

Prove Interlaboratorio Prodotti Petroliferi

Riunione Plenaria UNICHIM - 2011

***CARATTERISTICHE OTTANICHE E
RISPARMIO ENERGETICO***

Francesco Avella

Stazione Sperimentale per i Combustibili

avella@ssc.it

INTRODUZIONE

- Quando si progettano nuovi motori il costruttore deve tenere conto delle limitazioni determinate dalla qualità del combustibile disponibile sul mercato.
- In particolare la qualità indetonante della benzina costituisce il principale ostacolo alla realizzazione di propulsori efficaci, ossia caratterizzati da un elevato rendimento termodinamico.
- Le raffinerie cercano di ottenere il miglior prodotto a costi di produzione più bassi. Produrre benzina con Numeri di Ottano elevati comporta un maggior consumo di energia in raffineria.
- Lo studio RUFIT (*Rational Utilization of Fuels in Private Transport*) svolto dal CONCAWE alla fine degli anni '70 [1, 2] aveva indicato che il RON e il MON ottimali del *pool* benzine, pari rispettivamente a 95 e 85, è il miglior compromesso per avere la minima emissione globale di CO₂.

COSA E' IL NUMERO DI OTTANO

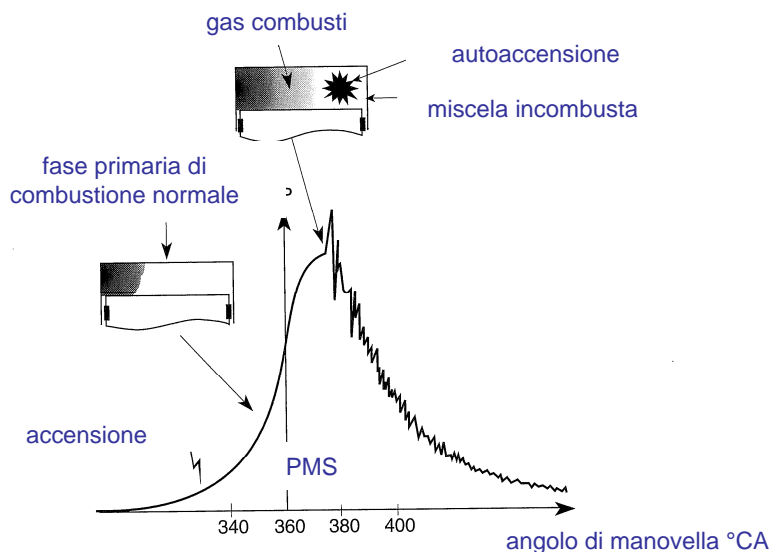
- Il Numero di Ottano della benzina è un parametro empirico che caratterizza la sua resistenza alla detonazione (*knock*).
- Esso è determinato in un motore speciale (motore CFR) per confronto del suo comportamento alla combustione con quello di miscele di due Combustibili di Riferimento Primari (PRF).
- Esistono due metodi standard:
 - metodo Research (EN ISO 5164)
 - metodo Motor (EN ISO 5163)
- I due metodi differiscono per le seguenti condizioni operative che influenzano l'insorgenza del *knock*:

PARAMETRO	RON	MON
Regime di rotazione [rpm]	600 ± 6	900 ± 9
Anticipo all'accensione [°CA]	13	diminuisce con il R.C
Temperatura della miscela [°C]	-	149 ± 1

Le condizioni operative dei motori CFR sono ben differenti da quelle di un motore di serie che risultano, a loro volta, essere molto variabili.

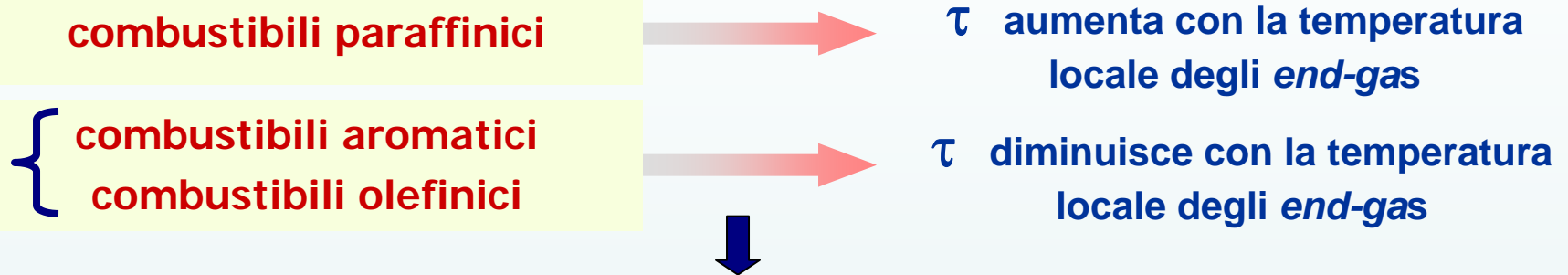
IL FENOMENO DELLA DETONAZIONE (KNOCK)

- La combustione detonante (*knock*) in un motore SI è un fenomeno complesso che causa un calo repentino delle prestazioni del motore e, quando è molto intenso, provoca anche danni irreversibili alle strutture meccaniche che lo costituiscono.
- La combustione detonante nel motore è il risultato di una catena di processi chimici e fisici che hanno come risultato finale l'accensione spontanea della miscela aria/combustibile non ancora bruciata (*end-gas*). L'autoaccensione esplosiva si manifesta con un forte impulso di sovrappressione che si propaga in modo estremamente rapido (tempi dell'ordine dei μs), la cui intensità è correlata con la velocità di rilascio locale di energia termica.

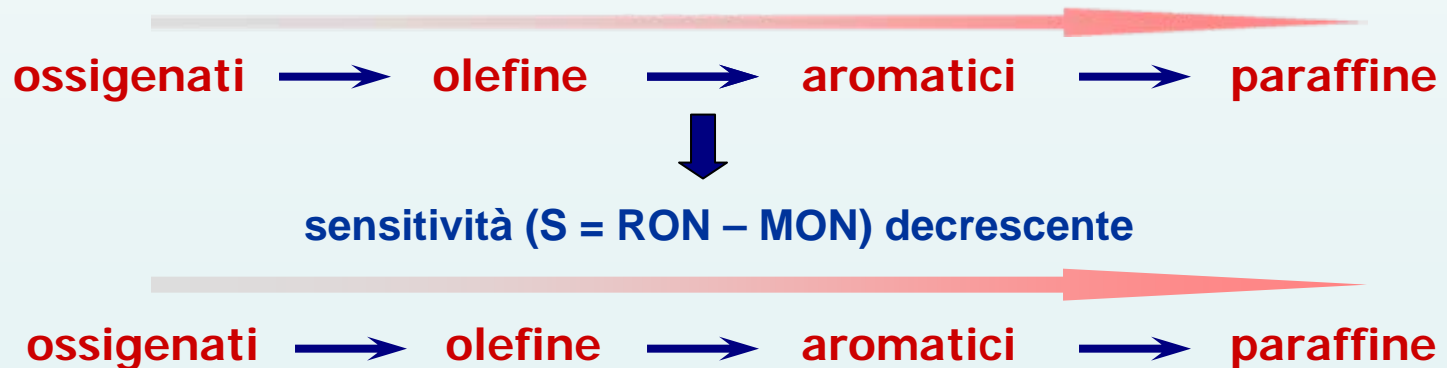


EFFETTI COMPOSIZIONALI DELLA BENZINA

Secondo molti dei modelli proposti di cinetica chimica dell'autoaccensione il differente comportamento all'accensione spontanea dei costituenti della benzina è espresso in termini di "ritardo di autoaccensione", $\tau = f(T, P)$, un parametro chiave per capire gli effetti della composizione del combustibile sulla *performance* del motore [3, 4].



