



Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2272A

ANNO: 2017

A P P U N T I

STUDENTE: Cammarata Maicol

MATERIA: Controllo delle Emissioni 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.

COMBUSTIONE NEI MOTORI SI

1

Si tratta di motori che utilizzano combustibili con bassa reattività, ovvero combustibili caratterizzati da catene corte e rigide. Grazie a ciò, nonostante le T elevate che possono esserci in un processo di combustione, è necessario un tempo lungo per immissione e penetrazione. Per ridurre questo tempo, in modo da essere compatibile con il ciclo motore è necessario aiutare il motore mediante una sorgente esterna. L'avvio del processo avviene generando una scintilla mediante una candela esterna (candela scettica).

I combustibili più utilizzati sono: benzina, Gas Naturale compresso (CNG), Liquefied Petroleum Gas (LPG) (gas naturale liquido GPL). → diverso dal GAS NATURALE che è a base di metano; il GPL è un derivato del processo di raffinazione del petrolio.

Come avviene la combustione?

Quando vogliamo avviare la combustione, mandiamo un comando ad una candela scettica, la quale fa scoccare un arco elettrico tra gli elettrodi. Questo arco elettrico ha una bassa energia (mille joule) che però è sufficiente ad avviare il processo di combustione.

Come si avvia la combustione? Si crea un nucleo centrale di sostanza combusta e la combustione si propaga a tutto il resto della camera. Appena tutto questo avviene è necessario, che nel momento in cui scocca la scintilla, la miscela sia già preformata, cioè ci sia già il contatto fisico tra aria e combustibile. → possiamo avere corone omogenee o stratificate. Con corone omogenee in camera, abbiamo una miscela stechiometrica in tutta la camera, scocca la scintilla, e ci sono le condizioni affinché la fiamma si propaga. Il fenomeno della combustione avviene proprio tramite la propagazione del fronte di fiamma. Il fronte di fiamma avanza e dietro di esso abbiamo i prodotti della combustione e davanti i reagenti. Quando la propagazione è finita, la combustione è completa e il motore è pronto per un nuovo ciclo.

Reagenti e prodotti della combustione sono le due specie chimiche stabili che vi sono in camera, le trasl. da reagenti a prodotti avviene all'interno del fronte di fiamma, cioè nel fronte di fiamma avvengono delle reazioni molto importanti che ci fanno passare dai reagenti ai prodotti.

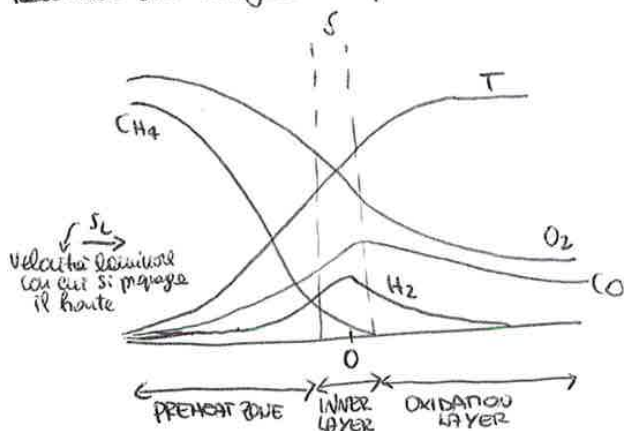
Come è fatto il fronte di fiamma?

Il fronte di fiamma è uno strato molto sottile e coniugato (davanti alle tubature). Nella strato del fronte di fiamma avvengono le reazioni che ci permettono di passare dai reagenti ai prodotti.

UNBURNED GAS = sono i reagenti, quindi miscela aria-combustibile e al max ci possono essere i gas residui dei cicli precedenti.

BURNED GAS = sono i prodotti, quindi O_2, H_2, CO, CO_2 e i vari inquinanti.

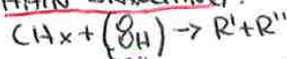
Passando dai reagenti ai prodotti la T aumenta.



• Nella zona di PREISCALDO avvengono le reazioni che si chiamano INITIATING STEPS (REAZIONI DI AVVIO). Le reazioni iniziali sono quelle in cui il fuel reagisce con l' O_2 più forte dei radicali: $CH_x + O_2 \rightarrow (O, OH \dots)$

In questa fase presono i radicali, la reazione è isotermica ma limitata e la velocità non è così elevata.

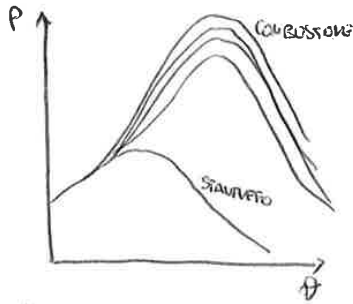
• Nella strato (INNER LAYER) INTERNA, dove avviene la concentrazione dei radicali è elevata, avvengono le CHAIN BRANCHING:



il combustibile o dei suoi componenti, reagisce con i radicali per creare altri radicali R' e R'' . Questi altri radicali reagiscono di nuovo con CH_x → reazione di ramificazione

In questo motivo vengono chiamate REAZIONI DI RAMIFICAZIONE A CATENA. Dunque abbiamo delle reazioni esotermiche da modo consistente che avvengono tutte insieme → si parla di esplosione termica, infatti la T nella PREHEAT zone è decisamente + bassa di quella dell'INNER LAYER. Ovviamente queste reazioni non avvengono all'infinito, ma si avranno delle CHAIN TERMINATION (reazioni di interruzione della catena) che sono delle reazioni in cui un radicale R reagisce con una molecola per formare qualcosa che non è un radicale: $R' + M \rightarrow N$ oppure: $R' + R'' + M \rightarrow R''' + N$

Si osserva che il rilascio termico varia da ciclo a ciclo, cioè la pressione da ciclo a ciclo varia un po' anche se le max della P rimangono più o meno le stesse sempre dallo stesso punto. Si parla di VARIABILITÀ DA CICLO A CICLO. C'è anche una variabilità da cilindro a cilindro nello stesso ciclo.



Bastano, quindi, piccole variazioni del campo di vuoto, di T del rapporto air/fuel nella zona dove sta secondo la scintilla e nelle zone circintorno dove c'è la propagazione del fronte di fiamma per cambiare radicalmente come avviene il processo di combustione. Quindi spesso non si può basta guardare il ciclo medio, ma deve guardare ciclo per ciclo. Questo si fa soprattutto per due aspetti: la detonazione, perché magari il ciclo medio non detona (ma qualche ciclo detona / deve considerarsi che ci sia un numero di cicli detonanti inferiori ad un certo valore); in termini di NO_x che dipendono dalla T e se considero la variabilità dei cicli, oltre che alla P, sono diverse la T e dunque diverse emissioni di NO_x diverse nei cicli.

non detona una maggior qualche ciclo detona / deve considerarsi che ci sia un numero di cicli detonanti inferiori ad un certo valore); in termini di NO_x che dipendono dalla T e se considero la variabilità dei cicli, oltre che alla P, sono diverse la T e dunque diverse emissioni di NO_x diverse nei cicli.

BASSA REATTIVITÀ significa ALTO NUMERO DI OTTANO (cioè effetto resistivo alle detonazioni)

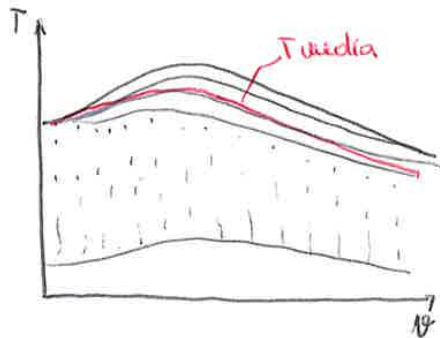
ATTENZIONE: la bassa reattività non deve essere confusa con la volatilità del combustibile. Le benzine, cioè i combustibili a bassa reattività sono molto volatili e quindi è facile trasformarli in vapore → per questo si usano le carburatore, che già lo stesso carburatore e si miscelavano con l'aria; ~~poi~~ si usano iniettori a bassa P nei collettori di aspirazione, molto vicini alle valvole. Oggi si usano sistemi ad iniezione DIRETTA con iniettori in camera, però l'iniezione si può fare durante l'aspirazione senza P ^{relativa} Nei Diesel e il contrario perché il combustibile non è facilmente vaporizzabile e quindi deve atomizzarlo, cioè iniettarlo ad alte P.

I combustibili più volatili sono più a rischio esplosivo quindi ci vuole maggior attenzione per lo stoccaggio. Perché essendo molto volatili si possono creare dei vapori di benzina che si miscelano con l'aria, possono essere effetto possibilità di esplosione.

È chiaro che la composizione dei prodotti e dei reagenti è diversa perché da una parte abbiamo fuel e aria e dall'altra CO_2 e H_2O . Le T sono diverse tra reagenti e prodotti, ma c'è un'unica T per tutti i prodotti e una per tutti i reagenti?

Per i reagenti, trascurando quelli a contatto con le pareti, possiamo dire che c'è una T uniforme, cioè al variare del tempo la T varia un po' in modo omogeneo in tutte le zone.

Nei burned gas (prodotti) c'è un gradiente di T: i gas che bruciano per primi raggiungono la T più elevata, gli altri progressivamente raggiungono delle T inferiori.

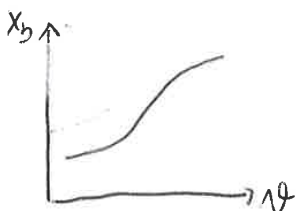


La prima massa brucia un po' nello stesso tempo comprime anche gli unburned gas, quindi gli unburned gas che bruciano al passo successivo portano da una P e da una T + alta e quindi aumentano la loro P e T un po' a sua volta gli unburned gas saranno compressi dallo stantuffo e portati ad una T + elevata. Per cui la 1° massa di brucia rimane ad una T + alta rispetto alle altre.

La T media non è un po' utile nelle stime degli NO_x perché gli NO_x dipendono esponenzialmente dalla T. Siccome tra la T + alta e la T media ci può essere una grande differenza, non ci si può basare su la T media. Gli NO_x sono di più a T + alte.

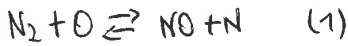
$X_b = \frac{m_b}{m}$ → massa degli unburned gas
 m → massa in camera

X_b è la frazione di massa bruciata che è un parametro importante perché ci descrive come la combustione evolve nel tempo; è legato alla quantità di energia chimica rilasciata più il rapido e X_b rappresenta la quantità di energia rilasciata. Ha un andamento ad S e dell'ordine più o meno 60° grad → ANDAMENTO UNIVERSALE



l'attivazione è fornita proprio dal processo di combustione.

Infatti la combustione, avvenendo a $T > 1850 \text{ K}$, obbliga questa energia di attivazione e permette la reazione di ossidazione dell'azoto N_2 presente nell'aria.



Questa reazione produce NO ma anche atomi di azoto N che sono fortemente reattivi e tendono a reagire con O_2 e altri radicali come OH. incontrando questi radicali si formano NO secondo le reazioni (2) e (3).

Inoltre la formazione di NO è data anche dalla formazione del composto intermedio N_2O (ossido di diazoto). Questo meccanismo di formazione di N_2O viene chiamato MECCANISMO DELL' N_2O INTERMEDARIO.

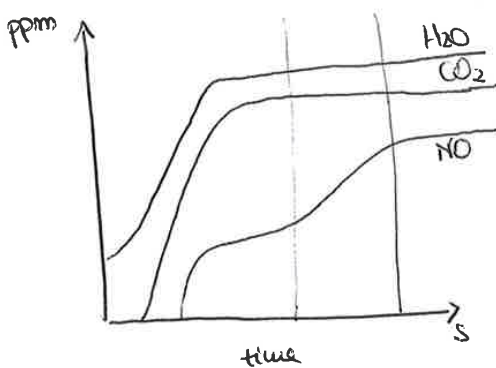
Questo meccanismo è importante soprattutto nelle uscite a basse T. Infatti siccome le energie di attivazione richieste per queste reazioni sono più basse di molto rispetto alla (1), esse si attivano con una dipendenza dalla temperatura meno sensibile.

LEGGE DI ARRHENIUS

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

con a e b che sono delle costanti delle reazioni

↳ costante di velocità di reazione



Si riporta in funzione del tempo le parti per milione in volume di combustione dei vari idrocarburi e composti.

Inizialmente ho solo reagenti e non so come passa il tempo:

- si riducono le concentrazioni dei reagenti
- aumenta il numero di radicali presenti
- aumenta la concentrazione dei prodotti

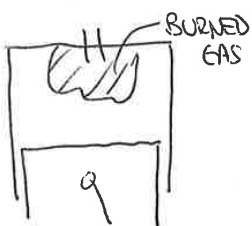
Dal grafico si osserva che la formazione degli NO è molto lenta rispetto a quella di formazione dei prodotti che è quasi istantanea.

Questa velocità di formazione degli NO_x è limitata proprio dal fatto che l'energia di attivazione

È dalla (1) è molto alta.

Questo significa che la velocità con cui avvengono le reazioni che richiedono energia all'interno del fronte di fiamma è sufficientemente rapida da permettere di ipotizzare che i gas combusti raggiungono velocemente condizioni molto prossime a quelle di equilibrio termodinamico. MURRE gli NO_x per formarsi è richiesta la combustione con una velocità diversa.

A causa di questa differenza di velocità fra la propagazione del fronte di fiamma (veloce) e di formazione degli NO_x (lenta) si intruisce che gli NO_x non si possono formare in prossimità del fronte di fiamma, ma lo formano piuttosto nella zona alle spalle di questo, ovvero nella zona dei BURNED GAS.

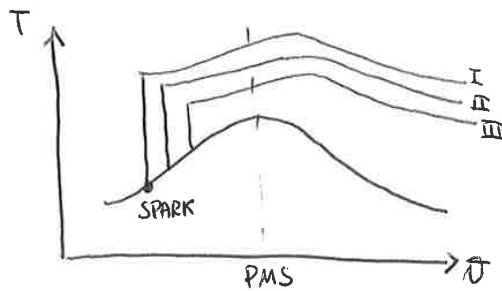
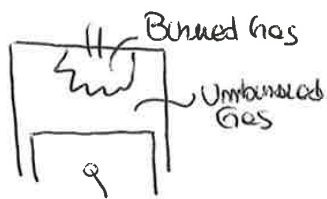


Però la velocità di formazione degli NO_x è piccola se confrontata con quella del processo di combustione ed aumenta esponenzialmente con la temperatura dei gas combusti.

È a causa della lentezza della formazione degli NO_x che si deve ricorrere alla **CINETICA CHIMICA**

- modello termodinamico

Questo modello mi deve riprodurre ciò che accade in camera di combustione.



Gli NOx si formano nella zona dei BURNED GAS, alla spalla del fronte fiamma, che possiamo considerare a $T_{unburned}$ uniforme e variabile nel tempo. Mentre gli UNBURNED GAS posso considerarli a $T_{unburned}$ uniforme ma variabile nel tempo.

La carica nei motori SI inizia a bruciare massa dopo massa.

La massa che brucia tocca la sua T di picco ma nel tempo stesso questa si espande comprimendo la carica circostante e creando il picco di pressione.

Man mano che se usasse bruciano le rispettive T di picco vanno a decaescere.

Si osserva che parte della massa brucia anche dopo il PMS per cui le ultime masse che bruciano presentano una T di picco notevolmente più bassa delle prime.

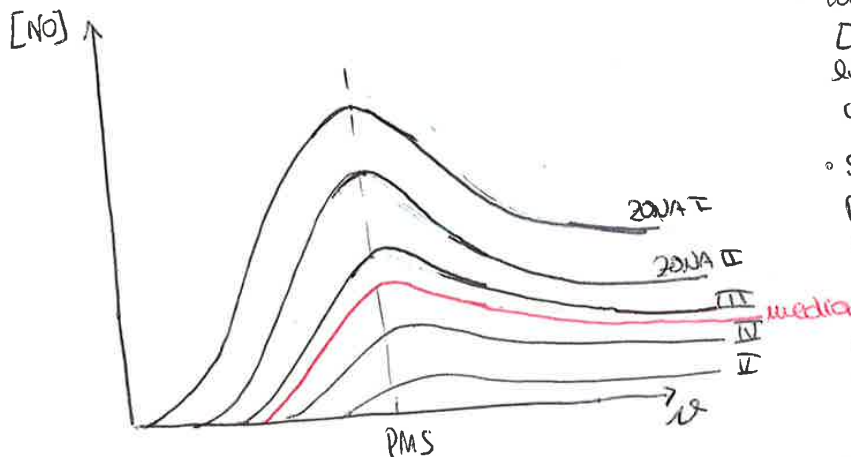
(cioè i gas che bruciano prima del raggiungimento del max di pressione subiscono un'alterazione (compressione che li porta a raggiungere temperature più elevate, mentre le regioni attraversate dalla fiamma quando in camera è stato superato il picco di pressione subiscono un'espansione).

Si capisce, quindi, che valutare la temperatura dei Burned al variare di φ è complesso.

Calcolando la media pesata sulla massa si conosce la temperatura media, però la temp. locale è molto variabile da zona a zona. Infatti la differenza di T tra le prime e l'ultima zona può essere anche dei 1000 K.

Proprio per questo motivo si preferisce utilizzare un **modello termodinamico a zone**.

Secondo questo modello dividiamo la camera in zone tali che mi esprimano il gradiente di T al meglio.



- La fase in cui si ha la crescita della [NO] è quella di formazione, invece, la fase decrescente rappresenta la decomposizione degli NO.
- Si osserva come se nelle prime zone presentino [NO] più elevate e che man mano che si passa a zone successive il picco si sposta dopo il PMS.
- Il processo ideale della fase di decomposizione darebbe risultati ed emissioni da [NO] invece questo non

succede poiché essi raggiungono un valore di essentamento. (Cio' è dovuto alla variazione di T che essendo repentina congela le reazioni di decomposizione degli NO che quindi ci ritroviamo solo scorie. Nelle ultime zone, invece, questo effetto congela le reazioni di formazione.

MECCANISMO PROMPT

È meno importante del meccanismo termico che è il principale. Con questo meccanismo gli NO_x si formano in corrispondenza del fronte di fiamma.

Per miscele particolarmente ricche o povere il meccanismo termico presenta delle sostanziali differenze rispetto ai casi reali.

Secondo questo meccanismo per lo svolgimento della reazione che porta alla formazione degli NO non è richiesto ossigeno ma radicali e idrocarburi → proprio per questo motivo questo meccanismo avviene in corrispondenza del fronte fiamma.

Sul fronte fiamma gli idrocarburi reagiscono con azoto formando IDROCIANATO. Questo reagisce con i radicali generati dalla combustione formando gli NO_x con velocità di formazione elevatissime. Questo processo di formazione di NO è molto rapido ed è sensibilmente influenzato dalla temperatura.

Quindi la differenza con il meccanismo termico sta proprio nella differenza di velocità con cui si formano gli NO .

Questo meccanismo diventa importante in tutte quelle condizioni di funzionamento del motore in cui la produzione termica è ridotta per effetto delle basse temperature in camera. Sono tali le condizioni di funzionamento con elevata diluizione della carica (EGR) con anticipo di accensione molto minore di quello di massima coppia o con miscele molto ricche.

Il meccanismo prompt non può essere trascurato tutte le volte in cui i livelli di NO misurati allo scarico sono dell'ordine dei 100 ppm o inferiori.

Non è molto importante questo meccanismo poiché si manifesta per dotature in cui un motore si quasi mai lavora.

Per misurare gli MHC si inserisce in serie un CUTTER con un HFID.

HFID è l'analizzatore a ~~flammanionizzazione~~ ionizzazione di fiamma dove si riscalda il tubo di collegamento tra analizzatore e motore per evitare che gli HC condensando si vanno a depositare su questi tubi e quindi falsare le misure successive.

Il cutter è un ~~albero~~ riscaldato a $800-900^\circ$ così che tutti gli HC ossidano tranne quelli MHC. Quindi se il cutter si trova in serie con l'HFID, il FID misura il numero di MHC.

Se il cutter è in parallelo al FID si misurano gli THC.

Sfruttando la relazione (1) risolve il numero di NMHC.

Però si deve considerare il fatto che sulla linea del cutter per la calibrazione si usa il metano, mentre nella linea dell'HFID la calibrazione è fatta con propano.

Si deve riportare tutto in C_1 equivalente per la normativa \rightarrow ppm C_1 .

In base al potenziale di ciascun idrocarburo a cominciare dalla formazione di ozono e suoz fotochimico, è possibile definire delle opportune scale di reattività e classificare in questo modo i diversi HC emessi allo scarico.

Si definisce il MIR (Maximum Incremental Reactivity) che è un indice che mi dice quanti gr di ozono quel particolare grammo di idrocarburo produce. Cioè è la maggior capacità dell'idrocarburo di produrre ozono.
 Allo scarico aumentano alchani e aromatici \rightarrow aumento MIR
 diminuiscono alcheni \rightarrow MIR basso

Ovviamente il MIR del metano (CH_4) è zero perché non produce suoz fotochimico

Si definisce anche la SR = reattività specifica =
$$\frac{\sum_j (NMOG_j \cdot MIR_j)}{NMOG_j}$$

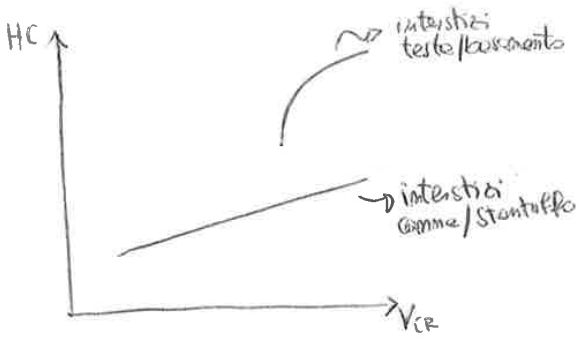
gli MHC non hanno un SR; NMHC hanno un SR

Se osserviamo la composizione del combustibile all'inizio e allo scarico, notiamo che allo scarico compaiono altre specie chimiche rispetto a quelle iniziali che dipende dalle reazioni intermedie degli idrocarburi.

La reattività specifica allo scarico può essere superiore a quello che avevamo all'inizio perché nascono nuove specie con alto SR.

\downarrow
 come aldeidi
 eteri ecc.

(per approfondire vedi slide 9)



NEL CASO DI INTERSTIZI CAMERA/STANTUFFO HO LIMITE MA NON PROPORZIONALITÀ DIRETTA.

NEL CASO DI INTERSTIZI TESTA/BASAMENTO NON HO LIMITE MA COMunque al crescere di VCR HO UN AUMENTO DEGLI HC.

