

Prove Interlaboratorio Prodotti Petroliferi

Riunione Plenaria UNICHIM – 9 novembre 2011

CARATTERISTICHE OTTANICHE/CETANICHE E RISPARMIO ENERGETICO 2^a parte

Francesco Avella

Stazione Sperimentale per i Combustibili

avella@ssc.it



INNOVHUB
STAZIONI SPERIMENTALI
PER L'INDUSTRIA
Innovazione e ricerca



STAZIONE SPERIMENTALE
PER I COMBUSTIBILI

***Prove Interlaboratorio Prodotti Petroliferi – UNICHIM
UNI Milano – 9 novembre 2011***

www.ssc.it

BREVE SINTESI DELLA PRECEDENTE PRESENTAZIONE – 1

- Il fenomeno della detonazione (*knock*) nei motori SI è un processo complesso che può essere descritto in termini di “ritardo di accensione”, un parametro che dipende dalla composizione della benzina.
- Nella pratica di laboratorio le caratteristiche di indetonanza della benzina sono espresse in termini di RON e MON, mentre il comportamento nei motori di serie è descritto meglio dalla combinazione dei due parametri, nota come Indice di Ottano OI:

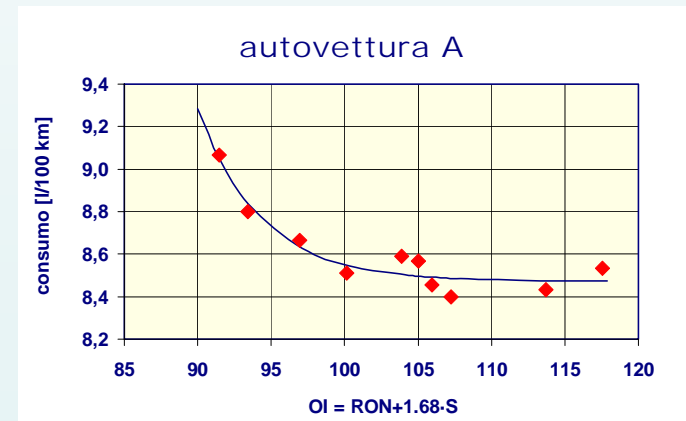
$$OI = RON - K \cdot S$$

MOTORI MODERNI { $K \sim 0$
 $K < 0$ → caratteristiche *anti-knock* elevate
se RON e Sensitivity (S) elevati



BREVE SINTESI DELLA PRECEDENTE PRESENTAZIONE – 2

- L'efficienza energetica dei motori SI è tanto più elevata quanto maggiore è il RC del propulsore, ma è ostacolata dall'insorgenza del *knock*.
- L'adattamento ottimale del combustibile con i motori di serie per conseguire la migliore *performance* può essere ottenuto attraverso la regolazione dell'anticipo all'accensione basata non solo sul rilevamento delle condizioni operative di funzionamento, ma anche sulle proprietà ottaniche della benzina se è presente un *knock sensor*.
- Con questo dispositivo è possibile regolare l'anticipo all'accensione sul valore ottimale che consente un incremento sensibile dell'efficienza del motore (potenza erogata) quando alimentato con benzine a elevato Indice di Ottano, come dimostrato sperimentalmente.
- Ciò si traduce in una diminuzione sensibile dei consumi energetici, come era stato determinato con una sperimentazione mirata.



EFFETTO DELLA QUALITÀ CETANICA SUL RISPARMIO ENERGETICO

- Il **Numero di Cetano** dei combustibili diesel è un parametro che ne caratterizza la qualità di autoaccensione: più elevato è il suo valore, minore è il ritardo di accensione, ossia la differenza tra l'istante dell'iniezione e l'istante del rilascio di energia termica (combustione).
- Il Numero di Cetano ha assunto un ruolo importante negli ultimi vent'anni in quanto è una delle caratteristiche del combustibile che influenzano sensibilmente le emissioni inquinanti dei motori diesel, con particolare riferimento a quelle degli ossidi di azoto e del particolato, come rilevato dai moltissimi studi e sperimentazioni svolte [1, 3].
- Viceversa, non è stato evidenziato alcun ruolo nell'economia dell'esercizio degli autoveicoli diesel: nessuna investigazione sperimentale riportata in letteratura è stata indirizzata verso la verifica di eventuali effetti benefici sul consumo di combustibile.



