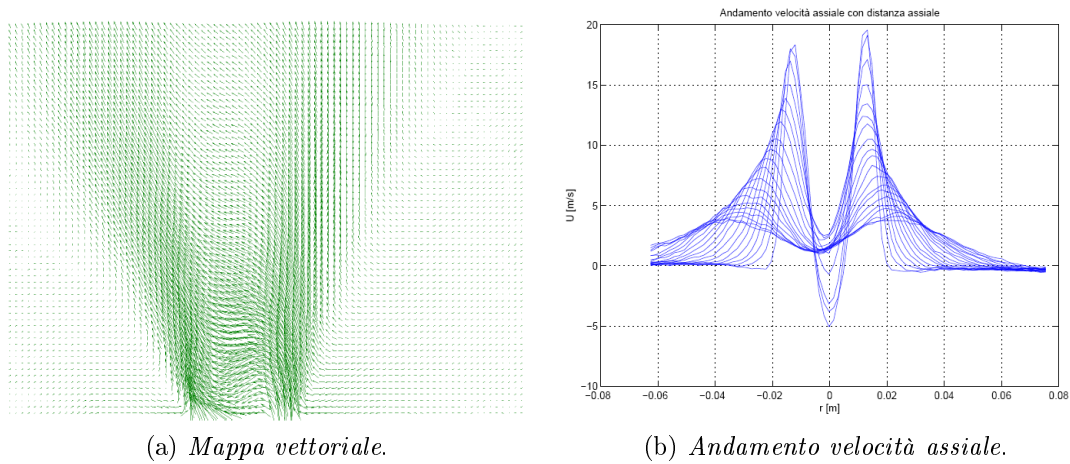


Figura 6.36: Effetto di confinamento a Re 30700, seconda configurazione

6.6 Calcolo entrainment rate mediante velocità radiale

L'entrainment rate degli esperimenti svolti è stato calcolato integrando i profili di velocità assiale a tutte le distanze assiali, per poter ricavare un andamento allontanandosi dall'ugello.

Esiste un secondo metodo per ricavare l'andamento di entrainment rate al crescere della distanza assiale ed esso si basa sull'utilizzo della velocità radiale.

La regione di campo di moto può essere divisa in due parti: la regione che si estende dagli estremi esterni del campo di moto fino allo strato limite tra getto ed aria ambiente, dove vale la seguente relazione:

$$V_{rad}r = cost.$$

e la regione che si estende dallo strato limite tra getto ed aria ambiente fino all'asse dell'ugello, dove questa relazione non vale più a causa delle instabilità presenti in essa.

Il sistema PIV restituisce anche i valori di velocità radiale all'esterno del getto e quindi è possibile per ogni quota (che viene presa pari a 3 spaziature della griglia che il sistema di acquisizione crea sull'immagine del flusso) calcolare il prodotto della formula precedente e verificare a quale valore di raggio la relazione non vale più: indicativamente quella posizione radiale corrisponde al confine fra la regione interessata dalle instabilità del flusso e la regione imperturbata.

A questo punto l'entrainment rate, per ciascuna quota, viene calcolato integrando il valore di velocità radiale medio che passa attraverso la superficie laterale del cilindro che ha per base il cerchio di raggio pari a quello corrispondente al confine fra interno ed esterno del flusso e altezza pari alla variazione di quota rispetto allo step precedente.

In figura (fig.6.37) si riporta lo schema di base per il calcolo dell'entrainment rate per mezzo della velocità radiale:

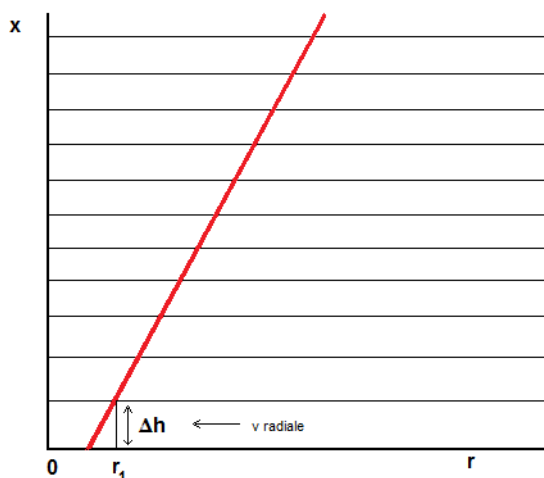


Figura 6.37: Schema per il calcolo di entrainment rate tramite velocità radiale

Nella realtà la linea rossa, che rappresenta la linea immaginaria su cui viene svolto il calcolo, è una spezzata, in quanto viene considerato il raggio medio di una variazione di altezza Δh

La formula per il calcolo dell'entrainment rate associato alla prima quota della figura diventa quindi:

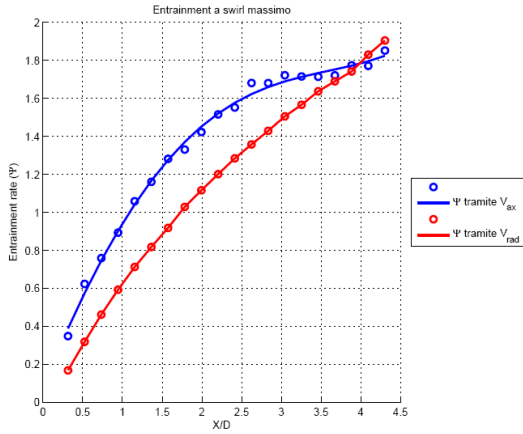
$$\psi_1 = 2\pi r_1 \Delta h \bar{V}_{rad}$$

Quindi in generale lungo tutte le quote e ipotizzando che Δh sia costante, il calcolo diventa:

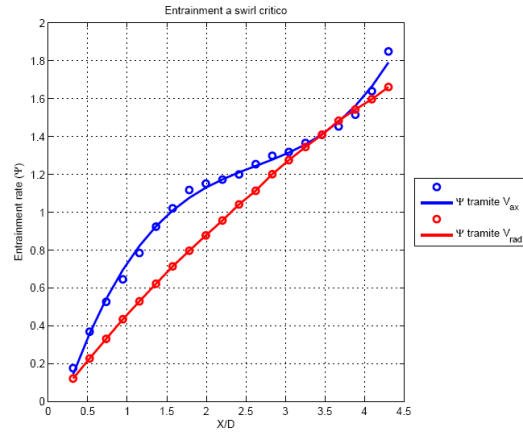
$$\psi = 2\pi \Delta h \sum_i r_i \bar{V}_{irad}$$

Si riportano di seguito i risultati per le prove 1, 5, 6, 7, e 9 a Reynolds pari a 30700: si calcola l'entrainment rate sia tramite velocità assiale, sia tramite velocità radiale e si riporta il confronto; per ultimi si riportano i risultati dei calcoli con la sola velocità radiale confrontati fra di loro.

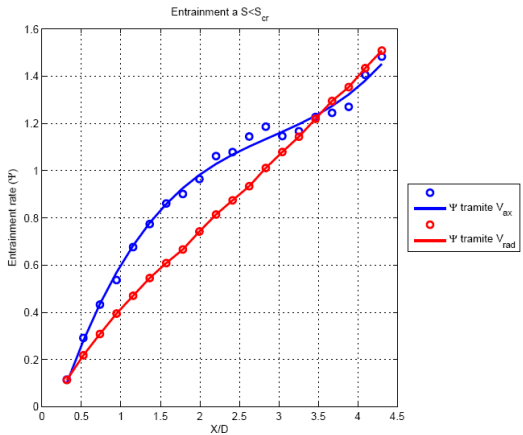
Allo stesso modo si riportano anche i risultati per le prove 1, 5, 6, 7 e 8 a Reynolds pari a 24400.



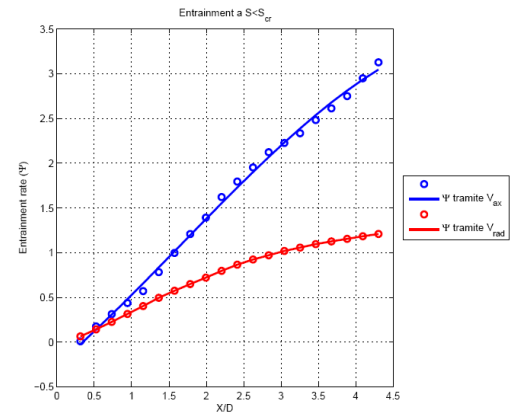
(a) Entrainment rate a swirl massimo pari a 1.47.



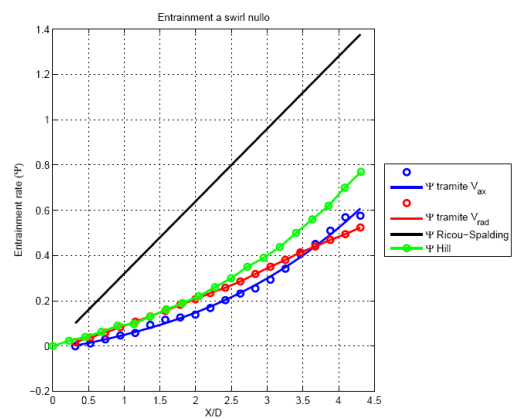
(b) Entrainment rate a swirl critico pari a 0.83.



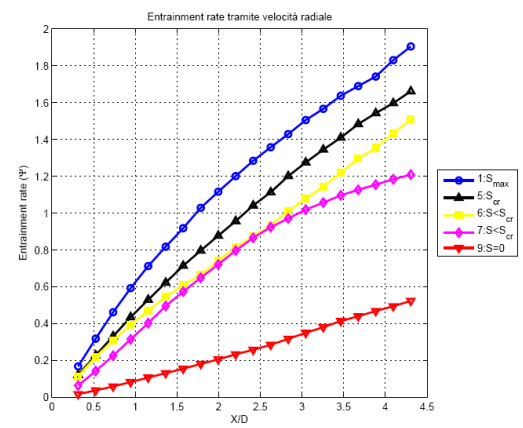
(c) Entrainment rate a $S=0.74$.



(d) Entrainment rate a $S=0.56$.

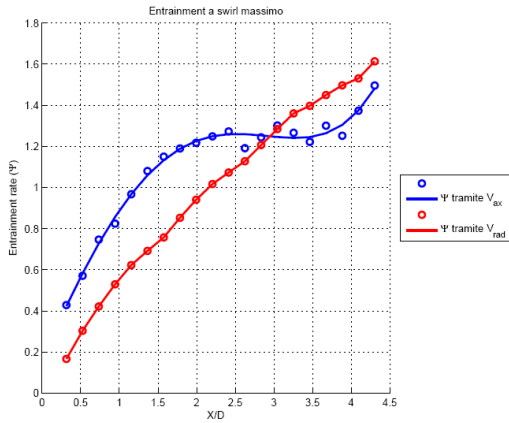


(e) Entrainment rate a $S=0$, confronto con andamento di Ricou-Spalding e Hill.

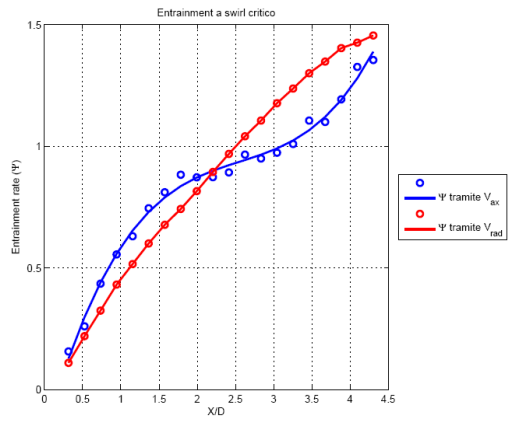


(f) Confronto entrainment rate tramite velocità radiale.

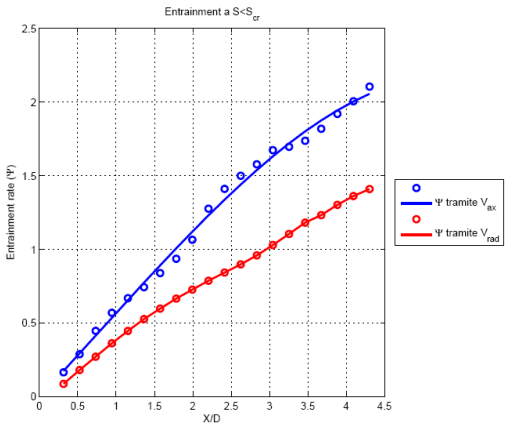
Figura 6.38: Risultati a $Re=30700$.



