

RILIEVI LDA E CORRELAZIONE CON MISURE DI SWIRL IN UN MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA AD ELEVATE PRESTAZIONI

Angelo ALGIERI

Dipartimento di Meccanica - Università degli Studi della Calabria
E-mail: a.algieri@unical.it

La tecnica di Anemometria Laser Doppler (LDA) è stata adoperata allo scopo di caratterizzare la testa di un motore motociclistico 4 tempi ad elevate prestazioni con 2 valvole per cilindro. L'attenzione è stata rivolta allo studio della fase di aspirazione, vista l'elevata influenza che questa esercita sulle performance erogabili dal propulsore.

In particolare, il lavoro si pone l'obiettivo di valutare il campo di moto generantesi all'interno della camera di combustione del propulsore e di correlare i rilievi anemometrici con le informazioni globali fornite da un misuratore di swirl. L'analisi sperimentale ha evidenziato la presenza in camera di combustione di due vortici controrotanti non perfettamente bilanciati a causa della posizione del condotto di aspirazione leggermente decentrata rispetto al piano di simmetria della testa. L'asimmetria nella distribuzione del flusso origina un momento angolare non nullo rispetto all'asse del cilindro, con valori crescenti con la distanza del piano di misura dalla testa. I valori del momento angolare, calcolati a partire dalle misure LDA, sono quindi stati correlati alle informazioni globali fornite da un misuratore di swirl.

Keywords: LDA, motori a combustione interna, coefficiente di swirl, fase di aspirazione.

INTRODUZIONE

La definizione del campo di moto all'interno dei cilindri dei motori a combustione interna è fondamentale per lo sviluppo e l'ottimizzazione della geometria dei moderni propulsori. Il moto del gas nella camera di combustione, infatti, influenza in maniera significativa la qualità e l'efficienza del processo di combustione e, quindi, i consumi di combustibile ed il livello di emissioni allo scarico [1, 2]. Per tale ragione, spesso, è richiesta la presenza in camera di combustione di strutture macroscopiche organizzate, quali ad esempio moti di swirl e di tumble, per migliorare il processo di combustione e rispettare le sempre più severe regolamentazioni sui gas di scarico [3, 4, 5].

Il presente lavoro si pone l'obiettivo di caratterizzare la distribuzione del flusso all'interno della camera di combustione di un motore motociclistico quattro tempi ad elevate prestazioni. In particolare, l'analisi è stata rivolta allo studio della fase di aspirazione. La testa esaminata fa parte di un motore bicilindrico ad L, di 992 cm³ di cilindrata, caratterizzata da doppia accensione

e dalla presenza di due valvole per cilindro. L'analisi sperimentale è stata eseguita adoperando la tecnica di Anemometria Laser Doppler (LDA). In particolare, i rilievi anemometrici sono stati eseguiti su piani perpendicolari all'asse del cilindro, disposti a differenti distanze dalla testa del propulsore, allo scopo di valutare l'evoluzione della struttura del flusso all'interno della camera di combustione. Inoltre le misure di velocità sono state correlate, in termini di coefficienti di swirl, a precedenti misure globali eseguite con un misuratore di swirl.

APPARATO SPERIMENTALE

L'attività sperimentale è stata eseguita al banco di flussaggio allestito presso il laboratorio di Motori a Combustione Interna dell'Università della Calabria (Figura 1). Si tratta di un banco di flussaggio stazionario in cui l'alzo valvola, mantenuto costante durante ogni misura, è regolato mediante una vite a filettatura micrometrica. Il sistema è costituito essenzialmente da un ventilatore (1) per la generazione del flusso attraverso i condotti di

aspirazione (2) e nella camera di combustione (3) del motore da studiare e da una valvola di by-pass (4) per la parzializzazione del flusso stesso. Per la misura globale della portata, necessaria per valutare l'efficienza volumetrica, il banco è integrato dalla presenza di un flussometro "V-Cone" (5), di misuratori di pressione (6) e temperatura, con portate che possono essere variate fra 40 e 600 m³/h, mentre la differenza di pressione fra ambiente e cilindro può giungere fino a 10 kPa.

