POLITECNICO DI TORINO



Caratterizzazione di getti piani per il controllo della scia di corpi tozzi

Relatori

Prof. Gaetano IUSO

Ing. Enrico AMICO

Candidato

Davide FORLEO

Aprile 2023

Sommario

L'obiettivo di questa tesi è quello di caratterizzare il getto piano uscente da un attuatore che sarà utilizzato per il controllo della scia dei corpi tozzi. Verranno analizzati due tipi di attuatori che presentano una diversa geometria interna. Nella prima parte verrà eseguita una caratterizzazione sperimentale tramite l'utilizzo della tecnica standard PIV. Invece, nella seconda parte si utilizza un software cfd open source per avere una convalida dei risultati ottenuti e capire come si comporta il flusso all'interno dell'attuatore.

Indice

1	Teo	ria del getto piano	1
	1.1	Getti stazionari	1
		1.1.1 Getto piano	1
2	Par	ticle Image Velocimetry	8
	2.1	La tecnica PIV	8
	2.2	Principi della tecnica PIV standard	9
		2.2.1 Sorgente laser e ottiche	11
		2.2.2 Telecamera	13
		2.2.3 Acquisizione delle immagini	14
		2.2.4 Post-processing delle immagini	14
3	Car	atterizzazione del getto	18
	3.1	Set up sperimentale	18
	3.2	Misure dei campi di velocità	22
	3.3	Risultati	25
		3.3.1 Caso 1	25
		3.3.2 Caso 2	35
		3.3.3 Caso 3	37
		3.3.4 Caso 4	45
4	Sim	ulazione numerica	48
	4.1	Equazioni di Navier-Stokes	48
	4.2	Geometria dell'attuatore	50
	4.3	Generazione della mesh	51
	4.4	Condizioni al contorno e inizializzazione della soluzione	52
	4.5	Risultati	53
		4.5.1 Caso 1	53
		4.5.2 Caso 2	55
5	Con	nclusione e sviluppi futuri	57

Elenco delle figure	58
Bibliografia	62

Capitolo 1 Teoria del getto piano

Si definisce getto sommerso quel campo di moto che si genera a valle di un orifizio con geometria qualsiasi in seguito all'espulsione di una portata di fluido in una regione in cui si ha flusso fermo $V_{amb} = 0$ ad una certa pressione uniforme P_{amb} . Un getto si origina quando una portata di fluido esce da un orifizio, se quest'ultimo possiede una geometria rettangolare, il getto è detto bidimensionale o piano (questo è vero per dimensioni di $\frac{b}{h} >> 1$) invece, se la geometria del foro di uscita è circolare avremo un flusso assialsimmetrico. La portata di fluido che fuoriesce dall'orifizio viene assicurata da un serbatoio mantenuto in pressione a valle del quale un sistema di valvole ne regola la portata. Solitamente il getto funziona a portata G costante e in tal caso viene detto getto continuo. Oltre al getto continuo sono presenti anche altre tipologie di getti a seconda delle modalità di emissione della portata nel tempo e delle caratteristiche geometriche. Potremmo avere un getto intermittente, caratterizzato da una portata in media non nulla, ma con variazioni di portata nel tempo, avremo una G = G(t). Se, invece, presentano una portata in media nulla, prendono il nome di getti sintetici. La portata di questi getti è costituita da due semiperiodi che si ripetono nel tempo. Nel primo semiperiodo viene emessa portata al di fuori dell'orifizio, mentre, nel secondo semiperiodo si ha un richiamo di portata.

1.1 Getti stazionari

1.1.1 Getto piano

Il getto è un flusso fondamentale e la stragrande maggioranza di essi è turbolenta, a meno che non si lavora su scale microscopiche dove i numeri di Reynolds sono dell'ordine delle centinaia. I getti piani presentano quattro regioni ben distinte che sono contenute all'interno di due macroregioni come evidenziato in figura 1.1. Queste regioni sono:



Figura 1.1: Regioni tipiche di un getto libero [1]

- regione di sviluppo
 - cuore potenziale, il getto mantiene un profilo costante di velocità su una sezione decrescente fino ad annullarsi. Non sono presenti i fenomeni viscosi per cui il profilo di velocità è costante e pertanto il flusso è irrotazionale, inviscido e ammette potenziale.
 - regione di mixing, in questa zona il profilo di velocità costante nei pressi dell'asse del getto deve raccordarsi con il flusso esterno in quiete.
- regione flusso consolidato
 - regione di transizione, zona di raccordo dei profili di velocità tra la regione precedente e quella self similare.
 - regione self similare, il getto evolve rallentando e allargandosi. Peculiarità della regione autosimilare è che i profili di velocità, pur variando in termini assoluti, sono costanti in termini dimensionali utilizzando accuarate normalizzazioni.

Regione di sviluppo del flusso

In prossimità dell'apertura dell'ugello, si forma una zona di mixing e si verifica uno scambio turbolento. La zona di mixing cresce in larghezza nella direzione a valle del getto, lasciando un nucleo potenziale in cui le proprietà del fluido e la velocità sono relativamente costanti. Alla fine, il nucleo viene dissipato come risultato dell'azione del taglio presente nella zona di mixing. Secondo Schlichting [2], utilizzando il sistema di riferimento presente in figura 1.1, la semilarghezza dell'apertura del getto, evidenziata da b è direttamente proporzionale alla distanza lungo la linea

mediana del getto, per cui b è costante all'aumentare di x. La portata volumetrica Q attraverso sezioni normali successive può essere scritta come:

$$Q(x) = \int_0^\infty u dA$$

Poiché Q varia con la distanza longitudinale x, il suo rapporto la portata volumica in uscita dall'ugello si può scrivere come:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\int_0^\infty u dA}{U_0 A_0}$$

dove A_0 è l'area di uscita dell'ugello e U_0 è la velocità di uscita. Inoltre, dal momento che il flusso di quantità di moto J può essere espresso come:

$$\frac{J}{J_0} = \frac{\int_0^\infty u^2 dA}{U_0^2 A_0}$$

Inoltre, è possibile definire il flusso di energia E nel seguente modo:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\int_0^\infty u^3 dA}{U_0^3 A_0}$$

All'interno della zona di mixing sono presenti sforzi di taglio per cui i profili di velocità devono raccordarsi con l'aria esterna in quiete. Il flusso di quantità di moto deve essere costante in ogni sezione normale, per cui:

$$\frac{J}{J_0} = \frac{\int_0^\infty u^2 dA}{U_0^2 A_0} = 1 \tag{1.1}$$

Se l'azione viscosa non ha alcuna influenza, il flusso medio dovrebbe essere dinamicamente simile in tutte le condizioni. Pertanto, un profilo di velocità simile deve caratterizzare ogni sezione della regione di diffusione. Di fatto, i dati sperimentali seguono l'andamento generale della distribuzione gaussiana:

$$\frac{U}{U_m} = exp(\frac{-y^2}{2\sigma^2}) \tag{1.2}$$

dove y è la distanza trasversale dall'asse del getto e σ è la deviazione standard, valore della distanza y per il quale $U = 0.606U_m$ e U_m è la velocità sull'asse. La condizione di similarità dinamica richiede che in tutte le sezioni trasversali, indipendentemente dalla velocità di fuoriuscita del flusso valga la relazione:

$$\frac{\sigma}{x} = K \tag{1.3}$$

Utilizzando le equazioni 1.2 e 1.3 nella valutazione dell'equazione 1.1 si ottiene un'espressione che mette in relazione la velocità media di uscita dall'ugello alla velocità assiale in qualsiasi punto a valle del nucleo potenziale, che conduce al risultato:

$$\frac{J}{J_0} = \frac{U_m^2 K^2 x^2 \pi}{U_0^2 A_0} = 1 \tag{1.4}$$

Questa equazione può quindi essere valutata nel punto in cui termina la regione del nucleo potenziale, per cui si ottiene:

$$\frac{x_c}{B} = \frac{1}{\sqrt{\pi}K_1} \tag{1.5}$$

dove il termine x_c indica la lunghezza del cuore potenziale e K_1 è una costante determinata sperimentalmente che dipende dal tipo di diffusore e dal numero di Re. Il confine interno della regione di diffusione soddisfa l'equazione:

$$\frac{B}{B_0} = 1 - \frac{\sqrt{\pi}K_1 x}{B_0} \tag{1.6}$$

dove B_0 è la larghezza dell'apertura rettangolare, e B è la larghezza del cuore potenziale alla distanza x. Unendo le equazioni 1.2, 1.3 e 1.6, si ottiene la distribuzione di velocità nella zona di diffusione:

$$\frac{U}{U_0} = exp\left[-\frac{\left(y - \frac{\sqrt{\pi K_1 x}}{2} - \frac{B_0}{2}\right)^2}{2(Kx)^2}\right]$$
(1.7)

Lunghezza cuore potenziale

La lunghezza del cuore potenziale per un getto a fessura rettangolare è stata studiata da Albertson supponendo che il profilo di velocità abbia la forma di una curva gaussiana. In questo modo è possibile descrivere i profili utilizzando la seguente legge matematica:

$$\frac{U}{U_m} = f(\xi) = \exp(-\frac{\xi^2}{2C_1^2})$$

dove $\xi = \frac{y}{x}$. Attraverso l'utilizzo di questa descrizione dei profili di velocità, si è ricavato che la lunghezza del cuore potenziale L_0 è pari a:

$$L_0 = \frac{B_0}{I_2}$$

dove I_2 è una costante che può essere determinata una volta che C_1 è nota. Da esperimenti Albertson [3] trova un valore di $C_1 = 0.109$ e di $I_2 = 0.272$ per cui ricava che la lunghezza del cuore potenziale è

$$L_0 = 5,2B_0$$

Regione di flusso consolidato

Fuori dal cuore potenziale il decadimento della velocità sull'asse è descritto dall'equazione:

$$\frac{U_m}{U_0} = \sqrt{C} \left(\frac{x}{B_0}\right)^{\frac{-1}{2}} \tag{1.8}$$

dove C è una costante determinata in modo sperimentale. Secondo Goertler questa costante risulta essere C = 2.43, mentre Tollmein trova C = 2.51 [4]. Secondo Schlichting [2], i problemi di flussi liberi turbolenti sono di natura di strato limite e possono essere studiati con l'aiuto di equazioni di tipo strato limite. Per il caso bidimensionale è possibile introdurre le seguenti semplificazioni: w = 0, quindi anche i termini che possiedono $\frac{\partial}{\partial z}$. Inoltre, considerando il flusso in stato stazionario risultano nulli i termini $\frac{\partial u}{\partial t} e \frac{\partial v}{\partial t}$. Attraverso queste semplificazioni si ottengono le seguenti equazioni:

$$\mathbf{U}\frac{\partial U}{\partial x} + \mathbf{V}\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau}{\partial y} \tag{1.9}$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} = 0 \tag{1.10}$$

dove τ denota lo sforzo di taglio turbolento e dove il gradiente di pressione assiale è stato abbandonato perchè in prima approssimazione lo si considera costante. Per ottenere la distribuzione di velocità da queste equazioni, è necessario esprimere τ in termini di parametri del flusso principale. Ciò può essere fatto utilizzando l'equazione della seconda ipotesi di Prandtl:

$$\tau = \rho \epsilon \frac{\partial U}{\partial y} \tag{1.11}$$

dove ϵ è la costante cinematica virtuale che viene assunta costante, essa vale:

$$\epsilon = 0.0256 U_{y_{1/2}}$$

e $y_{1/2}$ è il valore di y per cui $U = 0.5U_m$. Dalla risoluzione del sistema di equazioni dato dalla 1.9, 1.10 e 1.11, si ottiene la soluzione di Goertler:

$$\frac{U}{U_m} = (1 - tanh^2\eta) \tag{1.12}$$

$$U = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{K\lambda}{x}} (1 - tanh^2 \eta) \tag{1.13}$$

$$V = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{K}{\lambda x}} [2\eta (1 - tanh^2 \eta) - tanh\eta]$$
(1.14)

dove K è la costante di flusso di quantità di moto cinematico definita come $K = \frac{J}{\rho}$, λ è una costante empirica ottenuta da Reichardt e vale 7,67 ed η è definito come segue:

$$\eta = \frac{\lambda y}{x}$$

In figura 1.2 viene mostrata la soluzione di Goertler rispetto a prove sperimentali effettuate a differenti distante x.