Quindi in generale si ha un aumento degli HC al crescere di VCR ma senza proporzionalità.

INTERSTIZI CAMERA - STANTUFFO

Durante la fase di compressione si ha accumulato della carica negli interstizi. Una volta raggiunto il picco di pressione, cioè dopo il PMS lo stantuffo risale ed inizia la fase di espansione. Si crea allora uno strato di HC sulle pareti dovuto alla fuoriuscita degli HC dagli interstizi. Lo spessore di questo strato è proporzionale al volume degli interstizi.

Poi, durante l'espansione, si hanno in movimento dei moti turbolenti che assottigliano questo strato, ovvero portano parte di questi HC all'interno della camera, facendoci in parte bruciare perché all'interno della camera le T sono più elevate a quelle delle pareti.

Durante la successiva fase di ^(si apre la valvola di scoppio) scoppio, lo stantuffo risale, andando a riscaldare questo strato di HC, trasportandolo verso lo scoppio, dove vengono espulsi. Parte di questi HC, però,

subiscono delle perdite di ossidazione perché vengono a contatto con i gas caldi.

È proprio in questa fase dei moti che punto la proporzionalità di HC e VCR. Infatti al crescere di VCR cresce lo spessore dello strato di HC che si deposita a parete ma poi i moti lo rendono più sottile.

INTERSTIZI TESTA - BASAMENTO

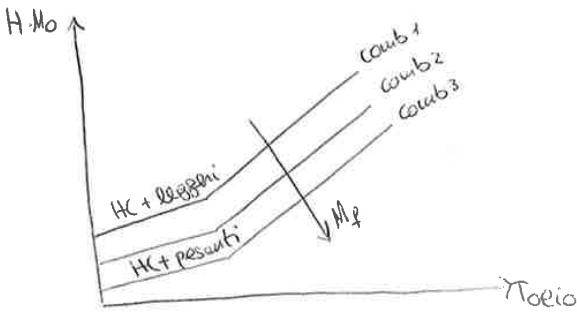
Durante la fase di compressione il combustibile viene spinto in questi interstizi, che poi si trovano nelle vicinanze della valvola di scoppio.

Quando lo stantuffo risale e si apre la valvola di scoppio, questi HC vengono richiacciati rapidamente verso la valvola di scoppio, proprio grazie alla vicinanza tra interstizio/valvola.

Dunque questi HC non vengono molto ossidati. È proprio per questa mancata ossidazione degli HC che a pari volume VCR, l'interstizio testa/basamento produce più HC rispetto all'interstizio camera/stantuffo. È per questo motivo che l'andamento non è lineare negli interstizi testa/basamento.

STRATO DI SPREZZAMENTO A PARETE

Quando il fronte fiamma è vicino alla parete. Tra questi due si crea una zona di carica fresca (UNBURNED GAS) che è influenzata dalla T delle pareti più fredde. Dunque necessità di un flusso di calore maggiore per essere riscaldato. Se questo flusso non arriva, non ossidano le immissioni scoppio e dunque la fiamma si spegne.



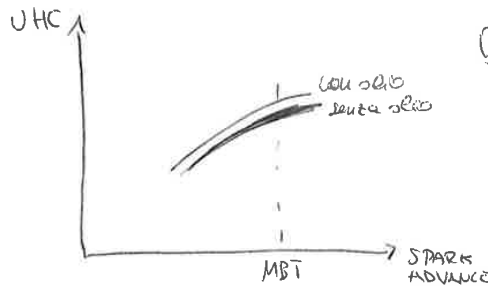
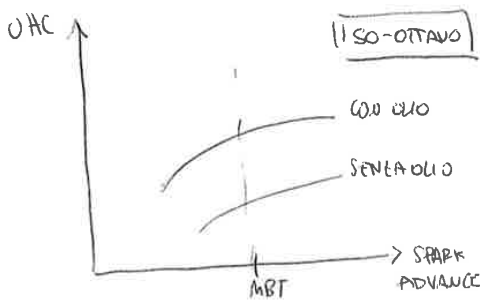
• Al decrescere di $M\phi$ dei combustibili, a parità di Torio, aumenta $M\phi \cdot H$ e dunque ω diminuisce \rightarrow si che significa che diminuisce la concentrazione di combustibile nell'olio e dunque abbiamo meno HC emessi. Infatti per HC+leggeri (e combustibili leggeri, cioè $M\phi$ più alti) hanno maggiore difficoltà di diffondere nell'olio, che è un HC+ pesante.

• A parità di ω , più piccolo è $M\phi \cdot H$ e più grande sarà ω maggiore sarà la diffusione del combustibile nell'olio.

• A parità di $M\phi \cdot H$ (cioè considerando lo stesso combustibile) al crescere della Torio cresce il denominatore $M\phi \cdot H$ facendo decrescere ω , ovvero la concentrazione di combustibile nell'olio \rightarrow meno HC emessi.

• Se ho un motore che lavora a carichi più alti \rightarrow p maggiore avrà una ω maggiore, cioè avrà una maggiore concentrazione di fuel nell'olio e quindi aumentano gli HC emessi.

Considerando 2 tipi di combustibili e diagrammando per unburned HC in funzione di Spark Advance (anticipo di eccensione) per due prove: con olio senza olio

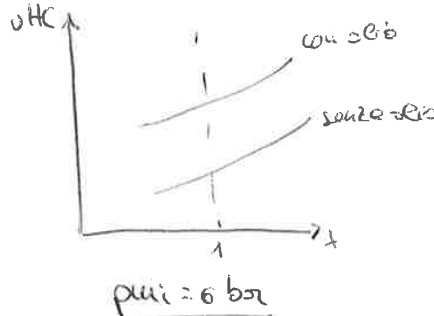
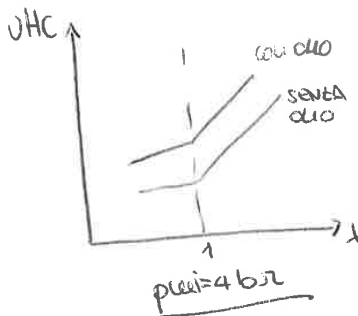


Il propano è molto più leggero dell'iso-ottavo e si nota una riduzione della distanza tra le due curve. Questo perché il propano è molto meno solubile nell'olio lubrificante rispetto a combustibili basati volatili come l'iso-ottavo e l'iso-pentano.

\Rightarrow SI PUÒ, QUINDI, AFFERMARE CHE SE USO UN COMBUSTIBILE A BASSO PESO MOLECOLARE POSSO CONSIDERARE UGUALI LE CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO WITH OIL and WITHOUT OIL.

Aumentando lo Spark Advance aumentano le pressioni in camera per cui cresce ω e quindi gli HC emessi.

Per quanto riguarda il carico a pari condizioni di λ , andando si forte la prova con e senza olio, si nota che aumentano gli HC prodotti:



All'aumentare del carico - motore le curve si distanziano.

Successivamente abbiamo la zona di OXIDATION LAYER, dove avvengono le reazioni di interazione della catena, ovvero la CHAIN TERMINATION che sono delle reazioni che consumano radicali. La T continua ad aumentare.

La distribuzione della T nelle 3 zone del fronte fa sì che questo si propoghi in senso di combustione per trasmissione di calore dalla zona BURNED alla zona UNBURNED (zona conica fresca).

Dunque si hanno degli scambi di calore tra la INNER LAYER e la PRE-HEAT LAYER che fanno partire le reazioni di avvio.

Quando la ~~zona~~ ~~zona~~ conica fresca è prossima alla parete, la T di questa condiziona la T della conica che necessita quindi di un flusso termico più elevato per ossidare il combustibile. Se allora questo flusso non è disponibile non si ha accensione della miscela in questo strato.

Lo strato che rimane non ossidato o parete verso il suo spessore in base al conico. Più è alto il conico, più è sottile lo strato di spegnimento.

In pratica abbiamo un flusso di calore da IL a PL e un flusso di calore derivante dalle pareti. Se quello delle pareti mensile non si immescano le INITIATION STEPS e quindi la fiamma si spegne.

• Spegnimento nella conica (BULK QUENCHING)

In particolari condizioni ^{della conica} può verificarsi lo spegnimento del fronte fiamma. Ad esempio quando la P e la T in conico, nella zona della conica fresca, si abbassano rapidamente raffreddando lo spegnimento della conica perché si riduce la velocità luminosa della fiamma.

Oppure può verificarsi nel caso di dosature locali: troppo ricche o troppo povere, % EGR locale troppo alta.

Nelle condizioni peggiori può provocare il MISFIRE, ovvero quando la fiamma non parte proprio.

• Trafilamenti dello scarico

Questo meccanismo è dovuto ai trafilamenti della conica attraverso la tenuta sede-piatello della valvola di scarico chiusa. Se questo trafilamento avviene prima della combustione, i gas che sfuggono verso lo scarico sono costituiti da miscela ricombusta. Questi trafilamenti sono più vicini ed sono dovuti al fatto che il contatto valvola-sede non è tale da assicurare la tenuta e consentono a parte della conica fresca di finire allo scarico senza essere ossidata allineando la concentrazione di HC allo scarico.

• Combustibile liquido

Nel caso di un motore ad iniezione diretta e indiretta. Nel caso di un motore FI il combustibile viene iniettato nel collettore ^{di aspirazione} e quindi dovrebbe evaporare. ^(L'INIEZIONE AVVIENE QUANDO LA VA È CHIUSA) Solitamente una ^{piccola} parte, però, evapora prima di raggiungere le sparkie. La maggior parte impatta con le pareti che essendo calde permette a questo combustibile di evaporare (infatti il combustibile evapora a contatto con il piatello caldo della VA). Non tutto questo combustibile evapora, però, al piatello della valvola non può ossidare nello stelo che è più freddo e quindi non evapora. Quindi ^{parte di} questo combustibile va a finire in zone più fredde e quindi non evapora del tutto. Quando si apre la valvola di aspirazione, queste particelle entrano in camera. Queste particelle che non evaporano (costituite essenzialmente dai componenti non volatili del combustibile) può essere immagazzinate nei depositi carboniosi, negli strati di olio o negli interstizi e dunque non viene ossidato e favorisce durante le fasi di aspirazione e di scarico. L'incomplete ossidazione di questo combustibile porta ad un aumento di HC emessi. Questo fenomeno è orientato durante il transitorio di AVVIAMENTO, dove la valvola, il condotto di aspirazione sono relativamente freddi e dunque solo una parte del comb. iniettato evapora. Per favorire l'avviamento del propulsore dovrà essere iniettata una maggiore quantità di fuel rispetto a quello richiesto nel caso di completa vaporizzazione.

Mentre nella prima categoria si ha la presenza di Ossigeno (agente ossidante); nella seconda categoria questi HC devono prima venire a contatto con un agente ossidante per ossidare → ossidazione più difficile.

Un tempo caratteristico necessario all'ossidazione è:

$$\frac{1}{T_{HC}} = \frac{1}{[HC]} \cdot \frac{d[HC]}{dt}$$

- $T_{HC} \approx 1 \text{ ms}$ → all'interno del cilindro prima della fase di scoppio spontaneo ($T > 1250 \text{ K}$)
Questo fa sì che il processo di ossidazione nel cilindro è controeffettuato dal mescolamento degli HC con i gas combusti e non dalla cinetica chimica → prevale la temperatura
- $T_{HC} \approx 50 \text{ ms}$ → durante la fase di scoppio spontaneo, dopo l'apertura della valvola di scoppio (T molto sotto i 1000 K)
Prevale la cinetica chimica. Al di là della T tutti gli HC ossidano
Quando se T sono molto basse, dal processo di ossidazione si possono formare composti intermedi molto diversi dagli idrocarburi presenti nel combustibile e molto più aggressivi di questi. Ad esempio aldeidi e chetoni e composti aromatici.

OSSIDAZIONE DEGLI HC nel cilindro

Le prime reazioni di ossidazione coinvolgono pertanto gli idrocarburi che si formano negli strati di spegnimento a parete, poiché è causa del loro ridotto spessore dello strato di spegnimento si diffondono velocemente all'interno della camera nel cilindro e si ossidano rapidamente.

La miscela che proviene dagli intenzisti riesce ad ossidarsi quasi completamente nel a $T > 1800 \text{ K}$, pertanto la parte degli HC rilasciata dagli intenzisti durante la fase di scoppio subisce soltanto una ridotta ossidazione nel cilindro. Complessivamente i $2/3$ degli HC provenienti dallo spegnimento delle fiamme e degli intenzisti riesce ad ossidarsi completamente nel cilindro, solo $1/3$ degli HC provenienti da olio e CCD riescono ad ossidarsi perché deve prima mescolarsi con l'ossigeno.

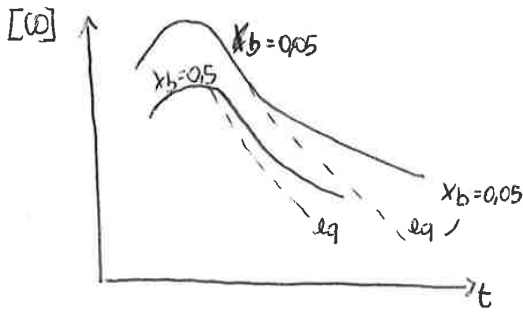
OSSIDAZIONE DEGLI HC allo scoppio

Nel condotto di scoppio buona parte degli HC riesce ad ossidarsi, dato che si hanno $T > 800^\circ$ e discreta presenza di ossigeno.

La percentuale di HC che si ossida nella prima parte del collettore di scoppio può arrivare anche al 40% degli HC uscenti dalla camera.

Anche se quest'ossidazione dipende dalle condizioni di funzionamento, si ritiene comunque che un'ossidazione significativa avviene soltanto nella prima parte del collettore di scoppio.

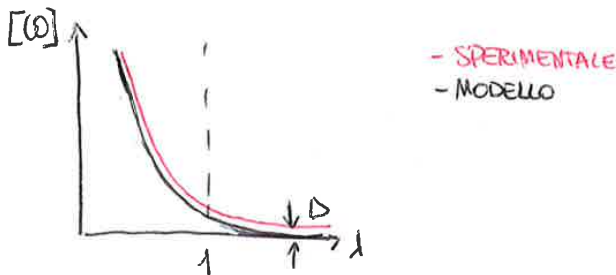
La produzione di CO è superiore per le zone che bruciano prima e inferiore per le ultime zone a bruciare.



La frazione $X_b=0,95$ brucia con T più alte e per questo motivo prosegue per più tempo con la curva di equilibrio avendo alte velocità di reazione. Mentre la curva $X_b=0,5$ avendo T più basse si distacca prima dalla curva di equilibrio. E avendo T più basse \rightarrow meno velocità di reazione \rightarrow meno formazione di CO.

Si vede come, inoltre, a causa delle diverse storie temporali di T e p presentiamo $[CO]$ diverse avendo una sorta di stratificazione con strati (con X_b piccoli) che producono molto CO e strati (con $X_b \rightarrow 1$) che producono poco CO. Si ha quindi un gradiente di CO.

Si può osservare come $[CO]$ varia in funzione di λ : **CINETICA CHIMICA**



\rightarrow differenza costante tra sperimentale e modello.

- Nel campo del ricco ($\lambda < 1$) le $[CO]$ sono massime a quelle di equilibrio $[CO]_e$, questo perché abbiamo a disposizione più combustibile che porta alla formazione di CO con alti tassi di reazione, cioè siccome le reazioni sono veloci ci avviciniamo molto all'equilibrio. E inoltre la carenza di ossigeno e quindi + formazione di CO perché meno ossigeno significa meno CO che si trasforma in CO_2 .
- Nel campo del povero ($\lambda > 1$) il modello dice che non si forma CO, invece sperimentalmente abbiamo una minima quantità di CO che si forma. Questo Δ è dovuto al fatto che il modello non considera il fatto che parte della formazione di CO deriva dalla combustione incompleta degli idrocarburi incombusti HC.
Non si tiene conto del fatto che gli HC prima di bruciare allo stacco si ossidano e formano CO.
Il tipo ha tolto tutto ossigeno che riesce a fare ossidare tutte le CO in CO_2 .
- Nel campo dello stechiometrico ($\lambda = 1$) dobbiamo tenere conto del fatto che consideriamo un λ medio. Questo perché abbiamo più cilindri in un motore e alla fine questi cilindri avranno λ differenti anche se di poco; inoltre il λ in un cilindro può variare da ciclo a ciclo. Quindi il fatto di considerare un λ medio mi era la differenza tra modello e quello che misuro sperimentalmente.
 \rightarrow questo perché l'andamento di $[CO]$ in funzione di λ non è lineare

COMBUSTIONE PREMISCELATA perché abbiamo una miscela di carica e di vapori di combustibile. In questa fase si è formata la miscela e all'interno della miscela si è innescata l'autoaccensione. Quando si avvia l'auto si innesca la combustione che è di tipo premiscelato perché avviene all'interno di questa miscela che si è venuta a formare.

LA COMBUSTIONE nei motori diesel avviene secondo due modalità:

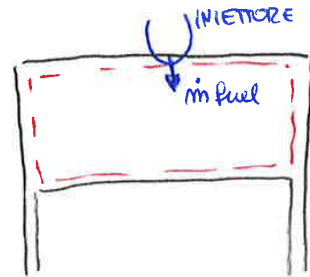
- COMBUSTIONE PREMISCELATA (PREMIXED BURN)
- COMBUSTIONE DIFFUSIVA

Come si ricava la velocità di rilascio termico HRR?

$$\rho Q - \dot{L}_L = \dot{E} \Rightarrow \dot{Q} - \dot{L} = \dot{U} + \dots$$

Applicato alla camera (rosso tratteggiato).

È un sistema APERTO, cioè permeabile alla massa che arriva dall'INIETTORE.



$\dot{L}_L \propto \rho V$ (dovuto allo strutturali)

$$\dot{U} \rightarrow \dot{U}_{chimico} + \dot{U}_{termico}$$

↓
è quello che voglio ricavare
Dipende dalla composizione chimica della miscela. ⇒ unicamente se ho solo vapore, o solo acqua (come nelle turbomacchine) l'energia chimica rimane costante. Nei motori due fasi di combustione da una conversione di energia chimica.

$$\dot{L} \propto dT \propto \rho V \quad (PV = nRT)$$

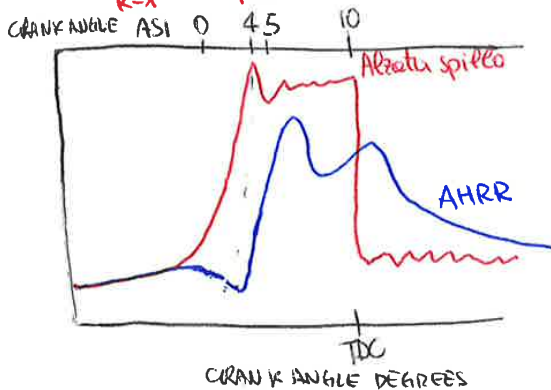
AHRR = velocità di rilascio termico, velocità con cui l'energia chimica viene rilasciata (rilascio dell'energia chimica del processo di combustione)

$$\Rightarrow \dot{Q} - \dot{U}_{ch} - \dot{L} = \dot{U}_{term}$$

HRR

AHRR = \dot{U}_{ch} si parla di Apparent Heat Release Rate perché ho trascinato il flusso termico

$$AHRR = \frac{k}{k-1} \rho V + \frac{1}{k-1} \dot{Y} \dot{p} \quad \text{con } k = \frac{c_p}{c_v}$$



Intorno ai 4° ASI si ha il minimo della curva blu ⇒ INIZIO COMBUSTIONE PREMISCELATA.

Cosa significa AHRR negativo? C'è si osserva da alcuni conto punto il rilascio termico diminuisce, perché?

Il combustibile sta evaporando e l'evaporazione del combustibile sottrae calore, raffredda quello che sta al centro.

L'evaporazione diminuisce la temperatura e quindi apparentemente è come se il rilascio termico è negativo. È legato all'evaporazione del combustibile.

Il rilascio termico della combustione parte dal minimo della curva blu. ⇒ INIZIO COMBUSTIONE

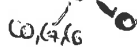
PUNTO F: questa zona di miscela (4°-4.5° ASI) dove si avvia la combustione ha densità RICCA ($\phi = 2-6$), cioè significa che abbiamo 6 volte il combustibile che potrebbe essere ossidato con l'aria che c'è lì dentro. ⇒ COMBUSTIONE RICCA (noi sappiamo che il Diesel lavora con miscela povera tra l'altro).

Si vede che c'è una altissima ETEROGENEITÀ, perché siamo in un ambiente con eccessi o più localmente in punto zona F abbiamo una miscela così ricca che c'è più combustibile di quello che può essere ossidato, da 2 a 6 volte di più. Perché? Perché il tempo per arrivare a formarlo è poco in quanto abbiamo iniettato lo spray che si mescola con l'aria.

PUNTO J: si forma attorno allo SPRAY una fiamma DIFFUSIVA.

Perché si forma questa fiamma DIFFUSIVA?

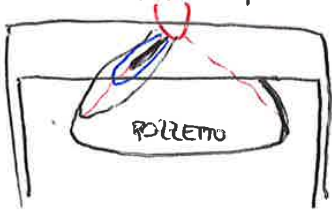
Tra i prodotti della combustione premiscelata abbiamo CO , C_1 , C_2 , C_3 che sono composti chimici che se mescolati con l' O_2 rilasciano energia chimica. Siccome la combustione avviene con $\phi = 1$ significa che ancora la combustione non ha rilasciato l'energia chimica. Come fa a rilasciare l'energia chimica se si trova all'interno della zona blu e l' O_2 non lo vede? Se non si ossida non può rilasciare energia chimica. Tra la zona blu e la zona bianca (dove c'è O_2) si può creare un MOTO DI DIFFUSIONE LOCALE e dunque i reagenti che sono separati diffondono nell'interfaccia che li separa.



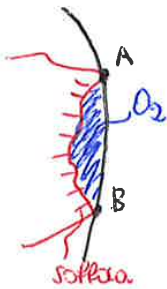
In questa interfaccia, per DIFFUSIONE l' O_2 che sta fuori e tutti i prodotti della combustione ricca che stanno dentro e che hanno ancora del potere calorifico residuo si mescolano e quindi nasce una FIAMMA DIFFUSIVA. Essa è caratterizzata da $\phi = 1$. \Rightarrow **COMBUSTIONE DIFFUSIVA**

Dal punto J in avanti la struttura del getto non cambia moltissimo: la parte interna continua ad ingrandirsi perché arriva altro combustibile in questo sto continuando ad iniettare e uscire quello che c'è all'interno si ossida di nuova massa che tra l'altro si espande perché del momento che da reagenti diventano prodotti aumentando le T diventa tutto più e questi più si espandono \Rightarrow il getto si ingrandisce. Inoltre varia la concentrazione di soot. Continuano i pelletti, e formansi particelle carboniose (a partire dai PAH) e queste sono più numerose con concentrazioni maggiori nella testa del getto perché c'è stato più tempo per formarsi e poi perché in quella zona ci sono T più alte perché c'è la fiamma diffusiva.