NUOVE MODALITÀ DI COMBUSTIONE NEI MOTORI

- Negli ultimi venti anni l'attenzione dei Costruttori si soffermata sulle potenzialità offerte dallo sviluppo di nuove tecnologie di combustione per realizzare motori con elevata efficienza, caratterizzati da bassissime emissioni e minori consumi energetici (sistemi HECC = *High Efficiency Clean Combustion*).
- Quella maggiormente studiata riguarda la "Combustione ad autoaccensione controllata" (in inglese CAI = *Controlled AutoIgnition Combustion*), più comunemente nota col termine:

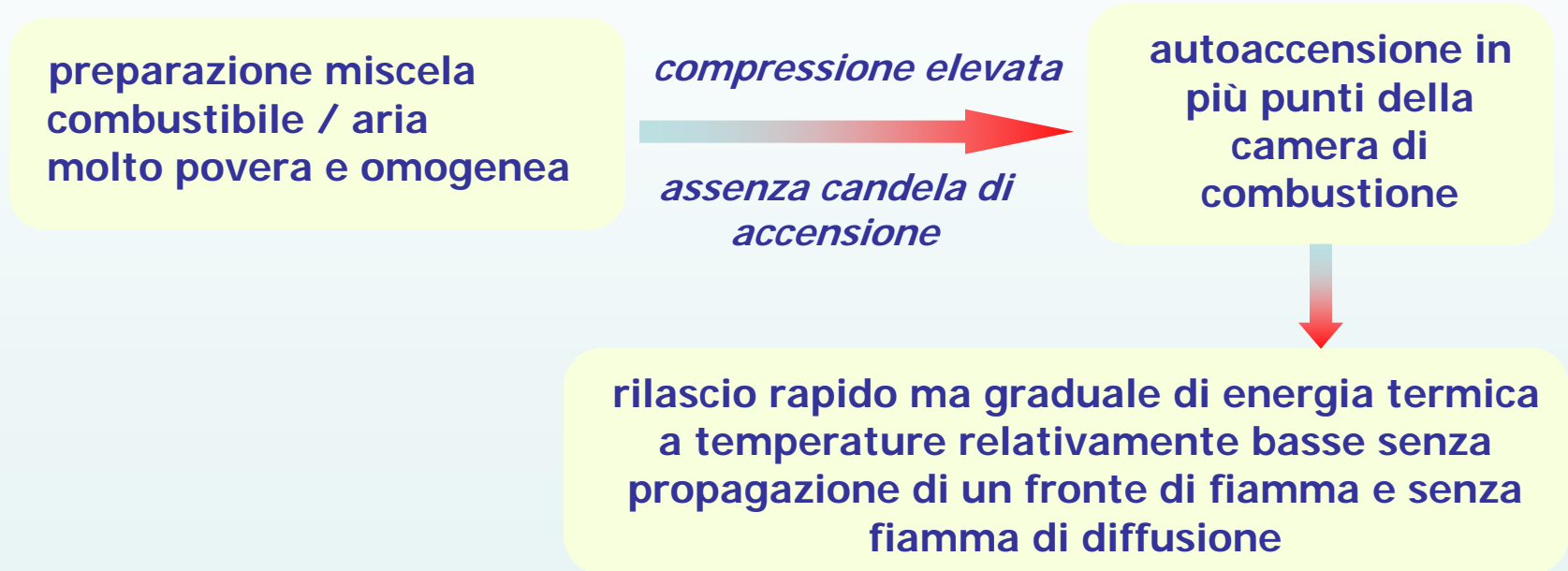
HCCI = *Homogeneous Charge Compression Ignition*

- L'ampia tipologia di tecnologie HCCI esplorata sperimentalmente [4, 5] ha indicato che la nuova modalità di combustione è caratterizzata da:
 - bassa variazione ciclica della combustione nel ciclo termodinamico
 - efficienza energetica più elevata di quella dei motori convenzionali
 - minori emissioni inquinanti, in modo particolare quelle di NOx e PM
 - ridotti consumi energetici (dal 5 al 25%).



