

MISURA DEL MOTO D'ARIA A VALLE DELLA VALVOLA D'ASPIRAZIONE DI UN MOTORE DIESEL I.D. MEDIANTE VELOCIMETRIA LASER

M.AURIEMMA, F.E.CORCIONE, U. DI MARTINO, G.VALENTINO

ISTITUTO MOTORI

Sommario

Nel presente lavoro si è studiata la struttura del moto d'aria all'aspirazione di un motore Diesel iniezione diretta mediante la *velocimetria laser per immagini (PIV)* e l'*anemometria laser Doppler (LDA)*.

Le prove sperimentali sono state effettuate in un piano verticale a valle della valvola di aspirazione, in condizioni di flusso all'aspirazione *stazionario*, ovvero con valvola d'aspirazione statica, per una portata volumetrica all'aspirazione di $40\text{m}^3/\text{h}$ corrispondente a quella elaborata dal motore reale per una velocità di rotazione di $3000\text{giri}/\text{min}$, due posizioni di alzata valvola ($h_v=4.25\text{mm}$ e $h_v=8.50\text{mm}$), ed *instazionario*, ovvero con valvola d'aspirazione in condizioni dinamiche, in corrispondenza di una portata volumetrica d'aria all'aspirazione di $40\text{m}^3/\text{h}$ e tre diverse alzate valvola ($h_v=4.25\text{mm}$ valvola in apertura, $h_v=8.50\text{mm}$, ed $h_v=4.25\text{mm}$ valvola in chiusura).

I risultati della metodologia PIV sono stati convalidati attraverso la misura del vettore velocità media utilizzando l'*Anemometria Laser Doppler*. Le misure LDA sono state effettuate nello stesso piano scelto per le riprese PIV, spostando il punto di misura su di una opportuna griglia, posizionata all'interno del campo di vista, in condizioni di flusso all'aspirazione stazionario ed instazionario. Con valvola d'aspirazione statica, si è utilizzata una portata d'aria all'aspirazione di $40\text{m}^3/\text{h}$, ed un'apertura della valvola pari alla sua alzata massima, $h_v=8.50\text{mm}$. Con valvola d'aspirazione in condizioni dinamiche, si sono effettuate una serie di rilievi per una finestra angolare di circa 100° di angolo di rotazione dell'albero a camme, corrispondenti alla legge d'alzata valvola. Si è misurato, in ciascun punto della griglia di misura, l'andamento, in funzione dell'apertura della valvola, delle componenti orizzontale e verticale della velocità. A partire dalle componenti si è ricavato, poi, l'andamento, in funzione dell'apertura della valvola, del modulo della velocità media d'insieme ed, infine, la distribuzione vettoriale della velocità media per un'alzata valvola $h_v=8.50\text{mm}$.

Introduzione

Lo studio della fluidodinamica interna dei motori rappresenta una chiave di lettura fondamentale per l'analisi dei parametri caratteristici che controllano il processo di combustione e, quindi, i meccanismi di formazione delle specie inquinanti [1]. Lo sviluppo di tecniche diagnostiche non intrusive ha consentito il raggiungimento di un miglior grado di conoscenza dei parametri fluidodinamici, del loro influsso sull'efficienza della combustione, e della loro dipendenza dai parametri costruttivi del motore. Ciò ha evidenziato la necessità di controllare il moto medio dell'aria e l'intensità di turbolenza, progettando soluzioni motoristiche (configurazione dei condotti d'aspirazione e disegno della camera di combustione), atte ad ottimizzare il processo di combustione.

L'importanza di controllare il moto d'aria all'interno della camera di combustione e di avere una maggiore comprensione dei fenomeni fisico-chimici, associati all'interazione aria-combustibile, ha spinto i Ricercatori del settore e le industrie automobilistiche verso la messa a punto di metodi diagnostici sempre più sofisticati. In particolare sono state sviluppate sia tecniche di misura del campo di moto dell'aria all'interno del cilindro motore, che implementati metodi numerici che consentissero di descrivere in dettaglio fenomenologie anche molto complesse. Tali codici richiedono l'assegnazione delle condizioni iniziali ed un'attenta calibrazione di alcune costanti semi-empiriche, che possono essere effettuate, utilizzando i dati sperimentali fino ad ora ottenuti, mediante l'utilizzo di tecniche *single point* (LDA). Al fine di garantire una

sempre maggiore attendibilità dei risultati, sono stati introdotti nei codici di calcolo, modelli che tengono conto anche del flusso d'aria all'aspirazione, comportando un notevole incremento del numero di condizioni iniziali necessarie, che possono essere ottenute solo tramite l'utilizzo di tecniche diagnostiche *multi-point*, come la *velocimetria laser per immagini (PIV)*. La PIV, infatti, è in grado di fornire, in una sola misura, una caratterizzazione completa del campo bidimensionale di velocità istantanea in un assegnato piano, il che consente di tenere conto delle condizioni di anisotropia, tipiche dei motori alternativi a combustione interna.

La PIV è una tecnica di visualizzazione quantitativa, e si basa sul principio di illuminare l'area di fluido che si vuole investigare, mediante una lamina di luce generata da un laser pulsato. La luce riflessa da particelle micrometriche, aggiunte al fluido, è registrata su di un elemento sensibile. Dall'analisi di quest'ultimo, si ottiene la velocità istantanea del fluido, come rapporto tra lo spostamento medio subito dalle particelle, nella regione di interrogazione, e l'intervallo temporale tra due impulsi luminosi consecutivi [2,3,4].

Il presente lavoro è finalizzato a fornire ulteriori informazioni sulla struttura del moto d'aria all'aspirazione in un motore alternativo a combustione interna, utilizzato per la trazione leggera, mediante la *velocimetria laser per immagini (PIV)* e l'*anemometria laser Doppler (LDA)*.

Apparato Sperimentale PIV e LDA

Gli esperimenti sono stati condotti utilizzando la testa di un motore diesel iniezione diretta 4 cilindri, 2 valvole per cilindro, avente cilindrata totale di 1930cm³, montata su di un banco a flusso stazionario per simulare la portata volumetrica reale all'aspirazione per diverse velocità di rotazione del motore.

