

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI GENOVA**



**SCUOLA POLITECNICA**

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Sistema di misura *Particle Image Velocimetry*  
applicato a un modello in scala di un diffusore di  
turbina a gas per generazione di energia elettrica

Relatore:  
Prof. Alessandro Bottaro

Correlatori:  
Dott. Sergio Rizzo  
Ing. Cinzia Cirigliano

Candidato:  
Matteo Volpato

Anno accademico: 2012/2013



*A Elena per essere sempre stata al mio fianco ed avermi aiutato a raggiungere questo obiettivo.*

*A tutta la mia famiglia, per il sostegno e la fiducia dimostratami.*

*Al Professor Bottaro, per la sua gentilezza e disponibilità.*

*E a tutto il team del Laboratorio di Fluidodinamica a freddo dell'Azienda Ansaldo Energia S.p.A., per avermi accolto e fatto sentire, fin da subito, parte del gruppo.*



# INDICE

<b>Introduzione</b>	1
<b>1 Cicli Combinati: fondamenti</b>	
Introduzione	4
1.1 Cicli Combinati: generalità	4
1.1.1 Ciclo termodinamico e rendimento di un ciclo combinato	6
1.2 Apparecchiature principali	9
1.2.1 Turbina a gas	9
1.2.2 Turbina a vapore	11
1.2.3 Generatore di vapore a recupero	13
1.2.4 Condensatore	13
1.2.5 Diffusore di scarico assiale	14
<b>2 Tecnica di misura ottica <i>Particle Image Velocimetry</i></b>	
Introduzione	18
2.1 Generalità sulla PIV	18
2.2 Particolarità della PIV rispetto ad altre tecniche di misura	21
2.3 Particelle traccianti	22
2.3.1 Proprietà meccaniche delle particelle traccianti	23
2.3.2 Proprietà ottiche delle particelle traccianti	25
2.4 Generazione e iniezione delle particelle traccianti	26
2.5 Sorgente di luce	28
2.6 Generazione del fascio di luce piano	30
2.7 Generazione e registrazione delle immagini	33
2.7.1 Formazione dell'immagine PIV	33
2.7.2 Strumenti e tecniche di registrazione delle immagini PIV	36
2.8 Metodi di valutazione delle immagini PIV	39
2.8.1 Metodi di valutazione digitali delle immagini PIV	41
2.9 Metodi di interrogazione avanzati	43
2.10 Metodologie di elaborazione delle immagini PIV	47
2.11 Misure con tecnica PIV stereoscopica	49
2.11.1 Disposizione delle ottiche nelle registrazioni stereoscopiche	50

2.11.2	Condizione di Scheimpflug	51
2.11.3	Correzione degli errori prospettici	53
2.11.4	Metodi per ricostruzione delle tre componenti del campo di moto	54
<b>3</b>	<b>Impianto di prova sperimentale</b>	
	Introduzione	58
3.1	Caratteristiche specifiche del diffusore	58
3.1.1	Realizzazione del diffusore in scala	61
3.2	Impianto di prova sperimentale	66
3.2.1	Realizzazione sistema di movimentazione dello specchio ottico	74
<b>4</b>	<b>Campagna sperimentale e analisi dei risultati</b>	
	Introduzione	78
4.1	Campagna sperimentale	78
4.1.1	Posizionamento del sistema laser e specchio	78
4.1.2	Allineamento del fascio laser	79
4.1.3	Posizionamento delle telecamere	80
4.1.4	Allineamento del fascio laser PIV con target di calibrazione	80
4.1.5	Calibrazione	82
4.1.6	Campagna di misura	84
4.2	Analisi dei risultati	97
4.2.1	Flusso <i>swirlato</i> a $v = 50$ m/s	98
4.2.2	Flusso <i>swirlato</i> a $v = 100$ m/s	101
4.2.3	Flusso libero a $v = 50$ m/s	104
4.2.4	Flusso libero a $v = 100$ m/s	108
4.2.5	Flusso <i>swirlato</i> a $v = 50$ m/s con diffusore montato	113
4.2.6	Considerazioni generali sulle misure	114
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	116
	Appendice 1	118
	Appendice 2	120
	Bibliografia	125

# A Particle Image Velocimetry measuring system applied to a scaled model of an industrial gas turbine diffuser

## Abstract

This work is focused on the definition of the settings of a Particle Image Velocimetry (PIV) measuring system, applied to a scaled model of an industrial gas turbine diffuser. Stereoscopic PIV has been used in order to obtain three-dimensional velocity fields. Experimental investigations were performed in the open loop wind tunnel of the Fluid Dynamics Laboratory of Ansaldo Energia S.p.A. The PIV technique has been set up and calibrated in order to study a high speed flow with a particular degree of swirl, and to determine the position and dimensions of the optical openings necessary for the measurements. More in detail, values of TbP, the amount of seed needed, and the opening of the camera orifice have been investigated to obtain results of the highest possible quality.

Experimental investigations regarded in particular the study of two different types of flow (free flow and flow with swirl), at two different velocities ( $v=50$  m/s and  $v=100$  m/s); measurements have been taken on two different planes, axially translated. The experimental campaign has been conducted at high speed, with swirl to simulate the flow developing in the diffuser. Moreover, the repeatability of the PIV results, obtained through a rigid translation of the PIV system to avoid a new calibration for every measurement on two different planes, has been verified.



# Introduzione

Gli impianti in ciclo combinato rappresentano attualmente una delle soluzioni migliori nel campo della generazione di energia elettrica e stanno progressivamente conquistando quote di mercato sempre maggiori, grazie all'elevato rendimento e al ridotto impatto ambientale.

Oltre all'ottimizzazione di componenti quali compressore e turbina, che comportano investimenti notevoli, un aumento del rendimento può essere ottenuto tramite una corretta progettazione del diffusore di scarico della turbina.

Quest'ultimo è un condotto attraverso il quale si realizza un aumento di pressione statica, ottenuto a spese dell'energia cinetica del flusso entrante; poiché la pressione all'uscita del diffusore è fissata dalle condizioni ambiente e dalle perdite di carico dei componenti a valle, quali camino o caldaia a recupero, il diffusore di scarico consente di abbassare la pressione statica allo scarico della turbina e quindi di generare una potenza più elevata.

Il presente lavoro di tesi sperimentale rientra in un progetto che ha la finalità di indagare il campo di moto che si sviluppa all'interno del diffusore di scarico della turbina AE94.3A, prodotta e commercializzata dall'azienda Ansaldo Energia S.p.A., al fine di migliorare l'efficienza dell'intera macchina.

In particolare, la tesi viene svolta presso l'Azienda Ansaldo Energia S.p.A., nel laboratorio di fluidodinamica a freddo, all'interno dell'unità "Laboratori Aerodinamica, Combustione e Scambio Termico (TLA)". Questa unità di lavoro fa parte dell'Ingegneria di Sviluppo e in particolare dello Sviluppo delle Turbomacchine (TMC).

È stato scelto di indagare il campo di moto all'interno del diffusore con la tecnica di misura ottica *Particle Image Velocimetry*; la PIV è una delle più recenti tecniche per la misura del campo di moto di un fluido e, come verrà descritto in seguito, essa sta avendo un utilizzo sempre più diffuso grazie alla sua caratteristica di non interferire con il flusso in esame e al fatto che restituisce una misura globale del campo di moto, a differenza di tutte le altre tecniche di misura che restituiscono una misura puntuale.

La presente attività di tesi ha come finalità la messa a punto della tecnica di misura ottica *Particle Image Velocimetry*, con le criticità

correlate ad effettuare una misura su un componente articolato e di grandi dimensioni, seppur scalato, come quello oggetto di studio. In particolare si cercheranno di definire alcune indicazioni fondamentali ai fini delle successive misure, che riguarderanno il modello in scala del diffusore e si svolgeranno presso la galleria del vento del Politecnico di Milano.

La progettazione e costruzione del diffusore scalato richiedono tempi più lunghi rispetto alla presente attività; di conseguenza, le indicazioni sono state tratte da prove che riproducono le principali criticità delle condizioni di moto ottenute dalla scalatura del componente.

La messa a punto è quindi utile per la determinazione preventiva di alcune grandezze fondamentali nella tecnica PIV, ma è anche indispensabile per valutare le implicazioni nella progettazione del diffusore modello, quali la realizzazione degli accessi ottici.

Le prove sono state effettuate su un flusso avente la velocità dedotta dalla scalatura e dotato di un certo grado di *swirl*, visto che il flusso in ingresso al diffusore presenta una *swirlatura* non trascurabile.

Ai fini di una conoscenza esauriente del campo di moto all'interno del diffusore, sono necessarie, oltre a prese di pressione distribuite su tutta la superficie del modello, anche misure PIV in corrispondenza di due piani, uno direttamente all'ingresso del componente ed uno traslato di 200 mm rispetto al primo.

Le prese dati sono state quindi realizzate, per ciascuna tipologia di flusso analizzata, in corrispondenza dei due diversi piani.

Il fatto che il sistema PIV sia montato su binari, consente di effettuare la traslazione da un piano all'altro in maniera agevole e limitando il numero di procedure di calibrazione necessarie nelle diverse condizioni di prova che verranno testate.

Obiettivo della presente tesi è perciò anche quello di verificare la robustezza di tale metodo, verificando la coerenza e la costanza delle misure una volta effettuata la traslazione rigida.

# CAPITOLO 1

## Cicli combinati: fondamenti

# 1. Cicli Combinati

Gli impianti in ciclo combinato rappresentano attualmente una delle soluzioni migliori nel campo della generazione di energia elettrica e stanno progressivamente conquistando quote di mercato sempre maggiori, grazie all'elevato rendimento, al ridotto impatto ambientale, alla semplicità costruttiva e anche alla possibilità di convertire vecchi impianti a vapore con minimi interventi.

## 1.1 Cicli combinati: generalità

L'impianto a ciclo combinato *gas-vapore* consiste essenzialmente nell'accoppiamento di un impianto con turbina a gas (TG) e di un impianto con turbina a vapore d'acqua (TV); infatti, un impianto termoelettrico a ciclo combinato prevede il recupero del calore contenuto nei gas esausti scaricati da una turbina a gas, tramite un generatore di vapore a recupero che produce il vapore che espanderà in una turbina a vapore, producendo una maggiore quantità di energia elettrica, con conseguente aumento del rendimento di utilizzo del combustibile.

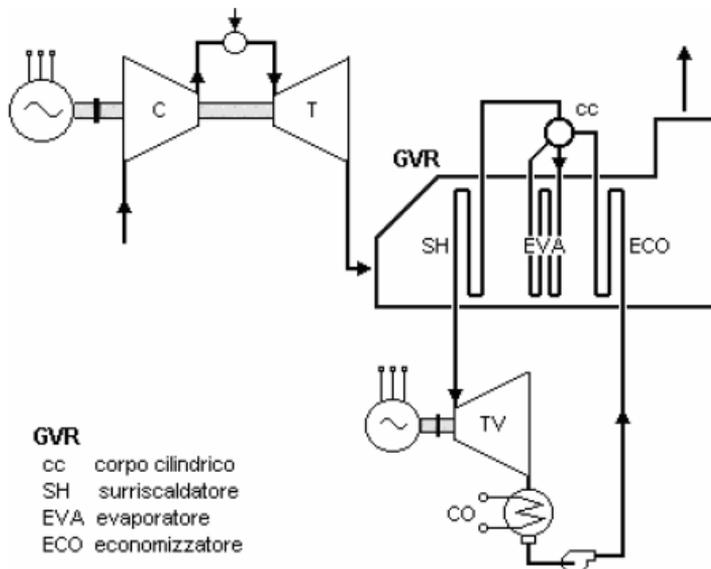


Fig. 1.1 Schema semplificato di un impianto in ciclo combinato.

Ciò nasce dall'idea di voler sfruttare le peculiarità dei due cicli termodinamici che presiedono al funzionamento degli impianti citati; in particolare, la caratteristica del ciclo a vapore di avere una temperatura massima del ciclo costante e piuttosto bassa, mentre, per gli impianti a gas, un valore di temperatura media dei gas di scarico abbastanza elevato.

E' noto che l'efficienza di un qualsiasi processo di trasformazione di energia termica in energia meccanica è tanto migliore quanto maggiore è la differenza delle temperature estreme fra cui opera il processo stesso, cioè quanto più è alta la temperatura della fase in cui il calore è fornito al sistema e quanto più è bassa la temperatura della fase in cui il calore è ceduto dal sistema all'esterno.

Ovviamente la prima è soggetta ai limiti sulla resistenza dei materiali costituenti le apparecchiature, mentre la seconda è limitata dalla temperatura ambiente.

I cicli sfruttati industrialmente, quello a vapore (di *Rankine*) e quello a gas (di *Joule-Brayton*), possiedono in realtà solo una delle proprietà richiamate e non riescono perciò a raggiungere, se presi singolarmente, dei rendimenti molto elevati.

Infatti bisogna ricordare come l'impianto con turbina a gas presenti delle limitazioni per quel che riguarda il valore di temperatura dei gas di scarico, dal momento che vengono scaricati nell'ambiente a temperature ben più alte di quella ambiente (intorno ai 500 °C), mentre il limite per l'impianto a vapore consiste proprio nel presentare una temperatura massima del ciclo non superiore ai 550 °C per motivi sia tecnologici che economici. Nasce così spontaneo combinare i due impianti o per meglio dire combinare i due cicli termodinamici, quello del ciclo a gas (ciclo Joule-Brayton) e quello dell'impianto a vapore (ciclo Rankine).

Il processo complessivo impiega dunque il calore alla temperatura elevata della turbina a gas e cede il calore alla temperatura bassa del condensatore della turbina a vapore, realizzando in definitiva le condizioni ottimali per rendimenti molto alti, nettamente superiori al 50%.

Ciò che permette la "combinazione" tra questi due impianti è senza dubbio dovuto al fatto che, nella TG, la frazione di energia termica non utilizzata, ossia non trasformata in energia meccanica, sia concentrata tutta nei gas di scarico e sia inoltre ad alta temperatura, a differenza di altri impianti, come i motori a combustione interna, dove l'energia

termica è rilasciata in varie parti nell'impianto e non concentrata solamente nei gas di scarico.

Nel realizzare un ciclo combinato distinguiamo allora il ruolo del ciclo a gas, detto "*topping*", nel senso che governa il funzionamento dell'intero sistema, da quello "*bottoming*" del ciclo a vapore che utilizza il calore scaricato ad un livello inferiore da un punto di vista termodinamico.

A livello di schema semplificato, la Fig.1.1 mostra quanto appena descritto; si nota subito la presenza di un componente nuovo, assente nel caso di impianti presi singolarmente, ossia il Generatore di Vapore a Recupero (GVR), al cui interno avvengono il riscaldamento dell'acqua, la sua evaporazione ed il surriscaldamento, in modo completamente diverso rispetto a ciò che avviene in un generatore di vapore tradizionale.

Gli impianti in ciclo combinato sono di recente utilizzo, in quanto si è dovuto aspettare lo sviluppo tecnologico delle turbine a gas, che ha portato a valori accettabili del rendimento.

Attualmente tale configurazione impiantistica sta ricoprendo un ruolo sempre più importante nel campo della produzione di energia elettrica, in quanto gli impianti in ciclo combinato presentano numerosi punti di forza.

Oltre al notevole incremento del rendimento, si ottiene anche un aumento considerevole della potenza sviluppata rispetto ad un ciclo a gas semplice, a parità di quantità di combustibile.

Inoltre si ha un ridotto impatto ambientale, soprattutto negli impianti con caldaia a recupero senza bruciatori, in quanto l'utilizzo di gas come combustibile permette basse concentrazioni di inquinanti nei fumi; si deve anche considerare l'elevato rendimento di conversione dell'energia, che consente di mantenere relativamente bassi i consumi di combustibile.

Vi sono poi anche vantaggi tecnico-costruttivi, quali alta disponibilità, alta flessibilità e ridotti tempi di installazione.

Infatti, il livello tecnologico raggiunto e l'elevata affidabilità delle turbine di ultima generazione consentono un funzionamento per un numero elevato di ore annue, riducendo così gli interventi di manutenzione; i componenti e le apparecchiature con cui sono costruiti hanno un'elevata flessibilità operativa, che li rende molto competitivi riguardo le esigenze dell'odierno mercato elettrico; infine, la loro

realizzazione richiede un tempo nettamente inferiore rispetto agli impianti a vapore tradizionali.

Un ulteriore vantaggio dei cicli combinati è che hanno tempi di avviamento minori rispetto ai cicli a vapore semplici; infatti la turbina a gas eroga già i  $2/3$  della potenza della centrale in circa 30 minuti, mentre la restante parte del ciclo raggiunge la piena potenza dopo tempi dell'ordine di un'ora o, al massimo, di alcune ore, a seconda che si tratti di avviamenti da caldo o da freddo.

Infine va anche evidenziato come l'utilizzo congiunto di un ciclo a gas con uno a vapore a recupero può anche riguardare impianti a vapore già esistenti; tale operazione viene detta "repowering".

Il repowering consiste nell'installare una turbina a gas su un impianto a vapore già esistente, al fine di convertirlo in un ciclo combinato. Questo è possibile grazie alla compattezza della turbina a gas; inoltre questa soluzione evita di ricercare nuovi siti su cui realizzare centrali elettriche.

### **1.1.1 Ciclo termodinamico e rendimento di un ciclo combinato**

Come si può vedere in Fig. 1.2, per quanto riguarda il solo ciclo termodinamico a gas, il compressore preleva aria in condizioni ambiente e la comprime, provocando un aumento di pressione e temperatura (trasformazione 1-2); in camera di combustione viene ulteriormente innalzata la temperatura tramite il calore rilasciato dalla reazione di ossidazione del combustibile (trasformazione 2-3); infine i gas prodotti si espandono nella turbina (trasformazione 3-4) permettendo la conversione parziale del calore in energia meccanica. I gas, dopo l'espansione in turbina, vengono convogliati in un generatore di vapore a recupero (GVR), indi sono inviati al camino (punto 5), dal quale escono a temperature non inferiori ai 100 °C, per evitare la formazione di pennacchi di fumo, resi visibili dalla condensazione del vapor d'acqua all'uscita del camino.

Nel secondo ciclo termodinamico a vapore (di Rankine), l'acqua viene riscaldata (trasformazione 6-7), subisce il cambiamento di stato da liquido a vapore saturo secco (trasformazione 7-8) e si surriscalda fino al punto 9: tutto ciò avviene a spese del calore posseduto dai gas di scarico del turbogas. Il vapore espande poi in turbina (trasformazione 9-10), fornendo energia meccanica, e viene successivamente condensato (trasformazione 10-6), cedendo calore nel condensatore ad una temperatura prossima a quella ambiente.

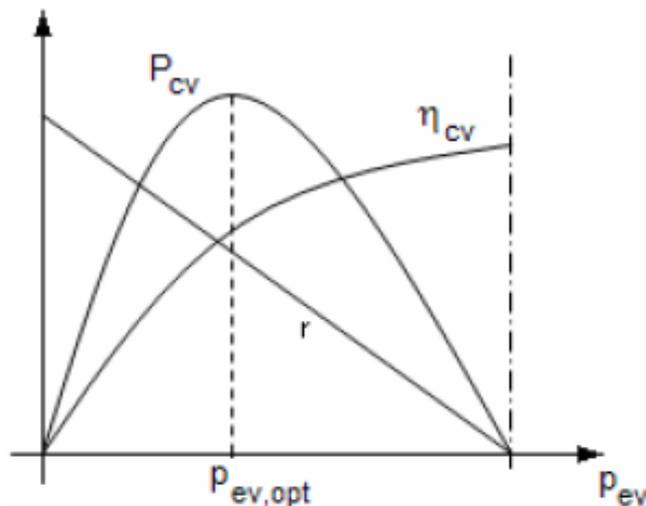


$$\eta_{CC} = \eta_{TG} + (1 - \eta_{TG}) \cdot r \cdot \eta_{CV} \quad (1.2)$$

dove  $\eta_{TG}$  è il rendimento netto della turbina a gas,  $\eta_{CV}$  è il rendimento del ciclo a vapore, mentre  $r=Q_{1,CV}/Q_{2,TG}$  indica la frazione di calore ceduto dal TG che alimenta il ciclo a vapore.

Risulta evidente che per ottenere  $\eta_{CC}$  elevati, oltre ad ottimizzare  $\eta_{TG}$ , ottenibile tramite un aumento della temperatura massima del ciclo a gas, si deve anche porre molta attenzione al ciclo a vapore, in particolare alla caldaia a recupero; infatti occorre agire su  $r \cdot \eta_{CV}$ , al fine di renderlo il più grande possibile, come si può vedere dalla Fig. 1.3.

Quindi, per massimizzare il lavoro del ciclo a vapore alimentato dal ciclo a gas, occorre recuperare nel modo più efficiente possibile il calore disponibile nei gas di scarico, ossia si devono ridurre al minimo le perdite per irreversibilità nello scambio termico e nella dispersione del gas nell'ambiente.

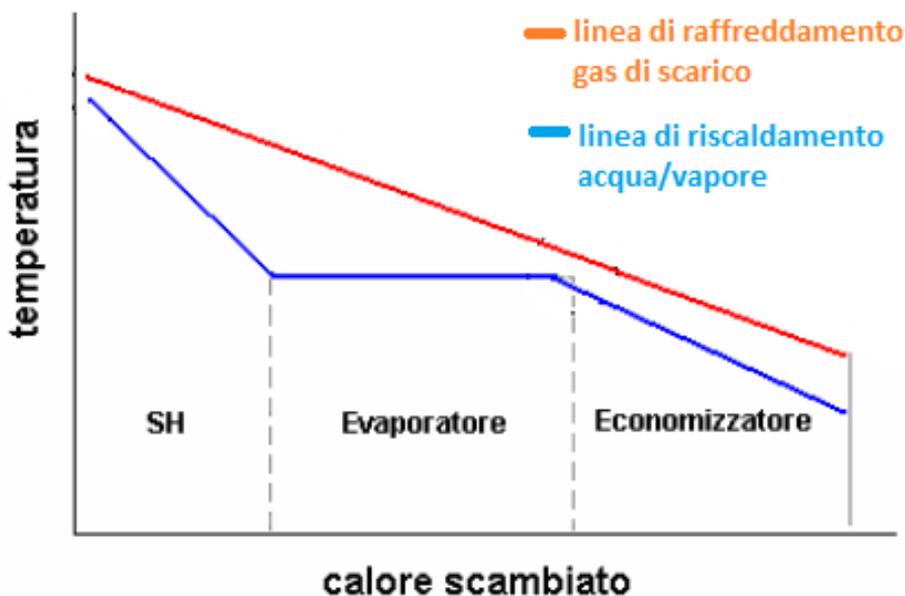


**Fig. 1.3** Andamento di  $P_{CV}$  in funzione della pressione di evaporazione.

Un ruolo fondamentale in questo ambito è ricoperto dalla pressione di evaporazione, in quanto, nel caso di cicli a recupero, essa assume un valore ottimale in funzione della temperatura iniziale dei gas di

scarico; è quindi evidente che essa deve essere ottimizzata, in modo da avere la minor perdita di calore non recuperato possibile.

Come si può infatti notare in Fig. 1.4, l'area compresa tra le due curve rappresenta la quantità di calore disponibile nei gas di scarico non sfruttato per la produzione di vapore.

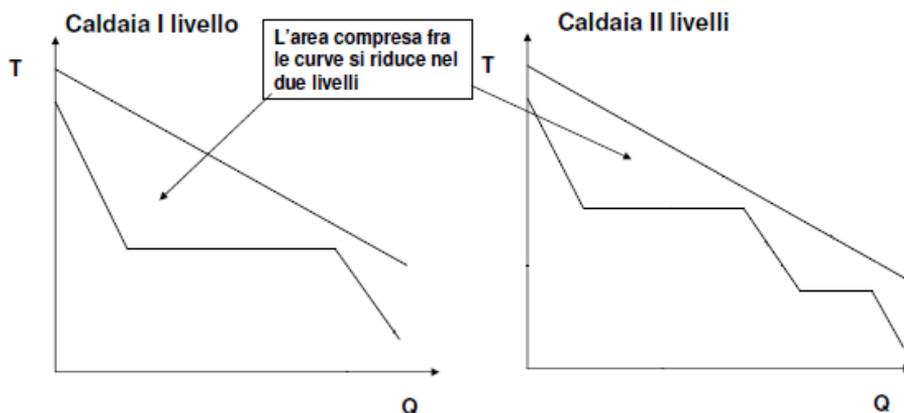


**Fig. 1.4** Profilo di temperatura del ciclo gas di scarico/vapore con un unico livello di pressione.

Al fine di limitare le dissipazioni del potenziale termodinamico dei gas di scarico legate agli scambi termici tra gas e vapore, il generatore di vapore a recupero deve prevedere una disposizione in controcorrente tra i gas di scarico e l'acqua, ed essere caratterizzato da più fasi di evaporazione (due o tre) a diverse pressioni, in modo da ridurre l'area tra le due curve di Fig. 1.4; ciò è mostrato in Fig. 1.5.

Va infine evidenziato che il rendimento di un ciclo combinato è scarsamente influenzato dal rapporto di compressione del TG. Infatti, l'energia termica ad alta temperatura dispersa allo scarico da un ciclo a basso  $\beta$ , che penalizzerebbe il ciclo semplice, nel ciclo combinato viene recuperato in modo efficace dal ciclo a vapore; il lavoro specifico cresce al diminuire di  $\beta$ , in relazione alla maggior potenza

sviluppata dal ciclo a vapore. Per questo motivo il  $\beta$  ottimo in ciclo combinato si attesta su valori pari a  $15 \div 20$ , mentre in ciclo semplice si attesta su valori pari a  $35 \div 40$ .



**Fig. 1.5** Andamento della temperatura di gas e acqua/vapore nelle diverse tipologie di GVR.

## 1.2 Apparecchiature principali

Vengono ora analizzati gli organi principali costituenti un ciclo combinato, quali l'impianto turbina a gas, la caldaia a recupero, la turbina a vapore, il condensatore e il diffusore. Viene posta particolare attenzione al componente *diffusore*, in quanto è il componente su cui si applicherà la tecnica ottica di misura PIV, oggetto della presente tesi.

### 1.2.1 Turbina a gas

La turbina a gas è costituita da tre macchine fondamentali: compressore, camera di combustione ed espansore.

Il compressore, generalmente di tipo assiale, aspira aria dall'ambiente attraverso un condotto opportunamente sagomato, la comprime e quindi la invia in camera di combustione. Qui, grazie all'iniezione di combustibile attraverso opportuni ugelli, avviene la combustione. I prodotti della combustione, ad alta pressione e temperatura, espandono in una turbina, per poi passare nel diffusore di scarico ed essere scaricati in atmosfera attraverso un camino, nel caso di cicli aperti, oppure essere mandati nella caldaia a recupero, nel caso di cicli combinati.

Il compressore è generalmente di tipo assiale in quanto ha rendimenti superiori rispetto a quello di tipo centrifugo ed è in grado di elaborare grandi portate volumetriche.

I rapporti di compressione tipici di un turbogas in ciclo combinato si attestano attorno a  $\beta=20$ , che sono ottenuti con un numero di stadi compreso fra circa 15 e 20, essendo il  $\beta$  di ciascuno stadio pari a circa 1,2. Questo limite è dovuto al fatto che il compressore è una macchina operatrice, che opera sul fluido al fine di aumentarne la pressione; non è, dunque, possibile produrre un aumento di pressione troppo elevato per ogni singolo stadio, in quanto si arriverebbe al pompaggio del compressore.

Il compressore è trascinato direttamente dall'espansore, mediante un collegamento meccanico.

La camera di combustione provvede all'innalzamento della temperatura del ciclo mediante il calore rilasciato dalle reazioni di ossidazione del combustibile. La temperatura massima alla quale può essere portato il ciclo è limitata dalla resistenza dei materiali, i quali possono, ad oggi, resistere a temperature non superiori ai 1300÷1500 °C, con l'utilizzo di opportune tecniche di raffreddamento; siccome la temperatura sviluppata da una combustione stechiometrica supera i 2300 °C, la camera di combustione lavora con forti eccessi d'aria, al fine appunto di ridurre la temperatura.

I requisiti fondamentali che deve possedere una camera di combustione di un turbogas sono: avere una buona stabilità di fiamma, operare una combustione completa, comportare basse perdite di carico, offrire facilità di manutenzione e affidabilità, produrre la minima quantità di inquinanti e fornire in uscita una buona distribuzione di temperatura, di modo da non danneggiare strutturalmente il primo stadio di turbina.

L'espansore delle turbine a gas può essere considerato l'elemento peculiare e critico di tali macchine, in relazione alle temperature critiche che raggiunge, ma anche per il fatto di essere l'organo dal quale si estrae energia dal fluido.

Ovviamente le temperature che si raggiungono nell'espansore sono minori rispetto a quello in camera di combustione, ma si deve considerare il fatto che esso è un organo rotante, a differenza della camera di combustione; ciò comporta stress meccanici molto elevati, che vanno ad aggiungersi a quelli termici.

Inoltre, è necessario raffreddare il primo stadio di turbina, in quanto i materiali di cui è costituito non sono in grado di resistere a temperature

maggiori di circa 1300°C, ben inferiori a quelle dei fumi in uscita dalla camera di combustione. La pratica del *blade cooling* risulta, dunque, fondamentale ai fini dell'integrità dell'intera macchina, in quanto non riguarda solamente l'espansore, ma anche le pareti della camera di combustione; tale pratica consiste nel prelevare una certa quantità d'aria dal compressore, per portarla, mediante opportuni condotti, alle zone che necessitano di raffreddamento. È dunque evidente che tale operazione comporta una limitazione sul rendimento della turbina a gas, in quanto parte del lavoro meccanico viene impiegato per il raffreddamento di parti della macchina, non producendo effetto utile. A differenza del compressore, la turbina è dotata di un numero di stadi notevolmente minore, dell'ordine dei 3÷4 stadi, a parità di rapporto di compressione; ciò è dovuto agli enormi carichi aerodinamici cui sono sottoposte le pale di turbina, che quindi smaltiscono un salto entalpico molto maggiore di quello smaltito dalle pale di compressore. Ciò comporta delle perdite in termini di rendimento, ma anche enormi benefici in termini di superfici da raffreddare.

### **1.2.2 Generatore di vapore a recupero**

Il generatore di vapore a recupero (GVR) è sede del trasferimento di calore tra i gas uscenti dalla turbina a gas e il fluido (acqua-vapore) che percorre il ciclo Rankine.

Facendo riferimento al ciclo più semplice, cioè a un ciclo a vapore monolivello (ma le considerazioni seguenti sono estendibili, senza alcuna variazione concettuale, a cicli a più livelli di pressione), il GVR deve provvedere a tre operazioni di scambio termico ben individuabili: il riscaldamento dell'acqua, proveniente dal condensatore, nell'economizzatore, l'evaporazione dell'acqua nell'evaporatore ed infine il surriscaldamento del vapore nel surriscaldatore.

La situazione è delineata in Fig. 1.1, che evidenzia la separazione fisica dei banchi di tubi che provvedono alle tre diverse operazioni.

Come è già stato detto in precedenza, la disposizione in controcorrente è essenziale per poter surriscaldare il vapore a beneficio del rendimento del ciclo e per poter sfruttare la fase di preriscaldamento del liquido, al fine di recuperare una quota ulteriore di calore dai gas (per questo motivo lo scambiatore relativo viene chiamato economizzatore, in analogia con le caldaie a combustione).

La possibilità di preriscaldare il liquido sfruttando il contenuto termico, altrimenti irrecuperabile, del gas uscente dalla sezione di

evaporazione fa capire come la pratica degli spillamenti rigenerativi, ampiamente utilizzata nei cicli a vapore convenzionali, sia solo controproducente nei cicli a recupero: essa comporterebbe un'inutile dissipazione dei gas ancora caldi nell'ambiente, accompagnata da una perdita di potenza della turbina a vapore, per la presenza degli spillamenti, non recuperabile da un minor consumo di combustibile.

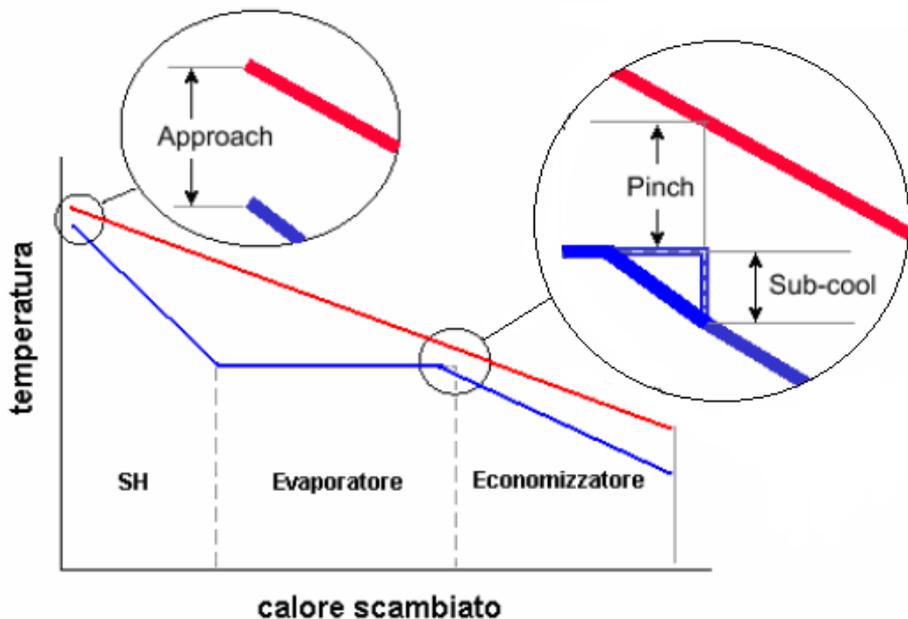
Scendendo nei particolari, lo scambio termico tra il gas e il vapore è caratterizzato da tre differenze di temperatura significative, mostrate in Fig. 1.6; esse sono: il  $\Delta T$  al *pinch-point*, il  $\Delta T$  di *sub-cooling* e il  $\Delta T$  all'*approach-point*.

Il  $\Delta T$  al *pinch-point* è il minimo  $\Delta T$  nell'evaporazione (cioè tra il gas uscente dai banchi evaporatori e la temperatura di evaporazione), il  $\Delta T$  all'*approach-point* è il minimo  $\Delta T$  nel surriscaldamento (cioè tra il gas entrante nel GVR e la massima temperatura del vapore), mentre il  $\Delta T$  di sottoraffreddamento (*sub-cool*) è la differenza tra la temperatura di evaporazione e quella dell'acqua all'uscita dell'economizzatore.

I primi due  $\Delta T$  stabiliscono le differenze di temperatura che stanno alla base del progetto termico del GVR. La loro influenza sulle prestazioni del ciclo è molto evidente, in quanto all'aumentare di  $\Delta T_{ap}$  diminuisce la temperatura massima del ciclo a vapore e quindi anche il rendimento, mentre all'aumentare di  $\Delta T_{pp}$  aumentano la temperatura dei gas di scarico, la temperatura di evaporazione e diminuiscono il grado di recupero termico, la portata di vapore prodotto e di conseguenza la potenza del ciclo a vapore. La logica dunque porterebbe a ridurre al minimo queste due differenze di temperatura, ma ciò comporta anche un aumento delle superfici di scambio termico, con conseguenti aumenti del costo iniziale dell'impianto.

Il  $\Delta T$  di sottoraffreddamento è invece necessario per evitare il rischio di inizio di evaporazione nell'economizzatore, il che comporterebbe un blocco temporaneo di portata nei tubi a causa del volume occupato dalla bolla di vapore e conseguenti oscillazioni di pressione.

Dal punto di vista costruttivo e morfologico una caldaia a recupero è profondamente diversa da una caldaia a combustione. Il punto centrale, a cui sono riconducibili tutte le differenze, è che nella caldaia a recupero non sono mai presenti zone in cui i gas combustibili si trovino a temperature particolarmente elevate.



**Fig. 1.6** Particolare mostrante i  $\Delta T$  significativi.

Infatti la temperatura massima è imposta dalle condizioni del gas uscente dalla turbina a gas (circa 600°C). Al contrario, in una caldaia a combustione la zona della fiamma è prossima ai 2000°C: in tali zone il meccanismo di scambio termico è principalmente controllato dall'irraggiamento, con flussi termici particolarmente alti. Pertanto in una caldaia a combustione grande attenzione deve essere posta a mantenere le tubazioni in condizioni termiche ben controllate (cioè a una temperatura molto più vicina a quella dell'acqua e del vapore che a quella dei gas combusti), pena la rottura fisica dei tubi. Essendo questo problema di rilevanza molto minore in una caldaia a recupero, diviene possibile: (i) realizzare la disposizione in controcorrente e in particolare porre il surriscaldatore a contatto con i gas a temperatura più elevata; (ii) realizzare una zona dedicata all'evaporazione con semplici fasci tubieri in cui lo scambio termico avviene per convezione; (iii) utilizzare, almeno per l'evaporatore e l'economizzatore, tubi alettati che rendono la costruzione assai più compatta ed economica.

Un elemento distintivo nelle caldaie a recupero è il tipo di circolazione previsto nel banco di evaporazione. Esso può essere di tre tipi: a

circolazione naturale, a circolazione assistita e ad attraversamento forzato.

Infine la caldaia a recupero deve anche prevedere un sistema di by-pass che consenta di allontanare i gas di scarico della turbina a gas direttamente in atmosfera, senza che questi attraversino la caldaia; il by-pass serve per permettere il funzionamento della turbina a gas anche in caso di disservizio dell'impianto a vapore.

### **1.2.3 Turbina a vapore**

La turbina a vapore ha il compito di trasformare l'energia potenziale termodinamica contenuta nel vapore ad alta pressione e temperatura in lavoro meccanico.

Questa trasformazione di energia, con la corrispondente variazione di entalpia del vapore, avviene con la trasformazione intermedia in energia cinetica.

Tutte le turbine sono costituite da due organi essenziali: il distributore, in cui l'energia potenziale termica viene trasformata in energia cinetica, e la girante, dove l'energia cinetica e l'energia potenziale termica residua contenuta nel vapore vengono convertite in energia meccanica utilizzabile all'albero.

In particolare, il distributore è costituito da uno o più settori palettati che indirizzano il vapore all'ingresso nelle giranti.

Il vapore viene prodotto da un generatore di vapore, sia esso una caldaia, come avviene nei cicli a vapore semplici, oppure un GVR, come avviene nei cicli combinati.

Le turbine a vapore per ciclo combinato non differiscono da quelle impiegate nei cicli a vapore convenzionali, né per gli aspetti concettuali, né per i criteri progettuali, né per la tecnologia costruttiva. I dati di funzionamento tuttavia presentano alcune differenze, quali: (i) la massima pressione di ammissione è generalmente più contenuta, in quanto per i cicli combinati esiste una pressione di evaporazione ottimale, mentre per i cicli a vapore semplici l'incremento di pressione è sempre favorevole al rendimento; (ii) la ripartizione di portata massica di vapore evolvente tra i primi e gli ultimi stadi è notevolmente diversa, in quanto in un ciclo convenzionale essa diminuisce durante l'espansione a seguito degli spillamenti rigenerativi, mentre in un ciclo *bottomer* non solo non vi sono spillamenti, ma viene aggiunto vapore proveniente dai livelli di media e bassa pressione (ovviamente per cicli combinati a tre livelli di

evaporazione); (iii) le turbine a vapore per cicli *bottomer* hanno potenze unitarie minori, ma, nonostante ciò, la sezione di bassa pressione risulta di progettazione critica, in virtù della grande portata massica e volumetrica.

#### **1.2.4 Condensatore**

Il condensatore è uno scambiatore di calore a superficie, a correnti incrociate. Il vapore in uscita dalla turbina lambisce i tubi al cui interno scorre il fluido refrigerante, e su questi condensa, venendo poi raccolto in un pozzo e rimesso nel circuito acqua-vapore tramite una pompa.

Il principale scopo del condensatore all'interno di un ciclo a vapore consiste proprio nel condensare il vapore, al fine di recuperare il fluido lavoro; questa operazione è importantissima, in quanto si utilizza acqua demineralizzata.

Il condensatore però svolge anche ulteriori compiti, quali attuare lo scarico di calore nell'ambiente, abbassare la pressione di scarico della turbina fino alle condizioni di vuoto tecnicamente raggiungibili (0,05 bar), ed effettuare la rimozione dei gas incondensabili dal fluido di lavoro.

Si può dunque notare come il condensatore sia un oggetto molto delicato, soprattutto per il fatto che opera ad una pressione inferiore a quella ambiente; ciò comporta un'adeguata progettazione a livello delle tenute, in quanto non deve entrarvi aria.

Da un punto di vista pratico, i condensatori per impianti in ciclo combinato non presentano aspetti concettuali e realizzativi differenti da quelli per i cicli a vapore convenzionali; infatti, anche nei cicli combinati possono venire utilizzati condensatori ad acqua di mare o fiume, condensatori con torre evaporativa oppure condensatori ad aria. La scelta tra queste tre soluzioni consiste nella disponibilità o meno di acqua nei pressi dell'impianto, nei costi di costruzione e nella pressione di condensazione che si vuole ottenere. La soluzione della condensazione a secco risulta più praticabile per un ciclo combinato rispetto ad uno convenzionale a vapore, in quanto, a parità di potenza elettrica, la potenza termica da dissipare al condensatore è molto inferiore, visto che i cicli combinati sono più efficienti di quelli a vapore.

Si deve infine evidenziare che la temperatura d'ingresso del liquido refrigerante influisce notevolmente sulle prestazioni del condensatore,

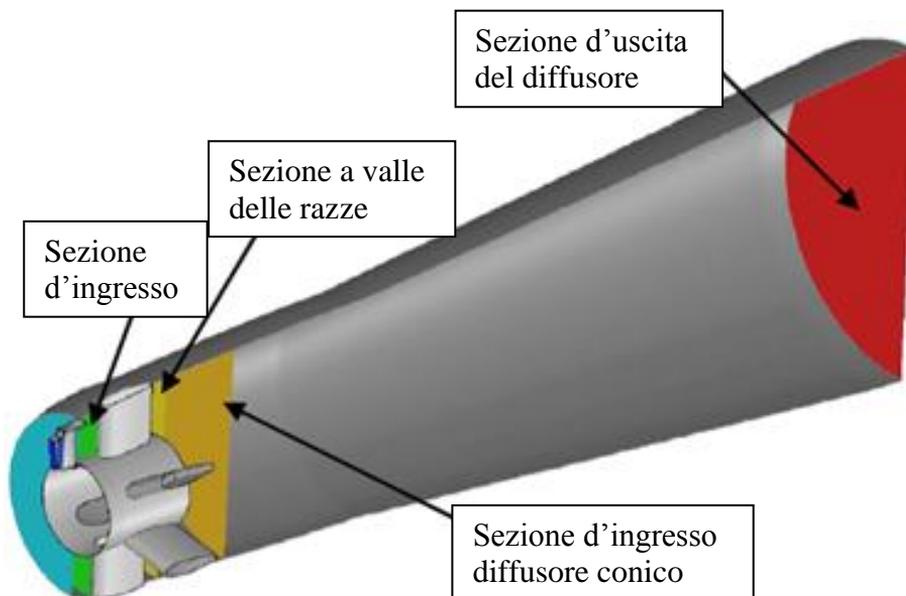
così come la temperatura d'uscita del liquido refrigerante che, a causa di vincoli ambientali, è soggetta a limiti legislativi.

### 1.2.5 Diffusore di scarico assiale

Il diffusore di scarico della turbina è un condotto attraverso il quale si realizza un aumento di pressione statica, ottenuto a spese dell'energia cinetica del flusso entrante.

Di converso, poiché la pressione all'uscita del diffusore è fissata dalle condizioni ambiente e dalle perdite di carico dei componenti a valle, quali camino o caldaia a recupero, il diffusore di scarico consente di abbassare la pressione statica allo scarico della turbina e quindi di generare una potenza più elevata.

Un diffusore di scarico assiale è generalmente costituito da una prima parte anulare, la quale contiene alcune razze profilate fisse; a valle del diffusore anulare vi è un diffusore conico di notevole lunghezza, come si può vedere in Fig. 1.7, che alimenta la caldaia a recupero oppure il camino.



**Fig. 1.7** Rappresentazione di un diffusore di scarico assiale.

Da un'analisi superficiale potrebbe risultare che questo organo ricopra un ruolo marginale nelle prestazioni dell'intero impianto, non avendo

parti mobili e quindi non producendo direttamente un effetto utile; in realtà il diffusore ricopre un ruolo molto importante, in quanto, se progettato in maniera corretta, esso incrementa le prestazioni del TG senza controindicazioni e senza spese costruttive rilevanti.

Infatti è necessaria e sufficiente una buona progettazione del diffusore per migliorare le prestazioni dell'intero ciclo, senza così dover aumentare, per esempio, il rapporto di compressione, che aumenta sì la potenza prodotta, ma in maniera ridotta in quanto aumenta anche il lavoro del compressore, oppure la temperatura in ingresso alla turbina, che comporta un consumo maggiore di combustibile.

Il compito del diffusore è fornire all'ingresso del GVR un flusso uniforme e con una velocità adeguata a permettere un efficiente scambio termico tra gas di scarico e acqua-vapore.

Le prestazioni di un diffusore di scarico dipendono da vari parametri, fra i quali la geometria del canale meridiano e delle razze, le condizioni aerodinamiche del flusso al suo ingresso e i fenomeni instazionari legati all'ultimo stadio di turbina.

In Fig.1.8 è riportato un particolare del canale meridiano, in cui vengono illustrati alcuni componenti che influiscono sulle prestazioni del diffusore, quali la conicità del *casing*, l'ogiva e le razze.



**Fig. 1.8** Particolare del canale meridiano del diffusore.

In particolare, per quanto riguarda la geometria del canale meridiano, risultano importanti la conicità del *casing* e l'estensione assiale dell'ogiva. A proposito della conicità del *casing*, si deve prestare attenzione a non imporre un angolo di apertura del cono troppo

elevato, in quanto si incorrerebbe in una separazione del flusso sulle pareti interne della cassa, ma neppure ad imporre un angolo troppo ridotto, perché si avrebbe un'estensione assiale del diffusore troppo elevata; riguardo all'estensione assiale dell'ogiva, si deve considerare il fatto che se essa risulta troppo corta, si creano delle zone di ricircolazione che influiscono notevolmente sull'aerodinamica del flusso all'interno del diffusore.

Un ruolo importante è ricoperto dalle razze, che hanno la funzione di raddrizzare parzialmente il flusso fortemente *swirlato* uscente dalla turbina e di sostenere il cuscinetto dell'albero lato turbina; esse devono essere in numero adeguato, in quanto un numero troppo alto comporta attriti troppo elevati, mentre un numero troppo ridotto comporta il non raddrizzamento del flusso.

Inoltre le razze devono essere progettate con un orientamento del *leading edge* e una curvatura adeguati; ovviamente questi saranno ottimizzati solo per una condizione, essendo le razze fisse.

Il parametro geometrico principale di un diffusore è l'*Area Ratio AR*, definito come il rapporto fra l'area circolare della sezione d'uscita rispetto all'area anulare della sezione d'ingresso; elevati valori di *AR* consentono, in linea teorica, di ottenere elevati recuperi di pressione.

Un altro parametro che influenza le prestazioni del diffusore sono le condizioni aerodinamiche del flusso all'ingresso, in quanto al loro variare si può presentare una separazione del flusso sulle razze, sull'ogiva o sulla cassa; infatti, l'angolo di flusso che impatta sulle razze varia notevolmente con il carico della turbina, per cui la razza potrebbe trovarsi ad operare con un carico aerodinamico eccessivo, verificandosi di conseguenza la separazione del flusso.

Anche la distribuzione radiale della pressione totale assoluta all'uscita della turbina ha un elevato impatto sul funzionamento del diffusore; infatti, una distribuzione decrescente della pressione totale (con un massimo verso l'ogiva) tende a fare separare il flusso all'uscita della razza in corrispondenza del *casing*. Il flusso infatti avrà elevata energia in corrispondenza dell'ogiva, ma poca al *casing*.

Allo stesso modo, una distribuzione di pressione totale con un massimo verso il *tip* della pala tenderà ad indurre la separazione del flusso sull'ogiva del diffusore.

Le prestazioni di un diffusore possono essere espresse in termini di coefficiente di recupero di pressione statica  $C_p$  e di coefficiente di perdita di pressione totale. Il primo parametro rappresenta una misura

della capacità del diffusore di incrementare la pressione statica del flusso, mentre il secondo rappresenta la conseguente perdita. La definizione più corretta del coefficiente di recupero di pressione statica  $C_p$  è:

$$C_p = \frac{p_{Diff,exh} - p_{Diff,in}}{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{Diff,in}} \quad (1.3)$$

dove  $V$  è la velocità del flusso in ingresso al diffusore [16], [17]. Essa correla l'aumento di pressione nel diffusore all'energia cinetica del flusso all'ingresso del diffusore stesso. È possibile definire in modo analogo il coefficiente di recupero ideale relativo ad un fluido incomprimibile senza perdite. Si dimostra facilmente la seguente relazione:

$$C_p = 1 - \frac{1}{AR^2} \quad (1.4)$$

attraverso la quale è possibile definire l'efficienza del diffusore:

$$\varepsilon = \frac{C_p}{C_{p_{id}}} \quad (1.5)$$



## CAPITOLO 2

### Tecnica ottica di misura *Particle Image Velocimetry*

## 2. Tecnica ottica di misura PIV

La *Particle Image Velocimetry* è una delle più recenti tecniche per la misura del campo di moto di un fluido; come verrà descritto in seguito, essa sta avendo un utilizzo sempre più diffuso grazie alla sua caratteristica di non interferire con il flusso in esame e al fatto che restituisce una misura globale del campo di moto, a differenza di tutte le altre tecniche di misura che restituiscono una misura puntuale.

La maggior parte delle informazioni fornite nel capitolo sono state tratte da [11].

### 2.1 Generalità sulla PIV

La *Particle Image Velocimetry* (PIV) è un metodo ottico utilizzato per la misura del campo di moto di un fluido. Questa tecnica fornisce le coordinate del vettore velocità in corrispondenza del piano di misura.

Da un punto di vista strettamente applicativo, la tecnica PIV è relativamente recente, in quanto il suo sviluppo è fortemente connesso ai progressi nei campi dell'ottica, dell'elettronica, dell'informatica e delle apparecchiature video; i recenti sviluppi hanno portato a poter disporre di telecamere ad elevata frequenza di acquisizione, con le quali, per esempio, si è riusciti a seguire in maniera molto soddisfacente l'andamento di strutture vorticosi.

L'apparato sperimentale per la *Particle Image Velocimetry* è costituito da un impianto di iniezione del flusso, un laser che illumina il piano di misura, una *timer box* che sincronizza l'impulso laser con quello di una o due telecamere puntate sul piano di misura, ed un computer che elabora le immagini ottenute dalle telecamere tramite un software specifico.

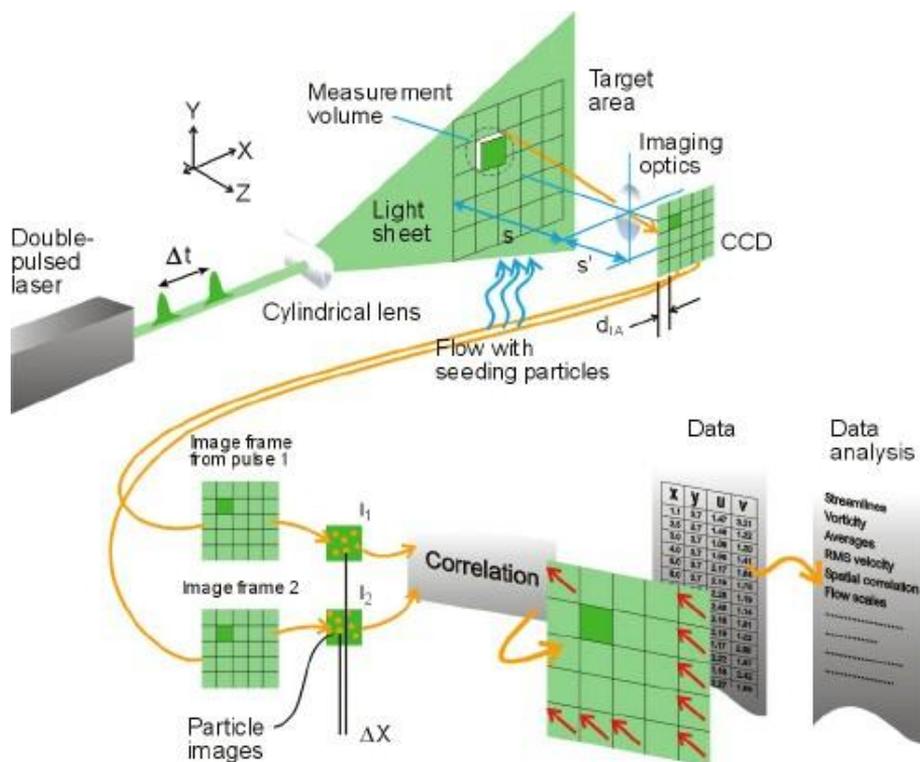
In figura 2.1 è rappresentato un tipico apparato sperimentale per la registrazione di immagini PIV.