Se la fiamma diffusiva non si spegnesse mai si direbbe che tutte le particelle carboniose (soot) brucerebbero e si ossiderebbero e non avremmo soot allo scarico. Evidentemente non è così perché questa fiamma diffusiva si spegne perché il getto più tocca le pareti.



Nei motori Diesel abbiamo un **(BOUL) ricovero** nella camera di combustione. Questo getto ad un certo punto viene a contatto con la parete che succede? ~~si spegne~~ Si spegne!



Nei punti A e B si spegne per scambio termico. Nelle zone **BLU** c'è ossigeno ma non è infinito perché non è più a contatto con tutto il resto che c'è nelle camere di combustione perché è stato confinato dalla fiamma stessa \Rightarrow dunque c'è un quantitativo limitato di O_2 . Non appena questo O_2 viene consumato questo fiamma soffoca e quindi tutte le particelle dietro non si ossidano più e ne le ritirano allo scarico. (la fiamma si spegne prima di toccare la parete per soffocamento).

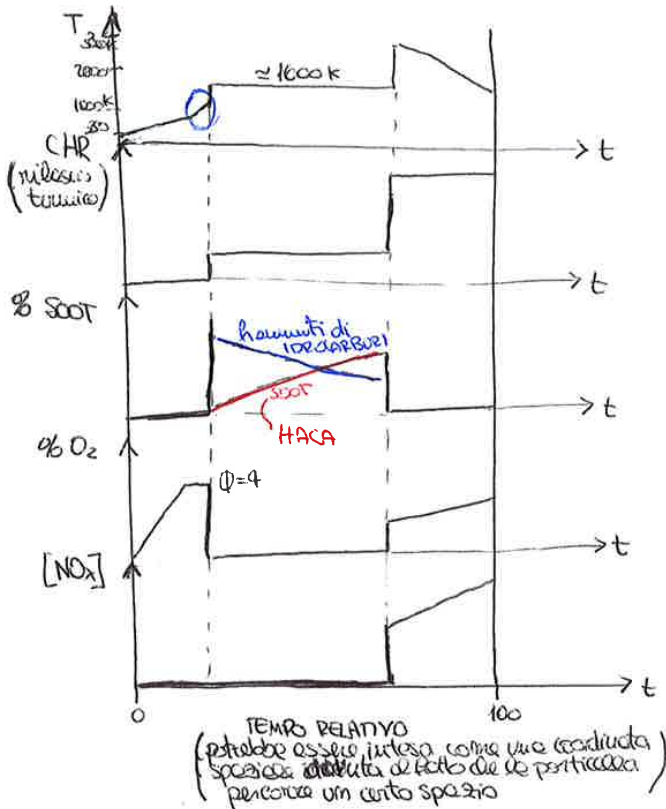
Un altro motivo ~~è~~ dato dal fatto che ho più pelletti e quindi più getti.



Si creano tre i getti delle zone in cui c'è poco O_2 e quindi in quelle zone la fiamma si spegne.

Quindi ci sono tutte una serie di fenomeni per cui queste particelle carboniose sopravvivono alle combustioni perché la fiamma può spegnersi prima. Però non è detto che tutte queste particelle carboniose arrivino allo scarico perché nei Diesel lavorano con miscela povera (meno di O_2) con O_2 che si muove in altre parti \rightarrow ci possono essere dei miscelamenti in camera che fanno ossidare queste particelle.

STORIA TEMPORALE DI UNA PARTICELLA DURANTE LA SUA EVOLUZIONE IN CAMERA DI COMBUSTIONE



Il getto entra in camera a 350-400K poiché il polverizzatore che è affacciato alla camera di combustione diventa caldo e quindi può scaldare il combustibile che sta all'interno del porzetto. Inoltre durante il processo di iniezione il fuel è soggetto ad una serie di trasformazioni che causano perdite di si invecchiamento in calore (dissipazioni). La T va aumentando ma aumenta anche la % di O_2 all'interno della particella. Quest'ultima nasce come combustibile e adesso in fiamma cioè grazie all'ATOMIZZAZIONE e quindi una volta che proseguono la particella ingloba O_2 e tende ad evaporare. La T aumenta perché il'aria che stiamo inglobando è calda ($T_{aria} \approx 950K$) poiché è stata compressa durante la fase di compressione che precede l'iniezione del fuel. La T sale fino a 1600K dovuto sia alla compressione che al mescolamento con l'aria. L' O_2 riesce fino ad un valore di $\Phi = 4$. Quando arriva a questo valore Φ rimane costante e quindi si forma il soot anche la $[CO_2]$ (grafico di Φ in funzione di x). L' O_2 rimane costante ma la T continua a salire (si crea O) perché è la fase in cui avvengono delle reazioni dove si formano i radicali e abbiamo emissione di una certa luminosità. \Rightarrow cambio di pendenza dovuto alle reazioni leggermente isotermiche. Il tratto verticale rappresenta il momento in cui avviene la combustione, quindi il rilascio di energia chimica (combustione che avviene con $\Phi = 4$ come premiscelata). Possiamo da 800-900K fino a 1600K dopo la combustione. Nei motori a benzina avevamo visto che non da

combustione avvenivano a 300K, qui arriviamo a 1600K perché è una combustione ricca con $\Phi = 4$, cioè non tutto il combustibile riesce a reagire con l' O_2 e quindi a liberare tutta l'energia chimica. Successivamente $T = \text{cost}$ per un lungo tratto corrispondente al periodo in cui la particella viaggia nel pericarico o prima di dare origine la COMBUST. PREMISCELATA fino alla zona dove avviene la COMBUST. DIFFUSIVA. Quest'ultima avviene dove c'è un ulteriore aumento di T che arriva fino a 2000K perché il fuel ha rilasciato tutto il suo potere calorifico. Successivamente la T diminuisce perché inizia la fase di espansione. Il fuel viene imiettato con un certo anticipo rispetto al PMS per il tempo necessario per percorrere tutto il pericarico la si ole quando la particella esce dal pericarico reagisce l'espansione è già iniziata quindi siamo in una fase in cui i volumi in camera tendono ad aumentare e dunque la T diminuisce.

Il **rilascio termico CHR** avviene in due fasi: durante la COMB. PREMISCELATA e durante la COMB. DIFFUSIVA. La maggior parte di energia chimica viene rilasciata durante la COMB. DIFFUSIVA e una parte più piccola viene rilasciata durante la COMB. PREMISCELATA. Però la proporzione non è sempre questa: si possono avere casi in cui abbiamo il 50 e 50 di energia rilasciata. Questo è quello che capita ad una particella!! Può essere che la particella si trova nella COMB. DIFFUSIVA e un'altra che arriva dopo si trova nella COMB. PREMISCELATA.

Durante questo processo si formano le particelle carbonose (**SOOT**) che sono uno dei componenti del PARTICOLATO. Il soot ha concentrazione nulla all'interno della zona di miscela, poi nasce una **LINEA ROSSA** quando superiamo la combust. PREMISCELATA. In questa zona abbiamo una serie di idrocarburi, tra cui PAH che sono i precursori di una combustione ricca e infatti O_2 è nulla. In queste condizioni: presenza di PAH, assenza di O_2 , alte $T = 1600K$ si immette un meccanismo che porta alla formazione di particelle carbonose \Rightarrow **MECCANISMO HACA**. Dunque il soot aumenta a spese di una riduzione di frammenti di idrocarburi **LIBERA**. Questa zona è piena di questi frammenti proprio perché la combustione è ricca, si immette questo fenomeno grazie ai PAH \rightarrow questo fenomeno HACA fa ridurre i frammenti. Durante la FIAMMA DIFFUSIVA la T aumenta (2000K), avviene un forte rilascio termico proprio a causa della COMB. DIFFUSIVA, la $[CO_2]$ aumenta perché in questa zona c'è la diffusione una soltanto del fuel ma anche dell' O_2 che sta all'esterno. Questi O_2 che si immettono fa ridurre il soot che si ossida e dunque la % di soot va a zero (se consideriamo una particella). In realtà tutto il soot dovrebbe ossidarsi ma ci possono essere dei fenomeni che portano allo spegnimento della fiamma e così tutto il soot riesce ad ossidarsi.

Gli NO_x si formano nella FIAMMA DIFFUSIVA in seguito ad alte T (2000K), e la $[CO_2]$ prossima allo stechiometrico e tempo a sufficienza. Si formano soprattutto grazie al meccanismo termico.

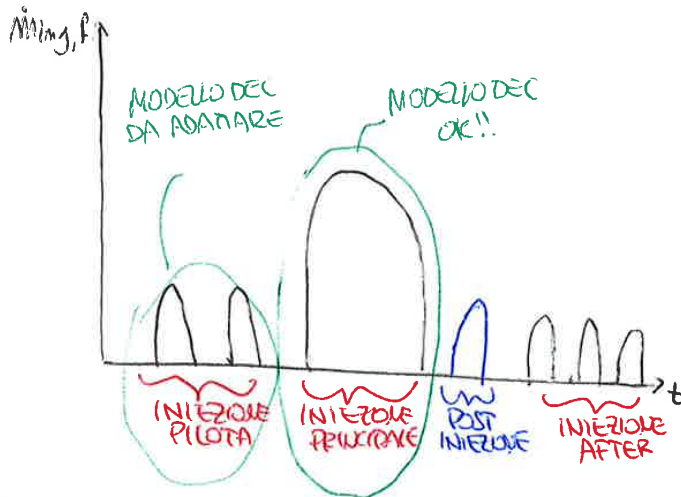
L' O_2 continua a salire anche dopo perché i prodotti della combustione vengono scaricati in un ambiente che contiene ancora O_2 e quindi ci può essere un riscaldamento tra gas combusti e O_2 anche dopo la fine della combustione. Questa $[CO_2]$ che sale influenza la formaz. di NO_x ma possono ancora ossidare HC e soot parzialmente \Rightarrow nel diagramma partecipa il fuel il soot si ossida tutto.

La particolarità di questo diagramma è che è **UNIVERSALE** perché generalmente la combustione nei Diesel sia qualitativamente che quantitativamente è tracciabile su questo diagramma. Si può usare un'equazione con il CFD. Si possono riportare i punti del prototipo di camera di combustione su questo diagramma, si fanno vedere e si vede le curve che si ottengono.

COMBUSTIONE PILOTA

Il modello di combustione di J. DEC è riferito alla combustione PRINCIPALE. Ovviamente ci stiamo occupando della combustione convenzionale e non ad esempio di quella HCCI.

Se, infatti, consideriamo LA LEGGE DI INIEZIONE in un motore Diesel (che riporta la portata di fuel iniettata m_{inj}, f in funzione del tempo t):

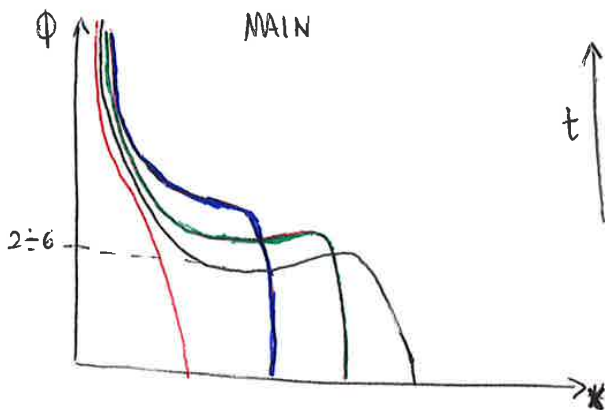


Oggi, i moderni COMMON RAIL possono avere all'incirca 9 impulsi (in figura ne abbiamo disegnati 7).

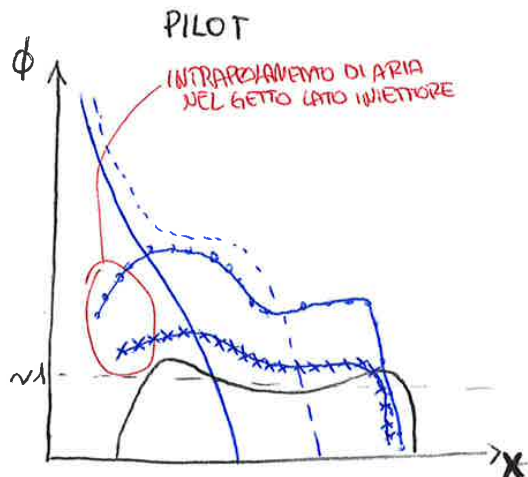
Questo modello vale per l'INIEZIONE PRINCIPALE anche se può essere adottato per l'INIEZIONE PILOTA.

Questo modello non può essere usato per la combustione HCCI dove si adottano altri modelli.

Riprendendo il diagramma di ϕ in funzione di x :



— SOC = START OF COMBUSTION
Le altre curve fanno riferimento a SOC che avviene prima della combustione.
— curva più accentuata
— un po' più accentuata
— più vicina all'inizio dell'iniezione
cioè queste curve fanno riferimento ai diversi istanti per quanto riguarda la distribuzione di $\phi-x$ nel getto.



— SOC dell'iniezione PILOTA
La pilota la inietta prima e poi ad un certo punto muore e muore prima della MAIN. Sono iniezioni diverse sia come aspetti di iniettore che come combustibile che brucia.
— — — — — } curve prima dello START OF COMBUSTION

Gli andamenti — e - - - sono simili ad — e — della MAIN. Le differenze stanno nelle curve $\times \times \times$ e $\bullet \bullet \bullet$ che portano la volubilità di ϕ . È invece d'altra differenza è che le curve della PILOTA sono intorno ad 1, quelle della MAIN intorno a $2/6$.

FORMAZIONE DEGLI NO_x nei motori CI

1

Immaginiamo tutti nei motori CI non possiamo più trascurare la quantità di NO_x che si forma. Abbiamo visto che nei motori SI la maggior parte di NO_x che si formavano era dovuta per il 99% agli NO e per 1% agli NO₂. Nei motori CI invece si ha 70% di NO e 30% di NO₂, cioè:

$$\frac{NO_2}{NO_x} = 10 \div 30\% \text{ nei CI} \quad ; \quad \frac{NO_2}{NO_x} = 1\% \text{ nei SI}$$

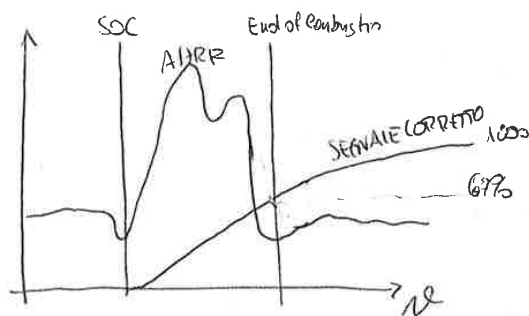
Nei motori CI, gli NO_x si formano nella COMBUSTIONE DIFFUSIVA, quindi ai bordi del getto, cioè della fiamma diffusiva. (Tranne nel caso di INIEZIONE PILOTA dove il tempo di accensione (IGNITION DELAY) della durata dell'iniezione, in questo caso si avrebbe solo COMBUSTIONE PREMISCIATA e quindi gli NO_x si formano qui).

Sperimentando sono stati fatti degli studi basati sulla diagnostica ottica del processo di combustione per mettere in evidenza il fatto che gli NO_x si formano proprio in corrispondenza della fiamma diffusiva.

Si usa un motore ottico e per evidenziare gli NO_x si usa una tecnica chiamata **NO PLIF** (Pump Laser Induced Fluorescence = fluorescenza indotta dalla luce laser). È una tecnica laser che si basa sulla fluorescenza indotta, cioè viene introdotto un raggio laser in camera di combustione sulla lunghezza d'onda specifica, cioè quella necessaria ad eccitare gli NO_x. Ogni molecola, a seconda della sua struttura avrà una sua lunghezza d'onda e se gli forniamo energia lungo quella lunghezza d'onda i suoi elettroni si eccitano e salgono ad un orbitale più elevato. Se interrompiamo il raggio laser questi elettroni tornano indietro emettendo un fotone. Si investe il periscopio con un raggio laser che eccita gli NO_x e misura i fotoni emessi dagli NO_x. Dove c'è il fotone c'è l'NO_x. Serve per andare a capire dove si trovano gli NO_x. Oltre a dare un'informazione qualitativa (dove c'è luce c'è NO_x) mi dà anche un'informaz. quantitativa, cioè quanti NO_x ci sono.

Con ELASTIC SCATTER investiamo il getto con un raggio laser greeno cioè che non ha la stessa frequenza (lung. d'onda) degli NO_x. ⇒ ci dà la posizione del getto.

Il NO PLIF ci dice dove sono gli NO_x. Combinando questi due metodi capiamo in quale parte del getto si formano gli NO_x. Gli NO_x si formano sui BORDI DEL GETTO.



La tecnica NO PLIF può essere influenzata dalla P e T che vanno ad incrementare la luminosità degli NO_x. Allora dopo un certo R segue che ci si possa capire quanti NO_x si formano ⇒ si usa il SEGNALE CORRETTO. Gli NO_x si formano all'inizio della fase di fiamma ma continuano a formarsi anche dopo la combustione. Si formano nei BORDI GAS della COMBUSTIONE DIFFUSIVA. Per effetto termico la formazione degli NO continua anche dopo la combustione perché i prodotti della combustione sono ad una T sufficientemente elevata e quindi il processo di formazione degli NO continua.

Il meccanismo principale di formazione è quello termico. Ad un certo livello però il meccanismo chimico di formazione degli NO si congelano perché interviene la cinetica chimica.

MECCANISMI DI FORMAZIONE DEGLI NO_x

- meccanismo termico
- meccanismo prompt

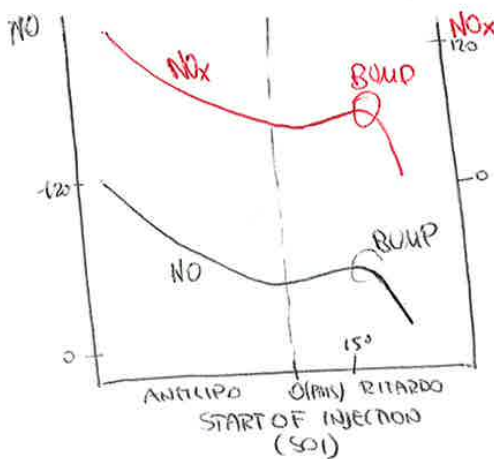
Uguale alla formazione degli NO_x nei SI

TUTTI I FENOMENI CHE VANNO A CAMBIARE LA TEMPERATURA POSSONO CAMBIARE LA FORMAZIONE DEGLI OSSIDI DI AZOTO.

Uno dei PARAMETRI PIÙ IMPORTANTI che va ad influenzare la T è proprio quanto combustibile si accumula e brucia subito nella fase della COMB. PREMISCEATA. Questo perché se paradossalmente metà del combustibile si accumulasse prima della fase di ACCIACCIONE prima della FASE PREMISCEATA e quel combustibile bruciasse tutto insieme avremmo un spronone picco di T ⇒ più formazione degli NO_x dopo.
 Invece, se avessimo poco accumulato (fase poco PREMISCEATA) all'inizio avremo T meno rilevanti e dunque meno ossidi di azoto dopo.

MAGGIORE È IL COMBUSTIBILE CHE SI ACCUMULA DURANTE IGNITION DELAY, MAGGIORE SONO GLI NO_x.

→ la COMB. PREMISCEATA contribuisce, quindi, indirettamente per la formazione degli NO_x.



È una curva che non è riferita ad unico punto di funzionamento del motore.

Rappresenta gli NO e gli NO_x che ottengo facendo funzionare il motore in diverse condiz. di funzionamento.

Abbiamo un andamento che scende poi risale per risalire di nuovo. Ovviamente il momento in cui avviene l'iniezione non coincide con il momento in cui avviene la combustione. La combustione inizia 4°-5° dopo il momento in cui inietta.

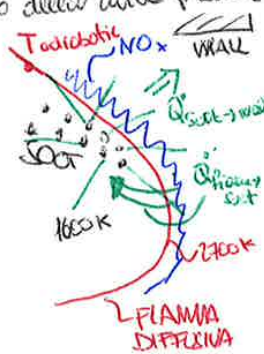
Se RITARDO L'INIEZIONE RITARDO LA COMBUSTIONE → e più ritardo e più la temperatura scende e quindi gli NO_x scendono. Però in un certo punto gli NO_x risalgono per poi ridiventare. Perché? cioè ritardando l'iniezione, ritardando la combustione, la T scende e gli NO dovrebbero scendere; in realtà prima scendono poi risalgono e poi riscendono di nuovo.

Una delle tecniche che viene utilizzata per ridurre gli NO_x è proprio quella di ritardare la combustione perché così la T scende e gli NO_x si riducono. Però così facendo però un po' in efficienza e inoltre se ritardando uno più particolato perché più ritardo più diventa difficile ossidarlo.

Se ho COMBUSTIONI MOLTO RITARDATE (10° ORO IL PIÙ) avremo che ho una risalita degli NO_x. Perché?

È molto difficile misurare la T in un motore direttamente, infatti, in genere la si stima. Si stima calcolando una T di fiamma adiabatica, cioè ho le condizioni in cui avviene la COME DIFFUSIVA, calcolo la T adiabatica corrispondente a quelle condizioni e quindi se ritardo il SOI la T adiabatica scende. In genere la T dei burnedges è pariente della T adiabatica fiamme, evidentemente, nelle zone in cui vi è la salita degli NO_x.

Questo giacchio della curva prende il nome di **BUMP**.



All'interno del getto abbiamo SOOT, però abbiamo la **FIAMMA DIFFUSIVA** ed ottengo si formano gli NO_x.

La T dove si formano gli NO_x non dipende dalla T adiabatica di fiamma ma dipende da altri fenomeni. Quali? Vediamone uno.

Le particelle carboniose (soot) sono calde. Queste particelle ad alte T si ossidano se c'è ossigeno ma siccome siamo all'interno del getto dove non c'è O₂ non si ossidano. Però le particelle di carbonio sono particelle solide e quindi se scaldate **IRRADIANO**.

