

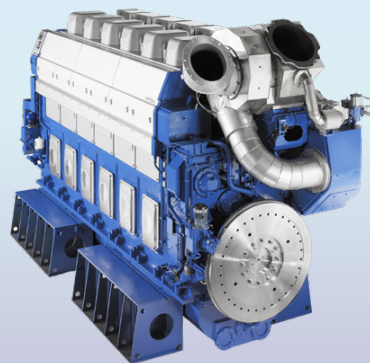
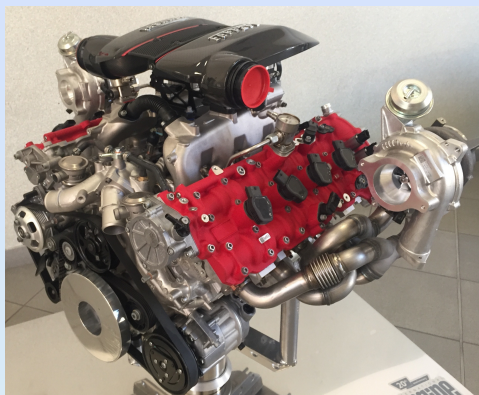


Università degli Studi di Napoli
"Parthenope"

Prof. Ivan Arsie
Motori a Combustione Interna

*Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Gestionale*

Motori a Combustione Interna



Prof. Ivan Arsie

Email ivan.arsie@uniparthenope.it, Tel. 081.5476803, Stanza 628



Università degli Studi di Napoli
"Parthenope"

Prof. Ivan Arsie
Motori a Combustione Interna



Emissioni Inquinanti



Principali inquinanti

Le sostanze inquinanti *primarie*, ossia direttamente prodotte dai motori, sono:

- il *monossido di carbonio* **CO**;
- gli *idrocarburi incombusti* ed i prodotti di parziale ossidazione, indicati sinteticamente con **HC** (spesso indicati anche come **VOC** Volatile Organic Compounds);
- il *monossido d'azoto* **NO** ed il *biossido d'azoto* **NO₂**, indicati sinteticamente con **NO_x** ;
- il *biossido* **SO₂** e il *triossido di zolfo* **SO₃**, indicati sinteticamente con **SO_x**;
- il *particolato (PM)*, particelle solide di piccole dimensioni costituite da un nucleo carbonioso e da una frazione organica solubile, indicata spesso come **SOF** (Solubile Organic Fraction) o **VOF** (Volatile Organic Fraction)



Principali inquinanti

Alcuni inquinanti primari possono reagire nell'atmosfera dando luogo ad *inquinanti secondari*:

- **ossidi di azoto** ed **ossidi di zolfo** sono responsabili delle cosiddette **piogge acide**;
- **ossidi di azoto** ed **idrocarburi incombusti** danno luogo, sotto l'azione catalizzatrice della radiazione solare, al cosiddetto "**smog fotochimico**", miscela di composti fortemente irritanti come ozono (O_3) ed aldeidi.

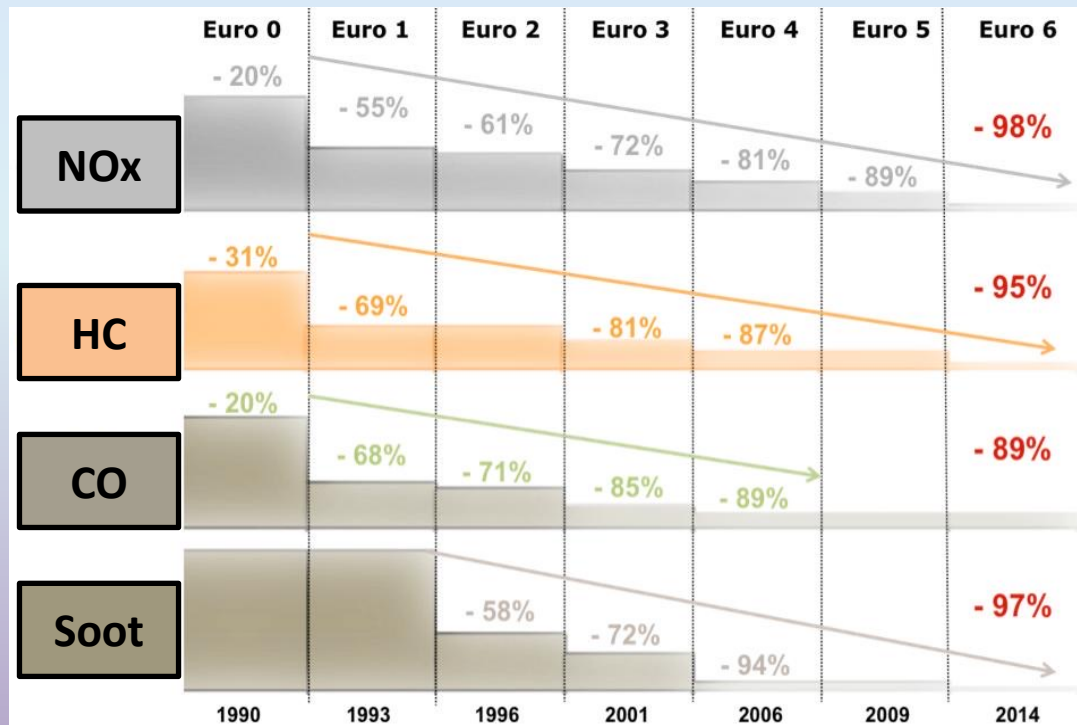


Effetti della Cinetica Chimica

Specie	Concentrazione in condizioni di Equilibrio Termodinamico		Concentrazione rilevata
	500 °C	800 °C	
CO [% vol.]	$2.6 \cdot 10^{-10}$	$2.6 \cdot 10^{-5}$	0.5 ÷ 1
HC [ppm]	-	-	200 ÷ 700
NO [ppm]	$3.0 \cdot 10^{-3}$	0.13	800 ÷ 2000

Normative Antinquinamento

- Il **settore trasporti** contribuisce fortemente all'**inquinamento** ambientale.
- L'Unione Europea prescrive **limiti** sempre più stringenti sulle **emissioni inquinanti** degli autoveicoli.





Normative Antinquinamento

DIESEL

NEDC	CO [mg/km]	HC+NO _x [mg/km]	NO _x [mg/km]	PM [mg/km]	Particles [#/km]	<i>Introduction Date</i>
Euro 4	500	300	250	25	-	NA 1/9/2006 – NR 1/1/2007
Euro 5	500	230	180	5	-	NA 1/9/2009 – NR 1/1/2011
Euro 6	500	170	80	5	6*10¹¹	NA 1/9/2014 – NR 1/9/2015

OTTO

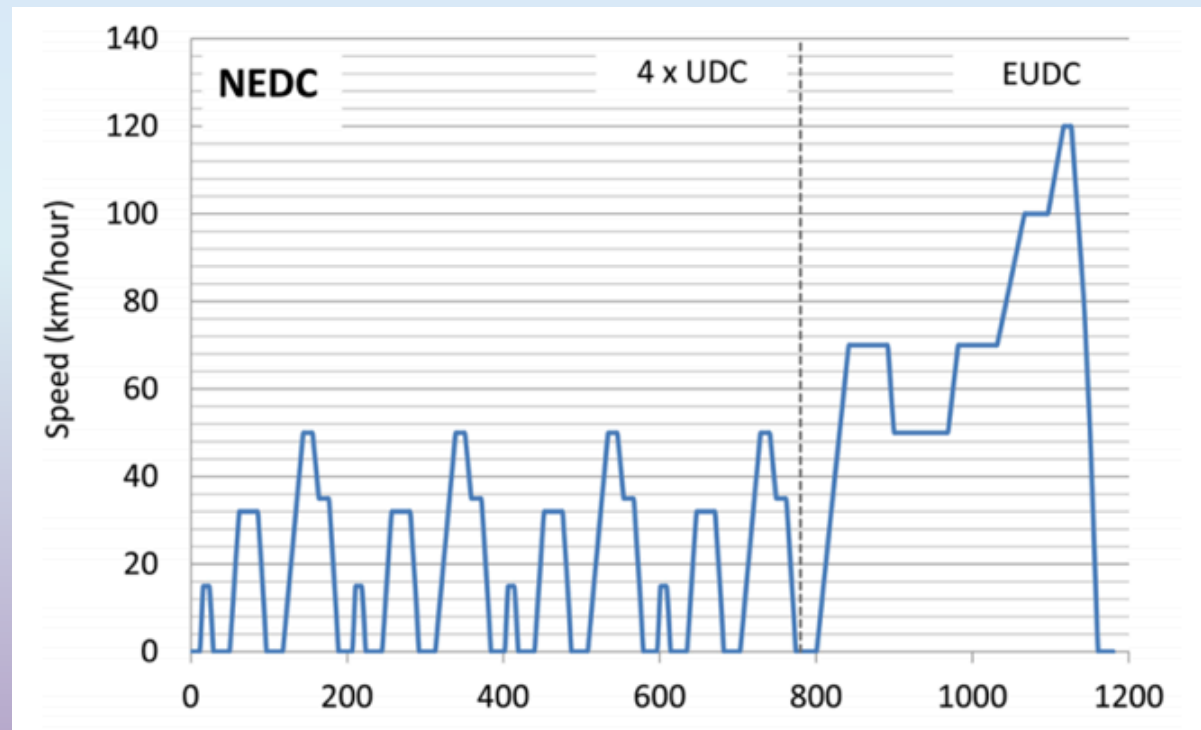
NEDC	CO [mg/km]	HC [mg/km]	NO _x [mg/km]	PM [mg/km]	Particles [#/km]	<i>Introduction Date</i>
Euro 4	1000	100	80		-	NA 1/9/2006 – NR 1/1/2007
Euro 5	1000	100	60	5 (GDI)	-	NA 1/9/2009 – NR 1/1/2011
Euro 6	1000	100	60	5 (GDI)	6*10¹¹_{GD} I	NA 1/9/2014 – NR 1/9/2015



Test Cycles - NEDC

- Performed under controlled and standard conditions in laboratory (vehicle test rig).
- Fixed Acceleration rate. Implemented up to Euro 6 standards.

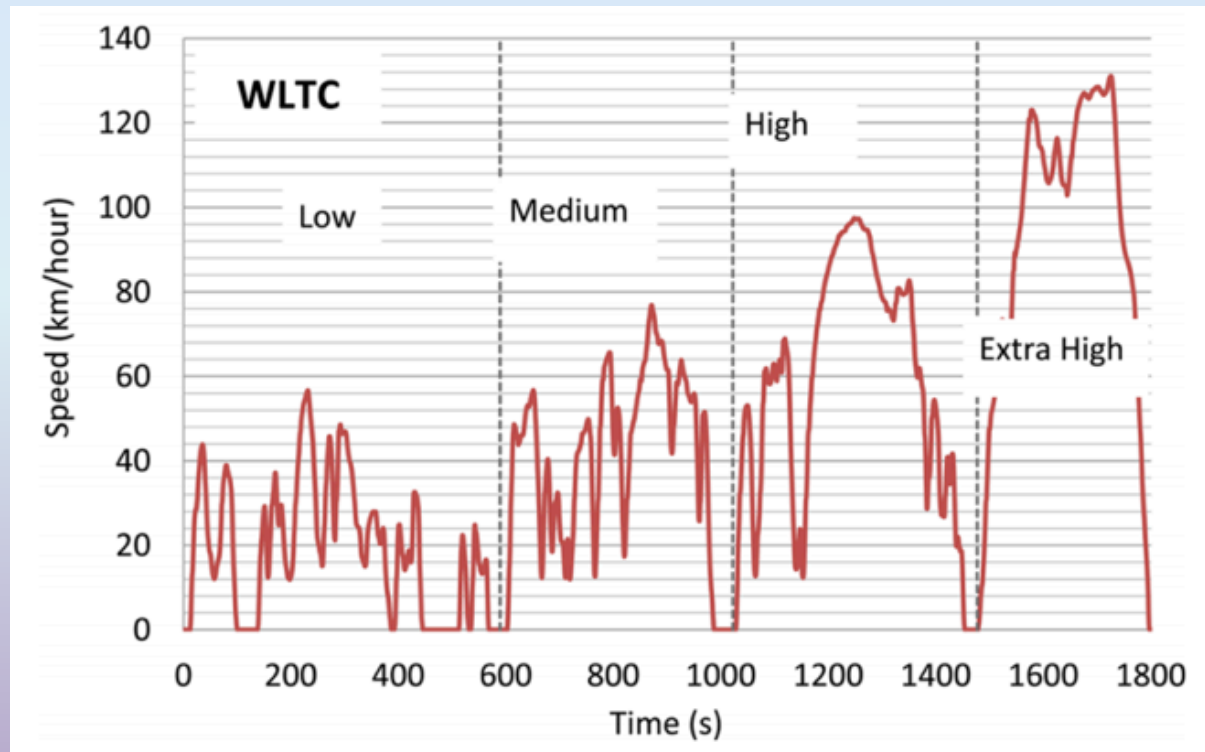
- Distance = 11 km
- Duration = 1180 s
- Max speed = 120 km/h
- Average speed = 33.6 km/h



Test Cycles - WLTC

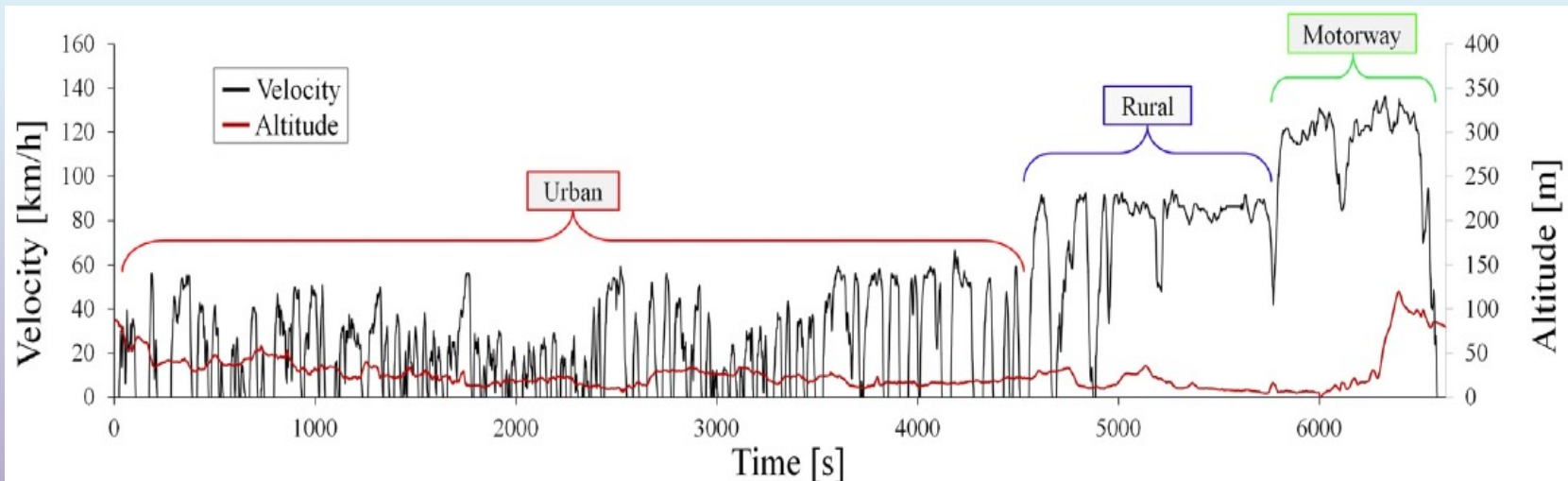
- Performed under controlled and standard conditions in lab.
- Variable acceleration rates. Implemented since Euro 6 standards.

- Distance = 23 km
- Duration = 1800 s
- Max speed = 131 km/h
- Average speed = 46.5 km/h



Test Cycles - RDE

- Performed on the road.
- Real operating conditions.
- Tests are not easily repeatable.
- Implemented since Euro 6 standards.





Ossidi di Azoto

- NO_x -



Monossido di Azoto - NO

- Gas incolore, insapore ed inodore
- Prodotto soprattutto nel corso dei processi di combustione ad alta temperatura.
- Viene poi ossidato in atmosfera dall'ossigeno e più rapidamente dall'ozono producendo biossido di azoto (NO_2).
- La quantità prodotta è tanto più elevata quanto maggiore è la temperatura di combustione e quanto più veloce è il successivo raffreddamento dei gas prodotti, che impedisce la decomposizione in azoto ed ossigeno.
- Il monossido di azoto NO, analogamente al monossido di carbonio, agisce sull'emoglobina, fissandosi ad essa con formazione di metamoglobina e nitrosometemoglobina.



Biossido di Azoto – NO₂

- Il biossido di azoto presenta una tossicità fino a quattro volte maggiore di quella del monossido di azoto. Forte ossidante ed irritante, il biossido di azoto esercita il suo effetto tossico principalmente sugli occhi, sulle mucose e sui polmoni.
- Il biossido di azoto si può ritenere uno degli inquinanti atmosferici più pericolosi, non solo per la sua natura irritante sull'uomo, ma anche perché, in condizioni di forte irraggiamento solare, provoca delle reazioni fotochimiche secondarie che creano altre sostanze inquinanti "smog fotochimico".
- Inoltre, trasformandosi in presenza di umidità in acido nitrico, esso è una delle cause della formazione delle cosiddette "piogge acide", che provocano ingenti danni alle piante e più in generale alterazioni negli equilibri ecologici ambientali.



Formazione NO_x

- L'ossidazione dell'azoto atmosferico può avvenire a seguito di una sua permanenza prolungata (di durata confrontabile con quella della fase di combustione nei motori) ad **elevate temperature** in presenza di una **adeguata concentrazione di ossigeno**.
- Nei motori ad a.c. la produzione degli NO ha generalmente luogo sia nella regione dei gas combusti (*thermal*), che in corrispondenza del fronte di fiamma (*prompt*).
- Dato che nei motori a combustione interna la combustione avviene con elevati valori di pressione, lo spessore del fronte di fiamma ed il tempo di permanenza risultano talmente piccoli da ritenere **marginale** il contributo del *prompt*.



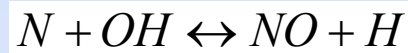
Formazione NOx

- Le reazioni di formazione degli ossidi d'azoto avvengono nei gas già raggiunti dal fronte di fiamma, dal momento che le frazioni di miscela che **bruciano per prime** raggiungono **temperature più elevate** rispetto alle frazioni che bruciano per ultime.
- Nei motori Diesel, lo spray è costituito internamente da un nucleo compatto con dosatura talmente bassa da inibire la formazione degli ossidi, mentre le frazioni periferiche della carica possono autoaccendersi in condizioni favorevoli alla formazione degli NOx (elevate temperature, elevate concentrazioni di ossigeno, tempi di permanenza sufficientemente lunghi).
- In seguito, nel corso dell'espansione, le reazioni chimiche che porterebbero alla distruzione degli NOx vengono **congelate** dalla rapida diminuzione della temperatura.



Formazione thermal NO

La formazione di NO è governata dalla cinetica chimica ed è formulata attraverso il meccanismo di **Zel'dovich**



Approssimazione
stazionarietà azoto atomico

$$\frac{d[N]}{dt} \approx 0$$

Equilibrio chimico per
[O], [O₂], [OH], [H], [N₂]

Velocità di formazione

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{2R_1 \left\{ 1 - ([NO]/[NO]_e)^2 \right\}}{1 + ([NO]/[NO]_e) R_1 / (R_2 + R_3)}$$

Costanti cinetiche

$$R_1 = k_1^+ [O]_e [N_2]_e k_1^+ = 7.6 \cdot 10^{13} \cdot \exp\left(\frac{-38000}{T}\right)$$

$$R_2 = k_2^- [NO]_e [O]_e k_2^- = 1.5 \cdot 10^9 \cdot \exp\left(\frac{-19500}{T}\right)$$

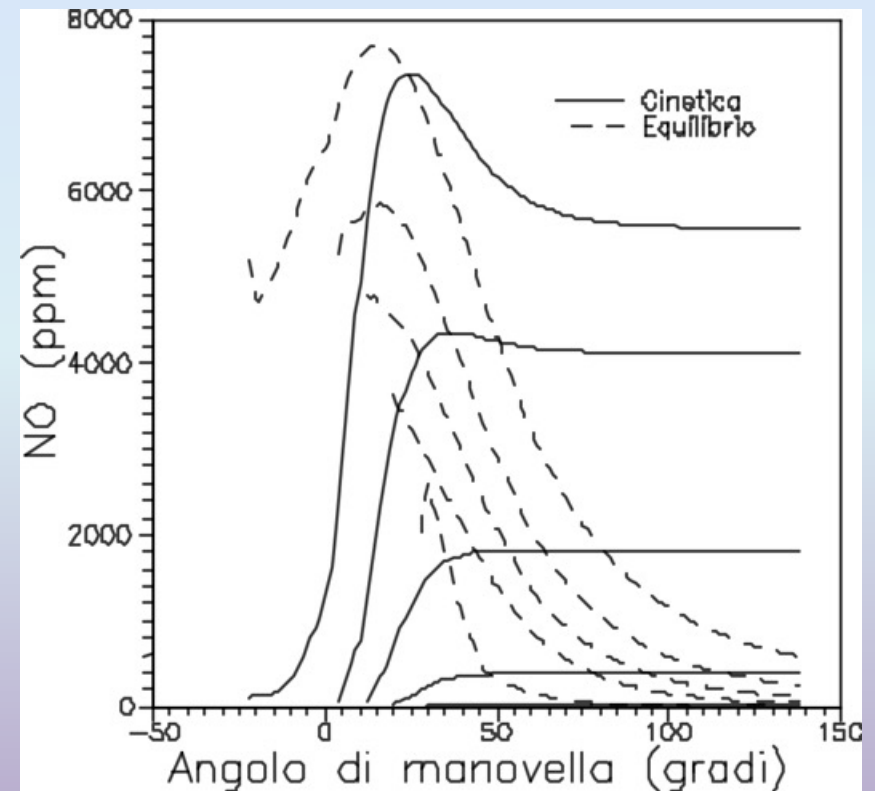
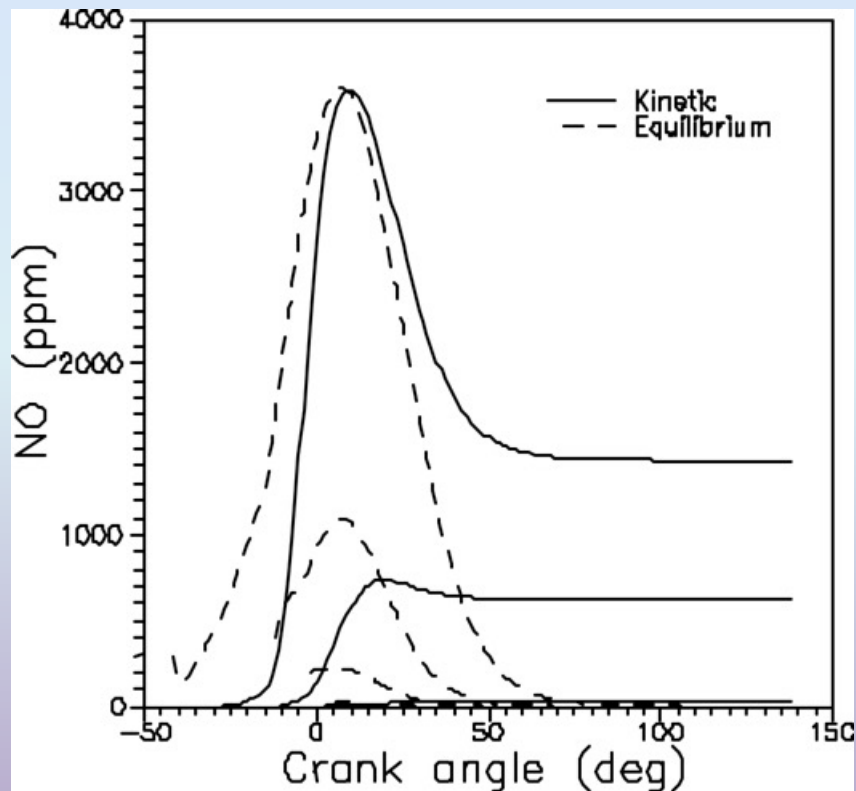
$$R_3 = k_3^- [NO]_e [H]_e k_3^- = 2 \cdot 10^{14} \cdot \exp\left(\frac{-23650}{T}\right)$$



Formazione thermal NO

Coppia = 10 Nm
Velocità = 1000 rpm
Anticipo accensione = 35°
AFR = 13.5

Coppia = 90 Nm
Velocità = 3000 rpm
Anticipo accensione = 25°
AFR = 15

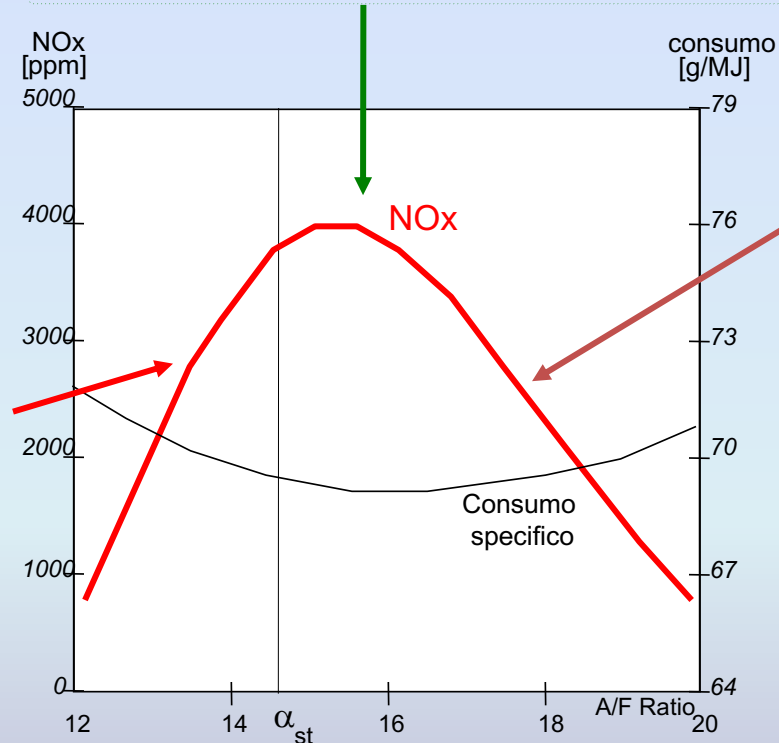




Dipendenza dal tenore di ossigeno

NOx limitato per la maggiore facilità del carbonio ad ossidarsi rispetto all'azoto.

NOx raggiunge il massimo valore quando tutto il carbonio è ossidato e le temperature sono ancora sufficientemente elevate.



NOx decresce perché le minori temperature ne rallentano la formazione.

Miscela ricca:
non c'è ossigeno a sufficienza per la ossidazione completa di C e H

Miscela povera:
le temperature massime decrescono a causa della maggiore diluizione della miscela.



Dipendenza NOx dalle cond. operative – Motori Otto

- **Rapp. di miscela (AFR)**

Se la concentrazione di NOx dipendesse esclusivamente dalla temperatura di picco durante il ciclo, essa risulterebbe massima per dosature leggermente inferiori alla stechiometrica, mentre la dipendenza anche dalla concentrazione di ossigeno sposta il massimo verso le miscele povere, in corrispondenza di valori di dosatura $AFR \approx 1.05 AFR_{st}$, laddove si riscontra una certa disponibilità di ossigeno.