La misura della velocità si basa sulla stima dello spostamento delle particelle tra due impulsi luminosi; tale stima viene effettuata da un sistema di elaborazione di immagini, attraverso un trattamento statistico dei dati ottenuti, che consiste nell'effettuare un algoritmo di cross-correlazione sui dati digitali ricavati. Una volta noti il vettore spostamento, l'intervallo di tempo tra i due impulsi luminosi e il fattore di scala, si ricava il vettore velocità. È evidente dunque che la velocità misurata è quella delle particelle iniettate e non

direttamente quella del flusso. Il campo di moto misurato è istantaneo e, nel caso in cui si fosse interessati al campo medio della velocità, questo può essere ottenuto considerando una collezione di un numero di immagini sufficientemente alto e facendone la media.

Il risultato del post processing è un'immagine digitale nella quale è mostrato il campo di velocità, rappresentato da un numero di vettori velocità, che dipende dalla scelta dell'estensione dell'area di interrogazione e dalla griglia di interrogazione. Infatti il processore applica il trattamento statistico ad ogni sottoinsieme del piano dell'immagine, detto appunto area di interrogazione.

È importante evidenziare che la PIV è una tecnica di misura ottica e, di conseguenza, non intrusiva, ossia non altera il moto del flusso oggetto dello studio.



**Fig. 2.1** Schema di un apparato sperimentale per la *Particle Image Velocimetry* in una galleria del vento [8].

La non intrusività di questa tecnica, però, non permette di valutare direttamente la velocità del flusso studiato, ma, come detto in precedenza, solamente la velocità delle particelle traccianti in esso; si effettua quindi una misura indiretta della velocità.

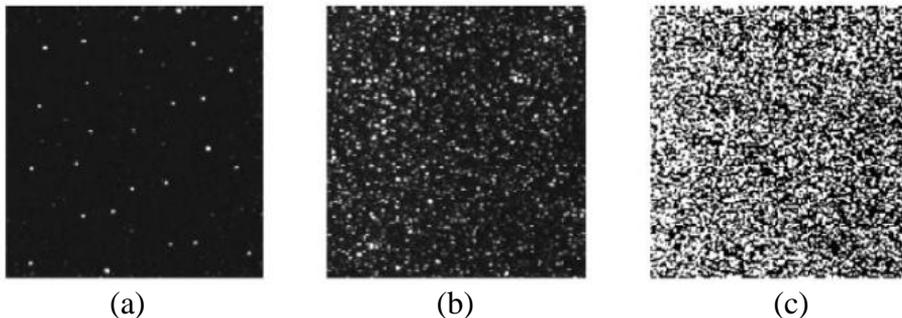
Risultano fondamentali il processo di *seeding* e le caratteristiche chimico-fisiche dell'inseminante.

In particolare, l'impianto di inseminazione deve fornire delle particelle traccianti aventi un diametro sufficientemente piccolo da seguire il moto del fluido; generalmente, il diametro dei traccianti è dell'ordine dei  $\mu\text{m}$ , proprio per ridurre gli effetti inerziali e gravitazionali sulle particelle.

Inoltre si deve effettuare una inseminazione che raggiunga ogni parte del campo di moto, prestando anche attenzione alla concentrazione delle particelle, ossia alla quantità di inseminante introdotta nel flusso.

Nello specifico, in relazione al numero di particelle presenti nell'immagine, si possono distinguere tre differenti metodi [1], mostrati in Fig. 2.2.

Nel caso di bassa concentrazione si parla di *Particle Tracking Velocimetry* (PTV), nella quale è possibile rilevare l'immagine della singola particella e associare l'immagine corrispondente alla stessa particella tra i due differenti fotogrammi; nel caso di media concentrazione si parla di PIV e si utilizzano metodi statistici tradizionali per valutare i record ottenuti; in caso di elevata concentrazione si parla di *Laser Speckle Velocimetry* (LSV), nella quale si perde completamente la corrispondenza di una particella tra le due immagini.



**Fig. 2.2** Metodi diversi di concentrazione di particelle nell'immagine:  
(a) PTV, (b) PIV, (c) LSV.

Le particelle traccianti devono essere illuminate in un piano di misura in due istanti di tempo successivi attraverso un foglio di luce laser, ottenuto dalla trasformazione di un raggio laser mediante un sistema di lenti cilindriche.

La luce riflessa dalle particelle viene registrata dal sensore di una telecamera digitale, ottenendo due fotogrammi distinti, che verranno successivamente elaborati; il laser deve dunque essere sufficientemente potente da riuscire ad "impressionare" il sensore della telecamera digitale con l'esigua luce diffusa dalle piccole particelle traccianti, ma deve anche riuscire a produrre un impulso luminoso di breve durata, al fine di "congelare" il moto delle particelle durante l'esposizione, per evitare la riproduzione di scie nell'immagine.

Il tempo di ritardo tra due impulsi luminosi è funzione della velocità del flusso, in quanto deve essere sufficiente ad individuare lo spostamento delle particelle tra le due immagini digitali sulle quali agirà il software, ma anche ridotto per evitare che le particelle con una componente di velocità ortogonale al piano di misura lascino, tra le due illuminazioni successive, il volume illuminato; il campo di misura infatti è un volume e non un piano, in quanto la lama laser ha uno spessore non trascurabile.

In particolare, se l'intervallo è eccessivamente breve, come già detto, lo spostamento è troppo piccolo e i disturbi dovuti al "rumore" e alla non perfetta correlazione tra le coppie di immagini diventano preponderanti rispetto allo spostamento reale stesso: come effetto, si ha un campo di velocità che non corrisponde a quello reale. Solitamente in campo sperimentale si utilizzano valori di  $\Delta t$  dell'ordine di una decina di  $\mu s$ .

Risulta dunque fondamentale sincronizzare i tempi del laser con quelli della telecamera digitale; questa operazione viene eseguita dalla *timer box*, ossia dal sincronizzatore.

Una volta che le telecamere hanno registrato i due fotogrammi, si elaborano questi ultimi, valutando lo spostamento delle particelle attraverso un algoritmo di cross-correlazione, come spiegato in precedenza.

Con la *Particle Image Velocimetry* si possono effettuare misure 2D oppure 3D. Nel caso di misura bicomponente, si ottengono le coordinate del vettore velocità che giacciono sul piano di misura, ossia il piano del campo di moto illuminato dal fascio laser, mentre in caso di misura tricomponente, si ottengono tutte e tre le coordinate del vettore velocità; le due principali giacciono sul piano di misura, mentre

la terza viene determinata in direzione ortogonale al piano stesso, sfruttando lo spessore della luce laser che non è infinitamente piccola, ma possiede, come già accennato, essa stessa uno spessore.

Le misure 2D del campo di moto si ottengono attraverso la PIV tradizionale, ossia posizionando la telecamera ortogonale al piano di misura illuminato dal laser. Tale configurazione presenta il limite di non poter essere utilizzata nello studio di moti fortemente tridimensionali, in quanto, non fornisce la componente del vettore velocità ortogonale al piano di misura.

Per superare tale limite, e quindi per effettuare misure tridimensionali, sono stati sviluppati alcuni metodi, come la PIV stereoscopica, la PIV olografica e la PIV *dual-plane*. La configurazione più utilizzata è la PIV stereoscopica, nella quale si devono utilizzare due telecamere puntate sullo stesso piano di misura, ma non più ortogonali ad esso, bensì aventi un angolo compreso tra i 30° e i 45°, rispetto alla perpendicolare del piano di misura.

## **2.2 Particolarità della PIV rispetto ad altre tecniche di misura**

Come detto in precedenza, la tecnica PIV è una tecnica di misura ottica non intrusiva, così come la *Laser Doppler Velocimetry*, dunque, non influenza fisicamente il campo di moto oggetto dello studio, a differenza di altre tecniche di misura della velocità come il tubo di Pitot e l'anemometro a filo caldo (HWA, *Hot Wire Anemometry*). Questa caratteristica consente di utilizzare la tecnica PIV anche per misure di flussi ad alta velocità in presenza di onde d'urto oppure all'interno dello strato limite vicino ad una parete, senza interferire con esso e di conseguenza alterare la misura, ma non consente di effettuare misure dirette del campo di velocità.

Vi è poi una caratteristica che rende la PIV unica tra le tecniche di misura della velocità; essa infatti è la sola in grado di misurare l'intero campo di moto, mentre tutte le altre tecniche effettuano solo misure puntuali. Essa infatti fornisce la misura di mille e più vettori velocità nello stesso istante di tempo e ciò consente la visualizzazione di strutture vorticosi anche nel caso di flussi instazionari.

Accanto agli evidenti pregi appena descritti, ossia di essere una tecnica non intrusiva in grado di fare misure tridimensionali di un intero campo di moto, vi sono da considerare anche degli aspetti

apparentemente “secondari”, ma che rendono questa tecnica molto costosa e complicata da utilizzare, rispetto ad altre tecniche.

Infatti, così come per la tecnica LDV, è necessaria una strumentazione molto più complessa per la realizzazione della misura, in quanto, come già detto, si ha bisogno di un laser, un impianto di *seeding*, una o più telecamere ed un apposito software, mentre per altre tecniche, come ad esempio l’anemometro a filo caldo, è sufficiente il sensore ed il computer con il programma dedicato.

Infine, si evidenziano due problemi “indiretti” che si possono verificare nelle misure con tecnica PIV: il primo riguarda possibili riflessioni in certe zone della camera di prova, mentre il secondo consiste nella realizzazione degli accessi ottici necessari per le telecamere ed il laser, che non sempre sono di facile realizzazione, in particolare se il componente che si vuole studiare presenta geometrie complesse.

Quindi, oltre agli evidenti aggravii sui costi dell’impianto di misura, bisogna anche considerare le maggiori difficoltà di messa a punto e di presa delle misure; infatti ogni fase della tecnica deve essere ottimizzata correttamente, soprattutto in base al flusso che si vuole studiare.

In Tab.1 sono infine riassunte le differenze tra i vari metodi di misura della velocità, nella quale è importante notare l’elevato costo della tecnica PIV rispetto a tutti gli altri metodi di misura.

Dalla tabella infine si può mettere in evidenza come la PIV abbia una risoluzione temporale non molto elevata, dell’ordine di pochi kHz, e di conseguenza risulta inadatta a rilevare fenomeni ad alta frequenza. Negli ultimi anni però, grazie all’importante sviluppo tecnologico riguardante laser e telecamere digitali, questa tecnica sta avendo un forte sviluppo e si stanno ottenendo evidenti miglioramenti anche per quanto riguarda la risoluzione temporale.

Lo sviluppo tecnologico inoltre riguarda anche un altro aspetto che finora rende la PIV inferiore ad altre tecniche di misura, ossia la risoluzione spaziale; questa infatti dev’essere la più elevata possibile, in modo da individuare possibili gradienti di velocità presenti nel flusso. Per aumentare la risoluzione spaziale bisogna far in modo che l’estensione delle aree di interrogazione sia la minore possibile, e questo può essere ottenuto attraverso lo sviluppo tecnologico del sensore della telecamera e del software del computer.

Metodo	Componenti	Tipo	Intrusività	Linearità	Calibrazione	Robustezza	Risol. temporale (s <sup>-1</sup> )	Risol. spaziale (m <sup>-1</sup> )	Costo (€)
PITOT	1	locale	SI	NO	NO	SI	1	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>
HWA	1-3	locale	SI	NO	SI	NO	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup>
LDA	1-3	locale	NO	SI	NO	SI	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	5 10 <sup>4</sup>
PIV	2-3	globale	NO	SI	NO	SI	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>

**Tab.1** Confronto tra metodi di misura della velocità.

## 2.3 Particelle traccianti

Come è già stato detto in precedenza, al fine di effettuare misure con la tecnica PIV, è necessario inseminare il flusso che si vuole studiare con delle particelle traccianti.

Questa procedura ricopre dunque un ruolo fondamentale nell'intero processo, in quanto i risultati della tecnica PIV si basano proprio sulla determinazione dello spostamento, e di conseguenza della velocità, che le particelle traccianti subiscono tra i due istanti di tempo in cui vengono scattate le foto digitali. E' già stato fatto notare che deve essere trovato un compromesso tra le caratteristiche fisiche ed ottiche delle particelle, in quanto esse devono seguire fedelmente il flusso, ma allo stesso tempo devono diffondere una quantità di luce sufficiente ad "impressionare" il sensore della telecamera digitale.

Di conseguenza le due fondamentali caratteristiche che deve possedere un buon tracciante sono: capacità di riflettere la luce e capacità di seguire il moto del mezzo nel quale è sospeso, senza interferire con esso.

Di seguito vengono analizzate dettagliatamente le caratteristiche meccaniche e di diffusione della luce delle particelle traccianti.

### 2.3.1 Proprietà meccaniche delle particelle traccianti

Indipendentemente dalla natura del fenomeno indagato, le particelle traccianti devono essere costituite da sostanze chimicamente inerti rispetto al fluido in esame e devono rispettare, per motivi di sicurezza, le condizioni di non tossicità e non corrosività.

Il moto delle particelle sospese in un fluido dipende da diversi fattori quali: forma delle particelle, dimensioni, densità relativa, concentrazione nel fluido, forze esterne.

La forma delle particelle influenza il valore del coefficiente d'attrito, la dimensione e la densità influenzano la risposta alle variazioni di velocità del fluido che le circonda, la concentrazione determina la probabilità di interazione tra particelle, e quindi deve essere tale per cui vi sia una distanza media tra le particelle sufficiente per poter trascurare interazioni e urti.

Siccome la tecnica PIV si basa sul rilevare lo spostamento delle particelle traccianti, risulta fondamentale la capacità dei traccianti di seguire le medesime leggi di moto del fluido, pertanto esse devono avere proprietà tali da rendere trascurabile l'effetto delle forze cui sono sottoposte. Se si indicano con  $u_p$  la velocità dei traccianti e con  $u$  quella della corrente, l'errore che si commette, detto errore di scorrimento, è definito come:

$$\varepsilon_S = \frac{u_p - u}{u} \quad (2.1)$$

Nella scelta delle caratteristiche fisiche dei traccianti, un ruolo rilevante è rivestito dalla loro densità, in quanto una forte differenza tra la densità del fluido e quella delle particelle introdurrebbe un rilevante errore, dovuto all'effetto delle forze gravitazionali.

Nonostante, comunque, gli effetti di quest'ultime vengano trascurati nella maggior parte dei casi, è utile definire la velocità  $u_g$  indotta da detti effetti, al fine di valutare il comportamento delle particelle in presenza di una generica accelerazione  $a$  del flusso. Per particelle di dimensioni sufficientemente piccole è lecito assumere per esse una forma sferica. Per numeri di Reynolds molto piccoli (minori dell'unità, se si prende come lunghezza di riferimento il diametro della particella) e supponendo che il numero di particelle per unità di volume sia sufficientemente basso da poter trascurare le mutue interazioni, si può utilizzare la legge di resistenza di Stokes, ottenendo l'espressione:

$$u_g = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho) g}{18 \mu} \quad (2.2)$$

in cui  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $\mu$  è la viscosità dinamica del fluido,  $\rho_p$  e  $\rho$  sono rispettivamente la densità delle particelle traccianti e del fluido e  $d_p$  è il diametro della particella.

Analogamente all'equazione (2.2), nel caso di una particella in un fluido animato da moto uniformemente accelerato si ottiene per la velocità di scorrimento  $u_s$  la seguente espressione:

$$u_s = u_p - u = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho) a}{18 \mu} \quad (2.3)$$

Dall'equazione (2.3) si può notare come, in presenza di una significativa differenza di densità tra tracciante e fluido, le particelle traccianti dovrebbero possedere un diametro molto piccolo, al fine di seguire fedelmente il moto del fluido e fornire una misura attendibile del campo di moto, fattore che però diminuirebbe la luce riflessa dalle stesse.

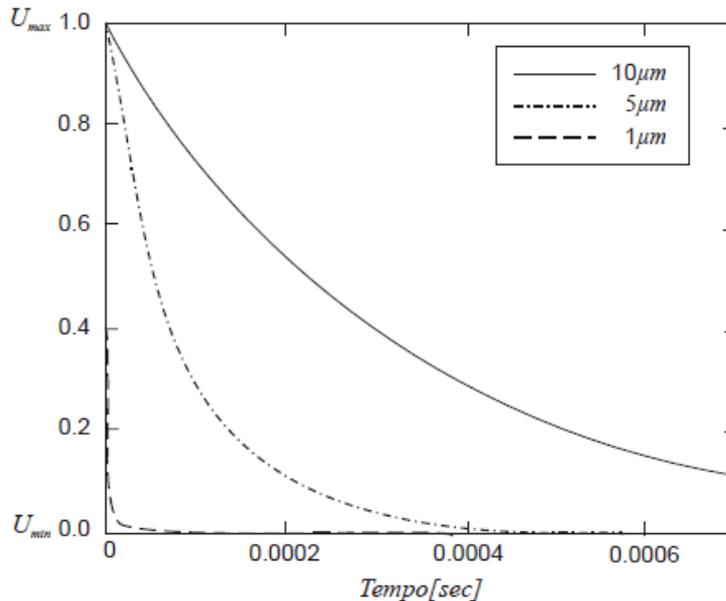
Per valutare la capacità delle particelle di seguire il flusso anche in presenza di fenomeni instazionari, come le onde d'urto, si può calcolare la risposta al gradino di  $u_p$ . Se la densità della particella è molto maggiore di quella del fluido, sotto le ipotesi adottate finora, la risposta al gradino segue tipicamente una legge esponenziale:

$$u_p(t) = u [1 - \exp(-t/\tau_s)] \quad (2.4)$$

dove  $\tau_s$  è il tempo di rilassamento della particella, dato da:

$$\tau_s = \frac{d_p^2 \rho_p}{18 \mu} \quad (2.5)$$

Il tempo di rilassamento è uno strumento utile alla stima della tendenza delle particelle a seguire il campo di moto imposto dal fluido. La risposta al gradino di particelle di diverso diametro immerse in aria sottoposta a forte decelerazione è mostrata in Fig. 2.3, dalla quale si evince che particelle con diametro minore rispondono in maniera più veloce alle variazioni di velocità del campo di moto [11]; ciò risulta fondamentale nel caso di flussi instazionari. Solitamente il diametro delle particelle assume valori non inferiori a  $1\mu m$ .



**Fig.2.3** Andamento della risposta a gradino, in funzione del tempo, per particelle d'olio in un flusso d'aria sottoposto a forte decelerazione.

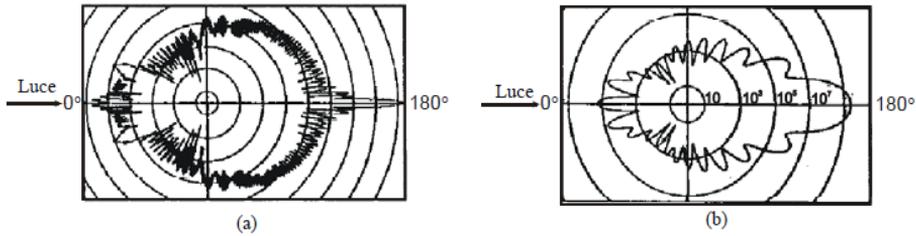
### 2.3.2 Proprietà ottiche delle particelle traccianti

Oltre alle caratteristiche meccaniche sono molto importanti anche le caratteristiche ottiche delle particelle traccianti, in quanto, come si vedrà in seguito, per migliorare l'affidabilità della misura è necessario avere immagini ad elevato contrasto, ossia le immagini delle particelle traccianti devono avere un'elevata intensità luminosa. Quest'ultima è direttamente proporzionale al potere di diffusione della luce, perciò spesso è più efficace ed economico aumentarla scegliendo particelle con potere riflettente più elevato, piuttosto che aumentare la potenza del laser.

In generale, si può affermare che l'intensità della luce diffusa dalle particelle è funzione del rapporto tra l'indice di rifrazione delle particelle e quello del mezzo circostante, delle dimensioni, della forma e dell'orientazione delle particelle, della polarizzazione e dell'angolo di osservazione.

Per particelle sferiche con un diametro maggiore della lunghezza d'onda della luce incidente, si può utilizzare la teoria di Mie [14] sulla diffusione della luce (*scattering*).

La Fig. 2.4 mostra la distribuzione polare dell'intensità luminosa della luce diffusa da particelle d'olio di diametro differente in aria alla lunghezza d'onda  $\lambda=532nm$ .



**Fig. 2.4** Distribuzione polare dell'intensità della luce diffusa da particelle di olio in aria per  $\lambda=532nm$  secondo la teoria di Mie. (a)  $d=10\mu m$ . (b)  $d=1\mu m$ .

La diffusione alla Mie può essere caratterizzata da un diametro normalizzato  $q$ , definito come:

$$q = \pi \frac{d_p}{\lambda} \quad (2.6)$$

dove  $d_p$  è il diametro della particella e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della luce incidente.

Per  $q > 1$  il rapporto tra la luce diffusa dietro e davanti alla particella è dell'ordine di  $100 \div 1000$ , per  $q < 1$  il rapporto si mantiene sull'unità.

Per valori crescenti di  $q$ , il rapporto tra l'intensità della luce diffusa in avanti rispetto a quella indietro aumenta rapidamente.

Da un punto di vista pratico, si può notare che l'intensità della radiazione incidente non è bloccata dalle particelle, ma è dispersa in ogni direzione; la distribuzione polare della luce diffusa dalla particella presenta il massimo di intensità luminosa a  $180^\circ$ , quindi sarebbe vantaggioso registrare le immagini dal lato verso cui avanza il fascio di luce, cioè proprio a  $180^\circ$ , ma, a causa delle limitazioni imposte dalla profondità di campo, ciò non è possibile; di solito si effettuano registrazioni a  $90^\circ$  rispetto al fascio di luce.

Tale fenomeno fisico è da tenere particolarmente in considerazione nel caso in cui si effettuino misure con PIV stereoscopica, poiché, dovendo utilizzare due telecamere inquadranti lo stesso piano secondo angoli di osservazione differenti, ma simmetrici, si deve evitare di orientare ciascuna delle due telecamere verso zone poco illuminate; si hanno dunque ulteriori limiti sulla scelta dell'angolo di osservazione.

Inoltre, come si può vedere dalla Fig. 2.4, l'intensità della luce diffusa aumenta all'aumentare del diametro della particella, essendo l'intensità diagrammata in scala logaritmica e rappresentata in modo che due cerchi adiacenti differiscano di un fattore pari a 100; si deve però anche registrare un aumento del numero di massimi e minimi della distribuzione polare, ossia una distribuzione molto più irregolare.

L'intensità media cresce bruscamente con  $q^2$ , mentre l'efficienza della diffusione dipende fortemente dal rapporto tra l'indice di rifrazione delle particelle e quello del mezzo. È allora determinante la conoscenza del mezzo; l'acqua, per esempio, possiede un indice di rifrazione molto più alto di quello dell'aria. Allora, a parità di dimensione dei traccianti, la diffusione delle particelle in aria è almeno un ordine di grandezza superiore a quella dell'acqua; si devono quindi utilizzare particelle di dimensioni maggiori, se lo studio prevede come mezzo l'acqua. Ciò comunque non crea problemi, in quanto si possono facilmente avere densità simili tra tracciante e fluido.

Come è già stato detto, le particelle diffondono la luce laser, quindi esse sono illuminate, oltre che dalla luce diretta, anche dalla luce diffusa dal gran numero di particelle presenti nel flusso e ciò contribuisce ad aumentare l'illuminazione di ogni singola particella. Se ne deduce che si può aumentare l'efficienza della diffusione non solo incrementando le dimensioni, ma anche aumentandone la concentrazione. L'impiego di una concentrazione elevata è però limitato da due problemi: il primo riguarda l'aumento del rumore di fondo, che comporta un aumento del rumore nelle registrazioni; il secondo è dovuto al fatto che, utilizzando, come di solito accade, particelle di dimensioni diverse, non è sicuro che il numero di particelle visibili aumenti semplicemente aumentando quelle di dimensioni più grandi. Infatti, dal momento che le immagini delle particelle più grandi dominano chiaramente l'analisi del campo, diventerebbe difficile fare stime accurate sulle dimensioni effettive delle particelle e sul corrispondente errore di scorrimento.

## 2.4 Generazione e iniezione delle particelle traccianti

Nonostante in alcuni esperimenti possano risultare sufficienti, ai fini della misura, i traccianti naturali presenti nell'aria, quali le polveri, nella maggior parte degli esperimenti è necessario aggiungere particelle traccianti, in modo da poter ottenere un sufficiente contrasto dell'immagine ed un controllo più preciso delle dimensioni delle particelle.

Per quanto riguarda gli esperimenti in flussi d'aria, o in generale gassosi, l'immissione di particelle traccianti è spesso critica sia per la qualità e la fattibilità delle misure, sia per la salute degli operatori che, per esempio, in prossimità di gallerie del vento in circuito aperto, respirano la miscela tra aria e particelle traccianti.

In Tab. 2 sono elencati i materiali più utilizzati per gli esperimenti in flussi gassosi.

Si deve porre particolare attenzione alla fase di *seeding*, in quanto le particelle di insemillante liquido tendono ad evaporare piuttosto rapidamente, mentre quelle solide sono difficili da disperdere e tendono facilmente ad agglomerarsi; questo dev'essere tenuto in conto nella scelta del punto di insemillazione, con le particelle che non possono essere immesse troppo a monte del piano di misura.

Tipo	Materiale	Diametro medio in $\mu m$
Solido	Polistirene	0.5 – 10
	Alluminio	2 – 7
	Magnesio	2 – 5
	Microsfere di vetro	30 – 100
	Granuli di rivestimenti sintetici	10 – 50
	Diottilfetalato	1 – 10
Fumo		< 1
Liquido	Oli vari	0.5 – 10

**Tab. 2** Materiali traccianti utilizzati per flussi gassosi.

L'immissione deve inoltre avvenire in maniera tale da non disturbare significativamente il flusso e da ottenere una distribuzione omogenea di particelle.

Poiché, spesso, il livello di turbolenza nelle camere di prova non consente un mescolamento sufficiente tra fluido e particelle, quest'ultime devono essere iniettate da un numero elevato di aperture praticate su un distributore, che in molti casi è costituito da un tubo dotato di minuscoli forellini; sono dunque necessarie particelle che possano essere trasportate all'interno di piccoli tubi.

Per quanto riguarda i traccianti liquidi, questi possono essere prodotti direttamente negli atomizzatori, oppure vaporizzati e successivamente condensati nei così detti generatori a condensazione [7], [9].

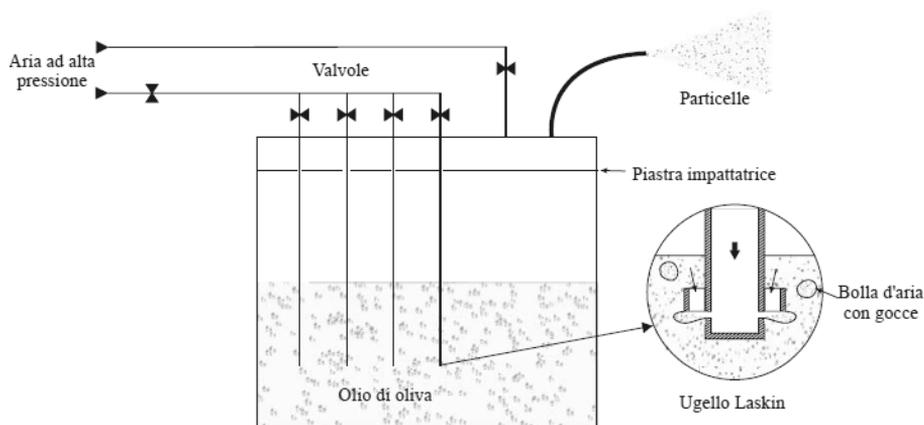
Il sistema di generazione di particelle maggiormente utilizzato nelle misure PIV in flussi d'aria consiste in un generatore con ugello di Laskin con olio vegetale, le cui particelle offrono il vantaggio di non essere tossiche, di restare sospese in aria per ore e di non cambiare significativamente dimensione al variare delle condizioni esterne.

Come si può vedere in Fig. 2.5, un tipico generatore di aerosol è costituito da un contenitore con due ingressi per l'aria ed un'uscita per l'aerosol. Alcuni condotti per l'immissione di aria, sono immersi nell'olio vegetale contenuto nel contenitore e ciascuno tubo, collegato all'alimentazione dell'aria per mezzo di un altro tubo, è dotato di una valvola. I condotti sono chiusi all'estremità inferiore e ciascuno è dotato di quattro ugelli Laskin di diametro pari ad  $1\text{mm}$  ed uniformemente distanziati lungo la circonferenza [2]. Una piastra impattatrice orizzontale è posizionata all'interno del contenitore in modo da formare una piccola cavità di  $2\text{mm}$  tra la piastra circolare e la parte interna delle pareti del contenitore. Il secondo ingresso per l'aria e l'uscita dell'aerosol sono collegati direttamente alla parete superiore del contenitore; due sonde misurano la pressione all'ingresso degli ugelli ed all'interno del contenitore rispettivamente. L'aria compressa, con pressione superiore di 0.5-1.5 bar rispetto a quella di uscita, è iniettata negli ugelli Laskin creando bolle d'aria all'interno del liquido. A causa degli sforzi viscosi generati dai getti sonici, piccole gocce di liquido sono generate e trasportate all'interno delle bolle verso la superficie di separazione dell'olio. Le particelle grandi vengono bloccate dalla piastra impattatrice, mentre le particelle piccole passano attraverso la fessura raggiungendo l'uscita dell'aerosol. Il numero di particelle può essere controllato per mezzo delle quattro valvole all'ingresso; la loro concentrazione, invece, può essere diminuita immettendo un maggiore quantitativo di aria dal secondo ingresso. La

dimensione delle particelle dipende principalmente dal tipo di liquido utilizzato e, in misura minore, dalla pressione esercitata all'interno degli ugelli.

Generalmente vengono utilizzati oli vegetali in quanto non sono tossici; con l'utilizzo di tali traccianti si possono produrre particelle con un diametro di circa  $1\mu\text{m}$ .

In Fig. 2.6 è mostrato lo schema di un atomizzatore con ugello Laskin con olio vegetale.



**Fig. 2.5** Generatore di particelle traccianti di olio con ugello Laskin.

## 2.5 Sorgente di luce

Al fine di illuminare le particelle immerse nel flusso, come è già stato detto in precedenza, è necessaria una sorgente di luce molto potente, in modo che la luce diffusa dalle particelle traccianti sia sufficiente ad "impressionare" il sensore della telecamera digitale.

Il laser, acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificazione della luce mediante emissione stimolata di radiazione), è largamente la tecnologia più utilizzata nelle tecniche PIV, per la sua capacità di emettere luce monocromatica con una grande densità di energia, che può essere facilmente concentrata in un sottile fascio di luce per illuminare e registrare le particelle traccianti senza aberrazioni cromatiche.

Come dice il nome stesso, i laser si basano sull'emissione stimolata di radiazione.

Dalla meccanica quantistica è infatti noto che un atomo può trovarsi a diversi livelli energetici. Indicando con  $E_1$  il livello energetico di partenza e con  $E_2$  il livello successivo ad energia maggiore, ogni atomo può passare da un livello all'altro soltanto assorbendo o emettendo sotto forma di fotone una quantità discreta di energia data dalla legge di Planck :

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (2.7)$$

in cui  $h$  è la costante di Planck pari a  $6.6 \cdot 10^{-34} J \cdot s$  e  $\nu$  è la frequenza caratteristica del fotone incidente o emesso.

Di solito, un atomo eccitato allo stato  $E_2$  ritorna spontaneamente allo stato  $E_1$  emettendo un fotone diretto in maniera casuale; in questo caso si parla di *emissione spontanea*. Quando l'atomo, invece, è investito da un fotone avente energia  $h\nu$  possono aver luogo due processi: un atomo allo stadio non eccitato assorbe il fotone passando al livello eccitato (*assorbimento*) oppure un atomo allo stadio eccitato passa allo stadio non eccitato emettendo in fase con il fotone incidente un altro fotone di pari energia; in quest'ultimo caso si parla di *emissione stimolata* e la luce emessa risulta amplificata. Questo è il tipo di emissione ricercata nei laser.

Una descrizione dettagliata è fornita da [11].

Un laser è costituito da tre elementi principali: il "materiale attivo", il sistema di pompaggio ed il risonatore ottico.

Il *materiale attivo* può essere costituito da un gas atomico o molecolare, da un semiconduttore oppure da un materiale solido; questo viene eccitato dal sistema di pompaggio per mezzo di energia chimica o elettromagnetica, con conseguente emissione di radiazioni, le quali vengono infine amplificate dal *risonatore ottico*.

Quest'ultimo è generalmente costituito da due specchi posti uno di fronte all'altro alle estremità opposte del mezzo attivo, ed ha la funzione di amplificare il fascio di luce laser. La radiazione emessa, infatti, viene riflessa avanti ed indietro dagli specchi e si amplifica ad ogni passaggio nel mezzo attivo, fino a raggiungere un processo stazionario. Il risonatore ha anche il compito di amplificare soltanto le radiazioni di lunghezze d'onda  $\lambda$  rispettanti la condizione (2.8):

$$L = \frac{m\lambda}{2n} \quad (2.8)$$

in cui  $L$  è la lunghezza della cavità risonante,  $n$  è l'indice di rifrazione del mezzo ed  $m$  è un numero intero.

La *camera di pompaggio* contiene una bacchetta di cristallo Nd:YAG ed una lampada a Krypton lineare; questi due componenti sono circondati da materiale ceramico riflettente in modo da ottenere un efficiente pompaggio ottico, mentre appositi filtri assorbono la radiazione ultravioletta emessa dalla lampada.

Lo *specchio di uscita*, nella maggior parte dei casi, ha la superficie rivolta verso la cavità parzialmente riflettente, mentre la superficie rivolta all'esterno è dotata di rivestimento antiriflettente.

I laser più diffusi nelle misurazioni con tecnica PIV sono quelli a stato solido, come il laser a Nd:YAG (acronimo di Neodimium-Yttrium-Aluminum-Garnet); si tratta di un laser il cui mezzo attivo è costituito da un cristallo di  $Y_3Al_5O_{12}$  (detto comunemente YAG) drogato con ioni Neodimio  $Nd_{3+}$  in sostituzione degli ioni Yttrio  $Y_{3+}$ . E' utilizzato soprattutto per le ottime proprietà termiche e meccaniche, per le alte frequenze di ripetizione, per l'elevata amplificazione e per la bassa energia di pompaggio. Quest'ultima proprietà è dovuta al fatto che il sistema è a quattro livelli di energia.

Alle normali temperature di esercizio il laser emette ad una lunghezza d'onda  $\lambda=1064nm$ ; per ottenere luce nella lunghezza d'onda del visibile, invece, si adopera un duplicatore di frequenza che consente di ottenere la metà dell'energia iniziale a  $\lambda=532nm$ .

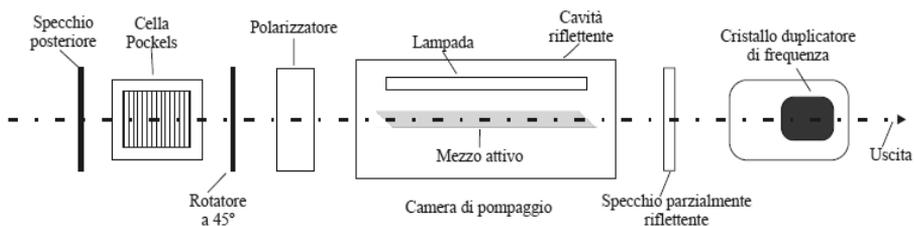
Un comune laser Nd:YAG utilizzato per misure PIV ha una frequenza di ripetizione oscillante tra 10 e 50  $Hz$ , una durata dell'impulso da 5 a 10  $ns$  ed emette per ogni pulsazione una quantità di energia attorno ai 400  $mJ$ .

Per ottenere un impulso comandato dal *timer* è necessario inserire nella cavità risonante un interruttore di qualità (*Q-switch*), che ha l'effetto di alterare le caratteristiche di risonanza della cavità stessa. Se il Q-switch è operativo, consentendo alla cavità di risuonare nel punto più energetico del ciclo di pompaggio della lampada, è possibile ottenere un impulso molto potente, detto *impulso gigante*.

Inoltre, poiché le proprietà ottiche della cavità laser cambiano con la temperatura, soltanto alla frequenza nominale di ripetizione si possono ottenere fasci di luce con proprietà costanti e di buona qualità.

Allo scopo è comunque indispensabile raffreddare la cavità del laser per asportare l'energia che non si converte in luce laser.

In Fig. 2.6 è analizzato più nel dettaglio un laser ad Nd:YAG con tutti i suoi componenti.



**Fig. 2.6** Schema di un laser a stato solido.

## 2.6 Generazione del fascio di luce piano

Come è già stato detto, le misure con tecnica PIV permettono la conoscenza del campo di velocità in un determinato piano; questo deve essere illuminato da un fascio di luce ad elevata energia e per questo motivo si utilizza la luce generata da un laser. Dal paragrafo precedente si è visto che il laser produce un raggio, che quindi deve essere trasformato in una lama di luce attraverso un sistema di lenti.

Prima di vedere nel dettaglio come si trasforma un raggio in una lama laser, è importante evidenziare le caratteristiche che la lama deve avere ai fini di una corretta misura, ossia lo spessore che deve avere.

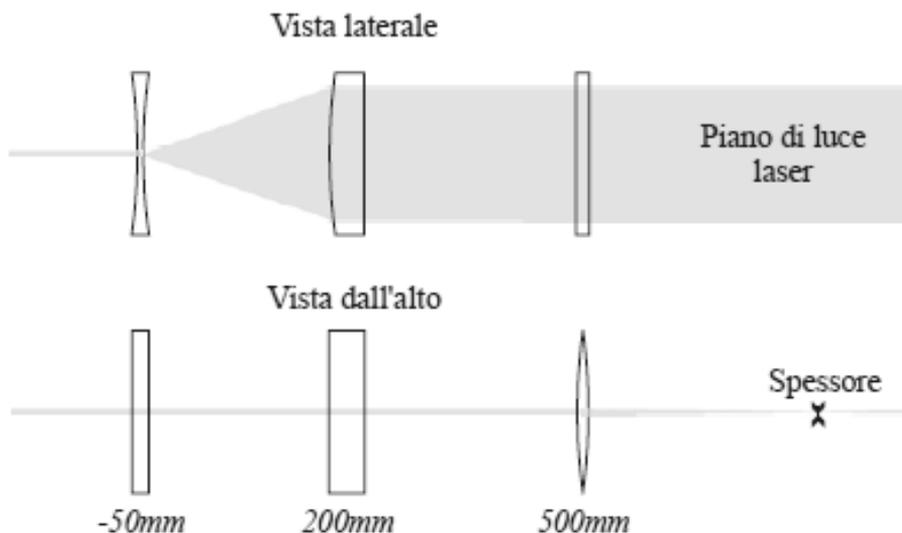
Lo spessore della lama laser deve essere circa costante su tutto il piano di misura, deve essere più sottile della profondità di campo della telecamera, per garantire la messa a fuoco, ed infine deve essere superiore allo spostamento delle particelle nella direzione normale alla lama di luce, in modo da ridurre la perdita di particelle dal volume illuminato.

L'elemento essenziale per la generazione del piano di luce è una lente cilindrica. Questa può risultare sufficiente a generare un fascio di luce piano nel caso di raggi di dimensioni ridotte, come quelli a ioni-Argon, mentre per i laser ad alta intensità, come quello Nd:YAG, si necessita di una seconda lente, che focalizza la luce allo spessore desiderato [6].

Tale configurazione è mostrata in Figura 2.7, in cui una terza lente cilindrica è stata aggiunta per generare un piano ad altezza costante.

La lente divergente è stata posizionata per prima per evitare la generazione di linee focali, le quali, anche se non provocano la ionizzazione dell'aria come i punti focali, possono incendiare le

particelle di polvere sospese nell'aria, alterando così le proprietà del fascio ed emettendo radiazione sonora.



**Fig. 2.7** Schema ottico di un fascio ottenuto utilizzando tre lenti cilindriche, di cui una con distanza focale negativa.

Nel caso rappresentato, la posizione dello spessore minimo, ossia il fuoco della lama laser, dipende dalla divergenza del raggio della sorgente luminosa e dalla lunghezza focale dell'ultima lente cilindrica (500mm per il caso illustrato).

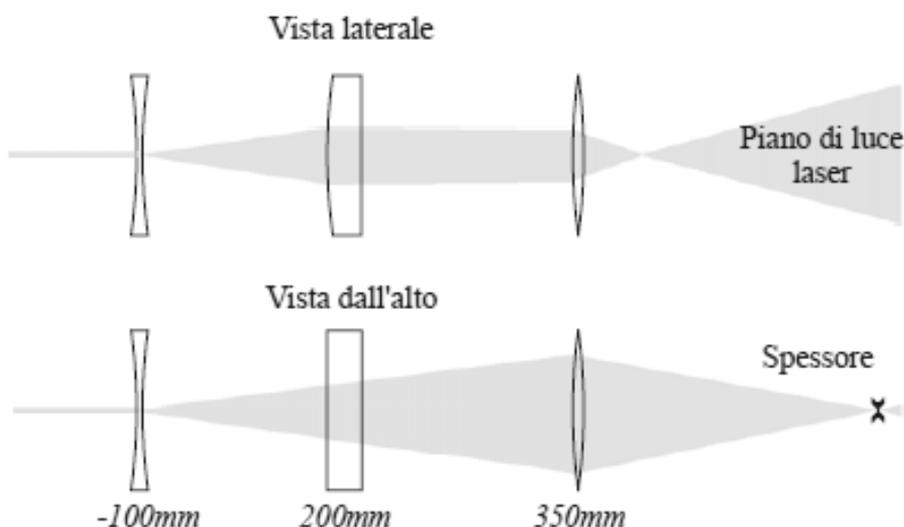
Vi è poi una configurazione diversa da quella mostrata in Fig. 2.7, che prevede la combinazione di una lente cilindrica con due lenti telescopiche; con tale configurazione si ottiene un sistema più versatile; ciò è illustrato in Fig. 2.8, in cui sono state utilizzate due lenti sferiche, perché sono più facili da costruire, specialmente se sono richieste distanze focali piccole.

L'altezza del piano di luce mostrato in figura è data principalmente dalla distanza focale della lente cilindrica centrale. Si sarebbe potuto utilizzare anche una lente divergente, ma, poiché la linea focale è abbastanza spessa, un siffatto sistema è adatto anche per laser impulsivi. L'adattamento dell'altezza del fascio di luce piano si ottiene cambiando la lente cilindrica, mentre la regolazione dello spessore si ottiene facilmente variando la distanza tra le lenti sferiche.

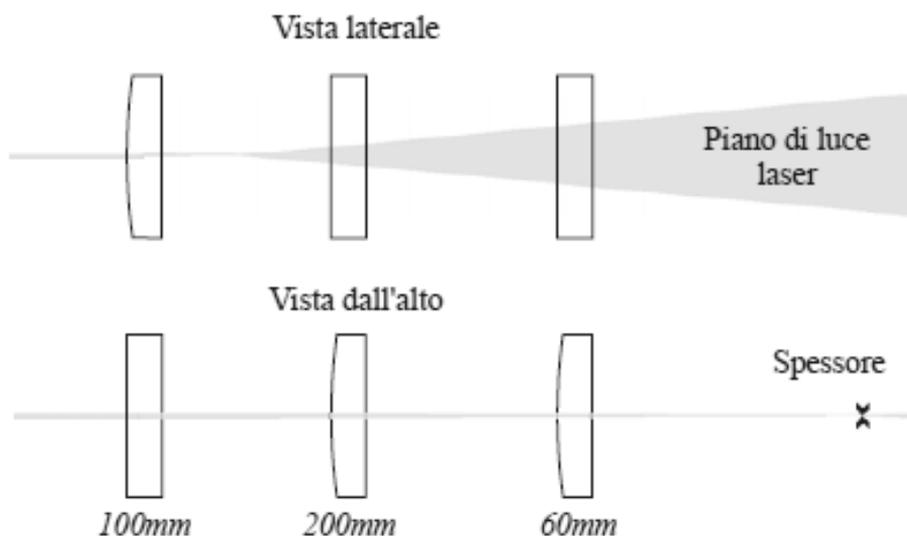
L'utilizzo di lenti sferiche in generale non permette di regolare in maniera indipendente sia lo spessore che l'altezza del fascio di luce. Per ovviare a tale inconveniente è necessario adottare la configurazione mostrata in Fig. 2.9.

Questa configurazione permette di generare ovunque lame di luce più sottili del diametro del raggio sorgente e, perciò, consente la generazione di fasci di spessore molto piccolo già all'uscita dell'ultima lente. L'inconveniente risiede nel fatto che l'energia per unità di area è molto alta e, come già osservato, per non incorrere nell'interferenza con polvere o particelle traccianti, è necessario isolare le zone in prossimità della linea focale.

L'utilizzo di una lente iniziale divergente risolverebbe il problema, ma la configurazione appena illustrata ha il vantaggio di consentire la registrazione del profilo del raggio luminoso dall'uscita della lente fino alla zona di misura mantenendo le proprietà costanti. In questo caso, da semplici considerazioni geometriche si può determinare il punto in cui è iniziata la registrazione del raggio laser e, se è noto lo sviluppo del profilo, si può utilizzare l'informazione per ottimizzare la distribuzione dell'intensità luminosa consentendo di migliorare il numero di dati validi.



**Fig. 2.8** Schema ottico di un fascio ottenuto utilizzando due lenti sferiche, di cui una con distanza focale negativa.



**Fig. 2.9** Schema ottico di un fascio ottenuto utilizzando tre lenti cilindriche.

Infine, nella disposizione delle lenti occorre tener presente alcune regole. Le superfici delle lenti non rivestite sono leggermente riflettenti e le relative perdite possono raggiungere valori del 4%. Le riflessioni prodotte possono provocare dei danni, se sono focalizzate su componenti ottici.

Nella maggior parte dei casi il problema può essere risolto disponendo le lenti nel verso corretto, mentre, in altri casi, è necessario ruotare leggermente la lente per evitare riflessioni su altre lenti, verso il laser o persino nella cavità risonante.

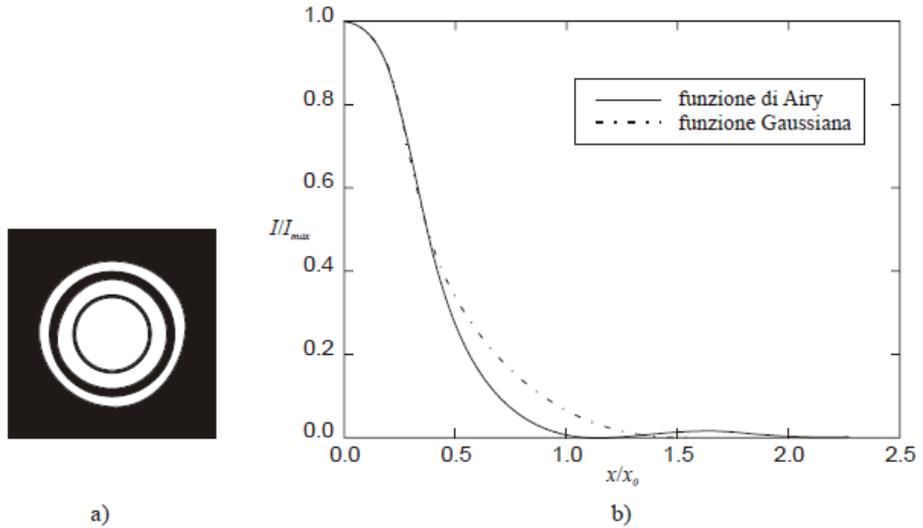
## 2.7 Generazione e registrazione di immagini PIV

Vengono ora esposti i meccanismi di generazione e registrazione di immagini PIV, con i relativi strumenti e tecniche.

### 2.7.1 Formazione dell'immagine PIV

Come è noto dalle leggi dell'ottica, quando si utilizzano dispositivi ottici dotati di obiettivi, come nel caso della PIV, bisogna tener conto del fenomeno della diffrazione. Se un fascio di luce piano investe uno schermo opaco dotato di un'apertura circolare e la lunghezza d'onda della luce incidente è confrontabile con le dimensioni del foro, su uno

schermo posto a grande distanza dal foro si genera una figura di diffrazione, detta *disco di Airy*, che è costituita da un disco circolare circondato da anelli, come è mostrato in Fig 2.10(a).



**Fig. 2.10** Figura di diffrazione di Airy per un prefissato diametro di apertura (a); confronto tra l'intensità della distribuzione normalizzata di Airy e l'approssimazione con una curva Gaussiana (b).

È opportuno determinare il diametro del disco di Airy  $d_s$ , in quanto questo rappresenta la minima dimensione dell'immagine della particella ottenibile per una data configurazione.

Imponendo la condizione  $I(x)/I_{max} = 0$ , dalla Fig.2.10(b), si ha che il valore del diametro per una fissato diametro di apertura  $D_a$  e per una fissata lunghezza d'onda  $\lambda$  è dato da (2.9):

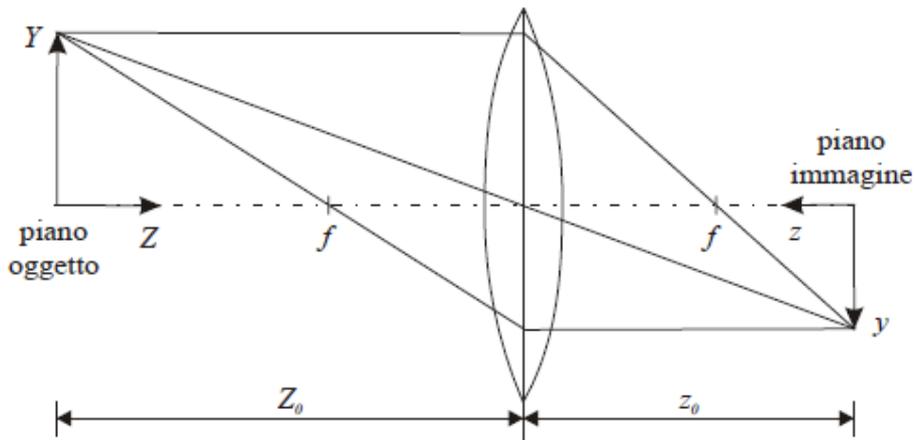
$$\frac{d_s}{2x_0} = 1,22 \quad (2.9)$$

con  $x_0 = \lambda \frac{z_0}{D_a}$ .

Se consideriamo che il mezzo in cui è immersa la lente di distanza focale  $f$  è lo stesso da entrambi i lati, in base alle leggi dell'ottica geometrica si ha:

$$\frac{1}{z_0} + \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{f} \quad (2.10)$$

dove  $z_0$  è la distanza tra il piano immagine e la lente, mentre  $Z_0$  è la distanza tra la lente e il piano oggetto, come mostrato in Fig. 2.11.



