

Nei MCI si fruttano l'energia termica prodotta dalla combustione per produrre lavoro meccanico.

Il ciclo termodinamico che trasforma il calore in lavoro, può essere realizzato solo mediante degli impianti motore termici.

Nei MCI volumetrici la **combustione si sviluppa internamente al motore** pertanto deve essere previsto il ricambio della carica che non può avvenire in modo continuo come nelle TG.

I MCI volumetrici sono pertanto considerati delle macchine volumetriche nel senso tradizionale del termine.



MACCHINE A FLUIDO

Motori a Combustione Interna
Sfruttano l'energia termica di un fluido prodotta dalla combustione.

A flusso stazionario (continuo)

Turbina a Gas

Parte dell'energia dei gas è usata per il compressore
Usa un compressore e una turbina

TG con albero motore

Il lavoro dell'albero può essere usato per muovere un'elica, un generatore elettrico, un rotore (elicottero)

Turbofan

Parte dell'energia dei gas è usata per la propulsione, parte per muovere un'elica intubata (fan)

Turbogetto

Parte dell'energia dei gas è usata per la propulsione, parte per muovere il compressore

Statoreattore (Ramjet)

Propulsione a reazione senza compressore né turbina
Usa il "ram effect" (compressione dinamica)

Razzo *

Propulsione a reazione
Usa un ossidante diverso dall'aria

a combustibile solido

Combustibile e ossidante sono premiscelati

a combustibile liquido

Combustibile e ossidante miscelati in camera di comb.

A flusso instazionario (discontinuo)

Pulsoreattore *

L'energia dei gas è usata per la propulsione
Non sono presenti parti in movimento

MCI con albero motore

L'energia dei gas è usata per muovere l'albero motore
Un unico organo mobile per compressione e espansione

Accensione comandata

Carica premiscelata (omogenea)
accensione innescata da una scintilla

2 Tempi

Un ciclo termico ogni giro dell'albero

4 Tempi

Un ciclo termico ogni 2 giri dell'albero

Accensione per compressione

Carica premiscelata solo in piccola parte
accensione spontanea

2 Tempi

Un ciclo termico ogni giro dell'albero

4 Tempi

Un ciclo termico ogni 2 giri dell'albero



*N.B. Solo gli elementi con * possono essere considerati macchine semplici*

Classificazione

I MCI sono degli *impianti motori termici volumetrici* che operano in modo ciclico pulsante e non a flusso continuo.

Nei MCI il ciclo termodinamico avviene all'interno di un singolo apparato meccanico: il motore. I MCI sono pertanto considerati delle *macchine volumetriche* nel senso tradizionale del termine.

Il combustibile è formato generalmente da una miscela di idrocarburi e aria che determina nei gas di scarico la presenza di incombusti quali CO e HC e ossidi di azoto che sono i motivi che hanno determinato il recente sviluppo dei MCI.



MACCHINE A FLUIDO

1. ciclo di riferimento - MCI a **ciclo Otto** e a **ciclo Diesel**;
2. durata del ciclo o numero di corse dell'organo mobile (pistone) – MCI **2T** e **4T**;
3. configurazione geometrica o tipo di moto dell'organo mobile – MCI **alternativi e rotativi**;
4. modalità di innesco della combustione - MCI ad **accensione comandata** o ad **accensione spontanea**;
5. tipo di combustibile impiegato - MCI a **benzina, gasolio, metano, GPL, alcool metilico o etilico, etc.**;
6. alimentazione dell'aria - MCI **aspirati e sovralimentati**;
7. alimentazione del combustibile - MCI a **carburazione** e ad **iniezione, diretta o indiretta**;
8. regolazione del carico - per **variazione della quantità o della qualità della miscela introdotta**;



Non tutte queste differenziazioni hanno la stessa importanza e diverse sono legate tra loro e non possono essere considerate indipendenti.

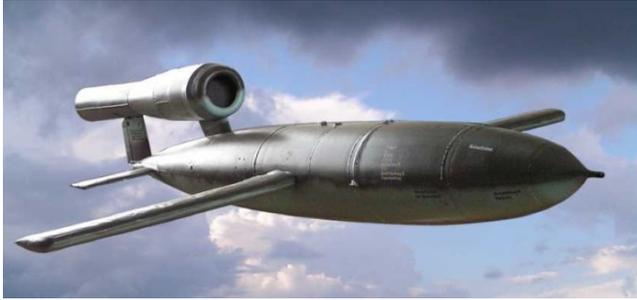
La classificazione classica basata sul tipo di combustione, che considera motori a ciclo Diesel e a ciclo Otto non è più attuale vista la velocità dei motori odierni.

I nuovi motori infatti non seguono i cicli ideali su cui si basa questa classificazione ma è comunque interessante fare un'analisi abbastanza dettagliata dei cicli di riferimento.

Fanno eccezione i grossi motori Diesel lenti per impiego navale che seguono abbastanza fedelmente il ciclo Diesel.



MACCHINE A FLUIDO



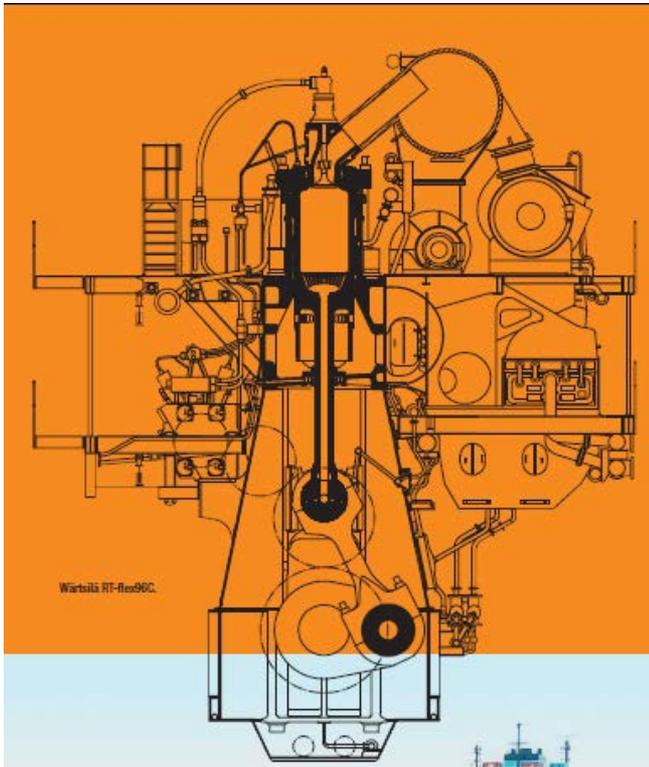
PREGI

- **Versatilità e adattabilità**
- **Facilità di regolazione e basso rapporto peso/potenza**
- **Campi di applicazione: propulsione aerea e navale e trazione terrestre.**
- **Potenze: da pochi Watt a diverse centinaia di MW.**



MACCHINE A FLUIDO

- **Wartsila-Sulzer RTA96-C** diesel turbo-sovralimentato a 2T, costruito in Finlandia, usato in navi porta container
- **14 cilindri: peso 2.300 ton; L 31.97 m; H 13.32 m; potenza massima 84.42 MW a 102 giri/min; 6 MW/cilindro**
- **Rendimento: 51%**



D = 960 mm
C = 2500 mm



MCI alternativo più potente al mondo

MACCHINE A FLUIDO

➤ *Cox Tee Dee 010*

Impiego: Aeromodellismo

Peso: 13 gr

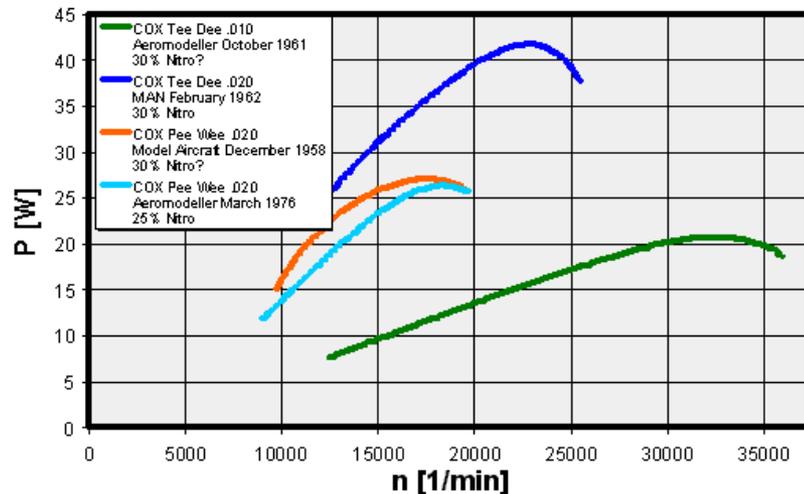
Cilindrata: 0.163 cm³

D: 6.02 mm C: 5.74 mm

Potenza: 21 W a 32.500 giri/min

Accensione: Glow plug

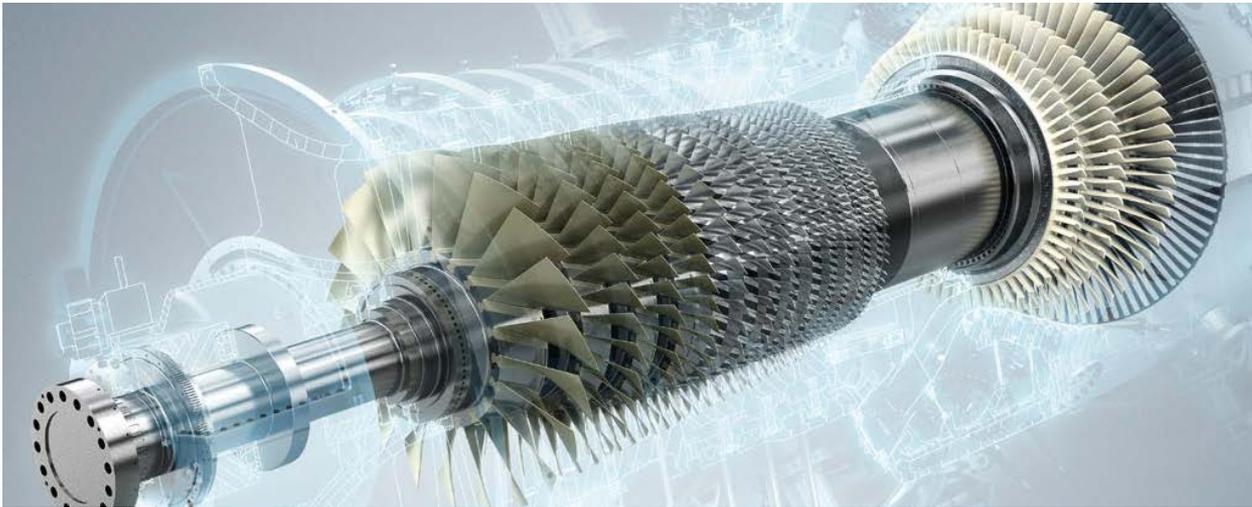
- Miscela: olio di ricino (15 - 20%), nitrometano (0 - 50%), + metanolo
- Rendimento (< 12%)



MCI alternativo più piccolo al mondo

MACCHINE A FLUIDO

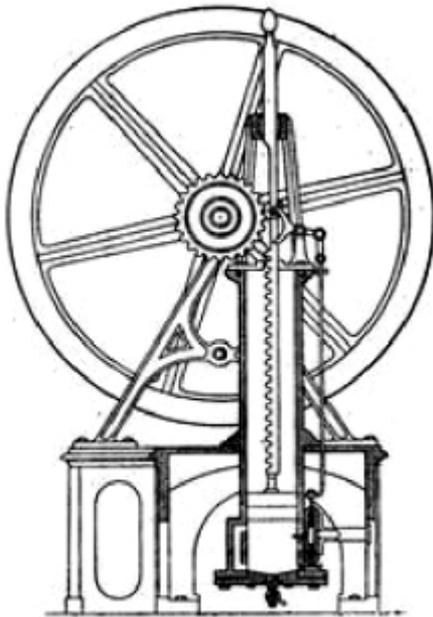
- Il Wartsila-Sulzer RTA96-C è il più grande MCI alternativo, ma i razzi Boosters dello Space Shuttle sono molto più potenti (≈ 31320 MW dovuti alla spinta generata dai gas di scarico)
- Il più potente MCI dotato di albero: Turbina a gas terrestre Siemens SGT5-8000H (425 MW) usata per la produzione di energia elettrica
- Rendimento: 40%



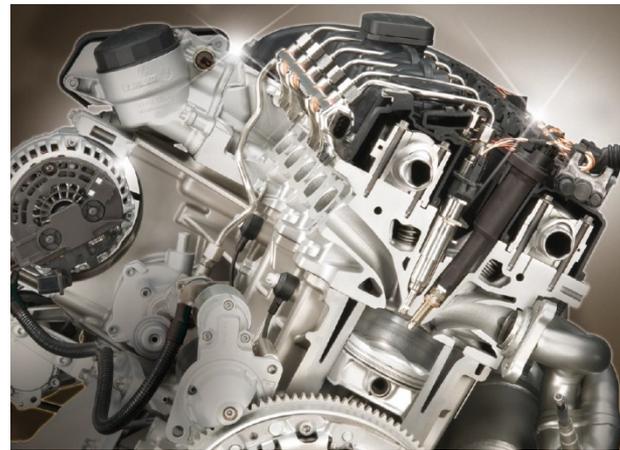
MCI a flusso stazionario più potenti

MACCHINE A FLUIDO

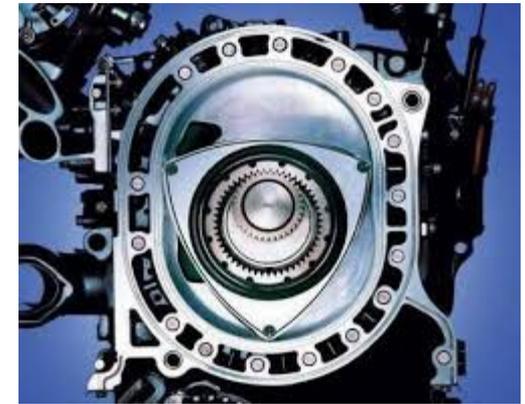
- Il MCI volumetrico può essere con moto alternativo o rotativo (rototraslatorio nel Wankel).
- Il motore alternativo è stato il primo MCI costruito (Barsanti e Matteucci 1854) e ancora oggi dopo oltre 150 anni è la macchina termica più utilizzata, in particolare nella trazione stradale, e anche quella a rendimento più alto.
- Presenta ancora oggi diversi punti deboli per cui si può dire che è il “peggior sistema usato in campo automobilistico esclusi tutti gli altri”.



Motore Barsanti e Matteucci (1854)



Moderno MCI ad accensione comandata

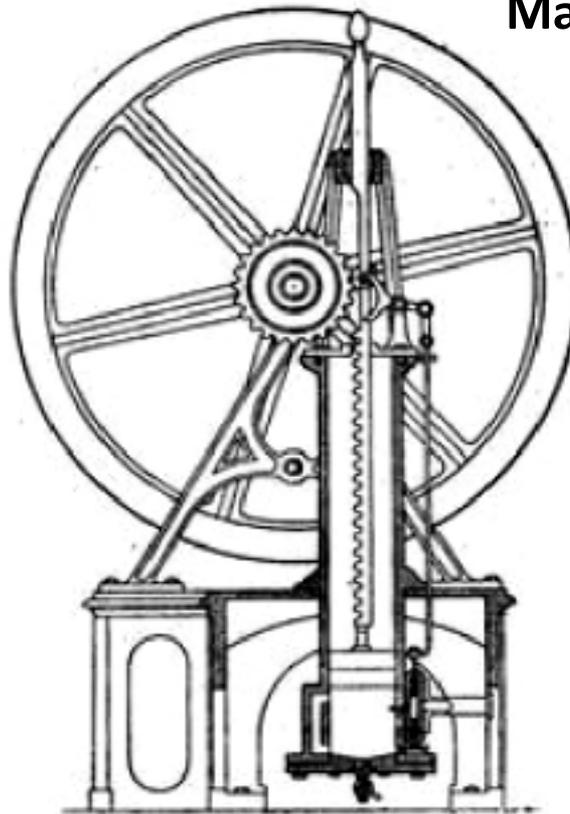
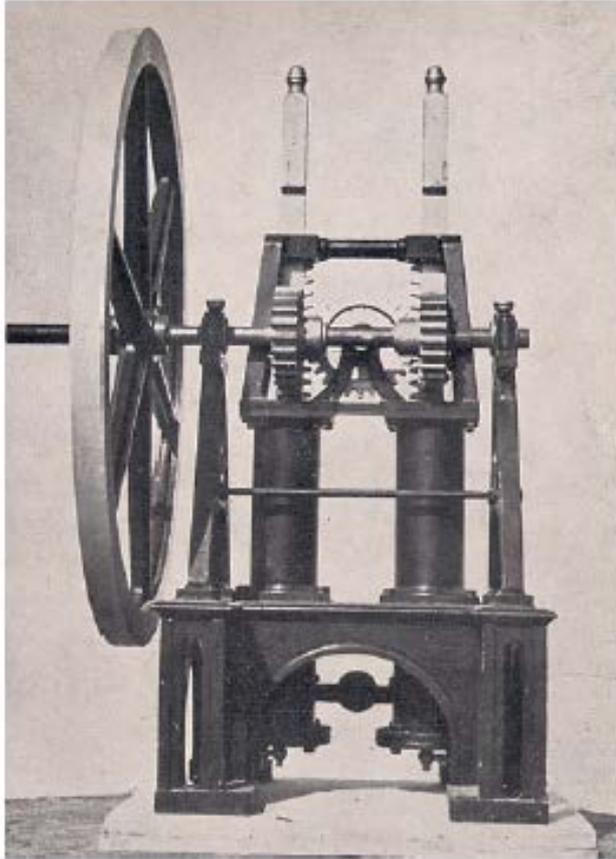


Motore Wankel (Mazda Renesis)



MACCHINE A FLUIDO

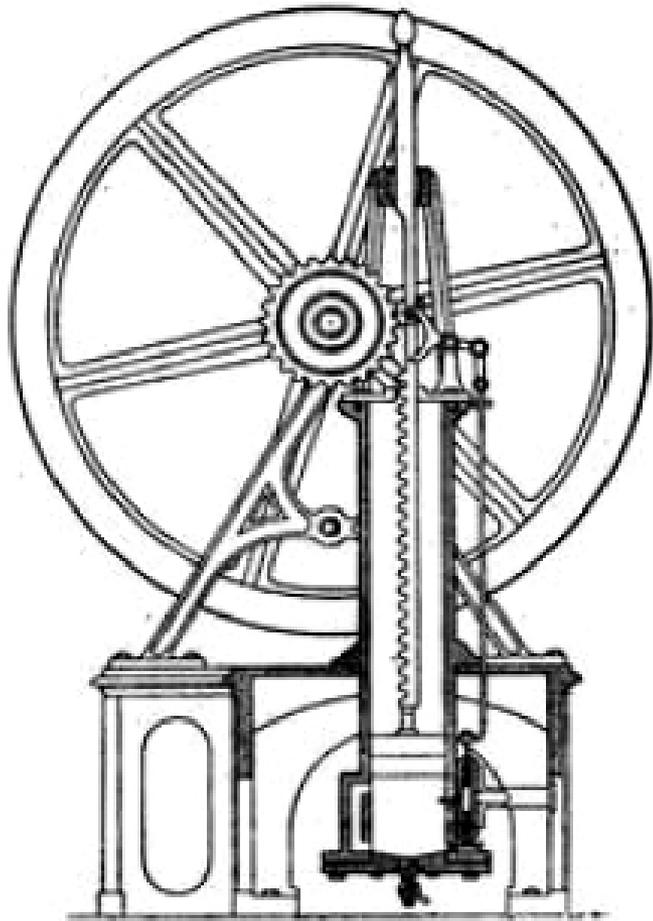
Riproduzione del primo esempio di motore a combustione interna usato per azionare una forbice e un trapano nelle Officine della Stazione ferroviaria Maria Antonia di Firenze (1856)



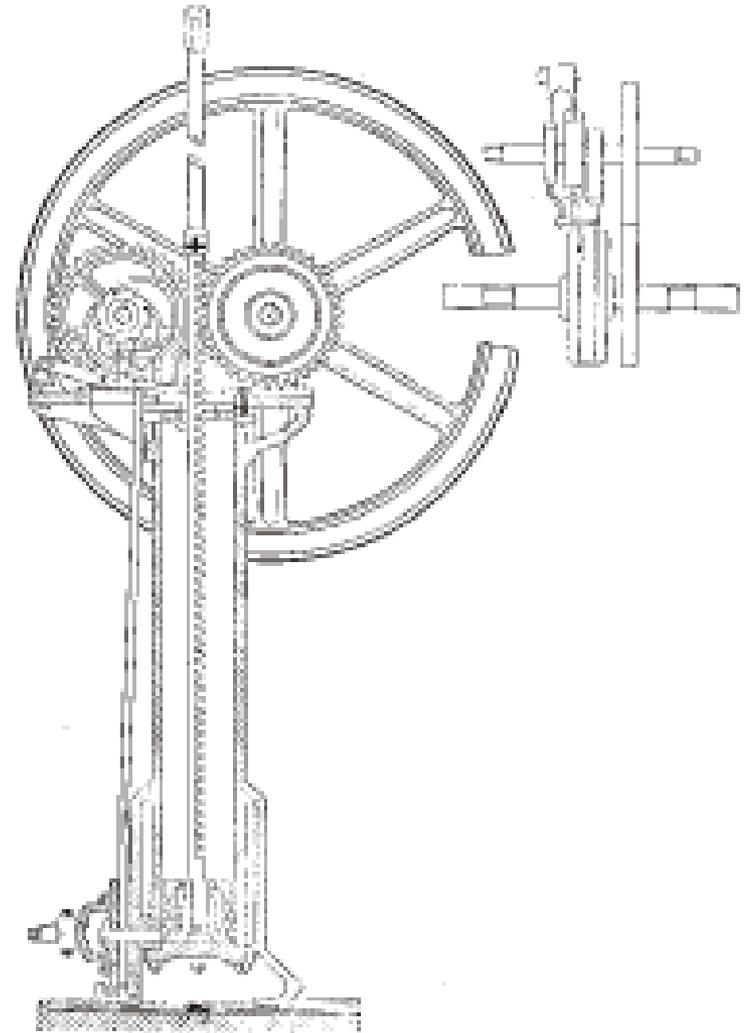
Il motore alternativo è stato il primo MCI costruito da Barsanti e Matteucci nel 1854.



MACCHINE A FLUIDO



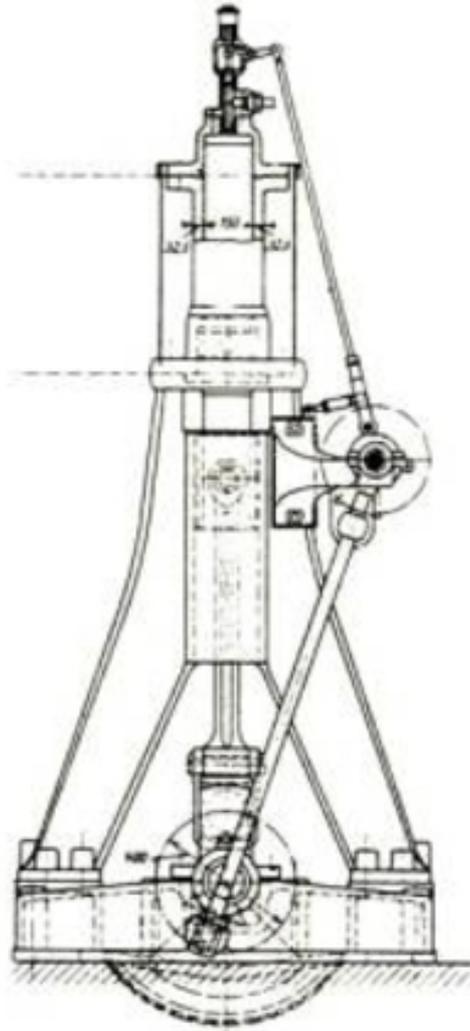
**Il motore alternativo di
Barsanti e Matteucci del 1854**



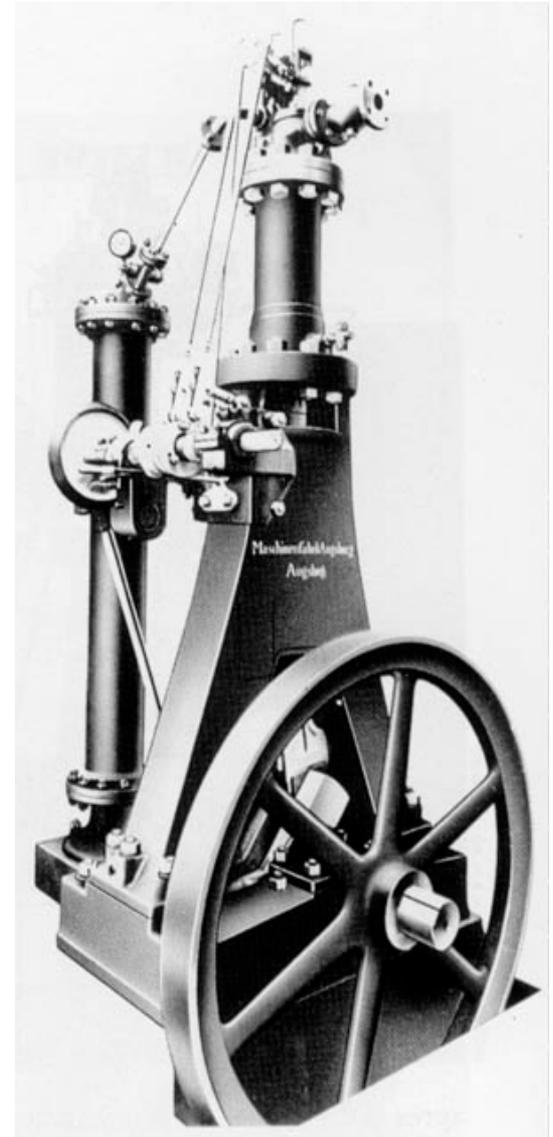
Il motore alternativo di Otto e Langen del 1867



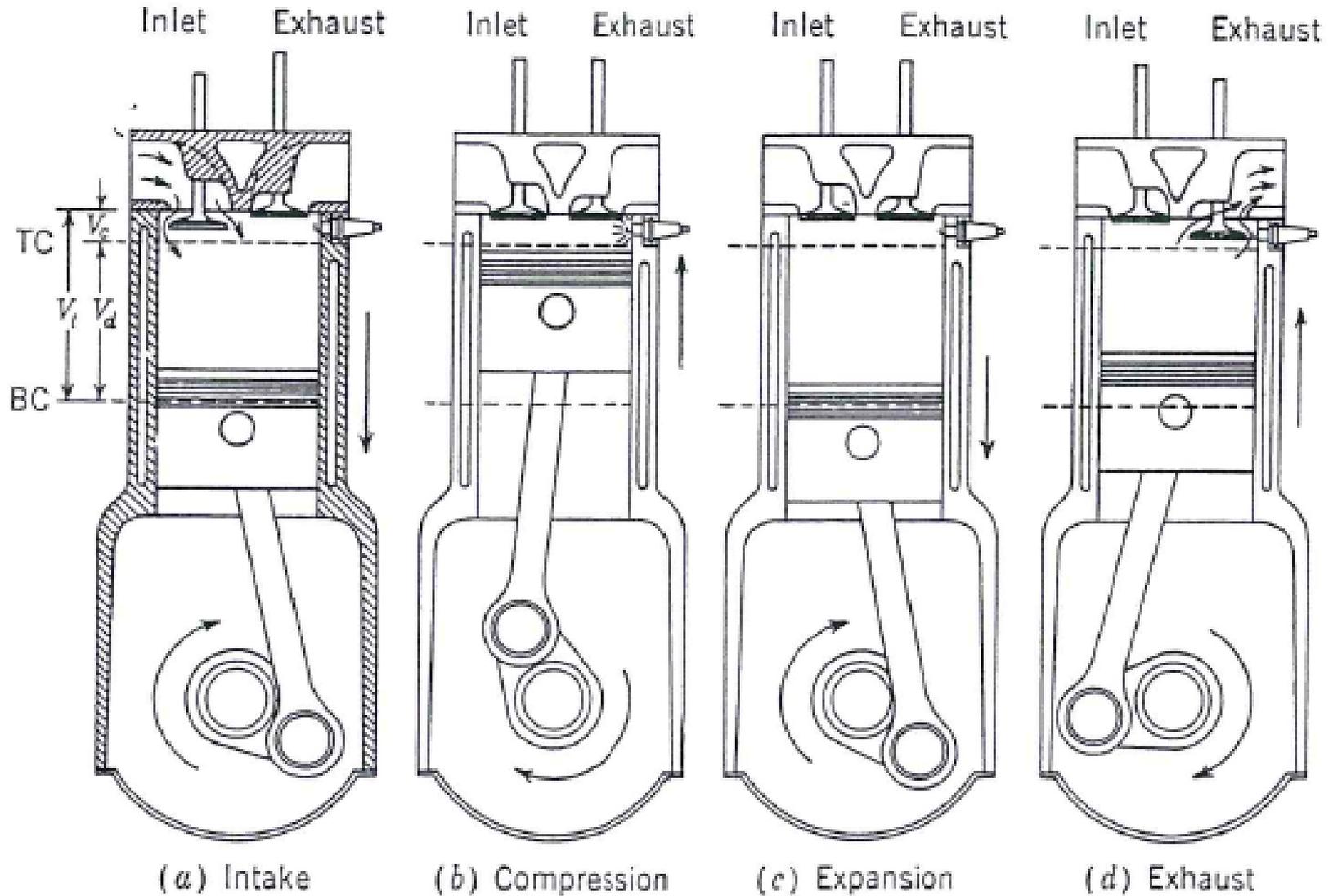
Il motore alternativo di Rudolf Diesel del 1893



Sezione del primo motore di Rudolf Diesel (1893).