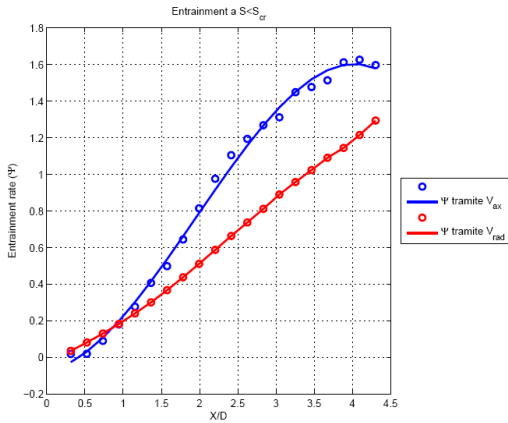
(a) Entrainment rate a swirl massimo pari a 1.5.



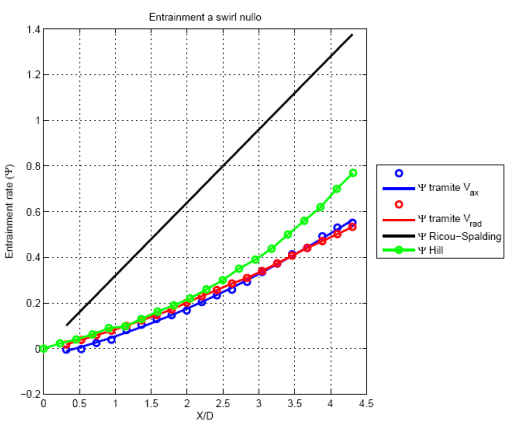
(b) Entrainment rate a swirl critico pari a 0.87.



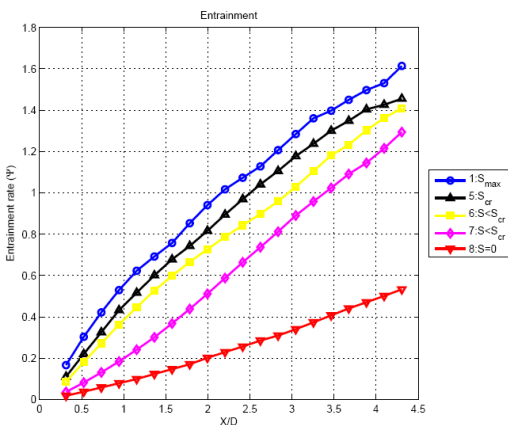
(c) Entrainment rate a $S=0.65$.



(d) Entrainment rate a $S=0.44$.



(e) Entrainment rate a $S=0$, confronto con andamento di Ricou-Spalding e Hill.



(f) Confronto entrainment rate tramite velocità radiale.

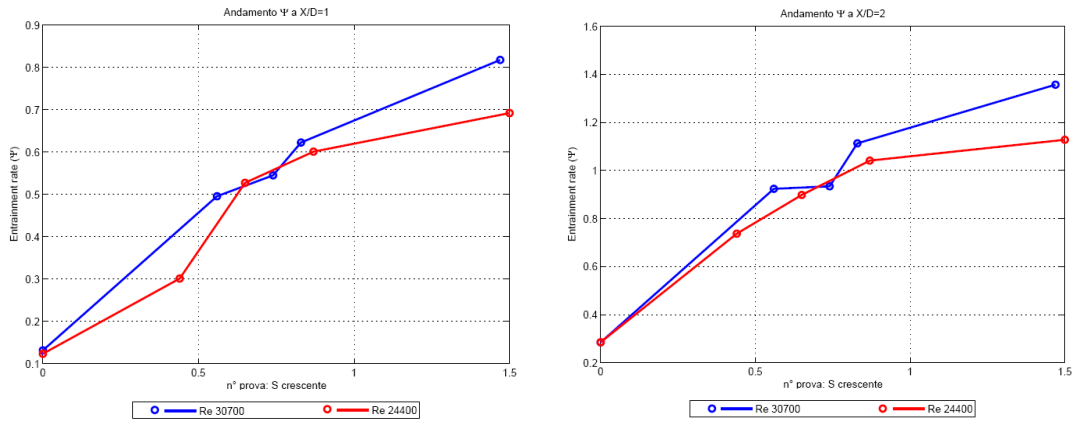
Figura 6.39: Risultati a $Re=24400$.

In tutte le prove riportate si nota che i valori di entrainment rate delle prove con swirl risultano localmente diversi dai valori calcolati tramite velocità assiale: per le prove 1, 5, 6 a Reynolds 30700 e 1, 5 a Reynolds 24400, le differenze si concentrano nella zona centrale, per distanze assiali comprese fra 0.5 e 3 diametri, ossia le medesime distanze per cui il flusso swirlato presenta una configurazione aperta attorno alla bolla di ricircolazione; le portate misurate integrando i profili di velocità assiale risultano maggiori di quella stimate dalle componenti radiali nella zona interessata dalla bolla di ricircolazione e dalla sua scia probabilmente a causa di una insufficiente risoluzione del profilo di velocità lungo il diametro, di una non perfetta simmetria del flusso e di una variazione di densità nella zona di ricircolazione che invece viene mantenuta uniforme in tutto il campo di moto per ipotesi. Le portate calcolate con la velocità radiale invece considerano solo l'aria che viene trascinata dall'esterno verso l'interno del getto e di conseguenza non vengono influenzate dalla presenza della bolla di ricircolazione interna.

Per quanto riguarda invece il caso a swirl nullo si ritrova un buon accordo fra i valori di entrainment rate calcolati con i due metodi. Viene riportato anche il confronto con la curva di Hill ([2]) e di Ricou-Spalding ([1]) che per iniezione di aria in aria segue un andamento lineare con un coefficiente pari a 0.32. La curva di Ricou-Spalding in realtà rappresenta l'andamento per regioni lontane dall'efflusso; la curva di Hill invece rappresenta la correzione della curva di Ricou-Spalding per regioni vicine all'efflusso e quindi le curve a swirl nullo di questo lavoro, che si concentra sulle distanze assiali vicino all'ugello si avvicinano maggiormente all'andamento di Hill.

Interessante invece è il caso della prova 7 per Reynolds 30700, e prove 6 e 7 per Reynolds 24400, che nei calcoli tramite velocità assiale avevano un comportamento anomalo, soprattutto all'aumentare della distanza assiale: integrando il profilo assiale, l'entrainment rate risultava crescere molto velocemente, assumendo valori maggiori dei valori delle prove a swirl maggiore; il calcolo tramite velocità radiale evidenzia invece un comportamento dell'entrainment rate conforme a quanto ci si aspetta dalla teoria, ossia i valori di entrainment sono più bassi delle prove a swirl maggiori. Questo è evidente proprio al crescere della distanza assiale: vicino all'ugello vi è accordo fra i profili con velocità assiale e radiale, dove quindi l'entrainment tramite velocità assiale non presentava ancora un comportamento anomalo, ma si discosta fortemente allontanandosi dall'ugello. Dal momento che per entrambi i valori di Reynolds le prove interessate da questo fenomeno rappresentano gradi di swirl simili, sorge il dubbio che attorno a quei determinati valori di swirl il profilo di velocità assiale assuma delle caratteristiche che rendano l'integrazione numerica estremamente poco accurata.

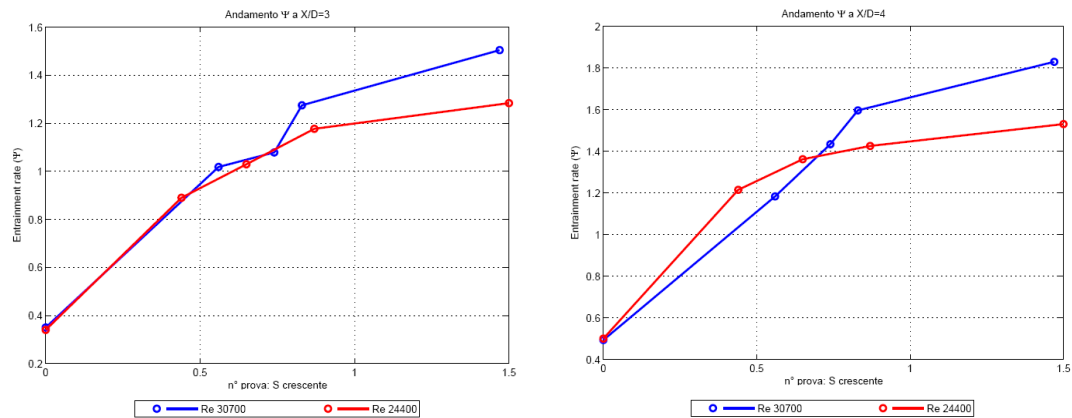
Si procede quindi con un'analisi dell'andamento dell'entrainment rate al variare del numero di swirl e a valori di X/D fissati, come era stato fatto per gli entrainment rate ottenuti mediante integrazione dei profili di velocità assiale.



(a) $X/D = 1$.

(b) $X/D = 2$.

Figura 6.40: Entrainment rate per X/D fissato



(a) $X/D = 3$.

(b) $X/D = 4$.

Figura 6.41: Entrainment rate per X/D fissato

Gli andamenti a $X/D = 1$ sono in realtà poco significativi, in quanto anche nelle prove precedenti non vi erano particolarità negli andamenti di entrainment rate. Di particolare interesse sono invece le distanze assiali dall'efflusso maggiori: viene confermato che il calcolo dell'entrainment rate mediante velocità radiale non porta ad avere andamenti che crescono con continuità al crescere del numero di swirl, anche se si può notare come la pendenza delle curve venga modificata quando i numeri di swirl si riferiscono ad un flusso in cui si sta formando il vortex-breakdown.

Da questi risultati si nota anche le differenze nei valori di entrainment rate fra i due Reynolds sono più nette a valori di swirl alti, in particolare a Reynolds 30700 l'entrainment rate è migliore, e sono invece attenuate a valori di swirl bassi.

Capitolo 7

Precessing vortex core

Il precessing vortex core (PVC) è un fenomeno periodico che si instaura in flussi dotati di alto numero di swirl e alto numero di Reynolds. In particolare nascono delle oscillazioni periodiche di pressione, e quindi di velocità, che portano il nucleo centrale del flusso a ruotare attorno alla bolla di ricircolazione formando un moto di precessione. Inoltre questo fenomeno crea una spirale tridimensionale allontanandosi dall'ugello che comporta una notevole asimmetria del campo di moto.

Tramite il sistema di sincronizzazione è possibile rilevare le fluttuazioni periodiche di pressione, che si riflettono anche in fluttuazioni acustiche rilevabili per mezzo di un microfono, e acquisire immagini in fase con il moto periodico.

Utilizzando un oscilloscopio è possibile visualizzare il segnale acquisito dal microfono: in conformità con i moti periodici, il segnale acquisito risulta essere una sinusoide di cui è possibile calcolare la frequenza, ovviamente diversa fra i due Reynolds in quanto il fenomeno del PVC è più intenso per Reynolds maggiori:

Reynolds	frequenza $f_{PVC}[Hz]$
30700	696
24400	665

Tabella 7.1: Frequenza PVC

La strumentazione PIV utilizzata in questo lavoro permette di acquisire immagini in un piano r-x posizionato in corrispondenza del diametro massimo dell'ugello e quindi, acquisendo immagini in fase con il PVC (ossia con il PVC sempre in una determinata posizione), si ottengono delle mappe di velocità assiale in cui viene visualizzata una sezione della spirale.

IL sistema PIV permette di impostare un ritardo di acquisizione rispetto al trigger di sincronizzazione: trovando un valore ottimale è possibile visualizzare il PVC quando presenta la sua estensione radiale massima nel piano di acquisizione, posizione che permette di visualizzare mappe di velocità fortemente asimmetriche; se al contrario la fase fissata dovesse corrispondere ad una posizione del PVC

sfasata di 90° rispetto al piano di acquisizione, il piano illuminato dal laser non ne risulterebbe influenzato e quindi le mappe di velocità acquisite sarebbero poco o per nulla asimmetriche.

Una prima analisi delle mappe quindi consente di stabilire il ritardo ottimale per le visualizzazioni PIV:

$$\Phi = \omega t = 2\pi f t$$

da cui ricavo il ritardo t per ogni grado di angolo:

$$delay = \frac{1}{2\pi f_{PVC}} \frac{\pi}{180}$$

che risulta di $4\mu s^2$ per Reynolds 30700 e $4.2\mu s^2$ per Reynolds 24400.