qualità indetonanti sotto condizioni operative del metodo Motor (T_{mix} elevata)



L'INDICE DI OTTANO

- Il comportamento all'indetonanza (*performance*) della benzina in un motore di serie non è adeguatamente valutabile attraverso i due parametri RON e MON presi singolarmente.
- Kalghatgi [5] ha introdotto, quindi, un nuovo parametro, l'Indice di Ottano (*Octane Index = OI*), che è una funzione lineare di RON e della *sensitivity S*:

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

in cui:

- S = sensitività della benzina = RON – MON
- K = fattore peso che dipende dalle condizioni operative del motore

Valori tipici di K per i motori CFR:

- $K = 0$ per le condizioni del motore CFR-F1 (metodo Research)
- $K = 1$ per le condizioni del motore CFR-F2 (metodo Motor)

IL FATTORE K - IL CONTRIBUTO RELATIVO DI RON E MON

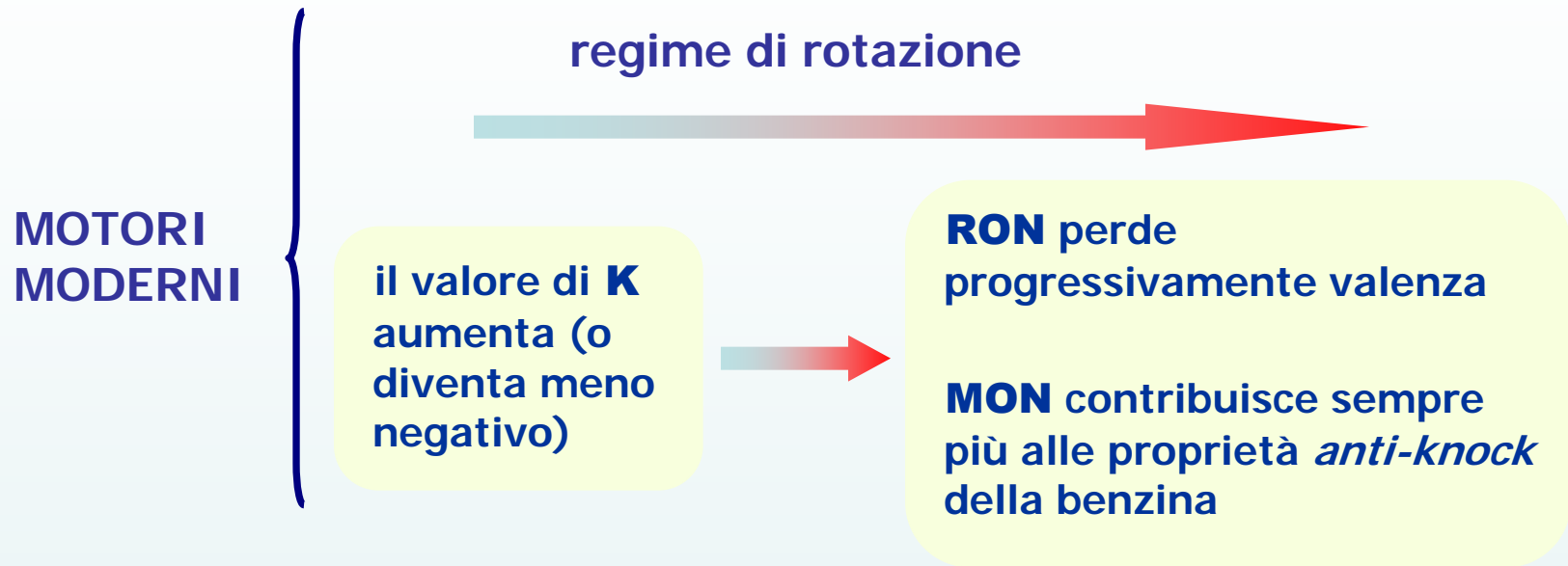
- Il valore di K indica, quindi, il contributo relativo di RON e di MON alle proprietà *anti-knock* della benzina in un motore di serie.

MOTORI MODERNI { $K \sim 0$
 $K < 0$ } → **RON = parametro predominante per qualificare il comportamento all'indetonanza della benzina**

- Pertanto le condizioni operative del metodo Research sono più rappresentative di quelle di motori tecnologicamente più evoluti rispetto alle condizioni operative del metodo Motor, perché la pressione di compressione è più elevata e la temperatura della carica più bassa rispetto ai motori di una volta [6].

MOTORI MODERNI { → **Le proprietà indetonanti della benzina diventano tanto più elevate quanto maggiore è la sensibilità S**

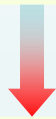
IL FATTORE K - IL CONTRIBUTO RELATIVO DI RON E MON



IL FATTORE K – DIPENDENZA DAI FATTORI MOTORISTICI

La diminuzione del valore di K con il progresso delle tecnologie motoristiche è dipesa essenzialmente dal continuo miglioramento dell'efficienza termica e volumetrica del motore.

- i motori moderni adottano un sistema di iniezione *multipoint* al posto del tradizionale carburatore, quattro valvole per cilindro e una nuova geometria della camera di combustione



- durante la fase di compressione del motore la temperatura della miscela aria/combustibile o dell'aria aspirata è diminuita progressivamente

- i rapporti di compressione sono aumentati al fine di migliorare il rendimento ideale

- talvolta è impiegato un turbocompressore associato con un *intercooler* per incrementare la potenza

IL FATTORE K – CORRELAZIONE CON LA COMBUSTIONE

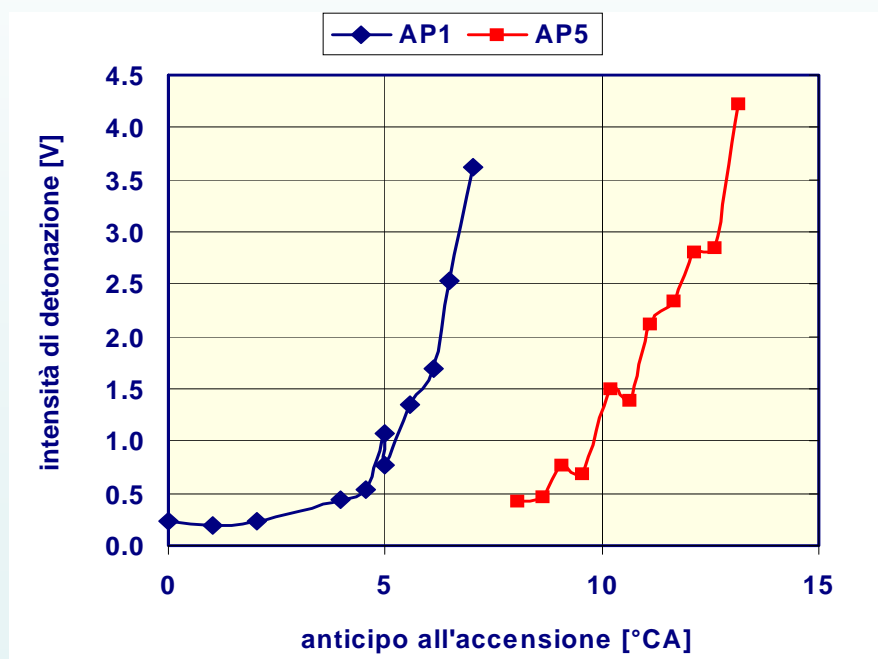
Il fattore K è correlato col
"ritardo di autoaccensione" τ del
combustibile [4]

