

Relazione scientifica finale del programma Short-Term Mobility svolto dall'ing. Luigi Sequino (IM-CNR) presso la Divisione Motori a Combustione, Facoltà di Ingegneria, Università di Lund (Svezia)

Introduzione

Lo studio dei processi di combustione nei motori utilizzati tutti i giorni per spostamento persone e trasporto merci è diventato fondamentale per le case produttrici di veicoli per rispettare le stringenti normative anti-inquinamento e per ridurre la dipendenza da risorse non rinnovabili. Gli obiettivi di ricerca dell'istituto motori comprendono questi ed altri temi nell'ambito dei sistemi per la produzione di l'energia.

L'ing. Luigi Sequino, tecnologo presso l'Istituto Motori del CNR di Napoli, è risultato vincitore di una borsa Short-Term Mobility (STM) 2015 del CNR, nell'ambito della quale ha svolto un periodo di soggiorno di 21 giorni presso l'università di Lund (Svezia), Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Scienze per l'Energia, Divisione Motori a Combustione. Tale periodo di soggiorno è stato svolto dal 1 novembre 2015 al 22 novembre 2015.

L'università di Lund, fondata nel 1666, è una delle più antiche università del nord Europa ed è quotata tra le migliori 100 università del mondo. L'istituzione ospitante è stato il dipartimento di Scienze per l'Energia, in particolare il supervisore nell'ambito del programma STM è stato il professor Övind Andersson della Divisione Motori a Combustione. Tale gruppo collabora con diversi centri di ricerca internazionali, come ad esempio i laboratori nazionali Sandia (SNL) negli Stati Uniti, l'istituto francese del petrolio e nuove energie (IFPen) e l'università politecnica di Valencia (CMT), punti di riferimento nel campo della ricerca e lo sviluppo di tecnologie innovative per il funzionamento dei motori a combustione interna. L'eccellente livello accademico e il contesto internazionale hanno permesso allo scrivente di approfondire conoscenze tecniche ed acquisire nuove competenze nell'ambito della ricerca sperimentale.

L'attività svolta durante il programma STM fa parte del progetto GenDies. Esso prevede la collaborazione del dipartimento di ingegneria meccanica, per lo studio dei motori a combustione interna, e del dipartimento di fisica, in particolare il gruppo di fisica della combustione, impegnato dello sviluppo di tecniche laser per la diagnostica dei processi di combustione.

Descrizione attività

Recenti studi hanno dimostrato che il particolato prodotto allo scarico dei motori ad accensione per compressione, uno dei principali inquinanti prodotto da questo tipo di motori, dipende fortemente dal processo di ossidazione del soot (precursore del particolato) all'interno del cilindro [1] [2] [3]. Per lo studio di questo fenomeno sono state messe a punto diverse tecniche di investigazione che prevedono l'accesso ottico nella camera di combustione e l'utilizzo di sorgenti laser [4] [5].

Il titolo dell'attività sperimentale svolta presso l'università di Lund può essere sintetizzato in: "Misure di estinzione laser per l'analisi della fase di ossidazione del soot in un motore Heavy-duty otticamente accessibile ad accensione per compressione".

L'attività di ricerca svolta si articola nei seguenti punti:

- Misura volume morto
- Assemblaggio e architettura motore
- Definizione campagna di prove con CCD (Central Composite Design)
- Set-up ottico per misure di estinzione laser
- Prove di estinzione laser

Misura volume morto

Il volume morto in un motore a combustione interna rappresenta il volume disponibile tra il pistone e la testata quando il pistone si trova al punto morto superiore. È il volume minimo disponibile. Esso viene utilizzato per il calcolo del rapporto di compressione di un motore con la seguente equazione:

$$rc = \frac{V_m - V}{V} \quad Eq.(1)$$

Dove rc è il rapporto di compressione volumetrico, V_m il volume morto e V è la cilindrata, ovvero il volume spazzato dal pistone nel suo movimento dal punto morto inferiore a quello superiore.

La misura diretta del volume morto è stata effettuata al fine di verificare ed eventualmente correggere i valori indicati dalla casa costruttrice. La conoscenza del rapporto di compressione effettivo viene utilizzato per il calcolo del rilascio del calore durante il processo di combustione. La misura del volume morto ha permesso di calcolare in modo più affidabile e preciso il rilascio del calore come indicato in [6].