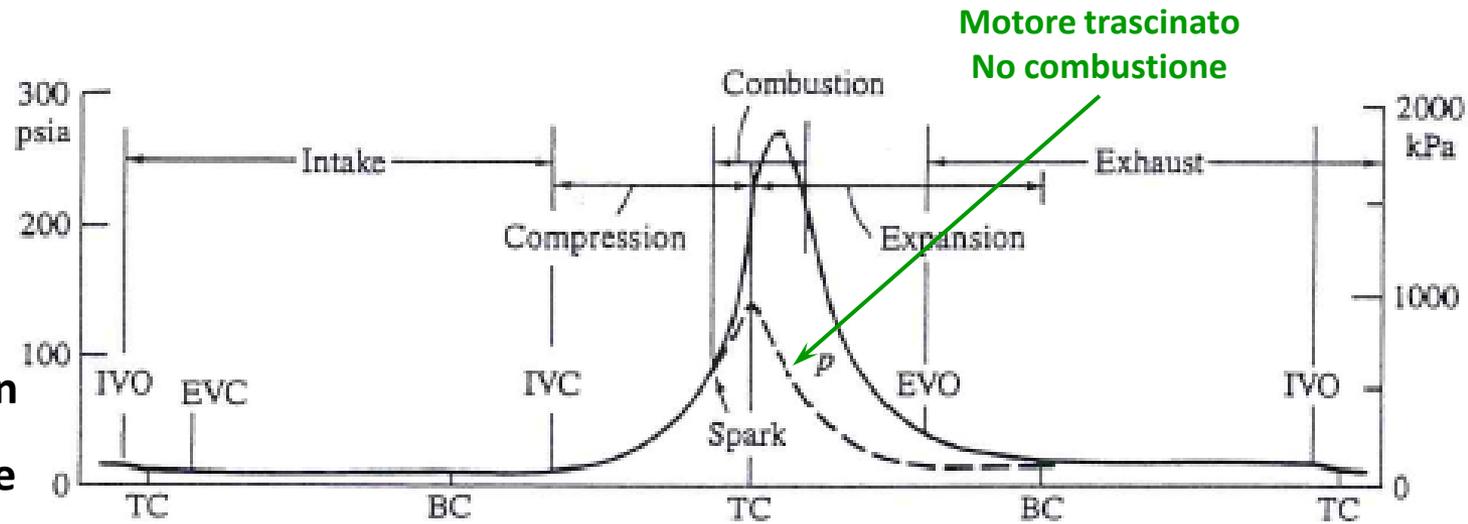


MACCHINE A FLUIDO

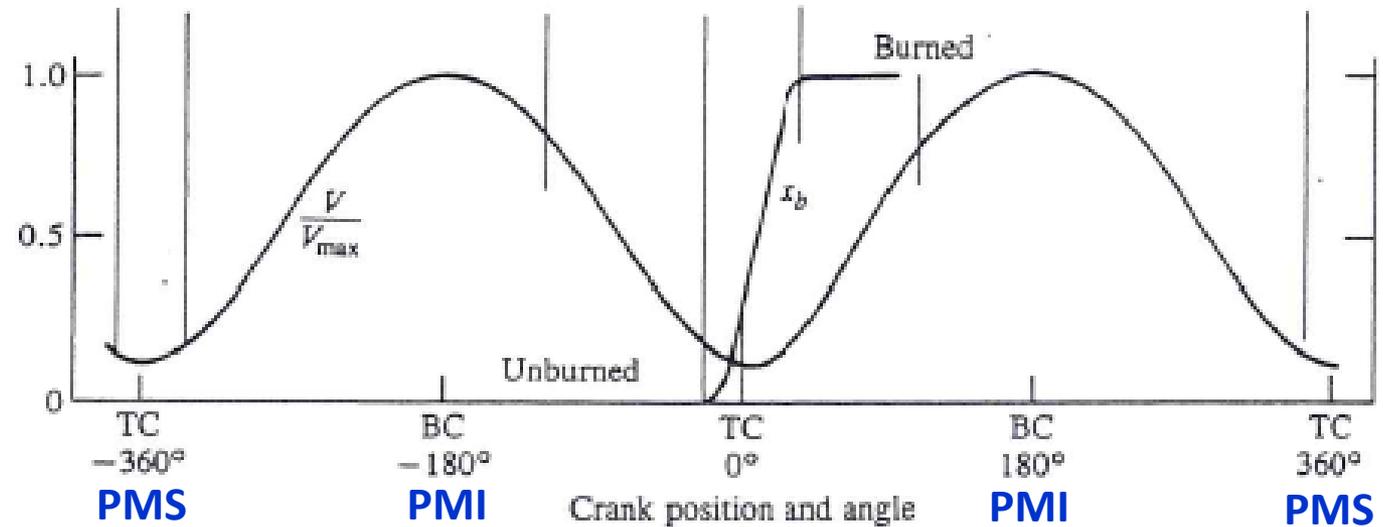


Motore ad accensione comandata 4T

MACCHINA A FLUIDO

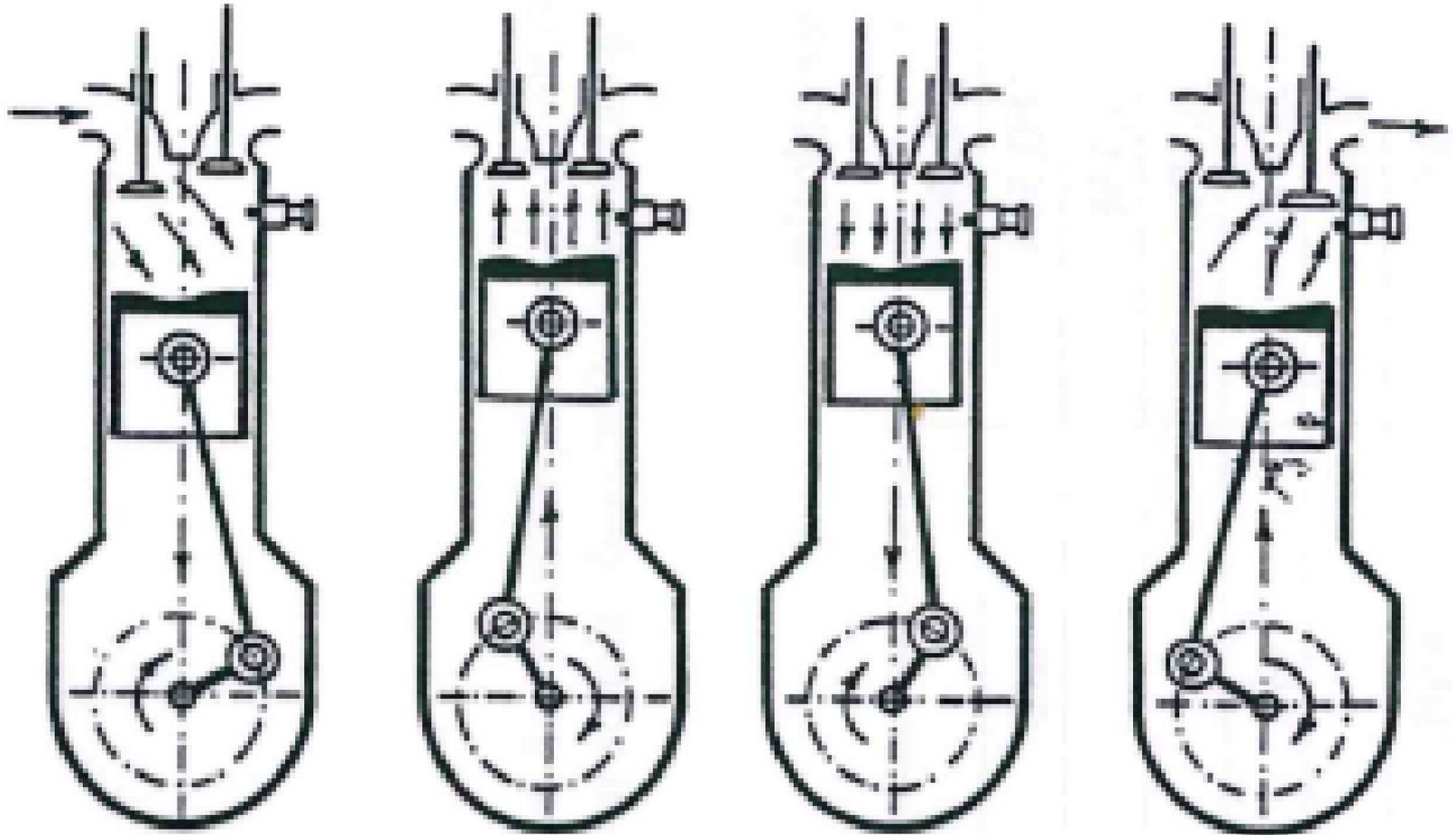


- IVO Inlet Valve Open
- IVC Inlet Valve Close
- EVO Exit Valve Open
- EVC Exit Valve Close



Motore ad accensione comandata 4T

MACCHINE A FLUIDO



Aspirazione

Compressione

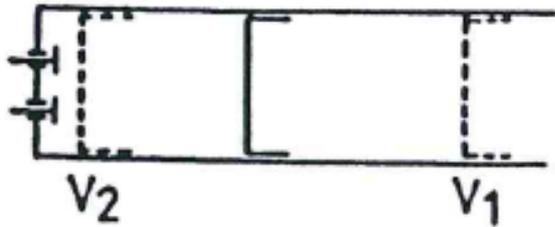
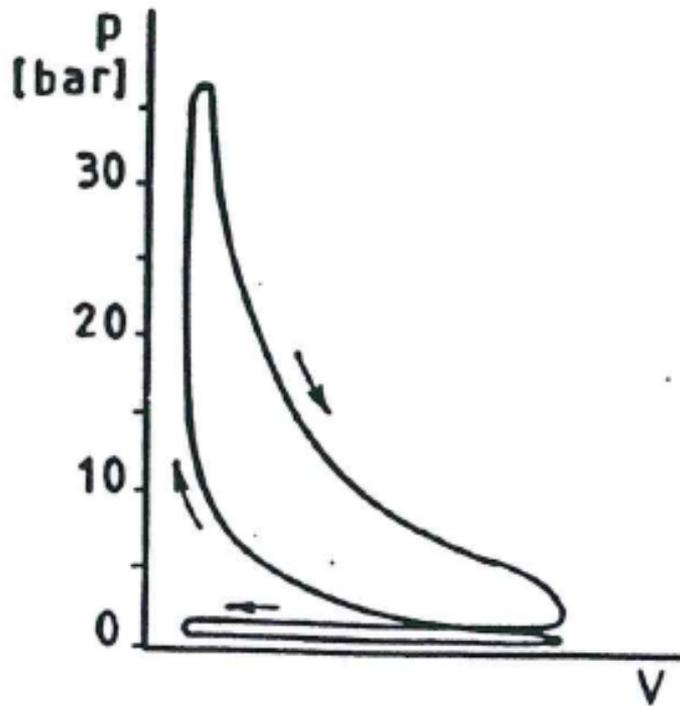
Espansione

Scarico

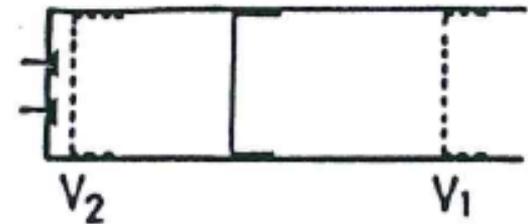
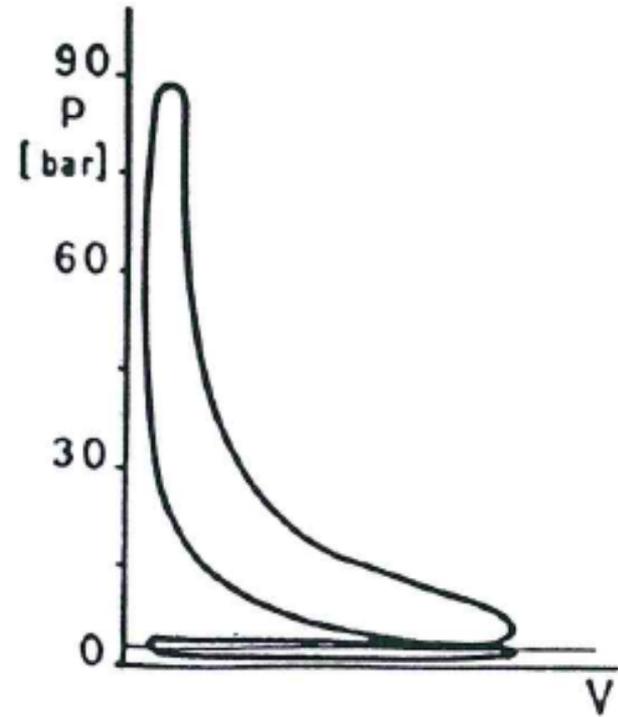


Motore ad accensione per compressione 4T

MACCHINE A FLUIDO



**Motore accensione
comandata aspirato 4T**



**Motore accensione per
compressione aspirato 4T**



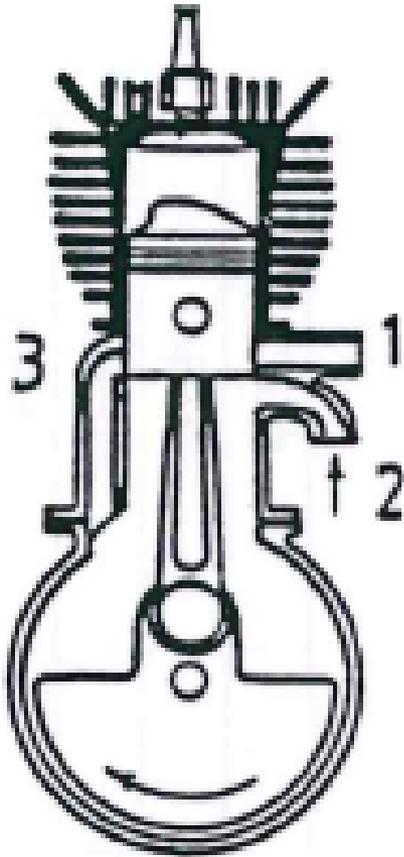
Diagramma indicato nei MCI 4T

MACCHINE A FLUIDO

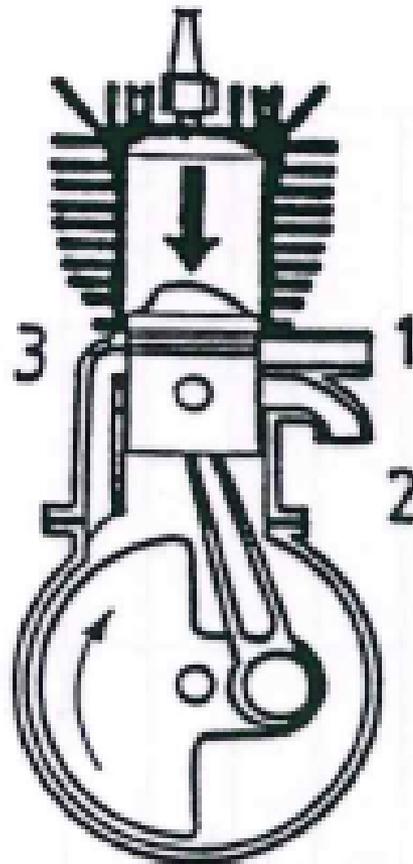
1 luce di scarico

2 luce di aspirazione

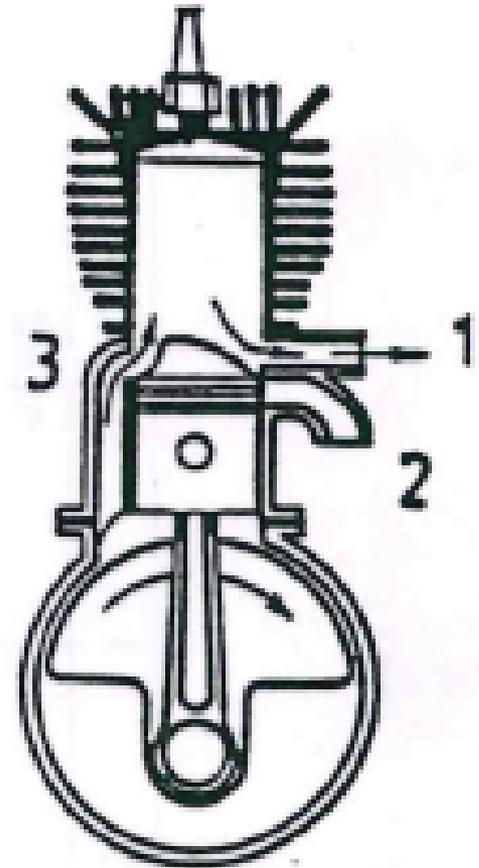
3 luce di lavaggio



Aspirazione nel carter e compressione nel cilindro



Combustione e espansione

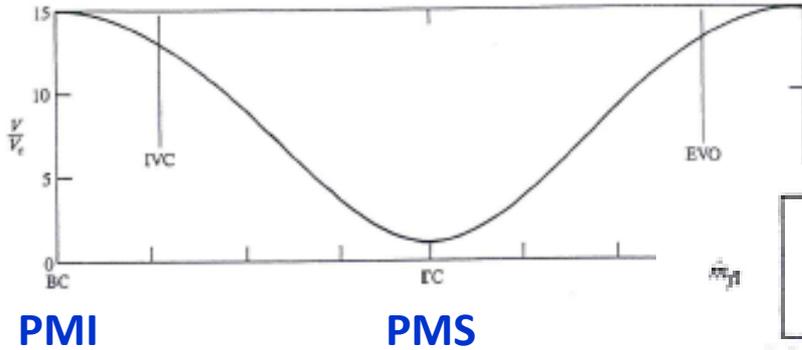


Scarico e riempimento del cilindro (Lavaggio)

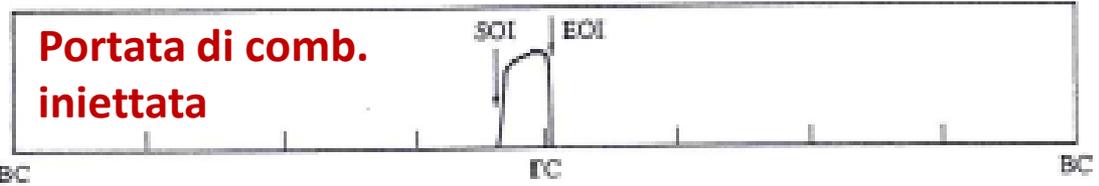


Motore ad accensione comandata 2T

MACCHINE A FLUIDO



BC: Bottom Center → PMI
TC: Top Center → PMS



IVC Inlet Valve Closing

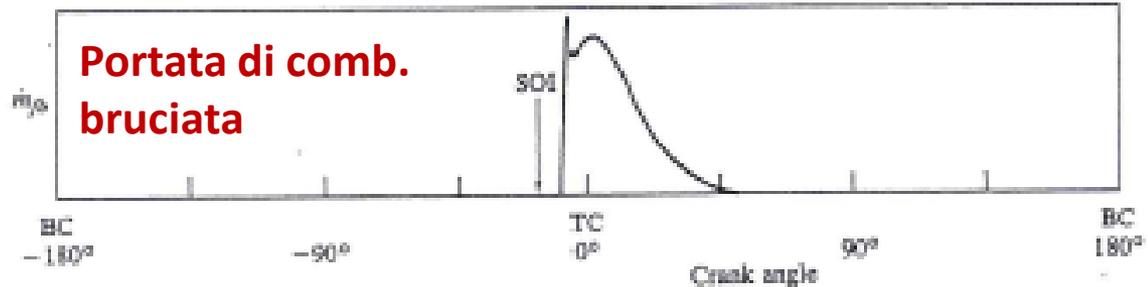
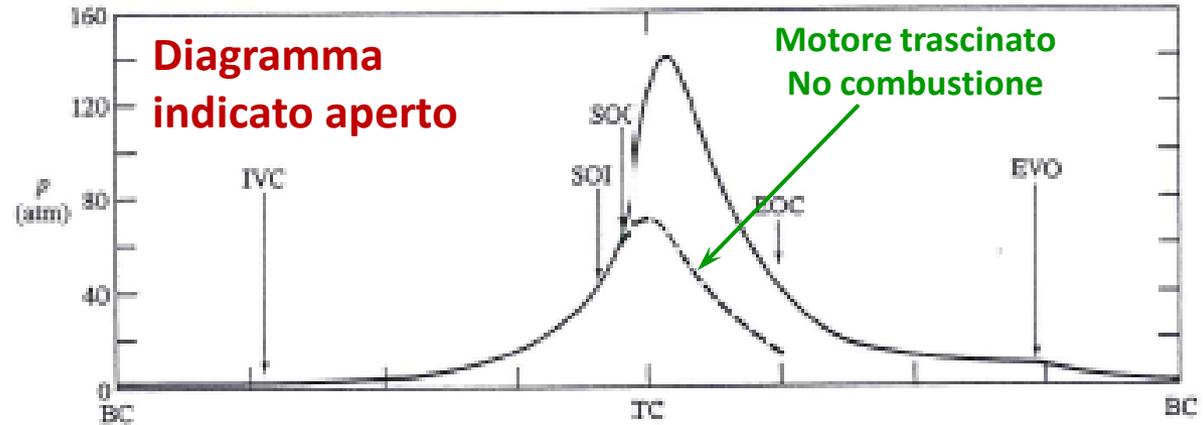
EVO Exit Valve Open

SOI Start Of Ignition

EOI End Of Ignition

SOC Start Of Combustion

EOC End Of Combustion



Motore ad accensione per compressione 2T

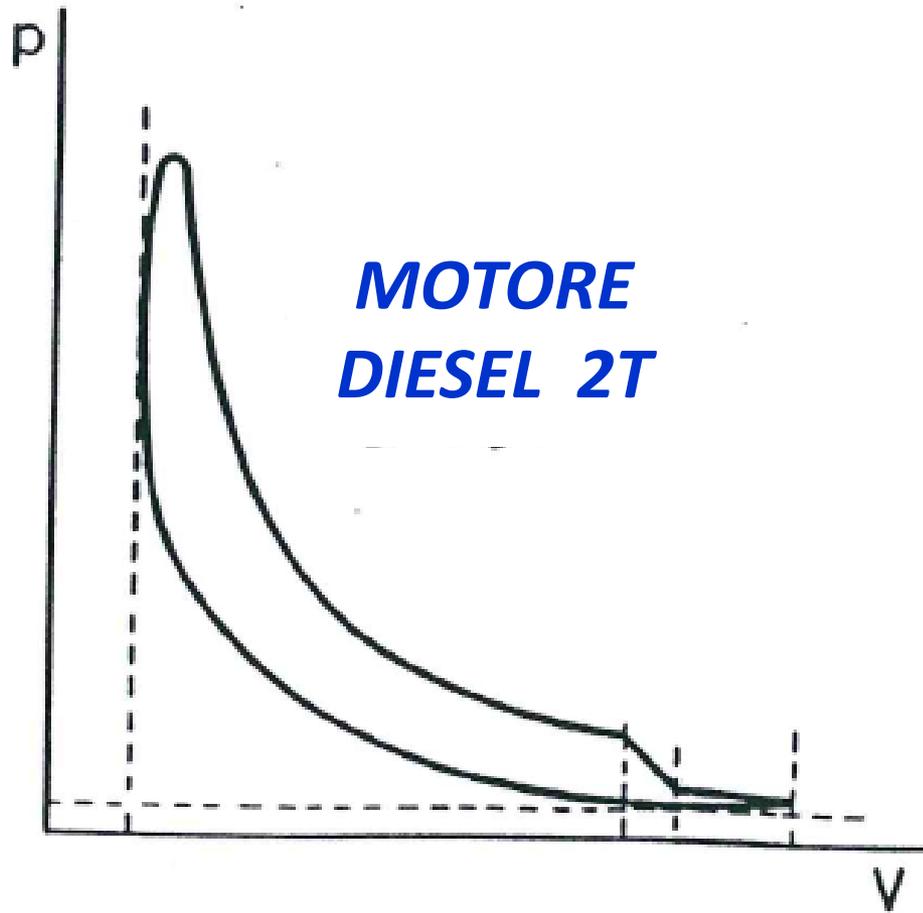
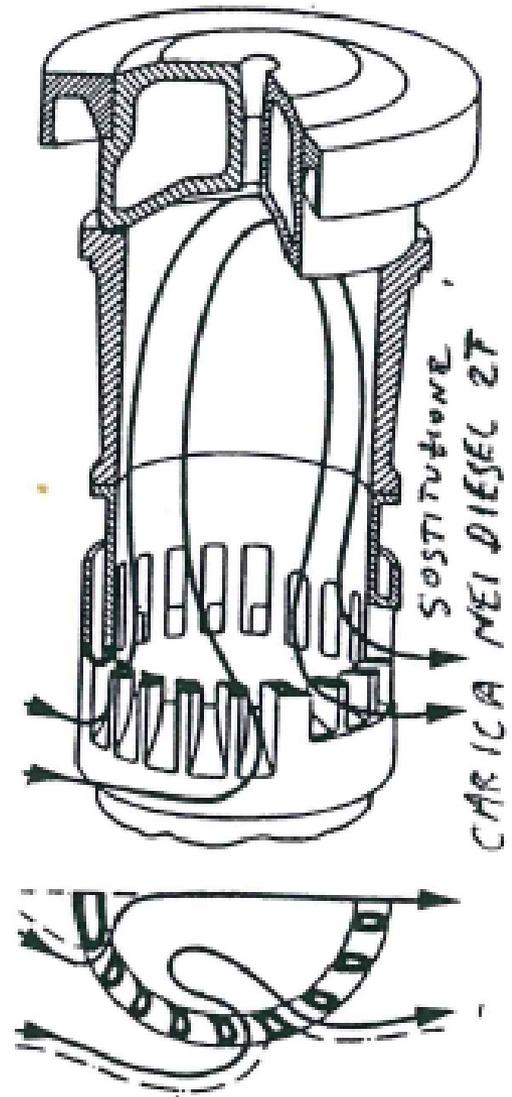
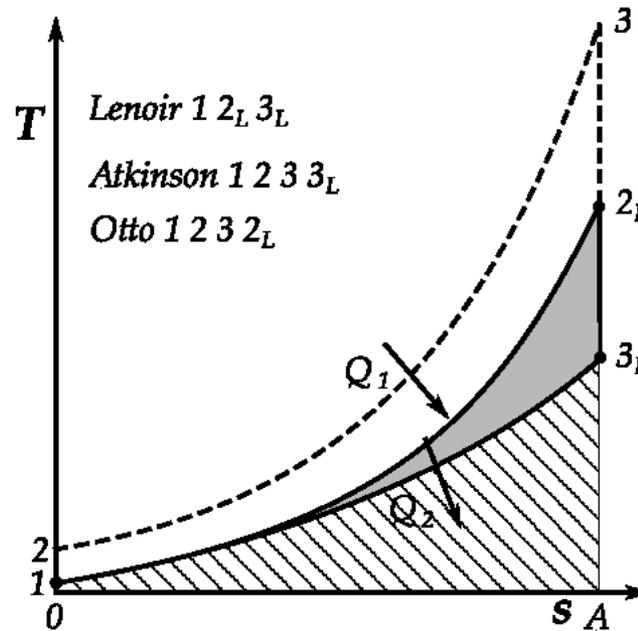
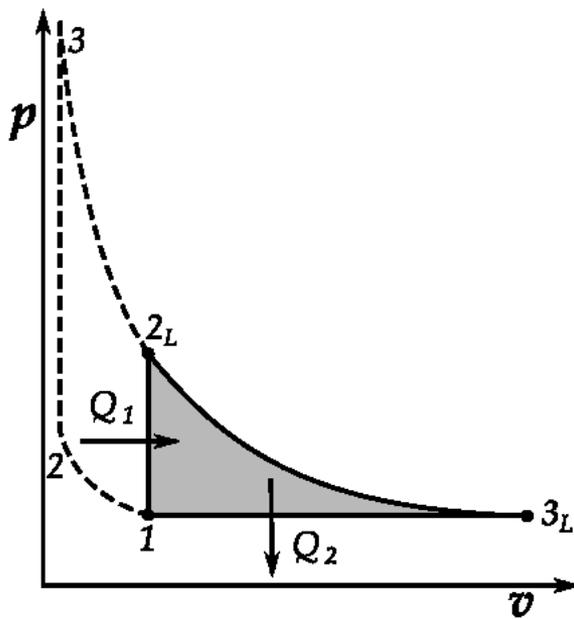


Diagramma p-V motore accensione per compressione 2T



MACCHINE A FLUIDO

- *Ciclo Lenoir senza compressione (1800) Macch. motrice semplice $\eta=4\%$*
- *Ciclo Atkinson – compressione isoentropica*
- *Ciclo Beau de Rochas – Otto scarico a $v=\text{cost.}$*



Rendimento massimo per trasferimenti di calore a temperatura costante come nel ciclo di Carnot.



