



**Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

**NUMERO: 522**

**DATA: 16/04/2013**

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

**STUDENTE: Scanu**

**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.**

# **CONTROLLO EMISSIONI INQUINANTI**

**PROFESSORE: EZIO SPESSA**

**ANNO: 2012/2013**

**STUDENTE: SCANU PIETRO**

## INIEZIONE DIESEL

- ITL
- NCD
- NOD | GRAFICI
- DWT

## POST TRATTAMENTO

- OSSIDAZIONE
- RIDUZIONE
- OFA \*
- GSA \*
- $\eta$ -T
- $\eta$ - $\alpha$
- FUMONATEMENTO CERVO
- SCR

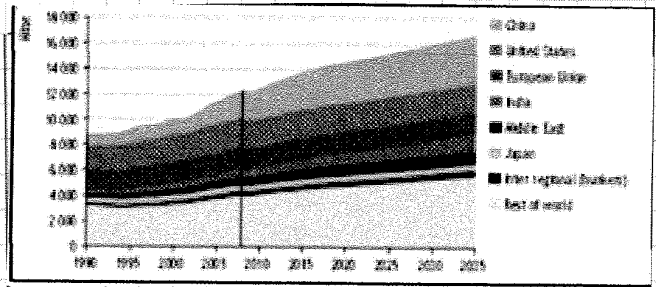
## ANALISI PER REGIONE

Considerando la previsione  
relativa al new policies

scenario, si va ad analizzare

lo scenario relativo ai  
singoli paesi (CHINA-USA-DE  
INDIA-MEIO ORIENTE- GIAPPONE  
RESTO DEL MONDO - ALTRO)

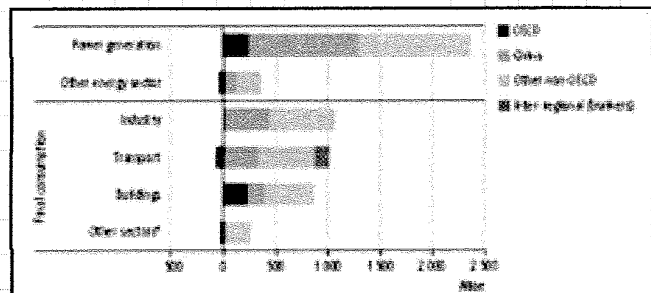
Ad oggi, USA e DE vanno ad essere i paesi con  
maggiore richiesta energetica, intorno al 2035 considerando  
incremento demografico e sviluppo saranno CHINA e INDIA i  
paesi con maggiore richiesta energetica.



Il responsabile dell'aumento di combustibili fossili, da qui al  
2035, sono sicuramente la CHINA, INDIA, RUSSIA e altri paesi  
in via di sviluppo

## ANALISI PER SETTORE

Nel caso del settore trasporti,  
per i paesi OECD, per  
quanto riguarda la richiesta  
di energia è prevista una  
riduzione, a differenza  
di CHINA e paesi in via di  
sviluppo in cui si prevede un incremento della richiesta,  
frutto delle politiche nazionali.

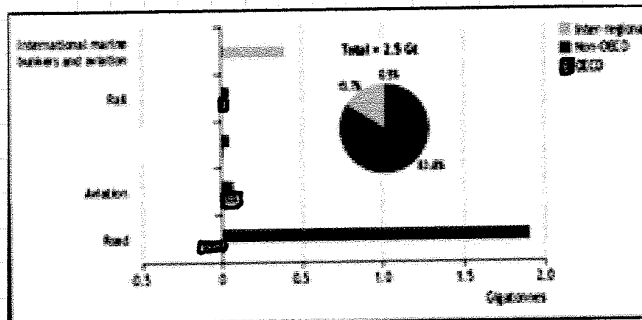


## IMPATTO CO<sub>2</sub>

Emissioni di CO<sub>2</sub> nella situazione attuale e in previsioni future, suddivise per e distribuzione l'incremento delle emissioni di CO<sub>2</sub> nei vari settori (Trasporti, Industrie...)

	2006	2030
World energy-related CO <sub>2</sub> emissions (Gigatonnes)	27,89	+12,66
Power generation	41%	+54 %
Transport	23%	+20 %
Industry	16%	+14 %
Residential, Services, Agriculture (direct)	10%	+5 %
Other	8%	+7 %

Analizzando poi il settore trasporti nel dettaglio, si può notare una notevole differenza tra paesi OECD e resto del mondo: riguardo ai trasporti su strada, nel caso degli OECD, nelle previsioni future si ipotizza una diminuzione delle emissioni, mentre nel resto del mondo un notevole incremento.

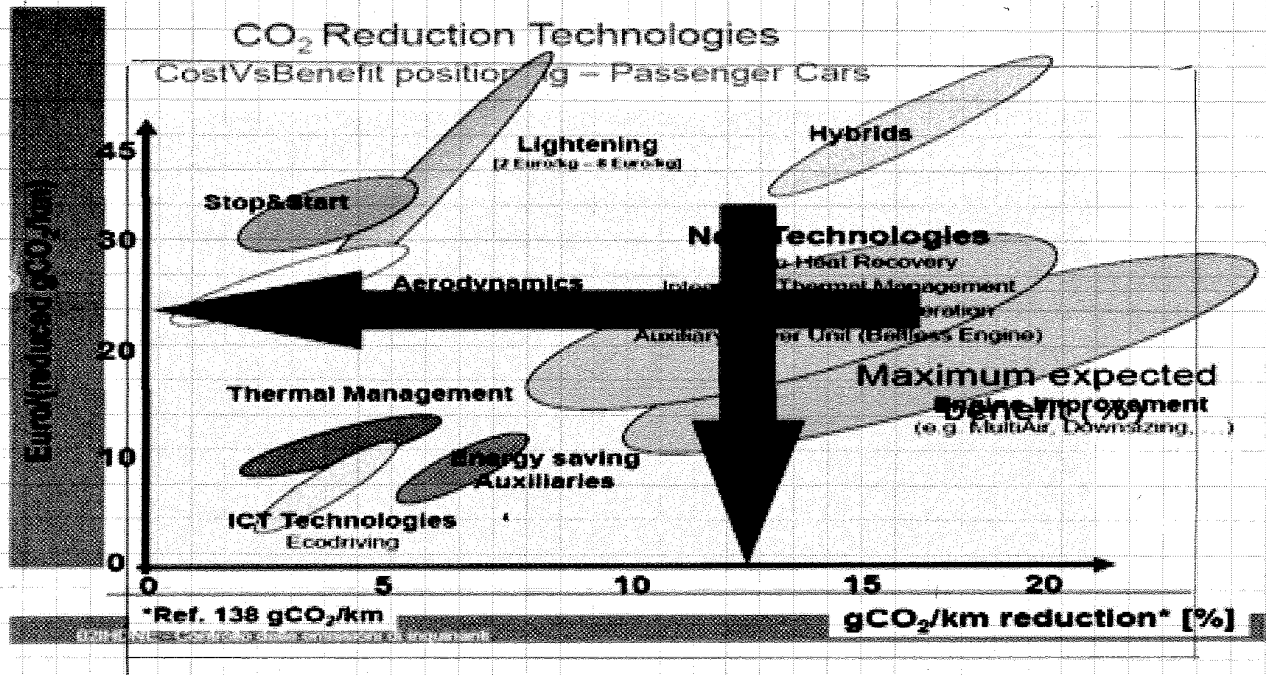


## INCREASED EFFICIENCY AND ENERGY-SOURCE SWITCHING

Analizzando le situazioni i livelli sono rappresentati dal current scenario e dal 450 scenario, distinguendo trasporto su strada, aviazione, trasporto via mare e altri trasporti. Per spostarsi dal livello superiore al 450S, occorre migliorare l'efficienza del motore termico, sviluppare tecnologie quali biomasse, gas, sistemi elettrici.

# CO<sub>2</sub> REDUCTION TECHNOLOGIES

## COST VS BENEFIT POSITIONING - PASSENGER CARS



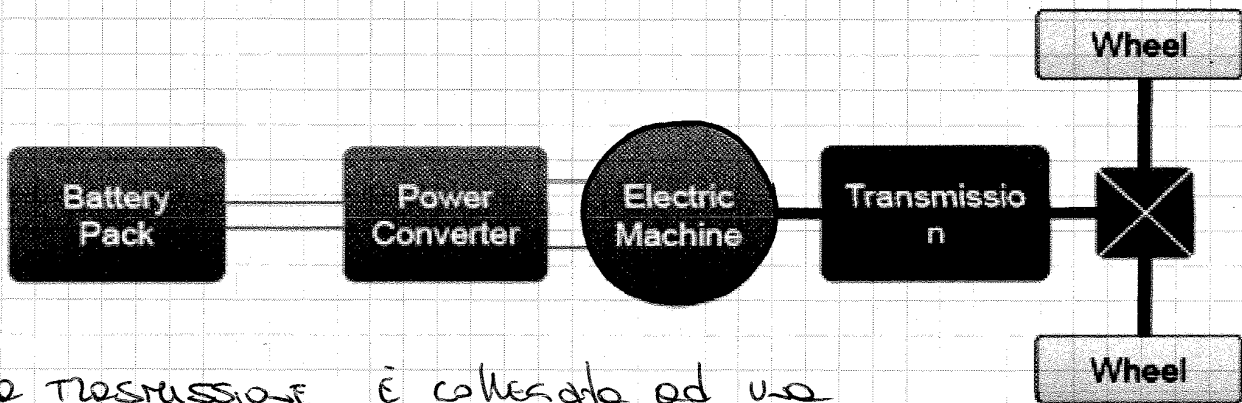
• **IBRIDI** → OTTIMI BENEFICI MA ELEVATI COSTI

• **TECNOLOGIE INTERMEDIE**

• **AERODINAMICA - RECUPERO ENERGIA**

• **UTILIZZO AUSILIARI EFFICIENTI**

• **NEW TECHNOLOGIES** → OTTIMI BENEFICI CON COSTI INFERIORI



la trasmissione è collegata ad una macchina elettrica reversibile che può funzionare sia da motore sia da generatore, e sua volta collegata alle batterie (con tensioni di qualche centinaio di volt)

In questo tipo di veicoli la trasmissione è molto più semplice rispetto ad un veicolo con motore termico.