Si è proceduto misurando separatamente il volume della camera di combustione nel pistone (comunemente detta "bowl") e quello della testa del motore ("firedeck"). Poiché questi sono caratterizzati da geometrie particolari, la misura del volume è stata eseguita coprendoli con una campana di vetro dal volume noto e riempiendo con acqua. Il volume di acqua versato corrisponde alla somma di quello della campana di vetro e quello dell'oggetto in esame ("bowl" oppure "firedeck"). In figura 1 si riporta un'immagine che rappresenta la misura del volume della campana di vetro.

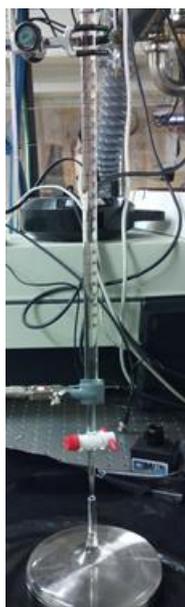


Figura 1. Operazione di misura del volume della campana di vetro.

Assemblaggio e architettura motore

Durante l'operazione di assemblaggio motore è stato possibile analizzare nel dettaglio ogni componente utilizzato e carpire i criteri di progettazione del motore ottico. Il concetto base è lo stesso di tutti i motori ottici ed è finalizzato all'osservazione dei fenomeni che avvengono nella camera di combustione attraverso una o più parti trasparenti. Nel caso in esame, è stato possibile venire a conoscenza di particolari accorgimenti utilizzati per garantire il fissaggio delle finestre trasparenti. Inoltre, di particolare interesse è stato il sistema messo a punto per l'accesso al pistone per la sua pulizia e per tale motivo è stato oggetto di uno studio approfondito al fine di acquisire know how per la sua riproduzione nei laboratori del CNR.

Definizione campagna di prove con CCD (Central Composit Design)

Al fine di valutare come il processo di ossidazione del soot sia affetto dai parametri principali di funzionamento del motore, è stato realizzato un piano prove. Un punto operativo del motore è stato selezionato, le prestazioni motore e le specifiche sono riportate in tabella 1. I parametri principali di funzionamento motore, pressione e temperatura di aspirazione, pressione di iniezione e giri motore, sono stati sistematicamente variati e, in tutte le combinazioni ottenute, le specifiche del punto operativo sono state rispettate. In Tabella 2 si riportano i valori massimi e minimi dell'intervallo di variazione di ogni parametro. Questi sono i tipici valori ottenuti durante il normale funzionamento del motore, eccetto che per il numero di giri, che è limitato a 1200 giri/min dalla massima frequenza del laser (10 Hz).

Tabella 1. Specifiche punto operativo motore.

IMEP [bar]	5
CA50 [°CA]	9
HR [J]	1700
[O ₂] [%]	15

Tabella 2. Parametri da variare e intervallo di variazione.

	Pin [bar]	Tin [°C]	Pinjection [bar]	Giri/min
Limite inferiore	1.18	80	1000	900
Limite superiore	1.78	160	2000	1200

Se immaginassimo di considerare per ognuno dei 4 parametri i soli valori massimo, minimo e medio (quindi 3 valori) e volessimo testare tutte le possibili combinazioni, avremmo un piano prove fattoriale completo costituito da $3^4 = 81$ test. Questo numero di prove permetterebbe di valutare gli effetti principali lineari e quadratici di ogni parametro, ma anche gli effetti delle loro interazioni. Normalmente le variabili non presentano interazioni quadratiche e lineari-quadratiche significative per cui l'analisi di questi effetti rappresenta uno spreco di risorse. Se si è interessati a conoscere gli effetti lineari di ogni variabile singolarmente ma non delle loro interazioni si può ricorrere ad un metodo di pianificazione delle prove chiamato Central Composite Design (CCD). Questo permette di costruire un modello quadratico degli effetti delle variabili senza il bisogno di costruire un piano fattoriale completo.