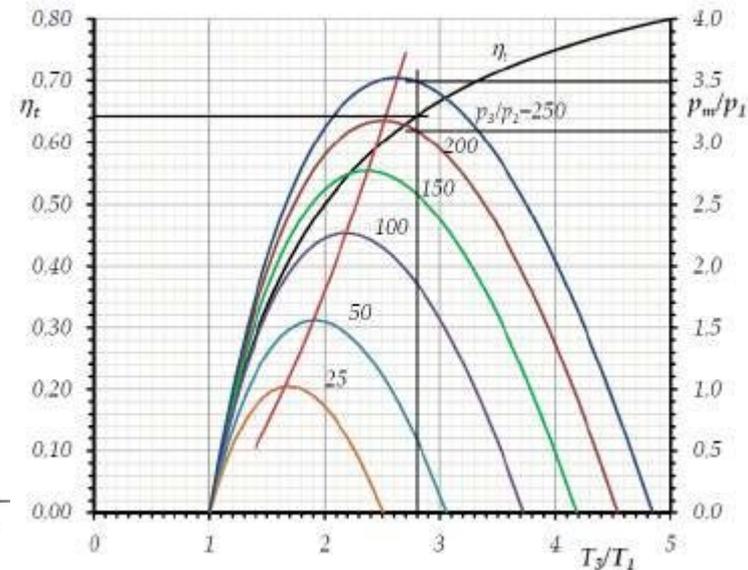
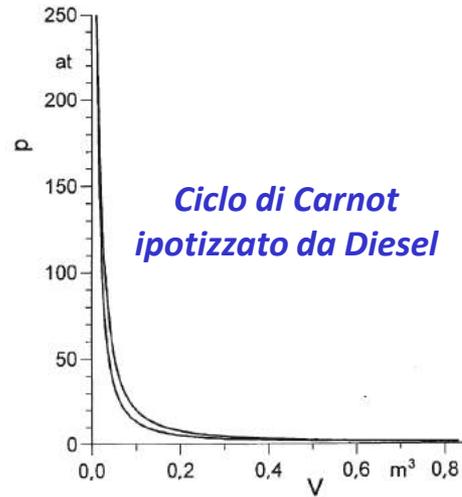
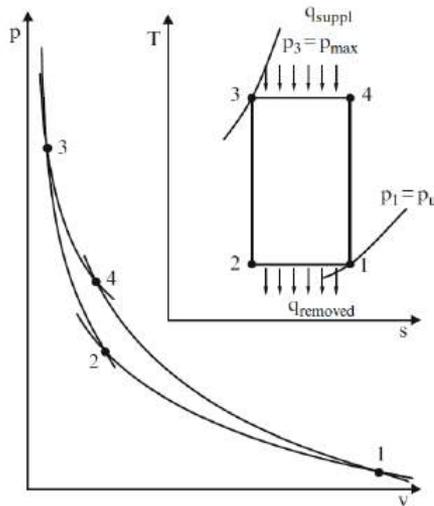
Ciclo di Carnot

Ciclo di Carnot è composto da due isoentropiche e da due isoterme.

Le trasformazioni di compressione e di espansione vengono effettuate in parte a temperatura costante e in parte senza scambio termico con l'esterno e pertanto dovrebbero essere eseguite in cilindri dedicati con un manovellismo pluricilindrico abbastanza complesso.

Per ottenere gli elevati rendimenti promessi dal ciclo di Carnot è necessario lavorare a pressioni molto alte con sollecitazioni meccaniche e termiche difficilmente sopportabili.

Ciclo di Carnot



Cicli Termodinamici di riferimento dei MCI

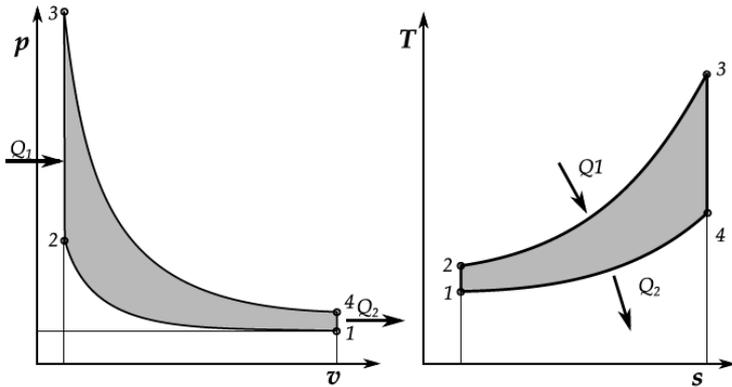


Figura 79: Ciclo Otto sui piani p-v e T-s

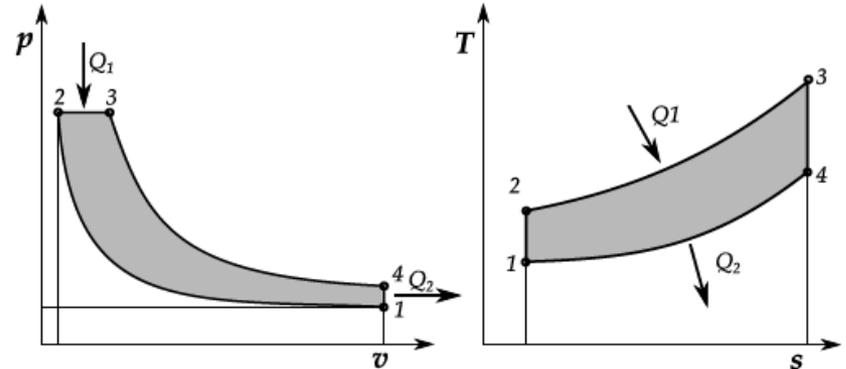


Figura 80: Ciclo Diesel sui piani p-v e T-s

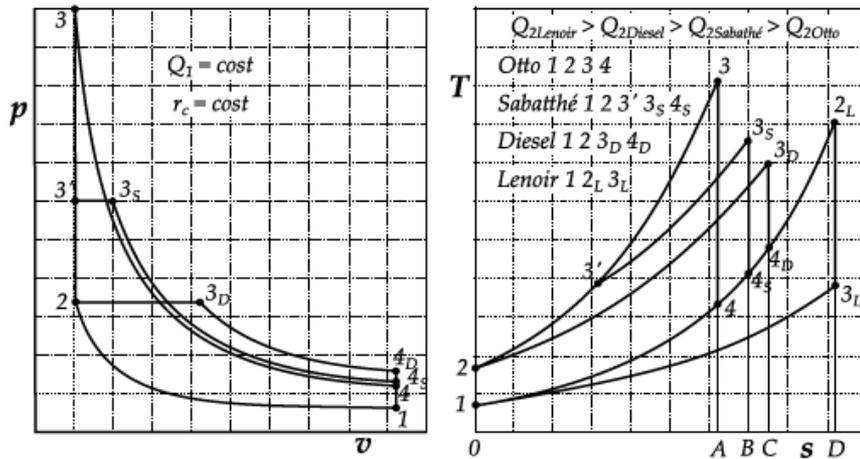


Figura 82: Confronto tra i cicli Otto, Diesel e Sabathé a parità di Q_1 e di r_c

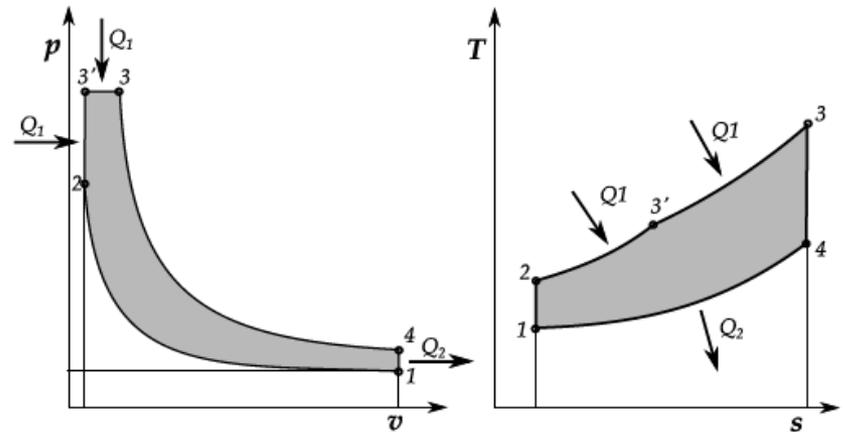
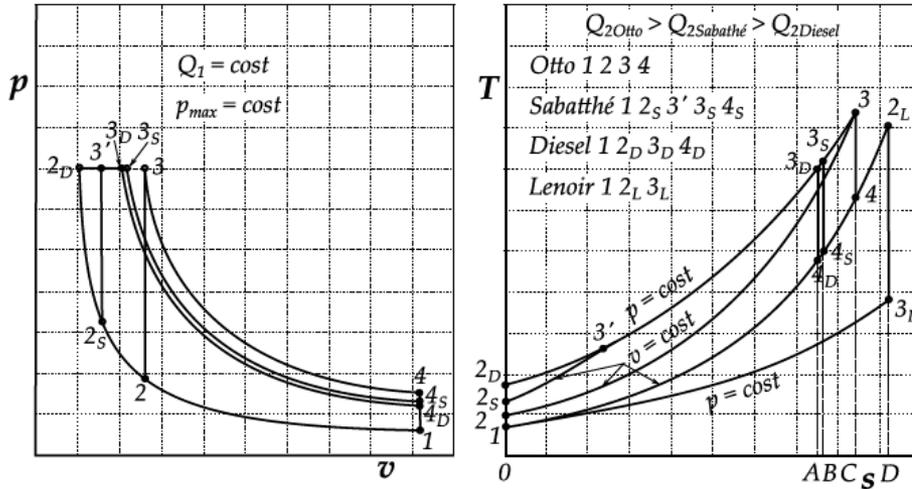


Figura 81: Ciclo Sabathé sui piani p-v e T-s





Rendimenti termodinamici

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 - r_c^{k-1}} \frac{\pi \tau^k - 1}{\pi - 1 + k\pi(\tau - 1)}$$

$$r_c = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V + V_{cc}}{V_{cc}} \quad \pi = \frac{T_3}{T_2} \quad \tau = \frac{T_{3'}}{T_3}$$

Figura 84: Confronto tra i cicli Otto, Diesel e Sabathé a parità di Q_1 e di p_{max}

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 - r_c^{k-1}}$$

Beau de Rochas - Otto

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 - r_c^{k-1}} \frac{\tau^k - 1}{k(\tau - 1)}$$

Diesel

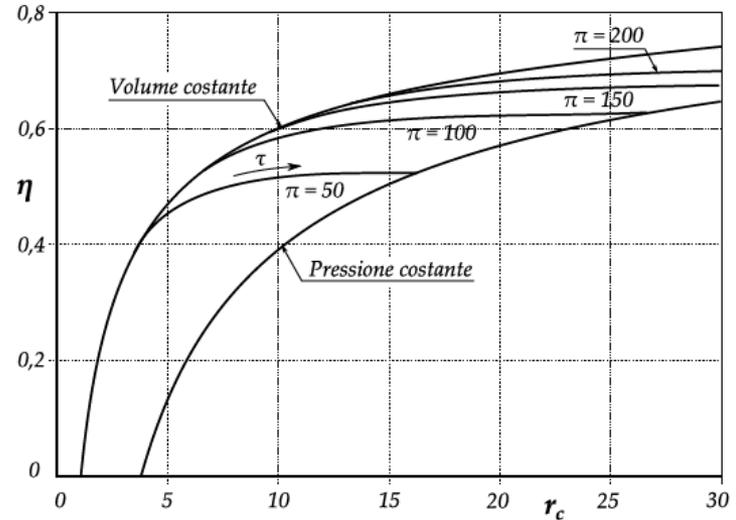


Figura 85: Rendimento teorico dei cicli Otto, Diesel e Sabathé al variare di r_c e della pressione massima π



Indice d'aria

$$\lambda = \frac{\alpha}{\alpha_{st}} = \frac{m_a}{m_{at}}$$

Motori sovralimentati (O_s) campo compreso tra

$r_c = 7$ con $r_s = 1.8$ $r_c = 9$ con $r_s = 1.4$

Motori aspirati (O_a)

$9 < r_c < 11$.

Motori Diesel

p_{max} fino a circa 200 bar nei grossi motori navali, $r_s = 3-3.5$ e $r_c = 12-15$ (campo D1).

Motori per autocarri e trasporto pesante con p_{max} superiori ai 180 bar con $r_c = 16-18$ (campo D2).

Motori automobilistici con $p_{max} = 160$ bar, $r_s = 1.9$ e $r_c = 18-20$ (campo D3)

Rendimenti termodinamici

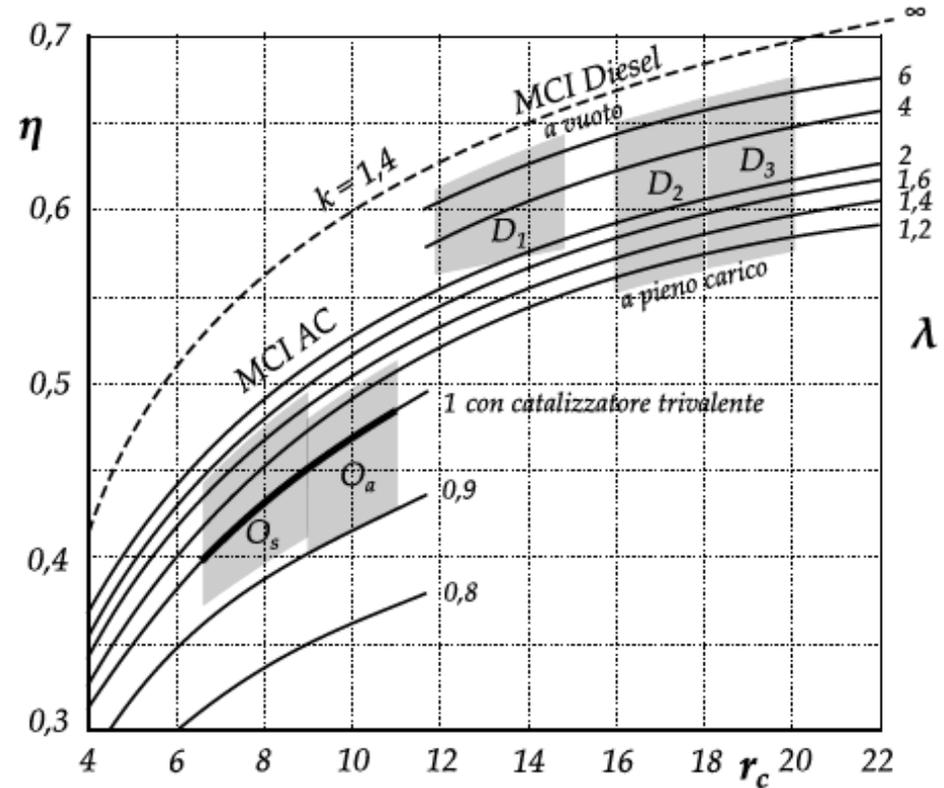


Figura 87: Rendimento termodinamico dei motori, ad Accensione Comandata e Diesel, con riferimento al ciclo Otto, al variare di r_c e dell'indice d'aria λ



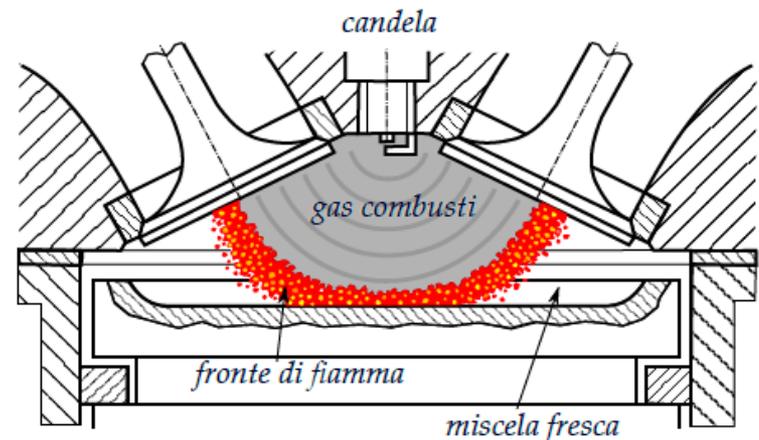
Combustione

- La combustione è un fenomeno di rapida ossidazione degli atomi di carbonio e idrogeno con l'ossigeno dell'aria.
- Il fenomeno richiede che il combustibile sia in forma gassosa e si trovi finemente disperso nell'aria a formare una miscela con un opportuno rapporto aria combustibile.
- La combustione può essere attivata portando tutta la miscela o una parte di essa alla giusta temperatura.

La rottura della molecola del combustibile con la liberazione dei legami carbonio idrogeno che vengono gradualmente occupati dall'ossigeno porta ad un ritardo di tipo chimico che per la singola molecola può essere trascurabile e la combustione considerata pressoché istantanea.

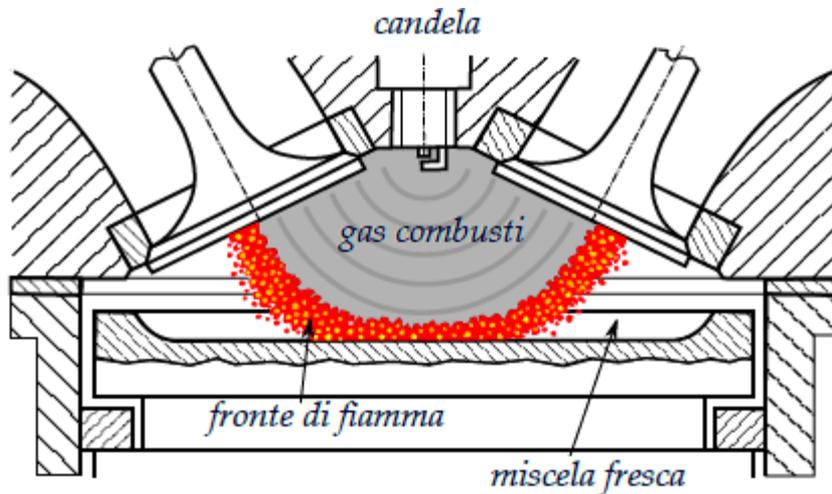
Accensione comandata

Combustione della miscela è attivata da una scintilla o un punto caldo che si propaga per fronte di fiamma

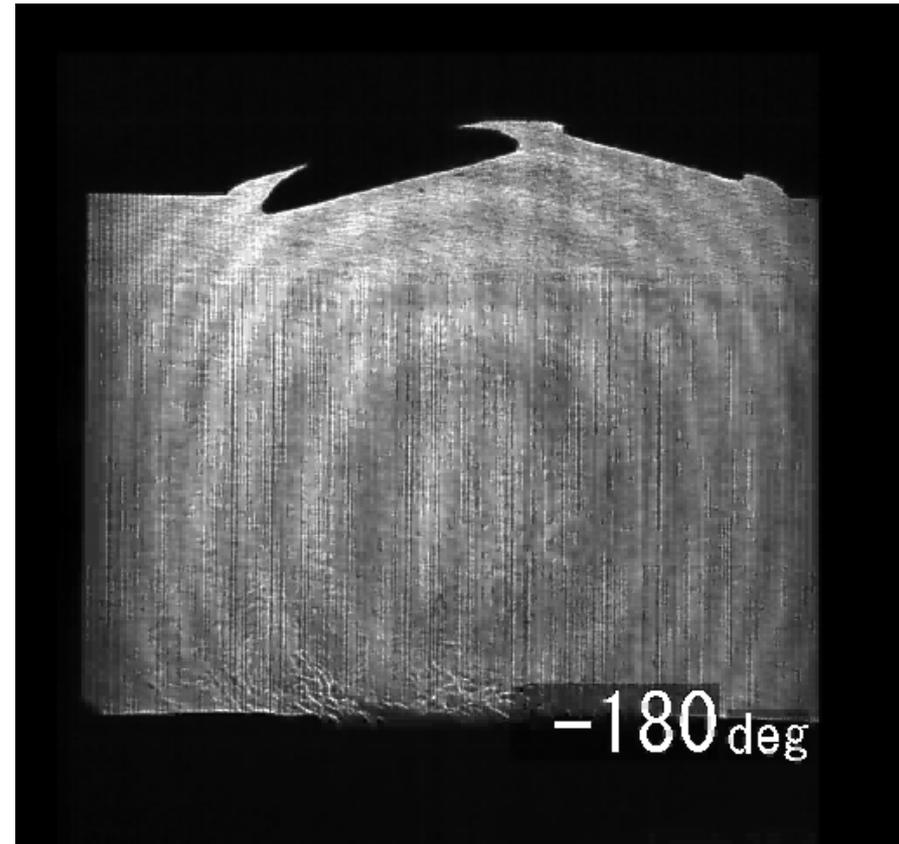


MACCHINE A FLUIDO

- Accensione grazie all'energia fornita da una scintilla.
- Carica premiscelata omogenea
- Propagazione della combustione per fronte di fiamma

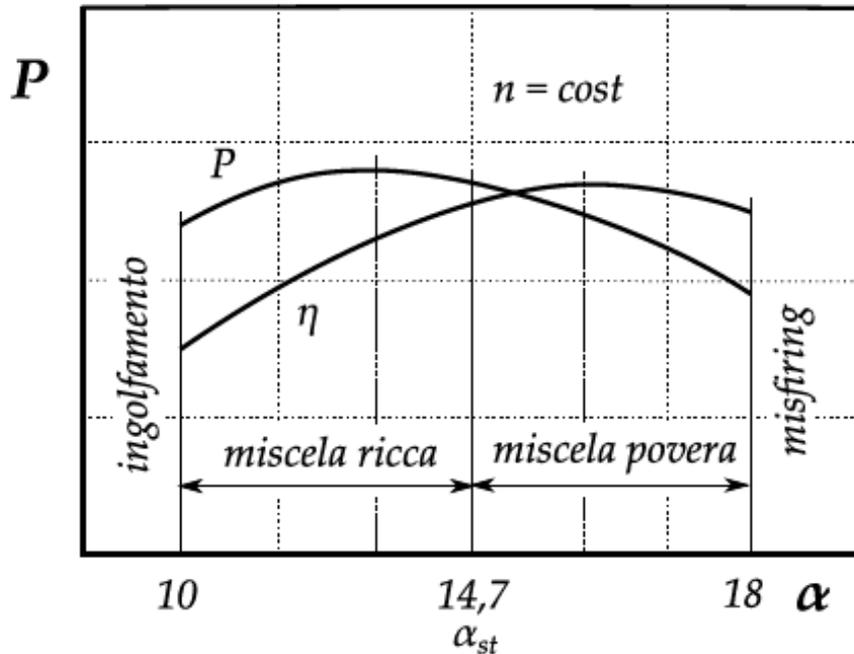


Combustione per fronte di fiamma



MCI ad accensione comandata

- Miscela povera: combustione in eccesso d'aria, migliore rendimento;
- Miscela stechiometrica: combustione ideale
- Miscela ricca: combustione in difetto d'aria condizioni di potenza massima.



*Combustione progressiva
ma non a $v = cost$.*

$$\eta \quad \alpha = \frac{m_a}{m_c} \quad \text{Rapporto aria/combustibile}$$

$$\Phi = \frac{\alpha_{st}}{\alpha} \quad \text{Rapporto di equivalenza}$$

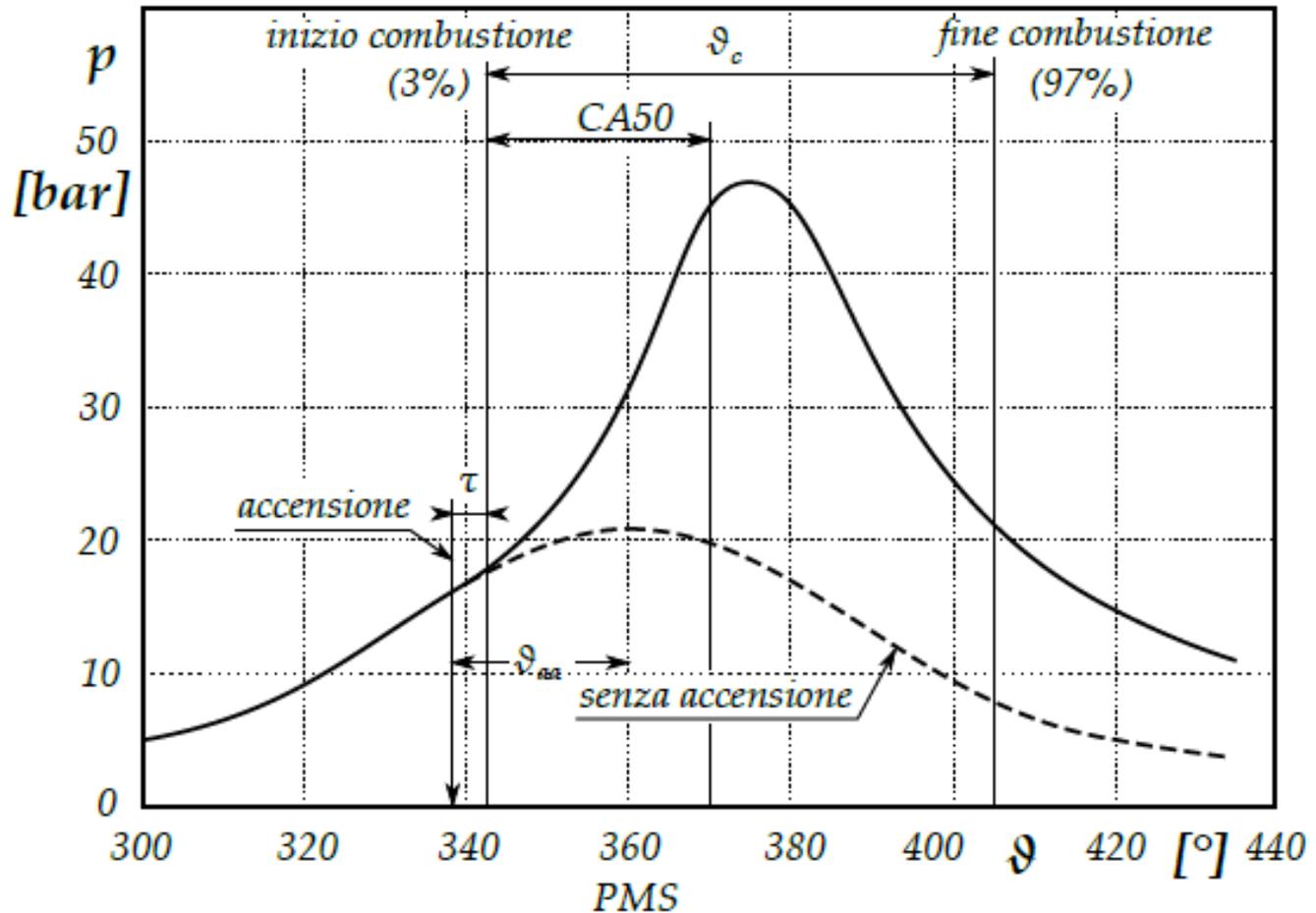
α è compreso fra 10 e 18 in base alle condizioni di funzionamento ovvero

$$0.8 < \Phi < 1.4$$

L'avanzamento del fronte di fiamma determina una combustione graduale che richiede qualche ms pari a circa **60°** dell'angolo di manovella.