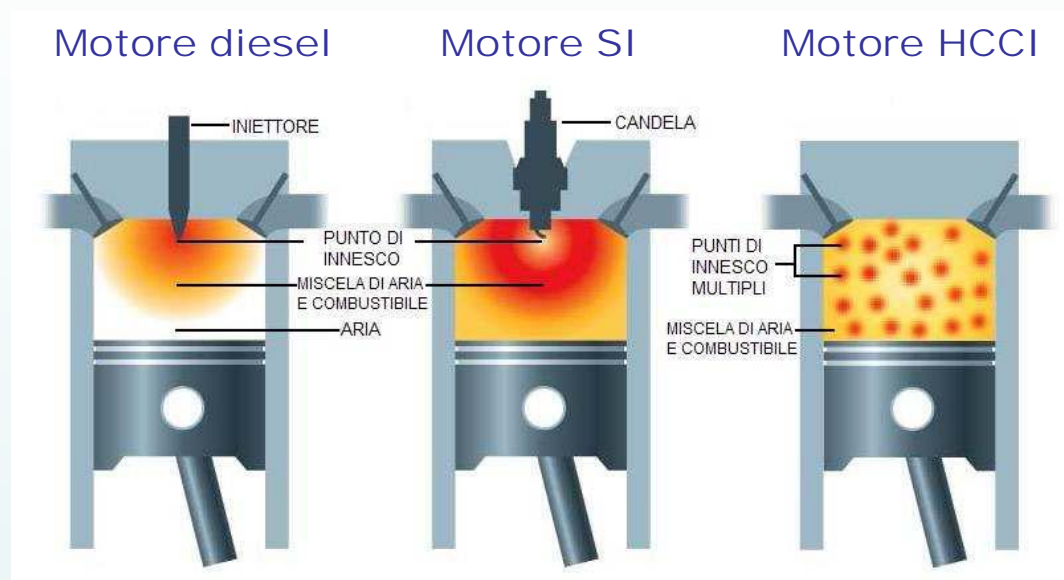
PRINCIPIO DELLA COMBUSTIONE CAI - HCCI – 1

- Il concetto su cui si basa la combustione CAI o HCCI è alquanto differente da quello tipico dei motori SI e CI convenzionali [4 – 7]:



PRINCIPIO DELLA COMBUSTIONE CAI – HCCI – 2

- In questo modo la combustione interessa la miscela nella sua interezza, a differenza di come avviene nei motori SI e nei motori diesel.



- Non essendoci la candela l'accensione della miscela combustibile/aria nel motore HCCI è controllata dalla temperatura e dalla pressione in camera di combustione, i cui valori devono essere sufficientemente elevati da innescare la combustione in più punti contemporaneamente.

CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO DEL MOTORE HCCI - 1



Nel motore HCCI l'iniezione del combustibile nel motore deve avvenire molto presto nel ciclo termodinamico, perché è necessario avere un tempo sufficientemente lungo per assicurare l'omogeneità della miscela prima dell'innesco della combustione in prossimità del PMS.

fattori controllanti
l'autoaccensione



profilo di temperatura
profilo di pressione
in camera di combustione

L'autoaccensione è espressa in termini di "**ritardo di accensione**" o "**tempo di induzione**" (τ), ossia l'intervallo di tempo che intercorre tra l'inizio dell'iniezione del combustibile nel motore e l'inizio della combustione.



CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO DEL MOTORE HCCI - 2

- La temperatura T e la pressione P nella camera di combustione sono condizionate principalmente da:
 - l'istante di iniezione ($SOI = \textit{start of injection}$) del combustibile nel ciclo termodinamico
 - la temperatura e la composizione della miscela aria/combustibile
 - il rapporto di compressione e la geometria della camera di combustione
 - il tasso di ricircolo dei gas di scarico (EGR)
- I valori corretti dei profili di T e P nella camera di combustione per innescare l'autoaccensione della miscela dipendono a loro volta dalle condizioni di carico e dal regime di rotazione del motore.
- I motori HCCI sinora sperimentati presentano una finestra di funzionamento ancora limitata a causa della forte dispersione ciclica della combustione, specialmente nelle condizioni di carico elevato, e risultano facilmente instabili.



