



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1957A -

ANNO: 2016

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Oberto Alessandro

MATERIA: Controllo delle emissioni di inquinanti - prof. Spessa

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

**APPUNTI DEL CORSO:  
CONTROLLO DELLE EMISSIONI  
DI INQUINANTI**

**A.A. 2015/2016**

**Corso tenuto dal prof. Ezio Spessa**

Stato di NO può essere volotta a causa della reazione 3.

La costante di velocità di reazione varia in funzione della temperatura secondo la legge

$$K = A T^b e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

↓  
MECCANISMO  
TERMICO

REAZIONE 1: gli atomi di O presenti nei gas combusti alle spalle del fronte di fiamma promuovono la decomposizione dell'ozono molecolare producendo atomi di ossigeno N.

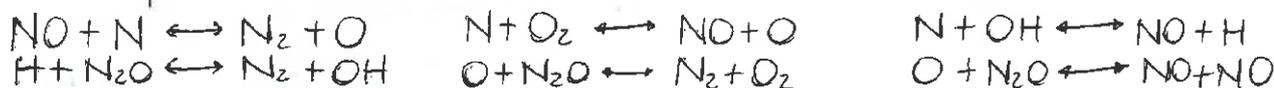
REAZIONI 2-3: gli atomi di ossigeno reagendo con l'ossigeno molecolare O<sub>2</sub> e con i gruppi OH liberi contribuiscono alla formazione di NO.

Dalla reazione 4 N<sub>2</sub>O va a reagire con l'ossigeno O secondo le reazioni 5 e 6. È necessaria la presenza di OH per avviare il meccanismo di formazione di N<sub>2</sub>O. Siccome le energie di attivazione richieste per queste reazioni sono molto più alte rispetto alla 1 esse si attivano con una dipendenza dalla temperatura meno sensibile.

### Modello della cinetica chimica

Lo studio della formazione di NO nei motori il meccanismo termico è sempre quello predominante soprattutto nelle condizioni di funzionamento tipiche dei motori ad accensione comandata. Si studia quindi come la velocità con cui avvengono le reazioni chimiche concorre alla formazione di NO. La velocità con cui avvengono le reazioni che liberano energia all'interno del fronte di fiamma è sufficientemente rapida da permettere di ipotizzare che i gas combusti raggiungano velocemente condizioni molto prossime a quelle di equilibrio termodinamico. La velocità di formazione degli NO è perciò confrontata con quella del processo di combustione ed aumenta esponenzialmente con la T dei gas combusti. Dal grafico si vede che NO è la specie chimica più lenta a formarsi.

Considero la prima reazione e ne scrivo le variazioni della concentrazione nel tempo



$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = -K_1^+ [\text{N}][\text{NO}] + K_1^- [\text{N}_2]_e [\text{O}]_e + K_2^+ [\text{N}][\text{O}_2] - K_2^- [\text{NO}][\text{O}]_e + K_3^+ [\text{N}][\text{OH}]_e - K_3^- [\text{NO}][\text{H}]_e + K_6^+ [\text{O}][\text{N}_2\text{O}] - K_6^- [\text{NO}][\text{NO}]$$

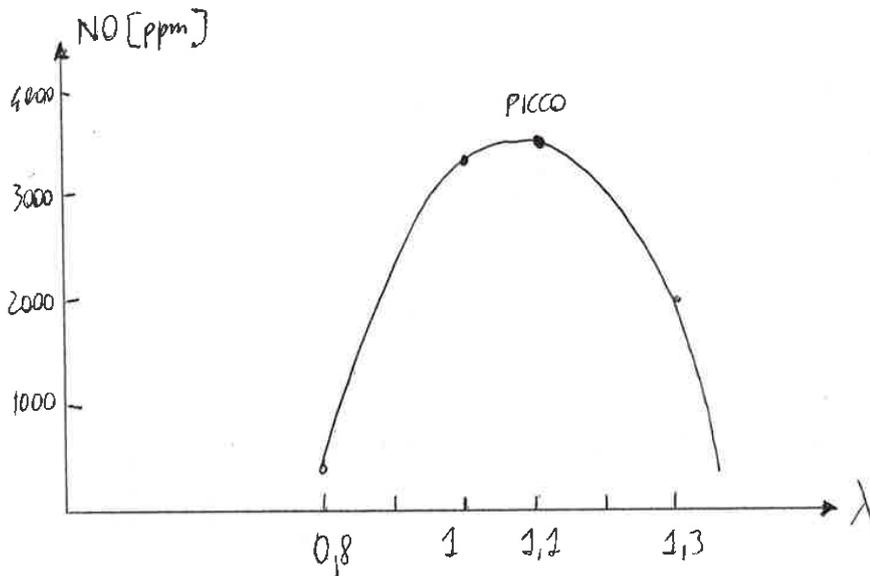
$$\frac{d[\text{N}]}{dt} = -K_1^+ [\text{N}][\text{NO}] + K_1^- [\text{N}_2]_e [\text{O}]_e - K_2^+ [\text{N}][\text{O}_2] + K_2^- [\text{NO}][\text{O}]_e - K_3^+ [\text{N}][\text{OH}]_e + K_3^- [\text{NO}][\text{H}]_e$$

(2)

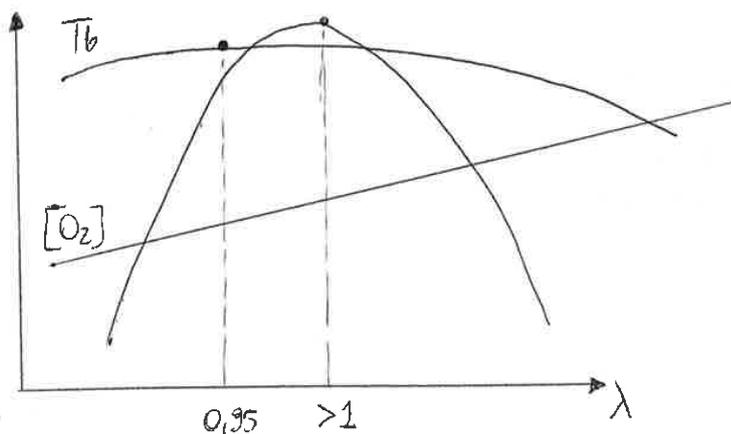
Dallo stesso grafico si nota che le curve non partono da zero perché ho un contenuto di  $O_2$  residuo nella camera non espulsa. Alcune curve non partono da zero a causa del meccanismo prompt.

Confrontando i grafici della temperatura e quello della concentrazione di NO si può notare come la differenza di temperatura (15-18%) sia molto minore della differenza di concentrazione di NO (33%). Ciò spiega perché la dipendenza dalla T è di tipo esponenziale.

Considerando una miscela ricca si può notare come la concentrazione di NO sia più bassa. Ciò è dovuto al fatto che le T sono più basse e considerando la miscela ricca c'è poco ossigeno per la formazione di NO. Nel caso di miscela povera la concentrazione di NO rispetto allo stesso metro è più alta in quanto proprio a causa delle basse temperature la dissociazione è trascurabile.

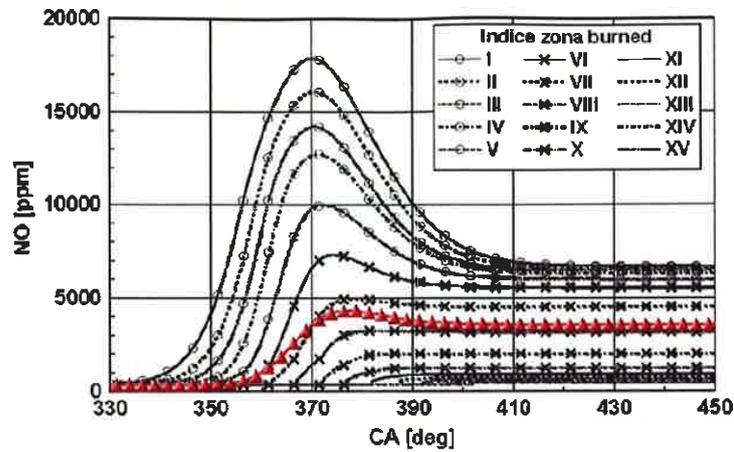


- Per miscela povera, le T sono più basse e la concentrazione di  $O_2$  è maggiore  $\Rightarrow$  si congelano le reazioni
  - Per miscela ricca, le T saranno più elevate e la concentrazione di  $O_2$  è minore. Lo
- La temperatura sale per  $\lambda$  fino a 0,9 - 0,95 e poi scende

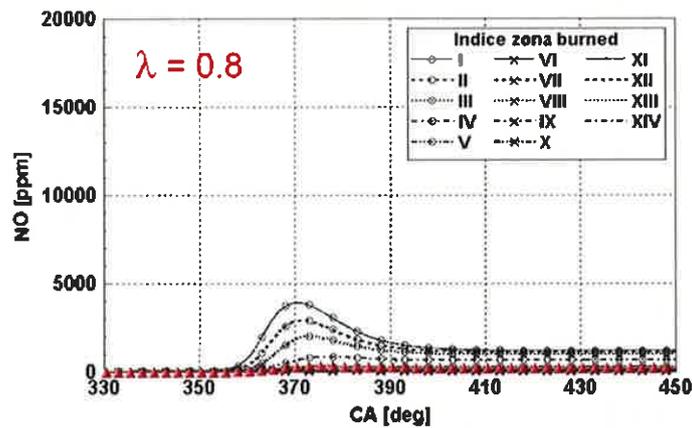


(4)

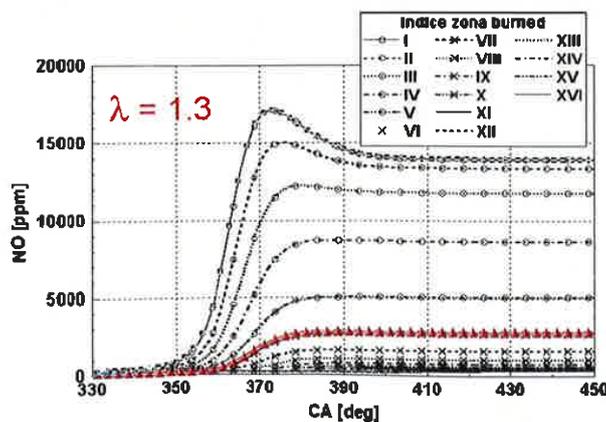
**$n = 3300\text{rpm}$ ,  $p_{me} = 440\text{kPa}$ ,  $\lambda = 1.00$ , MBT Timing, benzina verde**



**$n = 3300\text{rpm}$ ,  $p_{me} = 440\text{kPa}$  a  $\lambda=1$ , MBT, benzina verde, posizione fissa farfalla**



**$n = 3300\text{rpm}$ ,  $p_{me} = 440\text{kPa}$  a  $\lambda=1$ , MBT, benzina verde, posizione fissa farfalla**



6

Quando, anche se è presente una certa quantità di ossigeno sufficiente ad ossidare completamente il CO in CO<sub>2</sub>, le concentrazioni di CO saranno superiori. Successivamente le basse temperature favoriscono ulteriore ossidazione di CO in CO<sub>2</sub>. Si conclude che le concentrazioni di CO allo scacco sono superiori a quelle che si poteva attendere sulla base dell'equilibrio chimico alle temperature di scacco ⇒ la cinetica chimica svolge un ruolo nella formazione di CO.

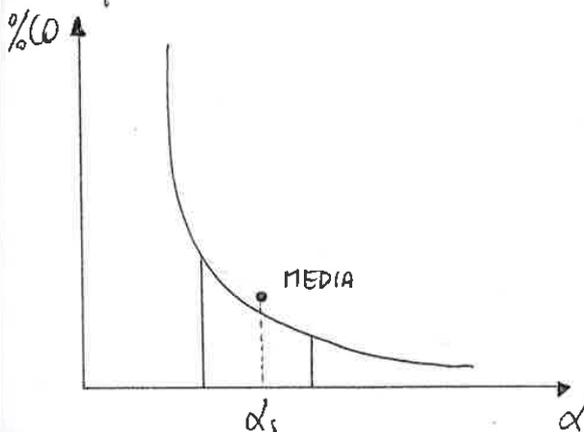
Con il raffreddamento dei gas caldanti durante la corsa di espansione e scacco le concentrazioni di CO possono assumere localmente valori diversi da quelli di equilibrio. Al termine dell'espansione le concentrazioni di CO misurate sono molto maggiori di quelle all'equilibrio chimico.

$$\frac{d[CO]}{dt} = K_1 [CO_2]_e [H]_e - K_1' [CO][OH]_e + K_2 [CO_2]_e [O]_e - K_2' [CO][O_2]_e$$

$$\frac{d[CO]}{dt} = R_1 - R_1 \frac{[CO]}{[CO]_e} + R_2 - R_2 \frac{[CO]}{[CO]_e} = (R_1 + R_2) \left(1 - \frac{[CO]}{[CO]_e}\right)$$

Il questo approccio chimico deve essere abbinato un approccio termodinamico. Considero il grafico di equilibrio chimico e cinetica chimica. Nel grafico della cinetica chimica si nota una differenza contenuta tra l'approccio sperimentale e quello calcolato. In realtà per una miscela povera se si considera il modello la concentrazione di CO è nulla. Tuttavia dai valori misurati sperimentalmente la % di CO è bassa ma non nulla. Ciò si verifica poiché nel campo del povero si ha un'ulteriore sorgente di CO derivante dalla difficile ossidazione degli idrocarburi incombusti. Questo fenomeno non si presenta lavorando nel campo dello stechiometrico/ricco perché essendo le temperature più alte l'ossidazione avviene completamente. Un altro problema si ha osservando la differenza in corrispondenza dello stechiometrico poiché il modello va a sottovalutare la quantità di CO rispetto ai dati sperimentali. Inoltre bisogna tener conto delle dispersioni da cilindro a cilindro poiché questi non saranno caratterizzati dalla stessa dosatura. Inoltre ciclo dopo ciclo il cilindro non sarà caratterizzato sempre dalla stessa dosatura. Il modello della cinetica chimica tiene conto di queste dispersioni.

Considerando la dispersione legata alla variazione di  $\alpha$  dell'1÷2% considero una finestra di una certa ampiezza andando a considerare non un cilindro/ciclo ma la media corrispondente al valore  $\alpha_s$  che andrà a trovarsi più in alto considerando che la dipendenza di  $\alpha$  da CO non è lineare. Il problema è legato al fatto che non si va a considerare la variazione cilindro-cilindro e ciclo ciclo.



(2)

## FORMAZIONE HC NEI MOTORI SI

**IDROCARBURI:** sono ciò che uscirà allo scarico del motore con uno strumento chiamato FID (Flame ionization detector). Essi sono una specie chimica non ben definita derivante dall'incompleta combustione degli HC costituenti il combustibile. Essi sono dei composti organici.

Si distinguono

- THC: numero di idrocarburi totali
- NMHC: numero di idrocarburi non metanici
- $\text{MHC} \equiv \text{CH}_4$ : numero di idrocarburi metanici

Le emissioni di idrocarburi totali (THC) costituiscono un indice significativo dell'inefficienza di combustione del motore ma non necessariamente delle emissioni inquinanti del motore. Gli NMHC sono più o meno reattivi ma non hanno un grande impatto in termini di gas serra.  $\text{CH}_4$  è scarsamente reattivo, tuttavia è un gas serra.

- $\text{NMOG}$  (composti organici non metanici):  $\text{NMHC} + \text{composti organici ossigenati}$ .

PER I MOTORI A BENZINA E GASOLIO:  $\text{MHC} \approx 0 \Rightarrow \text{THC} \approx \text{NMHC}$ ;  $\text{CDE} \approx \text{MCO}_2$

PER I MOTORI A METANO:  $\text{NMHC} \approx 0 \Rightarrow \text{THC} \approx \text{MHC}$

- MIR: maximum incremental reactivity: l'indice è una misura del massimo aumento di formazione dell'ozono dovuto a ciascun  $\text{NMOG}$

$$\text{SR: reattività specifica} = \frac{\sum_j \text{NMOG}_j \cdot \text{MIR}_j}{\text{NMOG}}$$

Considerando la reattività delle diverse specie che compongono il carburante, si può vedere come varia questa ponendo attraverso lo scarico. Identifico tre zone: engine out (emissioni uscite allo scarico del motore), UF (under-floor catalyst), CC + UF (emissioni uscite dopo il sistema di trattamento) e TAILPIPE (emissioni uscite all'uscita dalla macchina).

Ponendo dal combustibile alle emissioni engine-out la percentuale in massa di alcani diminuisce mentre la percentuale in massa di alcheni ed aromatici (alta MIR) aumenta  $\Rightarrow$  la reattività specifica delle emissioni engine-out è maggiore rispetto a quella del combustibile di partenza. Con la combustione si ha che ciascuna specie chimica diviene in composti di peso molecolare inferiore: la decomposizione degli aromatici produce specie con minore MIR mentre il cracking termico degli alcani di peso molecolare più elevato produce non solo alcani più leggeri, ma anche alcheni con maggiore MIR. Le emissioni tailpipe indicano una riduzione maggiore per le specie più reattive per effetto della catalisi e una riduzione allo scarico sia della SR sia degli  $\text{NMOG}$ .

(1)

- combustibile liquido all'interno del cilindro che non evapora e non si miscela con aria sufficiente per ossidarsi.
- miscela di vapori di combustibile e aria che rimane incombusta all'interno della camera quando la frangina si estrinse prima di aver raggiunto le pareti.

**BLOWBY:** gas che fluisce dalla camera di combustione nel carter a causa della differenza di pressione attraverso i giochi tra stantuffo cilindro e seguento. È una minore parte del gas fresco presente negli interstizi e ne impedisce il ritorno nel cilindro.