**Fig. 2.11** Ricostruzione geometrica dell'immagine.

Definendo poi il fattore di ingrandimento  $M$  come:

$$M = \frac{z_0}{Z_0} \quad (2.11)$$

si può ottenere la formula del diametro minimo di immagine limitato dalla diffrazione:

$$d_S = 2.44 f_{\#} (M + 1) \lambda \quad (2.12)$$

in cui  $f_{\#}$  è il rapporto tra la lunghezza focale  $f$  ed il diametro dell'apertura  $D_a$  [4].

Il valore del diametro minimo così definito è ottenuto soltanto nel caso di particelle di piccolo diametro e per piccoli fattori di ingrandimento.

Nel caso di particelle grandi e/o di elevati fattori di ingrandimento, l'influenza della geometria diventa predominante. Trascurando le distorsioni della lente si ottiene la seguente formula:

$$d_t = \sqrt{(M d_p)^2 + d_s^2} \quad (2.13)$$

Nella pratica la funzione di Airy è spesso approssimata con la curva Gaussiana, mostrata in Fig. 2.10(b), definita da:

$$\frac{I(x)}{I_{max}} = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.14)$$

dove il parametro  $\sigma$  deve essere fissato pari a  $f_{\#} (1 + M)\lambda \sqrt{\frac{2}{\pi}}$  per poter approssimare l'effetto della diffrazione. Questa approssimazione semplifica notevolmente la matematica necessaria al calcolo delle funzioni di trasferimento.

Nell'analisi con tecnica PIV, ci sono almeno due ragioni per cui è necessario ottimizzare il diametro delle particelle. In primo luogo, il diametro delle particelle influenza l'errore nella misura della velocità; in secondo luogo, immagini delle particelle piccole e ben definite sono essenziali per ottenere un'elevata intensità  $I_{max}$ , dal momento che, a parità di energia diffusa dalle particelle traccianti, l'energia della luce per unità di area cresce secondo il reciproco del quadrato del diametro ( $I_{max} \sim 1/d_t^2$ ). Ciò spiega anche perché un diametro elevato delle particelle spesso non riesce a compensare un'insufficiente potenza del laser.

L'equazione (2.13) mostra che, per diametri delle particelle maggiori della lunghezza d'onda diffusa ( $d_p \gg \lambda$ ), il limite della diffrazione diventa meno importante ed il diametro cresce linearmente con il diametro della particella. Poiché l'energia media della luce diffusa cresce con  $(d_p/\lambda)^2$ , per le particelle con diametro maggiore della lunghezza d'onda (cfr. teoria di Mie, paragrafo 2.1.2), l'intensità dell'immagine diventa indipendente dal diametro delle particelle, dal momento che sia l'energia diffusa che l'area dell'immagine crescono con il quadrato del diametro della particella.

Come è noto dall'ottica geometrica, un punto nel piano oggetto genera un'immagine nitida soltanto ad una posizione definita nello spazio immagine data dall'equazione (2.10). Se il piano dell'immagine non è perfettamente allineato con il piano del sensore della telecamera,

l'immagine è sfocata; ovviamente questa sfocatura non dipende né da aberrazioni della lente né dalla diffrazione.

In ogni caso, la dimensione del diametro dovuto alla diffrazione è il parametro utilizzato per il calcolo della profondità di campo.

Utilizzando il diametro fornito dalla (2.12), per la profondità di campo  $\delta_z$  si ottiene la seguente espressione (2.15):

$$\delta_z = 2 f_{\#} d_s \frac{(1 + M)}{M^2} \quad (2.15)$$

In base a quanto detto, il valore del diametro dell'apertura è un parametro critico nella registrazione delle immagini. Un diametro di apertura elevato è necessario per ottenere un'illuminazione sufficiente e particelle con contorni ben definiti, perché, come già osservato, al crescere del diametro diminuisce la dimensione del diametro dovuto alla diffrazione. D'altra parte, un elevato diametro di apertura riduce la profondità di campo e può rendere le aberrazioni della lente non trascurabili.

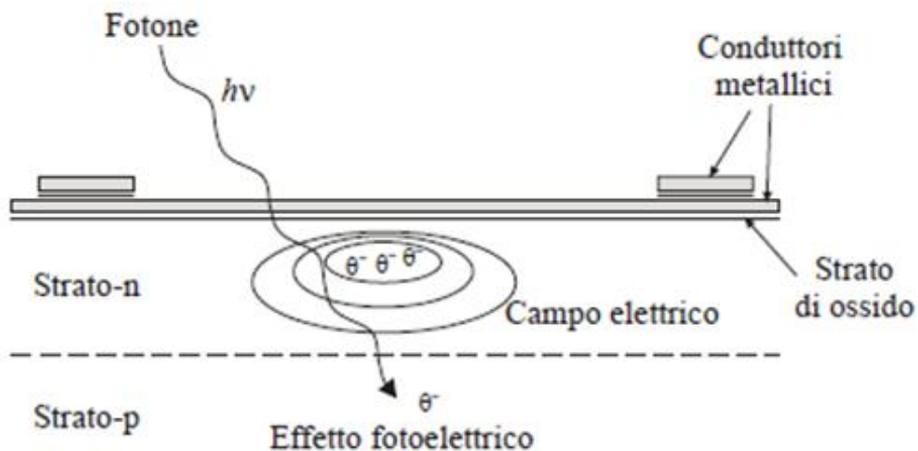
### 2.7.2 Strumenti e tecniche di registrazione delle immagini

Nel primo stadio dello sviluppo della tecnica PIV si faceva ricorso principalmente a tecniche di registrazione fotografiche. I progressi fatti recentemente nel campo dell'elettronica, hanno permesso di realizzare metodi di registrazione digitali, i quali hanno numerosi vantaggi rispetto a quelli ottici, tra i quali l'immediata visualizzazione delle immagini e l'eliminazione dei processi chimici di stampa, oltre ad una risoluzione temporale molto maggiore. Per tale ragione in questo paragrafo verranno analizzate soltanto le tecniche di acquisizione video digitali, in particolare l'attenzione sarà focalizzata sui sensori allo stato solido, in quanto essi sono i sensori maggiormente utilizzati dai centri di ricerca.

Il sensore elettronico allo stato solido più diffuso è senza dubbio il CCD (*charge coupled device*, ossia dispositivo ad accoppiamento di carica), il quale converte l'energia luminosa incidente sotto forma di fotoni in carica elettrica disponibile sotto forma di elettroni. Quando si parla di sensori CCD in genere si parla di un *array* di CCD singoli disposti lungo una riga o sotto forma di una matrice rettangolare. Il CCD individuale si chiama pixel, la cui dimensione fisica è dell'ordine di  $10 \times 10 \mu m^2$ .

Il CCD è un componente elettronico composto da materiali semiconduttori sensibili alla luce. Quando un fotone colpisce la sua superficie, vengono liberati elettroni che si accumulano nei singoli elementi rilevatori del CCD; quanto più luminoso è un oggetto, tanti più elettroni si accumulano sui pixel. I fotoni che colpiscono i pixel vengono poi convertiti in segnale elettrico, il cui voltaggio viene poi convertito in una scala di livelli di grigio, in base alla quale viene poi ricostruita l'immagine.

In particolare, come si può vedere dalla Fig. 2.12 [11], il CCD è costruito su di un substrato semiconduttivo, generalmente in silicene, con conduttori metallici sulla superficie, uno strato di ossido isolante, uno strato semiconduttore di tipo n (anodo) ed uno semiconduttore di tipo p (catodo) al di sotto (giunzione PN). Una piccola differenza di potenziale applicata tra i conduttori metallici e lo strato di tipo p genera un campo elettrico all'interno del semi-conduttore. Il valore minimo del campo elettrico che si forma al di sotto del centro del pixel è associato ad una vacanza di elettroni ed è detto buca di potenziale. In pratica, la buca di potenziale è equivalente ad un condensatore in grado di immagazzinare gli elettroni.



**Fig. 2.12** Modello semplificato di un pixel.

Quando un fotone di una certa lunghezza d'onda colpisce la giunzione PN, si genera una coppia vacanza-elettrone ed il fenomeno è detto

effetto fotoelettrico. Mentre la vacanza, portatrice di carica positiva, è assorbita nello strato p, l'elettrone, per effetto del campo elettrico, migra verso la buca di potenziale, dove viene immagazzinato. Gli elettroni continuano ad accumularsi per tutta la durata dell'esposizione alla luce. La capacità di immagazzinare elettroni è comunque limitata e viene misurata in elettroni per pixel; valori tipici della capacità per i sensori oscillano tra 10'000 e 100'000. Quando questo valore massimo viene superato, si ha sovraesposizione e gli elettroni eccedenti tendono a migrare verso i pixel adiacenti, provocando il *blooming* dell'immagine.

Per evitare questo effetto, i moderni CCD adottano dispositivi anti-*blooming* che catturano la carica in eccesso per mezzo di conduttori.

Un altro parametro importante per un CCD è il *fattore di riempimento*, o apertura, che è definito come il rapporto tra l'area otticamente sensibile e quella totale del sensore. Il suo valore può oscillare dal 15% al 100%, a seconda del sensore. Per aumentare il fattore di riempimento si possono posizionare delle lenti davanti al sensore in modo da raccogliere una maggiore quantità di luce; in tal modo l'apertura aumenta di un fattore pari a 3.

Come tutte le apparecchiature elettroniche, anche il pixel di un CCD è soggetto a rumore elettronico. A causa della limitata efficienza della luce diffusa, spesso, nelle misure PIV, il segnale supera di poco il rumore di fondo, il che ne rende necessario l'abbattimento. La maggiore fonte di rumore è costituita dagli effetti termici che, però, può essere eliminata sottraendo un valore costante al voltaggio in uscita; altra sorgente è il rumore di lettura connesso alla conversione della carica in differenza di potenziale e, in generale, aumenta con la frequenza di lettura.

Altre caratteristiche di un pixel sono la sensibilità, la linearità ed il range dinamico. In analogia alle pellicole fotografiche, la *sensibilità* del pixel, o efficienza di quantizzazione (QE), è definita dal rapporto tra il numero di elettroni immagazzinati ed il numero di fotoni incidenti e si misura in carica immagazzinata per intensità di luce incidente, oppure in corrente per potenza incidente.

Detto valore dipende dall'apertura e dallo spessore dell'area sensibile e cambia notevolmente con la lunghezza d'onda della luce incidente. Per ridurre la sensibilità a quest'ultimo parametro, a volte si pone un filtro all'infrarosso davanti al sensore. Per quanto riguarda la *linearità*, poiché ogni elettrone si aggiunge linearmente alla carica

immagazzinata, il voltaggio in uscita è linearmente proporzionale alla carica stessa.

Infine, si definisce *range dinamico* di un CCD il rapporto tra la capacità massima di accumulazione ed il rumore di fondo.

Alla base della scelta di un sensore CCD si deve considerare che i modi di registrazione delle immagini PIV si distinguono in due categorie: la prima categoria è costituita dai metodi che catturano le immagini del flusso su di un solo fotogramma, mentre nella seconda categoria ogni immagine del flusso, corrispondente ad un singolo impulso del laser, è registrata su un fotogramma distinto. Dette categorie sono denominate rispettivamente tecnica PIV con singolo fotogramma ed esposizione multipla e tecnica PIV con fotogrammi multipli e singola esposizione [14].

Di seguito viene riportata una breve descrizione delle due tecniche di registrazione delle immagini.

Nel caso di configurazione a “singola esposizione”, si apre l’otturatore della videocamera, si emettono due impulsi laser e poi si chiude l’otturatore; in questo modo sulla stessa immagine viene registrata la luce riflessa dai due impulsi laser e di conseguenza vi saranno due punti per ogni particella di tracciante illuminata.

Nel caso di configurazione a “doppia esposizione”, invece, si apre l’otturatore della videocamera, si emette un impulso laser, si chiude l’otturatore e si registra la prima immagine; poi si riapre l’otturatore, si emette un secondo impulso laser e poi si chiude l’otturatore. In questo modo su ciascuna immagine si registra la luce riflessa da un solo impulso laser: se una particella di tracciante viene illuminata da entrambi gli impulsi, sulla prima immagine viene registrato un punto luminoso e sulla seconda immagine viene registrato un punto luminoso in una posizione un po’ differente, a causa del cammino percorso dalla particella fra i due impulsi.

Tali modalità comportano notevoli differenze nella successiva fase di analisi delle immagini e si può affermare che, quando è possibile, è meglio effettuare l’acquisizione nella modalità a singola esposizione, in quanto:

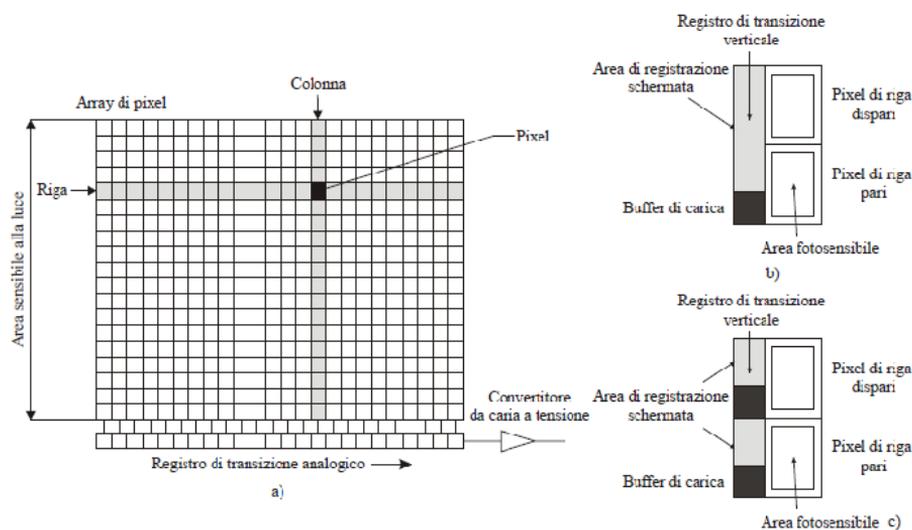
- Si determina facilmente il *verso della velocità* in base alla sequenza temporale delle immagini;
- Si semplifica la *procedura di analisi* delle immagini e la si rende più sensibile anche a piccoli spostamenti, in quanto le

immagini quasi sovrapposte sono difficilmente distinguibili nella modalità a multi esposizione;

- Si rende possibile un *aumento del numero di particelle traccianti* nelle immagini, senza compromettere la misura del campo di velocità con una sovrapposizione eccessiva.

Non è però sempre possibile effettuare una acquisizione in modalità a singola esposizione, in quanto è necessario avere un apparato di ripresa molto rapido, in termini di fotogrammi al secondo, rispetto ai tempi caratteristici del campo di moto.

In Fig. 2.13(a) è mostrata la geometria tipica di un sensore CCD in cui i pixel individuali sono raggruppati in un *array* rettangolare in modo da creare una regione sensibile alla luce.



**Fig. 2.13** Geometria tipica di un sensore CCD (a). Dettaglio della struttura dei pixel per due modelli di sensore CCD: a trasferimento di interlinea (b) e a trasferimento di interlinea completo (c) [11].

L'informazione contenuta in ciascun pixel deve essere trasmessa in maniera sequenziale in due fasi. Nella prima fase, successiva all'esposizione, la carica accumulata è trasferita verticalmente, una riga per volta, ad un registro di transizione analogico schermato dalla radiazione luminosa e collocato sul bordo inferiore del sensore. Ogni riga, attraverso un convertitore da carica a differenza di potenziale, è

convertita pixel per pixel in un vettore di tensioni che, insieme ad impulsi di sincronizzazione, costituisce il segnale di uscita del sensore. A seconda del tipo di sensore la lettura del segnale può avvenire in maniera sequenziale (progressiva) oppure interlacciata (vale a dire prima le righe dispari e poi le pari).

Nel caso in cui si vogliano registrare due immagini sullo stesso CCD, si registra la prima immagine, si invia da ciascun pixel la carica registrata al suo *buffer*, liberando così il pixel per la seconda immagine, che viene dunque registrata; infine si scaricano le informazioni delle due immagini da ciascun pixel.

L'ultima operazione è quella più onerosa in termini di tempo ed è quella che limita la frequenza di acquisizione delle coppie di immagini; l'operazione, invece, di liberare ciascun pixel immediatamente dopo la prima immagine è quella che limita il tempo fra le due immagini della coppia, ossia il tempo fra due impulsi luminosi.

Esistono varie tipologie di sensori CCD, che si differenziano in base al fattore di riempimento, al range dinamico e al rumore di lettura.

## 2.8 Metodi di valutazione delle immagini PIV

Lo scopo principale dei metodi di valutazione di registrazioni PIV consiste nel determinare lo spostamento tra gruppi di particelle, memorizzati come una distribuzione bidimensionale di livelli di grigio [11].

Tali metodi si differenziano a seconda della tecnica di registrazione delle immagini PIV, ossia se si analizzano immagini ottenute con tecnica PIV a singolo fotogramma ed esposizione multipla oppure con tecnica PIV a fotogrammi multipli e singola esposizione.

L'analisi delle immagini PIV suddivide il dominio spaziale acquisito in un insieme di sottodomini, detti aree di interrogazione, in ciascuno dei quali verrà calcolato lo spostamento medio delle particelle presenti.

Lo spostamento in ciascun sottodominio si calcola a partire dalla funzione bidimensionale di autocorrelazione (nel caso di tecnica PIV a multiesposizione) o dalla funzione di cross-correlazione (per PIV a singola esposizione) delle intensità dei livelli di grigio nello stesso sottodominio di interrogazione:

$$R_{ij}(r_1, r_2) = \iint F_i(x, y)F_j(x + r_1, y + r_2)dxdy \quad (2.16)$$

dove con  $i$  e  $j$  sono indicati i sottodomini di interrogazione di area  $A_i$  e  $A_j$ ,  $F_i$  e  $F_j$  sono le intensità registrate nei domini  $A_i$  ed  $A_j$  e con  $r_x$  e  $r_y$  le componenti sul piano  $(x,y)$  dello spostamento generico.

Se  $i$  è diverso da  $j$ ,  $A_i$  ed  $A_j$  sono prese su due immagini realizzate a tempi successivi e dunque si utilizza la cross-correlazione, mentre, se  $i$  è uguale a  $j$ , un'auto-correlazione.

L'operazione di correlazione serve per determinare  $r_x$  e  $r_y$  tali da massimizzare  $R_{ij}$ , ossia i valori che danno la massima sovrapposizione tra le due immagini.

L'integrale é di solito effettuato su  $A_i = A_j$  (anche per singole esposizioni successive), ma, a volte, per migliorare la qualità della funzione risultante e diminuire il rumore si usa un dominio  $A_i \neq A_j$ , in dipendenza del campo locale di velocità (metodi avanzati di elaborazione di immagini PIV).

Per determinare la funzione risultante sul piano  $(r_1, r_2)$ , si consideri il caso ideale di una singola particella in moto a velocità  $U$ , rappresentata nel sottodominio  $A_i$  dell'immagine da una delta di Dirac  $\delta(r - r_0)$  (essendo  $r_0 = (x_0, y_0)$  la posizione della particella all'istante  $t_0$ ), e nel sottodominio  $A_j$  ( $\equiv A_i$ ) da una delta di Dirac  $\delta(r - r'_0)$  (essendo  $r'_0 = r_0 + \Delta r_0 = U\Delta t$ , con  $r'_0 = (x'_0, y'_0)$  e  $\Delta r_0 = (\Delta x_0, \Delta y_0)$ ). La funzione precedente sarà:

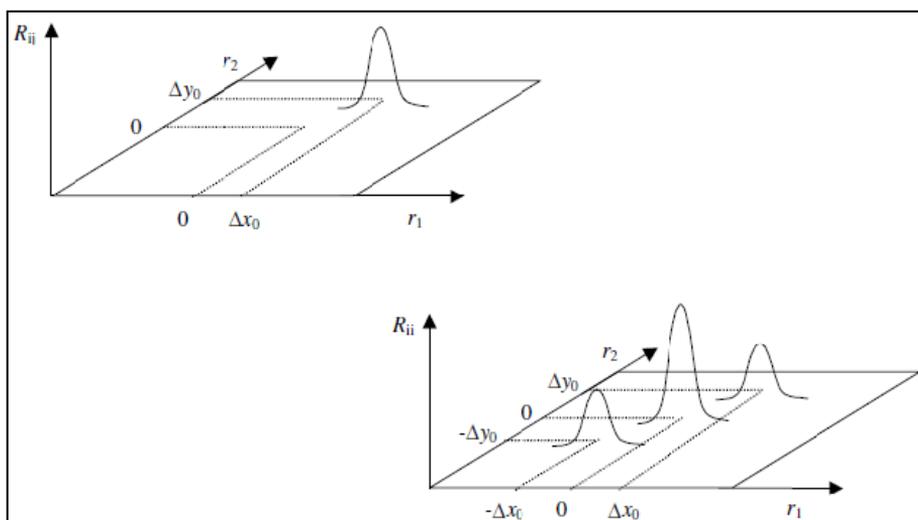
$$R_{ij}(r_1, r_2) = \iint_{A_i} \delta(x - x_0, y - y_0) \delta(x - x_0 + r_1, y - y_0 + r_2) dx dy = \delta(r_1 - \Delta x_0, r_2 - \Delta y_0) \quad (2.17)$$

nel caso della cross-correlazione, e

$$R_{ij}(r_1, r_2) = \iiint_{A_i} [\delta(x - x_0, y - y_0) + \delta(x - x'_0, y - y'_0)] [\delta(x - x_0 + r_1, y - y_0 + r_2) + \delta(x - x'_0 + r_1, y - y'_0 + r_2)] dx dy = 2\delta(r_1, r_2) + \delta(r_1 - \Delta x_0, r_2 - \Delta y_0) + \delta(r_1 + \Delta x_0, r_2 + \Delta y_0) \quad (2.18)$$

nel caso dell'auto-correlazione.

Preso l'origine degli assi nel centro del piano  $(r_1, r_2)$ , la funzione  $R_{ij}$  presenterà quindi un picco nel caso della cross-correlazione e un triplo picco nel caso dell'auto-correlazione, come si può vedere in Fig. 2.14.



**Fig. 2.14** Picchi nel piano della cross-correlazione (a sinistra) e dell'auto-correlazione (a destra) nella PIV.

In particolare, la funzione di autocorrelazione presenta tre picchi principali: un picco centrale dovuto alla correlazione delle immagini delle particelle con se stesse, e due *picchi di spostamento* sui lati opposti del picco centrale, che sono dovuti alla correlazione delle immagini delle particelle della prima esposizione con quelle della seconda e viceversa. La larghezza dei picchi dipende dalla dimensione del diametro delle particelle e, se queste ultime sono presenti in numero sufficiente, detti picchi si ergeranno tra i picchi del rumore di fondo casuale, prodotto da possibili riflessioni del raggio laser e anche da particelle singole che non trovano corrispondenza nella seconda esposizione.

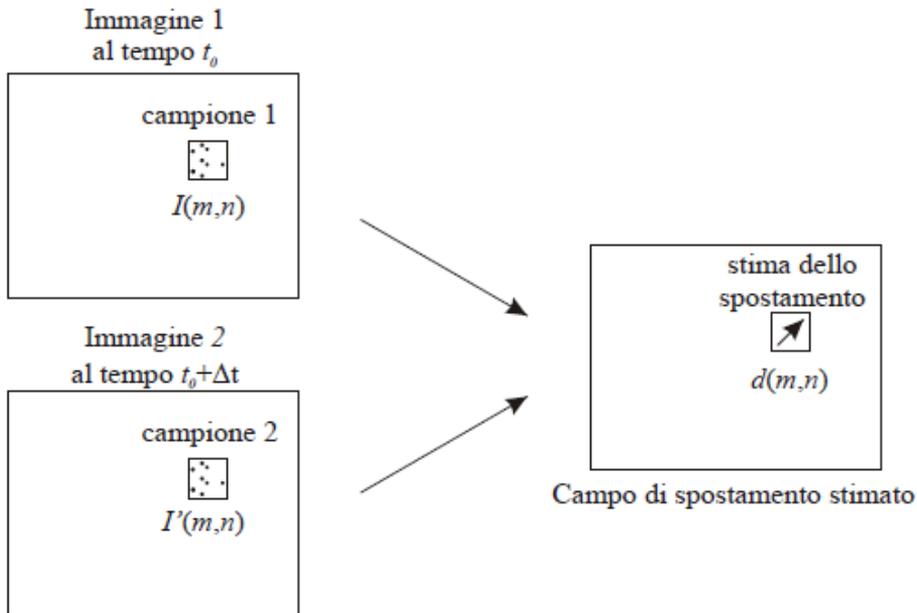
Come si può notare, mentre nel caso della cross-correlazione la determinazione è univoca, nel caso della auto-correlazione l'energia è suddivisa su tre picchi (e quello centrale è più elevato degli altri due); in particolare, poiché non è possibile distinguere tra i due picchi simmetrici secondari, sarà presente un'ambiguità direzionale che generalmente viene rimossa con una traslazione dell'immagine tra la prima e la seconda esposizione.

Queste osservazioni aiutano a comprendere perché è preferibile, quando possibile, utilizzare una coppia di esposizioni singole e calcolare su queste la funzione di cross-correlazione.

Tale metodo di valutazione delle immagini PIV viene detto digitale; la controparte analogica di tale metodo è un sistema che utilizza la trasformata di Fourier ottica (OFT), che però non viene analizzata nella presente tesi, in quanto i metodi di valutazione digitali sono ampiamente i più diffusi nelle applicazioni.

### 2.8.1 Metodi di valutazione digitali delle immagini PIV

In questo paragrafo viene introdotto il metodo di valutazione basato sulla cross-correlazione, essendo questo il metodo più diffuso nei laboratori ed è quello utilizzato per le misure realizzate nel presente lavoro di tesi. Innanzitutto occorre analizzare il metodo dal punto di vista dell'elaborazione delle immagini [11].



**Fig. 2.15** Schema del calcolo del campo di spostamento per PIV con doppio fotogramma e singola esposizione.

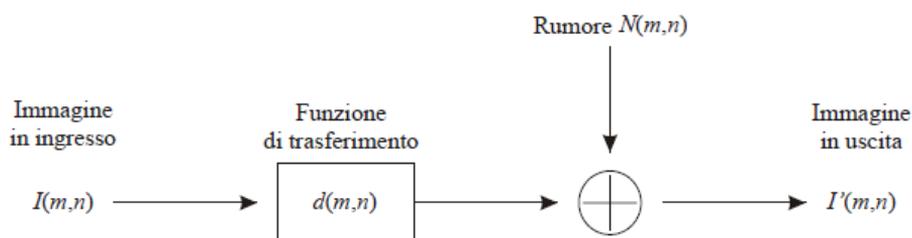
Si assume di avere a disposizione una coppia di immagini, memorizzate come una distribuzione di livelli di grigio dell'intensità luminosa riflessa dalle particelle traccianti, registrate con metodo PIV tradizionale.

Si indichi con  $I$  la prima immagine e con  $I'$  la seconda. Come detto,  $I$  e  $I'$  sono rappresentate come una distribuzione di livelli di grigio; nelle zone in cui non è presente nessuna particella, esse assumono valore nullo.

Dall'elaborazione della coppia di immagini si otterrà il campo di spostamento, i cui vettori sono ricavati analizzando il movimento di un gruppo di particelle localizzato; come mostrato in Fig. 2.15, ciò è ottenuto estraendo dall'immagine un piccolo campione (finestra di interrogazione) ed analizzandolo con metodi statistici.

Dal punto di vista dell'elaborazione dei segnali, la prima immagine si può considerare come l'ingresso di un sistema che fornisce in uscita la seconda immagine della coppia. La funzione di trasferimento del sistema converte l'immagine in ingresso  $I$  in quella di uscita  $I'$  ed è costituita da una traslazione  $d$  e dall'aggiunta del rumore  $N$ .

Quanto detto è illustrato schematicamente in Fig. 2.16.



**Fig. 2.16** Modello di elaborazione di un segnale digitale lineare applicato al caso di due fotogrammi successivi di immagini PIV di particelle traccianti.

Note le due immagini  $I$  ed  $I'$ , lo scopo del metodo di valutazione, dunque, consiste nella stima del campo di spostamento, eliminando gli effetti del rumore. Il fatto che il segnale non sia continuo, a causa della mancanza di informazioni dello sfondo nero, rende necessario l'utilizzo di strumenti statistici, ricercando una similitudine tra le immagini. Ciò è ottenuto utilizzando la funzione di cross-correlazione discreta data da:

$$R_{II'}(x, y) = \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-L}^L I(i, j) I'(i + x, j + y) \quad (2.19)$$

Per ciascun valore della traslazione  $(x, y)$ , la somma dei prodotti delle intensità di tutti i pixel sovrapposti fornisce un valore della funzione di cross-correlazione  $R_{II}'(x, y)$ . Effettuando questa operazione nel campo di valori  $(-M \leq x \leq M, -N \leq y \leq N)$ , si ottiene un piano di correlazione di dimensioni  $(2M + 1) \times (2N + 1)$  e, per i valori dello spostamento per cui le immagini delle particelle si sovrappongono, la somma dei prodotti delle intensità assumerà valori maggiori. Il valore massimo nel piano di correlazione può così essere utilizzato come stima diretta dello spostamento delle particelle del campione.

Adoperando l'implementazione diretta della cross-correlazione, si ha che il numero di moltiplicazioni per il calcolo di ogni valore della correlazione aumenta in proporzione all'area della finestra di interrogazione e non è possibile misurare spostamenti superiori al primo ordine, ossia non lineari. Per questo motivo è necessario ridurre sufficientemente le dimensioni delle finestre.

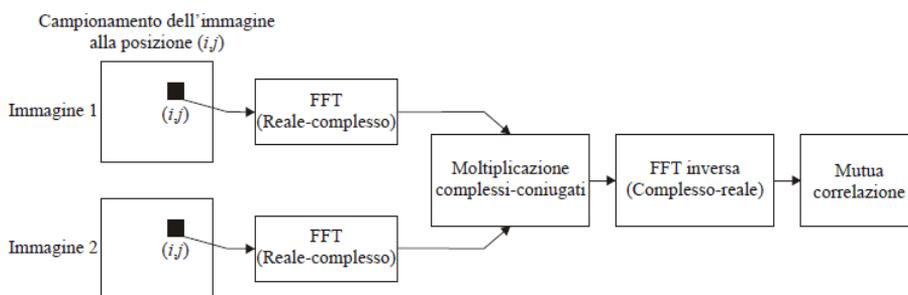
L'incremento quadratico del numero di moltiplicazioni con le dimensioni del campione impone un notevole sforzo computazionale. Se si tiene conto che in una tipica misura PIV le finestre di interrogazione sono dell'ordine delle migliaia di pixel e che il range dinamico degli spostamenti può raggiungere fino a 20 pixel, allora sono necessarie fino ad un milione di moltiplicazioni ed addizioni per formare un piano di correlazione. Poiché, inoltre, il numero di vettori spostamento su ciascuna immagine sono migliaia, ci si rende subito conto che è necessario uno strumento di calcolo più efficiente. In alternativa al calcolo diretto, come è noto dalla teoria dei segnali, è, dunque, possibile calcolare la funzione di cross-correlazione con una moltiplicazione tra complessi e coniugati nel dominio di Fourier, ossia:

$$R_{II}' \Leftrightarrow \hat{I} \cdot \hat{I}'^*$$

in cui  $\hat{I}$  ed  $\hat{I}'$  sono le trasformate di Fourier delle funzioni  $I$  ed  $I'$  rispettivamente. Nella pratica la trasformata di Fourier per dati discreti è ottenuta utilizzando gli algoritmi FFT che riducono il numero di operazioni da  $O[N^2]$  a  $O[N \log_2 N]$ . Pertanto, il laborioso processo di correlazione bidimensionale dato dalla (2.17) può essere ridotto calcolando due trasformate di Fourier (FFT) bidimensionali su campioni delle immagini di uguali dimensioni e, successivamente, effettuando la moltiplicazione complessa coniugata dei coefficienti di

Fourier ottenuti. Si calcola quindi la trasformata di Fourier del risultato, ottenendo un piano di correlazione che ha le stesse dimensioni  $N \times N$  dei due campioni. Rispetto alla correlazione diretta il numero di operazioni si riduce così da  $O[N^4]$  a  $O[N^2 \log_2 N]$ .

In Fig. 2.17 è riportato lo schema dell'implementazione di cui sopra.



**Fig. 2.17** Implementazione della cross-correlazione utilizzando la trasformata di Fourier.

## 2.9 Metodi di interrogazione avanzati

L'analisi delle immagini PIV è stata nel corso degli anni sempre più affinata, al fine di aumentare la risoluzione delle immagini stesse e sviluppare algoritmi di calcolo sempre più veloci.

Per quanto riguarda gli algoritmi, si è lavorato per ottimizzare il calcolo della cross-correlazione, mettendo a punto i seguenti miglioramenti:

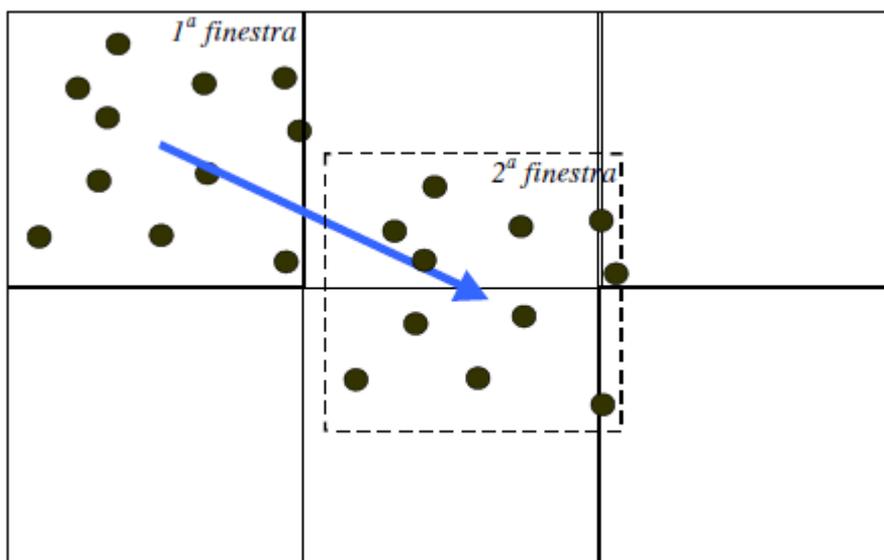
- spostamento della finestra di interrogazione (“window offset”) per la determinazione della velocità;
- approssimazione sub-pixel del picco di cross-correlazione;
- sovrapposizione parziale delle finestre di interrogazione;
- calcolo ricorsivo su finestre di interrogazione di dimensioni decrescenti;
- utilizzo di una funzione peso per i livelli di intensità luminosa nelle finestre di interrogazione;
- deformazione delle finestre di interrogazione e dell'intera immagine sulla base del gradiente di velocità locale.

Con l'applicazione di questi metodi è stato possibile ridurre l'errore sulla determinazione dello spostamento inferiore a 0.1 pixel (considerando che lo spostamento ottimale per immagini PIV è

dell'ordine di 10 pixel, si deduce che l'errore su un vettore istantaneo di velocità è inferiore all'1%).

Si considereranno brevemente i miglioramenti elencati in precedenza.

Il primo metodo consta nello spostare, precedentemente al calcolo della funzione di correlazione, la seconda finestra di interrogazione rispetto alla prima, in modo da seguire le particelle nel loro moto medio, massimizzando così il numero delle stesse particelle traccianti in ogni coppia finestra. Il procedimento è illustrato in Fig. 2.18.



**Fig. 2.18** Window offset tra finestre di interrogazione.

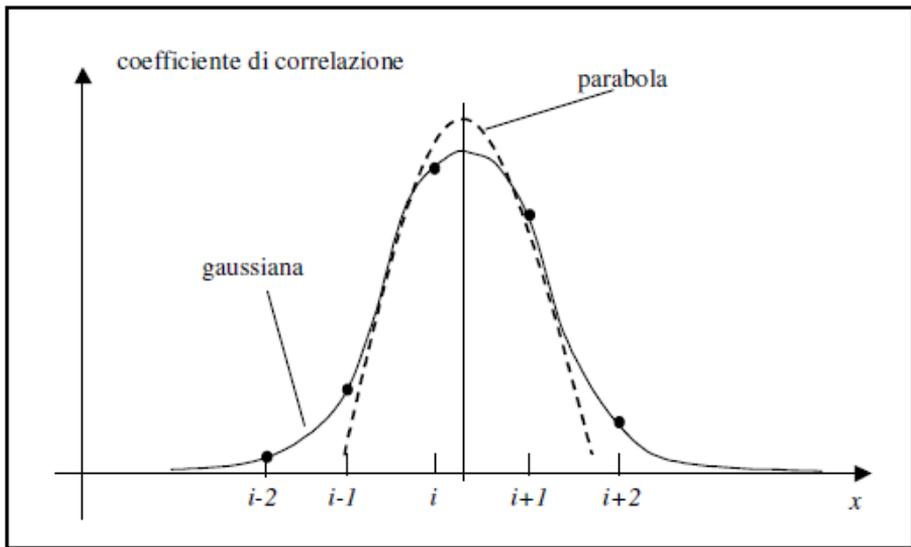
Il problema principale consiste nel trovare il valore dello spostamento da attribuire alla seconda finestra. Solamente nel caso di un flusso medio in una direzione, con basse variazioni di velocità, si può ragionevolmente assegnare uno spostamento medio costante. Negli altri casi lo spostamento andrà ricercato ricorsivamente attraverso un'ottimizzazione della funzione di correlazione; in questo senso, risulta naturale far lavorare questo metodo in parallelo con un calcolo ricorsivo su finestre decrescenti (punto 4).

Quest'ultimo metodo consiste nell'ottimizzare il calcolo delle velocità su un dato reticolo finale attraverso un processo iterativo che, partendo

da un reticolo piuttosto rado, arrivi per passi successivi al reticolo finale.

Normalmente non sono necessari più di 3-4 passi; come detto, questo processo viene però svolto simultaneamente a quello di ricerca dello spostamento della finestra di cui al punto 1, di conseguenza, spesso si effettuano più passi temporali sullo stesso reticolo di misura prima di passare a quello più fitto.

Per il secondo metodo (approssimazione sub-pixel), essendo lo spostamento delle immagini di particelle misurato dalla mappa della funzione di cross-correlazione in termini di numeri interi ( $i$  pixel appunto), ci si aspetta che non sia possibile ridurre l'errore sulla determinazione di tale spostamento a meno di  $\pm 0.5$  pixel. In realtà, come si può vedere dalla Fig. 2.19, quasi sempre il massimo effettivo della funzione di correlazione non è detto che si trovi in corrispondenza di un valore intero.



**Fig. 2.19** Approssimazione sub-pixel della funzione di correlazione.

Mediante un'interpolazione tra i punti in corrispondenza degli interi (3 o più), è possibile trovare un'approssimazione di questo massimo effettivo, ottenendo così una risoluzione sub-pixel. Solitamente la funzione interpolatrice è una gaussiana, che risulta più robusta rispetto alle altre.

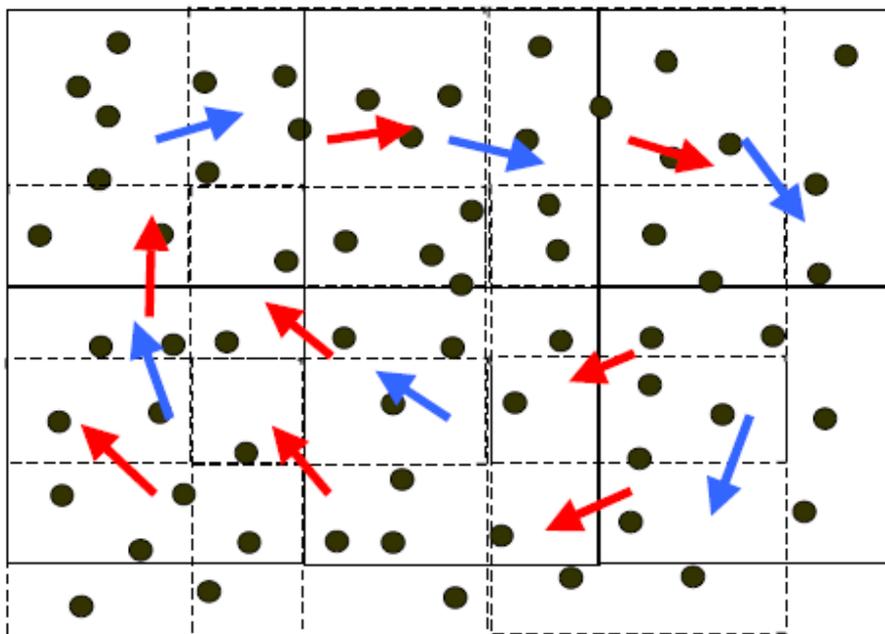
Per quello che riguarda la possibilità di incrementare artificialmente la risoluzione spaziale mediante sovrapposizione parziale di finestre di interrogazione adiacenti (3° metodo), si tratta di scegliere l'intervallo tra le finestre di interrogazione in modo da avere una sovrapposizione parziale delle stesse. Sebbene tale operazione non porta alcuna informazione aggiuntiva (le immagini delle particelle traccianti sono sempre le stesse), si è osservato un notevole beneficio sia nell'aspetto dei campi di velocità misurati (che risultano essere con più vettori e per così dire più "regolari") che nella diminuzione dei così detti vettori spuri (cioè vettori non omogenei a quelli immediatamente vicini). In particolare, quest'ultimo miglioramento, come si può osservare dalla Fig. 2.20, dipende dal fatto che le immagini di particelle ai margini della zona di interrogazione possono essere parzialmente tagliate e, quindi, il loro contributo alla velocità misurata risulta solo parziale (nella figura sono indicati in blu i vettori velocità risultanti dall'analisi con finestre di interrogazione non sovrapposte e in rosso quelli che vengono ad aggiungersi ai blu grazie alla sovrapposizione).

Dalla letteratura risulta che il valore di sovrapposizione che produce risultati migliori si attesta tra il 60% e il 75%, comportando, però, anche un pesante aumento dei tempi necessari all'analisi di ogni immagine PIV.

Per quello che riguarda il quinto punto (utilizzo di una funzione peso), come si è già messo in evidenza, uno degli aspetti cruciali nel calcolo della funzione di correlazione è la perdita di particelle dalla prima alla seconda immagine. Tale perdita è causata spesso dalla presenza di una componente di velocità in direzione ortogonale alla lama di luce, ma spesso anche dallo spostamento delle particelle sul piano della lama stessa (cosa a cui si cerca di porre rimedio con lo spostamento della finestra di cui al punto 1) o dal loro posizionamento in una zona laterale (con conseguente "taglio" di parte dell'immagine della particella). Il risultato è un decremento del massimo di correlazione con conseguente maggiore difficoltà della misura e aumento del rumore.

Per ovviare a questo effetto si effettua spesso una "finestratura" ("windowing") di ciascuna finestra di interrogazione moltiplicandola per una funzione peso (di solito una gaussiana) che dia maggiore importanza alle particelle situate in prossimità del centro della finestra stessa; questa operazione consente anche di aumentare il rapporto

segnale/rumore (il rapporto tra l'intensità luminosa dovuta alle particelle traccianti e quella dovuta alla luminosità di fondo).



**Fig. 2.20** Sovrapposizione parziale delle finestre di interrogazione e vettori velocità risultanti.

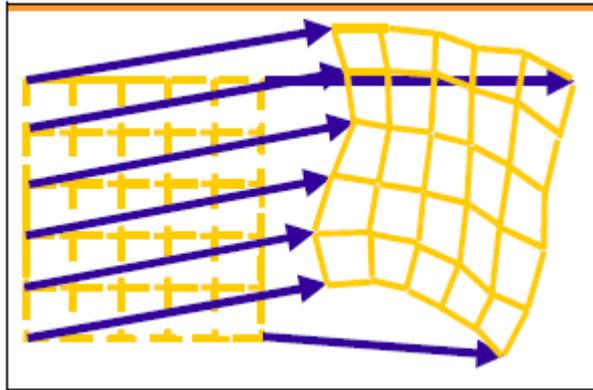
Con l'applicazione delle procedure descritte fino a questo punto si ottiene un errore complessivo intorno a  $\pm 0.1$  pixel.

Per quanto riguarda la deformazione dell'intera immagine (punto 6), come detto, per

rendere massimo il valore della funzione di correlazione (e quindi validare la misura PIV), è necessario rendere minima la differenza tra la prima e la seconda immagine. Uno degli aspetti che maggiormente aumenta tale differenza è la perdita di immagini di particelle tra le due immagini a causa di fuoriuscita dal piano di misura e gradienti del campo di velocità. Questa seconda causa può essere rimossa attraverso una deformazione locale delle finestre di interrogazione in base al campo di velocità misurato nelle iterazioni precedenti (come descritto al punto 4). Ciascun vertice della finestra di interrogazione viene spostato nella seconda immagine in una nuova posizione così che il

rettangolo iniziale si possa deformare in un quadrilatero orientato in qualsiasi modo [12].

In Fig. 2.21 é illustrato il procedimento: in tal modo la stessa immagine del reticolo di misura costituisce una visualizzazione del campo di velocità e dei gradienti in esso presenti.



**Fig. 2.21** Deformazione dell'intera immagine PIV in base al campo di velocità misurato iterativamente.

Questa procedura, sebbene comporti un aumento dei tempi di calcolo di circa un fattore 10, parallelamente porta una riduzione dell'errore di misura fino al limite di circa  $\pm 0.05$  pixel (insieme alle modalità descritte in precedenza).

## 2.10 Metodologie di elaborazione delle immagini

Tra le differenti metodologie di trattamento preliminare delle immagini e di validazione e calcolo a seguito della misura del campo di velocità, si esporranno in dettaglio:

- Filtro delle immagini;
- Eliminazione delle riflessioni;
- Validazione vettori dopo analisi PIV.

Le prime due vengono effettuate preliminarmente all'analisi delle immagini, la terza, in teoria, dovrebbe essere effettuata successivamente all'analisi, ma in pratica è inserita all'interno della procedura ricorsiva utilizzata nella tecnica PIV.

In generale applicare un filtro ad un'immagine digitale significa moltiplicare iterativamente ciascun elemento della matrice corrispondente per un operatore che pesi in maniera differente elementi adiacenti.

Le immagini possono essere filtrate con due categorie di operatori: filtri di ripristino dell'immagine (*image restoration*) e filtri di miglioramento dell'immagine (*image enhancement*). I primi effettuano operazioni di media delle differenze di intensità luminosa, che in genere eliminano l'effetto di un rumore concentrato, mentre i secondi esaltano le differenze di intensità, permettendo di migliorare il contrasto e di evidenziare la separazione tra zone differenti del campo. I primi sono quindi filtri passa-basso, mentre i secondi sono invece passa-alto

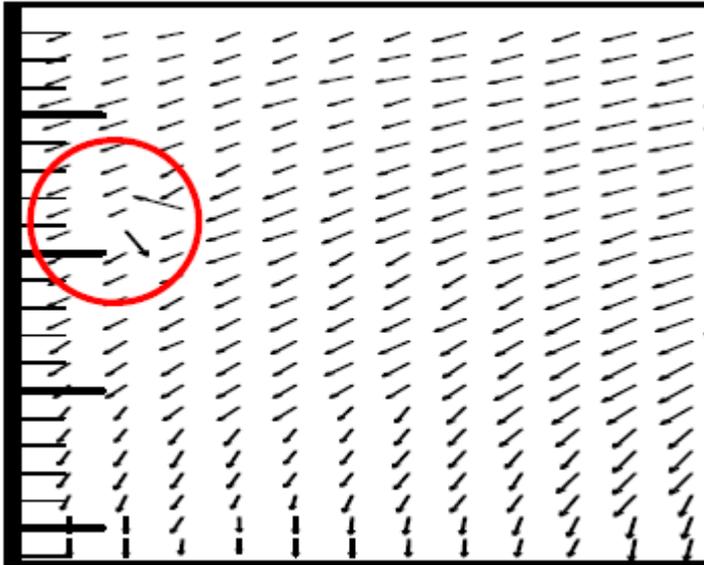
Per quanto riguarda l'eliminazione delle riflessioni interne ed esterne al campo (anche in questo caso si potrebbero effettuare delle operazioni di filtro, ma non si riesce a migliorare molto la soluzione), si procede sottraendo il valore minimo o il valore medio di una sequenza di immagini per ciascun elemento dell'immagine.

L'operazione di sottrazione del valore minimo o medio risulta molto vantaggiosa per la successiva analisi delle immagini e viene adottata comunemente. In poche parole il software cross-correla la differenza tra l'immagine stessa e il suo valor medio in una sequenza di immagini.

Per quanto riguarda le operazioni di post-trattamento delle immagini PIV, bisogna notare come spesso nelle stesse siano presenti vettori che possono essere classificati come "spuri" (cioè difformi rispetto ai vettori adiacenti).

Naturalmente questa osservazione deve essere fatta in modo oggettivo (e non soltanto visuale) e soprattutto l'operazione di successiva sostituzione deve essere effettuata con attenzione.

In Fig. 2.22, è riportata un'immagine con alcuni vettori spuri che andrebbero eliminati e sostituiti per avere un campo più regolare (naturalmente deve essere sempre possibile utilizzare il campo vettoriale non corretto).



**Fig. 2.22** Porzione di un'immagine PIV con evidenziati alcuni vettori spuri.

In passato, prima dell'utilizzo di procedure iterative di analisi di immagini PIV, l'operazione veniva effettivamente svolta a valle dell'analisi delle immagini. Bisogna, però, considerare che, in una procedura iterativa, la presenza di un vettore spurio può influenzare la determinazione dei vettori in tutta una zona, quando viene diminuita la dimensione della finestra di interrogazione. Di conseguenza è preferibile inserire la procedura di validazione e sostituzione all'interno del ciclo iterativo, per cui la procedura diventa parte integrante dell'analisi dell'immagine.

Come nell'utilizzo di filtri, la procedura di validazione e sostituzione considera ogni elemento della matrice di vettori, per ciascuna componente di velocità, cercando quando la differenza tra il punto considerato e i primi vicini (in genere gli 8 vettori adiacenti) supera un valore di soglia fissato inizialmente (in questo caso il valore viene considerato come spurio). Quando questo accade entra in gioco la procedura di sostituzione del vettore spurio

I possibili schemi di sostituzione di un vettore sono:

- media pesata a partire dagli 8 vicini;

- media pesata tra spostamenti lineari orizzontali;
- media pesata tra spostamenti lineari verticali;
- combinazione di spostamenti lineari orizzontali e verticali;
- combinazione dei precedenti.

Infine, anche la modalità con cui ci si sposta da un punto a quello adiacente può alterare il risultato.

L'uso di una procedura di individuazione basata su 12 vicini e la sostituzione dei vettori spuri con un peso variabile su 24 vicini porta ad una diminuzione dell'errore di un fattore 4.

E' importante notare che l'utilizzo di queste procedure di individuazione e sostituzione dei vettori spuri si rifletta in un aumento dei tempi di calcolo di un fattore circa pari a 2.

## **2.11 Misure con tecnica PIV stereoscopica**

Nonostante tutti i vantaggi descritti nei precedenti capitoli, uno dei maggiori inconvenienti della PIV classica risiede nel fatto che la tecnica è in grado di misurare soltanto la proiezione del vettore velocità sul piano di luce laser, ossia di effettuare solamente misure 2D. In presenza di moti fortemente tridimensionali, la componente della velocità ortogonale al piano di misura non può dunque essere misurata.

Nel caso si vogliano effettuare misure tridimensionali, è dunque evidente che non si può ricorrere alla tecnica PIV tradizionale; le tecniche PIV in grado di superare questo limite sono la PIV olografica, la PIV con piano duale e la PIV stereoscopica.

