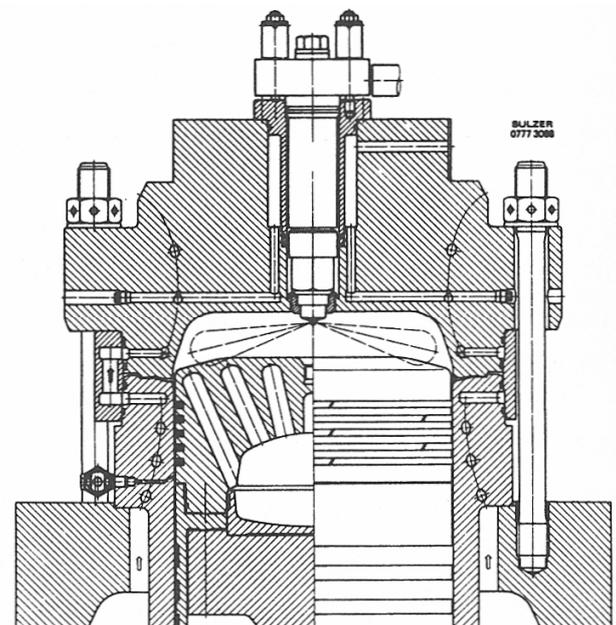
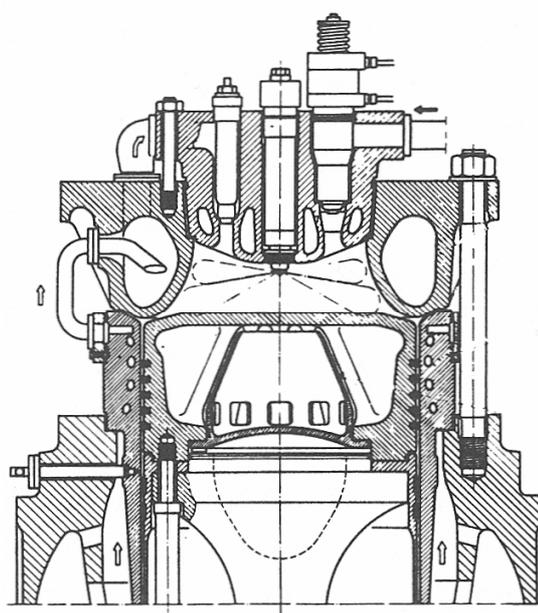
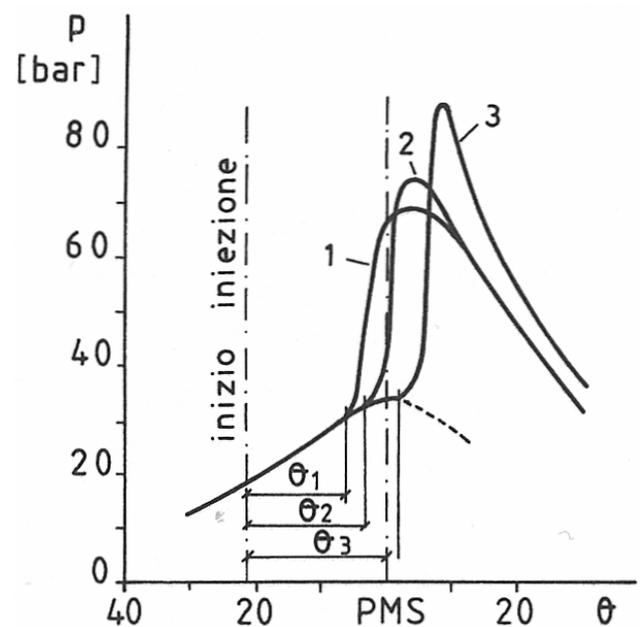
