

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale



Tesi di Laurea Magistrale

## CARATTERIZZAZIONE IN SITU DI GETTI PER IL CONTROLLO DELLA SCIA DI UN CORPO TOZZO

Relatori

Prof. Gioacchino CAFIERO

Prof. Jacopo SERPIERI

Dott. Enrico AMICO

Candidato

Enrico MORETTI

Anno Accademico 2023/2024

# Abstract

This thesis work aims to characterize in situ two actuator jets with a rectangular exit section, mounted on the back of a model of a goods transport vehicle.

The aim of the in situ characterization is to highlight effects relating to the assembly on the model and interactions between the casting and the surrounding environment, with particular attention to the effects induced by the presence of walls.

Finally, we propose to make a comparison with the results obtained from a previous characterization carried out on the bench.

This work constitutes a piece of a large research project, the aim of which is to exploit artificial intelligence in order to operate an active wake control that can optimize the performance of a vehicle, thus obtaining an improvement in terms of fuel savings, resulting from a reduction in resistance of around 5-10% depending on the operating conditions in which the vehicle is operates.

# Sommario

Questo lavoro di tesi si propone di caratterizzare in situ due getti attuatori con sezione di uscita rettangolare, montati sul retro di un modello di veicolo da trasporto merci.

Lo scopo della caratterizzazione in situ è quello di mettere in luce effetti relativi al montaggio sul modello ed interazioni tra il getto e l'ambiente circostante, con particolare attenzione agli effetti indotti dalla presenza di pareti.

Infine, ci si propone di operare un confronto con i risultati ottenuti da una precedente caratterizzazione effettuata al banco.

Questo lavoro costituisce un tassello di un ampio progetto di ricerca, il cui scopo è quello di sfruttare l'intelligenza artificiale al fine di operare un controllo di scia attivo che possa ottimizzare le prestazioni di un veicolo, ottenendo così un miglioramento in ambito di risparmio di carburante conseguente ad una riduzione di resistenza che si aggiri intorno al 5-10% a seconda delle condizioni operative in cui il mezzo si trova.

# Ringraziamenti

# Indice

<b>Abstract</b>	I
<b>Sommario</b>	II
<b>Elenco delle tabelle</b>	VI
<b>Elenco delle figure</b>	VII
<b>1 INTRODUZIONE</b>	1
1.1 Getto turbolento . . . . .	4
<b>2 SETUP SPERIMENTALE</b>	7
2.1 GETTI VERTICALI . . . . .	11
2.2 GETTI ORIZZONTALI . . . . .	12
2.3 RIDUZIONE DATI . . . . .	14
2.3.1 GETTI VERTICALI . . . . .	14
2.3.2 GETTI ORIZZONTALI . . . . .	14
<b>3 CARATTERIZZAZIONE GETTI</b>	16
3.1 GETTI VERTICALI . . . . .	16
3.2 GETTI ORIZZONTALI . . . . .	21
3.2.1 GETTO SUPERIORE . . . . .	22
3.2.2 GETTO INFERIORE . . . . .	24
3.2.3 CONFRONTO CON CARATTERIZZAZIONE MEDIANTE TECNICA PIV . . . . .	25
<b>4 QUANTITÀ INTEGRALI DEL GETTO 3D</b>	32
4.1 GETTO SUPERIORE . . . . .	32
4.1.1 VALUTAZIONE DI PORTATA E QUANTITÀ DI MOTO DEL GETTO SUPERIORE . . . . .	36
4.2 GETTO INFERIORE . . . . .	39

4.2.1	VALUTAZIONE DI PORTATA E QUANTITÀ DI MOTO DEL GETTO INFERIORE . . . . .	41
4.3	CONFRONTO . . . . .	44
<b>5</b>	<b>ANALISI BIDIMENSIONALE</b>	<b>45</b>
5.1	GETTO SUPERIORE . . . . .	45
5.2	GETTO INFERIORE . . . . .	49
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</b>	<b>53</b>
6.1	CONCLUSIONI . . . . .	53
6.2	SVILUPPI FUTURI . . . . .	55
	<b>Bibliografia</b>	<b>56</b>

# Elenco delle tabelle

2.1	Posizione $Y$ delle prese di pressione totale . . . . .	13
3.1	Numeri di Reynolds e velocità massime corrispondenti ai diversi valori di apertura dell'elettrovalvola . . . . .	17
3.2	Numeri di Reynolds e velocità massime corrispondenti ai diversi valori di apertura dell'elettrovalvola . . . . .	21
3.3	Numerazione profili $U(Y)$ . . . . .	29

# Elenco delle figure

1.1	Schema rappresentante l'instabilità delle bolle di ricircolo tratto da [1]	3
1.2	Campi di moto a, b, c tratti da [1]	4
1.3	Campi di moto d, e, f tratti da [1]	4
1.4	Schema della struttura di un getto piano tratto da [2]	6
1.5	Andamento adimensionale delle velocità nella regione autosimilare tratto da [3]	6
2.1	Schema della catena pneumatica tratto da [4]	7
2.2	Geometria modello	8
2.3	Dimensioni modello in mm	9
2.4	Vista della sezione del getto nel suo piano di simmetria	10
2.5	Vista del getto nel piano $X - Y$	10
2.6	Sonda di pressione totale	11
2.7	Movimentatore verticale	12
2.8	Motore passo-passo	12
2.9	Rake di prese di pressione totale	13
2.10	Trasduttore DSA3217	14
3.1	Profili di velocità a $Re=226$	17
3.2	Profili di velocità a $Re=985$	17
3.3	Profili di velocità a $Re=1792$	17
3.4	Profili di velocità a $Re=2334$	17
3.5	Profili di velocità a $Re=2470$	18
3.6	Profili di velocità medi e massimi	19
3.7	Profili di velocità adimensionalizzati	19
3.8	Contours della velocità a diversi valori di $X$ per ciascun numero di Reynolds	22
3.9	Contours della velocità a diversi valori di $X$ per ciascun numero di Reynolds	24
3.10	Piano PIV ad $Y=-44\text{mm}$	26
3.11	Piano PIV ad $Y=-33\text{mm}$	26



3.12	Piano PIV ad $Y=-22\text{mm}$ . . . . .	26
3.13	Piano PIV ad $Y=-11\text{mm}$ . . . . .	26
3.14	Piano PIV ad $Y=0\text{mm}$ . . . . .	27
3.15	Piano PIV ad $Y=11\text{mm}$ . . . . .	27
3.16	Piano PIV ad $Y=22\text{mm}$ . . . . .	27
3.17	Piano PIV ad $Y=33\text{mm}$ . . . . .	27
3.18	Piano PIV ad $Y=44\text{mm}$ . . . . .	28
3.19	Campo di correlazione profilo 12 . . . . .	29
3.20	Confronto tra profilo di massima correlazione e profilo 12 . . . . .	29
3.21	Coordinata $X$ dei profili di massima corrispondenza . . . . .	30
3.22	Coordinata $Z$ dei profili di massima corrispondenza . . . . .	30
3.23	Valore di $\epsilon$ per ciascun profilo . . . . .	30
4.1	Vista 3D del getto a $Re=852$ . . . . .	32
4.2	Vista 3D del getto a $Re=1488$ . . . . .	33
4.3	Vista 3D del getto a $Re=1909$ . . . . .	33
4.4	Vista 3D del getto a $Re=1983$ . . . . .	33
4.5	Andamento della dimensione dell'area del getto in funzione della coordinata $X$ . . . . .	34
4.6	Andamento delle velocità massime in funzione della coordinata $X$ . . . . .	34
4.7	Andamento della portata . . . . .	36
4.8	Andamento della portata adimensionalizzata . . . . .	37
4.9	Andamento della quantità di moto . . . . .	37
4.10	Andamento della quantità di moto adimensionalizzata . . . . .	38
4.11	Vista 3D del getto a 852 . . . . .	39
4.12	Vista 3D del getto a 1488 . . . . .	39
4.13	Vista 3D del getto a 1909 . . . . .	40
4.14	Vista 3D del getto a 1983 . . . . .	40
4.15	Andamento della dimensione dell'aera del getto in funzione della coordinata $X$ . . . . .	41
4.16	Andamento delle velocità massime in funzione della coordinata $X$ . . . . .	41
4.17	Andamento della portata . . . . .	42
4.18	Andamento della portata adimensionalizzata . . . . .	42
4.19	Andamento della quantità di moto . . . . .	43
4.20	Andamento della quantità di moto adimensionalizzata . . . . .	43
4.21	Confronto tra velocità massime e medie dei tre getti . . . . .	44
5.1	Profilo di velocità bidimensionale a $X=5.85\text{mm}$ . . . . .	46
5.2	Profilo di velocità bidimensionale a $X=25.85\text{mm}$ . . . . .	46
5.3	Profilo di velocità bidimensionale a $X=45.85\text{mm}$ . . . . .	46
5.4	Portata del getto 2D in funzione di $X$ . . . . .	47

5.5	Portata del getto adimensionalizzata 2D in funzione di $X$ . . . . .	47
5.6	Quantità di moto del getto 2D in funzione di $X$ . . . . .	48
5.7	Quantità di moto del getto adimensionalizzata 2D in funzione di $X$ . . . . .	48
5.8	Profilo di velocità bidimensionale a $X=5.85\text{mm}$ . . . . .	49
5.9	Profilo di velocità bidimensionale a $X=25.85\text{mm}$ . . . . .	49
5.10	Profilo di velocità bidimensionale a $X=45.85\text{mm}$ . . . . .	50
5.11	Portata del getto 2D in funzione di $X$ . . . . .	50
5.12	Portata del getto 2D adimensionalizzata in funzione di $X$ . . . . .	51
5.13	Quantità di moto del getto 2D in funzione di $X$ . . . . .	51
5.14	Quantità di moto del getto 2D adimensionalizzata in funzione di $X$ . . . . .	52

# Capitolo 1

## INTRODUZIONE

L'obiettivo della tesi è quello di caratterizzare dei getti attuatori posti sul retro di un modello di veicolo da trasporto merci, volti ad operare un controllo di scia del corpo tozzo al fine di ridurre la resistenza aerodinamica.

La resistenza aerodinamica agisce contro il movimento di un veicolo ed è causata dall'attrito dell'aria e dalla differenza di pressione tra il fronte ed il retro del veicolo. Ridurre la resistenza aerodinamica è un obiettivo cruciale nella progettazione dei veicoli da trasporto, poiché ha un impatto significativo sull'efficienza energetica, sulla velocità massima raggiungibile e sull'economia del carburante.

La resistenza aerodinamica è proporzionale al quadrato della velocità del veicolo, dunque man mano che il veicolo accelera, la resistenza aerodinamica diventa una componente sempre più significativa della forza totale da vincere. Riducendo questa forza, si può migliorare l'efficienza energetica complessiva del veicolo e conseguentemente ridurre il consumo di carburante.

Una riduzione del consumo di carburante comporta un vantaggio sia dal punto di vista economico che dal punto di vista ambientale, in quanto ad essa corrisponderebbe una minore emissione di gas serra e particelle inquinanti.

I veicoli da trasporto merci sono caratterizzati da una forma tozza a causa della necessità di disporre del volume più ampio possibile. In un corpo tozzo la maggior parte della resistenza è attribuibile alla differenza di pressione tra fronte e retro ed a tal proposito risulta giocare un ruolo di fondamentale importanza la scia del corpo.

Le tecniche di riduzione si dividono in tecniche passive e tecniche attive. Per la prima tipologia non è richiesto l'utilizzo di energia, che invece è necessaria per le tecniche attive.

Le tecniche passive, seppur molto promettenti dal punto di vista dei risultati, hanno delle forti limitazioni legate a problemi di sicurezza derivanti dall'aggiunta di appendici dalla modifica della carrozzeria e sono progettate per una sola condizione di funzionamento, con conseguente capacità di lavorare nel punto di massima

efficienza solo nelle condizioni di progetto.

Nel caso di controllo passivo su veicoli in letteratura si trovano diverse soluzioni come l'utilizzo di vortex generators, di flaps, di deflettori mobili automatici e modifiche locali del corpo.

Invece le tecniche attive risultano più promettenti in ottica pratico-implementativa perché non sono invasive dal punto di vista geometrico, quindi di più facile implementazione, e ad una minore affidabilità contrappongono una elevata flessibilità, permettendo un corretto funzionamento non solo nella condizione di progetto.

La maggior parte delle tecniche di riduzione della resistenza aerodinamica si concentrano sulla parte posteriore del corpo, cercando di aumentare il recupero di pressione.

Il motivo per cui ci si concentra nella parte posteriore del corpo è legato alla maggior semplicità di implementazione rispetto ad altre zone del veicolo e non nella migliore performance.

In aggiunta la forma di questi corpi porta ad avere una intensa separazione, una dinamica della scia particolarmente complessa con dinamiche che interessano grandi range di scale spaziali.

La scia a valle dei corpi tozzi tende ad essere caratterizzata da instabilità dinamica e gli esempi più classici di questo fenomeno sono quelli relativi al campo di moto attorno alla sfera ed al parallelepipedo.

Il campo di moto attorno ad una sfera è tridimensionale ed è caratterizzato da modi stazionari non banali e già in regime laminare si ha una perdita di assialsimmetria ( $Re=210$ ).

Nel caso della sfera l'assialsimmetria è poi ristabilita in regime turbolento, ovvero per  $Re \geq 10^3$ .

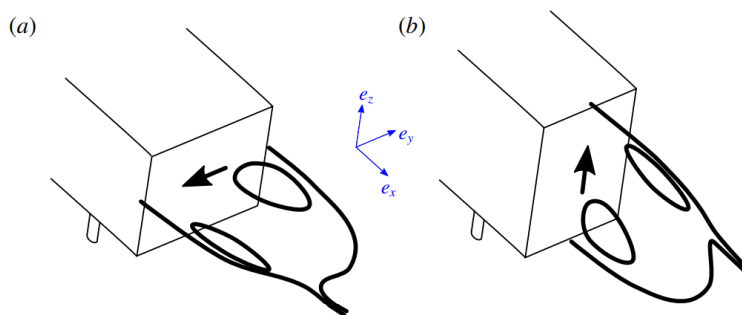
Nel campo di moto attorno ad un parallelepipedo già in regime laminare si osserva una perdita di simmetria (per  $Re=340$ ) ma differentemente rispetto alla sfera l'asimmetria viene preservata anche in regime turbolento.