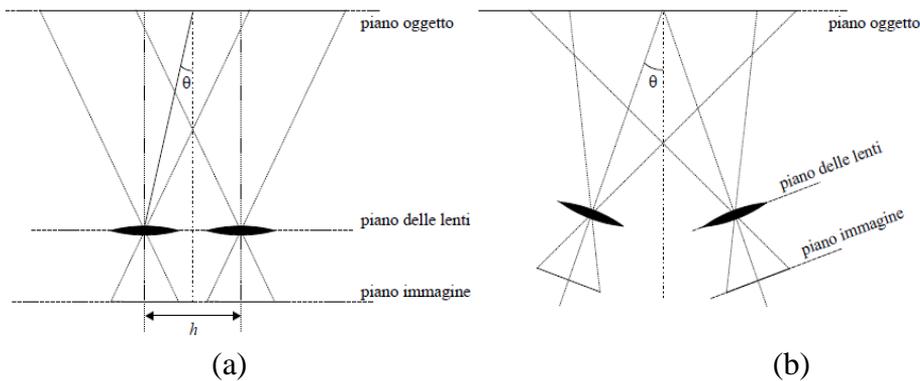
Quest'ultima è la tecnica più comunemente adoperata e consiste nel registrare le immagini delle particelle traccianti da due angoli di vista diversi, con due distinte telecamere. Nel seguito saranno trattate soltanto le problematiche connesse con la tecnica stereoscopica, essendo questa la tecnica adoperata per effettuare le misure del campo di moto nel presente lavoro di tesi [15], [18].

### **2.11.1 Disposizione delle ottiche nelle registrazioni stereoscopiche**

Come accennato in precedenza, le registrazioni stereoscopiche sono effettuate da due telecamere inquadranti lo stesso oggetto da punti di vista differenti.

In tal modo, ogni telecamera ottiene due informazioni bidimensionali dello stesso oggetto. Combinando le informazioni delle due

telecamere, è possibile ottenere un'informazione tridimensionale dell'oggetto registrato; tale processo avviene in maniera analoga a quanto accade nel nostro cervello, il quale stima la profondità di un oggetto a partire dalle immagini riprese dai due occhi. I metodi stereoscopici sono sostanzialmente due: il metodo con traslazione ed il metodo con spostamento angolare. Come si può vedere in Fig. 2.23, la principale differenza tra i due metodi risiede nel diverso allineamento dei sistemi ottici.



**Fig. 2.23** Rappresentazione schematica di un apparato stereoscopico: metodo con traslazione (a); metodo con spostamento angolare (b).

Come si può vedere in Fig. 2.23(a), nel caso di metodo con traslazione, le telecamere sono disposte parallelamente l'una rispetto all'altra ed hanno gli assi ottici ortogonali al piano oggetto; di conseguenza il piano della lente ed il piano dell'immagine, coincidente con il piano dei sensori CCD, sono paralleli. Con questa disposizione, però, è possibile calcolare le tre componenti del vettore spostamento soltanto nella zona in cui i due campi di vista si sovrappongono.

La distanza tra gli assi ottici delle due telecamere è indicata con  $2h$ , invece, l'angolo di vista, definito come l'angolo sotteso dall'asse di simmetria e dal raggio congiungente il centro dell'oggetto con il centro della lente, è indicato con  $\theta$ .

Dalla letteratura emerge che, per aumentare l'accuratezza nella misura della componente di velocità ortogonale al piano di misura, bisogna incrementare l'angolo di vista fino al valore massimo ottenibile. Nel caso si utilizzi il metodo con traslazione, per aumentare  $\theta$  si deve

incrementare  $h$ , a scapito, però, della zona di sovrapposizione dei campi di vista; per risolvere quest'ultimo problema, è possibile traslare i sensori CCD rispetto alle lenti, ottenendo un aumento del campo di vista comune. Così facendo, però, si creano dei problemi di distorsione dell'immagine, visto che la maggior parte delle lenti, essendo progettata per l'utilizzo con un sensore fisso centrato sull'asse ottico, è caratterizzata da una forte diminuzione della funzione di trasferimento della modulazione (MTF) verso i bordi del campo di vista, ossia lontano dall'asse di vista principale. Poiché le lenti con asse ottico obliquo non sono praticamente realizzabili, per migliorare l'accuratezza, è indispensabile adoperare sistemi alternativi a quello appena descritto. Il metodo con spostamento angolare, allineando l'asse della lente con la direzione di vista principale, rappresenta una valida alternativa; la sua schematizzazione è mostrata in Fig. 2.23(b).

In questa configurazione, le telecamere sono posizionate con un certo angolo rispetto al piano oggetto inquadrato e, di conseguenza, il piano oggetto ed il piano dell'immagine non sono più paralleli. Gli assi ottici si intersecano sul piano oggetto e l'angolo di vista, indicato con  $\theta$ , è definito ancora una volta come l'angolo sotteso dall'asse di simmetria e dal raggio congiungente il centro dell'oggetto con il centro della lente. Utilizzando questo metodo, si possono realizzare misure con grandi angoli di vista senza una grossa perdita di informazione e ci si aspetta così di ottenere una migliore accuratezza nella misura della componente ortogonale al piano oggetto.

Con l'allineamento secondo il metodo con spostamento angolare, però, nascono due nuove difficoltà che non erano presenti nel metodo con traslazione. Un primo problema, dovuto all'assenza di parallelismo tra il piano oggetto e quello dell'immagine, è legato all'ingrandimento non uniforme sull'immagine. Ciò induce grossi errori prospettici nella misura delle proiezioni delle componenti nel piano di misura e rende necessario l'utilizzo di diversi metodi di compensazione degli errori. Un secondo problema, dovuto anch'esso alla particolare disposizione di questa configurazione, è connesso al fatto che l'immagine non è completamente a fuoco su tutto il piano. Se si ricorda l'espressione della profondità di campo, scritta nella forma:

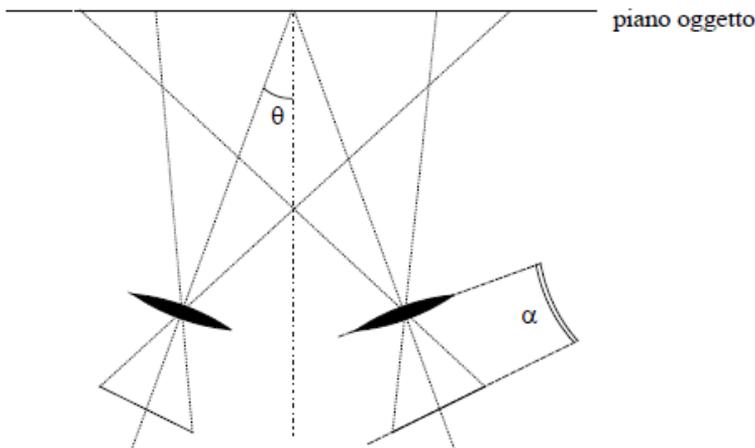
$$\delta_z = 4(1 + M^{-1})^2 f_{\#}^2 \lambda \quad (2.20)$$

è evidente che, per risolvere il problema della messa a fuoco dell'immagine, è necessario incrementare il numero  $f$  riducendo il diametro dell'apertura. In base alla (2.19) ed a semplici considerazioni geometriche, per una lunghezza d'onda di  $500nm$ , un angolo di vista  $45^\circ$  ed una lunghezza dell'oggetto di  $40mm$ , si ha che per avere una messa a fuoco uniforme su tutta l'immagine bisognerebbe avere  $f\# = 19.4$ . Questo valore è incompatibile con l'esigenza di avere una sufficiente quantità di luce necessaria ad effettuare misure PIV corrette. Per risolvere il problema della messa a fuoco si rende perciò necessario posizionare le lenti ed i sensori CCD in maniera da soddisfare la condizione di Scheimpflug [10].

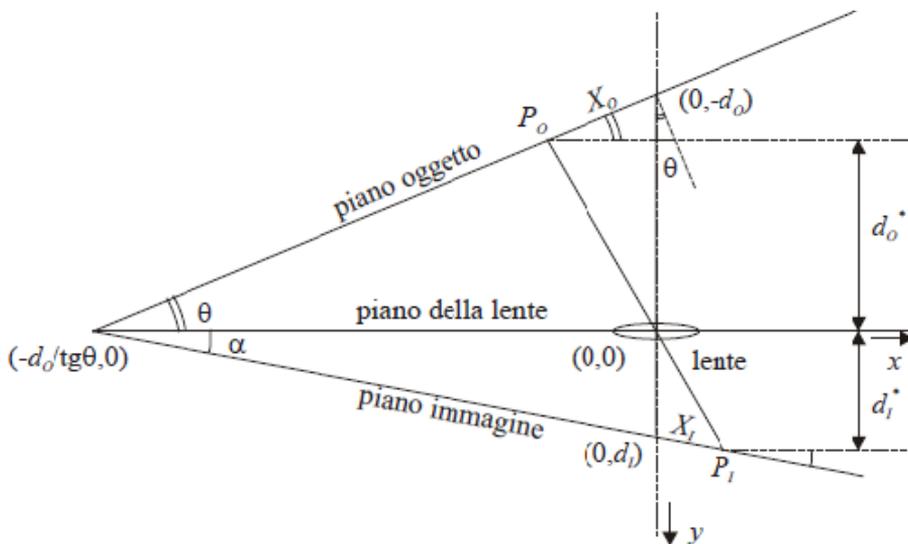
### 2.11.2 Condizione di Scheimpflug

La condizione di Scheimpflug richiede un'ulteriore rotazione del piano immagine rispetto al piano delle lenti di un particolare angolo  $\alpha$ , come è visibile in Fig. 2.24.

L'angolo di cui è richiesta la rotazione addizionale può essere calcolato in base a considerazioni deducibili dalla rappresentazione schematica di Fig. 2.25.



**Fig. 2.24** Rappresentazione schematica di un apparato stereoscopico nel metodo con spostamento angolare, rispettante la condizione di Scheimpflug.



**Fig. 2.25** Ricostruzione di una coordinata del piano di misura basata sull'ottica geometrica per una configurazione stereoscopica con metodo con spostamento angolare soddisfacente la condizione di Scheimpflug.

Si consideri un sistema di coordinate cartesiane  $(x, y)$  con origine nel centro della lente ed assi diretti lungo il piano della lente e la direzione ad esso ortogonale rispettivamente. Si consideri il raggio nominale del sistema ottico, definito come il raggio passante per il centro della lente ed ortogonale al piano della lente stessa.

Si indichi con  $\theta$ , l'angolo di vista definito come l'angolo compreso tra il raggio nominale e la normale al piano oggetto. Indicando rispettivamente con  $d_o$  e  $d_i$  le distanze della lente dal piano oggetto e dal piano immagine prese lungo il raggio nominale, i punti di intersezione del raggio nominale con i rispettivi piani avranno coordinate  $(0, -d_o)$  e  $(0, d_i)$ . Il fattore di ingrandimento nominale  $M_n$  è dato allora dalla seguente espressione:

$$M_n = \frac{d_i}{d_o} \quad (2.21)$$

Indicando con  $P_o$  un generico punto del piano oggetto, con  $P_i$  il punto corrispondente sul piano immagine e con  $d_o^*$  e  $d_i^*$  le corrispondenti

coordinate lungo  $y$ , in base alle note relazioni trigonometriche tra gli angoli ed i lati di un triangolo rettangolo, si ha:

$$\frac{tg\alpha}{tg\theta} = \frac{d_I - d_I^*}{d_I^*} \frac{d_O^*}{d_O^* - d_O} = \frac{d_I - d_I^*}{d_O^* - d_O} \frac{d_O^*}{d_I^*} \quad (2.22)$$

Affinché il punto  $P_I$  appartenga allo stesso piano focale del punto di intersezione del piano immagine con il raggio nominale, deve essere soddisfatta la condizione:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_I} + \frac{1}{d_O} = \frac{1}{d_I^*} + \frac{1}{d_O^*} \quad (2.23)$$

dove con  $f$  si è indicata la distanza focale della lente. Raggruppando al primo membro le coordinate dei punti nel piano immagine ed al secondo membro quelle dei punti nel piano oggetto, la (2.22) si può scrivere nella forma:

$$\frac{d_I}{d_O} = \frac{d_I - d_I^*}{d_O^* - d_O} \frac{d_O^*}{d_I^*} \quad (2.24)$$

Ricordando la (2.22) e la (2.23), la (2.24) diventa:

$$M_n = \frac{tg\alpha}{tg\theta} \quad (2.25)$$

L'equazione (2.25) è nota come condizione di Scheimpflug e, se è soddisfatta, le tracce del piano dell'immagine, del piano della lente e del piano oggetto si intersecano nello stesso punto avente coordinate  $(-d_O/tg\theta, 0)$ .

### 2.11.3 Correzione degli errori prospettici

Nel paragrafo precedente si è visto che, adoperando il metodo con spostamento angolare, si introducono errori prospettici nella misura delle componenti di velocità nel piano oggetto. Tali errori sono dovuti al fattore di ingrandimento non uniforme su tutta l'immagine. Al fine di effettuare misure corrette è pertanto necessario calcolare gli errori prospettici mediante una procedura di calibrazione ed eliminarli a posteriori.

I metodi maggiormente adoperati sono due: il primo metodo si basa su una stima del fattore di ingrandimento mediante l'ottica geometrica, il secondo si basa sull'utilizzo di polinomi interpolanti del secondo ordine.

Nel primo metodo, per determinare il fattore di ingrandimento locale sull'immagine e, di conseguenza, la correzione da effettuare sugli spostamenti è necessario conoscere in che modo le coordinate del piano immagine si trasformano nelle coordinate del piano oggetto quando è soddisfatta la condizione di Scheimpflug. Attraverso considerazioni geometriche infine si determinano le formule di trasformazione.

Il problema di tale metodo consiste nell'esatta conoscenza di parametri quali la distanza focale  $f$  della lente, gli angoli  $\alpha$  e  $\theta$  tra i piani, la posizione precisa del piano della lente ed il fattore di ingrandimento nominale  $M_n$ . Inoltre, le espressioni che si ottengono non tengono conto di effetti non lineari, quali le distorsioni della lente, e sono sensibili anche a piccole variazioni dei parametri geometrici.

Il secondo metodo è un approccio più robusto, che tiene conto delle distorsioni della lente, e si ottiene utilizzando polinomi del secondo ordine.

Il metodo con approssimazioni polinomiali approssima la funzione di trasformazione delle coordinate del piano immagine in quelle del piano oggetto con funzioni polinomiali del secondo ordine, utilizzando delle nuove coordinate.

Il suddetto approccio, quindi, ha il vantaggio di evitare il calcolo dei parametri geometrici e di consentire una stima delle deformazioni non lineari attraverso i termini quadratici delle funzioni polinomiali.

#### **2.11.4 Ricostruzione delle tre componenti del campo di moto**

L'accuratezza delle misure di velocità con tecnica PIV dipende dall'accuratezza con cui è possibile misurare gli spostamenti dell'immagine e dall'accuratezza con cui gli spostamenti sull'immagine possono essere collegati alla posizione e agli spostamenti delle particelle.

Questi fattori dipendono principalmente da due tipi di aberrazioni ottiche: le aberrazioni focali che, ingrandendo le particelle, rendono più difficile misurare gli spostamenti in maniera accurata e le distorsioni dell'immagine che introducono una relazione non lineare

tra la posizione della particella e la posizione della sua immagine. Le distorsioni dell'immagine si riferiscono ad ogni agente che rende il fattore di ingrandimento non uniforme lungo il campo di vista dell'immagine.

Le tre cause principali di distorsione sono le imperfezioni costruttive della lente, la rifrazione prodotta da interfacce ottiche, quali finestre e fluidi, che sono posizionate tra il piano oggetto ed il piano immagine e l'assenza di parallelismo tra il piano immagine ed il piano oggetto.

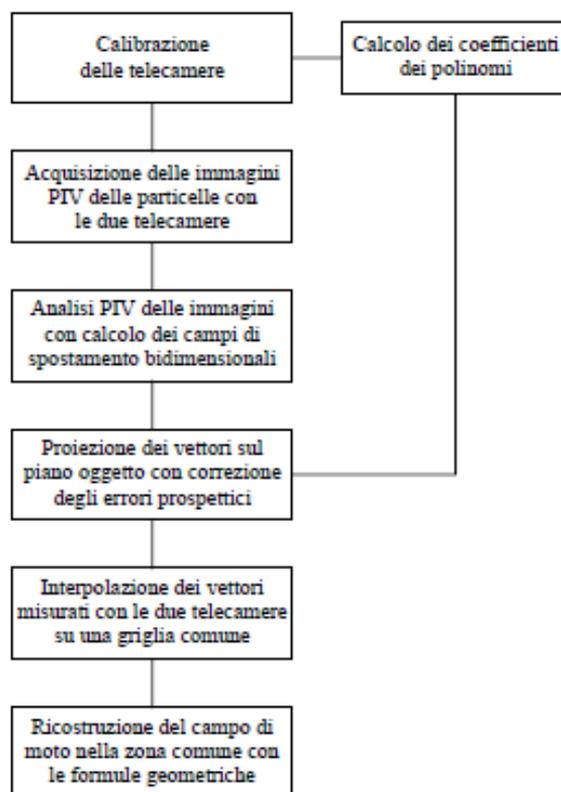
Quest'ultima, come visto, è inevitabilmente presente quando si realizza la PIV stereoscopica con spostamento angolare e capita, anche nel caso si utilizzi una singola telecamera, quando il fascio di luce laser non è allineato con il piano oggetto. In genere, per correggere le distorsioni, si ricorre a modelli matematici della distorsione oppure si utilizzano calibrizioni empiriche.

Sulla base di quanto detto precedentemente, il problema principale consiste nel determinare la funzione di deformazione  $F$ , ossia nel determinare in che modo le posizioni nel piano oggetto si proiettano nelle posizioni del piano immagine tenendo conto delle aberrazioni. Per fare ciò è necessario acquisire delle immagini di una griglia di calibrazione, le cui posizioni sul piano oggetto siano note. La griglia deve avere dei punti caratteristici, in modo tale che dalla posizione di questi nel piano oggetto e nel piano immagine sia possibile calcolare la funzione di mappatura richiesta. La procedura di calibrazione, dunque, fornisce, in uscita su tutta l'immagine, una mappa della deformazione dell'immagine e dei coefficienti di calibrazione che sono collegati alla distorsione spaziale dell'immagine stessa [13].

Per ottenere la massima accuratezza, è preferibile che la griglia occupi l'intero campo di vista inquadrato dalle due telecamere.

Per determinare la posizione dei punti della griglia sul piano immagine si utilizza il metodo PIV basato sulla mutua correlazione. In pratica, l'immagine della griglia ed un'immagine campione simile a quella presente sulla griglia sono correlate, determinando così la deformazione dell'immagine.

Dopo aver introdotto le principali problematiche connesse alla calibrazione, è ora possibile descrivere in maniera più dettagliata la procedura di misure con tecnica PIV stereoscopica.



**Fig. 2.26** Diagramma di flusso della procedura PIV stereoscopica.

Il diagramma di flusso relativo alla procedura descritta è riportato in Fig. 2.26, mentre i passi principali in cui si articola sono i seguenti:

- 1) Dopo aver posizionato le telecamere secondo la configurazione voluta, si effettua la calibrazione di entrambe le telecamere, utilizzando un'apposita griglia secondo le modalità indicate sopra. Con le informazioni ottenute si possono determinare i valori dei coefficienti delle equazioni di calibrazione per ciascuna delle due telecamere e le costanti del polinomio interpolante saranno successivamente utilizzate per correggere gli errori prospettici.
- 2) Si acquisiscono, per il flusso in esame, le immagini PIV delle particelle traccianti.
- 3) Le immagini acquisite sono analizzate con gli algoritmi PIV convenzionali. Ogni coppia di immagini acquisite da ciascuna

telecamera fornisce, così, un campo di moto bidimensionale misurato sul piano immagine.

4) Utilizzando i coefficienti del polinomio calcolati in fase di calibrazione si proiettano i campi di spostamento bidimensionali sul piano oggetto. Le proiezioni delle componenti ottenute in tal modo non sono affette da errori prospettici e possono essere utilizzate per una corretta ricostruzione del campo di spostamento.

5) Poiché le posizioni dei punti di griglia ricondotti al piano oggetto sono in generale diversi per le due telecamere, è necessario interpolare i dati su una nuova griglia in comune alle due telecamere.

6) Le componenti effettive del campo di spostamento sono calcolate in base a formule di ricostruzione geometrica. Infine, il campo di moto è fornito sui punti della griglia comune ed i dati in uscita costituiscono il risultato dell'analisi stereoscopica.

# CAPITOLO 3

## Impianto di prova sperimentale

### 3. Impianto di prova sperimentale

In questo capitolo viene descritto l'apparato sperimentale utilizzato nel presente lavoro di tesi, in dotazione presso il Laboratorio di fluidodinamica a freddo dell'Azienda Ansaldo Energia S.p.A., all'interno dell'unità "Laboratori Aerodinamica, Combustione e Scambio Termico (TLA)".

In principio vengono mostrate le caratteristiche specifiche del componente oggetto della presente tesi, il diffusore di scarico assiale della turbina a gas AE94.3A, realizzata e commercializzata dall'Azienda Ansaldo Energia S.p.A.; successivamente viene descritto l'impianto di prova utilizzato per effettuare la messa a punto delle misure del campo di velocità in una sezione interna ad un simulacro rappresentante il diffusore in scala 1:8, effettuate con la tecnica di misura ottica *Particle Image Velocimetry*.

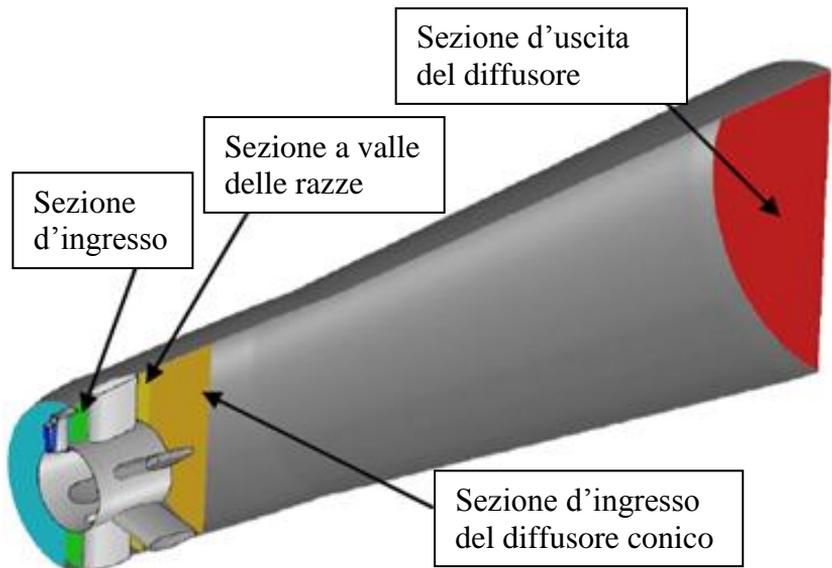
#### 3.1 Caratteristiche specifiche del diffusore

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno di un progetto che ha la finalità di studiare la fluidodinamica del diffusore di scarico assiale di turbina a gas, al fine di migliorarne le prestazioni e ottenere di conseguenza un incremento del rendimento.

Come già esposto nel paragrafo 1.2.5., il diffusore di scarico è un condotto attraverso il quale si realizza un aumento di pressione statica a spese dell'energia cinetica del flusso entrante; è dunque chiaro come un diffusore deve presentare almeno una zona in cui il flusso venga rallentato, ossia un tratto divergente.

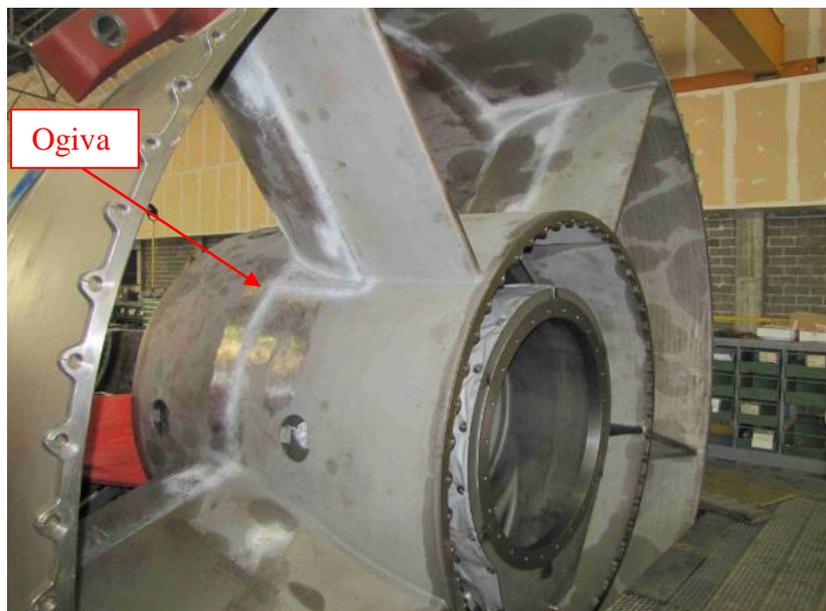
Nello specifico, come mostrato in Fig. 3.1, il diffusore di scarico montato sulla turbina a gas AE94.3A è dotato di una prima parte di forma anulare, di estensione assiale molto ridotta, e di una seconda parte di forma conica, di estensione notevole.

Il tratto anulare contiene cinque razze profilate, più un'ulteriore razza di dimensioni minori e forma diversa. Le prime ricoprono sia un ruolo strutturale che fluidodinamico; infatti servono per raddrizzare il flusso fortemente *swirlato* uscente dall'ultimo stadio della turbina e contengono al loro interno la struttura di supporto del cuscinetto lato turbina. La seconda invece contiene i tubi di alimentazione dell'olio del cuscinetto.



**Fig. 3.1** Rappresentazione di un diffusore di scarico assiale.

Le razze sono ancorate ad un'ogiva circolare, mostrata in Fig. 3.2, che termina immediatamente a valle delle stesse.

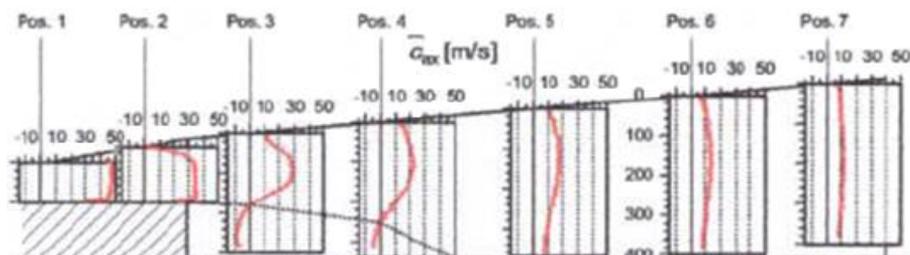


**Fig. 3.2** Particolare del diffusore anulare.

In questa sezione il flusso sperimenta un improvviso aumento dell'area di passaggio, passando dal diffusore anulare a quello conico, che comporta una forte riduzione della velocità, ma contemporaneamente si crea una estesa zona di ricircolo, che si chiude più o meno lontano dall'ogiva, in funzione delle condizioni di carico della turbina.

Le razze non possono essere ottimizzate per tutte le condizioni operative, quindi le loro prestazioni subiranno forti variazioni al variare del carico della turbina; in alcuni casi, si può verificare anche la separazione del flusso a valle delle stesse.

Come si può vedere in Fig.3.3, se il supporto cuscinetto non venisse terminato da una ogiva, il diffusore sarebbe interessato da ampie zone di ricircolazione, nelle quali la velocità assiale del flusso subisce un cambio di verso.



**Fig. 3.3** Andamento della velocità assiale all'interno del diffusore.

Oltre alla separazione del flusso prodotta dall'ogiva e dalle razze, si nota anche il forte sviluppo dello strato limite al *casing*; questo aspetto è da tenere in considerazione, in fase progettuale, nella scelta dell'angolo di apertura del cono diffusore. In particolare, si deve evitare un angolo di apertura troppo elevato tale da provocare la separazione del flusso al *casing*.

Come detto prima, la zona di separazione a valle dell'ogiva si richiude più a valle; nel caso mostrato in Fig. 3.3, essa si richiude nella posizione 5.

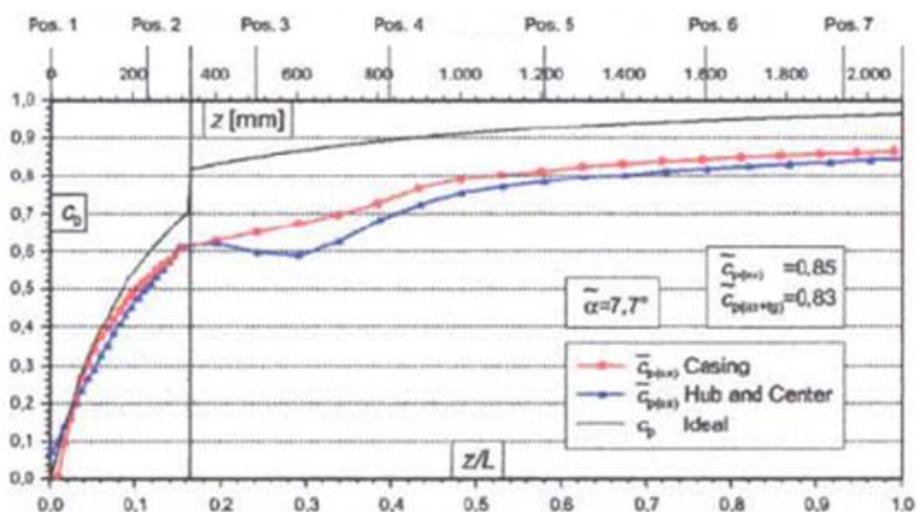
Infine si può notare che il flusso è quasi completamente uniforme nella posizione 7.

Nell'introduzione al componente diffusore, sviluppata nel paragrafo 1.2.5, si è evidenziato che un importante parametro in grado di esprimerne le prestazioni è il coefficiente di recupero di pressione statica  $C_p$ . In Fig. 3.4 viene mostrato il suo andamento lungo la

direzione assiale, nel caso della geometria mostrata in Fig. 3.3, valido per la condizione operative di pieno carico.

Dal grafico si può notare come il recupero di pressione statica sia molto efficiente nel tratto iniziale, per poi subire una breve caduta a causa della zona di ricircolo a valle del supporto cuscinetto ed infine ritornare a salire nel tratto conico finale.

La curva nera (tratto continuo) rappresenta l'andamento del coefficiente di recupero ideale; si può notare l'efficienza del tratto di diffusore circolare, in quanto le curve tendono a sovrapporsi, mentre per il tratto conico vi è un sostanziale scarto, dovuto al fatto che il caso ideale non considera la separazione del flusso.



**Fig. 3.4** Andamento del coefficiente di recupero di pressione statica  $c_p$  nel diffusore.

Per quanto riguarda i parametri operativi, il diffusore di scarico della turbina in studio opera in condizioni di pressione totale prossime a quelle atmosferiche; in particolare, la pressione totale a valle del diffusore è superiore a quella atmosferica di 10÷40 mbar, in funzione della configurazione presente a valle (camino o caldaia a recupero). La perdita di pressione totale attraverso il diffusore, in condizioni di funzionamento nominale, è prossima a 50÷100 mbar, per cui a monte del diffusore si ha una pressione totale superiore all'atmosferica di circa 60÷140 mbar.

La pressione statica all'ingresso del diffusore è dell'ordine di 0.85 bar assoluti; all'ingresso del diffusore si ha una pressione dinamica dell'ordine di 200 mbar, che si riduce lungo il condotto di scarico, fino a valori molto bassi all'uscita.

Il gas all'uscita della turbina ha una temperatura dell'ordine di  $560 \div 590$  °C, un numero di Mach di circa  $0.55 \div 0.65$  ed un angolo di flusso rispetto alla direzione assiale di  $20^\circ \div 30^\circ$ , in funzione delle condizioni di carico della turbina.

### **3.1.1 Realizzazione del diffusore in scala**

Al fine di studiare in laboratorio la fluidodinamica del diffusore di scarico, si è reso necessario scalare il diffusore stesso; siccome si studia un componente che opera la diffusione di un fluido, gli effetti viscosi e la comprimibilità sono molto importanti, perciò è fondamentale scalare il modello secondo le analogie di Reynolds e di Mach. La scalatura deve però anche tener conto delle caratteristiche dell'impianto sperimentale sul quale verranno eseguite le misure, delle dimensioni e dei costi del modello e delle opere di raccordo tra impianto e modello.

Come sede della campagna di prove è stato scelto l'impianto sperimentale del Politecnico di Milano, che dispone di un ventilatore capace di una portata fino a 25 Kg/s e di una pressione di mandata di circa 1.15 bar.

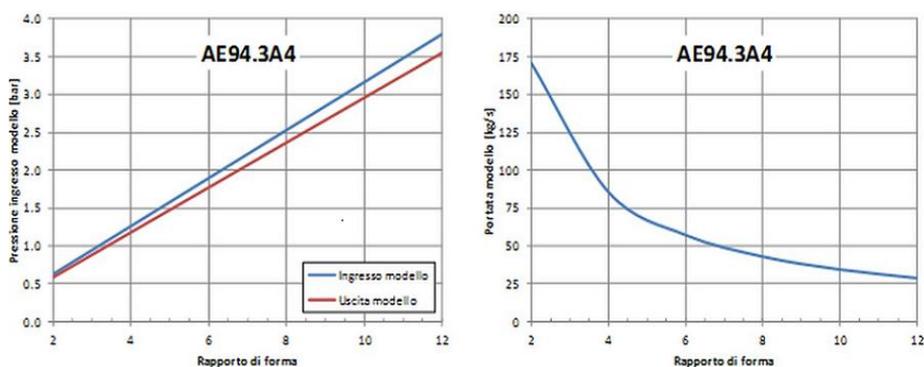
In Fig. 3.5 sono riportati gli andamenti della pressione totale e della portata del modello in funzione del rapporto di scala, nell'ipotesi di scalatura rigorosa con le analogie di Mach e Reynolds.

Come si può notare, non esiste una configurazione possibile che rientri nelle potenzialità dell'impianto di prova; infatti, i valori del rapporto di forma (inferiori a 4) che soddisfano il vincolo sulla pressione totale in ingresso, non rispettano il vincolo sulla portata e viceversa.

Si è dunque scelto di rinunciare alla similitudine di Reynolds e scalare geometricamente il modello con il rapporto di forma  $RF = 8.0$ .

Sono state dunque trovate le dimensioni del modello del diffusore; esso ha un diametro esterno d'ingresso pari a circa 0.400 m, un diametro esterno d'uscita pari a circa 0.800 m e una lunghezza di circa 2.200 m.

La velocità del flusso all'interno del diffusore modello sarà di circa 100 m/s.



**Fig. 3.5** Andamenti della pressione totale e della portata del modello in funzione del rapporto di scala.

Per effettuare lo studio del diffusore modello, la campagna sperimentale prevede di effettuare, oltre a prese di pressione statica, anche misure di campo di moto, in particolare su due piani interni al diffusore, con la tecnica di misura ottica *Particle Image Velocimetry*; in particolare, il primo piano di misura è situato immediatamente a valle delle razze, mentre il secondo è traslato assialmente di 200 mm rispetto al primo.

Al fine di mettere a punto l'intero sistema PIV, in particolar modo per decidere il posizionamento sul diffusore modello degli accessi ottici per laser e telecamere necessari alla misura, si è optato per la costruzione di un preliminare diffusore modello in materiali economici (legno e cartoncino), tale da avere le stesse dimensioni e forma del diffusore scalato.

Su questo diffusore economico è stato possibile mettere a punto il sistema di misura PIV verificando l'efficacia delle soluzioni operative in merito agli accessi ottici e al posizionamento del target per la calibrazione delle misure PIV.

In Fig. 3.6 viene mostrata la fase di costruzione del simulacro del diffusore.



**Fig. 3.6** Fase di costruzione del simulacro del diffusore modello.

Il modello in legno ha permesso di cambiare rapidamente la posizione degli accessi ottici praticati sulle pareti sino a trovare una soluzione soddisfacente. Infatti, sono necessari quattro accessi ottici per ciascun piano di misura: due per l'ingresso e l'uscita della lama di luce (che deve attraversare il piano di misura) e due per la visione del piano per mezzo di una coppia di telecamere (PIV stereoscopica), posizionate simmetricamente rispetto all'asse di simmetria del piano di misura.

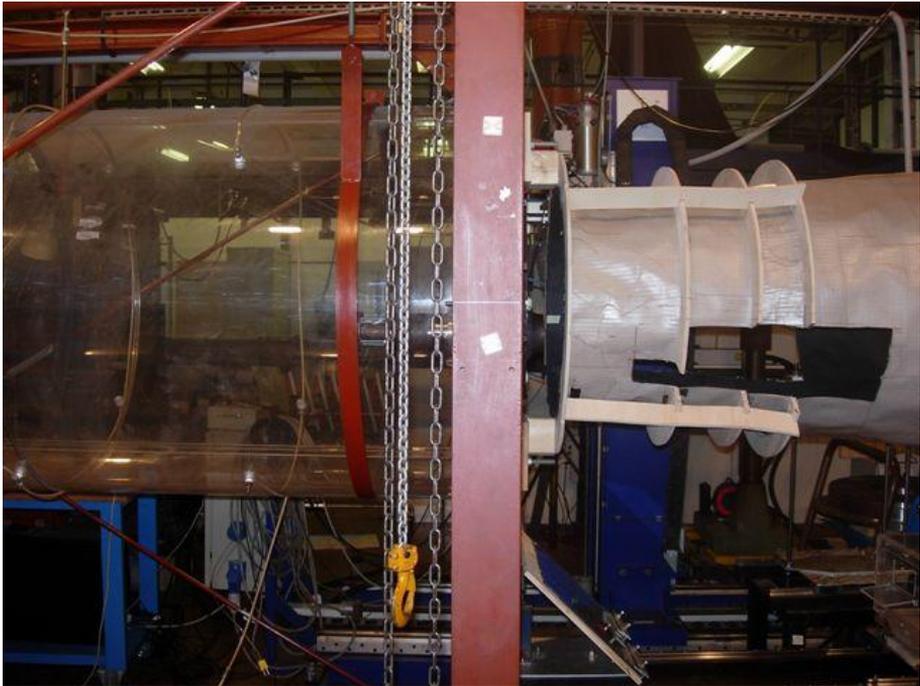
La posizione dell'ingresso e della uscita della lama laser è determinata dalla posizione del piano di misura, mentre l'angolo di vista delle telecamere può esser variato notevolmente.

Il modello economico è stato progettato in modo da poter essere montato sulla flangia di uscita della galleria del vento del Laboratorio del TLA, denominata Linea 10000, in modo tale da potere testare la misura in condizioni rappresentative rispetto alle condizioni sperimentali.

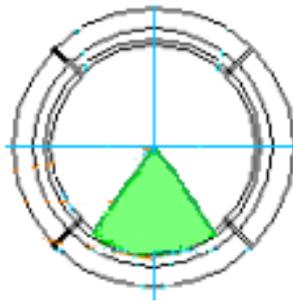
In Fig. 3.7 è mostrato il diffusore montato sullo sbocco della galleria.

Per trovare una definizione preliminare degli accessi ottici si è ricorso ai disegni in formato AUTOCAD del diffusore modello.

L'area d'interesse, sulla quale verranno effettuate le misure del campo di moto, riguarda solamente un settore circolare di ampiezza  $72^\circ$  e non l'intera sezione, come è possibile notare dalla rappresentazione frontale del diffusore in Fig. 3.8; l'area d'interesse è evidenziata in verde. Questo perché si considera la periodicità del flusso.



**Fig. 3.7** Il diffusore modello montato sullo sbocco della galleria del vento di Ansaldo Energia.



**Fig. 3.8** Settore circolare d'interesse.

Al fine di determinare il posizionamento delle telecamere e delle finestre, si sono ricreati i coni ottici delle telecamere sul disegno AUTOCAD del diffusore scalato, basandosi sulle caratteristiche ottiche dei sensori e degli obiettivi, quali la distanza focale, l'angolo di campo e l'area utile del sensore.

È importante far notare che sulla scelta del posizionamento delle telecamere, un vincolo imprescindibile è imposto dal tipo di misura PIV che si è voluto effettuare; infatti, siccome si è scelto di effettuare una misura PIV stereoscopica, che permette di ottenere le tre componenti del vettore velocità nello stesso momento, l'angolazione delle telecamere deve rientrare in un *range* compreso tra i 30° e i 45° rispetto all'asse di simmetria del diffusore.

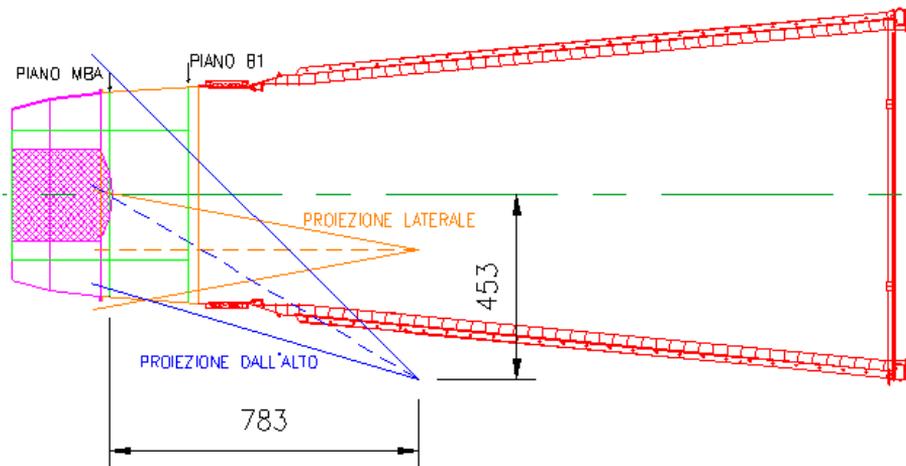
In definitiva la posizione delle telecamere è stata determinata in base alla logica necessità di inquadrare l'area d'interesse, ma anche di ricadere nel range di angolazione corretta.

Seguendo tutte queste impostazioni, il layout definitivo è risultato:

- Telecamere posizionate con un'angolazione di 30°, ad una distanza di 453 mm dall'asse di simmetria e di 783 mm dal piano di misura (vedi Fig. 3.9), e ad un'altezza dal suolo di circa 1520 mm. In particolare, l'altezza è stata determinata dai vincoli sulle dimensioni del diffusore modello e da quelli di interfaccia con la galleria del vento del Politecnico di Milano.

- Accessi ottici per le telecamere di lunghezza pari a 520 mm e di larghezza pari a 140-175mm (vedi Fig. 3.10).

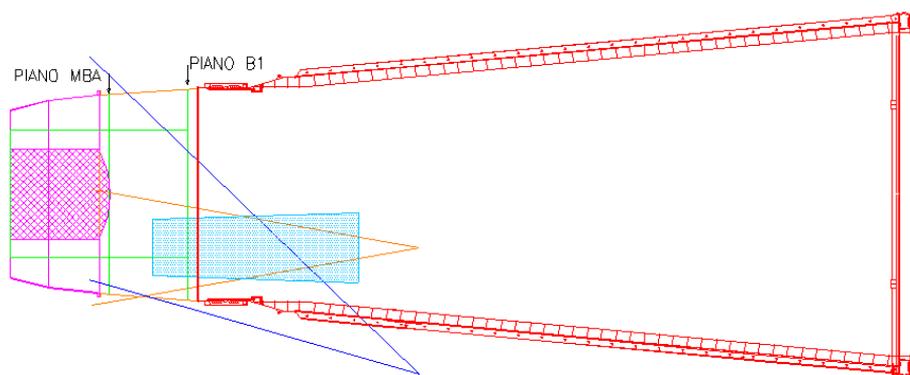
In Fig. 3.9 è mostrato il disegno del layout definitivo realizzato in AUTOCAD, nel quale sono riportati i coni di vista laterale e dall'alto delle telecamere e le quote di posizionamento delle stesse.



**Fig. 3.9** Disegno con rappresentazione proiezione dei coni di vista laterale e dall'alto delle telecamere e quote di posizionamento.

Una volta ottenuta la posizione delle telecamere soddisfacente i vincoli di inquadratura e di angolazione, si ricerca la posizione “teorica” degli accessi ottici, mostrata in Fig. 3.10.

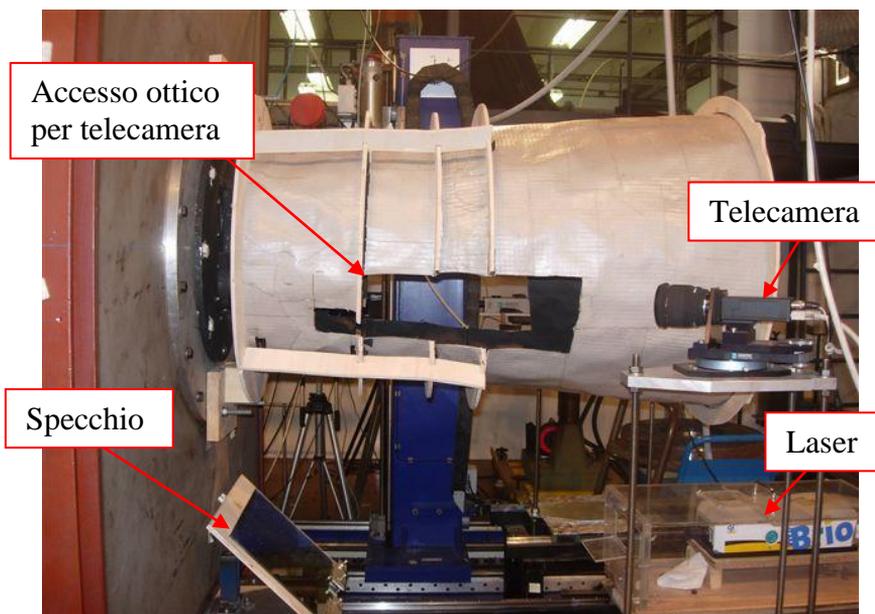
Una volta determinata la posizione e gli ingombri degli accessi ottici, si è proceduto al taglio del simulacro; in Fig. 3.11 è mostrato il simulacro di diffusore montato sull’interfaccia della Linea 10000, con i tagli effettuati secondo le indicazioni del disegno CAD.



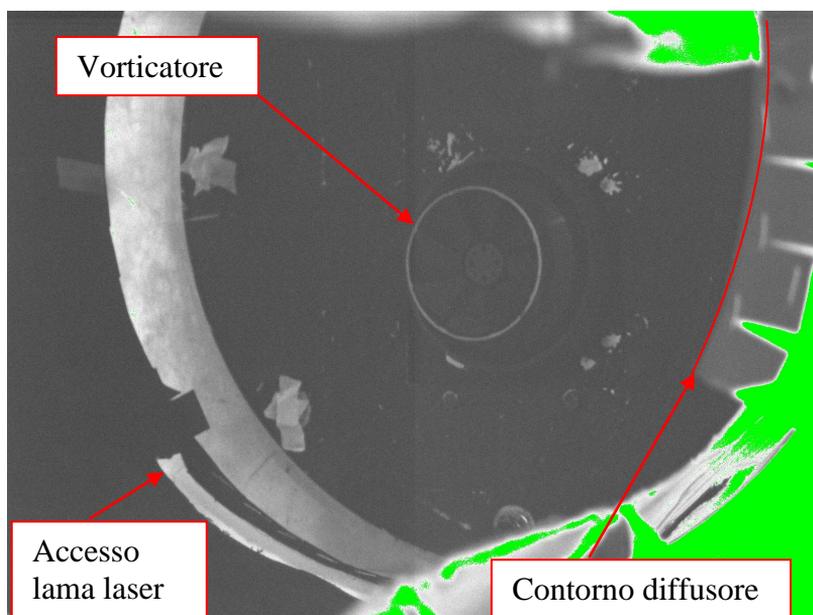
**Fig. 3.10** Disegno con rappresentazione di una finestra per l’accesso ottico della telecamera.

Per verificare l’effettiva correttezza delle impostazioni dedotte dal disegno CAD, sono state acquisite le immagini dell’inquadratura reale delle telecamere; si è riscontrato effettivamente che i tagli sono stati effettuati nella posizione corretta e con gli ingombri giusti, come si può vedere il Fig. 3.12, dove è mostrata, per una delle due telecamere necessarie alla misura PIV, la visuale del piano di misura, corrispondente allo sbocco della linea 10000, con il simulacro di diffusore montato.

Le zone verdi rappresentano le parti del sensore in cui il livello di intensità luminosa incidente ha ecceduto il livello massimo di soglia impostato dal software.



**Fig. 3.11** Particolare del simulacro con tagli effettuati.



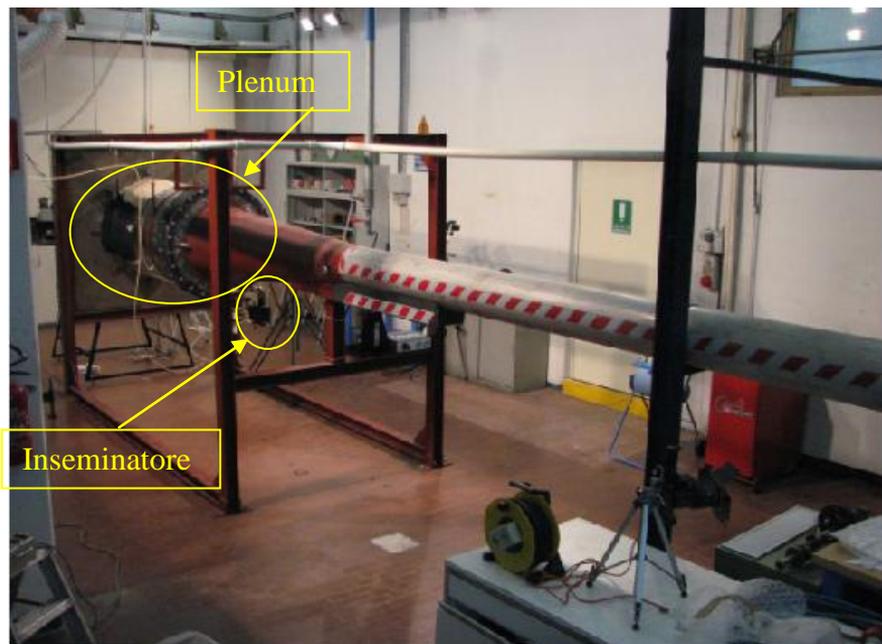
**Fig. 3.12** Visuale di una telecamera con diffusore montato.

### 3.2 Impianto di prova sperimentale

Il sistema di misura PIV utilizzato è composto dai seguenti elementi, che vengono descritti in seguito:

Laser Nd-Yag	Quantel Twins Brio con $f_{\max}=15$ Hz e $E = 120$ mJ
Camera digitale	FlowSense con sensore CCD 1600 x 1200 pixel e <i>pixel pitch</i> 7,4 $\mu\text{m}$
Specchio di rinvio a 90° della lama laser	Specchio ottico
Inseminante ed atomizzatore	TSI 9306A six-jet atomizer
Sistema di sincronizzazione	Timer box
Software Dantec	Dynamic Studio V3.30.0

In Fig. 3.13 è mostrata una visuale d'insieme della linea 10000.



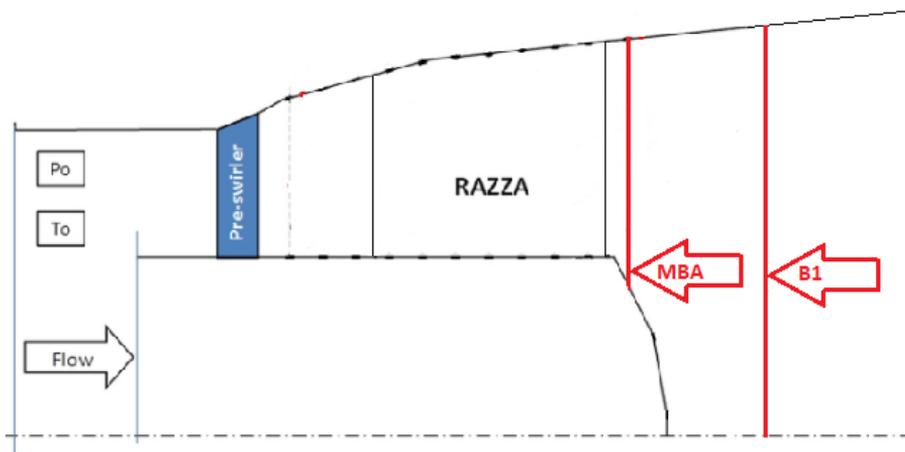
**Fig. 3.13** Galleria del vento.