Reynolds	delay [μs]
30700	180
24400	190

Tabella 7.2: Frequenza PVC

Entrambi i valori determinano uno sfasamento di 45° rispetto alla fase che il PVC possiede in questi esperimenti. Fissati questi valori e la posizione iniziale del microfono, si fissa la fase a 0° di riferimento per gli esperimenti.

Impostando questi valori per il ritardo è possibile visualizzare un profilo di velocità completamente spostato da un lato del piano di acquisizione; per visualizzare il PVC sfasato di 180° rispetto alle prove con i ritardi riportati in tabella, non è possibile sommare ulteriore ritardo in quanto il fenomeno non è esattamente periodico e il trigger del sistema PIV perde di efficacia per ritardi troppo elevati. Si preferisce quindi spostare fisicamente il microfono: le varie posizioni determinano al cambiamenti di fase.

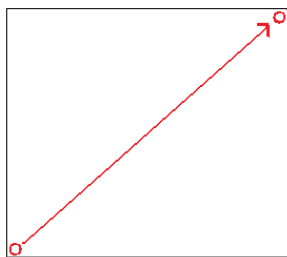


Figura 7.1: Posizione del microfono iniziale e posizione sfasata di 180°

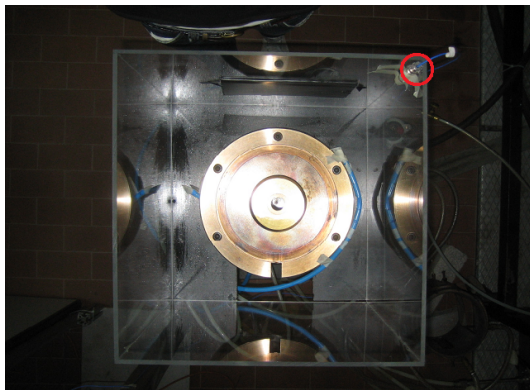
Per le prove a Reynolds 30700 il microfono è stato posizionato in 5 posizioni diverse; per le prove a Reynolds 24400 sono state considerate solo le due posizioni nei due vertici della diagonale.

7.1 Risultati a Reynolds 30700

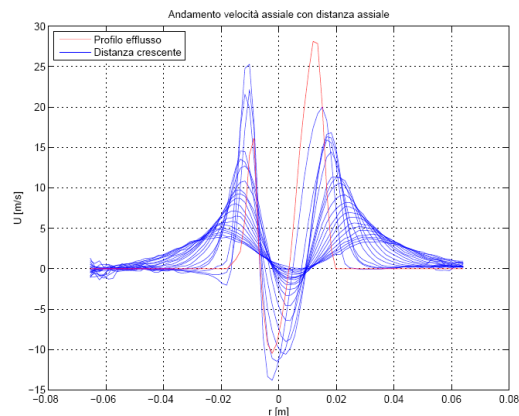
Il fenomeno del PVC è stato studiato al valore di swirl massimo, pari a 1.47. Sicuramente il PVC si manifesta anche in alcune delle prove a swirl inferiore, ma la sua influenza sul campo di moto risulterebbe essere di intensità minore. Dal momento che la struttura del PVC è molto complessa e di difficile interpretazione si è preferito utilizzare solo la prova a swirl massimo dove il PVC si manifesta con maggiore intensità.

Insieme ai risultati si riporta anche una fotografia che mostra la posizione del microfono per quella determinata prova, ricordando che in queste fotografie la telecamera PIV si troverebbe nella parte superiore ma non viene inquadrata. Si riporta anche una mappa di velocità assiale a colori dove è possibile vedere la sezione della spirale creata dal movimento del PVC.

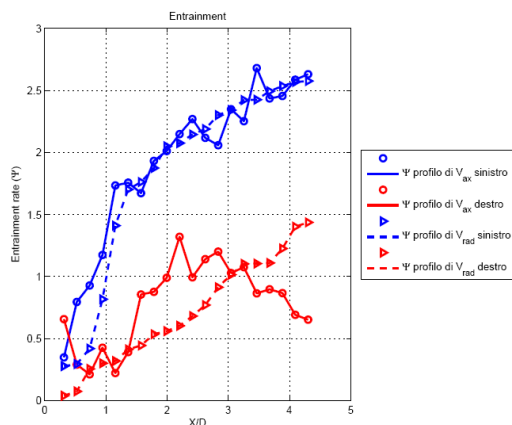
– Prova 1: fase 0°



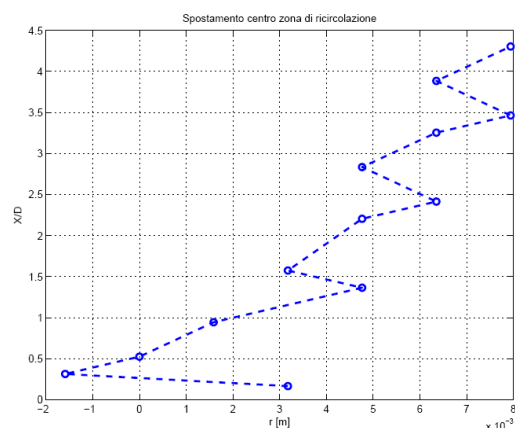
(a) Posizione microfono.



(b) Andamento velocità assiale.



(c) Entrainment rate.



(d) Spostamento centro di ricircolazione.

Figura 7.2: Risultati a $Re=30700$, fase 0° .

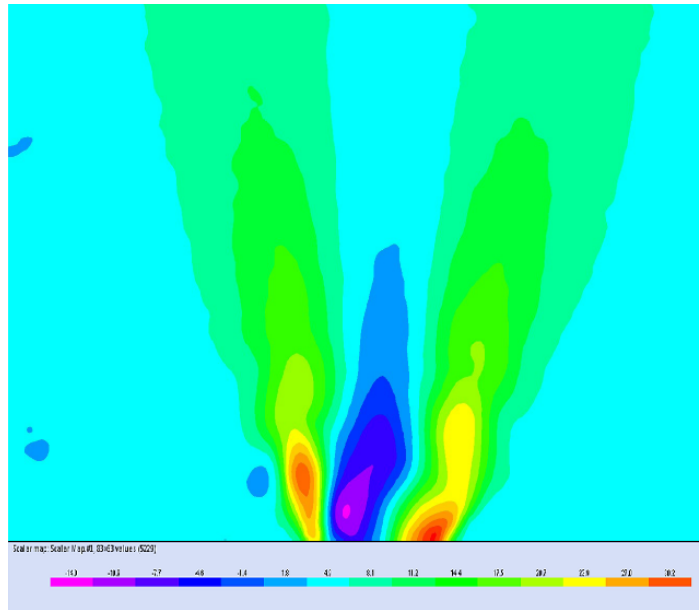
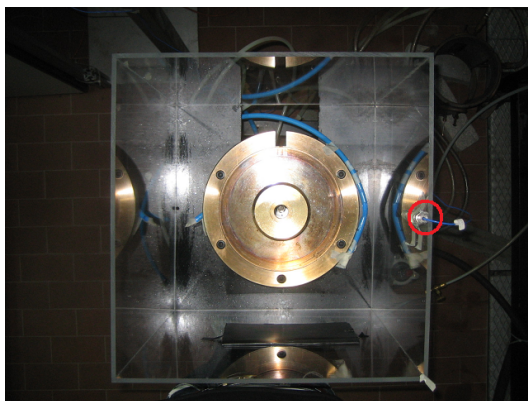
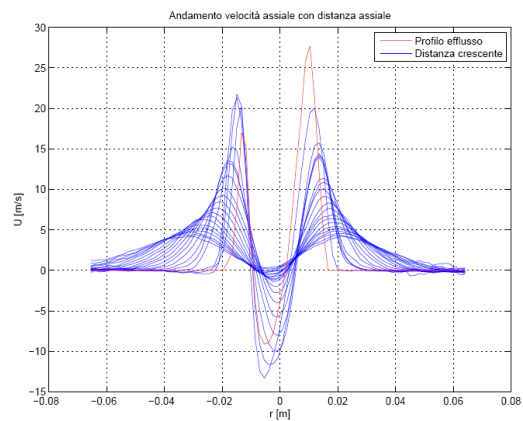


Figura 7.3: Mappa di velocità assiale Reynolds 30700 fase 0°

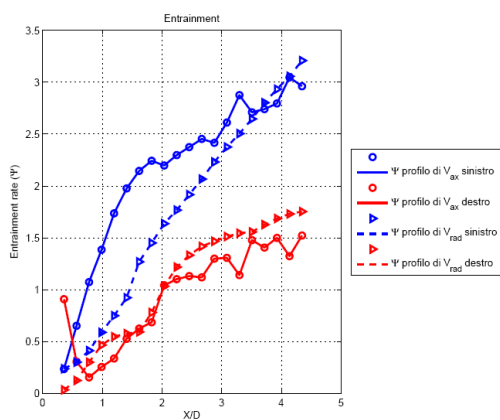
– Prova 2: Fase 45°



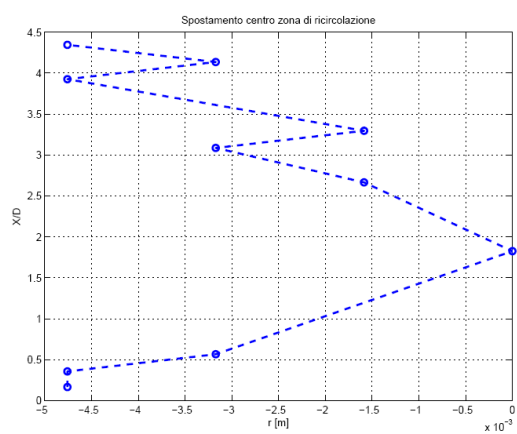
(a) Posizione microfono.



(b) Andamento velocità assiale.



(c) Entrainment rate.



(d) Spostamento centro di ricircolazione.

Figura 7.4: Risultati a $Re=30700$, fase 45° .

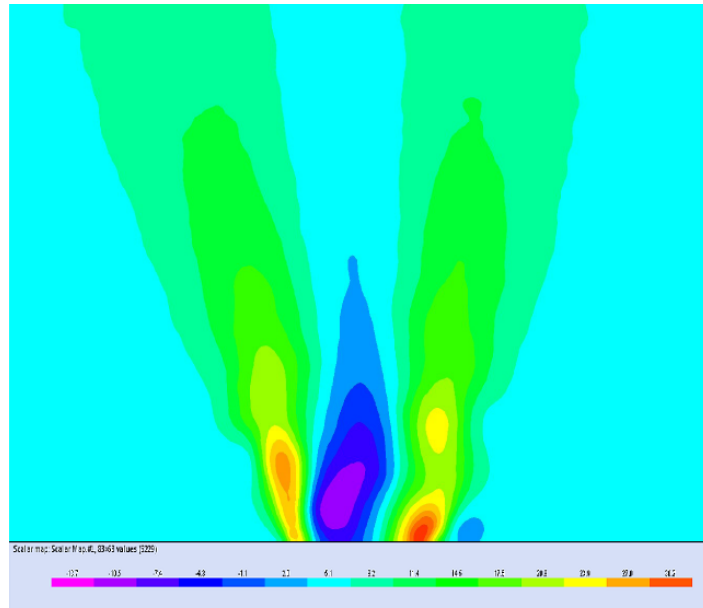
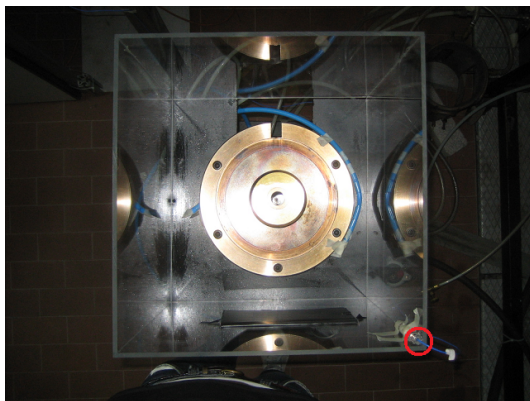
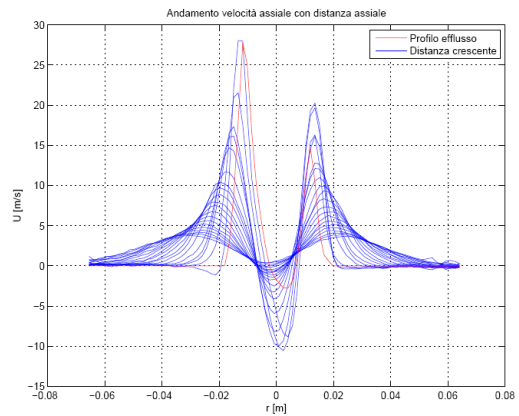


Figura 7.5: Mappa di velocità assiale Reynolds 30700 fase 45°

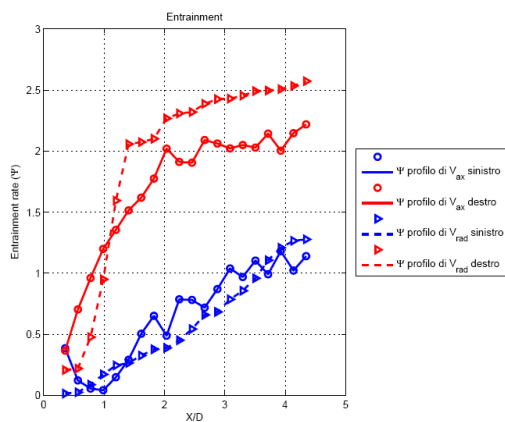
– Prova 3: fase 90°



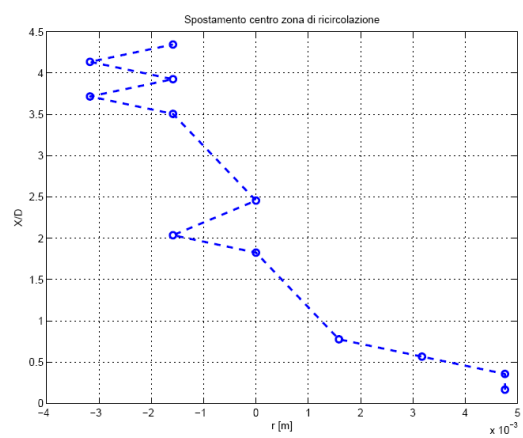
(a) Posizione microfono.