In sintesi, per la definizione delle prove da eseguire, il CCD prevede la definizione iniziale di un piano fattoriale completo. Da questo si identifica un punto operativo "centrale", per il quale tutte le variabili abbiano un valore intermedio tra quelli da testare. Infine si identificano dei punti operativi "assiali", caratterizzati dall'aver tutti i valori uguali a quelli del punto centrale eccetto uno. In generale, si prevedono due punti "assiali" per ogni variabile da modificare, uno con un valore maggiore del punto "centrale" e uno con valore inferiore. In particolare, nel caso in esame sono stati scelti due punti "assiali"

superiori e due inferiori per una maggiore affidabilità dei risultati [7]. Le condizioni operative da testare sono riportate in tabella 3, come si può notare grazie al CCD si è ridotto il numero di prove da 81 a 17.

Tabella 3. Piano prove ottenuto con Central Composite Design.

Prova	Pasp [bar]	Tasp [°C]	Pinj [bar]	Giri/min
1	1.48	120	1500	1050
2	1.18	120	1500	1050
3	1.33	120	1500	1050
4	1.63	120	1500	1050
5	1.78	120	1500	1050
6	1.33	80	1500	1050
7	1.51	100	1500	1050
8	1.55	140	1500	1050
9	1.63	160	1500	1050
10	1.48	120	1000	1050
11	1.48	120	1250	1050
12	1.48	120	1750	1050
13	1.48	120	2000	1050
14	1.48	120	1500	900
15	1.48	120	1500	975
16	1.48	120	1500	1125
17	1.48	120	1500	1200

Set-up ottico per misure di estinzione laser

Per le misure di estinzione laser ci si è avvalsi della collaborazione con il dipartimento di Fisica della Combustione, il cui lavoro consiste nello sviluppo di tecniche laser per la diagnostica del processo di combustione in generale. La stretta collaborazione tra il dipartimento di ingegneria e quello di fisica è un punto fondamentale, nonché il punto forte del progetto GenDies. Grazie al supporto di fisici, esperti di ottica, è possibile applicare le più sofisticate e aggiornate tecniche di diagnostica ottica garantendo una posizione di prima linea ai laboratori dell'università di Lund. La partecipazione alla messa a punto dell'apparato ottico con ingegneri e fisici ha permesso allo scrivente l'approfondimento e l'apprendimento di tecniche laser avanzate per la diagnostica ottica nei motori a combustione interna.

La tecnica di estinzione laser è un potente strumento per misure quantitative di soot e si è rivelata efficace nelle applicazioni in motori ad accensione per compressione [4] [5]. L'estinzione è una tecnica in cui l'intensità iniziale I_0 e l'intensità trasmessa I sono misurate. Assumendo che il soot sia un mezzo con un'alta trasmissività ottica, può essere applicata la legge di Lamber-Beer :

$$I = I_0 e^{-K_{ext}L} \quad Eq. (2)$$

Dove K_{ext} è il coefficiente di estinzione e L è il cammino ottico, in questo caso, l'estensione verticale della camera di combustione. Dalla misura di I e I_0 , il valore del prodotto $K_{ext}L$ può essere calcolato, questo è direttamente legato all'ammontare di soot attraversato dal fascio laser.

Per le misure di estinzione effettuate, un fascio laser viene generato da un diodo-laser con lunghezza d'onda di 690 nm. Questo è inviato nella camera di combustione del motore attraverso una finestra di quarzo posta nella sede di una delle due valvole di scarico. Dopo aver attraversato il cilindro, il fascio laser attraversa il pistone in quarzo, viene riflesso su uno specchio inclinato a 45° e raccolto da un fotodiodo (segnale I). Prima dell'ingresso nel motore il segnale di riferimento (segnale I₀) viene raccolto da un altro fotodiodo. In figura 2 è mostrato uno schema del set-up ottico utilizzato. Una serie di lenti piano convesse sono poste nel cammino del fascio laser per regolarne le dimensioni e compensare eventuali divergenze. Il fascio laser generato dal diodo-laser è continuo, ma viene trasformato in un fascio pulsato attraverso un modulatore opto-acustico (Figura 2) al fine di sincronizzare l'impulso con l'angolo di manovella (CAD). È stato impostato un impulso ogni 0.1 CAD.