Il flusso turbolento risulta instazionario e si può osservare su scale temporali piccole ( $T \sim 5 \frac{H}{U_0}$ ) un'oscillazione coerente sia nel piano verticale che nel piano orizzontale mentre per scale temporali più lunghe ( $T \sim 10^3 \frac{H}{U_0}$ ) il flusso diventa bistabile.

La bistabilità prevede l'alternarsi in maniera randomica della posizione della bolla di ricircolo tra due posizioni asimmetriche preferenziali.

Il fenomeno risulta instazionario e finisce per generare una forzante laterale a sua volta instazionaria.

Una variabile che influenza la bistabilità è la presenza di una parete in prossimità del corpo, la cui influenza svanisce soltanto oltre un certo valore critico di distanza.

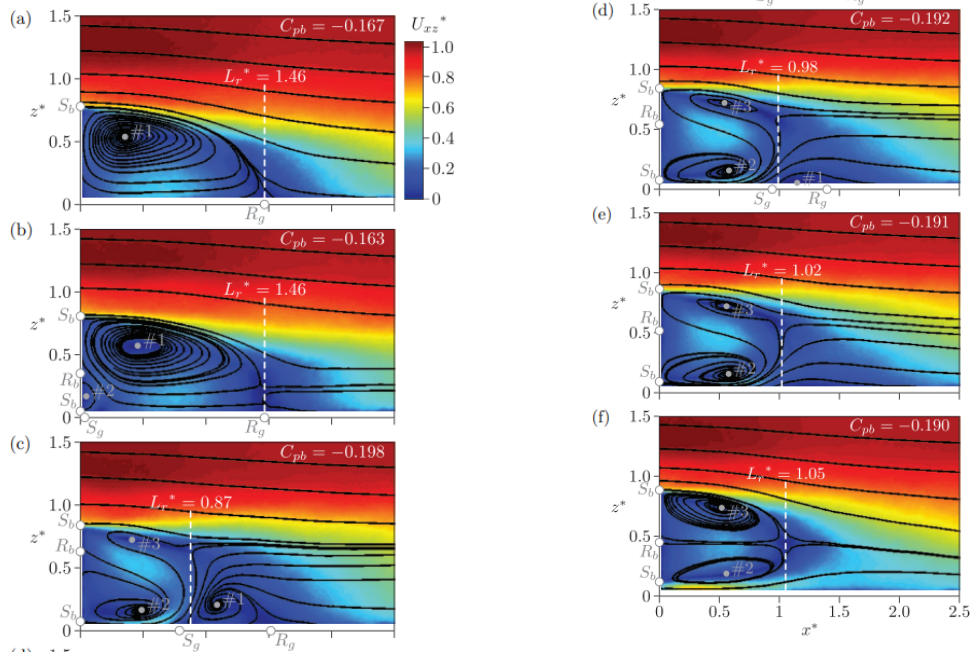


**Figura 1.1:** Schema rappresentante l'instabilità delle bolle di ricircolo tratto da [1]

Definendo la distanza  $C$  del parallelepipedo dalla parete e la larghezza  $W$  del parallelepipedo si può studiare l'effetto della variazione del rapporto adimensionale  $C/W$  sulla scia a valle del corpo.

- a)  $\frac{C}{W} = 0.02$  sul fondo della geometria gli effetti viscosi sono dominanti e si ha solamente una separazione nella zona superiore;
- b)  $\frac{C}{W} = 0.05$  aumenta il flusso nella zona inferiore grazie alla riduzione di influenza delle forze viscosi e si crea una seconda bolla di ricircolo;
- c)  $\frac{C}{W} = 0.07$  la seconda bolla di ricircolo aumenta la sua dimensione e spinge a valle la prima permettendo che abbia origine una terza struttura nella zona superiore;
- d)  $\frac{C}{W} = 0.07$  la seconda bolla di ricircolo aumenta la sua dimensione e spinge a valle la prima permettendo che abbia origine una terza struttura nella zona superiore;
- e)  $\frac{C}{W} = 0.09$  il flusso nella zona inferiore ha energia a sufficienza per prevenire la separazione di strato limite;
- f)  $\frac{C}{W} = 0.12$  si ha una bolla di ricircolo orientata in direzione parallela al flusso indisturbato.

Si nota anche che la lunghezza della regione di ricircolo si riduce molto nella condizione c per poi aumentare al crescere di  $\frac{C}{W}$ .



**Figura 1.2:** Campi di moto a, b, c tratti da [1]

**Figura 1.3:** Campi di moto d, e, f tratti da [1]

Ciò che si cerca di ottenere è un controllo di scia che permetta di limitare tutti i fenomeni che portano ad un aumento di resistenza tramite l'implementazione di getti sul retro del veicolo.

L'implementazione di getti permette di aumentare la pressione statica sul retro del veicolo riducendo la differenza di pressione tra fronte e retro e di conseguenza la forza di resistenza.

Il getto riesce nel suo obiettivo mediante due effetti:

- Riduce l'entrainment della scia, ovvero l'aumento della sua dimensione e della sua portata per effetto delle forze viscose;
- Aumenta il recupero della pressione riducendo la dimensione della sezione trasversale della scia.

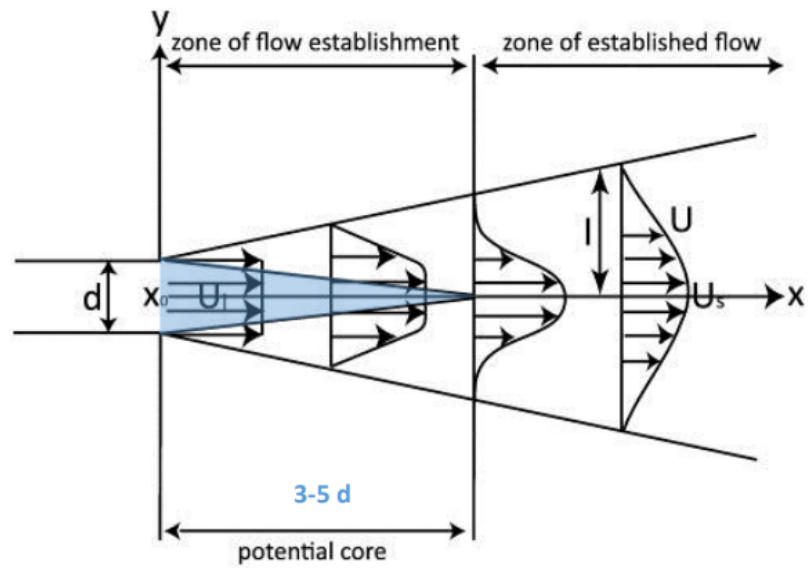
## 1.1 Getto turbolento

In campo fluidodinamico il getto turbolento costituisce un caso di studio di notevole rilevanza e, grazie all'ampia ricerca e letteratura in merito, esiste una teoria consolidata che ne descrive la struttura. Il getto di interesse è un getto piano

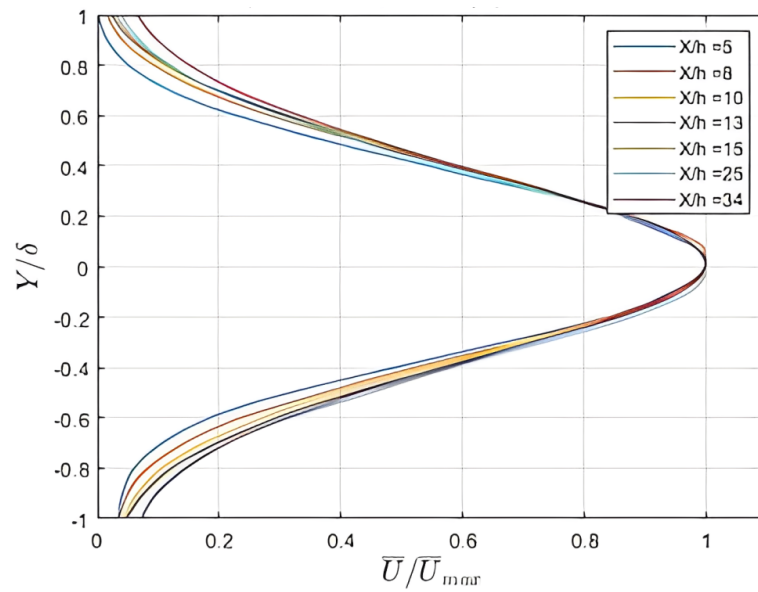
caratterizzato da una sezione di uscita rettangolare il cui campo di moto si suddivide in quattro aree principali: il cuore potenziale, la regione di mescolamento, la regione di transizione e la regione autosimilare.

- Cuore potenziale: A valle della sezione di uscita è presente una zona caratterizzata da velocità costante e pari alla velocità di uscita. Allontanandosi dalla sezione di uscita la superficie di questa zona si riduce fino ad annullarsi.
- Regione di mescolamento: Si trova nell'area circostante al cuore potenziale ed è il prodotto dell'interazione tra il getto e l'aria esterna. La regione di mescolamento è caratterizzata da strutture vorticosi coerenti e dal raccordo tra la velocità del cuore potenziale e la velocità dell'aria in cui il getto è immesso.
- Regione di transizione: Ha origine dove il cuore potenziale cessa di esistere ed è caratterizzata da un'alta produzione di energia turbolenta, causata dalla disgregazione delle strutture vorticosi generatesi nella regione di mescolamento.
- Regione autosimilare: Corrisponde alla regione di campo lontano ed il getto risulta ormai completamente sviluppato. Questa regione è dominata dai fenomeni di dissipazione ed allontanandosi dalla sezione di uscita si osserva una riduzione delle velocità. Il nome autosimilare deriva dal fatto che, adimensionalizzando la velocità tramite la velocità massima e la coordinata ortogonale al piano di simmetria ( $Y$  nelle immagini) mediante la distanza  $\delta$  per cui la velocità è pari a metà di quella massima, i profili di velocità risultano sovrapposti indipendentemente dalla distanza dalla sezione di uscita.

A causa della generazione di vortici e della diffusione ha luogo il fenomeno dell'entrainment, ovvero l'aumento di portata del getto. Nella regione di transizione si ha la massima variazione di portata grazie all'elevata attività turbolenta. Nella regione autosimilare il valore di  $\Delta$ , ovvero la coordinata  $Y$  per cui la velocità è pari a metà di quella massima, cresce linearmente mentre il valore della velocità sull'asse  $X$ , posizionato al centro del getto, risulta proporzionale a  $x^{-\frac{1}{2}}$ .



**Figura 1.4:** Schema della struttura di un getto piano tratto da [2]



**Figura 1.5:** Andamento adimensionale delle velocità nella regione autosimilare tratto da [3]

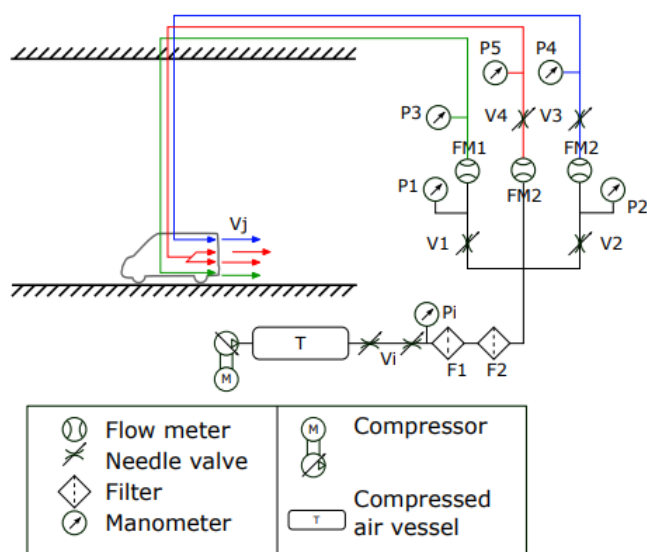


## Capitolo 2

# SETUP SPERIMENTALE

Il setup sperimentale è costituito da un modello in scala del veicolo, dei getti attuatori, una linea pneumatica necessaria ad alimentare i getti, una sonda di pressione totale, un trasduttore ed un sistema di acquisizione dati.

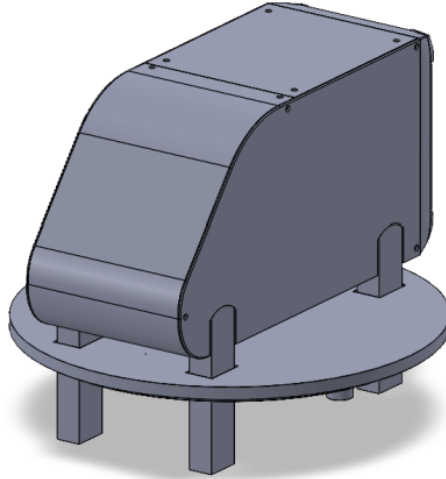
La linea pneumatica è composta da un compressore che fornisce la portata, un rubinetto che funge da valvola on/off ed un'elettrovalvola che permette la regolazione della portata tramite l'input di un valore di tensione impartito da un computer.



**Figura 2.1:** Schema della catena pneumatica tratto da [4]

Il modello è posto nella camera di prova di una galleria del vento a circuito aperto caratterizzata da una sezione rettangolare di altezza pari a 0.9 m, larghezza

pari a 1.2 m ed una lunghezza di 6.5m.



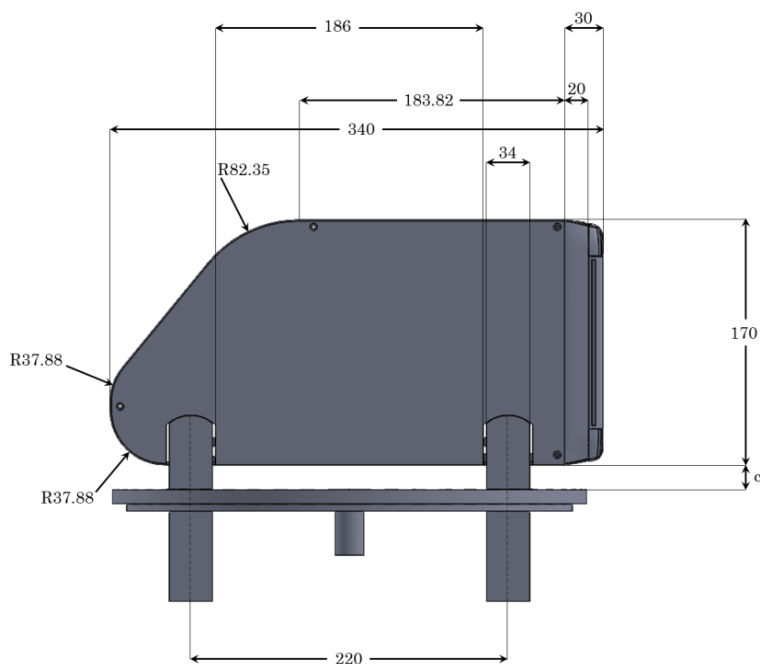
**Figura 2.2:** Geometria modello

All'interno della camera è posto un piano in plexiglass di lunghezza pari a 250 cm sul quale viene posizionato il modello in scala di un veicolo da trasporto leggero che rappresenterà il corpo tozzo sul quale sono montati i getti attuatori.