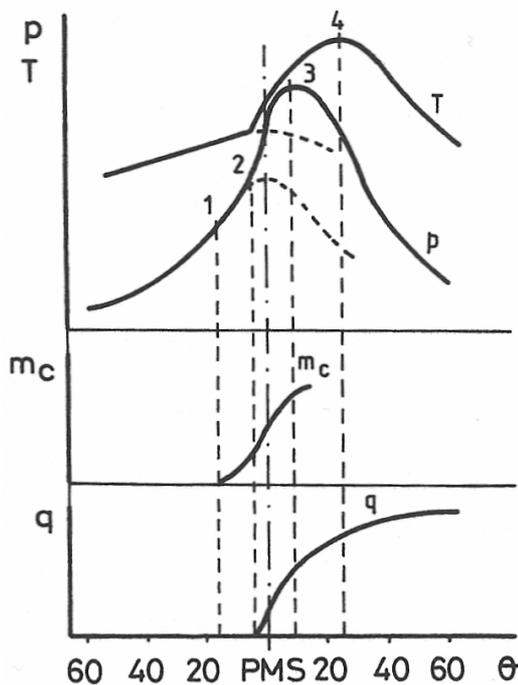
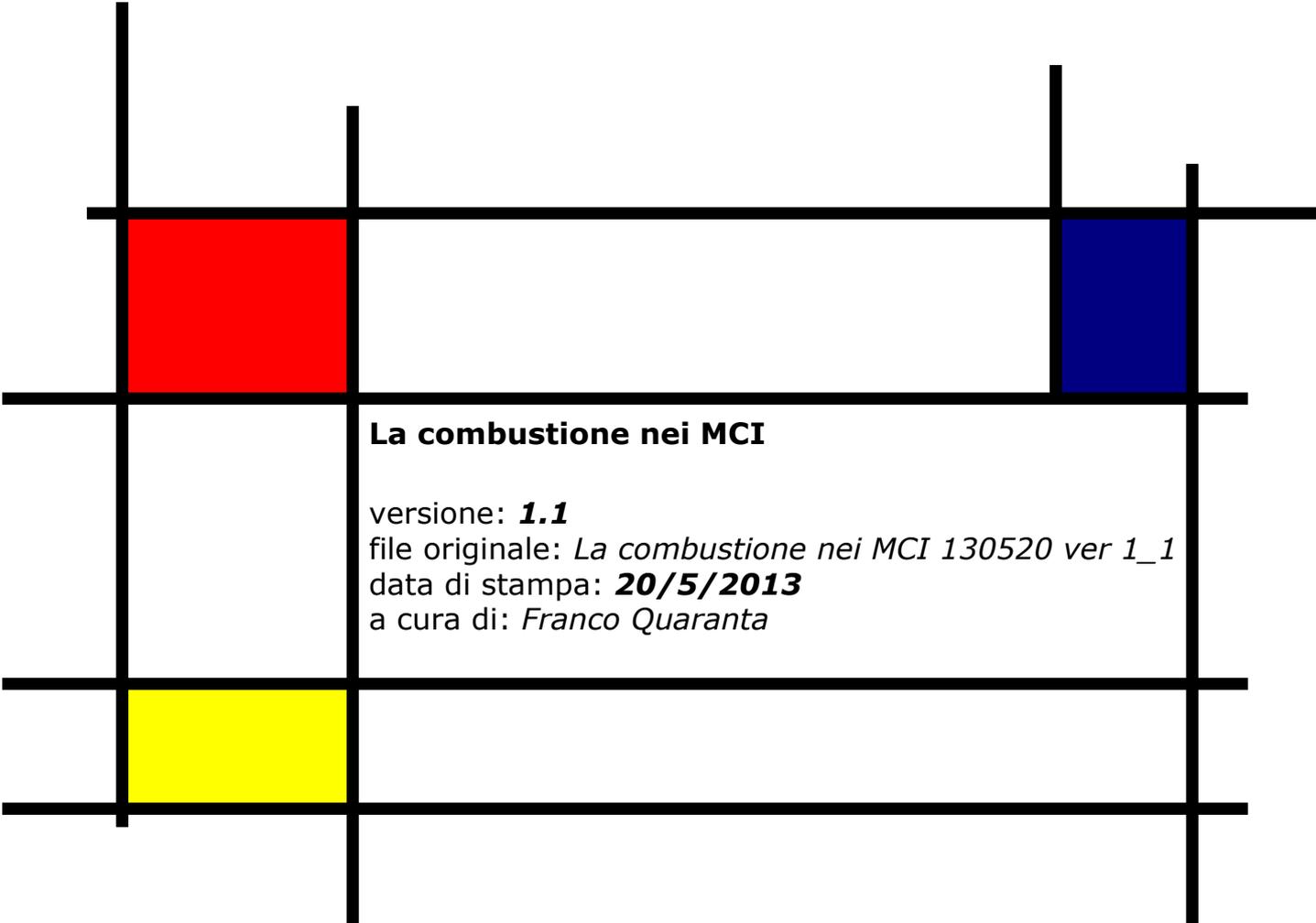