La testa motore è stata posizionata su di un cilindro di plexiglas dotato di opportuni accessi ottici, ed il condotto di aspirazione è stato collegato ad una soffiante a lobi, trascinata da un motore elettrico controllato in giri, idonea a coprire le portate reali del motore per diverse velocità di rotazione.

Si è utilizzato, inoltre, un gruppo motorizzatore elettrico per la movimentazione della valvola.

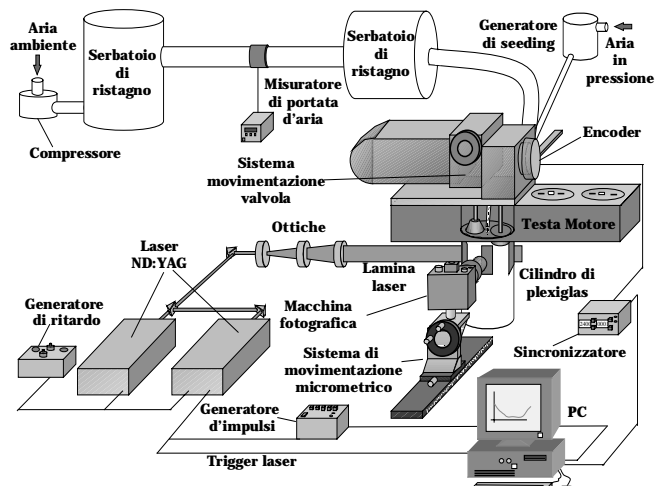


Figura 1. Schema dell'apparato sperimentale usato per la registrazione delle immagini fotografiche.

L'apparato sperimentale PIV può considerarsi diviso in due parti:

1. Il sistema di registrazione delle immagini, riportato in figura 1, composto da:
 - laser a doppio impulso Nd-Yag utilizzato per illuminare la sezione di cui si vuole conoscere le caratteristiche del moto;
 - personal computer, corredato di una scheda I/O per l'acquisizione dei dati, per il controllo esterno del laser e della velocità dell'albero a camme;
 - macchina fotografica 35mm Nikon, modello F5, dotata di un obiettivo Micro-Nikkor 105mm f/2.8, posizionata a 90° rispetto al piano di illuminazione.
2. Il sistema ottico di interrogazione dell'immagine fotografica, formato da:
 - un laser He-Ne, che ha il compito di illuminare i punti di interrogazione sul fotogramma;
 - un sistema ottico di filtri e lenti;
 - una videocamera CCD utilizzata per acquisire i dati che vanno poi trasferiti ad un PC mediante un *frame grabber* per le successive analisi di ricerca dei picchi di correlazione e convalida dei dati.

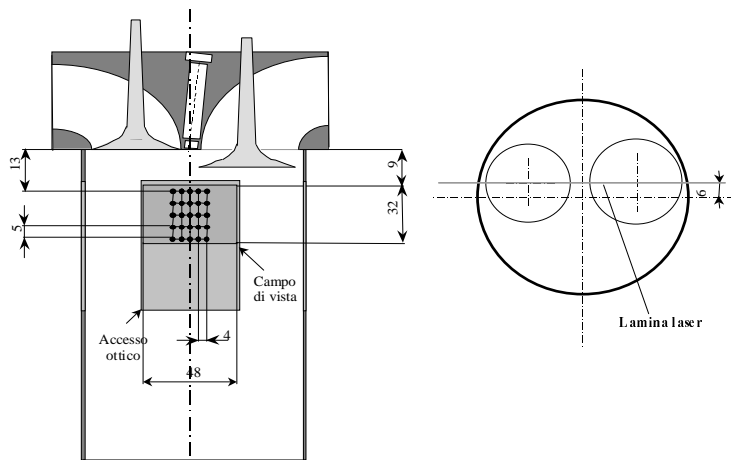


Figura 2. Piano di misura e campo di vista scelti per le misure PIV ed LDA.

L'apparato sperimentale LDA è composto da un laser a ioni di Argon della potenza massima di 4W, collegato, mediante una fibra ottica, ad un sistema di ottiche modulari, due fotomoltiplicatori e due analizzatori di spettro [5,6].

I test sperimentali sono stati condotti utilizzando, come mezzo di scattering, particelle di biossido di titanio (TiO_2), aggiunte nel condotto d'aspirazione utilizzando un ciclone in pressione. Tale scelta è stata motivata dal fatto che il biossido di titanio possiede un elevato indice di rifrazione (2.9). Inoltre, le particelle

di TiO_2 hanno un diametro medio inferiore ad $1\mu m$ e, perciò, sono idonee a seguire fedelmente il flusso d'aria, senza significativi effetti di rallentamento dovuti all'inerzia o ad effetti aerodinamici.

Condizioni di prova

I test sperimentali, per entrambe le tecniche, sono stati effettuati in condizioni di flusso all'aspirazione stazionario, ovvero con valvola d'aspirazione statica, ed instazionario, ovvero con valvola d'aspirazione dinamica, in un piano verticale parallelo all'asse del cilindro motore, passante per l'asse della valvola d'aspirazione.

Per le riprese PIV si è utilizzato un ingrandimento $M=1/1.35$, cui corrisponde un campo di vista di $48 \times 32 mm^2$. Tale valore è stato scelto in quanto è il massimo ingrandimento possibile, compatibilmente con la dimensione dell'accesso ottico disponibile.

Le misure LDA sono state effettuate scegliendo 25 punti disposti su di una griglia a maglia regolare posizionata, all'interno del campo di vista, nello stesso piano scelto per le acquisizioni dei dati PIV, ad una distanza dalla testa motore di 13mm.

Portata volumetrica (m^3/h)	Alzata valvola (mm)
40	4.25
	8.50

Tabella 1. Matrice delle misure in regime di flusso stazionario.