- **Anticipo di accensione**

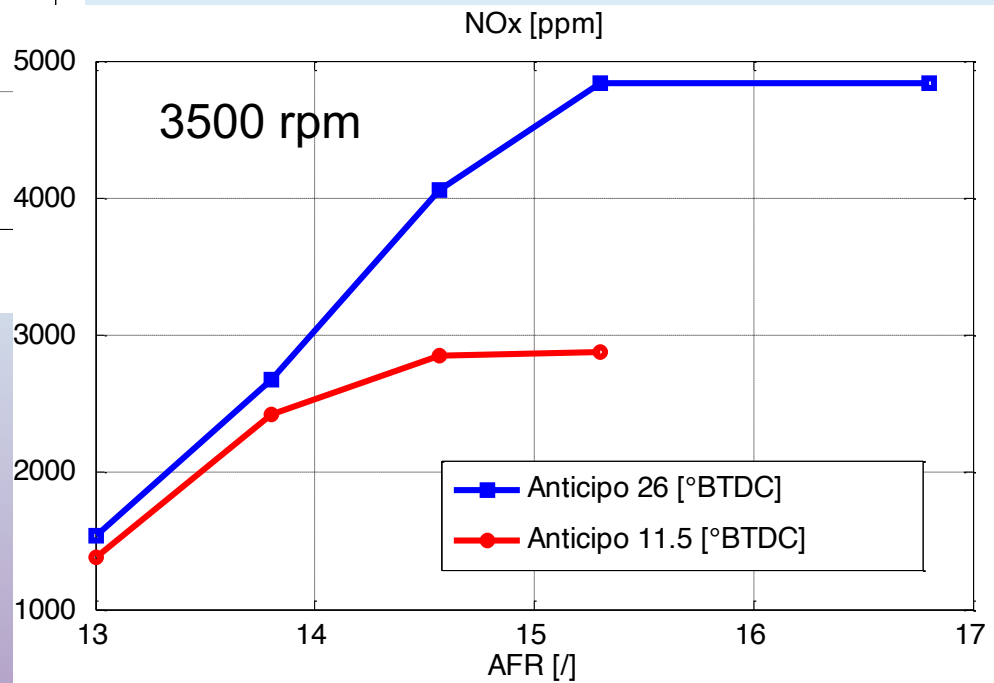
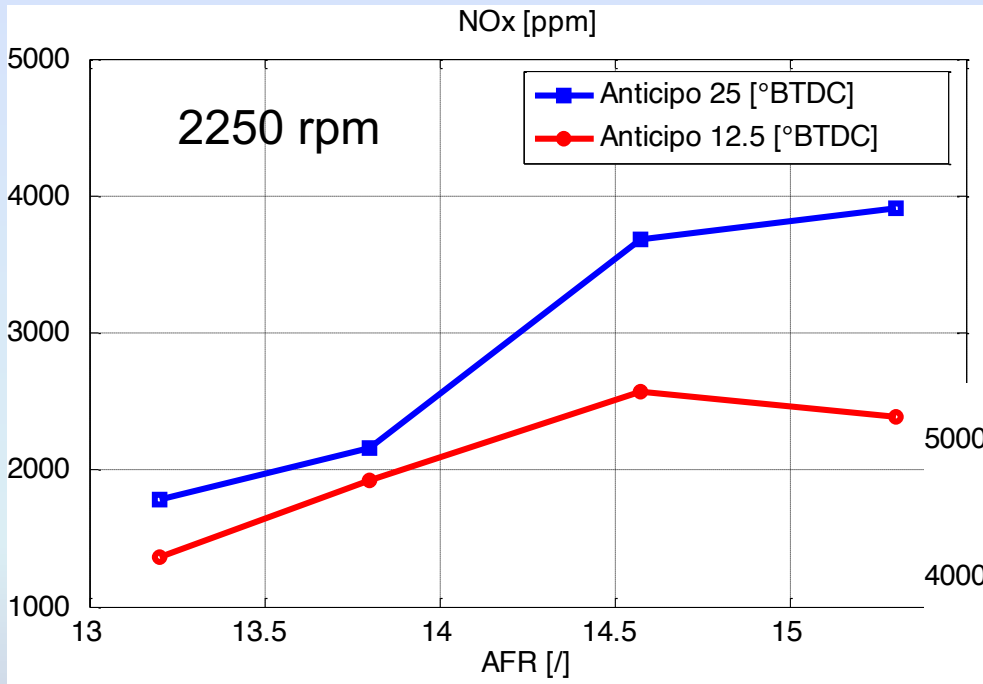
Al crescere dell'anticipo, aumenta la temperatura massima raggiunta durante il ciclo ed aumentano quindi le emissioni di NOx.

- **Tenore di gas residui (EGR)**

La presenza di gas combusti residui del ciclo precedente contribuisce a ridurre la temperatura massima, dal momento che tali gas si comportano come diluenti; il tenore dei gas residui può essere aumentato al fine di contenere le emissioni di NOx, con dispositivi EGR (exhaust gas recirculation).



Dipendenza NOx dalle cond. operative





Motori GDI

- Per effetto del funzionamento a **carica stratificata**, all'aumento della diluizione della miscela non corrisponde una riduzione delle emissioni di NO_x, come invece accade nel caso di motori ad iniezione indiretta.
- Ciò è imputabile al fatto che in prossimità della zona di accensione le miscele risultano stechiometriche o leggermente ricche (nucleo della carica) e, pertanto, le temperature si presentano molto elevate.
- Le emissioni di NO_x possono essere ridotte significativamente ai carichi parziali ($\approx 20-50\%$) grazie alla possibilità di utilizzare elevate percentuali di **EGR**.



Dipendenza NOx dalle cond. operative – Motori Diesel

- **Rapp. di miscela (AFR)**

Al crescere del carico (e quindi al diminuire di AFR), gli NOx tendono ad aumentare, dal momento che aumentano sia le temperature sia l'estensione delle zone in cui si trovano concentrazioni di ossigeno prossime ai valori stechiometrici.

- **Anticipo di iniezione**

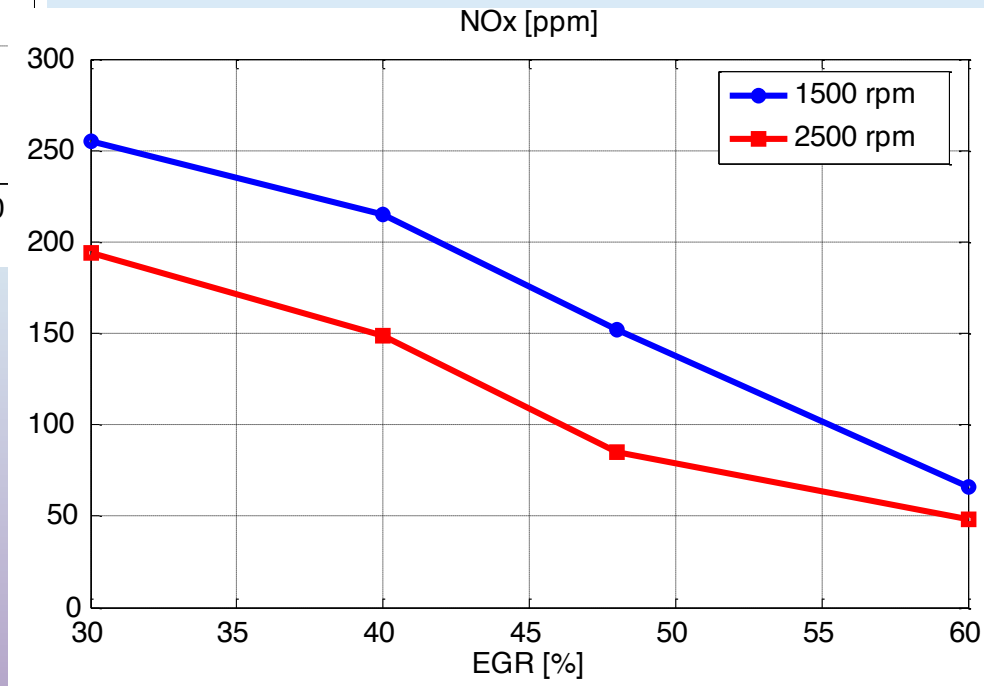
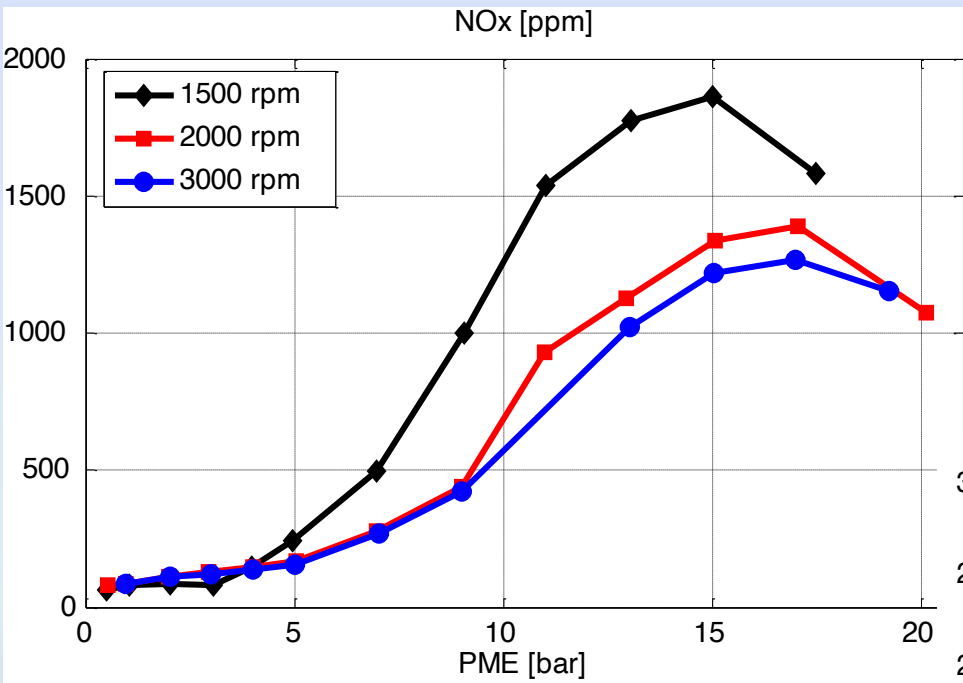
Le emissioni di NOx sono inoltre estremamente sensibili all'anticipo di iniezione, con una notevole aumento con l'anticipo (al crescere dell'anticipo di iniezione rispetto al PMS, infatti, aumentano la pressione e la temperatura massime).

- **Tenore di gas residui (EGR)**

La presenza di gas combusti residui del ciclo precedente contribuisce a ridurre la temperatura massima, dal momento che tali gas si comportano come diluenti; il tenore dei gas residui può essere aumentato, al fine di contenere le emissioni di NOx, con dispositivi EGR (exhaust gas recirculation).



Dipendenza NOx dalle cond. operative





Università degli Studi di Napoli
"Parthenope"

Prof. Ivan Arsie
Motori a Combustione Interna

Monossido di Carbonio - CO -



Natura

- Gas incolore, inodore, infiammabile, e molto tossico.
- Si forma durante le combustioni delle sostanze organiche, quando risultano incomplete per difetto di aria (cioè per mancanza di ossigeno).
- Rappresenta l'inquinante gassoso più abbondante in atmosfera.
- La principale sorgente di questa sostanza è rappresentata dal traffico veicolare (circa l'80% della produzione complessiva; in ambito urbano anche fino al 90-95%), in particolare dai gas di scarico dei motori ad a.c.
- La tossicità del monossido di carbonio è dovuta alla sua capacità di legarsi con l'emoglobina del sangue in concorrenza con l'ossigeno, formando carbossiemoglobina, interferendo così sul trasporto di ossigeno ai tessuti.



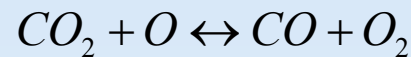
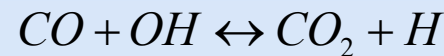
Formazione

- Il CO si forma durante la combustione degli idrocarburi, che avviene attraverso una serie di reazioni intermedie
 $RH \rightarrow R \text{ (radicali)} \rightarrow RO_2 \text{ (perossidi)} \rightarrow RCHO \text{ (aldeidi)} \rightarrow RCO \text{ (chetoni)} \rightarrow CO$
e viene successivamente ossidato a CO_2 .
- La reazione di **ossidazione** del CO è **relativamente lenta** rispetto a quella di **formazione** del CO stesso: ad elevata temperatura i tempi a disposizione sono comunque sufficienti per raggiungere l'equilibrio chimico, mentre non lo sono a bassa temperatura.
- Inoltre, ad alta temperatura, gli equilibri chimici prevedono che, anche in presenza di quantità adeguate di ossigeno, una parte della CO_2 che potrebbe teoricamente formarsi resti in forma **dissociata**, contribuendo ad elevare la concentrazione di CO.
- Durante il rapido abbassamento della temperatura che si verifica nel corso dell'espansione, la velocità di ossidazione del CO a CO_2 rallenta, fino ad un vero e proprio "**congelamento**" delle concentrazioni di CO: nei gas di scarico la concentrazione di tale inquinante risulta pertanto **maggiore** di quella che si ricaverebbe dal rispetto degli **equilibri chimici** a bassa temperatura.



Formazione

- Reazioni di ossidazione



- Equilibrio chimico per $[CO_2]$, $[H]$, $[O_2]$, $[OH]$, $[O]$

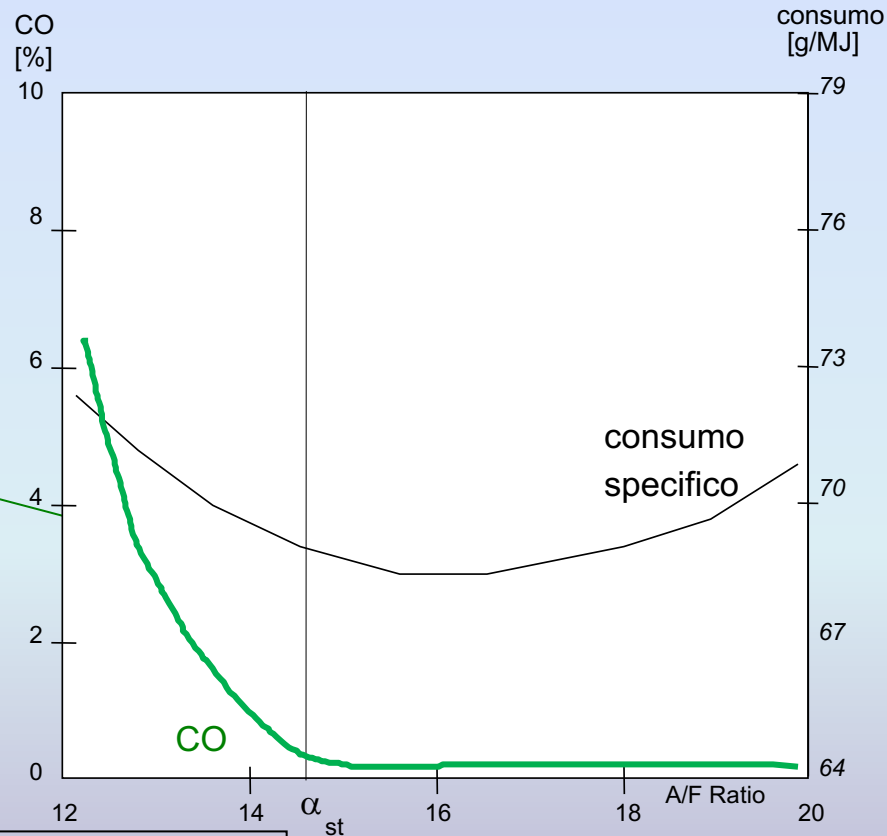
- Velocità di formazione di CO
$$\frac{1}{V_b} \frac{dn_{CO}}{dt} = (R_1 + R_2) \cdot \left(1 - \frac{[CO]}{[CO]_e}\right)$$

$$R_1 = k_1^+ [CO]_e [OH]_e \quad k_1^+ = 6.76 \cdot 10^{10} \cdot \exp\left(\frac{T}{1102}\right)$$

- Costanti cinetiche

$$R_2 = k_2^- [CO]_e [O_2]_e \quad k_2^- = 2.5 \cdot 10^{12} \cdot \exp\left(\frac{-24055}{T}\right)$$

Dipendenza dal tenore di ossigeno



CO elevati a causa della carenza di ossigeno.

Miscela ricca:
non c'è ossigeno a sufficienza per la ossidazione completa di C e H

Miscela povera:
le temperature massime decrescono a causa della maggiore diluizione della miscela.



Dipendenza dalle cond. operative

- **Rapporto di miscela (AFR)**

Sperimentalmente si osserva che la concentrazione di CO è essenzialmente determinata dalla dosatura, con valori rapidamente crescenti nel campo delle miscele ricche, mentre non è influenzata in misura apprezzabile dall'anticipo di accensione.

La presenza di piccole concentrazioni di CO anche nel campo delle dosature stechiometriche o leggermente povere è imputabile essenzialmente sia a fenomeni di dissociazione sia all'ossidazione tardiva di alcuni degli HC "intrappolati" negli interstizi o nel film d'olio lubrificante.

In conclusione, dato il rapido incremento delle emissioni di CO al diminuire della dosatura per valori inferiori allo stechiometrico, risultano particolarmente critiche le condizioni di funzionamento con miscela ricca (avviamento a **freddo**, **transitori** di accelerazione, **piena** ammissione), nonché eventuali **disuniformità** di dosatura tra cilindro e cilindro (l'incremento di emissioni dovuto ai cilindri più ricchi della media non è compensato infatti dalla riduzione di emissioni da parte dei cilindri più poveri).

Nei motori ad **accensione per compressione** e nei motori **GDI** le emissioni di CO sono **trascurabili** dal momento che si impiegano prevalentemente miscele magre.

Dipendenza dalle cond. operative

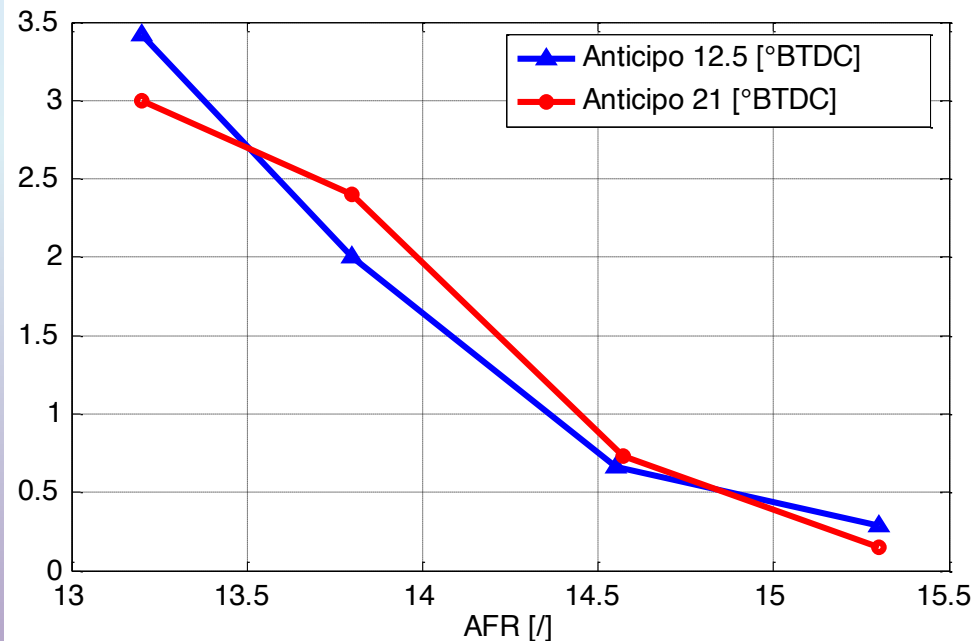
2250 rpm

$P_{man} = 700$ mbar

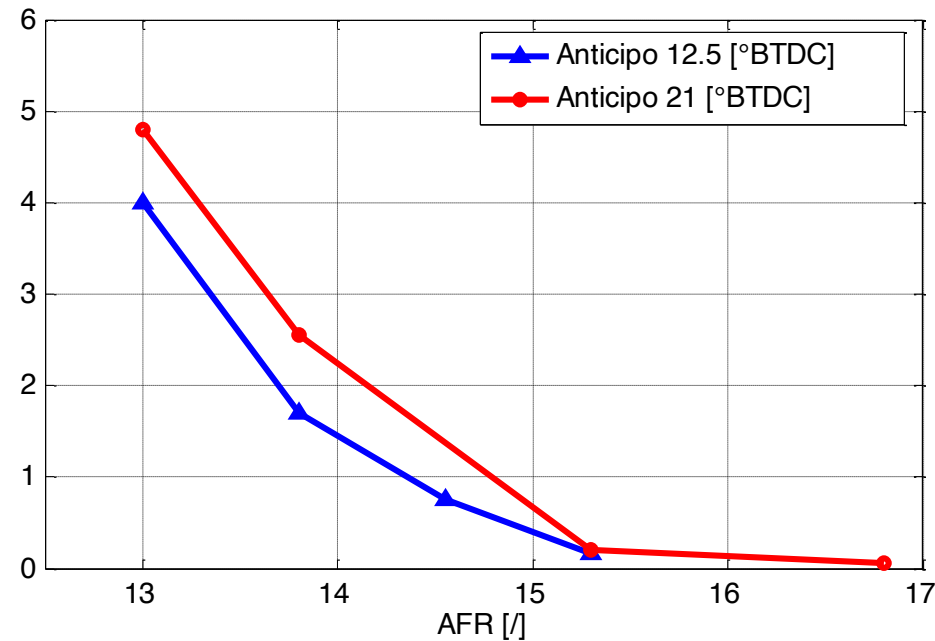
3500 rpm

$P_{man} = 700$ mbar

CO [% vol.]



CO [% vol.]





Idrocarburi Incombusti

- HC -



Natura

- Principali responsabili dello "smog fotochimico", che può provocare ingenti danni alla salute umana: difficoltà respiratorie, attacchi di asma ed insufficienza cardiaca.
- Alla famiglia degli idrocarburi appartengono vari tipi di sostanze, tra cui gli aromatici come il benzene, gli xileni e i tolueni, provenienti dall'evaporazione dei combustibili o dalla cattiva combustione degli stessi.
- Gli aromatici rappresentano circa il 40% del totale delle emissioni totali degli idrocarburi ed hanno effetti tossici notevoli.
- In generale è possibile suddividere gli idrocarburi in varie classi:
 - Policiclici aromatici (IPA), che comprendono molte centinaia di composti singoli, un terzo dei quali svolge un'accertata azione cancerogena. Il più conosciuto, anche per la sua cancerogenicità è il Benzo-a-pirene. Sprigionati dalle benzine, gli IPA rappresentano il 30% del totale delle emissioni di idrocarburi nel settore dei trasporti.
 - Idrocarburi totali non metanici (NMHC). Sono composti organici in forma gassosa o particellare derivanti dalla combustione incompleta di combustibili e altre sostanze contenenti carbonio, come i gas esausti dei veicoli a motore. Rappresentano circa il 30% delle emissioni totali di idrocarburi.
 - Benzene. Viene emesso dal traffico veicolare come sottoprodotto della benzina e degli altri composti aromatici e attraverso l'evaporazione della benzina dal tubo di scarico o dal serbatoio. È altamente cancerogeno.



Formazione

- Sono una diretta conseguenza di una **combustione incompleta**, imputabile al fatto che gli idrocarburi presenti originariamente nel combustibile non si sono ossidati del tutto e quindi vengono emessi allo scarico.
- Tale presenza è imputabile ad una molteplicità di fenomeni, dipendenti dalle cond. operative e dalla geometria della camera di combustione.
- La composizione di HC allo scarico presenta una certa varietà di specie organiche, tra queste, quelle che si presentano con concentrazioni più rilevanti sono le paraffine, le olefine, gli alchini, e gli idrocarburi aromatici, mentre aldeidi, chetoni, alcoli e fenoli sono presenti in percentuali minori.
- Dall'analisi dei gas di scarico di una motore ad accensione comandata, si è evidenziato che la percentuale di produzione di HC risulta essere più cospicua rispetto alle emissioni di HC nei motori ad accensione per compressione.



Università degli Studi di Napoli
"Parthenope"

Prof. Ivan Arsie
Motori a Combustione Interna

HC nei Motori ad A.C.



Formazione

Gli idrocarburi incombusti possono avere origini diverse, elencate qui di seguito in ordine di importanza:

- Frazioni della carica intrappolate negli interstizi.
- Frazioni della carica assorbite dal film d'olio lubrificante.
- Spegnimento all'interno della carica.
- Strato di spegnimento a parete.



Formazione

Frazioni della carica intrappolate negli interstizi

Durante la compressione, al crescere della pressione, parte della carica viene forzata ad entrare negli interstizi della camera di combustione (ad es. nel volume compreso tra canna, stantuffo e segmenti, nel volume compreso tra testata, guarnizione e cilindro), ossia in zone in cui la fiamma non riesce a propagarsi: nel corso della fase di espansione, al diminuire della pressione, tali frazioni possono rifluire verso la camera ed ossidarsi in modo incompleto.

Frazioni della carica assorbite dal film d'olio lubrificante

Parte della carica può essere assorbita dal film d'olio lubrificante presente sulle pareti del cilindro, in quanto i vapori di combustibile passano in soluzione nel film d'olio al crescere della pressione durante la compressione e vengono poi rilasciati durante l'espansione, quando la loro pressione parziale si abbassa notevolmente, ma possono allora ossidarsi soltanto in modo incompleto.



Formazione

Spegnimento all'interno della carica

Quando il fronte di fiamma incontra, a causa dell'inevitabile disomogeneità della miscela, zone con dosatura molto povera o con elevato tenore di gas residui, la sua velocità di propagazione può annullarsi, lasciando così, all'interno della carica, sacche di gas totalmente o parzialmente incombusti. Qualora sia la miscela che si trova in prossimità degli elettrodi della candela ad essere inadatta al propagarsi della fiamma, possono verificarsi vere e proprie mancate accensioni dell'intera carica (misfiring).

Strato di spegnimento a parete

Durante la combustione la fiamma si spegne in prossimità delle pareti della camera, a causa del raffreddamento della miscela combustibile-comburente da parte delle pareti stesse.