Figura 1.2: Soluzione di Goertler rispetto a prove sperimentali effettuate a differenti distanze assiali [3]

Turbolenza sull'asse del getto

Heskestad [1], dalle sue misurazioni, ha suggerito che la turbolenza è completamente sviluppata per x/B_0 , maggiore di circa 130. Per x/B_0 maggiore di circa 40, la turbolenza relativa sull'asse aumenta linearmente con la distanza assiale. Questo comportamento è visibile dalla figura 1.3 in cui si mostra la velocità media turbolenta u'^2 normalizzata con la velocità sull'asse:

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{U_m}$$



Figura 1.3: Andamento sull'asse del getto della root mean square della vlocità in direzione streamwise normalizzata [1]

Capitolo 2 Particle Image Velocimetry

2.1 La tecnica PIV

La tecnica PIV (Particle Image Velocimetry) si è sviluppata a partire dagli anni 70 fino a divenatare oggi una tecnica fondamentale per le analisi di campi di moto nell'aerodinamica sperimantale. Grazie alllo sviluppo tecnologico la tecnica PIV ha avuto dei grandi miglioramenti, infatti, si è passato dall'uso delle vecchie telecamere a pellicola a quelle digitali, i laser di oggi hanno una maggior potenza e sono meno costosi e la maggior potenza di calcolo dei computer permette di velocizzare la fase di post-processing. Questa tecnica permette di caratterizzare la velocità dei fluidi in modo non intrusivo, tuttavia rimane difficile utilizzarla per l'indagine di spazi chiusi o compatti, poichè bisogna avere un accesso ottico all'area di interesse per poter illuminare e visualizzare le particelle. Esistono diversi tipi di tecnica PIV che sono:

- Standard PIV: si utilizza una telecamera e si riescono a misurare due componenti del campo di velocità; di conseguenza si avrà la velocità in un piano che seziona il campo di moto. Questa tecnica verrà descritta approfonditamente in seguito.
- Stereoscopic PIV: per questa tecnica si necessitano due o più telecamere grazie alle quali si possono misurare le tre componenti del vettore velocità in un piano. Si utilizza quindi un fascio laser che illumina un piano all'interno del campo di moto da studiare. Si posizionano due telecamere rispettando la condizione di Schempflug, ovvero i due piani di ricezione delle telecamere si devono intersecare su un punto che appartiene al piano dell'oggetto. Le due telecamere saranno quindi poste con un certo angolo relativo fra loro che deve essere noto e proprio grazie a quest'angolo si ricaverà la terza componente di velocità combinando le procedure della Standard PIV alle due fotocamere che

vedranno valori di velocità diversi qualora esistesse una terza componente di velocità diversa da zero.

• Tomographic PIV: si utilizzano più di due telecamere per conoscere le tre componenti di velocità in un volume di controllo, si scannerizza il campo di moto ricostruendo il volume da numerose sezioni planari.

2.2 Principi della tecnica PIV standard

Per realizzare la tecnica standard PIV sono necessari i seguenti componenti che sono riassunti nella figura 2.1:

- Laser con relativo sistema di ottiche
- Telecamera
- Particelle tracciantifondamentali per riflettere la luce del laser ed essere quindi fotografate dalla fotocamera. Solitamente si utilizzano oli polimerici che vengono scaldati con una resistenza per essere nebulizzati. Le particelle devono ovviamente rispettare le caratteristiche del flusso senza perturbarlo, di conseguenza si cerca di mantenere quanto più piccolo possibile il numero di Stokes:

$$St = \frac{t_p}{t_0} \ll 1 \tag{2.1}$$

Dove t_p è il particle relaxation time:

$$t_p = \frac{d_p^2 \rho_p}{\mu_{flow}} \tag{2.2}$$

E t_0 è il tempo tipico del flusso, ad esempio il tempo di convezione naturale.

Il laser illuminerà un piano nel flusso che si vuole studiare mediante un sistema di lenti. La telecamera sarà posizionata perpendicolarmente al piano di luce ad una distanza adeguata. Ad ogni impulso laser la telecamera acquisirà un'immagine, tra due immagini, passerà un tempo δt . Per ogni coppia di immagini si possono individuare tutte le particelle illuminate ai tempi t e t' eccetto quelle che escono dal campo visivo della telecamera. Grazie ad un algoritmo di cross correlazione è possibile stimare lo spostamento delle particelle tra i due istanti t e t' di ogni impulso laser. Avendo precedentemente eseguito la calibrazione (che permette di conoscere esattamente la correlazione tra distanza nella foto in pixel e la distanza



Figura 2.1: Schema struttura e componenti tecnica PIV [5]

reale dei punti) è possibile risalire ad uno spostamento infinitesimo della particella δs da cui si ricava la velocità:

$$\bar{V_p} = \frac{\bar{\delta s}}{t' - t} = u\bar{i} + v\bar{j} \tag{2.3}$$

Ovviamente il lavoro di correlazione tra le coppie di immagini viene fatto per ognuna delle N_s immagini raccolte. Questo lavoro di post processing dei dati è fatto da un software apposito che lavora sulle immagini raccolte e salvate solitamente nella RAM del computer in acquisizione. Per passare dallo spazio misurato nelle immagini Δs nel tempo $\delta t = t - t'$ allo spazio reale fisico δs tra le due particelle si utilizza il fattore di magnificazione M_0 :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{M_0}{\delta t} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$$
(2.4)

Il tempo t' - t deve essere scelto in funzione del campo di moto in fase di analisi: si cerca di ottenere distanze nell'immagine ΔS tra le particelle tracciate di una decina di pixel. Risulta quindi fondamentale avere una stima di quali velocità si andranno a registrare nel flusso in esame. Dato che i vettori velocità istantanei sono calcolati con un rapporto tra posizioni a tempi diversi, minimizzare la distanza temporale equivale ad aumentare la precisione della misura e quindi minimizzare gli errori. Ovviamente, diminuendo il tempo tra due acquisizioni aumenta il numero di campioni e quindi la mole di dati a parità di tempo totale di acquisizione. Il tempo di acquisizione totale deve essere sufficiente per catturare tutti quei fenomeni dinamici del campo di moto. I vantaggi di questa tecnica rispetto alle altre tecniche che misurano il campo di moto sono:

- Misura di velocità indiretta Con l'utilizzo di questa tecnica la velocità del fluido viene misurata indirettamente, in quanto, non si utilizzano strumenti di misurazioni che riescono a valutare direttamente il moto del fluido, ma si misura la velocità delle particelle traccianti che sono state inserite nel fluido. Per questo motivo è necessario che le particelle rispettino le condizioni citate prima.
- Misura a pieno campo La tecnica PIV è l'unica tecnica che permette di risalire al campo di moto del fluido senza l'utilizzo di misure putiformi, infatti con essa è molto rapido ricostruire velocemente l'intero campo. Le informazioni sul campo di velocità sono memorizzate all'istante di misurazione, quindi si ottengono informazioni istantanee che possono essere mediate per ottenere il moto medio.
- Risoluzione temporale La tecnica PIV nelle sue prime forme consentiva di acquisire immagini a bassa frequenza (frame rate) dell'ordine di 5~10*Hz*. Questa infatti è la grande limitazine della tecnica PIV. Tuttavia, esiste anche una tecnica PIV che presenta una buona risoluzione temporale, con essa è possibile campionare le immagini fino a qualche migliaio di Hertz, per questo prende il nome di PIV Time Risolved.
- Risoluzione spaziale La tecnica PIV è caratterizzata da una elevata risoluzione spaziale. Infatti, in relazione alle dimensioni del campo fisico ripreso il numero di vettori misurati per unità di superficie risulta essere molto elevato e tale da rendere la misura tendente al puntiforme. Questo consente di descrivere il campo di moto dettagliatamente nello spazio, evidenziando le regioni caratterizzate da elevati gradienti di velocità.

2.2.1 Sorgente laser e ottiche

Il laser è uno strumento utilizzato nelle tecniche PIV per la sua capacità di emettere luce monocromatica, coerente e con una grande densità di energia. Inoltre, attraverso l'uso di specifiche lenti è facile creare un sottile piano di luce necessario ad illuminare le particelle traccianti senza aberrazioni cromatiche. Generalmente un laser è composto da tre elementi principali:

- il materiale attivo, costituito da gas atomico o molecolare, da un semiconduttore o da un materiale solido.
- il sistema di pompaggio, ha lo scopo di eccitare il materiale attivo fornendogli energia chimica o elettromagnetica.
- il risonatore ottico, parte formata da una serie di specchi, ha la funzione di amplificare la radiazione emessa dal materiale attivo.

I laser più diffusi nelle misurazioni con tecnica PIV sono quelli a stato solido come il laser a Nd:YAG che sfrutta come mezzo materiale attivo un cristallo di granato di ittrio e alluminio drogato al neodimio.



Figura 2.2: Disposizione lenti per creazione di un piano di luce monocromatica [6]

Il vantaggio di utilizzare un laser per misurazioni con tecnica PIV risiede nella sua capacità di creare un raggio di luce monocromatica. Si sceglie di utilizzare una luce monocromatica per beneficiare della sua facilità di collimare il fascio. Le variabili da controllare nella generazione del fascio di luce in relazione alla posizione del laser rispetto al setup sperimentale sono il suo angolo di diffusione e il suo spessore, ovvero la "vita del fascio". Esistono molti modi per ottenere un controllo adeguato che includono una varietà di combinazioni di lenti cilindriche e/o sferiche. Per la creazione di un piano di luce è necessario utilizzare una lente cilindrica. Nel caso in cui si utilizzino laser ad alta intensità come i laser ad Nd:YAG, la sola lente cilindrica divergente non basta per creare un piano di luce sottile e diventa necessario l'utilizzo di un'altra lente che focalizzi la luce allo spessore desiderato. Una configurazione tipica che impiega 3 lenti cilindriche, è illustrata nella figura 2.2 [6]. In questo esempio, la prima lente è una lente cilindrica divergente che viene utilizzata per diffondere il raggio in un foglio. La seconda e la terza lente vengono utilizzate per controllare la posizione della vita del raggio. Si utilizzano una lente convergente e divergente, entrambe ruotate di 90 gradi rispetto alla prima lente. Variando la distanza tra la seconda e la terza lente sarà possibile regolare la posizione della vita del raggio.