• Formazione degli HC "engine-out"

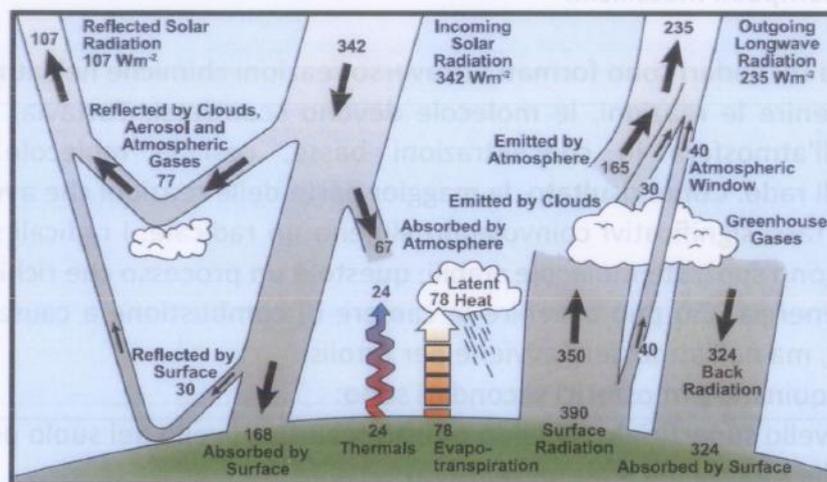
- ① Fuoriuscita della miscela aria combustibile incombusta dal volume degli interstizi e successivo mescolamento con i gas combusti: alcuni di questi HC si ossidano
- ② Diffusione dei vapori di HC dagli strati d'olio e dai depositi nei gas combusti: alcuni di questi HC si ossidano
- ③ Mescolamento dei gas provenienti dallo strato di seguento a parete e dallo seguento all'interno della camera con i gas combusti: alcuni HC non si ossidano
- ④ Processo di scarico spontaneo il quale trasporta una frazione degli HC incombusti dal cilindro al condotto di scarico
- ⑤ Processo di espulsione (scarico forzato) dovuto al moto dello stantuffo verso l'alto, il quale trasporta una frazione di HC incombusti dal cilindro al condotto di scarico
- ⑥ Gli HC incombusti che entrano dal cilindro si mescolano con i gas di scarico caldi: una frazione di questi HC si ossida nel condotto di scarico.

- Lo smog fotochimico (dovuto a reazioni avviate dai raggi solari con i composti organici emessi dallo scarico);
- Le piogge acide (dovute alla presenza di zolfo nei carburanti che comporta un pH minore di 5,7)

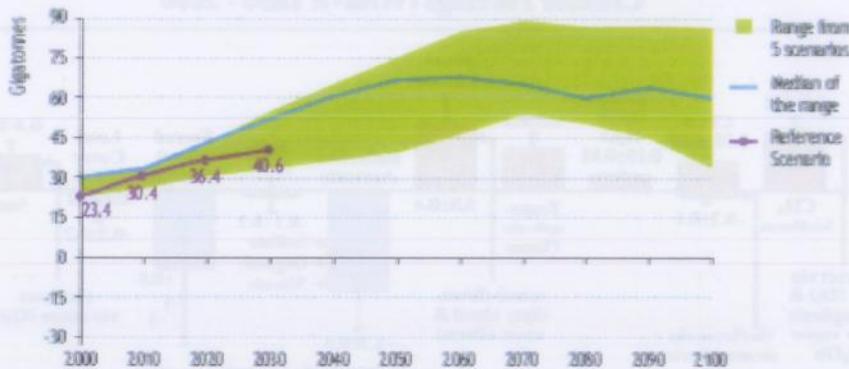
Sostanze chimiche artificiali industriali (CFC che rubano atomi all'ossigeno e riducono lo strato di ozono) e inquinanti (NOx) possono anche ridurre lo strato di ozono nella stratosfera ("buco dell'ozono").

## EFFETTO SERRA

La media del clima sulla Terra è determinata energia in arrivo dal sole e dalle proprietà della terra e della sua atmosfera, cioè la riflessione, l'assorbimento e l'emissione di energia all'interno dell'atmosfera e in superficie. Le proprietà dell'atmosfera e della superficie sono importanti e possono essere influenzati da una valutazione del clima. I cambiamenti si sono verificati in diversi aspetti dell'atmosfera e della superficie, che alterano il bilancio energetico globale della Terra e ciò può quindi causare un cambiamento del clima. Tra questi ci sono l'aumento delle concentrazioni di gas serra che agiscono principalmente per aumentare l'assorbimento atmosferico di radiazione uscente, e gli aumenti di aerosol (particelle sospese nell'aria microscopiche o gocce) che agiscono riflettendo e assorbendo la radiazione solare in arrivo e modificare le proprietà radiative delle nuvole. Tali cambiamenti provocano una forzatura radiativa del sistema climatico. La 'Forzante radiativa' è una misura dell'influenza che un fattore ha nell'alterare il bilancio di energia in entrata e in uscita nel sistema Terra-atmosfera; è un indice dell'importanza che ha un fattore come potenziale meccanismo di cambiamento climatico. Esso si considera positivo se tende a riscaldare la superficie, mentre è negativo se tende a raffreddarlo. I valori di Forzante radiativa sono di solito relativi agli anni precedenti a1750, e sono espressi in Watt per metro quadrato ( $Wm^2$ ) e si riferiscono ad un valore medio globale e annuale.



**Figure 16.16 • Energy-related CO<sub>2</sub> emissions in the Reference Scenario to 2030 compared with other published scenarios to 2100**



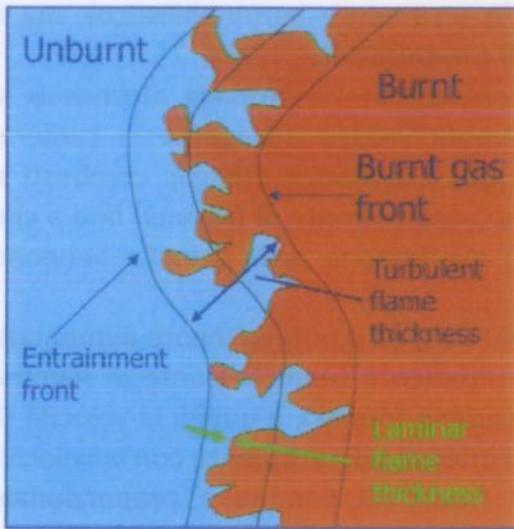
Note: Shaded area gives the ranges taken from five scenarios published since 2001. Some of these included emissions of non-energy CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases.  
Sources: IPCC (2007); Nakicenovic (2007) and IEA analysis.

## COMBUSTIONE NEI MOTORI SI

Nei motori ad accensione comandata, si usano combustibili a bassa reattività come la benzina, gas naturale compresso (CNG), Gas di petrolio liquefatto (GPL). Tali combustibili possono essere miscelati con l'aria per formare una miscela aria/carburante omogenea, e poi compressi nel cilindro motore fino a raggiungere temperature di circa 700K e pressioni circa 20-40 bar, senza accensione spontanea. Questo comportamento può essere spiegato sulla base delle caratteristiche della molecola combustibile: gli HC utilizzati nei motori ad accensione comandata sono caratterizzati da una catena corta, compatta e molecole con struttura rigida (come CH<sub>4</sub> per il metano, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> e C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> per il GPL, miscela di idrocarburi che può essere rappresentata da 2,2,4 metil-pentano o iso-ottano della benzina C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) per cui, anche a temperature e pressioni elevate, il tempo necessario per avviare il processo di combustione attraverso le reazioni preliminari con processi esotermici e di ossidazione, è piuttosto lungo. Nei motori ad accensione comandata il processo di combustione può quindi essere avviato solo con una sorgente esterna, ad esempio una scintilla elettrica.

Tuttavia, questo concetto non deve essere confuso con la capacità di un combustibile liquido di evaporare parzialmente a temperatura e pressione ambiente e formare una miscela combustibile con l'aria circostante; capacità, che è invece piuttosto alta per la benzina, e determina il pericolo di esplosione per i carburanti stoccati nei serbatoi se è fornita una fonte esterna di accensione (come una scintilla).

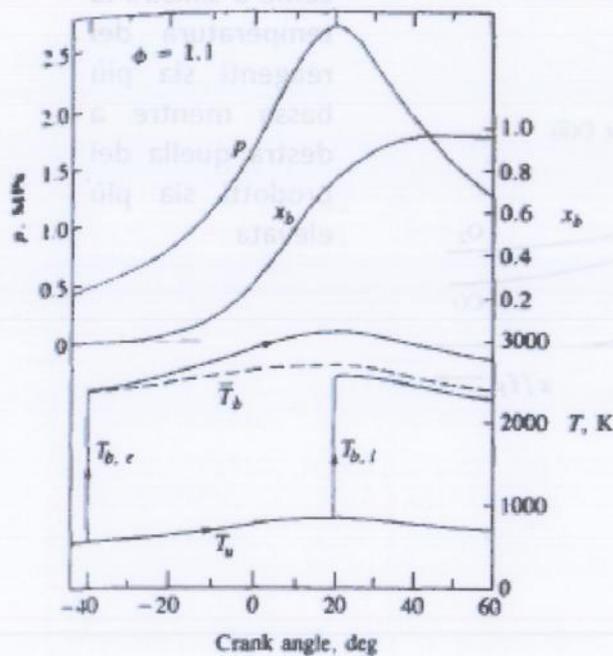
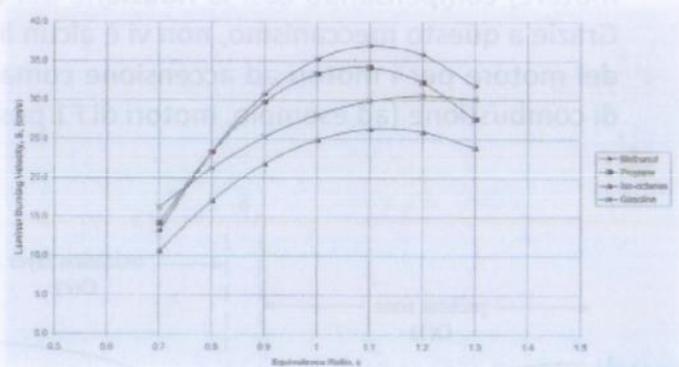
L'energia aggiunta alla miscela dalla scarica elettrica della scintilla è piccola (tipicamente 10 mJ) se confrontata con l'energia che verrà sprigionata dall'intero



Il fronte di fiamma è corrugato; ciò è vantaggioso perché mi permette di intrappolare una maggiore quantità di aria.

Courtesy of Mahle Powertrain Ltd. and University of Leeds

Per effetto della turbolenza la velocità di combustione aumenta di circa 50 volte

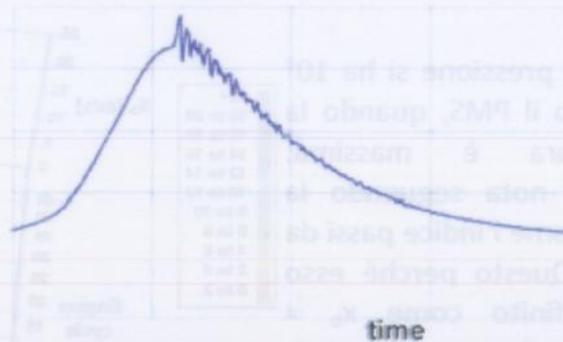


Dal grafico si vede che conviene lavorare in corrispondenza di una miscela stechiometrica o lievemente ricca per avere la massima velocità di combustione

combustione, che vengono trasmesse attraverso la struttura del motore con l'ambiente circostante, producendo un rumore caratteristico chiamato "knock" e provocando gravi danni al motore a causa di sollecitazioni di fatica termica.

Per evitare il verificarsi di un urto, il motore SI deve sottostare a diverse limitazioni, concernenti la

lunghezza del percorso della fiamma (che limita il diametro massimo del cilindro a circa 100 mm), la massima temperatura ammissibile e la pressione dell'end gas (che limitano il rapporto di compressione massimo del motore a circa 11, e il livello di sovralimentazione massimo a 2 bar).



**GLI INQUINANTI PRIMARI EMESSI DAI MOTORI AD ACCENSIONE COMANDATA SONO:**

- monossido di carbonio CO (1-2% in vol. o 100 g/kg carburante)
- idrocarburi incombusti HC (103 ppm vol o 10 g/kg carburante)
- ossidi di azoto NO<sub>x</sub> (103 ppm vol o 10 g/kg carburante)
- particolato (di solito trascurabile) (PM) e SO<sub>x</sub>, a causa dell'utilizzo di miscela quasi stechiometrica e basso tenore di zolfo del carburante, rispettivamente.

La formazione di CO è dovuta alla combustione incompleta causata dall'uso di miscele ricche di combustibile ( $\alpha < 1$ ). La dissociazione di CO<sub>2</sub> che si verifica a temperature elevate (> 1900K) può contribuire in modo significativo.

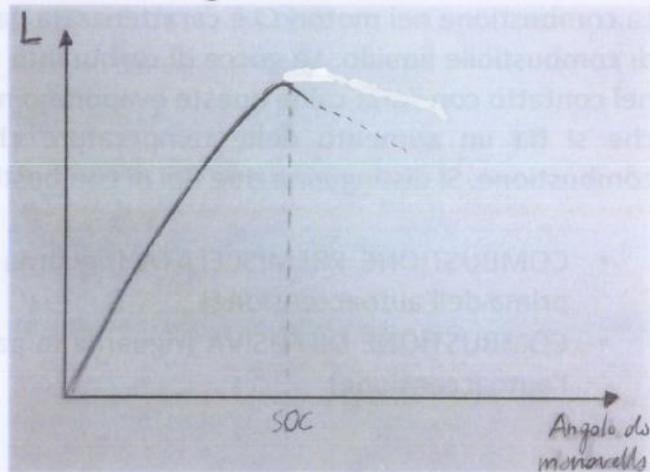
La formazione di NO<sub>x</sub> (NO e NO<sub>2</sub> miscela) è il risultato di alte temperature (> 2000K) e dell'ossidazione dell'azoto, che è parte dell'aria di aspirazione. La formazione di NO avviene dove i gas hanno temperature elevate, dietro il fronte di fiamma: maggiore è la temperatura dei gas combusti e la disponibilità di ossigeno, maggiore è il tasso di formazione di NO.

Gli HC (idrocarburi incombusti o parzialmente bruciati comprese diverse specie chimiche) sono prodotti da una serie di fenomeni tra cui l'intrappolamento della miscela negli interstizi, nello strato di spegnimento della fiamma e nella miscela assorbita dallo strato di olio sulla superficie della canna.

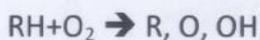
dovuta al fatto che, a causa della resistenza aerodinamica, il combustibile si accumula in corrispondenza della punta del getto. La penetrazione del getto avviene fino in prossimità della zona azzurra; oltre questa zona mi trovo al di sotto del limite di infiammabilità della miscela e si registra la generazione di HC per overleaning o overmixing.

Con riferimento al grafico a destra si nota che quando s'interrompe l'iniezione si verifica anche la chiusura dello spillo dell'iniettore. Si ha così una diminuzione di pressione nel sacco dell'iniettore, una polverizzazione peggiore e di conseguenza goccioline più grandi, che faranno più fatica ad evaporare. Quando s'interrompe l'iniezione, a causa della conservazione della quantità di moto, il getto richiama una certa quantità di aria dall'ambiente circostante. Lo svantaggio risiede nel fatto che si ha una produzione di HC a causa dell'undermixing dovuto alla presenza di gocce di grosse dimensioni.

Gli HC vengono quindi prodotti per undermixing all'inizio del getto e per overmixing all'estremità del getto. Il fenomeno di undermixing diventa critico in condizioni di pieno carico, si accentua al termine dell'iniezione quando si chiude l'iniettore e si può verificare un gocciolamento in camera e quando il combustibile impattando con la parete fredda diventa liquido. Il fenomeno di overmixing invece diventa critico in condizioni di basso carico.



Dal grafico si nota che il massimo della penetrazione viene raggiunto appena prima dello start della combustione. La penetrazione massima della fase liquida è controllata dal fenomeno di evaporazione dipendente a sua volta dal mescolamento dell'aria. Prima dello start della combustione si hanno delle reazioni di Chain-Branching che portano all'esplosione termica. Queste partono nella zona marrone del primo grafico e sono reazioni esotermiche che causano un lievissimo aumento della temperatura oltre ad una lieve luminosità.



O e OH vengono chiamati radical-pool

Considerando la camera di combustione di un diesel si nota la presenza di spegnimento quando il getto incontra la parete fredda. Il getto viene emesso in modo simmetrico rispetto all'asse.

A contatto con la parete si generano delle scorie di ossigeno. La miscela in corrispondenza della parete non si accende perché finiva l'ossigeno.

A Dalla figura si vede che in corrispondenza di un ritardo pari a  $1^\circ$  dopo l'iniezione nella camera si ha solo un getto di liquido. L'aria viene trascinata e si ha la formazione di aria e gocce di gasolio. Tutte le zone che circondano i disegni del getto contengono aria.

B La miscela aria combustibile inizia a svilupparsi nell'intorno delle pareti del getto (si vede la presenza di uno strato di gocce liquide circondato da goccioline di aria).

C Il getto di liquido raggiunge la massima estensione e inizia a vaporizzare trascinando l'aria calda.

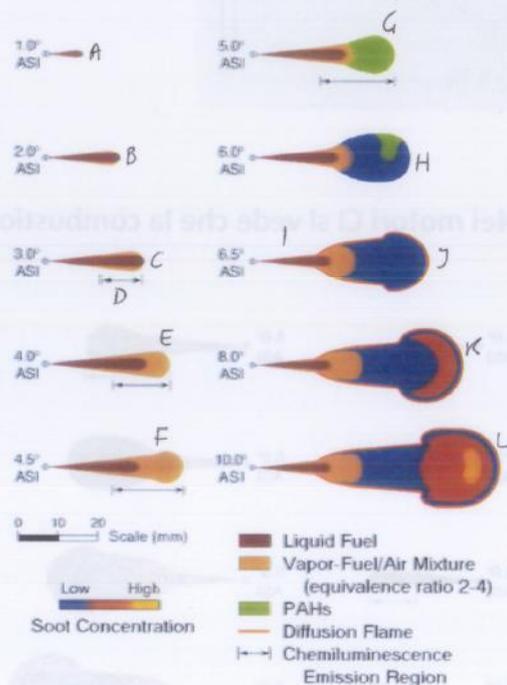
D Inizia a verificarsi il fenomeno della chemilluminescenza. Infatti analizzando il getto si nota la formazione di radicali che emettono fotoni nel campo del visibile.

E In questo punto si verifica l'avvio della COMBUSTIONE PREMISCELATA. La dosatura ha un valore dell'equivalence-ratio compreso tra 2 e 6, quindi è ricca e in seguito alla combustione si ha la produzione di CO, CO<sub>2</sub> (in quantità esigua), H, H<sub>2</sub> e composti con C<sub>7</sub>, C<sub>6</sub>, C<sub>5</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>.

In particolare le ultime due specie costituiscono quelli che vengono chiamati PAH (polycyclic aromatic hydrocarbon). Essi hanno legami carbonio-carbonio doppi o tripli, quindi più deboli del legame singolo e più semplici da rompere. Questi reagendo tra loro formano i soot-precursor (precursori delle particelle carboniose) chiamati HACA. I soot vengono considerati importanti poiché da essi ha inizio la formazione di particolato; una parte del particolato sono soot.