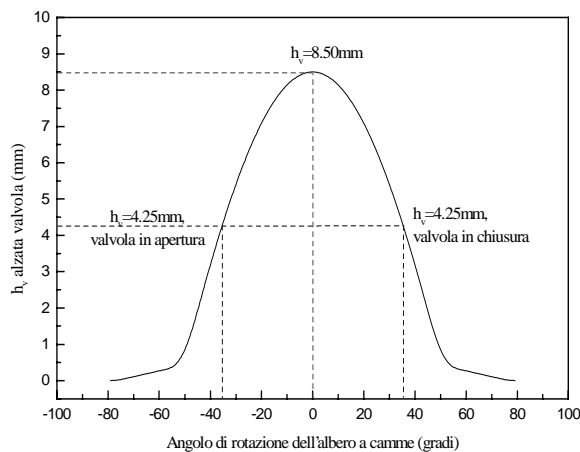


Figura 3. Punti di misura in condizioni di flusso instazionario all'aspirazione.

In figura 2 si riporta una rappresentazione schematica del piano di misura, del campo di vista utilizzato per le riprese PIV e della griglia dei dati LDA.

Si è utilizzata una portata volumetrica all'aspirazione di $40 m^3/h$ corrispondente a quella elaborata dal motore reale per una velocità di rotazione di 3000giri/min.

In regime di flusso stazionario, ossia con valvola statica, sono stati condotti test sperimentali per due diverse posizioni di alzata valvola e, precisamente, per $h_v=4.25 mm$ ed $h_v=8.50 mm$, che corrispondono rispettivamente all'apertura media e massima della valvola di aspirazione. La matrice delle misure effettuate, in regime di flusso stazionario, è riportata in tabella 1.

In regime di flusso instazionario, ossia con valvola in movimento, sono state effettuate misure PIV con una velocità di rotazione dell'albero a camme, pari a 1500giri/min, corrispondenti a 3000giri/min dell'albero motore, con la portata d'aria all'aspirazione summenzionata, $40 m^3/h$, per tre diverse posizioni d'alzata valvola, così come riportato in figura 3:

- $h_v=8.50\text{mm}$, in corrispondenza dell'alzata massima della valvola;
- $h_v=4.25\text{mm}$, in corrispondenza dell'alzata media, con la valvola d'aspirazione in apertura;
- $h_v=4.25\text{mm}$, in corrispondenza dell'alzata media, con valvola d'aspirazione in chiusura.

In tabella 2 si riporta la matrice delle misure effettuate in condizioni di flusso all'aspirazione instazionario.

Velocità di rotazione dell'albero a camme (giri/min)	Portata volumetrica (m^3/h)	Alzata valvola (mm)	
		Apertura	Chiusura
1500	40	4.25	8.50
		8.50	

Tabella 2. Matrice delle misure in regime di flusso instazionario.

Per i punti LDA, invece, sono state effettuate misure per una finestra angolare di circa 100° di angolo di rotazione dell'albero a camme, corrispondenti alla legge d'alzata valvola.

Risultati PIV ed LDA

Misure PIV: flusso stazionario - Nelle figure seguenti si riportano le distribuzioni bidimensionali del campo di velocità istantanea, valutate in un piano parallelo all'asse del cilindro, passante per l'asse della valvola di aspirazione secondo le condizioni riportate in tabella 1. Nei grafici vettoriali, la lunghezza e la direzione di ciascun vettore corrispondono, rispettivamente, al modulo ed alla direzione del vettore velocità istantanea.

In figura 4 si riporta la distribuzione del campo di velocità bidimensionale istantanea, per una portata d'aria all'aspirazione di $40\text{m}^3/\text{h}$ ed un'alzata valvola $h_v=8.50\text{mm}$. Dall'analisi di tale figura si può notare come il flusso d'aria, nella zona in esame, sia caratterizzato da un moto di ricircolo con direzione media verso l'alto. Ciò è plausibile se si tiene conto del fatto che il flusso d'aria, uscente ad elevata velocità dalla zona anulare intorno alla valvola di aspirazione, incide sulla parete del cilindro e ritorna verso l'asse dello stesso, nella zona sottostante la valvola di aspirazione (zona in esame), dando luogo a vortici di larga scala con asse normale a quello del cilindro: moto di *tumble*.

Il moto complessivo, visibile in figura, risulta fortemente orientato verso la valvola d'aspirazione, ed è possibile notare, nella parte inferiore, un moto di piccola scala, con formazione di un vortice antiorario. Inoltre il flusso, nella zona in esame, presenta una velocità massima $V_{\max}=6.00\text{m/s}$ ed una velocità media $V_{\text{mean}}=3.25\text{m/s}$.

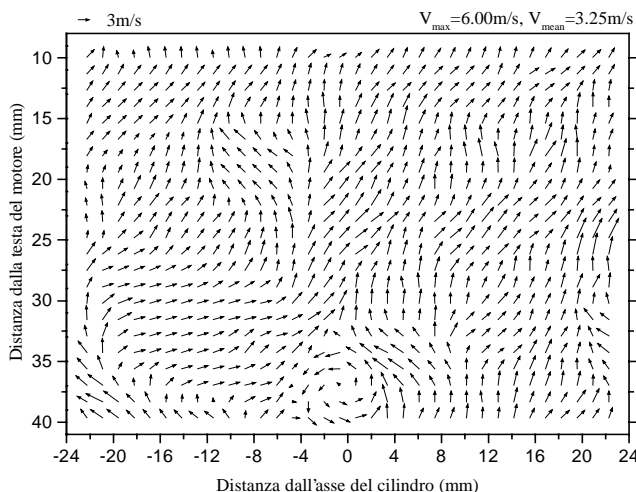


Figura 4. Distribuzione della velocità istantanea in condizioni di flusso all'aspirazione stazionario, per un'alzata valvola $h_v=8.50\text{mm}$ ed una portata d'aria di $40\text{m}^3/\text{h}$.