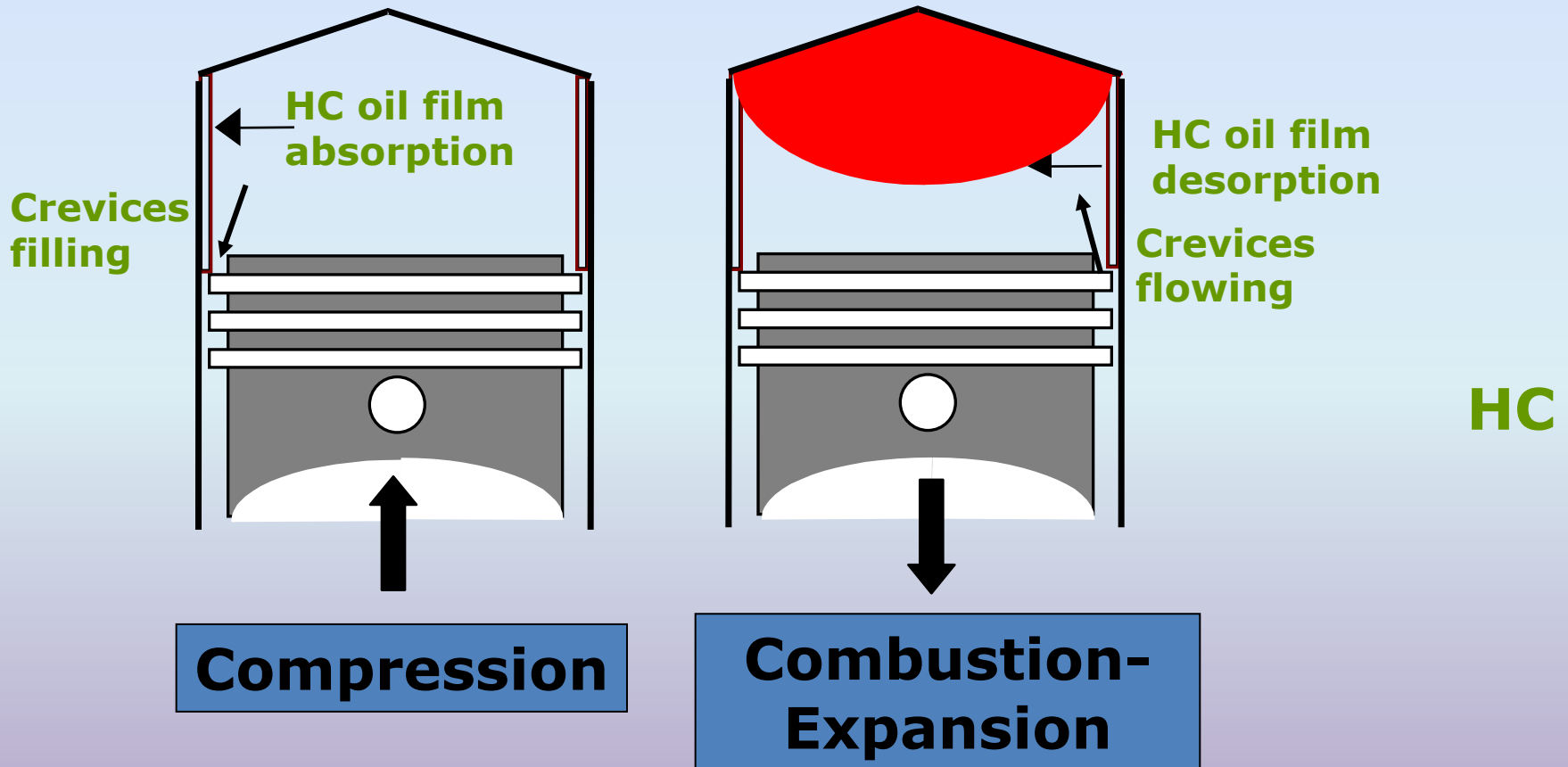


Formazione

Ossidazione Post-Flame

- Gli idrocarburi incombusti formati secondo i meccanismi precedentemente elencati possono ossidarsi parzialmente venendo in contatto con i gas combusti ad alta temperatura all'interno del cilindro nel corso delle fasi finali dell'espansione e durante lo scarico.
- L'ossidazione può poi procedere anche nel primo tratto del condotto di scarico (sono comunque necessarie temperature superiori ai 600°C e tempi di residenza superiori ai 50 ms).

Formazione





Formazione

- Riempimento e successivo rilascio, da parte della miscela incombusta, di piccoli volumi all'interno della camera di combustione caratterizzati da superfici di accesso molto ristrette in cui il fronte di fiamma è incapace di penetrare (crevices):

$$\frac{dm}{d\theta} = \frac{dP}{d\theta} \cdot \frac{RT}{V}$$

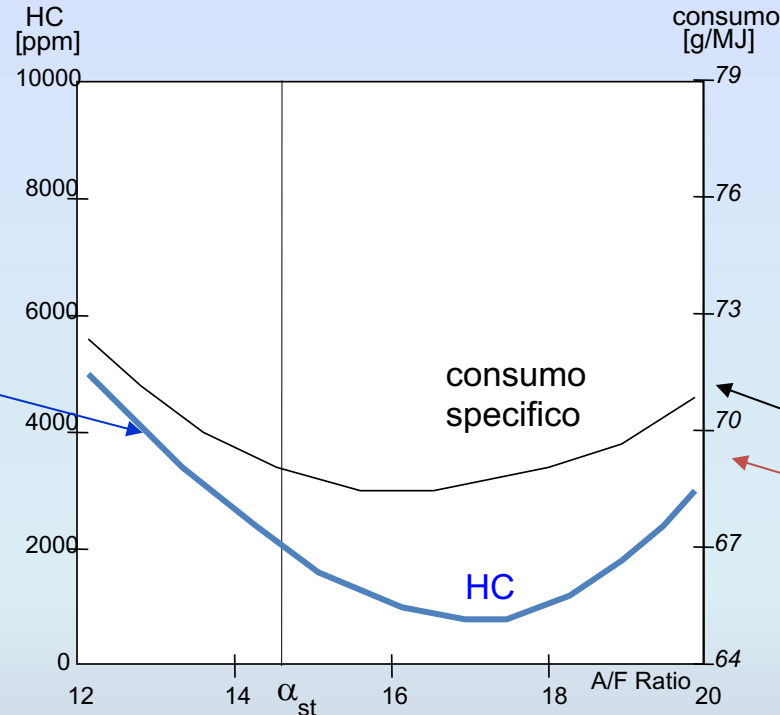
- Assorbimento di combustibile allo stato di vapore da parte del film di lubrificante aderente alle pareti del cilindro durante la fase di compressione e successivo desorbimento nel corso della fase di espansione:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2}$$

- Ossidazione completa degli idrocarburi rilasciati nella regione dei gas incombusti a monte del fronte di fiamma.
- Ossidazione post-flame regolata dalla cinetica chimica degli idrocarburi rilasciati a valle del fronte di fiamma nella regione dei gas combusti:

$$\frac{d[HC]}{dt} = -A \cdot [HC]^a [O_2]^b \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$

Dipendenza dal tenore di ossigeno



HC elevati a causa della carenza di ossigeno.

HC e **consumi** crescono in prossimità del limite di magro per mancata accensione (*misfiring*).

Miscela ricca:
non c'è ossigeno a sufficienza per la ossidazione completa di C e H

Miscela povera:
le temperature massime decrescono a causa della maggiore diluizione della miscela.



Dipendenza dalle cond. operative

Rapporto di miscela (AFR) :

La concentrazione degli HC è particolarmente elevata sia nel campo delle **miscele ricche** (ove, tra le cause di formazione, sono prevalenti lo spegnimento a parete, l'intrappolamento di parte della carica negli interstizi e nel film d'olio lubrificante), sia nel campo delle **miscele magre** (dove predominano lo spegnimento all'interno della carica e le mancate accensioni), mentre è minima per valori di dosatura $AFR \approx 1.15 AFR_{st}$.

Anticipo di accensione:

L'aumento dell'anticipo comporta generalmente un incremento degli HC: con bassi valori di anticipo si hanno pressioni e temperature più elevate durante la fase finale dell'espansione in cui avviene l'ossidazione **post-flame** degli HC che non hanno partecipato in precedenza alla combustione perché intrappolati nello strato di spegnimento o negli interstizi. Con dosature magre la tendenza può cambiare: difatti al crescere della dosatura, la velocità di avanzamento del fronte di fiamma diminuisce e con anticipi troppo bassi si possono raggiungere condizioni di combustione incompleta o di **misfiring**.

Regime di rotazione:

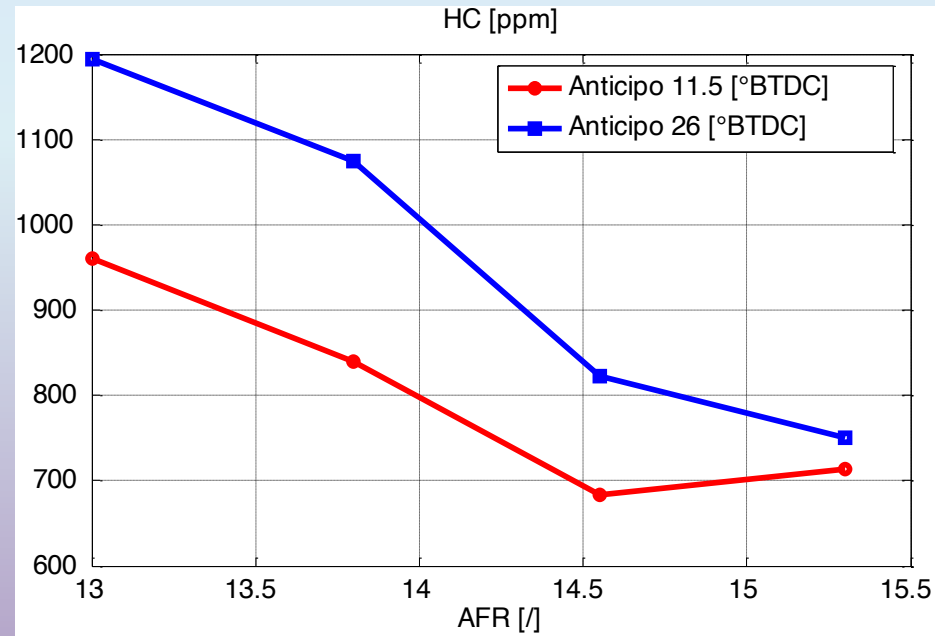
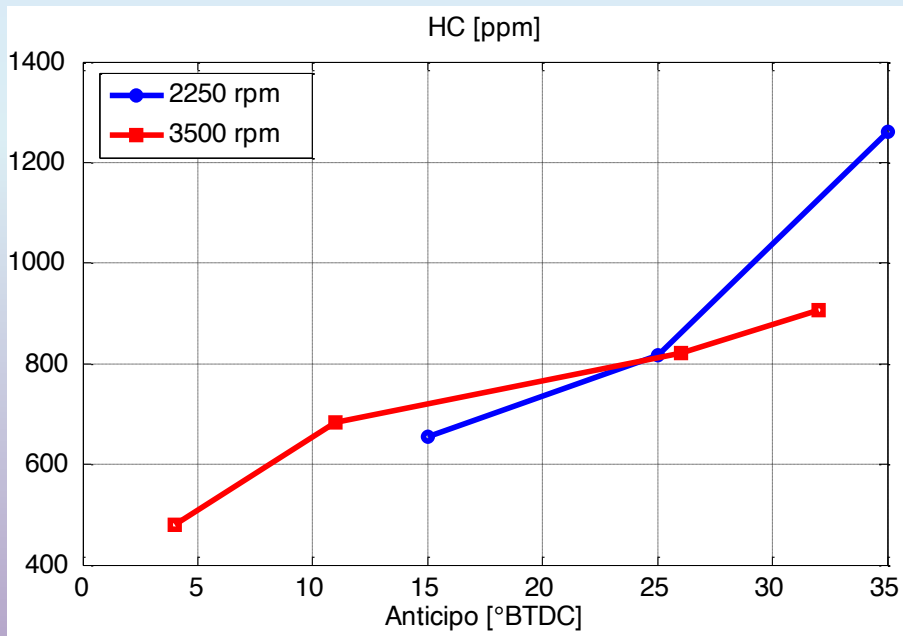
influenza lo **spessore** dello **strato limite** in quanto ad elevato numero di giri si ha un minore scambio termico e quindi temperatura delle pareti del cilindro più elevata.



Dipendenza cond. operative

AFR = 14.5
700 [mbar]

3500 rpm
700 [mbar]





HC nei Motori GDI

- La **stratificazione** della carica determina una drastica **riduzione** della formazione di HC dovuta all'intrappolamento della carica negli interstizi e nel velo di lubrificante.
- Inoltre, la composizione globalmente **magra** della miscela riduce notevolmente le emissioni durante le fasi di avviamento a **freddo** e nei **transitori**.
- Tuttavia la necessità di iniettare il combustibile in fase di compressione avanzata può causare ai carichi parziali ed al minimo un sostanziale incremento delle emissioni specifiche HC, a causa dei ridotti tempi disponibili per l'evaporazione delle gocce ed il miscelamento combustibile-comburente.
- Inoltre l'eccessiva stratificazione della carica potrebbe determinare ai bassi carichi fenomeni di **spegnimento** della fiamma alle estremità della camera di combustione.
- Le ridotte temperature allo scarico non favoriscono l'ossidazione **post-flame**.



Università degli Studi di Napoli
"Parthenope"

Prof. Ivan Arsie
Motori a Combustione Interna



HC nei Motori Diesel

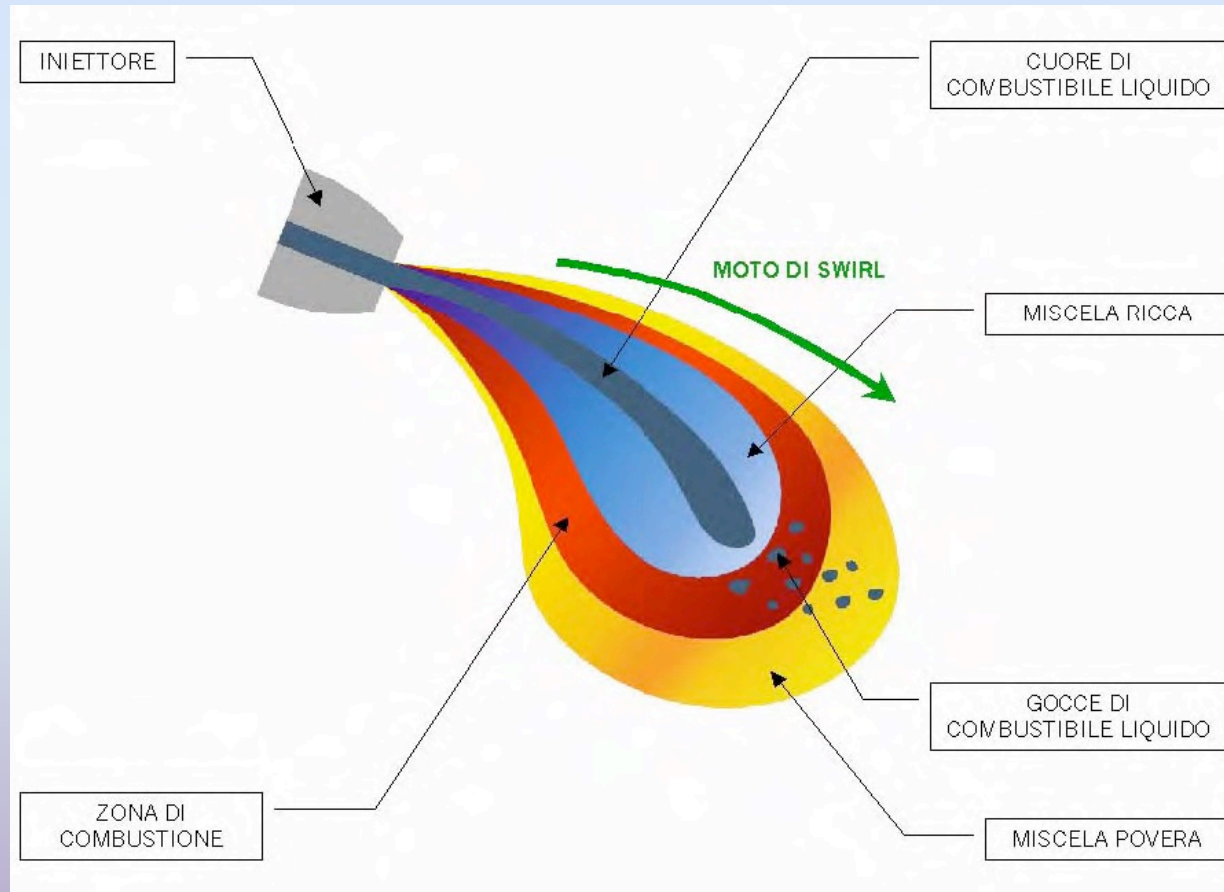


Formazione

- La composizione degli HC emessi dai motori Diesel è più complessa rispetto a quella degli HC emessi dai motori ad a.c. e copre un intervallo di pesi molecolari più esteso (dato il maggior contenuto in frazioni altobollenti del gasolio).
- Il combustibile risiede nella camera di combustione per un tempo decisamente minore rispetto al motore a benzina e si avrà anche un tempo più limitato per i meccanismi di assorbimento della carica fresca (interstizi / film di lubrificante).
- Poiché gli HC vengono misurati tramite prelievo con linea riscaldata a 190°C , previo filtraggio per eliminare le particelle solide, una frazione consistente degli idrocarburi incombusti resta allo stato liquido, adsorbita a nuclei carboniosi e viene computata come emissione di particelle solide (particolato).

Formazione

- All'estrema periferia dello spray, dove la fiamma originatasi in corrispondenza dei nuclei di accensione non riesce a propagarsi per la bassa concentrazione di combustibile, dando quindi luogo ad un'ossidazione parziale.
- Nella zona centrale del getto, ove le ultime gocce iniettate non trovano più ossigeno sufficiente per bruciare completamente.





Dipendenza dalle cond. operative

Miscele eccessivamente magre:

- L'iniezione di combustibile all'interno del cilindro dà luogo ad una distribuzione locale del rapporto di miscela aria-combustibile, per cui l'accensione avviene solo nelle zone in cui la miscela risulta leggermente ricca.
- La diffusione del getto liquido non avviene uniformemente, ma in modo eterogeneo.
- Si distinguono così zone a differente grado di miscelazione (differenti valori del rapporto di miscela) e solo in alcune di esse le condizioni termodinamiche sono tali da generare l'auto-ignizione.
- Nelle zone in cui la miscela si presenta magra, le condizioni termodinamiche e chimiche per l'accensione non sono soddisfatte, pertanto non si ha combustione con conseguente formazione di un'elevata concentrazione di HC.
- La quantità di idrocarburi incombusti che si genera in queste zone dipende esclusivamente dalle quantità di combustibile iniettato durante l'ignition-delay, dalla velocità di mescolamento del combustibile con l'aria durante questo lasso di tempo ed infine dalle condizioni di autoaccensione sviluppate all'interno del cilindro.



Dipendenza dalle cond. operative

Miscela eccessivamente ricche:

- Una combustione incompleta si verifica anche, in quelle zone in cui la miscela è particolarmente ricca, e dunque non sono rispettate le proporzioni chimiche tra combustibile e comburente.
- È possibile quindi distinguere, per questo tipo di miscele, due possibili cause principali che portano alle emissioni di HC:
 - una è imputabile al fatto che il combustibile fuoriuscente dall'iniettore ha una velocità sufficientemente bassa da essere in ritardo con il processo di combustione
 - l'altra è dovuta ad un possibile eccesso di combustibile che invade la camera di combustione.
- Al termine del processo di iniezione, all'interno dei piccoli volumi interstiziali che si creano negli orifici dell'iniettore si raccolgono idrocarburi pesanti che sfuggono alla combustione e vanno ad alimentare le emissioni di HC.
- La riduzione di tali volumi determina significative riduzioni dei livelli di concentrazione di HC allo scarico.



Università degli Studi di Napoli
“Parthenope”

Prof. Ivan Arsie
Motori a Combustione Interna

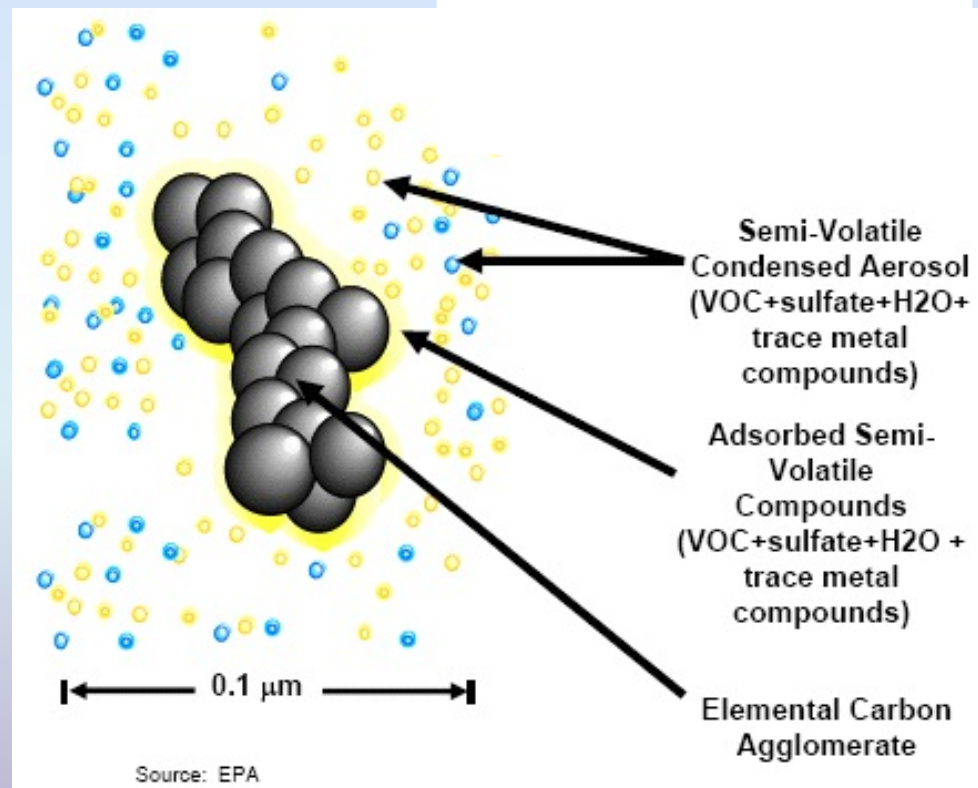


Particolato

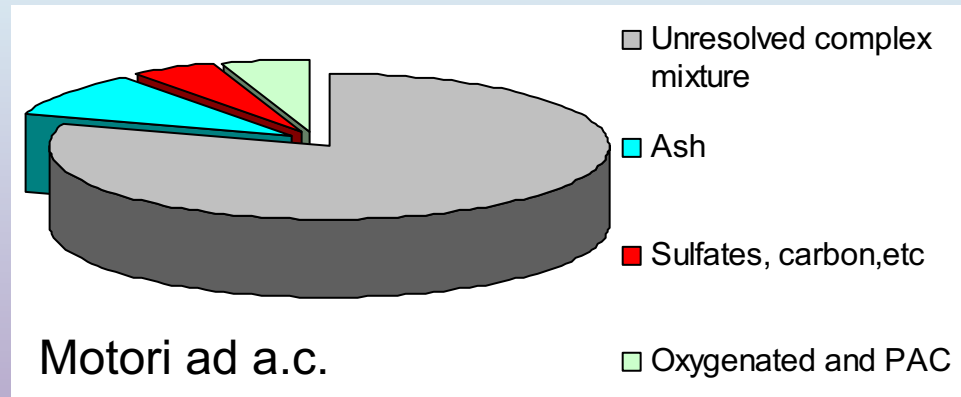
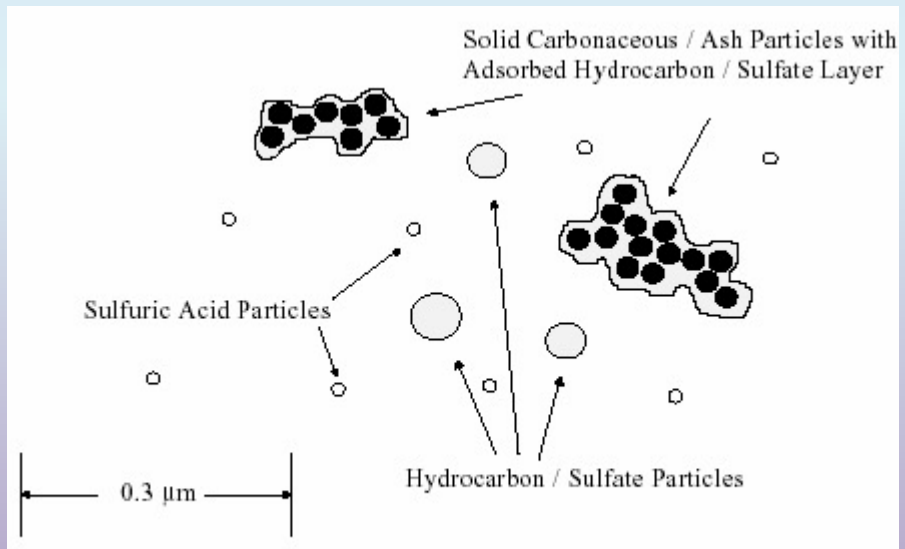
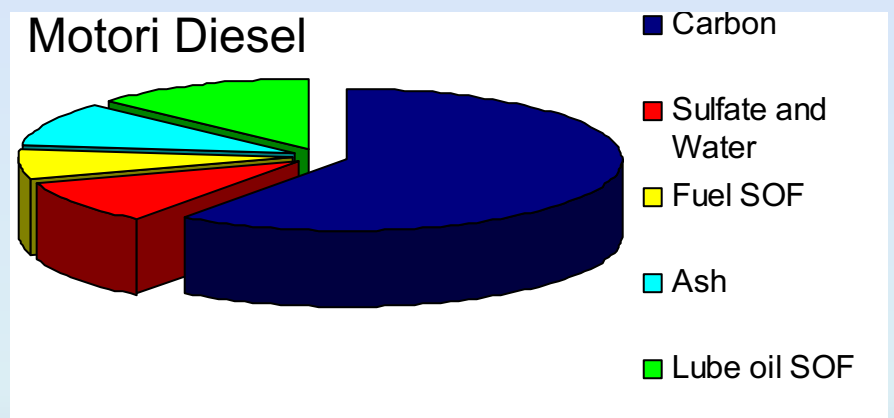
Natura

Il particolato atmosferico emesso dai motori a combustione interna è costituito da:

- una matrice carboniosa, **soot**, resistente all'ossidazione a temperature inferiori 400°C ;
- una frazione organica, volatile organic fraction **VOF**, dovuta agli idrocarburi incombusti;
- solfati;
- metalli / polveri non organiche.



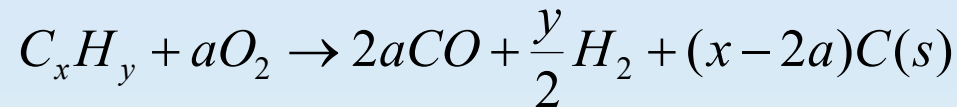
Struttura e Composizione delle particelle nei motori a c.i.