LE CARATTERISTICHE DEI MOTORI HCCI

I motori HCCI presentano caratteristiche che li rendono maggiormente efficienti rispetto ai motori convenzionali ad accensione comandata per le seguenti ragioni:

non hanno bisogno di valvola parzializzatrice della carica così che l'efficienza volumetrica è elevata



R.C. più elevati di quelli dei motori SI, in modo da aumentare l'efficienza termodinamica (anche > 50%) e la potenza erogata (R.C. = 14:1 - 15:1)

il motore lavora con miscele molto povere ed estremamente omogenee: bassissimi livelli di emissione di NOx e PM

fase più critica della combustione CAI:

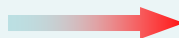
controllo dell'istante dell'autoaccensione ottimale per massimizzare la conversione dell'energia termica sviluppata in energia meccanica



REQUISITI DEI COMBUSTIBILI PER I MOTORI HCCI

- Le numerose sperimentazioni con motori HCCI [5, 6] hanno indicato che tutti i combustibili compresi nella fascia di punti di ebollizione della benzina e del gasolio possono sostenere la combustione CAI.
- Un ruolo importante nella combustione HCCI è giocato dalla costituzione chimica del combustibile da cui dipende la cinetica di reazione della combustione.
- Infatti il processo di autoaccensione si verifica attraverso lo sviluppo di reazioni di ossidazione a bassa temperatura (fiamme fredde) che portano a un rilascio rapido ma graduale dell'energia che dipende, quindi, dalla composizione del combustibile.

**requisiti del combustibile
che hanno un ruolo
importante nella
combustione HCCI**



- **bassa resistenza all'autoaccensione**
- **elevata volatilità**
- **adeguata composizione**



LE CARATTERISTICHE DI ACCENSIONE PER I MOTORI HCCI – 1

- Il **ritardo di accensione**, infatti, è il parametro chiave che regola la combustione HCCI ed è determinato principalmente dalla costituzione chimica del combustibile.

durata del ritardo di accensione (a parità di condizioni operative)

combustibili paraffinici → **olefinici** → **aromatici**

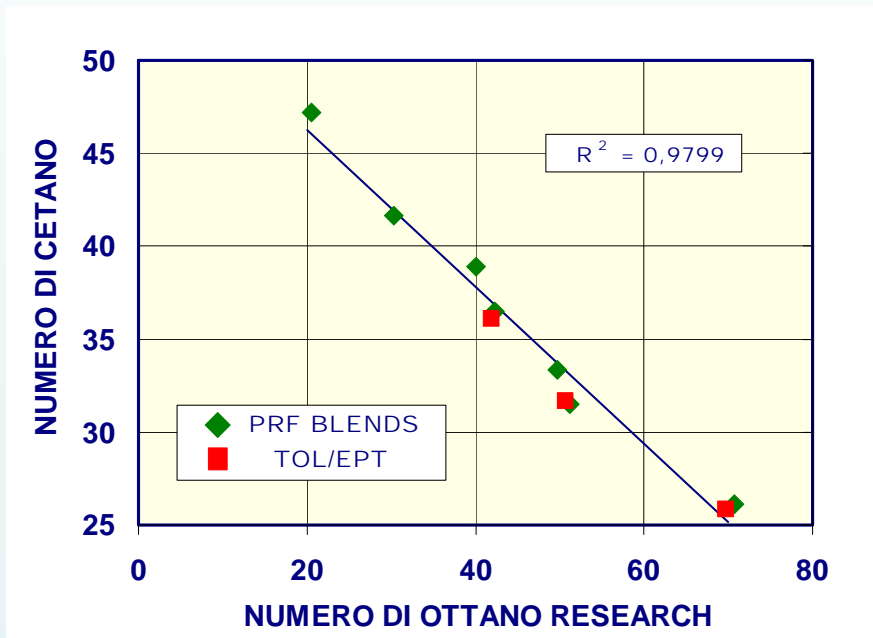


- La composizione del combustibile è un fattore cruciale nel controllo del ritardo di accensione e, quindi, dello sviluppo dei motori HCCI.
- Numerosi studi hanno indicato che è possibile alimentare un motore HCCI indifferentemente con combustibili assimilabili a quelli convenzionali (benzina, gasolio) e con miscele di entrambi, modificando opportunamente le condizioni operative e il rapporto di ricircolazione dei gas di scarico (EGR).