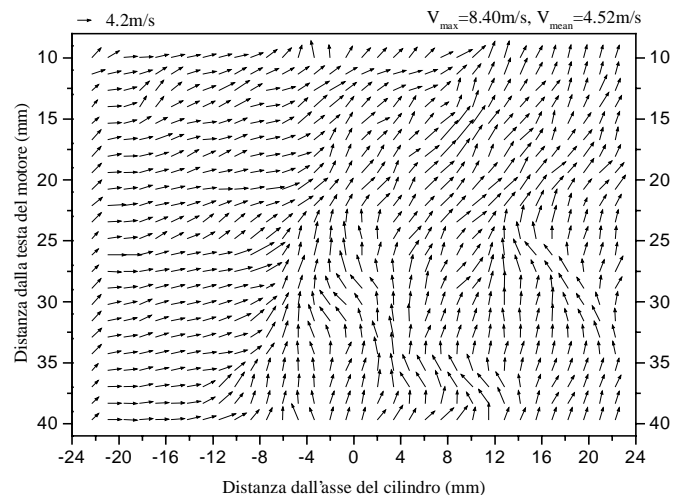


Figura 5. Distribuzione della velocità istantanea in condizioni di flusso all'aspirazione stazionario, per un'alzata valvola $h_v=4.25\text{mm}$ ed una portata d'aria di $40\text{m}^3/\text{h}$.

In figura 5 si riportano i risultati ottenuti in corrispondenza della stessa portata d'aria, ma per un'alzata valvola pari a $h_v=4.25\text{mm}$. Analogamente a quanto visto per la condizione precedente ($h_v=8.50\text{mm}$), il moto risulta orientato mediamente verso l'alto, in direzione della valvola d'aspirazione, presentando una struttura piuttosto disordinata. In queste condizioni si ha una velocità massima $V_{\max}=8.40\text{m/s}$ ed una velocità media $V_{\text{mean}}=4.52\text{m/s}$.

Da un confronto tra le due distribuzioni precedenti si può notare che la velocità media nel caso di massima alzata della valvola di aspirazione è minore. Ciò a conferma del fatto che, nel caso di massima alzata, la dimensione della sezione anulare di ingresso dell'aria nel cilindro motore aumenta, per cui la velocità media del getto d'aria, a pari portata volumetrica all'aspirazione, decresce. Un'ulteriore riduzione della velocità media, nella zona esaminata, è dovuta al fatto che lo spessore del getto d'aria in ingresso al motore aumenta, di conseguenza anche la sua interazione con l'aria ambiente ed il conseguente effetto di rallentamento sono maggiori.

Misure PIV: flusso instazionario - Per poter meglio simulare le reali condizioni di funzionamento all'aspirazione di un motore alternativo a combustione interna, ed avere dunque delle informazioni più realistiche sul campo di moto all'aspirazione, si sono effettuate delle misure

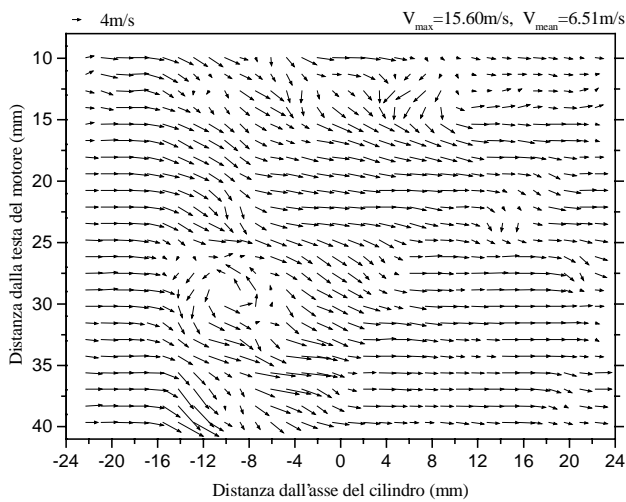


Figura 6. Distribuzione della velocità istantanea in condizioni di flusso all'aspirazione instazionario, per $h_v=4.25\text{mm}$ valvola in apertura, una portata di $40\text{m}^3/\text{h}$ ed una velocità di rotazione dell'albero a camme di $1500\text{giri}/\text{min}$.

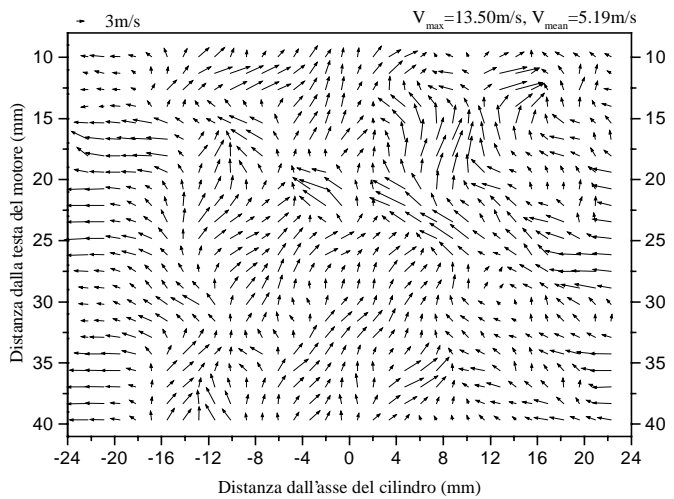


Figura 7. Distribuzione della velocità istantanea in condizioni di flusso all'aspirazione instazionario, per un'alzata valvola $h_v=8.50\text{mm}$, una portata d'aria di $40\text{m}^3/\text{h}$ ed una velocità di dell'albero a camme di $1500\text{giri}/\text{min}$.

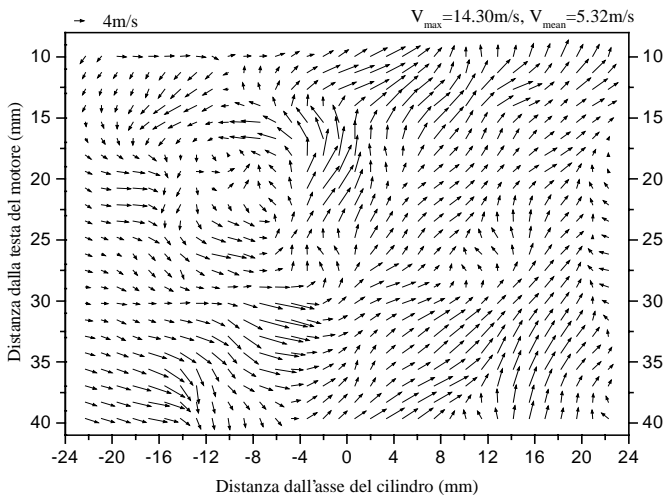


Figura 8. Distribuzione della velocità istantanea in condizioni di flusso all'aspirazione instazionario, per $h_v=4.25\text{mm}$ valvola in chiusura, una portata di $40\text{m}^3/\text{h}$ ed una velocità di rotazione dell'albero a camme di $1500\text{giri}/\text{min}$.

in condizioni di flusso instazionario, ossia con valvola in movimento, secondo le condizioni riportate in tabella 2. Si sono utilizzati, per le riprese, una velocità di rotazione dell'albero a camme di $1500\text{giri}/\text{min}$, una portata volumetrica d'aria all'aspirazione di $40\text{m}^3/\text{h}$ e tre diverse alzate valvola $h_v=4.25\text{mm}$ con valvola in apertura, $h_v=8.50\text{mm}$, ed $h_v=4.25\text{mm}$ con valvola in chiusura.