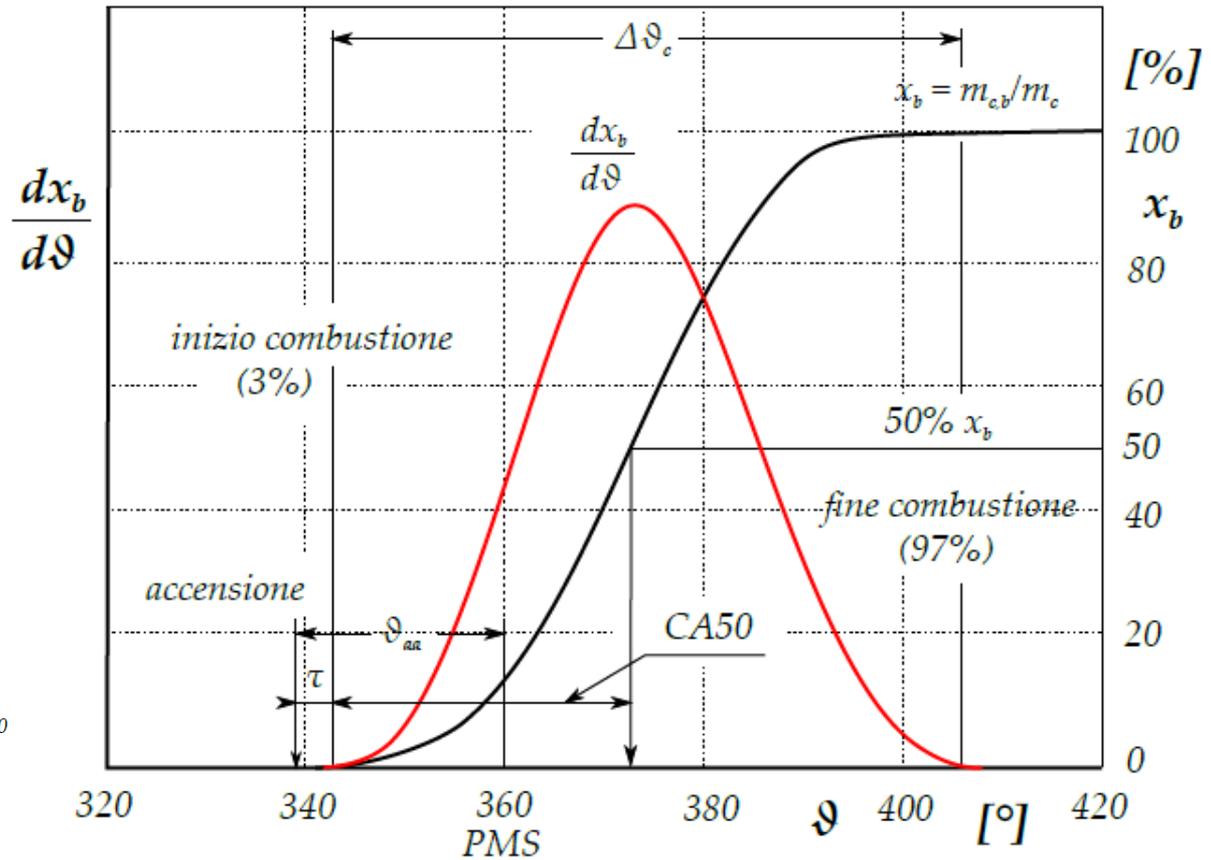
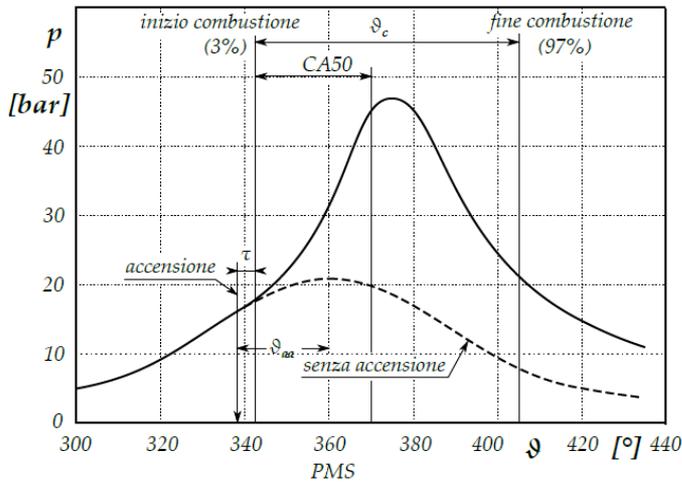
➤ Andamento della pressione nel cilindro



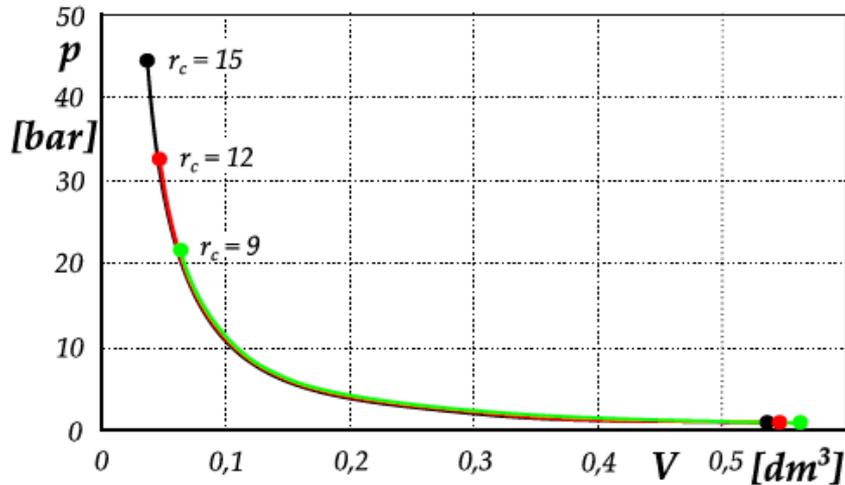
MCI ad accensione comandata



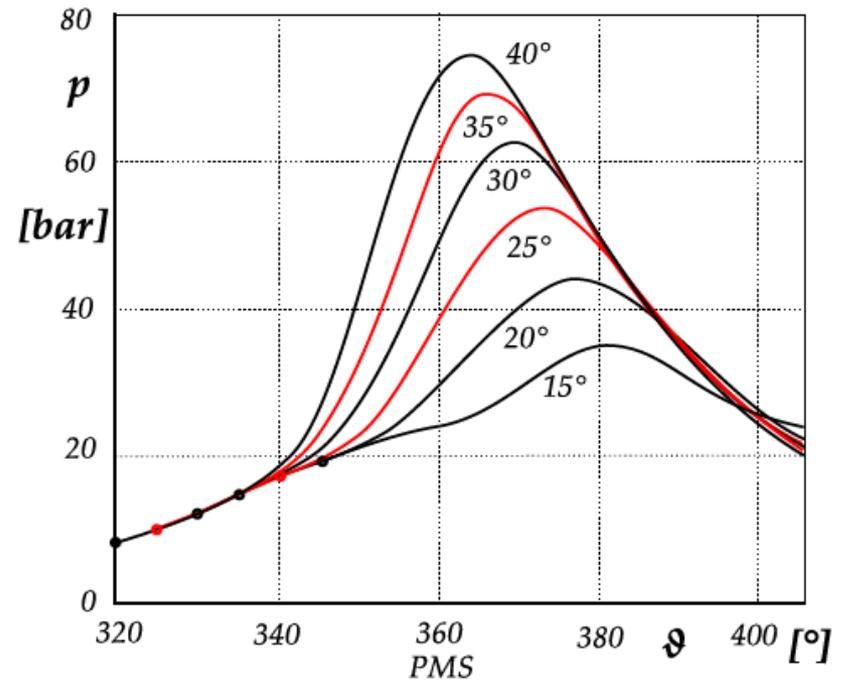
➤ Funzione di Vibe



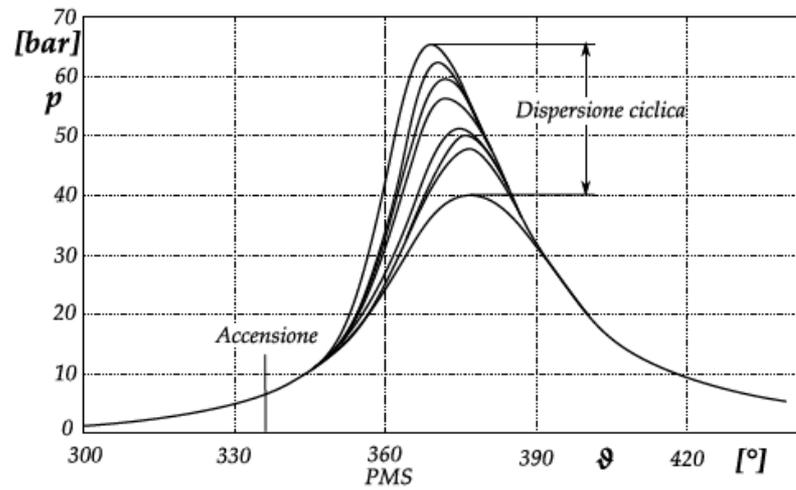
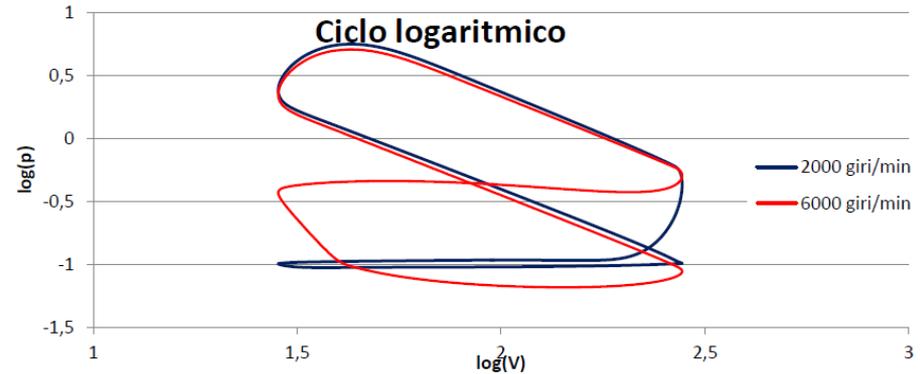
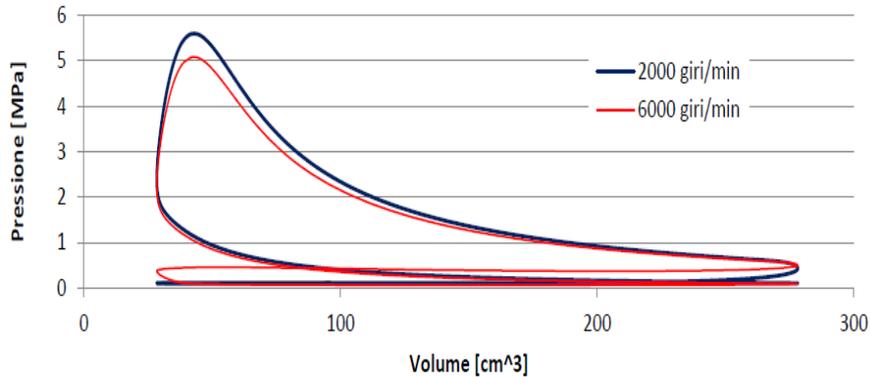
Influenza del rapporto di compressione



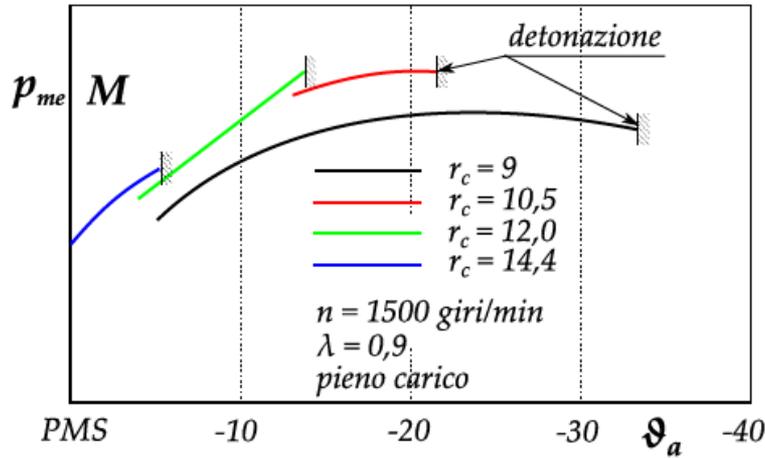
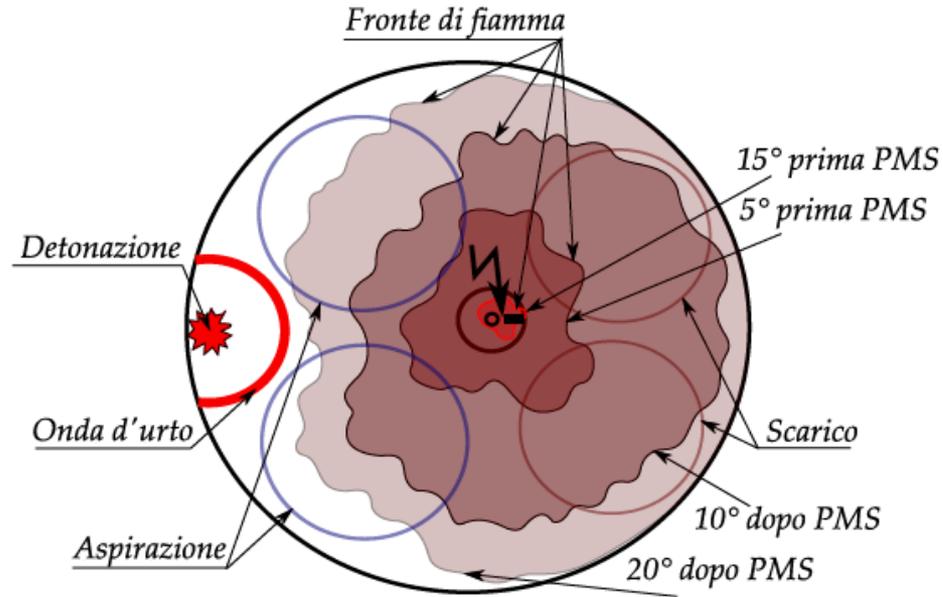
Influenza dell'angolo di anticipo



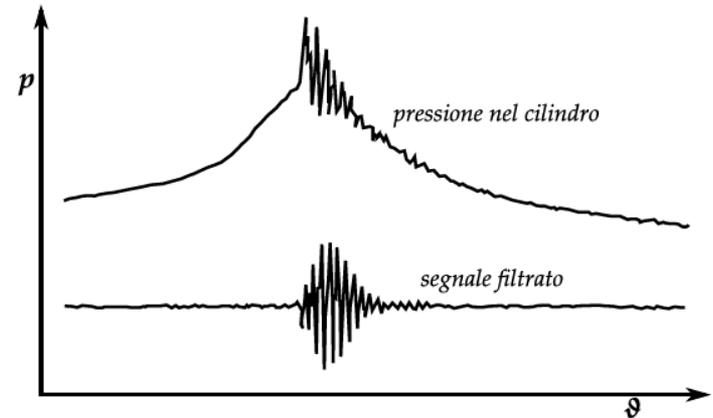
➤ Ciclo reale (indicato)



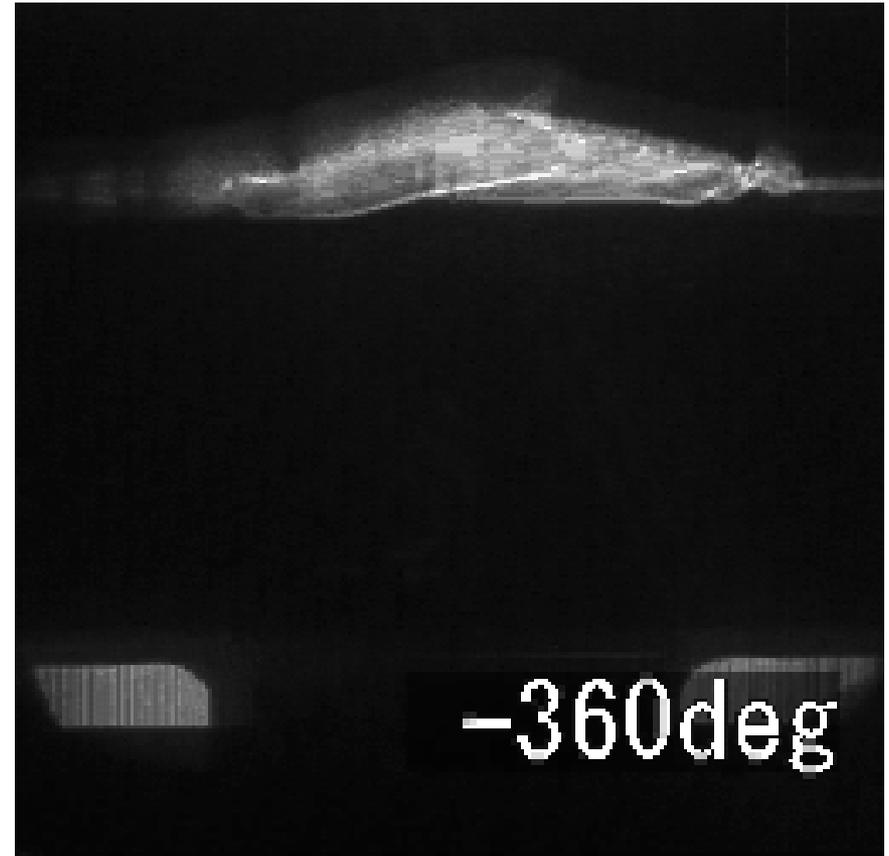
➤ Detonazione



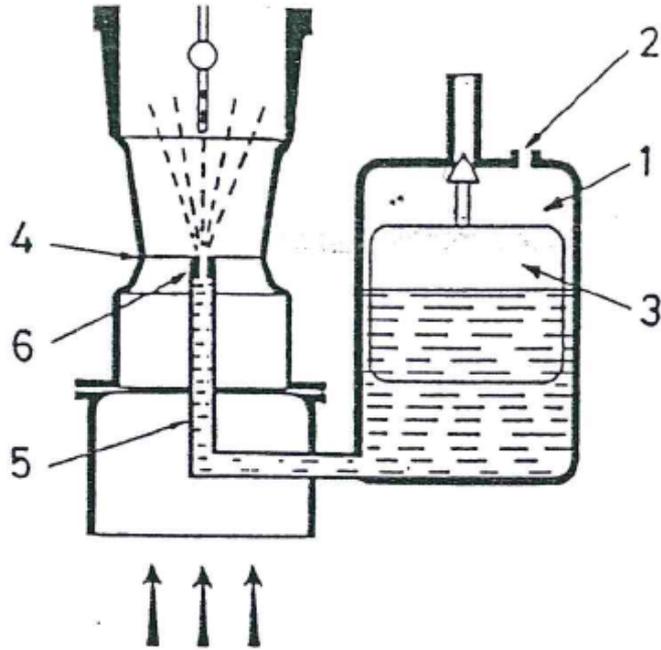
η



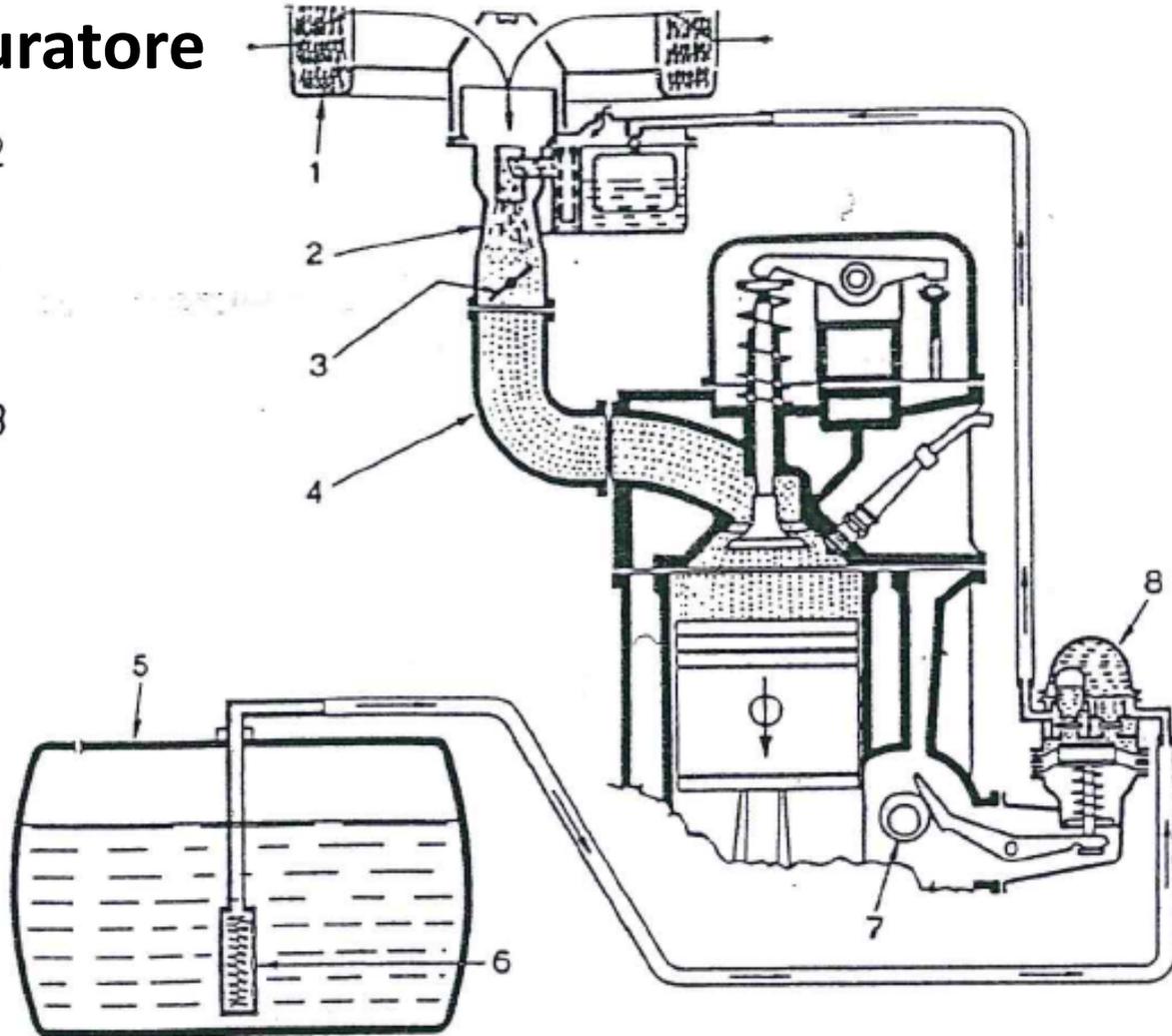
➤ Detonazione



Alimentazione a carburatore



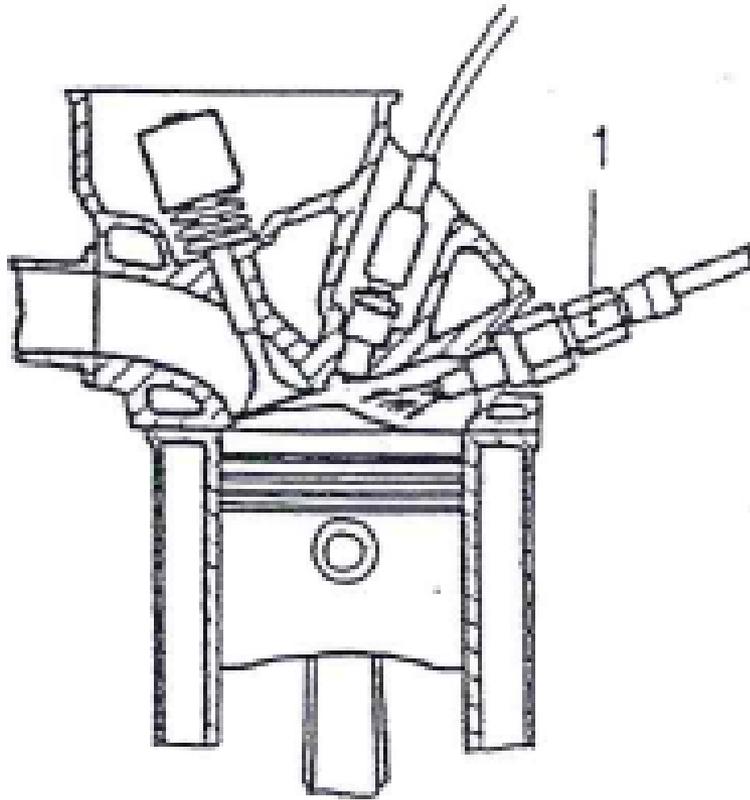
1 vaschetta; 2 foro; 3 galleggiante
4 venturi; 5 spruzzatore; 6 getto



1 filtro aria; 2 carburatore 3 valvola a farfalla 4 collettore di aspirazione; 5 serbatoio combustibile; 6 filtro combustibile; 7 eccentrico; 8 pompa a membrana

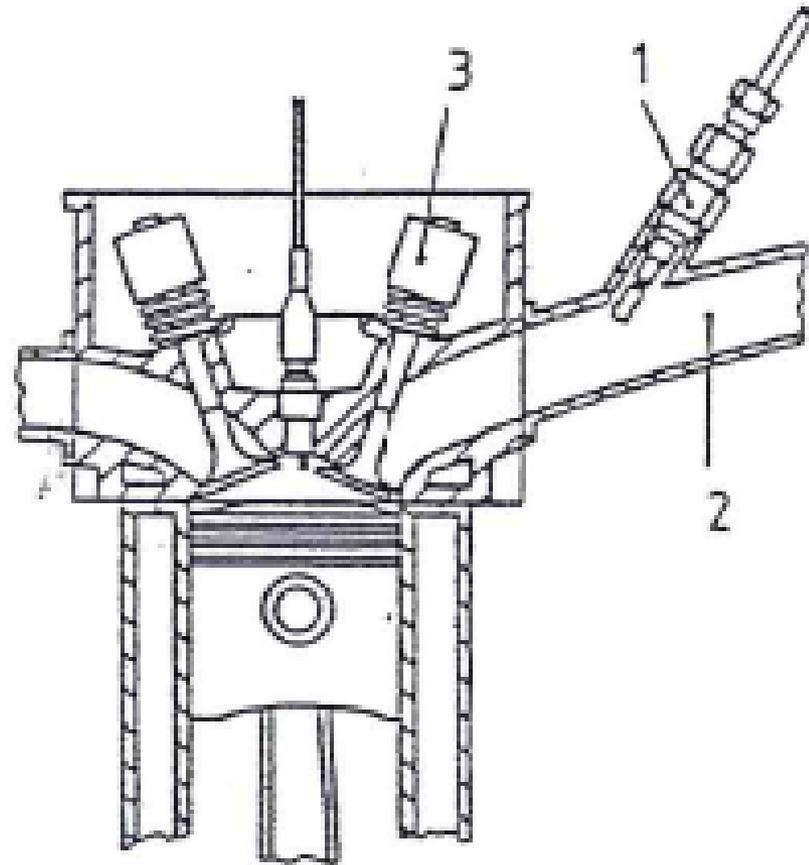


Alimentazione a iniezione



Iniezione diretta

1 iniettore

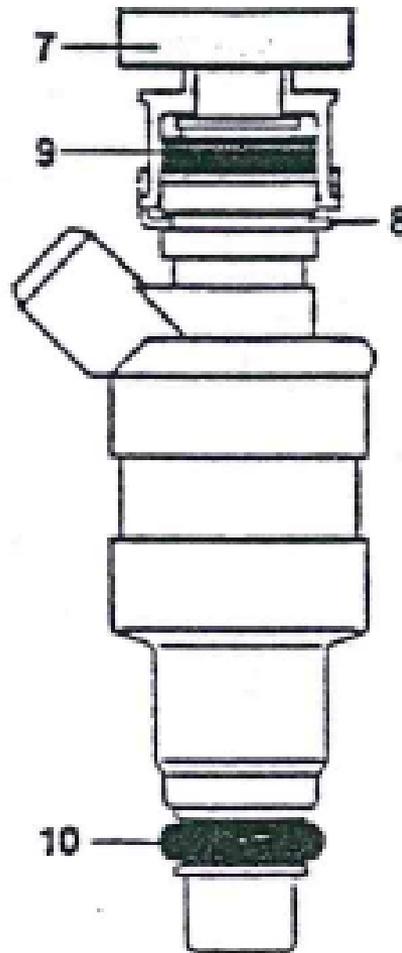
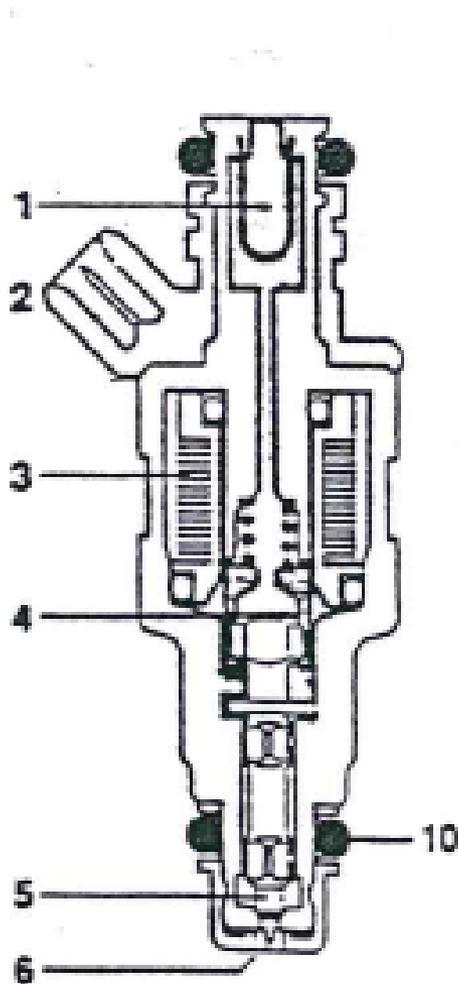


Iniezione indiretta

1 iniettore 2 collettore di aspirazione
3 valvola di aspirazione



Iniettore elettromagnetico BOSCH



- 1 filtro
- 2 connessione elettrica
- 3 avvolgimento
- 4 armatura avvolgimento
- 5 valvola a spillo
- 6 pernetto
- 7 tubazione combustibile
- 8 anello di serraggio
- 9 anello
- 10 anello inferiore di tenuta



Accensione Spontanea

L'energia di attivazione è dovuta alle elevate pressioni e temperature raggiunte, generalmente aumentando il rapporto di compressione. Tutti i combustibili in opportune condizioni di temperatura e pressione possono autoaccendersi.