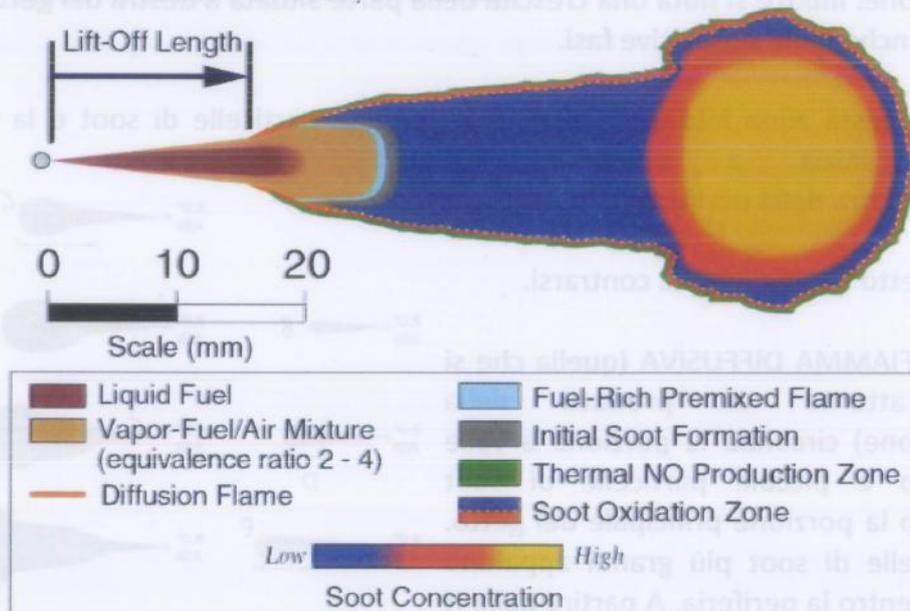
Inoltre essendo la miscela ricca non ho ossigeno perché tutto quello che avevo a disposizione è stato bruciato.

In corrispondenza del punto E si ha anche la massima penetrazione del getto. Questa è controllata dal fenomeno dell'evaporazione che dipende dal mescolamento dell'aria. Il picco viene raggiunto poco prima dello Start of combustion. Dopo il punto E si vede come il getto subisca una leggera contrazione.



La combustione della miscelazione controllata domina interamente. Si sviluppa il vortice di testa. La concentrazione di soot è alta in corrispondenza del vortice di testa. Le particelle di soot grandi si trovano in corrispondenza della testa del vortice, quelle di dimensioni medie si trovano lungo la periferia e quelle di dimensioni minori al centro.

\*From SAE 970873, J. Dec  
Lift-off. SAE 2001-01-0530, D. Siebers

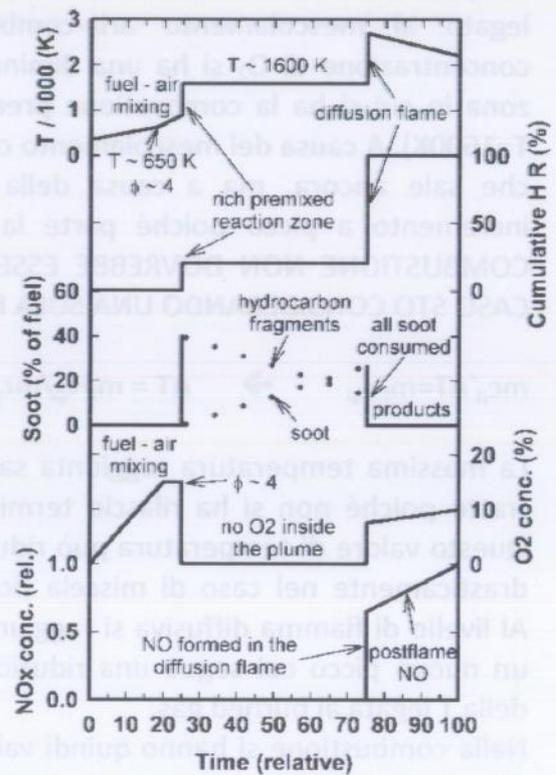


Dopo la fine dell'iniezione la maggior parte del soot prodotto formato inizialmente nella combustione è stato ossidato dall'attacco dei radicali OH alla periferia del getto. Prima della chiusura dell'iniettore, la velocità dell'ultima parte di combustibile uscente dall'iniettore può diminuire significativamente e avere problemi a raggiungere la parte principale del getto. Si può quindi verificare un'atomizzazione non perfetta che si traduce in un mescolamento povero che comporta un incremento e una crescita delle particelle di soot. Questa, formata lungo l'asse del getto è ancora presente alla fine del rilascio termico e ciò contribuisce alle emissioni di soot allo scarico. La formazione di CO si ha nella combustione premiscelata che però verrà ossidata a causa dell'interazione con la fiamma diffusiva. Lo schema considerato per la combustione nei motori CI vale solo nel caso di iniezioni singole o di iniezione principale, non vale però per l'iniezione pilota. In questo caso la zona dopo la combustione non darà origine al particolato, ma si avranno ossidi di azoto poiché la dosatura è prossima al valore stechiometrico.

Nella zona centrale del diagramma si nota la presenza di precursori delle particelle carboniose. Queste verranno prodotte in seguito finché arrivo in corrispondenza della fiamma diffusiva, quando viene rilasciato il potere calorifico non rilasciato in precedenza. Inoltre si nota un picco di aumento del combustibile in corrispondenza del quale si ha il consumo di tutte le particelle di soot. A questo punto inizia anche la formazione di ossidi di azoto perché sto per entrare nella zona verde delle fasi della combustione. Le temperature diminuiscono e la formazione di NO proseguirà con una velocità di ossidazione che finirà per congelarsi.

Per quanto riguarda il Cumulative Heat Release circa il 15% viene rilasciato nella fase premiscelata, mentre il resto in fase diffusiva.

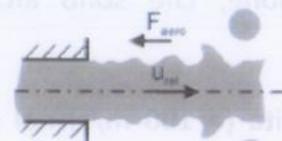
Riferendosi al soot i punti rappresentano la percentuale di precursori di particolato che vanno a formarsi, derivanti dalla frammentazione di HC che diminuiscono. Nella zona di fiamma diffusiva si ha l'ossidazione con formazione di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Gli ossidi di azoto si formano alla fine al livello della fiamma diffusiva. Possono inoltre essere presenti piccole quantità di NO<sub>x</sub> a livello di fiamma premiscelata a causa di meccanismi tipo il prompt. Considerando anche in questo caso un'iniezione pilota la formazione di NO<sub>x</sub> avverrebbe a livello di fiamma premiscelata caratterizzata da valori di equivalence-ratio pari a 1 circa.



LIFT-OFF LENGTH (H): essa rappresenta la distanza tra l'orifizio dell'iniettore e il principio della fiamma. È importante far affluire la maggiore quantità di ossigeno possibile all'interno della zona con miscela ricca per mandare avanti la combustione. L'aria può entrare dalla zona di lift-off che rappresenta l'unico tratto utile per intrappolare l'aria. La quantità di aria intrappolabile dipende dalle dimensioni di H e dal mescolamento. Più questa lunghezza è estesa, più tempo a disposizione è stato lasciato alla miscela per inglobare aria e omogeneizzarsi, il che porta ad una combustione frutto di dosaggi locali più vicini allo stechiometrico, e quindi, più puliti da particolato. In generale è possibile affermare che a distanze di lift-off minori, corrisponde una meno efficace miscela previa all'autoaccensione, che dà origine ad una combustione in cui gli elevati valori di dosaggio locale causano elevate formazioni di particolato e in generale ad una meno intensa liberazione di calore

rapporto tra queste due forze è misurato dal numero di Weber: la scissione si verifica solo quando le forze aerodinamiche sono prevalenti, il che avviene di solito per  $We > 12$ .

- **Low jet velocity:** la rottura è dovuta alla crescita instabile delle onde di superficie causata dalla tensione superficiale e si traduce in gocce più grandi del diametro del getto.
- **First wind-induced breakup regime:** come la velocità del getto cresce, le forze dovute al moto relativo del getto e l'aria circostante aumentano la forza di tensione superficiale, che porta alla formazione di gocce dell'ordine del diametro del getto.
- **Second wind-induced breakup regime:** un ulteriore aumento della velocità del getto si traduce in un dissolvimento dovuto alla divergenza del getto dopo una certa lunghezza a valle dell'ugello. In esso, la crescita instabile di onde a breve lunghezza d'onda indotta dal movimento relativo tra l'aria e il liquido circostante produce goccioline la cui dimensione media è molto inferiore al diametro del getto.
- **Regime di atomizzazione:** ulteriori aumenti della velocità del getto portano alla rottura nel regime di atomizzazione; dove avviene la rottura della superficie esterna del getto si verifica, o prima, il piano di uscita dell'ugello e genera goccioline il cui diametro medio  $D$  è molto più piccolo del diametro dell'ugello. Le interazioni aerodinamiche all'interfaccia liquido/gas sembrano essere un componente importante del meccanismo atomizzazione in questo regime.



growth of surface waves due to aerodynamic forces

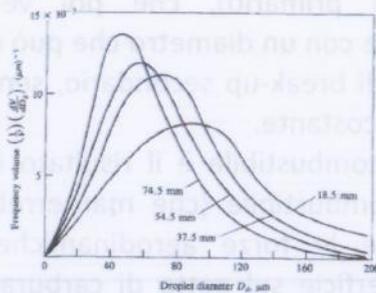


FIGURE 18-28 Droplet size distribution in diesel fuel spray injected through throttling pintle nozzle into quiescent room-temperature air at 11 atm. Nozzle opening pressure 9.9 MPa. Pump speed 500 rev/min. Droplets are sampled well downstream of injector at given radial distances from spray axis.<sup>24</sup>

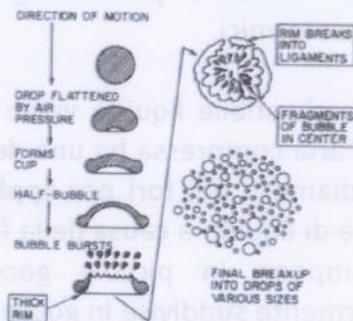
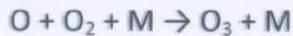
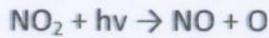
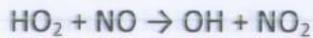
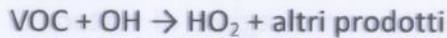


Figure 2.2 Breakup of a spherical drop by interaction with a

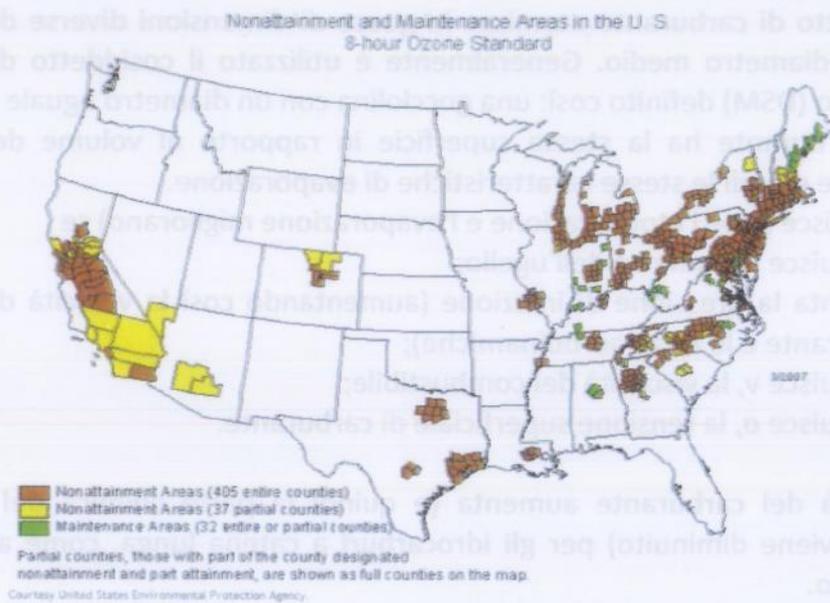
$$We_g = \frac{\rho_g v^2}{\sigma / D} = \frac{\rho_g v^2 D}{\sigma}$$

$$D_{SM} = \frac{\int D_d^3 dn}{\int D_d^2 dn} \equiv \frac{\sum_i N_i D_{d,i}^3}{\sum_i N_i D_{d,i}^2}$$

chimicamente interattive per descrivere le vie di degradazione del VOC. Un semplice schema è:



Nonattainment and maintenance areas in the U.S. 8-hour ozone standard

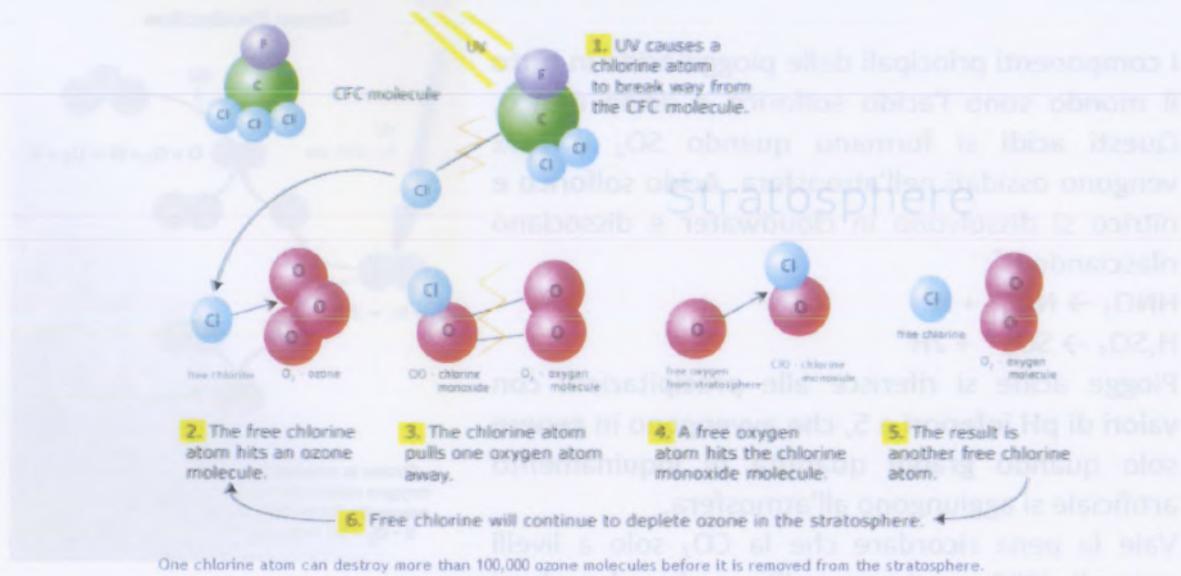


Prevailing winds in North America blow from west to east. Many areas downwind of large cities suffer from high ozone pollution.

Un aspetto importante di questo meccanismo è che NO<sub>x</sub> e OH agiscono come catalizzatori, cioè, essi accelerano il tasso di produzione di ozono senza essere loro stessi consumati. Invece essi si convertono rapidamente passando da NO a NO<sub>2</sub> e da OH a HO<sub>2</sub>.

Si ha lo smog fotochimico quando NO<sub>x</sub> e VOC reagiscono in presenza di radiazione solare per formare l'ozono a livello del suolo, PAN (nitrati Peroxyacyl) e aldeidi. La radiazione solare promuove anche la formazione di particelle di aerosol secondari dall'ossidazione di NO<sub>x</sub>, COV, e SO<sub>2</sub>. Lo smog fotochimico si sviluppa tipicamente in estate (quando la radiazione solare è più forte) in condizioni stagnanti promosse da sbalzi di temperatura e venti deboli. Lo smog fotochimico è un agente ossidante e si tratta di un problema urbano onnipresente nel mondo sviluppato e che spesso ammantava ampie regioni popolate come la costa orientale degli Stati Uniti e l'Europa occidentale per lunghi periodi in estate.

### Chlorine-catalyzed ozone depletion mechanism



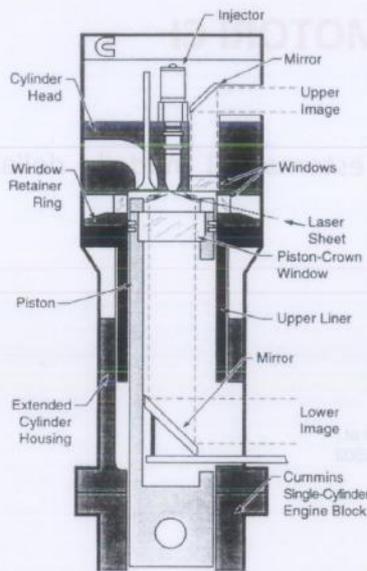


Table 1 Specifications of the Optical Access Engine

Engine base type	Cummins N-14 Di Diesel
Cycle	4-stroke
Number of intake valves	2
Number of exhaust valves	1†
Intake Valve Opening	17° BTDC Exhaust†
Intake Valve Closing	195° ATDC Exhaust†
Exhaust Valve Opening	235° BTDC Exhaust†
Exhaust Valve Closing	27° ATDC Exhaust†
Bore	139.7 mm (5.5 in)
Stroke	152.4 mm (6.0 in)
Combustion chamber diameter	97.8 mm (3.85 in)
Displacement	34 liters (142 in <sup>3</sup> )
Connecting rod length	304.8 mm (12.0 in)
Piston pin offset	None
Compression ratio	10:1 or 10.5:1 (See Table 3)
Simulated compression ratio	16:1

† In this optically accessible engine, one of the two exhaust valves of the production cylinder head was replaced by a window and pin-aspire.