la macchina è più leggera

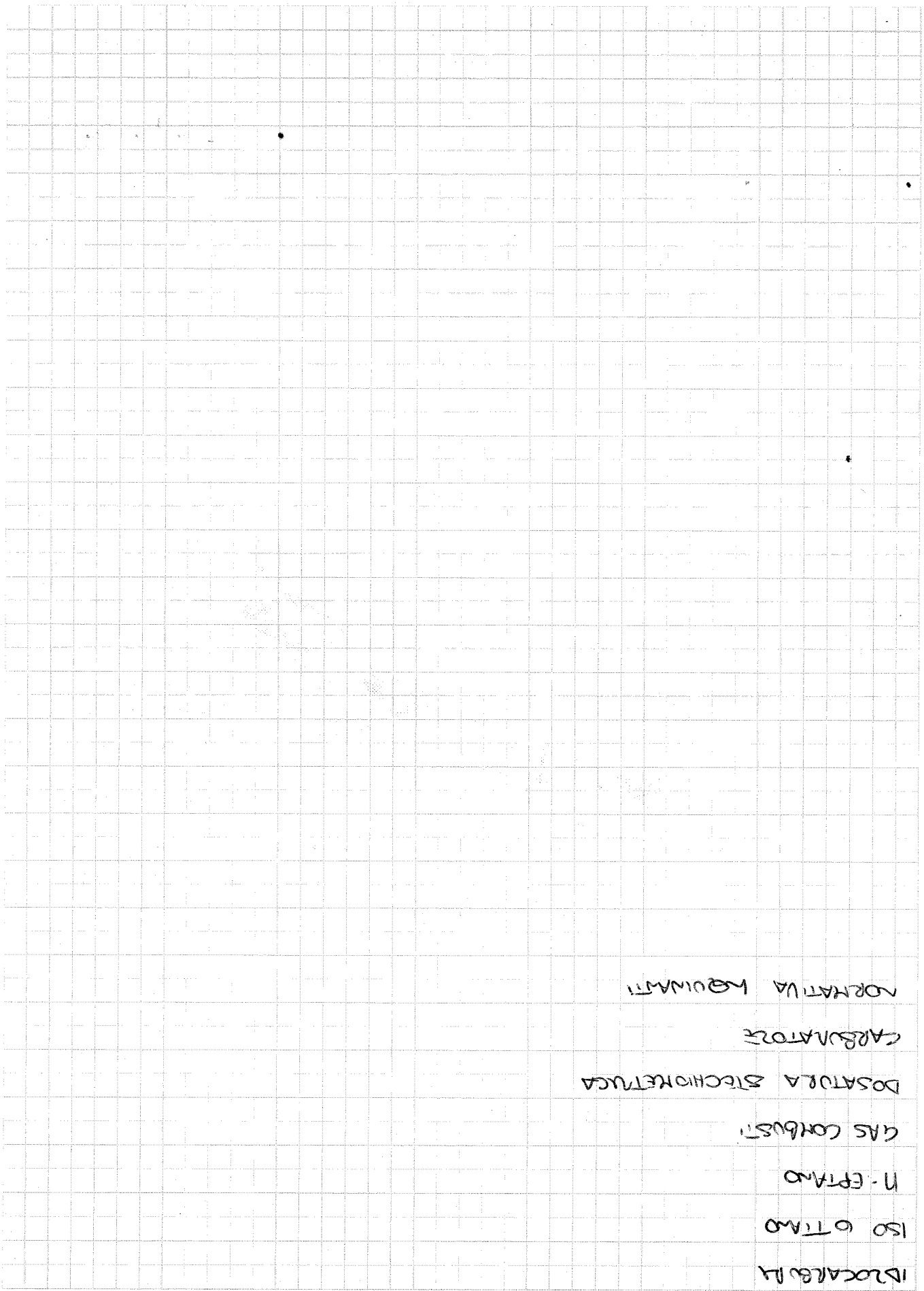
nel movimento, il veicolo deve vincere resistenze quali

- inerzia
- gravità
- aerodinamica
- attrito
- resistenza al rotolamento

Tutte queste resistenze vanno a dipendere dalla massa, dall'accelerazione, dalla velocità e dalla sezione frontale.

Fissato il peso di un veicolo, e noto il ciclo (obiettivo) che si vuole raggiungere, si determina subito la potenza richiesta





## SISTEMI IBRIDI

### SISTEMA TERMICO + elettrico

- IBRIDO SERIE
- IBRIDO PARALLELO

SERIES HEV

PARALLEL HEV



- INCREMENTO AUTONOMIA
- FUNZIONAMENTO STAZIONARIO ICE
- RIDUZIONE EFFICIENZA COMPRESSIVA
- OTTIMIZZAZIONE FUNZIONAMENTO ICE
- PRESTAZIONI LEGATE ALLA MACCHINA

ELETTRICA

- AUTONOMIA LEGATA ALLA MACCHINA

TERMICA



APPLICAZIONE URBANA

- RIDOTTE DIMENSIONI ICE
- DOWN SPEEDING
- EFFICIENZA ICE
- PROBLEMA DI ENERGY MANAGEMENT
- RIDOTTA RUMORosità
- OTTIMIZZAZIONE CONSUMI

- SMOG FOTOCHIMICO
- PIOGGE ACIDE
- FORMAZIONE DELL'OZONO

Si distinguono quindi NORMATIVE CHE REGOLANO EMISSIONI DI CO<sub>2</sub> E NORMATIVE CHE REGOLANO EMISSIONI DI INQUINANTI

Gli inquinanti in base alla fase sono distinguibili in:

GASSOSI: CO, HC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, AEROSOL DI OLIO

SOLIDI: PARTICOLATO ORGANICO, SALI DI PIOMBO E METALLI PESANTI, PARTICOLATO INORGANICO

SCALA DI AZIONE:

PRODUCENDO UN'EMISSIONE, SU CHE SCALE HA EFFETTO QUESTA EMISSIONE?

Ci sono sostanze che hanno effetto globale, come la CO<sub>2</sub>, responsabile dell'effetto serra, in quanto penetra nell'atmosfera.

Hanno effetto globale anche CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC, con poteri addirittura nettamente superiori rispetto alla CO<sub>2</sub>.

Gli inquinanti locali hanno effetto su scale ridotte:

- SCALA REGIONALE (20 ÷ 2000 km)

- SCALA LOCALE (0,2 ÷ 20 km)

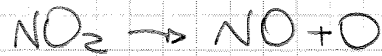
- MICROSCALA (0 ÷ 0,2 km) IDROCARBURI INCOMBUSTI - CO

Gli OSSIDI DI AZOTO POSSONO COMPORTARE L'EFFETTO SIMILE

livello suolo



suolo + STRATOSFERA



RISCALDAMENTO GLOBALE

SPECIE CHE CONTRIBUISCONO AL RISCALDAMENTO GLOBALE

GAS	GWP
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	21
N <sub>2</sub> O	270
CFCL <sub>3</sub>	14000
CFCL <sub>2</sub>	19500

per valutare l'effetto globale occorre sommare tutti i contributi

$$[CO_2] + 21 [CH_4] + 270 [N_2O] + \dots = CDE \quad [GRAMMI]$$

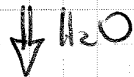
CDE CARBON DIOXID EQUIVALENT

## PIOGGE ACIDE

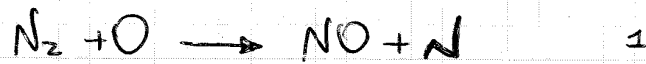
il motore ETGHE SU  $\text{NO}_x$  CHE  $\text{SO}_x - \text{SO}_2$  ed  $\text{NO}_2$  POSSONO REAGIRE OTRA DI LORO OPPIE IN UN AMBIENTE IN QUI È SU PRESENTE STOR FOTOCIMICO, LENNO E REAGITE CON I RADICALI OH - QUESTI ACIDI SONO MOLTO SOLUBILI IN ACQUA



gli acidi che si formano sono molto solubili in acqua e riducono il PH delle precipitazioni dal valore naturale di 5,6 ad un valore inferiore e 5 (PH ACIDO dannoso per il sistema)



gli Atomi di ossigeno presenti nei SDS combusti. Alle spalle del fronte di fiamma promuovono la decomposizione dell'ozono molecolare, producendo atomi di azoto N, secondo la reazione 1



Questi reagendo con l'ossigeno molecolare  $\text{O}_2$  e con i gruppi OH liberi, contribuiscono alle reazioni alla formazione di NO secondo le reazioni



L'energia di attivazione della reazione 1, pari a circa 319 kJ/mol, costituisce la principale barriera che limita la velocità di formazione degli NO, nella maggior parte delle condizioni di interesse motoristico

Per quanto riguarda la formazione di NO, tale meccanismo assume importanza soprattutto nelle mescele povere e basse T. Tuttavia può divenire non trascurabile nel caso di mescele ricche, dove la velocità di formazione di NO, re dante il meccanismo di Zeldovich, può essere significativamente ridotta per effetto della reazione 3.

IN QUESTO CASO, CON UN'ENERGIA DI ATTIVAZIONE MOLTO PIU' ALTESO rispetto alle reazioni (1), QUESTI REAGENTI SI OBTIENNO COSI' UNA DIPENDENZA DALLA TEMPERATURA MENO SENSIBILE, E QUINDI ALLE T PIU' BASSE - ANALIZZANDO LE TEMPERATURE TIPICHE DI UN MOTORE C.I., LE REAZIONI 1-3 Danno LUOGO OGGI OSSIDI DI AZOTO, LE 4-6 DAREBBERO LUOGO OGGI OSSIDI DI AZOTO SE CI FOSSE IL TEMPO PIU' SUFFICIENTE, IN QUANTO PIU' LENTE.

### CINETICA CHIMICA

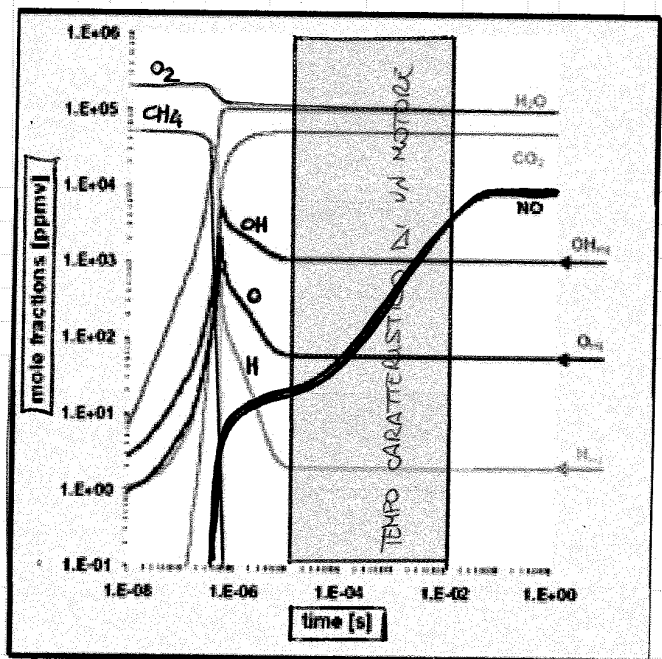
NELLA FORMAZIONE DEGLI OSSIDI DI AZOTO E FONDAMENTALE ANALIZZARE LA CINETICA CHIMICA: LE VELOCITA' DELLE REAZIONI DIRETTE-INVERSA SONO DIVERSE.

BISOGNA ANCHE VEDERE SE LE REAZIONI POSSONO ESSERE CONSIDERATE ALL'EQUILIBRIO

NEL GRAFICO SULL'ASSE DELLE ORDINATE VIENE RIPORTATA LA FRAZIONE MOLARE, MENTRE SULL'ASSE DELLE SCASSE IL TEMPO.