Schede di **Impianti Navali**

# La combustione nei MCI





**La combustione nei MCI**

versione: **1.1**

file originale: *La combustione nei MCI 130520 ver 1\_1*

data di stampa: **20/5/2013**

a cura di: *Franco Quaranta*

## 1 – generalità

La fase di combustione è quella che denota le maggiori differenze tra i motori a combustione interna funzionanti con ciclo Otto e Diesel.

Nei primi il fluido combustibile è bassobollente (la benzina, per esempio, a temperatura di 40° ha pressione di vapore pari a circa 0.5 bar); sia nei motori attuali ad iniezione (nel cilindro oppure nel collettore, ossia diretta o indiretta), sia in quelli a carburatori di precedente generazione, la combustione viene fatta avvenire a comando (ragion per cui questi motori vengono detti *ad accensione comandata*), provocandola in un determinato punto della camera di combustione attraverso un dispositivo (la candela) che genera le condizioni di accensione della miscela. Il combustibile al suo ingresso nel cilindro ha già oppure assume rapidissimamente le caratteristiche di vapore e “precarbura” l’ambiente, ossia – data la sua alta diffusività conferitagli dello stato aeriforme – si distribuisce omogeneamente nell’aria presente nel cilindro. Proprio questa caratteristica permette di ammettere, per ciascuna delle condizioni di funzionamento del motore, una quantità di comburente molto vicina a quella stechiometricamente richiesta per la corretta ossidazione del combustibile.

La scintilla avvia la combustione la quale si propaga partendo dal punto di innesco; la fiamma non si sviluppa in maniera istantanea ma comunque velocemente, attraverso un fronte che si estende a tutte le zone del cilindro. Contemporaneamente alla fiamma, inizia a propagarsi anche un’onda di pressione il cui fronte ha velocità generalmente superiore al primo.

La fiamma ha dunque tempo di propagazione non nullo in quanto il suo fronte ha una velocità altissima ma comunque finita; nel suo complesso, quindi, la combustione ha durata relativamente breve in quanto la fiamma avanza in una miscela già precarburata (in composizione pressoché stechiometrica) e, percorso tutto il volume del cilindro, si esaurisce.

La relativa velocità di tale operazione ne giustifica la rappresentazione nel ciclo ideale che è isovolumica. Si suppone, cioè, che la velocità con cui avviene tutta la combustione è talmente alta rispetto a quella con cui si muove il pistone che, nel caso limite, la fase di combustione riesce ad esaurirsi in un tempo talmente breve da potersi supporre che in esso il movimento del pistone è praticamente nullo.

L’onda di pressione ed il fronte di fiamma partono, praticamente, in contemporanea; se la pressione raggiunge zone dove la combustione non è ancora avvenuta e riesce ad infiammare la miscela che vi regna, si aprono altri fronti di fiamma. Il fenomeno che ne deriva, la *detonazione* può avere effetti molto gravi sulla salute del motore in quanto ha caratteristiche di estrema impulsività.