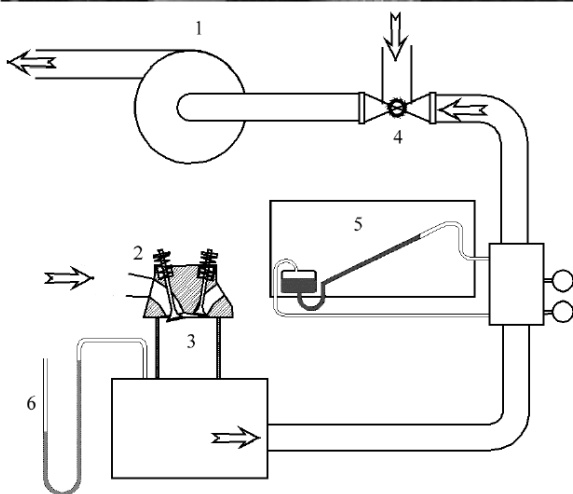
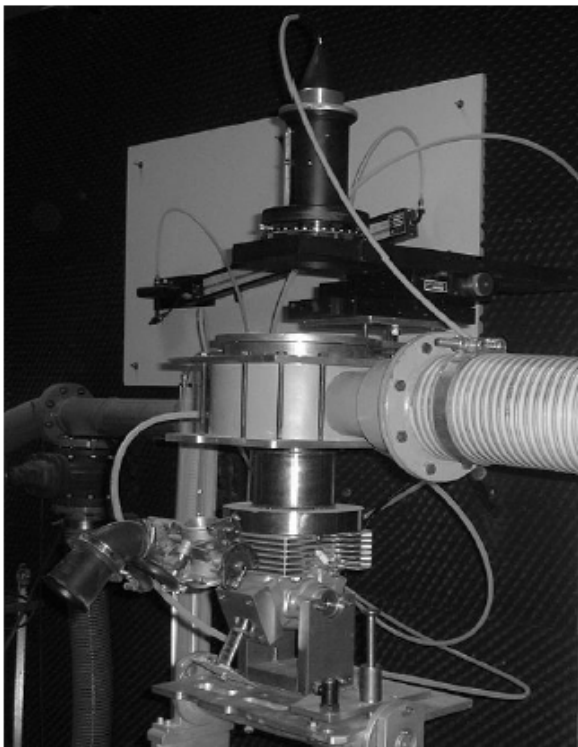


Figura 1 Apparato sperimentale

Il sistema consente, inoltre, rilievi puntuali di velocità mediante la tecnica di Anemometria Laser Doppler. A tale scopo è

stato realizzato un accesso ottico disposto perpendicolarmente all'asse del cilindro. Il sistema LDA è del tipo "ad un colore" (ossia capace di misurare una componente di velocità alla volta) con configurazione in back scattering. Il laser è del tipo a ioni di Argon con una potenza installata di 2W, con trasmissione del segnale luminoso mediante fibre ottiche.

I segnali ottenuti sono successivamente analizzati dall'analizzatore di spettro BSA (Burst Spectrum Analyser) nel dominio delle frequenze [6]. L'analizzatore è collegato ad un personal computer che consente di registrare ed analizzare i dati.