VENSONO QUINDI RIPORTATE LE CONCENTRAZIONI DI ALCUNE SPECIE CHIMICHE:

REAGENTI ( $\text{CH}_4 - \text{O}_2$ ) CHE Vanno poi a CONVERTIRSI PER DAR LUOGO AI PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE, IN QUESTO CASO DEL METANO



facendo riferimento alle 6 equazioni, non vedo di considerare  $\frac{d[OH]}{dt}$   $\frac{d[O]}{dt}$   $\frac{d[H]}{dt}$  in quanto, nel tempo caratteristico del motore QUESTE SPECIE CHIMICHE HANNO raggiunto l'equilibrio per cui la loro derivata è nulla; inoltre la loro concentrazione è pari alle concentrazioni di equilibrio.

$$\frac{d[NO]}{dt} = -k_1^+ \overbrace{[N][NO]}^{\text{REAGENTI}} + k_1^- \overbrace{[N_2][O]}^{\text{PRODOTTI}} + k_2^+ [N][O_2] - k_2^- [NO][O] + k_3^+ [N][OH] - k_3^- [NO][H] + k_6^+ [O][N_2O] - k_6^- [NO][NO]$$

Nella formazione degli NO, secondo la reazione ①-② scrivere:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1^- [N_2][O] - k_1^+ [NO][N] + k_2^+ [N][O_2] - k_2^- [NO][O]$$

vedo sostanzialmente a considerare le varie in cui compare NO

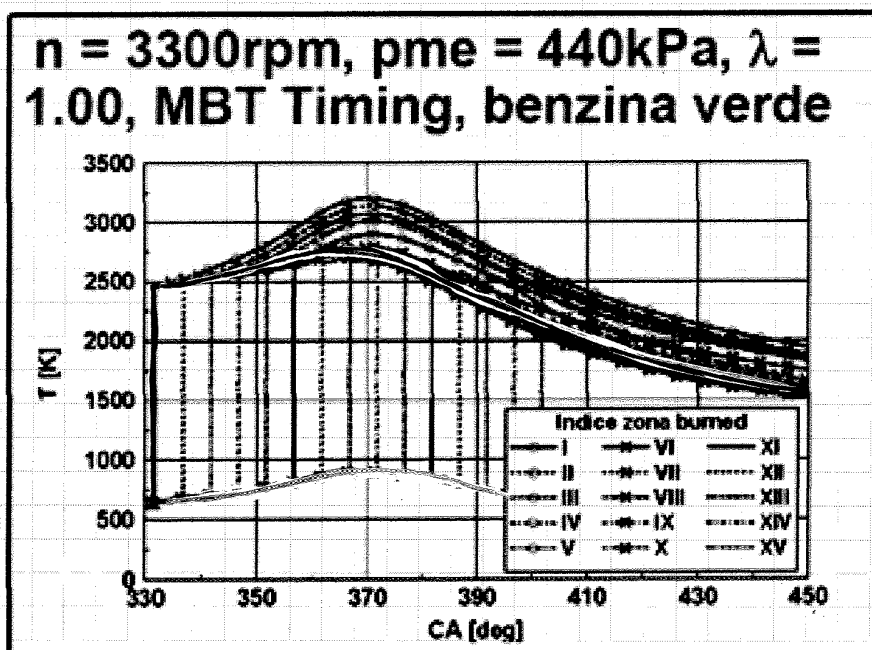
osservando l'espressione vi sono alcuni termini in cui compare il pedice "e": si ha a indicare l'equilibrio. la concentrazione delle specie chimiche in cui compare le "e" si ha all'equilibrio: queste sono tutte specie chimiche coinvolte nel processo di combustione, e considerando la rapidità del processo, ~~queste~~ i prodotti della combustione si troveranno nelle concentrazioni di equilibrio.



in realtà bisogna considerare che per applicare il modello è necessario conoscere la temperatura istante per istante, poiché lo ad influenza sia  $R_i$  sia le condizioni di equilibrio.

il modello della cinetica chimica deve essere abbinato ad un modello termodinamico che descrive la combustione: si parla di ANALISI DI MASCO TERNICO. Si lo ad applica per un motore di combustione il 1° principio della termodinamica:

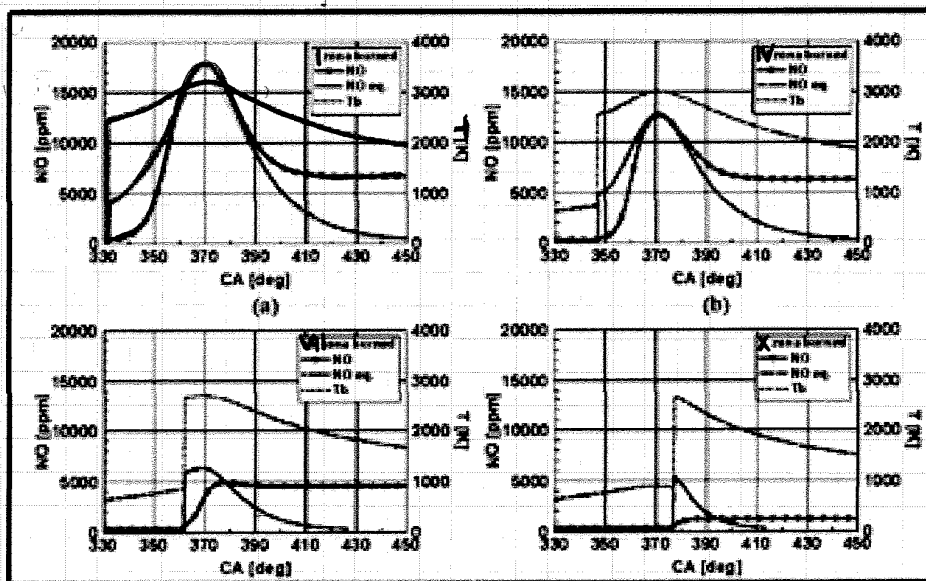
Analizzando ciò che accade in camera di combustione, vediamo come in funzione dell'angolo di manovella variano le temperature all'interno delle camere di combustione secondo un modello "MULTIZONA", considerato che proprio come combustione ha una netta separazione tra gas bruciati e non bruciati, separati dal fronte di fiamma che procede progressivamente, distinguendo così almeno due temperature



Analizzando le varie curve si può osservare:

- PRIMA CURVA: Gli ossidi di azoto partono da un livello basso, per raggiungere una certa altezza rapidamente, per poi diminuire e raggiungere un certo livello costante di parti per milione in volume.

Con la riduzione della temperatura, che è lenta e graduale, con lo stantuffo che si espande, la concentrazione di NO tende a diminuire. La velocità delle reazioni diminuiscono progressivamente, rallentando quindi il processo di dissociazione di NO, consentendo quindi la concentrazione di NO.

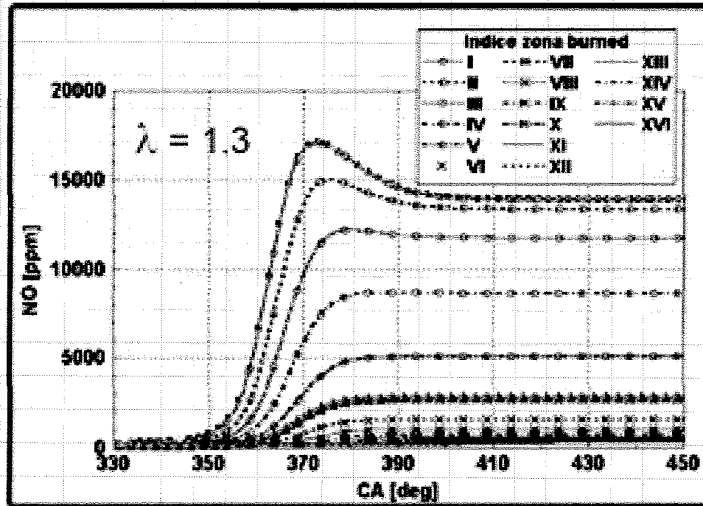


nel grafico è riportata l'andamento della temperatura (rosso) NO (curva azzurra), NO che si sarebbe all'equilibrio chimico

formazione di NO.

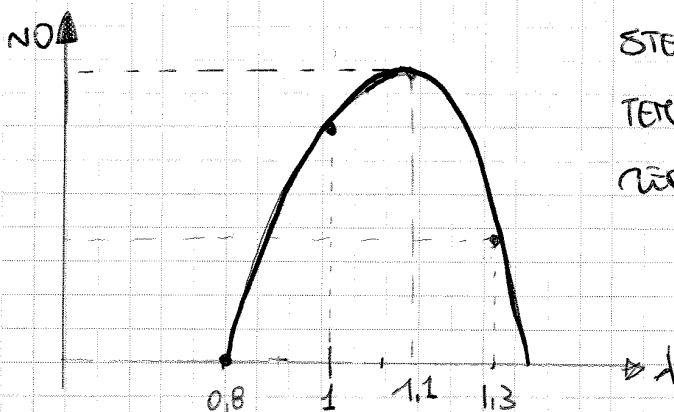
MISCELA POVERA  $\lambda = 1,3$

Elevate presenza di ossigeno - T CHE NON SONO MASSIME



l'effetto che prevale è legato alla temperatura: la concentrazione di NO rispetto allo stechiometrico è più bassa, in questo proprio per le basse temperature la dissociazione è particolarmente riconoscibile

In un stato intermedio ha lo stechiometrico e il molto povero ( $\lambda = 1,3$ ). Si osserva la concentrazione massima di NO: questo perché non tanto che si va verso il povero, quanto dal diminuire l'ossigeno e...



STESSO TEMPO si abbassano le temperature conseguendo così le riduzioni.

## FORMAZIONE HC - IDROCARBURI INCOMBUSTI

Non si tratta di una specie chimica ben definita, con il combustibile che durante la combustione non brucia completamente. Allo scatico, il combustibile può avere composizione diversa rispetto alla fase di combustione.

Più correttamente si parla di COMPOSTI ORGANICI.

In ambito motoristico si vanno a distinguere:

HC/THC: total HC

NMHC: non methane HC

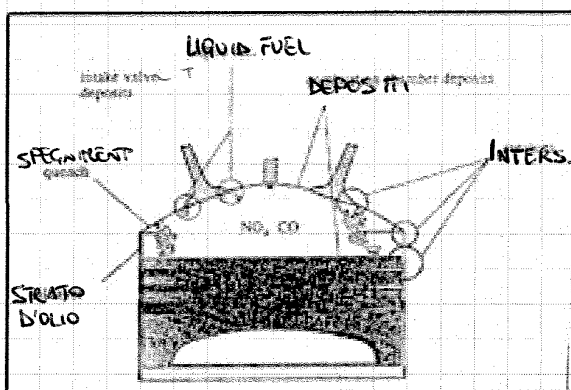
$THC - NMHC = CH_4$

$CH_4$  è scarsamente reattivo, tuttavia è un gas serra

Gli NMHC sono più o meno reattivi, ma non hanno un grande impatto in termini di gas serra

Nel caso dei motori, si parla di carboni incombusti, cioè di quei composti organici che è possibile misurare secondo le normative, con uno strumento chiamato FID (Flame Ionization Detector).

## GENERAZIONE HC



In campo di combustione possono avvenire dei fenomeni che per cui una frazione di combustibile non partecipa al processo di combustione: fenomeni definiti SORGENTI

## STRATO D'OLIO

Sulle pareti, considerate la lubrificazione, è presente olio.  
Parte degli idrocarburi, nella camera di combustione  
possono diffondere nell'olio non partecipando al processo  
di combustione. terminate la combustione, nella camera  
di combustione la concentrazione di combustibile è  
minore rispetto a quella presente nell'olio: questo si  
tratta allo scatto

## LIQUID FUEL

Si può avere soprattutto nei motori ad iniezione diretta,  
la formazione di combustibile liquido in camera che ha  
ragione difficile a risolversi con l'aria in quanto deve  
prima evaporare: parte di questo combustibile non riuscirà  
quindi ad ossidarsi, rappresentando una possibile  
sorgente di idrocarburi incombusti.