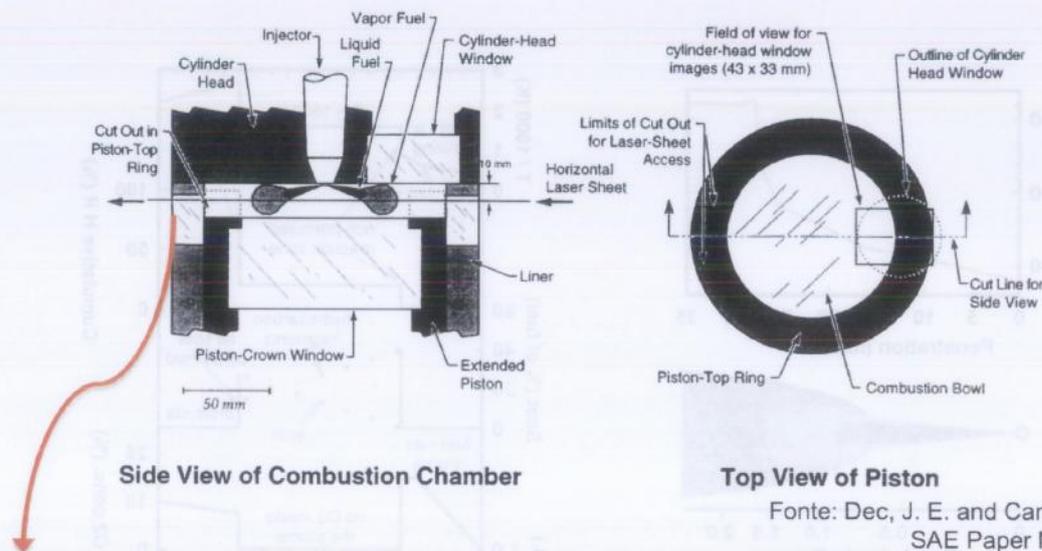
‡ All valve timings correspond to the crankangle when the valve first starts to move from fully closed.

Table 3 Base Engine Operating Conditions

Engine speed	1000 rpm
Water temperature	95° C
Oil temperature	95° C
Firing rate	Every 10th cycle
Start of injection	-11.5° BTDC
Peak injection pressure	88 MPa
Motored TDC pressure	5.0 MPa
Estimated motored TDC temperature	950 K
Estimated motored TDC density	18.5 kg/m <sup>3</sup>
<b>End-on illumination - 2 laser-access 'cut-outs'</b>	
Compression ratio	10:1
Intake air temperature	433 K (160° C)
Intake air pressure	206 kPa (absolute)
<b>Back-side illumination - 1 laser-access 'cut-out'</b>	
Compression ratio	10.5:1
Intake air temperature	420 K (137° C)
Intake air pressure	192 kPa (absolute)

Fonte: Dec, J. E. and Canaan, R. E., SAE Paper No. 980147

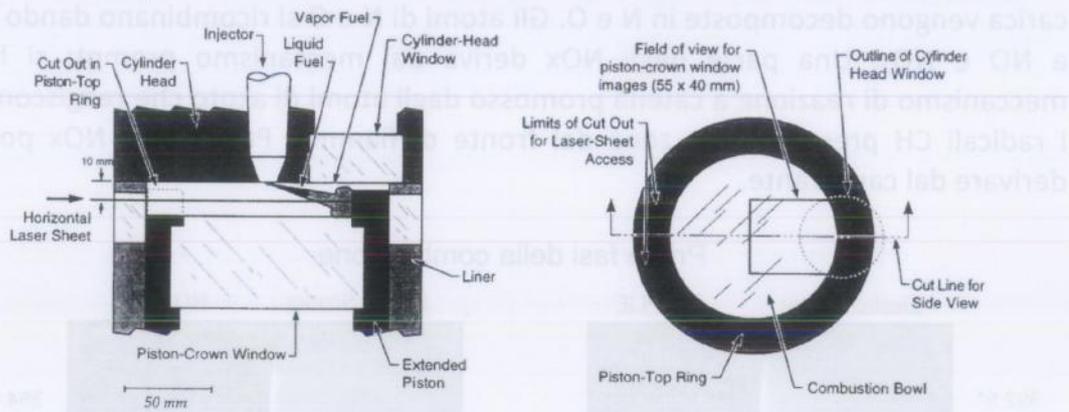
### Accesso ottico per misure NO PLIF durante le prime fasi della combustione



Vano per inserimento della telecamera con filtro passa banda. Questo dovrà essere posizionato in corrispondenza di una certa lunghezza d'onda. Dalla parte opposta arriva un raggio luminoso centrato sulla lunghezza d'onda degli NO in modo da ottenere l'emissione di fotoni

La tecnica utilizzata per l'analisi degli NOx è detta NO PLIF: fluorescenza indotta dalla luce del laser. Questo fenomeno si basa sul fatto che, quando un atomo viene eccitato lungo la sua frequenza propria, questo emette un fotone. L'eccitazione deriva dalla luce del laser che risulta pulsante. Inducendo quindi fluorescenza laddove vengono individuati fotoni si identifica la presenza di NOx. Durante il processo di combustione per effetto

Accesso ottico per misure NO PLIF durante le successive fasi della combustione



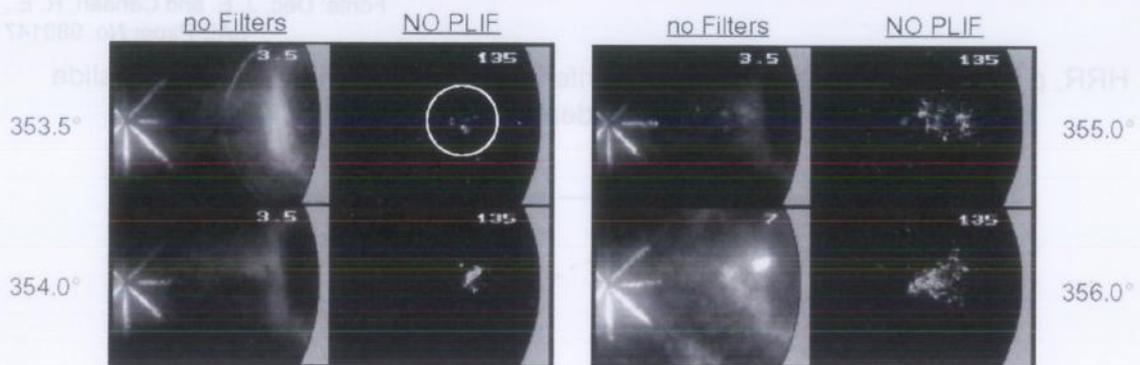
Side View of Combustion Chamber

Top View of Piston

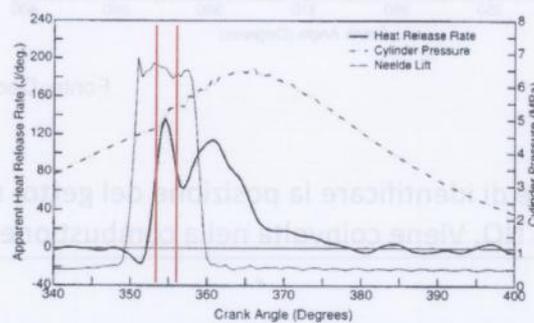
Fonte: Dec, J. E. and Canaan, R. E., SAE Paper No. 980147

In questo caso considero un solo getto di combustibile e rilevo da sotto l'immagine. Il problema del particolato risiede nel fatto che esso assorbe radiazione luminosa.

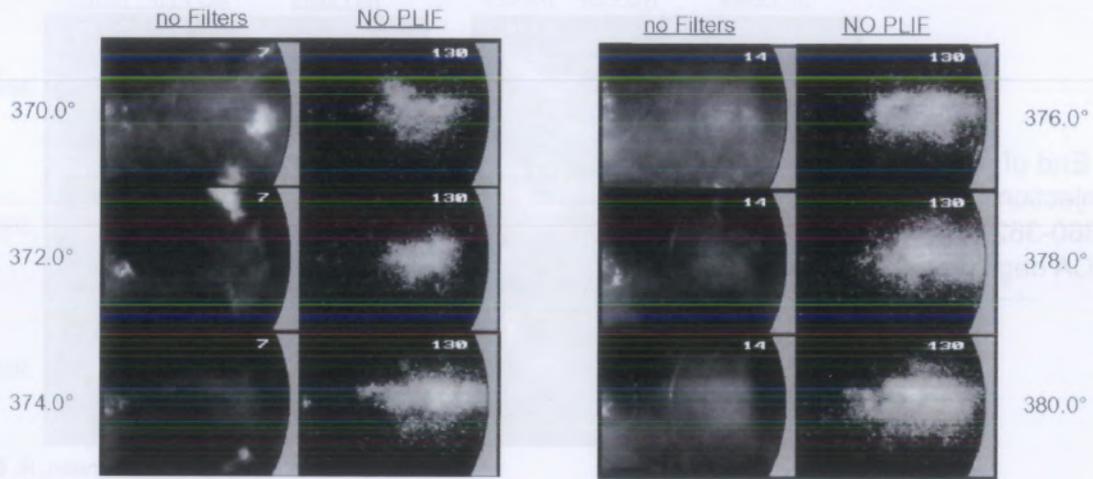
Prime fasi della combustione (per confronto con il caso precedente)



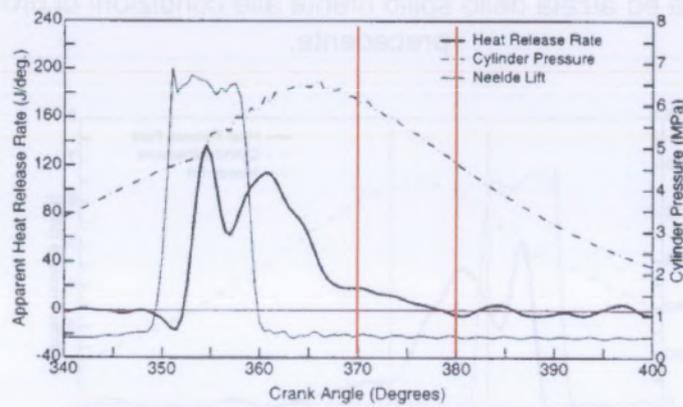
HRR, p in camera ed alzata dello spillo riferite alle condizioni di prova della slide precedente.



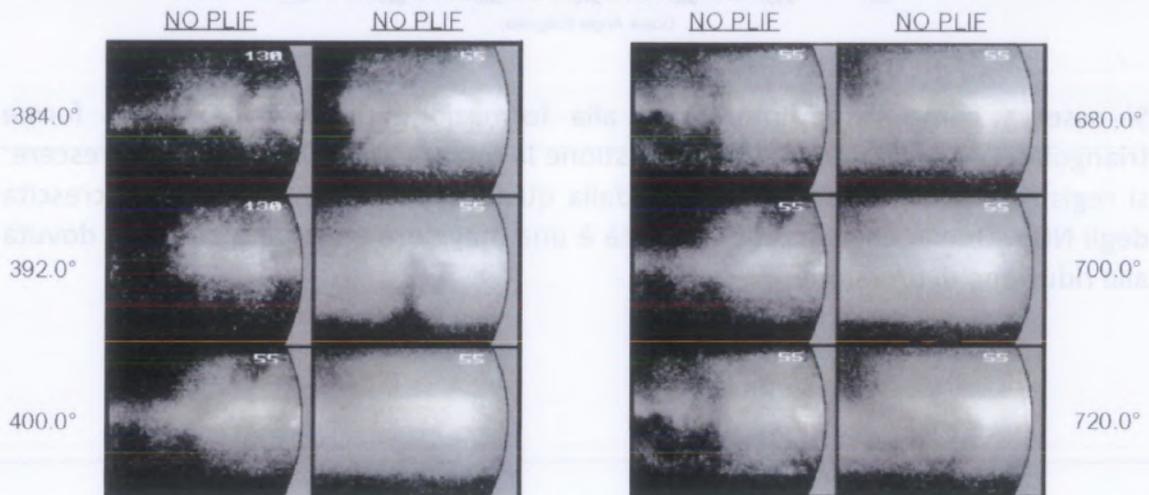
### Fasi successive della combustione

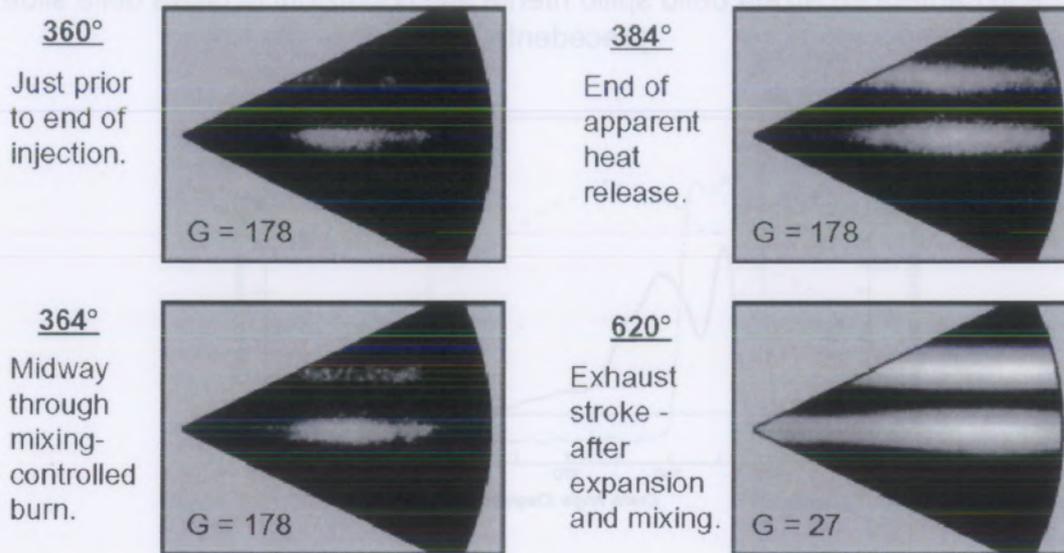


HRR, p in camera ed alzata dello spillo riferite alle condizioni di prova della slide precedente.

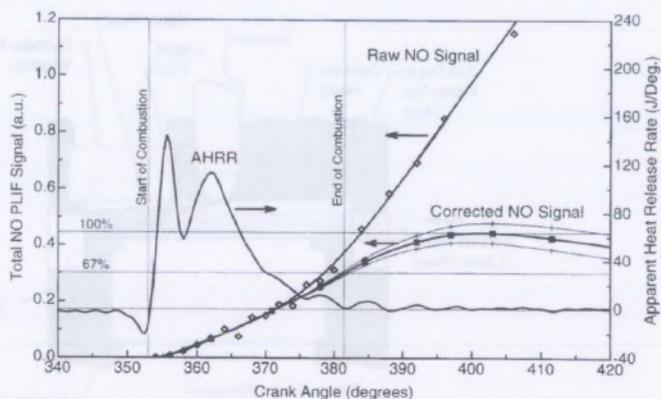
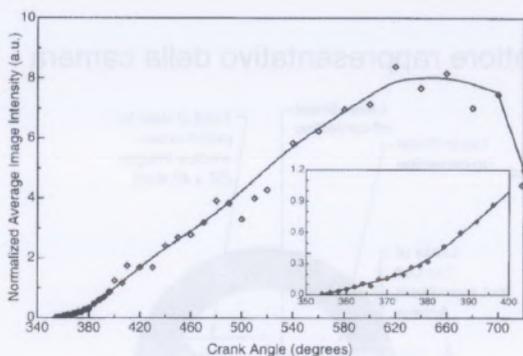


### Fasi successive della combustione





Si nota dalle immagini che gli NO si formano nelle zone dove la combustione è diffusiva e una parte di essi si forma dopo la combustione diffusiva.

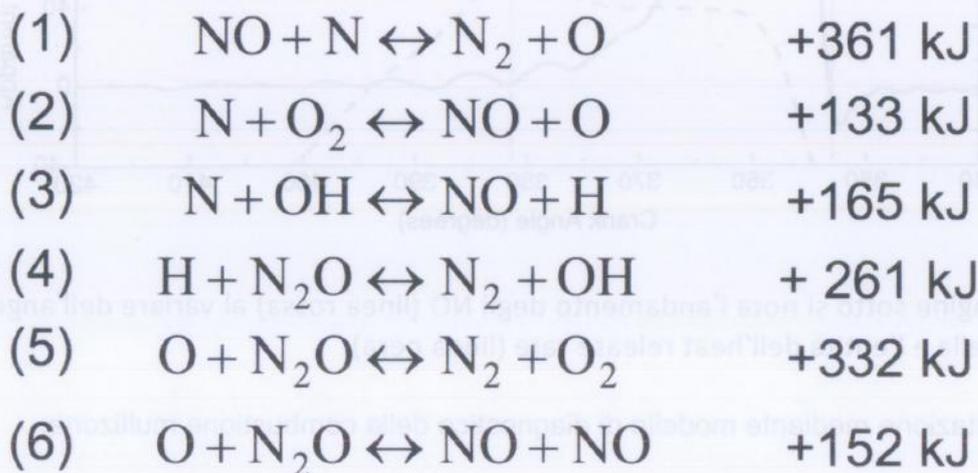


### MECCANISMI DI FORMAZIONE DEGLI NOx

Durante il processo di combustione, per effetto delle alte temperature (meccanismo termico) le molecole di O<sub>2</sub> ed N<sub>2</sub>, presenti nella carica e provenienti principalmente dall'aria aspirata dal motore, vengono decomposte in O ed N. Questi ultimi, a loro volta, si ricombinano dando luogo principalmente a NO ed NO<sub>2</sub>.

Inoltre, una parte degli NOx derivano dal cosiddetto meccanismo "prompt": un meccanismo di reazione a catena promosso dagli atomi di azoto che ragiscono con i radicali CH presenti nella zona del fronte di fiamma. Infine, parte degli NOx possono derivare dal combustibile. Prima che il combustibile entri nella zona della fiamma, l'azoto chimicamente legato ad esso si trasforma in radicali o composti contenenti il gruppo CN che, a loro volta, vengono ulteriormente ossidati per formare NO nella zona della fiamma.