i profili di temperatura e
pressione della carica dipendono
dalle caratteristiche
composizionali della benzina e
dalla tecnologia motoristica

il valore del "ritardo di
autoaccensione" dipende
dai profili di temperatura e
pressione della carica che
alimenta il motore

EFFETTI COMPOSIZIONALI DELLA BENZINA - 1

- Maggiore è l'anticipo all'accensione, migliori sono le prestazioni del motore, ma da un certo punto in poi l'intensità della detonazione tende a non essere più sopportabile e le prestazioni calano rapidamente.
- Così la benzina AP5 ha una qualità indetonante superiore a quella della benzina AP1 poiché il motore può funzionare in assenza di *knock* con anticipi all'accensione più elevati.



Fonte: [5]

AP1 = 95% alchilato
+ 5% riformato

RON = 94,2 MON = 91,4 S = 2,8

AP5 = 60% alchilato
+ 40% riformato

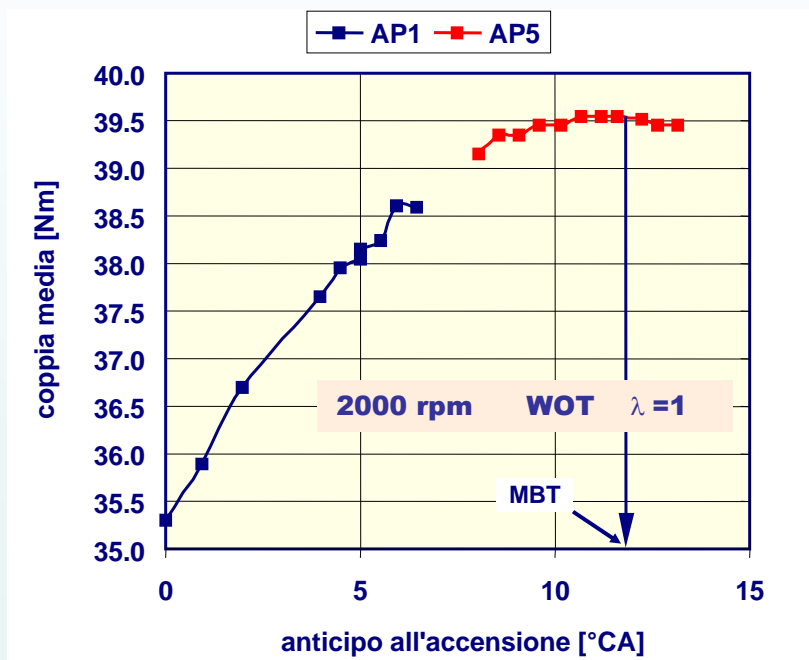
RON = 98,3 MON = 91,2 S = 7,1

RC = 10,5:1 2000 rpm

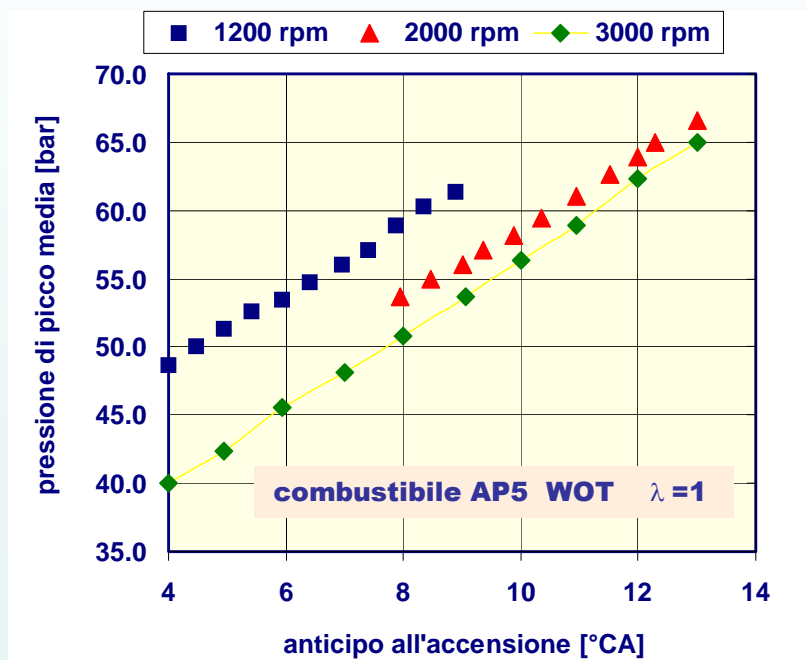
WOT miscela stechiometrica

EFFETTI COMPOSIZIZONALI DELLA BENZINA - 2

Con benzine a elevato livello ottanico si può aumentare l'anticipo all'accensione fino al valore ottimale MBT (*Minimum Advance for Best Torque*) per raggiungere pressioni di picco medie più elevate in camera di combustione, cioè potenze più elevate.



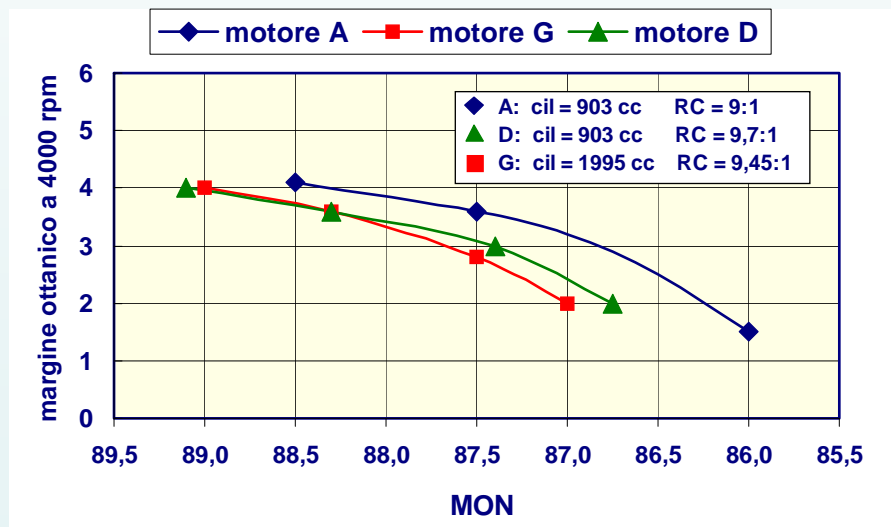
Fonte: [5]



Fonte: [5]

ADATTAMENTO MOTORE / COMBUSTIBILE

- Al fine di produrre motori con prestazioni (potenza erogata) ed efficienza sempre maggiori, senza aumentare la propensione all'insorgenza del *knock*, i Costruttori sono intervenuti nel corso degli anni adottando:
 - rapporti di compressione (R.C.) più elevati
 - il controllo elettronico della fasatura di accensione
 - una più corretta geometria della camera di combustione attraverso lo studio della fluidodinamica



Fonte: [7]

- L'incremento del R.C. è condizionato dal livello ottanico della benzina disponibile sul mercato.
- A parità di qualità ottanica della benzina un incremento del R.C. determina un minore margine di N.O.