## QUENCH - SPECIAMENTO

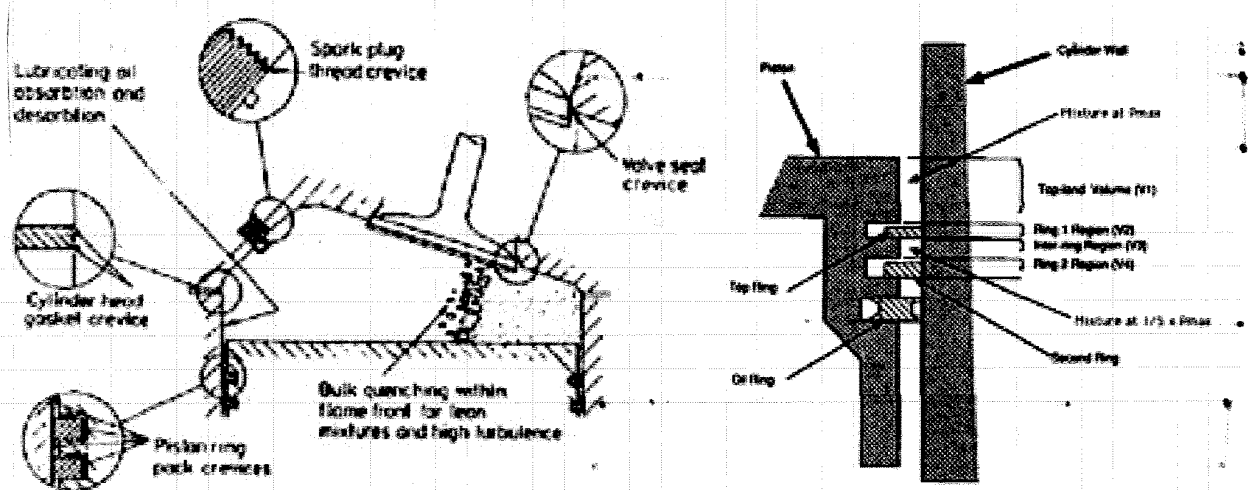
Si riferisce allo spegnimento della fiamma, in prossimità  
delle pareti, in cui viene ceduto un gran flusso di calore:  
nella zona comprese fra la fiamma e la parete vi sono  
una certa concentrazione di oss + combustibile che  
caratterizza la formazione di HC.

17-10-2012

## MECCANISMI DI FORMAZIONE HC - INTERSTIZI

Gli interstizi che comportano la formazione di HC sono:

- interstizi tra parete cilindro e stantuffo
- interstizi tra la testa e basamento - guarnizione testa
- interstizi presenti tra i filetti delle candeie



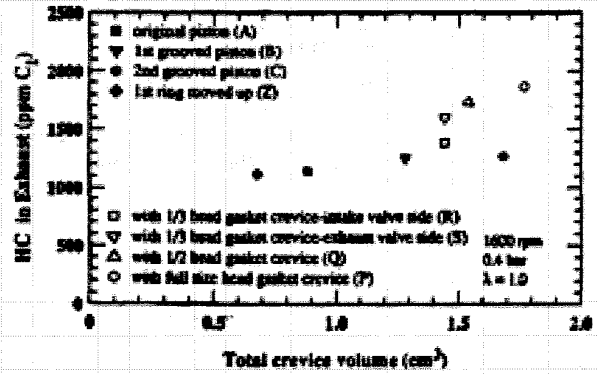
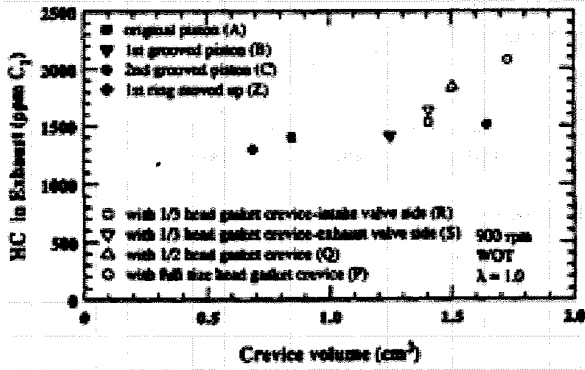
Andando a stimare il volume degli interstizi si ottiene ad avere un volume totale di circa  $1.14 \text{ cm}^3$ , in un cilindro la cui cilindrata è di  $500 \text{ cm}^3$ ; si tratta quindi di volume molto piccoli

Considerando un modello per copire ciò che accade, prendiamo in considerazione l'EQUAZIONE DI STATO e la definizione di massa.

La massa di miscela incombusta espulsa dagli interstizi può essere volutata come

$$m_{\text{scf}} = V_{\text{scf}} (p_{\text{cr}, \text{pmax}} - p_{\text{cr}, \text{pexh}}) = V_{\text{scf}} \left( \frac{p_{\text{max}}}{RT_{\text{cr}, \text{pmax}}} - \frac{p_{\text{exh}}}{RT_{\text{cr}, \text{pexh}}} \right)$$

Una soluzione sarebbe quella di ridurre i giochi e di conseguenza di aumentare la tenuta considerando regioni di carattere fisico-tecnologico (materiali, lubrificazione) si raggiungono dei limiti oltre il quale non si può andare.



sull'asse verticale il livello di HC in funzione del volume degli interstizi, con misure fatte allo scatto del motore

■ ▼ MODIFICA VOLUME INTERSTIZI PISTONE-CILINDRO

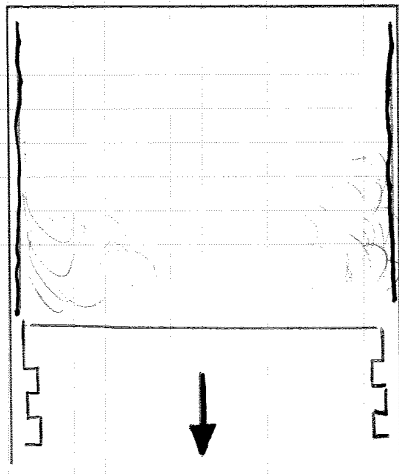
□ ▼ MODIFICA VOLUME INTERSTIZI NELLA SOSTITUZIONE DELLE TESTE

■ ▼ passando da un volume di 0,7 ad un volume di 1,7 si ha un'aumento del 15% degli interstizi

□ ▼ partendo dalla struttura originale (■) fino ad arrivare al (□) si osserva che raddoppiando il volume le emissioni di HC aumentano del 50%

Conviene quindi concentrare gli sforzi sugli interstizi delle teste: e anche di sforzo si ottiene un beneficio maggiore.

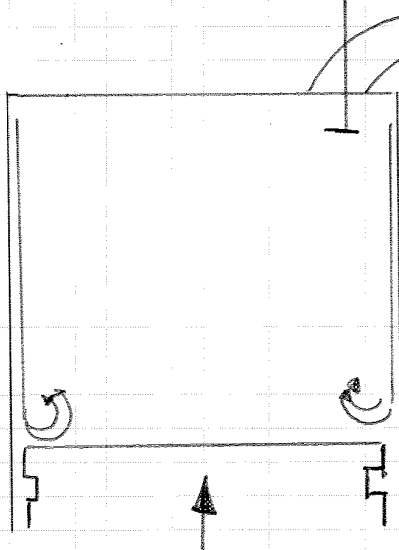
FASE DI ESPANSIONE



Bisogna considerare che all'interno delle camere di combustione ci sono dei moti piuttosto turbolenti, importanti in quanto si vanno a creare vortici vortici ricchi di energia cinetica che progressivamente trasferiscono la loro energia e macrovortici sempre più piccoli che vanno a riattivare la combustione.

Cause questi macrovortici parte dei gas incombusti ultrasuoni sulla parete viene "stappato" dalla parete: lo strato di gas a parete tende ad dissociarsi, con parte dei gas portati all'interno della camera di combustione, in cui le T sono molto più alte rispetto alla T parete, andando probabilmente a ossidare quasi completamente. Non si va a ossidare solo lo strato che rimane a parete

Nella successiva fase



di scacco, con lo sterntuffo che muove il suo moto. E la valvole di scacco che si apre, ~~la~~ lo strato rimasto a parete viene praticamente riscivato dallo sterntuffo che lo raccoglie in una sorta di vortice ricco di HC, e successivamente trasportato allo scacco. Questi inoltre si riscivano

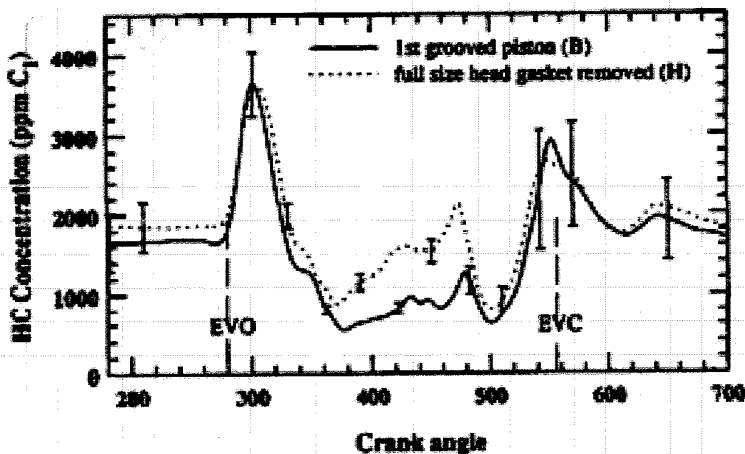
con gas ancora caldi, subendo ulteriori ossidazioni. Porzelli



si considerano 2 casi:

- pistone originale
- pistone fresato con diametro di interstici

si osserva un aumento di HC proprio in corrispondenza dello scacco forzato coerentemente con le analisi fatte



si considerano gli interstici testa-cilindro in questo caso il picco di HC si riferisce in corrispondenza dello scacco spontaneo (apertura delle valvole) coerentemente con le analisi fatte

## 2- STRATO DI OLIO LUBRIFICANTE

Questo strato si trova in camera di combustione a contatto con la parete.

In un motore ad acc. compresso, nella fase di compressione, in camera sono presente una concentrazione di combustibile elevata.

Considerato l'olio a parete, parte del combustibile va a diffondere nell'olio: la concentrazione di combustibile tende a diminuire mentre quella dell'olio va ad aumentare. L'olio occulto parte del combustibile

per conoscere la massa di combustibile disciolta nell'olio lubrificante scriviamo

$$\tilde{x}_f = \frac{n_{f,o}}{n_{f,o} + n_o}$$

- $n_{f,o}$  numero di mole di combustibile disciolte nell'olio lubrificante
- $n_o$  numero di mole di olio

SE  $n_o \gg n_{f,o} \longrightarrow \tilde{x}_f = \frac{n_{f,o}}{n_o}$

$$\tilde{x}_f = \frac{n_{f,o}}{n_o} = \frac{m_{f,o} / M_f}{m_{oil} / M_{oil}} = \frac{M_{oil}}{M_f} \frac{m_{f,o}}{m_{oil}} = \frac{M_{oil}}{M_f} \cdot W_{INTERFACE}$$

- $M$  = MASSA MOLARE
- $m$  = MASSA

$$W_{INTERFACE} = \frac{m_{f,o}}{m_{oil} + m_o} \approx \frac{m_{f,o}}{m_o} \quad (m_{f,o} \ll m_o)$$

scrivendo la legge di HENRY

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

$$\tilde{x}_f = \frac{M_{gas}}{M_f} \cdot \frac{p}{H} \cdot Y_{INTERFACE} \quad (p = \text{PRESSIONE IN CAMERA})$$