A causa dei limiti di velocità di ripresa della macchina fotografica, le misure PIV, per queste distribuzioni di velocità, sono state fatte in corrispondenza di differenti cicli di moto della valvola.

In figura 6 si riporta la distribuzione di velocità istantanea relativa ad una velocità di rotazione dell'albero a camme di $1500\text{giri}/\text{min}$ e ad una portata volumetrica all'aspirazione di $40\text{m}^3/\text{h}$. La valvola d'aspirazione si trova in condizioni di media alzata ($h_v=4.25\text{mm}$), in fase

di apertura. Si può notare che il flusso fuoriuscente dalla valvola penetra verso il centro della figura, dove interagisce con l'aria ambiente, formando un moto di ricircolo ruotante in senso antiorario. A seguito di tale interazione, la velocità del flusso, così come precedentemente detto nel caso di valvola statica, diminuisce notevolmente nella zona di misura, presentando, sull'intero campo di vista, una velocità massima $V_{max}=15.60\text{m/s}$ ed una velocità media $V_{mean}=6.51\text{m/s}$.

In figura 7 si riporta il campo di moto relativo alle stesse condizioni della figura 6 (3000giri/min, $40\text{m}^3/\text{h}$), in corrispondenza dell'alzata massima della valvola d'aspirazione ($h_v=8.50\text{mm}$). La struttura del campo di moto risulta essere, nel complesso, più disordinata di quella relativa alla figura precedente, soprattutto nella zona immediatamente al di sotto della valvola, che, in tale condizione, si trova molto più vicina alla zona di misura; ciò è probabilmente dovuto alla maggiore interazione del flusso, entrante attraverso la valvola, con l'aria ambiente. Le velocità media e massima rilevate, risultano essere rispettivamente di $V_{mean}=5.19\text{m/s}$ e $V_{max}=13.50\text{m/s}$, più basse di quelle del caso precedente. Per questo motivo, lo scambio di quantità di moto avviene con scale caratteristiche maggiori, caratterizzate da una maggiore struttura turbolenta all'interno del campo di vista.

In figura 8 si riporta la distribuzione di velocità istantanea relativa alle stesse condizioni delle figure precedenti (3000giri/min, $40\text{m}^3/\text{h}$). La valvola d'aspirazione, in questo caso, si trova in condizioni di alzata media ($h_v=4.25\text{mm}$), ma in fase di chiusura. La struttura del campo di moto mostra un'evidente differenza rispetto a quella riscontrata nella figura 6, dove la valvola d'aspirazione è in fase d'apertura, benché l'alzata sia la stessa. Infatti, a causa del rapido moto di risalita della valvola sono presenti:

- sul lato sinistro del campo di vista, l'effetto di deviazione verso il basso del getto d'aria, nell'istante in cui abbandona la valvola di aspirazione, che porta alla formazione di un moto vorticoso di larga scala con asse ortogonale a quello del cilindro;
- sul lato destro, invece, un notevole effetto di trascinamento esercitato dalla valvola stessa sull'aria ambiente, evidenziato da un orientamento prevalente del campo di moto verso l'asse della valvola.

In questo caso si ha una velocità media $V_{mean}=5.32\text{m/s}$ ed una massima $V_{max}=14.30\text{m/s}$.

Se si considerano distribuzioni di velocità istantanee relative a stesse condizioni di misura (alzata valvola, portata e velocità di rotazione dell'albero motore), si può rilevare che esistono delle differenze significative sulla struttura del flusso. Tali differenze sono dovute alla variazione ciclica dei campi di moto istantanei. Si possono ottenere informazioni sulla variazione ciclica, che interessa le distribuzioni istantanee di velocità, effettuando una *media di insieme* su diverse realizzazioni fotografiche ottenute nelle medesime condizioni.

Misure LDA: flusso stazionario - I dati PIV sono stati confrontati, al fine di poterne valutare l'attendibilità, con misure del vettore velocità media, effettuate utilizzando la velocimetria laser Doppler (LDA), tecnica ormai consolidata, di notevole precisione ed affidabilità.

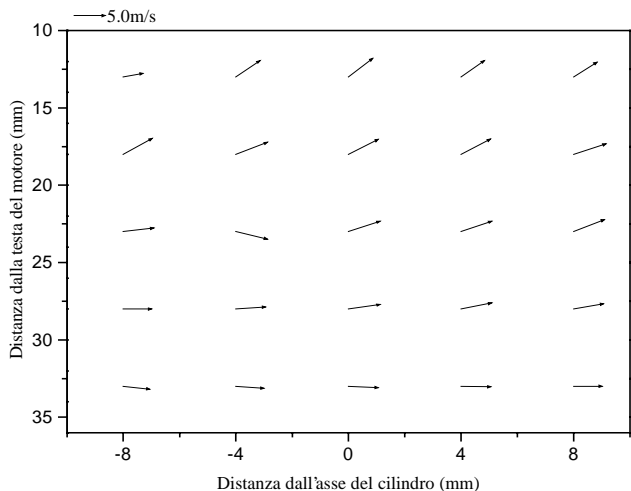


Figura 9. Distribuzione della velocità media, ottenuta con misure LDA, in condizioni di flusso all'aspirazione stazionario, per un'alzata valvola $h_v=8.50\text{mm}$ ed una portata d'aria di $40\text{m}^3/\text{h}$.