2.2.2 Telecamera

La telecamera deve risultare perpendicolare al piano illuminato e riprende le "immagini PIV" su cui sono riportate le tracce delle particelle illuminate e riflettenti. Per una misura accurata è necessario che la luce di fondo del laboratorio sia ridotta al minimo per non inquinare come "rumore di fondo" l'intensità luminosa emessa dalle particelle quando sono illuminate. A tal fine si rende necessario schermare con un telo tutta la zona interessata dall'esperimento in modo da effettuare le riprese al buio. Le "immagini PIV" così riprese si presentano con fondo nero e una grande moltitudine di punti bianchi derivanti dalla luce riflessa dalle particelle. La telecamera deve essere corredata da una opportuna ottica per riprendere un campo fisico più o meno ampio. Si possono utilizzare due tipi di telecamere e sono:

- Telecamera CCD (charge-coupled device)
 - In questa telecamera il CCD viene disposto in corrispondenza del punto focale. Esso è costituito da centinaia di migliaia di unità che suddividono l'intera immagine in una griglia ordinata a cui si attribuisce una coordinata verticale ed orizzontale. Queste unità prendono il nome di pixel. Ogni pixel è in grado di reagire alla luce che lo investe immagazzinando una certa carica elettrica, in questo modo è possibile risalire alla quantità di luce che ha investito i diversi pixel ed è possibile ricostruire l'immagine.
- Telecamera CMOS (complementary metal-oxide semiconductor)
- La differenza fondamentale fra un sensore CCD e un sensore CMOS sta nel modo in cui vengono lette la cariche dei singoli pixel.In un sensore CMOS ogni pixel viene dotato di una propria uscita individuale per fornire un segnale video direttamente di tipo digitale. In generale, questi tipi di telecamere sono più costose e presentano una risoluzione maggiore rispetto alle telecamere CCD.

Le caratteristiche principali delle telecamere sono:

• la risoluzione spaziale, ovvero il numero di pixels mediante i quali viene descritta l'immagine ripresa. Ogni pixel è un elemento della matrice che forma l'immagine sul piano di ripresa della telecamera. Maggiore è il numero di pixels e maggiore sarà la qualità dell'immagine ripresa in termini di risoluzione nella descrizione dei dettagli del campo.

- la densità di pixel, parametro importante che caratterizza l'immagine ripresa digitalmente è la quantità pixels per millimetro ripreso e descrive la corrispondenza tra l'immagine digitalizzata e l'immagine reale. Più elevata è questa quantità e meglio descritta è l'immagine ripresa.
- intensità luminosa, ognuno di questi pixel è caratterizzato a sua volta da un livello discreto di intensità luminosa descritto in termini di livello di grigio. Questa proprietà del sensore della telecamera, definita dalla sua capacità a discretizzare i livelli di grigio presenti nell'immagine reale in un certo numero di livelli discreti nell'immagine acquisita. La risoluzione è individuata dal numero di bit, che esprimono il numero di livelli di grigio, in termini di potenze di due, attraverso il quale è possibile descrivere l'immagine reale.

2.2.3 Acquisizione delle immagini

La sorgente laser emette impulsi in moto intermittente e ad intervalli di tempo regolari, per questo è stata sviluppata la tecnica del Q-switch. Questa tecnica permette di ottenere un'emissione di radiazione laser pulasata con durata temporale degli impulsi molto breve, dell'ordine di nanosecodi, e con elevata energia.

La telecamera deve riprendere le immagini esattamente negli stessi istanti in cui il campo è illuminato. Questa simultaneità è resa possibile dalla presenza nella catena di misura di un sistema di sincronismo tra sorgente laser e telecamera.

[7] Il primo impulso laser espone il primo frame, che viene trasferito dalle celle fotosensibili alle celle di memoria immediatamente dopo l'impulso laser. Il secondo impulso laser viene quindi sparato per esporre il secondo frame, questo viene mostrato in figura 2.3. Le celle di memoria ora contengono la prima immagine con informazioni sulle posizioni iniziali delle particelle seminatrici e la seconda, contenente informazioni sulle posizioni finali delle particelle seminatrici. Utilizzando un frame grabber, queste due immagini vengono quindi trasferiti in sequenza dalla fotocamera alla memoria RAM del computer o al suo disco rigido. Questa tecnica di acquisizione delle immagini si ripete per tutto il tempo di acquisizione. Una volta terminata l'acquisizione sarà necessario processare queste coppie di immagini al fine di ottenere il campo di moto.

2.2.4 Post-processing delle immagini

L'analisi delle immagini PIV suddivide l'intero dominio dell'immagine in sottodomini in cui verrà calcolato per ciascuno di essi lo spostamento medio delle particelle presenti. Inizialmente avremo l'immagine completa formata da N*M pixel che verrà suddivisa in porzioni più piccole che prendono il nome di finiestre di interrogazione. Si assume di avere a disposizione una coppia di immagini contenenti le particelle registrate da un fascio di luce con metodo PIV tradizionale. In questomodo, la



Figura 2.3: Diagramma che mostra l'impulso laser asincrono in relazione al frame rate della telecamera [7]

seconda immagine è stata scattata dopo un breve intervallo di tempo δt nel quale le particelle si sono spostate insieme al fluido. É possibile considerare la prima immagine I come l'ingresso di un sistema, mentre la seconda immagine I' rappresenta l'uscita dal sistema. Per ottenere dalla prima immagine la seconda, bisogna applicare una funzione di trasferimento. Questa funzione di trasferimento è formata da una traslazione d, che rappresenta lo spostamento delle particelle, e all'aggiunta del rumore di fondo N, dovuto alla tridimensionalità del flusso e al rumore di registrazione. Si vuole ricercare la funzione di spostamento d. Possedendo un rumore di fondo non trascurabile, è preferibile ricercare d mettendo in similitudine le due immagini, non con un approccio analitico, ma statistico. Questo metodo diretto utilizza la funzione di cross-correlazione:

$$R_{II}(x,y) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} I(i,j) I'(i+x,j+y)$$
(2.5)

É neccessario calcolare la funzione di cross-correlazione per ogni finestra di interrogazione con cui abbiamo diviso l'intera immagine. Il valore dello spostamento d da ricercare equivale allo spostamento per cui le particelle delle immagini si sovrappongono. Ovvero, il valore di d, per cui se trasliamo l'immagine I e la accavvalliamo all'immaggine I' avremo che le particelle illuminate coincidano. É proprio in questo caso che la somma dei prodotti delle intensità, e quindi, la funzione di correlazione avrà valori maggiori, questo processo è illustarto in figura 2.4.

Questa è una tecnica molto onerosa in termini di tempi di calcolo, perchè il numero di operazioni necessarie alla determinazione della funzione di correlazione è N^4 . Per questo motivo è stato introdotto un metodo indiretto più efficiente basato su algoritmi FFT in modo da ridurre il numero di operazioni a $N^2 log_2 N$. Utilizzando questi algoritmi è possibile calcolare la funzione di cross-correlazione



Figura 2.4: Modello di elaborazione per la valutazione dello spostamento tramite cross-correlazione [8]

con una moltiplicazione tra complessi coniugati nel dominio di Fourier:

$$R_{II}(x,y) = \hat{I}\hat{I}' \tag{2.6}$$

in cui $\hat{I} \in \hat{I'}$ sono le trasformate di Fourier delle funzioni I ed I'. Per cui il calcolo della funzione di cross-correlazione può essere ottenuta attraverso il calcolo di due trasformate di Fourier, effettuando il prdotto complesso coniugato dei coefficienti di Fourier ottenuti.



Figura 2.5: Procedura di elaborazione per la cross-correlazione tramite algoritmi FFT [9]

É possibile ridurre ancora il numero di operazioni da compiere sfruttando le proprietà di simmetria della trasformata di Fourier, essendo essa una funzione hermitiana, il numero di operazioni da compiere si dimezza. Questo processo viene descritto nella figura 2.5, in (a) si ha il campionamento di una finestra di interrogazione per le coppie di immagini sequenziali. In (b) viene eseguita una procedura di correlazione incrociata, in questo caso viene mostrata un'implementazione FFT. In (c) all'interno del dominio di correlazione incrociata, viene identificata la posizione del picco corrispondente allo spostamento medio delle particelle all'interno delle finestre di interrogazione e infine in (d) questo spostamento viene convertito nello spazio fisico, fornendo un vettore velocità. Per una finestra di interrogazione d'esempio di 64^2 pixel, la funzione di correlazione risultante è fornita nella figura 2.6. Da questa funzione bidimensionale il valore massimo corrisponde allo spostamento bidimensionale delle particelle nell'area di interrogazione.



Figura 2.6: Risultato funzione di cross-correlazione per una finestra di interrogazione di 64^2 pixel [10]

Capitolo 3

Caratterizzazione del getto

3.1 Set up sperimentale

Il set up sperimentale è costituito dai seguenti elementi:

- Serbatoio di aria compressa serbatoio contenente l'aria compressa che viene inviata all'attuatore.
- Flussimetro SD 8000 necessario per conoscere la portata in ingresso nell'attuatore. [11] Calcola la portata volumica con unità di misura $[m^3/h]$ che è possibile acquisire in modo analogico tramite corrente. La corrente può variare da 4mA a 20mA, per un range di portata che va da 0 a $56,3m^3/h$.
- Elettrovalvola Camozzi LRWD elettrovalvola necessaria a modulare il flusso in entrata nell'attuatore, in questo modo è possibile modulare la portata in ingresso con segnali ondulatori, tra cui onde quadre, onde sinuisoidali e onde triangolari. [12] Questa elettrovalvola viene controllata attraverso il software Lab View e presenta un fondo scala di 10 V. Nella figura 3.1 viene rappresentato lo schema di funzionamento. L'elettrovalvola è costituita da un ingresso in cui mandare il segnale in input indicato con il numero 2 e due uscite rappresentate nel grafico dai numeri 1 e 3. Con segnale di riferimento superiore al 50% del F.S., la connessione 1 viene messa in collegamento con la connessione 2. Quindi vi è passaggio d'aria tra queste due porte pneumatiche, mentre se il segnale di riferimento è inferiore al 50% del F.S., la servovalvola mette in collegamento la connessione 2 con la connessione 3. Con un segnale di riferimento pari al 50% del F.S, le connessioni 1, 2 e 3 risultano essere chiuse e quindi non vi è passaggio d'aria tra le porte pneumatiche. Per i nostri esperimenti, utilizzeremo segnali di riferimento superiori al 50% del F.S. perchè, per come sono state collegate le linee pneumatiche vogliamo che la portata d'aria passi solamente tra le connessioni 1 e 2.