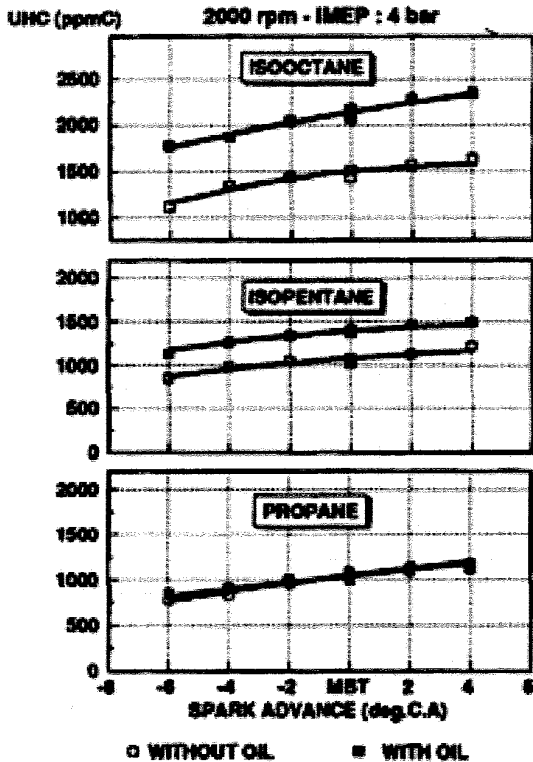
- $W_{INTERFACE}$ : CONCENTRAZIONE IN MASSA di combustibile nell'olio  $\frac{m_{f,o}}{m_o}$
- $Y_{INTERFACE}$ : CONCENTRAZIONE IN MASSA di combustibile in camera  $\frac{m_{f,cyl}}{m_{gas,cyl}}$

eguagliando le due espressioni

$$\frac{M_{oil}}{M_f} W_{INTERFACE} = \frac{M_{gas}}{M_f} \frac{p}{H} Y_{INTERFACE}$$

$$W_{INTERFACE} = \frac{M_{gas}}{H M_{oil}} p \cdot Y_{INTERFACE}$$

- più è alta  $p$  maggiore è la diffusione del combustibile nell'olio.



Andando a confrontare il modello con i dati sperimentali, si considerano test con olio normale □ e con aggiunta di olio ■ (spruzzato sulle teste dello stantuffo per vedere l'effetto sui carboni incombusti)

ISOTANO: in presenza di olio lubrificante COSTE HC ↑

La differenza tra "olio normale - olio aggiunto" va a diminuire progressivamente man mano che i combustibili

sono più leggeri.

Si nota anche come l'andamento varia in base all'angolo di rotazione (spark advance)

MBT → MAXIMUM BRAKE TORQUE TIMING (anticipo che dà la massima coppia)

Anticipando l'anticipo (spostandosi quindi verso sinistra) le pressioni in camera si abbassano:

- gli interstizi madano di meno (meno masse accumulate negli interstizi)
- la massa di combustibile che diffonde nell'olio è minore

Anticipando rispetto al MBT (spostandosi verso destra) le pressioni in camera aumentano: maggiore produzione di HC.

di HC per il 10-25%

### 3-CCDS

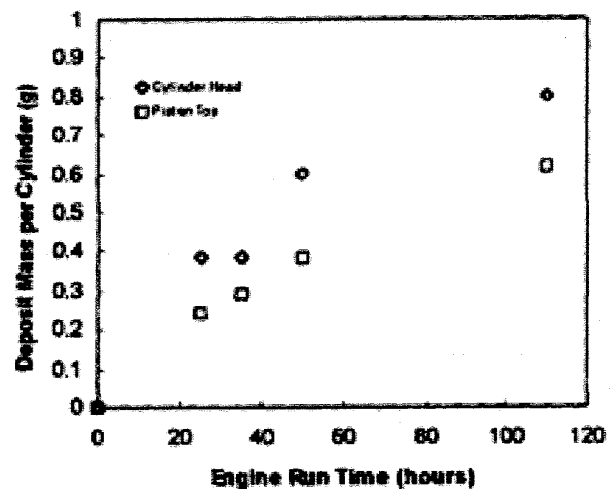
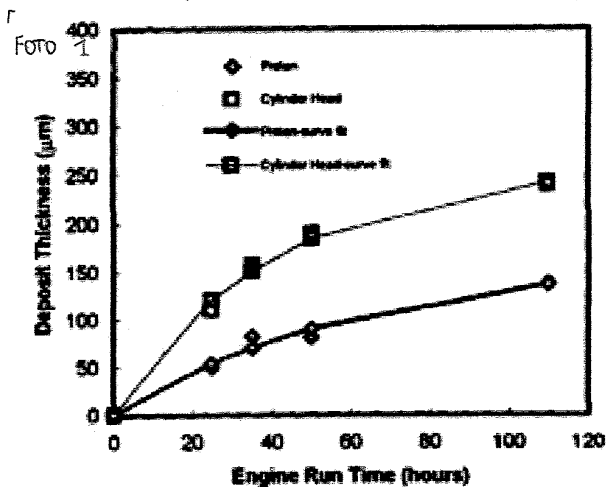
Dopo percorrenze di molte migliaia di km, nella camera di combustione dei motori si formano depositi: CCDS.

Depositi che possono essere ossidi di piombo (motori con benzina con piombo tetraetilico) o costituiti da materiale carbonioso (motori alimentati con benzina verde)

I CCDS risultano dalla combinazione della condensazione del combustibile e della sua ossidazione durante le ripetute decensioni.

A parete va depositata, una ragnuca di tipo poroso che:

- si comporta come interstizio se i pori sono grandi
- se i pori sono piccoli interviene la diffusione



Nei diagrammi si vede in evidenza come lo strato carbonioso, in funzione delle ore di funzionamento del motore, tende a crescere inizialmente per poi stabilizzarsi: questo accade perché lo strato carbonioso è caratterizzato da bassa conducibilità termica, per cui il flusso di calore a parete si diminuisce progressivamente.

- COMBUSTIBILE LIQUIDO IN CAMERA

PER MOTORI ad ACCENSIONE COMUNITA distinguamo

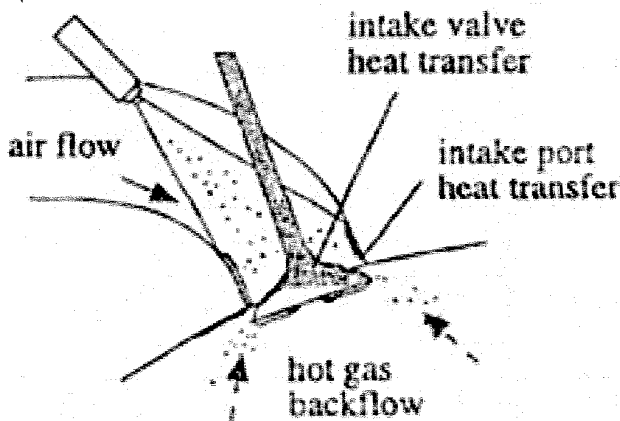
- INIEZIONE DIRETTA

- MOTORI PFI

• INIEZIONE DIRETTA: con l'iniettore che lo spruzza sulla parete, si deve considerare liquido in camera, così, deturmo anche il riaccolimento dell'iniettore.

• MOTORI PFI

FOTO 3



L'iniezione avviene nell'collettore di aspirazione, generalmente con la valvola di aspirazione chiusa: lo spray viene mandato sul metallo delle valvole caratterizzate da T elevate che portano a evaporare il combustibile.

Anche in questo caso, analizzando la fisica, parte del combustibile finisce sulle pareti laterali del condotto, depositandosi, considerando la T più bassa.

All'apertura della valvola di aspirazione (in anticipo rispetto al PMS), considerando le sottopressioni, comporta il reflusso di gas caldi verso il condotto di aspirazione, che durante e dopo l'apertura parte del combustibile liquido nella successiva espansione, viene richiamato all'interno del cilindro e trasportato anche combustibile liquido, depositato sulle pareti del condotto, verso le camere di combustione.

Le misure effettuate nel condotto di scarico con analizzatori a ionizzazione di fiamma a risposta rapida hanno mostrato un periodo durante il quale le concentrazioni di HC nel condotto mentre la valvola di scarico è chiusa.

Si ritiene che tali picchi (X) siano dovuti a trasferimenti intermittenti della carica all'interno la tenuta sede-parallelo della valvola di scarico chiusa.

### CONCENTRAZIONE DI HC (ppm)

Gli strumenti utilizzati nelle misurazioni di HC sono degli analizzatori della FID, che misurano la concentrazione in volume (%) (parti per milione ppm)

Si può notare

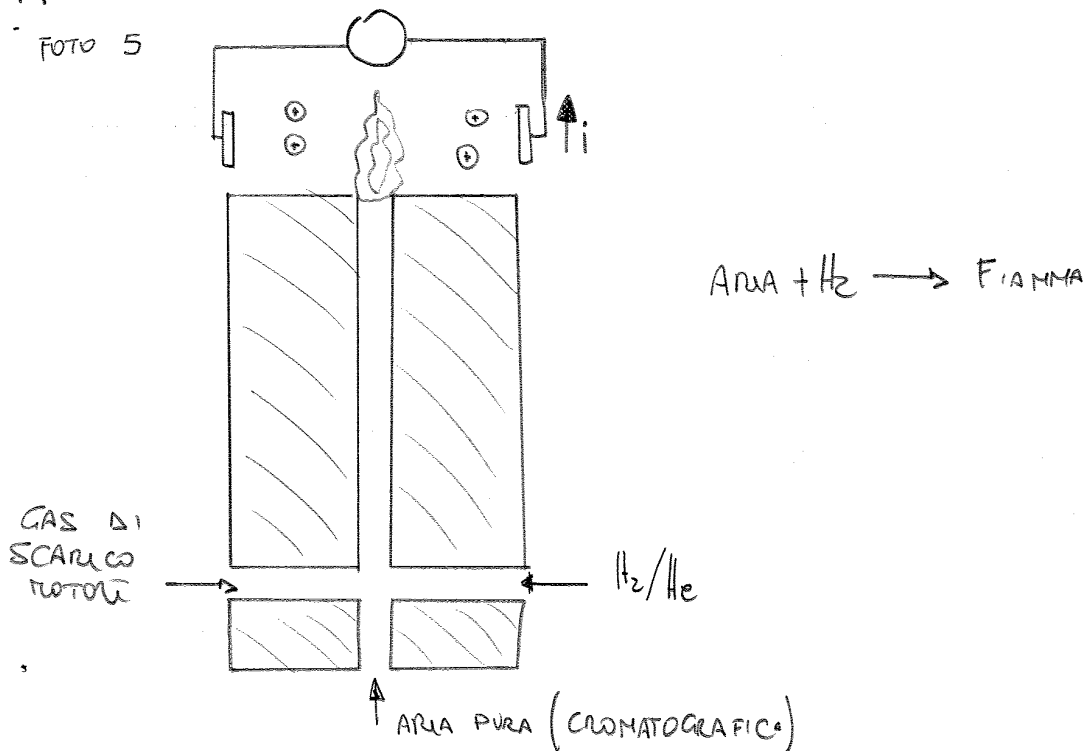
ppm

ppm C<sub>2</sub>

ppm C<sub>2</sub>

ppm C<sub>3</sub>

FOTO 5



le 2 temperature sono differenti

ppm C<sub>3</sub> → GAS CHE PRESENTA 3 atomi di carbonio

ppm C<sub>6</sub> → GAS CHE PRESENTA 6 atomi di carbonio

Il problema è quello di riportare tutto in ppm C<sub>1</sub> (CH<sub>4</sub>)

GAS	PPM	
	ppm C <sub>1</sub>	SENSORE letti 3333
TARATURA 10000 ppm C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	ppm C <sub>3</sub>	10000
10000 ppm C <sub>6</sub>	ppm C <sub>6</sub>	SENSORE letti 20000

Per evitare il problema si identifica una convenzione

ppm ⇒ ppm C<sub>1</sub>

- Cons. detrendo per esempio gli HC prodotti dagli interstizi tra cilindro e pistone e ribaciati su uno strato di un certo spessore sulla parete, parte di questo strato può venire trasportata per effetto dei moti turbolenti presenti in camera e trasportata al centro della camera, portando subito in processo di ossidazione sostanzialmente completo
- Altro fenomeno di trasporto riguarda per esempio lo straterello vicino a parete, che prima di raggiungere lo scacco subisce un processo di trasporto legato al movimento dello straterello verso l'alto raccogliendo in un vertice gli idrocarburi incombusti, subendo anche un processo di ossidazione considerato le T elevate nella fase di scacco forzato.