LA RICHIESTA OTTANICA DEL MOTORE

- Il margine di N.O. è condizionato dalla **richiesta ottanica** (OR = *Octane Requirement*) del motore che è il valore minimo del numero di ottano della benzina necessario e sufficiente per evitare ogni possibile traccia di detonazione nelle condizioni di funzionamento più severe.



FATTORI CHE INFLUENZANO LA RICHIESTA OTTANICA

- La OR, quindi, è un fattore intrinseco di ogni propulsore, che dipende dalle sue caratteristiche costruttive e di regolazione.

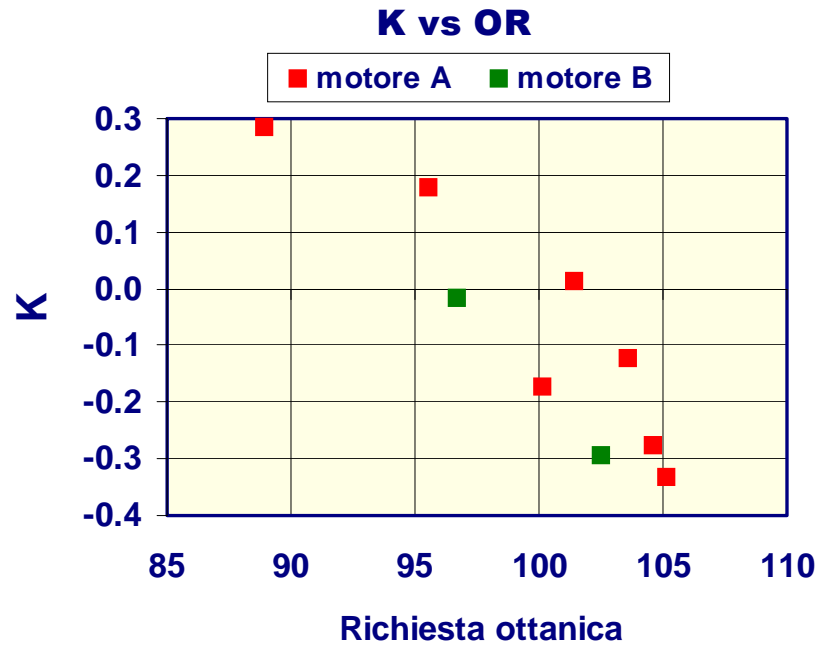
FATTORI CHE INFLUISCONO SULLA RICHIESTA OTTANICA		
Parametro del motore	Variazione del parametro	Variazione della OR
Rapporto di compressione	+1	da +4 a +7
Anticipo all'accensione (°CA)	+1	da +0,5 a +1
Temperatura aria aspirata (°C)	+25	da +1 a +4
Pressione aria aspirata (mbar)	-10	da -0,5 a -1
Rapporto equivalente	+0.2	-4
Umidità dell'aria aspirata (g H ₂ O/kg dry)	+4	-1

Rapporto equivalente. = $\text{comb./aria} / (\text{comb./aria})_{\text{stech}}$

Fonte: [8]

Dipendenza di OR dal regime di rotazione del motore

IL FATTORE K - CORRELAZIONE CON LA RICHIESTA OTTANICA



Se la richiesta ottanica OR del motore aumenta (per es. perché si è aumentato il rapporto di compressione o si è aumentato l'anticipo all'accensione della candela per avere la migliore *performance* del motore), allora il valore del fattore K diminuisce in modo proporzionale.

Fonte: [5]

Motore A: monocilindrico
cilindrata: 500 cc
RC: 10,5 : 1
4 valvole per cilindro

Motore B: monocilindrico
cilindrata: 344 cc
RC: 10,5 : 1
4 valvole per cilindro

FATTORI CHE INFLUENZANO LA *PERFORMANCE* DEI MOTORI

- In generale il R.C. e l'anticipo all'accensione sono i fattori più critici che determinano la migliore *performance* del motore, espressa in termini di massima potenza possibile erogabile e minori consumi energetici.
- A parità di qualità ottanica della benzina disponibile, i margini ottanici si riducono sensibilmente man mano che il R.C. aumenta.

livello ottanico medio della benzina "*regular grade*" distribuita sul territorio europeo RON 95 / MON 85



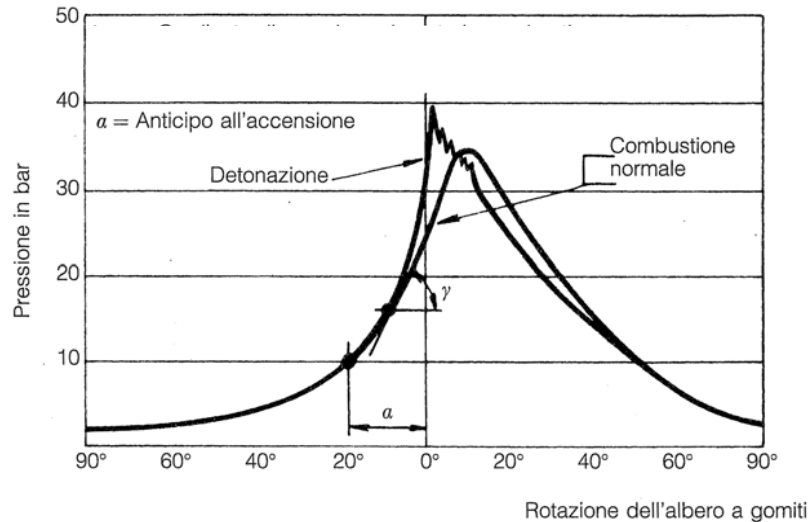
R.C. = 10 – 10.5
dei motori SI – IID
attualmente prodotti

l'adattamento migliore del motore con la qualità ottanica della benzina disponibile sul mercato



controllo automatico tramite *knock sensor* dei valori ottimali di anticipo all'accensione (MBT) senza incorrere nel fenomeno del *knock*