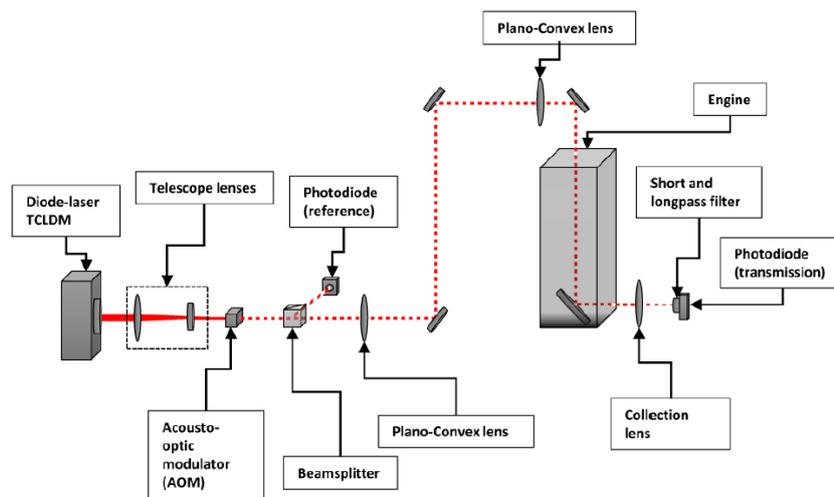


Figura 2. Set-up ottico per misure di estinzione laser.

Prove di estinzione laser

Sono state eseguite prove di estinzione laser nei punti motore riportati in tabella 3. Per ogni condizione operativa, è stata ricavata la curva di $K_{ext} \cdot L$ in funzione dell'angolo di manovella (CAD) utilizzando l'equazione 2 (Figura 3). Il tratto crescente della curva rappresenta la fase di formazione del soot, quello decrescente, la fase di ossidazione, che è l'oggetto di questo studio.

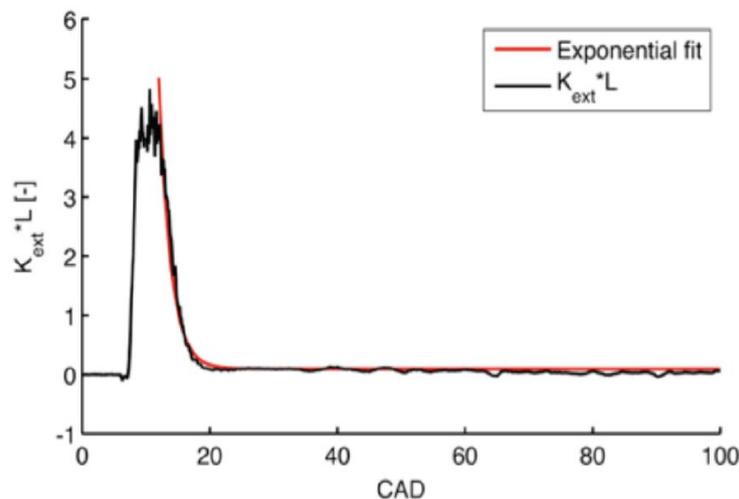


Figura 3. Curva $K_{ext}L$ sperimentale (nero) e approssimazione della fase di ossidazione con curva esponenziale (rosso).

Assumendo che la fase di ossidazione sia caratterizzata da un decadimento di tipo esponenziale, è possibile quantificare la velocità di ossidazione del soot calcolando il valore della vita media, $t^{1/2}$. Per definizione, dato un insieme di elementi, il cui numero decresce col tempo fino a diventare nullo, la vita media è il valore atteso del tempo che un elemento resta nell'insieme prima di esserne rimosso. Essa può essere calcolata utilizzando la seguente espressione:

$$K_{ext}L \propto e^{-\frac{\ln(2)x_{CAD}}{t^{1/2}}} \quad Eq. (3)$$

Dove x_{CAD} è la variabile tempo espressa in CAD (angoli di manovella). La vita media è stata calcolata per tutti i test effettuati.