Figura 3.1: Schema di funzionamento dell'elettrovalvola [12]

- Laser ND:YAG e ottiche è un laser a stato solido di classe 4 con durata degli impusi di 4ns ed energia massima emessa di 1200mJ. Il laser è controllato attraverso un telecomando con cui è possibile variare la potenza di attenuazione della luce emessa, viene utilizzato ad una frequenza di 15Hz.
- **Teca** è una teca in plexiglass di dimensioni 100*70*40[cm] che viene utilizzata come camera di prova per lo studio del getto, ha lo scopo di contenere le particelle di seeding.
- **Telecamera** telecamera CCD con obiettivo Canon EF 70-300mm f/4-5.6 IS USM.
- Generatore di seeding serve per generare il seeding da immettere all'interno della teca. Per generarlo si immette dell'aria compressa alla pressione di un bar in modo che il seeding liquido si nebulizzi.
- Supporto attuatore e attuatore stesso si utilizza un supporto regolabile in altezza, in modo da poter disporre l'attuatore nella corretta posizione all'interno dell'immagine della fotocamera. Per sostenere l'attuatore si utilizzano due pezzi di legno con incavi in modo da poterlo sorreggere e mantenere in posizione fissa. Tutta questa struttura è posizionata sopra ad un sistema OSMS serie 26 che permette lo spostamento in direzione z dell'attutore in modo da poterne analizzare diverse sezioni. Si vuole effettuare la caratterizzazione su due tipi di attuatori, che presentano la stessa geometria esterna, mostrata in figura 3.2, ma con differente geometria interna. Nella figura 3.3 è presente la geometria interna dei due attuatori. Gli attuatori prendono una portata di aria compressa tramite un ingresso circolare che esce sotto forma di getto libero attraverso una fessura rettangolare. L'ingresso circolare ha un diametro d pari a 6mm, mentre l'uscita rettangolare ha un'apertura di 91[mm] di lunghezza ed 2.06mm di altezza per il primo attuatore (a), mentre il secondo attuatore (b), l'altezza dell'aperura è di 1mm. Per distinguere i

due attuatori si è deciso di dare all'attuatore raffigurato in 3.3(a) il nome di "new" e per l'attuatore raffigurato in 3.3 (b) il nome di "old".



Figura 3.2: Geometria attuatore



Figura 3.3: Geometria interna dei due attuatori con le rispettive quote, in (a) è mostrata la geometria interna del nuovo attuatore, in (b) la geometria interna del vecchio attuatore

I collegamenti dei vari elementi che costiutiscono il set up sperimentale sono mostrati in figura 3.4, dove le linee di colore blu e rosso rappresentano le linee pneumatiche. Come si può osservare, l'aria compressa contenuta nel sarbatoio finisce in un rubinetto a due vie. Una di queste due vie, quella in blu, passa nel generatore di seeding, mentre l'altra via, quella in rosso, finisce nel flussimetro. Il generatore di seeding ha una linea pneumatica che termina nella teca in plexiglass, in questo modo quando è aperto il rubinetto è possibile riempire la camera di prova di particelle traccianti, invece, il flussimetro è collegato all'elettrovalvola che, a sua volta, è collegata all'attuatore. In questo modo tramite l'elettrovalvola è possibile variare la portata in ingresso all'attuatore. Gli altri elementi sono disposti nella classica configurazione per eseguire esperimenti con tecnica standard PIV.



Figura 3.4: Schema del set up sperimentale





Figura 3.5: Foto set up sperimentale

3.2 Misure dei campi di velocità

Calibrazione elettrovalvola e flussimetro

Per eseguire la caratterizzazione del getto è necessario eseguire in fase preliminare la calibrazione dell'elettrovalvola e del flussimetro che vengono comntrollati tramite il codice LabVIEW mostrato in figura 3.6. Nell'immagine (b) viene mostrato il codice di lettura che permette di acquisire i dati del flussimetro sotto forma di corrente elettrica, mentre in (a) è illustrato il codice di scrittura con cui è possibile modificare il voltaggio dell'elettrovalvola per far variare la portata in ingresso all'attuatore.



Figura 3.6: Codice Labview di scrittura per il controllo dell'elettrovalvola (a) e lettura del flussimetro (b)

Per la calibrazione del flussimetro sono state eseguite prove con portate differenti. La variazione di portata è stata effettuata cambiando il voltaggio dell'elettrovalvola. Nella tabella 3.2 facendo variare il voltaggio da 5 a 10V ad intervalli di 0,5V.

	f [Hz]	t [s]	Numero campioni
parametri di acquisizione	2500	30	75000
	22		



Figura 3.7: Calibrazione flussimetro

Il risultato della calibrazione è riporatao in figura 3.7, in cui si confronta l'andamento teorico preso dal manuale del flussimetro con la retta interpolante i dati sperimentali. Si può vedere come vi è una correlazione lineare tra la portata e la corrente. Inoltre, la retta interpolante i dati sperimentali e quella fornita dal manuale sono molto vicine, nella tabella 3.2 si riportano le eqauzioni delle due rette.

	equazione retta
dati sperimentali	Q=3591.3*I-14.29
retta teorica	Q=3518.7*I-14.075

Un'altra importante valutazione in fase di caratterizzazione del flussimetro è stata quella di valutare la stabilità della portata. In figura 3.8 sono riportate le oscillazioni della portata misurate durante la calibrazione. Nell'immagine (b) si mostra uno zoom per far scorgere le barre orizzonatli in blu che corrispondono alla deviazione standard dei valori di corrente rilevati dal flussimetro rispetto al valor



medio, in questo modo è possibile valutare le oscillazioni della portata.

Figura 3.8: Oscillazioni della portata

Per la calibrazione dell'elettrovalvola, si vuole ricavare una relazione tra il valore del voltaggio inserito nell'elettrovalvola e la variazione di portata in ingresso. Il risultato della calibrazione è riportato in figura 3.9, da cui è facile notare come la risposta non sia lineare e che la maggior variazione di portata avviene nel range $5.5 \div 7.5 V$.



Figura 3.9: Calibrazione elettrovalvola

Effettuata la calibrazione si può procedere con le misure PIV del getto. Si attiva il generatore di seeding per riempire la teca di particelle traccianti, successivamente si accende il laser. Adesso è possibile aprire il rubinetto della portata modificandola attraverso il funzionamento dell'elettrovalvola ed iniziare l'acquisizione delle immagini che saranno elaborate in fase di post-processing per ottenere il campo di moto medio.

3.3 Risultati

All'interno di questa sezione verranno riportati i risultati delle prove sperimentali effettuate per i due differenti attuatori. Nella tabella 3.3 vengono riassunti i casi esaminati per i due attuatori in termini di portata, di tensione utilizzata per l'elettrovalvola, numero di immagini acquisite e dt.

	Attuatore	Tensione $[V]$	Portata $[m^3/h]$	Immagini acquisite	dt $[\mu s]$
Caso 1	new	6	4.6	1000	60
Caso 2	new	7	11.2	1000	30
Caso 3	old	6	4.6	1000	150
Caso 4	old	7	11.2	1000	100

Per ogni attuatore e per ogni valore differente di portata sono state analizzate nove sezioni lungo l'apertura rettangolare di uscita del flusso. In figura 3.12 viene fornita la terna di riferimento utilizzata, le sezioni esaminate sono:

 $z = [-44 \ -33 \ -22 \ -11 \ 0 \ 11 \ 22 \ 33 \ 44][mm]$

3.3.1 Caso 1

• Visualizzazione campi di moto

Dall'analisi delle immagini si ricavano i campi di moto medi che sono raffigurati nell'immagine 3.11, in cui si visualizza la velocità U, velocità in direzione x che caratterizza il campo di moto.

Da questi campi di moto è facile vedere come il getto in uscita lungo le varie sezioni presenti angoli di inclinazionde dell'asse del getto rispetto all'orizzontale α , velocità, e apertura del cono β differenti. Nella figura 3.12 viene mostrato come sono stati misurati questi parametri per la sezione z = 0[mm].

Dove il simbolo + indica i punti lungo x in cui vi è il massimo della velocità, corrispondente quindi all'asse del getto, la retta in bianco è la loro interpolazione da cui verrà calcolato l'angolo α . I o e gli * rapprensentano isolinee



Figura 3.10: Sistema di riferimento

superiore e inferiore che identificano l'apertura del cono del getto, essi sono interpolati dalle rette in nero e in verde. Le isolinee superiori e inferiori sono state calcolate imponendo che la velocità U diventi $U = 0.2U_m$, dove con U_m si intende la velocità sull'asse del getto. Attraverso il calcolo del coefficiente angolare delle rette è possibile individuare gli angoli appena citati. Per cui nel caso di z = 0 mm troviamo:

$$\alpha = 34.3^{\circ}$$
$$\beta = 18.9^{\circ}$$

Nella tabella 3.3.1 vengono riportati gli angoli α e di apertura del cono β per le varie sezioni.

z[mm]	$\alpha[^{\circ}]$	$\beta[^{\circ}]$
-44	14.6	36.2
-33	38	40
-22	33.9	13
-11	33.8	18.8
0	34.3	18.9
11	33.8	19.6
22	34.2	21.8
33	31.3	38.2

Si nota come gli angoli α e β siano costanti se si considerano le sezioni centrali dell'attuatore. Infatti, nel range che va da z = -22 mm a z = 22 mm



Figura 3.11: Campi di moto al variare della sezione lungo z



Figura 3.12: Visualizzazione di come vengono studiati i parametri che caratterizzano il getto

questi angoli subiscono piccole variazioni. Man mano che ci si sposta verso le estremità dell'attuatore si nota come gli angoli α diminuiscono e quindi l'asse del getto si sposat verso l'orizzontale. Mentre, per gli angoli β si ha un andamento inverso, essi aumentano verso le estremità per cui si avrà un allargamento della regione di diffusione del getto.

• Profili di velocità

Per quanto riguarda la visualizzazione della velocità lungo l'asse del getto è conveniente cambiare il sistema di riferimento della figura e posizionarsi lungo l'asse del getto definito dall'angolo α . Per questo motivo, si effettua una rotazione del sistema di riferimento che sarà pari all'angolo α . Si passa dal sistema di riferimento globale ad un nuovo sistema di riferimento, avremo:

$$(x,y) \Longrightarrow (x',y')$$

Questo processo viene mostrato in figura 3.13. All'interno della figura sono presenti anche delle rette perpendicolari individuate da o che indicano la posizione lungo il nuovo sistema di riferimento in cui si andranno a studiare i profili di velocità per individuare le varie zone del getto.

Nella figura 3.14, vengono illustrati i vari profili di velocità lungo il nuovo sistema di riferimento per ogni sezione analizzata.



Figura 3.13: Visualizzazione del nuovo sistema di riferimento (x',y')

Per individuare le varie zone, è necessario utilizzare i profili normalizzati, per cui normalizzeremo nel seguente modo: U/U_m per le velocità e $y'/\delta - y'_{U_m}/\delta$ per la coordinata y'. Dove la variabile δ è stata calcolata nel seguente modo:

$$\delta(x) = \frac{1}{U_m(x)} \int_0^{+\infty} U(x, y) dy$$

mentre il termine y'_{U_m}/δ è lo scostamento tra un picco e l'altro, per cui attraverso la sua sottrazione è possibile allineare tutti i picchi. I profili normalizzati sono raffigurati in figura 3.15. Considerando le sezioni centrali, in cui z è compreso tra +22 mm e -22 mm, è possibile identificare la zona self similare. Si evidenzia che per x'/h > 30 i profili normalizzati coincidano. L'altezza del foro di uscita dell'attuatore è di 2 mm, mentre la sua lunghezza è di 91 mm. Eseguendo il rapporto $\frac{l}{h}$ si ricava un valore maggiore di 10, per cui, possiamo considerare il getto piano. Come evidenziato già dagli angoli β calcolati in precedenza, verso le estremità la larghezza del getto aumenta. In queste sezioni non siamo più in presenza di un getto piano e risulta difficile evidenziare la zona self similare. Questo può essere dovuto agli effetti di estremità che si creano all'interno dell'attuatore e alla presenza di una velocità w in direzione z diversa da zero.