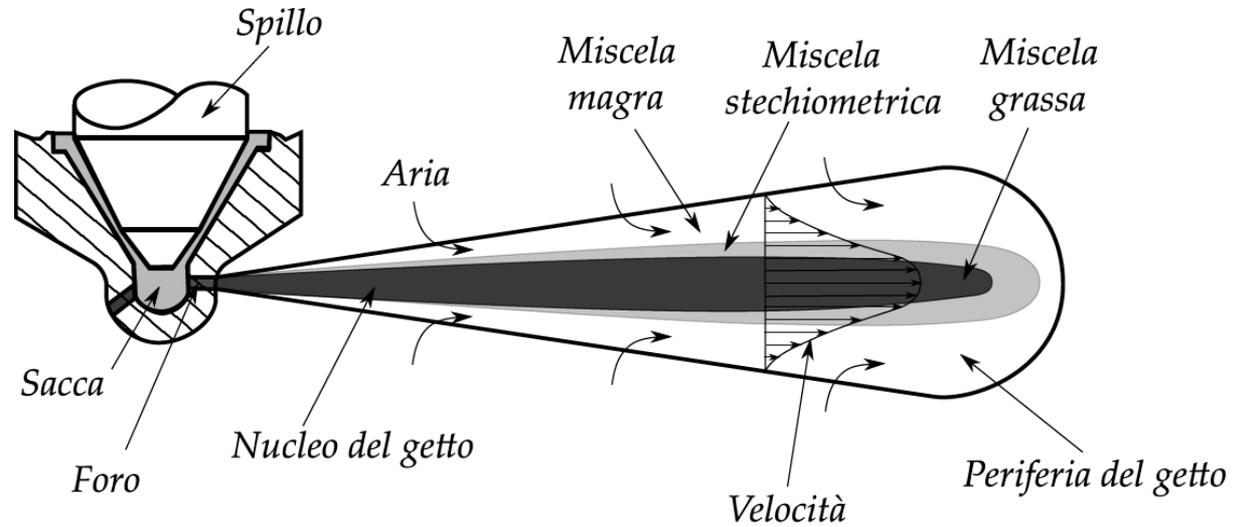
La rottura delle molecole di combustibile inizia a temperature relativamente basse dando origine alle prime reazioni di formazione di composti instabili parzialmente ossigenati che costituiscono le cosiddette reazioni di prefiamma.

Questo processo è esotermico e innesca quindi una reazione a catena che provoca presto la generazione di fiamma e quindi la combustione. Il processo non è però istantaneo e richiede un tempo caratteristico di ogni combustibile che prende il nome di **tempo di incubazione**.

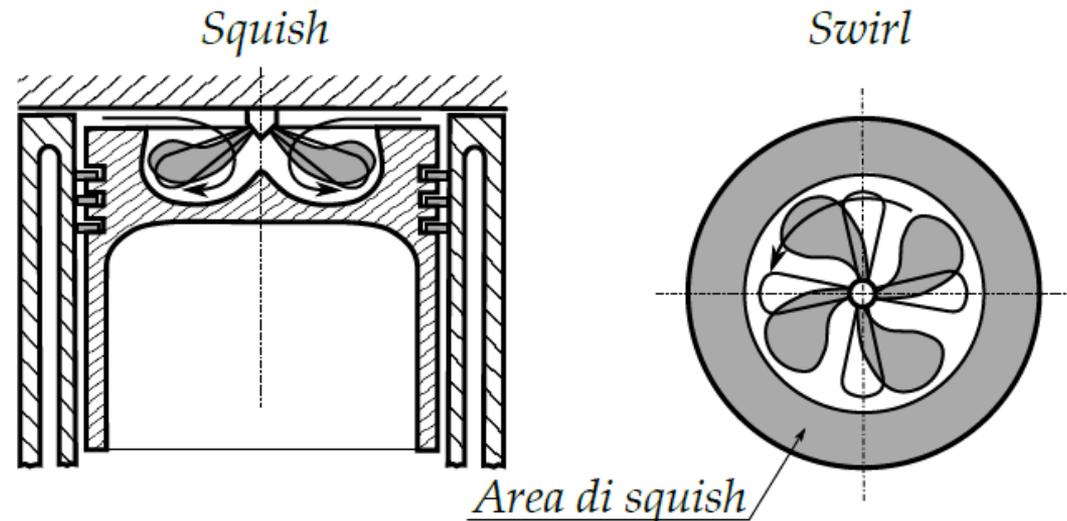
Nei motori Diesel il combustibile viene iniettato direttamente in camera di combustione quando sono state raggiunte le condizioni di autoaccensione. Il combustibile, iniettato liquido, è finemente polverizzato in modo da vaporizzare velocemente a formare una miscela combustibile. Solo in presenza di una miscela combustibile in fase gassosa possono iniziare le reazioni di prefiamma. Si hanno quindi due tempi di ritardo della combustione, uno di tipo fisico e uno di tipo chimico.



MACCHINE A FLUIDO

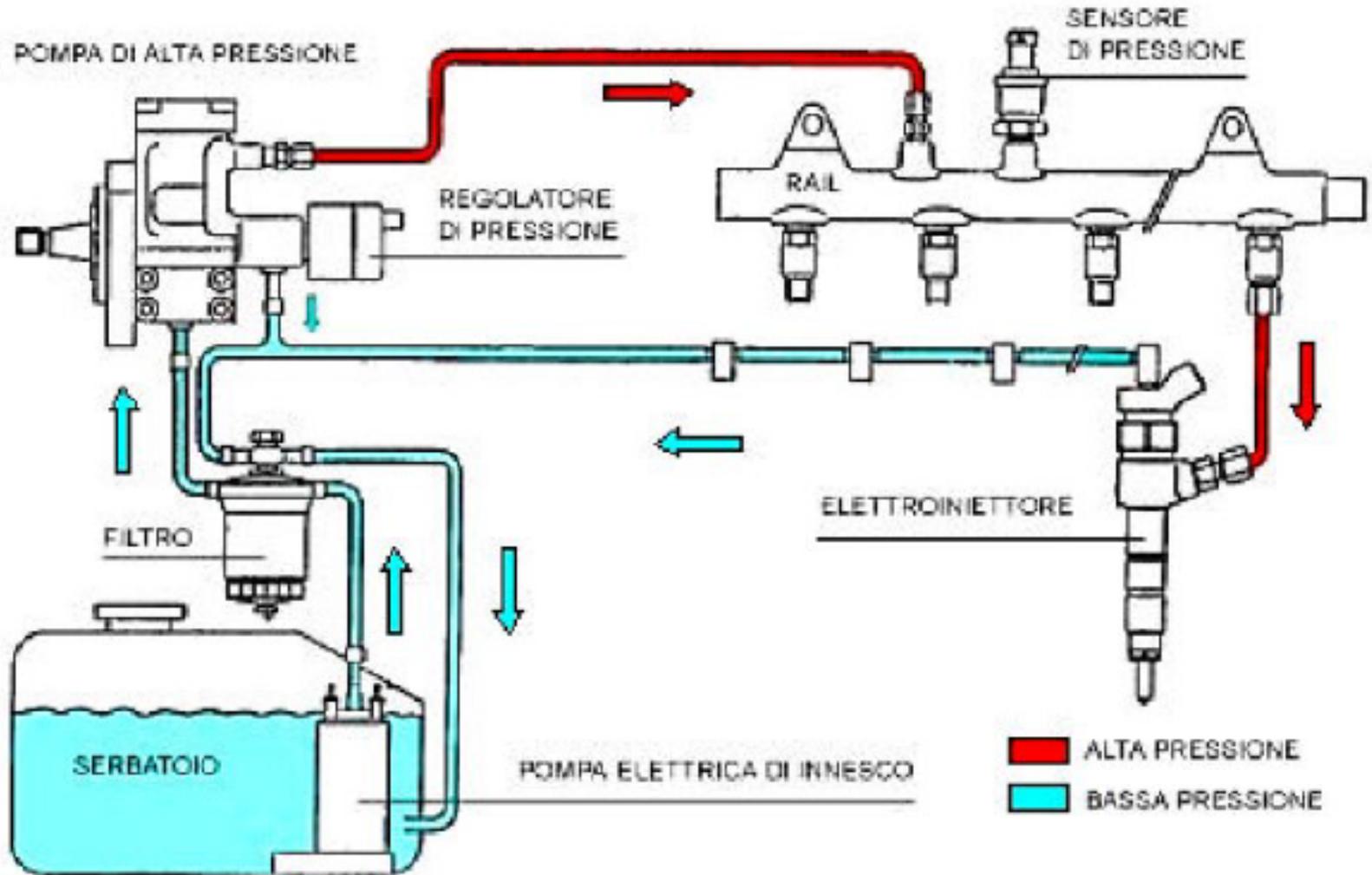


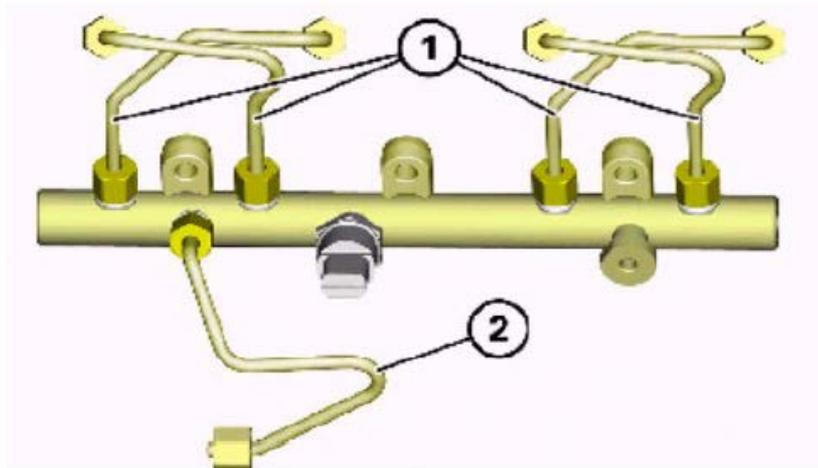
- **Getto del combustibile**
- **Carica disomogenea (stratificata)**
- **Turbolenza di “swirl”**
- **Turbolenza di “squish”**



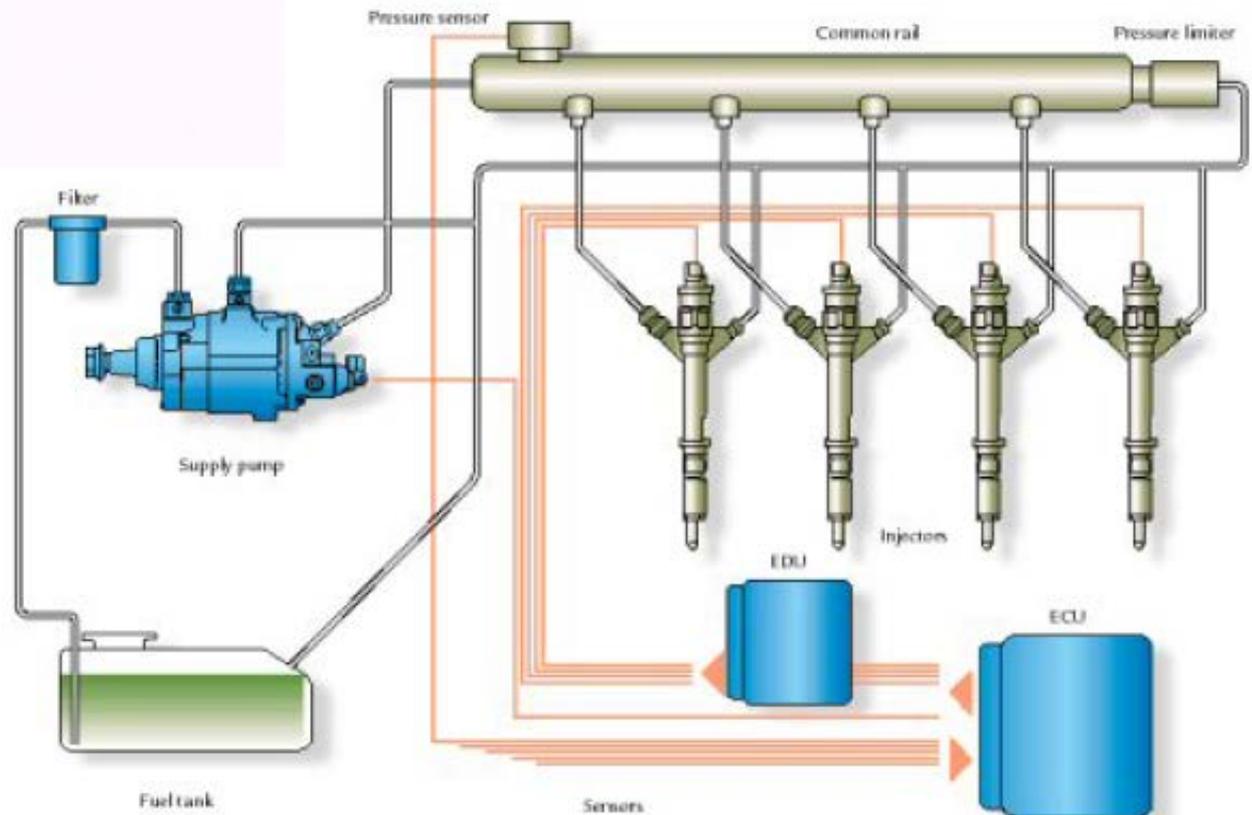
MCI ad accensione per compressione (Diesel)

Iniezione diretta Common Rail



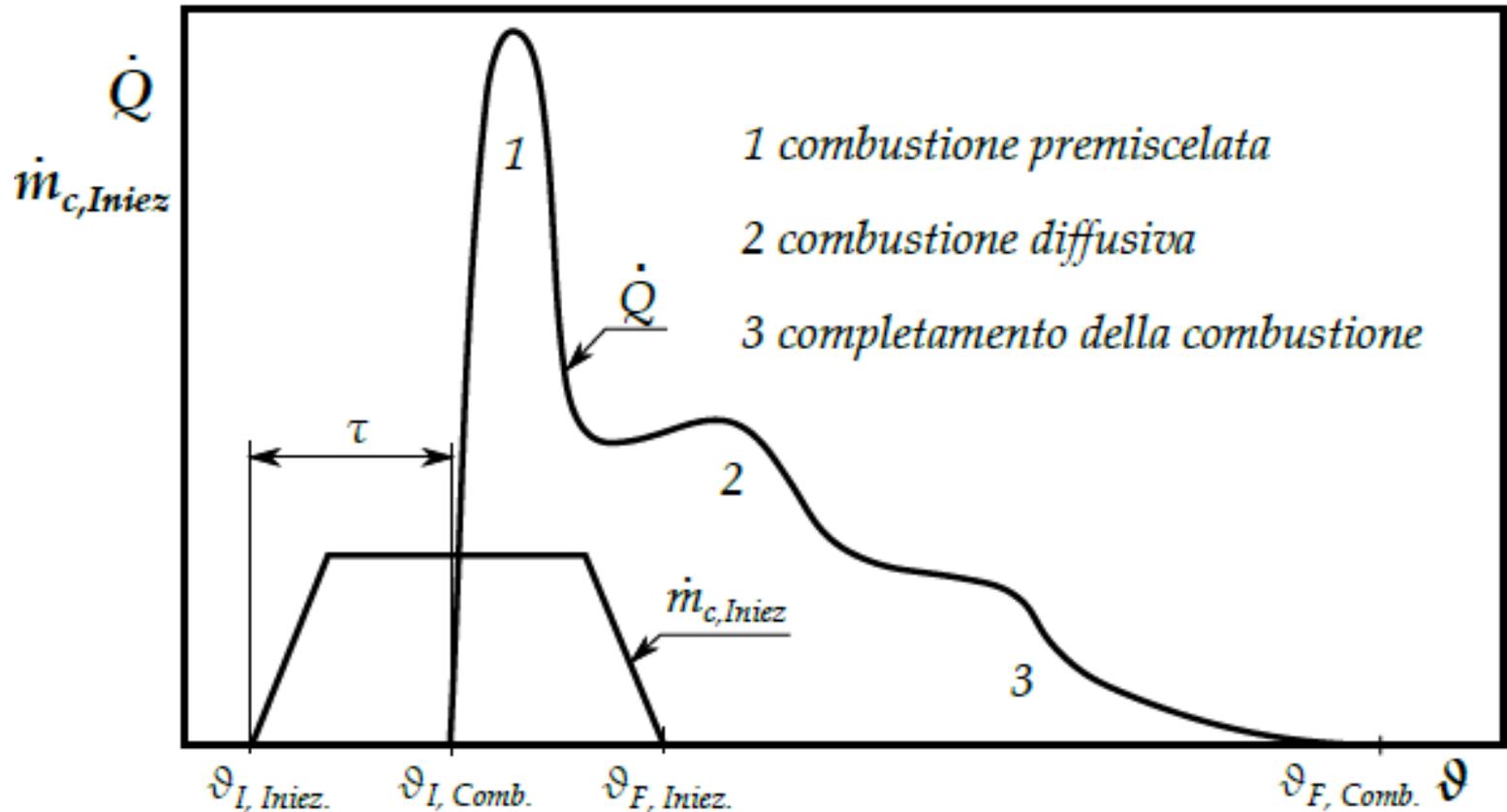


Iniezione diretta Common Rail



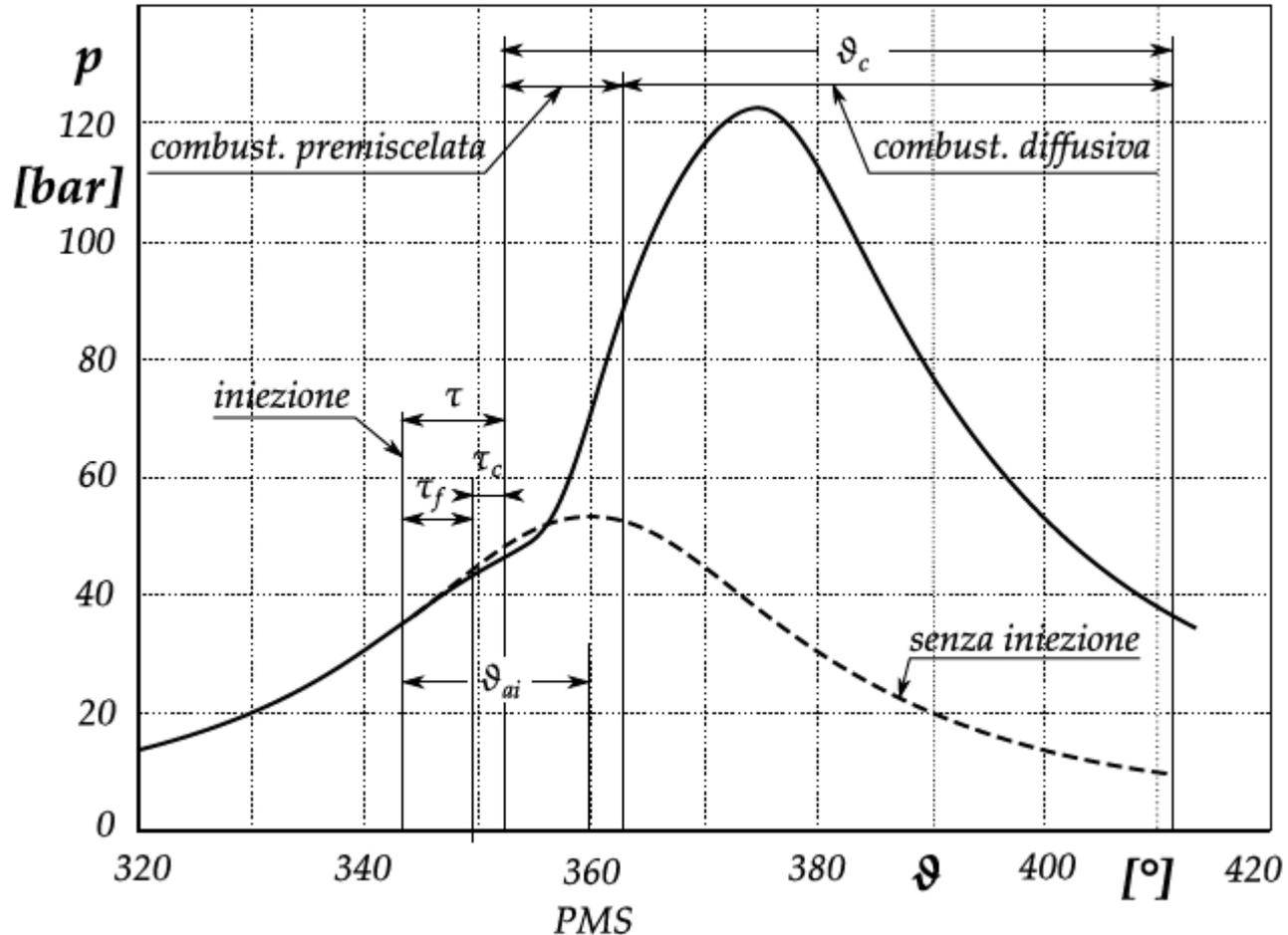
MACCHINE A FLUIDO

- Rilascio termico (Heat Release Rate)
- Combustione premiscelata (detonante)
- Combustione diffusiva (lenta)

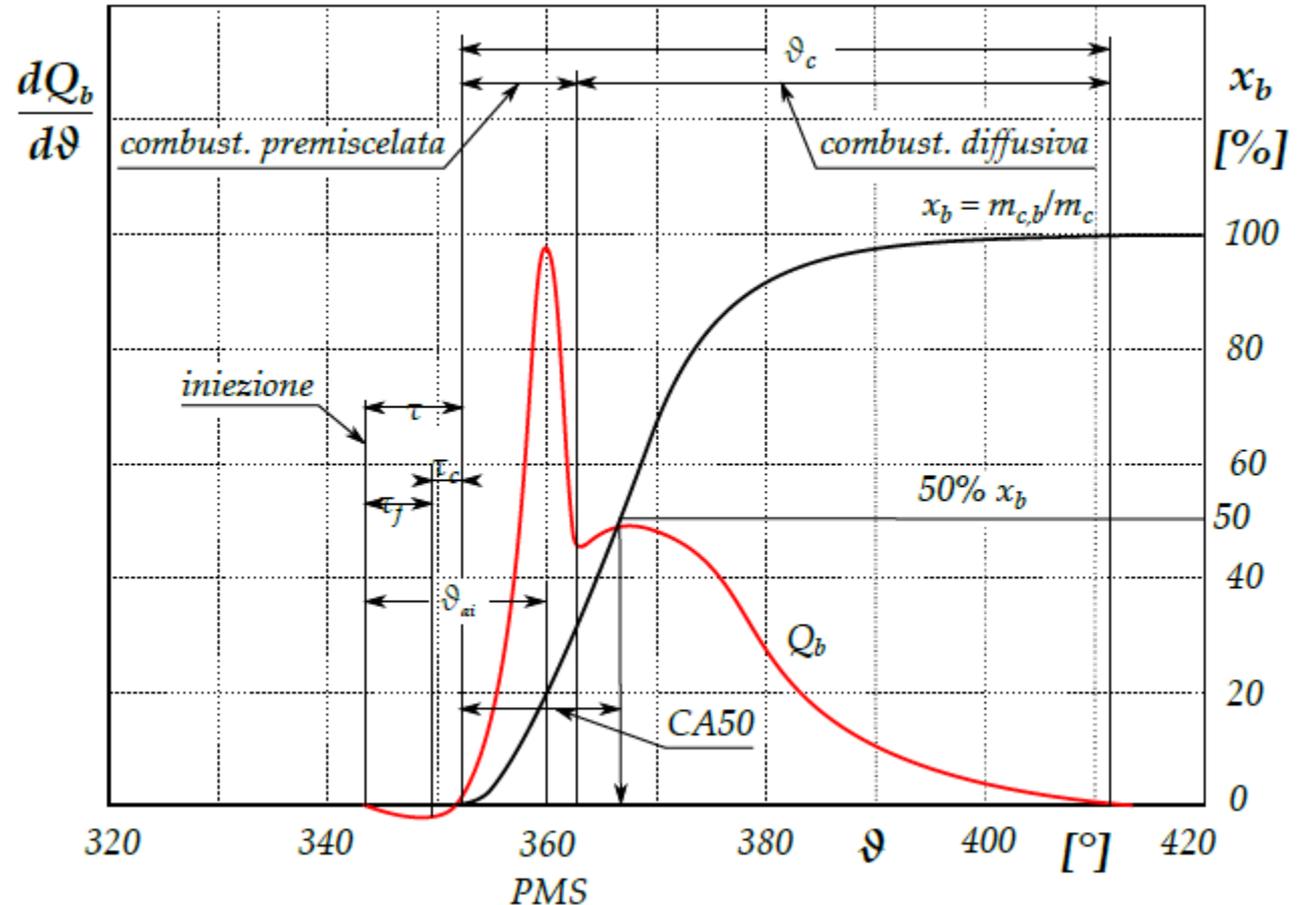


MCI ad accensione per compressione (Diesel)

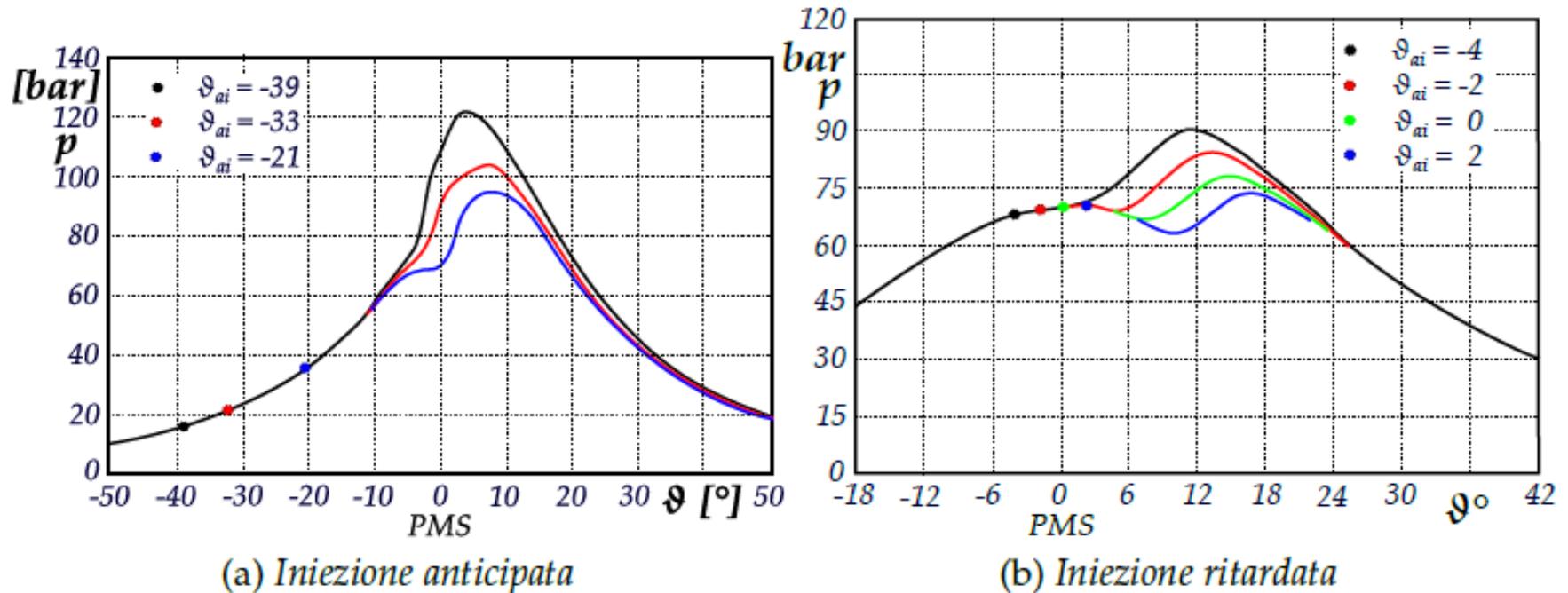
➤ Andamento della pressione nel cilindro



- Diagramma di Vibe.
- Frazione bruciata.
- Gradiente del rilascio termico.