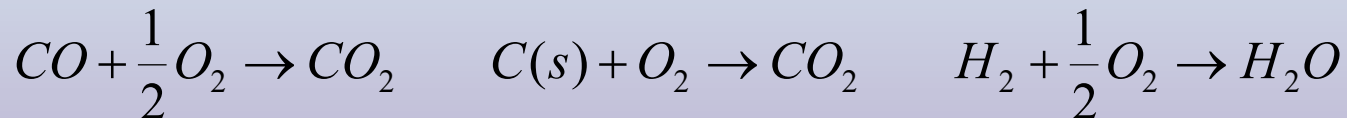
Formazione del soot

- La maggior parte delle particelle emesse dai motori sono dovute ad una combustione incompleta del carburante che si verifica quando il motore opera con miscele ricche.
- In particolare, il soot si forma quando $x \geq 2a$ (o $x/2a \geq 1$)



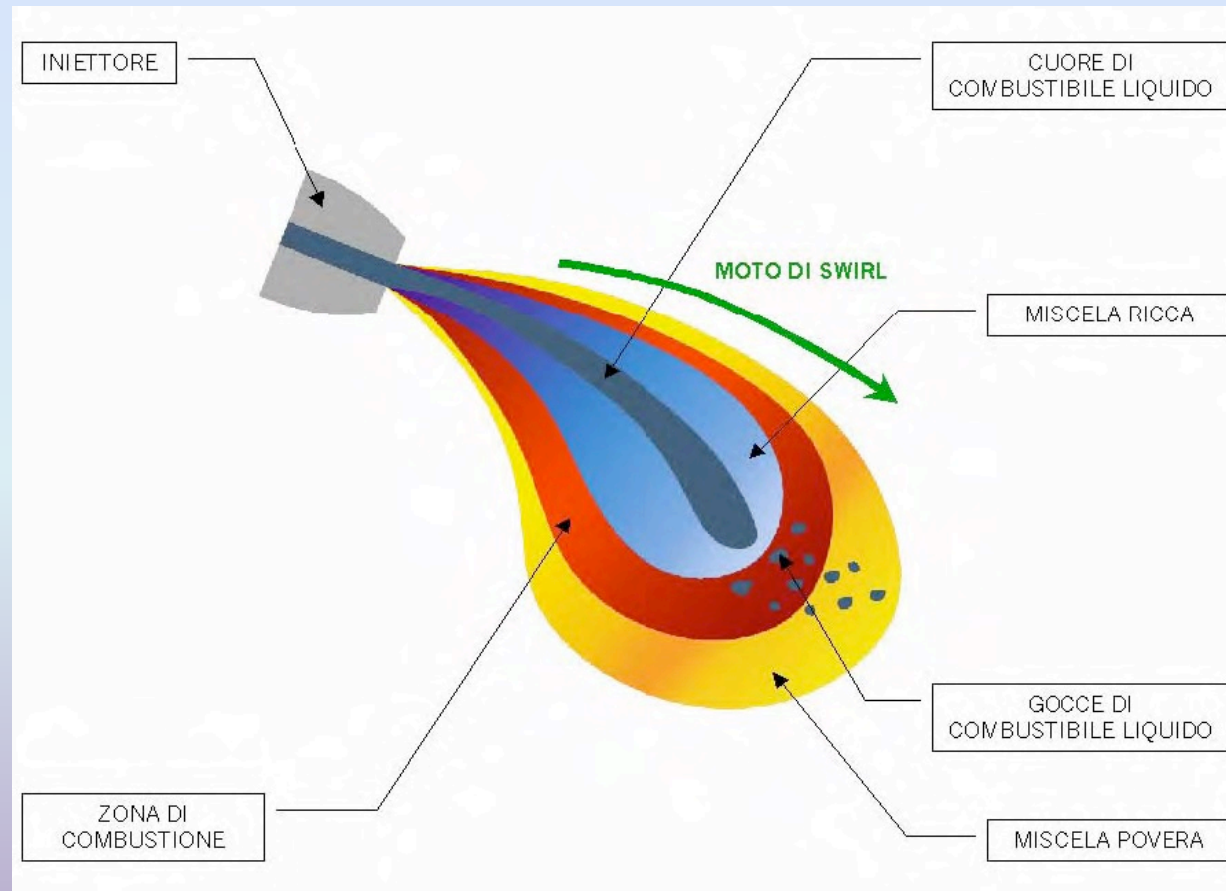
cioè quando il rapporto C/O è maggiore di 1.

- Sperimentalmente, è stato constatato che i valori critici del rapporto C/O per la formazione di soot sono compresi tra 0,5 e 0,8.
- CO, H₂, e il C(s) sono successivamente ossidati dalla fiamma diffusa e formano CO₂ e H₂O durante la seconda fase del processo di combustione secondo le reazioni:

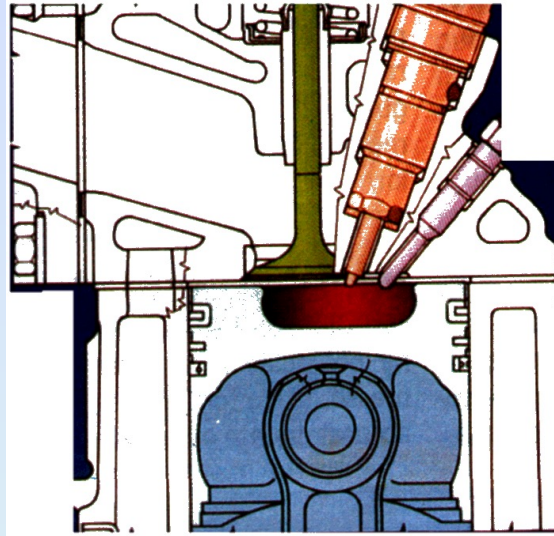


Formazione

- Nella zona centrale del getto, ove risulta più difficile la diffusione dell'ossigeno, le gocce iniettate non trovano più ossigeno sufficiente per bruciare completamente ed a causa della temperatura elevata subiscono un cracking termico.



Formazione di particelle nei motori Diesel



**Common Rail
Iniezione diretta
ad alta pressione**

Iniezione
combustibile in
camera di
combustione

Eccesso d'aria dal
40 al 50%

Particelle

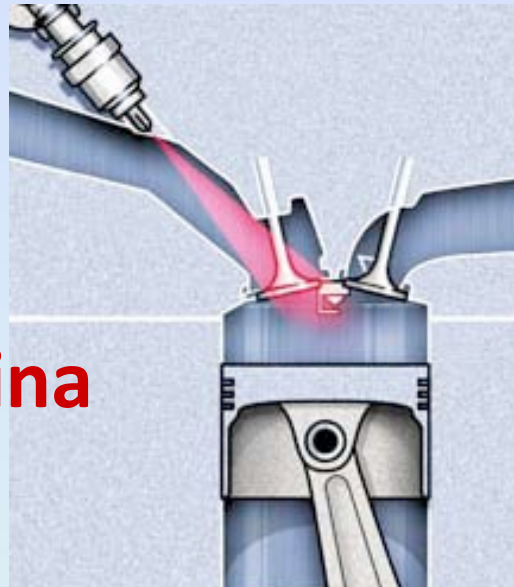
**Formazione di una
miscela
particolarmente ricca
localmente in camera
di combustione**

**Trafilamento
dell'olio di
lubrificazione**





Formazione di particelle nei motori ad accensione comandata a benzina



Iniezione
combustibile nel
condotto di
aspirazione

**Port fuel injection
(iniezione indiretta)**

Particelle

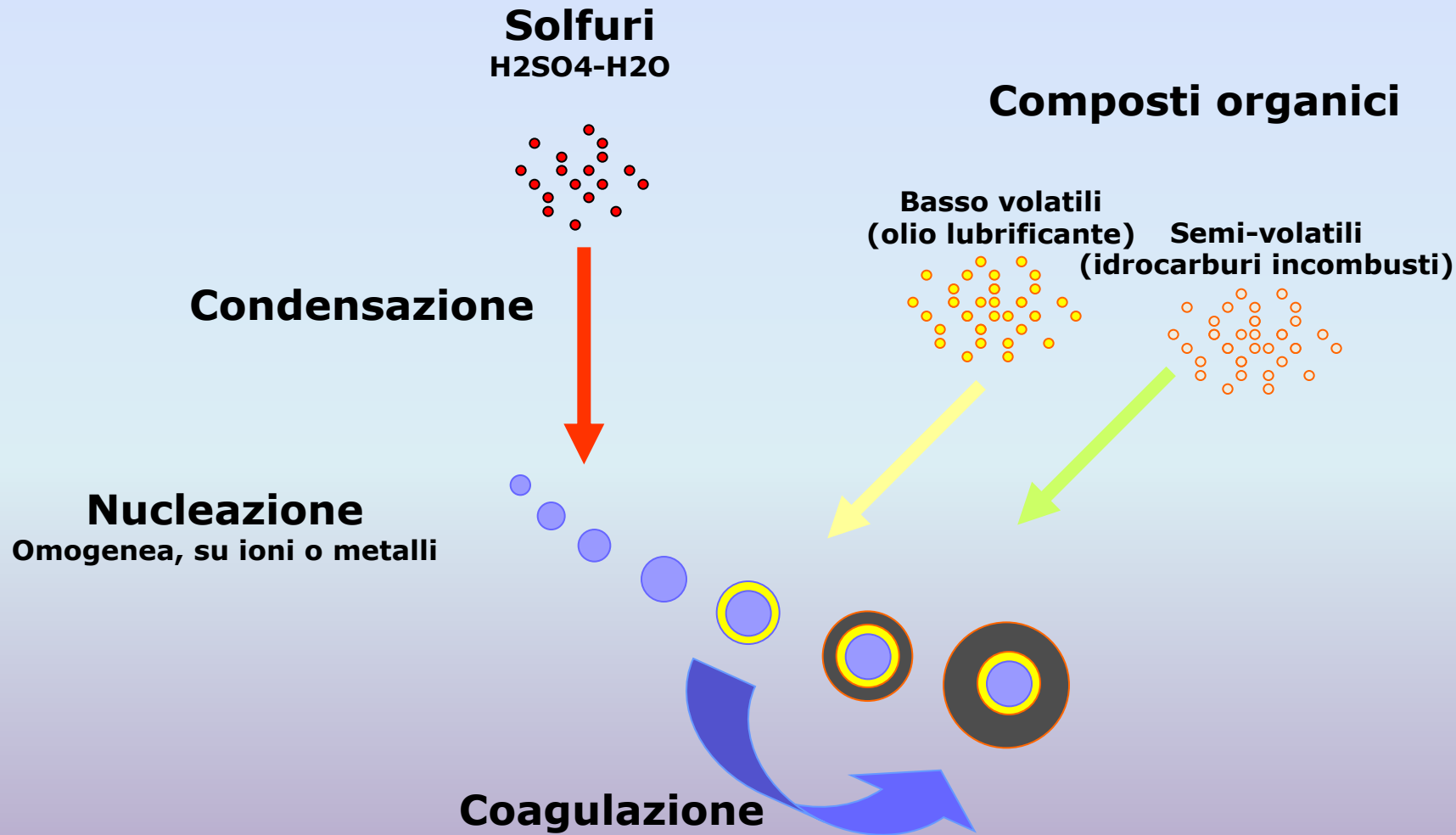
**Rapporto
aria/combustibile
non stechiometrico
per alti carichi**

**Trafilamento
dell'olio di
lubrificazione**

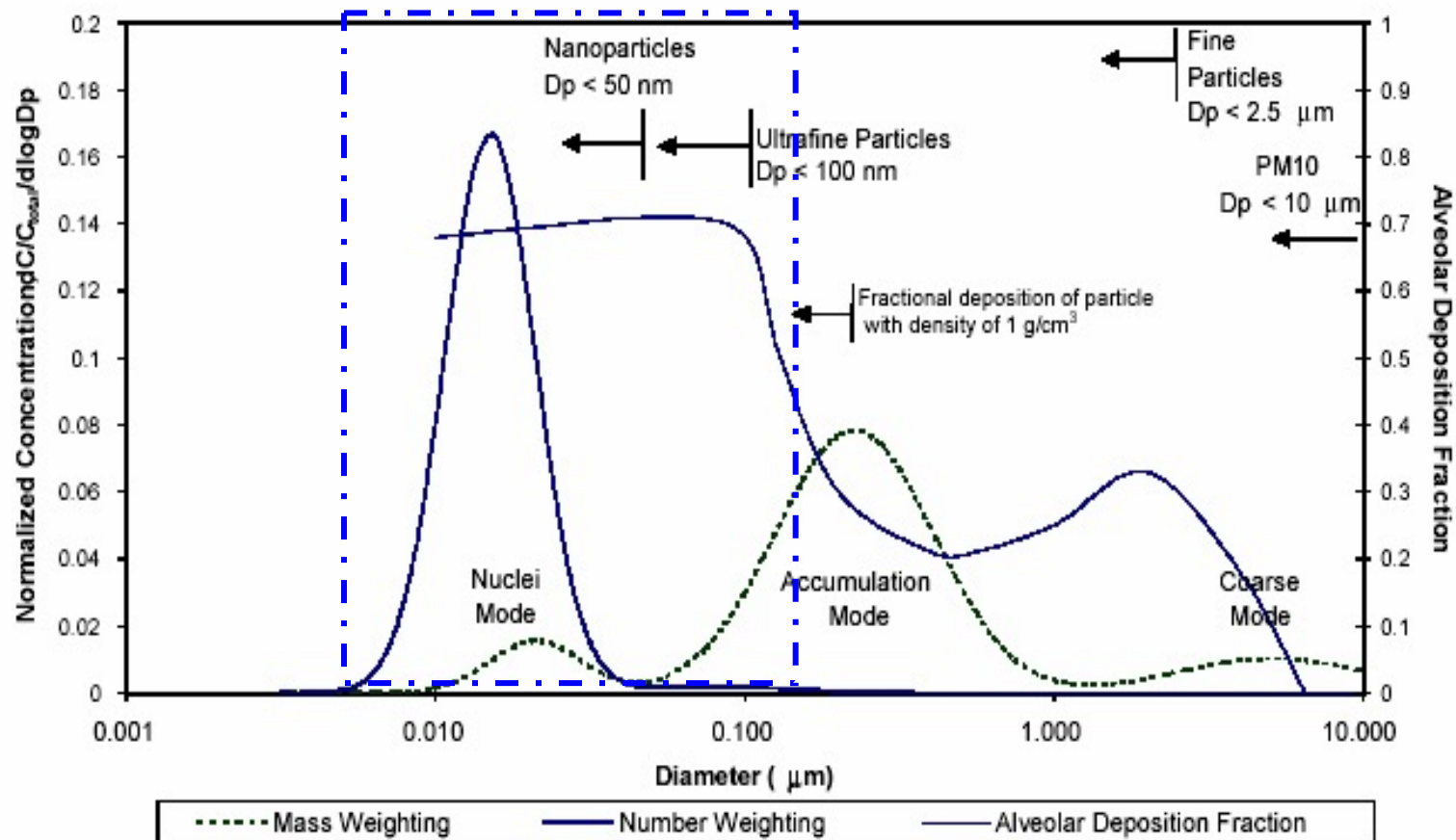
**Deposito di
combustibile
sulle valvole**

?

Crescita delle Particelle



Distribuzione Numerica delle Particelle





Modello per la stima delle emissioni di Soot

Il modello per il soot si basa sull'approccio di Hiroyasu e descrive i processi di formazione e di ossidazione del soot come cineticamente controllati da due equazioni di Arrhenius.

massa di soot

$$\frac{dM_s}{dt} = \frac{dM_{sf}}{dt} - \frac{dM_{so}}{dt}$$

velocità di formazione della massa

$$\frac{dM_{sf}}{dt} = K_f M_{fv}^n$$

velocità di ossidazione della massa

$$\frac{dM_{so}}{dt} = K_o M_s x_{o_2}$$

Costanti cinetiche

$$K_f = A_f p^{0.5} \exp\left(\frac{E_f}{RT}\right)$$

$$K_o = A_o p^m \exp\left(\frac{E_o}{RT}\right)$$

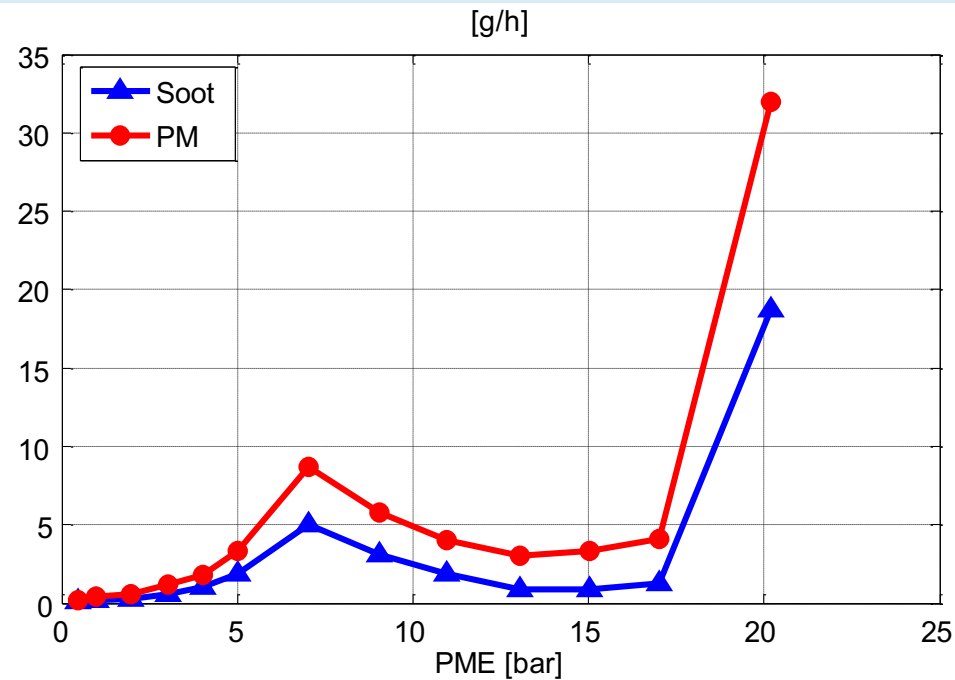
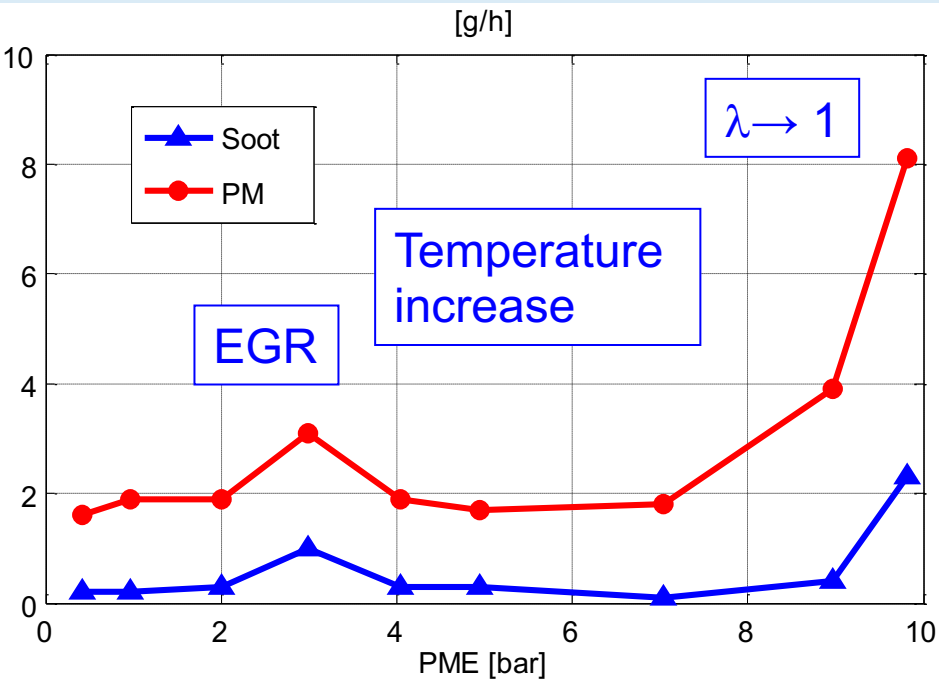


Dipendenza dalle condizioni operative

Motore a ciclo Diesel 1.9 lt. Common-Rail

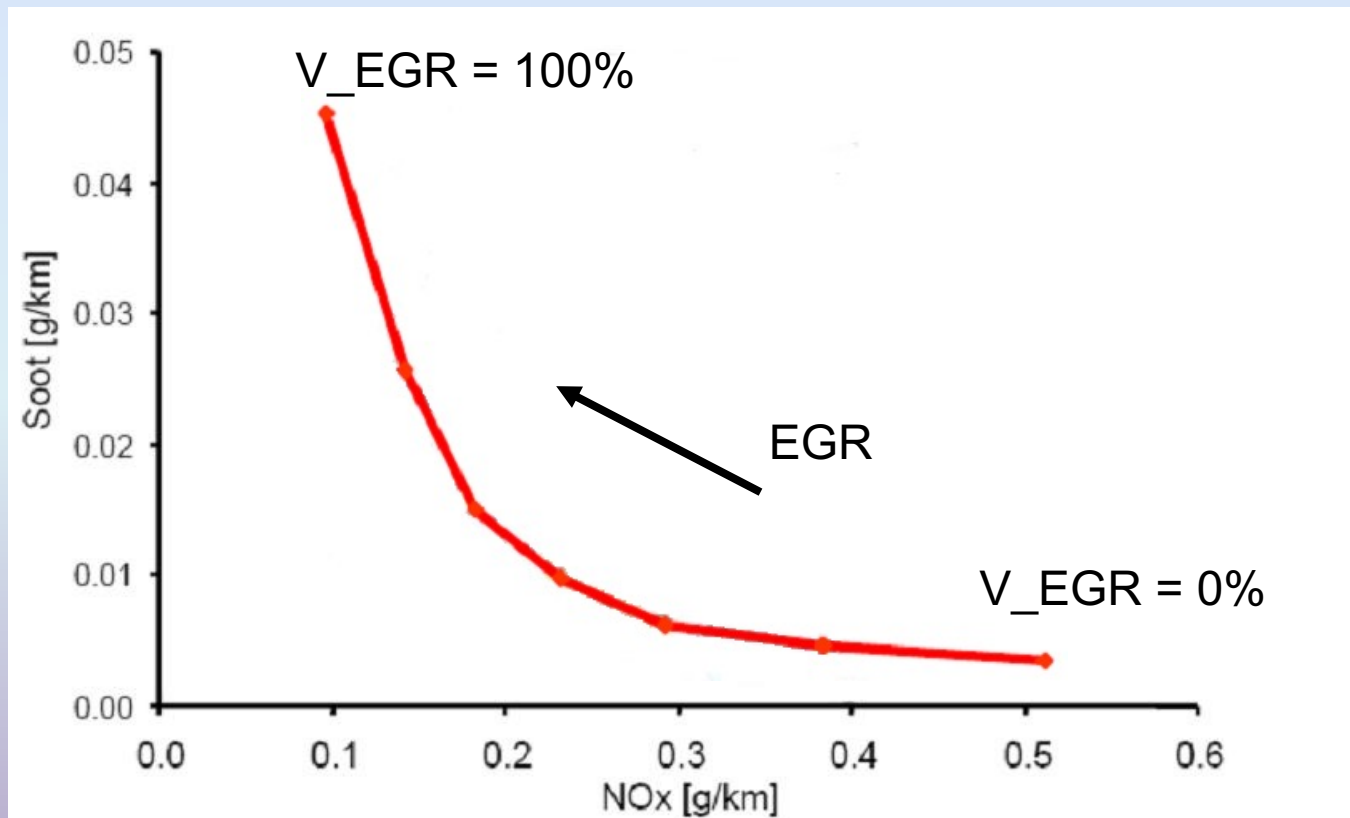
1000 [rpm]

2500 [rpm]

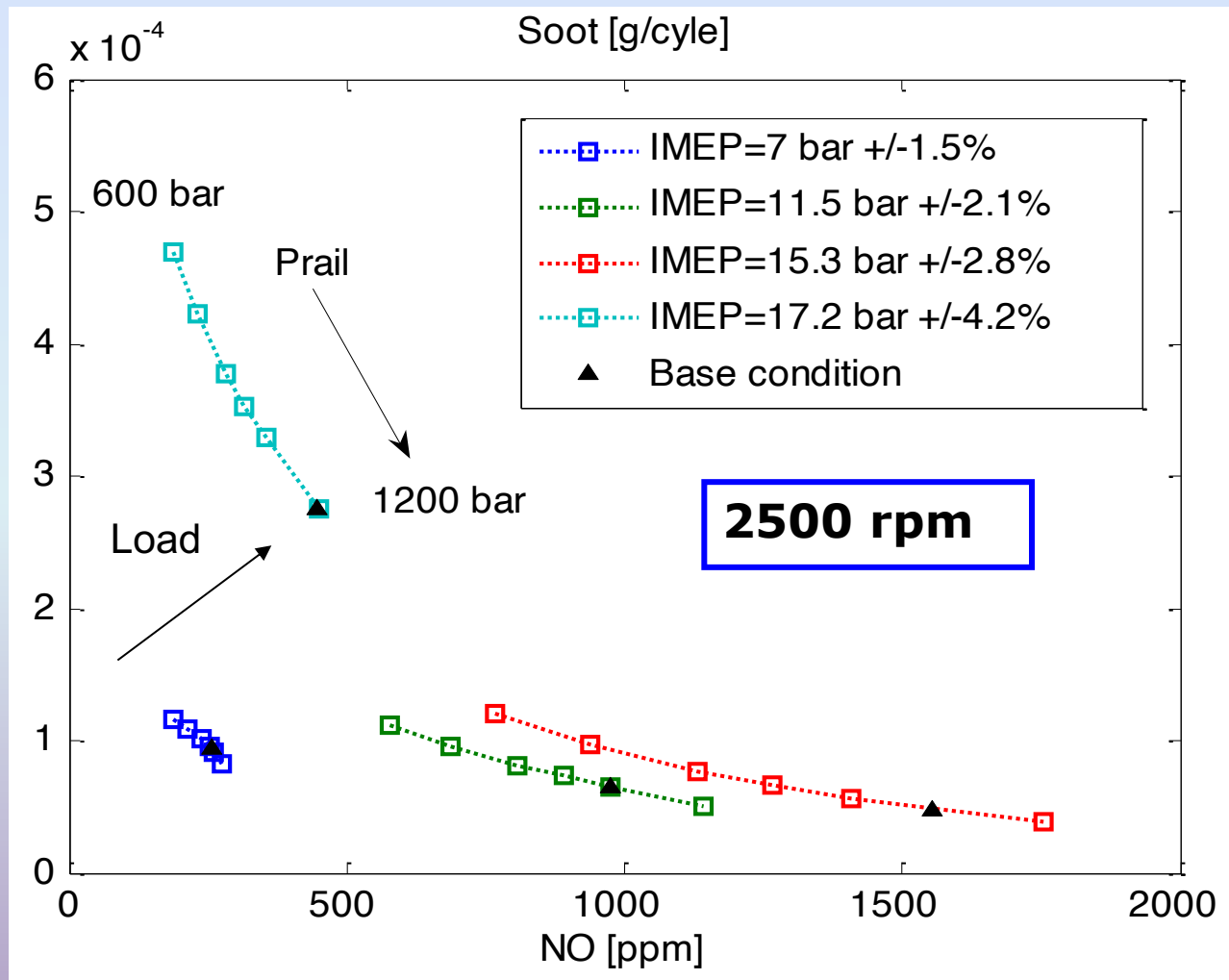


Dipendenza dalle condizioni operative

Un aumento della percentuale di **EGR** comporta una diminuzione della temperatura nel cilindro

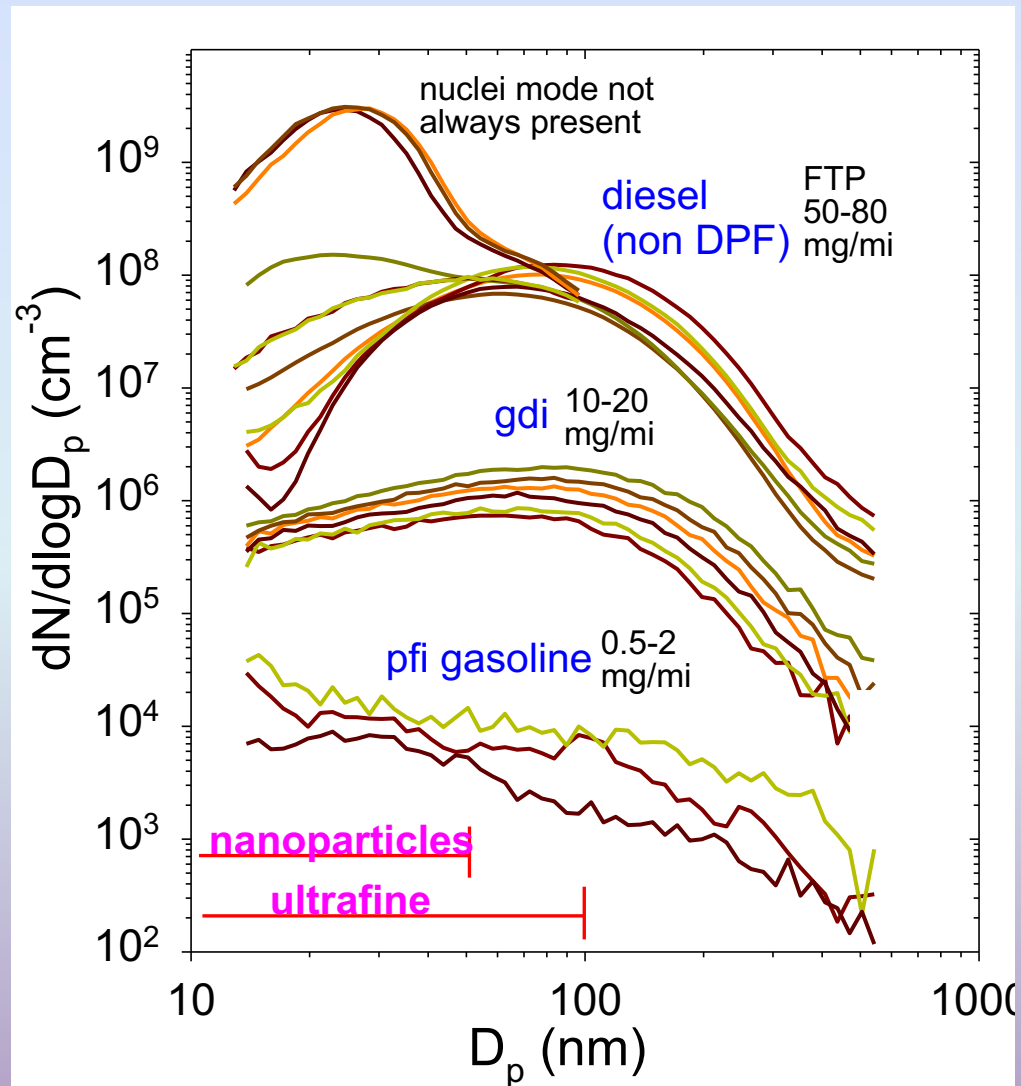


Dipendenza dalle condizioni operative



Emissione di particelle da motori a combustione interna

- La concentrazione di particelle allo scarico varia in un range di $82-10^9$ $\#/cm^3$ e dipende dal motore e dal sistema di post-trattamento.
- Il diametro delle particelle varia tra 3-600 nm.
- Le particelle rientrano, quindi, nella classe delle particelle *fini*, *ultrafini*, e delle *nanoparticelle*.