Figura 3.14: Velocità U nel sistema di riferimento ruotato per le varie sezioni e varie distanze di x'

In figura 3.16 si riporta il grafico del valore del δ di normalizzazione per le sezioni lungo z e al variare di x'. É possibile considerare il δ come una variabile che indica la larghezza della sezione trasversale del getto. Infatti, si èuò osservare come esso aumenti sempre, solamente per valori di x' elevati sembrerebbe diminuire. Questa diminuzione è dovuta alla dimensione finita dell'immmagine, che taglia parte della zona di diffusione del getto. I parametri $\delta \in \beta$ sono collegati tra di loro, infatti, entrambi sono costanti nelle sezioni centrali ed aumentano nelle sezioni di estremità.

• Profili sull'asse del getto

Un'altra informazione importante del getto, è l'andamento della U e della V sull'asse del getto. La figura 3.17 illustra il decadimento della velocità U sull'asse per le sezioni che vanno da $z = -44 \, mm$, fino alla sezione $z = 0 \, mm$. É anche presente la curva teorica di decadimento di Goertler citata nel capitolo 1.1.1, per cui la velocità decresce in modo proporzionale ad $x^{-1/2}$. Quello che ci si aspettava da questo grafico è che per x molto prossime allo zero, ovvero, in corrispondenza dell'apertura della fessura, si trovasse una retta orizzontale nel grafico delle U. In questo modo sarebbe stato possibile individuare la lunghezza del cuore potenziale e confrontarla con quella ricavata da Albertson. Tuttavia, la mancanza di particelle traccianti all'interno dell'aria compressa rende quella zona di campo difficile da analizzare. Successivamente alla zona di cuore potenziale possiamo notare che per le sezioni centrali il decadimento della U segue l'andamento teorico ricavato da Goertler.

• Bidimensionalità del getto

Nella figura 3.18 si mostra la variazione della velocità U lungo la componente z per varie posizioni di x'. Si può vedere come in prossimità dell'uscita della sezione rettangolare il getto non è uniforme, ma presenta dei picchi sull'estremità. É possibile considerare il getto uniforme da distanze di x' = 0.06 m. La lunghezza dell'apertura è di 91 mm, mentre il getto risulta essere uniforme all'incirca per 44 mm, per cui avremo che la percentuale di uscita in cui il getto è considerabile uniforme, e quindi in cui è considerabile bidimensionale, è 48.4%.

• Analisi fluttuazioni di velocità

Siccome siamo in un flusso turbolento è importante visualizzare il comportamento delle velocità fluttuanti, in questo caso la componente di maggior importanza è $|\overline{u'v'}|$. La figura 3.19 mostra il comportamento delle velocità fluttuanti rispetto a quello della velocità lungo l'asse in corrispondenza della sezione z = 0mm. I risultati mostrano come in corrispondenza del picco di velocità si ha un minimo, in valore assoluto, delle fluttuazioni, mentre diventano rilevanti verso i bordi dei profili di velocità. Questo perchè la maggior parte



Figura 3.15: Prof
li di velocità normalizzati nel sistema di riferimento ruotato per le varie sezioni lung
o ${\bf z}$



Figura 3.16: Valutazione dello spessore trasversale del getto attraverso il δ



Figura 3.17: Andamento della velocità U_m sull'asse del getto (a) e andamento della velocità U_m/U_0 normalizzata sull'asse del getto (b)

delle fluttuazioni si concentra nella zona in cui l'aria del getto in movimento entra in contatto con l'aria esterna in quiete. Inoltre, è possibile notare, come con l'aumento della coordinata x', oltre che avere un decadimento della veloctà U, si ha anche una diminuzione dell'intensità dei picchi delle fluttuazioni. In figura 3.20 vengono mostrate le fluttuazioni di velocità sull'asse del getto. Le fluttuazioni sull'asse del getto aumentano lungo x', come mostrato anche nel capitolo 1.1.1. Si può vedere come per le sezioni centrali le fluttuazioni aumentano molto di più rispetto alle sezioni d'estremità.



Figura 3.18: Profili di velocità dimensionali lungo l'asse z al variare di x'



Figura 3.19: Visualizzazione delle velocità fluttuanti $|\overline{u'v'}|$ rispetto ad U per la sezione z = 0 mm al variare della coordinata x'



Figura 3.20: Fluttuazioni di velocità $\overline{u'^2}$ (a) e $\overline{v'^2}$ (b) sull'asse del getto

3.3.2 Caso 2

In questo caso la portata è circa tre volte maggiore rispetto al caso in cui l'elettrovalvola ha un voltaggio pari a 6V, e per questo motivo le velocità di uscita dal getto sono molto elevate. Esse sono così grandi che a causa della bassa risoluzione spaziale, dovuta alla mancanza di particelle traccianti inserite all'interno del getto, parte del campo di moto è stato scartato. In figura 3.21, viene mostrato per la sezione z = 0 mm la porzione di campo di moto su cui si sono effettuate le analisi di post-processing.



Figura 3.21: Mappa della distribuzione di velocità media del campo di moto preso in considerazione per z = 0mm

Seguendo il processo di analisi eseguito per il Caso 1 nel paragrafo 3.3.1 si vuole valutare l'angolo dell'asse del getto rispetto all'orizzontale α e l'angolo di apertura del cono del getto β . I risultati per le varie sezioni sono riportati nella tabella 3.3.2

z[mm]	$\alpha[^{\circ}]$	$\beta[^{\circ}]$
-44	14.1	36.
-33	44.5	34.9
-22	35.5	20.3
-11	35.5	22.5
0	35.1	21.6
11	35.6	22.6
22	34.1	20.5
33	38.8	29.3

Anche con l'aumento di portata, si nota che nelle sezioni centrali, per z che va da 22 mm a -22 mm gli angoli $\alpha \in \beta$ rimangono costanti, mentre all'estremità dell'attuatore α diminuisce e β aumenta. In figura 3.22 è stato fatto un confronto tra gli angoli $\alpha \in \beta$ calcolati nel Caso 1 e nel Caso 2. Si nota come l'aumento di portata non generi grandi variazioni dell'angolo α , mentre si ha un aumento dell'angolo β nelle sezioni centrali di z.

Dai profili di velocità disposti in figura 3.23, si nota, come anche le velocità aumentino molto. Nonostante è stata scartata la parte del campo di moto vicino all'attutore, in cui le velocità sono le più alte possibili, si ritrovano valori della velocità U pari a 24 m/s.



Figura 3.22: Confronto degli angoli $\alpha \in \beta$ tra il Caso 1 e il Caso 2

In figura 3.24 si mostrano i profili di velocità normalizzati. In questo caso possiamo affermare di essere all'interno della zona self similare per valori di x'/h >30 per valori di z che vanno da -22 mm a 22 mm. Mentre nelle sezioni esterne il getto non ha più il comportamento di un getto piano. In figura 3.35 sono mostrati i grafici di velocità in direzione z. In questo caso, non avendo a disposizione la parte di campo vicino all'attuatore diventa difficile valutare l'uniformità del getto. Facendo un confronto a parità di distanza con gli stessi grafici per il Caso 1, si nota, che l'aumento di portata renda meno uniforme il getto nelle sezioni più esterne. Infatti, il salto di velocità che si crea è maggiore.

3.3.3 Caso 3

• Visualizzazione campi di moto

Per questo attuatore, vista la sua geometria interna, non diventa più importante valutare le velocità in direzione x. Questo perchè la complessa geometria interna abbinata all'effetto coanda, che è la tendenza di un fluido a seguire una superficie vicina, proietta il flusso verso il basso. Per questo motivo risulta molto più utile effetuare le analisi dei campi di moto sulle V, velocità nella direzione della coordinata di y. Questo effetto è visibile dai campi di moto



Figura 3.23: Velocità U nel sistema di riferimento ruotato per le varie sezioni e varie distanze di x'



Figura 3.24: Prof
fi di velocità normalizzati nel sistema di riferimento ruotato per le varie sezioni lungo z
 e al variare di x'/h\$39\$



Figura 3.25: Profili di velocità sull'asse z al variare di x'

medi presentati in figura 3.26, è facile notare anche come rispetto alle velocità dell'attuatore del capitolo 3.3.1 si hanno velocità molto minori. Le velocità sono inferiori perchè questa geometria presenta maggiori perdite di carico rispetto alla precedente, ma anche perchè il flusso in uscita dal getto, restando attaccato all'attuatore genera lo strato limite, per cui si generano perdite per effetto viscoso.

La complessità di questo attuatore rende difficile lo studio di questo getto. Essendo che il getto ruota sull'attuatore, per identificare l'angolo di inclinazione dell'asse del getto α sono stati presi i punti che formano l'isolinea di velocità massima al di sotto dell'attuatore. Per cui, vista la rapida rotazione del flusso avremo che l'angolo α sarà molto maggiore rispetto all'attuatore precedente. Gli angoli α calcolati sono riportati nella tabella 3.3.3. Dagli angoli illustrati nella tabella è facile evidenziare come solamante nelle sezioni che vanno da z = -11 mm a z = 11 mm, α è contenuto, mentre, se ci si sposta verso le estremità dell'attuatore questo angolo diventa prossimo a 90°. Inoltre dai campi di moto in figura 3.26 è possibile vedere come nelle sezioni di $z = \pm 33 mm$ e $z = \pm 44$ l'area trasversale di diffusione del getto è molto estesa.



Figura 3.26: Caso 3: campi di moto al variare della sezione z

z[mm]	$\alpha[^{\circ}]$
-44	84.1
-33	82.7
-22	77.6
-11	65.5
0	47
11	51.2
22	77.3
33	80.8
44	79.1
11	

• Profili di velocità

Ssfruttando gli angoli α appena calcolati, ruotiamo il sistema di riferimento per andare a valutare la velocità V lungo l'asse per le varie sezioni. In figura





Figura 3.27: Profili di velocità U nel sistema di riferimento ruotato per le varie sezioni

Utilizzando la stessa normalizzazione utilizzata nel capitolo 3.3.1, in figura 3.28 vengono mostrati i profili di velocità normalizzati, per verificare l'esistenza di una zona self similare.

Nonostante sia stata effettuata la normalizzazione dei profili di velocità, non si riesce a riscontrare nessuna zona in cui i profili sembrino essere self similari. In figura 3.29 si riporta l'andamento del δ usato per la normalizzazione dei profili, in questo modo, tramite questo parametro possiamo anche valutare lo spessore tarsversale del getto. Si osserva che nelle sezioni centrali il δ è minore rispetto alle sezioni esterne, ed è un risultato che ci potevamo aspettare dall'osservazione dei campi di moto.