(Le particelle di C emettono ad alte T, le particelle di C sono nere e i corpi) non si ossidano ma ad alte T emettono anche = **IRRADIANO**

I gas sono trasparenti alla radiazione quindi i soot irraggiano verso le PARETI della camera di combustione. Dunque vi è un flusso termico diretto verso le pareti $Q_{soot \rightarrow wall}$. La T a cui si formano gli NO_x dipenderà dalla T adiabatica e dal flusso $Q_{soot \rightarrow pareti}$. Se c'è questo flusso verso le pareti e i soot restano caldi allora ci sarà un flusso termico dalla fiamma verso le particelle $Q_{fiamma \rightarrow soot}$ perché gli calore va dalla fiamma più calda verso le particelle soot più fredde. Cosa succede se il soot non c'è più?

Sto ritardando la combustione che mi porta ad una riduzione degli NO_x, però ritardando la combustione avrà un effetto anche sul soot ⇒ cioè si forma anche meno soot.

FORMAZIONE DEGLI HC nei motori CI

1

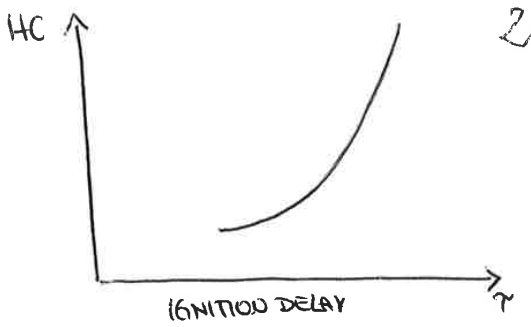
Generalità

Gli HC rappresentano gli IDROCARBURI INCOMBUSTI, ovvero sono dei composti organici che non prendono parte al processo di combustione. Dunque sono dovuti al fatto che la combustione è incompleta. Le emissioni di HC risultano essere più rilevanti nei motori CI rispetto ai motori SI. Infatti il gasolio è composto da idrocarburi più pesanti (presentano un peso molecolare elevato) rispetto agli idrocarburi che compongono la benzina. Questo comporta una più difficile miscelazione degli HC. Questa difficile miscelazione è legata ad alcuni problemi che si possono creare durante la miscela che avviene attraverso i FID.

- Un primo problema è dovuto al fatto che non possiamo realizzare dei condotti di collegamento tra motore e analizzatore troppo lunghi (in genere si usano lunghezze di 10m) perché altrimenti i pesi combustibili si raffreddano troppo durante il passaggio in questi condotti e permette la condensazione degli HC che si vanno a depositare lungo le pareti dei condotti e quindi non giungono all'analizzatore → falsifica la misura degli HC. Questo problema è presente anche nei benzina ma nei Diesel è più rilevante poiché gli HC sono più pesanti e dunque il fenomeno risulta accentratissimo. ⇒ la soluzione è quella di riscaldare (~190°) i condotti e il FID stesso (si parla di H-FID, ovvero Heated-FID).
- Un altro problema è che i motori Diesel producono particolato che potrebbe arrivare agli analizzatori e intorbidarli → per evitare ciò si usano dei FILTRI omettessi riscaldati. Questi FILTRI non servono per misurare il particolato!! Ma servono per separarlo in modo tale da far sì che non arrivi all'analizzatore e lo intorbidino.
- Un altro problema è dovuto al fatto che il particolato è anche costituito da particelle carboniose solide (SOOT) che hanno la capacità di assorbire composti organici come gli HC. E dunque questi HC non riescono più a misurarli. Per questo motivo poi verremmo misurati durante la misura del particolato nella cosiddetta FRAZIONE SOLUBILE (SOF) del particolato PM.

FORMAZIONE DEGLI HC

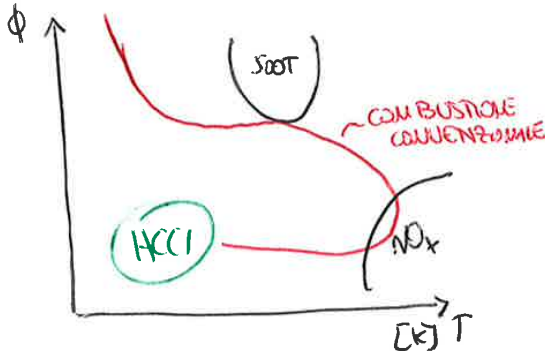
- 1) OVER MIXING / OVER LEANING → fenomeno principale
 - 2) UNDER MIXING / OVER RICH
 - 3) SPRAY IMPINGEMENT
 - 4) BULK QUENCHING
 - 5) OLIO LUBRIFICANTE
- } + diffusi



2) Man mano che il ritardo di accensione T aumenta, gli HC aumentano. Questo aumento, si può dimostrare, che è legato agli HC per OVERMIXING.

L'aumentare non è lineare. Questo perché i fenomeni usano con le temperature in modo non lineare. Ad esempio il tempo chimico dipende esponenzialmente con la T attraverso la legge di ARRHENIUS.

DIAGRAMMA DI KAMIMOTO-BAE



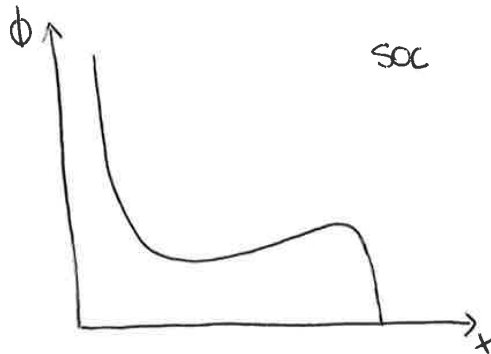
Quando realizziamo la combustione omogenea HCCI, dico della miscela tantissimo tempo per mescolarsi. Se dobbiamo realizzare una carica omogenea dobbiamo dare alla carica molto tempo per mescolarsi con l'aria il che vuol dire che anticipiamo di molto l'avvento di iniezione. Addirittura in certi casi lo si anticipa talmente che lo si fa all'esterno del motore in modo che il motore aspiri una carica già preformata. Cioè stiamo spingendo al limite il discorso dell'IGNITION DELAY. Sono tipi di combustioni dove τ è estremamente

lungo. Questo tipo di combustioni usano non permettono di formare SOOT e NOx però mi formano HC e CO. Qui il fenomeno di OVERMIXING diventa estremamente importante. Ci sono zone della carica che si mescolano troppi \rightarrow più HC

\Rightarrow spesso si parla di combustione di ALTA PREMISCEZZIONE, invece di HCCI perché HCCI è il caso limite a cui si tende ma non si riesce a realizzare perfettamente.

2) UNDER MIXING / OVER RICH (SOTTO MESCOLAMENTO)

Nella camera di combustione di un motore Diesel ci possono essere delle zone troppo ricche, quindi che si sono mescolate troppo poco con l'aria e dunque la combustione non avviene perché il combustibile non riesce ad avviare i processi di ossidazione in quanto non si riesce a mescolare con l'aria.

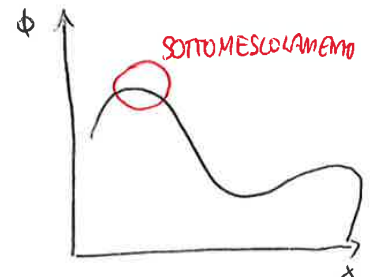
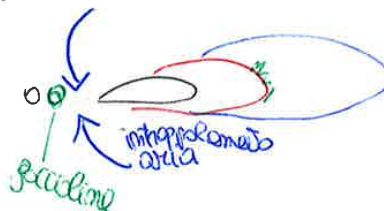
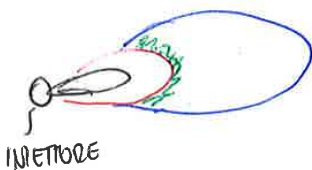


Per x bassi ho ϕ alti perché è una zona ricca; per x elevati invece ho ϕ bassi (ZONA POVERA). Nella zona con ϕ elevati (zona rossa) si potrebbe verificare UNDERMIXING ma non è detto!

La combustione dura $\approx 60^\circ$ e l'iniezione $10-15^\circ$ quindi nella SOC le particelle che stanno nella zona con ϕ alti che per il momento non possono bruciare perché sono in zone ricche, man mano che il processo di combustione continua si spostano progressivamente si spostano nella parte sottile del getto e possono bruciare. Quindi bisogna osservare la storia temporale della particella. Se la particella si trova in ϕ alti alla SOC non è detto che da UNDERMIXING non si sposta e brucia.

Quando l'iniezione si interrompe le particelle già iniettate non si fermano ma continuano a muoversi per la conservazione della quantità di moto.

GETTO LIQUIDO MISCELA COMBUSTIONE PREMISCEZZATA
FIAMMA DIFFUSA



Il fenomeno più importante è quello di OVERMIXING (SOVRAMESCOLAMENTO) soprattutto a corichi ³ parziali, ma a corichi alti può diventare anche molto importante il fenomeno dell'UNDERMIXING (SOTTOMESCOLAMENTO).
 Agli alti corichi la zona terminale dell'imiezione può essere importante e quindi posso essere importanti zone dove il fenomeno dell'undermixing è rilevante.

Nei motori Diesel il carico lo regoliamo variando il combustibile (solitamente il combustibile) quindi variando la dose, ma segue che a corichi parziali abbiamo dosature molto povere ma a corichi elevati possiamo avere a dosature molto ricche come che sono vicine allo stechiometrico e perché il motore Diesel è otticamente non omogeneo le zone del getto ricche con corichi elevati sono ancora più ricche ed ecco che il fenomeno dell'UNDERMIXING può diventare importante.

→ (SPENGIAMENTO DELLA MASSA)

4) **BULK QUENCHING** cioè il fatto che può essere uno spengimento in seno alle corici. Questo è vero, ma oggi nei moderni sistemi di combustione queste problematiche sono meno sentite.

Ritornando allo SPRAY IMPINGEMENT abbiamo altre cause oltre il variare della Temperatura (o motore freddo lo spray impinge e molto ristretto perché c'è più possibilità che il combustibile liquido arrivi a contatto con le pareti):

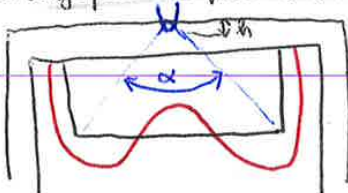
- **Diámetro dei fori.** All'aumentare di esso ~~può~~ aumentare la penetrazione ma non è un problema molto sentito oggi perché oggi si cerca di ridurre il diámetro dei fori.
 - **Pressione di iniezione.** Essa ha un effetto quasi trascurabile sulla penetrazione della fase liquida. Si potrebbe pensare che aumentando la pressione di iniezione aumenti la velocità del combustibile che mi permette di avere penetrazioni maggiori. In realtà però aumentando la velocità del combustibile, perché il combustibile trascina l'aria, aumenta anche la velocità dell'aria e quindi i due effetti si bilanciano. È vero che la pressione entra in gioco e quindi è vero che potrebbe penetrare di più ma è anche vero che l'aria anche più rapidamente e i due fenomeni si compensano.
- $$V = \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$
 Bernoulli:
- Aumentando la pressione di iniezione aumento il ΔP che fa aumentare la velocità del combustibile, ma il combustibile trascina l'aria e quindi aumento anche la velocità con cui l'aria viene intrappolata nella zona di miscela. ⇒ al crescere delle velocità la penetrazione non aumenta proporzionalmente.

- **posizione della parete** tradotta come distanza dal polverizzatore. Se riesco a tenere lontana la parete dalla penetrazione della fase liquida gli HC si riducono. La soluzione è fare la camera di combustione più grande.

FORMA DELLA CAMERA DI COMBUSTIONE

La cosa importante è la distanza tra iniettore e pareti per limitare lo SPRAY IMPINGEMENT quindi vorrei una camera più larga. Ma non posso farla grande all'infinito perché per mantenere il rapporto di compressione costante è devo ridurla in profondità.

La camera di combustione nei motori Diesel è un pozzetto (Bowl) ricavato sul ciletto dello stantuffo perché dobbiamo concentrare l'aria lì dove serve. La forma di questo pozzetto può essere diversa ma ovviamente deve essere il più largo possibile perché dobbiamo eliminare lo spray impingement e perché facendo largo l'aria e le due serve ^{PERCHÉ DEVO RACCOLGERE +}



Caricando il volume della camera di combustione equibio, il rapporto di compressione è quindi deve fare come diverse mantenendo $E = \text{cost}$.

La camera **ROSSA** è più larga e più profonda.

d = angolo di cono dello SPRAY (angolo tra due fori del polverizzatore)

h = protrusione, cioè sporgenza dell'iniettore in camera

Il polveramento degli assi del foro devono raggiungere le pareti ⇒ **TARGETING**.

Si fanno queste camere larghe e più profonde perché in questo modo l'aria si dove serve per il processo di combustione. Però questo vantaggio di portare l'aria dove serve si sentita di più a corichi elevati perché a corichi parziali siccome c'è pressione di iniezione inferiore la combustione avviene più lontana dalle pareti → c'è una cattiva utilizzazione dell'aria. Nei corichi parziali sarebbe meglio una camera meno perché la combustione può avvenire più lontana dagli iniettori, a corichi elevati sarebbe meglio la camera **ROSSA** e quindi si fa un compromesso per scegliere la forma della camera. ⇒ ad esempio faccio una camera che favorisca il funzionamento a **particolarmente** e a corichi parziali un aggiustato agendo sul sistema di iniezione.

Questi volti di squish si generano quando abbiamo un diverso rapporto di compressione, ovvero quando siamo in prossimità del PMS.

Quando lo stantuffo è quasi al PMS la distanza tra la testa dello stantuffo e la testa del motore è di pochi mm. Quindi questi effetti di SQUISH DIRETTO e INVERSO si sente nei 60° a cavallo del PMS quindi quando ancora lo stantuffo è scivolato quasi alla cima.

Si identifica una zona al di sopra dello stantuffo ed esterna al pozzetto che si chiama AREA DI SQUISH.

Lo squish genera energia cinetica all'interno della camera e questa energia cinetica ha due effetti:

- portata aria nella zona di combustione → trasporto di massa (probabilmente aria)
- genera turbolenza del flusso

L'effetto della turbolenza è sempre positivo.

L'effetto legato all'apporto di aria in genere è positivo ma si devono fare delle considerazioni.

Lo squish DIRETTO è positivo perché l'aria presente nell'area di squish viene fatta entrare all'interno del pozzetto dove avviene la combustione.

Lo squish INVERSO, invece, prende quello che c'è nel pozzetto e lo porta nell'area di squish. Può avere effetto positivo quando estraggono dal pozzetto cose che all'interno del pozzetto non si sarebbero ossidate e portandole nell'area di squish incontrano aria e si ossidano (ad esempio quando in seguito allo spegnimento della fiamma nelle zone o contorno delle parti si creano delle particelle carbonose ancora da ossidare); effetto negativo quando prendo all'interno del pozzetto qualcosa che le potrebbe ancora bruciare e lo porto nell'area di squish dove vi è aria fresca allora queste cose non bruciano più. Perché l'aria di squish è caratterizzata da T riferirsi perché non prende parte al processo di combustione e poi è circondata da pareti "fredde".

Faccendo le pareti della camera RIENTRANTE favorisco l'estrazione dello squish al momento giusto e coinvolgo i gas che hanno già partecipato al processo di combustione e non quelli che ancora devono partecipare. Quindi la camera RIENTRANTE serve per favorire lo squish-inverso. Altrimenti uso quella toroidale per favorire lo squish in generale.

In un motore Heavy-Duty abbiamo un vincolo geometrico che limita la turbolenza. La turbolenza la faccio generare dal getto. Inietto più combustibile e più a lungo.

In un motore Light-Duty posso contare poco sulla turbolenza generata dal getto perché ho iniezioni corte. Per questo motivo la turbolenza deve essere generata dalla camera.

Per iniezioni CONVENZIONALI (iniezioni prima del PMS) serve una camera RIENTRANTE non cambia molto più quanto riguarda la formazione di HC. Una camera più lunga ^{e meno profonda} riduce le formazioni di HC e questo per l'effetto positivo in caso di SPRAY IMPROVEMENT.

Per iniezioni RITARDATE la camera RIENTRANTE si comporta meglio. Perché nelle iniezioni ritardate una parte della combustione è ritardata e quindi durante lo squish inverso io prendo aria dal pozzetto durante il processo di combustione, ed è quando mi serve → per questo uso la camera RIENTRANTE.

Quindi le camere dei Diesel sono di difficile progettazione perché in base al parametro che voglio ottimizzare devo scegliere un'opportuna forma della camera.

Per esempio se ho un'iniezione anticipata per ridurre gli HC conviene utilizzare una camera toroidale ed è più lunga e meno profonda. Se ho un'iniezione ritardata conviene usare una camera rientrante per ridurre gli HC.

potrebbe misurare il particolato prima o dopo il max e si potrebbe pensare che il motore esista meno PM ma in realtà è stato diluito diversamente. Quindi la normativa per facilitare i confronti tra motori è necessario che le misure vengano prese nell'intervallo del MAX.

Quindi non solo il particolato è complesso come si forma ma anche come si misura. Oggi giorno la normativa prevede la misura della massa di PM e delle particelle. Non c'è bisogno di distinguere frazione solida da solubile ecc... => interessa solo la massa complessiva e il numero di particelle complessive.

FRAZIONE SOLIDA:

• PARTICELLE CARBONIOSE

La frazione solida è composta principalmente da carbonio elementare. Questo carbonio, non è chimicamente legato con altri elementi ed è responsabile del cosiddetto "FUMO NERO".

Queste particelle carboniose si formano nella zona premiscelata. Infatti i prodotti della combustione premiscelata sono rappresentati da PAH (poli aromatici) che vengono anche detti "SOOT PRECURSORS" perché da essi hanno origine le particelle carboniose. Ma le particelle carboniose si formano anche nella zona della fiamma diffusiva dove abbiamo miscela stochiometrica ed alte T → MECCANISMO INDIRECTO. Sulla fiamma diffusiva non si spegnesse mai si potrebbe ossidare tutto il soot presente nel perimetro, però ciò non accade e dunque vi sono particelle carboniose che sopravvivono e di queste che sopravvivono alcune si ossidano parzialmente in seguito, altre si accrescono perché su di esse si deposita una miscela di composti volatili.

Dunque il soot si forma:

- nella zona DIFFUSIVA per MECCANISMO INDIRECTO a alte T e con miscela stochiometrica
- nella zona PREMISCELATA per MECCANISMO DIRETTO a basse T e con miscela ricche.

Queste particelle inizialmente hanno delle strutture esagonali che si uniscono tra di loro dando luogo a piani paralleli. Successivamente degli strati di CRISTALLITE che si aggregano ancora per dare luogo a particelle più o meno sferiche → SOOT.

• CENERI (ASH)

Le ceneri sono un residuo solido incombustibile, cioè che non si brucia mai. SOSTANZE INCOMBUSTIBILI. Queste ceneri si possono formare in camera di combustione e nel collettore di scarico del motore.

Quelle che si formano in camera di combustione in genere derivano dalla presenza di additivi nell'olio lubrificante. Infatti l'olio lubrificante contiene sostanze chimiche come detergenti, dispersanti, anti-ossidanti che sono a base di metalli (zinco, magnesio) o solfati o fosfati o ossidi di calcio che non riescono a partecipare al processo di combustione perché incombustibili e ce ne ritroviamo come ceneri allo scarico e fanno parte della frazione solida.

Molte possono essere degli ossidi metallici che derivano dall'usura del motore e vengono trasportate in camera dello scarico.

Altre ceneri si formano nel collettore di scarico a causa della sua corrosione rilosando ossidi di ferro o ossidi metallici.

Altre ceneri si formano in seguito ad additivi nel combustibile. Oggi un problema legato al FILTRO-ANTI-PARTICOLATO è legato alla sua rigenerazione. Allo scarico di un motore diesel oggi troviamo il FILTRO-ANTI-PARTICOLATO che separa il PM. Quando il filtro è intasato bisogna togliere il PM e non potendo bruciare il filtro lo si rigenera, ovvero lo si fa bruciare (ossidare) con dei catalizzatori. Uno dei modi di introdurre il catalizzatore è mischiare il catalizzatore con il combustibile in modo tale che il catalizzatore omni all'interno del filtro. In questo modo il catalizzatore non può partecipare alla combustione (in quanto la defluizione di catalizzatore si deve catalizzare, cioè non si deve consumare durante la reazione di combustione) in quanto è qualcosa che non si ossida e lo ritroviamo allo scarico facilitando l'ossidazione del filtro antiparticolato però produce delle ceneri perché non brucia.

Le ceneri non si bruciano e prima o poi andranno ad intasare i filtri.

Dunque abbiamo 3 informazioni chiave:

- 1 Una volta raccolto il campione di PM la sua composizione può variare con la T
- 2 Per ossidare completamente il campione del PM ci vuole del tempo e mantenendolo ad una certa T.
- 3 Le ceneri non si bruciano mai.

La 1 è importante perché ci dice che è fondamentale dire come misuro il particolato => da qui nasce una **DEFINIZIONE OPERATIVA DI PARTICOLATO**:

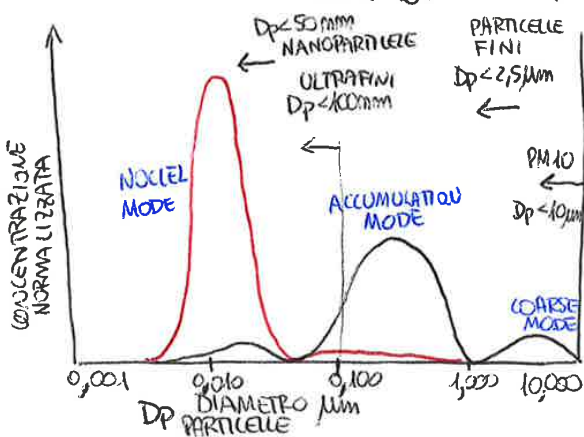
Dicesi particolato PM tutto ciò che viene raccolto allo scarico di un motore a combustione interna, disponendo allo scarico un filtro di campionamento mantenuto a 52°C. Quello che si deposita su quel filtro è particolato. Perché è importante specificare la temperatura di 52°C? Perché se la coppia si porta di cad. di funzionamento del motore cambia il quantitativo di PM che va a misurare perché qualcosa si è depositato o qualcosa è evaporato.

MISURA DEL PM allo scarico di un motore: si mette questo filtro che poi verrà messo da qualche parte che permette di contare il numero di particelle che contiene o cadendo a pesare. È importante quindi che quando prendo il filtro e lo sposto le condizioni rimangano invariate perché altrimenti raccolgo una cosa e me misuro un'altra.