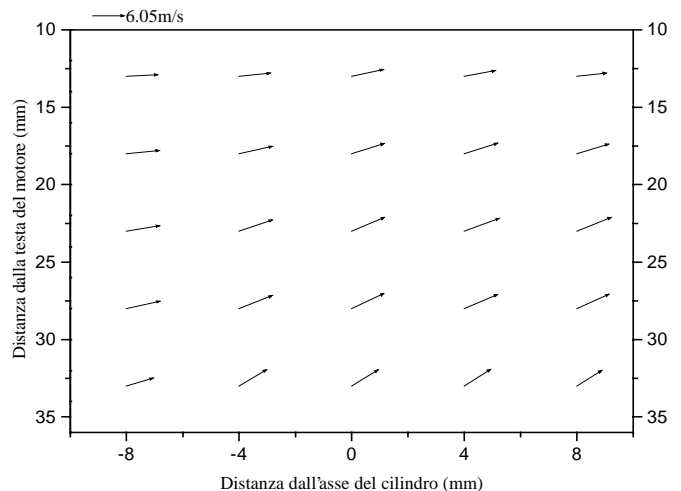


Figura 10. Distribuzione della velocità media, ottenuta con misure PIV, in condizioni di flusso all'aspirazione stazionario, per un'alzata valvola $h_v=8.50\text{mm}$ ed una portata d'aria di $40\text{m}^3/\text{h}$.

I rilievi sono stati fatti nello stesso piano scelto per le riprese PIV, ossia nel piano parallelo all'asse del cilindro passante per l'asse della valvola di aspirazione. In regime di flusso stazionario, ossia con valvola statica, sono stati condotti test sperimentali per una portata d'aria all'aspirazione di $40\text{m}^3/\text{h}$, e per una apertura della valvola pari alla sua alzata massima, $h_v=8.50\text{mm}$, i cui risultati sono riportati in figura 9.

In figura 10 si riporta, per confronto, il corrispondente diagramma delle misure PIV, estrapolato, nei punti di interesse, dalla distribuzione vettoriale media d'insieme.

L'analisi dei dati su riportati evidenzia che le due tecniche forniscono dei risultati simili per quanto riguarda la struttura generale del flusso.

Si hanno, invece, differenze percentuali medie sul modulo del 20%, con valori massimi del 40%. Bisogna tenere conto, però, del fatto che il moto d'aria all'aspirazione di un motore alternativo a combustione interna è caratterizzato da un'elevata turbolenza e risente fortemente delle variazioni cicliche. Per flussi turbolenti, l'effetto delle componenti fluttuanti, dovute alla variazione ciclica ed alla turbolenza, produce una variazione della velocità istantanea del fluido che, in alcuni casi, può superare il 50% del valore del moto medio. I dati LDA sono stati ricavati, al fine di ottenere una buona attendibilità statistica, mediando i valori di velocità istantanea su 5000 misure effettuate in ogni punto. I dati PIV, invece, si riferiscono ad una media d'insieme del campo istantaneo di velocità, eseguita su 20 riprese, per cui il confronto fornisce solo una conferma per la scelta del verso e per l'attendibilità dei valori PIV.

In definitiva si può affermare che, in condizioni di flusso stazionario, i risultati ottenuti con la metodologia PIV sono affidabili, e possono fornire un valido contributo per la caratterizzazione della struttura del moto d'aria nei motori alternativi a combustione interna.

Misure LDA: flusso instazionario - In regime di flusso instazionario, si sono effettuate una serie di rilievi per una finestra angolare di circa 100° di angolo di rotazione dell'albero a camme, corrispondenti alla legge d'alzata valvola. Si è utilizzato un valore di velocità di rotazione dell'albero a camme, pari a $1500\text{giri}/\text{min}$, ed una portata volumetrica d'aria all'aspirazione di $40\text{m}^3/\text{h}$ su di una griglia di 12 punti. Si è misurato, in ciascun punto, l'andamento, in funzione dell'apertura della valvola, delle componenti orizzontale e verticale della velocità, mediate su circa 350 cicli della valvola di aspirazione. A partire dalle componenti si è ricavato, poi, l'andamento, in funzione dell'apertura della valvola, del modulo della velocità media d'insieme.

Si riportano, nelle figure 11 e 12, gli andamenti delle componenti orizzontali e verticali della velocità media, in funzione dell'apertura della valvola di aspirazione, in tali diagrammi si è assegnato alla componente verticale della velocità media valore positivo se diretta verso il basso, mentre alla componente orizzontale della velocità media valore positivo se diretta verso destra. In figura 13 si riporta l'andamento del modulo della velocità media in funzione dell'apertura della valvola d'aspirazione. In figura 14 si riporta, infine, la distribuzione vettoriale della velocità media per un'alzata valvola $h_v=8.50\text{mm}$. Tale diagramma è stato ricavato estrapolando, per ciascun punto della griglia, dalle distribuzioni delle componenti orizzontali e verticali del vettore velocità media, il valore di modulo e fase in corrispondenza dell'alzata massima della valvola d'aspirazione.

L'andamento della componente orizzontale della velocità media mostra una repentina inversione di segno, per i punti 1 e 2, i più vicini alla testa motore, quando la valvola d'aspirazione si trova a circa 6mm d'apertura, prima dell'alzata massima. Per tali punti la componente verticale risulta essere diretta verso il basso e subire un incremento notevole, soprattutto per il punto 1, quando la valvola d'aspirazione si trova, prima dell'alzata massima, tra i 6mm e gli 8mm d'apertura. Ciò porta a concludere che il punto 1 è investito direttamente dal flusso d'aria che, entrante attraverso la valvola, raggiunge una velocità di ben $43\text{m}/\text{s}$ quando la valvola si trova, prima dell'alzata massima, ad un'apertura di circa 7mm , come si può ricavare dalla figura 13. Un valore così elevato di velocità non è presente negli altri punti della griglia, che non risultano, dunque, essere direttamente investiti dal getto fuoriuscente dalla valvola.