Per trasporto bisogna considerare anche il fenomeno del riscalamento: quando gli HC sono trasportati possono subire anche un processo di riscalamento con ciò che è presente nella zona in cui vengono trasportati (camera di combustione - correnti di scacco).

## OSSIDAZIONE

Tutti i processi di formazione degli HC descritti in precedenza producono HC o T prossimi a quelli della parete. L'ossidazione è un processo chimico in cui l'idrocarburo va a reagire con l'ossigeno.

L'avvio delle reazioni di ossidazione è subordinato all'aumento di temperatura degli HC, che si può realizzare per effetto di un riscalamento degli HC stessi con la camera combusta.



Posso in questo modo sia simulare l'ossidazione completa degli HC ma soprattutto valutare la COSTANTE DI TEMPO CARATTERISTICA DEL FENOMENO

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

COSTANTE DI TEMPO CHE PUÒ ESSERE UTILE PER CAPIRE QUANTO È VELOCE L'OSSIDAZIONE RISPETTO AD ALTRI FENOMENI.

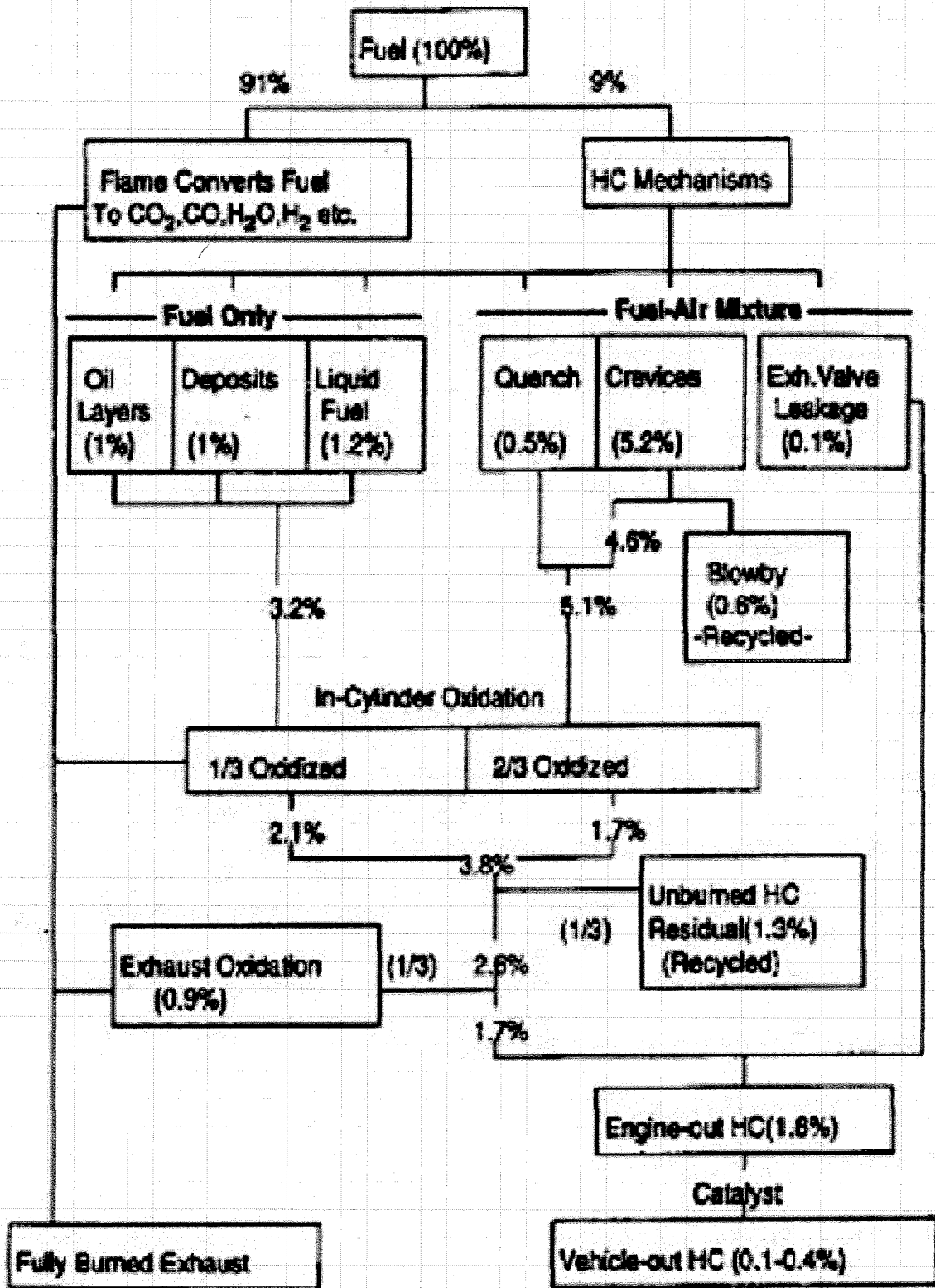
$\tau_{CH}$  CHE DIPENDE DA  $T$ :

- PER  $T > 1250 K$  ( $T$  CARATTERISTICO DELLA CORONA ALL'INTERNO DEL CILINDRO PURA CHE AVVERSA LA FASE DI SCARICO SPONTANEO) SITUAZIONE CHE  $\tau_{CH} < 1 \mu s$ , COSTANTE DI TEMPO QUASI ASSOCIABILE ALL'OSSIDAZIONE DEGLI HC CHE VENGONO STRAPPATI ALLA PARETE DEL CILINDRO E PORTATI VERSO LA CORONA PURA DELLO SCARICO SPONTANEO.

QUESTO FA SÌ CHE IL PROCESSO DI OSSIDAZIONE NEL CILINDRO SIA CONTROLLATO DAL MISCOLOMENTO DEGLI HC CON I GAS COMBUSTI ENTRA DALLA CHIMICA CHIMICA: QUESTI HC SONO CONTATTO CON LA PARETE E QUINDI FREDDI DEVONO VENIRE TRASPORTATI IN SENSO ALLA CORONA E ATTIVATE IN UNA ZONA PIÙ CALDE.

SE MISCOLOMENTO DEL MISCOLOMENTO IN TEMPO MISCOLOMENTO AD OSSIDAZIONE PIÙ VELOCEMENTE.

AFFINCHÉ GLI HC POSSANO OSSIDARSI, È NECESSARIO CHE QUESTI MISCOLOMENTO E MISCOLOMENTO IN MODO SUFFICIENTEMENTE VELOCE CON LA CORONA: LE  $T$  SANO TALI CHE LA COSTANTE DI TEMPO CARATTERISTICA SIA COSÌ BASTA CHE L'OSSIDAZIONE AVVERSA COMPLETAMENTE.



Consideriamo un combustore, in cui, introducendo una certa quantità di combustibile anche se o volente o no, di questo combustibile allo scarico rimane come HC e questo

1,7% FUEL AIR)

DI QUESTI HC CHE sfuggono allo scarico, tutti subiscono il processo di ossidazione parziale e una porzione di questi può ossidare anche completamente (quella più reattiva, dipende dalle condizioni di funzionamento del motore). Considerando una combustione media circa 1/3 ossidate completamente.

il resto (1,7%), subisce l'ossidazione parziale, attraverso il sistema post-trattamento:

- MOTORE ACC. COMANDATA PFI → CATALIZZATORE A 3 VIE  
si ottiene ad ogni ciclo una quantità di HC allo scarico pari a 0,1%!

- MOTORE ACC. COMANDATA GDI (iniezione diretta)  
occorre distinguere tra CARICA OMOGENEA o CARICA STRATIFICATA

In un sistema a carica omogenea è possibile sfruttare il sistema post-trattamento basato sul catalizzatore a 3 vie che permette di ossidare HC e CO riducendo inoltre gli NO.

Procedimento che può essere fatto lavorando nel campo dello stocchiometrico in quanto è presente l'ossigeno necessario

Per un motore a carica stratificata (che lavora nel campo del povero) non è possibile sfruttare il catalizzatore a 3 vie.

Un'altra causa che porta alla formazione di HC è legata al fatto che il combustibile incompleta nitrogenisi in modo caratteristico con la parete depositandosi su queste in forma liquida, non mescolandosi con l'aria in tempo e quindi bruciare.

Alle alte velocità può essere insufficiente il tempo a disposizione per le evaporazioni delle gocce: se le vaporizzazioni e insufficienti si possono dire grosse gocce di liquido circondate da una fiamma di tipo diffusivo.

NEI MOTORI ad ACCENSIONE comandate, i livelli di CO allo SCORICO possono ESSERE significativi ed il loro controllo può risultare critico soprattutto quando è richiesto l'arricchimento della miscela (ACCELERAZIONE ed ARRIVAMENTO a FREDDO)

### MECCANISMI DI FORMAZIONE DEI CO

SPESSAMENTE SI È NOTATO CHE le concentrazioni di CO allo SCORICO NEI MOTORI ad accensione comandata È MINORE rispetto ai valori massimi misurati all'interno delle camere di combustione, ma È CONSIDERABOLMENTE MAGGIORE dei livelli corrispondenti all'EQUILIBRIO CHIMICO nelle condizioni di SCORICO. PERTANTO i PROCESSI CHE DETERMINANO le quantità di CO allo SCORICO sono controllati dalla CHIMICA CHIMICA.

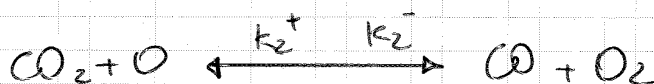
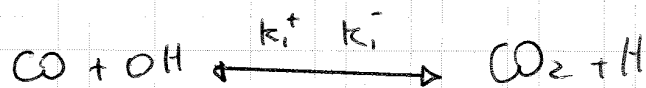
il processo di ossidazione degli idrocarburi può essere sintetizzato come



R = radicale di un IDROCARBURO

IPOTIZZATO CHE il CO sia in condizioni di p-T MASSIME, PER ALLE CONDIZIONI di EQUILIBRIO.

il CO VIENE QUINDI OSSIDATO in CO<sub>2</sub> ad una velocità minore



In realtà, per una miscela povera, se si considera il modello la concentrazione di CO è nulla:  $CO\% = 0$ .  
Per valori molto sperimentali la % di CO pur essendo piccola non è nulla. Questo perché nel campo del punto si ha un'ulteriore estrazione di CO: in questo caso infatti le T sono più basse, l'ossidazione degli idrocarburi incompleti è più difficile, con conseguente presenza di prodotti di parziale ossidazione come il CO.

Questo non capita lavorando nel campo dello stochiometrico/ricco poiché le T sono più alte, con ossidazione più completa, ed inoltre i prodotti di parziale combustione danno piccoli contributi trascurabili.