Le sei equazioni proposte per il modello sono:

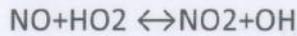


La costante di velocità della reazione è data da  $k = aT^b e^{-A/RT}$

Le sei equazioni precedenti permettono di distinguere due meccanismi di formazione termica degli NO:

- il principale meccanismo di formazione degli NO è costituito dalle equazioni (1)-(3) ed è detto meccanismo termico di Zeldovich-Keck, detto anche meccanismo di Zeldovich esteso (EZM: Extended Zeldovich Mechanism).
- il secondo meccanismo termico, descritto dalle equazioni (4)-(6), coinvolge come intermediario l'N<sub>2</sub>O.

rapidamente convertito in NO<sub>2</sub>:



In seguito dovrebbe avere luogo la riconversione

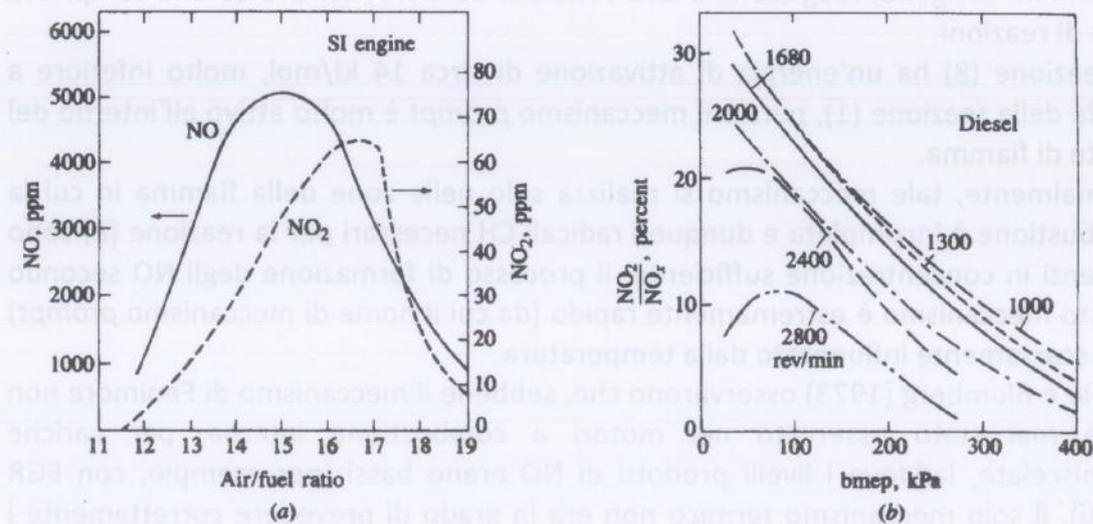
da NO<sub>2</sub> a NO:



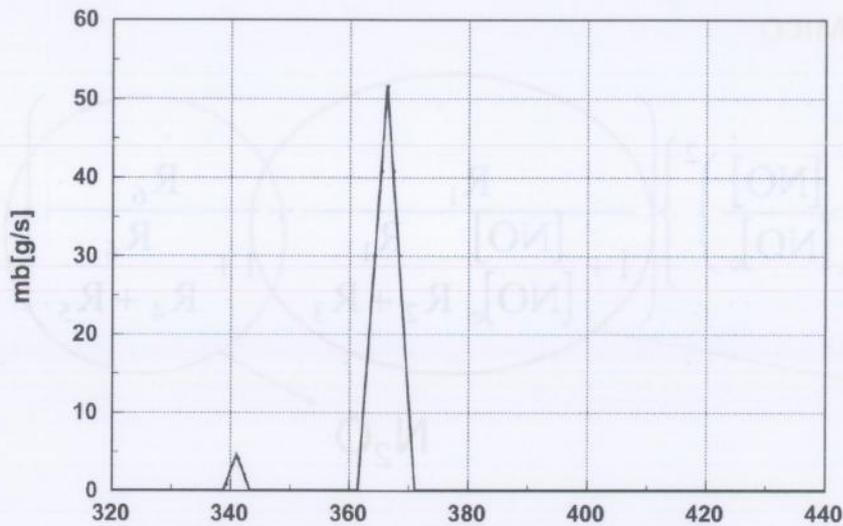
Quest'ultima reazione può essere congelata per effetto del mescolamento con un fluido più freddo (nei Diesel si ha aria in eccesso e quindi gas combusti a temperature inferiori).

Il meccanismo è coerente con il fatto che i più elevati rapporti NO<sub>2</sub>/NO nei Diesel si trovano ai bassi carichi, laddove sono più numerose in camera le regioni più fredde che possono congelare la decomposizione dell'NO<sub>2</sub>.

Dai grafici si può notare come la quantità di NO<sub>2</sub> prodotta sia nettamente inferiore alla quantità di NO.



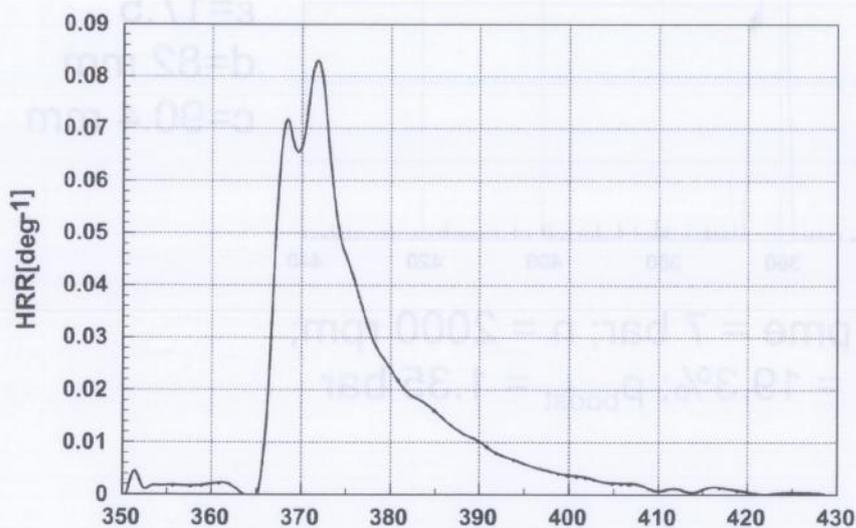
**FIGURE 11-6**  
 (a) NO and NO<sub>2</sub> concentrations in SI engine exhaust as function of air/fuel ratio, 1500 rev/min, wide-open throttle; (b) NO<sub>2</sub> as percent of total NO<sub>x</sub> in diesel exhaust as function of load and speed.<sup>5</sup>



$iV=1909 \text{ cm}^3$   
 4 cilindri  
 $\epsilon=17.5$   
 $d=82 \text{ mm}$   
 $c=90.4 \text{ mm}$

$\lambda = 1.7$ ;  $p_{me} = 7 \text{ bar}$ ;  $n = 2000 \text{ rpm}$ ;  
 $EGR_m = 19.3\%$ ;  $p_{boost} = 1.35 \text{ bar}$

In questo grafico si considera l'andamento della pressione in camera: si nota un primo picco dovuto alla compressione della miscela seguito da un altro picco dovuto alla combustione. È importante che i picchi non siano troppo elevati per non avere la formazione di una quantità eccessiva di NO.



$iV=1909 \text{ cm}^3$   
 4 cilindri  
 $\epsilon=17.5$   
 $d=82 \text{ mm}$   
 $c=90.4 \text{ mm}$

$\lambda = 1.7$ ;  $p_{me} = 7 \text{ bar}$ ;  $n = 2000 \text{ rpm}$ ;  
 $EGR_m = 19.3\%$ ;  $p_{boost} = 1.35 \text{ bar}$

essere:

- Compressione della carica prima della combustione;
- Compressione dei gas combusti successivamente alla combustione;
- Scambio termico per irraggiamento nella zona in prossimità della fiamma diffusiva.

Infine, in certe condizioni di funzionamento, può diventare rilevante la chimica del meccanismo 'prompt' a livello della fiamma premiscelata e di quella diffusiva. La fase di combustione premiscelata produce un rapido e spesso sostanziale aumento della pressione in camera nell'intorno del TDC. Uno degli effetti di tale aumento di temperatura è quello di comprimere la carica (aria + EGR) presente nel cilindro, aumentandone così la temperatura. La maggiore temperatura della carica produrrà pertanto un aumento della temperatura della fiamma diffusiva e dei gas adiacenti, determinando una maggiore produzione di NOx.

L'intensità dell'effetto descritto varierà in funzione di:

- intensità della combustione premiscelata;
- volume in corrispondenza del TDC.

L'effetto sarà pertanto più accentuato in motori di piccola cilindrata con elevati rapporti di compressione, dove la combustione in fase premiscelata coinvolge una frazione importante del combustibile iniettato (in quanto limitazioni tecnologiche spesso non consentono di adeguare al meglio la legge di iniezione). Nei motori diesel, l'ambiente che circonda i gas combusti è altamente eterogeneo ed il mescolamento tra burned-gas e la carica più fredda nel cilindro è estremamente complesso da simulare. Tutto quello che si può dire nell'ambito di un approccio semplificato è che la temperatura della fiamma sarà compresa tra la temperatura adiabatica di combustione, calcolata a partire dalla carica compressa fino al TDC, e la temperatura raggiunta dalla prima porzione di carica bruciata in corrispondenza del picco di pressione in camera, supponendo che tale porzione bruci adiabaticamente e sia poi compressa adiabaticamente fino al picco di pressione.

Queste particelle sono in grado di irraggiare e scambiare calore con le pareti; il loro effetto è quindi quello di abbassare la temperatura complessiva in camera a causa dello scambio termico con le pareti.



- Notes:
- EINO = Emission Index dell'NO (indica la presenza di una massa di NO)
  - La temperatura indicata in alto nell'area delle curve raggiunte dalla curva di EINO se non avviene la combustione
  - La start of combustion dipende dalla start of injection

I risultati indicano che la correlazione tra emissioni specifiche di NOx e temperatura adiabatica di combustione ( $T_{ad}$ ) non è diretta per la temperatura di aspirazione ( $T_{inlet}$ ) inferiore e per SOI ritardati rispetto al TDC (lo stesso si potrebbe verificare per la massima temperatura adiabatica dei burned gas ( $T_{max}$ )). In particolare, si osserva che al diminuire della  $T_{inlet}$  le emissioni di NOx tendono a non variare dopo aver raggiunto un minimo, mentre per SOI molto ritardati, prossimi al limite del ritardo, si registra il cosiddetto "NOx bump", se no in camera la presenza di particolate può succedere che diminuisca la temperatura adiabatica di fiamma ma non della cella. In certe condizioni si avrà quindi una variazione della temperatura con la quale posso giustificare un aumento della concentrazione di NO.

Poiché regolare la produzione di NOx del motore con il ritardo con cui inietta il combustibile, se il ritardo con cui inietta è grande avrà una grande quantità che brucia per combustione premiscelata e una bassa quantità che brucia per combustione diffusa. Se inietta con un ritardo contenuto poco carburante brucia per combustione premiscelata e molto per combustione diffusa (soluzione preferibile per ridurre le emissioni di NOx). Maggiore è il tempo che il combustibile fa per miscelarsi con l'aria, più rapida sarà la combustione. In termini di combustione vi è la presenza di SOI in corrispondenza della fiamma diffusa.

cilindro continua a salire, anche i gas combusti tendono a entrare nella regione dell'interstizio.

Quando la pressione scende durante l'espansione i gas rifluiscono dagli interstizi nel cilindro. La massa di miscela incombusta espulsa dagli interstizi può essere valutata come:

$$m_{ucr} = V_{cr}(\rho_{cr} p_{max} - p_{cr} p_{exh}) = V_{cr}((p_{max}/RT_{cr} - p_{max}) - (p_{exh}/RT_{cr} - p_{exh}))$$

dove  $V_{cr}$  rappresenta il volume degli interstizi,  $\rho_{cr}$  la densità all'interno degli interstizi in corrispondenza della pressione massima del ciclo  $p_{max}$  e della pressione durante lo scarico  $p_{exh}$ . La temperatura dei gas presenti negli interstizi farà riferimento alla temperatura di parete pari a circa 400-420K. La massa degli unburned gas ( $T=900-1000K$ ) sarà costituita da aria, combustibile e gas residui.

$$m_{ucr} = m_{acr} + m_{fcr} + m_{rcr} = m_{fcr}(\alpha + 1 + \alpha')$$

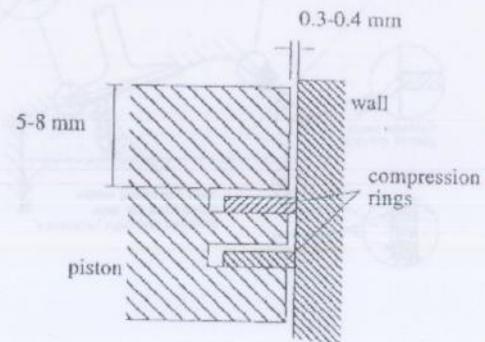
Supponendo che l'intera massa di combustibile contenuta negli interstizi sfugga all'ossidazione:

$$m_{HCcr} = V_{cr}((p_{max}/RT_{cr} - p_{max}) - (p_{exh}/RT_{cr} - p_{exh}))1/(\alpha + 1 + \alpha')$$

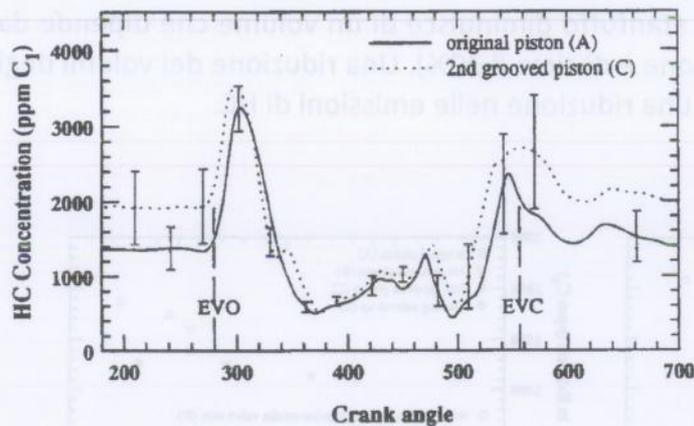
Per effetto dell'elevato rapporto superficie-volume degli interstizi, il gas in essi si raffredda rapidamente fino a valori prossimi alla temperatura delle pareti.

$$m_{HCcr} = V_{cr}/RT_w((p_{max} - p_{exh})1/(\alpha + 1 + \alpha'))$$

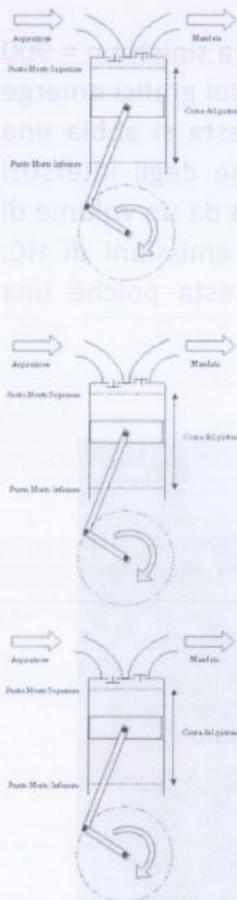
Perciò gli interstizi sono sorgenti di HC più importanti di quanto il loro volume relativo indichi: infatti la densità del gas negli interstizi è parecchie volte superiore alla densità del gas all'interno della carica. I limiti sulla riduzione degli interstizi sono imposti dai giochi richiesti dalla dilatazione delle parti metalliche adiacenti. I giochi radiali tra pistone e camicia in motori tipici commerciali sono di solito non inferiori a 0.4 mm a freddo. L'altezza dell'interstizio al di sopra del primo segmento è dell'ordine di 6 mm. La riduzione di questa altezza è limitata dalle tensioni nel materiale associate al movimento del segmento. Sia l'interstizio superiore che il secondo contribuiscono alle emissioni, ma il secondo in misura minore. Mentre gli effetti degli interstizi della candela e delle sedi valvole sembrano essere relativamente piccoli, la guarnizione della testa può contribuire in modo considerevole alle emissioni di HC.



## INTERSTIZI CILINDRO-STANTUFFO



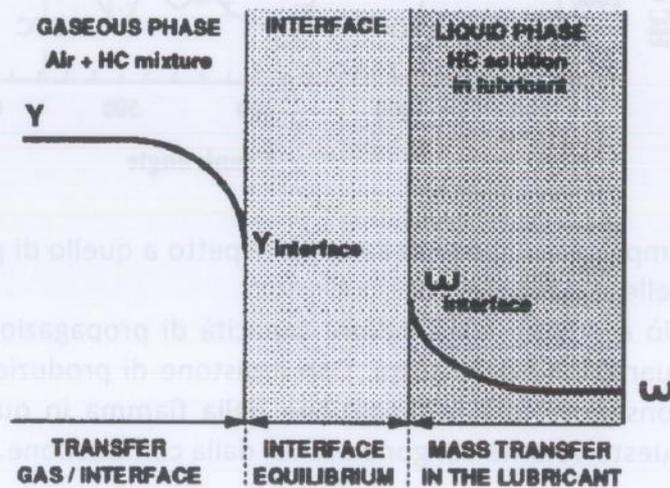
In corrispondenza del picco a sinistra si ha l'apertura della valvola di scarico e la parte che si considera del grafico è quella che va da circa 380° a 500° nella quale avviene lo scarico spontaneo. La seconda curva è relativa ad un pistone fresato con aumento degli interstizi. Si osserva un incremento di HC proprio in corrispondenza dello scarico forzato. Per eseguire queste misure è stata inserita una sonda all'uscita della testa motore sul cilindro.



Considero il legame tra la variazione del volume e la variazione degli HC prodotti. Analizzando e confrontando il modello utilizzato con i risultati si nota come nel modello si considerino i gas incombusti negli interstizi del cilindro, nei risultati i gas allo scarico. Considero ora la fase di espansione: all'interno della camera di combustione vi sono dei moti turbolenti, importanti in quanto generano macro-vortici ricchi di energia cinetica che progressivamente trasferiscono la loro energia a macro-vortici sempre più piccoli che vanno a migliorare la combustione. A causa di questi macro-vortici parte dei gas incombusti rilasciati sulla parete viene strappato dalla parete. Si nota quindi un assottigliamento dello strato a parete con parte dei gas che vengono portati all'interno della camera di combustione dove le temperature sono più alte rispetto a quelle delle pareti; ciò provoca una loro ossidazione quasi completa. Lo strato che non si ossida è quello che rimane a parete.