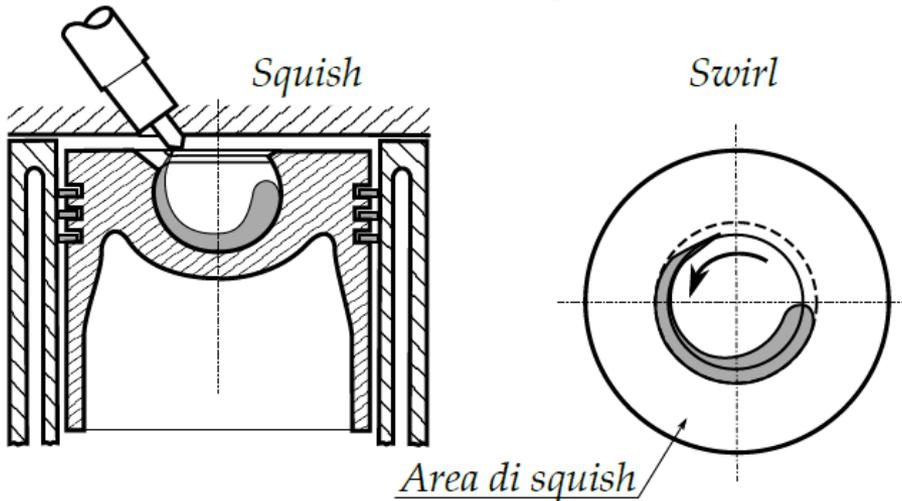


➤ Influenza dell'anticipo di iniezione

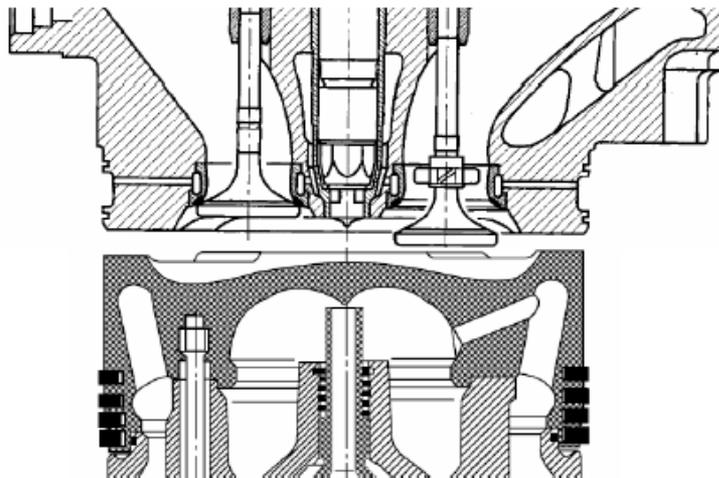
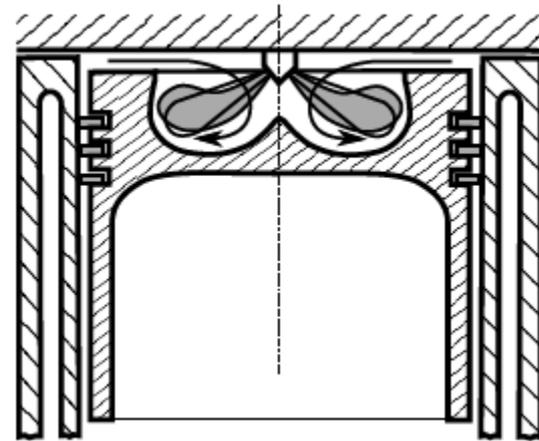


MACCHINE A FLUIDO

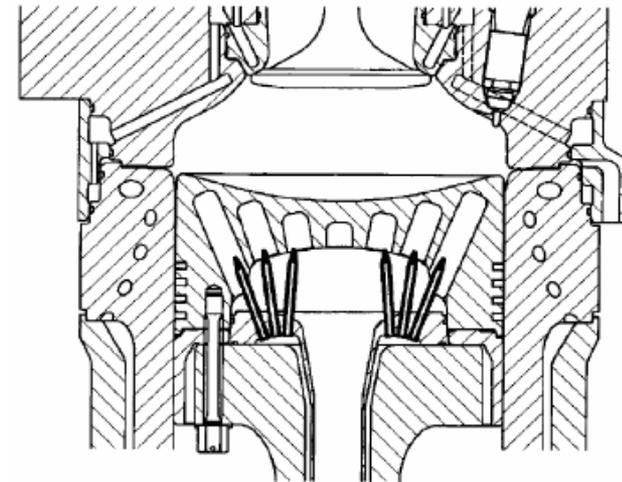
Camera di combustione tipo MAN



Camera di combustione toroidale



(a) Pistone e testata di un motore Diesel *Medium Speed*

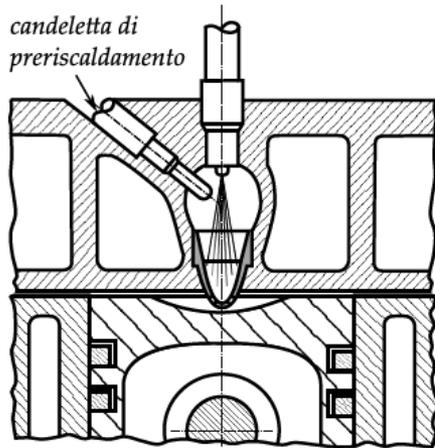


(b) Camera di combustione di un motore Diesel lento (*Low Speed*)

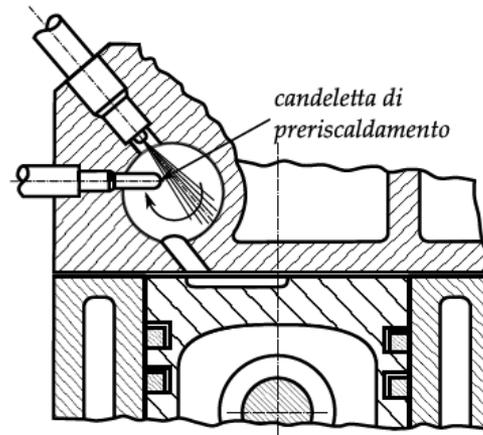


Camere di combustione ad iniezione diretta

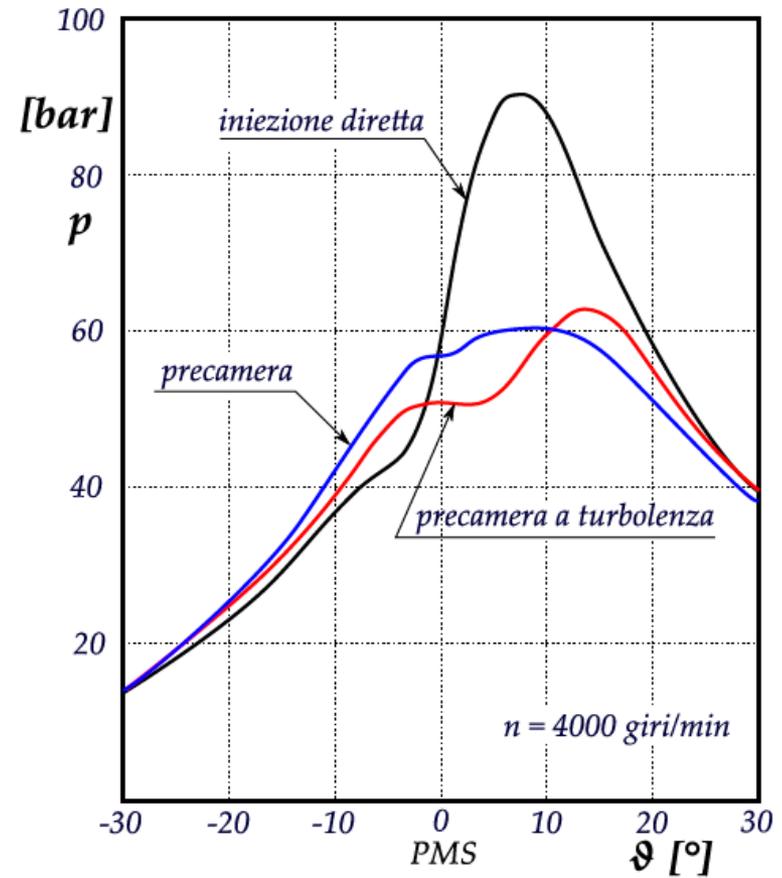
➤ Motori a precamera



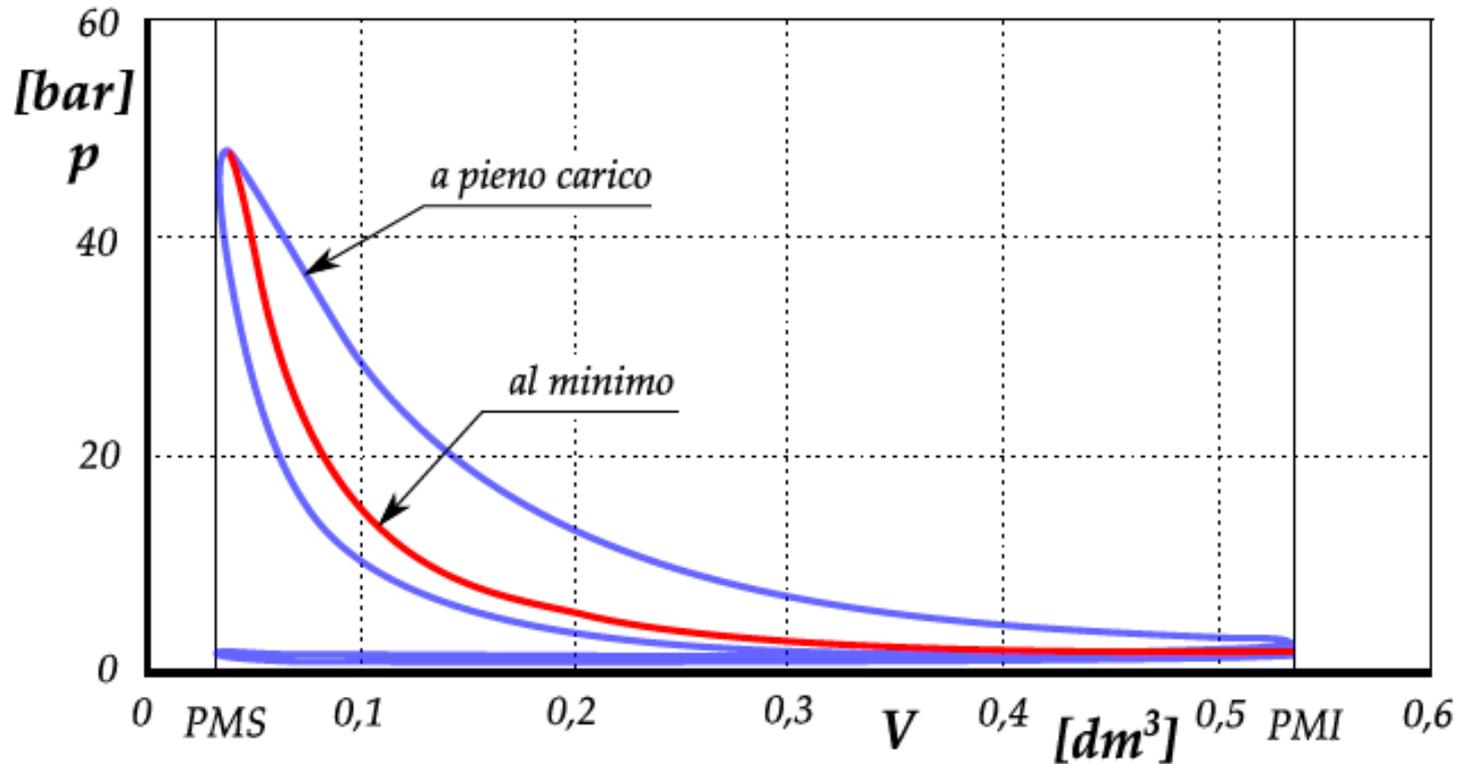
(a) Precamera semplice



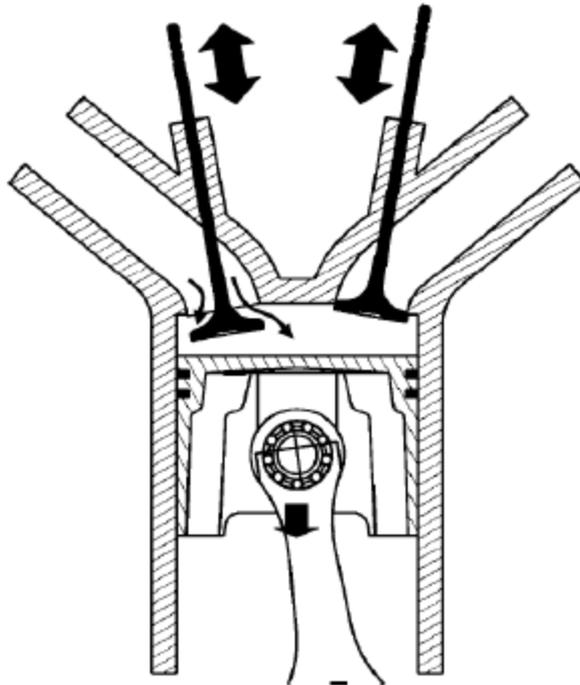
(b) Precamera a turbolenza (Comet)



➤ Regolazione dei MCI Diesel aspirati



➤ Valvole per MCI a 4T



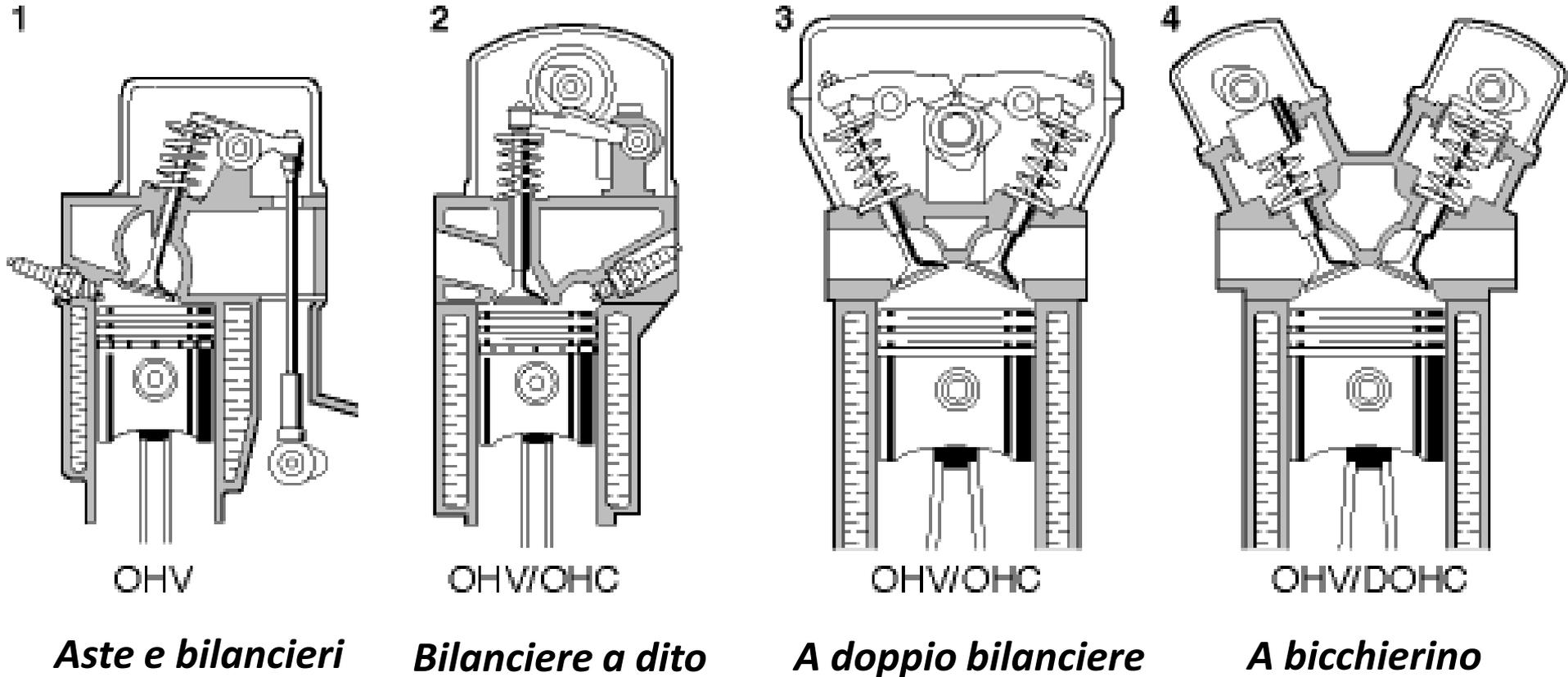
Valvole a fungo



Valvole rotanti



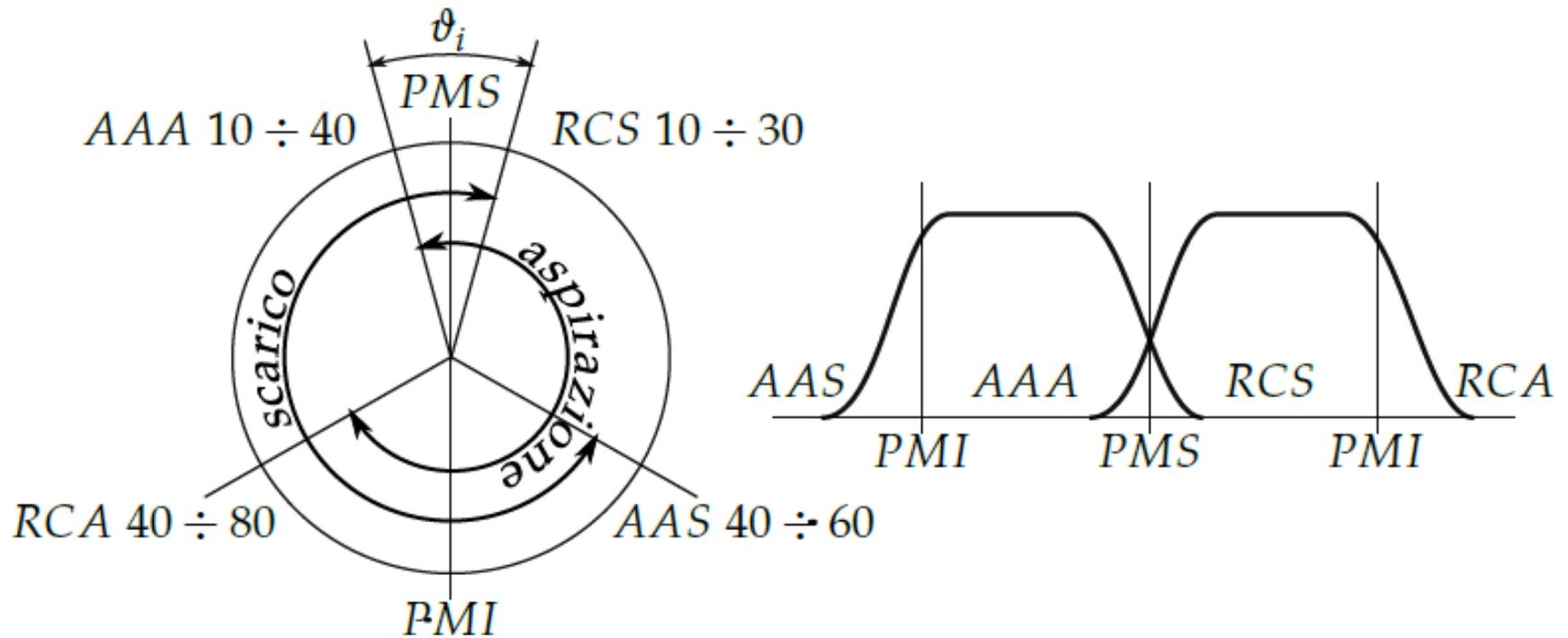
➤ Sistemi di distribuzione



2, 3 Albero a camme in testa 4 doppio albero a camme in testa



➤ Fasatura dei MCI a 4T



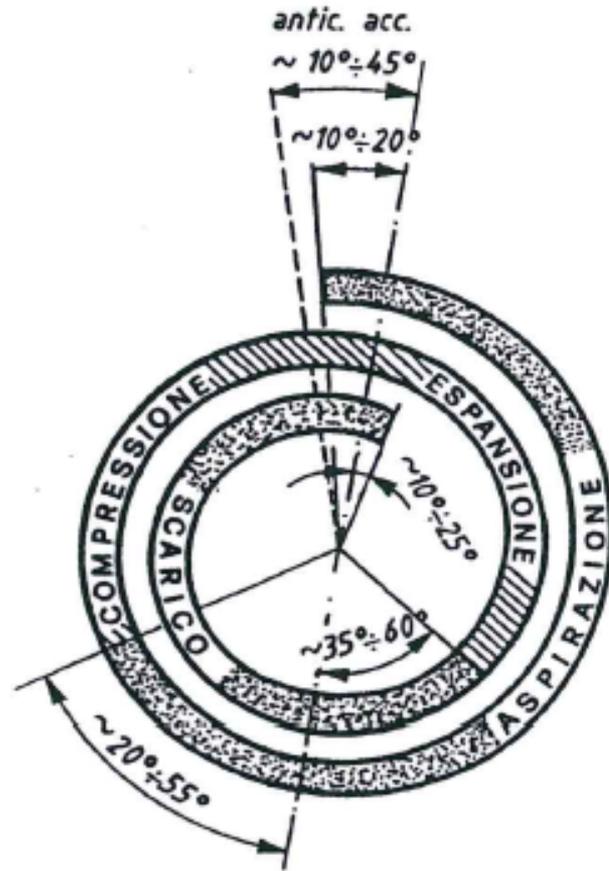


Diagramma polare della distribuzione per un motore accensione comandata aspirato 4T

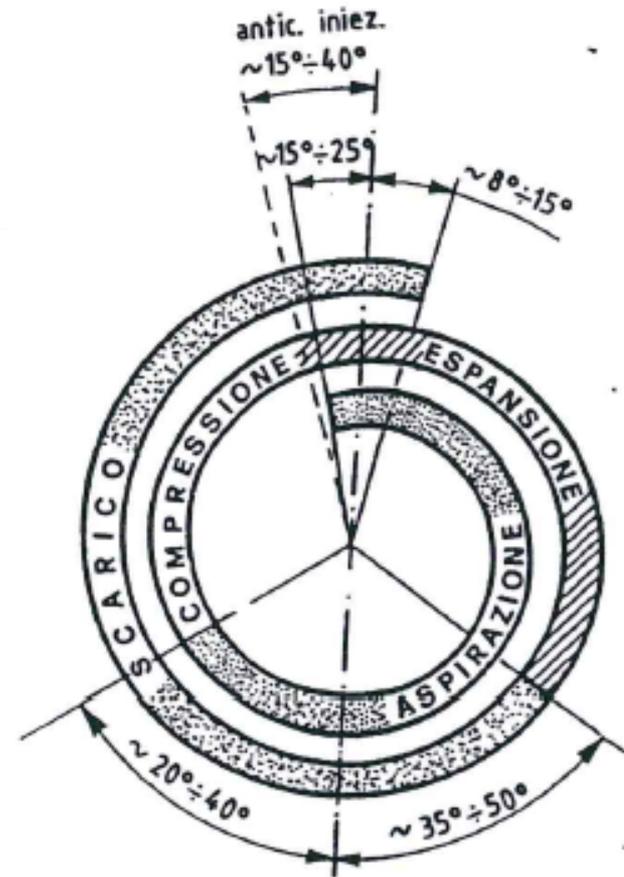
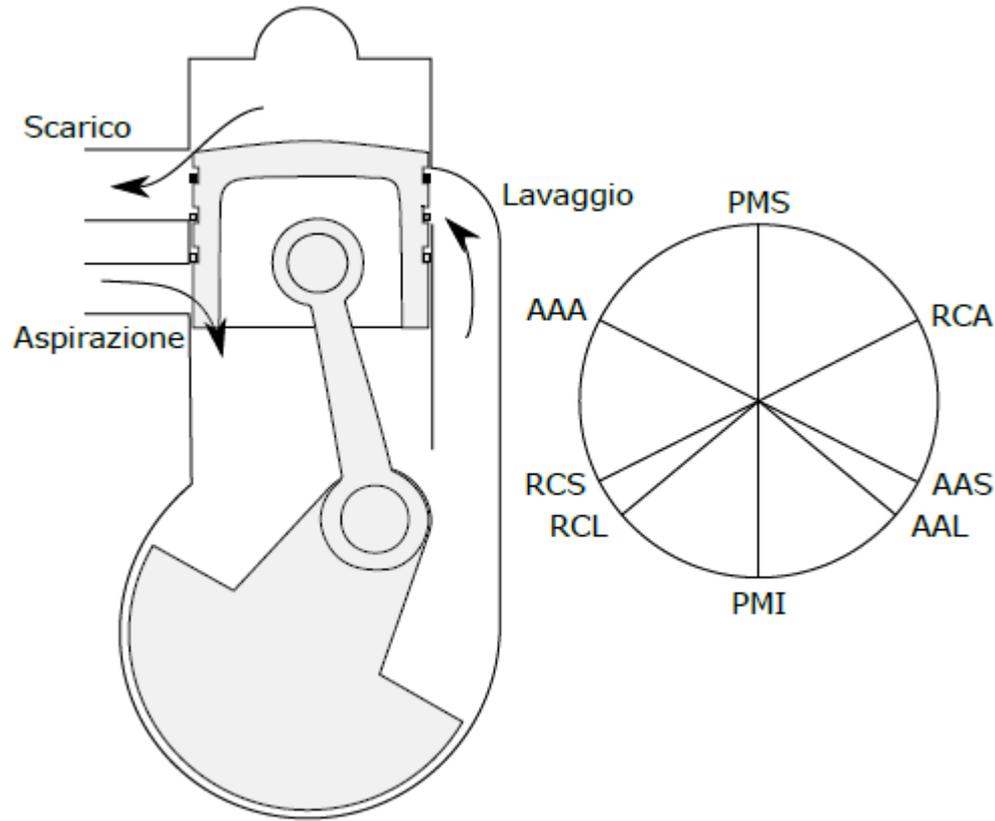


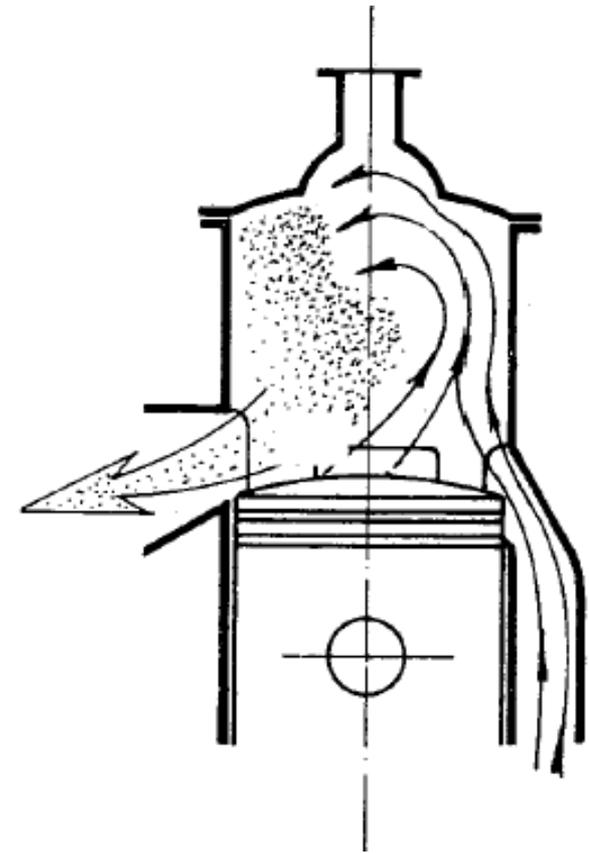
Diagramma polare della distribuzione per un motore accensione per compressione aspirato 4T