Per la generazione del segnale Doppler, il flusso d'aria è inseminato mediante la tecnica di fluidizzazione. Dell'aria compressa è prima deumidificata attraverso l'azione di un gel di silice e quindi è fatta passare attraverso un setto poroso sul quale è depositato lo strato di polveri da fluidizzare. Il flusso d'aria trascina quindi le particelle di inseminate che fungono da traccianti per il flusso da studiare. Mediante una valvola di regolazione è possibile variare la pressione dell'aria e la concentrazione dell'aerosol. Allo scopo di ridurre al minimo le alterazioni al campo di moto della fase gassosa, dovute all'introduzione delle particelle nel flusso, e di limitare i fenomeni di interazione fra le particelle stesse, gli esperimenti sono stati eseguiti con un rapporto di carica (rapporto fra la portata di inseminate e la portata d'aria) compreso fra il 5% ed il 10% [7, 8]. Le polveri adoperate sono sferette vuote di biossido di silicio opportunamente trattate, definite anche "microballoons".

Per la movimentazione della sonda laser, allo scopo di accedere ai vari punti di misura da investigare, è utilizzato un sistema di slitte a traslazione micrometrica, in aggiunta al quale esiste la possibilità di ruotare la sonda intorno al proprio asse longitudinale.

ATTIVITÀ SPERIMENTALE

La caratterizzazione locale del flusso in camera di combustione è stata eseguita mediante la tecnica di Anemometria Laser

Doppler (LDA). I rilievi sono stati effettuati fissando l'alzo-valvola ($L_v/D_v = 0.178$) ed il salto di pressione fra ambiente esterno e camera di combustione ($\Delta p = 73$ kPa). L'analisi è stata eseguita nella configurazione con valvola a farfalla completamente aperta (WOT).

I rilievi anemometrici sono stati realizzati su piani perpendicolari all'asse del cilindro, disposti ad una distanza H dalla testa del propulsore pari a 1/4, 1/2 e 3/4 dell'alesaggio B del cilindro. Sono, quindi, stati definiti 33 punti di misura (Figura 2) disposti su quattro diametri equispaziati (D_1 , D_2 , D_3 e D_4). In particolare il diametro D_3 risulta ruotato di 5 gradi in senso orario rispetto all'asse y, asse di simmetria della testa.

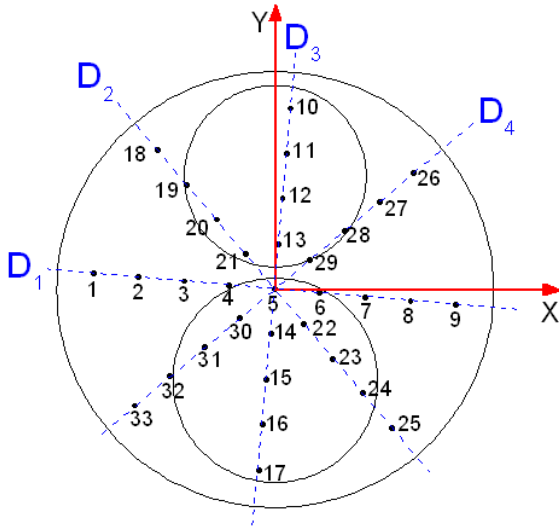


Figura 2 Punti di misura

Per ciascun punto sono state registrate le componenti di velocità in direzione x ed y. Per verificare le precedenti misure è stata acquisita un'ulteriore componente di velocità ed il valore ricavato sperimentalmente è stata confrontato con il valore calcolato a partire dalle componenti x ed y. Il confronto ha evidenziato un buon accordo con differenze inferiori al 4%. Per ciascuna misura di velocità è stato considerato un campione di taglia 3000.

Le componenti tangenziali di velocità sono quindi state adoperate per valutare un equivalente momento di swirl M . A questo scopo il momento angolare, originato dalle componenti tangenziali di velocità, è stato

combinato con il flusso assiale mediante la relazione seguente [9]:

$$M = 2\pi \int_0^{B/2} \rho \cdot v_a \cdot v_t \cdot r^2 dr \quad (1)$$

dove v_a è la velocità assiale;
 v_t è la velocità tangenziale;
 ρ è la densità dell'aria.