• Profili sull'asse del getto



Figura 3.28: Profili di velocità U normalizzata nel sistema di riferimento ruotato per le varie sezioni

In figura 3.35 sono riportati gli andamenti della velocità U sull'asse del getto. La velocità sull'asse presenta un grande picco che si smorza molto rapidamente dopo appena due centimetri, successivamente si ha una lenta decrescita.

• Bidimensionalità del getto

In figura 3.31, si riportano gli andamenti della velocità U_{max} lungo z. Da questo grafico si può vedere come il flusso non è omogeneo lungo l'uscita rettangolare. Infatti, si hanno due picchi di velocità sull'estremità dell'apertura e una diminuzione della stessa mentre ci si sposta verso la sezione z = 0 mm. In questo caso, anche se abbiamo un rapporto di $\frac{b}{h}$ doppio rispetto all'attuatore precedente, dato da una minore altezza della fessura rettangolare, non si riesce a riscontrare uniformità della velocità in uscita dalla fessura del getto.

• Analisi fluttuazioni di velocità

In figura 3.32 si mostrano le fluttuazioni di velocità u'^2 e v'^2 sull'asse del getto. In entrambi i casi si nota un comportamento simile delle fluttuazioni



Figura 3.29: Valutazione dello spessore trasversale del getto attraverso il δ



Figura 3.30: Andamento della velocità U_m sull'asse del getto

nelle sezioni da z = -22 mm a z = 22 mm, per cui queste fluttuazioni sono prossime allo zero fino ad x' = 4,5 cm. Superata quella distanza crescono molto rapidamente fino a raggiungere il loro massimo. Inoltre, si nota che rispetto all'attuatore del Caso 1, si hanno valori delle fluttuazioni di v'^2 maggiori. Nelle sezioni esterne si ha un andamento anomalo delle fluttuazioni, esse aumentano nei primi centimetri del campo e successivamente diminuiscono rapidamente.



Figura 3.31: Profili di velocità dimensionali lungo z al variare di x'



Figura 3.32: Fluttuazioni di velocità di $\overline{u'^2}$ (a) e di $\overline{v'^2}$ (b) sull'asse del getto

3.3.4 Caso 4

L'aumento di portata genera grandi cambiamenti al getto. Dalla comparazione del campo di moto della sezione z = 0 mm riportato in figura 3.33, è possibile notare come nonostante la portata diventi quasi il tirplo rispetto al caso precedente, le velocità V non variano molto. Tuttavia, l'aumento di portata fa diminuire l'effetto coanda, per cui il getto si stacca prima dalla parete dell'attuatore. Infatti, si vede dal campo di moto mostrato che il flusso si sposta maggiormente verso destra, per cui ci si aspetta una generale diminuzione degli angoli α ed un aumento della velocità U. I valori degli angoli α sono riportati in tabella 3.3.4. Da essa è possibile notare come questi angoli, in confronto al caso precedente, diminuiscono



con l'aumento della portata lungo tutta l'apertura.

Figura 3.33: Comparazione del campo di moto del Caso 3 (a sinistra) con quello del Caso 4 (a destra) per la sezione z = 0 mm

z[mm]	Angolo di emissione $\alpha[^{\circ}]$
-44	73.3
-33	61.1
-22	58.4
-11	64.8
0	66.8
11	69.1
22	73.3
33	69.3
44	80.7

In figura 3.34 vengono mostrati gli andamenti dei profili di velocità nel sistema di riferimento ruotato. Si osserva che i profili diagrammati presentano un'andamento molto complesso, per cui diventa difficile studiare l'esistenza di una zon self similare. In figura 3.35 vengono diagrammati i profili di velocità lungo z per diversi valori di x'. Anche in questo caso il flusso non è omogeneo sull'uscita, ma ricalca le stesse condizioni viste per il Caso 3. Si ritrovano dei picchi di velocità sulle estremità che diminuiscono man mano che ci si sposta verso il centro dell'attuatore. L'effetto dell'aumento della velocità U può essere verificato attraverso la figura ?? in cui si diagramma la velocità di U e di V sull'asse. Infatti, nel grafico (a) viene mostrata la velocità U, che rispetto al Caso 3 presenta valori maggiori in tutte le sezioni di z. Solamente nelle sezioni $z = \pm 22 \, mm$ si hanno valori negativi della velocità U, per cui in esse sarà ancora presente im modo importante l'effetto coanda.



Figura 3.34: Profili di velocità U nel sistema di riferimento ruotato per le varie sezioni



Figura 3.35: Profili di velocità dimensionali lungo z al variare di x'

Capitolo 4 Simulazione numerica

In questo capitolo viene illustrata la teoria su cui si fonda la simulazione numerica, per cui vedremo come è possibile risolvere le equazioni di Navier-Stokes. In primo luogo vengono richiamate le equazioni costitutive [13] che stanno alla base del moto di un fluido qualsiasi e verrà analizzato il modello di turbolenza utilizzato. In seguito verranno illustrate le scelte eseguite su un software cfd open source per l'analisi fluidodinamica dell'attuatore.

4.1 Equazioni di Navier-Stokes

Una descrizione completa del moto del fluido implica la conoscenza della sua densità, pressione, temperatura e velocità nelle tre direzioni spaziali. Per conoscere come variano queste proprietà all'interno del fluido lungo il suo moto si utilizzano le leggi di conservazione. Ci sono due leggi di conservazione scalare, quella della messa e dell'energia, e una vettoriale, della quantità di moto.

• Conservazione della massa

La legge di conservazione della massa afferma che il flusso netto di massa in uscita dal volume di controllo attraverso la superficie S è uguale alla riduzione nel tempo della massa contenuta all'interno del volume di controllo. Utilizzando la figura 4.1, senza riportare la dimostrazione completa, è possibile ricavare l'equazione scalare che prende il nome di equazione di continuità, che è:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) \tag{4.1}$$

Dove **u** è il vettore velocità costituito dalle tre componenti $(u, v, w) \in \nabla$ è l'operatore divergenza. L'equazione 4.1 rappresenta l'equazione di conservazione della massa in un caso tridimensionale, instazionario per fluido comprimibile.



Figura 4.1: Volume di controllo

Nel caso di fluido incomprimibile, quindi con densità ρ costante, come nel caso dei liquidi, la 4.1 si semplifica e diventa:

 $\nabla(\rho \mathbf{u})$

Tuttavia, quest'ultima formula non è pertinente al nostro caso poichè utilizziamo l'aria che ha una densità variabile, per cui l'equazione di interesse rimane la 4.1.

• Conservazione della quantità di moto

L'equazione di equilibrio della quantita di moto si basa sul principio fisico della seconda legge di Newton F = ma. Le forze che agiscono sul volume di controllo possono essere forze volumetriche, che sono forze che agiscono sulla massa contenuta nel volume di controllo, o forze superficiali che agiscono direttamente sulla superficie del volume di controllo. L'equazione della quantità di moto è:

$$\frac{D(\rho u)}{Dt} = \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho f \qquad (4.2)$$

Dove con $\frac{D(\rho u)}{Dt}$ si intende la derivata materiale, che può essere scomposta come segue:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} + wu\frac{\partial}{\partial z}$$

e $\boldsymbol{\tau}$ si indica il tensore degli sforzi viscosi

• Conservazione dell'energia

Il principio fisico della conservazione dell'energia è espresso dal primo principio della termodinamica, applicandolo si ottiene che il tasso di variazione dell'energia totale nel volume di controllo è uguale alla somma tra il flusso di calore netto verso il volume di controllo e il lavoro svolto per unità di tempo sul volume di controllo dalle forze volumetriche e superficiali. Per cui si ottione la segunete formulazione:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{u}) = -\nabla \cdot (p \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{u}) + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho \dot{q} \quad (4.3)$$

dove *E* rappresenta l'energia totale, che è somma dell'energia interna *e* e dell'energia cinetica $1/2\rho V^2$, λ rappresenta la conducibilità termica del materiale e λT il gradiente di temperatura.

• Equazioni di chiusura

Nel caso di fluido comprimibile, le incognite totali sono le tre componenti di velocità, p, ρ , T ed e, per un totale di sette incognite, mentre le equazioni che abbiamo a disposizione sono solamente cinque, la conservazione della massa, della quantità di moto (3) e dell'energia. Per cui avremo bisogno di altre due equazioni per risolvere l'intero sistema. Avendo a che fare con le variabili termodinamiche, introducendo l'ipotesi di equilibrio termodinamico e in caso di gas perfetto possiamo descrivere lo stato di una sostanza tramite due variabili di stato:

$$p = \rho RT \tag{4.4}$$

$$e = c_v T \tag{4.5}$$

In questo modo il sistema è matematicamente chiuso e può essere risolto attraverso l'introduzione delle condizioni al contorno.

4.2 Geometria dell'attuatore

Essendo che vogliamo studiare il getto libero quando fuoriesce dall'attuatore, per come è implementato il software cfd è necessario inserire un volume di controllo. Si è scelto di inserire un volume di controllo cubico, delle dimensioni di $400 * 400 * 400 * 400 [mm^3]$, inoltre con l'ausilio del software SALOME si elimina lo spessore delle

pareti, in questo caso verranno eliminate le pareti esterne. Il risultato finale del CAD che verrà importato nel software cfd è presentato in figura 4.2, con il relativo sistema di riferimento.



Figura 4.2: Geometria attuatore con volume di controllo e sistema di riferimento usato

4.3 Generazione della mesh

[14] Una delle differenze tra un approccio analitico e uno numerico alla soluzione del problema è che mentre una soluzione analitica è valida in ogni punto del campo di flusso, una tecnica numerica fornisce risposte in punti discreti scelti. La conversione del dominio spaziale di interesse in un dominio discreto è chiamata genereazione della mesh. Nella generazione della mesh, si utilizzano griglie fitte nelle aree in cui si prevedono rapidi cambiamenti della soluzione, come ad esempio negli strati limite, e griglie più rade dove si prevede che la soluzione cambi gradualmente, questo anche per non occupare troppa memomria e tempo di calcolo al computer. Per la generazione deòla mesh sono stati impostati i seguenti modelli: remesh di superficie, riparazione automatica della superficie, mesher poliedrico che genera una mesh volumetrica composta da celle di forma poliedrica, prism layer mesher che aggiunge strati di celle prismatiche accanto a superfici solide per migliorare l'accuratezza della soluzione in prossimità dello strato limite. Una volta selezionati i modelli opportuni, bisogna definire i valori di riferimento dei modelli selezionati che sono elencati nella tabella 4.3. Tra questi troviamo *base size* che rappresenta la dimensione caratteristica del modello utilizzato, *number of prism layer* definisce il numero di strati di layer generati vicino ad una parete, *prism layer thickness* stabilisce lo spessore dei prism layer, mentre per gli altri parametri non descritti si è lasciato il valore di default. All'interno di questa tabella vengono riassunti i valori impostati, dove i valori in percentuale sono relativi al valore di *base size* inserito.