Il meccanismo di combustione nel motore diesel si basa sulla creazione di un’atmosfera idonea all’accensione del combustibile quando viene iniettato nel cilindro; attraverso la fase di compressione (ed un idoneo rapporto di compressione: 20 – 22) si ottiene il riscaldamento dell’aria oltre le condizioni di ignizione del combustibile. Quest’ultimo viene iniettato a pressione tale (oltre 2000 bar) che il suo flusso si infrange in minutissime particelle (ordine di grandezza: 20  $\mu\text{m}$ ) in modo che la superficie complessiva del combustibile esposta all’aria sia la massima possibile. A contatto con l’aria riscaldata dalla compressione, il combustibile prende ad evaporare ed a bruciare “a strati” ossia liberando strati inferiori delle droplet che man mano si riscaldano, evaporano e bruciano. L’innesco della combustione avviene per effetto del contatto tra combustibile e l’aria calda presente nel cilindro: il meccanismo viene per questo denominato *accensione spontanea*. La combustione è piuttosto violenta in quanto le droplet in ingresso nel cilindro trovano una temperatura idonea alla combustione ed iniziano a bruciare tutte insieme generando un forte e repentino aumento di pressione e temperatura dei gas.

Ma, sia per effetto della durata relativamente lunga dell’iniezione, sia per la complessità della sequenza di momenti che portano alla combustione (entrata, riscaldamento, evaporazione, combustione a strati) la combustione dura molto più a lungo di quanto non accada nel motore a ciclo Otto. A ciò si deve la rappresentazione del ciclo diesel limite in cui la fase di iniezione – combustione è rappresentata da una isobara: si suppone, cioè, che la combustione duri per una parte significativa della corsa del pistone in cui la pressione, che dovrebbe ridursi per effetto della discesa

del pistone (con aumento del volume e diminuzione, appunto, della pressione) viene sostenuta dal progressivo rilascio di energia generato dal proseguire della combustione.

In altri termini, si suppone che la diminuzione di pressione dovuta alla discesa del pistone sia perfettamente controbilanciata dalla immissione di calore fintanto che la combustione prosegue. Ecco perché, nel ciclo limite, la pressione si rappresenta (ma è una idealizzazione, ovviamente) in maniera costante per tutto il periodo della combustione.

## 2 – la combustione nel motore diesel

Facendo riferimento al caso del motore a ciclo diesel, la fase di combustione risente delle modalità con cui il combustibile viene iniettato nel cilindro e brucia.