Per definire il valore delle velocità assiali e calcolare così il momento di swirl, in accordo con Kang e Reitz [10], è stato assunto un flusso assiale uniforme. È stato valutato, infine, il coefficiente di swirl C_s , definito dal rapporto fra il momento angolare del flusso ed il momento assiale:

$$C_s = \frac{8 \cdot M}{\dot{m}_{meas} \cdot v_0 \cdot B} \quad (2)$$

dove v_0 è una velocità di riferimento, valutata nell'ipotesi di flusso isoentropico:

$$v_0 = \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_0} \right) \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

RISULTATI

La Figura 3 mostra le velocità rilevate sul piano intermedio, posto ad una distanza dalla testa del propulsore pari a metà alesaggio ($H/B = 1/2$). La figura evidenzia la presenza in camera di combustione di due vortici controrotanti con assi di rotazione paralleli all'asse del cilindro. Si osserva che la regione adiacente all'asse di simmetria della testa è caratterizzata da un flusso diretto prevalentemente lungo l'asse y. Nei punti 4, 5 e 6, così come nella regione compresa fra i punti 11 e 16, la direzione dei vettori velocità tende, infatti, a coincidere quasi perfettamente con la direzione dell'asse y. I punti 10 e 17 risentono, invece, dell'effetto della parete che induce una progressiva deflessione del flusso, tanto maggiore quanto minore è la distanza del punto di misura dalla superficie laterale del cilindro. I rilievi anemometrici evidenziano, inoltre, che la regione centrale della camera di combustione è caratterizzata dai maggiori valori di velocità, mentre si

registrano velocità ridotte nei punti 10 e 17, a causa della vicinanza dei punti di misura alla parete del cilindro ed in corrispondenza delle coppie di punti 2-3 e 7-8, prossimi ai centri di rotazione delle due strutture vorticosi.

I dati di velocità evidenziano, inoltre, che il flusso in camera di combustione non è perfettamente simmetrico, a causa della posizione del condotto di aspirazione leggermente decentrata rispetto all'asse di simmetria della testa.

I rilievi LDA sono quindi stati estesi agli altri due piani di misura ($H/B=1/4$ e $H/B=3/4$) considerando le stesse condizioni operative adottate in precedenza ($L_v/D_v=0.178$ e valvola a farfalla completamente aperta). L'investigazione è stata limitata ai diametri D_1 e D_3 . La Figura 4 mostra i risultati ottenuti. Il confronto fra le distribuzioni del flusso sui differenti piani di misura evidenzia che la struttura globale del flusso è conservata e che stabile risulta la posizione dei vortici. In particolare, lungo il diametro D_3 sono trascurabili le differenze sull'orientazione del flusso, mentre maggiori scostamenti sono presenti in corrispondenza dei punti 4 e 6. Sul piano inferiore, infatti, i vettori velocità tendono ad allontanarsi dall'asse y a causa della maggiore interazione col flusso entrante in camera di combustione.

L'attenzione, quindi, è stata rivolta alle componenti tangenziali di velocità allo scopo di correlare le misure di Anemometria Laser Doppler con delle misure globali di swirl eseguite sullo stesso motore in un precedente lavoro [11], adottando un "impulse swirl meter".

In Figura 5 sono riportate le velocità tangenziali e le relative deviazioni standard misurate sui tre piani perpendicolari all'asse del cilindro, nelle stesse condizioni operative adottate in precedenza. L'analisi è stata ristretta ai soli diametri D_1 e D_3 . La figura evidenzia che le deviazioni standard tendono a distribuirsi abbastanza uniformemente, nonostante l'andamento non uniforme delle velocità medie, in accordo con i risultati presenti in letteratura [10].