Base size	7e-3
Target surface size	80%
Minimum surface size	10%
Surface curvature	120
Surface growth rate	1.3
Number of prism layer	5
Prism layer stretching	1.3
Prism layer total thickness	10%

Essendo che il fluido circola internamente al nostro attuatore, avremo generazione di strato limite e di perdite di carico, per cui, per avere una soluzione più accuarata è stata creata una nuova *parte* di forma cilindrica che si estende per tutta la lunghezza dell'attuatore, in questo modo è possibile creare una *custom mesh* più rifinita all'interno di questo volume. I valori della mesh di questo volume sono riferiti in valore percentuale rispetto al valore di *base size* dei controlli di default, e vengono riportati nella tabella 4.3

Custom size	5%
Number of prism layer	5
Prism layer stretching	1.3
Prism layer total thickness	1%

Una volta inseriti tutti i parametri è possibile costruire la mesh, essa è mosatrata in figura 4.3.

4.4 Condizioni al contorno e inizializzazione della soluzione

Le condizioni al contorno forniscono informazioni sul fluido che entra o esce dal dominio di calcolo. Specificando inoltre se i bordi definiscono una superficie rigida,



Figura 4.3: Illustrazione della mesh sulla sezione di mezzeria del CAD

quindi una parete, attraverso la quale il fluido non può passare. Le condizioni al contorno vengono applicate alle eqauzioni differenziali ad ogni passo temporale di calcolo, aggiornando la soluzione precedente. Le condizioni al contorno inserite sono:

- mass flow inlet condizione che indica la portata in kg/s che entra all'interno dell'attuatore, è applicata alla sezione circolare di ingresso all'interno dell'attutore.
- *output* condizione di uscita del fluido, è stata inserita per le pareti del cubo.
- *wall* condizione che indica la presenza di una parete solida, questa condizione è applicata per tutte le superfici rimanenti, che sono le pareti che costituiscono l'attuatore.

Inserite le condizioni al contorno, diventa necessario impostare il modello fisico del problema per poter inizializzare la soluzione. Il modello fisico selezionato comprende: gas (aria), densità costante, stabile, tridimensionale, flusso segregato, turbolento, $k - \epsilon$ turbolence. Adesso è possibile inizializzare la soluzione e procedere con l'aggiornamento dei passi temporali finchè i residui non tendono a convergenza.

4.5 Risultati

4.5.1 Caso 1

Per la risoluzione di questo caso è stato impostato un flusso di massa in ingresso di 0.0015 Kg/s per simulare la condizione con elettrovalvola pari a 6V. Mentre con la soluzione sperimentale possiamo conoscere solo l'evoluzione del getto all'esterno dell'attuatore, attraverso uno studio numerico, è possibile anche visualizzare come si comporta il flusso al suo interno. Una volta inizializzata la soluzione, abbiamo

eseguito 1200 passi temporali raggiungendo i livelli di residui mostrati in figura 4.4. Avendo una mesh molto fitta, sono necessari numerosi passi per raggiungere la convergenza dei residui.



Figura 4.4: Livello dei residui dopo 1200 passi

Adesso, è possibile visualizzare il comportamento del flusso all'interno dell'attuatore, per questo in figura 4.5 viene mostrato cosa succede al flusso all'interno dell'attuatore per la sezione z = 0 mm. Da questa immagine si nota, come una parte del flusso colpisce il plate centrale subendo un'arresto della corrente, mentre il resto del flusso ruota attorno al plate. Nella zona di rotazione del plate si ha un'accelerazione del flusso dovuto ad una leggera espansione. Sucessivamente il flusso si ricongiunge vicino alla sezione di uscita.



Figura 4.5: Magnitude di V nella sezione z=0 mm

Per fare un confronto con i dati sperimentali, abbiamo preso i dati delle velcità di $U \in V$ sull'asse del getto ad una distanza dall'apertura dell'attuatore pari ad x = 0.01 m. Questo confronto tra risultati sperimentali e numerici è mostrato nell'immagine 4.6, dove nell'immagine (a) viene mostrato il confronto delle velocità U e in (b) il confronto con la velocità V. Da questo confronto si nota come la

velocità U misurata sperimentalmente è mediamente più basso. Per avere delle valutazioni più accurate sarebbe opportuno avere i campi di moto medi su più sezioni rispetto alle nove analizzate.



Figura 4.6: Velocità $U \in V$ tra sperimentali e numerici lungo z

Con l'aiuto dell'analisi cfd, possiamo ricostruire i profili di velocità nei pochi millimetri a valle dalla fessura rettangolare. In questo modo è possibile avere delle informazioni sulle velocità all'interno del cuore potenziale. Dall'analisi sperimentale, non è stato possibile visualizzare la zona di cuore potenziale perchè l'aria compressa iniettata nell'attuatore era priva di particelle traccianti. In figura 4.7 viene mostrato l'andamento della velocità in prossimità dell'uscita. Il getto sull'uscita non è uniforme, la velocità U presenta due picchi in prossimità del centro dell'attuatore per poi decrescere man mano che ci si avvicina alla parte esterna. In prossimità delle estremità si formano altri picchi probabilmente dovuti all'effetto di bordo. Mentre la velocità V presenta un picco in corrsipondeza del centro dell'attuatore (sezione z = 0 mm) ed un profilo costante mentre ci si avvicina alle estremità.

4.5.2 Caso 2

Rispetto al Caso 1, abbiamo cambiato le condizioni di ingresso dell'aria, è stato inserito un valore di mass flow rate pari a 0.0036 Kg/s per simulare la condizione con voltaggio dell'elettrovalvola pari a 7V. La simulazione di questo caso viene utilizzata per ricostruire le velocità subito sull'uscita della sezione rettangolare e per vedere gli effetti che l'aumento di portata crea. I profili di velocità lungo l'apertura dell'attuatore sono riportati in figura 4.8. Dall'immagine del profilo di velocità Usi può notare come l'aumento di portata tenda ad unire i due picchi in un unico picco situato nel centro dell'apertura. Tuttavia, spostandoci verso le estremità



Figura 4.7: Velocità U (a) e V (b) in prossimità dell'uscita della sezione rettangolare

la velocità U decresce molto aumentando lo scompenso che si genera, per cui la velocità del getto diventa sempre meno uniforme sull'uscita. In corrispondenza delle estremità si generano sempre altri picchi di minore intensità rispetto a quello centrale, probabilmente dovuti agli effetti di bordo.



Figura 4.8: Velocità U (a) e V (b) in prossimità dell'uscita della sezione rettangolare

Capitolo 5 Conclusione e sviluppi futuri

Completata la caratterizzazione dei getti singoli, questi attuatori saranno montati sui quattro lati della base posteriore del modello di un autoveicolo da trasporto commerciale al fine di controllare la scia per ridurre la resistenza aerodinamica. Lo studio vedrà l'attivazione dei getti con una legge di controllo definita tramite algoritmi di intelligenza artificiale. La manipolazione della scia prevedendo l'attivazione di getti darà luogo ad un consumo di energia che andrà tenuto in conto nel bilancio energetico. Infatti da un lato un efficiente controllo della scia darà luogo ad una riduzione di resistenza aerodinamica da altro canto occorrerà fornire energia per il sistema di controllo. L'eventuale applicabilità della tecnica al vero dovrà prevedere una maggiore riduzione di resistenza rispetto alla spesa necessaria. L'attuatore "old" presenta maggiori perdite di carico, e a cuasa dell'effetto Coanda sarebbe opportuno eseguire uno studio tra l'interazione del getto e la parete del camioncino. Mentre l'attuatore "new", da un punto di vista ingegneristico, presenta meno perdite di carico per cui sembrerebbe funzionare meglio. Inoltre presenta un comportamento simile ad un getto piano bidimensionale nelle sezioni centrali. Tuttavia, entrambi gli attuatori hanno una velocità molto disomogenea sull'uscita. Per migliorare questo effetto, ed avere una maggiore uniformità della velocità sulla sezione di uscita, potrebbe essere opportuno inserire un divergente come imbocco di ingresso all'attuatore.