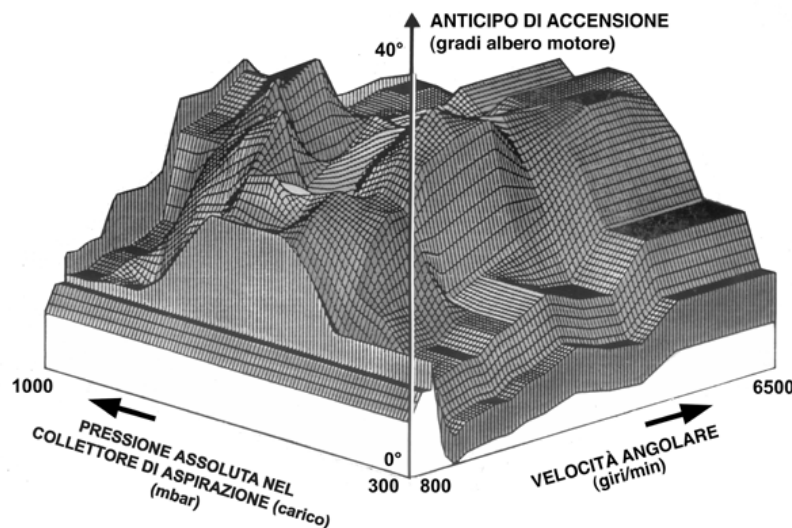
LA REGOLAZIONE DELL'ANTICIPO ALL'ACCENSIONE - 1



- Per ogni regime di rotazione e per ogni condizione di carico al motore il Costruttore tende a regolare l'anticipo all'accensione sul valore MBT in modo da avere il picco massimo di pressione di combustione appena dopo il PMS.
- In pratica, l'anticipo all'accensione viene regolato in ogni condizione di velocità e carico su un valore che è il migliore compromesso tra efficienza (consumo energetico), emissioni e durabilità del motore.
- Per evitare l'insorgenza del *knock* il valore dell'anticipo all'accensione può risultare talvolta inferiore al valore ottimale MBT: la *performance* del motore è, quindi, *knock limited*.

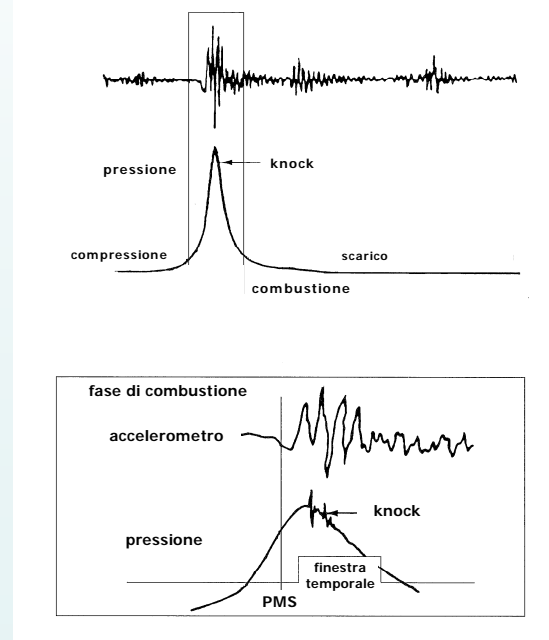
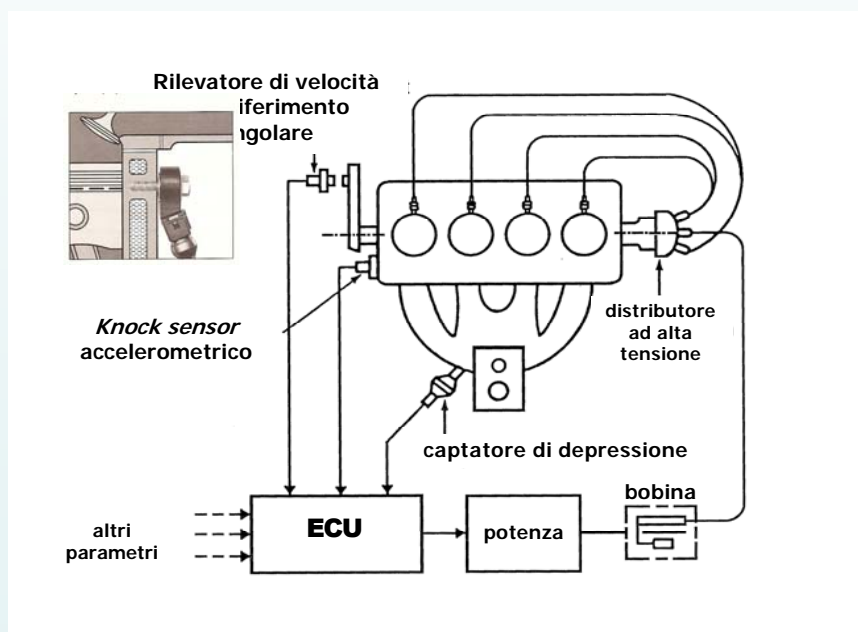
LA REGOLAZIONE DELL'ANTICIPO ALL'ACCENSIONE - 2

- Nei motori convenzionali moderni l'anticipo all'accensione è regolato attraverso la mappatura memorizzata nella centralina di controllo del motore (ECU).
- In questo modo è possibile massimizzare le prestazioni del motore (rendimento, potenza erogata) in dipendenza delle condizioni operative (carico, regime di rotazione, rapporto di miscela, temperatura del motore).
- Se il motore è dotato di un *knock sensor*, è possibile regolare l'anticipo all'accensione anche attraverso la qualità ottanica della benzina disponibile.



FUNZIONAMENTO DEL *KNOCK SENSOR*

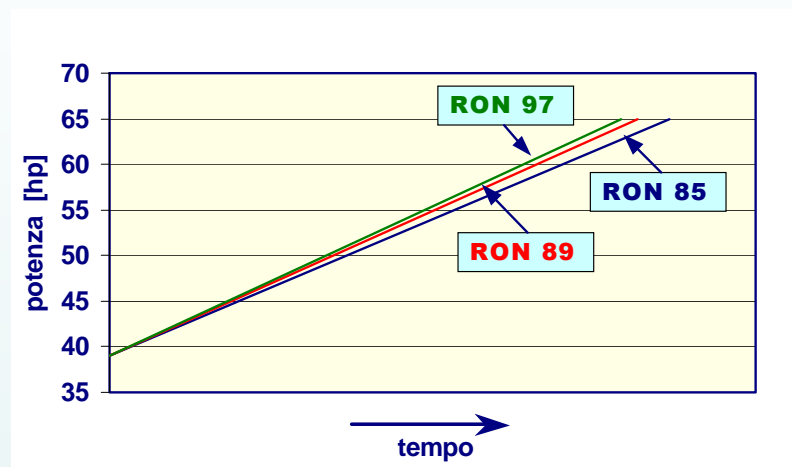
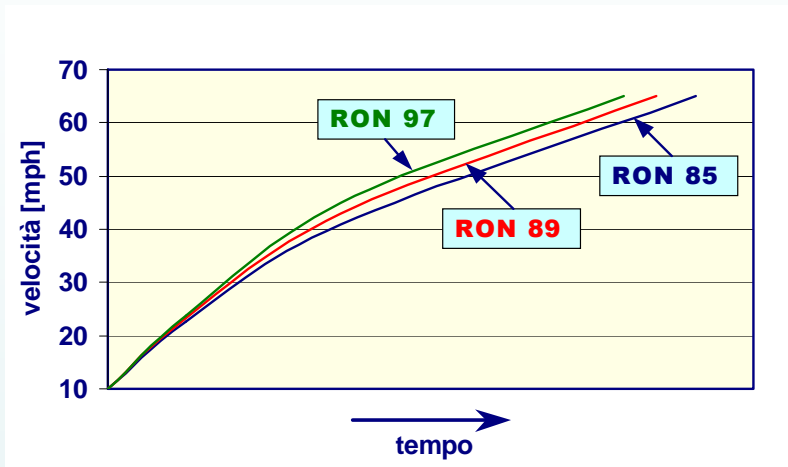
- Il *knock sensor* è un accelerometro posizionato sulla testata del motore in grado di captare una variazione delle vibrazioni del propulsore all'occorrenza del *knock* in una specifica finestra del ciclo termodinamico.
- All'insorgenza del *knock* il segnale del sensore è elaborato da una centralina elettronica (ECU) assieme ai segnali degli altri parametri operativi del motore per ritardare in modo opportuno l'accensione delle candela (riduzione dell'anticipo).