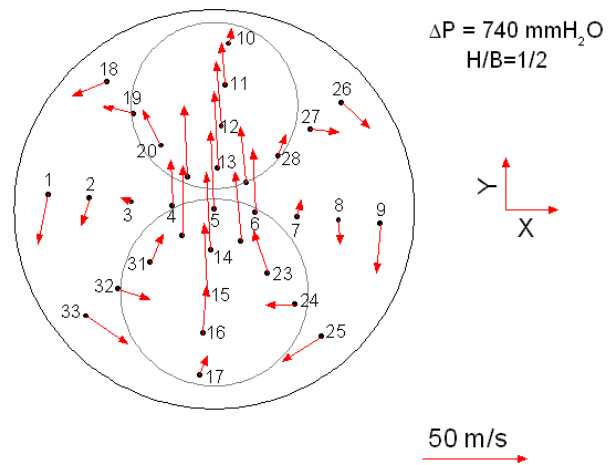
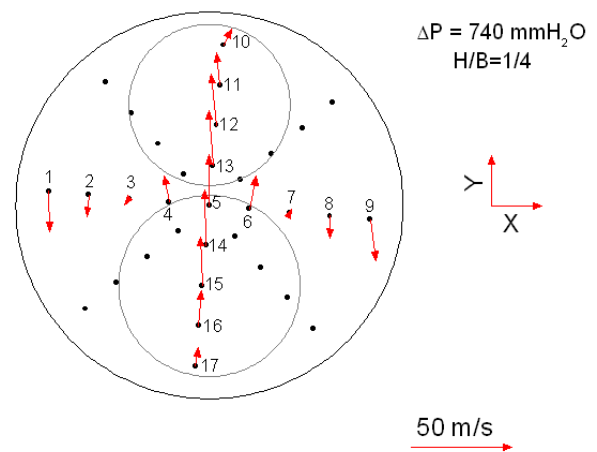
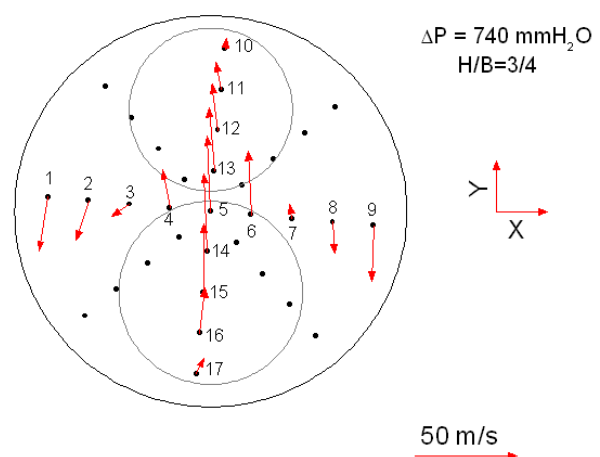


Figura 3 Velocità risultanti misurate sul piano intermedio ($H/B = 1/2$).



a) Piano di misura inferiore ($H/B = 1/4$)



b) Piano di misura superiore ($H/B = 3/4$)

Figura 4 Velocità risultanti misurate sul piano inferiore (a) e sul piano superiore (b).

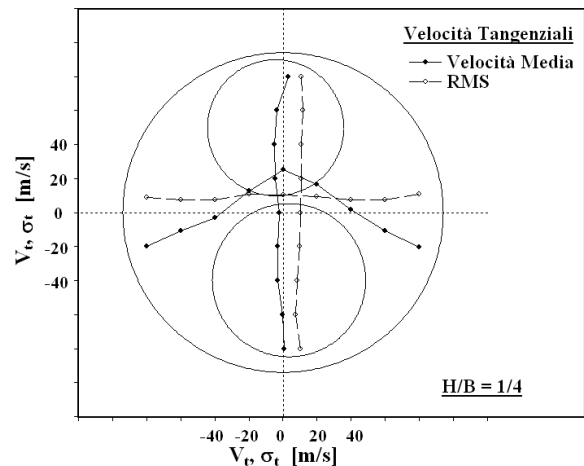
I tipici valori delle deviazioni standard registrati sono