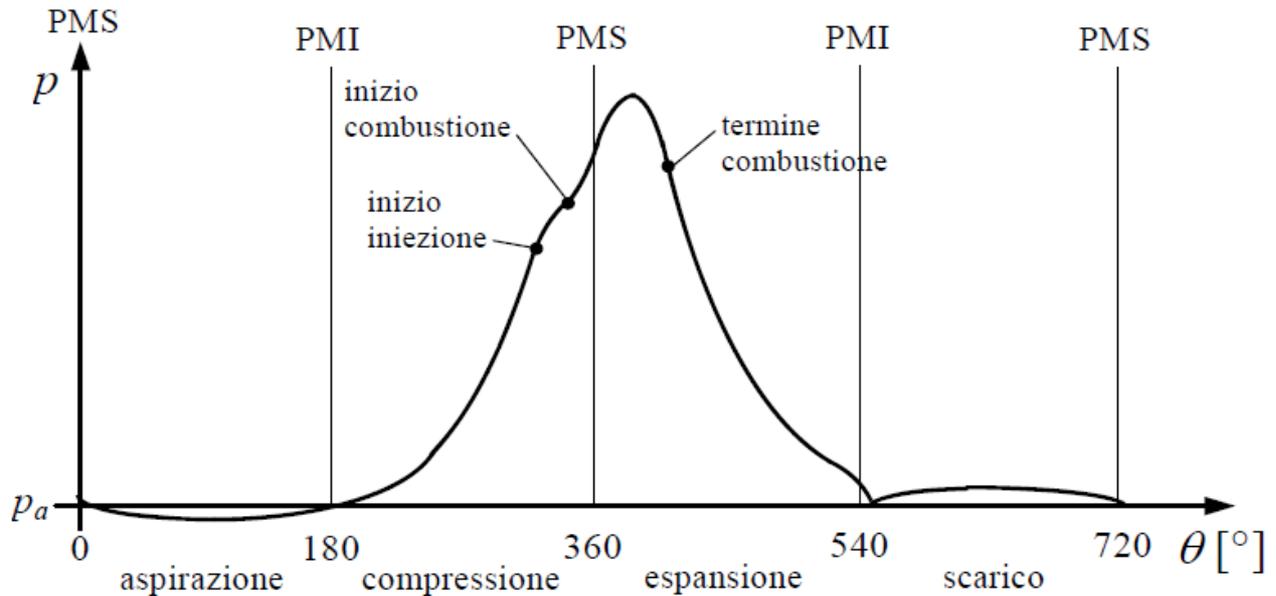


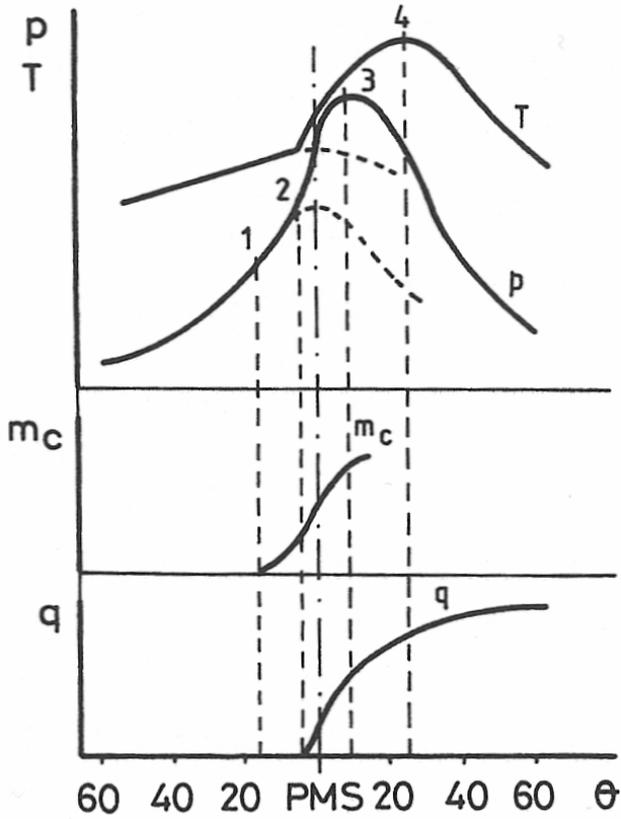
Figura 1 – ciclo indicato di un motore diesel 4T

In figura 1 è rappresentato un ciclo a 4T con le sue fasi; con un predeterminato anticipo sul punto morto superiore, in un momento definito SOI (Start Of Ignition) il combustibile viene iniettato nel cilindro polverizzato in modo tale da ottimizzare il contatto con l'aria calda che ne provocherà la combustione.

L'inizio della combustione avviene con un certo ritardo, in un istante definito SOC (Start Of Combustion), in quanto, una volta entrato nel cilindro, il combustibile deve dapprima evaporare per poi accendersi. Il lag di combustione, inteso come distanza temporale tra SOI e SOC è una caratteristica del combustibile misurabile con il numero di cetano di cui si dirà in seguito.