Elenco delle figure

 Soluzione di Goertler rispetto a prove sperimentali effettuate a differenti distanze assiali [3]	1.1	Regioni tipiche di un getto libero [1]	2
 1.3 Andamento sull'asse del getto della root mean square della vlocità in direzione streamwise normalizzata [1]	1.2	Soluzione di Goertler rispetto a prove sperimentali effettuate a differenti distanze assiali [3]	6
 Schema struttura e componenti tecnica PIV [5] Disposizione lenti per creazione di un piano di luce monocromatica [6] Diagramma che mostra l'impulso laser asincrono in relazione al frame rate della telecamera [7] Modello di elaborazione per la valutazione dello spostamento tramite cross-correlazione [8] Procedura di elaborazione per la cross-correlazione tramite algoritmi FFT [9] Procedura di elaborazione per la cross-correlazione tramite algoritmi FFT [9] Schema di funzione di cross-correlazione per una finestra di interro- gazione di 64² pixel [10] Schema di funzionamento dell'elettrovalvola [12] Geometria attuatore Geometria interna dei due attuatori con le rispettive quote, in (a) è mostrata la geometria interna del nuovo attuatore, in (b) la geometria interna del vecchio attuatore Schema del set up sperimentale Foto set up sperimentale Codice Labview di scrittura per il controllo dell'elettrovalvola (a) e lettura del flussimetro (b) Calibrazione flussimetro Oscillazioni della portata Calibrazione elettrovalvola Sistema di riferimento Campi di moto al variare della sezione lungo z 	1.3	Andamento sull'asse del getto della root mean square della vlocità in direzione streamwise normalizzata [1]	7
 2.2 Disposizione lenti per creazione di un piano di luce monocromatica [6] 2.3 Diagramma che mostra l'impulso laser asincrono in relazione al frame rate della telecamera [7] 2.4 Modello di elaborazione per la valutazione dello spostamento tramite cross-correlazione [8] 2.5 Procedura di elaborazione per la cross-correlazione tramite algoritmi FFT [9] 2.6 Risultato funzione di cross-correlazione per una finestra di interro- gazione di 64² pixel [10] 3.1 Schema di funzionamento dell'elettrovalvola [12] 3.2 Geometria attuatore 3.3 Geometria interna dei due attuatori con le rispettive quote, in (a) è mostrata la geometria interna del nuovo attuatore, in (b) la geometria interna del vecchio attuatore 3.4 Schema del set up sperimentale 3.5 Foto set up sperimentale 3.6 Codice Labview di scrittura per il controllo dell'elettrovalvola (a) e lettura del flussimetro (b) 3.7 Calibrazione flussimetro 3.8 Oscillazioni della portata 3.9 Calibrazione elettrovalvola 3.10 Sistema di riferimento 	2.1	Schema struttura e componenti tecnica PIV [5]	10
rate della telecamera [7] 2.4 Modello di elaborazione per la valutazione dello spostamento tramite cross-correlazione [8] 2.5 Procedura di elaborazione per la cross-correlazione tramite algoritmi FFT [9] 2.6 Risultato funzione di cross-correlazione per una finestra di interrogazione di 64 ² pixel [10] 3.1 Schema di funzionamento dell'elettrovalvola [12] 3.2 Geometria attuatore 3.3 Geometria interna dei due attuatori con le rispettive quote, in (a) è mostrata la geometria interna del nuovo attuatore, in (b) la geometria interna del vecchio attuatore 3.4 Schema del set up sperimentale 3.5 Foto set up sperimentale 3.6 Codice Labview di scrittura per il controllo dell'elettrovalvola (a) e lettura del flussimetro (b) 3.7 Calibrazione flussimetro 3.8 Oscillazioni della portata 3.9 Calibrazione elettrovalvola 3.10 Sistema di riferimento 3.11 Campi di moto al variare della sezione lungo z	2.2 2.3	Disposizione lenti per creazione di un piano di luce monocromatica [6] Diagramma che mostra l'impulso laser asincrono in relazione al frame	12
cross-correlazione [8]	2.4	rate della telecamera [7]	15
 FFT [9] Risultato funzione di cross-correlazione per una finestra di interrogazione di 64² pixel [10] 3.1 Schema di funzionamento dell'elettrovalvola [12] 3.2 Geometria attuatore 3.3 Geometria interna dei due attuatori con le rispettive quote, in (a) è mostrata la geometria interna del nuovo attuatore, in (b) la geometria interna del vecchio attuatore 3.4 Schema del set up sperimentale 3.5 Foto set up sperimentale 3.6 Codice Labview di scrittura per il controllo dell'elettrovalvola (a) e lettura del flussimetro (b) 3.7 Calibrazione flussimetro 3.8 Oscillazioni della portata 3.9 Calibrazione elettrovalvola 3.10 Sistema di riferimento 	2.5	cross-correlazione [8]	16
 2.6 Risultato funzione di cross-correlazione per una infestra di interrogazione di 64² pixel [10] 3.1 Schema di funzionamento dell'elettrovalvola [12] 3.2 Geometria attuatore 3.3 Geometria interna dei due attuatori con le rispettive quote, in (a) è mostrata la geometria interna del nuovo attuatore, in (b) la geometria interna del vecchio attuatore 3.4 Schema del set up sperimentale 3.5 Foto set up sperimentale 3.6 Codice Labview di scrittura per il controllo dell'elettrovalvola (a) e lettura del flussimetro (b) 3.7 Calibrazione flussimetro 3.8 Oscillazioni della portata 3.9 Calibrazione elettrovalvola 3.10 Sistema di riferimento 3.11 Campi di moto al variare della sezione lungo z 	9.C	FFT [9]	16
 3.1 Schema di funzionamento dell'elettrovalvola [12]	2.0	gazione di 64^2 pixel [10]	17
 3.2 Geometria attuatore	3.1	Schema di funzionamento dell'elettrovalvola [12]	19
 3.3 Geometria interna dei due attuatori con le rispettive quote, in (a) è mostrata la geometria interna del nuovo attuatore, in (b) la geometria interna del vecchio attuatore	3.2	Geometria attuatore	20
 interna del vecchio attuatore	3.3	Geometria interna dei due attuatori con le rispettive quote, in (a) è mostrata la geometria interna del nuovo attuatore, in (b) la geometria	
 3.4 Schema del set up sperimentale		interna del vecchio attuatore	20
 3.5 Foto set up sperimentale	3.4	Schema del set up sperimentale	21
 3.6 Codice Labylew di scrittura per il controllo dell'elettrovalvola (a) e lettura del flussimetro (b) 3.7 Calibrazione flussimetro 3.8 Oscillazioni della portata 3.9 Calibrazione elettrovalvola 3.10 Sistema di riferimento 3.11 Campi di moto al variare della sezione lungo z 	3.5	Foto set up sperimentale	21
3.7 Calibrazione flussimetro	3.6	Codice Labview di scrittura per il controllo dell'elettrovalvola (a) e	ഹ
3.7 Cambrazione nussimetro 3.8 Oscillazioni della portata 3.9 Calibrazione elettrovalvola 3.10 Sistema di riferimento 3.11 Campi di moto al variare della sezione lungo z	97	$\begin{array}{c} \text{fuscimetro} \\ \text{Calibrations flucture} \end{array}$	22
3.9 Calibrazione elettrovalvola	3.1 3.8	Oscillazioni della portata	$\frac{23}{24}$
3.10 Sistema di riferimento	3.9	Calibrazione elettrovalvola	$\frac{24}{24}$
3.11 Campi di moto al variare della sezione lungo z	3.10	Sistema di riferimento	26
	3.11	Campi di moto al variare della sezione lungo z	27

3.12	Visualizzazione di come vengono studiati i parametri che caratteriz-	
	zano il getto	28
3.13	Visualizzazione del nuovo sistema di riferimento (x',y')	29
3.14	Velocità U nel sistema di riferimento ruotato per le varie sezioni e	
	varie distanze di x'	30
3.15	Profli di velocità normalizzati nel sistema di riferimento ruotato per	
	le varie sezioni lungo z	32
3.16	Valutazione dello spessore trasversale del getto attraverso il δ	33
3.17	Andamento della velocità U_m sull'asse del getto (a) e andamento	
	della velocità U_m/U_0 normalizzata sull'asse del getto (b)	33
3.18	Profili di velocità dimensionali lungo l'asse z al variare di x'	34
3.19	Visualizzazione delle velocità fluttuanti $\left \overline{u'v'}\right $ rispetto ad U per la	
	sezione $z = 0 mm$ al variare della coordinata $x' \dots \dots \dots \dots$	34
3.20	Fluttuazioni di velocità $\overline{u'^2}$ (a) e $\overline{v'^2}$ (b) sull'asse del getto	35
3.21	Mappa della distribuzione di velocità media del campo di moto preso	
	in considerazione per $z = 0mm$	35
3.22	Confronto degli angoli $\alpha \in \beta$ tra il Caso 1 e il Caso 2	37
3.23	Velocità U nel sistema di riferimento ruotato per le varie sezioni e	
	varie distanze di x'	38
3.24	Profli di velocità normalizzati nel sistema di riferimento ruotato per	
	le varie sezioni lungo z e al variare di x'/h	39
3.25	Profili di velocità sull'asse z al variare di x'	40
3.26	Caso 3: campi di moto al variare della sezione z	41
3.27	Profili di velocità U nel sistema di riferimento ruotato per le varie	
	sezioni	42
3.28	Profili di velocità U normalizzata nel sistema di riferimento ruotato	
	per le varie sezioni	43
3.29	Valutazione dello spessore trasversale del getto attraverso il δ	44
3.30	Andamento della velocità U_m sull'asse del getto $\ldots \ldots \ldots \ldots$	44
3.31	Profili di velocità dimensionali lungo z al variare di x'	45
3.32	Fluttuazioni di velocità di $\overline{u'^2}$ (a) e di $\overline{v'^2}$ (b) sull'asse del getto	45
3.33	Comparazione del campo di moto del Caso 3 (a sinistra) con quello	
	del Caso 4 (a destra) per la sezione $z = 0 mm$	46
3.34	Profili di velocità U nel sistema di riferimento ruotato per le varie	
	sezioni	47
3.35	Profili di velocità dimensionali lungo z al variare di x'	47
11	Volume di controlle	40
4.1 1 0	Competitio attractore con volume di controlle a districtore di controlle di control	49
4.2	Geometria attuatore con volume di controllo e sistema di riferimento	F 1
4.9	Usato	51 51
4.3	mustrazione dena mesi suna sezione di mezzeria del UAD	- 33

4.4	Livello dei residui dopo 1200 passi	54
4.5	Magnitude di V nella sezione z=0 mm	54
4.6	Velocità $U \in V$ tra sperimentali e numerici lungo z	55
4.7	Velocità $U(a) \in V(b)$ in prossimità dell'uscita della sezione rettangolare	56
4.8	Velocità $U(a) \in V(b)$ in prossimità dell'uscita della sezione rettangolare	56

Elenco delle figure

Bibliografia

- [1] «Chapter 1 The Plane Turbulent Free Jet». In: *Turbulent Jets.* A cura di N. Rajaratnam. Vol. 5. Developments in Water Science. Elsevier, 1976, pp. 1–26. DOI: https://doi.org/10.1016/S0167-5648(08)70901-8. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167564808709018 (cit. alle pp. 2, 6, 7).
- [2] Hermann Schlichting. *Boundary-Layer Theory*. A cura di I. Tani e Y. Komatsu. Sixth. McGraw -Hill Book Co. (cit. alle pp. 2, 5).
- [3] «Chapter 1 Fundamentals of Turbulent Jet». In: URL: https://ocw.snu.ac. kr/sites/default/files/NOTE/7425.pdf (cit. alle pp. 4, 6).
- [4] M. L. Albertson, Y. B. Dai, R. A. Jensen e Hunter Rouse. «Diffusion of Submerged Jets». In: Transactions of the American Society of Civil Engineers 115.1 (1950), pp. 639-664. DOI: 10.1061/TACEAT.0006302. eprint: https: //ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/TACEAT.0006302. URL: https: //ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/TACEAT.0006302 (cit. a p. 5).
- [5] Gaetano Iuso. «9 $\text{PIV}_M aggio_2 022_S tudenti.pdf$ ». Unpublished (cit. a p. 10).
- [6] P. Maheo. «"Free-Surface Turbulent Shear Flows"». Tesi di laurea mag. CalTech, 1998 (cit. a p. 12).
- [7] Gharib M. e Dabiri. «"Digital Particle Image Velocimetry, Flow Visualization, Techniques and Examples». In: (2000) (cit. alle pp. 14, 15).
- [8] Dinar Zaripov, ., e. «Grid-free planar method of Particle Image Velocimetry». In: Numerical Methods and Programming (Vychislitel'nye Metody i Programmirovanie) (ott. 2022), pp. 328–338. DOI: 10.26089/NumMet.v23r420 (cit. a p. 16).
- [9] «piV.Review.Paper.final.pdf». In: () (cit. a p. 16).
- [10] Rob JM Bastiaans. Cross-correlation PIV; theory, implementation and accuracy. Eindhoven University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2000 (cit. a p. 17).
- [11] Istruzioni per l'uso Contatore di aria compressa. ifm electronic. 2013. URL: https://www.ifm.com/mounting/11406638IT.pdf (cit. a p. 18).

- [12] Istruzioni d'uso e manutenzione Servovalvola serie LRWD. Camozzi. URL: http://catalogue.camozzi.com/Download.aspx?id=320 (cit. alle pp. 18, 19).
- [13] H. Versteeg e W. Malalasekra. Un'introduzione alla fluidodinamica computazionale: il metodo dei volumi finiti. Educazione Pearson, 2007 (cit. a p. 48).
- [14] Okechukwu Onyelucheya. «application of computational dynamics (cfd) in drying equipment designs». In: (set. 2019) (cit. a p. 51).

Ringraziamenti

Vorrei approfittare di queste ultime righe per ringraziare coloro che mi hanno sostenuto in questo percorso. Ringrazio la mia famiglia, e tutti gli amici che hanno sempre creduto in me e mi hanno aiutato in questo percorso. Vorrei ringraziare il Prof. Gaetano Iuso e l'Ing. Enrico Amico per avermi dato questa opportunità di tesi ed avermi fornito gli strumenti e le conoscenze necessarie. Inoltre vorrei ringraziare Donato per essere sempre stato disponibile nella stampa dei modelli.