(b) Andamento velocità assiale.



(c) Entrainment rate.



(d) Spostamento centro di ricircolazione.

Figura 7.6: Risultati a $Re=30700$, fase 90°.

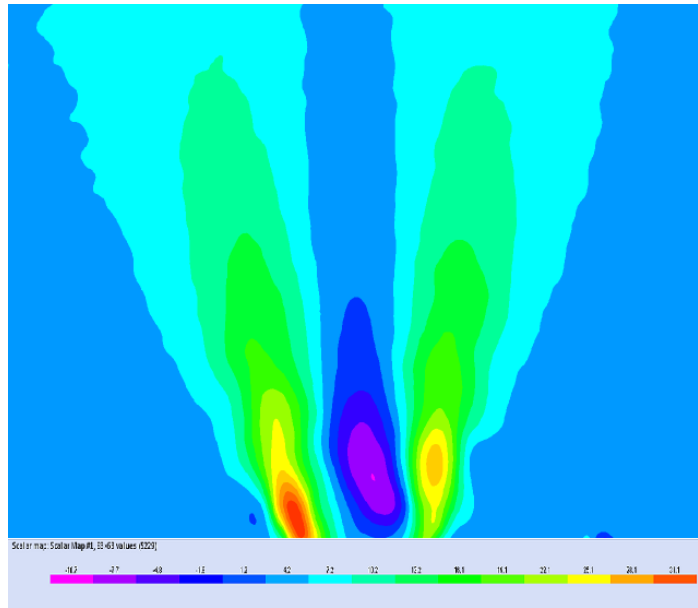
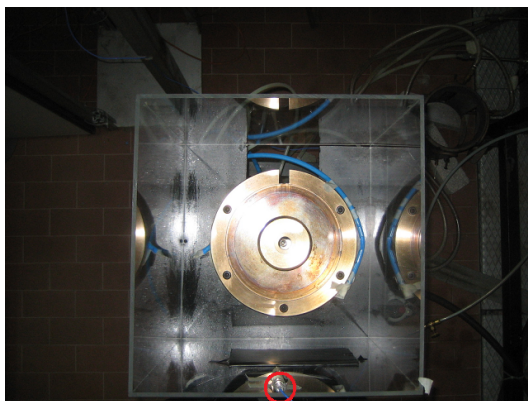
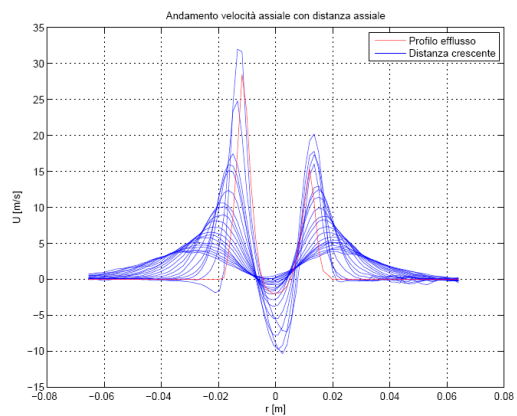


Figura 7.7: Mappa di velocità assiale Reynolds 30700 fase 90°

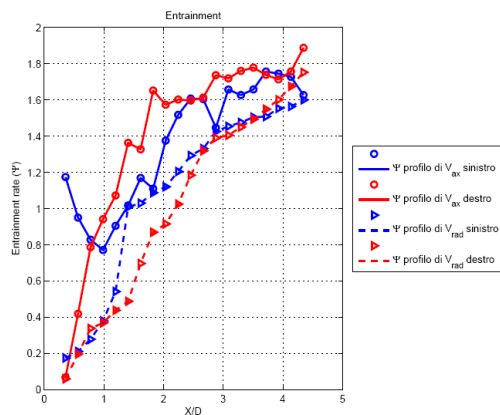
– Prova 4: fase 135°



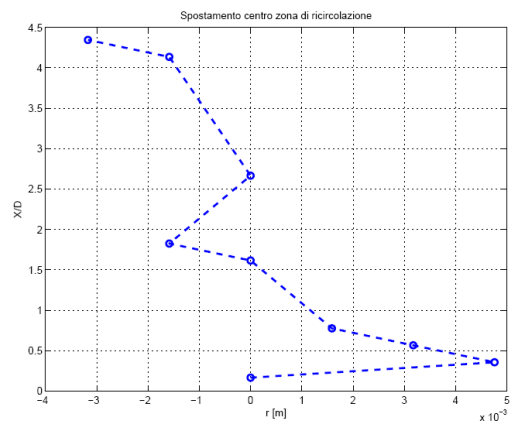
(a) Posizione microfono.



(b) Andamento velocità assiale.



(c) Entrainment rate.



(d) Spostamento centro di ricircolazione.

Figura 7.8: Risultati a $Re=30700$, fase 135° .

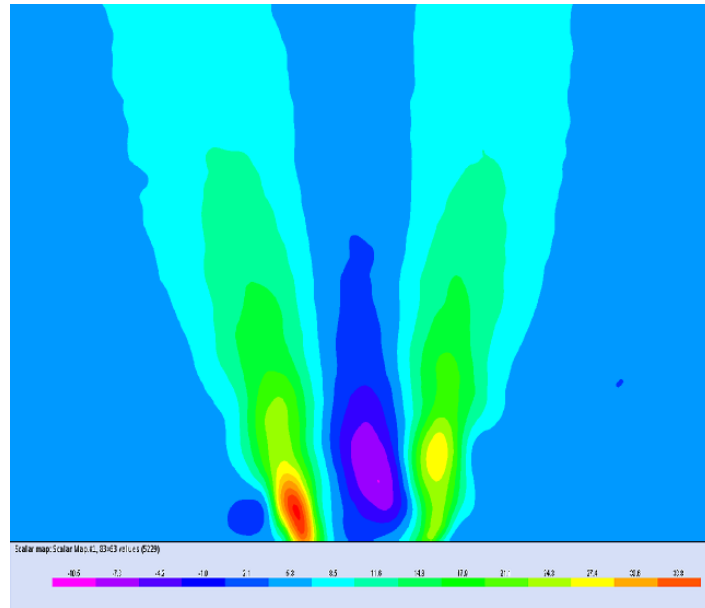
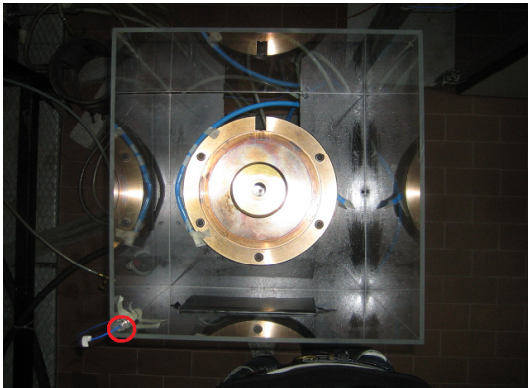
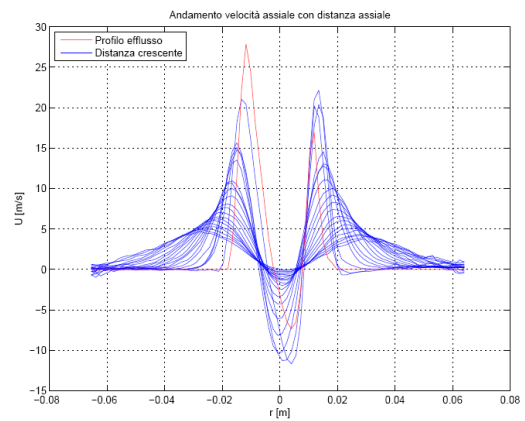


Figura 7.9: Mappa di velocità assiale Reynolds 30700 fase 135°

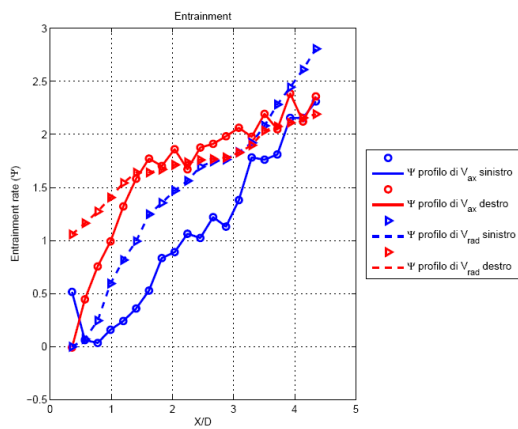
– Prova 5: fase 180°



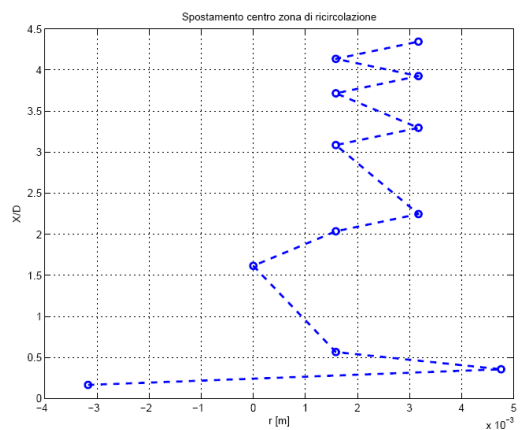
(a) Posizione microfono.



(b) Andamento velocità assiale.



(c) Entrainment rate.



(d) Spostamento centro di ricircolazione.

Figura 7.10: Risultati a $Re=30700$, fase 180° .

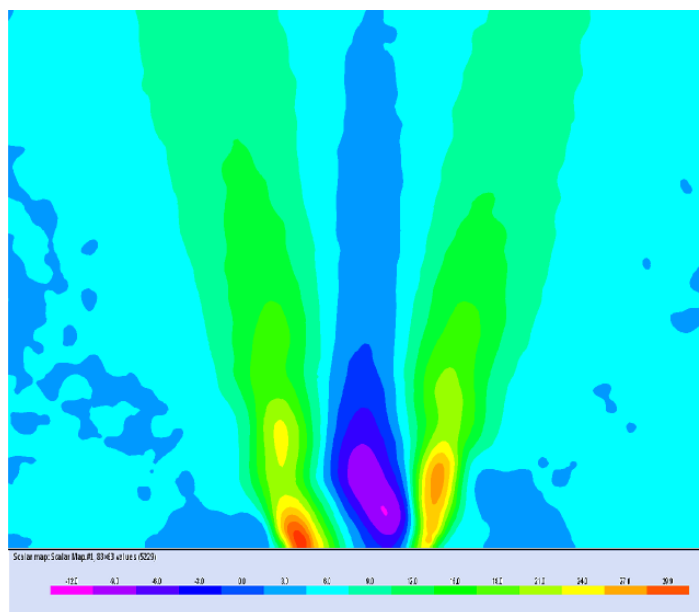


Figura 7.11: Mappa di velocità assiale Reynolds 30700 fase 180°

Si riporta di seguito lo spostamento del punto di massima velocità assiale dei profili all'efflusso delle varie prove per avere un'idea di come si muove il PVC al variare della posizione del microfono: guardando l'ugello dall'alto è possibile stabilire soltanto la posizione di tale punto lungo il diametro che corrisponde al piano di misura del sistema PIV. Non è possibile stabilire una fase precisa per il PVC che corrisponda alla fase determinata dalla posizione del microfono in quanto le misure prese sulla diagonale sono coerenti con uno sfasamento di circa 180° ma le misure prese nei punti con il microfono a 45° , 90° e 135° non sembrano avere uno sfasamento coerente con quello del microfono.