LE CARATTERISTICHE DI ACCENSIONE PER I MOTORI HCCI – 2

- Il ritardo di accensione dei combustibili diesel è descritto bene in termini di NC e DCN: in questo caso è intuitivo che la valutazione cetanica è strettamente correlata con la propensione del combustibile ad accendersi spontaneamente.
- Per le benzine il NO (RON, MON), o meglio l'IO, indica in modo meno intuitivo la capacità del combustibile di accendersi spontaneamente.



- I due parametri di valutazione delle proprietà di combustione risultano ben correlati tra loro:

$$NC = 54,63 - 0.421 \cdot RON$$

per $RON < \sim 70$ e $NC > \sim 25$

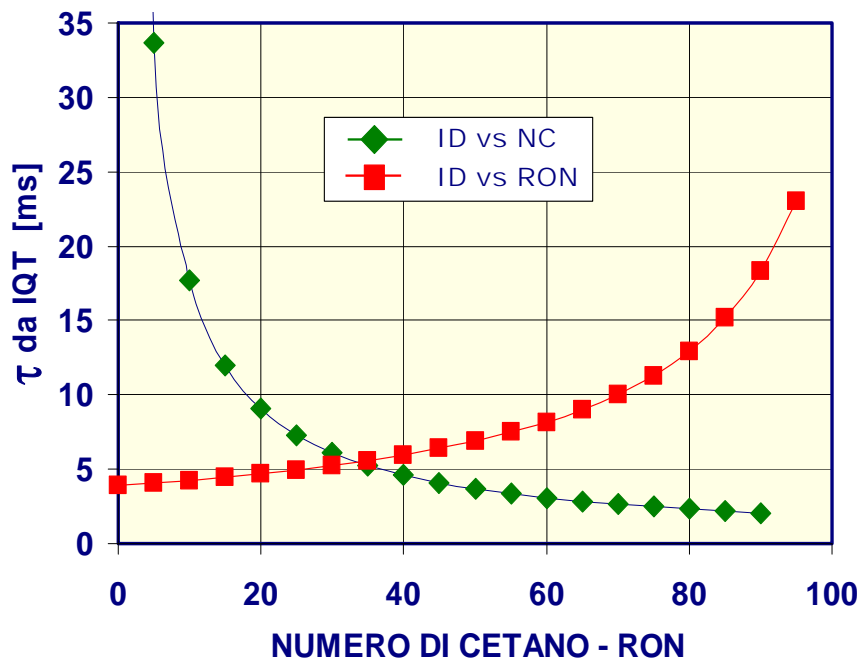
Fonte: [9]



CORRELAZIONE TRA NC E NO COL RITARDO DI ACCENSIONE

- Il ritardo di accensione τ dei combustibili diesel decresce in modo non lineare con il NC del combustibile. La relazione che li lega è quella definita sperimentalmente per la determinazione del DCN con l'IQT:

$$DCN = 4,460 + 186,6 / \tau \quad (\tau \text{ in ms})$$



- Analogamente anche per i combustibili tipo benzina il ritardo di accensione si correla in modo non lineare col NO, come valutato attraverso misure di τ di combustibili di differente costituzione in una macchina a compressione rapida [10].

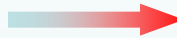
Fonte: [9]



PARAMETRI MOTORISTICI INFLUENTI SULLA HCCI

- Un altro fattore chiave per mantenere la combustione HCCI in un motore è la **fasatura di iniezione**:

valore ottimale dell'istante di iniezione (SOI) del combustibile in camera di combustione