Fonte: [8]

PRESTAZIONI PER EFFETTO DELL'INCREMENTO DEL N.O.

Gli effetti sulle prestazioni del motore (sviluppo di potenza) determinati da un cambiamento della qualità ottanica della benzina quando si è in presenza del *knock sensor* sono stati valutati nella pratica di laboratorio in termini di tempi di accelerazione con numerosi modelli di autoveicolo [9].



Fonte: [9]

Un incremento del numero di ottano (RON) della benzina determina una diminuzione sensibile del tempo di accelerazione da 40 a 65 mph e un incremento della potenza erogata di un modello tipo di autovettura USA dotata di *knock sensor* in virtù di un aumento dell'anticipo all'accensione [9].

CONSUMO ENERGETICO E QUALITÀ OTTANICA DELLA BENZINA

Per valutare gli effetti sull'efficienza energetica di 3 modelli europei di autovettura dotati di *knock sensor* alimentati con 14 benzine differenziate per RON e MON, Beck et al. (*Shell Global Solution*) [10] hanno impiegato il seguente modello che lega il consumo di combustibile con l'Indice di Ottano:

$$FC = \alpha + \beta \cdot e^{-\gamma OI^*}$$

dove:

- α, β e γ = costanti da determinare sperimentalmente
- $OI^* = (1-K) \cdot (RON - 95) + K \cdot (MON-85)$

Per le tre autovetture il valore di K è risultato negativo, il che significa che l'IO aumentava con l'incremento di RON e della sensitività della benzina.

RIDUZIONE DEL CONSUMO ENERGETICO CON LA QUALITÀ OTTANICA

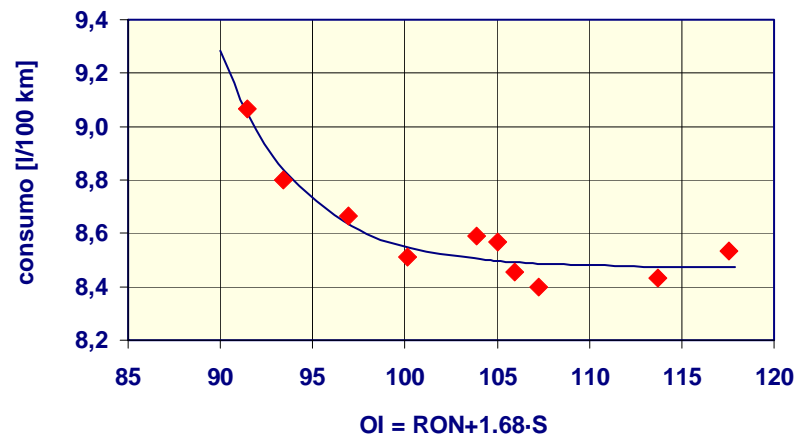
autovettura	sistema di alimentazione	livello di omologazione	cilindrata	K
A	ID	Euro 4	2.0 l	-1,68
B	MPI	Euro 2	2.0 l	-0,74
C	ID	Euro 4	1.6 l	-0,13

	RON	MON	S
min	86,8	81,0	1,4
max	99,4	94,7	11,0

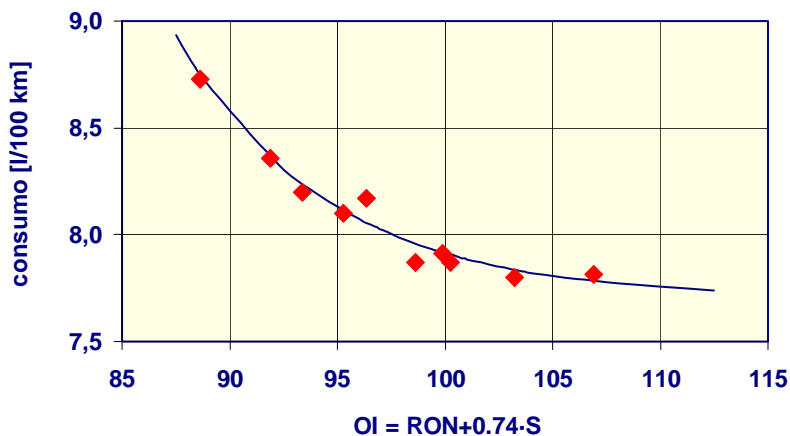
Ciclo di prova:
FCOC = Fuel
Consumption
Off-cycle

Fonte: [10]