$$\sigma = 0.2 v_{max} \quad (4)$$

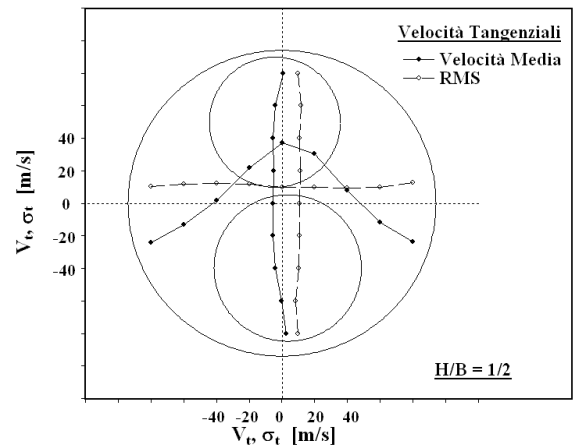
dove v_{max} rappresenta la velocità tangenziale massima misurata su ciascun piano.

Considerando le velocità tangenziali medie si osserva che i valori più contenuti sono presenti lungo il diametro D_3 , mentre si registrano valori maggiori negli altri punti di misura. Sul piano inferiore ($H/B = 1/4$) si osserva, inoltre, un'elevata simmetria nella distribuzione delle velocità tangenziali, con un andamento lineare per ciascun vortice. Allontanandosi dalla testa, la struttura del flusso è complessivamente conservata, tuttavia è da segnalare un progressivo incremento delle velocità (analogamente a quanto visto per le velocità risultanti) e dell'asimmetria nella distribuzione del flusso. La crescente asimmetria delle componenti tangenziali determina il progressivo sbilanciamento del flusso e quindi un momento angolare crescente. A tal proposito sono stati calcolati il momento angolare ed il coefficiente di swirl, adoperando i valori delle velocità tangenziali misurati con la tecnica LDA ed ipotizzando un flusso assiale uniforme, in accordo con Kang e Reitz [10].

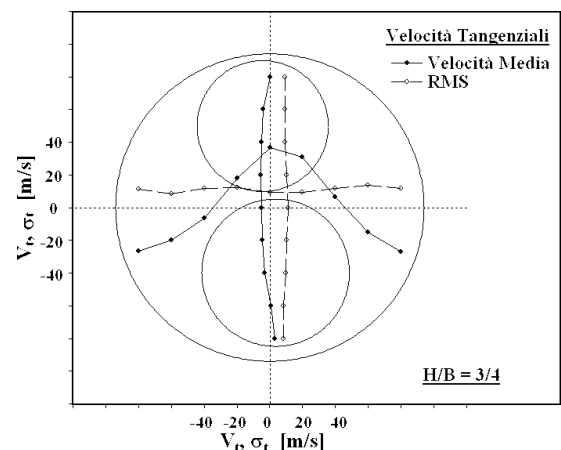
La Figura 6 mostra i coefficienti di swirl ottenuti dalle misure LDA ed il valore ricavato dal misuratore di swirl, in funzione della distanza del piano di misura dalla testa. È evidente che la progressiva asimmetria determina un incremento nel momento angolare e, quindi, nel coefficiente di swirl. Inoltre, la figura evidenzia che il valore registrato dal misuratore globale di swirl può essere estrapolato con relativa buona accuratezza dai rilievi LDA, una volta note le posizioni dei differenti piani di misura. In particolare, è stata trovata una semplice relazione lineare fra i coefficienti di swirl calcolati adottando la tecnica LDA e la tecnica globale.



a) Piano di misura inferiore ($H/B = 1/4$)



b) Piano di misura intermedio ($H/B = 1/2$)



c) Piano di misura superiore ($H/B = 3/4$)

Figura 5 Velocità tangenziali misurate sui tre piani.