L'andamento della componente verticale della velocità media mostra che il vettore velocità è diretto verso il basso, nei punti che si trovano nella regione investita direttamente dal flusso uscente attraverso la valvola, e risulta essere orizzontale o diretto verso l'asse della valvola, nei punti che si trovano proprio sotto la valvola d'aspirazione.

Tale andamento risulta chiaramente visualizzato, in corrispondenza dell'alzata massima, in figura 14. Da questa distribuzione vettoriale risulta evidente che il campo di moto, nella zona in esame, è caratterizzato da un moto di ricircolo con asse ortogonale a quello del cilindro e che i punti, situati al confine dell'area di ingresso del getto, sono quelli maggiormente investiti dal flusso fuoriuscente dalla valvola.

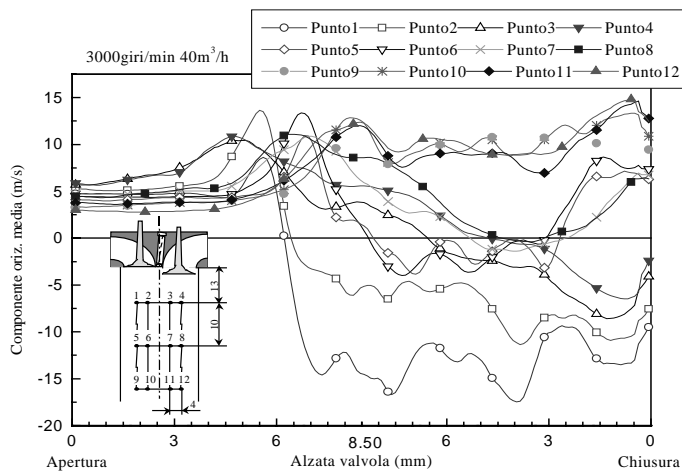


Figura 11. Andamento della componente orizzontale della velocità media, in funzione dell'apertura della valvola d'aspirazione, in corrispondenza di una velocità di rotazione dell'albero a camme di 1500giri/min e di una portata d'aria di 40m³/h.

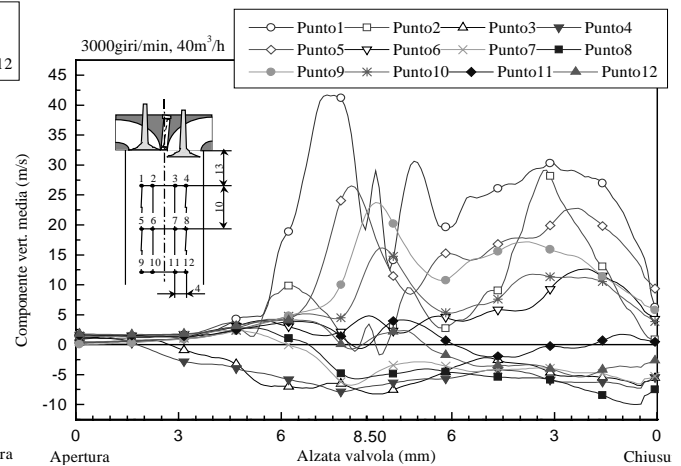


Figura 12. Andamento della componente verticale della velocità media, in funzione dell'apertura della valvola d'aspirazione, in corrispondenza di una velocità di rotazione dell'albero a camme di 1500giri/min e di una portata d'aria di 40m³/h.

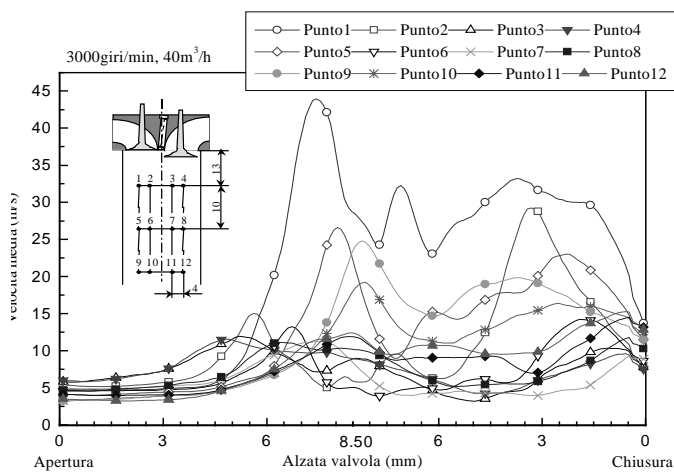


Figura 13. Andamento della modulo della velocità media, in funzione dell'apertura della valvola d'aspirazione, in corrispondenza di una velocità di rotazione dell'albero a camme di 1500giri/min e di una portata d'aria di 40m³/h.

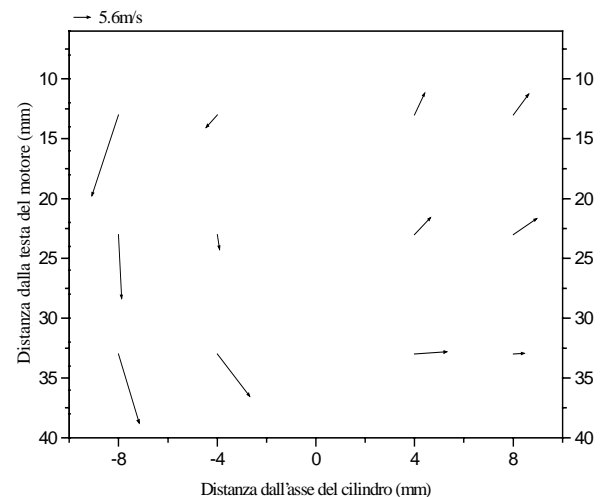


Figura 14. Distribuzione vettoriale della velocità media corrispondente ad una velocità di rotazione dell'albero a camme di 1500giri/min, ad una portata di 40m³/h, per un'alzata valvola h_v=8.50mm.

Nel complesso, le misure LDA, in condizioni di flusso instazionario, forniscono valori di velocità confrontabili con quelli determinati con misure PIV, così come mostrato dagli andamenti dei moduli delle velocità medie (vedi fig. 13).

Anche con valvola in movimento, le misure PIV risultano affidabili, e possono fornire un valido contributo per la caratterizzazione della struttura del moto d'aria nei motori alternativi a combustione interna.