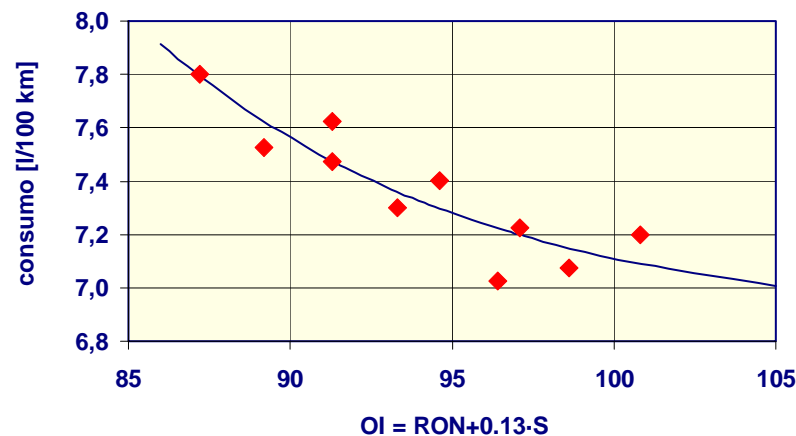
autovettura A



autovettura B



autovettura C

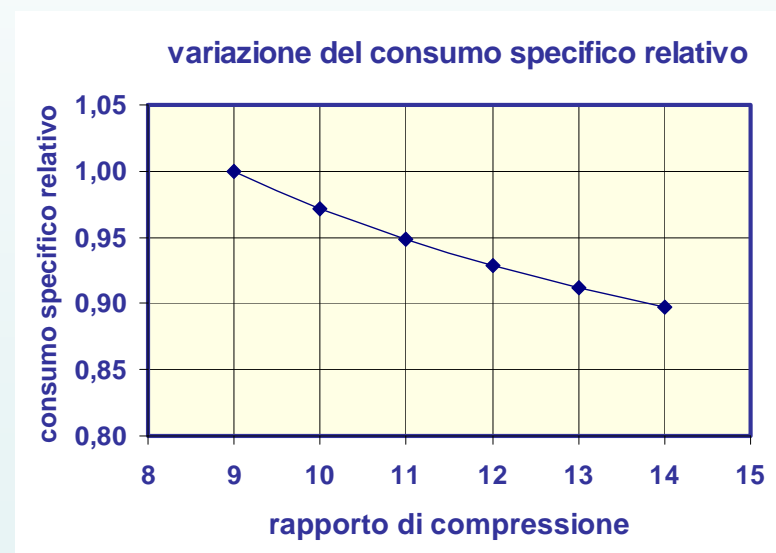
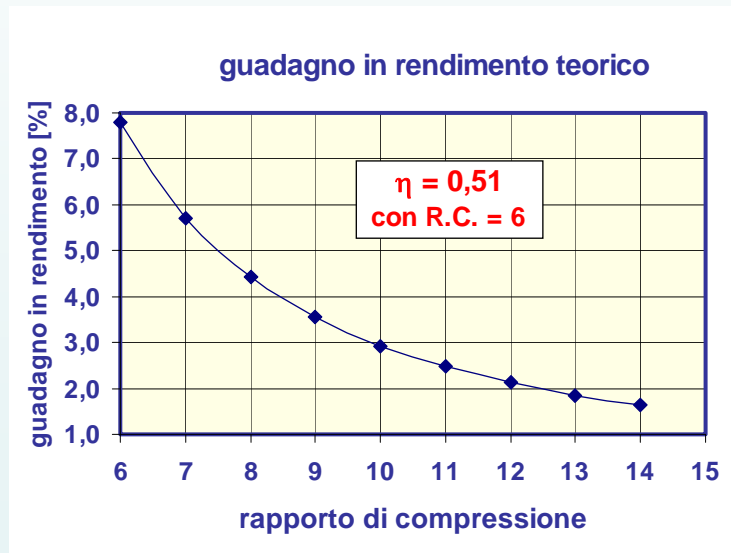


L'EFFETTO DEL R.C. SULLA *PERFORMANCE* DEI MOTORI

- Dal punto di vista teorico l'incremento di efficienza del motore per effetto di un aumento del R.C. si riduce sempre più quanto maggiore è il valore di R.C.
- Esiste, quindi, un valore di R.C. al di là del quale non è possibile ottenere miglioramenti significativi della *performance* del motore.

$$\eta = 1 - 1 / \text{R.C.}^{(\gamma-1)}$$

$$\gamma = C_p/C_v$$



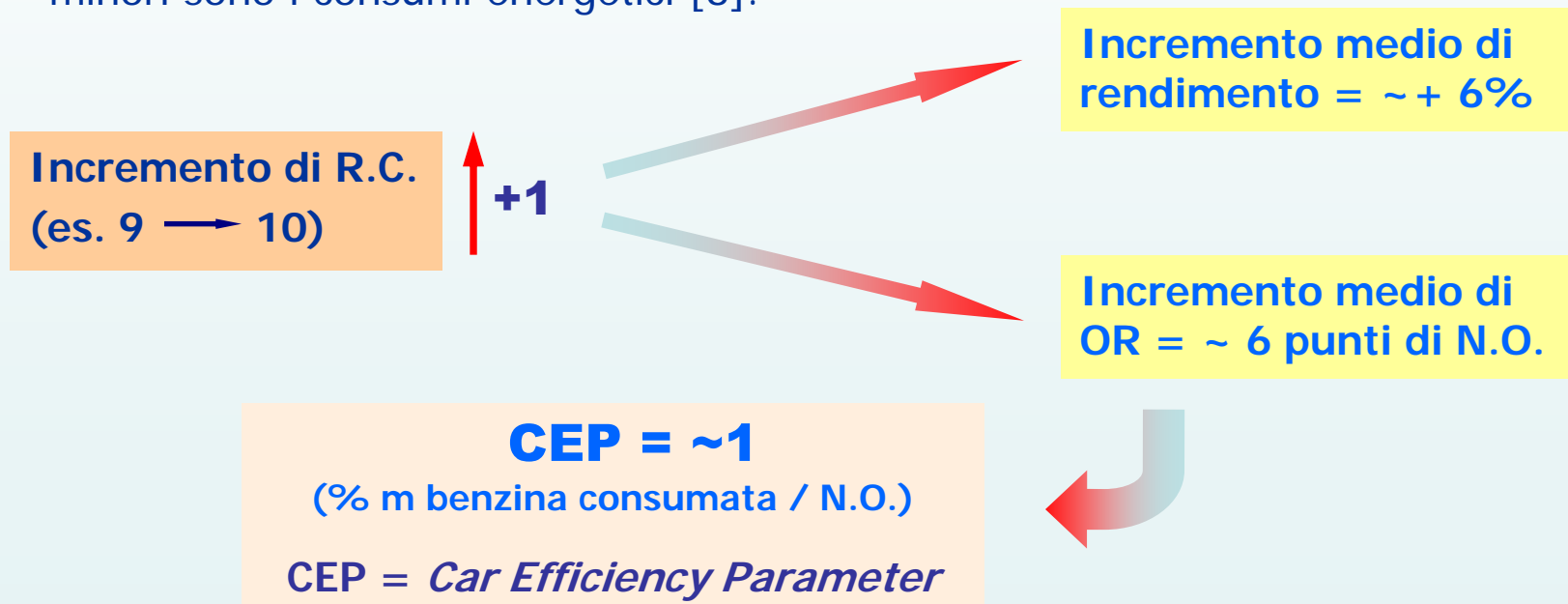
OTTIMIZZAZIONE DELLA *PERFORMANCE* DEI MOTORI

- In pratica il rendimento termico effettivo del motore è più basso di quello teorico, poiché intervengono altre variabili:

- combustione incompleta
- perdite di energia termica

- perdite meccaniche
- perdite di pompaggio

- Più elevato è il R.C., maggiore è il rendimento termico e, di conseguenza, minori sono i consumi energetici [8].



EFFICIENZA ENERGETICA PER EFFETTO DELL'INCREMENTO DI N.O.

- L'aumento del RON della benzina consente un aumento dell'efficienza termica del motore tanto più elevato quanto maggiore è il suo R.C. [11].
- L'effetto osservato risulta maggiormente evidente con i motori ID *lean-burn* e turbocompressi rispetto ai motori con aspirazione naturale.