L'impianto utilizzato per la messa a punto delle misure, la linea 10000, è una galleria del vento in circuito aperto, alimentata da un ventilatore capace di fornire una portata d'aria massima di circa 2 Kg/s; variando la frequenza di rotazione del ventilatore tramite inverter, è possibile variare la portata d'aria in ingresso alla linea.

La portata d'aria viene monitorata mediante un misuratore termico massico di portata, che restituisce i valori di portata e temperatura dell'aria in ingresso.

Su tale linea sono inoltre montati dei rilevatori di pressione, che permettono di valutare il  $\Delta p$  tra pressione di mandata e ambiente; nello specifico, il  $\Delta p$  massimo sostenibile dalla linea è di circa 70 mbar.

La sorgente pulsante luminosa è generata da un laser Nd-Yag Quantel Twins Brio a bassa frequenza (15 Hz) ed energia di circa 120mJ; si tratta di un laser allo stato solido che emette un fascio di luce laser verde a lunghezza d'onda  $\lambda = 532 \mu\text{m}$ .



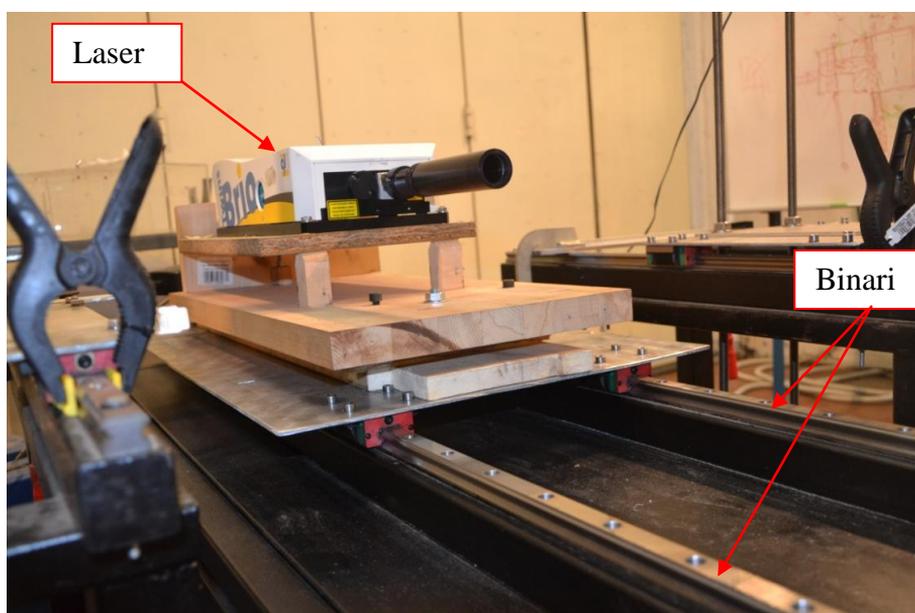
**Fig. 3.14** Rappresentazione dei piani di misura.

Come detto in precedenza, il progetto all'interno del quale si inserisce il presente lavoro di tesi consiste nel determinare il campo di moto in due sezioni interne al diffusore; in particolare, si devono effettuare misure PIV sul piano immediatamente a valle delle razze, denominato piano MBA, e su un piano, denominato B1, posto ad una distanza di 200 mm dal primo. Per ciascun piano si devono effettuare 3 misure, corrispondenti a tre diverse condizioni di funzionamento della turbina.

I piani di misura MBA e B1 sono mostrati in Fig. 3.14.

La messa a punto delle misure PIV comprende, oltre alle verifiche relative alla configurazione del set-up di misura, anche la determinazione delle condizioni di prova, quali il Time between Pulses, l'apertura del diaframma, la quantità di insemillante, e la ripetibilità delle misure ottenute dalle calibrazioni effettuate. Infatti, i piani di misura MBA e B1 vengono indagati, ciascuno nella stessa condizione di carico, per tutte e quattro le condizioni sperimentali studiate.

Questo significa che il sistema laser/specchio e le telecamere devono essere rigidamente traslati ad ogni singola condizione di carico; questo è possibile perché tutti i componenti sono montati su binari, come mostrano le Figg. 3.15, 3.17 e 3.21.



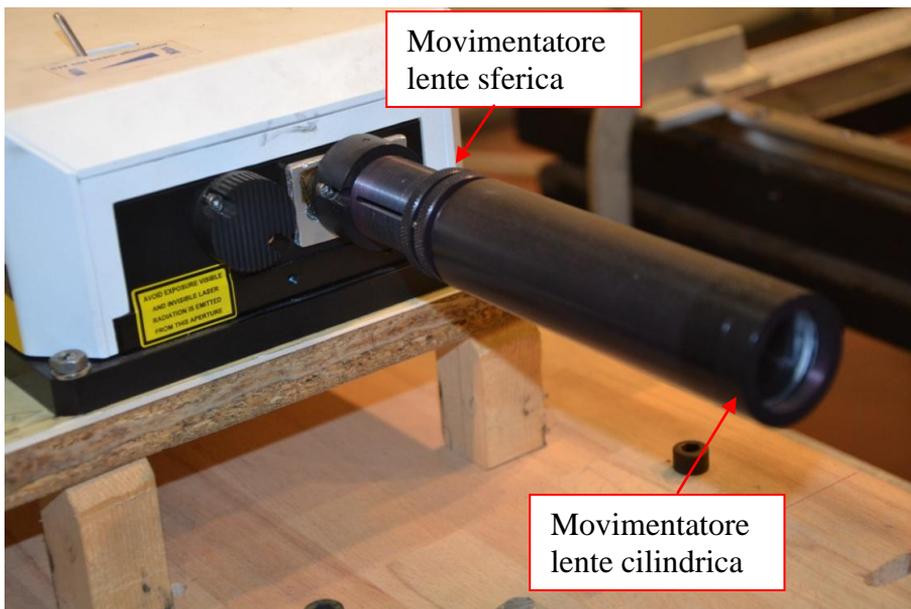
**Fig. 3.15** Sistema di sostegno e movimentazione del laser.

La fig. 3.15 mostra il laser posizionato su di un sostegno dotato di binari, sui quali il laser può scorrere.

Dal momento che la fase di allineamento tra piano laser e telecamera è la più critica e quella che richiede più tempo, laser, specchio e telecamere sono fissate rigidamente alle slitte che scorrono sui binari, in modo che, durante la campagna sperimentale, sia necessario solo

verificare quotidianamente lo stato dell'allineamento. In particolare, il laser è montato su una struttura che permette sia spostamenti verticali, sia rotazionali; questi due gradi di libertà risultano necessari nella fase di allineamento del fascio laser.

La fig. 3.16 mostra, invece, il particolare della testa del laser, sulla quale vi sono due sistemi di movimentazione; uno permette di ruotare la lente cilindrica, in modo da ruotare la lama laser, l'altro di spostare la lente sferica, in modo da spostare il punto di fuoco nella posizione voluta, ossia il centro del piano su cui verranno effettuate le misure PIV, in modo da concentrarvi la massima energia del fascio.



**Fig. 3.16** Dettaglio della testa del laser, con sistema movimentazione lente cilindrica.

L'acquisizione delle immagini è stata eseguita utilizzando una telecamera digitale FlowSense 2M, alla quale è stato montato un obiettivo Sigma 24 mm f/1.8. Il sensore della telecamera presenta un'area utile di  $1200 \times 1600$  pixel, e *pixel pitch* di  $7,4 \mu\text{m}$ .

Le telecamere sono state montate su un sistema che permette di slegare gli spostamenti trasversali, generalmente rilevanti, dalle variazioni

d'inclinazione, generalmente molto ridotte e bisognose dunque di una regolazione fine.

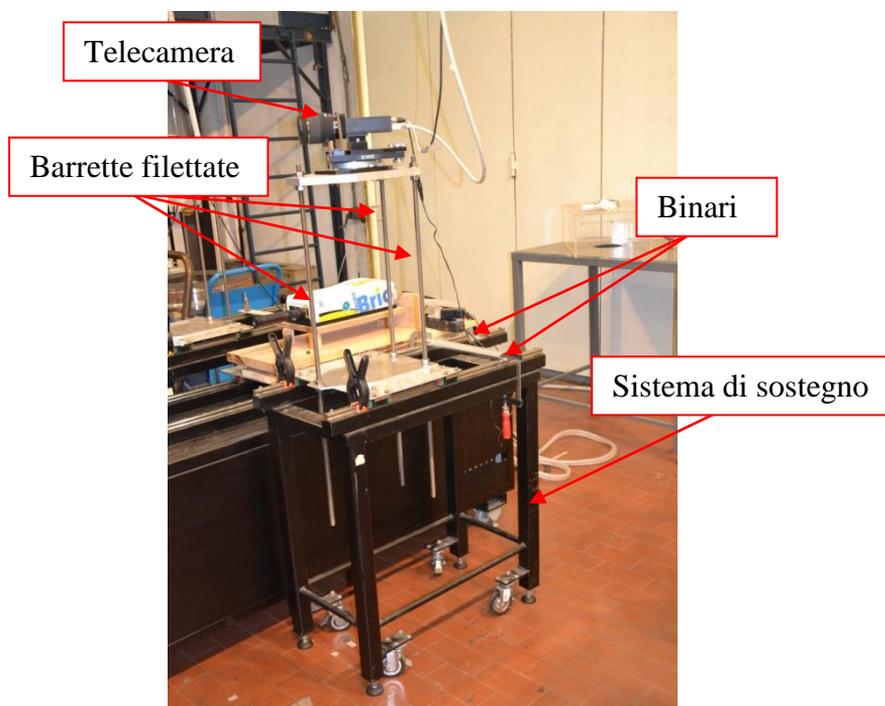
In particolare, la necessità di una regolazione fine dell'inclinazione del sensore della telecamera ricopre un ruolo fondamentale durante la fase di centraggio ed allineamento del sensore rispetto al piano di misura.

La regolazione dell'inclinazione viene effettuata montando la telecamera su una piastra avvitata su tre barrette filettate M12; la regolazione permessa da tale sistema è definita dal passo del filetto delle barrette, pari a 1,25 mm; si può regolare una rotazione di 1/6 di giro e, siccome la distanza fra i punti di regolazione è di 100 mm o superiore, si può regolare l'inclinazione della telecamera con una precisione di:

$$\text{Arctg}\left(\frac{1,25/6}{100}\right) = 0,12^\circ \quad (3.1)$$

o migliore.

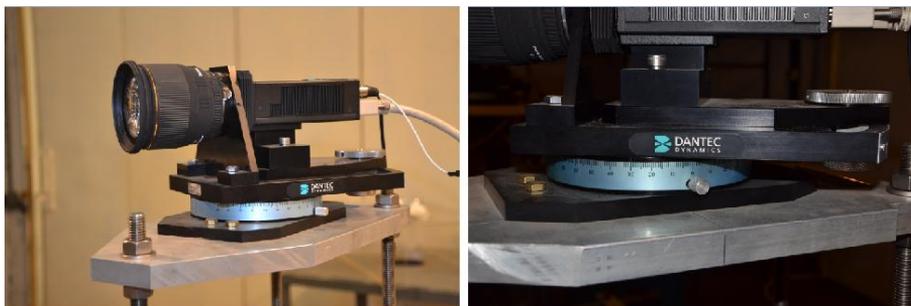
Il sistema nel suo complesso è mostrato in Fig. 3.17.



**Fig. 3.17** Sistema di sostegno e movimentazione delle telecamere.

Tale sistema di sostegno e movimentazione soddisfa anche l'esigenza di ottenere un vincolo quanto più stabile possibile, rispetto per esempio ad un semplice cavalletto fotografico.

Per poter effettuare misure stereoscopiche, come già detto, è necessario dare al sensore della telecamera un'angolazione rispetto all'asse di simmetria compresa tra i  $30^\circ$  e i  $45^\circ$ ; per evitare una complessa rotazione dell'intero sistema di sostegno, la telecamera è stata montata su un sistema di movimentazione angolare, dotato di scala graduata, visibile in Fig. 3.18.



**Fig. 3.18** Sistema di movimentazione angolare per la telecamera.

Un altro componente fondamentale per le misure PIV è il *timer box*, ossia il sistema di sincronizzazione, che permette di regolare il sistema d'acquisizione delle immagini in modo tale da mascherare l'istante in cui è comandato l'impulso laser attraverso le lampade (flash) e l'istante in cui esso si verifica (Q-switch); in questo modo si ottiene la corrispondenza tra l'apertura dell'obiettivo e l'istante in cui è massima l'energia dell'impulso laser.

L'inseminatore è un ulteriore componente indispensabile per le misure PIV; esso deve produrre particelle traccianti dal diametro molto ridotto, in modo da rendere trascurabili gli effetti gravitazionali ed inerziali sulle particelle.

Per le prove è stato utilizzato come tracciante una miscela di acqua e glicerina, la quale viene atomizzata ed iniettata nel flusso d'aria da una coppia di atomizzatori, schematizzati in Fig. 3.19.

È stata scelta la miscela di acqua e glicerina in quanto è un inseminante atossico, economico e che riflette in maniera efficiente la luce laser, in

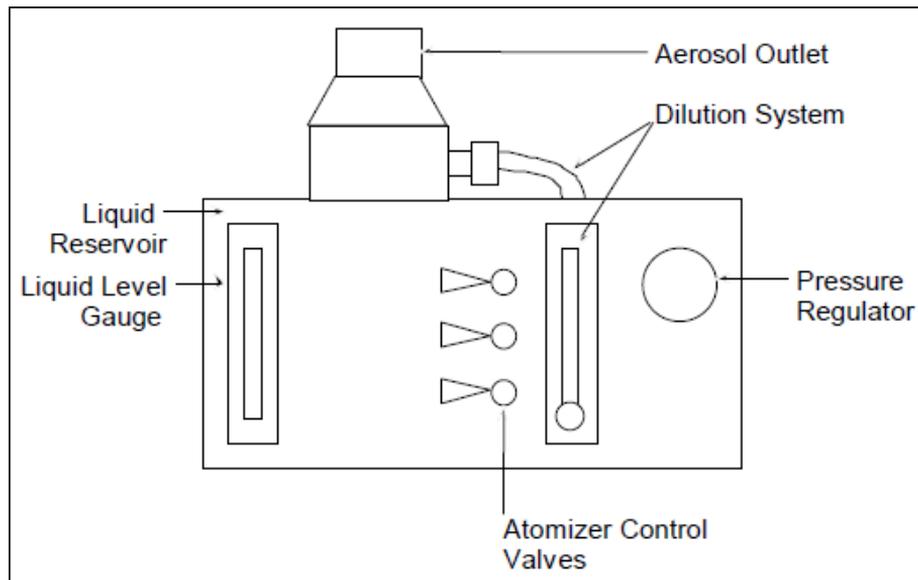
modo da soddisfare le caratteristiche che deve avere un buon tracciante.

Come si può vedere dalla Fig. 3.19, l'atomizzatore è dotato di un regolatore di pressione, che controlla la pressione in ingresso, di un sistema di diluizione, che consente di variare la concentrazione dell'aerosol, e di tre valvole di controllo, che permettono di variare la quantità di insemillante immessa nel flusso.

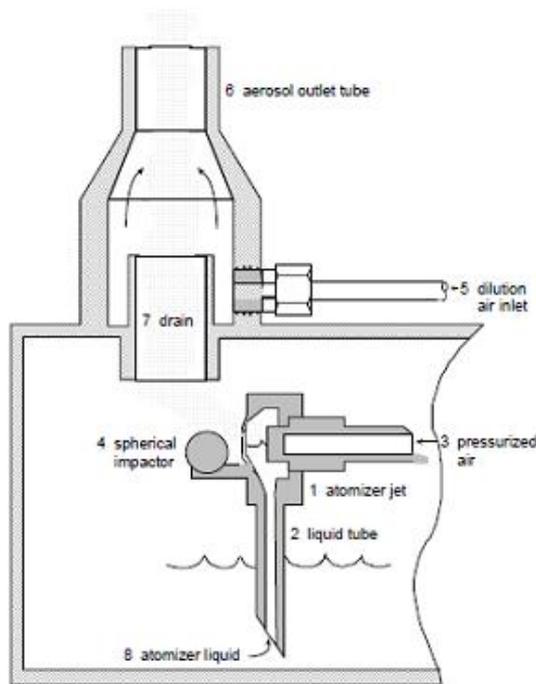
In particolare, ciascuna valvola attiva un numero differente di jet atomizzatori, fino ad un numero massimo di sei, consentendo un campo di utilizzo molto ampio.

Il principio di funzionamento di un singolo jet atomizzatore è mostrato in Fig. 3.20.

L'aria pressurizzata, passando in un tubo di diametro molto piccolo, forma un getto ad altissima velocità; si crea dunque, all'uscita del tubicino, una depressione che aspira l'insemillante attraverso un condotto capillare. L'insemillante quindi viene frantumato in goccioline dal getto stesso; le gocce di dimensioni maggiori impattano sull'ostacolo sferico, posto subito a valle del getto, mentre quelle di dimensioni minori formano l'aerosol.



**Fig. 3.19** Schema atomizzatore utilizzato per le prove.



**Fig. 3.20** Schema del principio di formazione dell'aerosol.

La quantità di insemillante prodotta dipende dalla pressione dell'aria in ingresso e dal numero di getti attivati; ovviamente, a parità di pressione in ingresso, la portata di insemillante è proporzionale al numero di getti attivi.

Nello specifico, la Tab. 3.1 mostra la portata di insemillante prodotta da un singolo getto, al variare della pressione in ingresso.

L'atomizzatore utilizzato per le prove produce particelle di insemillante con un diametro di  $0,3 \mu\text{m}$ , con una concentrazione di circa  $10^6$  particelle/cm<sup>3</sup>.

Il punto di iniezione del tracciante è posizionato a monte del piano di misura, per la precisione ad una distanza di circa un metro dalla sezione di sbocco della galleria del vento, al fine di consentire un adeguato miscelamento dell'insemillante nella corrente fluida.

Aerosol Flowrate Per Jet

<u>Input</u> <u>Pressure</u> <u>kPa</u>	<u>Aerosol</u> <u>Output*</u> <u>L/min</u>
34.5	2.4
68.9	3.7
103.0	4.7
138.0	5.7
172.0	6.6
241.0	8.3
310.0	10.2
379.0	12.0

\*Outlet open to the atmosphere.

**Tab. 3.1** Portata di insemillante in funzione della pressione in ingresso.

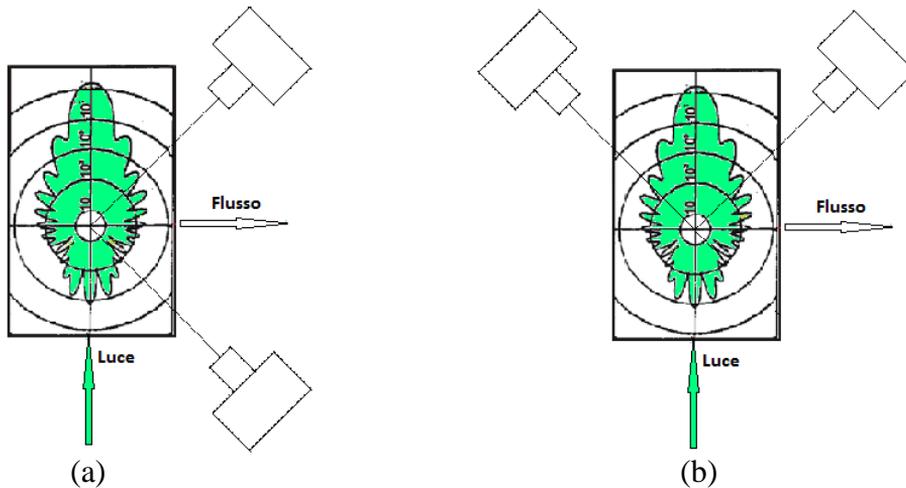
Infine, per illuminare il piano di misura con la luce laser, è stato utilizzato uno specchio ottico, posizionato con un'inclinazione di  $45^\circ$ , in modo tale da deviare di  $90^\circ$  la lama laser, siccome i piani di misura risultano perpendicolari alla lama laser.

Lo specchio utilizzato per le prove è uno specchio ottico di dimensioni 400 mm x 300 mm e spessore 5 mm.

È importante giustificare la scelta dell'utilizzo dello specchio. Si potrebbe infatti posizionare il laser lateralmente alla direzione principale del flusso, in modo da inviare direttamente la lama laser verticale ad illuminare il piano di misura. Con tale configurazione, però, si otterrebbero due differenti condizioni di illuminazione per le telecamere; infatti, come si può vedere dalla distribuzione della luce riflessa da una particella, riportata in Fig. 3.21, se le due telecamere non sono posizionate simmetricamente rispetto alla lama laser, la quantità di luce ricevuta da una telecamera è sensibilmente maggiore rispetto all'altra.

Invece, se le due telecamere vengono posizionate simmetricamente rispetto alla lama laser, come nel caso delle prove effettuate, entrambe ricevono la stessa quantità di luce riflessa dalle particelle.

Nel lavoro di tesi si è anche proceduto all'ottimizzazione e costruzione di un nuovo sistema di sostegno, movimentazione e regolazione dello specchio



**Fig. 3.21** Disposizione delle telecamere rispetto alla lama laser: (a) asimmetrica, (b) simmetrica.

### 3.2.1 Realizzazione del sistema di movimentazione dello specchio ottico

La campagna di misure da effettuare in laboratorio prevede di indagare il campo di moto in due sezioni trasversali del diffusore; per questo motivo, per utilizzare la configurazione simmetrica delle telecamere rispetto alla luce laser e usufruire dei suoi vantaggi, è necessario che la lama laser venga generata frontalmente ai piani di misura. A tal fine, si ruota la lente cilindrica per ottenere una lama laser orizzontale e la si devia di  $90^\circ$ , utilizzando uno specchio ottico inclinato di  $45^\circ$ , come mostrato in Fig. 3.22.



**Fig. 3.22** Schematizzazione della lama laser rispetto alle telecamere.

Nella tecnica di misura ottica PIV, è fondamentale la fase di allineamento tra il fascio laser e il piano di misura; per questo motivo, il sistema di sostegno e movimentazione dello specchio riveste un ruolo delicato, in quanto deve consentire una regolazione fine.

Teoricamente, per ottenere la lama verticale, sarebbe sufficiente posizionare lo specchio esattamente inclinato di  $45^\circ$  e fissarlo in tale posizione; in realtà, può succedere che non sia verificata la perfetta ortogonalità tra il sistema di sostegno del laser e il piano di misura, rendendo così necessaria una compensazione, ottenibile tramite la regolazione dell'inclinazione dello specchio.

Proprio per tale motivo, è stato costruito un sistema di movimentazione tale da permettere piccolissime variazioni dell'angolo di inclinazione dello specchio.

Come detto in precedenza questo sistema deve permettere sia la regolazione che il sostegno.

La funzione di sostegno dello specchio viene svolta da una tavola in legno, di dimensioni leggermente maggiori di quelle dello specchio; sul lato inferiore della tavola sono stati posizionati due profilati di alluminio a forma di "L", che agiscono come scontri sui quali appoggiare lo specchio, come mostrato in Fig. 3.23. Per evitare che eventuali vibrazioni si trasmettessero allo specchio, è stata infine inserita una striscia di gomma nella zona di contatto tra specchio e profilato.

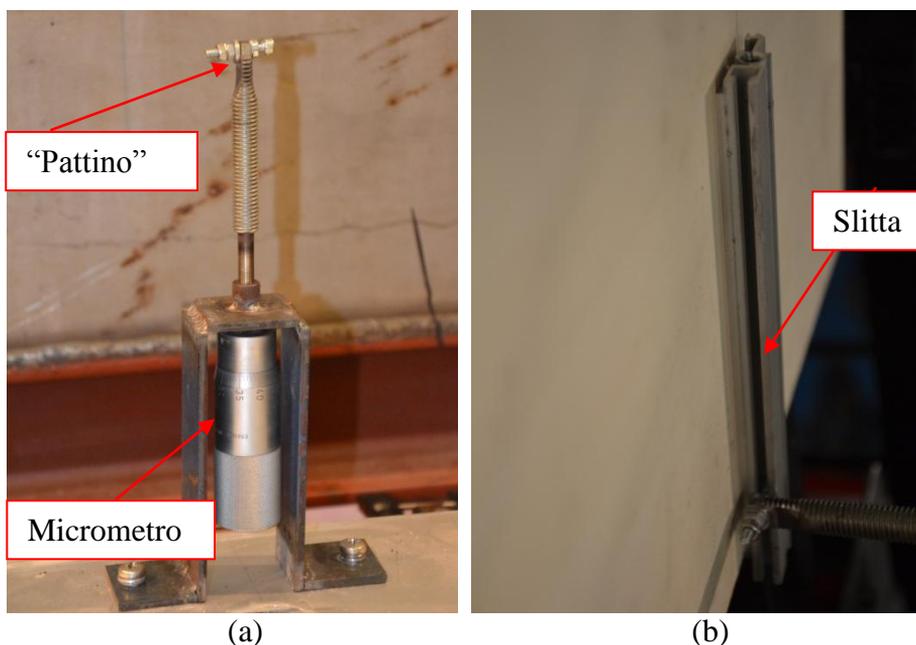


**Fig. 3.23** Sistema di sostegno per lo specchio.

La funzione di regolazione invece viene svolta da un micrometro, la cui testa è stata inserita in un foro assiale effettuato su una barretta lavorata al tornio, in modo tale da creare un incastro con leggero gioco per permettere il grado di libertà rotazionale; l'estremità opposta della barretta è stata lavorata adeguatamente, in modo da creare una zona appiattita, sulla quale effettuare un foro radiale con il trapano a colonna. A questo punto è stata inserita una vite nel foro radiale ed è stato successivamente avvitato un dado all'altra estremità della vite; il dado serve da "pattino" per la slitta fissata alla tavola di legno. L'insieme di micrometro, barretta e "pattino" è mostrato in Fig. 3.24. In questo modo si è reso solidale lo spostamento verticale del micrometro con la variazione di inclinazione della tavola di legno; in

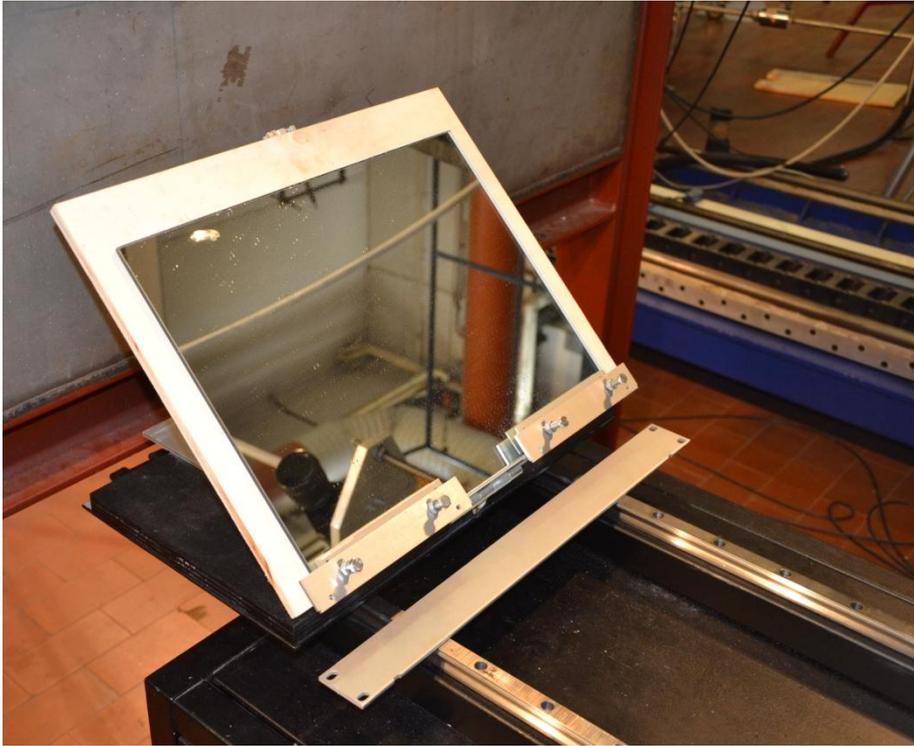
particolare, l'accoppiamento pattino-slitta è stato realizzato per evitare un possibile movimento basculante della tavola attorno alla testa della barretta.

L'intero sistema è stato infine montato su una piastra in metallo, dotata di pattini, che scorrono lungo gli stessi binari sui quali scorre il laser, in modo da garantire eventuali spostamenti solidali tra specchio e laser; in particolare, la tavola di legno è stata montata alla piastra metallica utilizzando una mappa, in modo tale da permetterne le variazioni di inclinazione.



**Fig. 3.24** (a) Assieme micrometro-barretta; (b) Assieme slitta-barretta.

In Fig. 3.25 è mostrato il sistema di sostegno e movimentazione dello specchio ottico nel suo insieme.



**Fig. 3.25** Sistema di sostegno e movimentazione dello specchio ottico.

## CAPITOLO 4

### Campagna sperimentale e analisi dei risultati

## **4. Campagna sperimentale e analisi dei risultati**

Nella prima parte di questo capitolo viene esposta la procedura di messa a punto ed esecuzione di misure di campo di moto con tecnica PIV stereoscopica, oggetto della presente tesi, applicata al simulacro di diffusore; nella seconda parte vengono esposti i risultati ottenuti tramite tale procedura.

I risultati non rappresentano il reale campo di moto che si sviluppa all'interno del diffusore, in quanto il presente lavoro rientra in un progetto della durata di circa 18 mesi e, attualmente, non si è ancora proceduto alla costruzione del vero diffusore modello. Per questo motivo i risultati esposti sono stati ottenuti al fine di verificare la bontà della messa a punto del layout definito nel capitolo 3; in questo modo si ricercano alcune indicazioni fondamentali ai fini delle successive misure, che avverranno nell'impianto del Politecnico di Milano. In particolare, tali prove sono state utili per stabilire il corretto tempo tra due impulsi luminosi da imporre al timer box, l'adeguata quantità di insemillante da immettere nella corrente fluida e la giusta apertura del diaframma delle telecamere.

### **4.1 Campagna sperimentale**

La campagna sperimentale ha riguardato l'applicazione della tecnica ottica PIV su due diverse tipologie di flusso, ottenute variando la configurazione dello sbocco in atmosfera della galleria del vento.

Una tipologia è dotata di una forte componente rotazionale, che produce una decisa struttura fluidodinamica, in modo da poter mettere a punto i parametri della tecnica tali da ottenere una restituzione più chiara del campo di moto; l'altra tipologia ha una velocità assiale elevata, in modo tale da porsi nelle condizioni operative della futura campagna sperimentale.

Di seguito vengono esposte le operazioni necessarie ad effettuare le misure del campo di velocità con tecnica PIV stereoscopica.

La corrente fluida è stata prodotta dalla linea 10000 e, come piani di misura, sono stati scelti il suo sbocco in atmosfera e il piano traslato assialmente di 200 mm rispetto al primo piano.

#### 4.1.1 Posizionamento del sistema laser e specchio

Per ottenere misure soddisfacenti del campo di moto con la tecnica PIV, si deve prestare molta attenzione alla fase di posizionamento del laser e dello specchio, in quanto la lama laser dev'essere perfettamente centrata rispetto al piano di misura e all'asse dello stesso.

Per far sì che la lama sia centrata rispetto ai piani di misura, si deve far coincidere l'asse dei piani con quello del laser. Per facilitare tale operazione, è stato tracciato sul pavimento l'asse di simmetria dei piani di misura, utilizzando un filo a piombo per riportare sul pavimento la posizione dei centri dei due piani e tracciando la perpendicolare passante per i due punti; successivamente si è posizionato il sistema di sostegno del laser in modo tale che il suo asse di simmetria, che coincide con quello del laser, si sovrapponesse con quello dei piani di misura.

Una volta effettuato il corretto posizionamento del sistema laser, è necessario verificare l'allineamento del fascio laser.

#### 4.1.2 Allineamento del fascio laser

Per effettuare l'allineamento del fascio laser, si toglie la lente cilindrica dalla testa del laser, di modo che esso produca non più una lama di luce, ma bensì un raggio. A questo punto si proietta il raggio laser su una superficie e ne si segna la posizione, definita da A'; il laser è nella posizione A e a distanza X+L da tale superficie. Successivamente si trasla il laser, lungo i binari, di una distanza L nota, portandolo nella posizione B, e si marca il nuovo punto su cui impatta il raggio laser, definito da B'. Se i due punti non coincidono, è evidente il non allineamento del fascio laser; per correggere tale disallineamento, si ricorre a considerazioni geometriche, come mostrato in Fig. 4.1.

Si pone con dz la distanza tra i punti in cui il laser impatta sulla superficie prima e dopo la traslazione e con z la distanza del punto B' dal punto O, che rappresenta il punto in cui i due fasci devono impattare al fine del corretto allineamento.

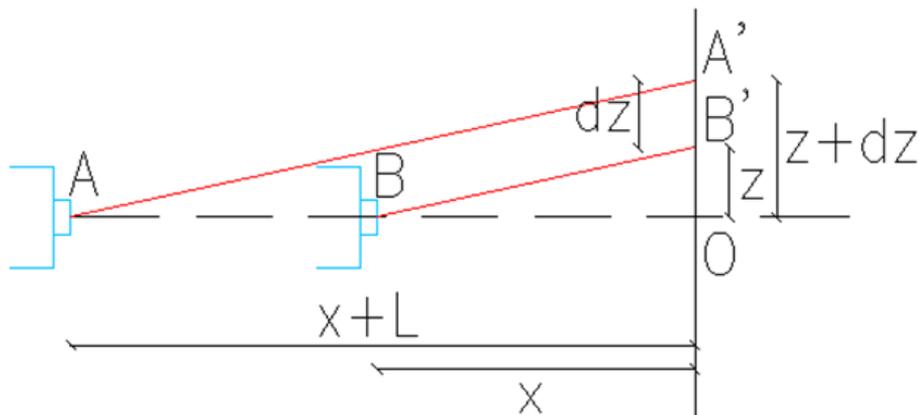
Per stabilire il valore del segmento z, ossia del punto su cui bisognerà traslare il fascio, si ricorre ad una semplice proporzione:

$$(z + dz) : z = (X + L) : X \quad (4.1)$$

dalla quale si ottiene:

$$z = \frac{dz \cdot X}{L} \quad (4.2)$$

In questo modo è possibile determinare la posizione effettiva del punto O, in quanto  $z$  è espressa in funzione di quantità note.



**Fig. 4.1** Schema per allineamento fascio laser.

Una volta nota la posizione del punto O, si procede a traslare fisicamente il fascio laser, in modo da portarlo in tale posizione. Infine si verifica l'effettivo allineamento riportando il laser nella posizione A e osservando il punto colpito dal laser; se il fascio laser viene proiettato sul punto O, allora l'operazione di allineamento è terminata.

#### 4.1.3 Posizionamento delle telecamere

Il posizionamento delle telecamere è basato sulle considerazioni teoriche del disegno CAD e sulla verifica dell'inquadratura, come descritto nel paragrafo 3.1.1; sono quindi state posizionate ad un'altezza da terra di circa 1520 mm, a circa 780 mm dal primo piano di misura e a circa 450 mm dall'asse di simmetria, con una angolazione del sensore di  $30^\circ$  rispetto a quest'ultimo.

Tali coordinate valgono per la posizione del sensore di ciascuna telecamera, di conseguenza si è riportata sul pavimento la posizione di tali coordinate e si è posizionato ciascun sensore sul rispettivo punto, grazie ad un filo a piombo, prestando attenzione a mettere l'intera struttura di sostegno delle telecamere ortogonale ai piani di misura.

#### 4.1.4 Allineamento del fascio laser PIV con target di calibrazione

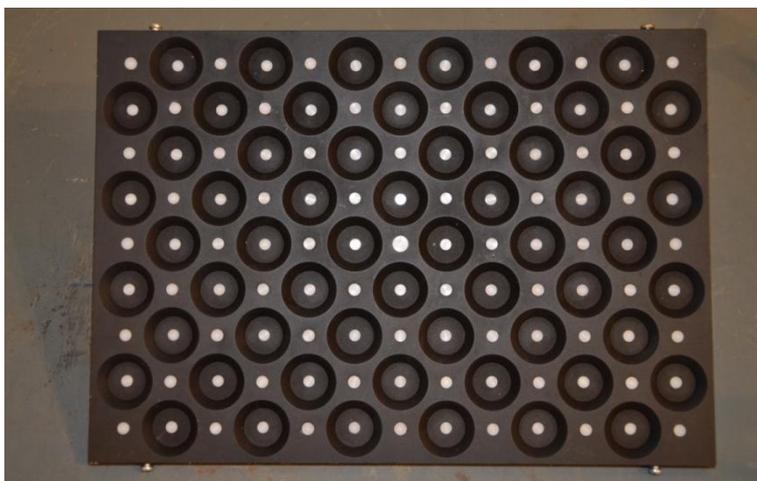
Le immagini, prodotte dalle telecamere digitali utilizzate, sono in toni di grigio e sono descritte da matrici di numeri il cui range dipende dalla telecamera.

In ciascun punto, o pixel, dell'immagine è registrata l'intensità luminosa; fondamentale risulta dunque ricavare come le posizioni nel piano dell'oggetto (le particelle rese visibili sulla lama laser) siano mappate nel piano dell'immagine (immagine in tonalità di grigio rese dalle fotocamere).

Per fare ciò, il software, con cui vengono elaborate le immagini ottenute con le telecamere, necessita dell'utilizzo di un componente dalla geometria nota, detto **target di calibrazione**, che serve per ottenere la corrispondenza tra piano immagine e piano di misura.

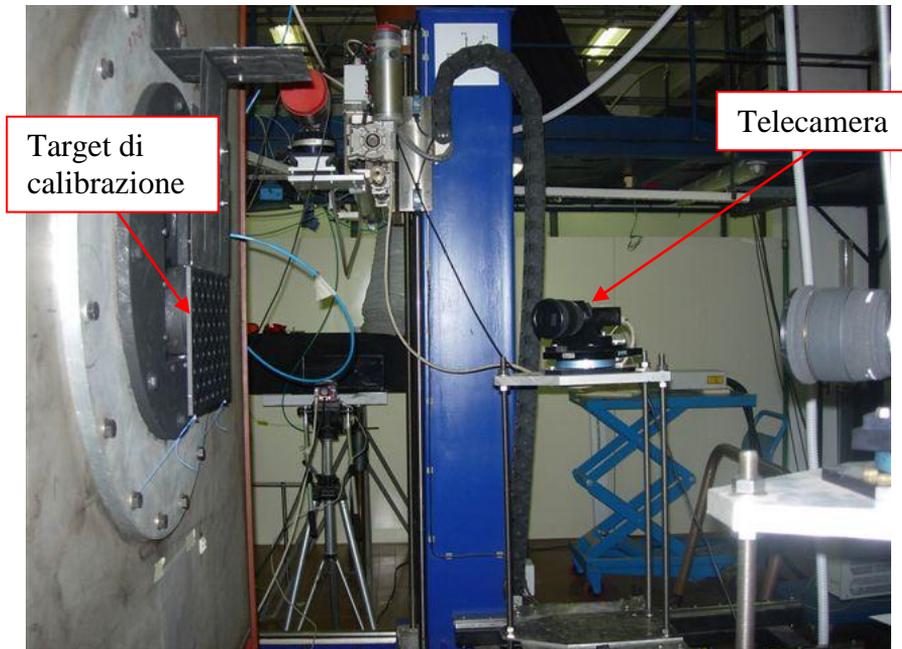
Il target utilizzato per la calibrazione è costituito da una lastra, sulla quale vi è una serie ordinata di pallini bianchi in contrasto con lo sfondo nero, come mostrato in Fig. 4.2.

Il software ha al suo interno un file in cui è riportata la geometria del target di calibrazione, ossia le dimensioni in pixel di ogni singolo pallino e la distanza relativa tra i centri dei vari pallini; una volta effettuato l'allineamento del target con il piano di misura, si acquisisce l'immagine del bersaglio, che viene elaborata dal software, determinando così con accuratezza la relazione oggetto-immagine sul campo che si desidera analizzare.



**Fig. 4.2** Target di calibrazione.

In particolare, il target utilizzato per le prove è “multi-level”, ossia presenta i punti bianchi posti su due piani diversi; inoltre i pallini sono traslucidi, in modo da permettere un’illuminazione sia anteriore che posteriore, necessaria, come si vedrà in seguito, nella fase di calibrazione.

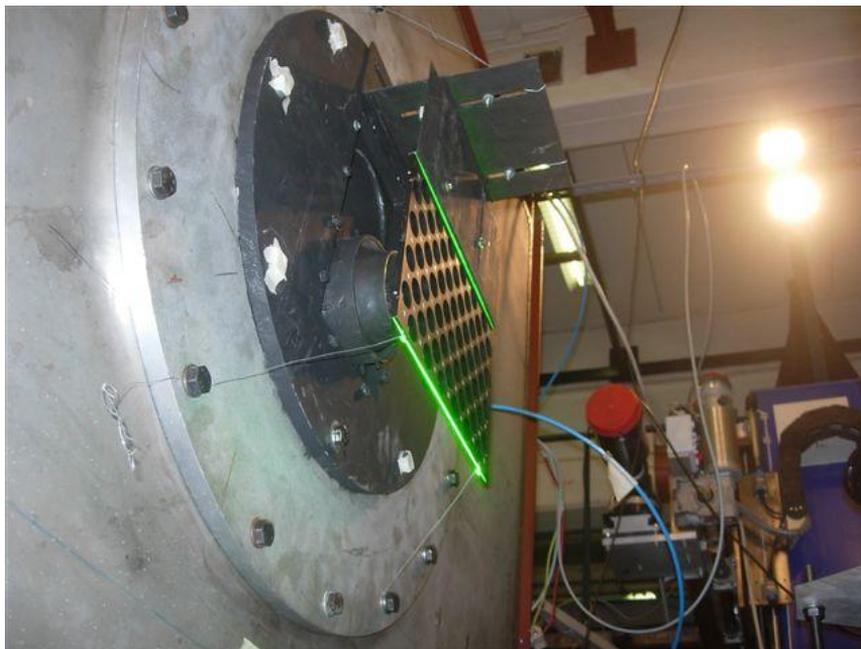


**Fig. 4.3** Allineamento target: il target montato sul piano di misura.

Il target dev’essere allineato con la massima precisione possibile alla lama laser, ossia con il piano di misura, al fine di determinare la reale corrispondenza tra i due piani. Per facilitarne il posizionamento, è stato montato su un sistema di piastrine di metallo, sulle quali sono state realizzate delle asole, in modo tale da poterne variare sia l’altezza che la posizione assiale.

Ai fini di una corretta calibrazione, la superficie del target deve, inoltre, essere sufficientemente estesa da occupare la maggior parte possibile dell’immagine che viene acquisita dalle telecamere, in modo tale da trovare la corrispondenza tra piano immagine e piano di misura sulla maggiore porzione di immagine possibile.

Le operazioni di allineamento del target sul piano di misura e della lama laser sul target stesso sono mostrate in Fig. 4.3 e in Fig. 4.4.



**Fig. 4.4** Allineamento target: la lama laser allineata con il target ne illumina il bordo inferiore.

Di seguito è descritta nel dettaglio la procedura di allineamento del fascio laser con il target di calibrazione, che risulta fondamentale ai fini della calibrazione vera e propria.

Il primo step è posizionare il target sul piano di misura, assicurandosi che giaccia perfettamente su tale piano e che sia ben centrato. Come detto in precedenza, il posizionamento è stato effettuato montando il target su un sistema di lastre metalliche, che permettono la regolazione sia verticale che assiale; le lastre metalliche sono state progettate in modo da poter essere avvitate alla flangia di interfaccia della galleria del vento del laboratorio.

Successivamente si procede con l'allineamento della lama laser sul target; una volta posizionato lo specchio nella posizione prossima a quella del target, l'allineamento preciso della lama laser viene

realizzato utilizzando la vite micrometrica montata sul sistema di movimentazione dello specchio.

Durante la fase di allineamento si deve porre molta attenzione a centrare la lama laser rispetto al target, ma anche a posizionarne il fuoco in modo tale da ottenere su tutto il piano di misura una lama laser dallo spessore il più possibile uniforme; infatti lo spessore della lama laser è minimo nel punto di fuoco, in cui è pari a 0,5 mm, per poi aprirsi fino ad uno spessore di 10 mm ad una distanza di circa 1500 mm. In base all'estensione dell'area di misura, è dunque necessario trovare un compromesso tra l'uniformità dello spessore della lama e la densità di energia di quest'ultima, che è massima nel punto di fuoco, dove però si ha anche una forte variazione dello spessore.

Nello specifico, per le prove oggetto della presente tesi, il fuoco della lama laser è stato posizionato al centro del piano di misura, in modo da concentrarvi la maggiore densità di energia possibile.

#### **4.1.5 Calibrazione**

Come primo passo si effettua l'allineamento del sensore della telecamera con il target variando l'inclinazione della telecamera, in modo che i centri dei pallini di una stessa fila risultino tutti alla medesima quota in termini di pixel. Per la regolazione dell'inclinazione delle telecamere si è lavorato sul sistema di sostegno delle stesse, agendo sulle tre barrette filettate. Durante questa operazione, al fine di ottenere una piena sovrapposizione tra le immagini trasmesse dalle due telecamere, si pone il centro del target (individuato da un pallino bianco di dimensioni maggiori) al centro dell'immagine.

È dunque evidente come la fase di allineamento del sensore della telecamera con il target di calibrazione sia un'operazione molto delicata e onerosa in termini di tempo; di conseguenza, una volta terminato l'allineamento, si fissano le telecamere in tale posizione, per evitare che eventuali urti rendano necessario un nuovo allineamento.

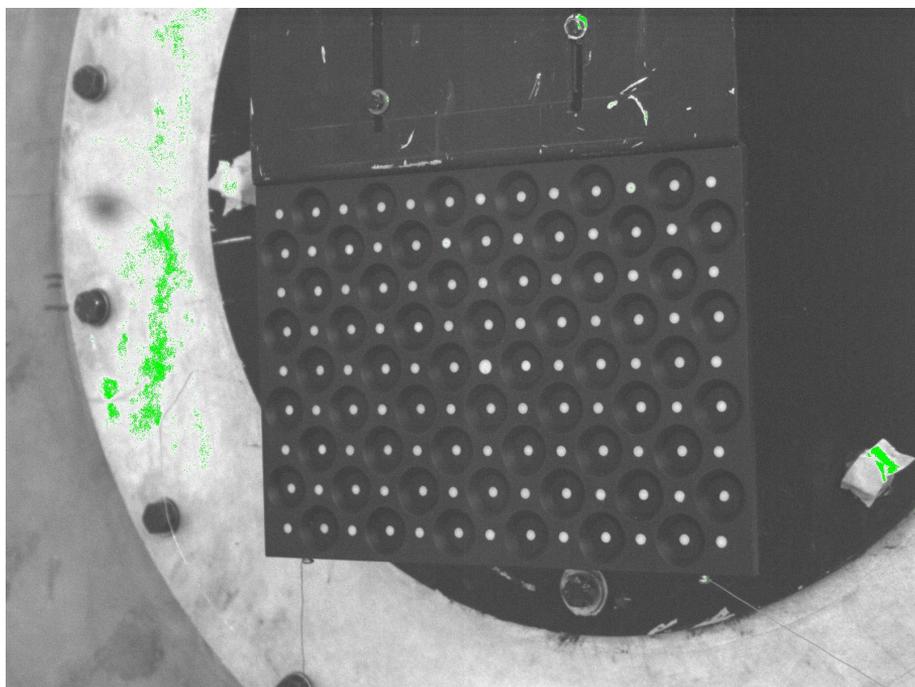
A questo punto si procede con la messa a fuoco delle telecamere, mettendo a fuoco il target di calibrazione; successivamente si acquisisce l'immagine del target.

Il software identifica il target di calibrazione attraverso la distinzione tra zone bianche e nere, che esso utilizza come proprio riferimento; ai fini della riuscita della calibrazione, è dunque necessario illuminare il target, in modo tale da aumentare il contrasto tra le diverse zone.

Durante le prove, il target è stato illuminato anteriormente con un faretto alogeno da 500 W. Quando si acquisisce l'immagine del target illuminato, si deve prestare attenzione a non saturare i sensori delle telecamere; per evitare ciò, si acquisiscono le immagini del target illuminato con un diaframma molto chiuso, per poi aprirlo fino a che la calibrazione non vada a buon fine.

In Fig. 4.5 è mostrata l'immagine del target illuminato anteriormente, ricavata da una delle due telecamere, dalla quale si può notare il contrasto tra le zone nere ed i pallini traslucidi.

Ai fini di una corretta calibrazione, il software necessita della conoscenza dell'orientamento dell'indicatore centrale di dimensioni maggiori, che, nel caso dell'immagine sottostante, è in rilievo.



**Fig. 4.5** Inquadratura del target illuminato da parte di una telecamera.

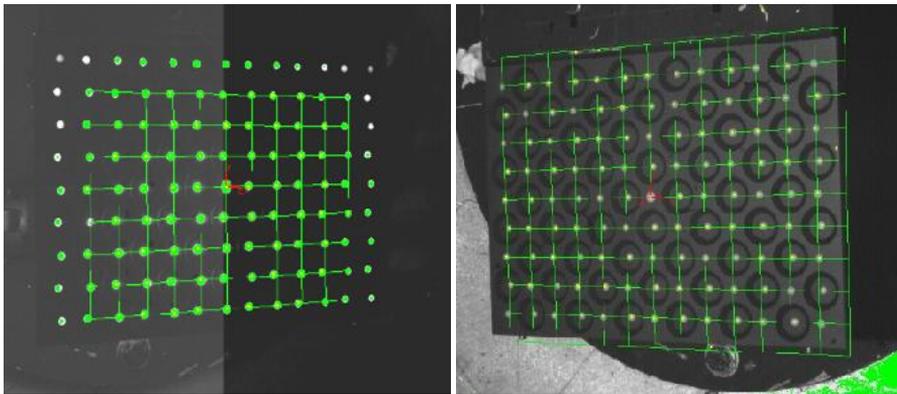
Le zone verdi che compaiono in Fig. 4.5 dipendono dalle impostazioni digitali dell'immagine e rappresentano i pixel per i quali il valore dell'intensità luminosa incidente supera un valore massimo di soglia, impostato dall'operatore.

Una volta effettuata l'acquisizione dell'immagine, il software la elabora, utilizzando il file contenente la geometria del target di calibrazione; se il riconoscimento da parte del software dà esito positivo, si ottiene la griglia di calibrazione e si verifica la correttezza della calibrazione stessa sovrapponendola con l'immagine utilizzata.

L'acquisizione delle immagini di calibrazione è un'operazione molto delicata, in quanto si devono trovare le giuste condizioni di illuminazione affinché il target venga riconosciuto correttamente dal software; durante la campagna sperimentale, si sono riscontrate delle difficoltà nella restituzione della griglia per una delle due telecamere.

In particolare, per la telecamera di destra non si sono verificati problemi; il target è stato illuminato anteriormente e l'immagine ottenuta è stata riconosciuta dal software, restituendo una griglia di ottima qualità.

Infatti la griglia ricopre l'intero target e il centro degli assi (mostrati in rosso) coincide con l'indicatore centrale di dimensioni maggiori, come mostrato nella fotografia di destra in Fig. 4.6.



**Fig. 4.6** Sovrapposizione immagine target con griglia di calibrazione: a destra per telecamera di destra, a sinistra per la telecamera di sinistra.

Per quanto riguarda la telecamera di sinistra, l'immagine ottenuta con illuminazione frontale non è stata riconosciuta dal software; di conseguenza, il target è stato illuminato posteriormente e l'immagine ottenuta è stata elaborata, restituendo il risultato mostrato nella fotografia di sinistra in Fig. 4.6.

Come si può notare, in questo caso la griglia non ricopre l'intero target; tale risultato è comunque accettabile, in quanto viene riconosciuto correttamente gran parte del bersaglio di calibrazione e il centro degli assi coincide con l'indicatore centrale.

Terminate tutte le precedenti operazioni si rimuove il target di calibrazione, facendo la massima attenzione a non spostare più le telecamere, la loro messa a fuoco, il laser e lo specchio.