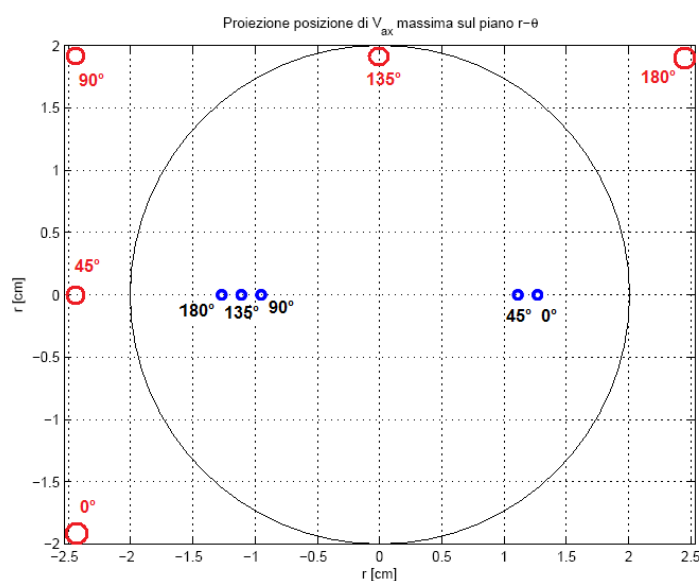


Figura 7.12: Variazione posizione PVC con la posizione del microfono

Sicuramente le prove eseguite a Reynolds 30700 con il microfono in diverse posizioni colgono diverse posizioni del PVC lungo la traiettoria circolare che esso naturalmente segue. Questo metodo di misura non è sufficiente a ricostruire in maniera esatta il percorso seguito.

Con queste prove è possibile valutare infine la media dei campi di moto delle diverse prove. Le fasi coperte dalle prove precedenti riguardano il range 0° - 180° e si suppone un comportamento simmetrico per le fasi 180° - 360° .

In questo modo si svolge un'analisi comparabile con l'analisi della prova a swirl massimo con misura non condizionata: è sufficiente calcolare l'entrainment rate medio dei due profili destro e sinistro del campo di moto medio fra le prove in fase e confrontarlo con la curva della medesima prova non condizionata:

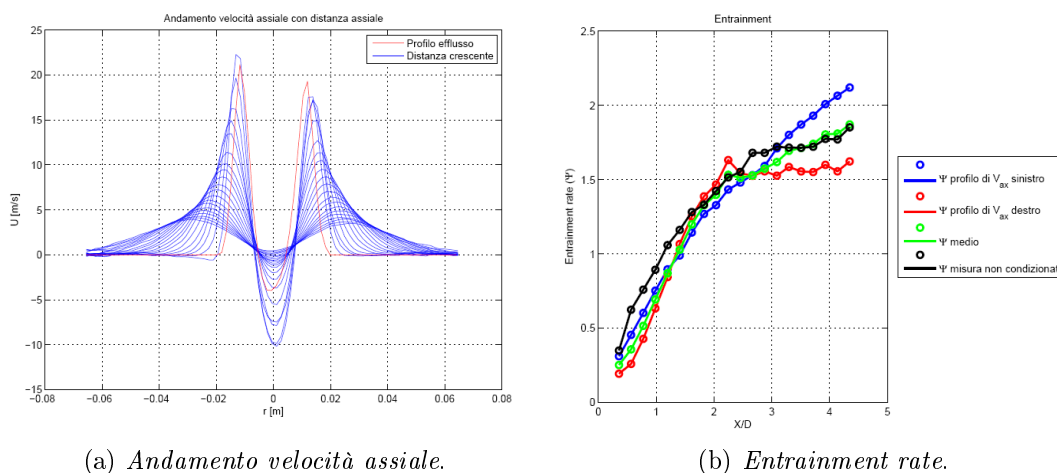
(a) *Andamento velocità assiale.*(b) *Entrainment rate.*

Figura 7.13: Confronto risultato medio prove in fase-risultato prova non condizionata a Re 30700 e swirl pari a 1.47.

Si può notare che in media le velocità assiali hanno componenti maggiori nel lato sinistro e questo è dovuto al fatto che vi sono più prove con il PVC spostato dal lato sinistro. Per questo motivo i due profili di entrainment non sono esattamente sovrapposti.

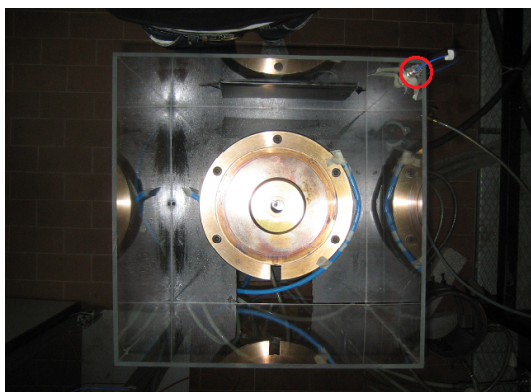
Per il confronto con la prova non condizionata è necessario mediare i due profili destro e sinistro di entrainment perchè nelle prove non in fase effettivamente il profilo di entrainment rappresentava una media del campo di moto destro e sinistro. Le due curve di entrainment rate, verde e nera, non coincidono perfettamente ma hanno un andamento che si accorda bene: le differenze fra le due prove probabilmente derivano dal fatto che il PVC non è un fenomeno esattamente periodico e quindi coprire le fasi 0° - 180° e poi supporre un comportamento simmetrico per le fasi 180° - 360° comporta introdurre un errore.

7.2 Risultati a Reynolds 24400

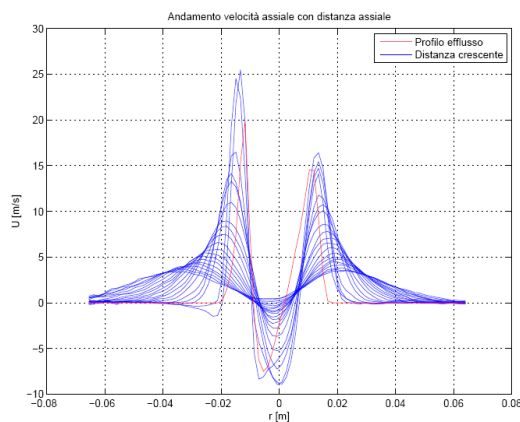
Anche per il Reynolds 24400 il PVC è stato studiato solo al grado di swirl massimo, pari a 1.5. Le motivazioni sono le medesime del caso a Reynolds 30700, a cui si aggiunge il fatto che il PVC perde già di intensità al diminuire del numero di Reynolds.

Si riporta anche per questi risultati la fotografia della posizione del microfono, considerando sempre che la posizione della telecamera PIV nella parte superiore dell'immagine.

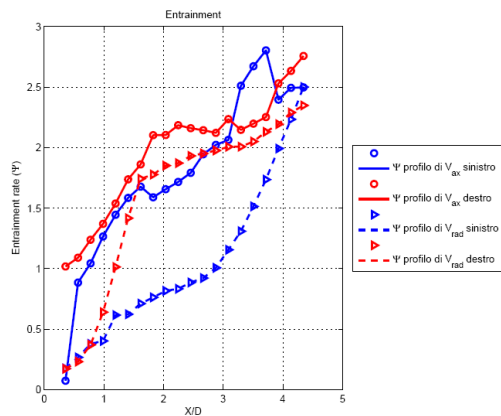
– Prova 1: fase 0°



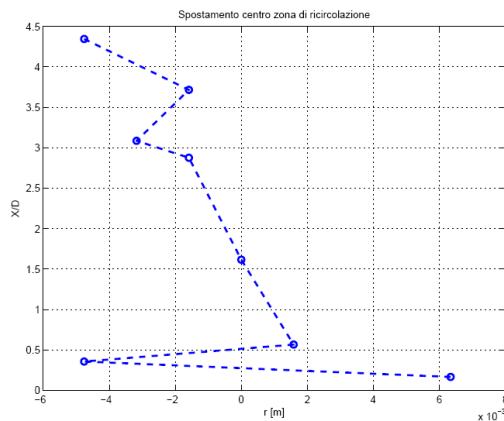
(a) Posizione microfono.



(b) Andamento velocità assiale.



(c) Entrainment rate.



(d) Spostamento centro di ricircolazione.

Figura 7.14: Risultati a $Re=30700$, fase 0°.

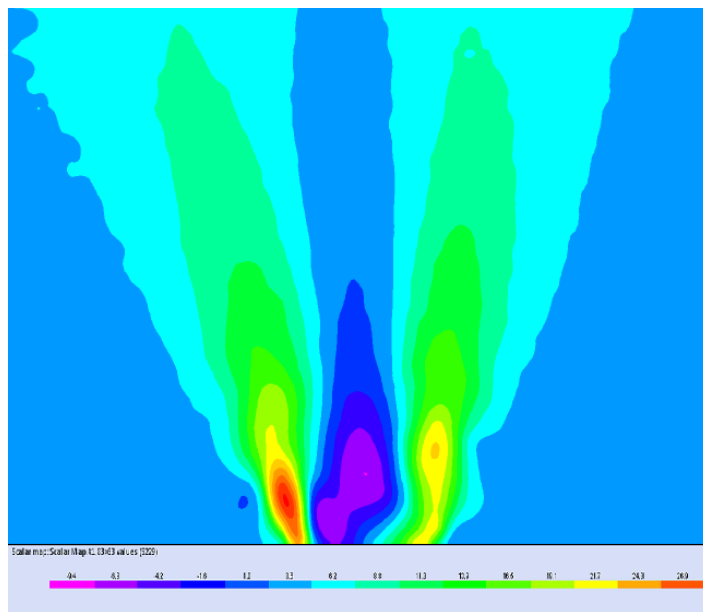
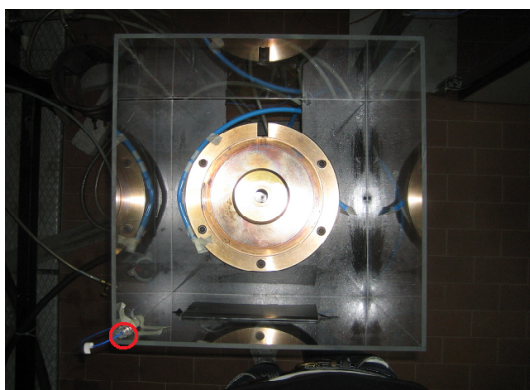
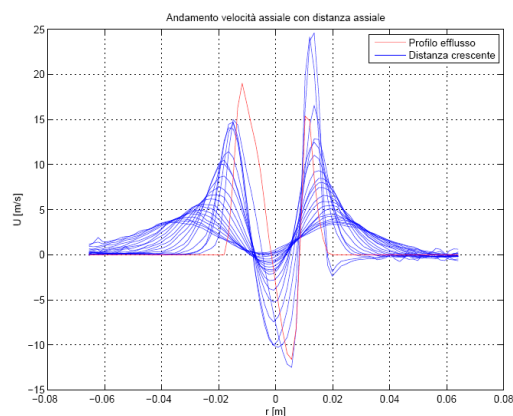


Figura 7.15: Mappa di velocità assiale Reynolds 24400 fase 0°

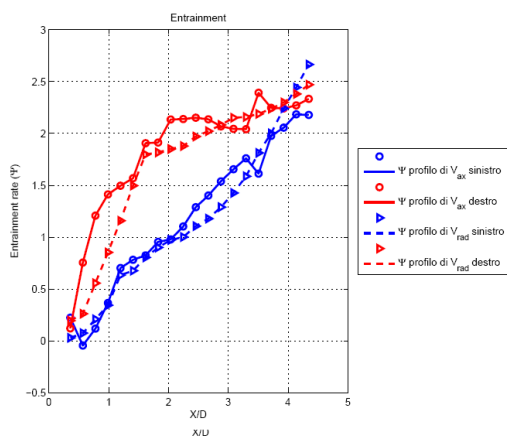
– Prova 2



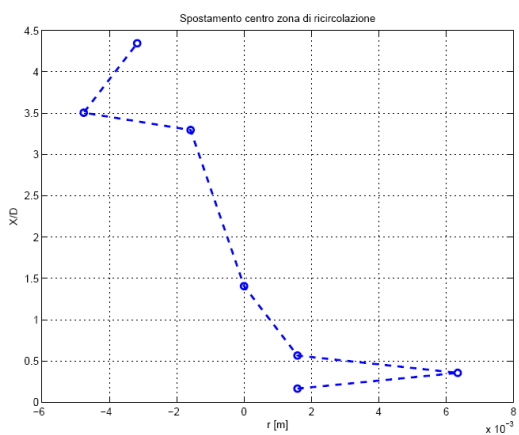
(a) Posizione microfono.