Il modello è un corpo tozzo assimilabile ad un corpo di Ahmed invertito, avente una parete inclinata frontale invece che una parete inclinata posteriore, presenta raccordi ad ampio raggio ed è caratterizzato da una base posteriore verticale.

Le sue dimensioni sono:

- Lunghezza:  $L_m = 0.34m$  ;
- Larghezza:  $W_m = 0.14m$  ;
- Altezza:  $H_m = 0.17$  m ;
- Parametro di forma base:  $W_m^* = \frac{W_m}{H_m} = 0.824$  .



**Figura 2.3:** Dimensioni modello in mm

Il modello è posizionato su una base mobile inseribile all'interno del piano in plexiglass e la struttura di supporto è costituita da piloni posti in sostituzione delle ruote, collegati rigidamente alla carenatura del modello e liberi di scorrere nelle tre direzioni.

L'ancoraggio è effettuato mediante i piloni in quanto questa risulta essere la soluzione che minimizza maggiormente l'impatto del supporto sulla scia del corpo.

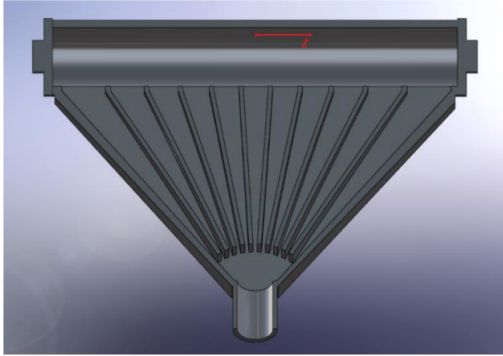
Sulla base del modello sono montati quattro getti, due verticali e due orizzontali, posti alle estremità della stessa. I getti hanno lo scopo di modificare il campo di moto della scia e lo fanno immettendo nel flusso una portata che viene regolata da un'elettrovalvola.

I getti sono stampati in 3D e sono formati essenzialmente da due diversi componenti: un canale divergente che funge da diffusore e che, con delle pareti al suo interno, riesce a rallentare e direzionare il flusso verso l'uscita, ed una camera circolare dove l'aria viene raccolta prima di essere iniettata nell'ambiente esterno attraverso una fessura rettangolare.

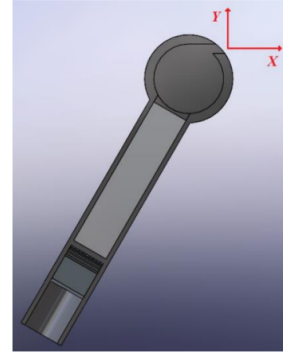
Il canale divergente è suddiviso al suo interno da pareti disposte a raggiera a intervalli regolari di  $7.5^\circ$ , questo permette di ottenere un rapporto tra area di ingresso e area di uscita del canale elevato in una lunghezza ridotta senza andare incontro a fenomeni di separazione del flusso.

La camera circolare ha invece il compito di uniformare il flusso lungo tutta la

larghezza dell'ugello e di indirizzare il flusso attraverso la fessura.



**Figura 2.4:** Vista della sezione del getto nel suo piano di simmetria



**Figura 2.5:** Vista del getto nel piano  $X - Y$

I getti orizzontali sono di dimensioni inferiori ed hanno una sezione di uscita che misura 9.1 cm di larghezza e 2 mm di altezza, mentre i getti verticali, di dimensione maggiore, sono caratterizzati da una sezione di uscita di larghezza pari a 2 mm ed altezza pari a 10cm.

La regolazione del getto avviene mediante un'elettrovalvola che riceve portata da una linea pneumatica alimentata da un compressore.

L'elettrovalvola è caratterizzata da una tensione di offset pari a 5V ed all'aumentare della tensione aumenta la portata che attraversa la valvola.

Si vuole effettuare la caratterizzazione in situ dei getti posti sul retro del modello per poterne studiare il campo di moto.

A tale scopo si effettuano delle misure mediante prese di pressione totale che, grazie ad un trasduttore, sono in grado di fornire in valore del vettore velocità in un punto dello spazio e permettono di ricostruire il campo di moto del getto.

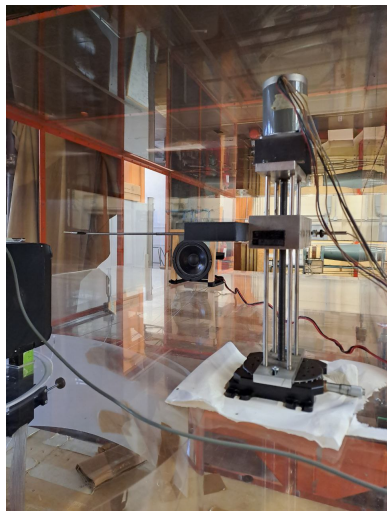
## 2.1 GETTI VERTICALI

Per la caratterizzazione dei getti verticali ci si avvale di una sonda di pressione totale singola di diametro pari a 0.5mm che rileva il valore  $p_{tot} = p_s + 1/2\rho V^2$ .

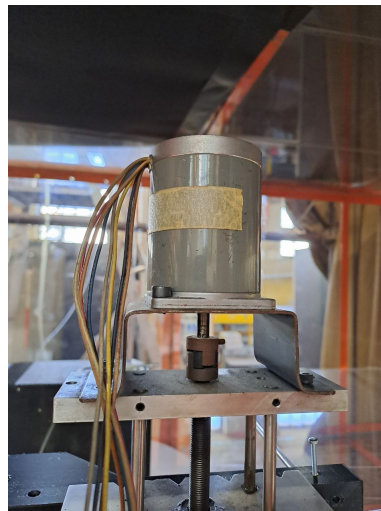


**Figura 2.6:** Sonda di pressione totale

La sonda di pressione posta nel centro del getto viene spostata mediante un movimentatore verticale che permette di impartire spostamenti con intervalli precisi. Il sistema di movimentazione si compone di un sistema vite-madrevite messo in rotazione da un motore passo-passo che impartisce uno spostamento pari a 1mm ogni 100 passi.



**Figura 2.7:** Movimentatore verticale



**Figura 2.8:** Motore passo-passo

## 2.2 GETTI ORIZZONTALI

Al fine di conoscere la posizione relativa dei punti in cui si effettua la misura per i getti orizzontali si utilizza un rake orientato orizzontalmente composto da 31 prese di pressione totale di diametro pari ad 1mm.

Questo strumento elimina l'incertezza relativa agli errori legati al posizionamento della sonda da parte dell'operatore e permette, con l'ausilio del movimentatore verticale, di definire dei piani di velocità invece che dei profili di velocità.

Il movimentatore verticale è il medesimo utilizzato per i getti verticali.



**Figura 2.9:** Rake di prese di pressione totale

Ponendo nella sonda centrale l'origine del sistema di riferimento si possono dunque definire le posizioni di ciascuna sonda ponendo l'origine del sistema di riferimento nella sonda centrale.

N sonda	Y sonda [mm]	N sonda	Y sonda [mm]	N sonda	Y sonda [mm]
1	-9.5	12	-2	23	3.5
2	-8.5	13	-1.5	24	4
3	-7.5	14	-1	25	4.5
4	-6.5	15	-0.5	26	5
5	-5.5	16	0	27	5.5
6	-5	17	0.5	28	6.5
7	-4.5	18	1	29	7.5
8	-4	19	1.5	30	8.5
9	-3.5	20	2	31	9.5
10	-3	21	2.5		
11	-2.5	22	3		

**Tabella 2.1:** Posizione Y delle prese di pressione totale

## 2.3 RIDUZIONE DATI

### 2.3.1 GETTI VERTICALI

Il valore di pressione totale rilevato viene dunque fornito come input ad un trasduttore capacitivo differenziale che misura la differenza  $p_{tot} - p_s$ , dove la  $p_s$ , ovvero la pressione statica, coincide con la pressione ambientale, e fornisce un valore di tensione in output proporzionale alla differenza di pressione misurata.

Conoscendo da calibrazioni precedenti la costante di taratura del trasduttore, pari a  $K = 540 \frac{Pa}{V}$ , è possibile dunque determinare il valore della pressione dinamica misurata  $1/2\rho V^2 = K * E$  e di conseguenza ricavare il valore di velocità  $V = \sqrt{\frac{2KE}{\rho}}$ .

I valori di tensione vengono dunque acquisiti per 60 secondi con una frequenza di campionamento pari a 2000Hz e salvati su pc mediante il software Labview assieme al valore di tensione dell'elettrovalvola utilizzato per la misura e le coordinate spaziali  $X$   $Y$  e  $Z$  che definiscono la posizione della sonda.

### 2.3.2 GETTI ORIZZONTALI

Le prese di pressione sono collegate a due trasduttori DSA3217 con 16 ingressi disponibili ciascuno che forniscono in output il valore di pressione dinamica rilevato da ciascuna presa.



**Figura 2.10:** Trasduttore DSA3217

I trasduttori operano nel un range di pressione  $\pm 5$  inchH2O, pari a  $\pm 1244.2$  Pa, e sono caratterizzati da un'accuratezza pari a  $\pm 0.05\%$  del fondoscala, ovvero equivalente a  $\pm 1.2442$  Pa.



I valori di pressione vengono nuovamente acquisiti per 60 secondi con una frequenza di campionamento pari a 2000Hz e salvati su pc mediante il software di acquisizione assieme al valore di tensione dell'elettrovalvola utilizzato per la misura e le coordinate spaziali  $X$  e  $Z$  che definiscono la posizione delle sonde.

## Capitolo 3

# CARATTERIZZAZIONE GETTI

### 3.1 GETTI VERTICALI

I getti verticali sono perfettamente identici e posizionati in maniera simmetrica rispetto al piano di mezzeria del modello dunque anche i loro campi di moto risultano identici, pertanto la caratterizzazione si effettua su un singolo getto.

Al fine di descrivere il profilo di velocità si posiziona la sonda al centro del getto e mediante il movimentatore si fa variare la coordinata  $Z$  della posizione della sonda e la si registra.

La singola sonda di pressione totale è molto leggera ed a causa della coppia impartita dal movimentatore risulta soggetta a piccoli disallineamenti che rischiano di introdurre errori nei valori misurati dunque necessita di essere supervisionata e riallineata di tanto in tanto.

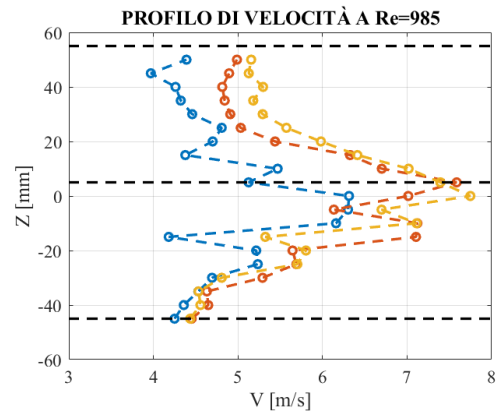
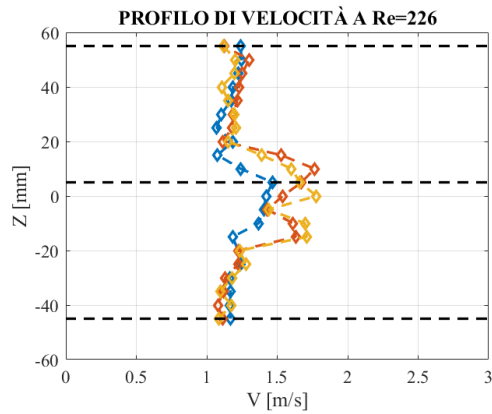
Per ridurre le probabilità che la misura sia affetta da errore essa è ripetuta diverse volte.

La misura viene effettuata per valori di tensione dell'elettrovalvola che variano da 6V a 10V per poter osservare le differenze che insorgono nel profilo di velocità all'aumentare della portata del getto.

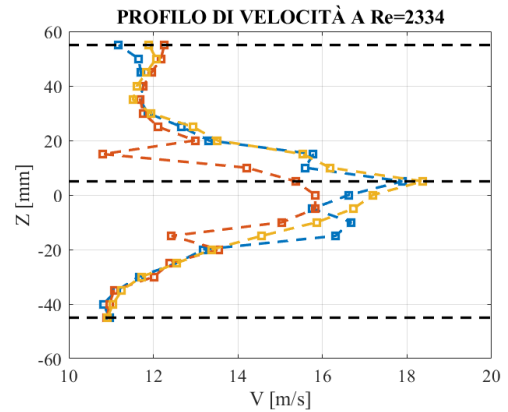
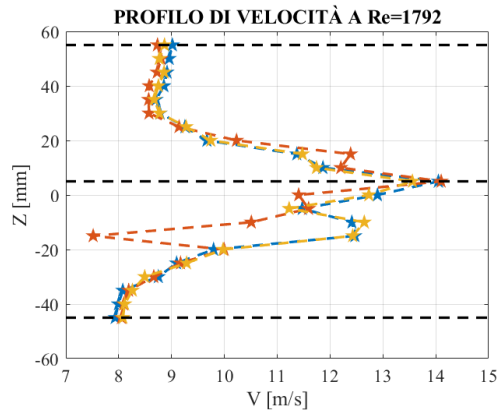
Ad ogni valore di tensione corrisponderà un differente valore di velocità massima misurata, mediante la quale andiamo a definire un numero di Reynolds come  $Re = \frac{V_{max} * h * \rho}{\mu}$ , con  $h$  che indica la larghezza della sezione di uscita del getto, pari a 2 mm,  $\rho$  densità dell'aria, pari a  $1.15 \frac{kg}{m^3}$ , e  $\mu$  viscosità dinamica dell'aria, pari a  $1.81e - 5 Pa \cdot s$

E[V]	6	7	8	9	10
$V_{max}$ [m/s]	1.778	7.75	14.1	18.4	19.4
Re	226	985	1792	2334	2470

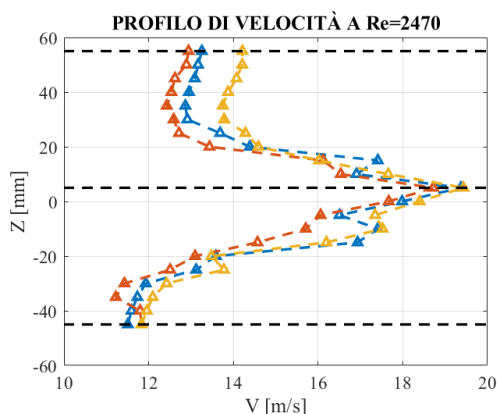
**Tabella 3.1:** Numeri di Reynolds e velocità massime corrispondenti ai diversi valori di apertura dell'elettrovalvola



**Figura 3.1:** Profili di velocità a Re=226 **Figura 3.2:** Profili di velocità a Re=985



**Figura 3.3:** Profili di velocità a Re=1792 **Figura 3.4:** Profili di velocità a Re=2334



**Figura 3.5:** Profili di velocità a  $Re=2470$

Nei grafici rappresentanti i profili sono raffigurati con delle linee tratteggiate orizzontali l'estremo superiore ed inferiore del getto e la linea di mezzeria. I profili di velocità ottenuti tendono ad avere lo stesso andamento indipendentemente dalla tensione, presentando una zona piatta alle estremità ed un picco nella zona centrale.