#### **4.1.6 Campagna di misura**

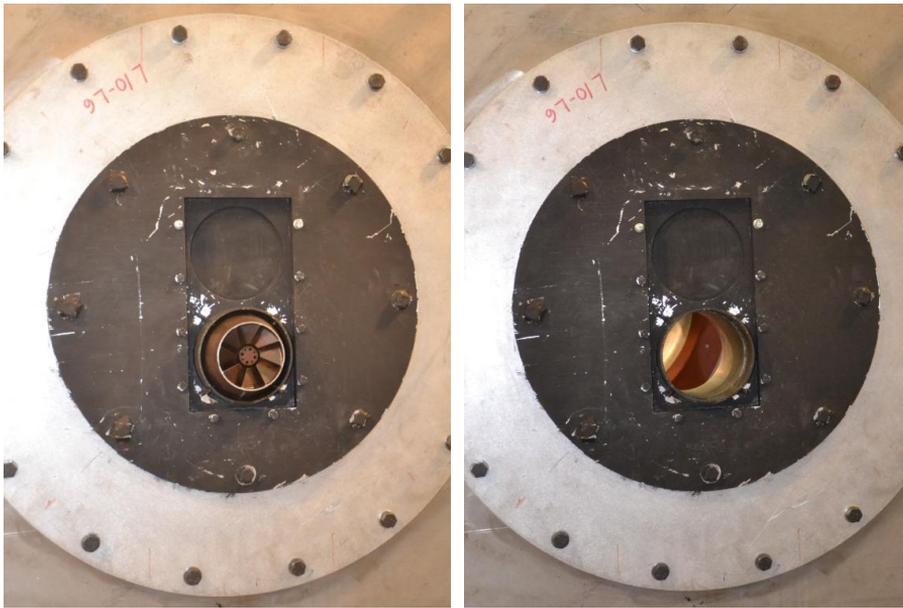
Le prove hanno riguardato lo studio di due diversi campi di moto mediante tecnica ottica PIV; le due tipologie di flusso sono state realizzate variando la configurazione dello sbocco in atmosfera della galleria del vento.

Come detto in precedenza, le due tipologie sono solo in parte rappresentative del reale campo di moto che si sviluppa all'interno del diffusore modello, ma sono state svolte per definire, nel modo più affidabile permesso dai limiti della galleria del vento disponibile, i migliori parametri della tecnica PIV da utilizzare una volta che siano disponibili la galleria del vento e il diffusore modello definitivi. Fra i parametri PIV necessari ai fini di una corretta misura, risulta fondamentale determinare con correttezza il *time delay between pulses* (TbP) da assegnare alla *timer box*, la quantità di insemnante da immettere nel flusso e l'apertura del diaframma delle telecamere.

Il flusso studiato nell'ambito della tesi è stato scelto in modo da interessare la maggiore porzione di area di misura desiderata e con velocità del flusso nella direzione ortogonale al piano di misura che fossero altrettanto elevate di quelle attese, in modo da definire i parametri PIV (spessore della lama di luce, quantità di insemnante, TbP) compatibili con le velocità in gioco.

Inoltre, poiché nel campo di moto del diffusore è presente una *swirlatura* non trascurabile, si è simulato un secondo flusso con forte *swirlatura*, in modo da verificare la capacità del set-up di misura a misurare flussi *swirlati*.

In Fig. 4.7 sono mostrate le due configurazioni dello sbocco della galleria del vento; a sinistra vi è lo sbocco con montato il componente vorticolatore, che genera il flusso *swirlato*, mentre a destra vi è lo sbocco libero, che genera il flusso completamente assiale.



**Fig. 4.7** Configurazioni dello sbocco atmosferico della galleria del vento. A sinistra vi è lo sbocco con vortificatore, mentre a destra lo sbocco libero.

Come è stato detto nell'esposizione dei dati ottenuti dalla scalatura, il diffusore modello dev'essere attraversato da un flusso avente una velocità di circa 100 m/s; l'impianto in dotazione nel laboratorio TLA è in grado di produrre una portata massima di 2 Kg/s, con un  $\Delta p$  massimo di circa 7000 Pa.

Al fine di ottenere la velocità voluta, si deve dunque tener conto delle potenzialità dell'impianto in dotazione; per trovare la velocità massima ottenibile dalla galleria del vento, si ricorre alla formula operativa di Bernoulli:

$$Q = \alpha A \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (4.3)$$

Dalla quale si può ricavare la velocità, mediante  $v=Q/\alpha A$ :

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4.4)$$

dove  $Q$  è la portata volumetrica in [ $m^3/s$ ],  $\rho$  è la densità del fluido in [ $Kg/m^3$ ],  $\Delta p$  la differenza tra la pressione prodotta dal ventilatore della galleria del vento e quella atmosferica e  $\alpha A$  è l'area effettiva attraversata dal flusso.

Dalla formula della velocità espressa in funzione del  $\Delta p$ , sostituendovi  $\Delta p=7000$  Pa, si determina la massima velocità ottenibile dalla galleria del vento, che risulta essere pari a circa 105 m/s; è dunque verificato come l'impianto a disposizione sia in grado di produrre un flusso avente la velocità necessaria.

Il sistema di monitoraggio della galleria del vento non restituisce direttamente il valore della velocità del flusso allo sbocco, ma soltanto i valori istantanei di portata massica e  $\Delta p$ ; di conseguenza, il valore della velocità dev'essere ricavato in maniera indiretta, tramite la formula:

$$v = \frac{M}{\rho \cdot \alpha A} \quad (4.5)$$

dove  $M$  è la portata massica in [ $Kg/s$ ].

In particolare, si deve evidenziare che  $\alpha A$  varia a seconda della configurazione presente allo sbocco della galleria del vento e, per determinarla, è necessario effettuare la caratterizzazione di entrambi gli sbocchi.

La caratterizzazione consiste in una serie di misure, nelle quali si aumenta progressivamente la portata massica prodotta dal ventilatore e si misura il  $\Delta p$  esistente nella cassa di sfogo della galleria del vento; elaborando i risultati su una tabella Excel, si ottiene il valore di  $\alpha A$ .

I valori ottenuti dalla caratterizzazione di entrambi gli sbocchi sono:  $\alpha A = 18,1$  cm<sup>2</sup> per il componente vorticatore e  $\alpha A = 79,1$  cm<sup>2</sup> per il flusso libero.

Una volta ottenuti i valori di  $\alpha A$  per entrambe le configurazioni, si può risalire al valore di portata massica da raggiungere per ottenere  $v = 100$  m/s; nel caso di flusso libero si deve fornire una portata pari a 0,965 Kg/s, mentre nel caso con il componente vorticatore si devono fornire 0,220 Kg/s.

Sono state inoltre svolte prove in entrambe le configurazioni ponendo la velocità del flusso pari a 50 m/s; ciò è stato fatto per effettuare misure anche con il simulacro di diffusore montato a sbalzo, in quanto

quest'ultimo, essendo costituito di materiali leggeri e con ridotta resistenza alle sollecitazioni, non avrebbe resistito ad una velocità del flusso troppo elevata.

Prima di iniziare la presa dati, si deve fare un'ulteriore considerazione, riguardante il tempo di ritardo tra due impulsi luminosi. Si è infatti stabilito di imporre una velocità del flusso da studiare pari a 100 m/s e a 50 m/s ed è anche stato detto che lo spessore della lama laser varia da 0,5 mm fino a 10mm; si può quindi risalire ad un valore di primo tentativo del TbP, ipotizzando uno spessore medio della lama di 1 mm. Per le prove a  $v = 100$  m/s si ottiene  $TbP = 10$   $\mu$ s, mentre per quelle a  $v = 50$  m/s si ricava  $TbP = 20$   $\mu$ s; le prove sono dunque state effettuate con valori di TbP nell'intorno di quelli definiti sopra, per poi determinare il valore ottimale in seguito all'analisi delle misure.

Il TbP è dunque un primo grado di libertà su cui agire durante la campagna, al fine di ottenere la più elevata qualità possibile in termini di immagini del campo di moto risultante; come detto in precedenza, altri due gradi di libertà sono la quantità di insemiante da immettere nel flusso e l'apertura del diaframma delle telecamere. Riguardo agli ultimi due, non è possibile fare considerazioni preliminari, per cui si devono effettuare dei tentativi durante la campagna di misura, per poi confrontare i risultati ottenuti e ricavare i valori migliori.

Una volta determinate le condizioni generali, quali la portata massica, la velocità del flusso e il range di valori da assegnare al TbP, si può dunque procedere con la presa dati vera e propria.

Di seguito si riporta la procedura per la presa dati con tecnica PIV stereoscopica.

Come primo passo si alimentano laser e telecamere, che hanno tempi di messa a regime di circa mezzora; successivamente si accende la galleria del vento, aumentando la velocità di rotazione del ventilatore fino ad ottenere la portata massica voluta. A questo punto si mette il laser nella configurazione in cui è connesso con la *timer box*, in modo che si possa controllare tramite software l'emissione degli impulsi luminosi, e si tolgono i tappi dagli obiettivi delle telecamere, regolando il diaframma con l'apertura voluta. Una volta che la galleria del vento è a regime, si accende l'insemiante, attivando un numero di getti di primo tentativo.

Quando tutti i componenti sono pronti per la misura, si spengono le luci del laboratorio per evitare riflessi non voluti e si può procedere

con la presa dati, imponendo dal software il TbP voluto e il numero di acquisizioni da registrare.

Solitamente, si effettuano 30 acquisizioni per telecamera; solo dopo l'analisi di tutte misure, si verifica quale sia la migliore e si registrano 100 immagini in tale configurazione. Ciascuna acquisizione consiste di due coppie di fotogrammi, essendo stata utilizzata una tecnica PIV stereoscopica ad esposizione singola e fotogrammi doppi.

A questo punto inizia la presa dati da parte del software, che sincronizza gli impulsi luminosi con gli scatti delle telecamere tramite la *timer box*, acquisendo le immagini delle particelle traccianti illuminate dalla lama laser. Una volta terminata la presa dati, si procede con l'elaborazione.

Di seguito è mostrato un esempio delle operazioni in sequenza che vengono effettuate durante l'elaborazione delle immagini; l'esempio riguarda l'analisi del caso con flusso *swirlato* in uscita dalla galleria del vento, con portata massica pari a 110 g/s, TbP = 15  $\mu$ s, apertura diaframma f/1.8 e numero di getti attivi pari a 12, corrispondenti ad una portata di aerosol pari a 73,2 l/min, essendo la pressione di alimentazione degli inseminatori pari a 1,5 bar relativi (guardare Tab. 3.1).

In Fig. 4.8 è riportata un'immagine acquisita da una delle due telecamere, durante la presa dati.

Dalla Fig. 4.8 si può notare la nube di particelle traccianti illuminate dalla luce laser.

Tale immagine rappresenta solo uno dei due fotogrammi acquisiti da una telecamera; l'altro fotogramma è ritardato rispetto al primo di un intervallo pari al TbP imposto.

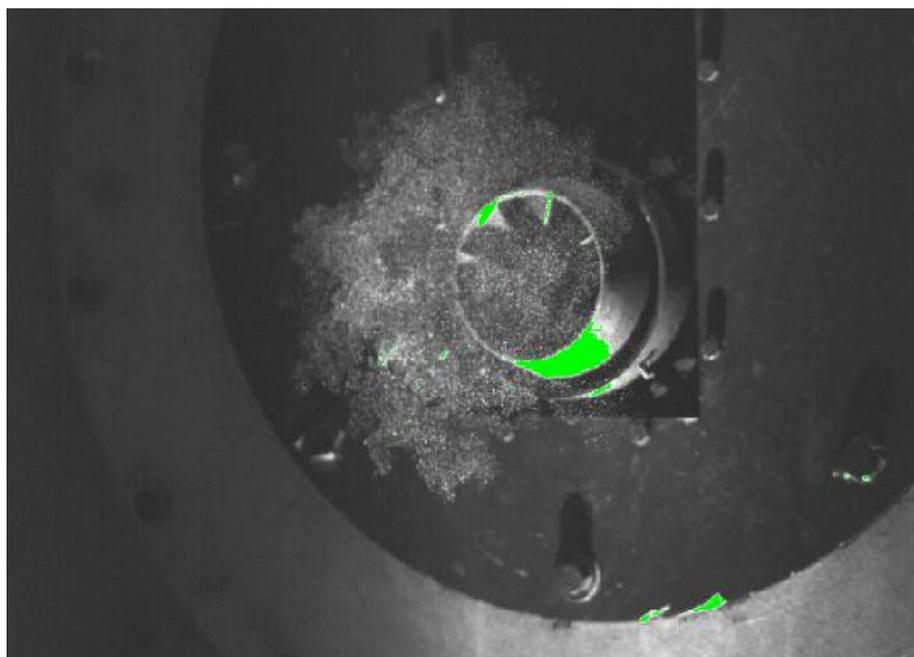
Una volta terminata l'acquisizione dati, si procede con l'elaborazione delle immagini.

Il primo passo consiste nel ricavare l'immagine di sfondo; in Fig. 4.9 ne è riportato un esempio, ottenuto assegnando a ciascun pixel il valore di minima intensità luminosa registrato nell'insieme delle immagini acquisite.

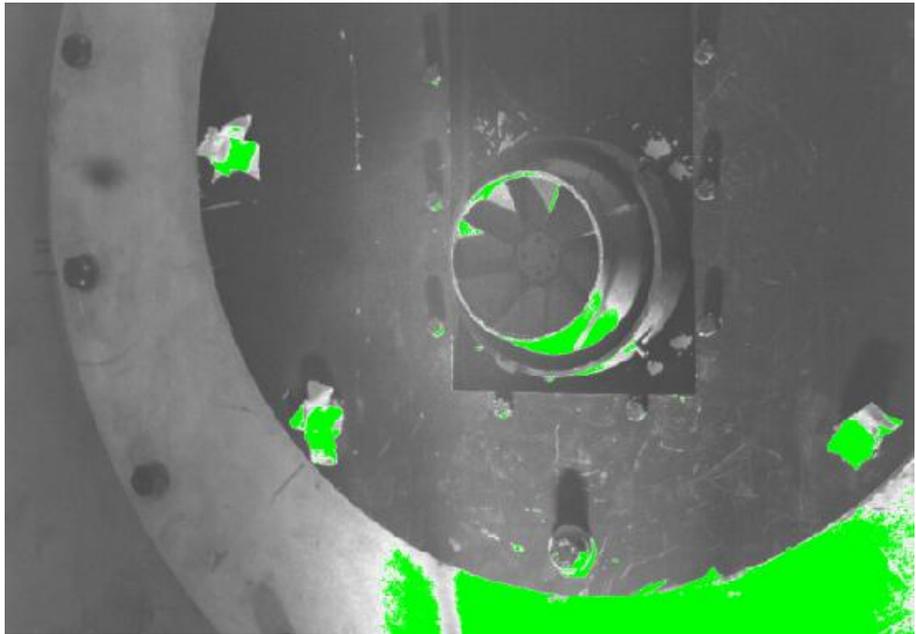
Un altro metodo per ricavare l'immagine di fondo consiste nell'usare un'immagine registrata in assenza di inseminazione, accendendo comunque il laser, per avere i riflessi spuri della lama sugli oggetti inquadrati; la differenza tra queste due modalità riguarda il fatto che parte della luce laser viene diffusa dall'inseminante e può generare dei

riflessi che, registrando lo sfondo senza insemiante, non ci possono essere e, quindi, non verrebbero poi sottratti.

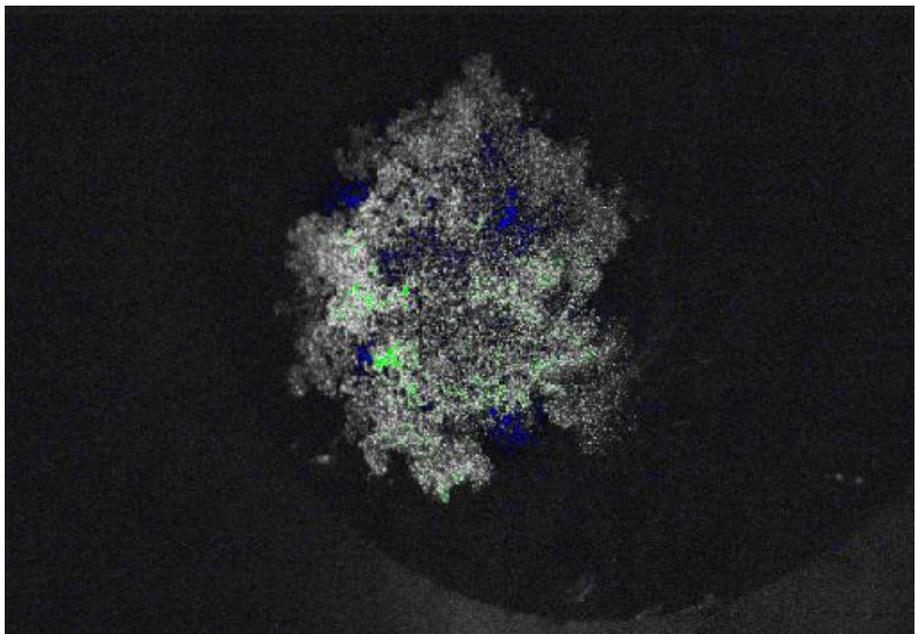
A questo punto si sottrae alle immagini acquisite lo sfondo comune, di modo da eliminare il rumore di fondo associato al segnale, ossia tutto ciò che non riguarda il campo di moto. In Fig. 4.10 è mostrata l'immagine ottenuta dalla sottrazione.



**Fig. 4.8** Esempio di immagine acquisita da una delle telecamere.



**Fig. 4.9** Immagine dello sfondo.



**Fig. 4.10** Immagine risultante dalla sottrazione.

Dall'immagine ottenuta si può notare come sia stato eliminato tutto ciò che non riguarda il campo di moto vero e proprio; ciò è molto utile ai fini della qualità dell'immagine del campo di moto finale, in quanto le successive elaborazioni verranno effettuate solamente su immagini rappresentanti il reale campo di moto.

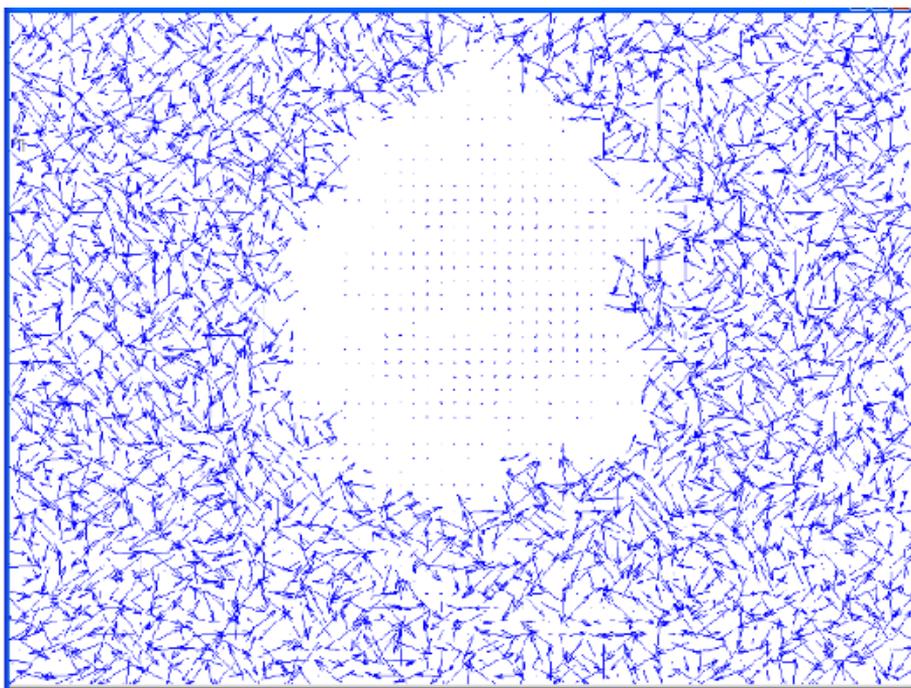
In Fig. 4.10, oltre a delle zone verdi, compaiono anche dei puntini blu, che rappresentano i pixel per i quali il valore di intensità luminosa, in seguito alla sottrazione del valore minimo, è sceso sotto un valore soglia impostato dall'operatore; dunque, entrambi sono solo una conseguenza digitale e non fisica.

Una volta effettuate queste operazioni preliminari, si procede effettuando, per entrambe le coppie di fotogrammi registrati da ciascuna telecamera, la cross-correlazione dell'immagine risultante; tale operazione agisce sui due fotogrammi che costituiscono la singola presa di misura e restituisce un vettore velocità medio per ogni area di interrogazione (IA). Nello specifico, il picco principale fornisce il vettore spostamento medio delle particelle, che viene poi diviso per il tempo tra le immagini, fornendo il vettore velocità.

La dimensione delle IA adoperata è pari a  $32 \times 32$  pixel.

È importante far notare che il vettore velocità ottenuto mediante cross-correlazione è solamente indicativo; infatti quest'ultima restituisce una mappa nella quale viene rappresentato l'andamento delle componenti  $u$  e  $v$  rilevate dalla singola telecamera. Non essendo ancora stato utilizzato il riferimento spaziale dato dalla calibrazione, che permetterà di assegnare ai vettori una misura corretta, è dunque chiaro che le due distinte mappe ottenute dalla cross-correlazione non rappresentano il campo di moto.

In Fig. 4.11 è mostrato il risultato dell'operazione di cross-correlazione.



**Fig. 4.11** Immagine del campo di moto ottenuta con l'operazione di cross-correlazione.

L'immagine riportata in Fig. 4.11 rappresenta inoltre solamente una elaborazione istantanea.

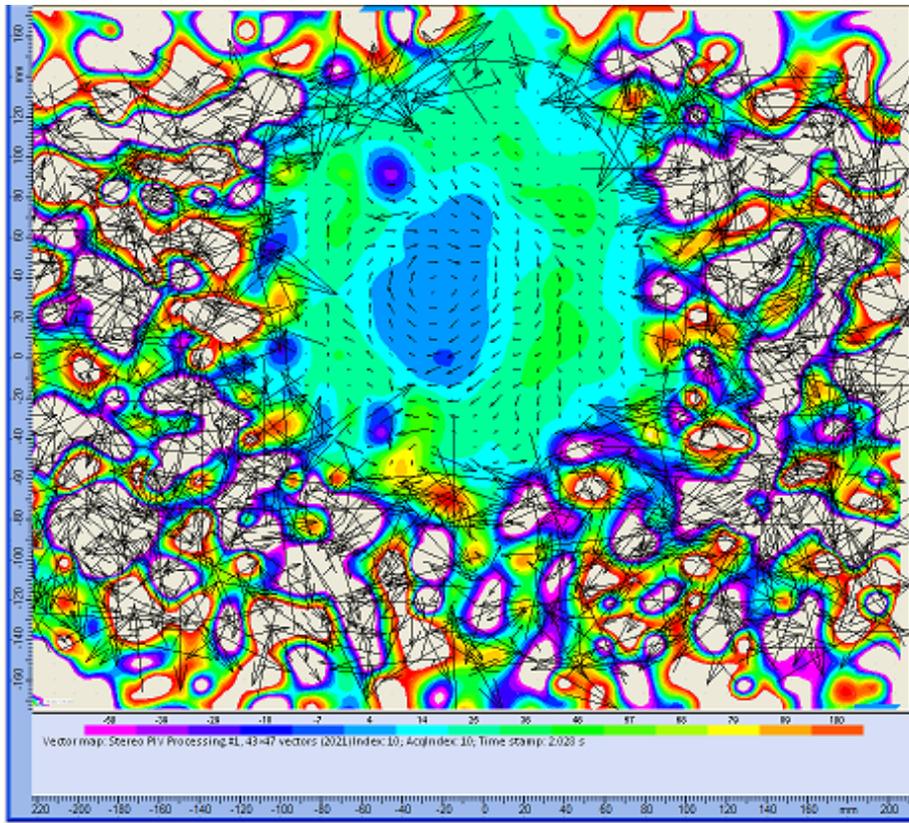
La zona circolare al centro dell'immagine, ossia la regione di nostro interesse, presenta dei vettori di intensità molto ridotta in relazione a quelli caotici esterni all'area di interesse.

I vettori all'esterno della zona *swirlata* presentano un andamento caotico. Questo è dovuto al moto disordinato che si sviluppa al di fuori del campo di moto principale; a seguito degli effetti di miscelamento, alcune particelle di insemnante vengono trascinate fuori dal campo di moto e, venendo comunque illuminate dalla luce laser, vengono riconosciute dal software, che restituisce dei vettori anche per esse, seppure a seguito di una cross-correlazione scarsa.

Per determinare la bontà della cross-correlazione, si possono estrapolare delle mappe che riportano l'andamento del rapporto tra il picco principale e il secondo all'interno di ogni IA; per una descrizione dettagliata si rimanda all'Appendice 1.

A questo punto si può operare la trasformazione delle due immagini cross-correlate in quella rappresentante il reale campo di moto tridimensionale; tale operazione è la *stereo PIV*, che elabora le due distinte immagini con l'immagine della griglia di calibrazione di ciascuna, per poi combinarle adeguatamente, restituendo l'immagine finale, nella quale si è dato il corretto valore ai vettori.

In Fig. 4.12 è mostrato il campo di moto tridimensionale per il caso in esame.



**Fig. 4.12** Immagine risultante dalla stereo PIV.

L'immagine riportata in Fig. 4.12 è una rappresentazione istantanea del campo di moto, nella quale compaiono tutte e tre le componenti del vettore velocità; i vettori rappresentano le componenti  $u$  e  $v$ , appartenenti al piano di misura, la scala dei colori rappresenta la

componente  $w$ , ortogonale al piano, mentre la scala metrica ai lati dell'immagine rappresenta l'estensione reale del piano oggetto.

La zona centrale della figura rappresenta la zona di interesse, ossia il campo di moto studiato; dall'andamento dei vettori, si può notare la struttura vorticoso creata dal componente vortice, che determina un ricircolo del flusso. Il ricircolo produce una zona in cui il flusso viene notevolmente rallentato, come mostrato dai valori che assume la componente  $w$  al suo interno.

La zona esterna al campo di moto ha un andamento casuale e non ha interesse ai fini della determinazione dei parametri da ricavare.

In Fig. 4.12 si possono inoltre notare alcune zone nelle quali sono assenti i valori della scala colori; questo è dovuto al fatto che, in tali zone, la componente  $w$  assume valori che non rientrano nel range impostato per la scala colori, che, nel caso in esame, comprende i valori di  $w$  tra -50 m/s e 100 m/s.

Infine, si può rilevare la presenza di vettori spuri di lunghezza significativa; questi sono dovuti ad una cross-correlazione di scarsa qualità e non hanno nessun significato fisico.

Come ultima analisi, si può operare la media di tutte le stereo PIV istantanee ottenute (in questo caso 30), per acquisire il campo di moto medio.

In Fig. 4.13 è mostrato il campo medio risultante per il caso in esame.

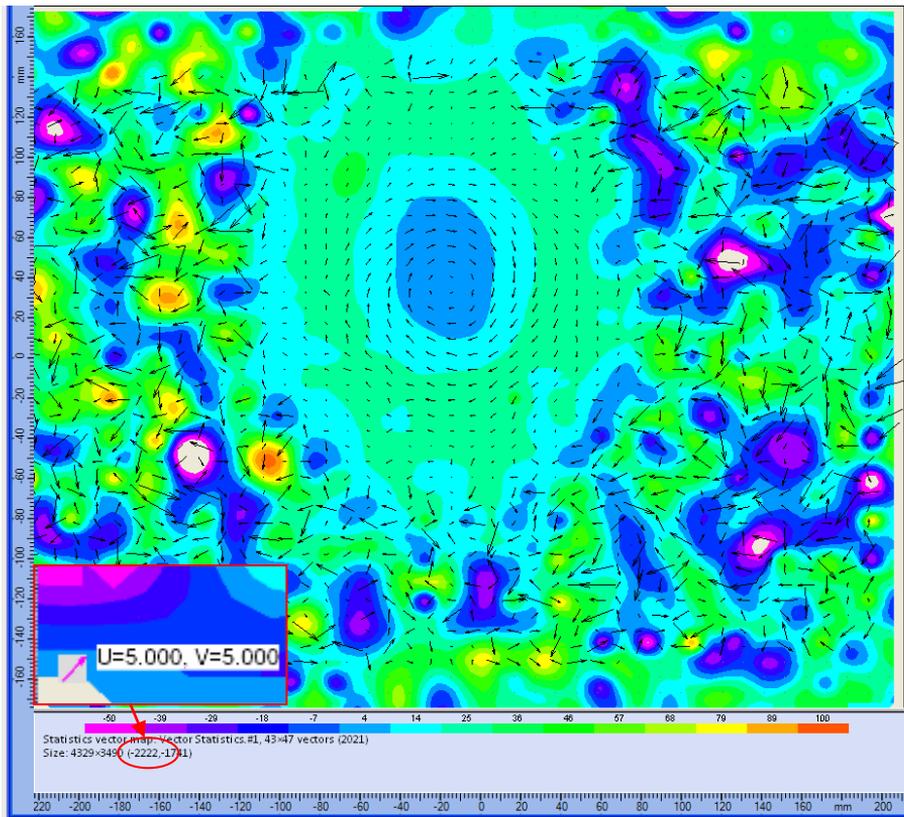
Dalla Fig. 4.13 si deve, innanzitutto, distinguere la zona del campo di moto dalla zona circostante, che non ha interesse nella presente analisi.

Il campo di moto non occupa tutta l'immagine, in quanto l'inquadratura delle telecamere è stata ottimizzata per le future misure che riguarderanno un'area maggiore.

Nel seguito della trattazione verranno dunque riportate le immagini del campo di velocità riguardante solamente la porzione di immagine d'interesse.

Tale immagine rappresenta il campo di moto medio, ottenuto dalla media delle 30 immagini stereoscopiche istantanee acquisite.

I vettori, rappresentanti le componenti di velocità  $u$  e  $v$  appartenenti al piano di misura, sono stati scalati in modo che un vettore lungo 10 mm nel piano immagine corrispondesse ad una velocità di 25 m/s; in basso a sinistra di Fig. 4.13, è mostrato il vettore di riferimento, di componenti  $u = 5$  m/s e  $v = 5$  m/s (vedi dettaglio).



**Fig. 4.13** Immagine del campo medio di velocità.

Come si può notare dalla Fig. 4.13, il campo di moto risultante dall'analisi PIV è coerente con il fenomeno fisico che si sta studiando; infatti, la distribuzione dei vettori evidenzia il flusso rotante, prodotto dalle palette del vorticolatore, mentre la scala dei colori, che rappresenta la velocità assiale, mostra una zona centrale a bassa velocità, prodotta dal ricircolo del flusso, e delle zone periferiche a velocità assiale crescente. In particolare, la corona circolare di colore verde è dovuta all'accelerazione indotta al flusso dai canali palari del componente vorticolatore, che sono convergenti.

Si può notare inoltre la coerenza delle velocità studiate. Il caso in esame consiste in un flusso *swirlato* ad una velocità media di 50 m/s e, come mostrano la scala colori e i vettori, la velocità media del flusso si attesta su tale valore.

L'elaborazione delle immagini PIV appena descritta è solamente una delle numerose modalità di analisi delle immagini; di seguito viene presentata una seconda tipologia di elaborazione, denominata *Adaptive PIV* [5].

In un algoritmo standard di cross-correlazione, le particelle traccianti che entrano o abbandonano l'area di interrogazione durante l'acquisizione della coppia di immagini non contribuiscono positivamente al calcolo della correlazione, venendo a mancare nell'area la posizione iniziale o finale delle particelle. Nonostante ciò, esse contribuiscono alle cosiddette correlazioni random e, quindi, diminuiscono il rapporto segnale/rumore. Nella PIV questo fenomeno è anche chiamato "loss-of-pairs" e contribuisce in misura importante sull'errore della misura.

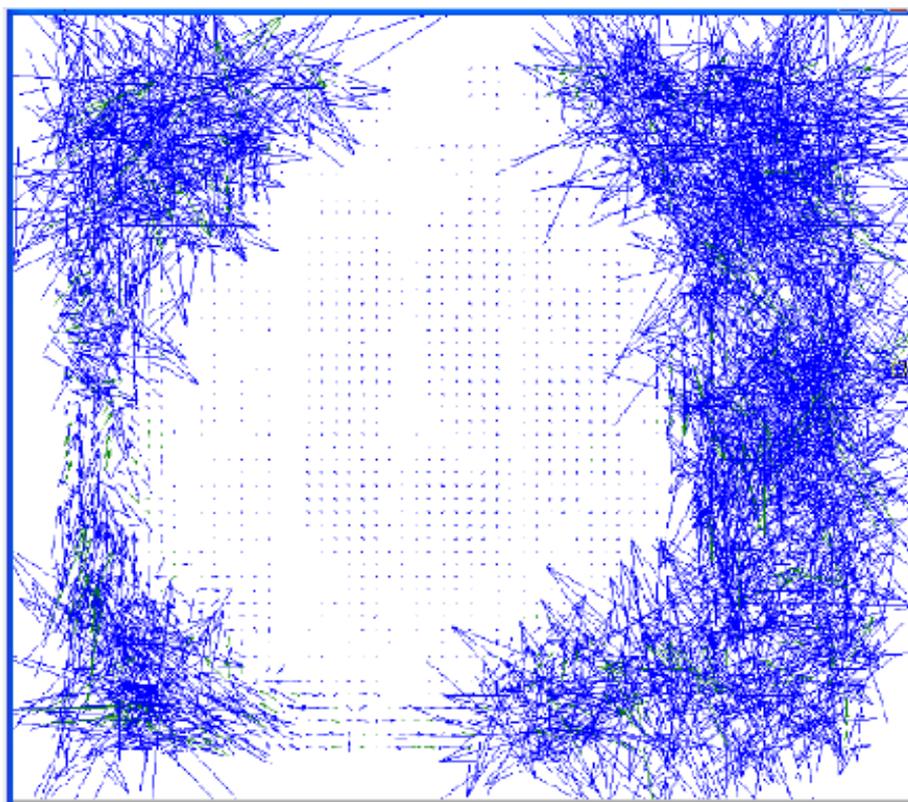
Per diminuire il peso di questo errore si utilizza la *Adaptive PIV*, che impiega aree di interrogazione in posizioni differenti per la prima e la seconda immagine, cercando di diminuire il loss-of-pairs. La tecnica utilizza un metodo iterativo: viene scelto un valore di offset iniziale, valore che viene applicato dalla prima finestra (l'area di interrogazione nell'immagine 1) alla seconda. Si implementa quindi una cross-correlazione tra le due immagini; dal campo di moto così ottenuto, si calcola un vettore velocità medio e da questo un nuovo offset per la successiva analisi, questa volta però con aree di interrogazione più piccole. Il processo può essere ripetuto più volte, per affinare il livello di precisione dell'analisi.

Il maggior beneficio proveniente dallo spostamento delle finestre è proprio di catturare nell'area di interrogazione applicata alla seconda immagine anche le particelle traccianti che escono dall'area di interrogazione applicata alla prima immagine. Catturando un numero maggiore di particelle per ogni vettore, le aree di interrogazione sono più piccole e il campo di moto risultante è più dettagliato, a parità di un numero adeguato di vettori esatti e di densità delle particelle nel flusso.

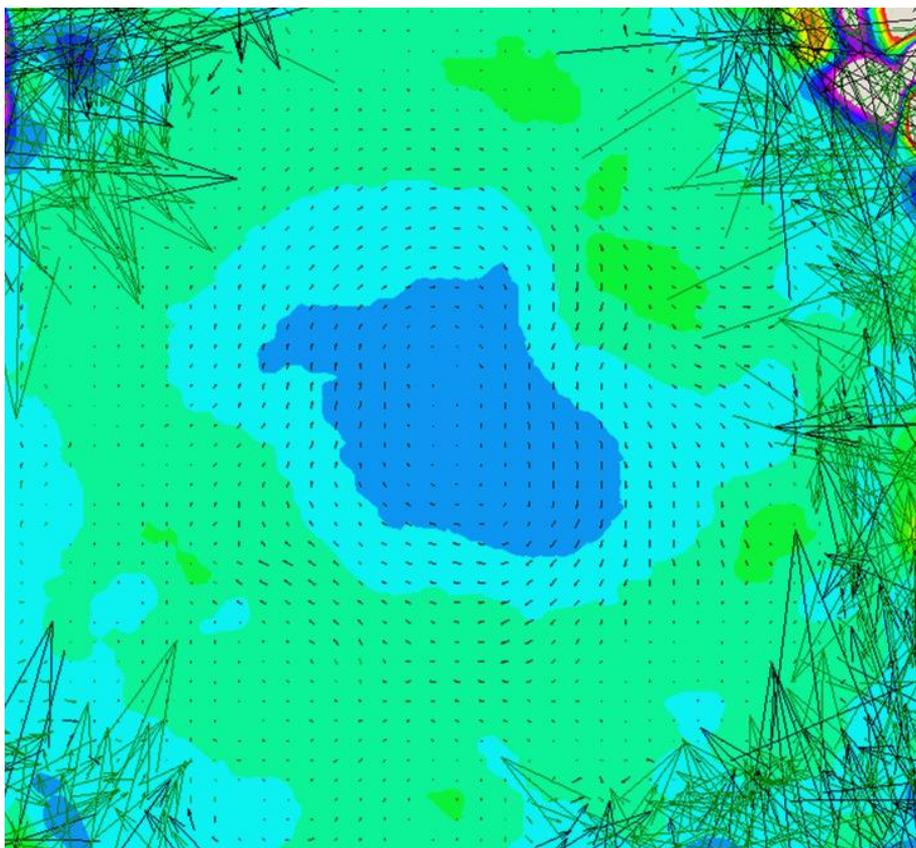
L'utilizzo della *Adaptive PIV* contribuisce quindi in maniera positiva, sia perché si aumenta la forza del segnale andando a catturare le particelle fuori dalla finestra di interrogazione, sia perché le aree di interrogazione sono di dimensioni ridotte, essendo possibile applicare degli offset adattativi sulle finestre.

Nell'Appendice 2 verranno mostrati i risultati ottenuti variando l'estensione delle IA e del valore della sovrapposizione delle finestre (*overlap*).

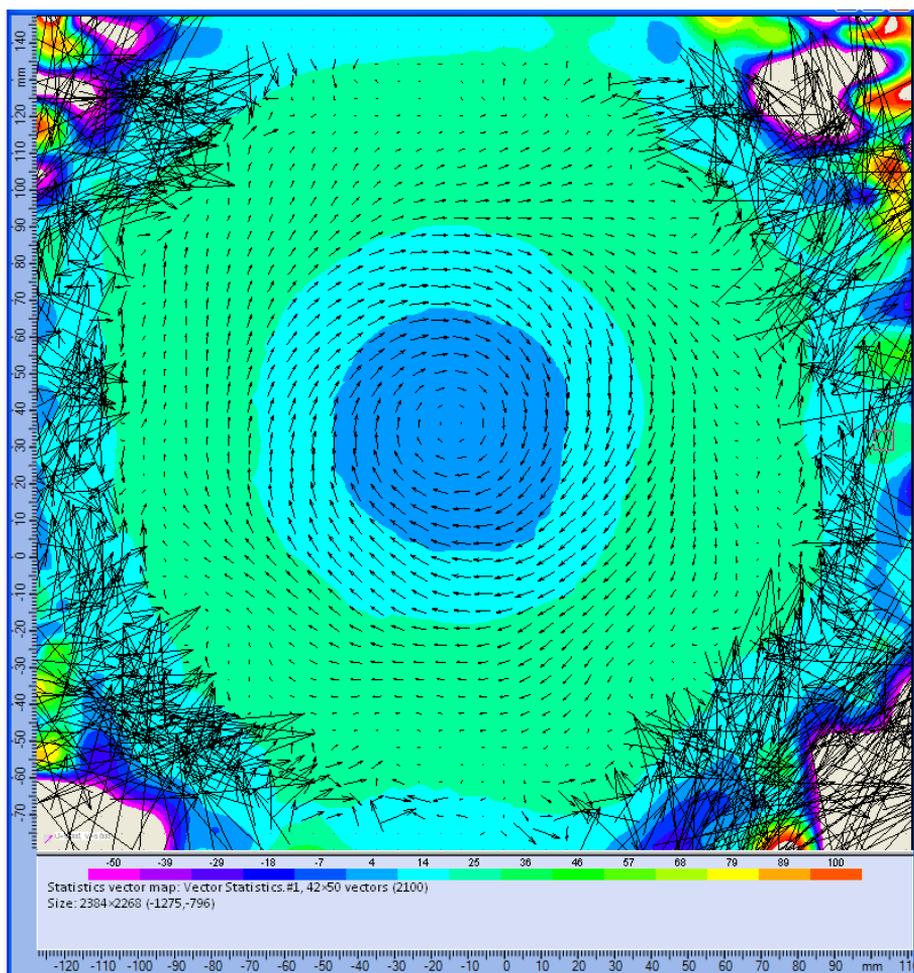
Nelle seguenti immagini, Fig.4.14, Fig. 4.15 e Fig. 4.16, vengono mostrati i risultati ottenuti attraverso una Adaptive PIV.



**Fig. 4.14** Risultato di un'analisi mediante Adaptive PIV.



**Fig. 4.15** Immagine stereo ottenuta mediante Adaptive PIV.



**Fig. 4.16** Immagine del campo medio di velocità ottenuta mediante Adaptive PIV.

Il campo di moto, mostrato in Fig. 4.16, è stato ottenuto utilizzando per la Adaptive PIV i seguenti parametri:

- Area di interrogazione finale: è indicata in pixels. Nella sperimentazione in esame si è deciso di utilizzare aree di interrogazione di 16X16 pixels. Si sono utilizzati 4 “*refinement steps*”, partendo da finestre inizialmente di 128X128 pixels;
- Percentuale di sovrapposizione: le correlazioni sono calcolate dal processore utilizzando una *Fast Fourier Transformation* (FFT);

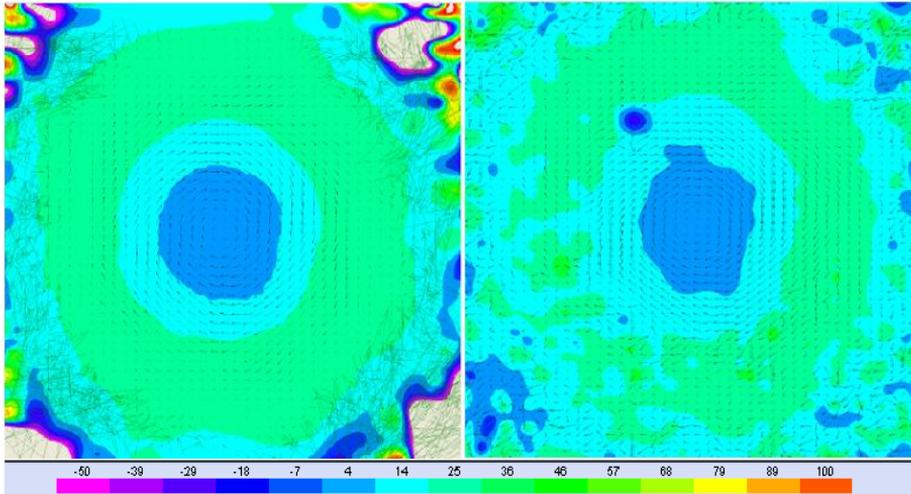
tale algoritmo di analisi è affetto da rumori ciclici. Per ridurre questi rumori si ricorre all'uso di funzioni finestra e di sovrapposizione delle aree di interrogazione. Grazie a tale tecnica, le informazioni che non sono utilizzate in una area di interrogazione vengono utilizzate in un'altra area che parzialmente si sovrappone alla prima. In questo lavoro la percentuale di sovrapposizione è stata fissata a 25%;

- Active image map area: percentuale dell'area della foto che si intende processare. Nel lavoro in esame è stata settata in modo da processare solo il campo di moto (1100X900);

- Validazione: durante il processo iterativo della *Adaptive correlation*, per passare da un livello al successivo è necessaria la validazione dei vettori spostamento. Si utilizza quindi una *Peak validation* ed una *Local Neighborhood Validation*. Utilizzando la prima, si vanno a validare o a scartare i singoli vettori a seconda del valore di picco corrispondente al piano di correlazione dove il vettore spostamento viene misurato. Viene principalmente utilizzata per determinare la qualità dei vettori provenienti dall'analisi. Nella cross-correlazione è infatti assunto che il picco di maggiore intensità rappresenti il segnale mentre il secondo corrisponde al rumore (correlazioni random). Se la qualità dei dati è alta, il picco del segnale dovrebbe essere sufficientemente maggiore rispetto al picco del rumore. La *Peak Validation* è stata impostata in modo da considerare validi i vettori per i quali l'ampiezza del picco di cross-correlazione è maggiore di almeno un fattore 1.2 rispetto al secondo picco più alto. Il valore 1.2 viene correntemente utilizzato in letteratura [3]. Attraverso la seconda validazione, vengono validati o scartati i vettori in comparazione con i vettori circostanti. I vettori scartati vengono quindi sostituiti con vettori stimati sui valori vicini. La continuità nel comportamento del campo di moto è un'assunzione implicita nell'utilizzo di questo metodo.

- Window filters: vengono utilizzate per migliorare le analisi. Nel corso del lavoro è stato deciso di non fare uso dei filtri di finestra in quanto non apportavano un importante miglioramento delle analisi a fronte di un considerevole aumento dei tempi di esecuzione dell'implementazione.

Infine, in Fig. 4.17, viene presentato il confronto tra i campi di moto medi ottenuti dalle due analisi; per comodità di confronto, entrambe hanno le aree di interrogazioni di 16x16 pixel.



**Fig. 4.17** Confronto tra campo di moto medio ottenuto con Adaptive PIV e con semplice cross-correlazione.

Dal confronto, si può vedere che entrambe le tecniche restituiscono un'immagine coerente del flusso studiato, con la differenza che l'immagine ottenuta con l'*Adaptive PIV* risulta maggiormente omogenea. L'efficienza del processo iterativo è visibile nel fatto che, nell'immagine ottenuta con tale tecnica, non compare la piccola zona di colore blu interna alla corona verde, presente nell'immagine di destra e risultato di un riflesso su un dado della flangia della galleria del vento.

## 4.2 Analisi dei risultati

Vengono di seguito presentati i risultati ottenuti dalle misure effettuate su:

- flusso *swirlato* e flusso libero;
- $v = 100$  m/s e  $v = 50$  m/s;
- piano MBA, piano B1 e nuovamente piano MBA.

In particolare, le misure sono state effettuate nuovamente per il piano MBA al fine di verificare la riproducibilità delle misure PIV; tutto il

sistema è infatti montato su guide lineari che permettono di traslarlo in direzione parallela all'asse del componente in misura, come descritto nel paragrafo 3.1.

La posizione dei piani MBA e B1 è mostrata nel paragrafo 3.2 in Fig. 3.14.

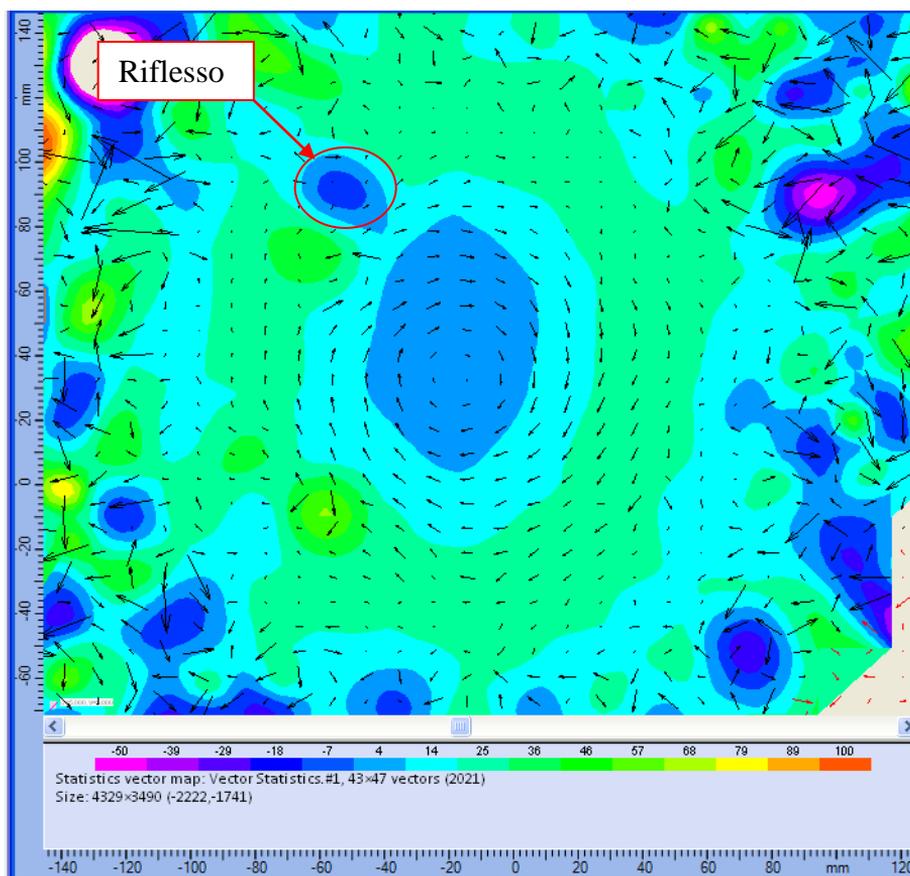
Le misure sono state effettuate utilizzando una tecnica PIV stereoscopica a singola esposizione /doppio fotogramma, elaborazione mediante cross-correlazione su IA di 32x32 pixel e *overlap* del 25%. Per le misure in flusso libero, si è effettuata anche la *Peak Validation* impostata sui valori di 1.1.

Durante l'elaborazione delle immagini si è scelto un valore di sovrapposizione pari al 25%, in quanto consente di ottenere una buona restituzione grafica conservando la veridicità del dato acquisito, e un'estensione delle IA pari a 32x32 pixel, in quanto restituisce un campo di moto sufficientemente dettagliato soprattutto nella fase di messa a punto della misura.

Come è stato detto in precedenza, il flusso non interessa l'intera area di misura; di conseguenza, i valori di ineliminante riportati per le seguenti prove, ai fini delle misure che si svolgeranno presso il Politecnico di Milano, dovranno essere scalati opportunamente.

#### **4.2.1 Flusso swirlato a $v = 50$ m/s**

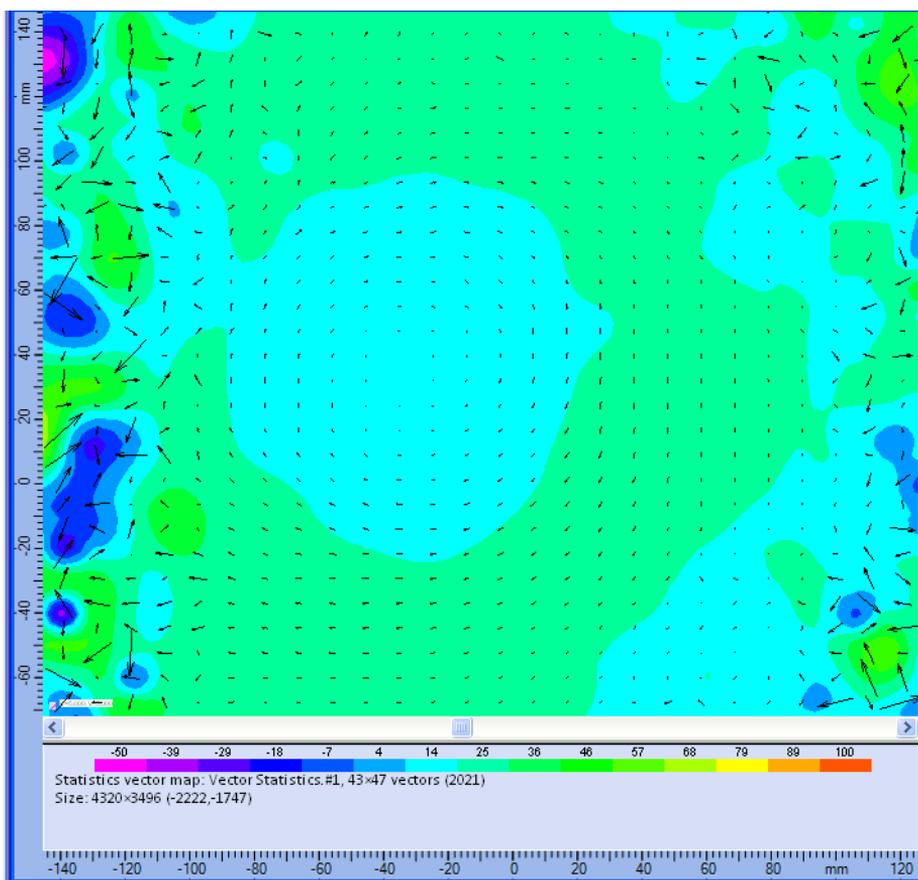
Nelle Figg. 4.18, 4.19 e 4.20 vengono riportati i risultati ottenuti per il flusso *swirlato* a velocità di 50 m/s, con apertura del diaframma pari a f/1.8, TbP = 15 $\mu$ s e numero di getti attivi pari a 12, corrispondenti ad una quantità di aerosol di 73,2 L/min.