Effetto delle condizioni operative sulla distribuzione numerica delle particelle emesse da un motore GDI

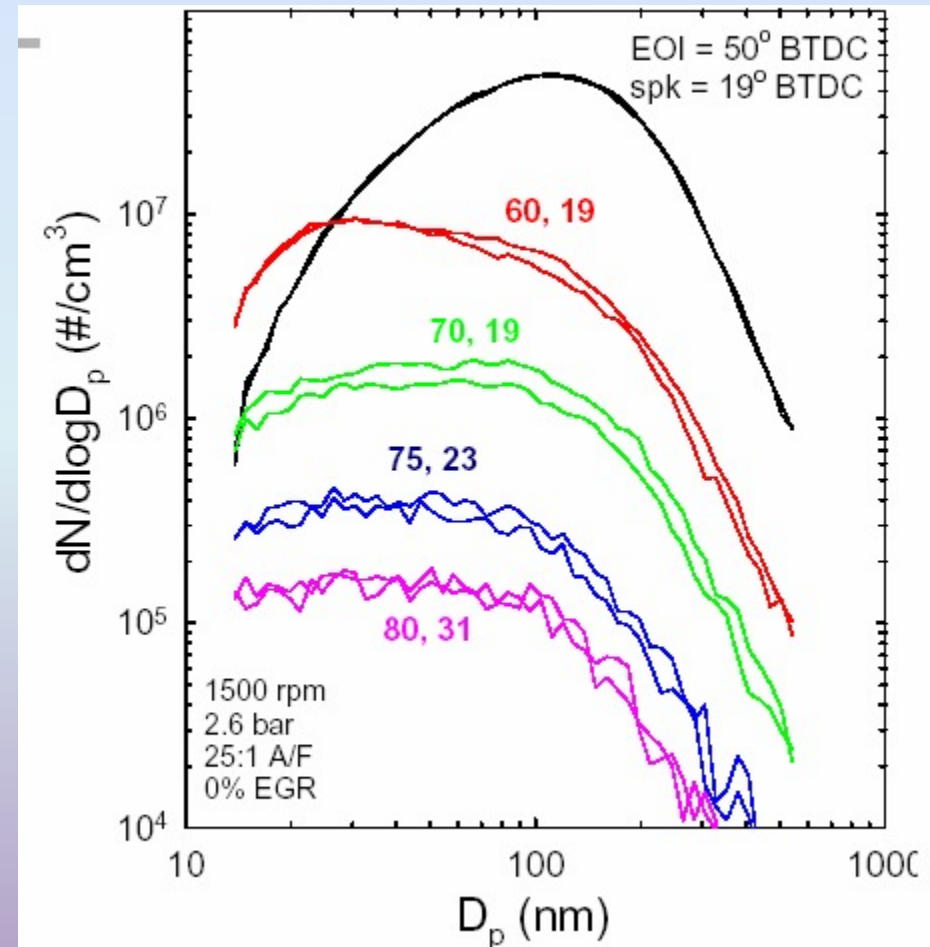
Modalità di funzionamento:

Stratificata:

- Iniezione ritardata combustibile;
- Miscela magra;
- Basse perdite di pompaggio;
- Impingement del combustibile, mancanza di miscelazione maggiore emissioni di PM;

Omogenea:

- Iniezione anticipata del combustibile;
- Rapporto AFR stechiometrico;
- Emissioni PM ridotte;





Università degli Studi di Napoli
"Parthenope"

Prof. Ivan Arsie
Motori a Combustione Interna

Sistemi di post-trattamento dei gas di scarico



Catalizzatore Trivalente

- E' costituito da un' anima a nido d'ape formata da allumina porosa, rivestita di sostanze catalitiche (rodio, platino, palladio)
- Operando in condizioni molto prossime allo stechiometrico, consente simultaneamente la riduzione di NOx e l'ossidazione di CO ed HC.
- Per garantire una buona conversione anche in presenza di brevi escursioni nelle miscele ricche/magre, è rivestito di ossido di cerio che conferisce capacità di assorbimento dell'ossigeno (oxygen storage).
- **Impiegato nei motori a ciclo otto che operano con miscela stechiometrica.** Il sistema di controllo dell'iniezione di combustibile garantisce un rapporto di miscela che oscilla intorno al valore stechiometrico con un ampiezza di ca. +/- 5%

Catalizzatore Trivalente

WORKING CONVERTER
LEAN CONDITIONS

Oxidation → {

Exothermic reactions:

$$\text{CO} + 0.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$$

$$\text{H}_2 + 0.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$$

$$\text{C}_3\text{H}_6 + 4.5 \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$$

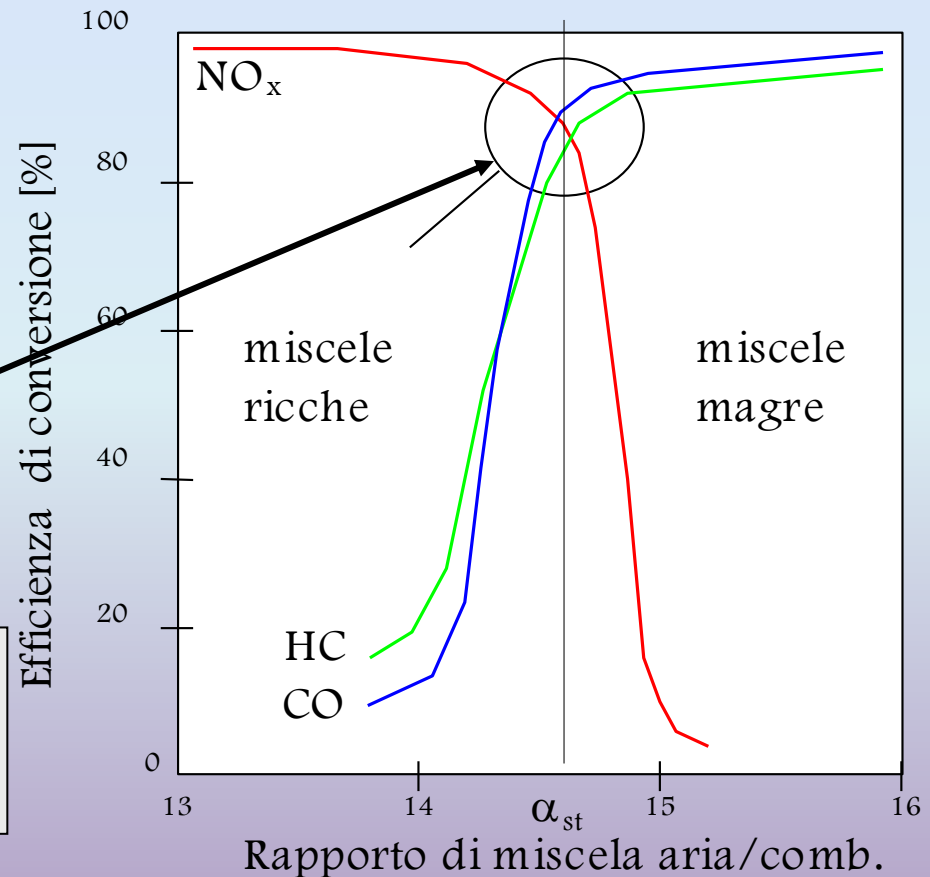

Catalizzatore Trivalente

Reduction promoted
 by lack of oxygen

Oxidation promoted
 by excess of oxygen

In a narrow range around stoichiometric mixture, a suitable efficiency can be reached for both oxidation and reduction reactions.

The efficiency is strongly dependent on . Temperature. During engine warm-up (**cold-start**) tail pipe emissions of CO and HC reach the maximum values.



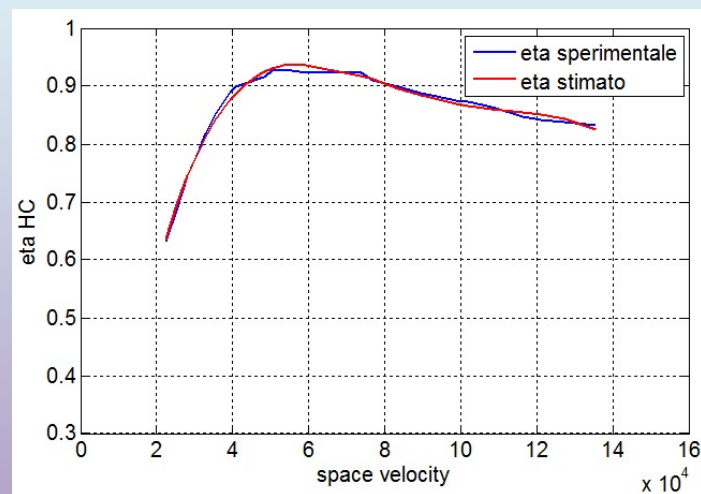
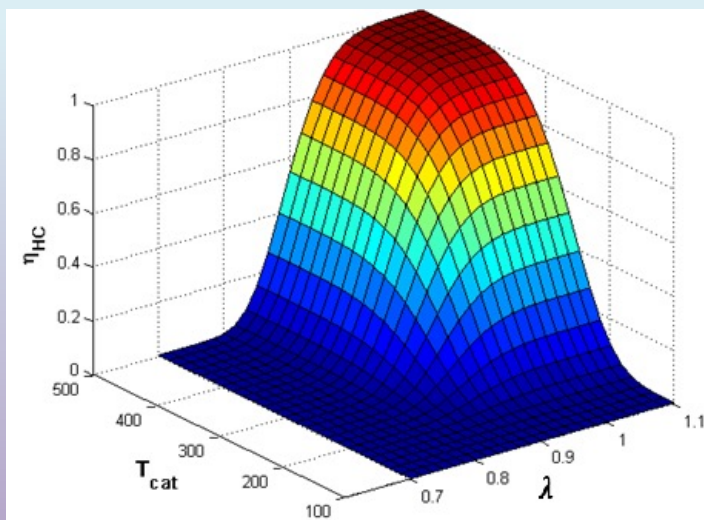
Catalizzatore Trivalente

$$X_{out} = (1 - \eta_{globale}) X_{in}$$

$$\eta_{global} = \eta(T_{cat}, \lambda) \cdot \eta(SV)$$

$$\eta_i = \exp\left[-a_1 \left(\frac{T - T_0}{\Delta T}\right)^{m_1} - a_2 \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta \lambda}\right)^{m_2}\right]$$

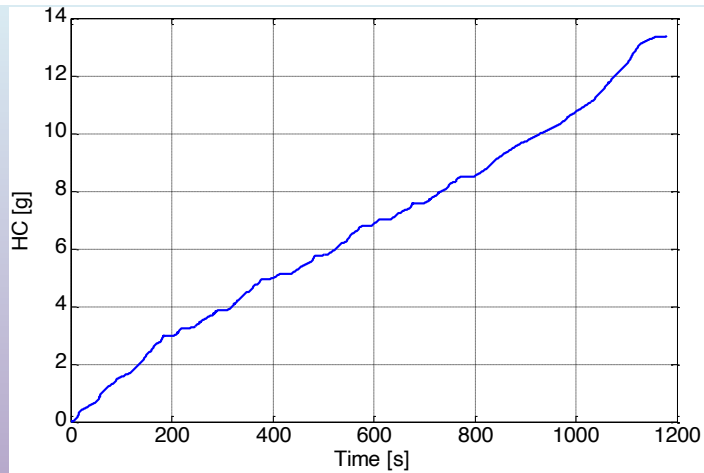
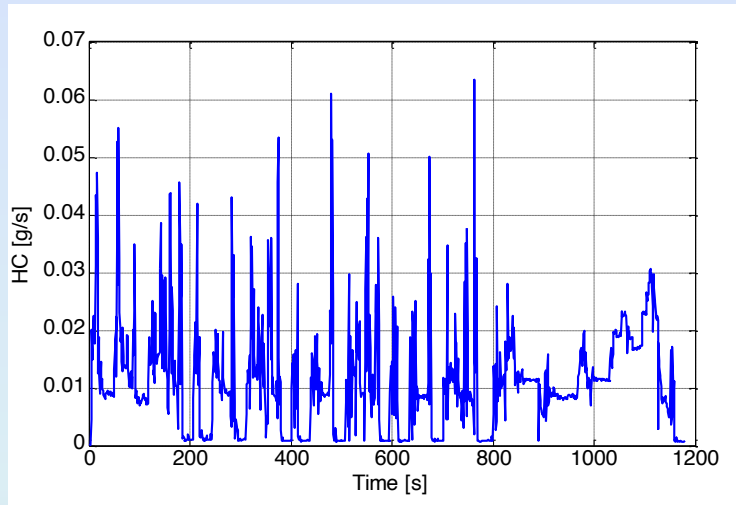
$$Spatial\ Velocity = 80.64 \cdot \dot{m}_g \frac{(M_{exhaust})^{-1}}{V_{cat}}$$



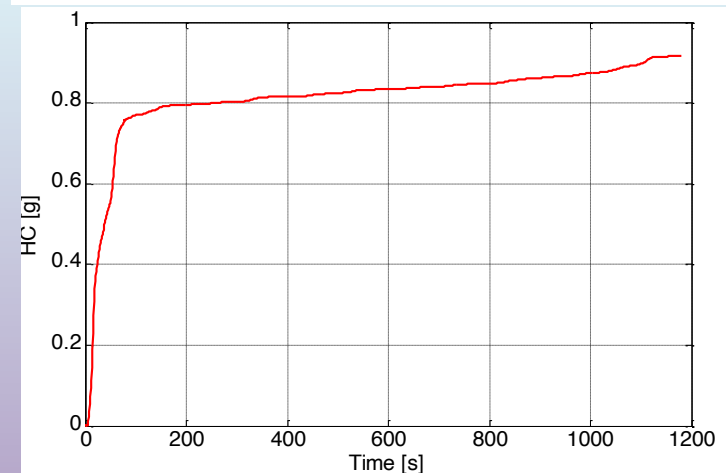
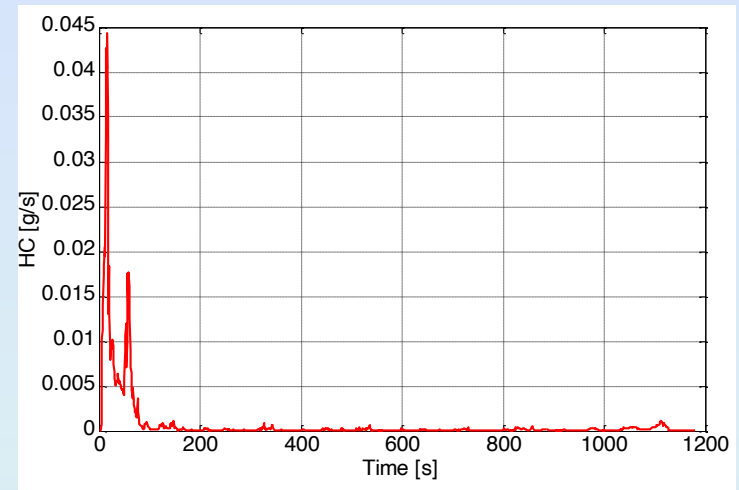


Misure sperimentali HC

Emissioni di HC 'engine'



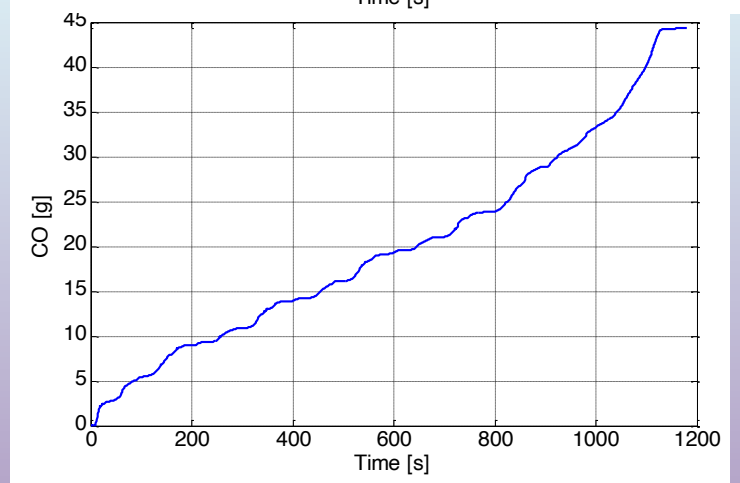
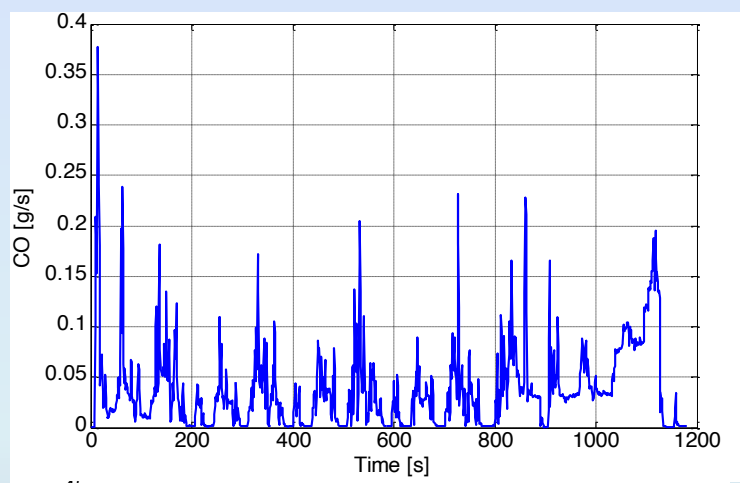
Emissioni di HC 'out cat'



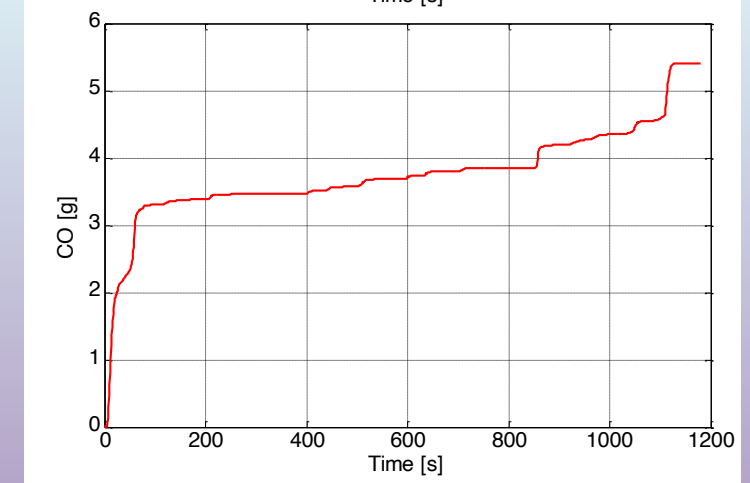
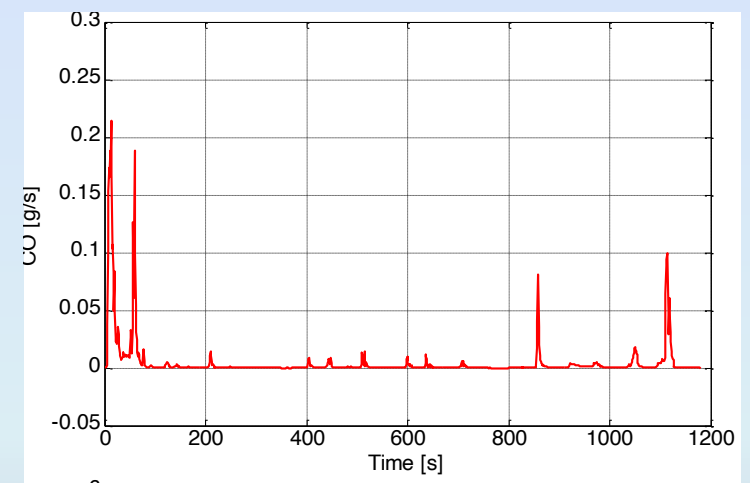


Misure sperimentali CO

Emissioni di CO 'engine'



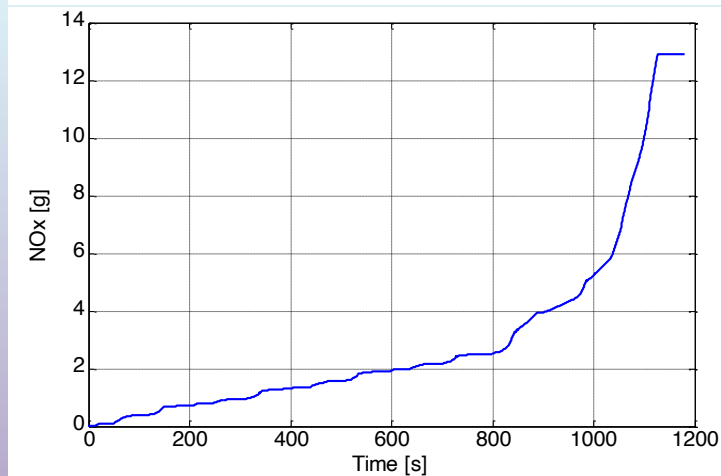
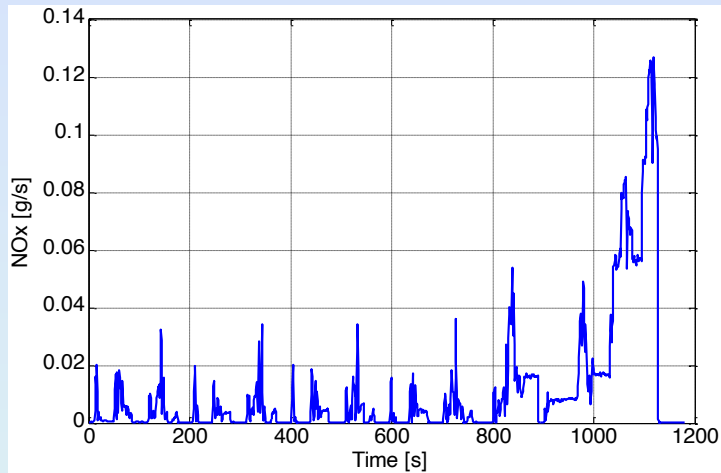
Emissioni di CO 'out cat'



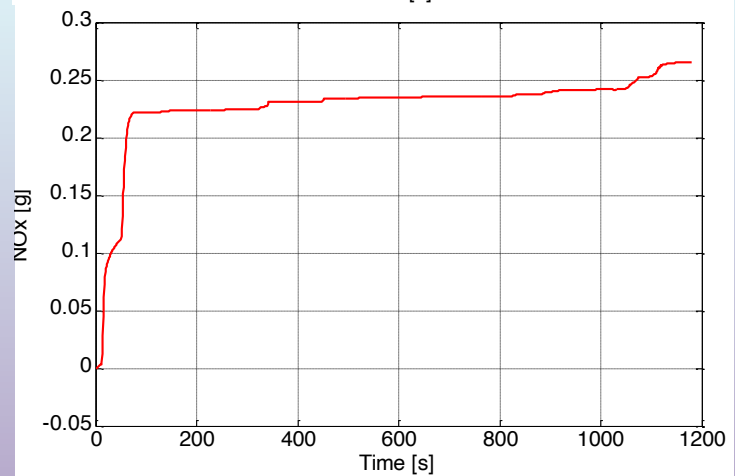
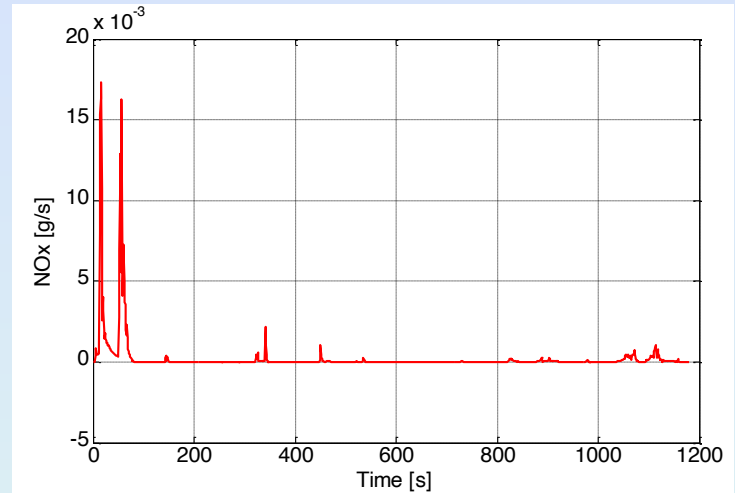


Misure sperimentali NOx

Emissioni di NOx 'engine'



Emissioni di NOx 'out cat'





Soot emissions control



The *Common-Rail* system brings to a sensible reduction of particulate matter. The high injection pressure promotes the spray development, the fuel evaporation and the air-fuel mixing.



The *n° of injections* and *SOI* have reduced combustion noise and CO/HC emissions but promoted the diffusion combustion which involves soot formation.



The introduction of *EGR* technologies (HP-LP) to mitigate the NO_x formation causes an increase of soot emissions for two reasons:

- ✓ The recirculation of particles promotes the soot formation.
- ✓ The minor O₂ concentration reduces the oxidation phenomena.

Soot emissions are in contrast with other pollutants



Diesel Particulate Filter

With the current technological solutions the *filtration* is the only way for particulate matter abatement.

Particulate filter can be classified into two different types according to the filtration criteria:

- Flow-through Diesel Particulate Filter.
- Wall-flow Diesel Particulate Filter.

The first one, such as ceramic foams, open honeycomb structures, metallic wire-mesh or metal-wools, even if characterized by low pressure drop, have a lower filtration efficiency (40–70%).