➤ MCI a 2T



Lavaggio a correnti trasversali



Lavaggio tipo Schnurle



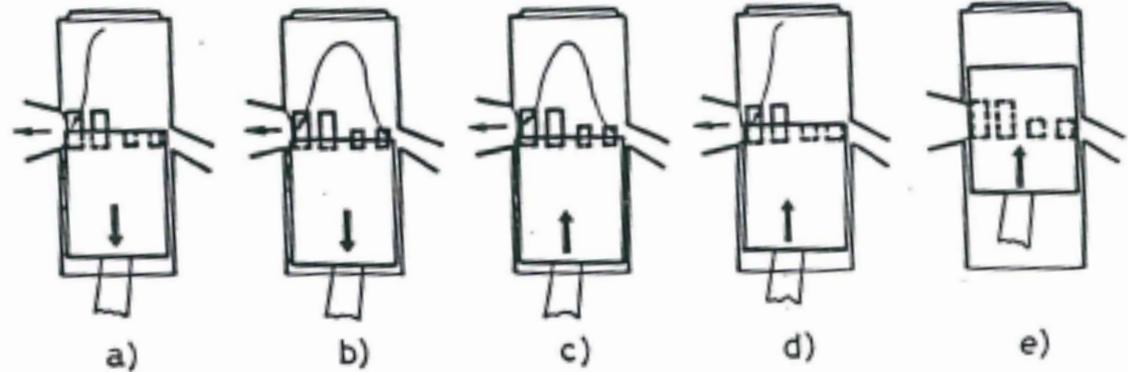
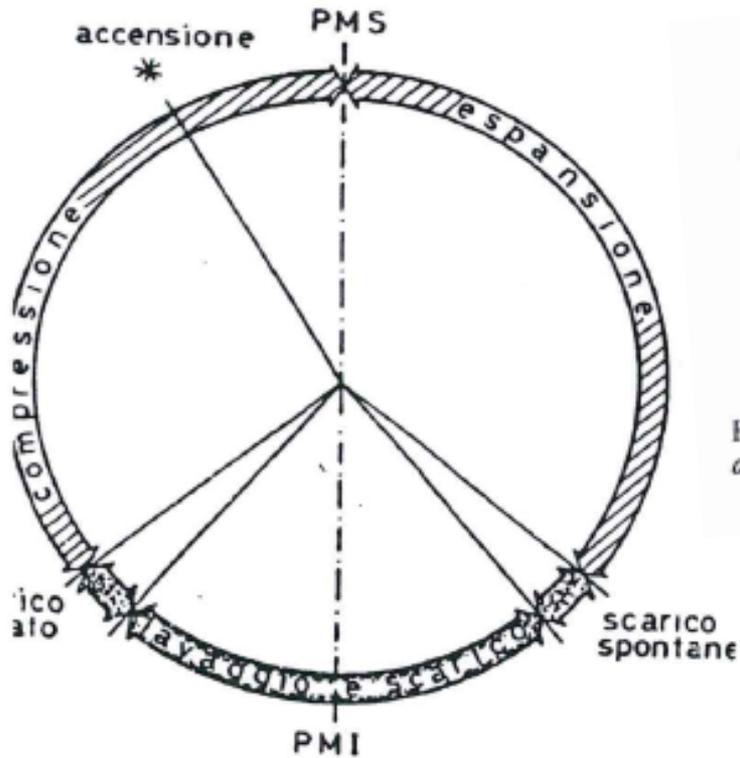
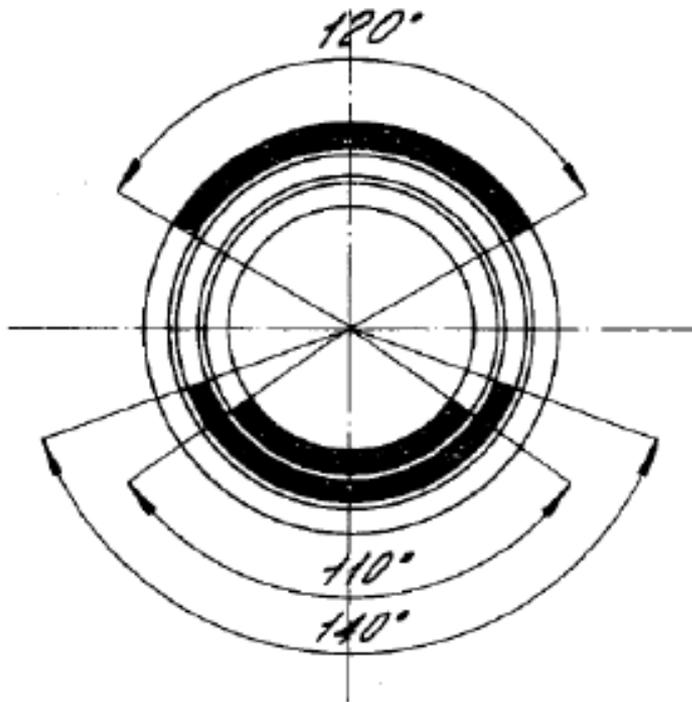


Fig. VIII.21 [2] — Schema di funzionamento di un motore a due tempi.
a) Scarico spontaneo; b-c) Lavaggio; d) Scarico forzato; e) Compressione

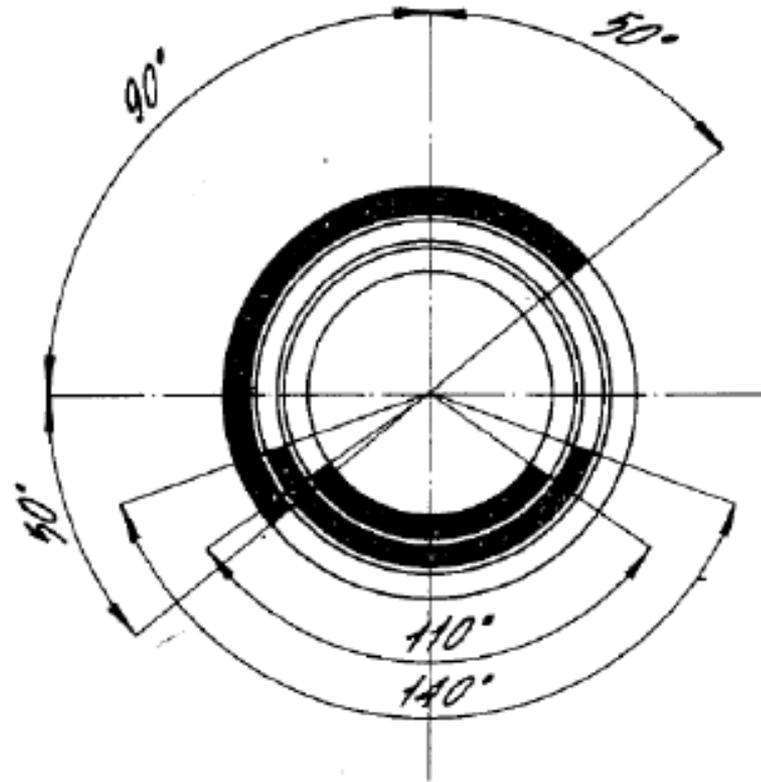
Diagramma polare della distribuzione per un motore accensione comandata 2T con luci di scarico più alte delle luci di lavaggio



➤ Fasatura dei MCI a 2T

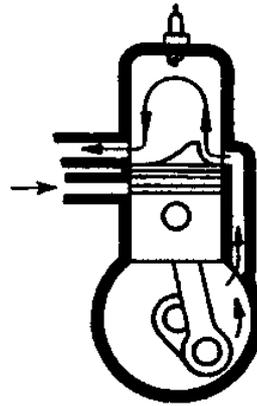


*Fasatura di aspirazione
simmetrica*

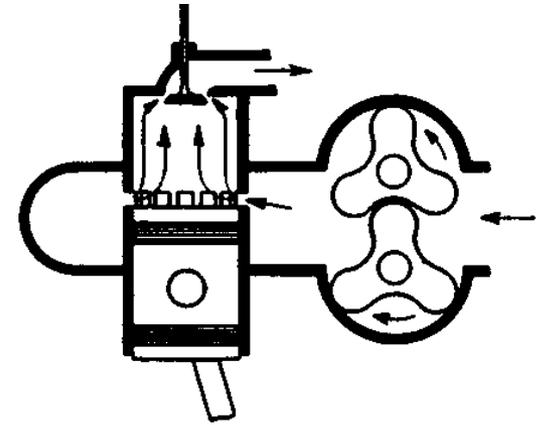


*Fasatura di aspirazione
asimmetrica*



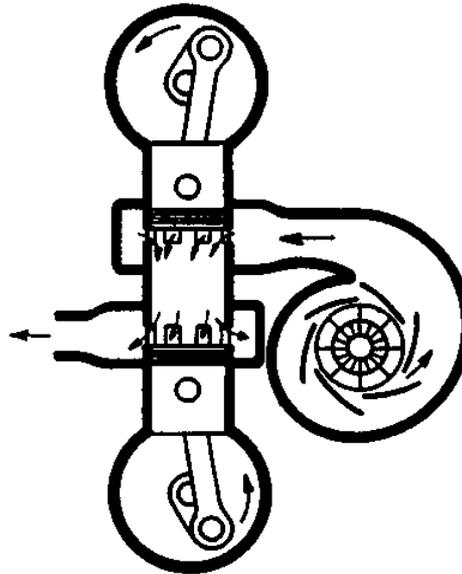


(a)

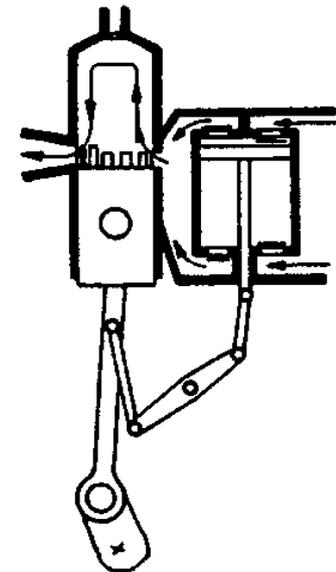


(b)

➤ Lavaggio nei MCI a 2T



(c)



(d)



La potenza in uscita dal sistema viene variata in relazione alle esigenze dell'utilizzatore (carico stradale variabile). Si modifica la quantità di combustibile introdotta nel motore nell'unità di tempo, ovvero varia l'energia potenziale chimica fornita al sistema.

Le modalità di regolazione dei MCI ad accensione comandata e di quelli ad accensione per compressione sono sostanzialmente differenti e sono in gran parte legate alle caratteristiche dei processi di combustione che si sviluppano nei due casi.

La regolazione nei Diesel avviene per qualità mentre nei MAC viene condotta per *quantità*.

La regolazione per qualità

Si varia la massa di combustibile iniettata a parità di massa di aria aspirata, si varia quindi il valore medio statistico del rapporto aria-combustibile α .

$$\alpha = m_a / m_c$$

A velocità di rotazione costante del motore, m_a risulta in prima approssimazione costante, non essendo presente la valvola a farfalla. Pertanto, per variare la potenza effettiva, si agisce su m_c e il rapporto aria-combustibile α assume valori più elevati a basso carico del motore. La combustione in un MCI Diesel, essendo di tipo diffusivo, consente di operare con valori del rapporto aria/combustibile anche molto superiori del valore stechiometrico (**20-100**).



La regolazione per quantità

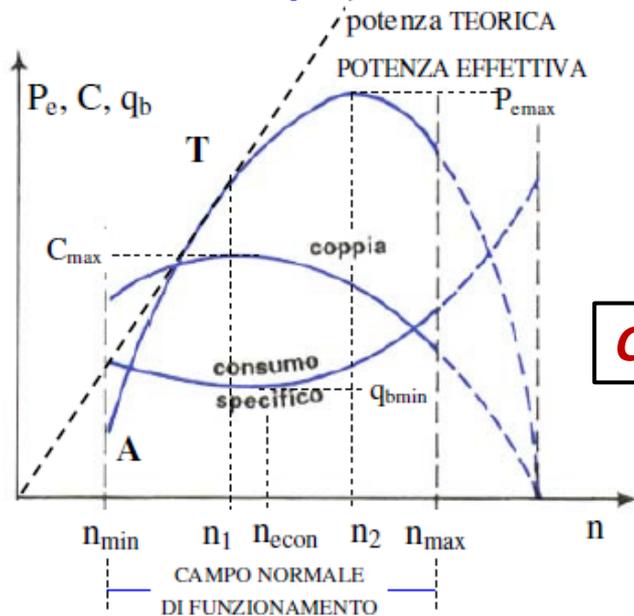
In un MAC il campo di variazione di α è molto più limitato (tipicamente fra 10-18 circa), benché la qualità della miscela è prossima al valore stechiometrico (14.7), a causa delle restrizioni sulle emissioni (marmitta catalitica trivalente).

Pertanto al variare della portata di combustibile, è necessario variare in misura pressoché proporzionale anche la portata di aria (regolazione per quantità). L'obiettivo si raggiunge con una **valvola a farfalla** nel condotto di aspirazione, a monte della valvola di aspirazione vera e propria, con cui si realizza una perdita di carico controllata e modulabile. Tale perdita di carico riduce la pressione nel collettore di aspirazione e pertanto la densità della carica e quindi la massa introdotta nel cilindro.

Una soluzione innovativa per la regolazione dei MAC è costituita dal controllo dell'apertura delle valvole di aspirazione (**VVA, Variable Valve Actuation**), agendo sulla fase, sull'arco di apertura e sulla legge di alzata delle valvole. Un tale sistema permette di regolare la quantità di carica introdotta nel cilindro senza ricorrere alla valvola a farfalla, con vantaggi in termini di rendimento.



Per confrontare le prestazioni dei MCI sono spesso utilizzate *le curve ottenute in condizioni di piena apertura dell'organo di regolazione, dette caratteristiche meccaniche di pieno carico.*



$$C = k P / n$$

C è max. quando è max. il rapporto P/n , ovvero quando è max. l'angolo α che l'asse delle ascisse forma con una qualsiasi semiretta uscente dall'origine degli assi e che taglia la curva della potenza. La coppia è max. nel punto T in cui tale semiretta è tangente alla curva di potenza.

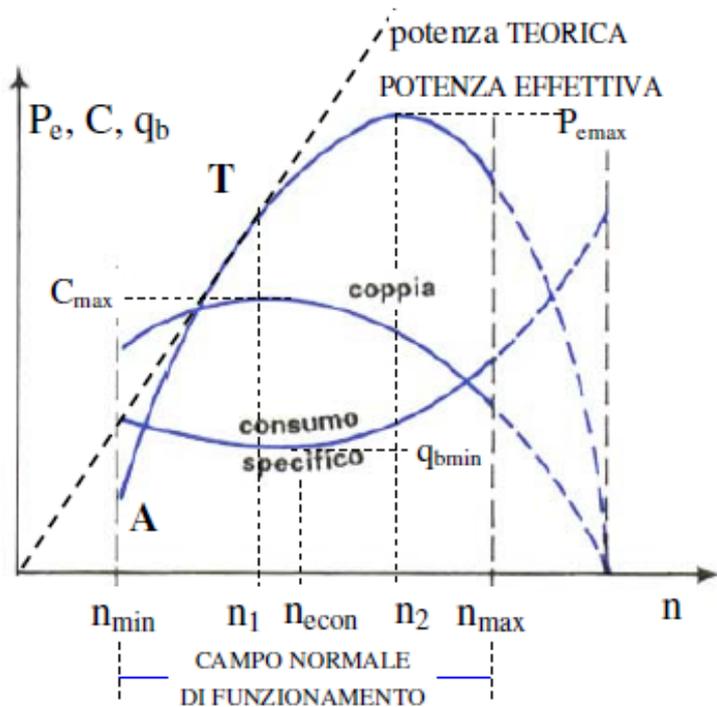
La curva di potenza viene rappresentata a partire da un valore minimo di velocità di rotazione (punto A) compatibile con un funzionamento regolare del motore.

Al di sopra del punto A, la potenza tende ad aumentare (P dipende linearmente da n) fino a raggiungere il valore P_{max} oltre il quale diminuisce rapidamente fino ad annullarsi per un valore più elevato di n. Tale andamento può essere giustificato tenendo conto che nel primo tratto (A-T) contribuiscono all'aumento di P sia l'aumento di n che della coppia C.

C è sostanzialmente influenzato dall'andamento del coefficiente di riempimento, che raggiunge un massimo per un livello definito di n, in funzione del valore dell'angolo di chiusura della valvola di aspirazione.



MACCHINE A FLUIDO



Per velocità di rotazione superiori a n_1 la potenza cresce con gradiente minore (tratto T- P_{max}) in quanto, aumenta per l'incremento di n pur diminuendo la coppia del motore (riduzione di λ_v). Oltre il punto di max. la quantità di fluido evolvente per ogni ciclo si riduce più rapidamente di quanto aumenti il numero di cicli nell'unità di tempo, per cui, anche a causa della sensibile riduzione del rendimento meccanico del motore, la potenza diminuisce fino ad annullarsi per quella velocità in corrispondenza della quale le perdite meccaniche assorbono completamente il lavoro indicato

Il consumo specifico di combustibile è inversamente proporzionale al rendimento globale η_g , e nelle condizioni di pieno carico del motore presenta un minimo per regimi prossimi a quelli di coppia massima. A partire dalle condizioni di minimo, al crescere di n , i consumi aumentano principalmente per effetto dell'incremento delle perdite meccaniche (diminuzione di η_m) ed in minor misura per la tendenza ad arricchire la miscela ad alta velocità di rotazione del motore.

Al diminuire di n , invece, si ha un aumento del consumo specifico connesso principalmente per l'incremento delle perdite per scambio termico.



La sovralimentazione di un MCI è definita come la precompressione di una parte o di tutta la carica al di fuori del cilindro.

La sovralimentazione aumenta la quantità di carica introdotta nel cilindro e quindi la potenza del motore, senza aumentare la velocità di rotazione.

$$P = p_{me} V \frac{n}{60\varepsilon} \qquad P = \rho_a \lambda_v V \frac{n}{60\varepsilon} \frac{H_i}{\alpha} \eta_g$$

Fissata cilindrata V e tipologia di motore (2T o 4T, quindi ε), la sovralimentazione incrementa la potenza del motore attraverso l'aumento della densità della carica ρ_a ovvero l'aumento della p_{me} , entrambi correlati linearmente alla potenza.

Con la sovralimentazione aumentano tutti i livelli di pressione all'interno del cilindro (diagramma indicato) e quindi p_{mi} e p_{me} .

Poiché il processo di compressione comporta l'incremento della temperatura del fluido, è evidente che la densità della carica potrà essere incrementata in misura superiore se, a valle del compressore di sovralimentazione, sarà installato uno scambiatore di refrigerazione ([intercooler](#)).



I principali vantaggi della sovralimentazione sono:

- minore ingombro (medesima P con una cilindrata inferiore) ➔ downsizing;
- minore peso;
- migliore η_g per i MCI Diesel turbosovralimentati;
- minor costo per unità di P;
- vantaggi in quota;
- emissioni più basse (particolarmente CO ed HC per i più elevati eccessi d'aria);

La sovralimentazione comporta anche alcuni svantaggi:

- carichi termici e meccanici superiori per il motore;
- caratteristiche di coppia più sfavorevoli (particolarmente con la turbosovralimentazione);
- peggiore risposta in transitorio.



I sistemi di sovralimentazione possono essere classificati

- a) secondo la tipologia del sistema di compressione della carica;
- b) secondo il tipo di collegamento fra il motore ed il sistema di sovralimentazione;

Sistema di compressione della carica

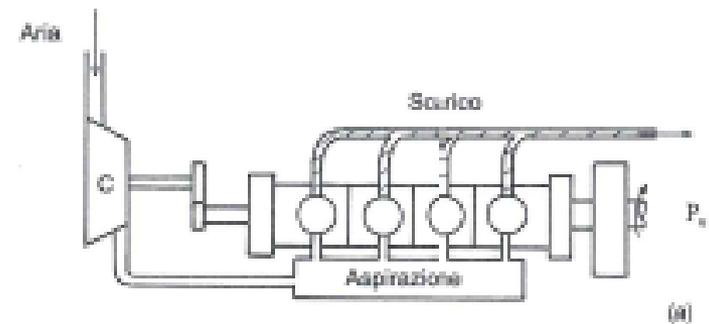
- sovralimentazione con **compressore volumetrico** (alternativo o rotativo);
- sovralimentazione con **compressore dinamico** (turbocompressore radiale o assiale);
- sovralimentazione con **scambiatore ad onde di pressione (Comprex)**.



COLLEGAMENTO MOTORE-SOVRALIMENTATORE

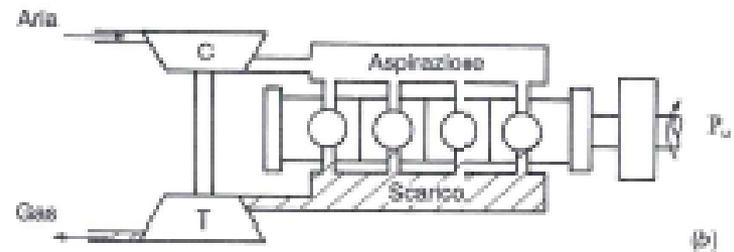
SOVRALIMENTAZIONE MECCANICA

Motore sovralimentato mediante compressore trascinato



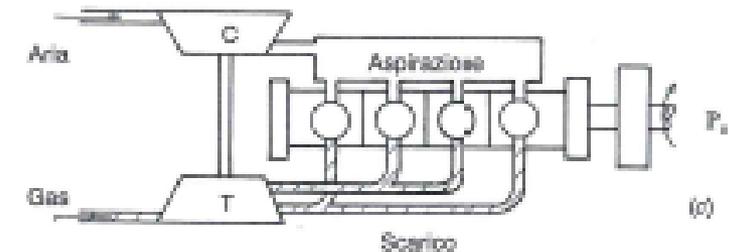
(a)

TURBOSOVRALIMENTAZIONE
pressione a monte della turbina
costante



(b)

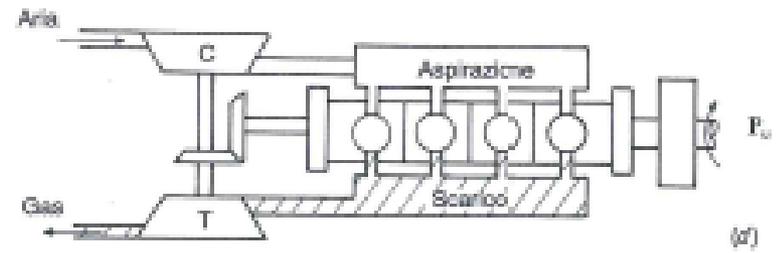
TURBOSOVRALIMENTAZIONE
impulsi di pressione



(c)

COMPOUND

Motore turbocomposito con collegamento meccanico tra albero del motore e quello del turbocompressore



(d)



MACCHINE A FLUIDO

- Iniezione di Ossigeno all'aspirazione (Protossido di azoto N_2O)
- Aumento di potenza pari al 50% - 60% per brevissimi periodi
- Usato nelle competizioni americane di accelerazione (Drag Racing)



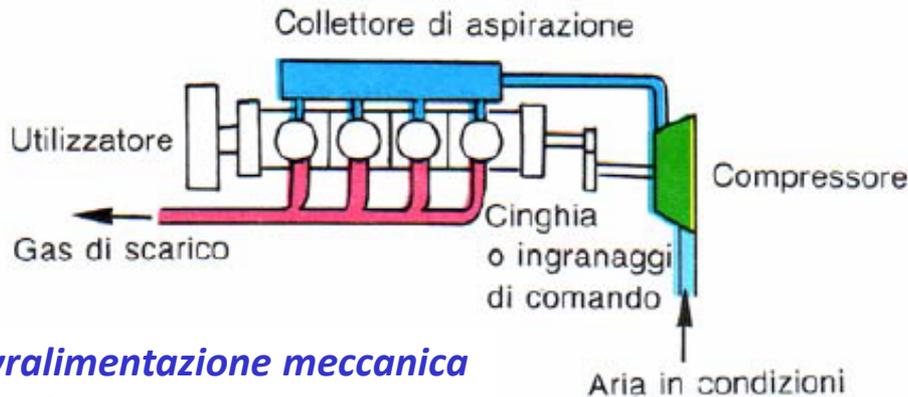
NOS Nitrous Oxide System



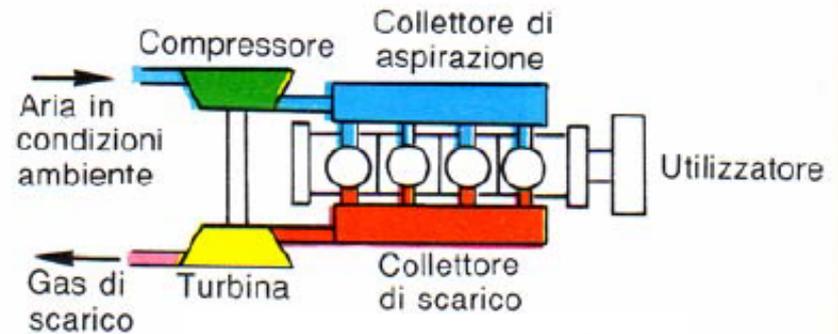
Sovralimentazione chimica

La sovralimentazione dei MCI

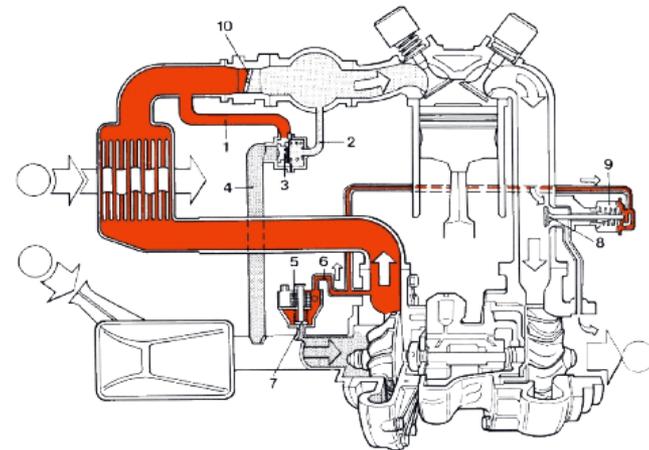
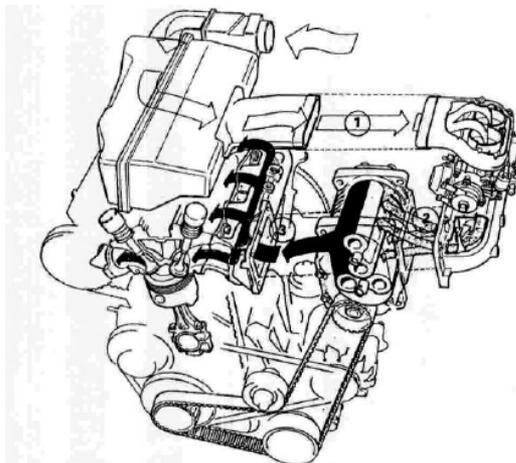
Nella pratica le due soluzioni impiantistiche più utilizzate sono la sovralimentazione meccanica e la turbo-sovralimentazione sia per MAC che Diesel a 2 e 4 tempi.