Allo problema si ha anche osservando la differenza in corrispondenza dello stochiometrico: il modello adottato va a sostituire la quantità di CO rispetto ai dati sperimentali.

Bisogna considerare le dispersioni da cilindro a cilindro. Supponiamo di considerare un cilindro: dati le dispersioni da cilindro a cilindro, questi non saranno correlati dalla stessa sostanza. Inoltre, anche dopo un ciclo, cause dispersioni, lo stesso cilindro non sarà correlato sempre dalla stessa sostanza.

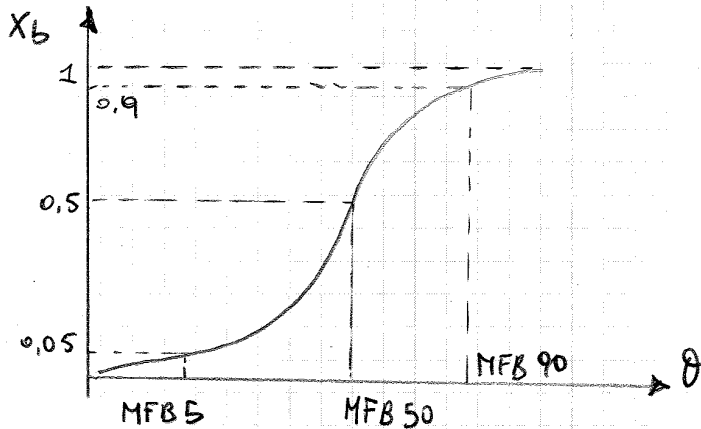
Il modello della cinetica chimica non va a tenere conto di queste dispersioni.

con  $X_b$  si indica la frazione di massa bruciata.

PER UN MOTORE ad accensione comandata con carica crescente:

$$X_b = \frac{m_b}{m_{TOT}}$$

$$m_{TOT} = m(AMA + COMBUSTIBILI + GAS RESIDUI)$$



$$X_b = X_b(\theta)$$

posso identificare dei valori chiave di  $X_b$  corrispondenti ad un certo valore di  $\theta$ :

MFB50  $\rightarrow$  angolo in cui è bruciato il 50% di carica

si individuano 2 casi

$X_b = 0.05$  masse che bruciano prima

$X_b = 0.5$  masse che bruciano dopo

Con le 2 curve si va a considerare l'evoluzione nel tempo e  $\theta$  di quelle masse bruciate in corrispondenza di quell'angolo di rinnovo, passando da UNBURNED GAS a BURNED GAS e continuando la sua evoluzione

Osservando il grafico si vede come al valore di  $X_b$  per uno stesso  $\theta$  si hanno valori di CO diversi; in particolare si hanno valori di CO con  $X_b = 0.50$

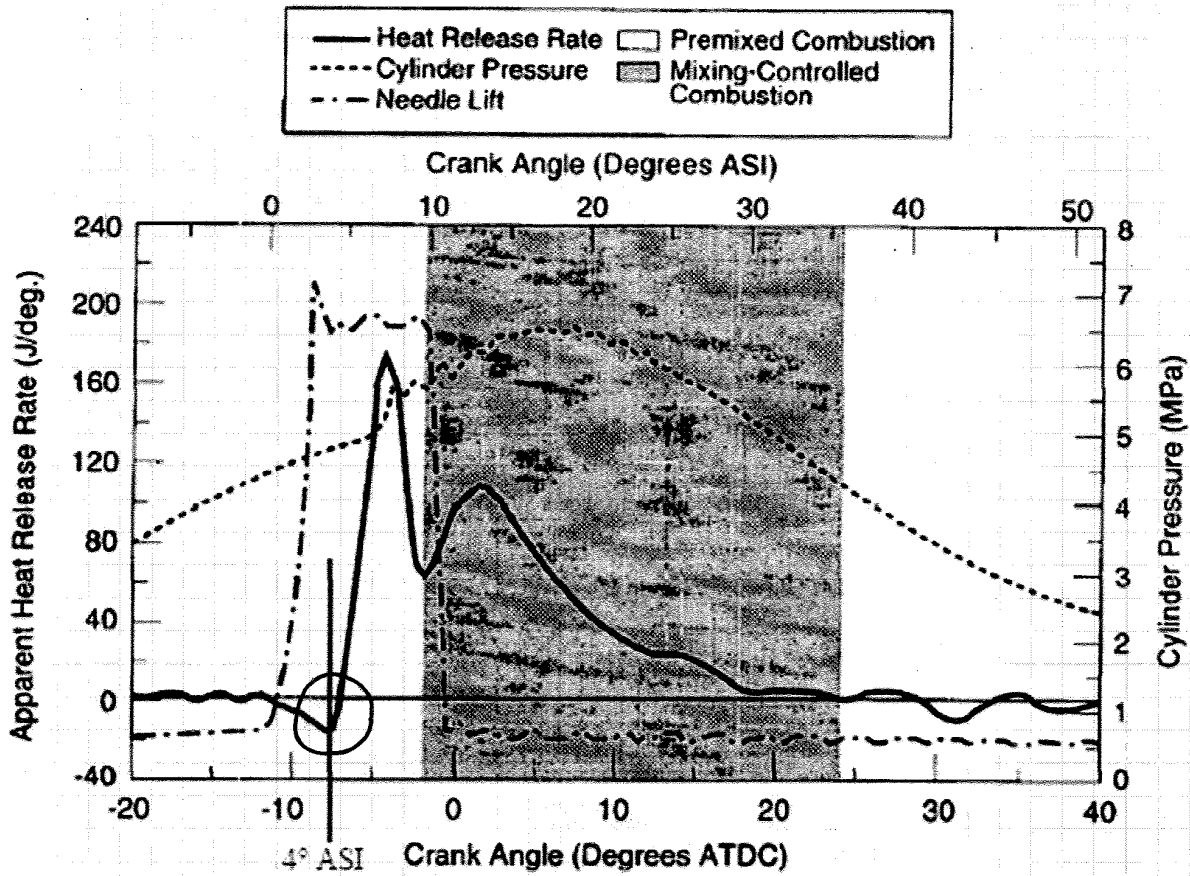
- Per miscele ricche e per miscele stechiometriche le concentrazioni allo scarico di CO sono predette con buona accuratezza dai modelli di formazione precedentemente illustrati;
- Per miscele povere le concentrazioni allo scarico di CO sono sensibilmente superiori ai valori calcolati da tutti i modelli esaminati.

La spiegazione di quest'ultimo fenomeno potrebbe risiedere nel fatto che:

- per miscele povere un contributo significativo alla concentrazione di CO deriva dall'incompleta ossidazione di alcuni degli idrocarburi incombusti che entrano in camera durante l'espansione (provenienti dagli interstizi, dallo strato d'olio e dai depositi sulle pareti).



REGIONE DEL SETTO CON COMBUSTIBILE LIQUIDO



Dove inizia la combustione?

Si può osservare l'evoluzione delle combustioni attraverso un'analisi del segnale di pressione

4 ASI → 4 gradi dopo l'arrivo dell'iniezione - inizio combustione  
 il minimo che è presente nel grafico è legato al rap  
 calore latente di evaporazione del combustibile: il combustibile raffredda e raffreddando tutto ciò che ci sta intorno.  
 Si ha quindi una riduzione dell'entità apparente

Analizzando l'andamento di  $\phi$  come mai dopo una prima riduzione ho una risalita?

Considerando una particella di <sup>COMBUSTIBILE</sup> che dilata, questa tende a evaporare. Evaporando tende a raffreddarsi ciò che ha intorno, rallentando in questo modo le penetrazioni delle particelle che seguono e che vanno ad accumularsi

## PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE

- PARTICOLATO
- CO - CO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O
- COMBUSTIBILE CHE NON RIESCE A TROVARE OSSIGENO

Le temperature raggiungono i 1600 K ~~1600~~

Alcuni idrocarburi a 1600 K iniziano a reagire e danno luogo ai così detti precursori del particolato, che danno ad degradarsi per dare origine al particolato.

Un'altra caratteristica della combustione diesel può essere fatta evidenza ad ultravioletti (burned gas) secondo:

- Elastici LASER (illuminazione particelle)
- LASER WAVED INCANDESCENZE LII (illuminazione e riscaldamento che mettono in evidenza un numero maggiore di particelle)

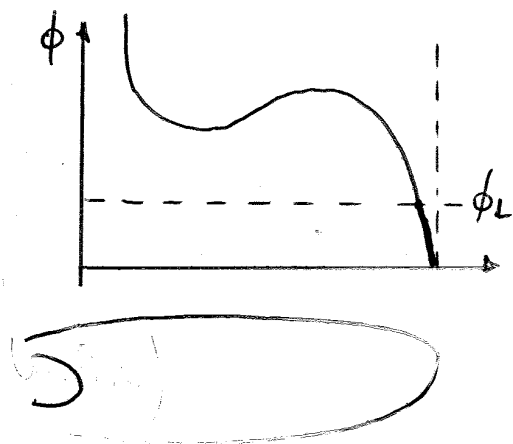
In certe per effetto dell'interazione con la parete le fiamme potrebbero spegnersi, non ossidando completamente il particolato che si troverà allo scatico.

Devo considerare che l'iniezione è caratterizzato da più getti, e la loro interazione potrebbe portare allo spegnimento delle fiamme.

Considerando il contatto tra fiamma e il combustibile che non entra in contatto con l'ossigeno, viste le alte temperature, possono avvenire fenomeni di pirolisi, con formazione di particelle differenti rispetto al particolato, che o vengono ossidate dalle fiamme diffuse in un secondo momento, oppure arrivano allo scatico.

Allo effetto legato alle fiamme diffuse è la formazione di ossidi di azoto, legata alle alte temperature, alla presenza di radicali e di ossigeno (colori verdi/blau), continuando poi la loro evoluzione, generando o decomponendo gli ossidi di azoto.

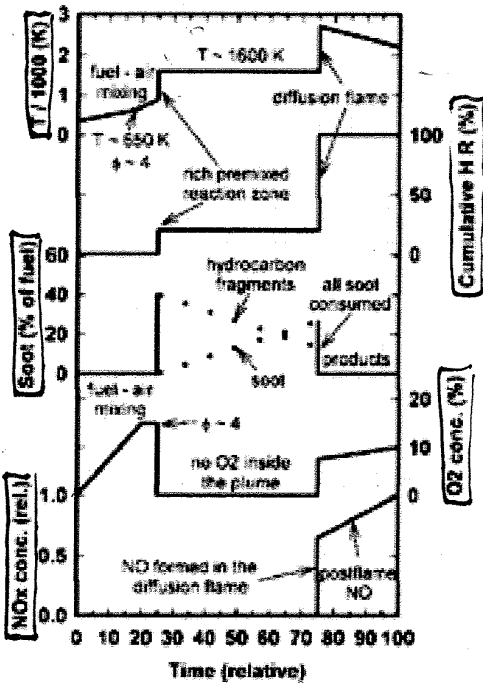
Nelle zone in cui la dose viene bruciata a zero, ci saranno delle zone con combustibile molto riscaldato come detto, con valori di  $\phi$  molto bassi, anche al di sotto del  $\phi_L$  di accendibilità: quando l'autocceensione si ama non viene coinvolta tale zona, in cui è presente del combustibile che quindi non brucia  $\rightarrow$  si producono HC secondo il processo di OVERMIXING



lo SCHEMA considerato vale PER

- INIEZIONI SINGOLE
- INIEZIONE PRINCIPALE

Schema che deve essere modificato, quando l'ipotesi in cui l'iniezione è più lunga del ritardo di accensione non vale più. In una situazione in cui l'iniezione è inferiore al ritardo di accensione cambia la distribuzione di densità nel seno al getto (iniezione pilota). la zona quindi, causa combustione, non presenterà particolato, ma considerata la T elevata, si avranno ossidi di azoto: questo perché si ha una densità prossima allo stechiometrico. Altra caso si hanno in situazioni di COMBUSTIONE AD ALTA PREMISCELAZIONE



Analizzando la figura sull'asse delle ascisse è presente il tempo relativo. Sull'asse delle ordinate si ha:

- CONCENTRAZIONE  $NO_x$
- CONCENTRAZIONE  $O_2$
- SOOT (PARTICELLE CARBONIOSE)
- RILASCIO TERMICO CUMULATO
- TEMPERATURE

## SOOT (% OF FUEL)

I PUNTI RAPPRESENTANO LA % DI PRECURSORI DI PARTICOLATO CHE VONO A FORMARSI, DERIVANTI DALLA FIAMMENTAZIONE DI IDROCARBURI, CHE VONO A DEGRADARE.