NUCLEAZIONE, ACCUMULAZIONE E MODI GROSSI

DISTRIBUZIONE BIMODALE DELLA MASSA DELLE PARTICELLE IN FUNZIONE DEL DIAMETRO

Si parla di distribuzione bimodale perché i modi più importanti sono due: NUCLEI e ACCUMULATION



— DISTRIBUZIONE DEL NUMERO DI PARTICELLE
— DISTRIBUZIONE DELLA MASSA

Il grosso della massa è nell'ACCUMULATION MODE dove ci sono particelle con $D_p > 100 \text{ nm}$ e minori di $1 \mu\text{m}$. Se andassi a misurare solo la massa vedo a contenere le PARTICELLE FINI, però il mio motore magari emette tantissime NANOPARTICELLE e ULTRAFINI PARTICELLE che da un punto di vista della massa danno un piccolo contributo e quindi non lo misuro. Proprio per questo oggi si misura anche il numero di particelle e si vede che il maggior numero di particelle sono nel campo del NUCLEI MODE dove ho microparticelle.

Questi picchi corrispondono al fatto che queste particelle si formano secondo MODI DIVERSI:

• NUCLEI MODE

Le particelle sono formate in piccolissima parte da particelle carboniose circondate dai composti organici che sono stati assorbiti dalla particella solida. Ma la maggior parte sono particelle di SOF che si sono create per condensazione dello SOF => lo SOF si è condensato da solo essendo una gocciolina o se stante. Poi ho anche i solfati. Dove si formano queste particelle sono? Non durante il processo di combustione ma allo scarico dove la T sono particolarmente basse. Addirittura possono formarsi all'esterno. A volte questo NUCLEI MODE si genera nei sistemi di campionamento quando vedo a misurare. Quindi nella maggior parte dei casi queste particelle si formano allo scarico o all'esterno dove viene scaricato il particolato o nei sistemi di campionamento. Qualcuna di queste particelle (una polissima) si possono formare durante la combustione. Queste particelle sono molto instabili => basta che cambi la T ed esse possono evaporare o condensare => misurare molto delicata.

• ACCUMULATION MODE

Sono delle particelle fini ed in particolare sono tutte particelle carboniose, quindi che si generano durante il processo di combustione e su queste particelle durante lo scarico o dopo nell'ambiente si depositano i composti organici.

• COARSE MODE

Sono particelle inferiori ai $10 \mu\text{m}$ che non si formano durante la combustione ma si formano per usura, cioè particelle che si staccano dal motore o dai condotti di scarico. Sono delle particelle grandi ma sono poche e quindi incidono poco sia come massa che come numero di particelle.

Globalmente si formano composti aromatici con massa molecolare sempre più elevata e H/C decrescente, mediante un processo di crescita a catena che coinvolge i PAH più piccoli.

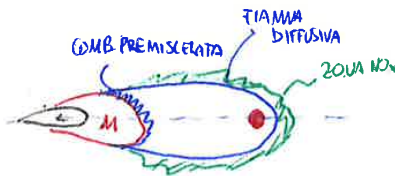
Questo meccanismo, quindi, rappresenta il meccanismo di nucleazione e di accrescimento delle particelle carbonose che avviene nella combustione premiscelata.

L'accrescimento avviene mediante l'aggiunta di anelli benzenici ai PAH.

Oltre a questo meccanismo DIRETTO vi è anche un **MECCANISMO INDIRETTO**.

Questo meccanismo avviene durante la combustione diffusiva, ad alte Temperature ed a miscela stechiometrica.

In queste condizioni non solo gli aromatici (formano SOOT mediante HACA) ma tutti gli idrocarburi e quindi anche gli ALIFATICI (olefini, alcheni, alchini) che sono composti + stabili. Questi in presenza di O ed ad alte T, le molecole si possono rompere per meccanismi come PIROLISI e CRACKING TERMICO dando luogo a dei frammenti CH_x , C_2H_x , C_3H_x dando luogo a dei meccanismi simili a quello HACA possono produrre SOOT (percorso più lento). Viene chiamato INDIRETTO perché passa prima dai frammenti. Questo meccanismo viene in corrispondenza della fiamma diffusiva.



Il meccanismo HACA si manifesta durante la combust. premiscelata, e quindi all'intorno della curva blu, quello indiretto nel combusto blu.

- Zona più ricca di SOOT perché quelli HACA si sono accresciuti e in corrispondenza della fiamma diffusiva avviene anche il meccanismo indiretto. → la fiamma diffusiva
- È nella zona intermedia il SOOT può essere dato per via del meccanismo indiretto.

Questo SOOT poi può ossidarsi ma non si ossiderà tutto perché la fiamma diffusiva può spegnersi. Parte del SOOT, quindi, sopravvive ed è soggetto a meccanismi di BURNOUT, che può avere ossidarsi in ceneri altrimenti va a finire allo scorie.

AGGLOMERAZIONE DELLE PARTICELLE

Queste particelle non sono solo ma si trovano con altre particelle e assieme a composti organici. Quindi possiamo avere meccanismi di NUCLEAZIONE E CRESCITA ma anche altri meccanismi come l'AGGLOMERAZIONE delle particelle, cioè una volta che queste particelle crescono con il meccanismo HACA possiamo avere collisioni tra particelle che formano o particelle più grandi e allora diminuzione del numero di particelle (due particelle si agglomerano e ne formano una grande).

Si possono distinguere tre tipi di agglomerazione:

- coagulazione
- aggregazione
- reazione con molecola gassosa

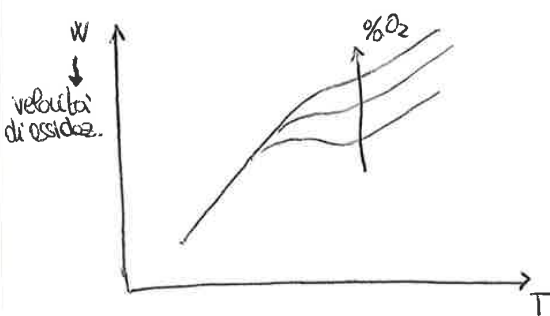
Con le prime due avviene solo la nucleazione con la quale le particelle si uniscono. Esse possono coagulare se possiedono una viscosità elevata, si aggregano per azioni elettrostatiche se le particelle hanno delle viscosità basse.

Reazione con molecola gassosa si ha quando la particella, siccome è un ambiente con tanti composti organici, può accrescere in seguito al fatto che a basse T questi composti organici possono condensare sulla particella solida che si accresce.

Con coagulazione e aggregazione il numero di particelle tende a diminuire, con reazione con molecola gassosa non è detto.

Esistono dei modelli semiempirici realizzati prendendo una serie di campioni di SCOT che si sono fatte ossidare in fiamme diffuse.

Questi modelli suggeriscono che la velocità di ossidazione dipende strettamente dalla temperatura ma anche dalla % di O_2 presente. La concettual. di O_2 è legata alle dosature locali.



A parità di T si nota che al crescere della % di O_2 aumenta la velocità di ossidazione.

A parità di % di O_2 al variare della T la velocità di ossidazione presenta un tratto crescente, poi decresce un po' per poi riprendere a crescere.

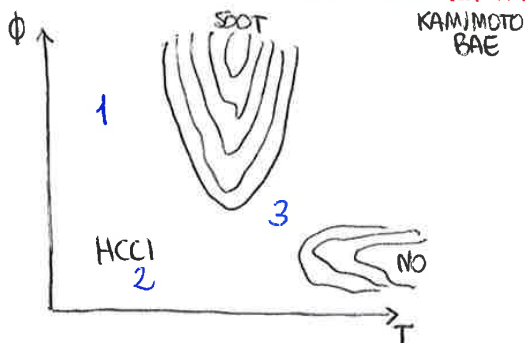
Questo andamento si spiega dal fatto che sulle particelle carboniose vi sono dei siti preferenziali in cui si depositano i radicali O per ossidare la particella di SCOT.

Fino ad una certa T questi siti hanno una certa struttura \rightarrow SITI ATTIVI A per cui la velocità di ossidazione cresce al crescere della T . Dopo questa T all'aumentare della T questi SITI ATTIVI A si trasformano diventando meno reattivi \rightarrow SITI B. Ovviamente la trasformazione da SITI A a SITI B è graduale, cioè non tutti questi siti A si trasformano tutti in una volta in siti B ma a poco a poco \rightarrow questo spiega il l'andamento un po' decrescente ad una certa T . All'aumentare della T i siti B diventano + reattivi, più risultano sempre meno reattivi di siti A.

FENOMENI FISICO-CHIMICI che influenzano la formazione del PM nei motori Diesel

- Fenomeni fisici dove intervengono i parametri di T e P
- Fenomeni chimici dove intervengono parametri come il rapporto di equivalenza ϕ e la composizione del combustibile

Effetti di T e ϕ sulla formazione del PM



Questo diagramma viene ricavato applicando dei modelli di simulazione molto dettagliati che simulano la combustione, la crescita dei PAH, la nucleazione, le reazioni superficiali, la condensazione ecc... Queste simulazioni vengono fatte facendo come (PESI):

- P = pressione
- T = temperatura
- t_r = tempo di reazione
- ϕ = rapporto di equivalenza
- Fuel

Per un certo fuel, per ogni ϕ ottengo un valore di T . Qual è l'effetto della P e del tempo di reazione t_r ?

EFFETTO DEL TEMPO DI REAZIONE t_r

t_r = è il tempo con la quale faccio cadere avanti un meccanismo chimico ad un certo ϕ e P .

Si osserva che all'aumentare del t_r la zona di formazione del PM si estende progressivamente verso valori di ϕ inferiori e verso T leggermente inferiori. Questo fino ad un certo valore di t_r , dopo questo valore le cose cambiano poco.

Il t_r rappresentativo delle condiz. di funzionamento di un motore Diesel è di circa 1 ms; al di sotto di questo valore la variazione di formazione del SCOT è rilevante, al di sopra la variazione è molto contenuta.

Molti per questi diagrammi si fissa un $t_r = 1$ ms.

EFFETTO DELLA PRESSIONE

stesso discorso. Valore fisso di $P = 60$ bar

Neque nei diagrammi, P e t_r non influenzano molto rispetto alle altre variabili e quindi vengono fissati.

Si fissa anche il combustibile che è il gasolio e si prende un surrogato del fuel: esano, perché altrimenti per ogni riorientamento dovrei ripetere le simulazioni del modello.

Il diagramma di KAMIMOTO BAE, fissato un fuel e un diagramma universale perché si scelgono in modo opportuno la pressione e il tempo di reazione. In genere $P = 60$ bar e $t_r = 1$ ms

CONTESTO NORMATIVO

Introduzione

L'introduzione di normative, che oggi diventano sempre più stringenti, è dovuta ad una serie di motivi:

- migliorare la qualità dell'aria
- ridurre le emissioni di CO₂, che è un gas serra responsabile del riscaldamento globale
- ridurre il consumo di petrolio, che è elevato soprattutto nel settore dei trasporti, e in particolare nel settore dei trasporti su strada
- incentivare l'uso di combustibili alternativi e quindi il ricorso a risorse rinnovabili.

Quindi in seguito al fatto che negli anni si è assistito ad un incremento sempre maggiore di veicoli, soprattutto nelle aree principali fortemente sviluppate (USA, Europa, Giappone) ha portato ad alcune conseguenze come inquinamento a livello locale e globale e danni anche per la salute dell'uomo.

Vi sono diversi contesti normativi, che dipendono da:

- TIPOLOGIA DI VEICOLO (veicoli leggeri, veicoli pesanti, off-road, veicoli a 2 ruote) perché ovviamente ogni veicolo ha una missione differente
- NAZIONI poiché in ogni nazione che uno stile di guida differente, ovvero un diverso modo di guidare.

Quindi è stato necessario introdurre delle procedure di prova, attraverso dei cicli omologativi, per ridurre i livelli di inquinamento dei veicoli a motore (ICE).

Con questi cicli omologativi si è cercato di riprodurre in maniera statistica le condizioni di guida reali, ovvero le condizioni più frequenti di utilizzo di un propulsore a seconda della sua applicazione. Quindi questi cicli omologativi dipendono dai veicoli e dalle usanze, poiché ogni nazione usa un suo ciclo omologativo che più rappresenta il più fedelmente possibile le condizioni di guida più frequenti nella loro nazione.

Inoltre in queste normative è necessario introdurre i sistemi ^{di campionamento*} e gli strumenti che vengono utilizzati per misurare con accuratezza e precisione la quantità di inquinanti emessi.

* cioè come misurare questi inquinanti: se prezzi, se diluite ecc.. Questo perché la misura effettuata in laboratorio diversi deve dare gli stessi risultati.

Questi limiti vengono velutati su un ciclo guida.

2

Per analizzare il veicolo, esso viene messo in un banco a rulli. Questi rulli sono responsabili per trasmettere alle ruote una resistenza, in modo tale che il veicolo realizzi una certa missione. I gas di scarico delle vetture vengono raccolti e diluiti in sacchi. Alla fine del ciclo-guida questi sacchi vengono analizzati per capire quanti grammi di un certo inquinante sono presenti. Dunque ho una massa totale e dividendo per i Km percorsi del ciclo tengo i g/Km.

L'analizzatore mi dà la misura in ppm che poi ottengo dei veicoli viene trasportato in massa e dividendo per i Km si tengono le emissioni in g/Km.

Perché le emissioni vengono raccolte nei sacchi?

Perché non misuro direttamente i gas allo scarico? Perché se misurassi i gas allo scarico in tempo reale che in funzione della velocità e del carico motore la portata di gas di scarico cambia e quindi dove misurare non solo le concentrazioni ma anche la portata dei gas di scarico se voglio le emissioni in massa. Così ho le emissioni in massa istantanea, che devo integrare per avere le emissioni complessive \rightarrow misura possibile ma è soggetta ad errori.

Con i sacchi misuro una portata complessiva che è più facile misurare rispetto a quella istantanea. La diluizione viene fatta per evitare la condensa dell'acqua all'interno dei gas di scarico e lo spegnimento della fiamma con se gli inquinanti, dunque misuro meno inquinanti di quelli che il motore emette. Devo mettere un certo quantitativo di acqua tale per cui evito la condensa, quindi devo scegliere un giusto rapp. di diluizione. Se non diluisco con l'acqua i gas di scarico nel sacco si raffreddano e con questo raffreddamento il vapore condensa e condensando porta con se gli inquinanti.

Per garantire un certo rapporto di diluizione si usa un sistema (DVS) \rightarrow tipo di ventura critica che un permette di mantenere costante la portata di gas di scarico e di acqua rendendo costante il rapporto di diluizione.

Ventilatore di raffreddamento a cosa serve? Siccome la vettura è ferma mancano le flussi di aria fresca, che in condizioni normali, arrivano al radiatore. Il ventilatore non serve a creare la resistenza aerodinamica che invece viene simulata tramite i rulli. I rulli simulano la resistenza al rotolamento, la resistenza aerodinamica, e le perdite di inerzia legate alle accelerazioni e decelerazioni che dipendono fondamentalmente dalla massa del veicolo. La velocità del flusso d'aria del ventilatore non sarà costante ma dipenderà dalla velocità del guidatore.

All'interno del veicolo vi è un guidatore che deve fare ~~il ciclo~~ seguire al veicolo la missione di riferimento che è rappresentato dal ciclo **NEDC (New European Driving Cycle)**.

Questo ciclo si compone di due parti:

- PARTE URBANA (Ciclo ELE)
Sostituito da 4 cicli elementari, cioè un ciclo elementare che viene ripetuto 4 volte
- PARTE EXTRAURBANA (EUDC)
Sostituito da un ciclo che rappresenta le guide extraurbane.

Questo ciclo è costituito da parti a velocità costante raccomandate con fasi di minimo (cioè veicolo fermo).

REAL DRIVE EMISSION (RDE)

3

Ciclo guida vs realtà:

- banco a ruota produce resistenza all'acceleramento quando è in piano → nella realtà il veicolo può fare delle salite
- Nel ciclo guida abbiamo un solo passeggero e il bagagliaio è vuoto → nella realtà ci sono + passeggeri e il bagagliaio può essere pieno
- accelerazione e la velocità ^{max} non è detto che siano quelle del ciclo guida ⇒ possiamo accelerare di più per emergenze o sorpasso
- nel ciclo guida l'ovvio avviene a 20°C e non ho problemi di clima rigido → nella realtà il veicolo può trovarsi in un clima rigido e dunque per dar iniettori + combustibile perché il combustibile evapora con + difficoltà, di quanto abbiamo punti + fresche → dunque consumo di più e più emissioni.
- nel ciclo guida non ho eccessi: climatizzatori (condizionatore o riscaldamento)
Soprattutto nel veicolo elettrico che per riscaldare il veicolo non può sfruttare l'energia termica del veicolo ma deve consumare energia elettrica dalle batterie.

Per risolvere il problema si installano nelle vetture dei dispositivi portatili per la misura delle emissioni inquinanti, le cosiddette PMS. In questo modo posso valutare cosa la vettura emette anche in condizioni di guida reali. Si deve rispettare un certo ~~prezzo~~ ^{prezzo}.

Qual è il limite emissivo a cui si fa riferimento?

$$RDE = CF \times EURO 6$$

↳ ~~fattore~~ ^{fattore} di conformità

(CF=1 significa che ciclo RDE e NEDC coincidono e non può essere. Si cerca quindi prima modo di ridurre questo CF.

Quindi il costruttore sviluppa con il ciclo NEDC e poi si deve fare la valutazione con RDE. Però questa suddivisione deve farlo prima dell'omologazione perché non puoi fare il ciclo NEDC e sperare che rientri anche nell'RDE. Dunque i costruttori hanno dei cicli reali propri con i quali riproducono un RDE. E quindi così verifica il rientro all'interno di questi fattori CF.

DURABILITY

È chiaro al fatto che sto testando il veicolo come nuovo, però poi il veicolo invecchia e quindi le emissioni inquinanti ~~deteriorano~~ ^{deteriorano} nel tempo → la normativa deve tenere conto di ciò.

Cioè oltre ad esserci dei limiti sulle emissioni inquinanti per i veicoli nuovi che devono essere rispettati; questi limiti devono essere rispettati anche dai veicoli vecchi.

Un motore più vecchio, più inquinante e + consuma.

Per tenere conto del veicolo che è invecchiato si fa riferimento alla cosiddetta **fattore di deterioramento che è maggiore di uno.**

Quindi per rispettare le emissioni anche dopo un certo tempo (dei vari km) deve anche essere il veicolo con dei limiti che tengono conto di questo fattore. Deve moltiplicare i limiti del veicolo nuovo per questo ~~fattore~~ ^{fattore} e deve ottenere un valore che rientra all'interno di un range che si è convenuto!

Più è grande il fattore di deterioramento peggio è → LIMITE + RESTRITTIVO

Esempio:

Ciclo guida NEDC veicolo nuovo → misuriamo NO_x da moltiplicarlo per il fattore di deterioramento → questo valore deve essere inferiore al valore di legge.

CONTESTO USA

4

In questo caso non si parla di EURO 1, 2... ma di TIER 1, TIER 2, Oggi si è introdotto il TIER 3
I limiti si distinguono solo in base alla taglia espressa in litri (1 lb = 0,5 kg).

Nel contesto USA i limiti di emissione si applicano a tutti i veicoli a prescindere dal
combustibile che utilizzano. Cioè abbiamo gli stessi limiti normativi sia per Diesel che per
benzina. Negli USA si usano principalmente auto a benzina, derivante dal fatto che la benzina
costa meno. Cioè a parità negli USA una stessa pentolaccia del Diesel nei mercati USA.

All'interno dei TIER si hanno 8 categorie, chiamate BIN (cose contenitori), all'interno del quale
un costruttore decide di sviluppare il veicolo. Cioè il costruttore può sviluppare il veicolo in qualsiasi
contenitore. Però c'è un vincolo: la flotta media per ogni singolo costruttore deve rispettare un
limite di NOx di 0,07 ^{g/miglio} cioè quello del contenitore 5. Ovvero la media delle emissioni della
sua intera flotta non deve superare il BIN 5.

Inoltre da normative USA usano i NMOC cioè HC non metanici, quindi distinguono gli HC in
metanici e non metanici. C'è anche un limite super oleosio (HCHO).

CICLO OMOLOGATIVO USA: FTP-75 (Federal Procedure Test)

È un ciclo reale, cioè non è artificiale ma viene rilevato su strada. Cioè viene fatto sempre nel
banco a ruoli solo che la traccia l'ho presa misurando la traccia reale di una vettura, a cui
ho fatto percorrere una missione tipo.

È costituito da 3 fasi:

- 1 FASE DI PARTENZA A FREDDO (20") → si raggiungono velocità max di 90 km/h
- 2 FASE DI STABILIZZAZIONE
- 3 HOT SOAK
- 4 HOT START TRANSIENT PHASE (FASE DI PARTENZA A CALDO)

Si parte a freddo (20°C) per 505 secondi e si fa una certa missione. → 1ª FASE

Successivamente si entra nella FASE STABILIZZATA, stabilizzata perché si presuppone che dopo la
1ª fase il motore ha raggiunto il regime tecnico. Questa fase è rappresentativa di un ciclo di guida
urbano.

Successivamente FASE 3, il veicolo viene arrestato per un tempo di 15 minuti.

Successivamente inizia la FASE 4 che è una nuova fase di partenza a caldo.

Questo è il ciclo di guida che si pensa che è più rappresentativo di un veicolo negli USA.

Le emissioni di ogni fase vengono raccolte in sacchi separati e poi vengono sommate e mediate
con dei fattori di peso diverse per ogni fase. Quindi prima di fare la somma si considerano dei
fattori peso. Ogni fase viene moltiplicata per un fattore di peso diverso.

Questo ciclo dura 31 minuti.

In sintesi: questo ciclo consiste di due prove di cui una a freddo e una a caldo, con un
transitorio e una sosta a caldo. È un ciclo molto + aggressivo dell'NEDC.

Presente velocità max di 60 miglia all'ora (= 90 km/h) e accelerazioni più aggressive con
corichi più alti.

CICLO WLTP (o WLTC) → durata = 30 minuti, distanza = 23 km 5

Nessuno dei cicli che abbiamo visto (NEDC, FTP-75) è in grado di rappresentare bene le condizioni di guida reale. Nasce l'esigenza di un ciclo UNIVERSALE. Questo perché i costruttori hanno un mercato globale e devo fare riferimento a cicli diversi.

Questo ciclo è costituito da 4 parti. In questo ciclo vengono riportate le velocità e le accelerazioni in funzione del tempo.

Si osserva che è un ciclo molto più aggressivo (si vede dalle accelerazioni).