Sovralimentazione meccanica



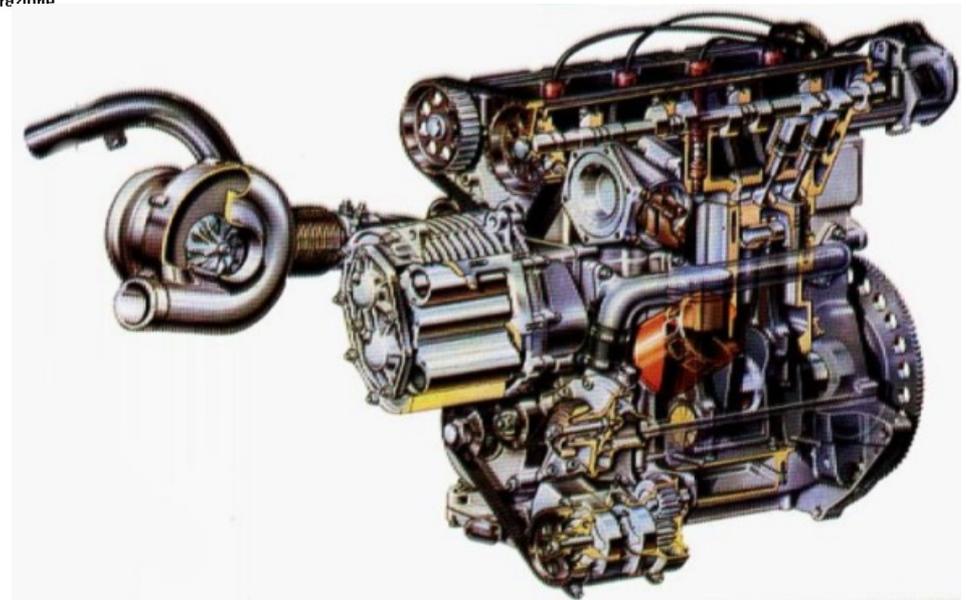
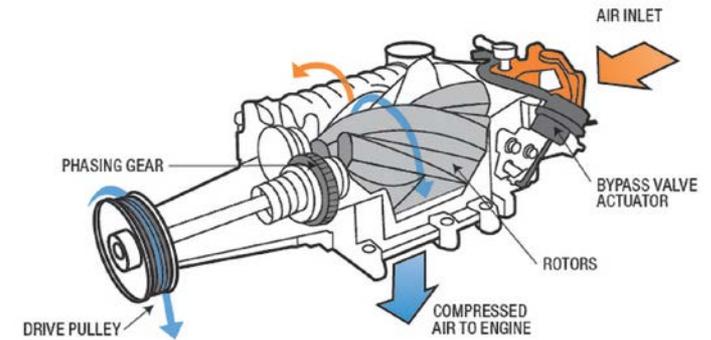
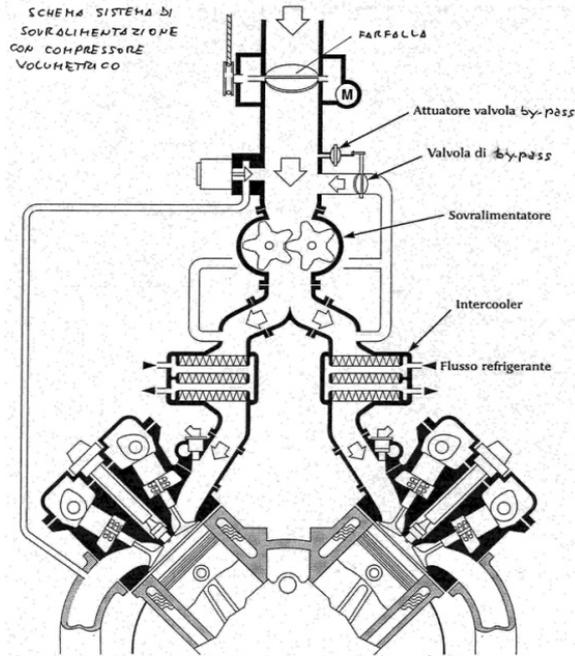
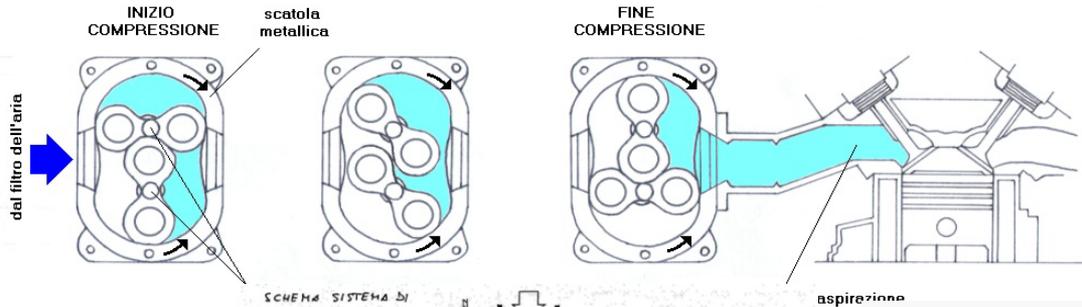
Turbo-sovralimentazione



MACCHINE A FLUIDO

- Risposta immediata ai bassi giri
- Assorbe energia dall'albero motore

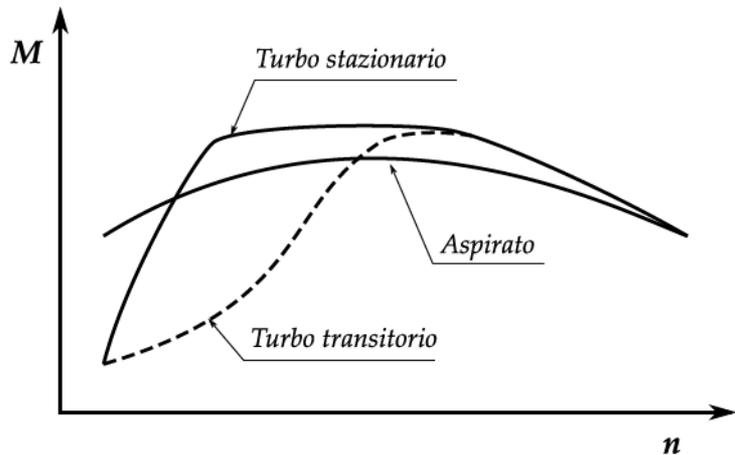
POSITIVE DISPLACEMENT SUPERCHARGER



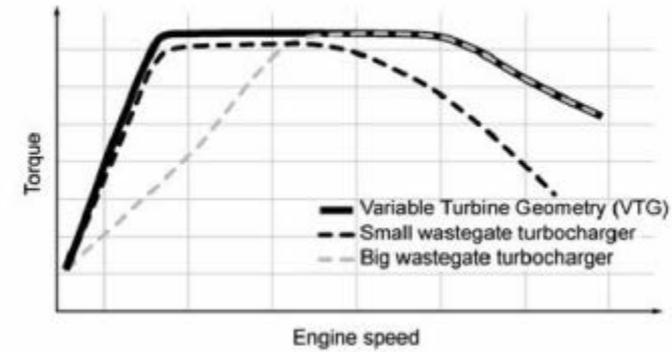
Sovralimentazione meccanica



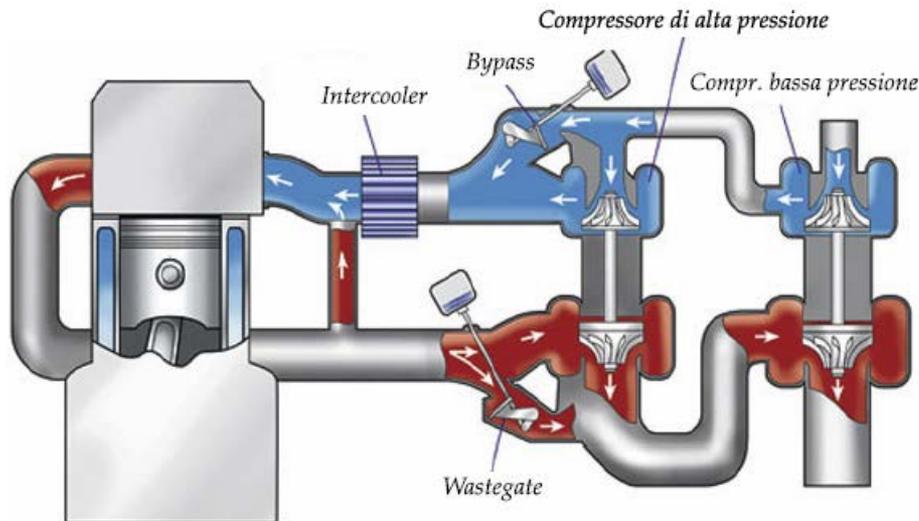
MACCHINE A FLUIDO



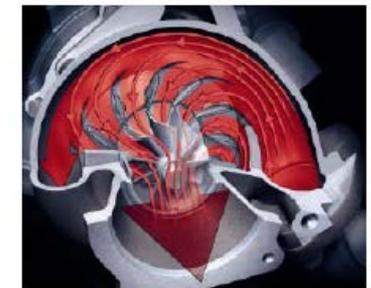
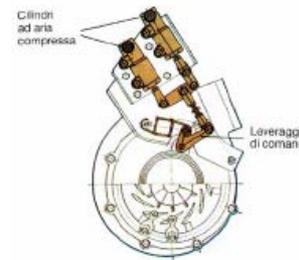
Ritardo di risposta (Turbo-lag)



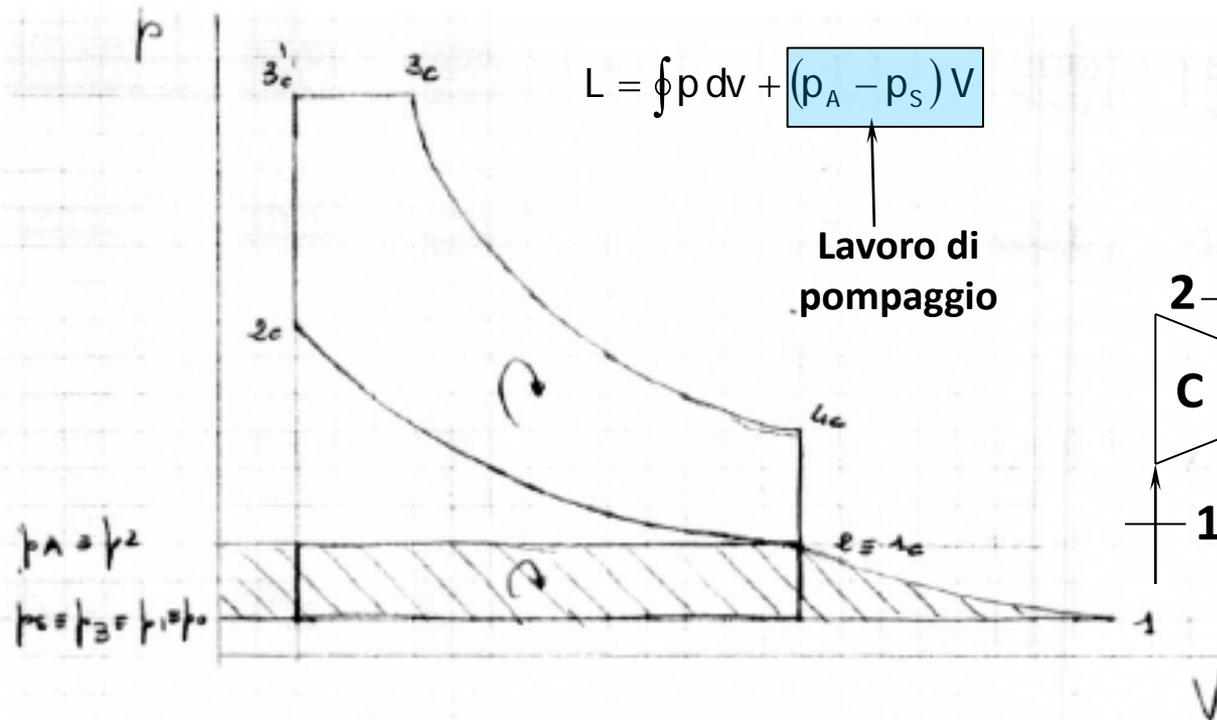
Turbina a geometria variabile



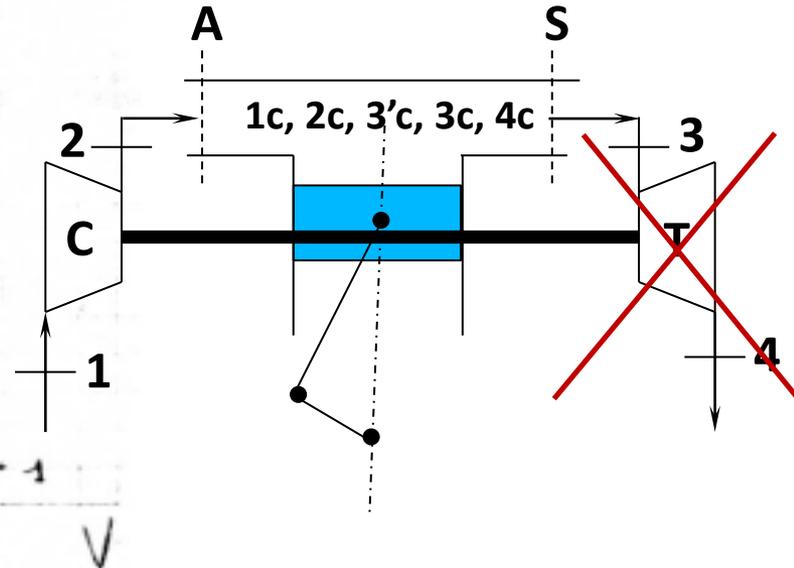
Doppio turbo



Turbosovralimentazione



Schema elementare di un MCI sovralimentato



Nella sovralimentazione meccanica manca la turbina, pertanto $p_s = p_3 = p_1$

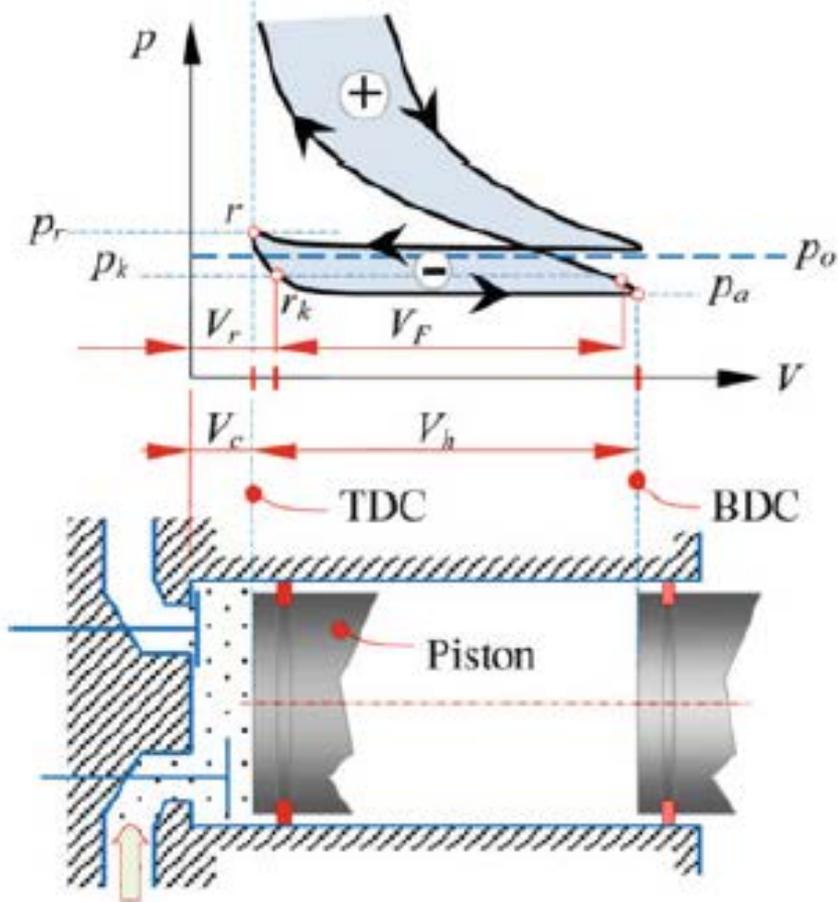
Il compressore realizza la compressione 1-2 e il lavoro assorbito è dato dall'area tratteggiata.

Il lavoro netto per ciclo è dato dalla differenza fra l'area positiva del ciclo motore e l'area negativa rappresentativa del lavoro assorbito dal compressore.

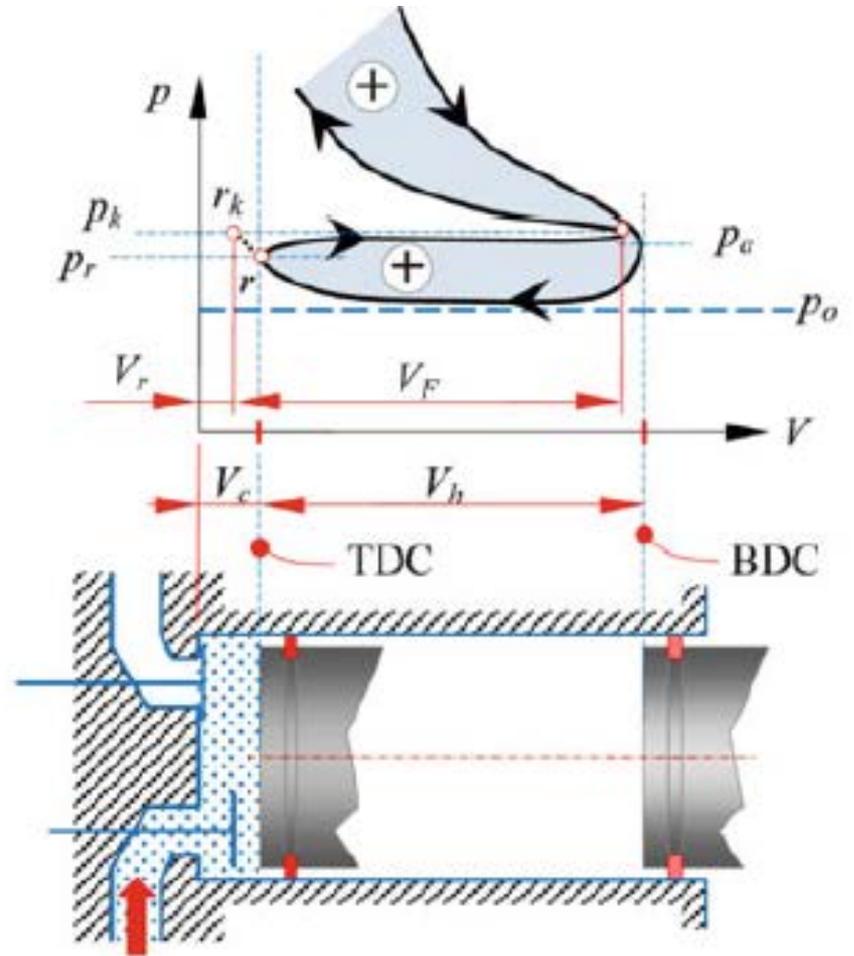
Rispetto ad un motore aspirato il lavoro utile per ciclo è superiore per l'incremento dell'area del ciclo principale per effetto dell'aumento di tutti i livelli di pressione.



MACCHINE A FLUIDO



Naturally aspirated diesel engine

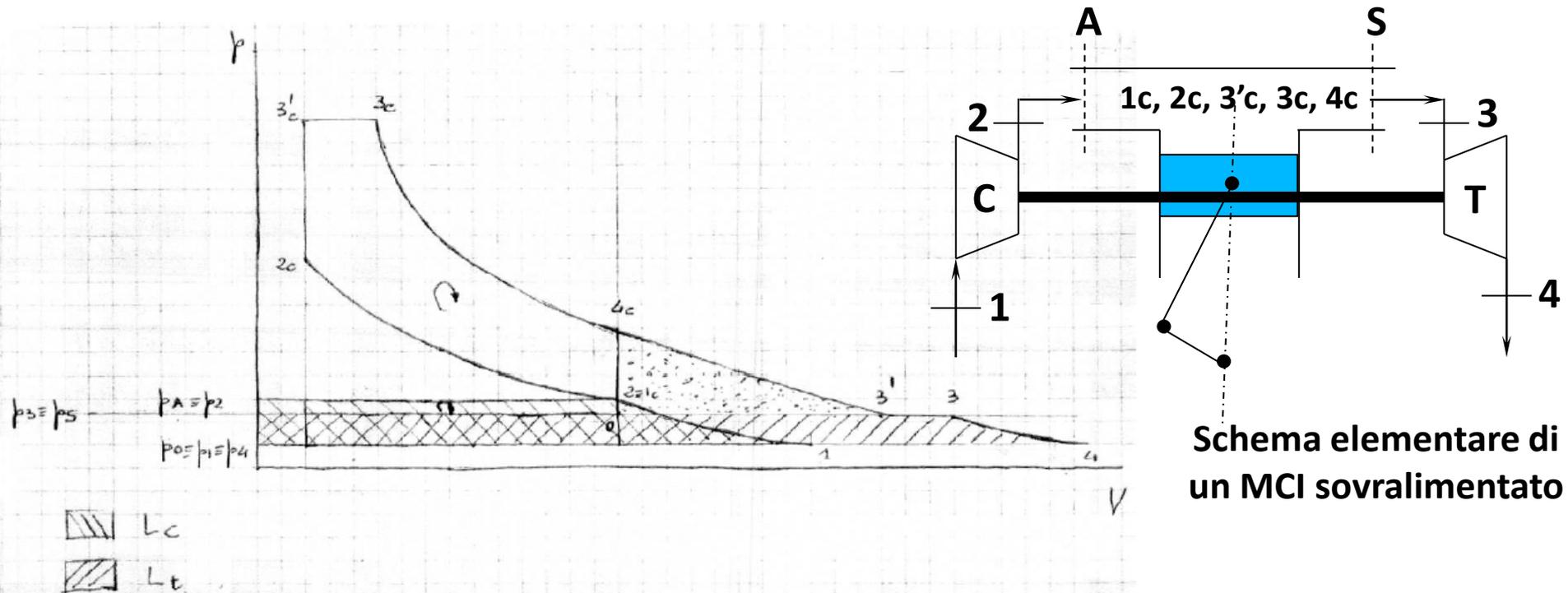


Turbocharged diesel engine



Diagramma indicato nei MCI sovralimentati

MACCHINE A FLUIDO



Nella turbo-sovralimentazione $p_5 = p_3$ $p_4 = p_1$ $p_2 = p_A$

Il lavoro netto per ciclo risente della diminuzione (o addirittura dell'inversione di segno) del ciclo di pompaggio del motore.

$$L_c = h_2 - h_1 = C_p (T_2 - T_1) = C_p T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = \frac{kRT_1}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \text{Lavoro del compressore}$$

$$L_t = h_3 - h_4 = C_p (T_3 - T_4) = C_p T_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3} \right) = \frac{kRT_3}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad \text{Lavoro della turbina}$$



MACCHINE A FLUIDO

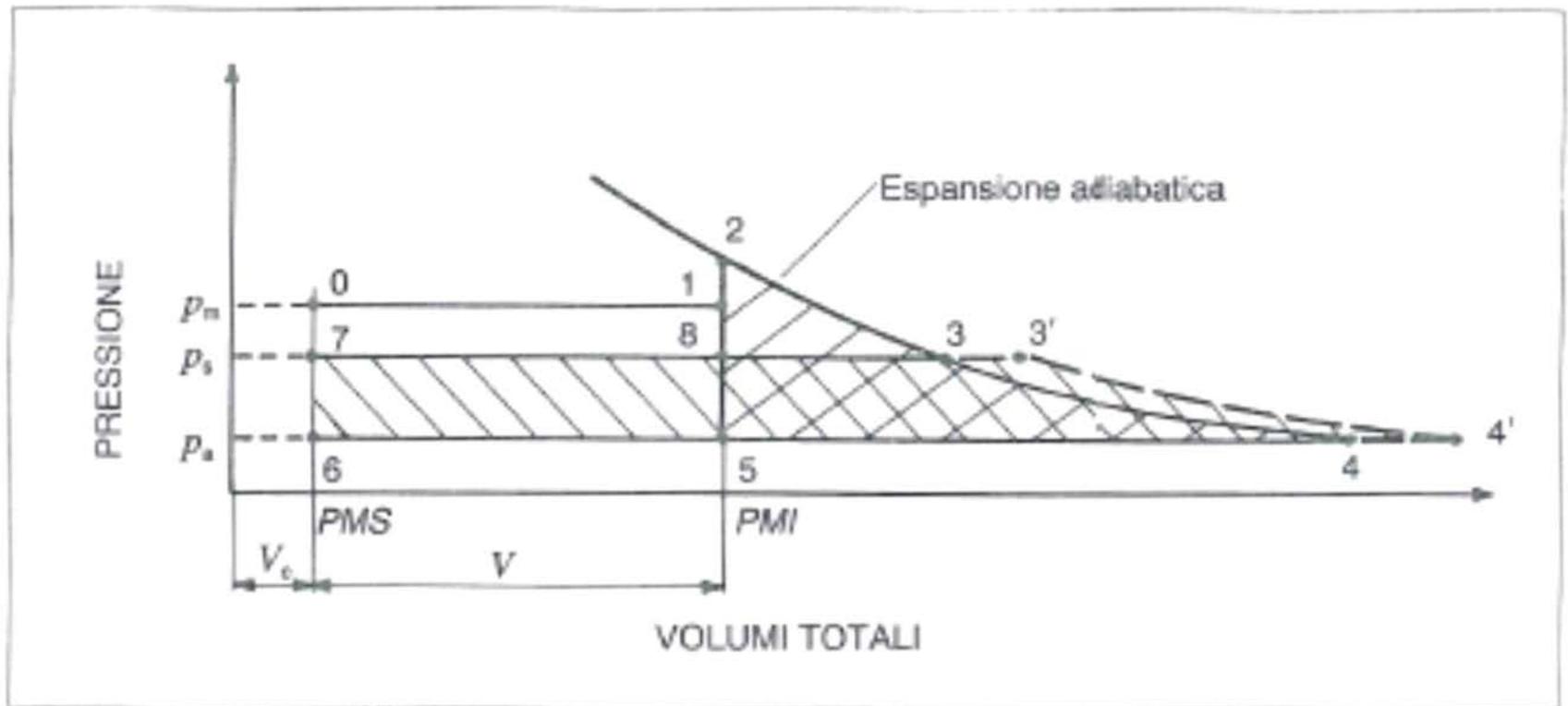


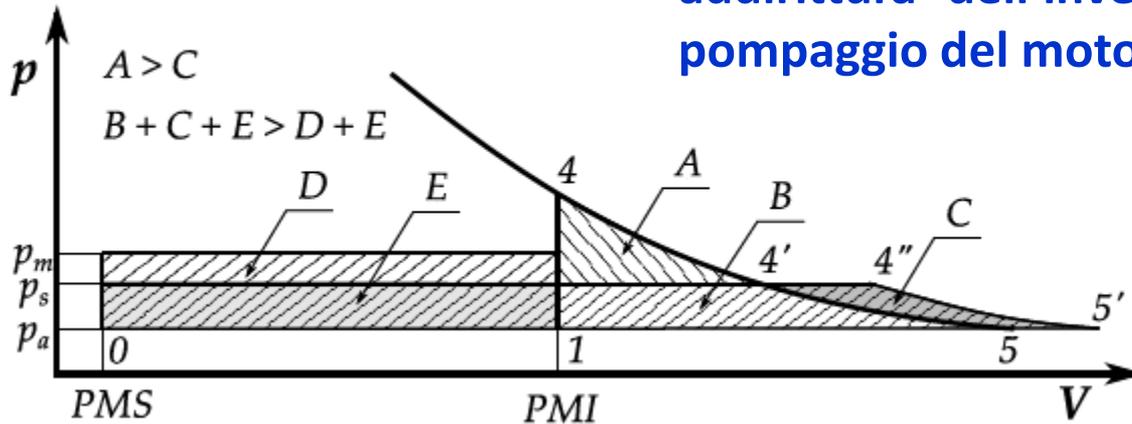
Figura 5.3 - Rappresentazione schematica dell'energia posseduta dai gas di scarico di un motore a quattro tempi ed idealmente utilizzabile in una turbina per trascinare un compressore di sovralimentazione. L'area tratteggiata 2-3-4-5 rappresenta la massima energia estraibile dai gas combusti, attraverso la loro espansione fino alla pressione ambiente p_a ; mentre l'area 3'-4'-6-7 rappresenta l'energia disponibile per una turbina alimentata a pressione costante p_s .



MACCHINE A FLUIDO

Area (A+B)	energia di scarico spontaneo = max. energia estraibile dai gas di scarico
Area (A)	energia cinetica dei gas di scarico
Area (C)	parziale recupero dell'energia cinetica dei gas (area A)
Area (B+C+E)	energia a disposizione della turbina
Area (A+C)	recupero parziale dell'energia dei gas di scarico spontaneo (area A+B)
Area (E)	energia sottratta al motore nella fase di scarico forzato alla pressione p_s
Area (D)	lavoro di pompaggio

Il lavoro netto per ciclo risente della diminuzione (o addirittura dell'inversione di segno) del ciclo di pompaggio del motore.



Elevando la pressione p_s (ad esempio riducendo l'area di efflusso della turbina) si incrementa il lavoro della turbina e quindi il grado di sovralimentazione

