

CAPITOLO 2

MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA

2.1 CICLI TERMODINAMICI

Per "ciclo" di un motore a pistoni si intende il succedersi delle trasformazioni che il fluido subisce nell'interno di un cilindro e che vengono ripetute con legge periodica. La durata di un ciclo operativo viene misurata con il numero delle corse fatte dal pistone o con il numero dei giri dell'albero motore.

Distingueremo motori a pistoni a quattro tempi e motori a pistoni a due tempi. Per i primi occorrono 4 corse del pistone per compiere un ciclo (o 2 giri dell'albero motore), per i secondi occorrono due corse del pistone (o un giro dell'albero motore).

I motori a pistoni si distinguono anche in base al tipo di ciclo, per questo si parla di:

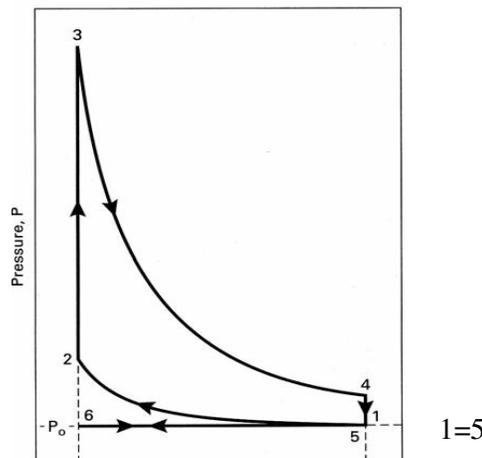
- Motori a ciclo OTTO;
- Motori a ciclo DIESEL;
- Motori a ciclo SABATHE'.

I motori aeronautici sono del tipo a 4 tempi.

2.2 CICLO OTTO teorico a quattro tempi.

I motori aeronautici a pistoni impiegano il ciclo OTTO che si compone delle seguenti fasi:

Diagramma P-V¹



¹ Ricorda che il pedice 1 della trasformazione coincide con il pedice 5 (1=5)

Fase 6-1: Fase di ammissione (o aspirazione)

Durante tale fase il pistone si sposta dal PMS al PMI. Tale fase si realizza, teoricamente, mediante una trasformazione ISOBARA ($p=p_{ATM}$) e si ottiene l'ammissione della miscela gassosa (aria+combustibile) attraverso l'apposito condotto a seguito dell'apertura della valvola di ammissione (o di aspirazione).

Fase 1: Chiusura della valvola di ammissione (o aspirazione)**Fase 1-2: Fase di compressione**

Durante tale fase il pistone si sposta dal PMI al PMS. Tale fase si realizza teoricamente, mediante una trasformazione adiabatica ($pV^k=cost$ oppure $TV^{k-1}=cost$). In questa fase il volume diminuisce, mentre la temperatura T e la pressione p aumentano. Questa fase terminerà quando il volume sarà pari a quello di combustione e la pressione molto elevata e calcolabile con la seguente formula:

$$p = p_{ATM} \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k \quad \text{essendo } v_1 = \text{volume del cilindro, } v_2 = \text{volume della camera di combustione,}$$

$$\text{e } k = \frac{c_p}{c_v}$$

Quando il pistone raggiunge il PMS la miscela viene compressa nella camera di scoppio durante tale fase entrambe le valvole rimangono chiuse.

Fase 2-3: Fase di scoppio

Lo scoppio si realizza mediante un isocora, scoppia la scintilla tra gli elettrodi e la candela, la miscela si incendia ed il calore sviluppato (energia termica) farà aumentare rapidamente la pressione, prima ancora che il pistone cominci a muoversi.

Fase 3-4: Fase di espansione

Questa fase si realizza mediante una trasformazione adiabatica, il pistone spinto dall'elevata pressione, si sposta dal PMS al PMI, il volume all'interno del cilindro continua ad aumentare e si ha un'espansione che terminerà quando il pistone raggiunge il PMI con entrambe le valvole chiuse.