- 1 ciclo LOW a basse velocità → urbano
- 2 ciclo MIDDLE a medie velocità } alto consumo
- 3 ciclo HIGH ad alte velocità } autostrada
- 4 ciclo EXTRAHIGH a velocità medie e alte

Come si fa a capire con quale di questi cicli ^{WLTP} il veicolo verrà omologato? Il veicolo viene diviso in 3 classi a seconda del PMR (Power to Mass Ratio).

$$PMR = \frac{\text{Rated Power [W]}}{\text{Curb Mass [kg]}} \rightarrow \text{potenza max del motore} \rightarrow \text{masse della vettura}$$

Per $PMR > 34 \frac{W}{kg}$ per questo tipo di vettura la normativa richiede di utilizzare il ciclo WLTP completo (Low, Middle, High, Extra-High)

↓
Veicoli di classe 3 (Europa, USA...)

Invece in altre aree geografiche (India, Giappone, Corea) dove le vetture sono molto potenti rispetto a quelle vendute in UE, si utilizzano solo alcune fasi di questo ciclo:

CLASSE 2: $34 > PMR > 22$ ciclo WLTP (Low, Middle, High)

CLASSE 1: $PMR \leq 22$

ciclo WLTP (Low, Middle) → ad esempio sul mercato indiano si cambia ed utilizza esclusivamente la fase LOW e MIDDLE per l'omologazione delle loro vetture.

Esempio PANDA: $PMR = 50 > 34$ cioè la PANDA rientra nella classe 3. Quindi le classi individuiamo i PAESI!!

Questo ciclo rispetto al NEDC ha:

- più durata: 23 km _{del ciclo}

- durata degli STOP uguali a quelli del NEDC però su un ciclo + lungo → START e STOP meno influente nel WLTP.

- velocità + alte

- accelerazioni + alte
- assenza (quasi) di fasi in stazionamento (velocità costante)

Ciclo + aggressivo con meno fermate.

Nei ciclo NEDC impone un profilo di cambio marcia che è fisso per qualunque vettura.

Nei ciclo WLTP richiede che il cambio marcia venga definito sulle base delle caratteristiche della vettura. Il cambio marcia è deciso in base al punto funzionario motore.

I produttori possono introdurre delle tecnologie che portano al risparmio di CO₂ che però non è misurabile nel ciclo NEDC, come per esempio i freni a LED. Questi sono sconti durante il ciclo NEDC, che quindi non ne tiene conto. **⇒ ECO-INNOVATION**

In questo caso i produttori possono avere varie agevolazioni in termini di emissioni di CO₂ che al max può essere 7 g di CO₂/km in media per ogni produttore.

Altre agevolazioni: POLINA, deroga per produttori di camion che usano di nuovo vetture pesanti.

• VETCOLI COMMERCIALI LEGGERI

Entrate in vigore nel 2016.

Target di 175 g di CO₂/km entro il 2017

CONTESTO USA

Vi sono due normative in parallelo: **FUEL ECONOMY**

- CAFE riguarda il consumo di carburante, invece che quella CO₂ che è quasi uguale (ciò sono legati)
- limiti sui gas serra

CAFE

Questa normativa impone a ciascun costruttore di poter rispettare uno standard in quanto riguarda la FUEL ECONOMY mediata sulle vendite della sua flotta di auto veicoli.

Questi limiti vengono misurati sul ciclo FTP-75 e HWFET.

Sono emissioni in km/litri (in realtà miglia per gallone)

LIMITI DEI GAS SERRA

Le emissioni si testano su due cicli: FTP-75 e HWFET

Se non si rispettano ci sono delle multe.

TEST CYCLES: ETC (European Transient Cycle)

È un ciclo in transitorio che rappresenta diverse condizioni di guida. È costituito da 3 parti:

- zona urbana → vel. max = sostanzialmente con frequenti accelerazioni e arresti e funzionamenti a minimo
- zona rurale (extra-urbana) → accelerazione rapida
- zona in autostrada

Per ognuna di queste parti del ciclo abbiamo una certa traccia di velocità in funzione del tempo e una traccia della coppia in funzione del tempo.
Una delimitazione 18005 = 30 minuti

CICLO CATALOGICO WHSC (World Harmonized Stationary Cycle) → eseguito su un motore con ~~dinamometro~~ DINAMOMETRO

Oggi viene utilizzato questo. È un ciclo ^{simile} a quello a 13 modi. Soltanto che in quello a 13 modi la misura veniva fatta in ciascun modo e poi il risultato finale era la media pesata di ciascun modo. Qui la misurazione parte all'inizio e si ferma alla fine. È un ciclo stazionario dove però ~~passaggio~~ ^{passaggio} transitorio da passaggio da un modo all'altro.

WHTC

È un ciclo in transitorio simile all'altro in transitorio (ETC) con tracce di velocità in funzione del tempo e di coppia in funzione del tempo.

CONTESTO USA

Differenze per quanto riguarda i limiti normativi e per quanto riguarda i cicli catalogici.

Il ciclo di riferimento è il ciclo FTP-transient HD ed è un ciclo dinamometrico per motori.

Poi si usa anche un ciclo in stazionario come il SET (Supplemental Emission Test) più un test NTE (Not-to-Exceed).

SET: è un ciclo stazionario che prevede un certo numero di modi. È un ciclo rampato simile a quelli europei.

NTE: è un test in cui nella zona dei punti motori si identifica un'area di controllo, in cui il personale addetto alle verifiche può chiedere o dei punti in stazionario o in transitorio. Serve per rendere più complesso degli accorgimenti tali da rilevare il fatto che si sta eseguendo il ciclo catalogico. Il limite da rispettare è più lasco.

TARGET EMISSIVI IN DIFFERENTI PAESI

Ci sono dei paesi che ancora sono indietro con i target emissivi. Alcuni nel 200 erano ancora all'EURO 1. Questo ci fa capire che ancora si possono commercializzare dei veicoli in altre parti del mondo che oggi non si possono più commercializzare in Europa. Non è detto, quindi, che tutto quello che produciamo oggi deve essere EURO 6.

MOTORI NON ROAD (il contesto americano ed europeo sono molto simili)

In Europa ci sono degli stadi normativi che si differenziano sia per il limite normativo sia per il tipo di veicoli.

MONOLITE

Esso deve avere:

- **RESISTENZA AD ALTE TEMPERATURE** (1200°C) infatti nel catalizzatore si opera a T elevate e quindi si deve fare in modo che le monolite non si sciolgano.
- **RESISTENZA AGLI SHOCK TERMICI** infatti nel catalizzatore si hanno significative variazioni di T nel tempo e nello spazio (vi sono dei gradienti spaziali termici dovute alle reazioni esotermiche che avvengono nel catalizzatore).
- **RESISTENZA ALLA CORROSIONE** in quanto vi è la presenza di gas corrosivi come le vapori d'acqua e acido T, o agenti aggressivi che derivano dagli HC del combustibile e del lubrificante, e dall'erosività delle correnti fluidiche.
- **RESISTENZA ALLE SOLLECITAZIONI MECCANICHE** e urtazioni che possono essere indotte.

Un materiale in grado di rispondere bene a queste esigenze è un materiale CERAMICO chiamato

CORDIERITE. Esso, infatti, presenta un punto di fusione elevato 1300°C ed è in grado di resistere a T elevate. Possiede un ridotto coeff. di dilatazione termica che lo rende adatto ad resistere ai gradienti termici. Inoltre ha una densità bassa e quindi una massa ridotta che gli permette di avere una buona resistenza alle vibrazioni. Inoltre ha una buona resistenza alla corrosione e una soddisfacente resistenza meccanica. Esso viene posizionato il più vicino possibile allo scorcio, dove vi sono elevate T, per raggiungere in breve la TEMPERATURA DI LIGHT-OFF e per avere anche di più una maggiore resistenza meccanica ad elevate T a' usura dei monoliti in LEGHE METALLICHE. In genere questi tipi di monoliti vengono usati dove sono aumentate le prestazioni \rightarrow VEICOLI SPORTIVI. I monoliti possono essere realizzati con ridotti spessori di parete per ridurre i tempi di Light-Off (dovuto alla bassa densità).

Il monolite è contenuto in un involucro metallico. Esso è a diretto contatto con il metallo se ha un supporto metallico. Se il monolite è di tipo ceramico viene interposto uno strato di Vermiculite che funge da antivibrante e isolante termico e di tenuta per i gas di scarico.

CARRIER

È una sostanza altamente porosa e frastagliata. È costituito da γ -allumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) che presenta una superficie specifica maggiore e dunque l'accoppiamento monolite e carrier mi permette di avere una superficie maggiore di scambio.

Nel carrier è anche presente ossido di CERIO che è in grado di immagazzinare e trasferire ossigeno ma agisce anche come stabilizzatore ad alte T per la γ -Allumina.

Inoltre si usano altri stabilizzatori di superficie in quanto che ad alte T e per riuscire meglio la γ -Allumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) degrada in α -allumina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) che presenta una superficie specifica molto inferiore.

METALLI NOBILI

Vengono utilizzati solitamente PALLADIO (Pd), PLATINO (Pt), RODIO (Rh). Pd e Pt per l'ossidazione di HC e CO, e Rh per la riduzione degli NO_x (solo nel catalizzatore a 3 vie si ha pure il Rh).

Questi metalli sono molto costosi ma nelle auto vetture ho problemi di ingombro e volume e conviene utilizzare questi.

È stata dimostrata l'efficacia di un'opportuna combinazione di Pt/Pd/Rh (**EFFETTO MIX**) che permette:

- ottimizzare l'efficienza del catalizzatore a regime
- ridurre la T di LIGHT-OFF
- ridurre il decadimento dell'efficienza con invecchiamento

si deve trovare un compromesso per avere un mix ottimale che mi permette di rispettare questi punti. e quantità del mix dipende dalle esigenze e dai prezzi di Pt, Pd e Rh. Ovviamente non è detto che si deve il giusto mix del dosatore le quantità di tutti i componenti.

Questi fenomeni (turbolenze, diffusioni, fenomeni chimici) devono avvenire tutti assieme altrimenti non avviene la conversione.

Unicamente poi formano i prodotti che devono tornare indietro e lo fanno con il processo inverso.

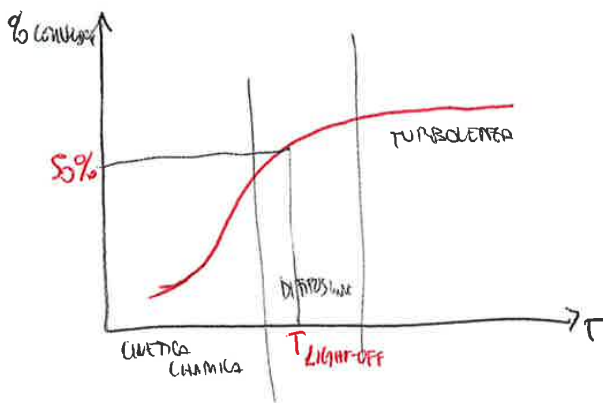
In funzione delle condizioni operative può succedere che uno di questi fenomeni sia dominante \Rightarrow si ha il cosiddetto fenomeno controllante.

Un parametro operativo è la temperatura T infatti in funzione delle condizioni di funzionamento varia la temperatura del gas di scarico può cambiare.

- Il trasporto turbolento non dipende dalla T
- Il trasporto diffusivo in strato laminare } dipendano dalla T in modo intermedio
- Diffusione nei pori del washcoat } \rightarrow dipendenza pressoché lineare
- reazioni chimiche dipendono esponenzialmente dalla T con la legge di Arrhenius

Alle basse T il fenomeno chimico è la cinetica chimica, poiché alle basse T il trasporto turbolento non dipende dalla T , quelli diffusivi dipendono poco dalla T , ed è in modo lineare, invece le reazioni chimiche dipendono esponenzialmente.

Efficienza catalizzatore



Alle basse T è controllante la cinetica chimica, alle T intermedie sono controllanti i fenomeni diffusivi che dipendono linearmente dalla T . Alle alte T il fenomeno controllante è la turbolenza.

Quando dobbiamo progettare un convertitore catalitico dobbiamo targettare:

- la massima efficienza \rightarrow per farlo uno dei principali parametri su cui dobbiamo agire è la turbolenza
- la T a cui si raggiunge la ~~MAX~~ efficienza \rightarrow perché se la max efficienza si raggiunge a 2000 K non ci interessa molto perché con i gas di scarico non ci lavoriamo mai a 2000 K.

È difficile con questo ^{ad S} curve stabilire la T a cui si avrà la max efficienza allora si definisce la **TEMPERATURA DI LIGHT-OFF**, ovvero la temperatura a cui l'efficienza di conversione vale il 50%.

Si cerca di ridurre la T di light-off al modo di raggiungerla prima.

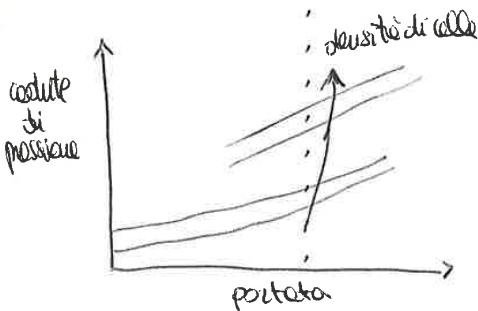
CADUTA DI PRESSIONE NEL MONOLITA

Quando introduciamo un convertitore catalitico sul motore introduciamo un'ostacolo allo scarico quindi cambia la contropressione. La contropressione allo scarico del motore influenza in modo importante il funzionamento del motore stesso, in particolare ne può ridurre le prestazioni e in particolare ridurre l'efficienza.

La caduta di pressione attraverso il monolita dovuta al passaggio dei gas di scarico provoca una perdita di potenza da parte del motore.

Dunque sarebbe interessante avere cadute di pressione, le più ridotte possibili.

All'aumentare della portata le cadute di pressione aumentano:



molte dipendono anche dalla densità di celle.

Se da un lato per migliorare le prestazioni del catalizzatore (efficienza) in termini di capacità di catalizzazione sarebbe interessante avere tante celle (o un elevata densità di celle) e anche uno da dell'altro lato aumentando la densità delle celle vedo ad aumentare la contropressione allo scarico (cadute di pressione).

=> devo trovare un compromesso

In fatti fissata la dimensione e faccio più celle (aumenta la superficie) però faccio più porosi (perché ho più celle) e dunque altri canali di passaggio più piccoli e maggiore resistenza (passo una pressione più piccola).

$$\frac{dp}{dz} = -f \frac{2fv^2}{jd}$$

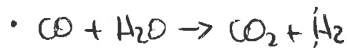
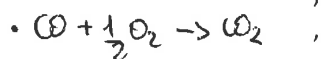
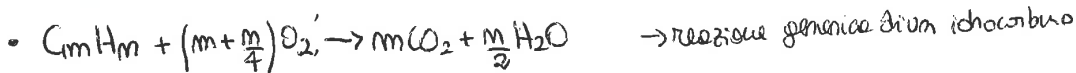
PER STIMARE LE CADUTE DI PRESSIONE

f = coeff. di dritto di Fanning che dipende dal regime di turbolenza o laminare.
 d = diametro del canale

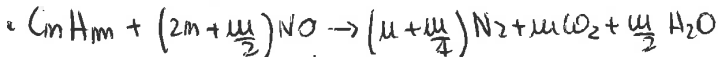
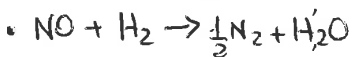
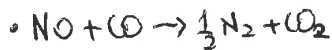
in regime turbolento f è costante all'inverso.

CATALIZZATORE A TRE VIE

• REAZIONI DI OSSIDAZIONE



• REAZIONI DI RIDUZIONE



Le reazioni di RIDUZIONE avvengono meglio nel RICCO perché nel povero dove c'è un eccesso di ossigeno CO e H₂ vanno a reagire con O₂ piuttosto che con NO.

Le reazioni di OSSIDAZIONE avvengono più facilmente nel POVERO perché mi serve l'O₂ che nel ricco non c'è.

Quello che vorrei fare è togliere l'O₂ da NO_x e donarlo a CO e HC in modo da ottenere il più possibile CO₂ e H₂O che sono i prodotti di una combustione perfetta (ideale).

Quindi si vede in qualche modo risolvere il problema del deterioramento del catalizzatore dovuto al fatto che l'evoluzione tecnologica ha fatto sì che il catalizzatore sia soggetto a le variazioni sugli inquinanti

- T più elevate
- ambiente più ossidante per un certo tempo (ambiente povero)

Ma il catalizzatore può essere soggetto anche ad AVVELENAMENTO.

DETERIORAMENTO ed AVVELENAMENTO DEL CATALIZZATORE

- Catalizzatore esposto ad elevate T
- ambiente povero (ambiente altamente ossidante, cioè povero di ossigeno) } deterioramento
- avvelenamento, dovuto alla ~~presenza~~ presenza di specie chimiche presenti nei gas di scarico che ottengono il catalizzatore.

Di conseguenza i fenomeni di DISATTIVAZIONE del catalizzatore si riconducono a due cause:

- 1 ELEVATA TEMPERATURA
- 2 AVVELENAMENTO

1 ELEVATA TEMPERATURA

- L'elevata esposizione del catalizzatore a Temperature da un lato provoca l'aumento di mobilità dei reagenti perché se alte T favoriscono la velocità di reazione, dall'altro lato può portare alla COALESCENZA dei metalli nobili, ovvero questi metalli nobili formano grani più grandi che portano a diminuire la superficie attiva di scambio.

⇒ SOLUZIONE: si usano dei stabilizzanti come l'ossido di cerio CeO_2 che riducono la mobilità superficiale dei metalli nobili.

- Le elevate T agiscono anche sul $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, provocando la graduale occlusione dei micro-pori del supporto. Con l'occlusione dei pori si verifica l'accesso degli inquinanti ai siti attivi.

Al limite per stabilizzamento ad alte T si possono avere dei cambiamenti di fase. ⇒ si passa dalla δ -allumina allo α -allumina con riduzione della superficie attiva.

⇒ SOLUZIONE: uso dei stabilizzanti come BaO (ossido di bario) che ritardano i cambiamenti di fase.

- Ad alte T e in ambienti ossidanti si può avere un'interazione tra le specie chimiche e il carrier che può portare alla disattivazione del Rh. Cioè il Rh può reagire con la γ -allumina e creare un elemento più o meno proprietà catalitiche. ⇒ SOLUZIONE: si usano dei carrier meno reattivi

Inoltre ad alte T e nel povero il nodio Rh può reagire con il cerio CeO_2 (che ha anche un'attività di stoccaggio, cioè regola il tenore di O_2 nei gas di scarico del motore) e ridurre l'attività del CeO_2 e del Rh → meno efficienza nella riduzione degli NO_x .

⇒ SOLUZIONE: Washcoat viene redistribuito a strati multiple in modo da tenere separati Rh e Ce che si trovano in siti differenti.

FUNZIONI DEL CERIO:

• STABILIZZANTE

• STOCCAGGIO: regola il tenore di O_2 :

se ho poco O_2 (nel ricco) facilita la riduzione e non l'ossidazione più utilizzando il cerio esso mi restituisce O_2

e ho molto O_2 facilita l'ossidazione e non la riduzione. Ma il cerio mi stocka l' O_2 .

CONTROLLO DEL TITOLO

6

È interessante che il catalizzatore funzioni in una finestra di funzionamento più o meno stretta, nell'intervallo dello stochiometrico.

Per fare ciò, non posso usare un sistema ad anello aperto (è difficile) ma si utilizza un sistema ad anello chiuso: combinazione di anello aperto con retroazione. C'è infatti un certo quantitativo di combustibile rispetto la quantità di ossigeno iniettata e la centralina lo calcola con un algoritmo ma dopodiché ha bisogno di un sistema in retroazione che corregga questo sistema.

La centralina registra una certa quantità d'ossigeno e decide sulla base di un suo modello quanto combustibile deve iniettare e poi ha bisogno di un sensore che mi dice ciò che realmente sono riuscito a fare. Successivamente questo sensore mi dà l'input per correggere quello comando.

Funzionamento ad anello chiuso:

La centralina invia una certa quantità di combustibile da iniettare; successivamente vi è un sensore **EGO (Exhaust Gas Oxygen)** che effettua una misura allo scarico che invia ad un controllore (che può essere INTEGRATIVO, PROPORZIONALE o PROPORZIONALE-INTEGRATIVO) che invia un segnale per modificare la quantità di combustibile iniettata.

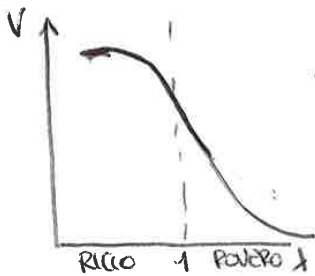
Unicamente dal momento in cui invio un comando e dal momento in cui il sensore percepisce questo comando ci sarà un **RITARDO**. Questo ritardo è dovuto al fatto che io inietto nel collettore di aspirazione e questo darà il risultato allo scarico dopo un certo motore (ovvero perzione di ciclo) perché devo completare l'aspirazione, la compressione ecc. e poi i gas arrivano allo scarico.

Anche questo sensore avrà un suo ritardo (tempo di risposta). Il ritardo che c'è tra il momento che inietto il combustibile al momento che il gas arriva allo scarico è facilmente stimabile perché è legato alle condizioni di funzionamento motore.

Il ritardo del sensore è un problema di chi costruisce il sensore. È interessante sapere come funziona il **CONTROLLORE LAMBDA**.

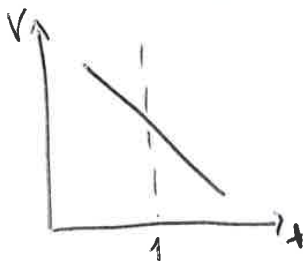
SENSORE EGO O SONDA LAMBDA

→ tensione



Questo sensore mi darà un segnale in tensione elevato se sono nel ricco, un segnale basso di tensione se mi trovo nel povero. Data la sua caratteristica di funzionamento si capisce che questo sensore è in grado di discriminare soltanto se stiamo lavorando nel campo del ricco o del povero, però non mi permette di capire quanto sono nel ricco o nel povero. È come se fosse un segnale a gradino. È un sensore di tipo ON-OFF → cioè mi dice se sono nel ricco o nel povero.

SENSORE UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen)

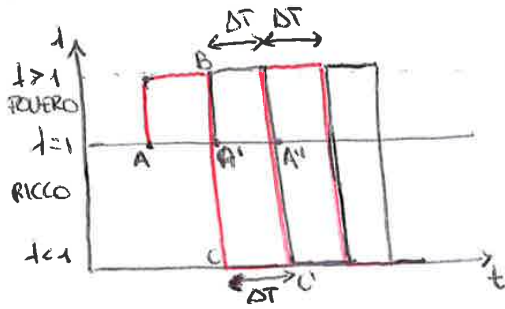


Esiste questo sensore molto più preciso che restituisce un segnale in tensione proporzionale alla dosatura. Questo sensore è molto più costoso e non può essere utilizzato nei motori. In molti viene usato in celle a bruci.