(b) Andamento velocità assiale.



(c) Entrainment rate.



(d) Spostamento centro di ricircolazione.

Figura 7.16: Risultati a $Re=30700$, fase 180° .

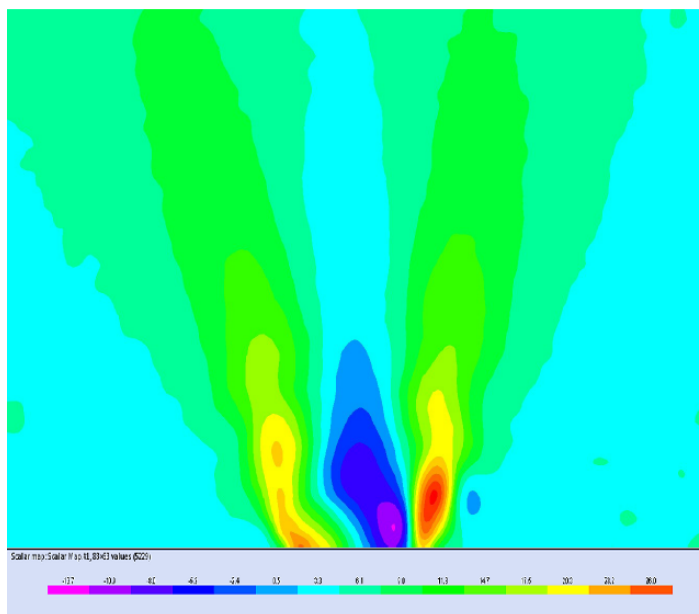


Figura 7.17: Mappa di velocità assiale Reynolds 24400 fase 180°

Dalle mappe a colori di velocità assiale si nota chiaramente come il PVC sia concentrato in regioni vicine all'efflusso, e il ramo di spirale, che viene visualizzato dalla parte opposta rispetto al centro della zona di ricircolazione, si estende fino a circa 1.5 diametri dall'efflusso.

Questo andamento si nota anche nelle asimmetrie dei profili di velocità assiale: le velocità assiali assumono valori maggiori dalla parte dove si trova il PVC, o il suo ramo di spirale, e valori inferiori nelle regioni opposte; questa asimmetria si attenua fortemente dopo 1.5 diametri. Una leggera asimmetria rimane nei profili anche allontanandosi dall'ugello.

L'asimmetria dei profili di velocità si manifesta anche negli andamenti di entrainment rate, che si differenziano a seconda del lato dove si trova il PVC: la tendenza dell'entrainment rate è quella di assumere valori inferiori nel lato dove si trova il PVC e valori superiori nel lato dove si trova il ramo di spirale.

Questo comportamento viene confermato anche dagli andamenti di entrainment rate calcolati mediante velocità radiale: come succede per le prove non condizionate, gli entrainment rates calcolati tramite velocità radiale non coincidono perfettamente con quelli ottenuti mediante velocità assiale, per i motivi già spiegati nel capitolo precedente; tuttavia anche tramite velocità radiale si riscontrano i medesimi comportamenti diversi fra lato destro e sinistro rispetto al centro del vortice di ricircolazione.

In accordo con quanto detto da Canepa, et al. ([5]), la presenza del PVC comporta delle variazioni radiali di velocità assiale e quindi dei gradienti radiali di pressione che causano una curvatura del flusso verso l'esterno rispetto all'asse dell'ugello laddove si trova il PVC o il suo ramo di spirale, che a loro volta agiscono sull'entrainment rate sfavorendolo localmente. Al contrario il lato opposto subisce una curvatura del flusso verso l'interno che favorisce l'entrainment richiamando aria in direzione radiale.

Dalle mappe di spostamento dei centri dei vortici di ricircolazione si può avere

un'idea approssimativa di come il PVC si sposta allontanandosi dall'ugello e si può anche notare che effettivamente il fenomeno si attenua entro 1.5 diametri ma rimangono delle instabilità che dimostrano che effettivamente il flusso non ritorna simmetrico entro 4.5 diametri.

Capitolo 8

Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro di tesi era studiare in maniera approfondita il comportamento dell'entrainment rate nella regione vicina all'efflusso, al variare del grado di swirl per evidenziare anche l'influenza del vortex-breakdown e con l'insorgere del fenomeno del precessing vortex core (PVC).

I risultati ottenuti sono particolarmente significativi in quanto i lavori precedenti che riguardano l'iniezione di un getto dotato di moto di swirl si sono focalizzati sulle regioni lontane dall'efflusso e su gradi di swirl elevati, senza studiare quindi la transizione del getto attraverso il vortex-breakdown. Inoltre mancavano informazioni sull'influenza del fenomeno del PVC sul comportamento dell'entrainment rate.

Gli esperimenti inizialmente previsti per ottenere misure di entrainment a diversi gradi di swirl e per due valori di Reynolds, sono stati completati e analizzati tramite due metodi di calcolo, nonostante si siano riscontrate alcune difficoltà, sia esecutive sia numeriche.

La prima configurazione utilizzata creava un ambiente confinato ma con limitata accessibilità ottica alla camera di prova; tuttavia i risultati ottenuti nella regione molto vicina all'efflusso, entro due diametri dall'efflusso, e ai numeri di swirl più bassi sono significativi e mostrano un incremento dell'entrainment rate con il confinamento. Questo succede perchè il mescolamento fra il getto swirlato e l'aria ambiente viene favorito in ambienti confinati.

Per ottenere dei risultati corretti a numeri di swirl più alti è stata utilizzata una seconda configurazione che, oltre a risolvere i problemi di accessibilità ottica, creava un ambiente non confinato che ha permesso di analizzare il comportamento di un getto libero, come è stato fatto nei pochi lavori già esistenti. In questa seconda serie di esperimenti sono stati visualizzati campi di moto molto differenti rispetto alla prima configurazione, ma è stato visualizzato un comportamento dell'entrainment rate generalmente in accordo con le aspettative teoriche, ossia l'entrainment rate aumenta a numeri di swirl più elevati e allontanandosi dall'ugello.

A livello numerico sono state riscontrate problematiche nella stima dell'entrainment rate tramite l'integrazione dei profili della componente assiale di velocità; tale stima è risultata poco affidabile per i valori di swirl di transizione attraverso il vortex-breakdown e affetta da forti approssimazioni per le prove in fase con la

frequenza del PVC, a causa dei problemi di asimmetria e non stazionarietà del getto. Le analisi effettuate tramite analisi della componente radiale dei profili di velocità sono risultate maggiormente accurate e poco sensibili ai problemi di asimmetria e non stazionarietà.

Da entrambi i metodi di calcolo viene confermato che l'entrainment rate aumenta con la distanza assiale dall'ugello, in maniera fortemente non lineare tramite l'integrazione dei profili di velocità assiale o con una non linearità più attenuata tramite le misure di velocità radiale; invece solo il metodo di calcolo che utilizza la velocità radiale mostra in maniera corretta come l'entrainment rate aumenti all'aumentare del grado di swirl, con un salto abbastanza netto nel passaggio per il valore di swirl critico.

Infine le prove in fase sono state condotte con successo sincronizzando l'acquisizione delle immagini PIV col segnale di un microfono sensibile alla frequenza caratteristica del PVC e dalle analisi delle medie in fase è stato possibile individuare l'effetto della fase sull'entrainment rate. Entrambi i metodi di calcolo forniscono utili informazioni sul fenomeno, indicando che l'entrainment rate varia a seconda della posizione angolare in corrispondenza con la rotazione del PVC.

In conclusione da questo lavoro si possono trarre informazioni utili sul comportamento medio e locale dell'entrainment rate nelle regioni vicine all'efflusso. Poter migliorare il fenomeno del mescolamento fin dalle prime regioni dopo l'ugello significa infatti ottimizzare non solo l'efficienza dell'intero fenomeno di combustione, ma anche la geometria della camera di combustione.

8.1 Sviluppi futuri

I risultati ottenuti con questo lavoro rappresentano diversi aspetti del medesimo fenomeno e sarebbe interessante poterli approfondire separatamente.

Studiare l'effetto del confinamento è di particolare importanza per la progettazione delle dimensioni ottimali di una camera di combustione e sarebbe anche interessante riprodurre gli esperimenti svolti con la prima configurazione di camera ma migliorando gli ingressi ottici. In questo modo si potrebbe verificare se esiste un livello di confinamento del getto ottimale per avere un buon miscelamento del getto swirlato con l'aria ambiente.

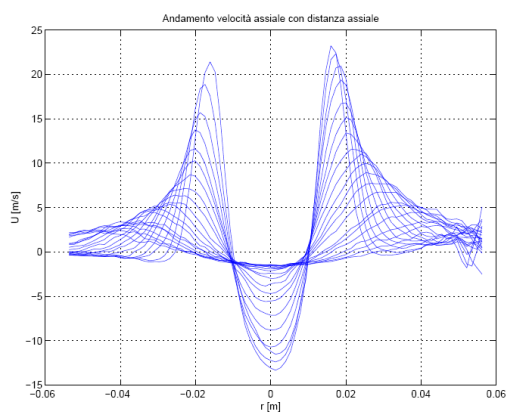
Da un punto di vista puramente numerico potrebbe essere utile studiare un metodo di calcolo che unisca i vantaggi dei metodi utilizzati in questo lavoro, cercando di attenuarne gli svantaggi. Si potrebbe provare a migliorare la risoluzione del campo di moto affetto dai gradienti di velocità più alti e mantenere la risoluzione utilizzata in questo lavoro per il resto del campo di moto, in modo tale da non renderlo esageratamente rumoroso.

Infine sarebbe utile approfondire lo studio del PVC: è possibile utilizzare due microfoni per avere una migliore correlazione tra la posizione di un microfono e l'effettiva fase del PVC; oppure è possibile studiare un maggior numero di fasi spostando il microfono di una variazione di angolo inferiore ai 45° : il fenomeno del PVC infatti non è esattamente periodico come ipotizzato per semplicità e avere un maggior numero di fasi permette di ricostruire in maniera più esatta la reale struttura tridimensionale del vortice.