Come anticipato, sotto l'effetto della coppia impartita dal motore del movimentatore verticale, la sonda di pressione totale tende a perdere l'allineamento parallelo alla direzione della corrente in uscita dal getto.

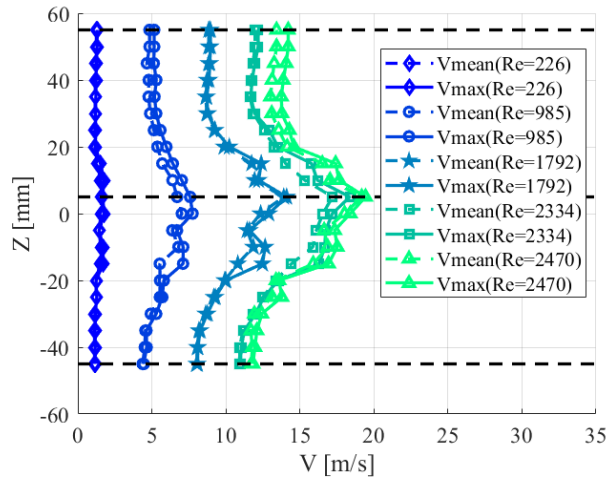
Questo fenomeno dà origine alla presenza di alcuni punti nella misurazione non coerenti rispetto all'andamento del resto del profilo.

Poiché la misura viene ripetuta diverse volte riposizionando la sonda e fornendole l'orientazione corretta, al fine di ridurre al minimo l'incidenza di errori legati al disallineamento, risulta opportuno considerare che il valore di velocità corretto in un punto sia quello massimo misurato, poiché sarà il valore acquisito con minor disallineamento possibile.

Si nota che ciascun profilo presenta, in un punto sottostante alla mezzeria, un valore di velocità inferiore che si discosta dall'andamento, tuttavia questa particolarità è comune a tutti i profili ed è indipendente dall'apertura dell'elettrovalvola dunque risulta ragionevole ritenere che il motivo sia legato alla struttura del getto e che questo difetto sia figlio di un'imprecisione nella produzione dello stesso o di una deformazione strutturale che ha luogo durante l'impiego.

Per confrontare i profili di velocità ottenuti con valori diversi di apertura dell'elettrovalvola si riportano tutti sullo stesso piano affinché sia possibile osservare l'aumento di velocità all'aumentare della tensione.

Si riporta l'andamento delle velocità medie e massime per ciascun valore di tensione dell'elettrovalvola e si osserva come i due andamenti risultino concordi.

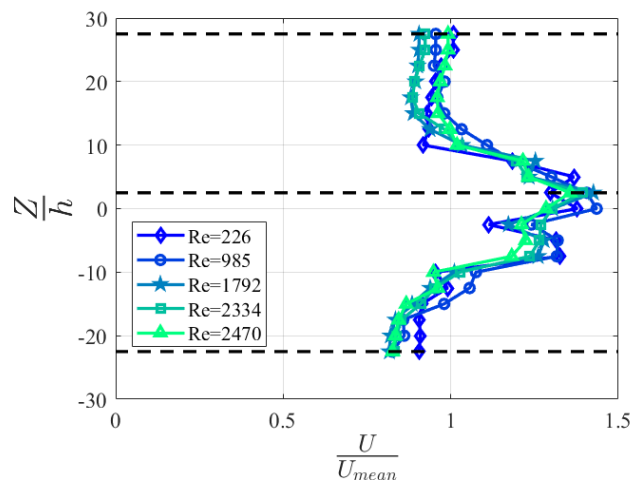


**Figura 3.6:** Profili di velocità medi e massimi

Come anticipato in precedenza al fine di minimizzare l'errore legato al disallineamento della sonda è ragionevole considerare che il profilo corretto di velocità sia quello descritto dalle velocità massime.

Si distingue in entrambi gli andamenti il difetto presente alla coordinata  $Z = -5\text{mm}$  per cui si misura una velocità minore rispetto a quella che ci si aspetterebbe se il profilo avesse un andamento perfettamente regolare.

Si procede adimensionalizzando i profili di velocità massimi facendo il rapporto con la velocità media del profilo per ciascuna tensione.



**Figura 3.7:** Profili di velocità adimensionalizzati

Si osserva come la distribuzione di velocità adimensionale sia sempre la stessa, indipendentemente dal numero di Reynolds.

La coordinata  $Z$  è stata adimensionalizzata rapportandola al valore  $h$  di ampiezza della sezione di uscita.

## 3.2 GETTI ORIZZONTALI

I getti orizzontali sono caratterizzati dalla stessa geometria, tuttavia ci si aspetta che il loro campo di moto sia differente in quanto il getto inferiore si trova in una posizione tale da premettere l'interazione con la parete inferiore della galleria, mentre il getto superiore risulta sufficientemente distante.

I campi di moto dei due getti orizzontali risultano differenti ed è necessario caratterizzarli entrambi.

Al fine di descrivere il campo di velocità si posiziona il rake di sonde pneumatiche nel getto e mediante il movimentatore si fa variare la coordinata  $Z$  della posizione della sonda e la si registra.

Il rake è in grado di acquisire in questo modo le misure di velocità in un piano a coordinata  $X$  costante.

Si ripete il procedimento per diversi valori di distanza dalla sezione di uscita per poter descrivere l'evoluzione del getto e poter valutare l'influenza della parete sullo stesso.

Il rake, a differenza della singola sonda di pressione, risulta essere più pesante, impedendo la rotazione del supporto sotto l'effetto della coppia impartita dal movimentatore, e le sue sonde, essendo caratterizzate da un diametro maggiore, sono meno sensibili al disallineamento, pertanto questo tipo di errore, fortemente presente nella misurazione precedente, risulta non influente.

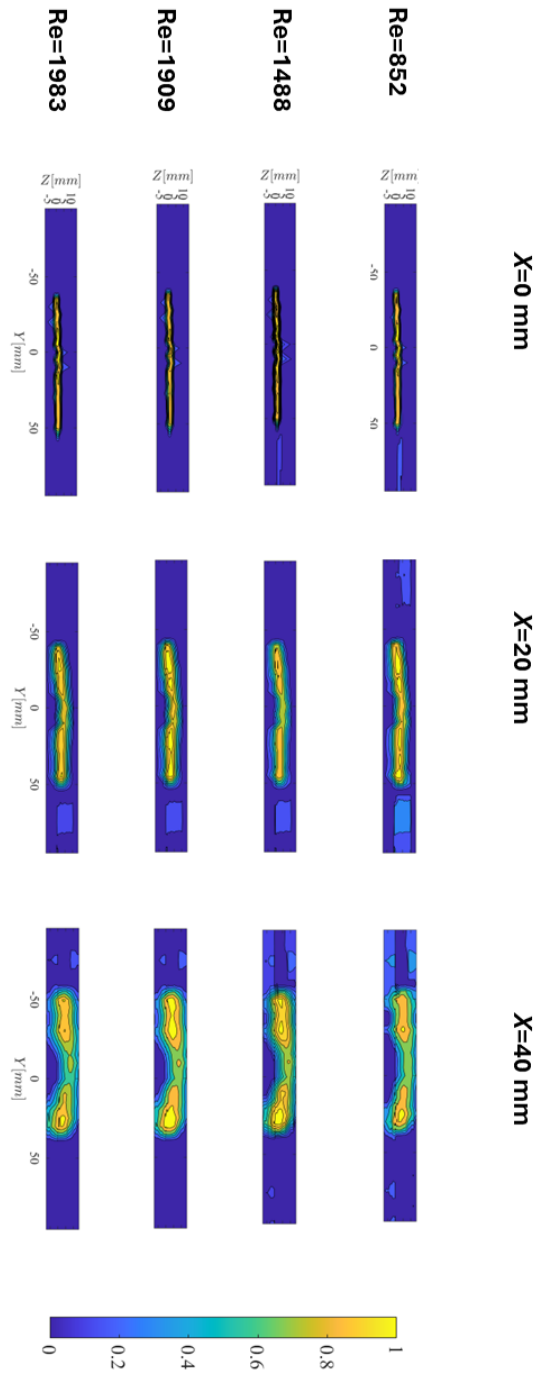
La misura viene effettuata per valori di tensione dell'elettrovalvola che variano da 6V a 10V per poter osservare le differenze che insorgono nel getto all'aumentare della portata del getto.

Ad ogni valore di tensione corrisponderà un differente valore di velocità massima misurata, mediante la quale andiamo a definire un numero di Reynolds come  $Re = \frac{V_{max} * h * \rho}{\mu}$ , con  $h$  che indica l'altezza della sezione di uscita del getto, pari a 2 mm,  $\rho$  densità dell'aria, pari a  $1.15 \frac{kg}{m^3}$ , e  $\mu$  viscosità dinamica dell'aria, pari a  $1.81e - 5 Pa \cdot s$

E[V]	7	8	9	10
$V_{max}$ [m/s]	6.7	11.7	15	15.6
Re	852	1488	1909	1983

**Tabella 3.2:** Numeri di Reynolds e velocità massime corrispondenti ai diversi valori di apertura dell'elettrovalvola

### 3.2.1 GETTO SUPERIORE



**Figura 3.8:** Contours della velocità a diversi valori di  $X$  per ciascun numero di Reynolds

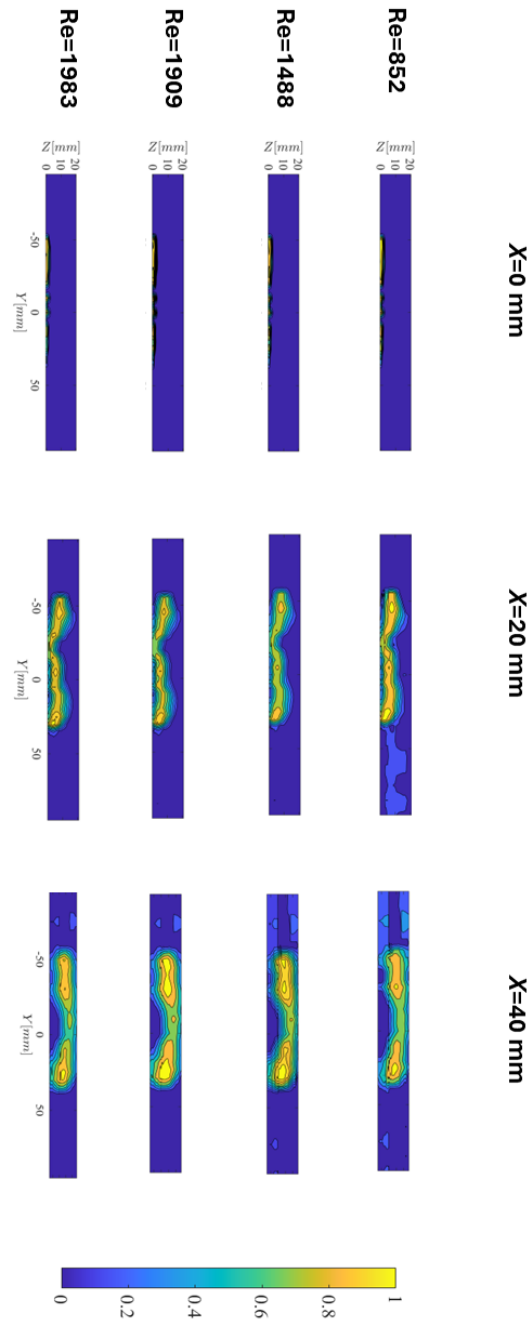


Tutte le misure di velocità vengono riportate adimensionalizzate mediante il valore di velocità massima, dunque ogni immagine presenta la medesima colorbar riportata in figura.

Le velocità misurate risultano massime in prossimità della sezione di uscita del getto e tendono a ridursi all'aumentare della coordinata  $X$ .

Contrariamente all'andamento della velocità, la dimensione del getto parte da un valore pari alla dimensione della sezione di uscita ed aumenta all'aumentare della coordinata  $X$ .

### 3.2.2 GETTO INFERIORE



**Figura 3.9:** Contours della velocità a diversi valori di  $X$  per ciascun numero di Reynolds

Nello studio del getto inferiore si vuole cercare di mettere in risalto l'effetto indotto dalla presenza di una parete nel campo di moto.

Tutte le misure di velocità vengono adimensionalizzate mediante il valore di velocità massima, dunque ogni immagine presenta la medesima colorbar riportata in figura.

Nuovamente si osserva che le velocità misurate risultano massime in prossimità della sezione di uscita del getto e tendono a ridursi all'aumentare della coordinata  $X$ .

Contrariamente all'andamento della velocità, la dimensione del getto parte da un valore pari alla dimensione della sezione di uscita ed aumenta all'aumentare della coordinata  $X$ .

### 3.2.3 CONFRONTO CON CARATTERIZZAZIONE MEDIANTE TECNICA PIV

Il getto attuatore orizzontale è stato caratterizzato al banco mediante delle misure di Particle Image Velocimetry nel lavoro di tesi [3].

Si vogliono sfruttare i risultati ottenuti dalla PIV per definire un sistema di riferimento in comune tra le due misurazioni al fine di stabilire accuratamente la posizione della sonda nello spazio.