Quindi non si mette per motivi di costi.

CONTROLLORE PROPORZIONALE

Esso, anziché apportare piccole correzioni nel tempo, apponta subito un'unica correzione e vede cosa succede.



- dosatura scorda - dosatura camera

Quando sono in A vale il comando precedente che mi porta in B. La scorda si accorge che sono in A solo in A', cioè dopo un Δt . Intanto da A scordo a B con la curva. Una volta arrivato in B il sensore si accorge che sono nel povero e effettua una correzione immediata e fa iniettore di più \rightarrow quindi da B scordo a A' ma il sensore si accorge che sono in A' con la curva solo quando il sensore arriva a A'. Nel frattempo la curva scende fino a C e C'. Quando arriva a C' il sensore è arrivato in A'' e dunque si accorge (dopo un Δt) che deve iniettore di meno e quindi invia il comando per iniettore di meno e dunque da C' la curva va in A''.

Anche questo è un funzionamento a CICLO LIMITE però:

$$PERIODO = 2 \Delta t$$

Dunque il periodo di oscillazione è dimezzato.

Avendo dimezzato il Δt posso avere una risposta più pronta e quindi posso avere dei dimpi più piccoli: $Dim p = K_p \cdot \Delta t = \frac{1}{2 \Delta t} \Delta t = \frac{1}{2 K_p}$

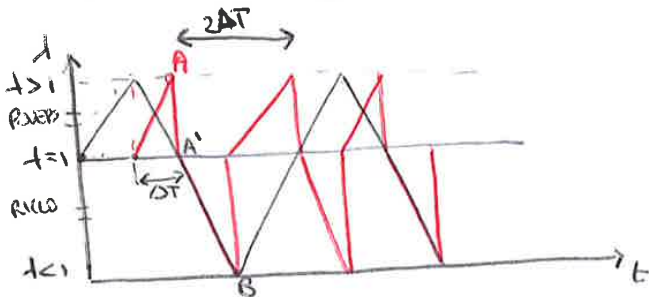
Il vantaggio è che ha una frequenza di oscillazione migliore.

Lo svantaggio è se ho una correzione superiore del valore per cui il controllore è stato progettato non riesce più a riportare la dosatura nel range previsto. Ovvero se si esce dal campo $\pm \Delta t$ che noi abbiamo fissato, il controllore non riesce più a riportare la dosatura nel range previsto.

CONTROLLORE PROPORZIONALE-INTEGRATIVO

Utile per risolvere i problemi del controllore proporzionale e quelli del controllore integrativo.

$$Dim p(t) = K_p e(t) + \int_0^t K_i e(\tau) d\tau$$



- controllore integrativo (I)

- controllore proporzionale-integrativo (P-I)

Immaginiamo che ci troviamo muovendo da A a B, cioè nel povero. Il controllore P-I se me accorge con un ritardo in A. Dunque accorgendosi di ciò il controllore manda ad iniettore più combustibile.

Immaginiamo di essere in A e supponiamo che questo è quello che c'è in camera (cioè povero). Il sistema di controllo si accorge di essere nel povero, supponiamo in A, cioè in questo momento. In questo momento si accorge di quello che è capitato un Δt prima \rightarrow quindi in A si sta accorgendo che c'è una transiz. verso il povero e quindi arricchisce. Come arricchisce? Prima in modo proporzionale A \rightarrow A', poi continua con un controllore integrativo A' \rightarrow B. Il sistema si accorge di essere arrivato nello stadiometrico A' soltanto in B e in questo periodo l'integrativo va da A' a B. In B si accorge della transizione verso il ricco e quindi lavora prima con il proporzionale e poi con l'integrativo.

Si immagina un ciclo LIMITE che ha un periodo di $2 \Delta t$, cioè di quello che avviene subito con un controllore proporzionale, una conserva le caratteristiche dell'integrativo. Abbino i vantaggi del controllore proporzionale e di quello integrativo. Quindi è caratterizzata dalla prontezza tipica del proporzionale, ma segue l'errore con le caratteristiche di un integrativo.

Il controllore ha due parametri che devono essere impostati: K_p e K_i che sono legati tra loro.

$$K_p = K_i \frac{\Delta t}{2} = \frac{Dim p}{2}$$

SISTEMI OBD per la diagnostica dell'impianto catalitico

Si è visto che con il tempo il catalizzatore si va a deteriorare. Per tenere sotto controllo il deterioramento del catalizzatore si usano i sistemi OBD. Essi servono per controllare il corretto funzionamento del catalizzatore e in caso di guasto segnalare all'utente. Questo OBD deve monitorare l'efficienza del catalizzatore.

Per fare ciò si usano due sonde lambda: una a monte del catalizzatore, ovvero allo scorcio del motore che serve per il controllo motore; un'altra sonda viene montata a valle del catalizzatore che ha il compito di effettuare la misura.

Quando il catalizzatore funziona correttamente si ha che la sonda a valle misura un'oscillazione più piccola. Questo perché quando il catalizzatore funziona correttamente quando siamo nel povero usa l'eccesso di O_2 per ossidare CO e HC e quando siamo nel ricco riduce gli NO_x producendo un gas a valle del catalizzatore che è il prodotto di una combustione completa stechiometrica. Quindi questo gas (prodotto da una combustione completa) non varia, idealmente, nessuna oscillazione \rightarrow il sensore a valle darà misure di valore sempre costante \rightarrow il risultato non è proprio costante.

Se il catalizzatore non funziona ^{o non c'è} succede che le due sonde mi danno due oscillazioni sovrapposte.
 * a valle del catalizzatore sono sostanze tipiche della combustione stechiometrica.

Quindi: FIGURE

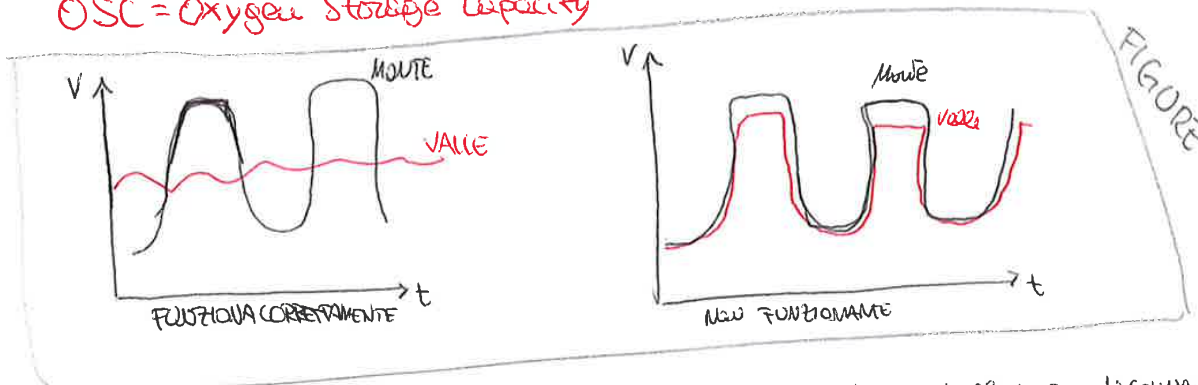
- Se il catalizzatore funziona correttamente il sensore a monte registra un'oscillazione che è quella detta dal sistema di controllo; il sensore a valle misura un'oscillazione, che in seguito all'effetto mediato del catalizzatore di completamente della combustione, ~~che~~ che ~~è~~ è perfettamente sulle stechiometriche. \Rightarrow cioè ~~la~~ ~~valore~~ non ha nessuna oscillazione ~~piccola~~ ~~oscillazione~~ intorno allo stechiometrico.
- Se il catalizzatore non funziona (efficienza zero) allora le due sonde misurano delle oscillazioni che sono uguali e quasi sovrapposte.

Al ridursi dell'efficienza del catalizzatore a fronte di un'oscillazione pari a monte, l'oscillazione a valle va a crescere.

Da un punto di vista fisico se un catalizzatore ha una bassa efficienza di conversione degli HC significa che gli HC non vengono ossidati e non vengono ossidati perché probabilmente il catalizzatore non riesce a utilizzare il giusto quantitativo di ossigeno.

Dunque si può stimare la capacità del catalizzatore di stoccare l'ossigeno \Rightarrow OSC

OSC = Oxygen Storage Capacity



La capacità di stoccare ossigeno del catalizzatore è legata all'efficienza di conversione del catalizzatore. Questo vale sperimentalmente. Al diminuire di OSC diminuisce l'efficienza del catalizzatore.

SISTEMI POST-TRATTAMENTO NEI MOTORI AD ACCENSIONE PER COMPRESSIONE

Nei motori CI abbiamo vari sistemi di trattamento delle emissioni allo scoppio, al coartamento dei motori si deve avere soltanto il CATALIZZATORE A TRE VIE.

- CATALIZZATORE OSSIDANTE (DOC) che si occupa di ossidare HC e CO
- CATALIZZATORE RIDUCENTE che si occupa di ridurre gli NOx
- FILTRI PER IL PARTICOLATO

Per i motori CI le emissioni allo scoppio più significative sono quelle del particolato PM → proprio per questo nei CI abbiamo bisogno di un filtro antiparticolato; e quelle di ossidi di NOx. L'altra differenza che alla presenza di un filtro per il particolato è la presenza di due tipi di catalizzatori: uno ossidante e uno riducente. Nei motori si utilizzavano un solo catalizzatore, quello a 3 vie, sia per ossidare HC e CO che per ridurre gli NOx.

Nei motori si si lavora soprattutto con miscele povere (magne) che non consente l'utilizzo del TWC (catalizzatore a 3 vie) che risulterebbe inefficace per la riduzione degli NOx. (devo togliere l'O₂ agli NOx ma coi CI mi trovo in un ambiente ricco di O₂ → concettualmente non funziona).

CATALIZZATORE OSSIDANTE (DOC = Diesel Oxidation Catalyst)

Strutturalmente è identico ad un catalizzatore a 3 vie, avere possiedono un supporto strutturato usualmente di materiale ceramico al cui interno abbiamo dei canali su cui viene depositato il CARRIER (γ-Alumina) dove si trovano i metalli nobili. Carrier + metalli nobili = WASH COAT

La differenza sta nei metalli nobili. Nei catalizzatori a 3 vie avevamo Pt, Pd e Rh, nei DOC abbiamo soltanto Pt e Pd perché Rh non è presente in quanto il DOC non riduce gli NOx ma ossida HC e CO. Per questo Pt e Pd sono in proporzioni diverse rispetto alle proporzioni che avevamo nel TWC perché nei DOC non si ossida solo HC e CO ma anche la SOF, che sono dei composti organici che fanno parte del particolato.

Altra differenza è la composizione di HC poiché nei motori CI abbiamo un combustibile costituito da idrocarburi più pesanti → HC più pesanti → questo fa sì che la composizione di Pt e Pd è diversa nei Diesel.

Un altro problema è legato alla presenza di zolfo nel combustibile dei Diesel. Lo zolfo, presente nel combustibile, quando attraversa il catalizzatore ossidante DOC si ossida. Lo zolfo ossidandosi produce ossidi di zolfo, che in presenza di acqua danno acido solforico che possono reagire e dare dei SOLFATI, che fa parte del particolato. Quindi dobbiamo avere che il DOC ossida SOLFATI quindi deve essere più efficiente a ossidare HC e CO e meno efficiente ad ossidare zolfo perché altrimenti produciamo solfati, cioè particolato. Questo problema dei solfati era più rilevante quando non esisteva il filtro antiparticolato (cioè fino agli EURO 4) perché tutto quello che fuoriusciva dal DOC andava nell'ambiente. A partire dagli EURO 5 è stato introdotto il filtro ANTIPARTICOLATO e questo problema è meno rilevante, cioè può essere più rilassato.

L'ossidazione della SOF e del zolfo. Più non tanto, perché più particolato si forma più in fretta si intasa il filtro.

Quindi l'unica differenza con il TWC sta nella diversa composizione di Pt e Pd che dipende adesso da:

- HC + pesanti ; • presenza di zolfo → formazione di solfati



FILTRO PER IL PARTICOLATO (DPF = Diesel Particulate Filter)

2

È un imbraccio metalceramico con all'interno dei canali. Quindi molto simile ai catalizzatori. La differenza è che le DOC e TWC hanno un supporto strutturato che presenta dei canali passanti, nel filtro antiparticolato i canali sono ciechi alternativamente. Il fluido arriva da un canale ma non può uscire dallo stesso canale che è tappato, ma esce dal successivo. Dunque il setto che separa i canali deve essere poroso. I gas passano attraverso questi setti porosi, la cui porosità deve essere controllata in modo da trattenere le particelle. Ciò non è banale perché le particelle del PM hanno dei diametri inferiori ai 10 μm ma a volte anche dell'ordine di qualche nanometro. La porosità deve porci fa sì che le particelle più grandi vengano trattenate (queste carboniose). Potrebbe essere comunque riesca a passare coi gas di scarico.

La separazione delle particelle dai gas di scarico avviene durante il passaggio dei gas attraverso la barriera ceramica porosa (setto poroso). Il filtraggio può avvenire secondo due meccanismi:

- A) Meccanismo a letto profondo (DEEP-BED)
- B) Meccanismo di filtraggio a torta (filtra a separazione superficiale)

A) I gas pieni di particolato fluiscono attraverso il setto poroso, entrano in profondità nel setto poroso e le particelle si attaccano alle parti più profonde del setto poroso per effetto di interazioni elettrostatiche e fluidodinamiche. Questo può avere saturazione del setto poroso e sotto le particelle.

B) si depositano nella superficie esterna andando a formare degli strati di torta a spessore via via crescente che contribuisce al filtraggio. \rightarrow FILTRAGGIO MECCANICO

Oppure ci possono essere delle particelle grosse che non riescono ad entrare nel setto poroso e si depositano in superficie formando uno a meno uno strato di PM (una torta di PM) all'ingresso che contribuisce al filtraggio. Perché queste particelle depositate all'ingresso impediscono alle successive di passare.

Quando i filtri sono puliti (cioè all'inizio) iniziano a funzionare con il meccanismo A, ma poi da subito inizia a funzionare il meccanismo B. Quindi entrambi i meccanismi ci sono contemporaneamente.

Ad un certo punto però il filtro si intasa. Cioè in lungo andare, per effetto della deposizione di particelle di PM nel filtro aumentano le resistenze fluidodinamiche al passaggio dei gas e dunque aumenta la caduta di pressione Δp attraverso i canali. L'aumento della Δp allo scarico di un motore è un problema perché comporta una perdita di efficienza perché fa una maggiore compressione del miscelato. Nel caso limite potrebbe accadere che queste contropressioni potrebbero aumentare al punto tale da scappare il filtro.

Dunque quando il filtro si intasa, devo sudare però non posso smontare il filtro, l'unica cosa che posso fare è la RIGENERAZIONE DEL FILTRO, cioè devo pulire il filtro in modo anche "trasparente" nei confronti del guidatore che non deve accorgersene.

Rigenerare il filtro significa ossidare il PM che si è depositato. Per ossidare il PM serve:

- energia per innescare il processo di ossidazione, che fornisce sotto forma di calore
- agenti ossidanti come l' O_2 e l' NO_2 .

Il primo agente ossidante che ci viene in mente è l' O_2 che mi conviene perché sono in un motore Diesel dove si lavora con miscela povera (ricca di O_2). Il problema è che l' O_2 è che per poter ossidare completamente il PM si deve arrivare a T elevate (650°C) e cioè devo fornire molta energia (cioè molto calore) per far partire l'ossidazione. Una volta che inizio a quella T il processo di ossidazione è esotermico (produce energia) però per farlo partire devo spendere qualcosa. Un modo è quello di poter iniettare nel combustibile nel collettore di scarico

Il DPM non mi dice quanto PM si è depositato, però mi dice che indipendentemente da quanto se ne è depositato questo DPM è così elevato che devo rigenerare → FUNZIONE DI DIAGNOSTICA.

Il DP DEVE ESSERE MONITORATO perché se troppo basso o troppo alto vuol dire che c'è qualche problema. Se per esempio è alto e poi ad un certo punto va a zero significa che il filtro si è bruciato.

Però il DP non mi dice quanto particolato si è accumulato e quindi quando rigenerare.

Esistono dei sensori di pressione che misurano la ^{differenza} pressione a monte e a valle del catalizzatore però sono sensori di diagnostica → mi dicono se il DP è troppo alto o basso. Ma non dicono quando devo rigenerare.

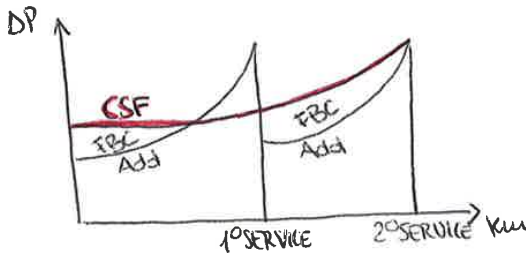
Nei configurazioni più moderne filtro antiparticolato e catalizzatore vengono inglobati in un unico corpo, cioè c'è un involucro metallico che contiene all'interno catalizzatore e filtro antiparticolato.

CENERI nel DPF

Il DPF funziona in modo tale da accumulare PM, rigenerarlo → accumularlo di nuovo, rigenerarlo di nuovo e così via fino a quando non si intasa e non posso più rigenerarlo. Questo perché si accumulano nel filtro anche le ceneri che sono incombustibili → le CENERI non si ossidano e quindi non posso rigenerarle. Le ceneri compongono il PM (cioè il PM è fatto anche da ceneri).

Le ceneri sono inevitabili, non posso eliminarle. Le ceneri vanno gradualmente ad aumentare la contropressione (il DP) nel DPF e ad un certo punto anche dopo la rigenerazione ho una contropressione eccessiva, dovuta al fatto che sono presenti delle ceneri che sono incombustibili e non posso ossidarle ⇒ UNICA SOLUZIONE è portare la vettura in assistenza.

Quindi è necessario che questa condizione, cioè questo intasamento del filtro da parte delle ceneri deve avvenire alle fine della vita del motore.



Osserviamo che ad aumentare dei Km del motore aumenta il DP anche se si fanno le rigenerazioni.

Ad un certo punto (dopo un tot Km) è necessario fare il servizio di assistenza per pulire (sostituire) il filtro.

Oggi questo servizio di assistenza non si fa quasi mai, però dobbiamo essere ed essere ad un numero elevato di Km.

FILTRO A RIGENERAZIONE FORZATA

Per effettuare la rigenerazione serve:

- un agente ossidante
- energia sotto forma di calore, che viene prodotto allo scorio normalmente viene prodotto a spese del combustibile. Questo apporto di calore deve essere ridotto il più possibile → una soluzione è quella di ridurre la T a cui si immette il processo di ossidazione riducendo l'energia di attivazione, ovvero mettendo del catalizzatore.

Vi possono essere due tipi di filtri (DPF) che si differenziano in base a come l'agente catalizzante viene introdotto:

- DPF con FBC (Fuel Borne Catalyst)
- DPF con CSF (Catalyzed Soot Filter)

• Altro problema (svantaggio) è UNCONTROLLED EMISSIONS DURING THE RGN (rigenerazione):
 Con l'uso di EULIS non riesco più a controllare le altre emissioni. 4
 Quando faccio la rigenerazione ossido il PM e facendo questa ossidazione produco CO_2 e H_2O .
 Però si producono anche HC e CO perché è una combustione (non si producono NO_x perché la T
 sono basse) e tra i prodotti della combustione ci sono anche HC e CO. Questi li produco al
 scappo del catalizzatore (dal RHO) e dunque non riesco più a controllarli e me li ritrovo allo
 scappo.

Se invece avessi un filtro catalizzato siccome per agenti catalizzanti in generale sono Pt e Pd, essi possono
 riuscire a controllare anche le emissioni di HC e CO che si formano durante la rigenerazione.

In sintesi, i sistemi DPF con FBC hanno:

VANTAGGI

- Rigenerata a T più basse ($T=450^\circ$)
- Trappola usata nuda, cioè non catalizzata
- possono funzionare con gasolio con elevati tenori di zolfo.

SVANTAGGI:

- sistema più complesso perché c'è il problema di dosaggio degli EULIS
- problema delle ceneri
- emissioni non controllate durante la rigenerazione

19:50 secondo parte 10/01/18

DPF CATALIZZATI: CSF (Catalyzed Soot Filter)

In questo caso la trappola sozze catalizzata, cioè nella trappola mettiamo un washcoat di metalli
 nobili, questi metalli nobili si occupano di ridurre l'energia di attivazione del PM. Quindi il catalizzatore
 (metalli nobili) si trovano già all'interno dei canali. A differenza di un catalizzatore a 3 vie e di un DOC questo
 washcoat non è disposto lungo tutto il canale, ma è disposto su un tratto del canale di ingresso e su un tratto
 del canale di uscita. Sul tratto di canale di ingresso perché una volta che avviene l'ossidazione il resto del
 canale si ossida naturalmente perché il processo di ossidazione è esotermico e si autosostiene. Sul tratto
 del canale di uscita, anche se sui canali di uscita teoricamente il PM non c'è, per poter controllare le
 emissioni di CO e HC durante il processo di ossidazione.

Vantaggi rispetto al DPF con FBC:

- La trappola sozze catalizzata e dunque non c'è bisogno di fare rifornimento di EULIS
- Costi ^{operativi} inferiori e meno formazione di cenere, dovuto al fatto che non consumo EULIS (incombustibile)
- Possono controllare le emissioni di CO e HC durante la RGN grazie al fatto che mette i metalli nobili anche
 sul canale di uscita.

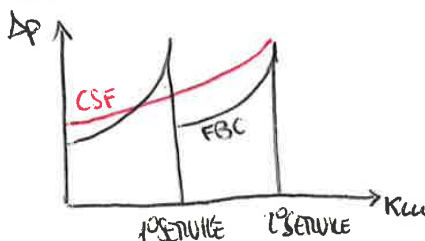
Svantaggi:

- la T a cui avviene la RGN è più alta di $\sim 100^\circ C$ rispetto sistema FBC
- presenza di metalli nobili \rightarrow aumento da zolfo

Quale sistema si preferisce usare? FBC o CSF?

Si utilizzando entrambi dipende la situazione. Se per esempio abbiamo un ~~combustibile~~ ^{combustibile} con più tenore di zolfo
 conviene utilizzare un sistema FBC. Oppure se ho la necessità di avere T + basse durante la RGN perché magari
 ho un veicolo che per la missione che fa funziona con basse T allo scappo allora conviene ancora il FBC.
 Però il CSF garantisce una funzione FOR LIFE, proprio per questo molti costruttori (da viaggio forte) lo usano.