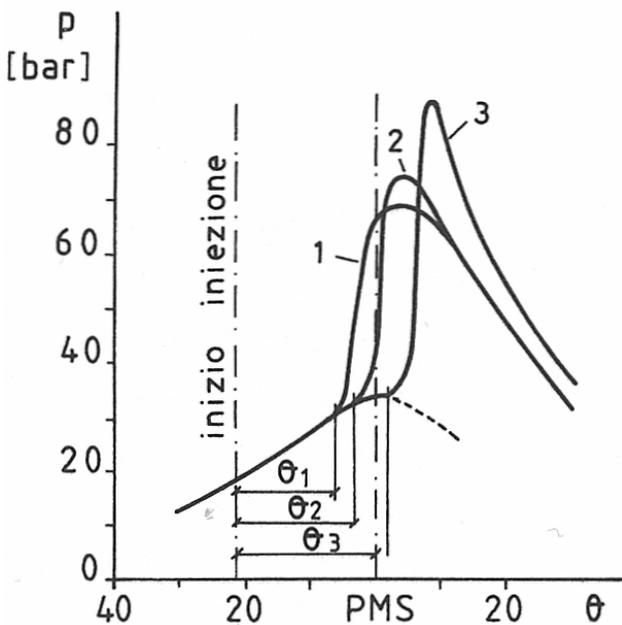
In figura 2 sono rappresentati gli andamenti dei principali parametri legati alla fase di combustione ( $T, p, m_c, q$ ) in funzione dell'angolo di manovella  $\theta$ .

Osservando il riquadro più alto, in cui sono riportati gli andamenti di pressione e temperatura, si nota che, fino al punto 1, la risalita del pistone riduce il volume a disposizione della carica d'aria e genera l'aumento di  $p$  e  $T$ . Il punto 1 coincide con il momento dell'inizio dell'iniezione del combustibile, come si può notare nel secondo riquadro dall'alto in cui, sempre in funzione dell'angolo di manovella  $\theta$ , è riportata la massa  $m_c$  di combustibile introdotta nel cilindro; da tale punto e per un certo angolo di manovella, non vi sono cambiamenti nell'evoluzione di pressione e temperatura che continuano a crescere per il solo effetto della compressione dovuta alla risalita del pistone. Ciò perché la combustione inizia soltanto nel punto 2 (SOC) quando inizia il cosiddetto *heat release* ossia il rilascio di energia per effetto della combustione; da quel punto sia la pressione sia la temperatura crescono molto di più di quanto avrebbero fatto (e soltanto fino al PMS) per effetto della sola compressione.



**Figura 2** – andamento dei parametri legati alla combustione

Le curve tratteggiate a partire dal punto 2 descrivono proprio gli andamenti di pressione e temperatura che si sarebbero avuti se non vi fosse stata l'immissione di energia nei gas per effetto della combustione. La combustione avviene in un lasso di tempo piuttosto lungo per cui la pressione aumenta fino al suo massimo, raggiunto nel punto 3; la temperatura nei gas, fino al massimo nel punto 4. Da questi valori entrambi i parametri prendono poi a diminuire per effetto della discesa del pistone e dell'espansione che ne consegue; nei due riquadri inferiori in figura è possibile conoscere quantità e tempi di iniezione di combustibile nel cilindro ed energia immessa nei gas sotto forma di calore.