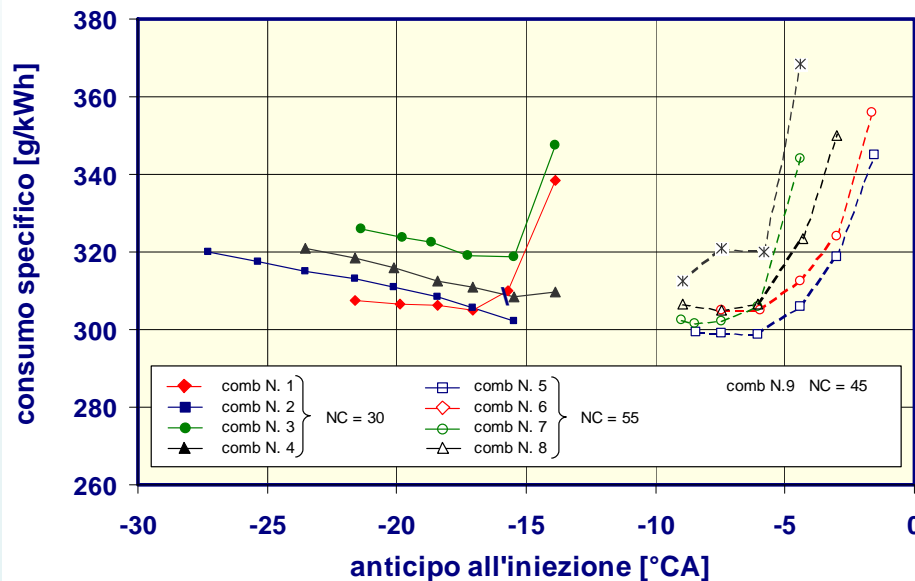
- completa vaporizzazione del combustibile
- miscelazione omogenea con l'aria aspirata dal motore
- posizione del picco di rilascio termico in prossimità o poco dopo il PMS della corsa del pistone

- Risulta quindi evidente che la regolazione della fasatura di iniezione che consente la massima *performance* del motore è correlata strettamente con le proprietà ottaniche e cetaniche dei combustibili.



EFFETTO DELLA QUALITÀ CETANICA NELLA HCCI – 1

- In una sperimentazione svolta [11] con un motore HCCI alimentato con combustibili diesel di differente composizione e, quindi con proprietà diverse, è stata osservata una notevole variabilità del SOI ottimale con la qualità cetanica del combustibile.
- Combustibili con bassi numeri di cetano portano ad alcuni vantaggi rispetto a quelli con qualità cetanica elevata a riguardo di una riduzione sensibile del consumo energetico e delle emissioni inquinanti.

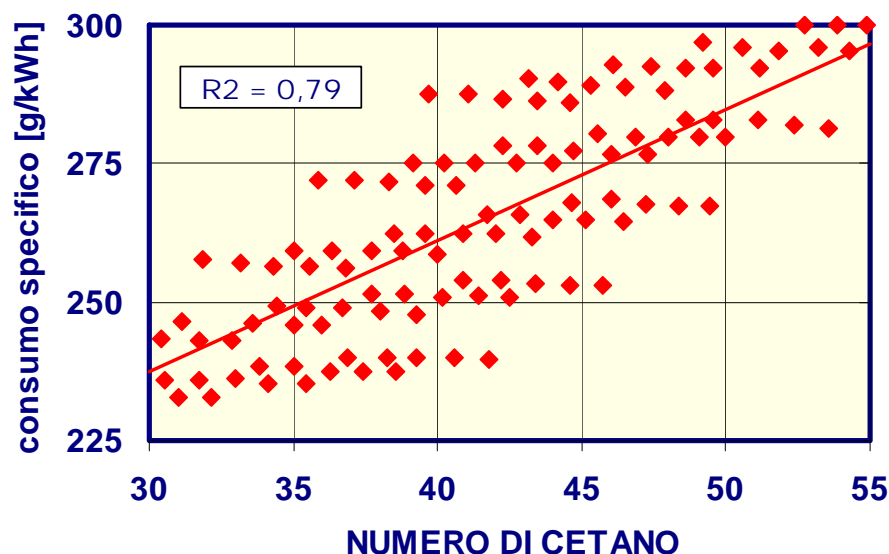


Fonte: [11]



EFFETTO DELLA QUALITÀ CETANICA NELLA HCCI – 2

- In un altro studio sperimentale [12] svolto con un motore HCCI monocilindrico alimentato con combustibili tipo gasolio caratterizzati da NC variabili tra un minimo di 30 e un massimo di 55, e con tenori differenti di aromatici e T90, è stato evidenziato come queste proprietà hanno un impatto sensibile sul consumo energetico e sulle emissioni.