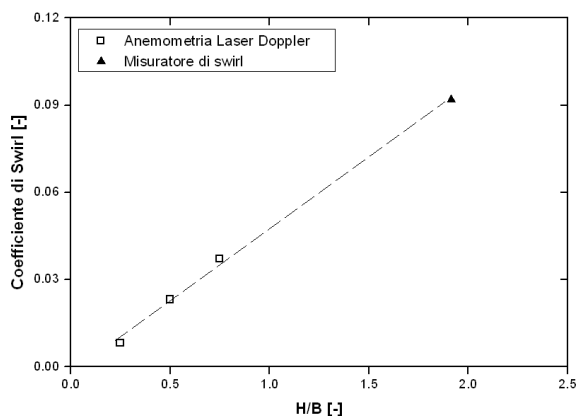


Figura 6 Andamento del coefficiente di swirl valutato mediante la tecnica LDA e mediante un impulse swirl meter.

CONCLUSIONI

La tecnica di Anemometria Laser Doppler (LDA) è stata utilizzata per definire il campo di moto all'interno della camera di combustione di un motore motociclistico ad elevate prestazioni e per correlare i rilievi di velocità con misure globali di swirl.

Le misure LDA, eseguite su piani perpendicolari all'asse del cilindro, hanno evidenziato la presenza in camera di combustione di due vortici controrotanti, con assi di rotazione paralleli all'asse del cilindro. Sui differenti piani investigati si è rilevato che la struttura del flusso tende complessivamente a conservarsi, così come stabili risultano le posizioni delle strutture vorticosi. Al crescere della distanza del piano di misura dalla testa si osserva, inoltre, un progressivo incremento dei moduli dei vettori velocità e dell'asimmetria nella distribuzione del flusso. La progressiva asimmetria determina, in particolare, valori crescenti del momento angolare e, quindi, del coefficiente di swirl con la distanza dalla testa. I valori del coefficiente di swirl, ottenuti dalle misure LDA, sono stati correlati successivamente con l'informazione globale fornita da un "impulse swirl meter". Dal confronto si è osservato che è possibile estrapolare, con relativa buona accuratezza, le informazioni globali dalle misure anemometriche.

RINGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento va al Prof. S. Bova, che ha reso possibile il lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Heywood J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mc Graw Hill, 1998.
- 2 Pignone G. A., Vercelli U., "Motori ad Alta Potenza Specifica", Ed.G. Nada, 2003.
- 3 Li Y., Zhao H., Leach B., Ma T., Ladommatos N., "Optimization of In-Cylinder Flow for Fuel Stratification in a Three-Valve Twin-Spark-Plug SI Engine", SAE Paper 2003-01-0653, 2003.
- 4 Crnojevic C., Decool F., Florent P., "Swirl measurements in a motored cylinder", Experiments in Fluids 26, 1999.
- 5 Arcoumanis C., Nouri J., Xu H. M., Stone R., "Analysis of the steady flow characteristics of tumble-generating four-valve cylinder heads", Optical Diagnostics in Engineering 2 (2), 1997.
- 6 Dantec, "Instruction manual 57N10 Burst Spectrum Analyzer", 1999.
- 7 Durst F., Melling A., Whitelaw J. H., "Principles and practice of Laser Doppler Anemometry", Academic Press, 1976.
- 8 Meyers J. F., "Generation of Particles and Seeding", Lectures Series 1991-08 von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1991.
- 9 Auriemma M., Caputo G., Corcione F. E., Valentino G., Riganti G., "Fluid-Dynamic Analysis of the Intake System for a HDDI Diesel Engine by STAR-CD Code and LDA Technique", SAE paper 2003-01-0002, 2003.
- 10 Kang K. Y., Reitz R. D. "The effect of the valve alignment on swirl generation in a DI diesel engine", Experimental Thermal and Fluid Science 20, 1999.
- 11 Carrera M., "Caratterizzazione fluidodinamica di teste di MCI ad elevate prestazioni", Dipartimento di Meccanica - Università della Calabria, 2004.