Nella successiva fase di scarico, con lo stantuffo che inverte il suo moto e la valvola di scarico che si apre, lo strato rimasto a parete viene praticamente raschiato dallo stantuffo che lo raccoglie in un vortice ricco di HC, trasportandolo allo scarico. Questi gas inoltre si mescolano ancora con i gas caldi e subiscono ulteriori ossidazioni parziali.

idrocarburi dell'olio lubrificante, in fase vapore o in fase liquida (per urto delle goccioline). Infatti, durante la discesa dello stantuffo, sulla camicia del cilindro uno strato di olio dello spessore di pochi micron rimane esposto ai gas presenti nel cilindro fino a quando non viene nuovamente coperto dallo stantuffo durante la successiva corsa di risalita. La concentrazione dei vapori di combustibile nel cilindro (prossima a quella presente nel collettore di aspirazione) è superiore a quella nell'olio per tutta la fase di aspirazione. Durante la compressione, la pressione dei vapori di combustibile è in progressivo aumento perciò, in base alla legge di Henry, l'assorbimento da parte dello strato di olio può continuare anche se esso era già stato saturato durante la fase di aspirazione. Durante la combustione, la concentrazione dei vapori di combustibile nella carica si riduce praticamente a zero, perciò lo strato d'olio a parete inizia a rilasciare i vapori di combustibile all'interno dei prodotti della combustione. Tale rilascio prosegue per tutta la fase di espansione e scarico. Una parte dei vapori di combustibile così rilasciati si mescolano con i prodotti della combustione ad alta temperatura e vengono ossidati. La parte rimanente (che è rimasta intrappolata nel boundary layer o è venuta a contatto nelle ultime fasi del ciclo con la porzione più fredda della carica) determina l'aumento delle emissioni di HC. L'aumento delle emissioni di HC è proporzionale alla solubilità del combustibile nell'olio. I differenti composti organici della benzina hanno solubilità diverse nell'olio motore, perciò risulta difficile una previsione accurata di questo meccanismo. È tuttavia risaputo che, utilizzando combustibili gassosi (quali propano o gas naturale), non si registra praticamente nessun aumento degli HC aggiungendo olio nel cilindro. Aumentando la temperatura del fluido refrigerante, si registra un minore aumento di HC a parità di quantità d'olio introdotta nel cilindro. L'aumento della temperatura del refrigerante aumenta la temperatura dello strato d'olio a parete, diminuendone così la viscosità. La minore viscosità incrementa la velocità con cui l'olio viene drenato nel carter e modifica sia la solubilità sia la velocità di diffusione dei vapori di combustibile negli strati di olio. Si indica, nel grafico, con Y la frazione in massa di combustibile nel cilindro e con ω la frazione in massa del combustibile nell'olio. Il trasporto dei vapori di combustibili dalla miscela nel cilindro all'interfaccia gas è controllata dalla legge della convezione:



$$m = g_G(Y - Y_{interfaccia})$$

Per la legge di Henry:

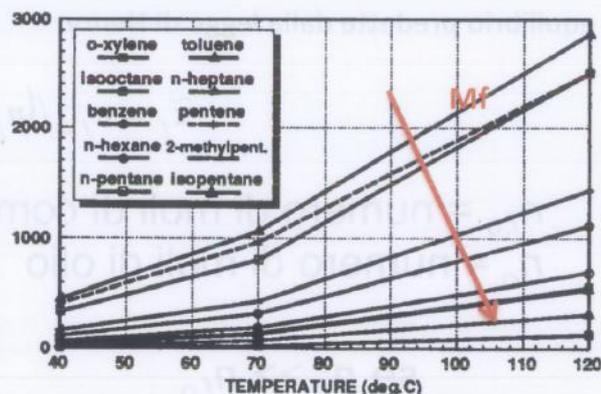
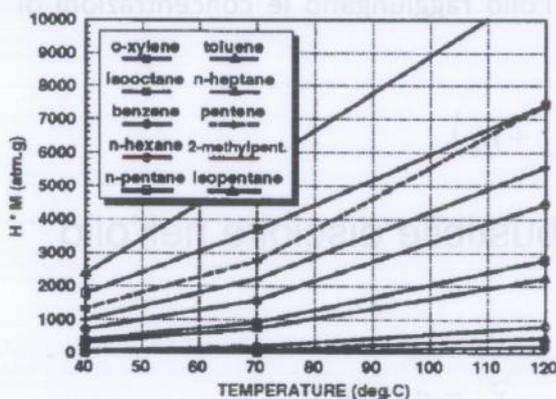
$$\tilde{x}_f = \frac{p_f}{H} = \frac{p_f}{p} \frac{p}{H} = \frac{n_{f,cyl}}{n_{gas,cyl}} \frac{p}{H} = \frac{m_{f,cyl}/M_f}{m_{gas,cyl}/M_{gas}} \frac{p}{H} = \frac{M_{gas}}{M_f} \frac{p}{H} Y_{int\ erface}$$

Eguagliando le due espressioni così ottenute:

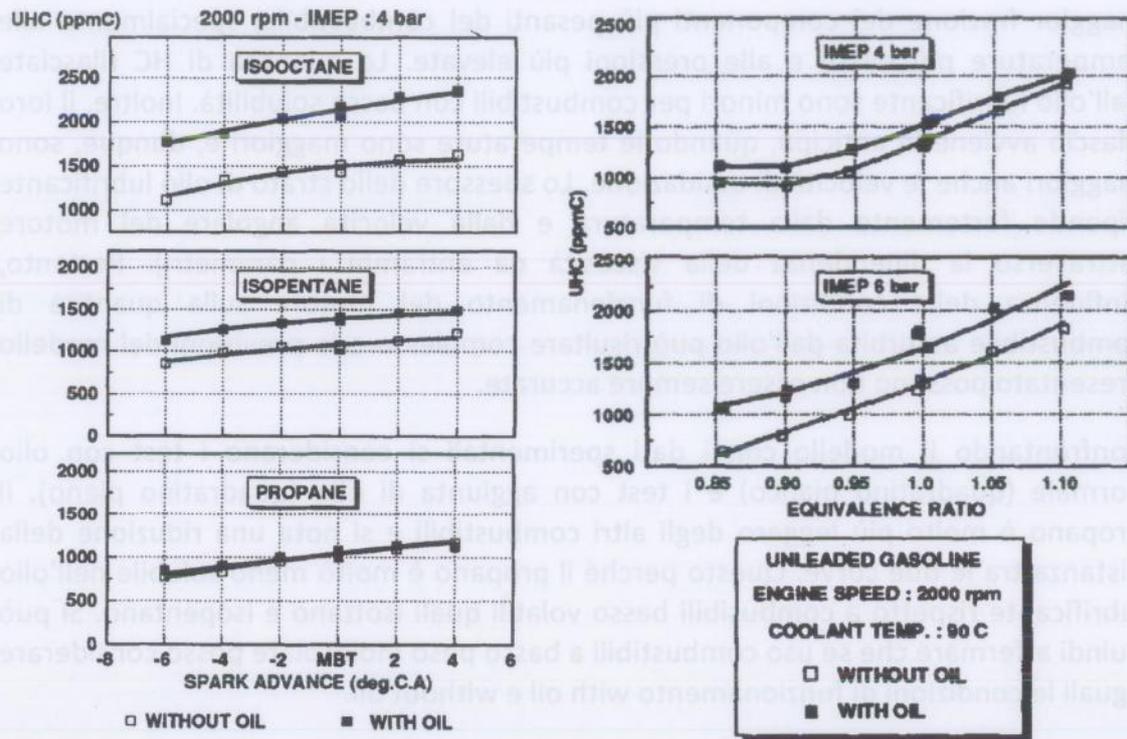
$$\frac{M_{oil}}{M_f} \omega_{int\ erface} = \frac{M_{gas}}{M_f} \frac{p}{H} Y_{int\ erface}$$

$$\omega_{int\ erface} = \frac{M_{gas}}{H \cdot M_{oil}} p Y_{int\ erface}$$

Più è alta p maggiore è la diffusione del combustibile nell'olio. Il termine a denominatore dipende dalla temperatura e dal tipo di combustibile; quest'ultimo influenza H in quanto combustibili differenti, fissata la composizione dell'olio, andranno a diffondere in maniera diversa nell'olio. Combustibili leggere incontrano maggiore difficoltà a diffondere nell'olio che è un HC pesante.



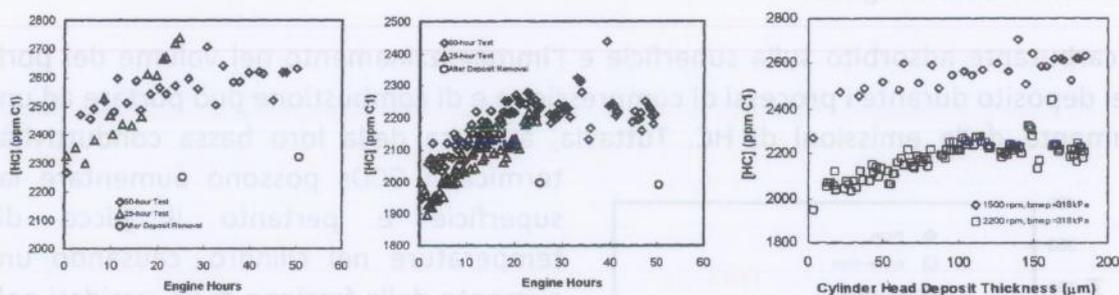
Le curve dei grafici non sono spezzate, ma sono state ottenute congiungendo dei punti. In essi sono rappresentati i valori delle temperature assunte dal lubrificante e in funzione di esse i diversi tipi di lubrificante e  $H \cdot M_{oil}$ . Gli HC più leggeri si trovano più in alto sui grafici mentre quelli più pesanti in basso. In generale si osserva che al crescere della T cresce il prodotto  $H \cdot M_{oil}$  e al crescere di  $M_f$  diminuisce  $H \cdot M_{oil}$ . Si avrà quindi che a parità di Y, più è piccolo  $H \cdot M_{oil}$  più  $\omega$  sarà grande e maggiore sarà la diffusione. Ci si aspetta perciò di trovare disciolta nell'olio lubrificante una



### CCDs : DEPOSITI IN CAMERA DI COMBUSTIONE

Dopo percorrenze di molte migliaia di chilometri, nella camera di combustione dei motori a combustione interna si formano dei depositi (CCDs: Combustion Chamber Deposits). Nel caso di motori alimentati con benzina con piombo tetraetile tali depositi erano principalmente costituiti da ossidi di piombo; nel caso di alimentazione con benzina verde i depositi sono invece composti da materiale carbonioso. Inoltre, depositi carboniosi di tipo fuliginoso si possono formare in seguito a fasi prolungate di esercizio con miscele ricche. I CCDs risultano dalla combinazione della condensazione del combustibile e della sua ossidazione durante le ripetute accensioni. Nella maggior parte dei casi, la formazione di depositi in camera determina un aumento delle emissioni di HC comprese tra il 7%-20%. In tutti i casi esaminati tale aumento viene eliminato rimuovendo i depositi. Oltre ai CCDs, si formano depositi anche fuori della camera di combustione, in particolare sulle valvole di aspirazione e sull'iniettore del combustibile. Questi depositi sono molto probabilmente dovuti alla polimerizzazione e all'ossidazione dei componenti più pesanti del combustibile che formano un rivestimento simile ad una vernice. I depositi sulla valvola di aspirazione, assorbono parte del combustibile liquido iniettato sul retro del piattello o sullo stelo della valvola di aspirazione ritardando l'ingresso del combustibile nel cilindro. Questo fenomeno influenza la quantità di combustibile presente nel cilindro durante i transitori. La miscela in camera è perciò

cielo del pistone. Il tasso di crescita dei depositi dipende fortemente dal tipo di combustibile e dalle condizioni di funzionamento. Combustibili con maggior massa molecolare, olefinici ed aromatici, comportano un maggior sviluppo di depositi rispetto ai composti paraffinici. Nei grafici si nota come dopo la rimozione dei CCD le emissioni di HC ritornano ai livelli iniziali, registrati a motore pulito.



## STRATI DI SPEGNIMENTO A PARETE

La presenza di uno strato di spegnimento della fiamma in prossimità della parete è ormai ben noto. Lo spessore di tale strato varia mediamente, in funzione del carico tra 0.05 mm – 0.4 mm (lo spessore minimo si raggiunge ai carichi più elevati). Inoltre, all'aumentare della temperatura della parete, lo spessore dello strato di spegnimento si riduce a causa della diminuzione del flusso termico a parete.

Un tempo gli idrocarburi incombusti presenti all'interno di tale strato erano ritenuti tra i principali responsabili dei livelli di HC allo scarico. Tuttavia, è ormai riconosciuto che, nel caso di una combustione regolare, gli idrocarburi contenuti nello strato di spegnimento a parete diffondono all'interno dei gas combusti e si ossidano in tempi caratteristici dell'ordine di pochi millisecondi (2 ms), ossidandosi completamente durante la fase di espansione. Nel caso di combustione con miscele particolarmente povere o diluite, lo strato di spegnimento raggiunge spessori maggiori e gli HC in esso contenuti possono non ossidarsi completamente ma, anche in questo caso, attraverso questo meccanismo solo una piccola frazione di combustibile (circa lo 0.25%) sfugge al normale processo di combustione. La presenza degli strati di spegnimento rappresenta comunque una perdita in termini di rendimento e prestazioni del motore.

## SPEGNIMENTO DELLA CARICA

L'estinzione prematura della fiamma all'interno della carica (*bulk quenching*) determina emissioni HC *engine-out* più significative rispetto allo spegnimento a parete. Durante la fase del ciclo motore in cui la pressione diminuisce, decresce anche la temperatura della miscela incombusta davanti al fronte di fiamma, determinando così la diminuzione della velocità laminare della fiamma ed il

## COMBUSTIBILE LIQUIDO IN CAMERA



Trasferimento di calore dalla valvola di aspirazione. Questo viene in parte trasferito al combustibile che dopo l'iniezione si è accumulato sulla testa della valvola.

Riflusso dei gas di scarico. Il riflusso dei gas caldi nel condotto di aspirazione aiuta il combustibile ad evaporare.

Trasferimento di calore dal condotto di aspirazione.

In motori PFI in cui l'iniezione di combustibile (liquido) avviene nei condotti di aspirazione, l'iniettore dirige normalmente lo spray sul retro del piattello, sullo stelo della valvola di aspirazione e sulla superficie laterale del condotto. Solo una piccola frazione del combustibile evapora prima di colpire le superfici, mentre la maggior parte si deposita sulle pareti. Quest'ultima parte evapora per effetto del calore ricevuto dalle pareti calde e per effetto dell'atomizzazione prodotta dal flusso di aria di aspirazione. In condizioni di funzionamento con motore perfettamente riscaldato

Durante il flusso principale del bulk gas (etichetta "Y"), la concentrazione di HC è inferiore e rappresenta la concentrazione di HC nei burned gas. Come il pistone si avvicina al PMS, gli HC precedentemente immagazzinati nella fessura della testa, sono raschiati dalla parete del cilindro, dove sono stati depositati durante la fase di fuoriuscita dei gas; questi escono dal cilindro poco prima dell'EVC. Ciò si traduce in un aumento della concentrazione di HC appena prima del PMS (etichetta "Z") e questa concentrazione continua ad essere campionata mediante il FID fino all'EVO del ciclo successivo.

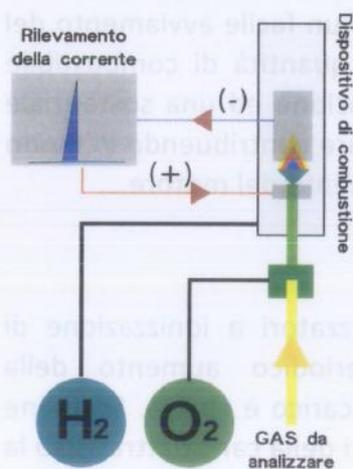
### FID (FLAME IONIZATION DETECTOR)

Il rivelatore a ionizzazione di fiamma, FID dall'inglese *Flame Ionization Detector*, è uno strumento di misurazione utilizzato per il rilevamento gas-cromatografico degli idrocarburi (come il butano o l'esano). Ha un range di rilevamento lineare di 6 - 7 ordini di grandezza ( $10^6$ - $10^7$ ), con un limite inferiore di rilevamento pari a meno di un picogrammo. Lo strumento permette di rilevare solo i composti che possono bruciare; altri componenti possono essere ionizzati attraverso il passaggio lungo la fiamma, ma non possono produrre un segnale sufficientemente intenso, tale da essere rilevato dallo strumento. Non sempre questo fatto costituisce uno svantaggio; in certi casi, come per l'analisi dei gas di scarico, lo strumento può rilevare degli idrocarburi incombusti, ma non l'azoto (così come altri gas permanenti, come l'acqua o l'anidride carbonica).

Per le molecole che contengono solo carbonio ed idrogeno, lo strumento risponde in modo corretto, ma la presenza di altri atomi nelle molecole, come l'ossigeno, riduce la sensibilità dello strumento.

Ad esempio la sensibilità verso il metano ( $CH_4$ ) è eccellente, ma quella relativa alla formaldeide ( $CH_2O$ ) è più bassa.

Essendo il FID un rivelatore distruttivo, deve essere utilizzato in fondo alla catena di rilevazione strumentale. Per la sua semplicità e compattezza, il FID sarebbe lo strumento ideale per l'analisi in campo dei fumi, ma essendo del tutto insensibile ad una parte dei composti comunemente presenti in tali tipi di scarichi, come l'acqua ( $H_2O$ ), il monossido di carbonio (CO), l'anidride carbonica ( $CO_2$ ) e gli ossidi di azoto ( $NO_x$ ), può essere utilizzato solo per rilevare la componente di idrocarburi eventualmente presenti come residui di combustione. L'analisi di tali idrocarburi serve a determinare il Carbonio Organico Totale (TOC). Come il nome lascia intuire, lo strumento sfrutta la presenza di ioni nella fiamma. La sorgente degli ioni è data dall'idrogeno introdotto nella fiamma. Spesso viene introdotto anche dell'ossigeno al fine di aumentare la sensibilità dello strumento. La fiamma risultante dalla



rilasciati dall'olio combustibile; la miscela gas-HC contenuta tra i filetti della candela e nell'intercapedine tra testa e basamento.

- *trasporto nel vortice generato dall'interazione cilindro-stantuffo durante lo scarico forzato.*

Considerando gli HC prodotti dagli interstizi tra cilindro e pistone e rilasciati su uno strato di un certo spessore sulla parete, parte di questo strato verrà asportato per effetto dei moti turbolenti nella camera e portato al centro di essa. Esso potrà quindi subire un processo di ossidazione completa. Un altro fenomeno di trasporto è relativo allo straterello rimasto a parete che prima di raggiungere lo scarico subisce un processo di trasporto legato al movimento dello stantuffo verso l'alto. Vengono così raccolti in un unico vortice gli HC incombusti che subiscono anche un processo di ossidazione considerate le temperature elevate allo scarico.

Sempre parlando di trasporto bisogna considerare anche il fenomeno del mescolamento.

In condizioni di piena apertura, solo i 2/3 degli HC che non si ossidano all'interno del cilindro fuoriescono con i gas di scarico, mentre il 95% del gas contenuto nel cilindro fuoriesce attraverso le valvole di scarico. Ne segue una concentrazione di HC nei gas residui 11 volte più elevata rispetto a quella media nei gas di scarico. Ai carichi parziali, dove la frazione di gas residui è maggiore, si calcola che solo la metà circa degli HC ancora presenti nel cilindro al termine della combustione viene espulsa allo scarico.