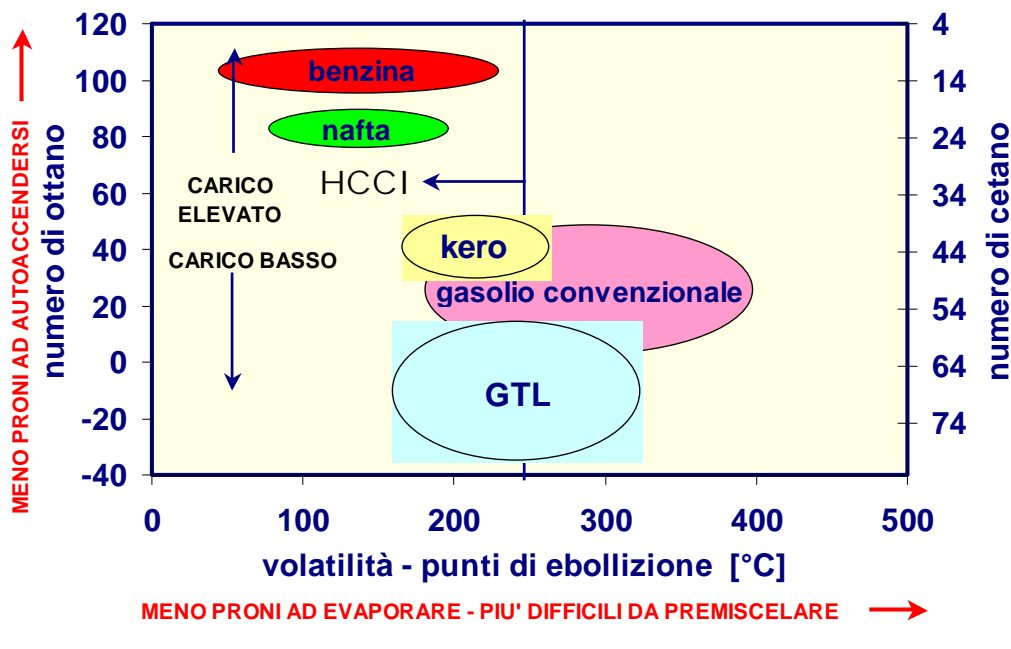


Nell'esempio riportato si evidenzia come, mantenendo costanti il flusso di combustibile iniettato e la temperatura dell'aria aspirata dal motore, il consumo energetico diminuisce se si riduce sensibilmente il NC. Un risultato simile è stato ottenuto modificando altre condizioni operative del motore.

Fonte: [12]



I COMBUSTIBILI CONVENZIONALI SONO IDONEI?



Allo stato attuale non c'è ancora alcuna chiarezza a riguardo delle proprietà del combustibile ideale per la combustione HCCI.

Le sperimentazioni svolte evidenziano che un combustibile compatibile con la combustione HCCI può essere un gasolio a basso numero di cetano ($NC < 35$) o una benzina a basso NO [13, 14].

Le benzina e i gasoli convenzionali europei della produzione corrente non risultano perfettamente idonei per alimentare i motori HCCI.

benzina eurosuper



τ troppo lungo (difficoltà di autoaccensione)

gasolio EN 590



τ troppo breve (autoaccensione troppo rapida)



INNOVHUB
STAZIONI SPERIMENTALI
PER L'INDUSTRIA
Innovazione e ricerca



STAZIONE SPERIMENTALE
PER I COMBUSTIBILI

Prove Interlaboratorio Prodotti Petroliferi – UNICHIM
UNI Milano – 9 novembre 2011

www.ssc.it

CONCLUSIONI

- La combustione HCCI rappresenta una tecnologia di combustione più efficiente di quella dei motori convenzionali SI e CI.
- Lo sviluppo di un motore HCCI con elevata efficienza termica dipende dall'efficacia e dalla precisione con cui si controlla l'autoaccensione della miscela aria/combustibile: la sfida per il prossimo futuro, infatti, riguarda la gestione del SOI necessario per ottimizzare l'istante di autoaccensione e il tasso di rilascio dell'energia termica.
- Occorreranno ulteriori investigazioni per definire le proprietà del combustibile che si adatterà meglio alle esigenze richieste dai nuovi sistemi di propulsore in via di sviluppo.
- Le caratteristiche di accensione del combustibile giocano un ruolo cruciale nello sviluppo dei propulsori HCCI: molti studi sperimentali svolti hanno dimostrato come le proprietà del combustibile ideale per supportare una combustione CAI in tutte le condizioni operative del motore sono alquanto diverse da quelle dei combustibili convenzionali.