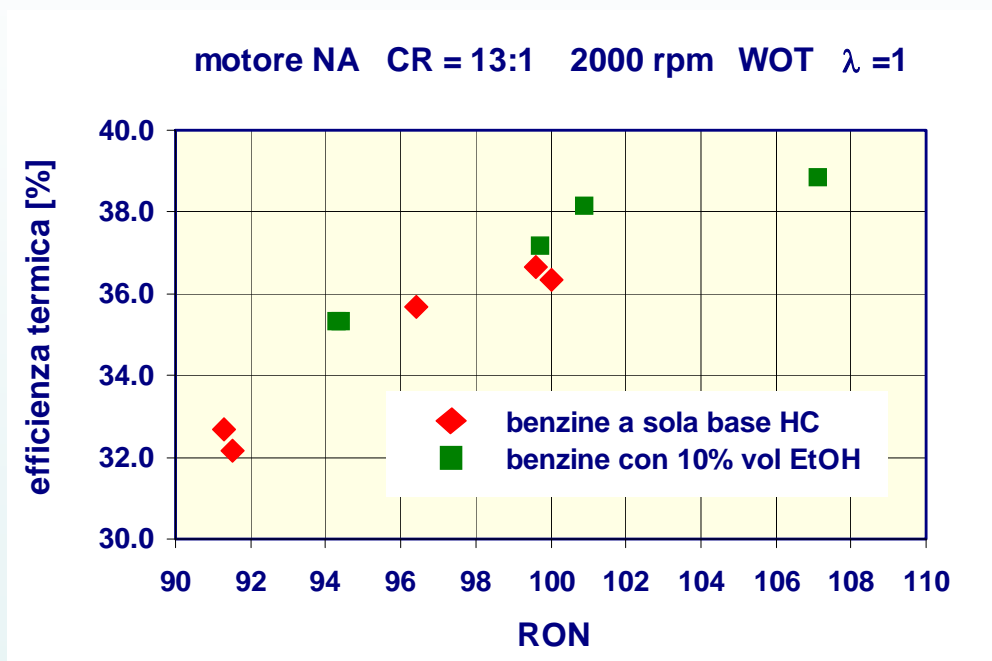
motore	tipo aspirazione	Cil	R.C.	efficienza termica	Δ %
variazione del NO				RON 92 → 100	
A	NA	1.5 l	13:1	37,8% → 39,9%	5,6%
B	TC	1.8 l	13:1	39,0% → 41,9%	12,8%

Fonte: [11]

- Un incremento di efficienza energetica si traduce in un maggior potenziale di *downsizing* del motore (ossia massimizzare la potenza specifica) e, quindi, in minori consumi di combustibile e minore emissione della CO₂.

LE POTENZIALITÀ DELL'ETANOLO IN MISCELA CON LA BENZINA

Le eccezionali caratteristiche indetonanti del bioetanolo (RON 110 / MON 92) permetterebbero di aumentare il R.C. dei motori a valori superiori (R.C. > 10) a quelli attualmente adottati per aumentarne le prestazioni (efficienza termica) e i consumi di combustibile [11, 12].



Fonte: [11]

L'effetto è maggiore se la concentrazione di bioetanolo nella benzina è > 10% in volume [12].

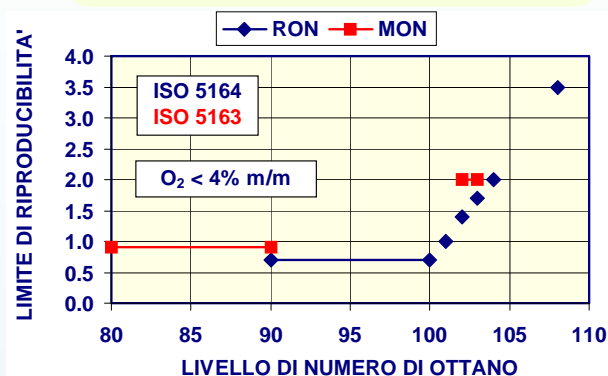
CONSIDERAZIONI SULLA DETERMINAZIONE DI RON E MON

Analisi risultati sperimentali di prove con miscele ricche in bioetanolo (concentrazione > 10% vol.)

Nessun valore di precisione per combustibili con concentrazione di $O_2 > 4\%$ m/m (~11% vol etanolo)

Gruppo di studio in ASTM / ISO per verificare l'applicabilità dei metodi convenzionali

precisione di RON e MON ?



Problema maggiormente sentito con motori *Flex Fuel* a elevato R.C. per ridurre i consumi energetici

CONCLUSIONI

- I parametri di valutazione della qualità indetonante della benzina, RON e MON, non sono sufficientemente adeguati per valutare la *performance* dei motori moderni. Meglio si presta l'I.O., quale combinazione lineare di entrambi.
- Nella valutazione sperimentale della *performance* dei motori tecnologicamente evoluti il RON risulta il parametro predominante per qualificare le caratteristiche indetonanti della benzina, poiché le condizioni operative sono più prossime a quelle del motore CFR-F1.
- L'impiego di benzine con elevati valori di RON e sensitività consente di ottenere benefici in termini di prestazioni e consumi energetici dei motori dotati di *knock sensor*.
- Combustibili con elevata qualità ottanica, quali le miscele etanolo / benzina a elevata concentrazione di alcool, permettono di adottare R.C. più elevati di quelli attualmente impiegati per avere sensibili incrementi di efficienza energetica del motore.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. CONCAWE Report No. 8/80 – “*The rational utilization of fuels in private transport (RUFIT) – extrapolation to unleaded gasoline case*” (1980)
2. CONCAWE Report No. 8/80 – “*Assessment of the energy balances and economic consequences of the reduction and elimination of lead in gasoline*” (1983)
3. D. Bradley, G.T. Kalghatgi, M. Golombok (Shell Research Ltd, UK) – “*Fuel blend and mixture strength effects on autoignition heat release rates and knock intensity in S.I. engines*” – SAE Tech Paper N. 962105 (1996)
4. D. Bradley, R.A. Head (Shell Global Solution - UK) – “*Engine autoignition: the relationship between octane numbers and autoignition delay times*” – Combustion and Flame, 147 (2006), 171-184
5. G.T. Kalghatgi (Shell Research Ltd, UK) – “*Fuel anti-knock Quality – Part I. Engine studies*” – SAE Technical Paper N. 2001-01-3584 (2001)
6. G.T. Kalghatgi (Shell Research Ltd, UK) – “*Fuel anti-knock Quality – Part II. Vehicle study – How relevant is Motor Octane Number (MON) in modern engines*” – SAE Tech Paper N. 2001-01-3585 (2001)
7. E. Barbera, F. Ciselli, S. Corso (Fiat Auto) – “*Influenza della qualità antidetonante dei carburanti sullo sviluppo dei motori per autotrazione*” – Riv. Comb., 38, No. 3-4 (1984), 79-88
8. J.C. Guibet (Institut Francais du Petrol) – « Fuels and engines » - *Engine and Fuel matching* - vol 1, p. 250 – Editions TECHNIP (1999)

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

9. D.E. Whelan, G.K. Schmidt, M.E. Hischler (*Amoco – Chevron*) – “*An Acceleration Based Method to Determine the Octane Number Requirement of Knock Sensor Equipped Vehicles*” – SAE Technical paper N. 982721 (1998)
10. C. Beck, P. Stevenson, P. Ziman (*Shell Global Solution*) – “*The Impact of Gasoline Octane on Fuel Economy in Modern Vehicles*” – SAE Technical paper N. 2006-01-3407 (2006)
11. K. Nakata, D. Uchida, A. Ota, S. Utsumi, K. Kawatake (*Toyota Motor Corporation*) – “*The Impact of RON on SI Engine Thermal Efficiency*” – SAE Tech Paper N. 2007-01-2007 (2007)
12. R.C. Costa, J.R. Sodré – “*Compression ratio effects on an ethanol/gasoline fuelled engine performance*” – Applied Thermal Engineering, 31 (2011), 278-283

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!



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