Wall-flow DPF which consist of a series of parallel channels alternatively plugged at each end, instead, shows a filtration efficiency around 98 %.

The majority of production vehicles is equipped with wall-flow filters.

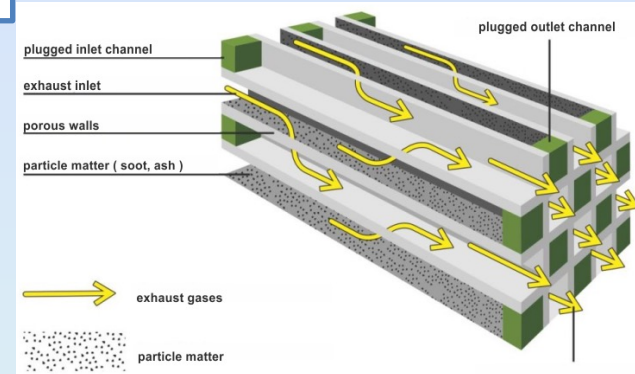


Wall-flow DPF consist of a series of parallel channels alternatively plugged at each end to force the exhaust gas flow through the porous filter wall. This filter is made by cordierite or SiC (Silicon Carbide) which are porous ceramic materials.

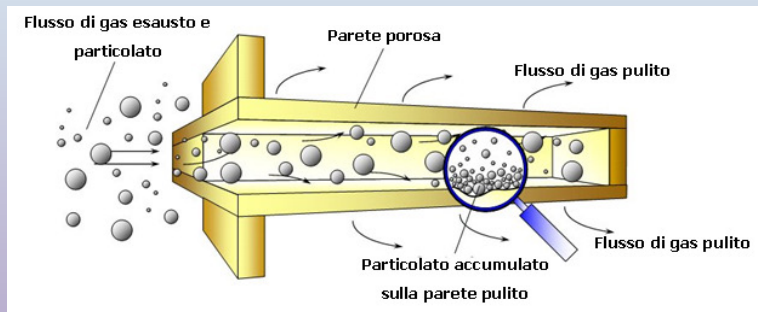
Wall-flow DPF

In general, the filtration process is characterized by two different mechanism:

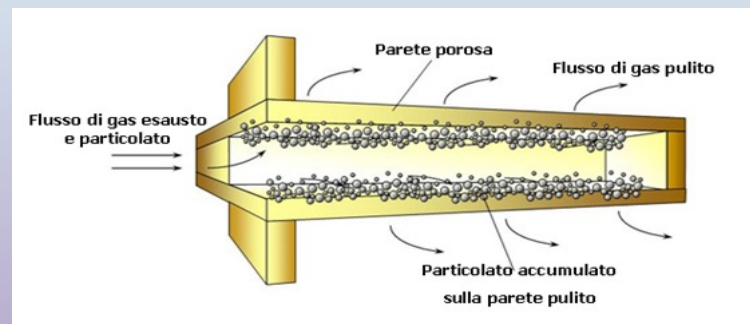
- ✓ **Depth filtration.**
- ✓ **Cake deposition.**



The establishment of the depth rather than the cake deposition depends on the filling of the filter and on the size of particles in the exhaust gas.



Depth filtration

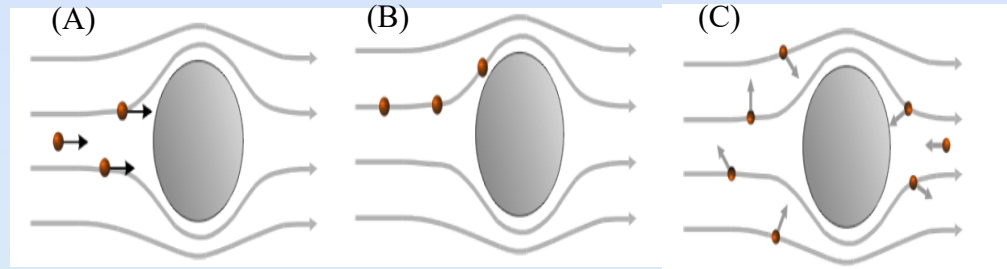


Cake deposition

Filtration phenomena

1) **Depth filtration** can be achieved by three different modes:

- Inertial deposition (A).
- Diffusion deposition (B).
- Interception (C).



These phenomena involve the fine particles and occur during the initial filling of the clean filter. This leads to a non-linear increase of pressure drop across the filter.

2) During the **cake deposition** the particles which have greater size than the pores of the filter are deposited on the wall of the channel through mechanical actions. The soot layer gradually grows which results in a linear increment of pressure drop.

During engine operation the soot trapped in the filter increases the backpressure in the exhaust pipe thus a periodic **regeneration process** is required.

DPF regeneration

Regeneration process is usually classified in **active** or **passive**.

- Active regeneration involves an additional heat source in the exhaust pipe to increase the temperature across the filter and activating the soot oxidation which starts around 550°C .



- The temperature at the inlet of DPF is generally between $250\text{-}400^{\circ}\text{C}$ due to the high compression ratio and the turbo-charged system.

The heat power can be obtained by:

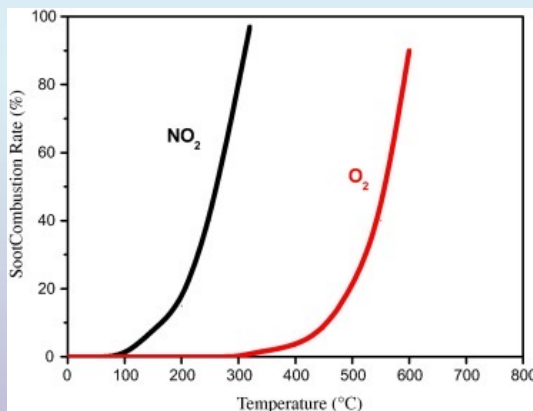
- An external source such as micro-waves, electric heater and burner.
- A suitable setting of engine control parameters with after/post injections.

- External sources are mostly used in laboratory applications.**
- Post injections determine an increase of fuel consumption.**

DPF regeneration

Passive regeneration uses a catalyst or involves other oxidizing molecules (NO_2) to reduce the temperature threshold for soot oxidation.

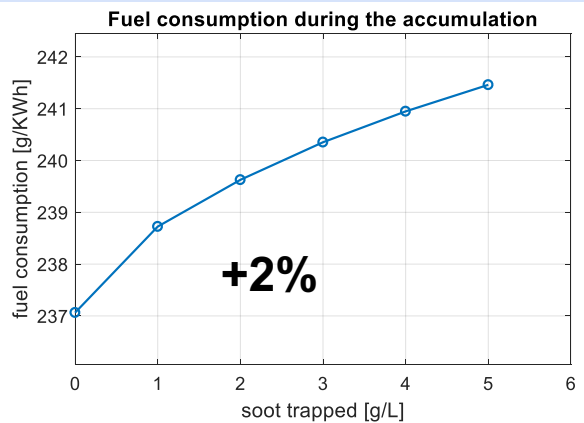
- ❑ The deposition of active species (such as Pt,Rd or molecules contained transition element) in a ceramic substrate is a critical operation which also compromise the initial properties of DPF.
- ❑ Passive regeneration with other oxidizing is a secondary phenomenon which slows the filling of the DPF during the normal engine operation, thus a complete regeneration should involve a considerable amount of NO_2 .



The drawback is that NO_2 is obtained from the oxidation of engine out NO emissions that in turn has to be reduced to comply with standard legislation.

Actually the regeneration on production vehicles is obtained by post injections.

DPF regeneration



One of the issues of DPF control is to guarantee suitable **trade-off** between:

- Medium/high soot loading that results in **highest filtration efficiency**.
- **Low backpressure** that affects fuel consumption (i.e. low soot loading).

An increase of regeneration frequency allows reducing back-pressure (thus improving ICE efficiency).

Fuel expensive in case of active regeneration



- Extra fuel means extra cost.
- Increase CO-HC pollutants.
- Increase of PN emission.

Suitable in case of passive regeneration



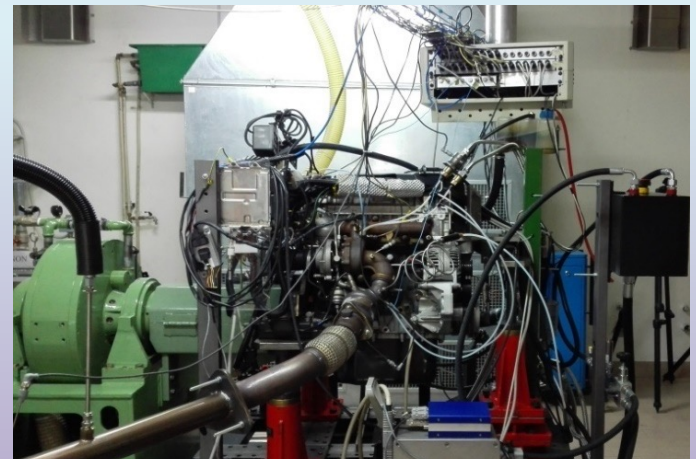
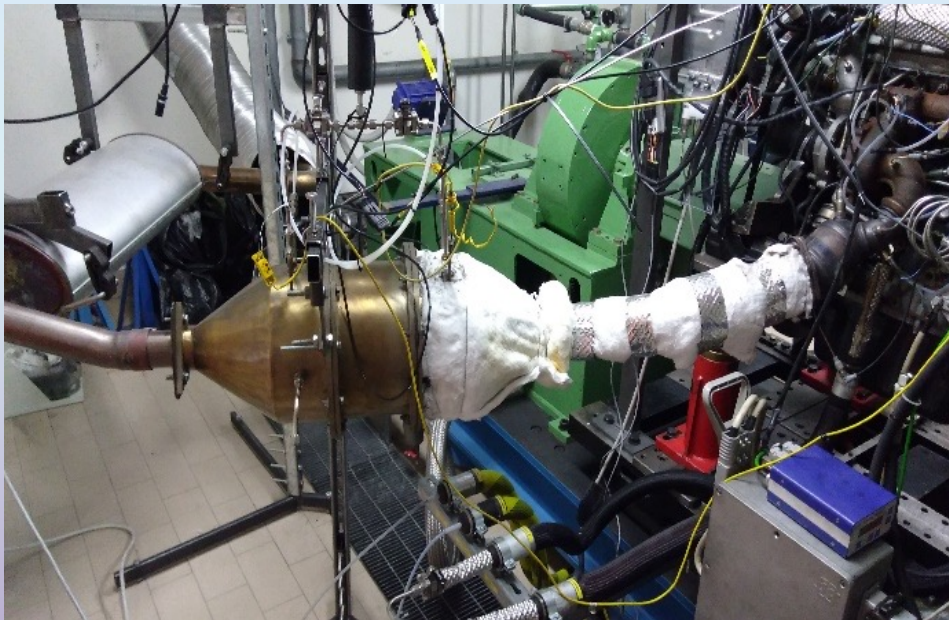
- Feasible during normal engine operations
- Does not involve emissions increase.
- Does not involve thermal transient.



Experimental setup

Common-rail Euro V Diesel Engine with V and HP EGR

N° of cylinder	4
Bore x stroke [mm]	88 x 94
Displacement [cm³]	2287
Compression ratio	16.2
Max Torque [Nm]	350 @ 1500 rpm
Max Power [KW]	107 @ 3600rpm



Accumulation test

Different steady-state operating conditions were selected for the tests in terms of:

- Exhaust flow conditions.
- Soot loading.
- Soot cake properties.

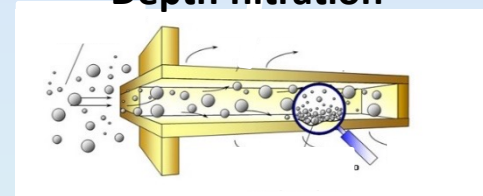
$$\Delta p = \Delta p_{clean} + \Delta p_{soot}$$

During the tests:

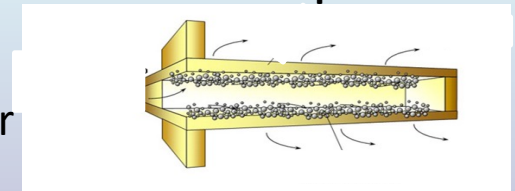
- **Standard injection** strategy was applied.
- Flow rate was kept constant by controlling the **EGR valve**.
- The **filtration efficiency**, in terms of mass and particles number both, was calculated by the following formula:

$$\eta_{filtration} = \frac{[soot]_{in} - [soot]_{out}}{[soot]_{in}}$$

Depth filtration

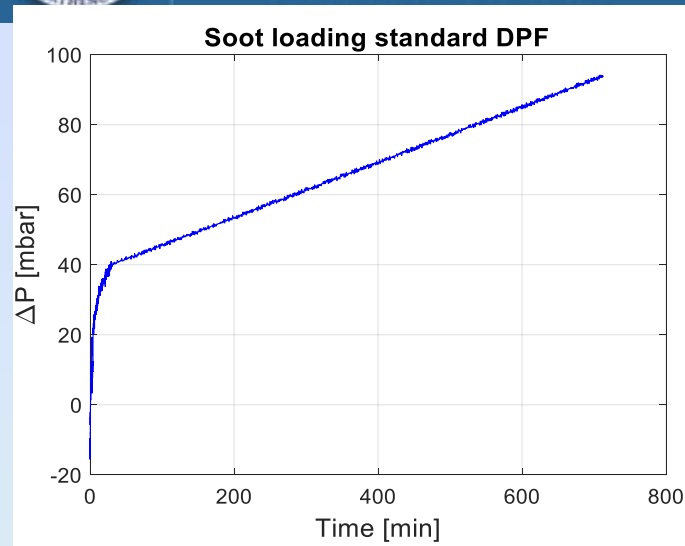


Cake deposition





Accumulation test



Depth filtration

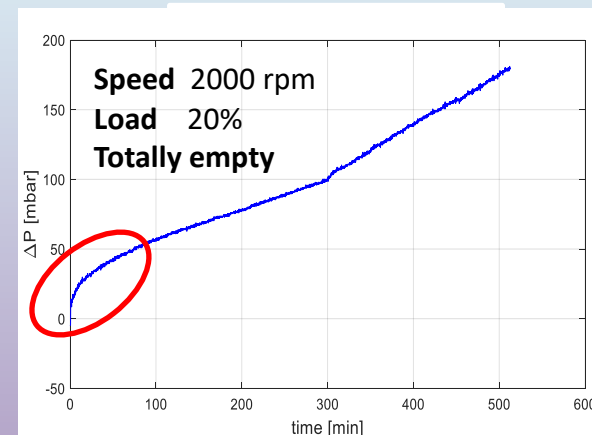
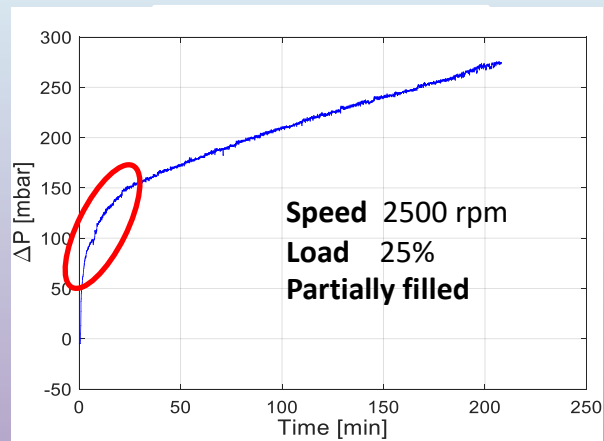
$$\eta_{\text{filtration}} = 60-70\%$$

Cake deposition

$$\eta_{\text{filtration}} = 92-99\%$$

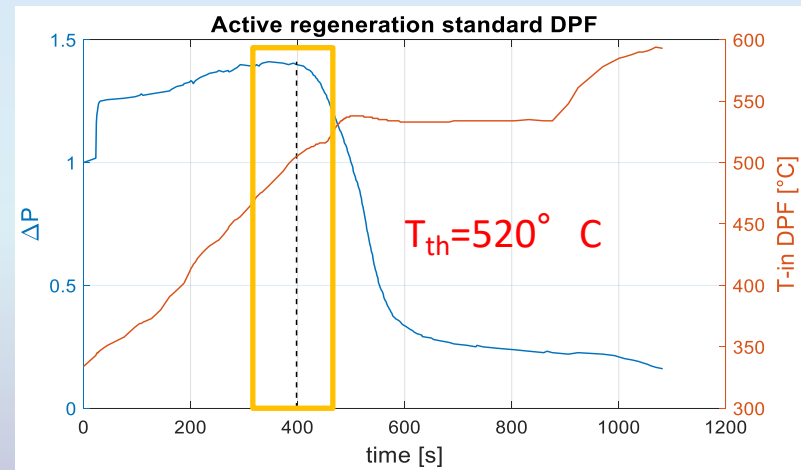
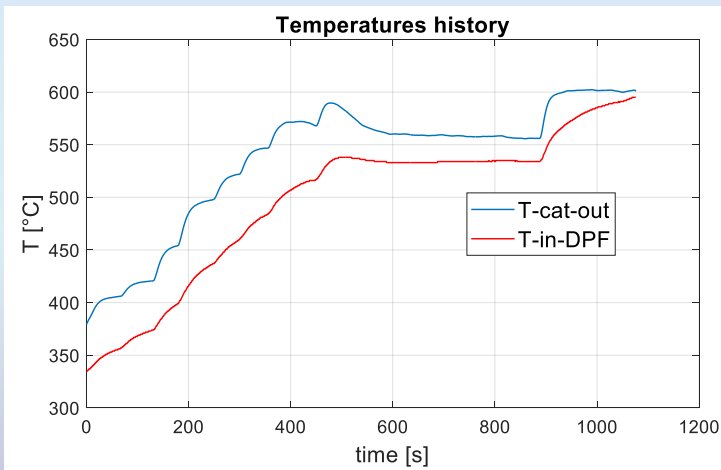
The filtration efficiency is the most different feature between the two filtration mechanisms.

The exhaust conditions, in terms of *volumetric flow rate* and *thermal state* of the DPF affect the pressure drop.



Regeneration test

- The regeneration is performed by *4 post-injections* between 150° and 180° ATDC.
- The EGR valve is closed to increase the *oxygen concentration* and promote oxidation.
- The regeneration is performed by a *stepwise increase* of the injected fuel, to identify the effective temperature at which the regeneration starts.



- The **threshold temperature** is defined as the inlet DPF temperature at which the pressure starts decreasing.
- The oxidation starts before but the increase of the DPF temperature produces a higher pressure drop.



Regeneration test

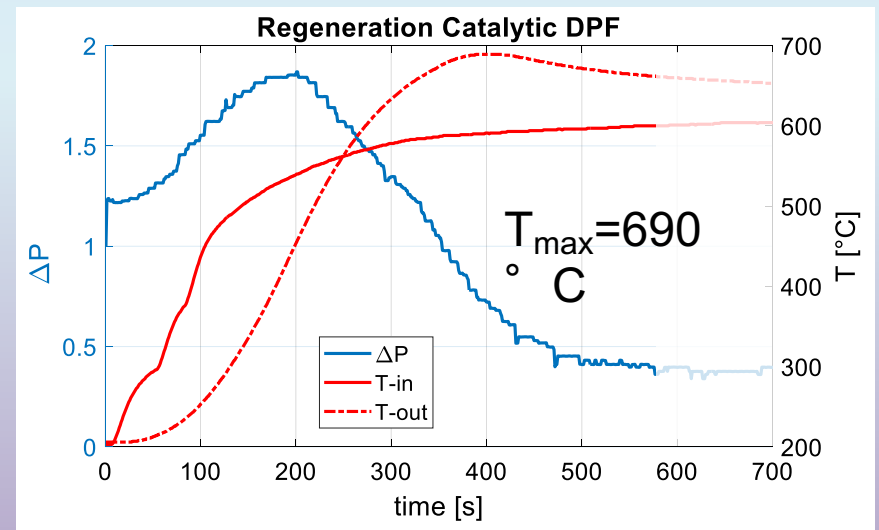
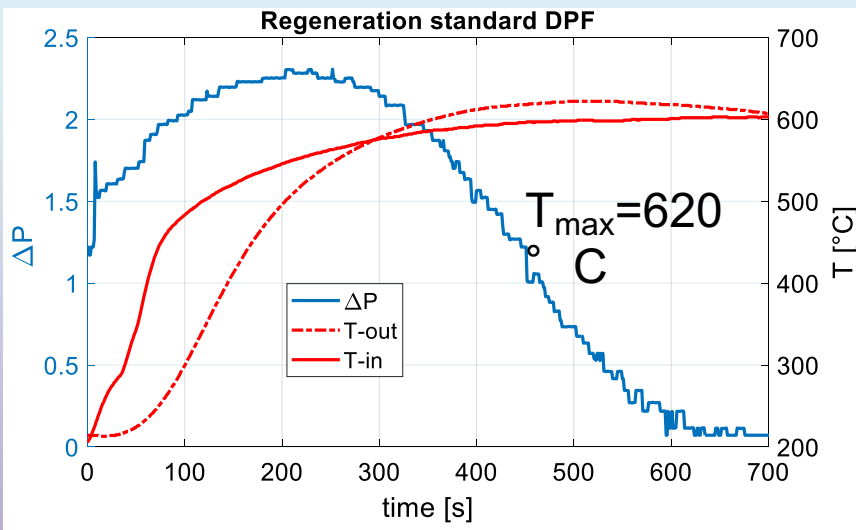
Standard DPF

Catalytic DPF (CuFe_2O_4)

$T_{\text{threshold}} = 535^\circ\text{C}$
Rig Start = 270 s
Extra fuel = 0.649 Kg

Fuel saving 25%

$T_{\text{threshold}} = 390^\circ\text{C}$
Rig Start = 200 s
Extra fuel = 0.486 Kg

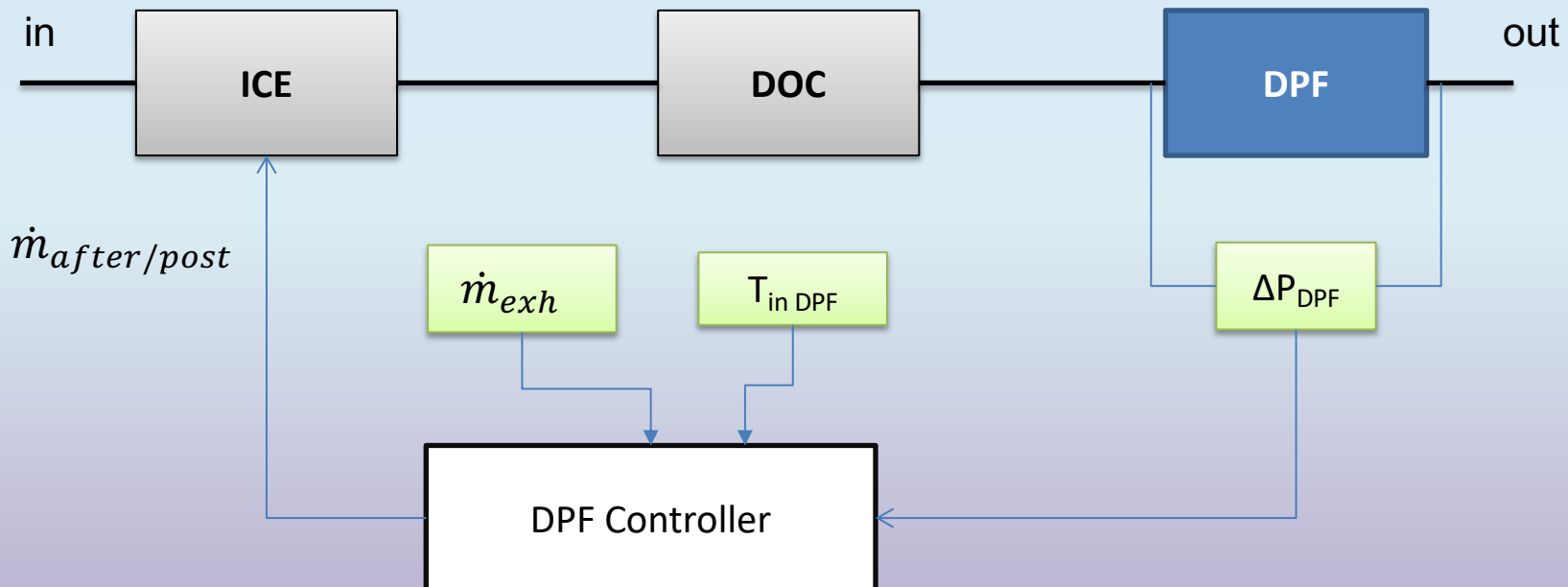




DPF Control

Goals:

- high filtration efficiency
- Engine Performance
- Fuel economy



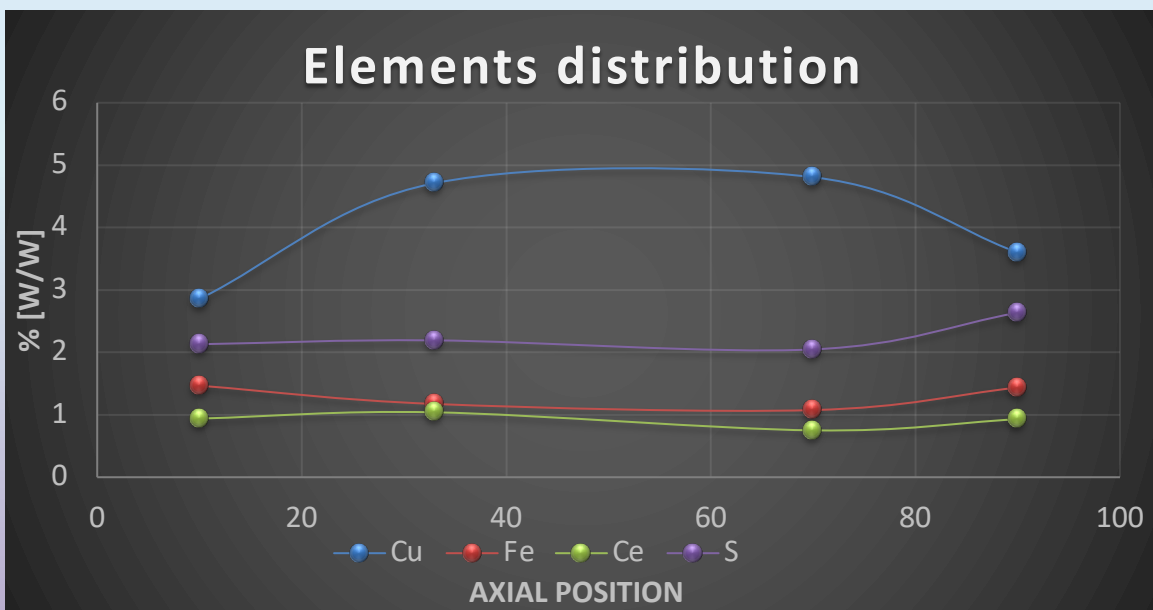


SCR for NO_x reduction

- With current technology, the most promising after-treatment device for the abatement of NO_x emissions in lean mixture engines is the **SCR system** which has high NO_x reduction capability in a wide temperature range.
- A catalytic converter performs nitrogen oxides reduction by using a suitable reducing chemical agent: ammonia (NH₃), obtained from the injection of an aqueous urea solution (Diesel Exhaust fluid – DEF or AdBlue).
- The urea solution (AdBlue) is injected upstream of the SCR catalyst and, due to the effect of the high temperatures, mixes with the exhaust gases;
- Nitrogen oxides react with ammonia on catalytic sites via several reactions;
- Sensors are placed downstream of the catalyst to provide feedback about NO_x and NH₃ emissions for closed loop control strategies.