**Fig. 4.18** Campo di moto medio per il piano MBA.

In Fig. 4.18 è mostrato il campo di moto per il piano MBA a traslazione ancora da avvenire. È possibile distinguere una zona centrale di forte ricircolo, rappresentata dall'andamento dei vettori e dai ridotti valori che assume la componente  $w$ ; la velocità assiale tende poi ad aumentare radialmente verso le zone periferiche, dove si riduce l'effetto del vorticatore, con valori della componente  $w$  che si attestano sui 40 m/s circa.

All'interno della corona circolare che presenta velocità assiali maggiori, è presente una piccola zona (mostrata dal cerchio rosso) in cui la componente  $w$  assume valori non coerenti con il fenomeno fisico; questa è dovuta ad un riflesso della lama laser su un dado della flangia della galleria del vento.

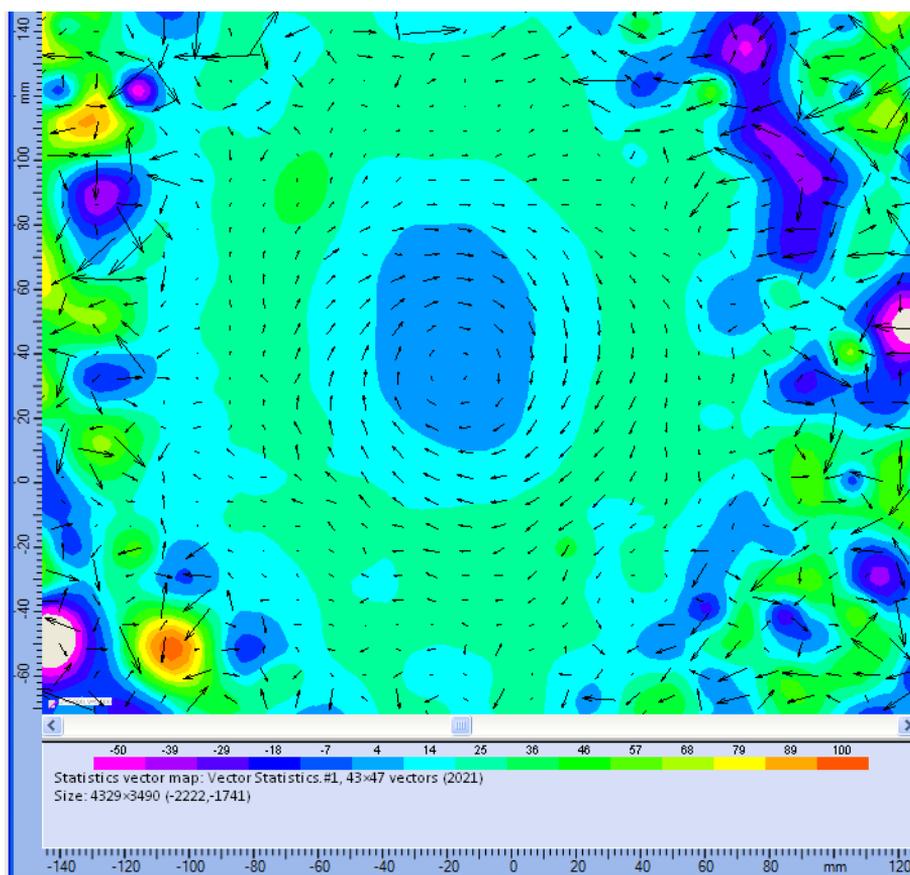


**Fig. 4.19** Campo di moto medio per il piano B1.

Come si può notare dalle Figg. 4.18, 4.19 e 4.20, l'immagine rappresentante il campo di moto è coerente con il fenomeno studiato e con le velocità previste.

Dalla Fig. 4.19, si nota che il flusso, essendo dotato di un forte grado di *swirl*, si allarga rispetto al piano MBA, presentando inoltre una zona centrale con velocità maggiori di quelle mostrate in Fig. 4.18, a causa del miscelamento del flusso.

Per quanto riguarda il confronto tra le misure sul piano MBA prima e dopo la traslazione, si può notare come il campo di moto misurato sia rimasto inalterato, sia dal punto di vista della velocità  $w$  ortogonale al volume di misura, sia per le due componenti appartenenti ad esso.



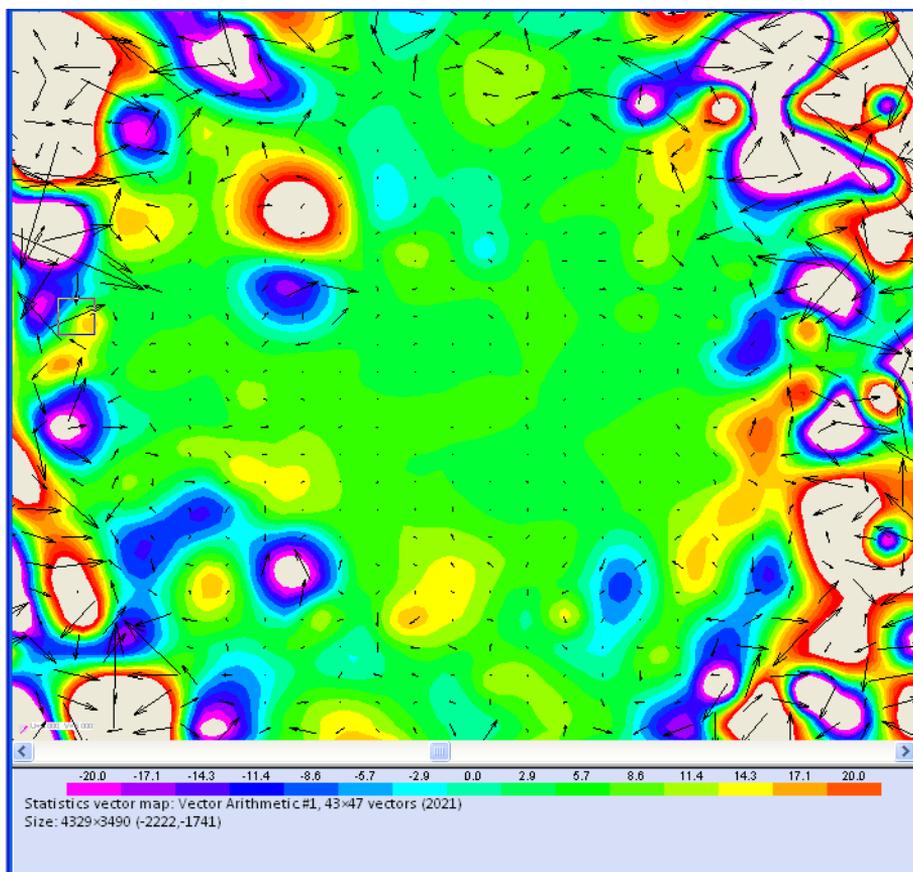
**Fig. 4.20** Campo di moto medio per il piano MBA, dopo la traslazione.

L'unica differenza tra i due campi di moto è rappresentata dal riflesso evidenziato nella Fig. 4.18, dovuto, come detto, ad un dado della flangia, che nella seconda presa dati è stato opportunamente pitturato di nero per evitare la riflessione della lama laser.

Al fine di constatare con esattezza la riproducibilità delle misure, si è sottratto il secondo campo di velocità al primo; l'immagine di Fig. 4.21 mostra il campo risultante dalla sottrazione.

Dalla Fig. 4.21 si può notare come vengano annullate le caratteristiche del flusso studiato, ossia non compare più la struttura vorticoso prodotta dal componente vorticolatore, come dimostra la presenza di vettori dall'intensità minima, dell'ordine dei mm/s; per quanto riguarda la componente  $w$ , la differenza tra i due campi di moto è omogenea, a

meno delle zone dovute a possibili riflessioni della luce laser sui componenti metallici della flangia, e si attesta su valori molto ridotti, dell'ordine dei 2-3 m/s, producendo dunque un errore inferiore all'6%, essendo la velocità media del flusso attorno ai 40 m/s.



**Fig. 4.21** Campo di moto risultante dalla sottrazione.

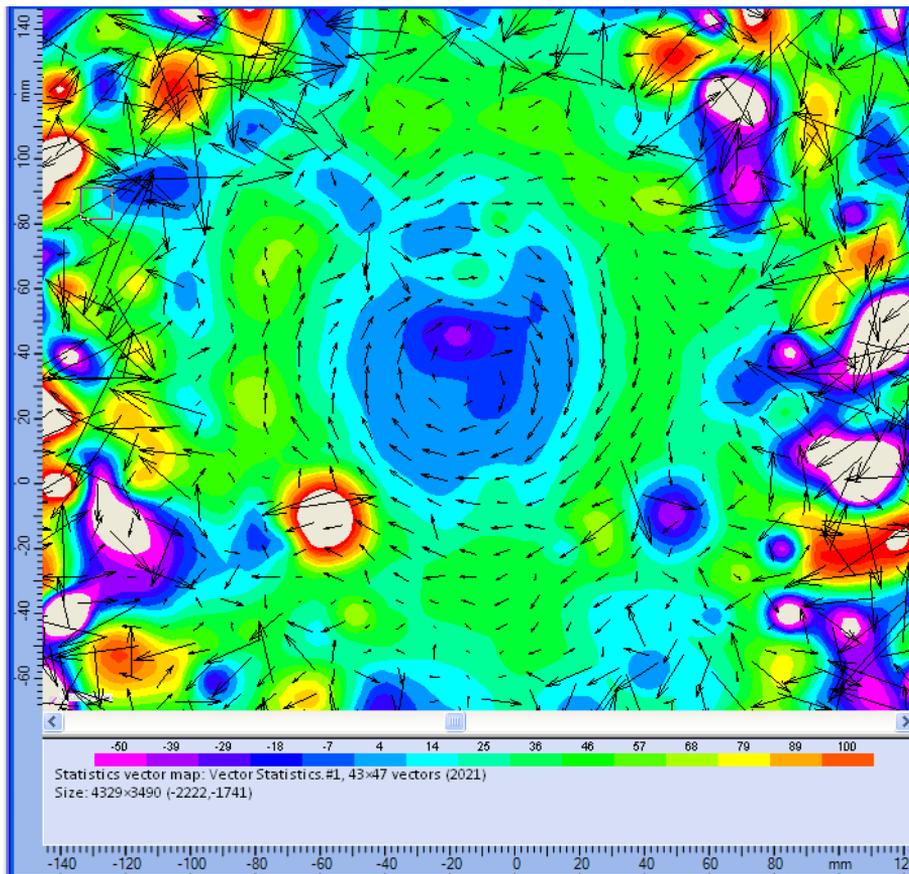
Un contributo a questo errore è dovuto al fatto che le prese dati prima e dopo la traslazione sono state effettuate in giornate differenti, nelle quali il valore di pressione era differente, con la conseguente variazione di temperatura e densità dell'aria all'interno della galleria del vento. In particolare, la presa dati di Fig. 4.18 è stata effettuata con una temperatura in galleria misurata pari a 30°C, mentre la presa dati in Fig. 4.20 con una pari a 28 °C.

Determinando i valori di densità per le due prese dati e calcolando le rispettive velocità, si è trovata una differenza pari a 0,5 m/s.

La differenza tra i due campi di moto si attesta allora su un valore minore dei 2 m/s, con un conseguente errore inferiore al 5%.

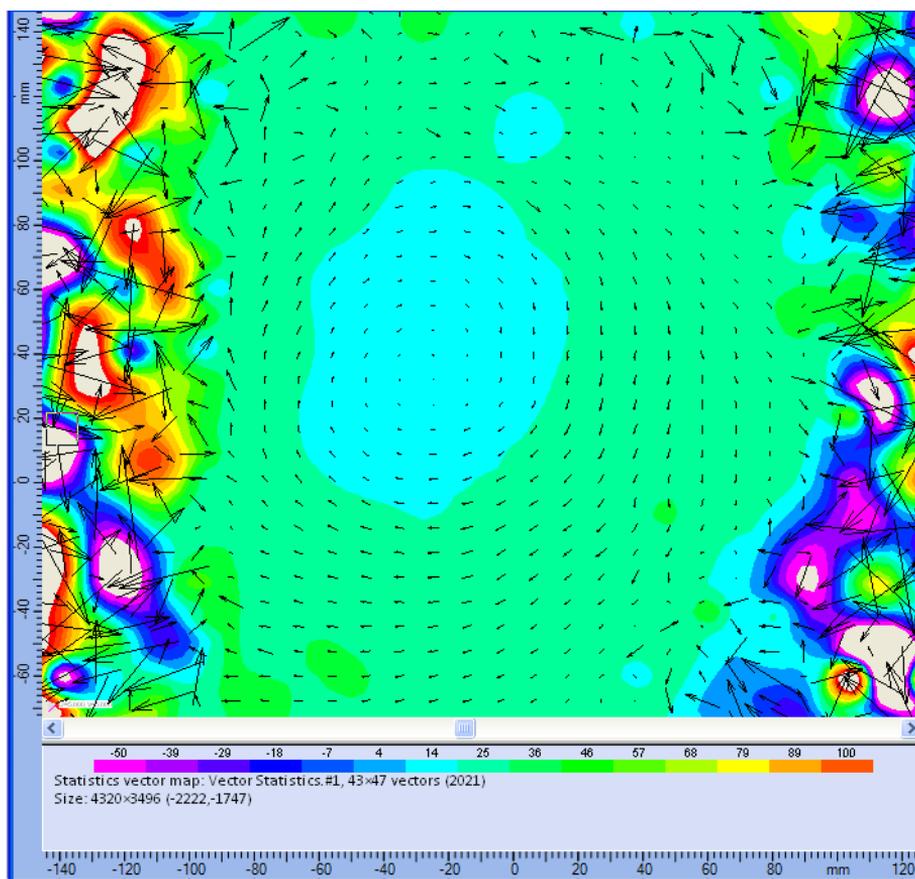
#### 4.2.2 Flusso swirlato con $v = 100$ m/s

In Fig. 4.22, Fig. 4.23 e Fig. 4.24 vengono riportati i risultati ottenuti per il flusso *swirlato* a velocità di 100 m/s, con apertura del diaframma pari a  $f/1.8$ ,  $TbP = 5\mu s$  e numero di getti attivi pari a 12, corrispondenti ad una quantità di insemiante di 73,2 L/min.



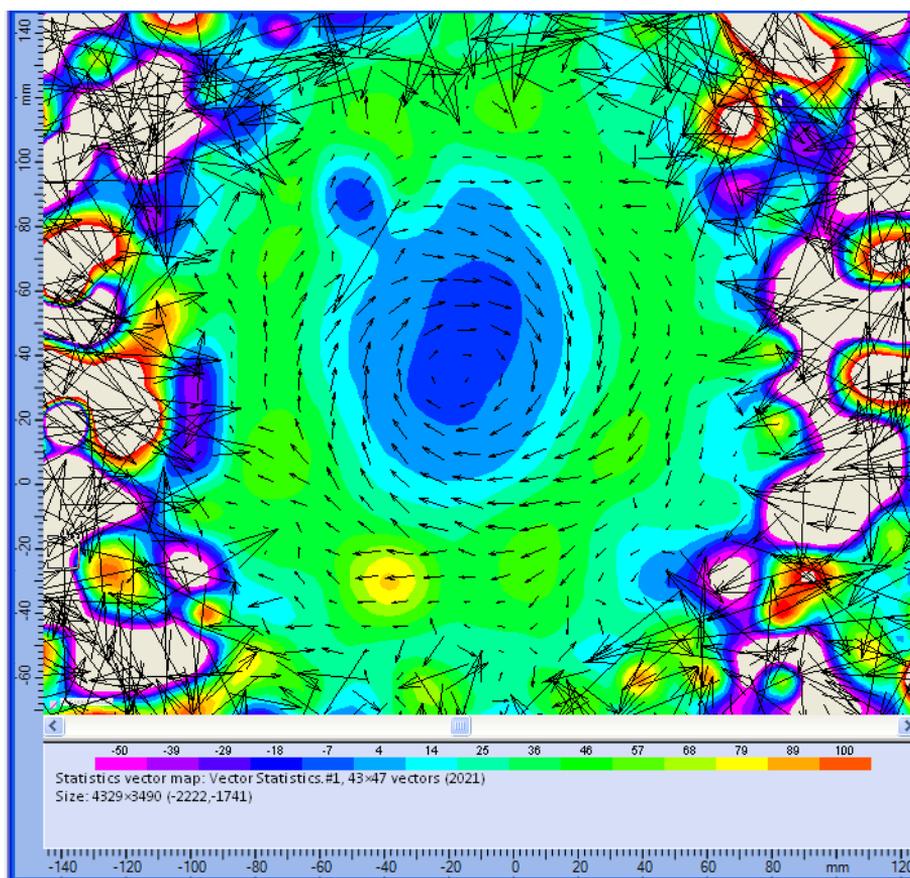
**Fig. 4.22** Campo di moto medio per il piano MBA.

In Fig. 4.22 è mostrato il campo di moto per il piano MBA a traslazione ancora da avvenire. Anche in questo caso, è possibile distinguere una zona centrale di forte ricircolo, rappresentata dall'andamento dei vettori e dai ridotti valori che assume la componente  $w$ ; la velocità assiale tende poi ad aumentare radialmente verso le zone periferiche, dove si riduce l'effetto del vorticolatore, con valori della componente  $w$  che si attestano sui 70 m/s circa.



**Fig. 4.23** Campo di moto medio per il piano B1.

Come si può notare dalle Figg. 4.22, 4.23 e 4.24, l'immagine rappresentante il campo di moto è coerente con il fenomeno studiato e con le velocità previste.



**Fig. 4.24** Campo di moto medio per il piano MBA, dopo la traslazione.

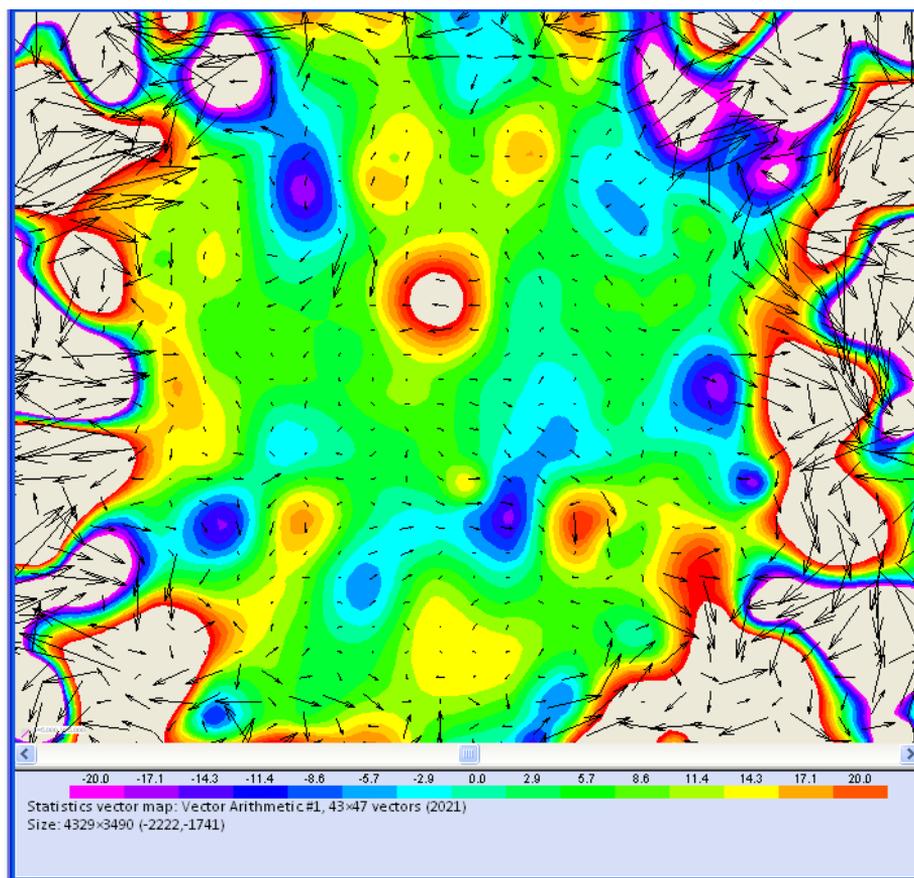
Rispetto al caso precedente, è evidente l'aumento della velocità del flusso, sia per quanto riguarda le componenti sul piano di misura (vettori più lunghi), sia per la componente  $w$  (verde più intenso). Anche nel presente caso si può vedere la zona centrale di flusso fortemente rallentato.

Dalla Fig. 4.23, si nota l'allargamento che il flusso, essendo dotato di un forte grado di *swirl*, sperimenta rispetto al piano MBA; inoltre si nota l'effetto del mescolamento del flusso, che produce una zona centrale con velocità maggiori di quelle mostrate in Fig. 4.22.

Per quanto riguarda il confronto tra le misure sul piano MBA prima e dopo la traslazione, si può notare come il campo di moto misurato sia rimasto sostanzialmente inalterato, sia dal punto di vista della velocità

$w$  ortogonale al volume di misura, sia per le due componenti appartenenti ad esso.

Al fine di constatare con esattezza la riproducibilità delle misure, anche in questo caso si è sottratto il secondo campo di velocità al primo; l'immagine di Fig. 4.25 mostra il campo risultante dalla sottrazione.



**Fig. 4.25** Campo di moto risultante dalla sottrazione.

Dalla Fig. 4.25 si può notare come vengano annullate le caratteristiche del flusso studiato, ossia non compare più la struttura vorticoso prodotta dal componente vortice, come dimostra la presenza di vettori dall'intensità minima; per quanto riguarda la componente  $w$ , la differenza tra i due campi di moto è per lo più omogenea, a meno delle

zone dovute a possibili riflessioni della luce laser sui componenti metallici della flangia, e si attesta su valori molto ridotti, dell'ordine dei 3-4 m/s, producendo dunque un errore inferiore all'5%, essendo la velocità media del flusso attorno ai 70 m/s. Anche in questo caso, un contributo a questo errore è dovuto al fatto che le prese dati prima e dopo la traslazione sono state effettuate in giornate differenti, nelle quali il valore di pressione era differente, con la conseguente variazione di temperatura e densità dell'aria all'interno della galleria del vento.

Dal calcolo delle rispettive velocità, si è trovata una differenza pari a 0,7 m/s.

La differenza tra i due campi di moto si attesta allora su un valore di circa 2,5 m/s, con un conseguente errore inferiore al 4%.

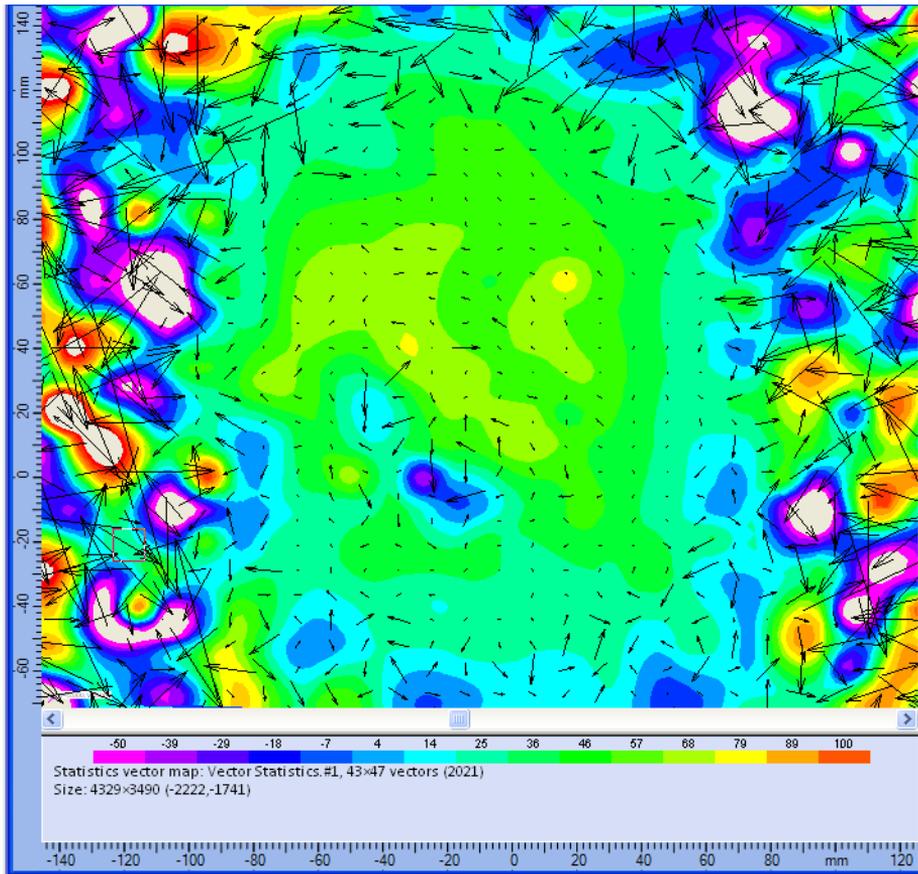
#### **4.2.3 Flusso libero a $v = 50$ m/s**

In Fig. 4.26, Fig. 4.27 e Fig. 4.28 vengono riportati i risultati ottenuti per il flusso libero a velocità di 50 m/s, con apertura del diaframma pari a  $f/1.8$ ,  $TbP = 10\mu s$  e numero di getti attivi pari a 9, corrispondenti ad una quantità di aerosol di 54,9 L/min.

Per le misure sul piano MBA è stata utilizzata anche la *Peak Validation*, con valore impostato pari a 1.1.

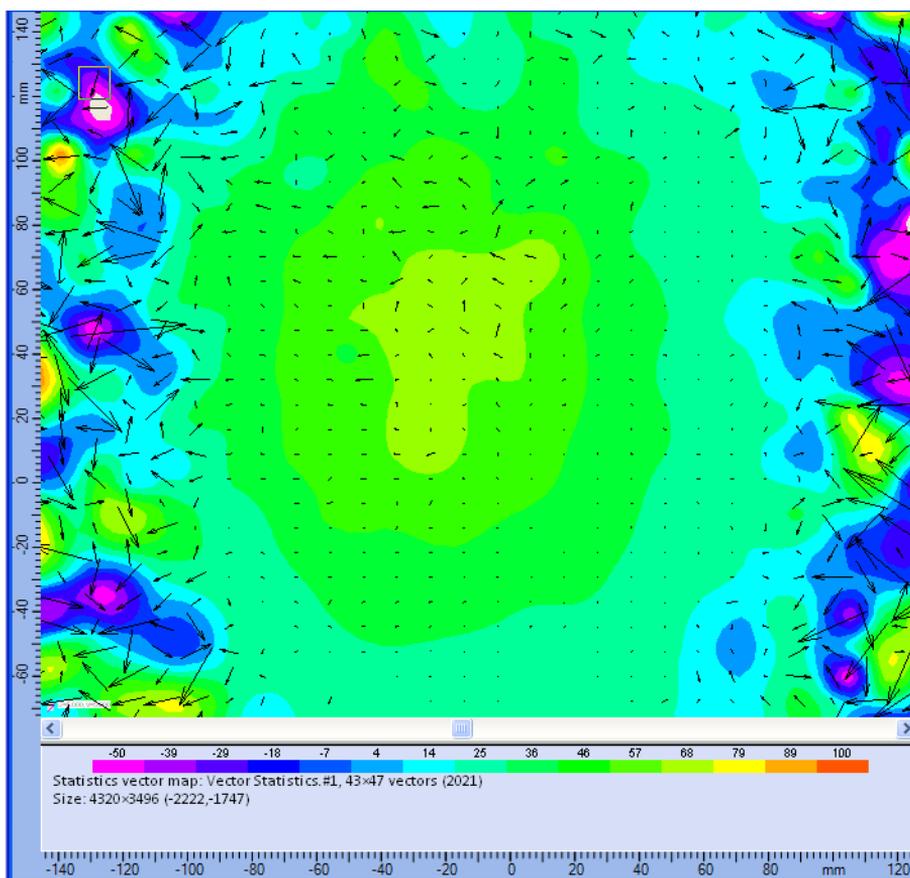
Come si può notare dalle Figg. 4.26, 4.27 e 4.28, l'immagine rappresentante il campo di moto è coerente con il fenomeno studiato e con le velocità previste. Le componenti appartenenti al piano di misura infatti hanno un modulo molto contenuto, mentre la componente  $w$  rappresenta la quasi totalità del modulo della velocità.

Dalle immagini ottenute sul piano MBA si può vedere una zona centrale con velocità superiori, dovuto al restringimento della sezione di passaggio a causa dello strato limite presente sullo sbocco della galleria del vento.



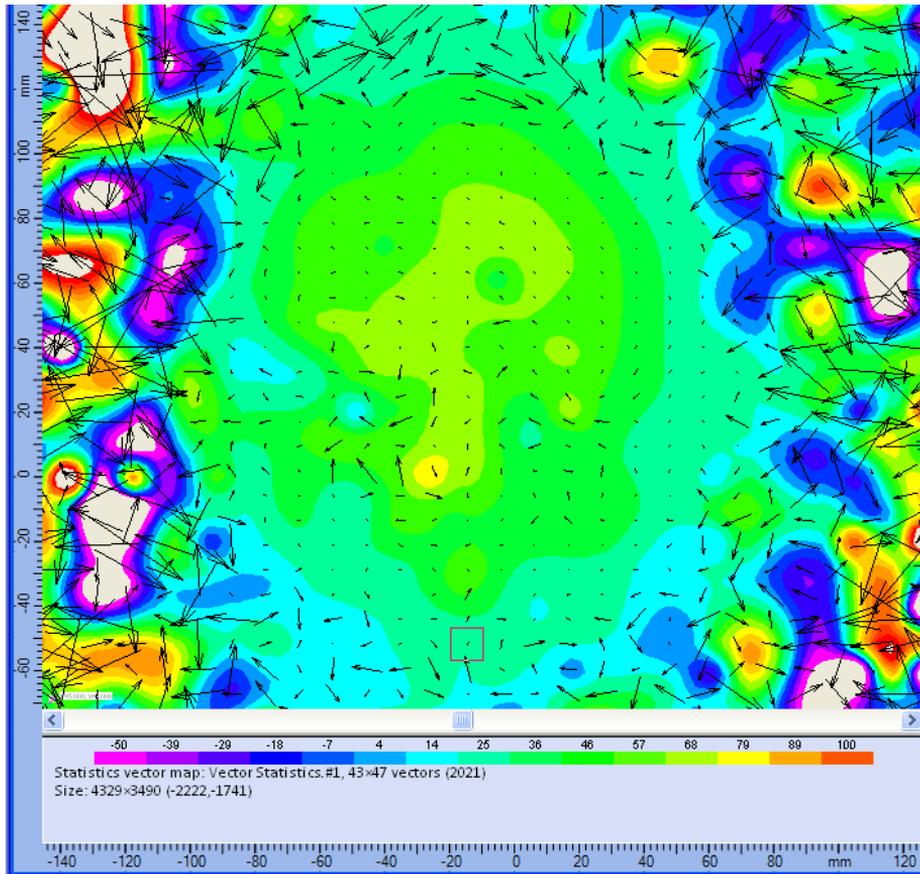
**Fig. 4.26** Campo di moto medio per il piano MBA.

Dalla Fig. 4.27, si nota il lieve allargamento che il flusso sperimenta rispetto al piano MBA; inoltre si nota il mescolamento del flusso, che presenta una zona centrale con velocità minori di quelle mostrate in Fig. 4.26.



**Fig. 4.27** Campo di moto medio per il piano B1.

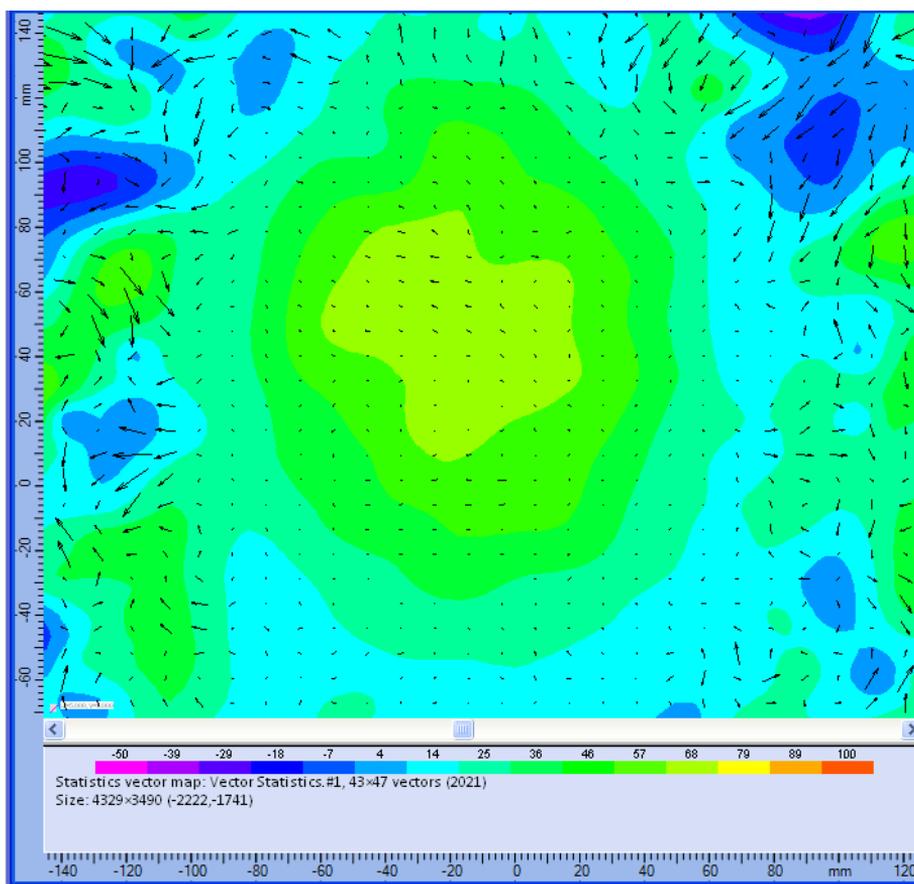
Anche in questo caso, per quanto riguarda il confronto tra le misure sul piano MBA prima e dopo la traslazione, si può notare come il campo di moto misurato sia rimasto sostanzialmente inalterato, sia dal punto di vista della velocità  $w$  ortogonale al volume di misura, sia per le due componenti appartenenti ad esso.



**Fig. 4.28** Campo di moto medio per il piano MBA, dopo la traslazione.

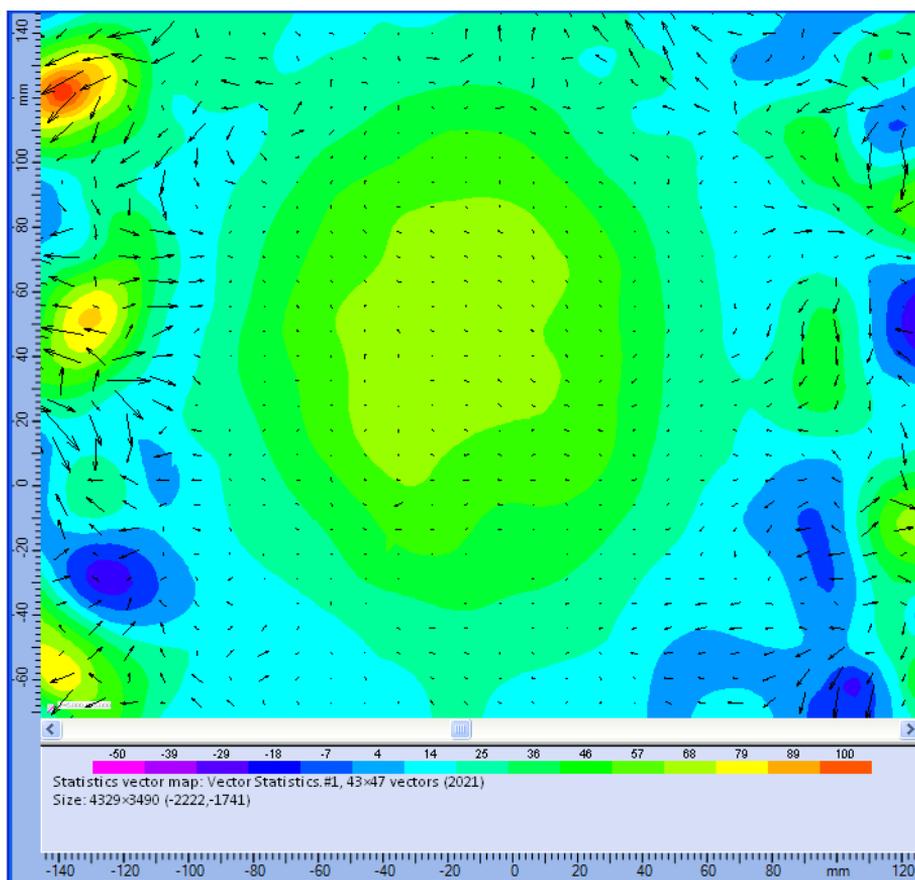
Ciò è ancora più visibile dalle Figg. 4.29 e 4.30 , che riportano il campo di moto ottenuto tramite l'aggiunta, nel post processing, della *Moving Avarage Validation*, che consente di ottenere un'immagine della zona centrale del campo di moto più definita; attraverso questa validazione, i vettori che non risultano coerenti con quelli che li circondano, vengono sostituiti con vettori stimati sui valori di quelli vicini.

È evidente che, con tale sostituzione, il campo di moto risultante subisce delle alterazioni; queste sono rilevanti in prossimità del confine con la zona caotica, dove si hanno notevoli differenze tra i vettori, mentre, per quanto riguarda il campo di interesse, esso non subisce marcate alterazioni.



**Fig. 4.29** Campo di moto medio per il piano MBA.

Dal confronto delle Figg. 4.26 e 4.29 si nota come il campo di moto, a seguito dell'utilizzo della *Moving Avarage Validation*, risulta più omogeneo, pur mantenendo invariate le sue caratteristiche; in entrambi, le componenti sul piano di misura assumono valori molto ridotti, mentre la componente  $w$  ricopre la quasi totalità del modulo della velocità.



**Fig. 4.30** Campo di moto medio per il piano MBA, dopo la traslazione.

Confrontando le Figg. 4.29 e 4.30, si nota invece l'ottima riproducibilità della misura, sia dal punto di vista delle componenti  $u$  e  $v$ , sia di quello della componente  $w$ .

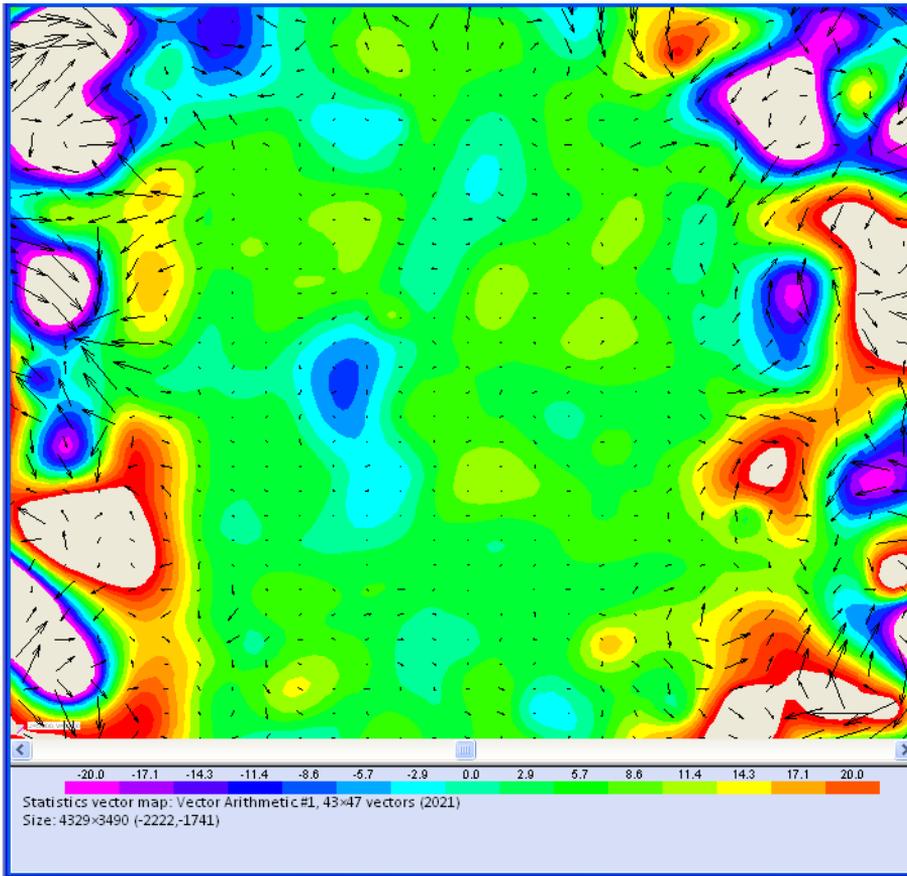
In Fig. 4.31 è mostrato il campo di moto risultante dalla sottrazione dei due campi di moto ottenuti mediante la *Moving Average*.

Dalla Fig. 4.31 si può notare come, per quanto riguarda la componente  $w$ , la differenza tra i due campi di moto è omogenea, a meno di una piccola zona, e si attesta su valori molto ridotti, dell'ordine dei 3-4 m/s, producendo dunque un errore inferiore all'7%, essendo la velocità media del flusso attorno ai 50 m/s. Anche in questo caso, un contributo a questo errore è dovuto al fatto che le prese dati prima e dopo la traslazione sono state effettuate in giornate differenti, nelle quali il

valore di pressione era differente, con la conseguente variazione di temperatura e densità dell'aria all'interno della galleria del vento.

Dal calcolo delle rispettive velocità, si è trovata una differenza pari a 0,7 m/s.

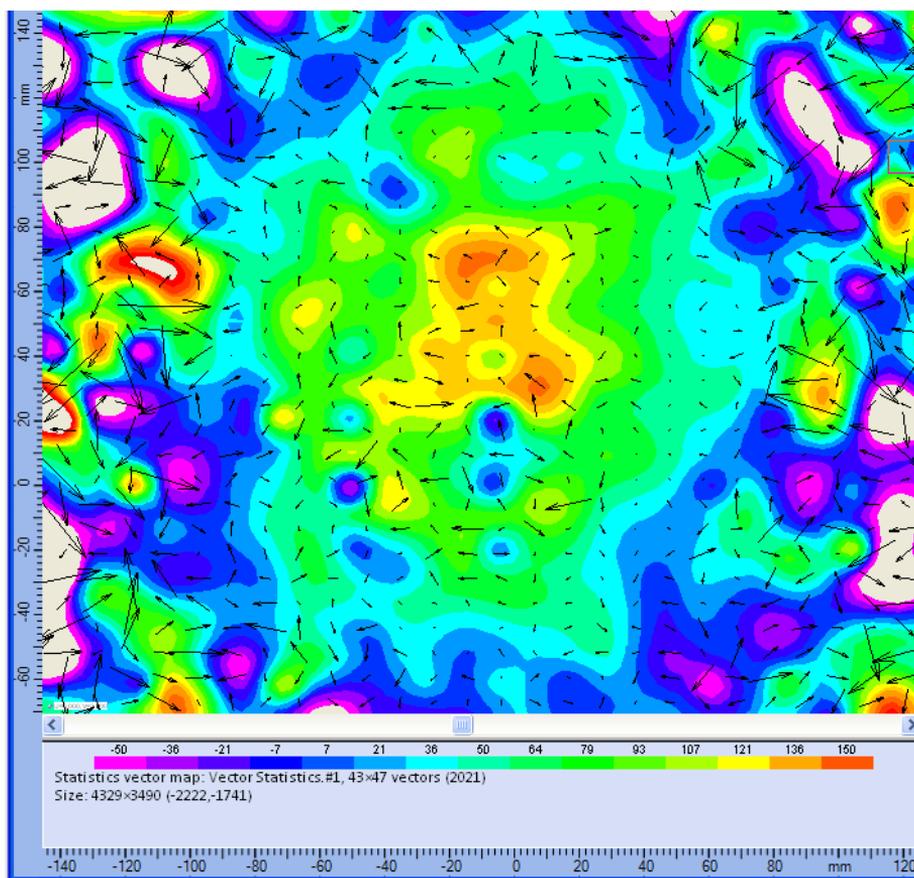
La differenza tra i due campi di moto si attesta allora su un valore di circa 3 m/s, con un conseguente errore attorno al 5%.



**Fig. 4.31** Campo di moto risultante dalla sottrazione.

#### 4.2.4 Flusso libero a $v = 100$ m/s

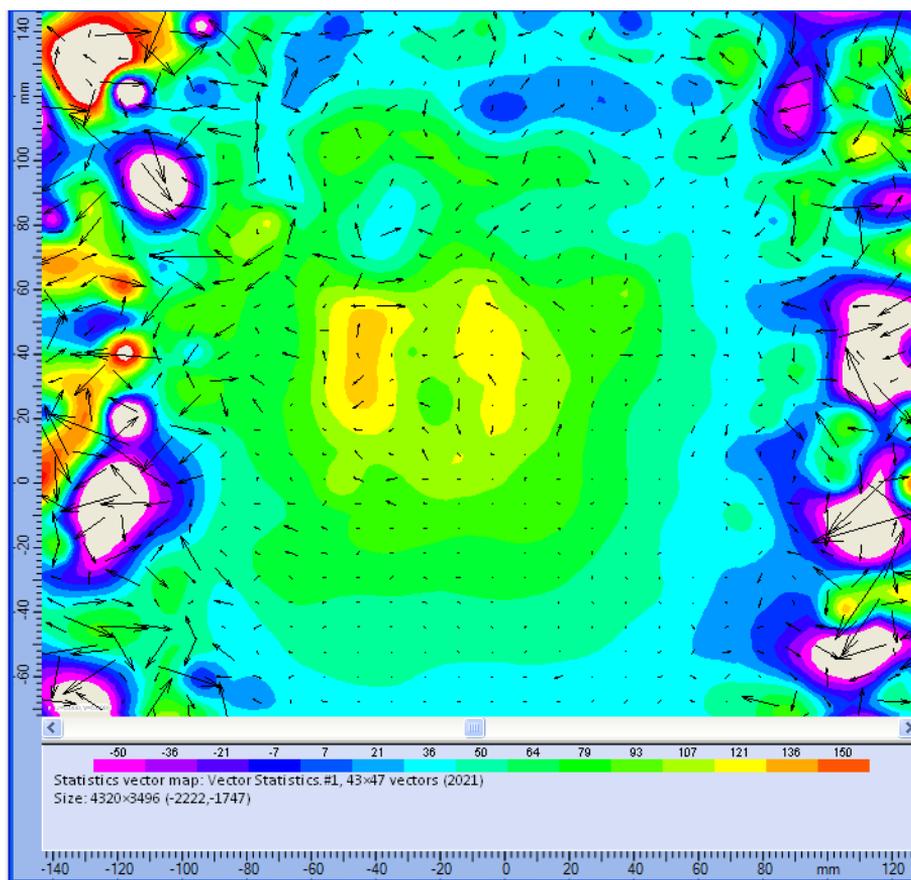
Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per il flusso libero a velocità di 100 m/s, con apertura del diaframma pari a  $f/1.8$ ,  $TbP = 5\mu s$  e numero di getti attivi pari a 9, corrispondenti ad una quantità di aerosol di 54,9 L/min.



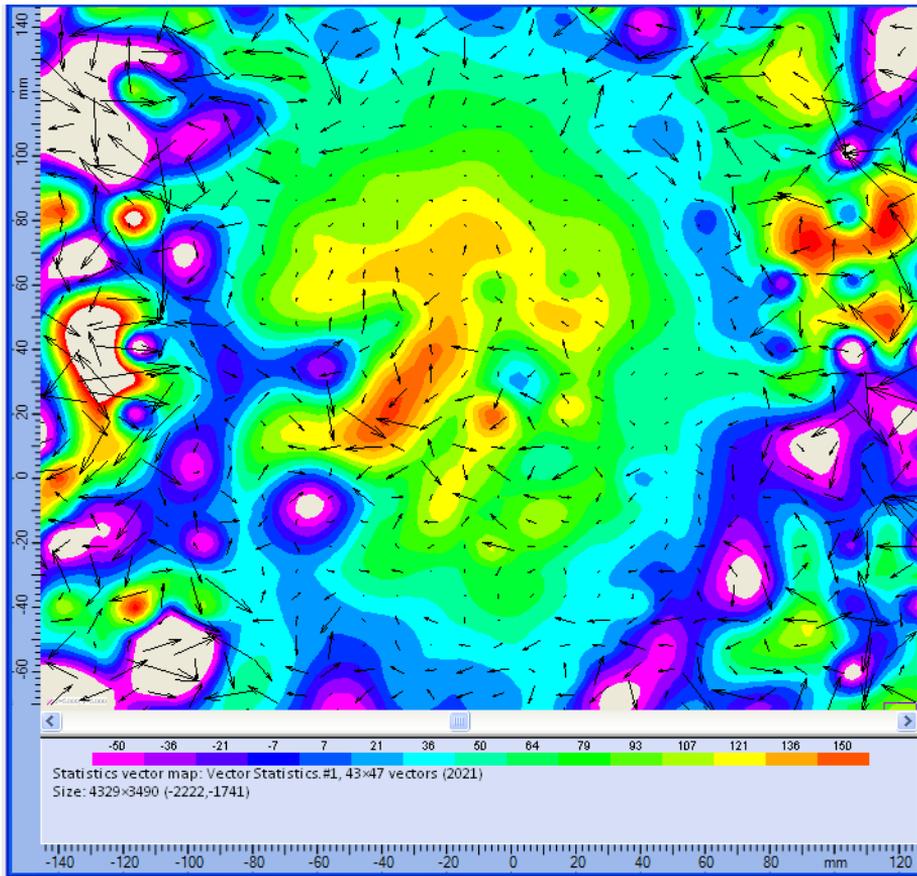
**Fig. 4.32** Campo di moto medio per il piano MBA.

Come si può notare dalle Figg. 4.32, 4.33 e 4.34, il campo di moto ottenuto è sì riconoscibile, ma al suo interno compaiono vettori spuri e zone a velocità  $w$  molto ridotte, o addirittura negative, che non trovano corrispondenza all'interno di una corrente assiale ad elevata velocità. Questo è dovuto al fatto che il flusso studiato ha una componente assiale molto elevata e ciò comporta la possibile perdita di informazioni riguardanti le particelle traccianti che nel primo fotogramma sono sui confini dell'area di interrogazione e non compaiono più nel secondo. Inoltre, come detto nella trattazione teorica della tecnica stereoscopica, l'angolazione ottimale delle telecamere sarebbe  $45^\circ$ ; anche questo fattore, data l'angolazione di  $30^\circ$

nel presente lavoro, può comportare una diminuzione della risoluzione dell'immagine.