## OSSIDAZIONE DEGLI HC

Tutti i processi di formazione fin qui descritti producono HC a temperature prossime a quelle di parete. L'avvio delle reazioni di ossidazione è pertanto subordinato all'aumento di temperatura degli HC, che si può realizzare per effetto di un mescolamento degli HC stessi con la carica combusta. È inoltre necessaria la presenza di una sufficiente quantità di ossigeno. Esistono due tipologie di HC:

- HC sotto forma di miscela incombusta aria-combustibile (interstizi; flame quenching; trafiletti);
- HC sotto forma di vapori di idrocarburi incombusti (strati di olio; depositi; combustibile liquido).

Nella prima tipologia l'O<sub>2</sub> richiesto per ossidare gli HC è già presente nella miscela incombusta insieme ai vapori di combustibile. Nella seconda tipologia di sorgenti gli HC devono prima venire a contatto con un agente ossidante. Un tempo caratteristico dei processi di ossidazione è:

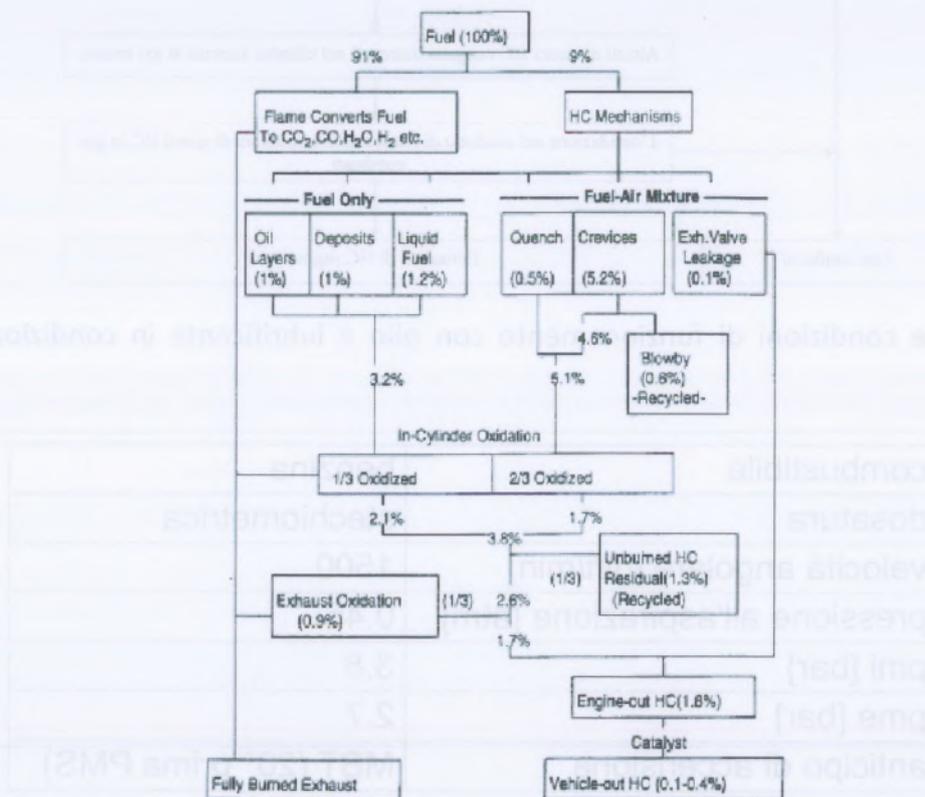
convertitore catalitico). Inoltre, gli HC presenti in camera sono in genere costituiti da combustibile (quelli dovuti al “quenching” sono prodotti di una combustione parziale, ma si ossidano completamente). Solo il 40% degli HC allo scarico è costituito da idrocarburi presenti nel combustibile, mentre il resto è composto da prodotti di pirolisi e di una parziale combustione. Queste due osservazioni permettono di concludere che anche nel sistema di scarico si verificano consistenti reazioni di ossidazione. Le temperature medie dei gas di scarico (i gas che fuoriescono per primi si trovano a temperature di 100°C superiori rispetto a quelli che escono al termine dello scarico) in corrispondenza della valvola sono di circa 800°C; poi diminuiscono mentre i gas procedono lungo lo scarico e, in corrispondenza dell’uscita dal tratto di collettore ricavato nella testa, sono pari a circa 600°C. Per ossidare gli HC contenuti nei gas di scarico, sono necessari tempi di residenza superiori a 50ms (il tempo caratteristico calcolato in precedenza) per temperature superiori ai 600°C. Per fare lo stesso con il CO, sono necessarie temperature superiori ai 700°C. Anche se si tratta di valori che dipendono fortemente dalle condizioni di funzionamento, si ritiene comunque che l’ossidazione sia significativa soltanto nel tratto dello scarico ricavato all’interno della testa motore, nella prima parte del collettore di scarico. Complessivamente, la frazione di HC che reagisce nel collettore di scarico varia da pochi punti percentuali fino al 40% degli HC che fuoriescono dal cilindro, a seconda delle condizioni di funzionamento. In particolare nelle condizioni che determinano alte temperature (carica stechiometrica, velocità elevate, anticipi di accensione ritardati rispetto a MBT, ridotti rapporti di compressione) e lunghi tempi di residenza (bassi carichi) si hanno percentuali di ossidazione relativamente elevate. La dipendenza dell’ossidazione dalla temperatura e dalla quantità di ossigeno può essere valutata con una relazione del tipo:

$$d[HC]/dt = -A*[HC]^a*[O_2]^b * e^{-E/RT}$$

[ ] indica una concentrazione,  $a$  e  $b$  sono costanti che dipendono dal combustibile,  $E$  è una costante che rappresenta l’energia di attivazione della reazione di ossidazione e  $A$  un’ulteriore costante che dipende dal combustibile. Una grande porzione degli HC allo scarico che sopravvivono ai processi di ossidazione è costituita da specie olefiniche, aromatici, e HC ossigenati. La frazione di idrocarburi diversi dal combustibile originale aumenta all’aumentare della temperatura, dal momento che il combustibile si decompone velocemente in idrocarburi intermedi, ma non ha a disposizione un tempo sufficiente per completare l’ossidazione. In questa fase viene prodotta la maggior parte delle specie tossiche (1,3-butadiene, benzene, formaldeide, acetaldeide). L’ossidazione nel collettore di scarico è promossa da:

- iniezione di aria secondaria nella parte di collettore ricavata nella testa motore (forte influenza della fase di iniezione e del punto del collettore in cui

Sorgente	% di combustibile che sfugge alla combustione	% di emissioni di HC engine-out da ciascuna sorgente
Interstizi	5.2	38
Spegnimento	0.5	5
Strati di olio	1.0	16
Depositi	1.0	16
Combustibile liquido	1.2	20
Perdita valvole di scarico	0.1	5
TOTALE	9.0	100



## FORMAZIONE DEGLI HC NEI MOTORI CI

Le emissioni di idrocarburi, o più propriamente emissioni organiche, allo scarico di un motore derivano dall'incompleta combustione degli idrocarburi costituenti il combustibile. La composizione degli HC allo scarico dei motori ad accensione per compressione è molto più complessa ed articolata rispetto a quella presente allo scarico dei motori ad accensione comandata. Essa comprende un intervallo molto più esteso di masse molecolari (sono stati individuati quasi 400 diversi composti organici).

La composizione chimica del gasolio comprende anche frazioni di idrocarburi con temperature di ebollizione più elevate e maggiore massa molecolare rispetto a quelle presenti nelle benzine. Inoltre, durante il processo di combustione nei motori Diesel, una parte degli idrocarburi che compongono il gasolio è soggetta, all'interno dello spray, ad importanti reazioni di pirolisi e dà luogo ad emissione di particelle solide (particolato). Una frazione consistente degli HC viene adsorbita allo stato liquido su tali nuclei carboniosi.

Quanto esposto ha delle conseguenze dirette sulle modalità di prelievo degli HC allo scarico ai fini della determinazione della concentrazione dell'inquinante.

Le emissioni gassose di HC nei motori Diesel sono misurate usando:

- un filtro riscaldato per particolato (mantenuto a 190 °C)
- una linea di campionamento riscaldata (mantenuta a 190 °C)
- un analizzatore riscaldato a ionizzazione di fiamma.

Il riscaldamento del filtro, delle linee e dello strumento di analisi permette di mantenere in fase vapore tutti i componenti degli HC con temperature di condensazione inferiori ai 190°C. Se ciò non avvenisse avrei la condensazione dell'acqua che trascinerebbe con essa una certa quantità di HC. Gli altri composti organici incombusti vengono invece filtrati insieme al particolato e vengono inclusi nella cosiddetta frazione solubile (SOF) del PM. Per evitare di intasare il filtro inserisco all'interno della cella uno strumento chiamato prefiltro che trattiene il particolato per non intasare gli analizzatori.

## FORMAZIONE DEGLI HC

Il processo seguito per la formazione degli HC per il combustibile iniettato durante il ritardo di accensione è:

Si possono individuare i seguenti meccanismi attraverso cui il combustibile iniettato può sfuggire al normale processo di combustione:

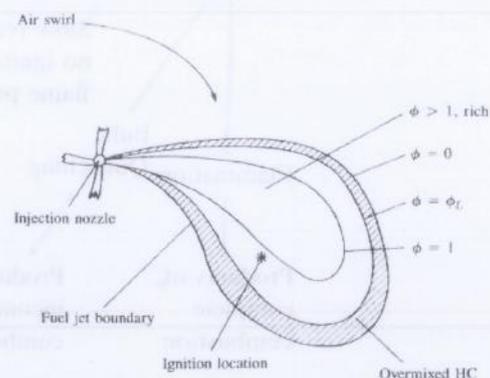
- in seguito ad un eccessivo mescolamento locale con aria (*overmixing*), in alcune zone della camera (specialmente alla periferia dello spray) la miscela aria-combustibile può diventare troppo povera (*overleaning*) per autoaccendersi o per sostenere la propagazione della fiamma;
- in seguito ad un insufficiente mescolamento locale con aria (*undermixing*), la miscela può essere troppo ricca (*overrich mixture*) per accendersi o sostenere la fiamma. L'*undermixing* coinvolge soprattutto il combustibile introdotto nelle fasi finali dell'iniezione (in ritardo nel ciclo ed a bassa velocità) e quello che rimane nel sacco dell'iniettore.
- una parte del combustibile introdotto all'inizio dell'iniezione può raggiungere ancora allo stato liquido le pareti della camera (*overpenetration, spray impingement*) ed evaporare con molto ritardo senza venire a contatto con ossigeno sufficiente;
- in alcuni casi specifici, si può verificare lo spegnimento in seno alla carica (*bulk quenching*) durante la fase di espansione, dovuto alla presenza di "thermal boundary layer" o al rapido mescolamento con l'aria.
- L'olio lubrificante del motore può essere un'ulteriore "sorgente" di HC.

I livelli di emissioni di HC nei motori diesel e l'importanza relativa di ciascuno dei meccanismi di formazione individuati dipendono in maniera sostanziale dalle condizioni di funzionamento del motore.

Le emissioni di HC aumentano normalmente al diminuire del carico motore; al minimo ed ai bassi carichi si registrano, per effetto dell'*overleaning*, emissioni di HC maggiori rispetto ai carichi più elevati. Tuttavia, durante i transitori di accelerazione, le emissioni di HC aumentano notevolmente (per effetto dell'*undermixing*) specie se il rapporto A/F raggiunge valori particolarmente bassi (*overfueling*). Di conseguenza, anche la composizione degli HC varia in funzione del carico motore. Ai bassi carichi l'*overmixing* produce essenzialmente molecole di incombusti; ai carichi più elevati l'*undermixing* dà luogo a composti di parziale ossidazione e pirolisi.

## OVERLEANING/OVERMIXING

La concentrazione del combustibile all'interno dello spray non è uniforme, e le minori concentrazioni di combustibile si trovano alla periferia. La quantità di combustibile nella zona caratterizzata da rapporti di equivalenza locali inferiori a quello necessario per sostenere il processo



lasciato nella punta dell'iniettore dopo che lo spillo è arrivato in battuta sulla sede). L'ultima zona del getto dell'iniezione è quella nella quale si hanno delle gocce grandi. Questa zona genera overriching perché si hanno grandi difficoltà di mescolamento con l'aria; il fenomeno si ripete ogni volta che si chiude l'iniettore. Applicando la conservazione della quantità di moto si ottiene

$$\delta M / \delta t = m_{out} - m_{in}$$

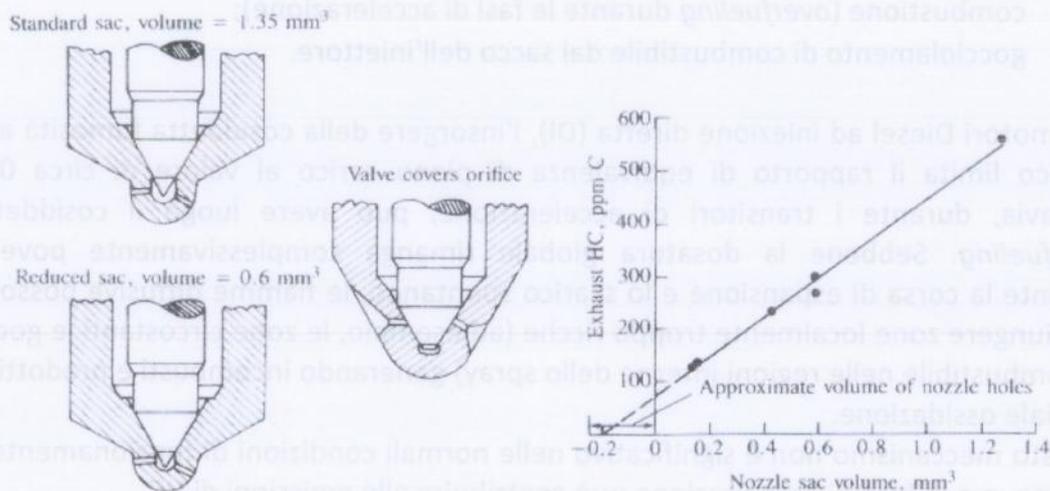
dalla quale si deduce che  $m_{in}$  cambia se considero o no l'iniezione di combustibile; si avrà quindi un richiamo di aria dalla zona circostante che provocherà un cambiamento dei valori di  $\Phi$ .

Inoltre, eventuali iniezioni secondarie (dovute per esempio al rimbalzo dello spillo sulla sede) possono contribuire all'aumento delle emissioni di HC.

Alla fine del processo di iniezione il volume del sacco rimane pieno di combustibile. Al procedere del processo di combustione, questo combustibile viene riscaldato e vaporizza, ed entra nel cilindro, durante l'espansione, a bassa velocità attraverso i fori dell'iniettore sotto forma di vapori o di grosse gocce.

Vapori e gocce si mescolano in modo relativamente lento con l'aria e sfuggono al processo di combustione primario.

Il contributo degli HC dovuto al gocciolamento diminuisce al diminuire della dimensione del sacco



L'extrapolazione dei dati del diagramma indica che per un volume nullo del sacco le emissioni di HC sono ancora diverse da zero e che emissioni nulle si otterrebbero

emissioni di HC nei motori Diesel aumentano del 30% quando, mantenendo costante la durata del ritardo di accensione, le temperature dell'olio e del refrigerante vengono diminuite da 90°C a 40°C.

Complessivamente, l'influenza del bulk quenching sulle emissioni di HC è maggiore per:

- elevate velocità di espansione;
- bassi rapporti di equivalenza;
- combustione ritardata;
- elevate percentuali di combustibile che, durante l'iniezione, giunge direttamente a contatto con la parete (*spray impingement*).

### MISFIRE

Si tratta di un fenomeno molto più raro rispetto al misfire dei motori SI. Infatti, nei motori Diesel le variazioni cicliche del processo di combustione sono generalmente molto meno pronunciate. Esse sono principalmente determinate dalle variazioni da ciclo a ciclo delle portate iniettate e della fase dell'iniezione.

Tuttavia, il misfire può effettivamente verificarsi in condizioni particolarmente sfavorevoli, quali quelle che si realizzano in presenza di basse temperature e pressioni in camera durante la compressione e nel caso di anticipi di iniezione molto "ritardati".

### SPRAY IMPINGEMENT

A causa della possibile interferenza che lo spray potrebbe avere con le pareti della camera di combustione cerco di iniettare il combustibile nel pozzetto. Cerco quindi di scegliere correttamente il valore dell'angolo del cono dello spray.

L'interferenza tra lo spray (specie la fase liquida) e le pareti della camera di combustione è considerata una delle cause principali di formazione degli HC. Le emissioni di HC aumentano se vengono adottati, ad esempio, iniettori con fori molto grandi e se la distanza fra l'estremità del polverizzatore e la parete è inferiore ad una certa soglia. In queste condizioni la fase liquida dello spray può infatti aderire alle pareti della camera di combustione. Dunque, per contenere l'aumento delle emissioni di HC è fondamentale impedire il deposito di combustibile liquido a parete. Infatti, le pareti della camera di combustione hanno una temperatura relativamente bassa rispetto alla temperatura media del gas e questo determina uno strato di spegnimento vicino alle pareti stesse, dovuto all'elevata cessione di calore.

L'entità dell'aumento delle emissioni di HC dipende dalla temperatura delle pareti, dalla temperatura del gas, dalla velocità e dalla pressione con cui il combustibile viene iniettato, nonché dalle proprietà del combustibile stesso.

## TEMPERATURA DELL'ARIA DI ASPIRAZIONE

Un secondo parametro importante è costituito dalla temperatura dell'aria all'aspirazione, che influisce sui fenomeni dell'overleaning e del bulk quenching.

Il rapporto di equivalenza  $\Phi_L$ , corrispondente al limite di accendibilità nel povero, cresce al diminuire della temperatura dell'aria nel cilindro al momento dell'autoaccensione; la tendenza all'autoaccensione, a sua volta, diminuisce al decrescere della temperatura dell'aria aspirata. Ne deriva una maggiore quantità di combustibile nella zona del getto caratterizzata da  $\Phi < \Phi_L$  e dunque una maggiore quantità di HC prodotti per "overleaning". Inoltre, una minore temperatura dell'aria aspirata determina a sua volta un aumento del ritardo di accensione che, come già visto, aumenta gli HC prodotti per overleaning e bulk quenching. Una minore temperatura dell'aria aspirata favorisce l'insorgere del bulk quenching anche in fasi del ciclo più anticipate.