La PIV è una tecnica ottica non invasiva, ovvero non fa uso di sonde che possano interferire con il flusso, e consente di valutare la velocità di un campo di moto in un elevato numero di punti, ottenendo quindi un'ottima risoluzione spaziale.

La PIV si basa sull'acquisizione di immagini di un tracciante immesso nel flusso d'aria indagato.

Le particelle traccianti, illuminate tramite un fascio laser, risultano visibili e permettono la ricostruzione del campo di moto mediante l'acquisizione di immagini del flusso.

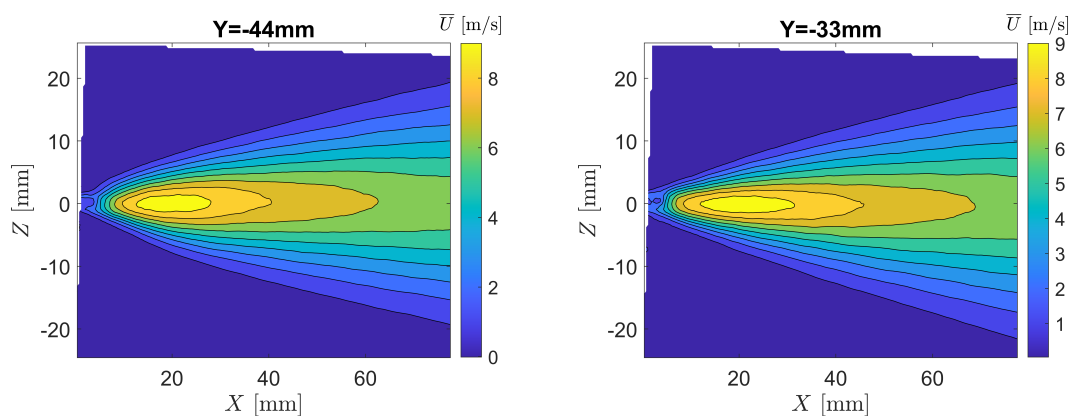
Ipotizzando che le particelle immesse si muovano coerentemente con il fluido è possibile confrontare tra di loro due immagini consecutive per quantificare in ogni punto lo spostamento verificatosi nel tempo intercorso tra i due scatti.

Conoscendo la distanza percorsa dal tracciante e il lasso di tempo tra l'acquisizione delle immagini è immediato risalire alla velocità del flusso preso in analisi.

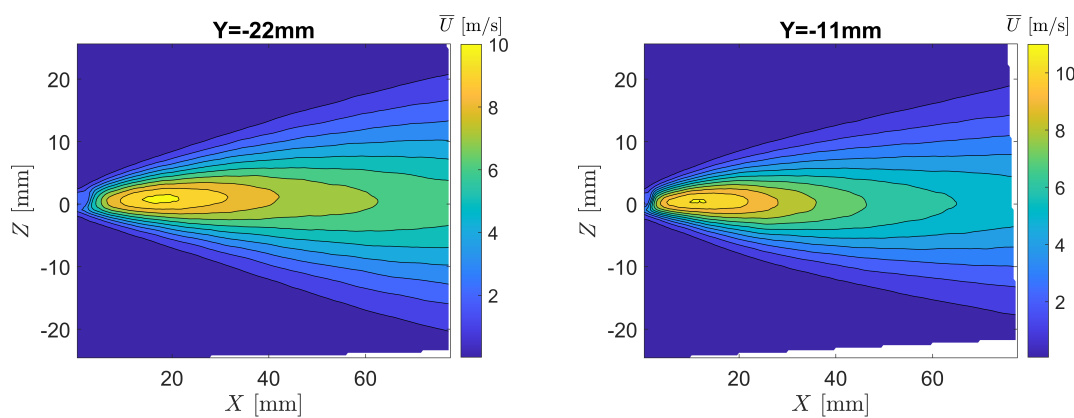
In questo modo sono stati acquisiti svariati campi di moto piani nel getto, paralleli al piano  $X - Z$  e definiti da diverse coordinate  $Y$ .

Poiché il getto non è risultato perfettamente orizzontale è stata necessaria una

rotazione al fine di confrontarlo con le misure ottenute in situ.



**Figura 3.10:** Piano PIV ad  $Y=-44\text{mm}$     **Figura 3.11:** Piano PIV ad  $Y=-33\text{mm}$



**Figura 3.12:** Piano PIV ad  $Y=-22\text{mm}$     **Figura 3.13:** Piano PIV ad  $Y=-11\text{mm}$

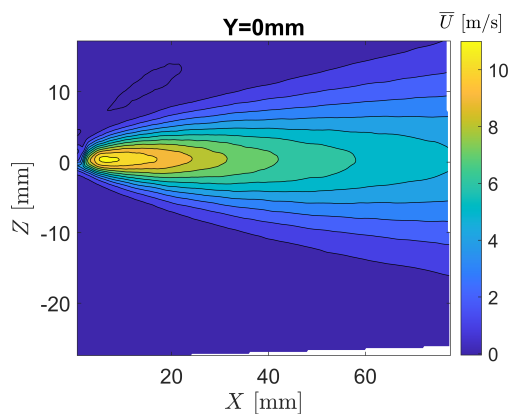


Figura 3.14: Piano PIV ad  $Y=0\text{mm}$

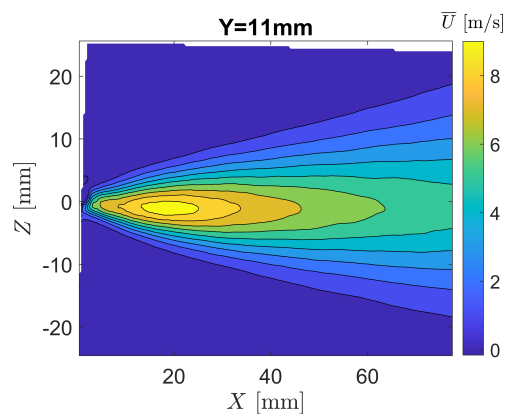


Figura 3.15: Piano PIV ad  $Y=11\text{mm}$

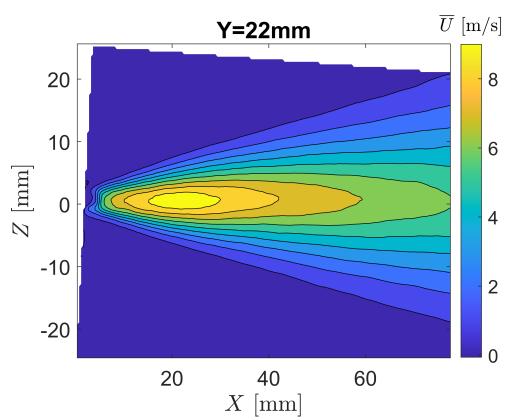


Figura 3.16: Piano PIV ad  $Y=22\text{mm}$

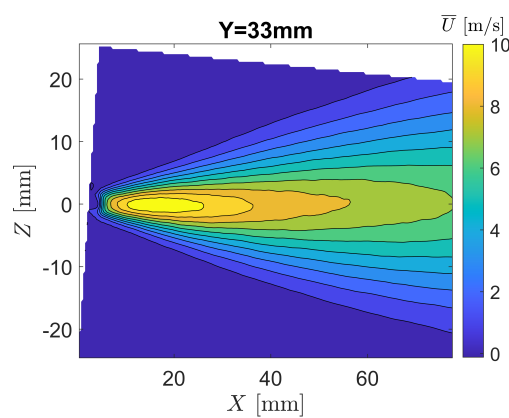
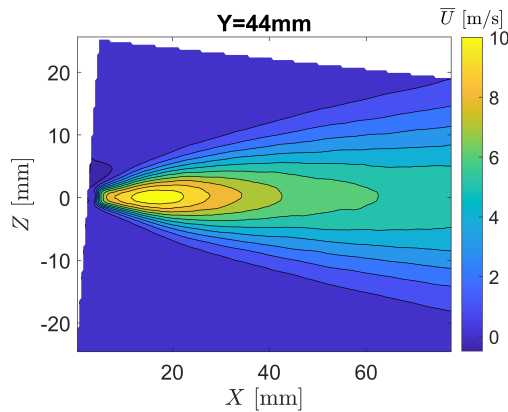


Figura 3.17: Piano PIV ad  $Y=33\text{mm}$



**Figura 3.18:** Piano PIV ad  $Y=44\text{mm}$

Disponendo delle misure di velocità ottenute mediante tecnica pneumatica, si vuole operare un confronto tra le due caratterizzazioni.

Il range di velocità misurato con tecnica PIV è corrispondente a quello misurato con tecnica pneumatica con un'apertura dell'elettrovalvola pari ad 8V e dunque  $Re=1488$ .

A partire dai piani ottenuti mediante PIV e dalle misure di velocità nei piani ottenuti mediante tecnica pneumatica, si ricostruiscono dei profili di velocità  $U(Y)$  che possano essere confrontati gli uni con gli altri.

La ricostruzione dei profili di velocità  $U(Y)$  dai dati PIV si effettua prendendo in considerazione valori di velocità ottenuti alle stesse coordinate  $X$  e  $Z$ , nel sistema di riferimento delle misure PIV, dai vari piani e definendo di conseguenza un andamento della velocità che sia esclusivamente funzione di  $Y$ .

Allo stesso modo si prendono in considerazione profili a coordinate  $X$  e  $Z$  fissate e si definiscono profili di velocità  $U(Y)$  anche dalle misure di pressione totale.

Si procede interpolando i profili di velocità ottenuti con tecnica pneumatica sulle stesse coordinate  $Y$  su cui sono definiti i profili estrapolati dalla PIV.

Per quanto riguarda i profili di velocità ottenuti dalle misure di pressione totale, si considerano i risultati acquisiti alla coordinata  $X = 0$  nel getto superiore, in quanto il campo di moto del getto inferiore è influenzato dalla presenza di parete, che in teca è assente, dunque si effettua una cross correlazione tra i profili di velocità ottenuti nelle due caratterizzazioni.

La cross correlazione permette di assegnare, preso un profilo  $U(Y)$ , a fissate coordinate  $X$  e  $Z$ , tra quelli ottenuti con tecnica pneumatica, un valore numerico alla somiglianza con ciascun profilo ricostruito dalle misure di PIV.

Selezionando il profilo che presenta il massimo valore di correlazione tra quelli ottenuti dalla PIV, è possibile definire quali siano le coordinate del profilo ottenuto dalle misure di pressione totale nel sistema di riferimento della PIV.

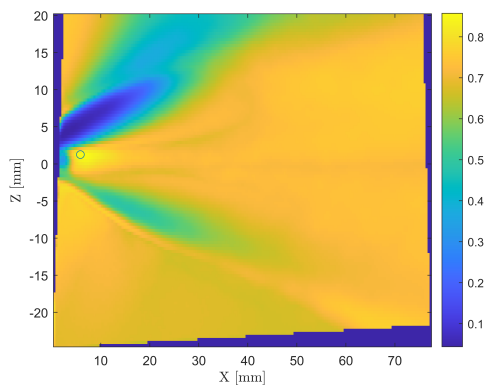
Per semplicità si numerano i profili a diverse  $Z$  ricavati dalle misure di pressione totale:

N profilo	$Z$ profilo [mm]	N profilo	$Z$ profilo [mm]	N profilo	$Z$ profilo [mm]
1	0	8	26	15	40
2	5	9	27	16	45
3	10	10	28	17	50
4	15	11	29	18	55
5	20	12	30	19	60
6	22.5	13	32.5	20	65
7	25	14	35	21	70

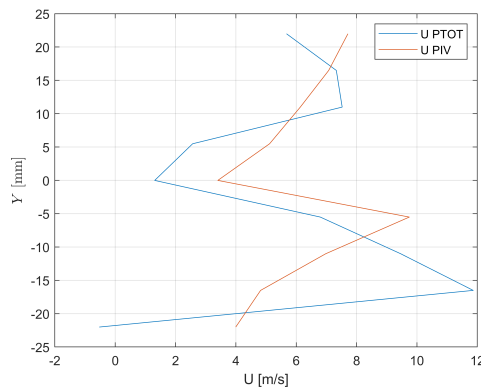
**Tabella 3.3:** Numerazione profili  $U(Y)$

Per ciascun profilo si ottiene dunque un campo di correlazione che attribuisce un valore alla corrispondenza tra l' $n$ -esimo profilo e ciascun profilo  $U(Y)$  ottenuto con tecnica PIV in modo da determinare quale sia il profilo con maggiore corrispondenza.

Si riporta a titolo di esempio un campo di correlazione che permette di identificare il profilo di massima corrispondenza ed il confronto tra i profili ottenuti dalle due misurazioni.

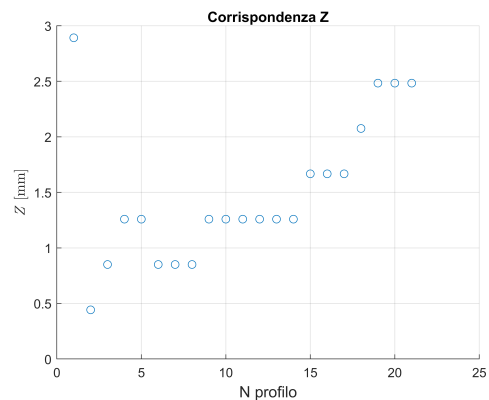
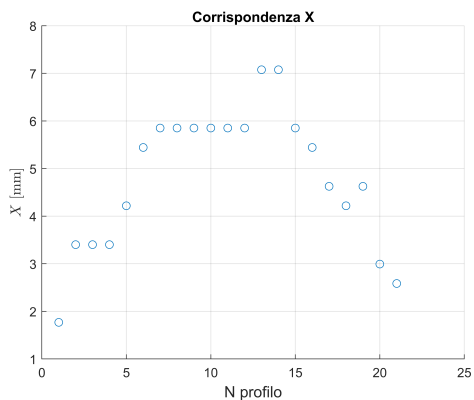


**Figura 3.19:** Campo di correlazione profilo 12



**Figura 3.20:** Confronto tra profilo di massima correlazione e profilo 12

Definiti i profili corrispondenti tra le due misurazioni si riportano graficamente le coordinate ottenute nel sistema di riferimento PIV.