NELLE ZONE DI FIAMMA DIFFUSIVA SI HA L'OSSIDAZIONE CON FORMAZIONE DI CO<sub>2</sub> E H<sub>2</sub>O

## OSSIGENO

DURANTE LA FASE DI MESCOLAMENTO LA CONCENTRAZIONE DELL'OSSIGENO NEL GELLO SOLI, FINO A RAFFRESCERE UNA SITUAZIONE PROSSIMA A  $\phi = 4$ , SEAVE L'OSSIDAZIONE DELLA FIAMMA PREMISCELATA CON IL LIVELLO DI OSSIGENO CHE VA A ZERO (T<sub>1</sub> 1600 K).

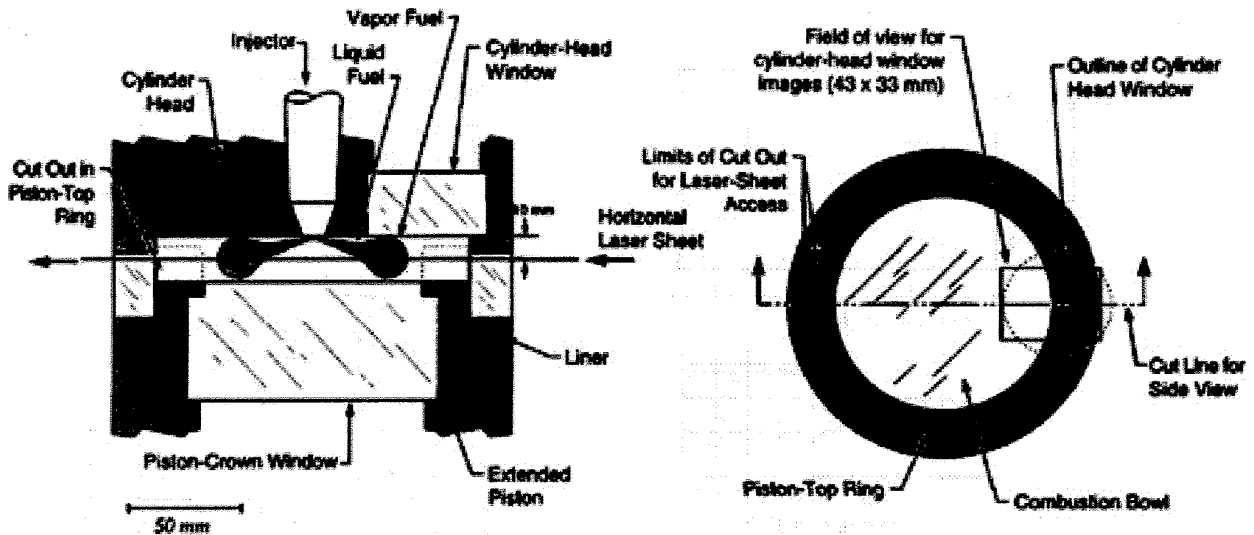
A LIVELLO DI FIAMMA DIFFUSIVA IL LIVELLO ~~DEVE~~ AUMENTA L'OSSIDAZIONE, CON UN LIVELLO DI OSSIGENO LEGATO ALLE FORMAZIONI DI BURNED GAS.

## OSSIDI DI AZOTO

SI FORMANO ALLA FINE, AL LIVELLO DELLA FIAMMA DIFFUSIVA.

POSSONO ESSERE PRESENTI PICCOLE QUANTITÀ DI NO<sub>x</sub> A LIVELLO DI FIAMMA PREMISCELATA CAUSE MECANISMI TIPO MECANISMO PROMPT.

CONSIDERANDO ANCHE IN QUESTO CASO UN MECCANISMO PILOTE LE FORMAZIONI DI NO<sub>x</sub> AVVERREBBE A LIVELLO DI FIAMMA PREMISCELATA, CARATTERIZZATO DA  $\phi$  DELL'ORDINE DI 1.



la tecnica utilizzata per l'analisi degli  $\text{NO}_x$  è della NO PLIF: fluorescenza indotta dalla luce del laser.

la fluorescenza è un fenomeno in cui, considerato un atomo, questo è eccitato lungo la sua frequenza propria, passando ad emettere un fotone. l'eccitazione deriva dalla luce del laser che risulta pulsante.

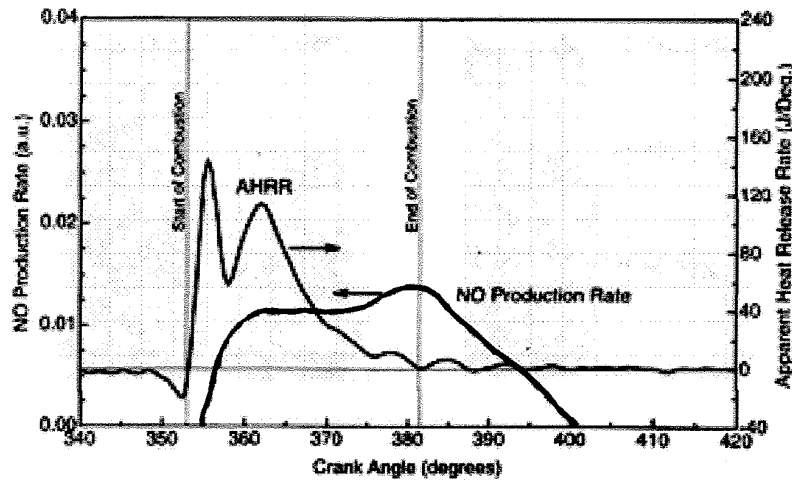
lancinando quindi fluorescenza, l'atomo viene individuato  
fotoni si vanno ad identificare la presenza di  $\text{NO}_x$

Durante il processo di combustione per effetto delle alte temperature (recombinato termico) le molecole di  $\text{N}_2$  e  $\text{O}_2$  presenti nella camera vengono decomposte in  $\text{N}$  e  $\text{O}$ . Gli atomi di  $\text{N}$  e  $\text{O}$  si ricombinano dando luogo a  $\text{NO}$  e  $\text{NO}_2$ .

Inoltre una parte di  $\text{NO}_x$  deriva dal cos. detto recombinato piropet:  
 il recombinate di reazioni a catena processo dagli atomi di ossigeno che reagiscono con i radicali  $\text{CH}$  presenti nella zona del fronte di fiamma

Altre parte degli  $\text{NO}_x$  possono derivare dal combustibile.

opportunitamente trattate, le immagini permetteranno di ottenere una corretta valutazione degli NOx.



le linee relative us ad indicare l'aumento delle velocità di produzione degli NO in funzione dell'angolo di manovella. (velocità più lenta rispetto alle combustioni)

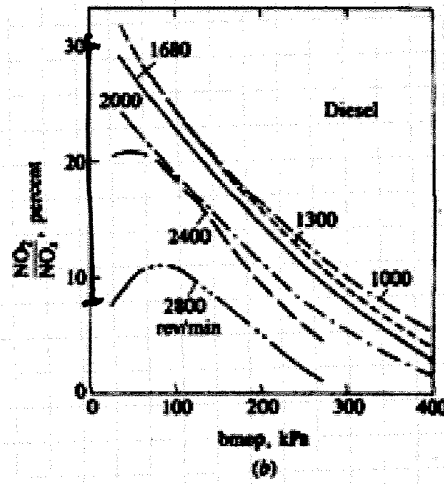
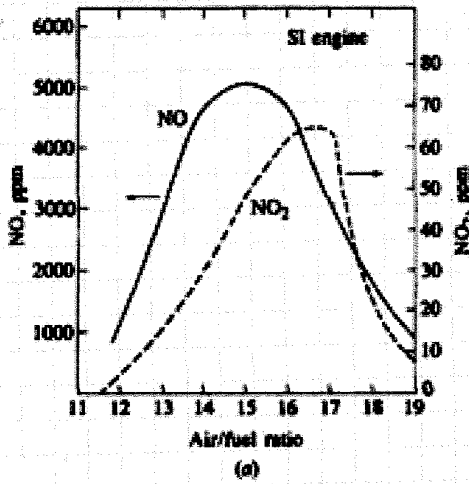
Applicando il modello della cinetica chimica (Zeldovich)  
È possibile valutare la formazione di NOx anche per  
motori diesel - Bisogna tuttavia considerare un modello  
termodinamico differente in cui distingui:

- ZONA LIQUIDA
- ZONA MISCELA
- ZONA BURNED GAS (prodotti dalle combustioni premiscelate)
- ZONA BURNED GAS (prodotti dalle combustioni diffuse)
- ZONA UNBURNED GAS

il modello termodinamico risulta quindi più complicato.

Una certa quantità di NO<sub>2</sub> allo scarico.

Di interesse risulta quindi il calcolo del rapporto NO<sub>2</sub>/NO che lo influenza i fenomeni di post-trattamento.



il meccanismo è quindi coerente con il fatto che i più elevati rapporti di NO<sub>2</sub>/NO nei diesel si trovano ai bassi carichi, freddi sono più notevoli in quanto le reazioni più fredde che possono consentire la decomposizione dell'NO<sub>2</sub>

MECCANISMO TERMICO

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2 \left\{ 1 - \left( \frac{[NO]}{[NO]_e} \right)^2 \right\} \left( \frac{R_2}{1 + \frac{[NO]}{[NO]_e} \frac{R_1}{R_2 + R_3}} - \frac{R_6}{1 + \frac{R_6}{R_4 + R_5}} \right)$$





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

- Eccessivo rimescolamento locale con aria OVERMIXING.

In alcune zone della camera (specialmente alla periferia dello spray) la miscela aria-combustibile può diventare troppo povera (OVER LEANING) per autoaccendersi o per sostenere la propagazione della fiamma.

- Un servizio ed un insufficiente rimescolamento locale con aria, UNDERMIXING, la miscela può essere troppo ricca per accendersi o sostenere la fiamma. - L'UNDERMIXING coinvolge soprattutto il combustibile nelle fasi finali dell'iniezione e quello che rimane nel sacco dell'iniezione.

- Una parte del combustibile introdotto all'inizio dell'iniezione può raggiungere ancora allo stato liquido le pareti della camera ed evaporare con molto ritardo senza venire a contatto con ossigeno sufficiente.

- In alcuni casi specifici, si può verificare lo spegnimento in seno alla camera (bulk quenching) durante la fase di espansione.

- Olio lubrificante del motore