**Fig. 4.33** Campo di moto medio per il piano B1.



**Fig. 4.34** Campo di moto medio per il piano MBA, dopo la traslazione.

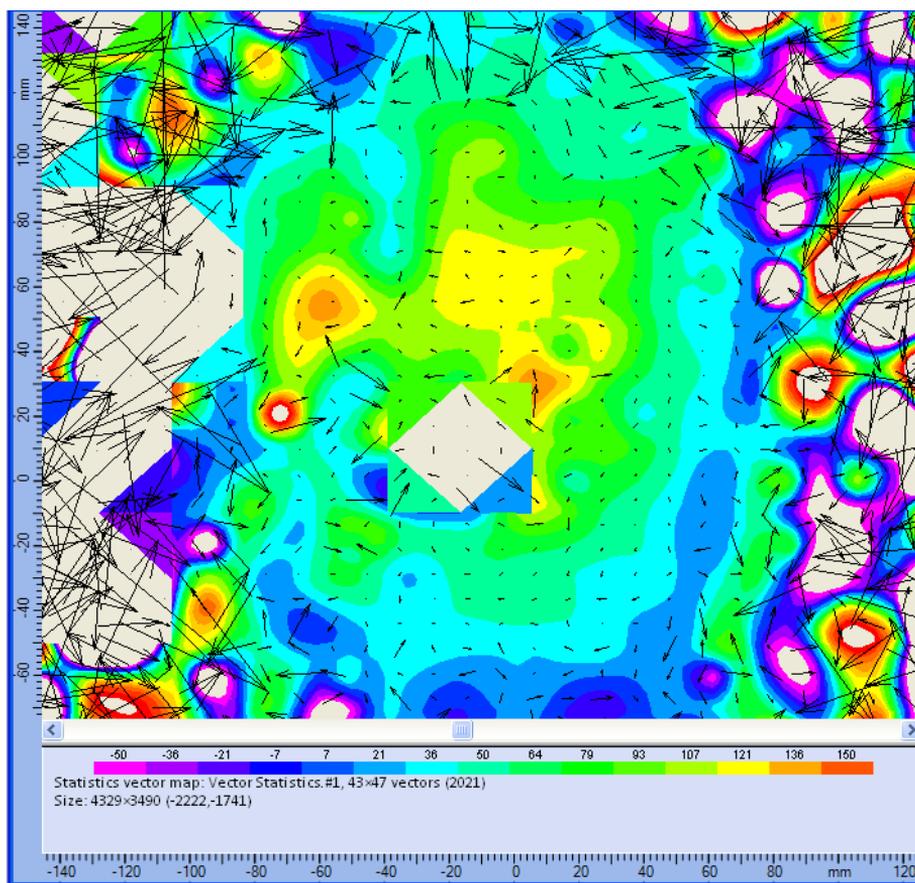
Al fine di migliorare i risultati ottenuti, si è dunque utilizzata la *Peak Validation*, con valore impostato pari a 1.2; i risultati ottenuti sono mostrati in Fig. 4.35 e Fig. 4.36.

Come si può notare dalle Figg. 4.35 e 4.36, utilizzando la *Peak Validation* si è ottenuto un leggero miglioramento del campo di moto, in quanto è possibile identificare più facilmente il comportamento del flusso, che presenta una zona centrale ad elevatissime velocità.

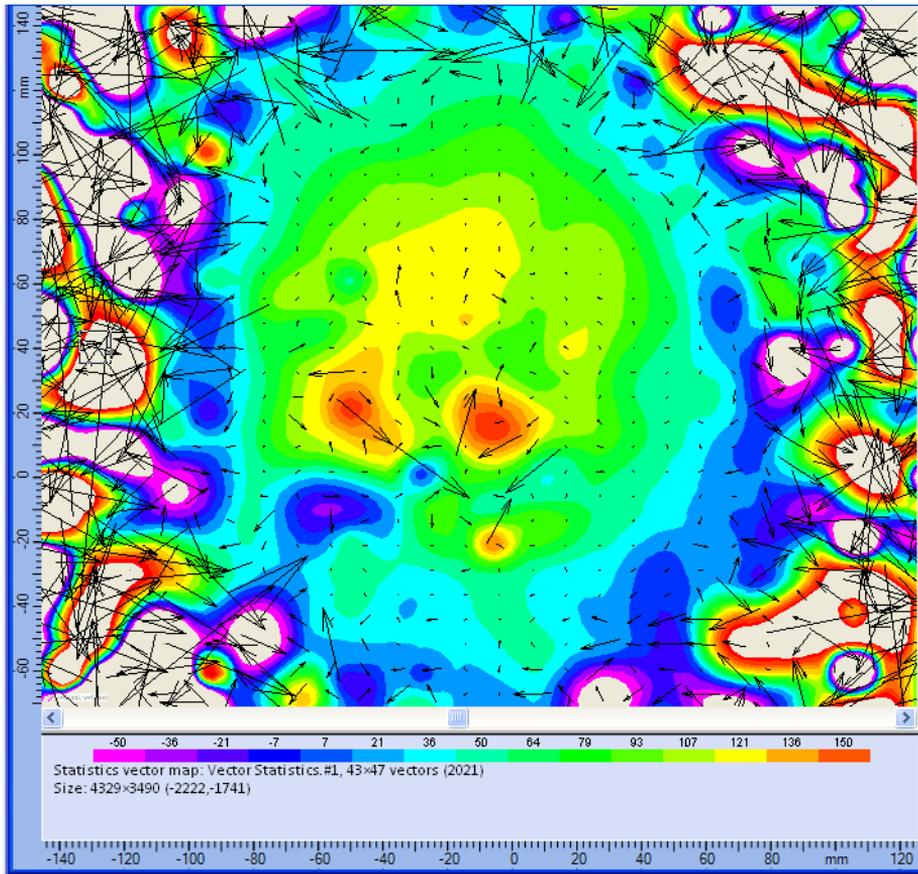
Nell'immagine 4.35, è presente, nella zona centrale, una porzione di immagine nella quale non sono riportati i valori della componente  $w$ ; questo è dovuto alla perdita di vettori nelle operazioni di validazione.

Al fine, quindi, di migliorare ulteriormente la restituzione del campo di moto, si è dunque utilizzata, a fianco della *Peak Validation*, anche la

*Moving Avarage Validation*, ottenendo i risultati di Fig. 4.37 e Fig. 4.38.

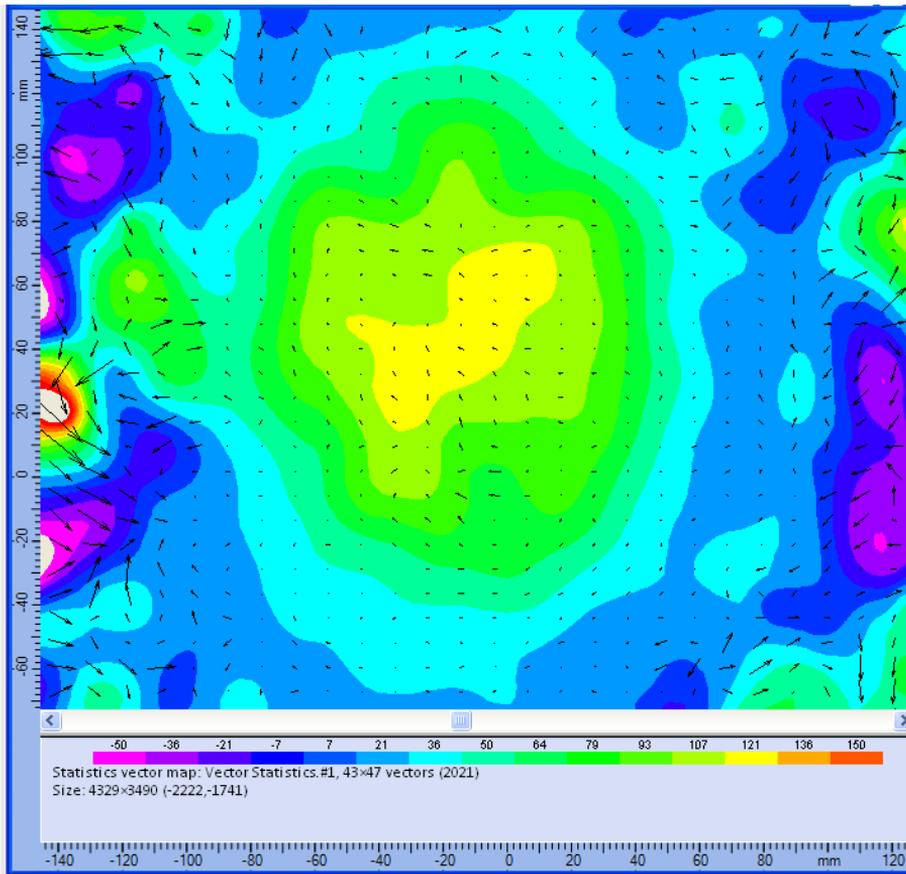


**Fig. 4.35** Campo di moto medio per il piano MBA.



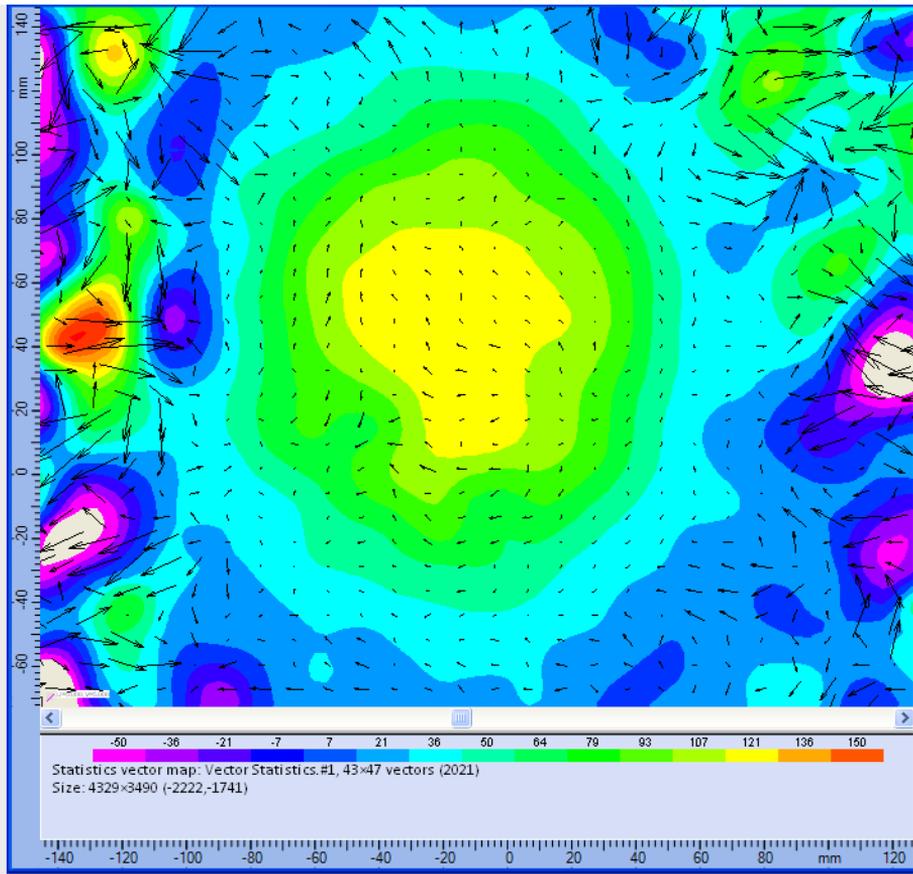
**Fig. 4.36** Campo di moto medio per il piano MBA, dopo la traslazione.

Come si può vedere dalle Figg. 4.37 e 4.38, il campo di moto misurato mostra un andamento coerente con il fenomeno studiato e con le velocità previste. Le componenti appartenenti al piano di misura infatti hanno un modulo estremamente contenuto, mentre la componente  $w$  rappresenta la quasi totalità del modulo della velocità. Si può inoltre vedere una zona centrale con velocità molto elevate, dovuto al restringimento della sezione di passaggio a causa dello strato limite presente sullo sbocco della galleria del vento.



**Fig. 4.37** Campo di moto medio per il piano MBA.

Dal confronto delle due immagini si nota una buona riproducibilità della misura, sia dal punto di vista delle componenti  $u$  e  $v$ , sia di quello della componente  $w$ . In entrambe è presente una zona centrale con velocità assiali superiori ai 100 m/s, che diminuiscono verso le zone periferiche.



**Fig. 4.38** Campo di moto medio per il piano MBA, dopo la traslazione.

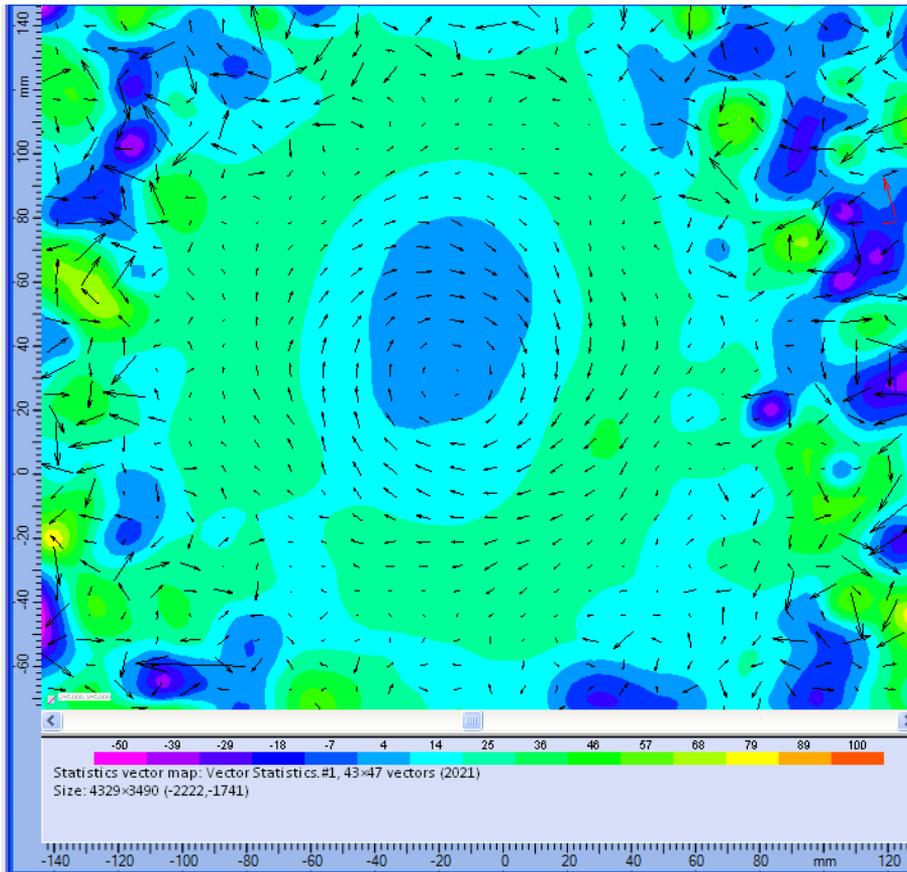
#### 4.2.5 Flusso swirlato a $v = 50$ m/s con diffusore montato

In Fig. 4.39 viene riportato il risultato ottenuto con il simulacro di diffusore montato, per il flusso *swirlato* a velocità di 50 m/s, con apertura del diaframma pari a  $f/1.8$ ,  $TbP = 15\mu s$  e numero di getti attivi pari a 12, corrispondenti ad una quantità di aerosol di 63,2 L/min.

Si è effettuata una sola misura in tale condizione in quanto i tagli per gli accessi ottici per il piano B1 non avrebbero permesso alla struttura di resistere alle sollecitazioni del flusso.

Come si può notare dalla Fig. 4.39, l'immagine rappresentante il campo di moto è coerente con il fenomeno studiato e con le velocità.

In particolare è ben visibile la zona centrale di flusso ricircolato (di colore blu) e la zona circostante in cui la velocità aumenta radialmente.



**Fig. 4.39** Campo di moto medio per il piano MBA.

#### 4.2.6 Considerazioni generali sulle misure

Le misure svolte in laboratorio sono state utili per determinare i valori di Tbp, quantità di insemiante e apertura del diaframma delle telecamere che verranno utilizzati per le prove presso il Politecnico di Milano.

I valori che hanno dato i risultati migliori sono stati:

- *Time between pulses* pari a 5  $\mu$ s;
- Apertura del diaframma delle telecamere pari a f/1.8;
- Quantità di insemiante pari a 54,9 L/min.

Le prove inoltre hanno verificato la robustezza dell'utilizzo della traslazione rigida del sistema PIV, attraverso la riproducibilità delle

misure. Questo risultato è molto importante, in quanto permetterà, durante la campagna sperimentale presso la galleria del vento del Politecnico di Milano, di misurare in successione rapida i due piani di misura, riducendo la possibilità di una variazione del flusso fra le due misure.

Infine, viene fatta una considerazione riguardo alle misure con flusso libero, le quali hanno una qualità minore rispetto a quelle con flusso *swirlato*; il motivo è dovuto al fatto che presentano un campo di moto caratterizzato da una forte componente assiale, che comporta la perdita di informazioni connesse alle particelle che sono sui confini della IA nel primo fotogramma.



# CAPITOLO 5

## Conclusioni

## 5. Conclusioni

Il lavoro svolto presso il Laboratorio di fluidodinamica a freddo dell'Azienda Ansaldo Energia S.p.A., all'interno dell'unità "Laboratori Aerodinamica, Combustione e Scambio Termico (TLA)", ha avuto come oggetto la messa a punto della tecnica di misura ottica *Particle Image Velocimetry* applicata a un modello in scala di un diffusore di scarico della turbina a gas AE94.3A.

In particolare, il presente lavoro è rientrato in un progetto avente la finalità di considerare uno sviluppo del componente stesso per migliorare l'efficienza dell'intera macchina; la conoscenza del campo di moto evolvente all'interno del componente è un parametro utile per trarre indicazioni a tal riguardo.

La progettazione e la realizzazione del modello scalato hanno richiesto una tempistica maggiore, per cui la tecnica è stata messa a punto studiando un flusso avente caratteristiche il più simili possibile a quello che evolve realmente all'interno del diffusore.

Dall'operazione di scalatura, rispettante la similitudine di Mach, e dai dati già in possesso riguardanti la distribuzione del flusso in uscita dall'ultimo stadio di turbina, sono state ricavate le caratteristiche del flusso che evolverà nel diffusore modello; in particolare quest'ultimo verrà attraversato da un flusso a velocità pari a circa 100 m/s e dotato di un grado di *swirl* che varia in funzione delle condizioni operative della macchina.

Il modello in scala verrà testato presso il Politecnico di Milano, dotato di una galleria del vento in grado di soddisfare i vincoli di portata d'aria e di  $\Delta p$  richiesti dalla scalatura, mentre le prove svolte presso il laboratorio dell'Azienda Ansaldo Energia S.p.A. hanno riguardato un flusso avente la velocità di 100 m/s e una swirlatura maggiore, per cui risultano conservative da questo punto di vista.

L'attività ha ricercato le indicazioni fondamentali necessarie alle misure che si svolgeranno sul componente modello; nel dettaglio, sono stati determinati il valore del *Time between Pulses*, la quantità di insemnante necessaria e l'apertura del diaframma delle telecamere.

Queste grandezze rappresentano tre gradi di libertà, su cui è possibile agire per migliorare la qualità delle misure; al fine di determinare i valori ottimali di tali grandezze, le prove sono state effettuate variando singolarmente ciascuna grandezza, lasciando inalterate le altre due.

In particolare, le misure sono state svolte per valori del TbP pari a 5-10  $\mu$ s, quantità di insemillante compresa tra 36,6 L/min e 73,2 L/min e apertura del diaframma variata tra f/1.8-f/2.8-f/4.

Le misure ottenute hanno evidenziato che i valori di tali grandezze che hanno restituito immagini di qualità superiore alle altre sono: TbP = 5  $\mu$ s, quantità di insemillate pari a 73,2 L/min e apertura del diaframma pari a f/1.8.

Oltre a trarre indicazioni su alcune grandezze utili alla tecnica PIV, l'attività è consistita anche nel verificare la riproducibilità di misure PIV ottenute tramite una traslazione rigida di tutto il sistema di misura. La campagna sperimentale sul diffusore modello prevede infatti la conoscenza del campo di moto su due piani, per cui la possibilità di effettuare le misure semplicemente traslando il sistema di misura, senza interrompere il flusso per effettuare la calibrazione, permette di misurare in successione rapida i due piani di misura, riducendo la possibilità di una variazione del flusso fra le due misure.

Sono perciò state effettuate misure PIV traslando rigidamente il sistema di misura; l'analisi dei risultati ha mostrato la riproducibilità delle stesse, restituendo immagini coincidenti.

È stato valutato un errore medio del 4%, che rappresenta un valore accettabile per delle misure volte solamente alla messa a punto della tecnica.

Le immagini ottenute dalle prove svolte hanno quindi dato risultati soddisfacenti e hanno permesso di determinare i parametri necessari per le future misure sul diffusore modello; vi sono però i margini per ottenere risultati ancora migliori.

In primo luogo, come è stato detto nella trattazione teorica di tale tecnica, la PIV stereoscopica restituisce i risultati migliori se le telecamere sono posizionate con un'angolazione di 45° rispetto all'asse di simmetria, mentre per le prove in esame è stata utilizzata una configurazione a 30°. Un primo margine di miglioramento è dunque possibile ottenerlo posizionando le telecamere a 45°, salvo restando la necessità di cambiare anche le telecamere attuali con altre aventi un sensore di dimensioni maggiori.

Un sensore di dimensioni maggiori, a parità di obiettivo, ha un campo di vista maggiore e ciò permetterà di avvicinare le telecamere al componente, potendo effettuare di conseguenza degli accessi ottici di dimensioni minori; questo sarà molto importante ai fini della resistenza strutturale del modello.

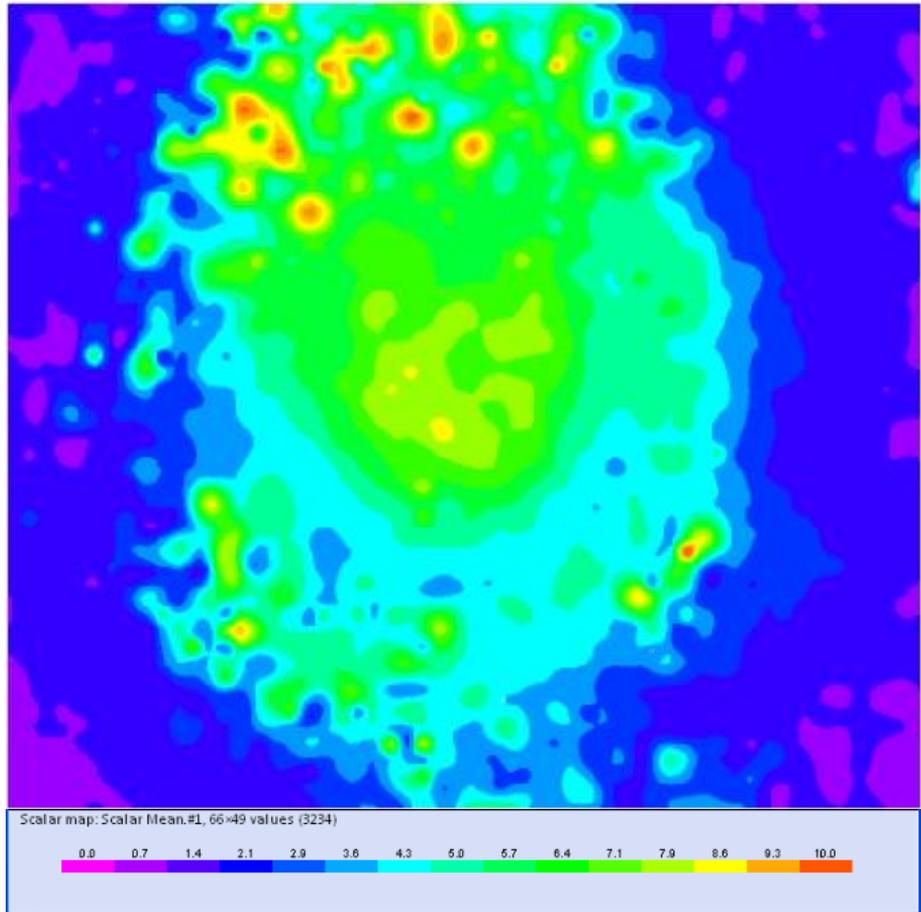
Oltre ad un sensore di dimensioni maggiori, si potrebbe utilizzare anche un obiettivo con distanza focale minore, in modo da ottenere un ulteriore aumento del campo di vista e riduzione degli accessi ottici; bisognerà però prestare attenzione alla luminosità concessa dal possibile nuovo obiettivo, in quanto dovrà avere per lo meno un valore non inferiore a  $f/1.8$ , che è quello ricavato dalla presente campagna sperimentale.

Si potrà poi aumentare la qualità delle immagini anche attraverso l'utilizzo di una sorgente luminosa più potente; in questo modo sarà possibile l'utilizzo di una lama laser di spessore maggiore, mantenendo invariata la densità di energia, il che permetterà di ridurre la perdita di informazioni legata alle particelle più veloci.

Infine, un ulteriore miglioramento potrà essere ottenuto utilizzando una PIV stereoscopica che soddisfa la condizione di Scheimpflug; in tale modo sarà possibile migliorare la qualità delle immagini grazie al fatto che tutto l'area di misura avrà una messa a fuoco uniforme.

# Appendice 1

In questo paragrafo vengono esposte le mappe che riportano l'andamento del rapporto tra il picco principale e il secondo all'interno di ogni IA, dalle quali si può comprendere la bontà della cross-correlazione.



**Fig. A1** Mappa del rapporto picco principale/secondo picco.

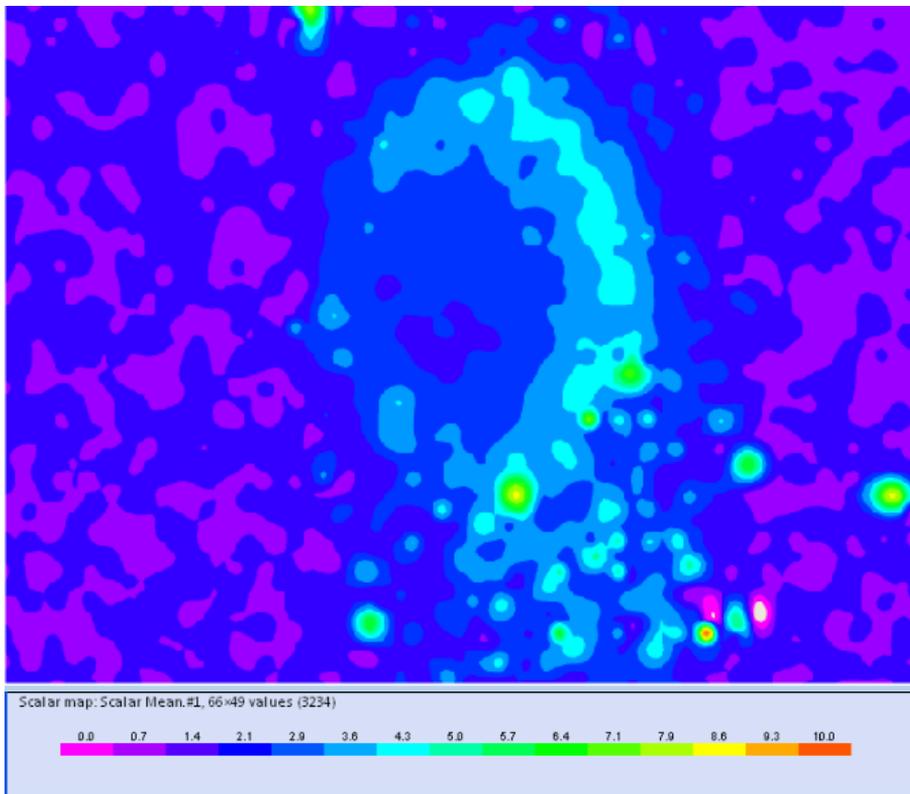
La qualità della cross-correlazione è un elemento imprescindibile ai fini di una buona misura PIV; un valore elevato del rapporto tra il picco principale e il secondo, significa una cross-correlazione di ottima

qualità e, di conseguenza, misure soddisfacenti. Ciò si verifica quando il rapporto segnale/rumore è elevato.

In Fig. A1 è mostrato l'andamento del rapporto tra il picco principale e il secondo per il caso di flusso *swirlato* a  $v = 50$  m/s.

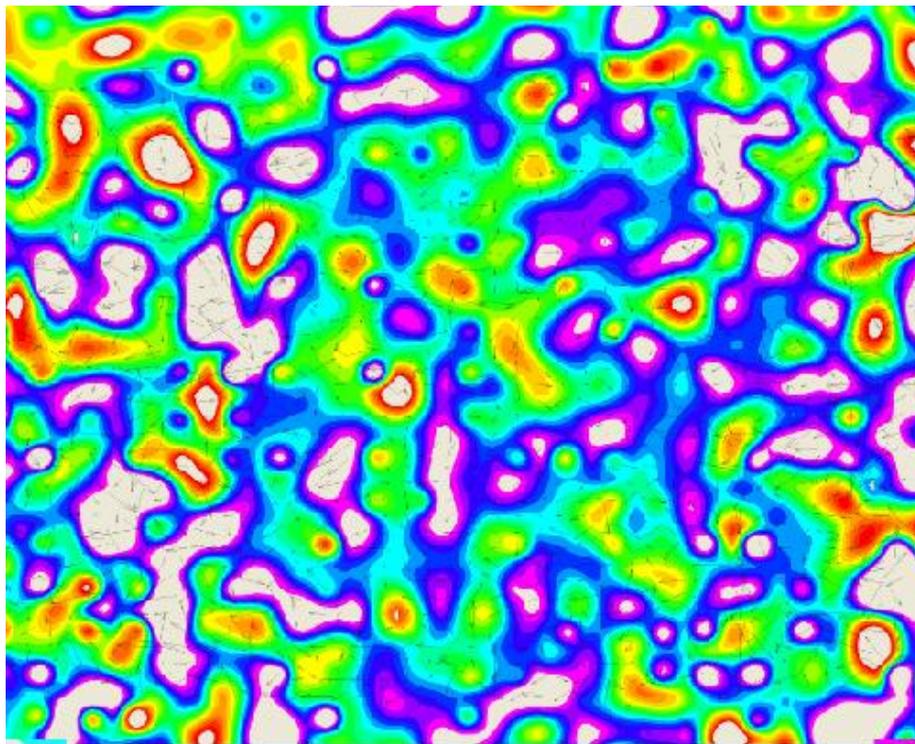
Come si può vedere dalla Fig. A1, all'interno del campo di moto, il rapporto assume valori elevati, superiori a 5; questo è la dimostrazione di una cross-correlazione ottima, come testimoniano i risultati del paragrafo 4.2.1.

È importante anche notare come, nella zona non comprendente il campo di moto, il rapporto assume valori molto bassi; il risultato di ciò è una pessima cross-correlazione, che restituisce un andamento casuale dei vettori, come si può vedere sempre in Fig. 4.18.



**Fig. A2** Mappa del rapporto picco principale/secondo picco, per un caso errato.

In Fig. A2 è mostrata una mappa del rapporto tra il picco principale e il secondo, ottenuta da una presa dati nella quale non si ha un buon rapporto segnale/rumore.



**Fig. A3** Campo di moto medio per un caso errato.

Come si può vedere dalla Fig. A2, il rapporto non assume mai valori elevati; in questo caso è evidente la scarsa qualità dell'operazione di cross-correlazione, come dimostrato dalla Fig. A3, che mostra il campo di moto medio ottenuto dall'elaborazione. In tale figura non si è possibile distinguere il campo di moto e l'andamento dei vettori rappresentanti le componenti del vettore velocità nel piano di misura hanno andamento completamente casuale.



## Appendice 2

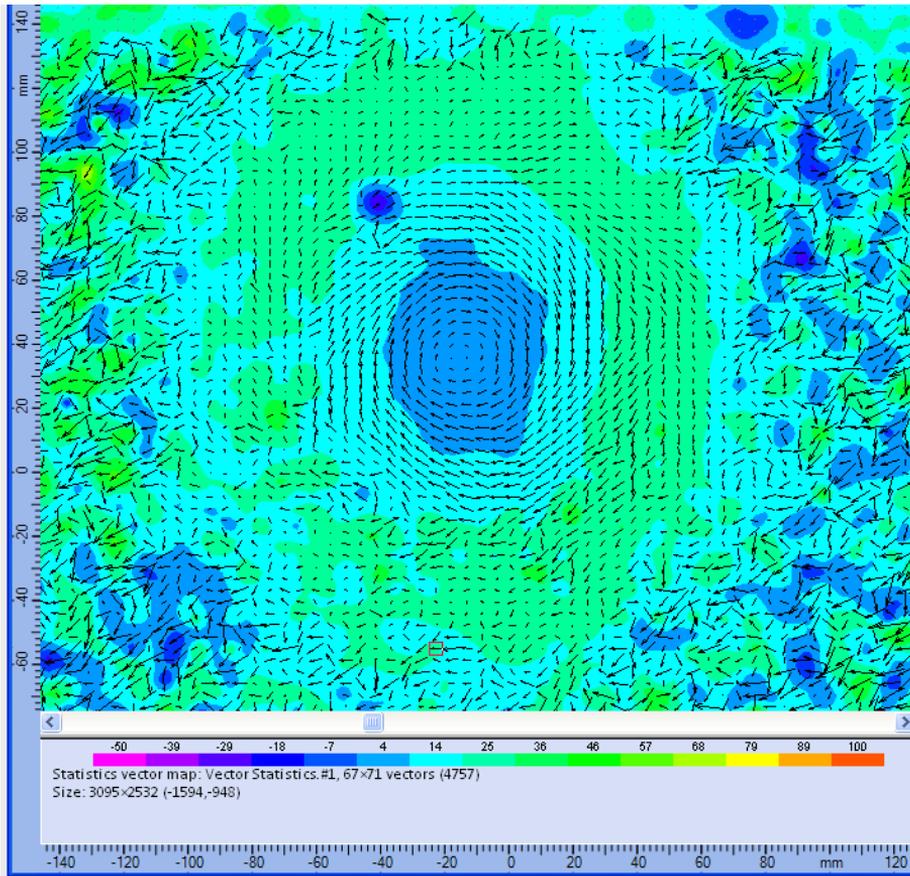
In questo paragrafo vengono esposti i risultati ottenuti mediante differenti modalità di elaborazione, nelle quali sono state variate l'estensione delle aree di interrogazione IA ed il valore della sovrapposizione delle finestre (*overlap*).

- **Variazione dell'estensione delle IA**

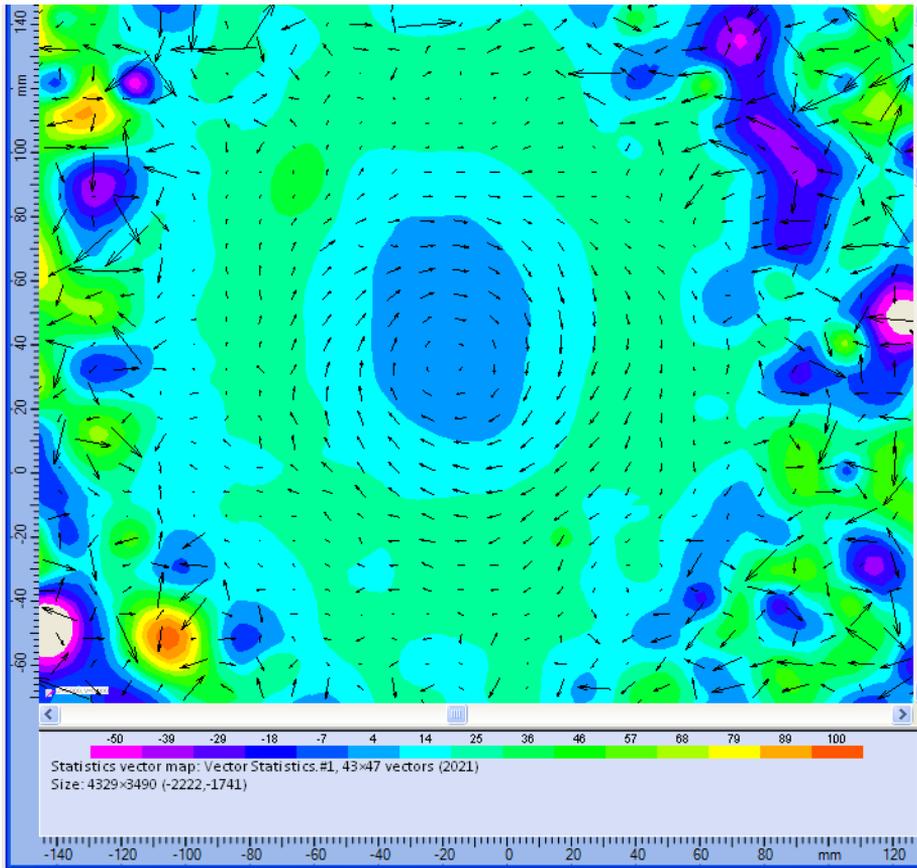
L'area di interrogazione è l'area all'interno della quale si applica l'algoritmo di cross-correlazione al fine di determinare i vettori di spostamento locale delle particelle traccianti.

Variare la sua estensione permette di modificare la risoluzione delle immagini; è chiaro che, se si utilizzano IA di dimensioni minori, l'immagine risultante avrà un numero di vettori maggiore rispetto ad una con IA più grande.

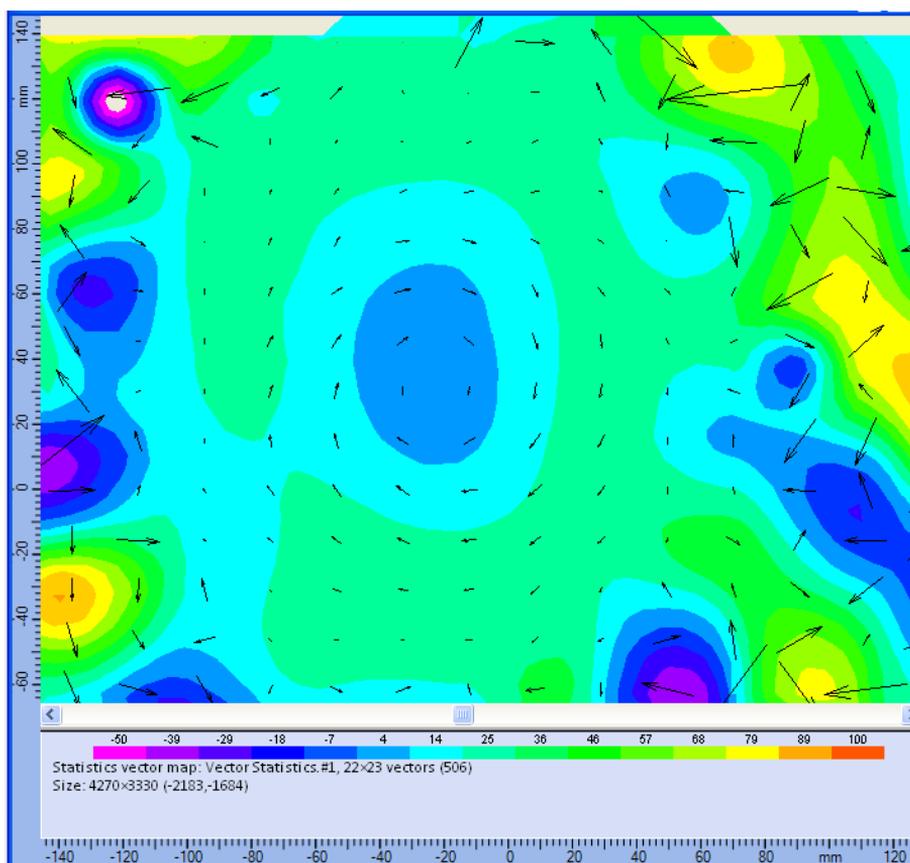
Di seguito si riportano i risultati ottenuti variando l'estensione delle IA per il caso con flusso *swirlato* a  $v = 50$  m/s,  $TbP = 15$   $\mu$ s, apertura diaframma f/1.8 e numero di getti attivi pari a 12.



**Fig. A4** Campo di moto con IA pari a 16x16 pixel.



**Fig. A5** Campo di moto con IA pari a 32x32 pixel.



**Fig. A6** Campo di moto con IA pari a 64x64 pixel.

Dal confronto delle Figg. A4, A5, A6 è evidente l'aumento di risoluzione al diminuire dell'estensione delle aree di interrogazione; ciò permette la visualizzazione di strutture vorticosi, difficilmente identificabili da un'analisi con IA di dimensioni maggiori.

Per quanto riguarda i valori della componente  $w$ , invece, non si notano rilevanti variazioni qualitative.

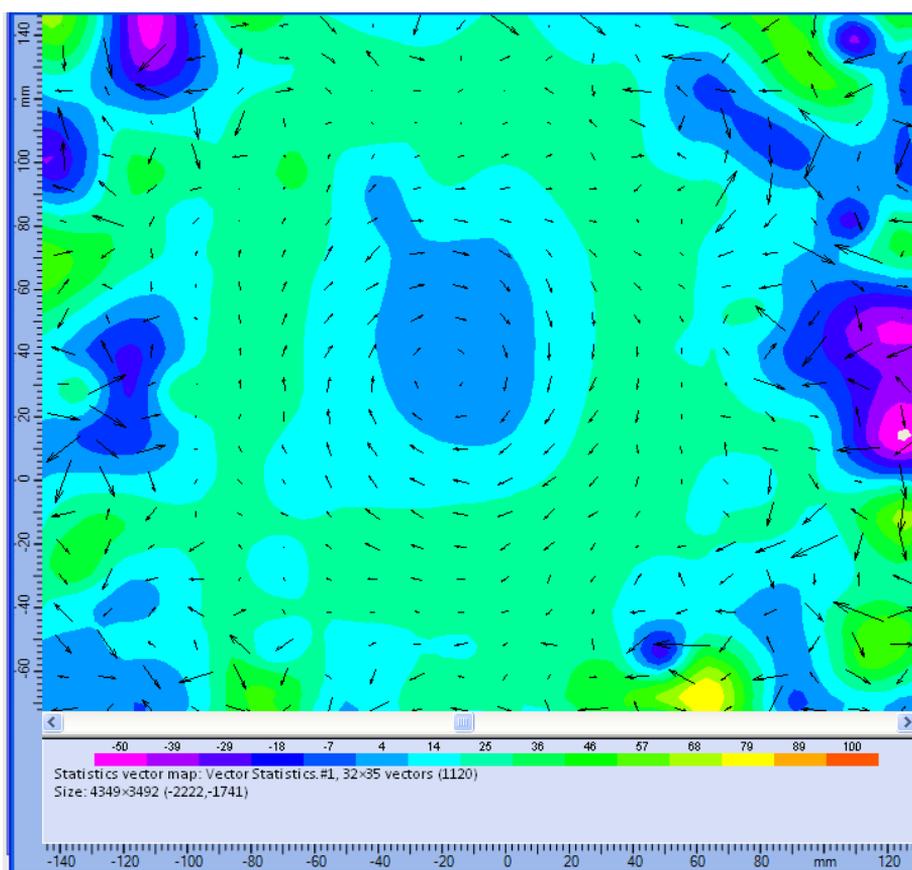
- **Variazione della sovrapposizione delle finestre**

La sovrapposizione delle finestre serve per ridurre gli errori che il software introduce a seguito dell'utilizzo delle *Fast Fourier Transformation* (FFT); grazie a tale tecnica, le informazioni che non

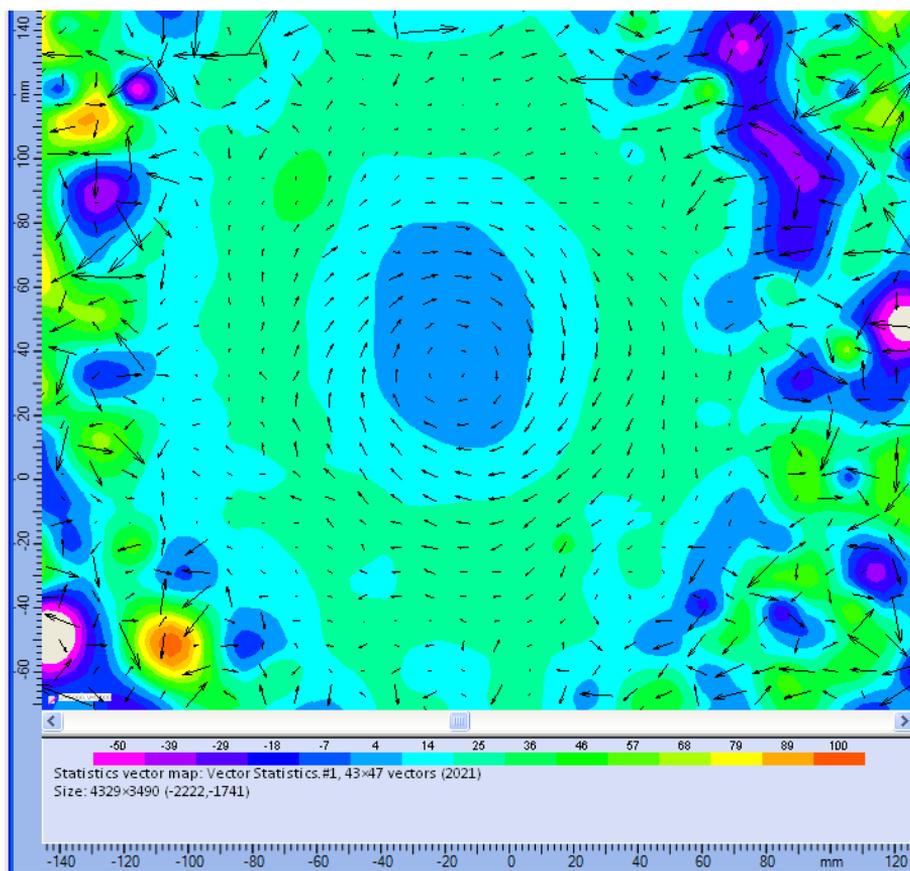
sono utilizzate in una area di interrogazione vengono utilizzate in un'altra area che parzialmente si sovrappone alla prima.

A parità di estensione delle IA, all'aumentare della percentuale di sovrapposizione delle finestre aumenta anche la risoluzione dell'immagine.

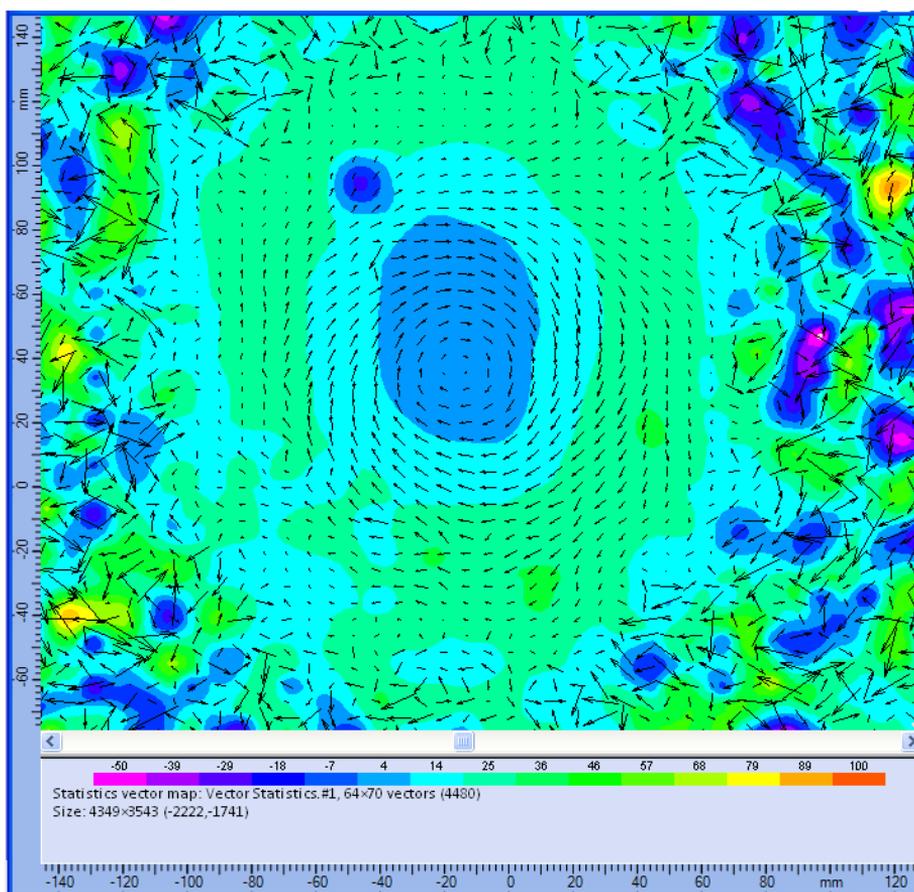
Di seguito si riportano i risultati ottenuti variando la percentuale di sovrapposizione delle finestre, con IA pari a 32x32, per il caso con flusso *swirlato* a  $v = 50$  m/s,  $TbP = 15$   $\mu$ s, apertura diaframma f/1.8 e numero di getti attivi pari a 12.



**Fig. A7** Campo di moto con overlap pari a 0%.



**Fig. A8** Campo di moto con overlap pari a 25%.



**Fig. A9** Campo di moto con overlap pari a 50%.

Dal confronto delle Figg. A7, A8, A9 si apprezza l'aumento di risoluzione all'aumentare della percentuale di sovrapposizione delle finestre.

L'immagine con sovrapposizione al 50% presenta un numero di vettori doppio rispetto a quello con sovrapposizione 0%; questo permette di visualizzare in maniera più efficiente la struttura vorticoso generata dal componente vortice. La sovrapposizione al 50% rischia però di falsare i risultati rispetto al campo di moto reale, si sceglie quindi di utilizzare una sovrapposizione del 25% che consente di ottenere una buona restituzione grafica conservando la veridicità del dato acquisito.



# Bibliografia

- [1] Adrian, R.J., "*Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics*", Ann. Rev. Fluid Mech., vol. 23, p.261, 1991
- [2] Echols W.H., Young J.A., "*Studies of portable air-operated aerosol generators*", Naval Research Laboratory, 1963
- [3] Fan W., Weng W., Liao G., "*An improved cross-correlation method for (digital) particle image velocimetry*", Acta Mechanica Sinica, 2001
- [4] Goodman J.W., "*Introduction to Fourier optics*", Roberts & Company Publishers, 2004
- [5] Grant I., "*Particle image velocimetry: a review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*", Journal of Mechanical Engineering Science, vol.211, p.55, 1997
- [6] Hecht E., Zajac A., "*Optics*", Addison-Wesley Pub. Company, 2001
- [7] Hunter W.W., Nichols C.E., "*Wind tunnel seeding systems for laser velocimeters*", NASA Langley Research Center, 1985

- [8] Jahanmiri M., "*Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications*", Division of Fluid Dynamics, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, 2011
- [9] Melling A., "*Tracer particles and seeding for particle image Velocimetry*", Meas. Sci. Tech., vol. 8, p.1406, 1997
- [10] Prasad A. K., Jensen K., "*Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows*", Appl. Optics 34, 1995
- [11] Raffael M., Willert C., Kompenhans J., "*Particle Image Velocimetry*", Ed. Springer, 1998
- [12] Scarano F., Riethmuller M. L., "*Iterative multigrid approach in PIV image Processing*", Exp. Fluids 26, 1999
- [13] Soloff S. M., Adrian R. J., Liu Z.C., "*Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry*", Meas. Sci. Technol. 8, p.1441, 1997
- [14] Van de Hulst H. C., "*Light scattering by small particles*", John Wiley & Sons, Inc., 1957
- [15] Van Oord J., "*The design of a stereoscopic DPIV system*", MEAH Report 161, 1997

- [16] Vassiliev V., Irmisch S., Samer A.W., 2010, Granovskij A., *“Impact of the inflow conditions on the heavy-duty gas turbine exhaust diffusers performance”*, ASME Paper GT2010 - 22840
- [17] Vassiliev V., Rothbrust M., Irmisch S., 2008, *“Refitting of exhaust diffuser of industrial gas turbine”*, ASME Paper GT2008 - 50165
- [18] Willert C., *“Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows”*, Meas. Sci. Technol. 8, p.1465, 1997