SCR for NO_x reduction

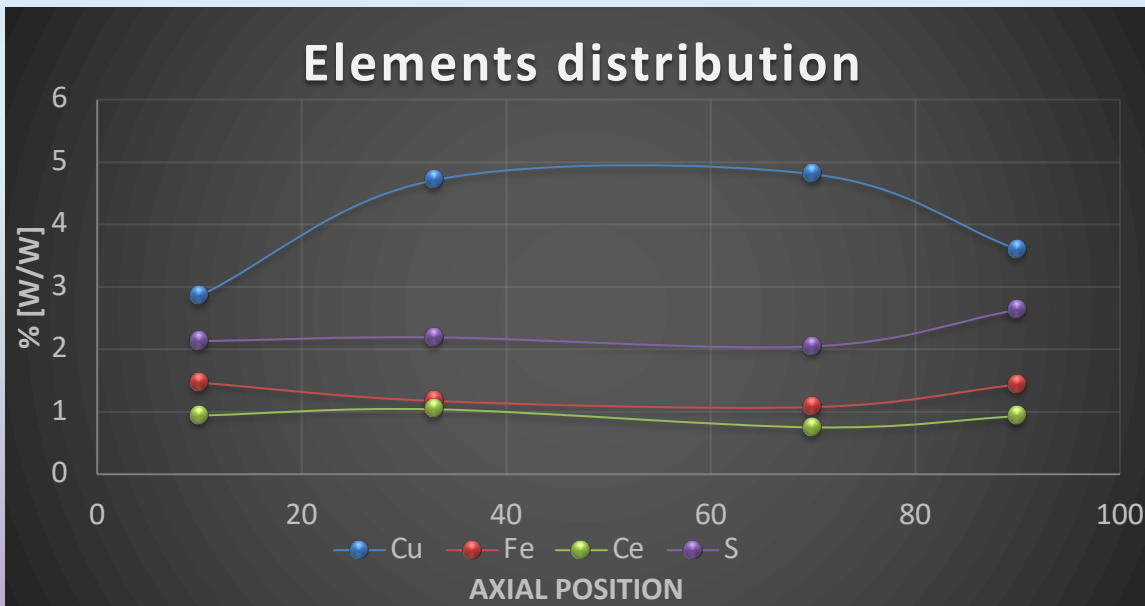
- The SCR system is composed by a monolith of alumina coated with copper exchanged zeolites, that have proved to be good catalysts for NO_x reduction.
- PGM (Platinum Group Metal, e.g. platinum, rhodium, palladium) are usually not used for SCR but for the AMOX section that is in charge to oxidize the desorbed ammonia to avoid slip.





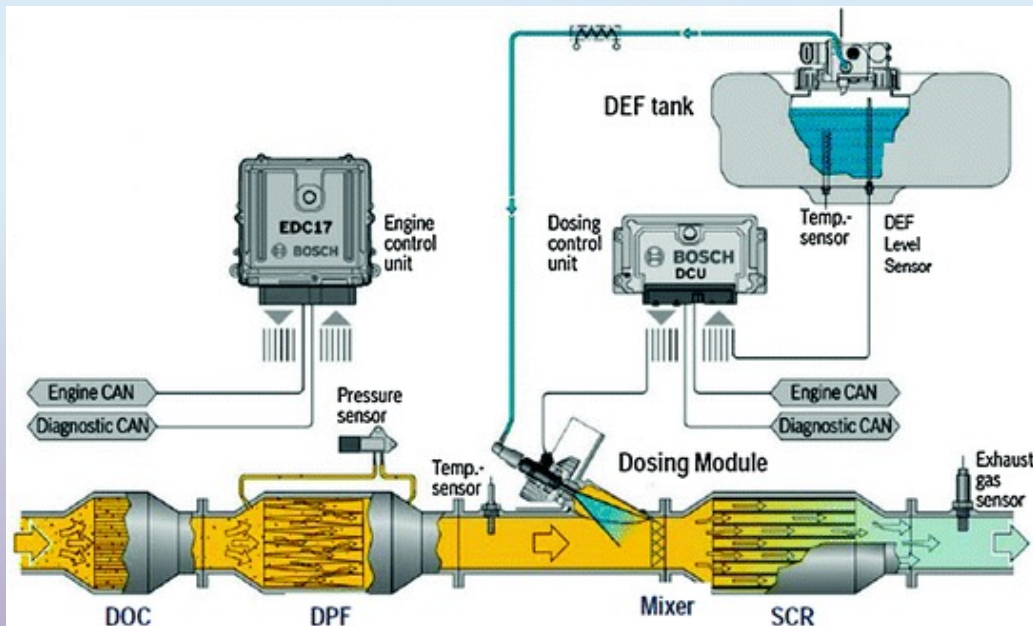
SCR for NO_x reduction

- The SCR system is composed by a monolith of alumina coated with copper exchanged zeolites, that have proved to be good catalysts for NO_x reduction.
- PGM (Platinum Group Metal, e.g. platinum, rhodium, palladium) are usually not used for SCR but for the AMOX section that is in charge to oxidize the desorbed ammonia to avoid slip.



Urea dosing system

The ammonia, used as reducing agent in the SCR system, cannot be directly fed in the exhaust tail pipe for toxicity and safety reasons, thus an aqueous 32.5% urea solution (i.e. DEF or AdBlue) is generally used as ammonia precursor.



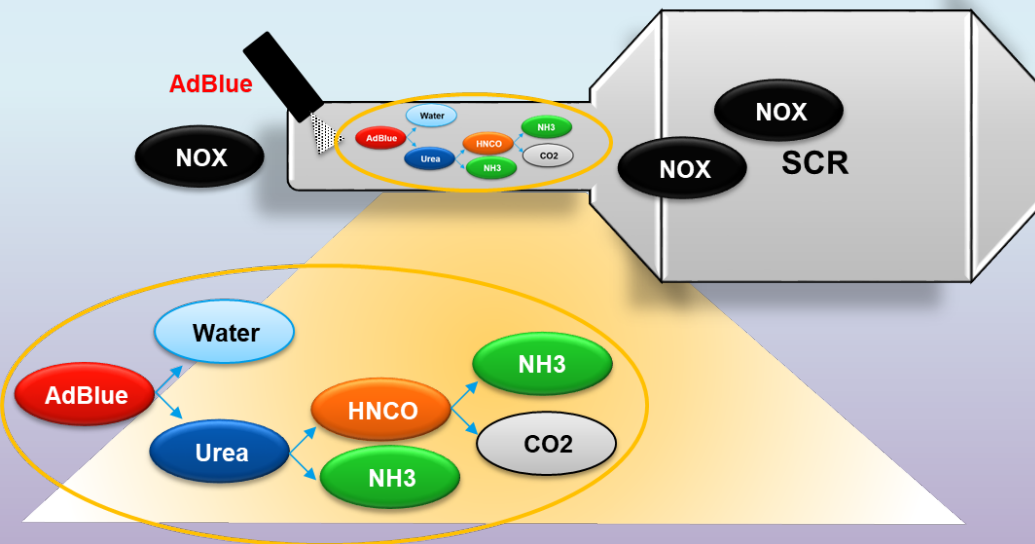
The urea solution is stored in a separate tank and it is injected upstream the catalyst.

Two of the greatest challenges in injection urea in Diesel exhaust are devising:

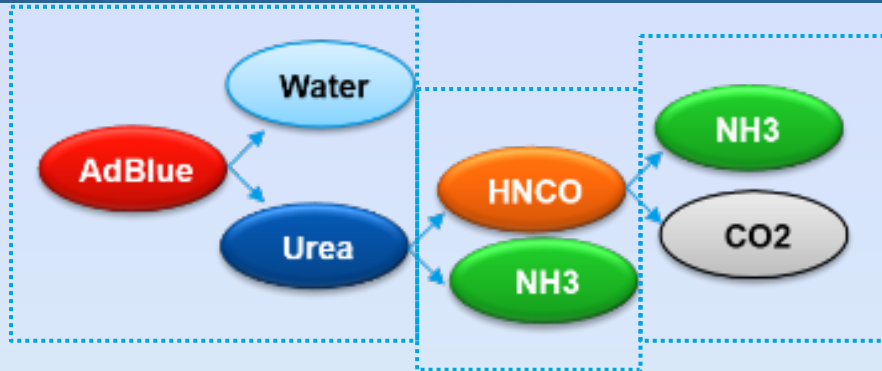
- accurate injection strategy to supply 'sufficient' urea to the SCR catalyst for deNOX activity;
- avoid a major slip of gaseous ammonia downstream.

SCR system

The urea is sprayed inside the Diesel exhaust, forming ammonia through gas-phase decomposition (thermolysis) and reactions with the Diesel exhaust water content (hydrolysis).



The role of temperature is fundamental in urea managing strategy, especially in cooler exhaust

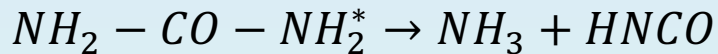


SCR system

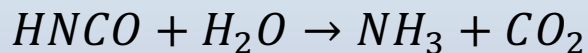
1. Urea **evaporation**



2. Urea **decomposition**



3. Isocyanic acid (HNCO) **hydrolyzation**



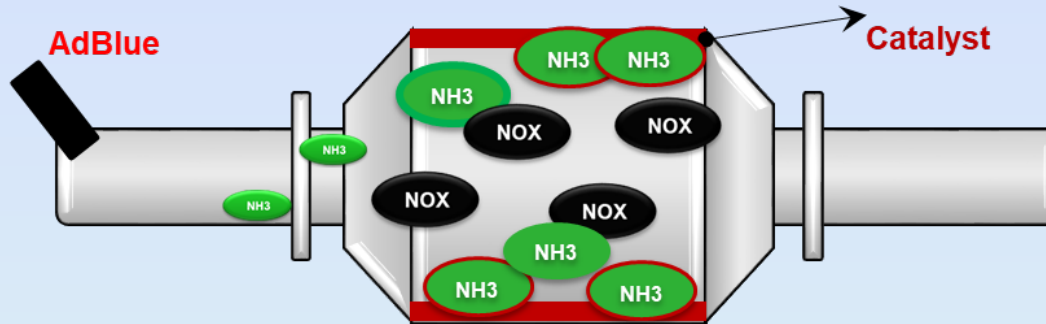
The HNCO is very slow when gas temperature is less than 400° C and tend to be inactive without SCR catalyst

- The presence of **catalyst**;
- High exhaust **temperature**;
- Well designed SCR system **geometry**.



Ideally, 100% urea to ammonia conversion can be expected at the very beginning part of the SCR catalyst.

The main chemical DeNO_x reactions involve only the adsorbed ammonia on catalytic substrate, which, by reacting with NO_x specie, desorbs by the catalyst.



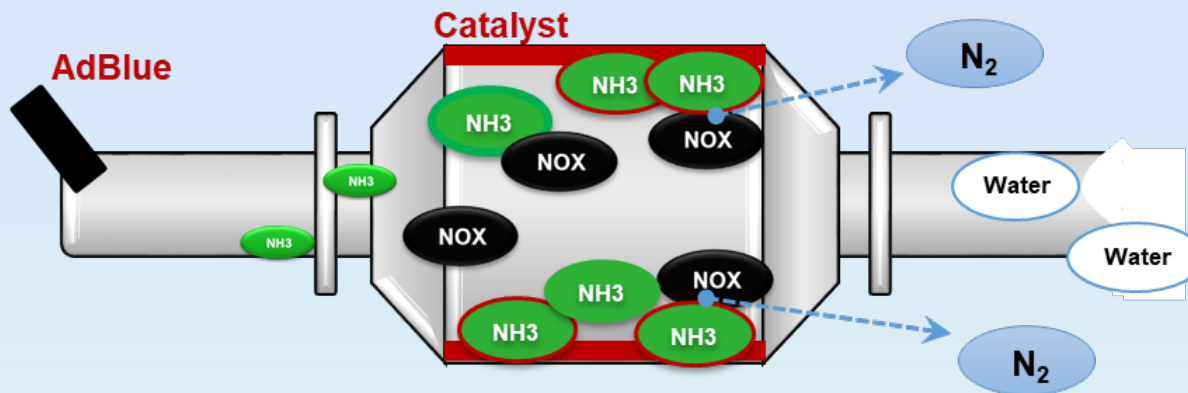
Adsorption	$NH_3 + \theta_{free} \rightarrow NH_3^*$
Desorption	$NH_3^* \rightarrow NH_3 + \theta_{free}$

NH_3
Adsorption/Desorption

NH_3^* is the adsorbed NH_3 in the catalyst and θ_{free} are the free active sites. Ammonia adsorption/desorption reactions are strictly related to the total NH_3 adsorption capacity Ω , which is the maximum amount of ammonia which can be adsorbed on catalytic substrate. The total ammonia capacity is a very critical parameter in ammonia dynamics because the ammonia adsorption and desorption rates are related to the free catalytic sites available on the converter's substrate. The phenomenon is complicated by the fact that Ω is temperature dependent.

SCR system

The adsorbed ammonia reacts with NO_x specie. The key SCR catalyst reaction:



NO_x conversion

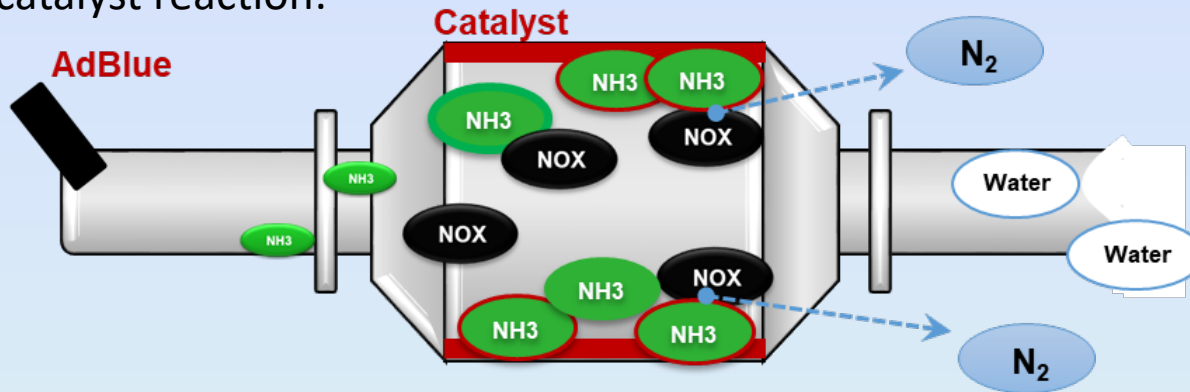
Since NO₂ is always present in the exhaust, Fast reaction is the fastest and preferred NO_x reduction reaction. A DOC is commonly used to increase the amount of NO₂

<i>Standard Reaction</i>	$4NH_3^* + 4NO + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$
<i>Fast Reaction</i>	$2NH_3^* + NO + NO_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$
<i>Slow Reaction</i>	$4NH_3^* + 3NO_2 \rightarrow 3.5N_2 + 6H_2O$

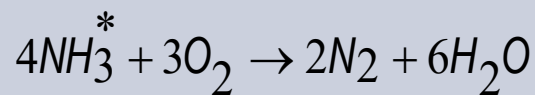


The adsorbed ammonia reacts with NO_x specie. The key SCR catalyst reaction:

SCR system



Oxidation



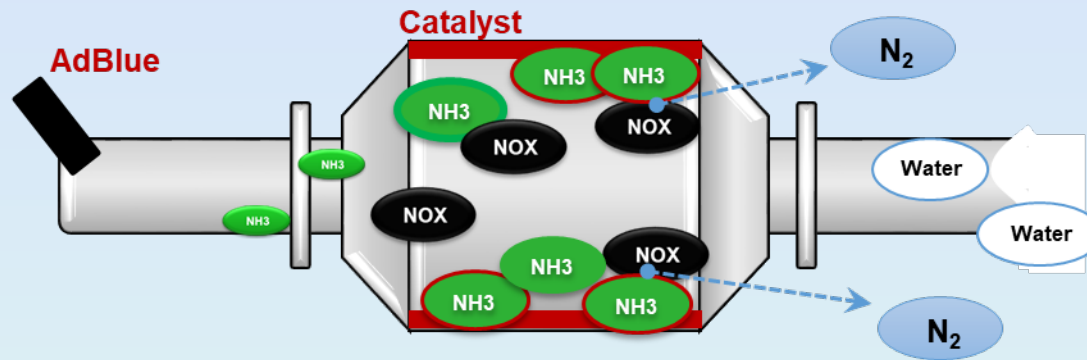
Ammonia oxidation

Unwanted secondary reactions can take place as a result of catalyst nature, oxygen content, temperature or presence of acid gases.

The phenomenon increases if excess of ammonia is injected to achieve high deNO_x efficiency.

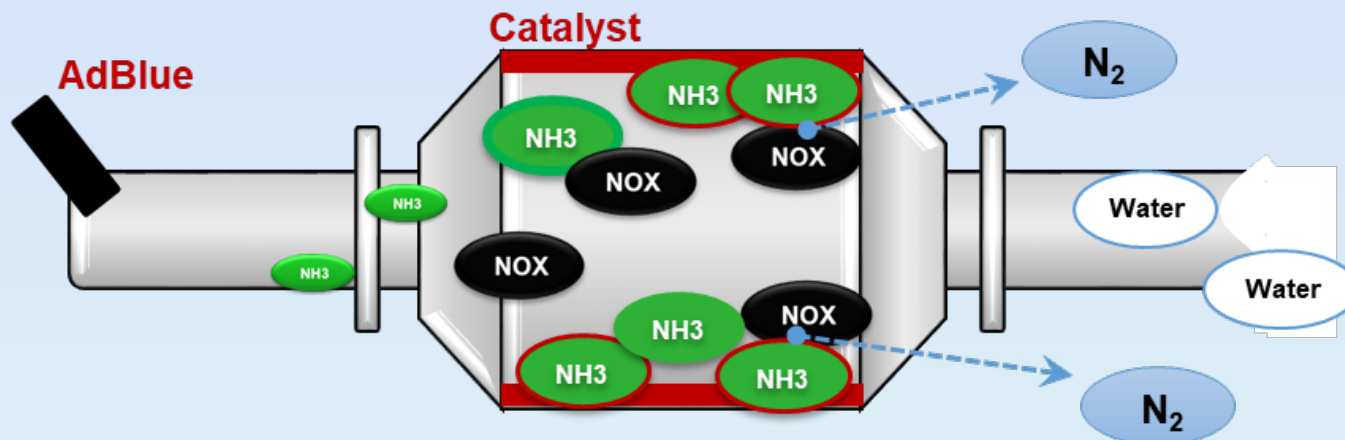
The NH₃ oxidation is the key process in AMOX technology, placed downstream the SCR.

SCR system



Since only the adsorbed ammonia is the reductant which can react with NO_x specie, the key processes of NH_3 -SCR chemistry are the ammonia adsorption and desorption from the catalyst surface, which are highly affected by the rapid variation of engine working conditions.

SCR system



The urea to ammonia conversion and chemical reactions into SCR converter are influenced by exhaust gas temperature, gas composition and thermo-fluid-dynamic phenomena variable with engine operation. As a results of unfavorable working conditions:

- It is not possible to reach 100 % of **NOx reduction efficiency**, especially during transient conditions due to the much slower dynamics of the catalyst compared to the engine (the catalyst typically requires several minutes before reaching chemical equilibrium).
- Ammonia slip at the catalyst outlet occurs, which has a distinct unpleasant smell and is also regulated by current legislation.



SCR control

Objective: optimization of Urea dosing strategies to reach balance between high NO_x reduction efficiency and low NH_3 slip

Non linearities of the system

- Reaction kinetics
- Cross-sensitivity of NO_x sensor to NH_3

System dynamics

- Catalyst Temperature
- Ammonia storage

Transport delay

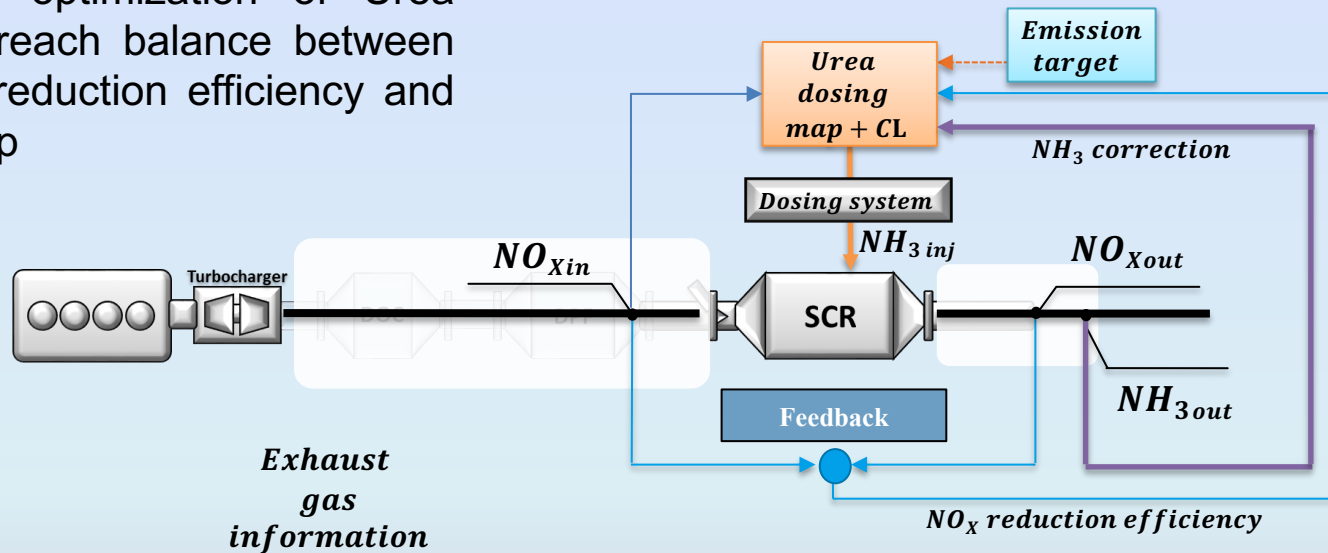
- From urea control signal to NH_3 in the catalyst

Uncertainties

- Engine out gas temperature, flow and composition (i.e. NO , NO_2);
- Thermal state of the SCR;
- NH_3 injection accuracy, deposits.
- Sensor accuracy
- SCR actual NH_3 storage, formulation, aging

SCR control

Objective: optimization of Urea dosing to reach balance between high NO_x reduction efficiency and low NH_3 slip



Control inputs:

- NO_x engine out
- NO_x post SCR target
- Nominal Stoichiometry Ratio (NSR) maps to prevent NH_3 slip.
- NO_x sensor feedback

Compensation requirements:

- Dynamic compensation for NH_3 desorption;
- NH_3 slip prevention for load variations;
- Slow catalyst dynamics;
- Sensor response time and time delay in the dosing system;
- NO_x sensor cross-sensitivity towards NH_3 .

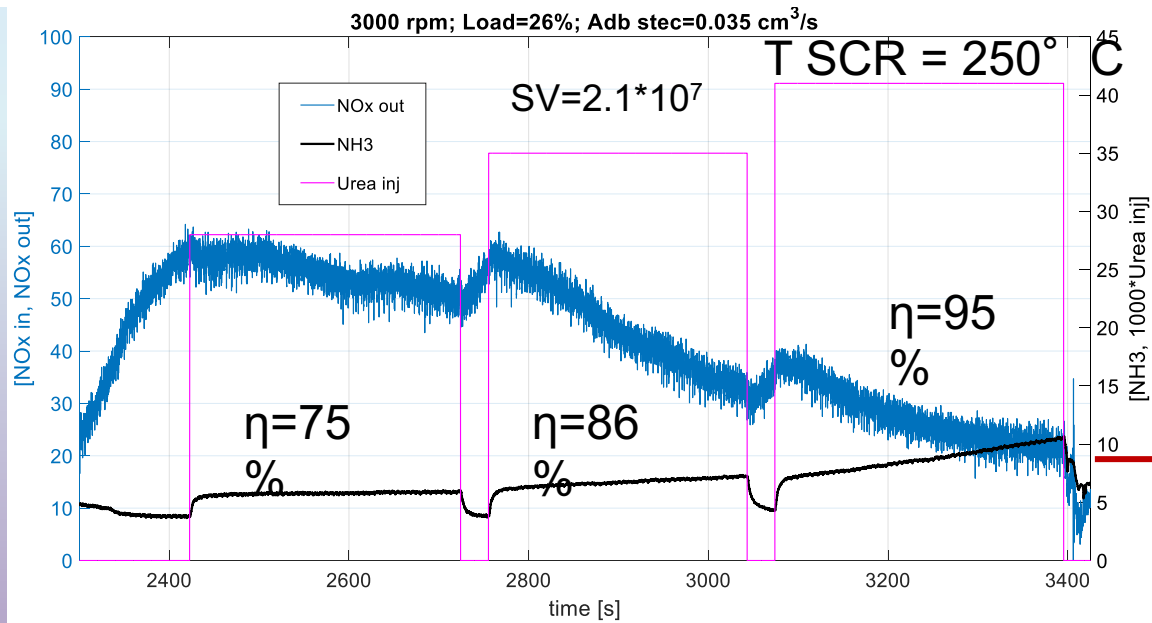
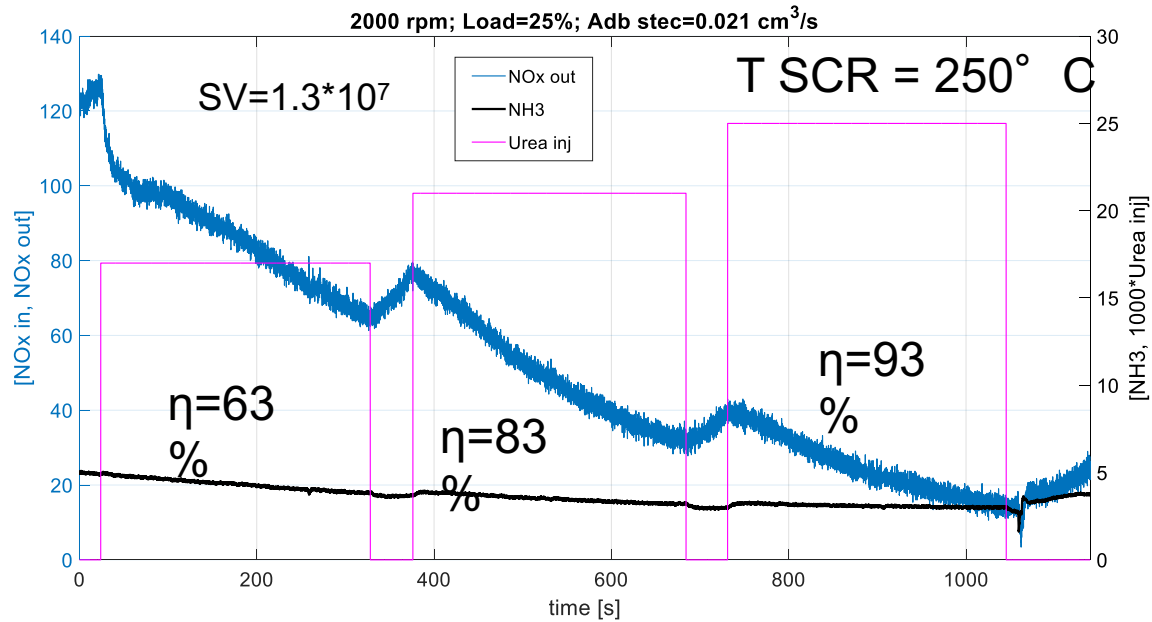