Osservando maggiormente la figura:

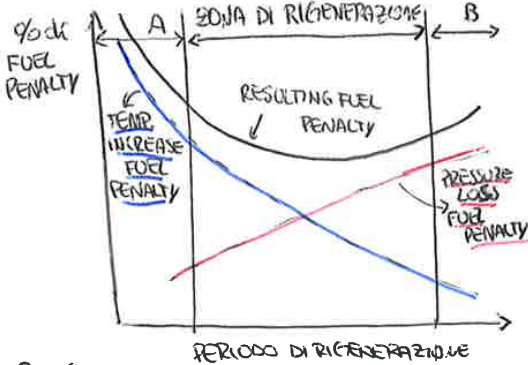


Si utilizza come il DP consente in entrambi i casi per effetto delle ceneri,
 però si osserva come FBC parte da un Δp più basso quando il filtro è nuovo,
 per poi aumentare più velocemente rispetto al CSF per effetto delle ceneri
 perché il sistema FBC usando EULIS produce più ceneri e quindi il Δp nel FBC
 cresce più velocemente. Perché parte più in basso il DP di FBC rispetto a CSF?
 Perché il FBC è una trappola nuda e il CSF no e quindi possedendo il washcoat
 di metalli nobili la porosità si riduce e il Δp è filtro nuovo è più elevata.

Come fa il motore a capire quanto soot si è accumulato? Fa l'integrale sulle mappe. 5

Il motore in centralina ha una mappa che ci dice per ogni condizione di funzionamento quanto PM il motore sta producendo. Fa la somma (cioè l'integrale) su ogni punto di funzionamento.

Quando fare la RGN? Più aumenta l'accumulo di PM più aumentano le DP sul filtro. La centralina mi dice quanto soot ho accumulato e quindi posso fare una stima della DP: all'aumentare di PM aumenta il DP.



Però devo considerare il fatto che devo raggiungere una certa T per immergere la RGN e poi la RGN si autosostiene.

Dobbiamo considerare il fatto che una volta che immergo la RGN, esso si autosostiene, quindi spendere una certa energia per immergere il processo e poi spendo meno perché il processo si autosostiene.

FUEL PENALTY = penalità in termini di consumo di combustibile

Però devo garantire anche una T per immergere la RGN.

Si osserva che la FUEL PENALTY sarà molto elevata se faccio delle RGN frequenti, lo sarà molto di meno se faccio delle RGN poco frequenti.

Per esempio:

Immaginiamo che il motore funziona a punto fisso, quindi produce un quantitativo di soot costante nel tempo. Posso fare una rigenerazione ogni ora oppure un'unica RGN dopo due ore. Se ogni ora accumulo 100 di soot. Per ossidare 100 mi serve 100 di combustibile, per ossidare 200 (dopo due ore) mi serve il doppio di fuel. Quale conviene? Siccome una volta che immergo la RGN esso si sostiene → quindi quello che devo spendere è l'energia per attivare il processo, una volta che è attivato è la combustione stessa del soot che completa la RGN, devo solo accenderlo (quindi spendo molto meno). Quindi spendo meno a bruciare un'unica volta 200 perché se lo faccio ogni 100, devo immergere la RGN due volte. ⇒ se aumento l'intervallo le fuel penalty aumentano, se aumento l'intervallo diminuiscono.

Le FUEL PENALTY compressive sono la somma di: Fuel penalty legate al fatto che devo immergere la RGN, Fuel penalty legate al fatto che se devo difendere il processo di RGN devo far funzionare più e lungo il motore con il DP più elevato.

Esiste un intervallo ottimale di RGN: ZONA DI RIGENERAZIONE → abbiamo una zona.

Per esistono due zone A e B che sono due zone:

ZONA B: in questa zona posso aver accumulato troppo soot che prestermia, che genera quel quantitativo di soot che brucia tutto insieme, potrebbe essere tale da distruggere il filtro.

Potrebbe succedere che il sistema scatta alcune RGN perché non funziona correttamente e mi ritarda nella zona B → per questo caso è necessario che il mio sistema di controllo sappia che sono in questa zona perché così non mi fa immergere la RGN → in questo caso si fa riferimento al DP: se è troppo elevato significa che il filtro è pieno e non fa la RGN.

ZONA A: in questa zona le penalità di combustibile non sono elevate perché devo immergere più volte la RGN e quindi spendo di più. Questo perché una volta che ho accumulato, questa non è necessaria per autosostenere la RGN.

ZONA A: RIGENERAZIONE DIFFICILE - INSUFF. MASSA DI SOOT

ZONA B: RISCHIO DI DISTRUZIONE FILTRO - ECCESSIVA MASSA DI PM.

1:01:00

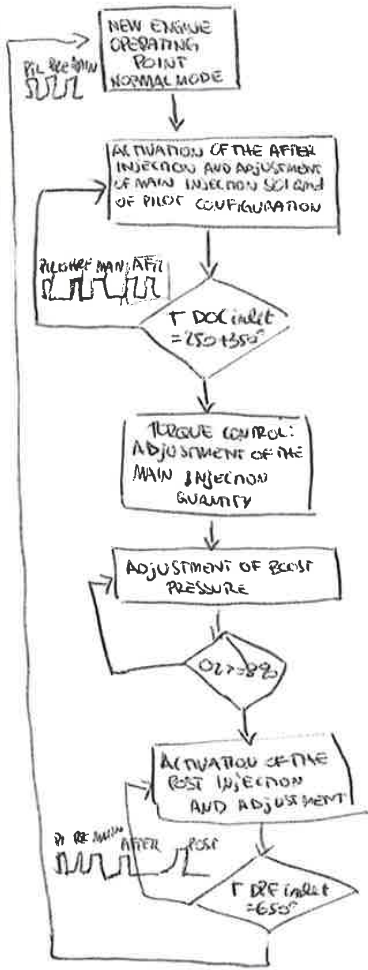
Come avviene la RIGENERAZIONE?

La centralina, dopo un tot di Km, in base alle sue mappe decide di RIGENERARE. Come si fa?

Immaginiamo che l'imiezione sia fatta da una piccola, una ~~grande~~ e una media, quindi il motore sta funzionando in modalità normale. Ad un certo punto il sistema dice che è ora di rigenerare. La prima cosa da fare è di aumentare la T dello scarico perché devo arrivare ai 650° (se filtro non catalizzato) o 450°, insomma alla T che serve per illuminare il processo di ossidazione. La prima cosa da fare è RITARDARE il treno di iniezioni, in questo modo aumento la T dello scarico, ma com'è fatto lo scarico del motore? Il filtro ANTIPARTICOLATO è integrato al DOC, oggi! Quindi quando il sistema decide di rigenerare si ritardano il treno di iniezione per aumentare la T dello scarico e quando la T scarico aumentiamo aumentiamo la T di funzionamento del catalizzatore ossidante fino a quando il catalizzatore non raggiunge la T a cui raggiunge la max efficienza di conversione o comunque di stare da quelle parti.

CONTINUO RIGENERAZIONE TRZATA

6



Quando arriva il momento di RIGENERARE, la prima cosa da fare da parte del sistema di controllo è quello di andare a verificare le condizioni del DOC. In funzione della T del DOC il sistema decide cosa fare. Se la T è molto scattano da quella di funzionamento del DOC, il sistema di controllo non inizia subito la RGN (essa consiste nel fare delle iniezioni post molto ritardate) perché il DOC non funziona ad efficienza elevata → conversione a bassa efficienza, quindi ossidazione bassa; inoltre crea la formazione di quantitativi di HC e CO elevati. Quindi se la T del DOC non è sufficiente a garantire una buona efficienza allora il sistema di controllo ritarda il treno di iniezioni in modo da portare il DOC alla T corretta di funzionamento. Ritardando il treno di iniezioni avrà una variazione di coppia, allora per mantenere la coppia costante e non fare percepire nessuna usucione di coppia all'utente il sistema di controllo fa iniettore più combustibile. Quando il DOC raggiunge la T corretta e questo viene fatto andando a misurare la T a valle del DOC e a monte del DPF. Oggi giorno il DOC e il DPF sono regolati in unico oggetto. Attraverso del sensore si monitora la T ^{alla ripresa del DPF e a valle del DOC} quando si raggiunge la T = 600-650° (temp. ottimale di conversione) allora si è pronti per la RIGENERAZIONE. Si fanno delle iniezioni multiple delle post-iniezioni per evitare il problema della diluizione dell'olio.



Le post-iniezioni avvengono quando lo stantuffo si trova lontano dal PM (nel momento della RGN) il targeting di più essere tale da iniettare il fuel nei posti, quindi non possa fare iniezioni lunghe perché altrimenti la pressione aumenta e dunque questo fuel invece di raggiungere lo scudo si va a depositare all'interno della camera e si va a diluire con l'olio lubrificante.

⇒ dunque si fanno delle iniezioni multiple (in genere 4). Queste iniezioni sono molto ritardate e dunque avvengono durante l'espansione. Ho due problemi: un problema dovuto alla diminuzione di efficienza perché ho il ritardo di iniezione; il secondo problema che è voluto consiste nel fatto che + ritardiamo le iniezioni più iniettiamo in momenti in cui il cilindro la T sono basse (durante la fase di espansione la T scende) e quel fuel che inietta nei posti, viene che non si autoaccende perché lo voglio ritardare tutto nel DOC dove deve ossidarsi per produrre l'isoterma... Però in realtà parte del fuel brucia in camera e mi darà un po' di coppia. Però non so quanto fuel delle post brucia in camera e avrà una variazione di coppia perché queste post-iniezioni erano comunque un po' TERME FORMING → ho un problema dal punto di vista del controllo perché dovrai sapere quanto coppia mi generano queste post. Non posso avere VARIAZIONI DI COPPIA → l'operazione deve essere trasparente per l'utente.

CONDIZIONI CRITICHE

- In condizioni di guida con frequenti viaggi a brevi può capitare che la RGN non duri abbastanza, cioè non si riesce a completare il processo di RGN e quindi il sistema di controllo non sa più quanto PM è rimasto. In questi casi risulta utile il sensore di pressione perché dopo alcuni casi di RGN non completate si renderà conto che il DP è più alto di quello che doveva essere e quindi la centralina fa accendere delle spie per invitare l'utente a guidare per fare completare la RGN.

NO_x si distinguono in NO e $\text{NO}_2 \rightarrow$ a me servono gli NO_2 .

7

Si può pensare di inserire a monte del DPF a RGN continua un catalizzatore ossidante che ha una specializzazione, ovvero oltre ad ossidare CO e HC deve essere in grado anche di ossidare gli NO in $\text{NO}_2 \rightarrow$ questo per aumentare la concentrazione di NO_2 . In questo modo questo NO_2 lo sfruttiamo per ossidare il soot.

Però ho dei problemi:

- il quantitativo di soot da ossidare è legato agli NO_2 che il motore produce, in generale agli NO_x che ~~in genere~~ ^{però} devono essere ridotti per limitare le emissioni di NO_x .
- a monte e a valle del sistema gli NO_x rimangono quelli, perché da un lato devo avere un numero sufficiente di NO_x per ossidare il soot, dall'altro lato però mi ritengo questi NO_x dopo che sono degli inquinanti e quindi devo cercare di eliminarli andando ad inserire a valle dei sistemi atti ad eliminarli. Gli NO_x comunque passeranno però se devo aumentare gli NO_x per eliminare il soot, questo diventa un problema.

Quindi dovrei avere una stima della missione del veicolo per poter garantire, sia da un punto di vista della T, sia dal punto di vista del quantitativo di NO_x , ~~la~~ ^{le} condizioni per fare avvenire la RGN continua.

Quindi questo sistema deve essere calibrato in modo opportuno e costantemente ~~ciò~~ ^{adattato} comunque consentire di poter effettuare una RGN forzata, in quanto non è detto che il veicolo faccia sempre questa missione, può capitare che per imprevisti il veicolo ~~deve~~ è costretto a fare un'altra missione.

Oggi, nelle moderne centraline, ci sono dei sensori per gli NO_2 che ci stimano e in questo modo capiamo qual è la capacità di autorigenerazione del DPF e quindi vanno a modificare l'intervallo di RGN per tenere conto del fatto che un po' di soot si è autorigenerato grazie alla presenza di NO_2 . Questo succede anche nel caso di RGN forzata.

CATALIZZATORI RIDUCENTI PER GLI NO_x

Nei motori CI siccome si lavora nel povero, per ridurre gli NO_x devo utilizzare un catalizzatore a poeste.

Si possono distinguere:

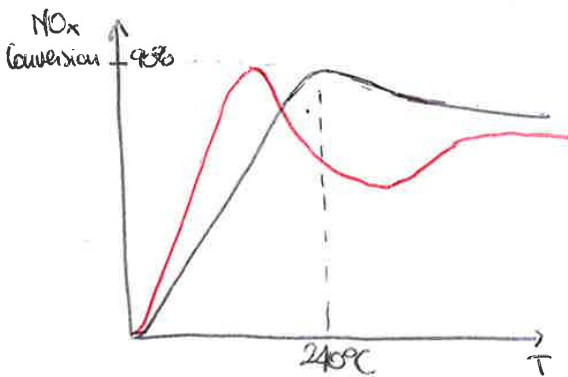
- 1) CATALIZZATORI A RIDUZIONE SELETTIVA, dove la riduzione degli NO_x avviene facendo reagire con un elemento specifico che ha una reattività specifica con gli NO_x . Questo elemento ~~mescolati~~ ^{mescolati} nei gas scarico reagisce con gli NO_x riducendoli. Gli agenti riducenti selettivi più utilizzati sono:
 - gli idrocarburi incombusti $\text{HC} \rightarrow$ DENOX o LNC. Questi sistemi, però, hanno una bassa efficienza di conversione degli NO_x legati sia al fatto che gli HC possono essere più o meno presenti in un numero sufficiente e inoltre se fossero presenti in un numero sufficiente, la finestra di T a cui questi funzionano bene è molto stretta e l'efficienza è ~~relativa~~ ^{molto} bassa.
 - l'ammoniaca \rightarrow SCR. In questo caso dobbiamo avere un serbatoio a parte per l'ammoniaca e iniettare l'ammoniaca nello scarico. Inoltre l'ammoniaca è tossica e quindi si possono avere dei grandi problemi nello stoccaggio ^{con i trasporti} ~~che~~ ^{con i trasporti} posso avere + danni di quelli che voglio evitare. Per questo non si usa l'ammoniaca pura ma una soluzione a base di UREA, che poi nel sistema SCR viene prima trasformata in ammoniaca e poi fa il suo lavoro. Quindi dobbiamo ^{avere} un serbatoio per l'urea e quindi un sistema di iniezione dell'urea \rightarrow un sistema in più a bordo del motore e inoltre ho anche problemi di infrastruttura (rifornimento urea).
- 2) TRAPPOLE DEGLI NO_x (LNT = LEAN NO_x TRAP) o sistema NSR. È una specie di filtro chimico, costituito da specie chimiche che sono in grado di stoccare gli NO_x . Ma non all'infinito. Una volta stoccati, dobbiamo rigenerarli, e durante la RGN vanno ridotti.

Questo catalizzatore ossidante CUC serve per ossidare l' NH_3 quando esso non reagisce con gli NO in quanto non c'è il tempo sufficiente, oppure perché questi reagenti non si incontrano. Posso, quindi, avere NH_3 allo scarico perché non ha avuto il tempo di reagire con NO_2 o perché non si ha trovato, quindi allo scarico ho sia NH_3 che NO ma gli NO_2 li volevo eliminare quindi ~~devo~~ mettere un momento di uccelli di NH_3 meglio in modo da pensare che tutti gli NO_2 vengano ridotti. Per abbattere gli NO_2 ~~non~~ devo mettere l'ammoniaca giusta ma devo metterne di più. Questo fa sì che sicuramente mi avanza NH_3 che mi ritrovo allo scarico \rightarrow per questo uso il CUC.

Dobbiamo, però, considerare che non conosciamo la quantità di NO_x che esattamente produce il motore (oggi si stanno cercando dei sensori per NO_x) e quindi non possiamo sapere la quantità di ammoniaca da inserire. Posso, attraverso un modello, stimarli, ma comunque resta l'incertezza sul quantitativo di urea che stiamo iniettando.

In ogni caso allo scarico avrò NH_3 , se riesco a ossidare tutti gli NO_x . Il problema dell' NH_3 allo scarico ~~è~~ che è molto inquinante ed è più pericoloso degli NO_2 , proprio per questo devo eliminarlo assolutamente tramite il CUC.

Oggi, questi sistemi funzionano molto bene. Infatti se osserviamo l'EFFICIENZA DI CONVERSIONE in funzione della T:



Già a partire da T basse ^{allo scarico} (240°C), l'efficienza è molto buona \rightarrow 90%. Quest'efficienza si mantiene elevata per tutte le T.

Posso spostare il max della curva per T ancora più basse \rightarrow **curva rossa**. Questo è stato possibile utilizzando un DOC più grande che produce + NO_2 e quindi già a basse T produco + NO_2 e riesco a raggiungere prima $\text{NO}_2/\text{NO} = 1$ e quindi riesco ad avere efficienze elevate. Più all'aumentare della T questa curva decresce e questo è dovuto al fatto che questo DOC + grande produce troppi NO_2 e quindi si attiva la reazione (3) che è molto lenta e l'efficienza scende.

La curva NERA si riferisce ad un DOC ottimizzato, ovvero che ha una dimensione tale da garantire la migliore efficienza a T basse. Se faccio il DOC troppo grande altero la curva **rossa**.

Questi sistemi SCR con urea vengono molto utilizzati negli HEAVY-DUTY perché essendo grandi il costo dell'aggiunta del serbatoio non è molto rilevante.

Struttura SCR \rightarrow presenta una struttura a corredi passanti però non presenta metalli nobili, cioè catalizzatori. Può presentare metalli nobili come il vanadio che serve ad accelerare le reazioni. (basso costo dei catalizzatori a vanadio).

VANTAGGI SCR

- Non presentano metalli nobili che come sappiamo sono costosi e sono soggetti all'avvelenamento da zolfo e quindi ogni tanto devono essere desolforati.
- Può funzionare sia ad ammecc aperto (efficienza $\sim 80-90\%$) che chiuso (efficienza $\sim 95\%$). In quello ad ammecc chiuso si effettua un controllo di retroazione sugli NO_x prodotti che assieme deve essere efficiente.

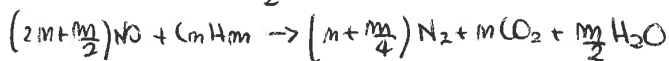
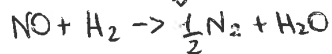
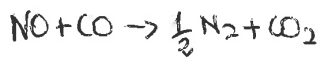
SVANTAGGI SCR

- Problema infrastrutturale per il trasporto e la distribuzione di urea
- Maggiori ingombri dovuti alla presenza del serbatoio, iniettori (inverso critico negli Heavy-Duty)
- Emissioni di NH_3 allo scarico (Spesso si parla di AMMONIA SCR)
- Surriscaldamento del sistema, che durante il funzionamento accumula SOLFATI DI AMMONIO che sono scorie molto pericolose
- Il corretto funzionamento dell'SCR dipende dall'urea iniettata che deve ripresentarsi con regolarità al livello del serbatoio.

la riduzione degli NO_x. Dunque si ottengono queste due fasi per fare funzionare in modo corretto il sistema. 12:00:00 Fine post Diesel 9

Questi composti metallici, che inizialmente sono carbonati nel normale funzionamento e successivamente diventano nitrati quando intrappolano gli NO_x, sono a base di bario normalmente.

Dunque durante il normale funzionamento, gli NO_x vengono intrappolati in siti che contengono carbonati di bario formando nitrati di bario e rilasciando CO₂. Quando tutti questi siti risultano occupati la trappola deve essere rigenerata. Questa rigenerazione, che avviene in condizioni ricche, fa sì che gli NO_x vengono rilasciati liberando i siti. Questi NO_x vengono poi ridotti grazie ad un agente catalizzatore (il rodio) e all'agente riduttore (CO).



Il meccanismo è molto simile a quello che avviene nel DPF. La differenza sostanziale è che nel DPF abbiamo un filtraggio meccanico, la LNT fa un filtraggio chimico. Però anche nel DPF quando vedo a rigenerare c'è un ambiente ricco: infatti mentre il fuel che faccio iniezione nel DOC, quindi c'è un ambiente ricco di CO e HC nel DOC che ossida tutto ciò che dopo di che ossida le soot.

L'altra grossa differenza è che nel filtro antiparticolato il filtraggio può durare centinaia di Km e poi la fase di rigenerazione può durare minuti; invece nel LNT l'assorbimento dura qualche minuto e la rigenerazione qualche secondo → quindi avviene frequenti cicli povero/ricco e questo fa sì che questa tecnologia richiede un'attenta e stretta integrazione con il sistema di controllo del motore: pertanto è più facile adozione in congiunzione con sistemi elettronici di iniezione del combustibile, quindi il sistema common-rail.

Svantaggi:

- Fuel Penalty (consumo di combustibile) perché quando funzioniamo nel ricco devo introdurre combustibile che se anche per qualche secondo alla lunga avrà un certo consumo di fuel.
- Presenza di metalli nobili (come il rodio) che sono soggetti ad avvelenamento e deterioramento
- I carbonati di bario, che servono per assorbire gli NO_x, reagiscono con lo zolfo per formare i solfati di bario (i carbonati di bario sono voraci di zolfo) che non assorbono gli NO_x. Quindi non possiamo utilizzare combustibili con elevati tenori di zolfo, altrimenti succederebbe che i siti della trappola sono tutti occupati dai solfati di bario e non permettono più di assorbire NO_x → il sistema non funziona più. La soluzione è la desolfatazione. Però siccome il solfato di bario è molto stabile, non basta rigenerare per effettuare la desolfatazione. Bisogna effettuare un processo simile alla RAN però a T più alta e con tempi più lunghi che si chiama desolfatazione. Questo desolfatazione mi aggiunge ancora di più fuel penalty perché per desolfatare devo raggiungere T più elevate. Il vantaggio è che quando faccio la desolfatazione faccio anche la RAN. Inoltre il sistema di controllo deve fare delle cose complicate, perché ogni minuto devo svolgere queste operazioni.

Oggi giorno, i gasoli hanno tenore di zolfo molto basso e quindi i cicli di desolfatazione avvengono ad intervalli di tempo accettabili e dunque un sistema di questo tipo può funzionare.

Siccome la reazione di riduzione è molto simile a quella che avviene nel 3° letto del catalizzatore a 3 vie posso, inserendo un DOC e un LNT, creare un catalizzatore a 3 vie a 2 stadi.