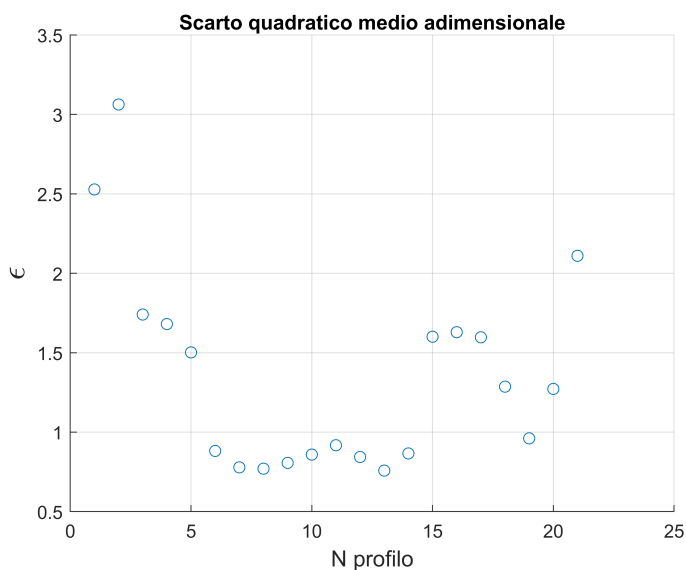


**Figura 3.21:** Coordinata X dei profili di massima corrispondenza

**Figura 3.22:** Coordinata Z dei profili di massima corrispondenza

Definiti i profili corrispondenti tra le due misurazioni è possibile fornire una valutazione della loro differenza tramite la definizione del parametro

$$\epsilon = \frac{\sum(U_{PIV}(i) - U_{PTOT}(i))^2}{U_{PIVmean} * U_{PTOTmean}}$$



**Figura 3.23:** Valore di  $\epsilon$  per ciascun profilo

I profili con la maggior somiglianza si trovano nella zona centrale del getto in quanto più ci si allontana dal centro, più le velocità in gioco sono basse e la



correlazione perde di significato.

L'analisi effettuata permette di definire una nuova origine del sistema di riferimento in cui sono state effettuate le misure di pressione totale.

Per farlo si prende in considerazione la moda, ovvero il valore più ricorrente, della corrispondenza delle coordinate  $X$  e  $Z$ , dunque si evince che l'origine del sistema di riferimento iniziale è posizionata alle coordinate  $X = 5.85mm$  e  $Z = 1.31mm$ .

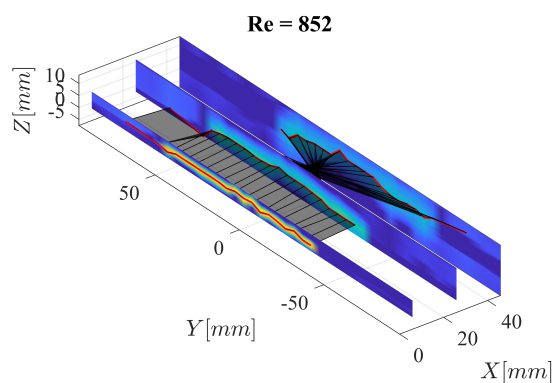
Il valore trovato risulta essere quello relativo alla correlazione dei profili al centro del getto, dunque oltre ad essere quello più ricorrente è anche quello maggiormente significativo in quanto l'errore  $\epsilon$  per questi profili di velocità è il minore.

## Capitolo 4

# QUANTITÀ INTEGRALI DEL GETTO 3D

### 4.1 GETTO SUPERIORE

Definito il nuovo sistema di riferimento si possono osservare i piani in un grafico tridimensionale in modo da osservare l'evoluzione del getto in funzione della distanza dalla sezione di uscita.



**Figura 4.1:** Vista 3D del getto a  $Re=852$

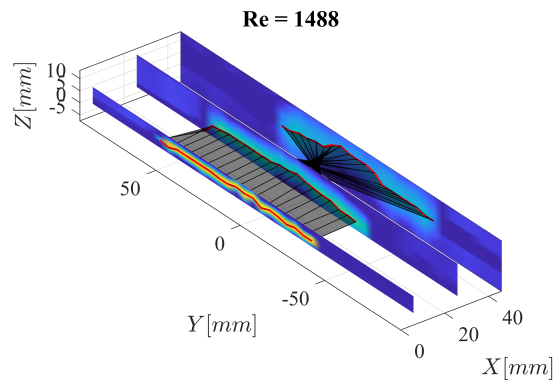


Figura 4.2: Vista 3D del getto a  $Re=1488$

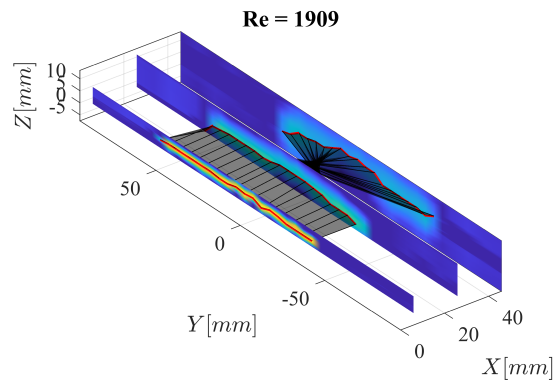


Figura 4.3: Vista 3D del getto a  $Re=1909$

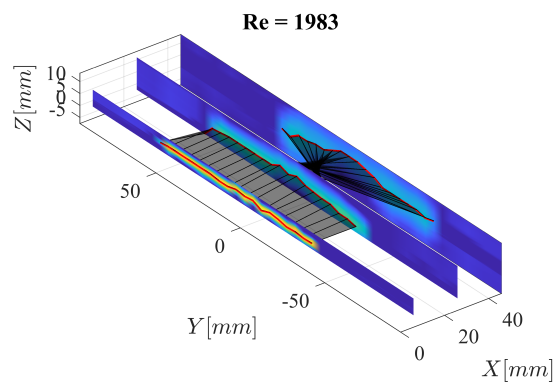
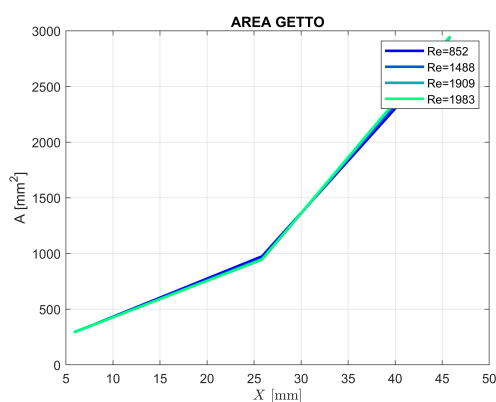


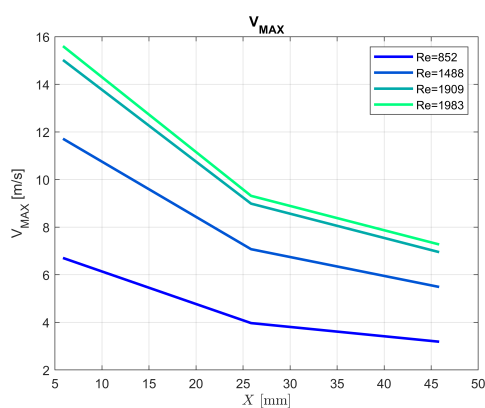
Figura 4.4: Vista 3D del getto a  $Re=1983$

È riportata in rosso la linea che indica le velocità massime per ogni sezione ed è notevole lo spostamento in direzione verticale del punto caratterizzato da velocità massima, specialmente nella zona centrale del getto, indice della possibile presenza di una deformazione elastica strutturale dello stesso.

In ciascuna misurazione ad  $X$  costante il piano è suddiviso in sezioni rettangolari, alle quali viene attribuito un valore di velocità costante pari a quello misurato nel centro della cella dalla sonda di pressione totale. Sommando le aree di ciascuna sezione in cui si misura una velocità non nulla, è possibile definire una misura quantitativa della dimensione dell'area del getto.



**Figura 4.5:** Andamento della dimensione dell'area del getto in funzione della coordinata  $X$



**Figura 4.6:** Andamento delle velocità massime in funzione della coordinata  $X$

Si può osservare l'andamento decrescente della velocità massima e quello crescente dell'area del getto all'aumentare della coordinata  $X$ , che confermano le osservazioni fatte osservando i campi di moto.

### 4.1.1 VALUTAZIONE DI PORTATA E QUANTITÀ DI MOTO DEL GETTO SUPERIORE

Per studiare nel dettaglio l'evoluzione del getto all'allontanarsi dalla sezione di uscita si valutano la portata e la quantità di moto dello stesso.

Per valutare la portata si integra il valore di velocità su tutto il piano a  $X$  costante

$$Q = \int_{-7mm}^{14mm} U(Y, Z) dY dZ \quad (4.1)$$

per la valutazione della quantità di moto si effettua l'integrale

$$M = \int_{-7mm}^{14mm} U^2(Y, Z) dY dZ \quad (4.2)$$

Dall'osservazione dell'andamento della portata è possibile quantificare l'entrainment, ovvero l'aumento di portata legato all'inglobamento nel getto di aria ferma per effetto delle forze viscosive.

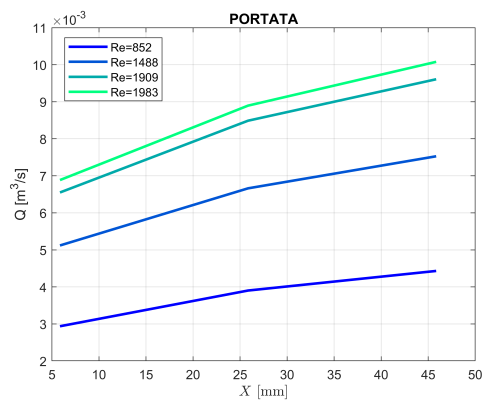
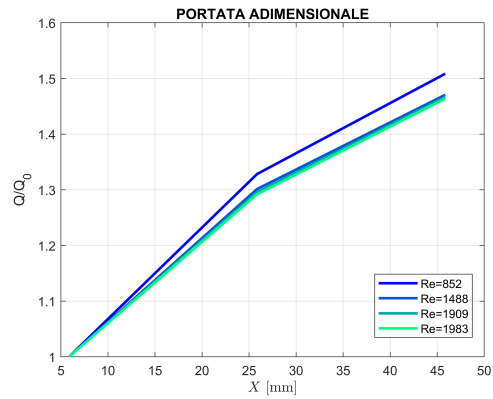


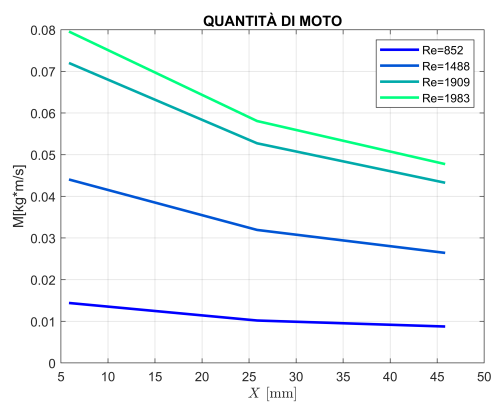
Figura 4.7: Andamento della portata



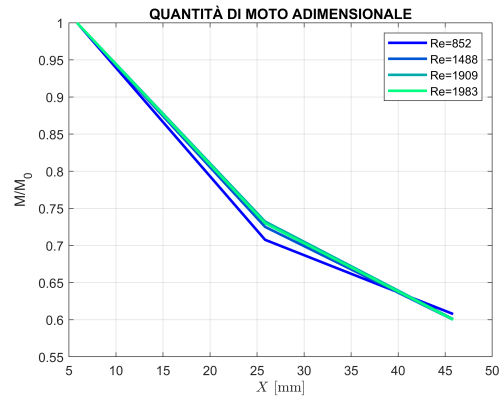
**Figura 4.8:** Andamento della portata adimensionalizzata

Si osserva un aumento di portata non trascurabile e, valutando l'evoluzione della portata adimensionalizzata con il valore misurato nella sezione di uscita, si nota che gli andamenti si sovrappongono e non persistono differenze al variare della tensione.

La quantità di moto nell'evoluzione del getto non può aumentare dunque ci si aspetta un valore costante o leggermente decrescente.



**Figura 4.9:** Andamento della quantità di moto



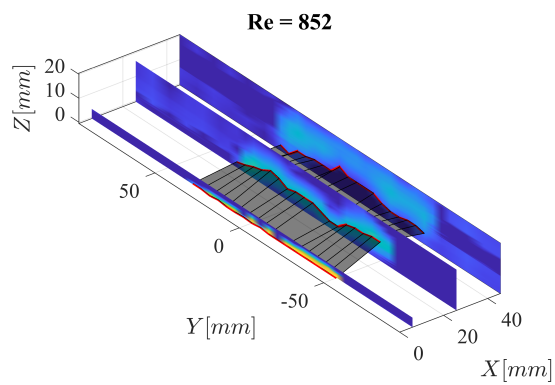
**Figura 4.10:** Andamento della quantità di moto adimensionalizzata

L'andamento della quantità di moto è decrescente come atteso tuttavia si misura una perdita ingente che è certamente accresciuta dalla bassa risoluzione della misura.

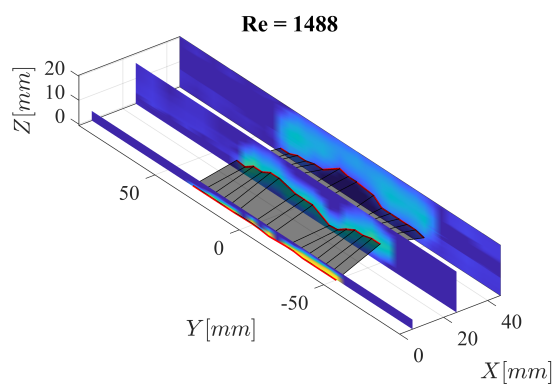


## 4.2 GETTO INFERIORE

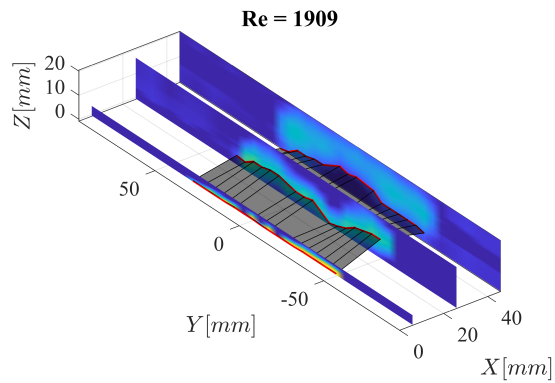
Anche per il getto inferiore si rappresentano i piani in un grafico tridimensionale in modo da osservare l'evoluzione del getto in funzione della distanza dalla sezione di uscita.