Si tiene a ribadire, infine, che la differenza sui valori di velocità che si è registrata, tra misure PIV e misure LDA, sia in condizioni di flusso all'aspirazione stazionario che instazionario, è da attribuirsi all'effetto della variazione ciclica, che influenza fortemente il moto d'aria all'aspirazione di un motore alternativo a combustione interna, producendo una variazione della velocità istantanea del fluido che, in alcuni casi, può superare il 50% del valore del moto medio.

Conclusioni

- Dalle misure effettuate, sia in condizioni statiche che dinamiche, è emerso che il flusso d'aria, nella zona investigata, è caratterizzato dalla presenza di un moto di ricircolo, mediamente orientato verso l'alto in direzione della valvola d'aspirazione, con formazione di struttura di larga scala, avente asse normale a quello del cilindro (moto di *tumble*).
- In condizioni di flusso all'aspirazione stazionario, da un confronto tra le distribuzioni vettoriali relative a due diversi valori dell'alzata valvola, si può notare che la velocità media nel caso di massima alzata della valvola di aspirazione è minore. Ciò a conferma del fatto che, nel caso di massima alzata, la dimensione della sezione anulare di ingresso dell'aria nel cilindro motore

aumenta, per cui la velocità media del getto d'aria, a pari portata volumetrica all'aspirazione, decresce. In tal caso un'ulteriore riduzione della velocità media, nella zona esaminata, è dovuta al fatto che lo spessore del getto d'aria in ingresso al motore aumenta, di conseguenza anche la sua interazione con l'aria ambiente ed il conseguente effetto di rallentamento sono maggiori.

- In condizioni di flusso all'aspirazione instazionario le distribuzioni bidimensionali di velocità, in corrispondenza della massima alzata ($h_v=8.50\text{mm}$) hanno mostrato una struttura del campo di moto, nella zona immediatamente al di sotto della valvola, più disordinata di quella relativa alle condizioni di alzata media, a causa della maggiore interazione che, in questa condizione, la valvola d'aspirazione stessa ha con l'aria ambiente, trovandosi molto più vicina alla zona di misura.

La struttura del campo di moto, in condizioni di alzata media ($h_v=4.25\text{mm}$) con valvola in fase di chiusura, mostra un'evidente differenza rispetto a quella riscontrata in condizioni di medesima alzata, ma con valvola in fase di apertura. Infatti, a causa del rapido moto di risalita della valvola sono presenti, l'effetto di deviazione verso il basso del getto d'aria, nell'istante in cui abbandona la valvola di aspirazione, che porta alla formazione di un moto vorticoso di larga scala con asse ortogonale a quello del cilindro, ed un notevole effetto di trascinamento esercitato dalla valvola stessa sull'aria ambiente, evidenziato da un orientamento prevalente del campo di moto verso l'asse della valvola.

- L'anemometria laser Doppler ha fornito dei risultati simili a quelli PIV per quanto riguarda la struttura generale del flusso. Si sono avute, invece, differenze percentuali medie sul modulo del 20%, con valori massimi del 40%. Tali differenze sono da imputarsi agli effetti della variazione ciclica e dell'elevata turbolenza che caratterizzano il moto d'aria all'aspirazione di un motore alternativo a combustione interna. I risultati LDA, infatti, sono stati ottenuti, al fine di ottenere una buona attendibilità statistica, mediando i valori di velocità istantanea su 5000 misure effettuate in ogni punto. I dati PIV, invece, si riferiscono ad una media d'insieme del campo istantaneo di velocità, eseguita su 20 riprese, per cui il confronto fornisce un'indispensabile conferma per la scelta del verso e per l'attendibilità dei valori PIV.

In conclusione, è possibile affermare che la *velocimetria laser per immagini* (PIV) si è rivelata un potente strumento d'indagine per la caratterizzazione della struttura del moto d'aria all'aspirazione nei motori alternativi a combustione interna, sia in condizioni statiche che dinamiche. L'impiego di tale tecnica sui motori reali, però, si presenta estremamente complesso, a causa delle dimensioni e della disposizione degli accessi ottici richiesti e della difficoltà di applicazione, ai risultati provenienti dai vari fotogrammi, delle tecniche di riduzione della variazione ciclica.

L'utilizzo del set-up sperimentale, che ha consentito di effettuare le misure in condizioni di flusso instazionario, ossia con valvola in movimento, ha permesso di simulare, con miglior approssimazione rispetto alle condizioni statiche, il flusso all'aspirazione di un M.C.I., grazie alla possibilità di tenere conto dell'effetto del moto alterno della valvola, consentendo, dunque, migliore caratterizzazione del moto d'aria all'aspirazione.

Bibliografia

- [1] Arcumanis, C., Hu, Z., Vafidis, C., Whitelaw, J.H.: Tumbling Motion: A mechanism for Turbulence Enhancement in Spark-ignition Engines, SAE paper 900060, 1990
- [2] Adrian, R. J.: Particle image techniques for experimental fluid mechanics, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1991 23:261-304, 1991
- [3] Lee, J., Valentino, G., Kaufman, D., Farrell, P.V.: Particle Image Velocimetry Methods in an IC Engine, ASME, Experimental and Numerical Flow Visualization, Fed-Vol.172, New Orleans, Louisiana, 1993.
- [4] Valentino, G., Auriemma, M., Corcione, F.E., Di Martino, U.: Investigation of the Air Flow Down-Stream the Intake Valve of an Internal Combustion Engine, "The Millennium 9th International Symposium on Flow Visualization", 22 - 25 Agosto 2000, Edimburgo.
- [5] Valentino, G., Auriemma, M., Corcione, F.E.: LDV Characterization of Mean Motion and Turbulence In A Four-Cylinder Diesel Engine, 2000 ASME Fluids Engineering Summer Conference, Boston, Massachusetts, 2000.
- [6] Valentino, G., Auriemma, M., Corcione, F.E., Di Martino, U.: LDA Investigation of the Dynamic Intake Flow in a Diesel Engine Head by a Steady State Test Rig, "XXII Task Leaders Meeting of the IEA Implementing Agreement Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion", 6 - 9 Agosto 2000, Stoccolma.