**Figura 3** – andamento della pressione nel cilindro per tre diversi ritardi dell'inizio della combustione

La differenza tra momento dell'iniezione ed inizio della combustione ha un effetto pernicioso sul funzionamento del motore; ciò perché quando la combustione inizia coinvolge tutta la massa iniettata fino a quel punto nel cilindro il che rende piuttosto impulsiva la combustione. È chiaro anche che più è forte il ritardo di combustione, peggiore sarà la combustione che verrà caratterizzata da maggiore veemenza in quanto la quantità di combustibile iniettato durante il ritardo sarà maggiore e con essa più alte saranno le pressioni sviluppate e le temperature raggiunte. In figura 3 sono riportati i possibili andamenti della pressione nel cilindro immaginando di alimentare uno stesso motore con tre combustibili aventi tre diversi ritardi dell'inizio della combustione (tre diversi numeri di cetano) denotati, in termini di angoli di manovella, con  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$ . Si vede che il combustibile con ritardo inferiore ( $\theta_1$ : numero di cetano più alto) ha il picco di pressione più basso in quanto, al momento d'inizio della combustione, essendo stato iniettato meno combustibile, minore risulterà la quantità di combustibile che brucia per primo. Aumentando il ritardo di combustione (diminuzione del numero di cetano), aumentano gli accumuli di combustibile nel cilindro ed aumenta la pressione che si sviluppa all'inizio della combustione. Più la combustione è ritardata, maggiori sono i picchi di pressione sviluppati all'inizio della combustione, più ruvido sarà il comportamento del motore e maggiori saranno i danni cui questo sarà esposto.

### 3 – il numero di cetano

Il *numero di cetano* è un indicatore del comportamento, in fase di accensione, dei combustibili che alimentano i motori diesel in cui ha grande importanza il ritardo di accensione ossia il tempo che intercorre tra l'inizio dell'iniezione del combustibile e l'inizio della combustione.

Oltre che da fattori legati alla meccanica del motore (come temperatura e pressione della carica, grado di atomizzazione del combustibile, velocità del motore), influisce sul ritardo d'accensione anche la natura del combustibile.

E' stato così constatato che gli idrocarburi paraffinici lineari (aventi una temperatura di autoaccensione più bassa rispetto ai corrispondenti idrocarburi isoparaffinici o ciclici) danno tempi di ritardo più brevi e permettono funzionamenti più regolari e meno duri del motore oltre che minori usure.

Le qualità di un combustibile legate all'accensione sono rappresentate dal *numero di cetano*. In origine tale numero rappresentava la percentuale in volume di cetano (n-esadecano  $C_{16}H_{34}$ ) presente in una miscela di cetano e di alfa-metil-naftalina che dà lo stesso ritardo di accensione, su un motore standard, del combustibile in esame. Il valore del numero di cetano veniva, così, determinato sperimentalmente rilevando il ritardo tra la fase di iniezione e quella di accensione; al cetano veniva assegnato il valore 100, al alfa-metil-naftalina il valore 0.

La scarsa reperibilità di sostanze a lungo ritardo come alfa-metil-naftalina ha fatto ripiegare sul cosiddetto isocetano (eptametil-nonano  $C_{16}H_{35}$ ) cui è attribuito valore di accensione 15.

In tal modo, Se  $C$  è la frazione di cetano e  $I$  quella di isocetano (numeri percentuali, compresi tra 0 e 1) nella miscela di prova avente capacità di ignizione simili a quella del combustibile da caratterizzare, la formula che dà il numero di cetano  $NC$  sarà semplicemente:

$$NC = C \times 100 + I \times 15$$

Più breve è il ritardo fra iniezione e combustione, più alto sarà il numero di cetano del combustibile e minore sarà la quantità di combustibile presente nel cilindro allorché inizia la combustione; i valori massimi di pressione raggiungibili in camera di combustione saranno inferiori e ciò porta ad una diminuzione della rumorosità e ad un funzionamento più regolare del motore.

Il gasolio ha normalmente valori del numero di cetano intorno a 50-52; si è valutato che un aumento del numero di cetano a 58 consentirebbe di far diminuire le emissioni di particolato del 20%.

– *bibliografia e riferimenti*

- [http://www.edurete.org/pd/sele\\_art.asp?ida=3094](http://www.edurete.org/pd/sele_art.asp?ida=3094)
- R. Della Volpe: *Impianti motori per la propulsione navale*, Liguori, Napoli, 2007, ISBN 9788820717605