Risultati attesi

Una precedente campagna di prove [8] aveva dimostrato la dipendenza della vita media dalla concentrazione di ossigeno in camera di combustione. In figura 4 si riporta un grafico dei valori misurati per le singole prove (nero con barre di errore) e per la media (rosso). L'aumento dell'ossigeno disponibile fa aumentare la velocità di ossidazione del soot in camera (le vita media si riduce), riducendo così la quantità di particelle inquinanti emesse allo scarico del motore.

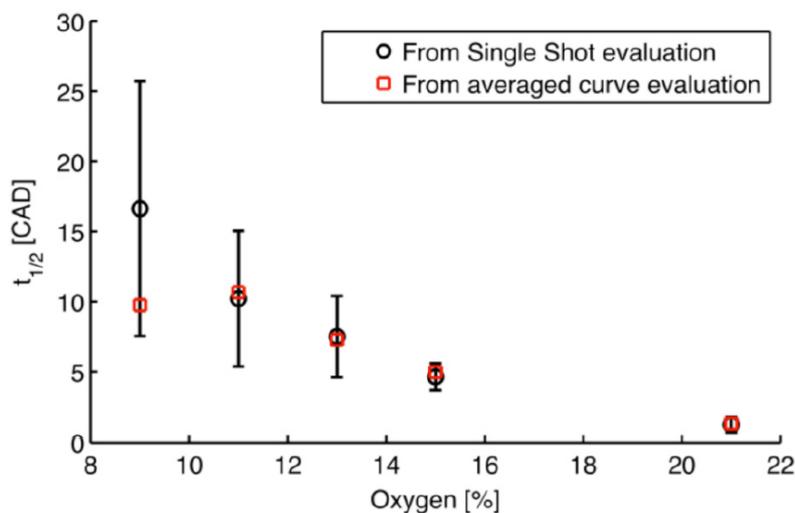


Figura 3. Stima della vita media del decadimento del soot in funzione della percentuale di ossigeno. I dati sono relativi alle singole ripetizioni (nero) e alla curva media (rosso).

Con la presente campagna di prove si mira a comprendere se e come la velocità di ossidazione del soot sia influenzata da altri parametri di funzionamento motore come pressione di iniezione, pressione e temperature di aspirazione e velocità del motore. La comprensione dei fenomeni che intervengono nel processo di ossidazione del soot è fondamentale per il controllo e la messa a punto di strategie di combustione innovative per la riduzione delle emissioni allo scarico ed il rispetto nelle normative anti-inquinamento.

Bibliografia

- [1] J. Eismark, M. Balthasar, A. Karlsson, T. Benham, M. Christensen, and I. Denbratt, “Role of late soot oxidation for low emission combustion in a diffusion-controlled, high-egr, heavy duty diesel engine,” SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2009.
- [2] U. Aronsson, C. Chartier, Ö. Andersson, R. Egnell, J. Sjöholm, M. Richter, and M. Aldén, “Analysis of the correlation between engine-out particulates and local ϕ in the lift-off region of a heavy duty diesel engine using raman spectroscopy,” *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, vol. 2, no. 2009-01-1357, pp. 645–660, 2009.
- [3] G. Lequien, Ö. Andersson, P. Tunestal, and M. Lewander, “A correlation analysis of the roles of soot formation and oxidation in a heavy-duty diesel engine,” SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2013.
- [4] D. R. Tree and J. E. Dec, “Extinction measurements of in-cylinder soot deposition in a heavy-duty diesel engine,” SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2001.
- [5] E. Mancaruso, S. Merola, and B. Vaglieco, “Soot concentration and particle size in a diesel engine by broadband scattering and extinction measurements,” SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2005.
- [6] U. Aronsson, H. Solaka, G. Lequien, Ö. Andersson, and B. Johansson, “Analysis of errors in heat release calculations due to distortion of the in-cylinder volume trace from mechanical deformation in optical diesel engines,” *SAE International Journal of Engines*, vol. 5, no. 4, pp. 1561–1570, 2012.
- [7] Ö. Andersson, *Experiment!: planning, implementing and interpreting*. John Wiley & Sons, 2012.
- [8] Y. Gallo, J. Simonsson, T. Lind, P.-E. Bengtsson, H. Bladh, and Ö. Andersson, “A study of in-cylinder soot oxidation by laser extinction measurements during an egr-sweep in an optical diesel engine,” SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2015.