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI – 1

1. R. Nishiumi, A. Yasuda, Y. Tsukasaki, T. Tanaka (*Toyota Motor Corp.*) – “*Effects of Cetane Number and Distillation Characteristics of Paraffinic Diesel Fuels on PM Emission From a DI Diesel Engine*” – SAE Technical Paper N. 2004-01-2960 (2004)
2. K. Takahashi, Y. Sakurai, T. Furuse, T. Sakuraba, S. Imai, T. Kezuka, R. Aki, M. Sekimoto, H. Watanabe (*Japan Petroleum Energy Center*) – “*Effects of Cetane Number and Chemical Components on Diesel Emissions and Vehicle Performance*” – SAE Technical Paper N. 2009-01-2962 (2009)
3. T.C. Zannis, D.T. Hountalas, R.G. Papagiannakis, Y.A. Levendis (*Università di Grecia*) – “*Effects of Fuel Chemical Structure and Properties on Diesel Engine Performance and Pollutant Emissions: Review of the Results of Four European Research Programs*” – SAE Technical Paper N. 2009-01-0838 (2009)
4. J. Li, H. Zhao, N. Ladommatos, T. Ma (*Brunel Univ.- Ford Motor Co. UK*) – “*Research and development of controlled auto-ignition (CAI) combustion in a 4-stroke multi-cylinder gasoline engine*” – SAE Tech Paper N. 2001-01-3608 (2001)
5. “*Advanced combustion for low emissions and high efficiency: a literature review of HCCI combustion concepts*” – CONCAWE Report 4/08 (2008)
6. “*Advanced combustion for low emissions and high efficiency - Part 1: Impact of engine hardware on HCCI combustion*” – CONCAWE Report 9/10 (2010)
7. “*Advanced combustion for low emissions and high efficiency - Part 2: Impact of fuel properties on HCCI combustion*” – CONCAWE Report 10/10 (2010)
8. J.T. Farrel, B.G. Bunting (*ExxonMobil Res. & Eng*) – “*Fuel Composition Effects at Constant RON and MON in an HCCI Engine Operated with Negative Valve Overlap*” – SAE Technical Paper N. 2006-01-3275 (2006)



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI – 2

9. G.T. Kalghatgi (Shell Research Ltd, UK) – “Auto-Ignition Quality of Practical Fuels and Implication for Fuel Requirements of Future SI and HCCI Engines” – SAE Technical Paper N. 2005-01-0239 (2005)
10. S. Tanaka, F. Ayala, J.C. Keck, J.B. Heywood – “Two-stage ignition in HCCI combustion and HCCI combustion control by fuels and additives” – Combust. Flame, **132**, pp 219-239 (2003)
11. K. Cho, M. Han, C.S. Sluder, R.M. Wagner, G.K. Lilik (Oak Ridge National Laboratory) – “Experimental Investigation of the Effects of Fuel Characteristics on High Efficiency Clean Combustion in Light-Duty Diesel Engine” – SAE Technical Paper N. 2009-01-2669 (2009)
12. B.G. Bunting, S.J. Eaton, R.W. Crawford (Oak Ridge National Laboratory) – “Performance Evaluation and Optimization of Diesel Fuel properties and Chemistry in a HCCI Engine” – SAE Technical Paper N. 2009-01-2645 (2009)
13. B.G. Bunting, E.W. Crawford, L.R. Wolf, Y. Xu (Oak Ridge National Laboratory) – “The Relationships of Diesel Fuel Properties, Chemistry, and HCCI Engine Performance as Determined by Principal Components Analysis” – SAE Technical Paper N. 2007-01-4059 (2007)
14. A. Iijima, K. Yoshida, H. Shoji, J.T. Lee (Nihon University, Japan) – “Analysis of HCCI combustion characteristics based on experimentation and simulations - influence of fuel octane number and internal EGR on combustion” – International Journal of Automotive Technology, **8**, No. 2 (2007), 137-147



CARATTERISTICHE OTTANICHE/CETANICHE E RISPARMIO ENERGETICO – parte 2

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!



Francesco Avella
Tel 02-516024.249
e.mail: avella@ssc.it



Innovazione e ricerca

INNOVHUB
STAZIONI SPERIMENTALI
PER L'INDUSTRIA



STAZIONE SPERIMENTALE
PER I COMBUSTIBILI

***Prove Interlaboratorio Prodotti Petroliferi – UNICHIM
UNI Milano – 9 novembre 2011***

www.ssc.it