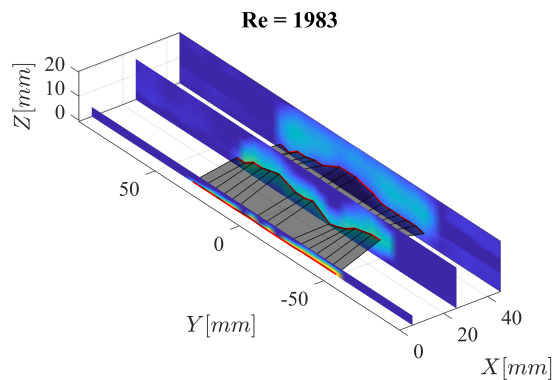
**Figura 4.11:** Vista 3D del getto a 852



**Figura 4.12:** Vista 3D del getto a 1488

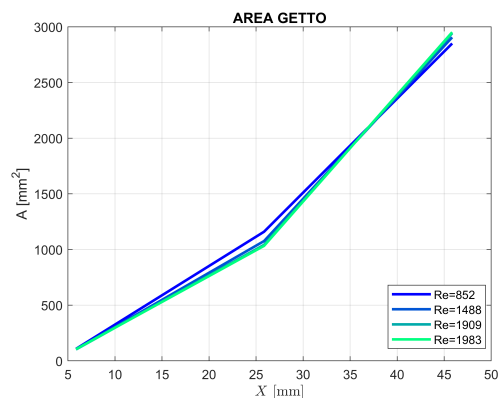


**Figura 4.13:** Vista 3D del getto a 1909

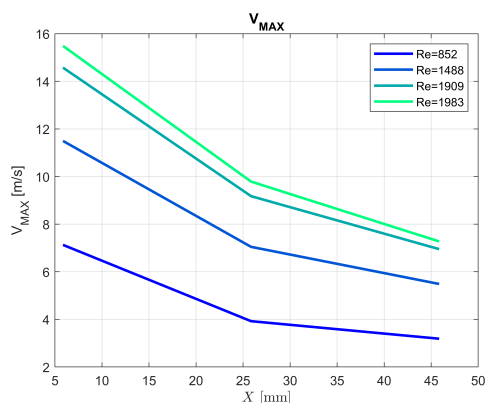


**Figura 4.14:** Vista 3D del getto a 1983

La linea dei massimi riportata in rosso continua a presentare uno spostamento in direzione verticale del punto caratterizzato da velocità massima, ancora in particolar modo nella zona centrale del getto ma a differenza del getto superiore a seguito dei 20mm l'inclinazione tende ad annullarsi. Questa differenza è frutto della presenza della parete che modifica il campo di moto.



**Figura 4.15:** Andamento della dimensione dell'aera del getto in funzione della coordinata  $X$



**Figura 4.16:** Andamento delle velocità massime in funzione della coordinata  $X$

Si può osservare l'andamento decrescente della velocità massima e quello crescente dell'area del getto all'aumentare della coordinata  $X$  che confermano le osservazioni fatte osservando i campi di moto.

#### 4.2.1 VALUTAZIONE DI PORTATA E QUANTITÀ DI MOTO DEL GETTO INFERIORE

Il campo di moto del getto inferiore non è acquisito in maniera completa per ragioni relative alla massima escursione permessa dal movimentatore verticale, pertanto la portata e la quantità di moto sono valutate sulla metà superiore del getto, considerando la linea delle velocità massime come linea di mezzeria.

Ancora una volta si valuta l'andamento della portata al variare della distanza dalla sezione di uscita del getto al fine di quantificare l'entrainment.

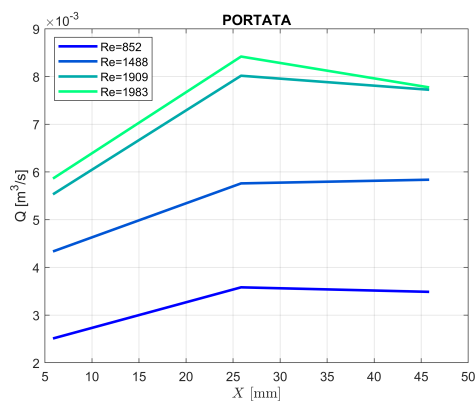


Figura 4.17: Andamento della portata

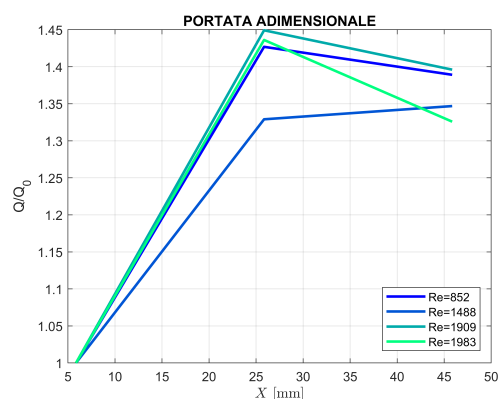


Figura 4.18: Andamento della portata adimensionalizzata

La portata del getto risulta inizialmente crescere per poi diventare costante, diversamente dal caso precedente che presentava una portata costantemente crescente.

Nuovamente si osserva che adimensionalizzando la portata con il valore misurato nella sezione di uscita le curve si avvicinano e non risulta notevole l'influenza del numero di Reynolds.

La differenza notata nell'andamento è giustificata dalla prossimità del getto alla parete, che limita l'effetto dell'entrainment.

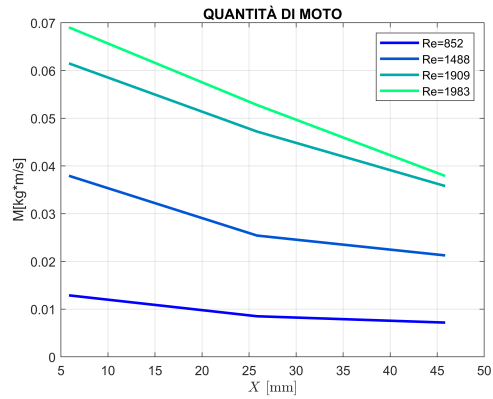


Figura 4.19: Andamento della quantità di moto

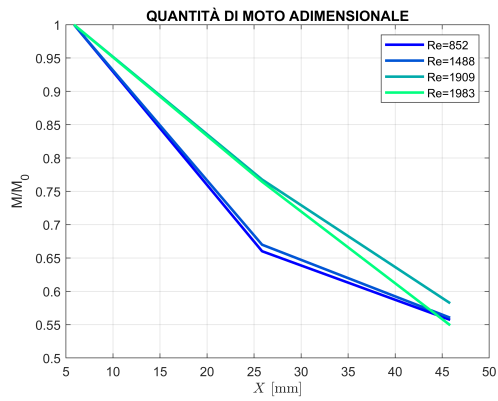


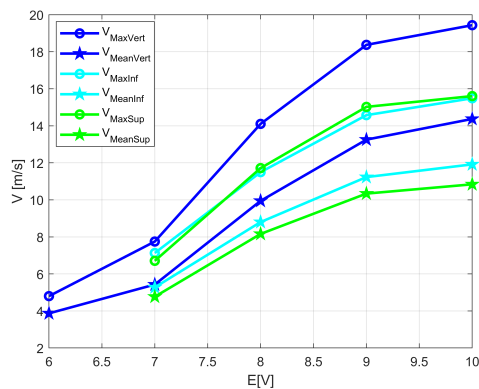
Figura 4.20: Andamento della quantità di moto adimensionalizzata

La valutazione della quantità di moto in funzione di  $X$  presenta nuovamente un andamento decrescente che non mette in luce differenze rispetto al getto superiore. Si noti che i valori di portata e quantità di moto misurati nei due getti risultano molto simili ed anche l'aumento di portata per entrainment è lo stesso ma la presenza di parete fa sì che questo fenomeno si concentri nella parte del getto più prossima alla sezione di uscita.

### 4.3 CONFRONTO

Effettuata la caratterizzazione dei tre getti si vuole operare un confronto tra i loro campi per valutare l'influenza della variazione di geometria e della presenza di parete.

Il confronto è effettuato paragonando le velocità medie e massime di ciascun getto al variare del numero di Reynolds.



**Figura 4.21:** Confronto tra velocità massime e medie dei tre getti

All'aumentare della tensione imposta dall'elettrovalvola tutte le velocità presentano un andamento crescente, tuttavia si nota che le velocità massime e medie del getto verticale risultano nettamente superiori a quelle dei getti orizzontali. Questa disparità è da attribuirsi alla differenza di geometria ed in particolare alle maggiori dimensioni.

I valori di velocità misurati nei getti orizzontali sono molto simili ma si può osservare una velocità media sempre superiore nel getto inferiore. Questo fenomeno è causato dalla presenza della parete solida che limita la possibilità del flusso di muoversi verso il basso.

## Capitolo 5

# ANALISI BIDIMENSIONALE

Al fine di eliminare gli effetti della tridimensionalità del getto da questa analisi si vuole studiare anche il campo di moto dei getti orizzontali approssimando il getto ad un getto bidimensionale.

L'approssimazione viene fatta mediando il profilo di velocità in direzione  $Y$  in modo da ottenere un campo di moto che evolva esclusivamente in direzione  $X$  e  $Z$ . Fissate le coordinate  $X$  e  $Z$  si valuta il valore di velocità media lungo  $Y$  sommando tutti i valori di velocità rilevati da ciascuna presa di pressione del rake e lo si divide per il numero di prese di pressione.

I valori di velocità media ottenuti che condividono la stessa ascissa  $X$  vanno dunque a formare i profili  $U(Z)$  bidimensionali.

### 5.1 GETTO SUPERIORE

Determinati i profili medi di velocità si riportano, al variare del numero di Reynolds, per ciascun valore di  $X$  in cui è stata effettuata l'acquisizione durante la caratterizzazione dei getti orizzontali.

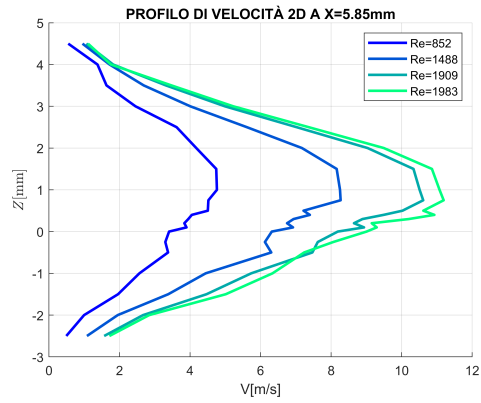


Figura 5.1: Profilo di velocità bidimensionale a  $X=5.85\text{mm}$

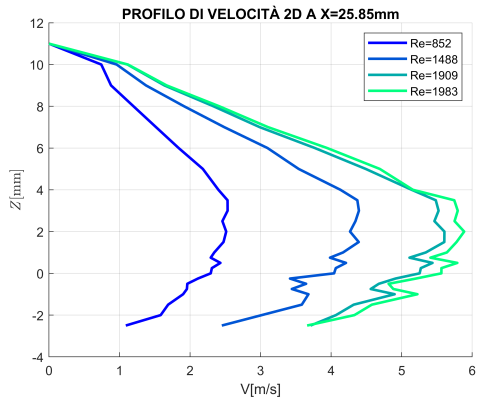


Figura 5.2: Profilo di velocità bidimensionale a  $X=25.85\text{mm}$

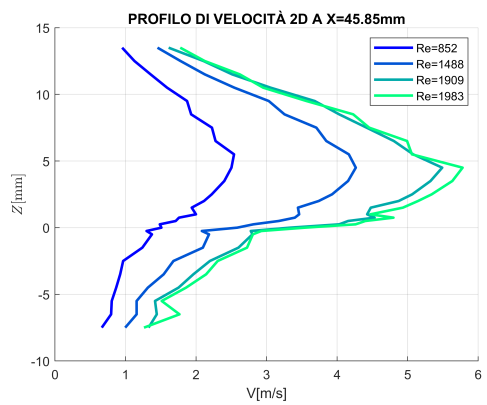


Figura 5.3: Profilo di velocità bidimensionale a  $X=45.85\text{mm}$



Una volta descritto il getto si può procedere a valutare l'evoluzione della portata e della quantità di moto al variare della coordinata  $X$ .

La portata nel caso bidimensionale è valutata come

$$Q = \int_{-7mm}^{14mm} U(Y, Z) * bdZ \quad (5.1)$$

con  $b$  larghezza della sezione di uscita del getto.

per la valutazione della quantità di moto si effettua l'integrale

$$M = \int_{-7mm}^{14mm} U^2(Y, Z) * bdZ \quad (5.2)$$

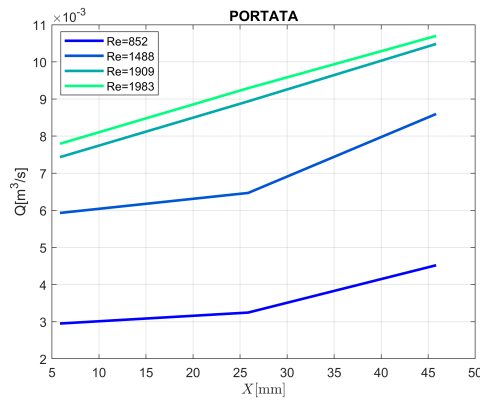


Figura 5.4: Portata del getto 2D in funzione di  $X$

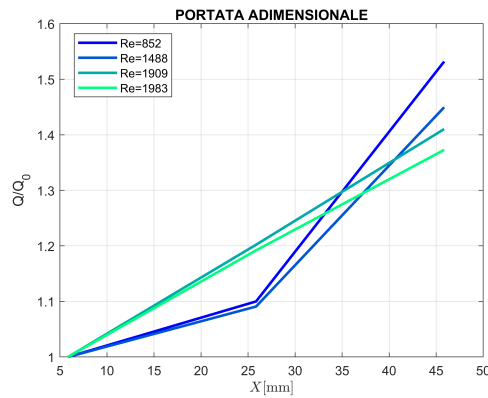
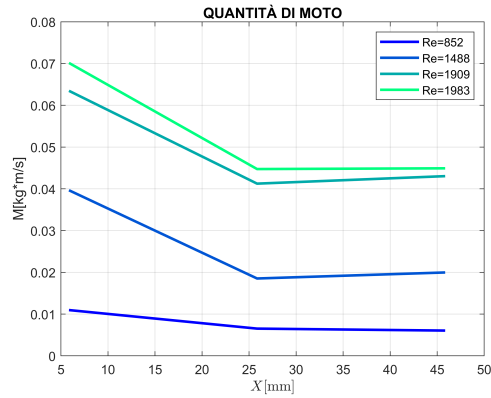


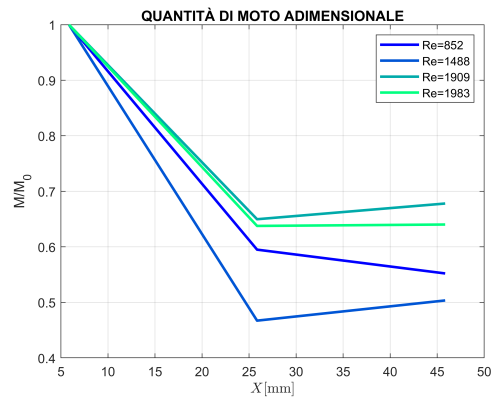
Figura 5.5: Portata del getto adimensionalizzata 2D in funzione di  $X$

L'andamento osservato per la portata non differisce da quello ottenuto per il getto bidimensionale ed ancora una volta si può notare la presenza di entrainment

che aumenta la portata del getto allontanandosi dalla sezione di uscita del getto. Anche in questo caso con l'adimensionalizzazione si osserva che le curve tendono a sovrapporsi diventando indipendenti dal valore di tensione.