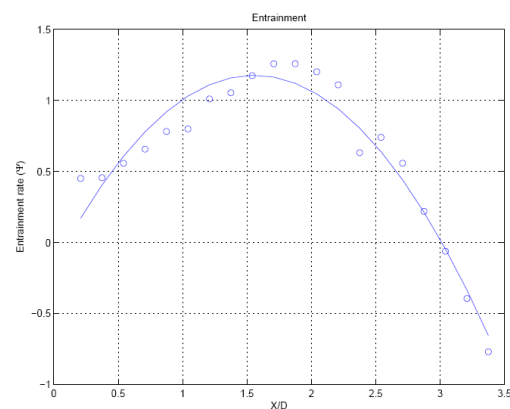
Appendice

- Prove a $Re=30700$, prima configurazione
Si riportano le prove mancanti nella sezione 5.2.1:

* Prova 2



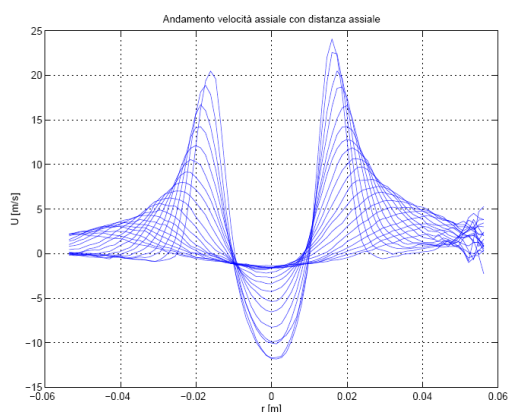
(a) *Andamento velocità assiale.*



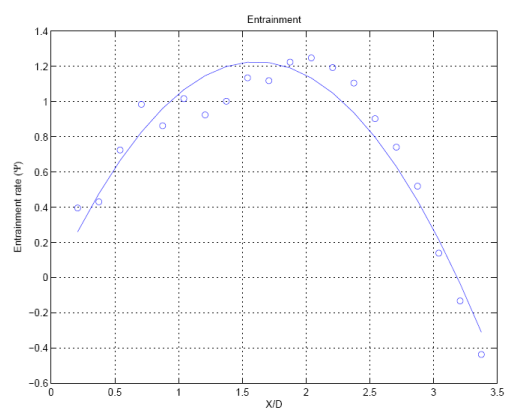
(b) *Entrainment rate.*

Figura 1: Risultati prova 2 Re 30700

* Prova 3



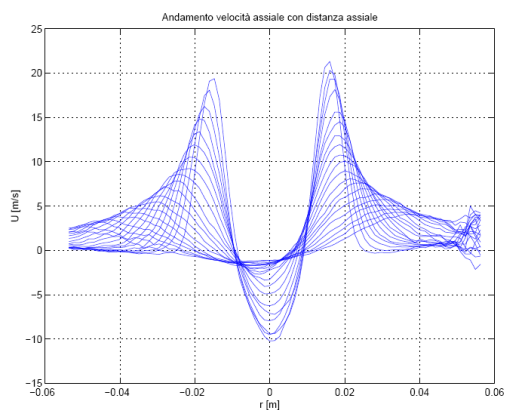
(a) *Andamento velocità assiale.*



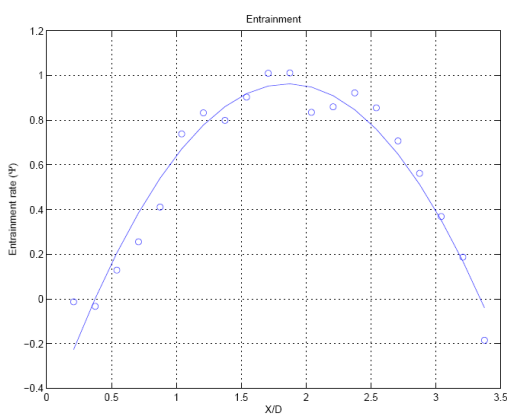
(b) *Entrainment rate.*

Figura 2: Risultati prova 3 Re 30700

* Prova 4



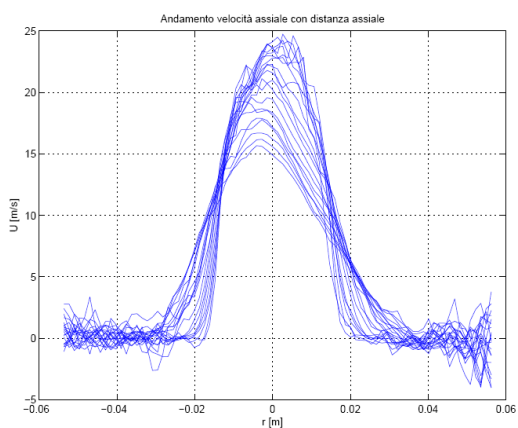
(a) *Andamento velocità assiale.*



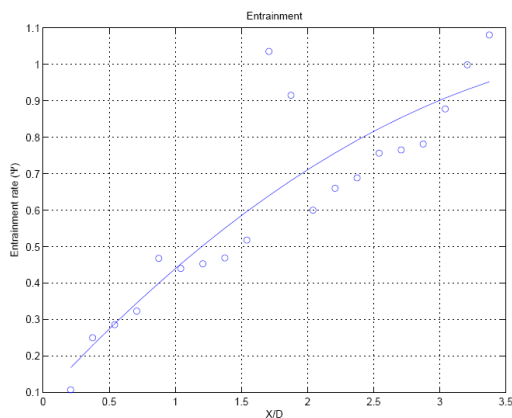
(b) *Entrainment rate.*

Figura 3: Risultati prova 4 Re 30700

* Prova 9: il tempo fra i due frame è stato portato a $10 \mu s$



(a) *Andamento velocità assiale.*



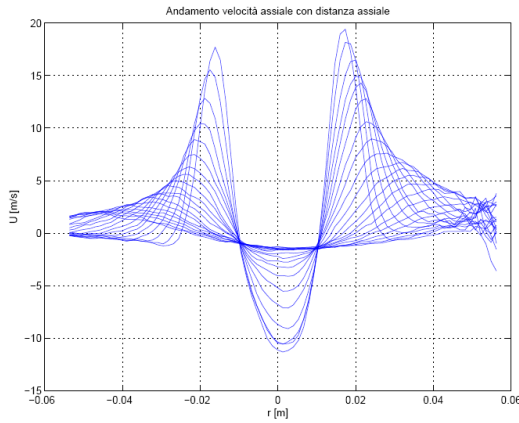
(b) *Entrainment rate.*

Figura 4: Risultati prova 9 Re 30700

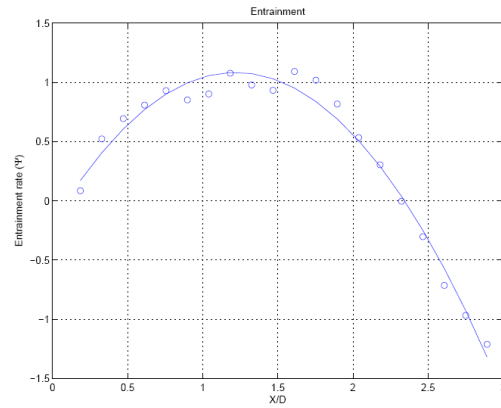
– Prove a $Re=24400$, prima configurazione

Si riportano quindi i risultati delle prove in termini di velocità assiale ed entrainment rate per tutte le prove descritte in tabella:

* Prova 1



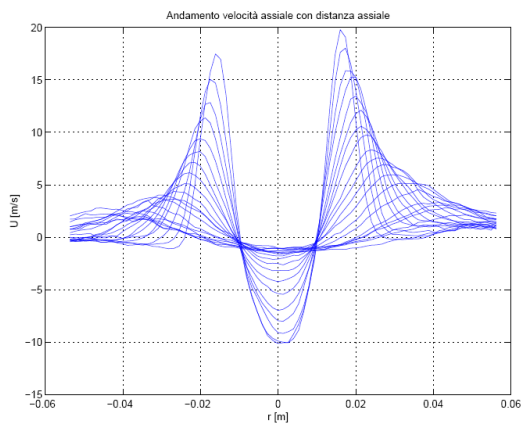
(a) *Andamento velocità assiale.*



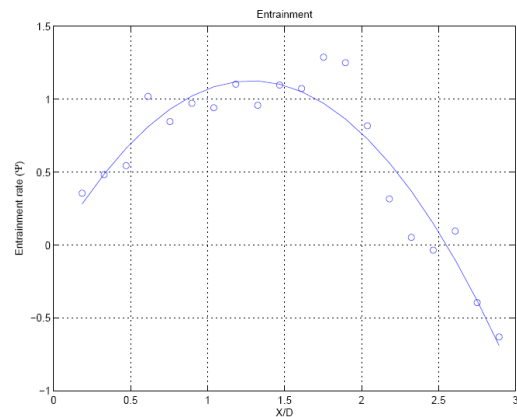
(b) *Entrainment rate.*

Figura 5: Risultati prova 1 Re 24400

* Prova 2



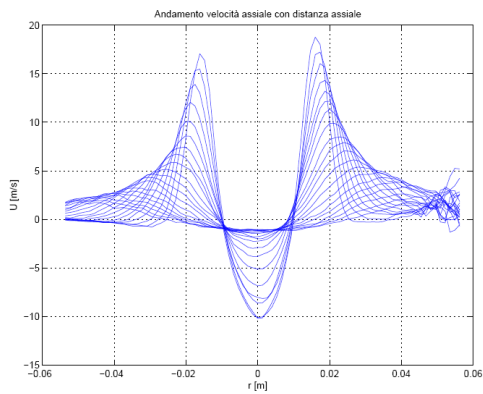
(a) *Andamento velocità assiale.*



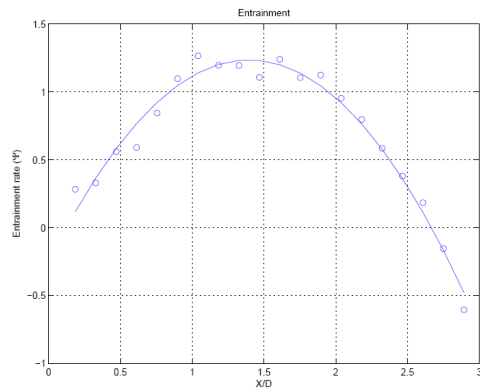
(b) *Entrainment rate.*

Figura 6: Risultati prova 2 Re 24400

* Prova 3



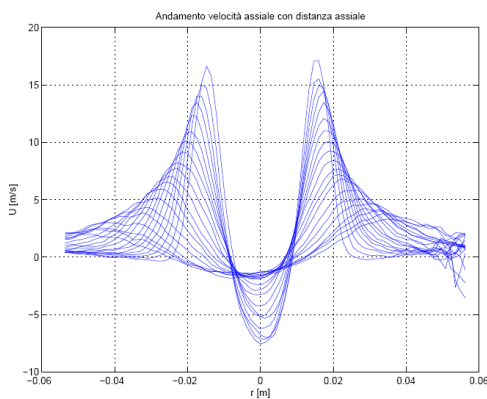
(a) *Andamento velocità assiale.*



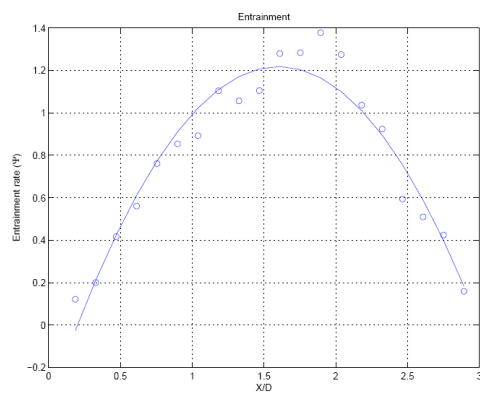
(b) *Entrainment rate.*

Figura 7: Risultati prova 3 Re 24400

* Prova 4



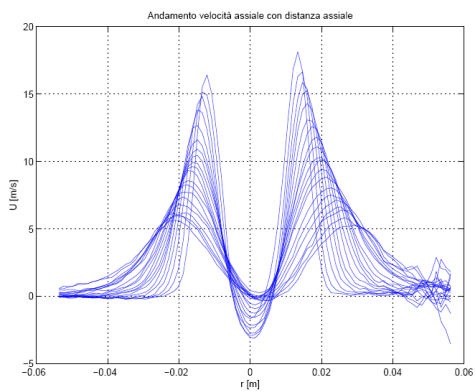
(a) *Andamento velocità assiale.*



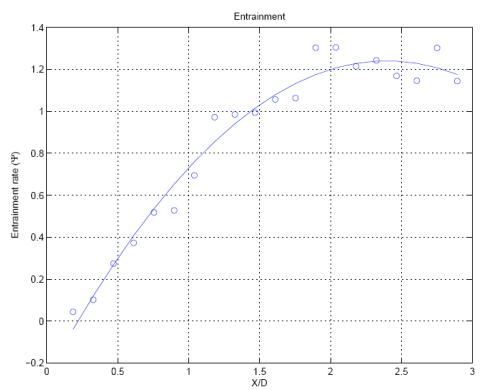
(b) *Entrainment rate.*

Figura 8: Risultati prova 4 Re 24400

* Prova 5



(a) *Andamento velocità assiale.*



(b) *Entrainment rate.*

Figura 9: Risultati prova 5 Re 24400

* Prova 6

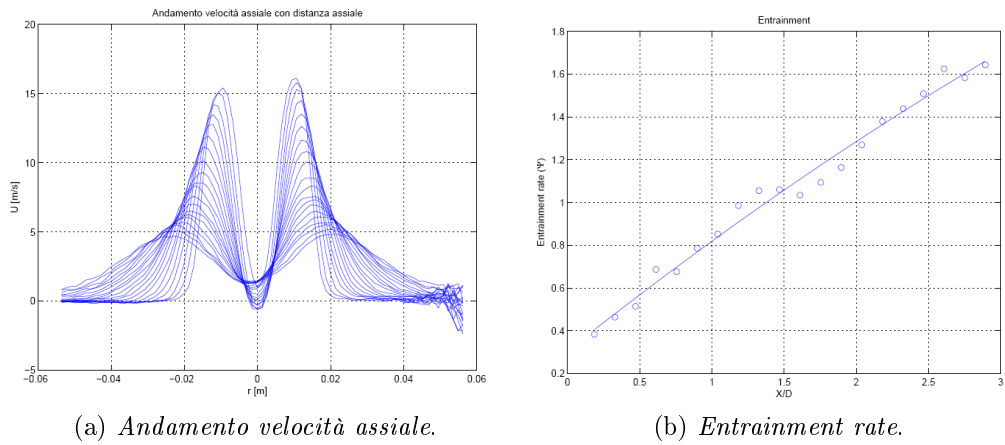


Figura 10: Risultati prova 6 Re 24400

* Prova 7: il tempo fra i due frame è stato portato a $10 \mu s$

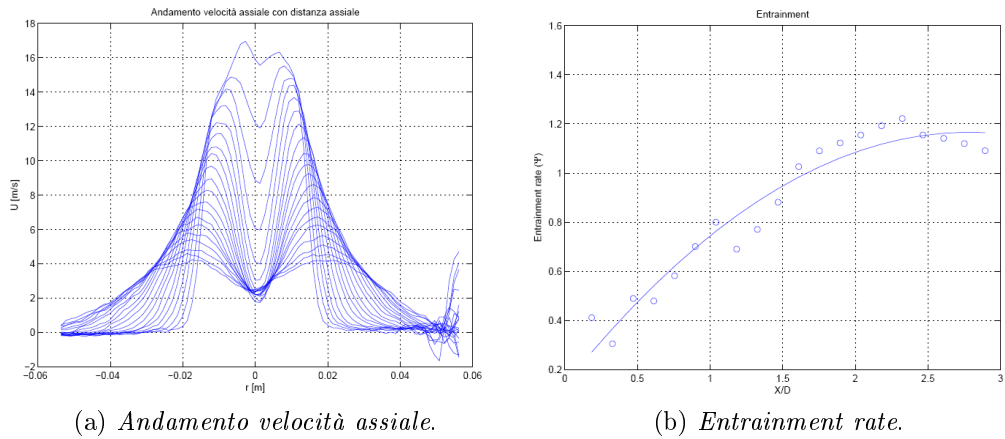


Figura 11: Risultati prova 7 Re 24400

* Prova 8: il tempo fra i due frame è stato portato a $10 \mu s$

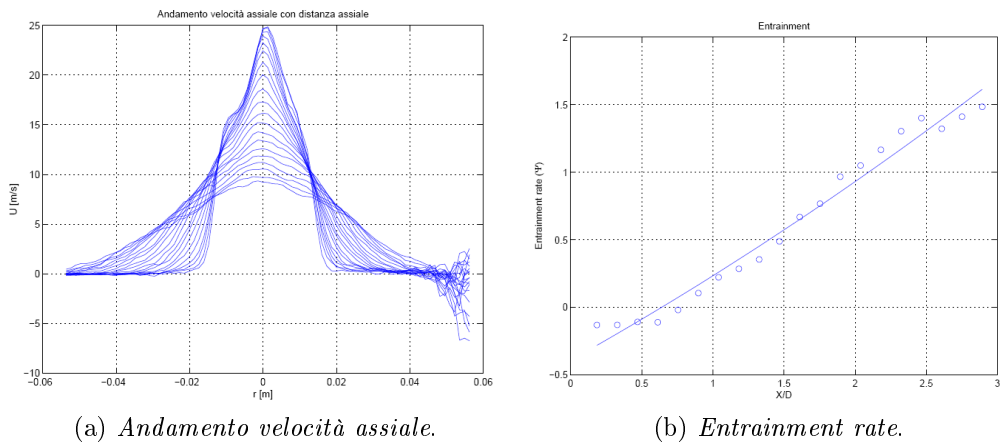


Figura 12: Risultati prova 8 Re 24400

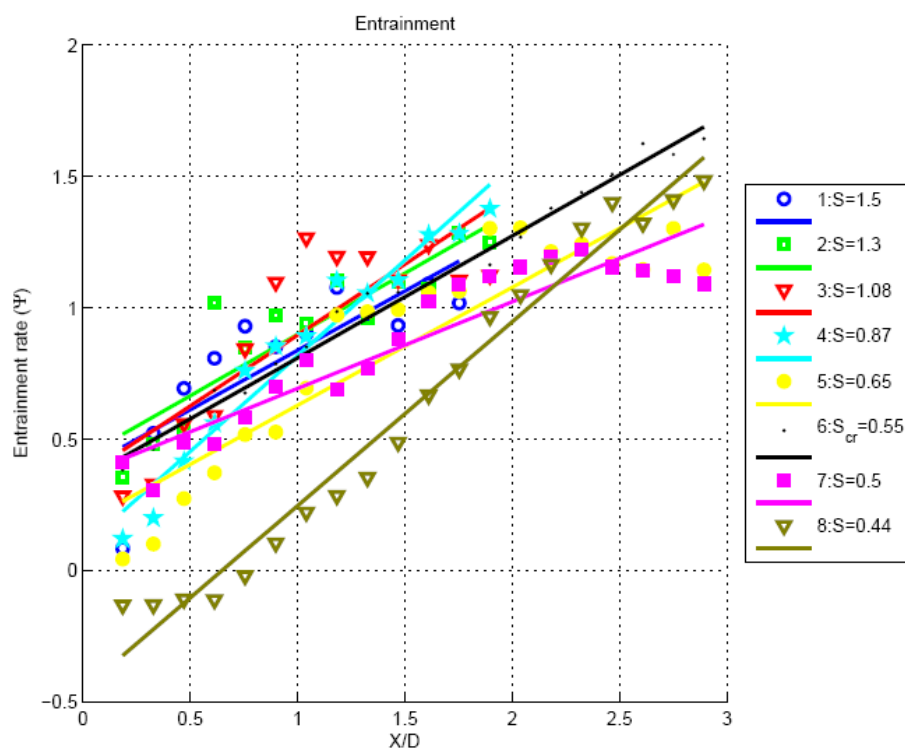


Figura 13: Andamento entrainment rate per tutte le prove a Re 24400

Bibliografia

- [1] Ricou,F.P., and Spalding,D.B., 1960, ‘Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets’, J. Fluid Mech., Vol. 11, pp. 21-32.
- [2] Hill,B.J., 1971, ‘Measurements of local entrainment rate in the initial region of axisymmetrical turbulent jets’, J. Fluid Mech., Vol. 51, part 4, pp. 773-779.
- [3] Cossali,G.E., Brunello,G., and Coghe,A., 1991, ‘LDV characterization of air entrainment in transient diesel sprays’, SAE paper No. 910178.
- [4] Park,S.H., and D.Shin,H., 1993, ‘Measurements of entrainment characteristics of swirling jets’, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 16, pp. 4009-4018.
- [5] Canepa,E., Di Martino,P., Formosa,P., Ubaldi,M., and Zunino,P., 2006, ‘Unsteady aerodynamics of an aeroengine double swirler lean premixing prevaporizing burner’, Journal of engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 128. pp. 28-39.
- [6] Martinelli,F., Olivani,A., and Coghe,A., 2007, ‘Experimental analysis of the precessing vortex core in a free swirling jet’, Exp Fluids, Vol. 42, pp. 827-839.
- [7] Oberleithner,K., Sieber,M., Nayeri,C.N., Paschereit,C.O., Petz,C., Hege,H.C., Noack,B.R., and Wygnanski,I., 2010, ‘Three-dimensional coherent structures in a swirling jet undergoing vortex breakdown: stability analysis and empirical mode construction’, J. Fluid Mech., Vol. 679, pp. 383-414.
- [8] Cala,C.E., Fernandes,E.C., Heitor,M.V., and Shtork,S.I., 2004, ‘Coherent structures in unsteady swirling jet flow’, Experiments in Fluids, Vol. 40, pp. 267-276.
- [9] Toh,K.,Honnery, D., and Soria,J., 2008, ‘Axial plus tangential entry swirling jet’, Exp Fluids, Vol. 48, pp. 309-325.
- [10] Billant,P., Chomaz,J.M., and Huerre,P., 1997, ‘Experimental study of vortex breakdown in swirling jets’, J. Fluid Mech., Vol. 376, pp. 183-219.
- [11] Panda,J., and McLaughlin,D.K., 1993, ‘Experiments on the instabilities of a swirling jet’, Phys Fluids, Vol. 6 (1), pp. 263-276.
- [12] Liang,H., and Maxworthy,T., 2003, ‘An experimental investigation of swirling jets’, J. Fluid Mech., Vol. 525, pp. 115-159.
- [13] Syred,N., 2004, ‘A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems’, Prog Energy Comb Sci, Vol. 32, pp. 93-161.

-
- [14] Yazdabadi,P.A., Griffiths,A.J., and Syred,N., 1993, ‘Characterization of the PVC phenomena in the exhaust of a cyclone dust separator’, *Experiments in Fluids*, Vol. 17, pp. 84-95.
- [15] Gupta,A.K., Lelley,D.G., and Syred,N., 1984, ‘Swirl flows’.
- [16] Caruggi,M., Canepa,E., Formosa,P., Niberto,A., Ubaldi,M., Zunino,P., and Di Martino,P., 2004, ‘Misure PDA in flussi bifase: discriminazione fase liquida/-fase gassosa mediante tecniche di post-elaborazione’, XII Convegno Nazionale A.I.VE.LA., Istituto Motori-CNR, Napoli, 11-12 novembre 2004.
- [17] Singh,K.K., Mongeau,L., Frankel,S.H., and Gore,J.P., 2005, ‘Acoustic detection of flow anomalies in swirling flows’, *AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference (26th AIAA Aeroacoustic Conference)*, 23-25 May 2005, Monterey, California.
- [18] Kahler,C.J., Scharnowski,S., and Cierpka,C., 2012, ‘On the resolution of limit of digital particle image velocimetry’, *Exp Fluids*, DOI 10.1007/s00348-012-1280-x.
- [19] Martinelli,F., 2005, ‘Analysis oh the precessing vortex core instability in a free swirling jet’, *Tesi di Laurea*, Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria Industriale, Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto il mio relatore, Prof. Coghe, per aver proposto un argomento di tesi che si accordasse con i miei interessi e per avermi costantemente seguita in questo percorso.

Vorrei ringraziare assieme a lui il Prof. Cozzi che mi è stato di valido aiuto nella fase sperimentale di questa tesi.

Ringrazio la Prof.ssa Pusineri, perchè tutto è partito da liceo e le basi di matematica e fisica che mi ha dato meritano davvero un mio sincero ringraziamento.

Non esiste ringraziamento sufficientemente grande per la mia famiglia, che mi ha appoggiata nella scelta di questa facoltà e ha vissuto con me i momenti belli e brutti di questi anni. Ringrazio mio fratello, che mi ha aperto la strada nel mondo della Bovisa e che ha condiviso con me i sacrifici della vita da studente, ingegnere e per di più pendolare.

Voglio ringraziare le amiche di sempre: Cry, perchè mi conosce da una vita, Fede, perchè mi vuole bene anche se dimentico le date importanti, Giulia, perchè è una stella cadente, Cry, perchè è sempre in giro per il mondo, Marzia, perchè in fondo siamo quasi sorelle, e Silvia, perchè è unica, anche nei suoi ritardi. Vi voglio bene.

Ringrazio le mie compagne di squadra e le serate passate a giocare a pallavolo: grazie a voi non ho mai dubitato che la scelta di fare la pendolare fosse sbagliata.

Mi ritengo fortunata ad avere avuto degli splendidi compagni di università, che si sono sempre dimostrati disponibili, aiutandomi, consigliandomi e anche ospitandomi a Milano quando necessario e grazie ai quali la preparazione degli esami è sempre stata accompagnata da qualche sana risata. In particolare grazie a Chiara, Verons, Andrea, Mattia, Sarah, Giada, Giuse, Alby, Juri, Luca, Mattia, Enrico.

Un ringraziamento va anche ai compagni di treno, alcuni anche compagni di facoltà, con cui ho fatto amicizia negli anni e con i quali è stato bello condividere i disagi di un treno regionale.

Grazie infine alla persona che riesce a farmi vivere felice semplicemente rimanendomi accanto.