## FORMA DELLA CAMERA DI COMBUSTIONE

Considero le diverse condizioni di funzionamento del motore:

- Pieno carico: in questo caso inietta nella camera di combustione una grande quantità di combustibile che però dovrà trovare una grande quantità di ossigeno per bruciare. Dovrò quindi realizzare una camera di combustione che mi permetta di sfruttare al meglio l'aria. Se il cono di iniezione è stretto rischio di sfruttare solo una frazione di aria presente in camera. Se il cono di iniezione è troppo ampio si vanno a coinvolgere zone della camera in cui il rapporto superficie/volume è elevato con il pericolo di temperature basse e rischio di mancata accensione. L'angolo di apertura del cono sarà quindi influenzato dal disegno del pozzetto.
- Carichi medio-bassi: il timing di iniezione può essere diverso rispetto alla condizione di pieno carico. In questo caso si avrà un'iniezione pilota seguita da un'iniezione principale; si introdurrà così una certa quantità di combustibile prima che lo stantuffo raggiunga il PMS con il rischio che una parte di combustibile vada ad occupare l'area di squish. La soluzione per queste condizioni di funzionamento sarebbe quella di ridurre la pressione di iniezione.

Iniettando una quantità di combustibile minore non si avranno problemi di utilizzazione dell'aria, ma il problema principale sarà rappresentato dal fatto che la penetrazione dello spray aumenta fino al punto di interferire con la camera del pozzetto. Si dovrebbe quindi utilizzare una camera di combustione più larga e meno profonda per allontanare le pareti dalla camera di combustione. In condizioni di pieno carico iniettando una maggiore quantità di combustibile si

incombusto c'è il rischio di portare via qualcosa che avrebbe potuto continuare l'ossidazione in camera.

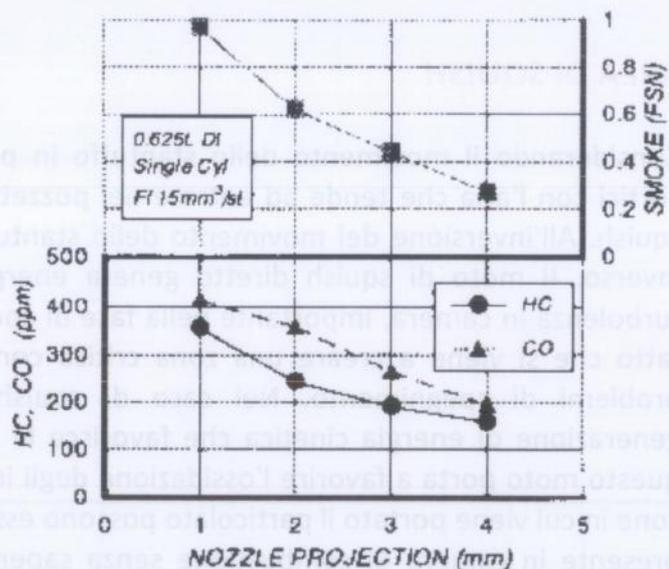
### FORMA DELLA CAMERA DI COMBUSTIONE (SLIDES)

E' noto che l'adozione di una camera di combustione costituita da un pozzetto nel cielo dello stantuffo permette di amplificare il moto di swirl al termine del processo di compressione e di generare moti di squish. Nei piccoli motori veloci la forma del pozzetto nel cielo del pistone e la posizione dell'iniettore determina le proporzioni in cui il combustibile si distribuisce tra il pozzetto e la cosiddetta area di squish. Il problema consiste nell'ottimizzare i parametri di iniezione, la posizione dell'iniettore e la forma della camera in modo da ottenere un'uniforme distribuzione del combustibile. Per tali camere di combustione, nella frazione di miscela che viene proiettata dal pozzetto alla "zona di squish" l'autoaccensione risulta più difficile e le reazioni chimiche all'interno della fiamma tendono ad arrestarsi (quenching) per effetto del raffreddamento da parte della superficie inferiore della testa motore e della corona dello stantuffo. La quantità di combustibile nella zona di squish può quindi determinare un aumento degli HC. L'aumento è influenzato dall'eventuale punto di impatto tra combustibile liquido e parete (impingement), fase di iniezione e forma della camera di combustione.

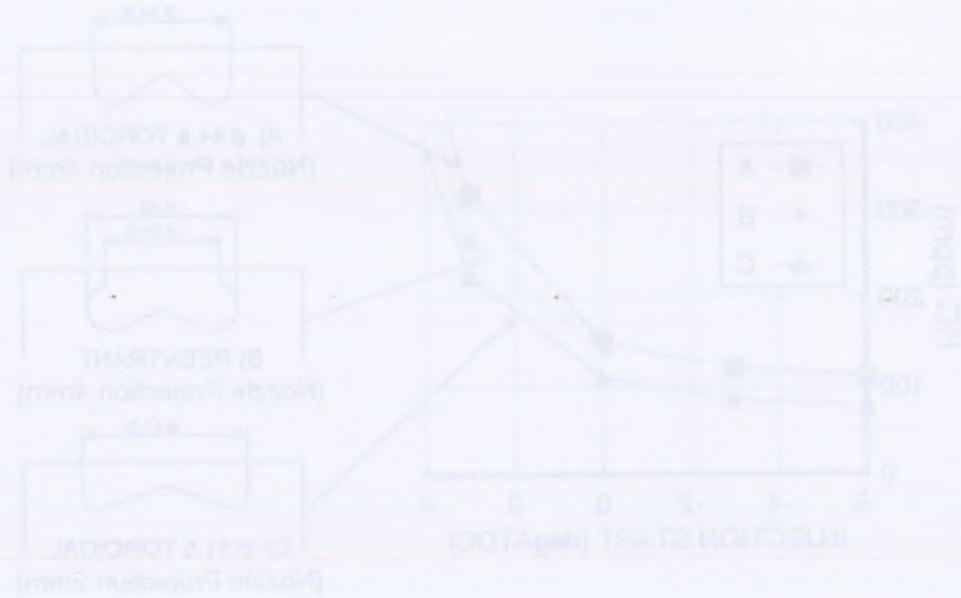
Quanto più il punto di "impingement" dello spray sulla parete laterale del pozzetto si trova vicino al piano della testa motore, tanto più la quantità di combustibile che fuoriesce dal pozzetto aumenta, aumentando così la generazione di HC dovuti allo spegnimento della carica per effetto del raffreddamento nella zona di squish. Contemporaneamente, diminuisce la quantità di combustibile nel pozzetto, aumentando la produzione di HC per effetto del meccanismo di overleaning. Aumentano inoltre le emissioni di CO e la fumosità allo scarico.

Se si riduce il diametro del pozzetto a parità di rapporto di compressione, si aumenta il livello di swirl nel pozzetto stesso in corrispondenza del PMS. Tuttavia, l'eccessivo mescolamento può anche determinare un aumento delle emissioni di HC.

Un aumento del livello di swirl, con effetti analoghi a quelli appena descritti, si può anche



Nei motori più grandi e lenti la camera nel pistone è più ampia e meno profonda, per evitare l'impatto del getto di combustibile con le pareti. I moti della carica sono meno critici e la generazione della turbolenza necessaria al miscelamento aria-combustibile è affidata principalmente alla quantità di moto dello spray.



Nel caso delle iniezioni effettuate prima del PM2, il moto di spray diretto impedisce allo spray ed alla carica di disperdersi all'interno dell'area di spray. Di conseguenza, le emissioni di HC sono influenzate principalmente dalla distanza tra i fori del polverizzatore e la parete. Pertanto, i motori con diametro minore (A e B) danno luogo a maggiori emissioni di HC.

Nel caso delle iniezioni effettuate dopo il PM2, il moto di spray inverte notevolmente parte dello spray e della carica all'interno dell'area di spray, questo può

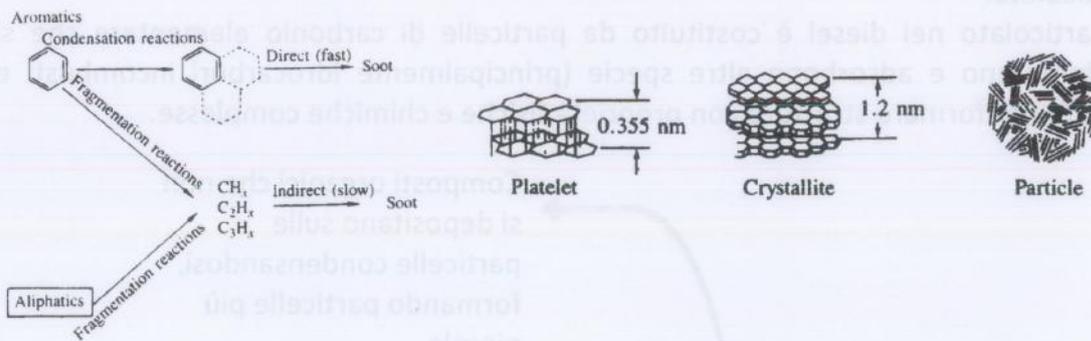
determinare l'overlapping della carica nel getto ed il "bulk quenching" della carica nell'area di spray. Per ciò, camere di combustione di tipo venturante (B) permettono di convertire la turbolenza della carica dal getto grazie ad diverso angolo di iniezione getto/parete, riducendo così le emissioni di HC rispetto all'impiego del getto controllabile.

Nelle camere di tipo-C si nota una minore diminuzione delle emissioni con dimensioni della camera maggior.



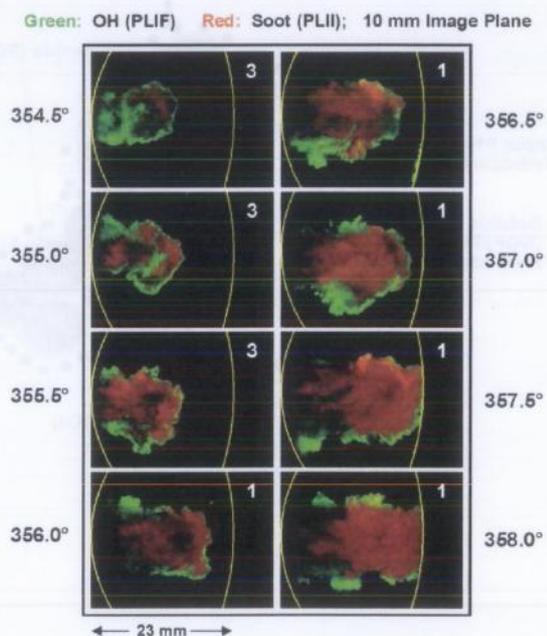
## FORMAZIONE DI SOOT DURANTE LA COMBUSTIONE

La formazione di soot iniziale si verifica in un ambiente molto ricco ( $\Phi > 4$ ) a temperature relativamente basse (1600 K) ed è innescata dalla combustione premiscelata. In questo processo di formazione iniziale, le reazioni di condensazione degli aromatici dominano e portano alla formazione dei PAH (idrocarburi poliaromatici), strutture che portano alla formazione di soot all'interno (enorme numero di piccoli nuclei). Per questo motivo, i PAH sono chiamati "soot-precursor". Nella zona vicina alla fiamma diffusiva, con miscela pressoché stechiometrica, dove la temperatura è più alta, anche componenti alifatici possono essere trasformati mediante pirolisi e cracking per produrre soot (indiretta, percorso più lenta). Il meccanismo diretto avviene a basse temperature e con miscele ricche, quello indiretto avviene ad alte temperature e per miscela circa stechiometrica.



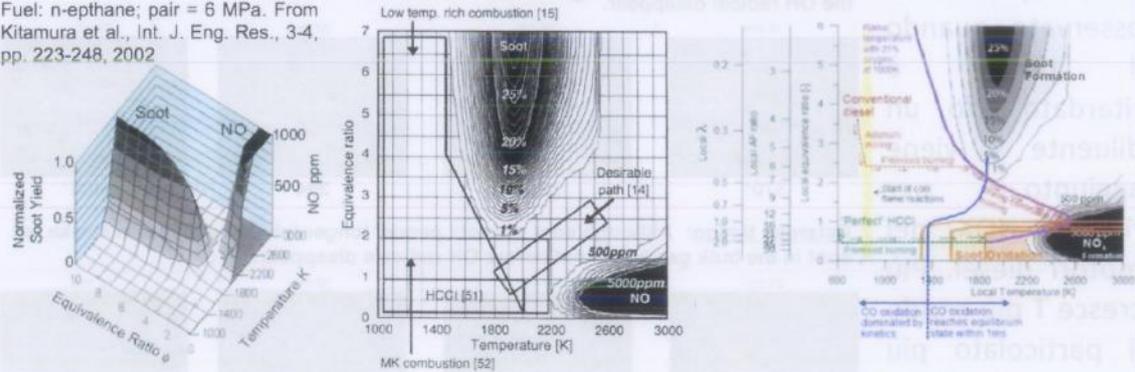
Le particelle di soot viaggiano lungo il getto con gli altri prodotti della combustione ricca verso la fiamma diffusiva dove bruciano a causa delle temperature elevate e alla disponibilità di radicali OH e/o ossigeno.

La combustione e l'ossidazione della soot riducono le dimensioni delle sacche di soot, che continuano a diventare più piccole (terza immagine) fino a scomparire (quarta immagine). A seconda delle condizioni di funzionamento del motore, il cambiamento della combustione di soot nei gas potrebbe essere un importante contributo per l'aumento



### Soot formation during diesel combustion

Fuel: n-eptane; pair = 6 MPa. From Kitamura et al., Int. J. Eng. Res., 3-4, pp. 223-248, 2002



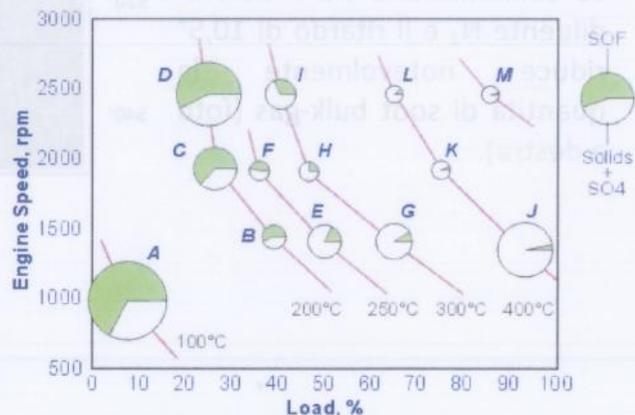
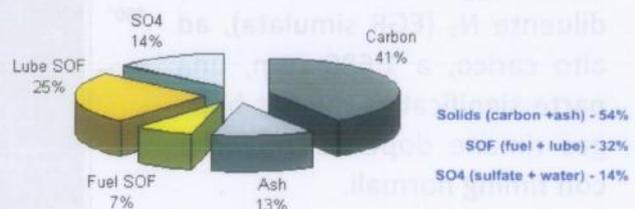
Questo grafico identifica la direzione lungo la quale si sviluppa il processo di combustione dei diesel convenzionali, e la direzione lungo la quale muoversi per raggiungere regimi di combustione diversi da quello "convenzionale", come per esempio combustione HCCI.

### COMPOSIZIONE DEL PARTICOLATO

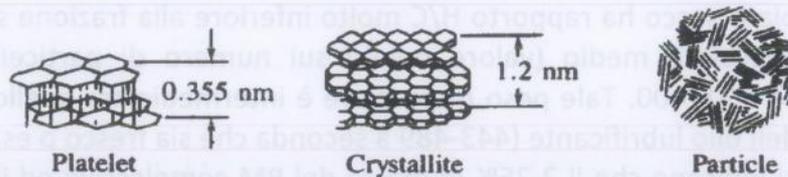
Sulla base dell'analisi effettuata da una combinazione di metodi fisici e chimici, il PM è tradizionalmente diviso in tre frazioni principali, che possono essere ulteriormente sub-classificati come segue:

- frazione solida (SOOT): particelle carboniose, cenere;
- frazione organica solubile (SOF): materiale organico derivato da olio lubrificante del motore, materiale organico derivato da combustibile;
- particolato solfato ( $SO_4$ ): acido solforico, acqua.

La composizione di PM varia notevolmente a seconda della tecnologia dei motori, delle condizioni di prova, e in caso di solfato-particolati del contenuto di zolfo nel carburante. Un esempio di composizione del PM da un post-1994 US motori diesel pesanti e per il motore e Eu HD durante STC sono illustrati nelle figure a destra. La maggior parte del PM (~48%) deriva dal carbonio presente nel gasolio (H/C~2); la parte rimanente deriva



casualmente con i loro piani generalmente paralleli alla superficie delle particelle primarie (modalità nuclei). Queste tre strutture sono schematizzate nella figura sottostante.



## CENERI

In generale, la cenere allo scarico dei Diesel è costituita da una miscela dei seguenti componenti:

- Solfati, fosfati, o ossidi di calcio (Ca), zinco (Zn), magnesio (Mg), ed altri metalli che si formano nella camera di combustione del motore dalla combustione di additivi nel motore olio lubrificante. Queste sostanze chimiche sono presenti nell'olio lubrificante come detergenti, disperdenti, neutralizzanti acidi, antiossidanti, inibitori di corrosione, antiusura e additivi per pressioni elevate, ecc
- Impurità ossido-metalliche derivanti dall'usura del motore, che vengono trasportate nella camera di combustione dall'olio lubrificante. Questi includono ossidi di ferro (Fe), rame (Cu), cromo (Cr) e alluminio (Al).
- Gli ossidi di ferro derivano dalla corrosione del collettore di scarico del motore e di altri componenti del sistema di scarico. A seconda della tipologia dei materiali del sistema di scarico, queste particelle possono anche includere cromo, nichel e alluminio.
- Inoltre, se vengono utilizzati additivi combustibili metallici per facilitare la rigenerazione del filtro anti-particolato, i gas di scarico conterranno la corrispondente cenere di ossido metallico. Metalli utilizzati a tale scopo comprendono cerio, ferro, e stronzio. Additivi metallici potrebbero diventare una fonte di un elevato numero di nuclei modo solido particellale emissioni.

## SOF

Gli idrocarburi adsorbiti sulla superficie delle particelle di carbonio e/o presenti in forma di goccioline formano la frazione organica solubile (SOF) del particolato. L'aggettivo "solubile" prende origine nella tecnica analitica che utilizza estrazione con solventi per isolare la frazione organica di particolato. Talvolta questa frazione è indicata anche come VOF (frazione organica volatile). La VOF viene generalmente misurata mediante evaporazione sotto vuoto e la sua interpretazione è molto vicino a quello di SOF. Il VOC deve essere quindi regolata per solfati, che sono determinati mediante analisi chimica. In assenza di tale adeguamento, l'interpretazione dei VOC dovrebbe essere la somma di particolato SOF e solfato,  $SO_4$ .

Occorre sottolineare nuovamente che la frazione SOF diventa liquido solo dopo il