**Figura 5.6:** Quantità di moto del getto 2D in funzione di  $X$



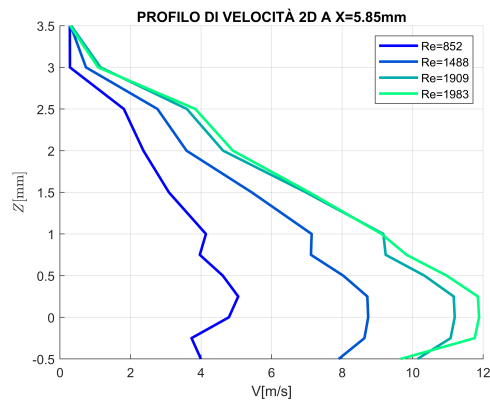
**Figura 5.7:** Quantità di moto del getto adimensionalizzata 2D in funzione di  $X$

Dall'analisi dell'andamento della quantità di moto si osserva un andamento ancora decrescente ma in questo caso la riduzione risulta inferiore a quella ritrovata nel getto tridimensionale.

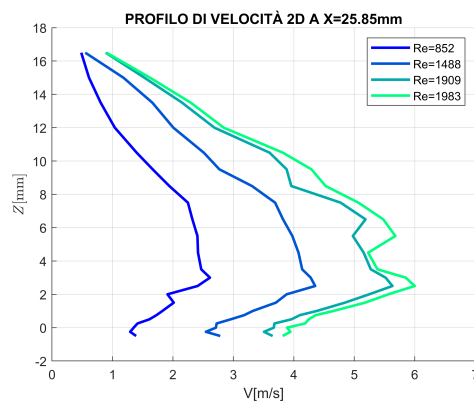
Nuovamente si osserva che con l'adimensionalizzazione le curve tendono a coincidere diventando indipendenti dal valore del numero di Reynolds.

## 5.2 GETTO INFERIORE

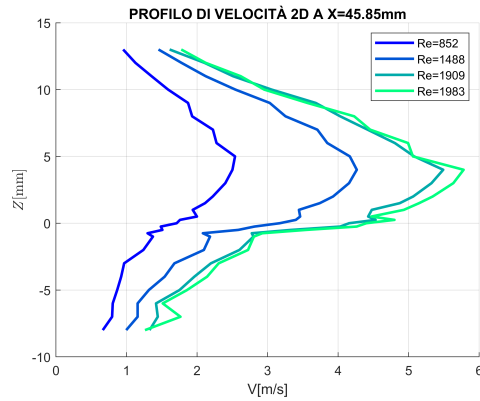
Il procedimento è ripetuto analogamente per il getto inferiore, dunque si riportano i profili medi di velocità al variare del numero di Reynolds per ciascun valore di  $X$  in cui è stata effettuata l'acquisizione durante la caratterizzazione dei getti orizzontali.



**Figura 5.8:** Profilo di velocità bidimensionale a  $X=5.85\text{mm}$

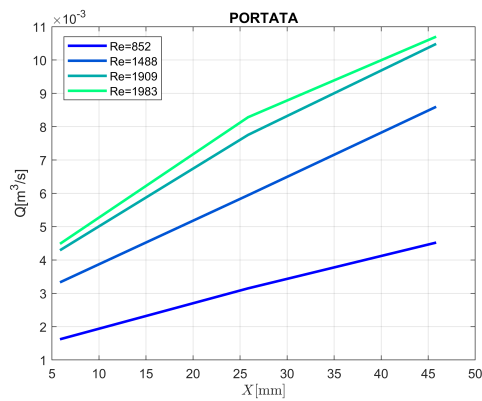


**Figura 5.9:** Profilo di velocità bidimensionale a  $X=25.85\text{mm}$



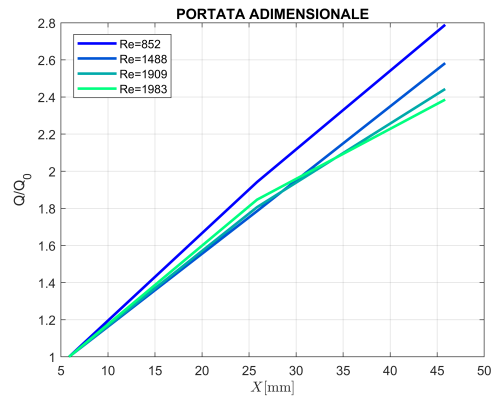
**Figura 5.10:** Profilo di velocità bidimensionale a  $X=45.85\text{mm}$

Una volta descritto il getto si può procedere a valutare l'evoluzione della portata e della quantità di moto al variare della coordinata  $X$ .



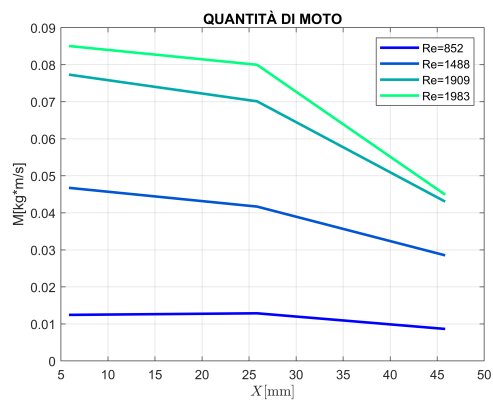
**Figura 5.11:** Portata del getto 2D in funzione di  $X$

L'andamento osservato per la portata non differisce da quello ottenuto per il getto bidimensionale ed ancora una volta si può notare la presenza di entrainment che aumenta la portata del getto allontanandosi dalla sezione di uscita del getto.

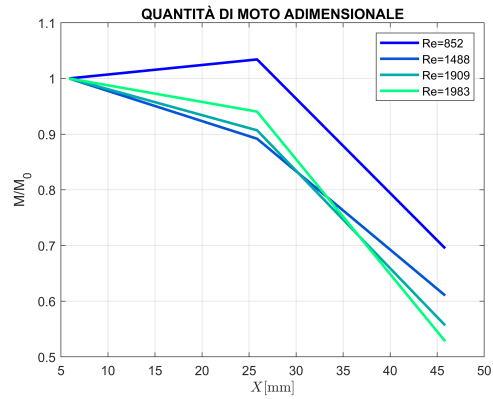


**Figura 5.12:** Portata del getto 2D adimensionalizzata in funzione di  $X$

Anche in questo caso con l'adimensionalizzazione si osserva che le curve tendono a sovrapporsi diventando indipendenti dal valore del numero di Reynolds. Si valuta infine l'evoluzione della quantità di moto nel getto.



**Figura 5.13:** Quantità di moto del getto 2D in funzione di  $X$



**Figura 5.14:** Quantità di moto del getto 2D adimensionalizzata in funzione di  $X$

L'andamento risulta decrescente come atteso ma presenta, in maniera esattamente opposta al getto superiore, inizialmente un tratto circa costante ed in seguito una riduzione brusca.

In questo caso la perdita di quantità di moto misurata risulta essere addirittura superiore a quella valutata per il getto tridimensionale.

## Capitolo 6

# CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

### 6.1 CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi si è effettuata la caratterizzazione in situ dei quattro getti attuatori, posti sul retro di un modello di veicolo da trasporto merci.

Si è tenuto conto della differenza tra getto verticale, getto orizzontale superiore e getto orizzontale inferiore a causa della differenza di geometria tra getto verticale e getti orizzontali e a causa della presenza di una parete solida che influenza il campo di moto del getto orizzontale inferiore.

La portata dei quattro getti è stata regolata mediante un'elettrovalvola la cui apertura il numero di Reynolds che caratterizza il getto.

Il getto verticale è stato studiato come getto bidimensionale e la sua caratterizzazione è stata operata mediante una singola sonda pneumatica movimentata verticalmente.

Per il getto verticale ci si è concentrati sulla forma del profilo che si è cercato di rendere il più uniforme possibile con l'ausilio del diffusore posto prima della sezione di uscita.

Lo studio del getto verticale ha messo in luce un andamento del profilo di velocità piatto ed uniforme nelle zone più esterne del getto ed un picco di velocità nella zona centrale indipendentemente dal numero di Reynolds del getto.

Ciascun profilo di velocità studiato ha messo in luce un'irregolarità poco al di sotto della mezzeria del getto che necessita di ulteriori indagini in quanto potrebbe essere eliminata variando la geometria del diffusore o irrigidendone la struttura nel caso in cui la causa fosse una deformazione elastica strutturale del getto.

La caratterizzazione dei getti orizzontali è stata operata mediante un rake di prese di pressione totale orientato orizzontalmente e movimentato verticalmente al fine

di ricostruire dei piani che rappresentassero l'andamento della velocità nel getto. Le misure di velocità sono state effettuate a diversi valori di distanza dalla sezione di uscita al fine di visualizzare lo sviluppo tridimensionale del getto. I getti orizzontali sono stati studiati in maniera tridimensionale al fine di apprezzare meglio l'influenza della presenza della parete nel getto inferiore. Mediante un confronto con i dati ottenuti dalla PIV è stato possibile definire un'origine del sistema di riferimento in comune tra i due metodi di misura e si sono potute definire di conseguenza le posizioni reali delle misure effettuate mediante prese di pressione totale. È stata osservata una differenza nell'andamento della portata e della quantità di moto tra i due getti al variare della distanza dalla sezione di uscita ma i valori ottenuti sono risultati molto prossimi. Si è poi cercato di studiare i getti orizzontali con un approccio bidimensionale andando a mediare il profilo in direzione Y. Ciò ha portato ad osservare una perdita di simmetria del getto all'aumentare della coordinata X. Anche nell'approccio bidimensionale sono stati valutati gli andamenti di portata e quantità di moto al variare della distanza dalla sezione di uscita, con risultati analoghi a quelli ottenuti mediante lo studio del getto tridimensionale.



## 6.2 SVILUPPI FUTURI

La caratterizzazione in situ dei getti costituisce il passo preliminare all'impiego degli stessi ai fini di ottenere una riduzione di resistenza.

La naturale prosecuzione di questo lavoro di tesi prevede dunque di operare il controllo di scia in svariati regimi di moto e di avvalersi di algoritmi basati sull'intelligenza artificiale per definire una condizione di ottimo.

Se si volesse ulteriormente perfezionare il getto al fine di ottenere un controllo di scia più efficace si potrebbero valutare modifiche strutturali o variazioni della configurazione del diffusore così da distribuire più uniformemente la quantità di moto in uscita ed eliminare le imperfezioni riscontrate nello studio di questa configurazione. Definito un setup soddisfacente bisogna poi fare un bilancio energetico tra la potenza risparmiata grazie alla riduzione di resistenza e la potenza necessaria per azionare i getti, e valutare di conseguenza se questo tipo di impianto possa produrre un effetto utile significativo.

Nel caso in cui si desideri investigare ulteriormente il campo di moto si potrebbe pensare ad una misurazione di tipo PIV operata in situ che potrebbe fornire maggiori informazioni sui getti.

La particle image velocimetry potrebbe produrre risultati interessanti se operata a galleria spenta ma fornirebbe informazioni completamente inedite circa l'interazione tra il flusso e i getti se operata a galleria in funzione.

# Bibliografia

- [1] Guillaume Bonnavion e Olivier Cadot. «Unstable wake dynamics of rectangular flat-backed bluff bodies with inclination and ground proximity». In: *Journal of Fluid Mechanics* 854 (2018), pp. 196–232 (cit. alle pp. 3, 4).
- [2] Daniele Grassucci. «Studio di pressione e velocità in un getto libero con wavelet e linear stochastic estimation». In: (2013) (cit. a p. 6).
- [3] Lorenzo Barbera. «Caratterizzazione di un getto attuatore= Characterization of an actuator jet». Tesi di dott. Politecnico di Torino, 2023 (cit. alle pp. 6, 25).
- [4] Enrico Amico, Domenico Di Bari, Gioacchino Cafiero e Gaetano Iuso. «Genetic algorithm-based control of the wake of a bluff body». In: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2293. 1. IOP Publishing. 2022, p. 012016 (cit. a p. 7).
- [5] Diogo Barros, Jacques Borée, Bernd R Noack, Andreas Spohn e Tony Ruiz. «Bluff body drag manipulation using pulsed jets and Coanda effect». In: *Journal of Fluid Mechanics* 805 (2016), pp. 422–459.
- [6] Enrico Amico, Gioacchino Cafiero e Gaetano Iuso. «Deep reinforcement learning for active control of a three-dimensional bluff body wake». In: *Physics of Fluids* 34.10 (2022).
- [7] M Grandemange, M Gohlke e O Cadot. «Bi-stability in the turbulent wake past parallelepiped bodies with various aspect ratios and wall effects». In: *Physics of Fluids* 25.9 (2013).
- [8] Nallamuthu Rajaratnam. *Turbulent jets*. Elsevier, 1976.
- [9] S Aydore e PJ Disimile. «Natural coherent structure dynamics in near field of fully turbulent axisymmetric jet». In: *AIAA journal* 35.7 (1997), pp. 1171–1178.
- [10] Enrico Amico. «Controllo della scia di corpi tozzi mediante Reinforcement Learning= Active flow Control of a bluff body wake by Reinforcement Learning». Tesi di dott. Politecnico di Torino, 2021.