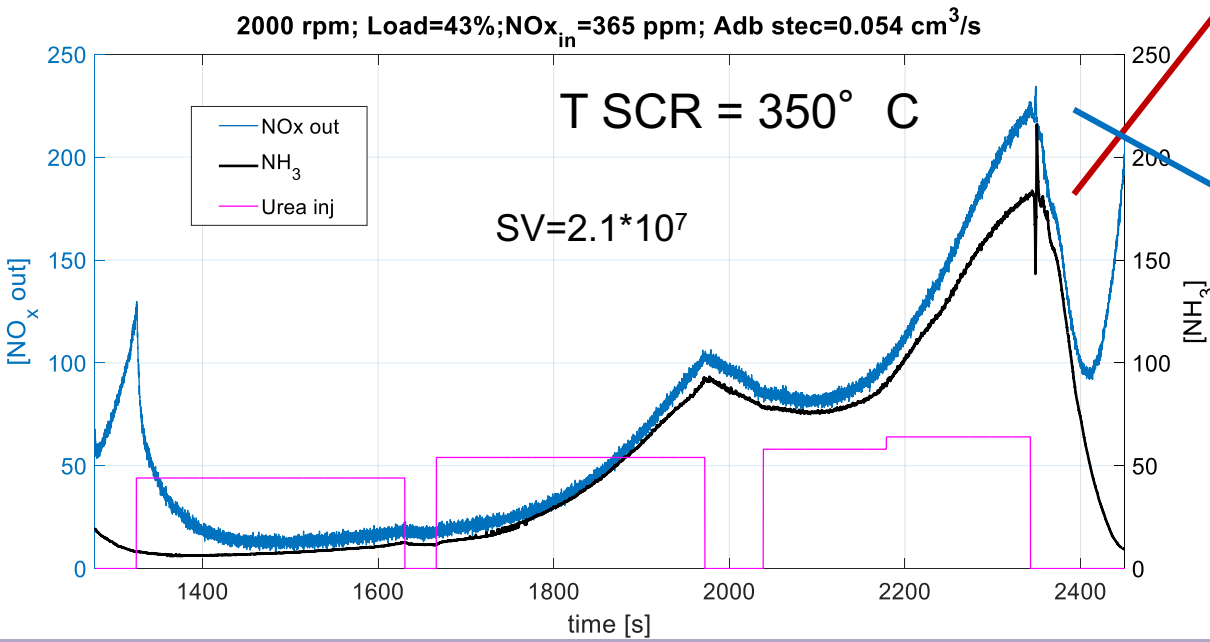
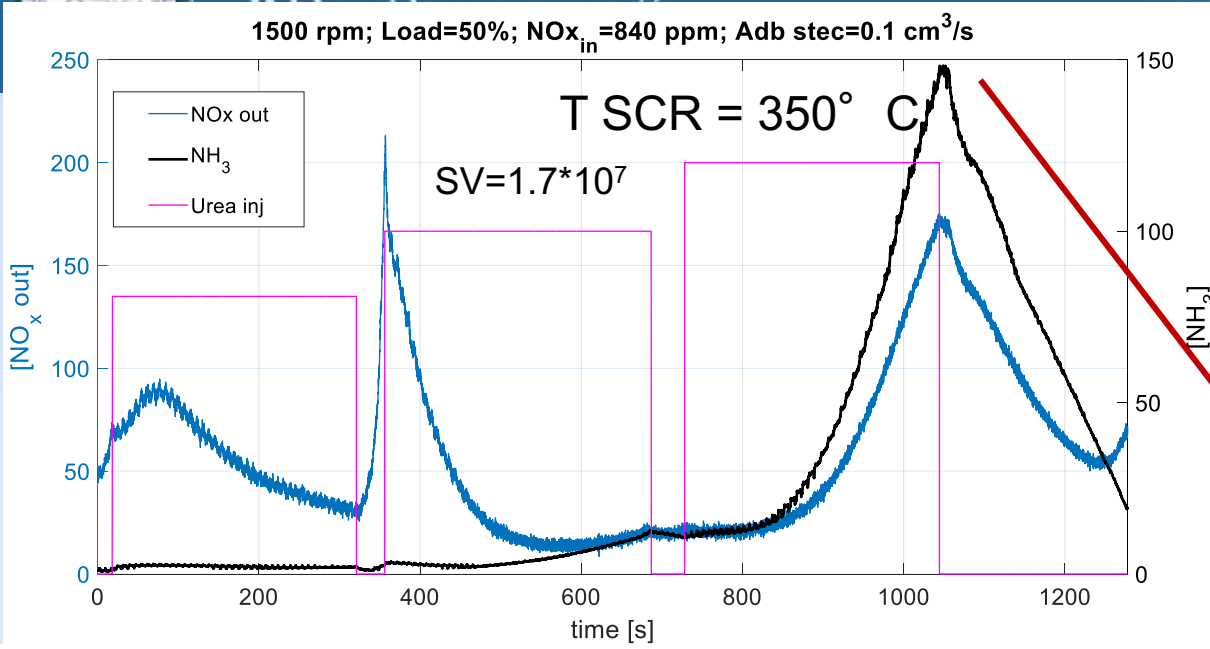
SCR experimental characterization

The engine operating conditions are kept constant along the test in order to have steady state values of NOx, exhaust temperature and mass flow rate.

For each test case, 3 urea injection steps are actuated, corresponding to sub-stoichiometric (0.8), stoichiometric (1.0) and over-stoichiometric (1.2) values.

Ammonia slip becomes appreciable with the increase of spatial velocity





SCR experimental characterization

The increase of SCR temperature promotes ammonia desorption thus a large ammonia slip takes place.

The NOx out measurement is affected by cross sensitivity with NH3



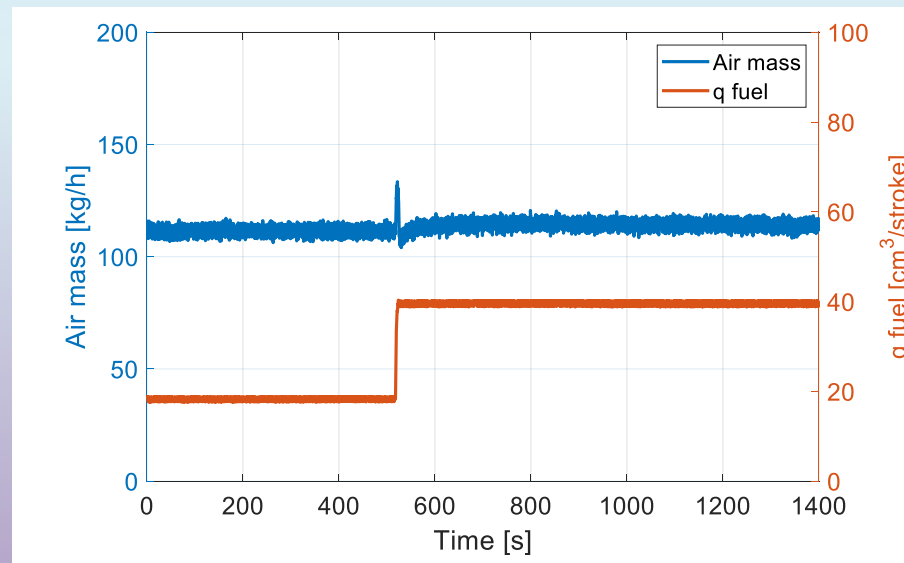
SCR experimental characterization

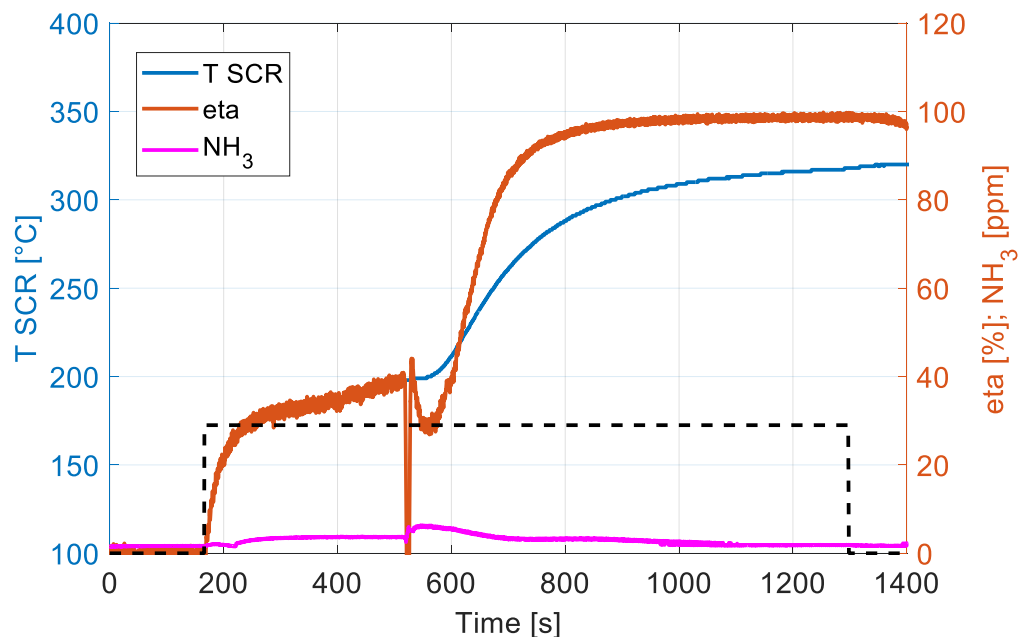
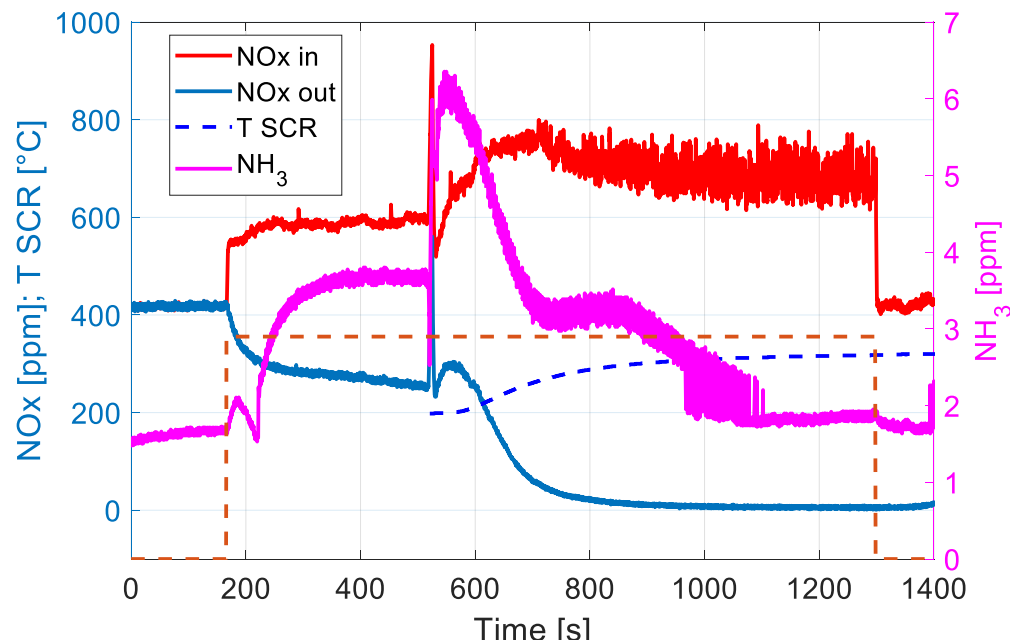
The SCR behavior (e.g. conversion efficiency and ammonia slip) in engine transient conditions is investigated by performing :

- load steps to increase the exhaust temperature and in turn the SCR temperature.
- A sub-stoichiometric injection (0.8) is actuated.
- Different engine speeds are considered to evaluate the impact of space velocity through the SCR
- The tests are performed with and without urea injection.
- Exhaust mass flow rate and NOx concentration upstream the SCR are kept constant by operating on SOI, cEGR and cVGT:
 - 1) At low load **cEGR** is closed in order to increase NOx concentration and mass flow rate.
 - 2) Once the load step is actuated **cEGR** is opened to guarantee the previous mass flow rate.
 - 3) The **SOI** IS advanced to reestablish the NOx concentration.
 - 4) Finally the **cVGT** is slightly tuned to compensate the previous actuations.

Test case #1: 1500 rpm

Test case #1	Load [%]	SOI main [°BTDC]	cEGR [%]	VGT[°C]	NOx [ppm]	Mair [Kg/h]
before	18	3	7	80	420	108
after	40	5	26	75	420	108



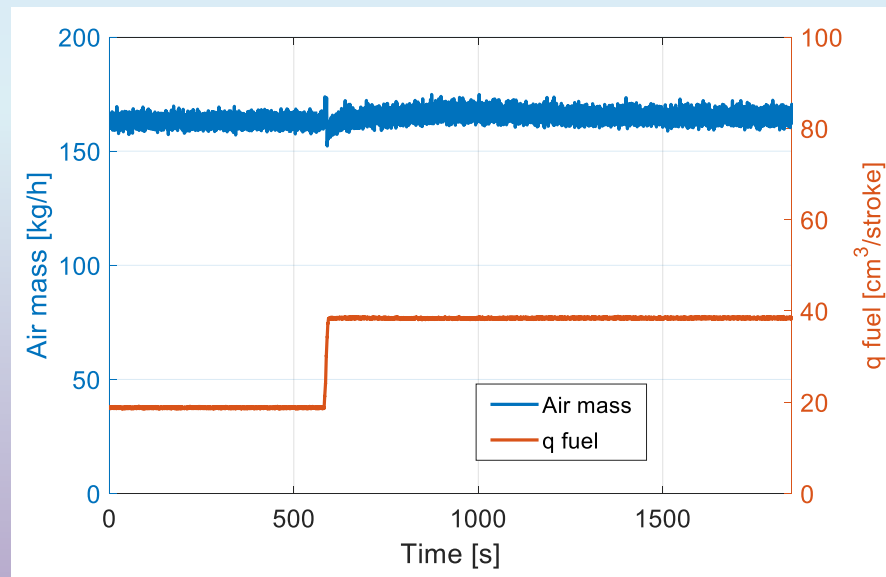


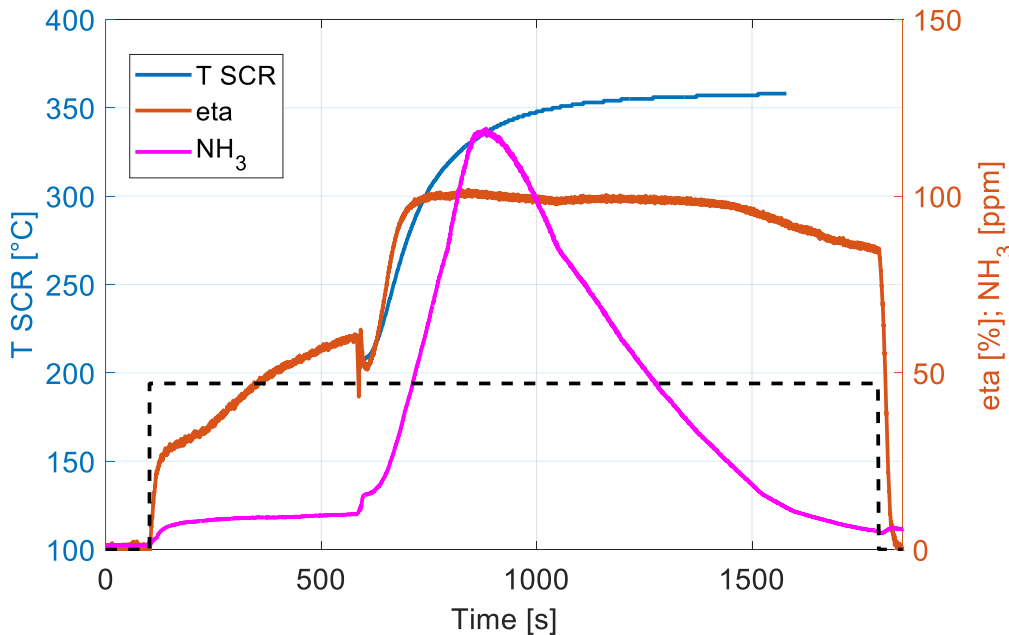
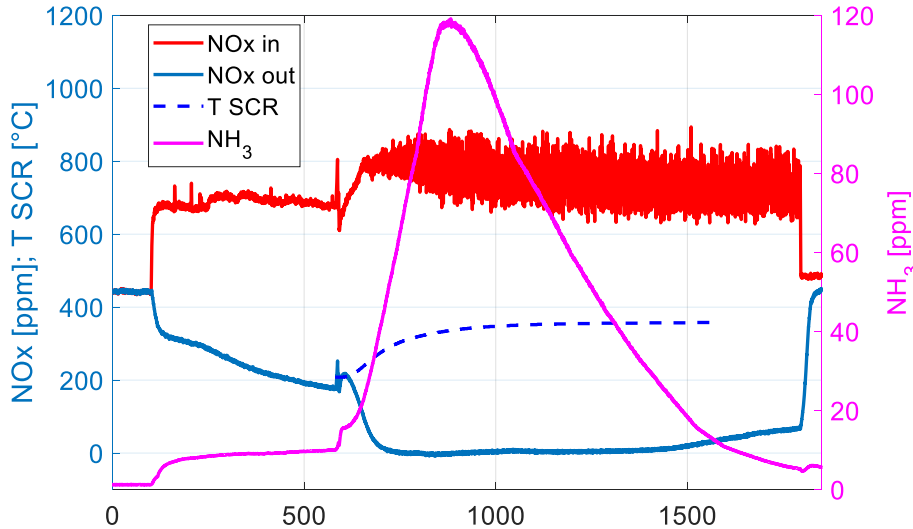
Test case #1: 1500 rpm

- Until the urea injection is actuated (before 200 s), the red line and blue line are superimposed.
- Once the injection starts, the step increase in the NOx inlet concentration is due to the partial decomposition of the urea in ammonia; at the same time, the outlet concentration decreases monotonously.
- The ammonia slip, after an initial increase becomes constant around 4 ppm.
- Once the load step is actuated, the temperature increases and a slight ammonia peak is detected around 600 s; after that the ammonia slip decrease as the SCR conversion efficiency increase.
- At the same time, the inlet Continental detection increase, suggesting a higher urea decomposition upstream the SCR.

Test case #2: 1800 rpm

Test case #2	Load [%]	SOI main [°BTDC]	cEGR [%]	VGT[°C]	NOx [ppm]	Mair [Kg/h]
before	19	2	0	79	450	165
after	40	-7	15	62	470	165



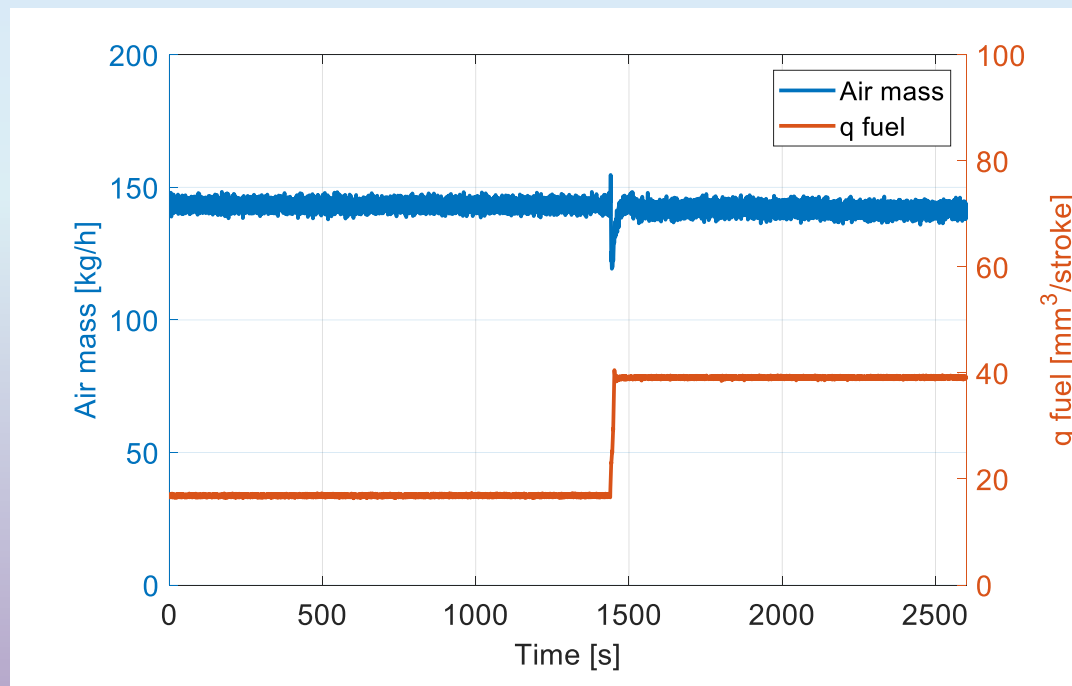


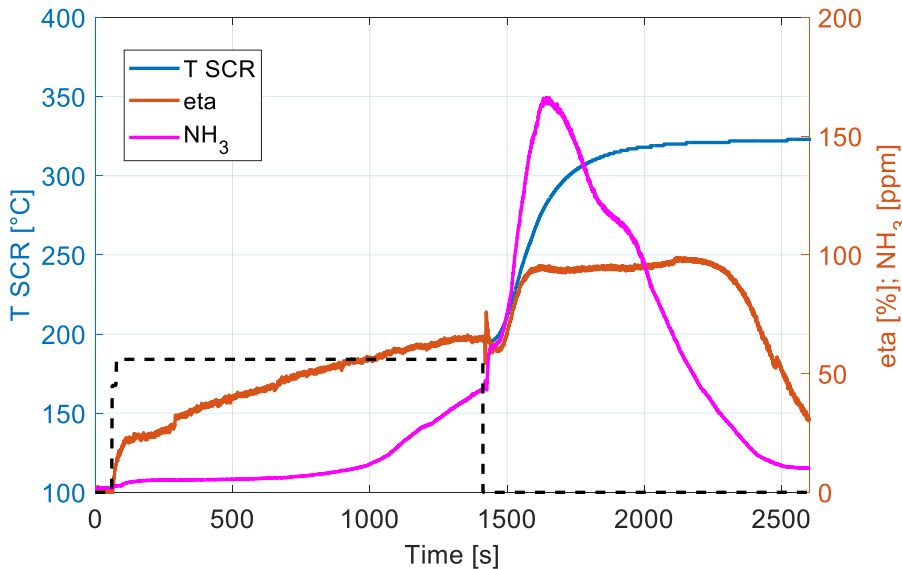
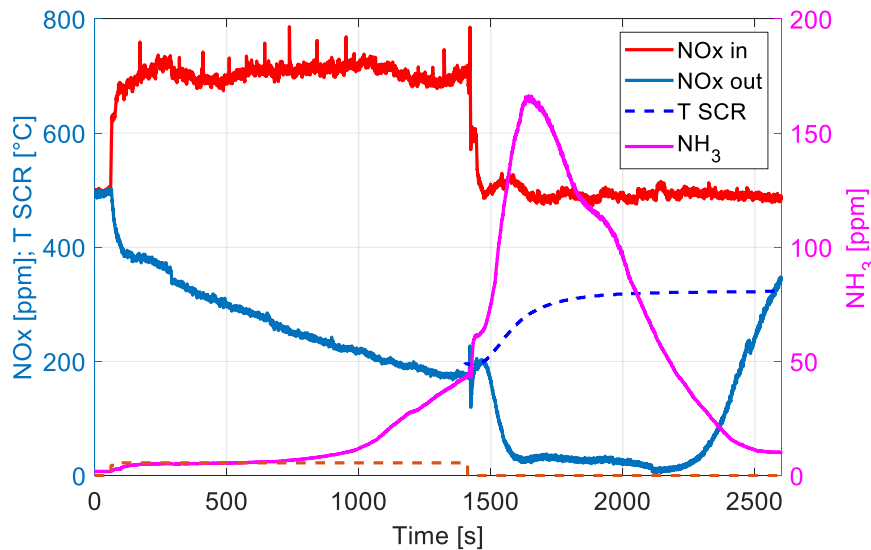
Test case #2: 1800 rpm

- Once the load step is actuated, the temperature increases;
- A high ammonia desorption takes place, sensed downstream the SCR as ammonia slip.
- The outlet NOx increase after 800 s from the load step.
- This test confirms that higher is the SV, higher is the ammonia slip phenomenon and thus also the exhaust mass flow rate has an impact on the adsorption and desorption phenomena.

Test case #7: 1700 rpm

Test case #7	Load [%]	SOI main [°BTDC]	cEGR [%]	VGT[°C]	NOx [ppm]	Mair [Kg/h]
before	17	5	3,5	80	500	140
after	40	7	13	80	500	140

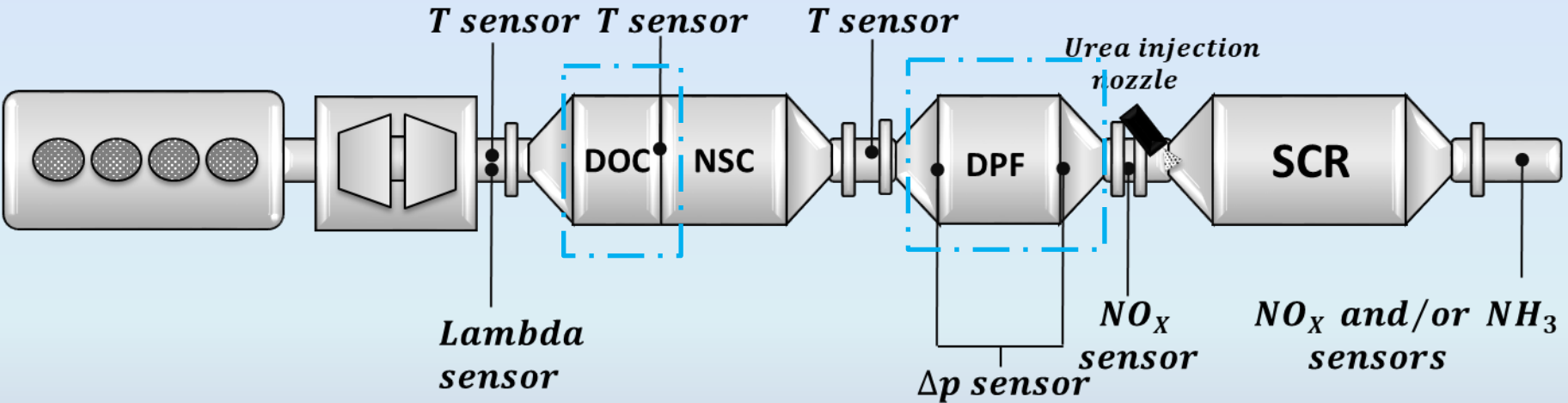




Test case #7: 1700 rpm

- The urea injection is stopped when the load step is actuated.
- A high ammonia desorption takes place, sensed downstream the SCR as ammonia slip.
- The conversion efficiency initially increases up to 95% due to the high temperature.
- Afterwards efficiency decreases as far as no more ammonia is available in the monolith.

Diesel engine after-treatment layout



DOC – Diesel Oxidation Catalyst

- Oxidation of HC and CO
- Oxidation of NO to NO₂

DPF – Diesel Particulate Filter

Accumulation

- ✓ Depth filtration
- ✓ Cake deposition

Regeneration

- ✓ Active
- ✓ Passive

SCR – Selective Catalytic Reduction

- Urea injection
- Ammonia slip



Bibliografia

- G. Ferrari, «Motori a combustione interna». Società Editrice Esculapio.
- J.B.Heywood, «Internal Combustion Engine Fundamentals». McGraw Hill.
- C. Pianese, G. Rizzo, «Dispense del corso di «Modellistica dei sistemi energetici e propulsivi». Università di Salerno.