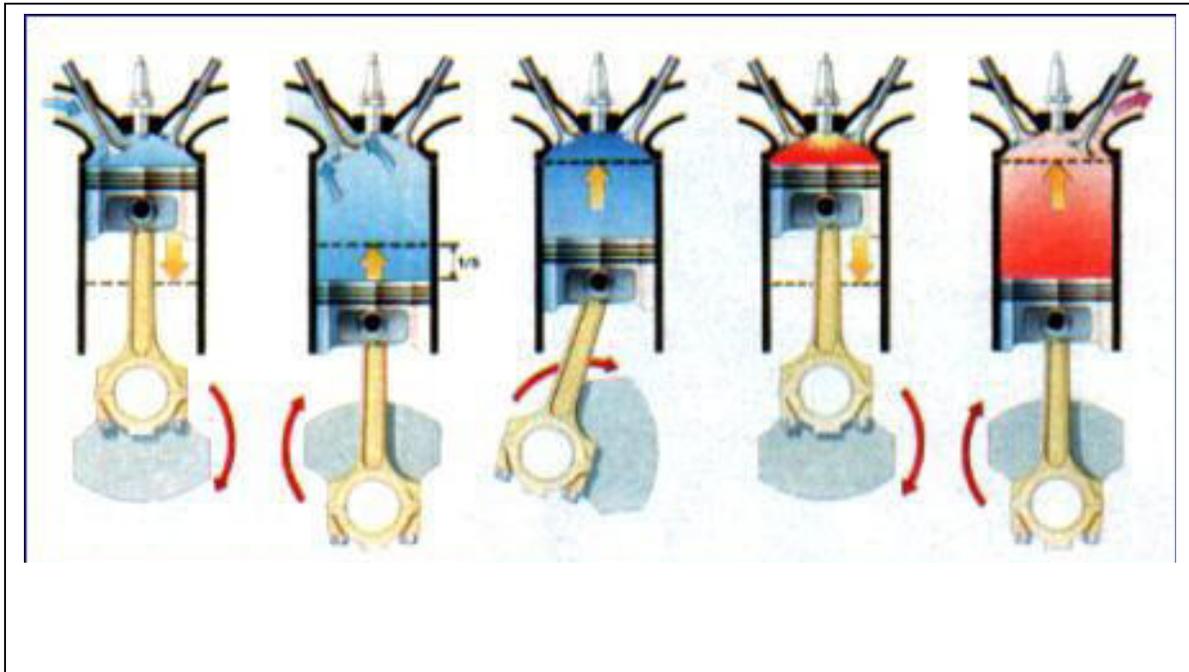
Lo "**SCARICO**" per il ciclo OTTO si realizza, teoricamente, in due fasi: in parte mediante un isocora ed in parte mediante un isobara.

Fase 4-1 (o 4-5): Fase di scarico spontaneo

In questa fase la trasformazione è isocora, il pistone è teoricamente fermo al PMI, la valvola di scarico è aperta, la pressione inoltre si porta al valore atmosferico.

Fase 1-6 (o 5-6): Fase di scarico forzato

La trasformazione è isobara si completa in questa fase lo scarico dei gas combusti attraverso l'apposito condotto. Il pistone si porta dal PMI al PMS. Durante questa fase la pressione rimane teoricamente uguale a quella atmosferica, ed al termine della fase, può iniziare un nuovo ciclo identico a quello precedente.

**2.3 RENDIMENTO di un ciclo OTTO**

Ricordando quanto espresso dal secondo principio della Termodinamica (enunciato di CARNOT):

Ogni ciclo termico percorso in senso orario comporta l'introduzione di un calore Q_1 e la perdita di un calore Q_2 , con la produzione di un lavoro utile $L=Q_1-Q_2$.

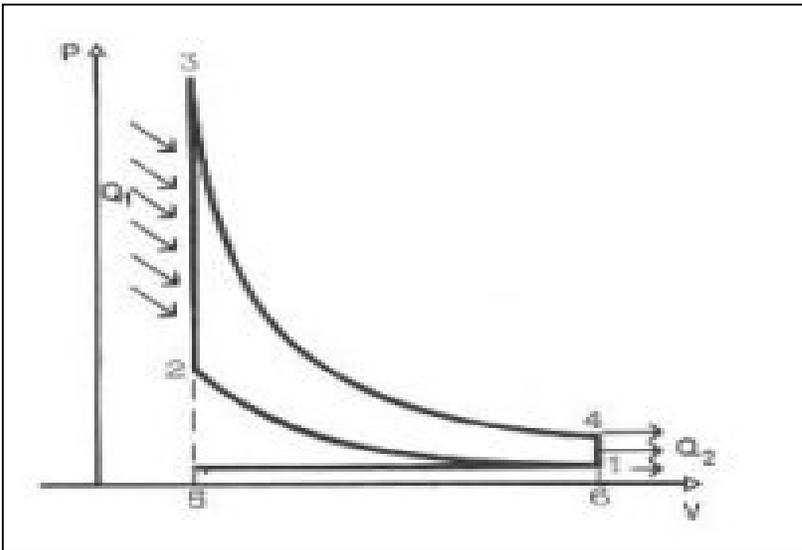
Il rendimento di tale ciclo risulterà pari:

$$\eta = \frac{L}{Q_{\text{ASSORBITO}}} = \frac{L}{Q_1}$$

Nel caso del ciclo OTTO:

Il calore assorbito $Q_1 = Q_{23}$ mentre il calore ceduto $Q_2 = Q_{41}$.

Il Lavoro utile risulta $L = Q_{23} - Q_{41}$



Il rendimento per il ciclo OTTO:

$$\eta = \frac{L}{Q_{23}} = \frac{Q_{23} - Q_{41}}{Q_{23}} = 1 - \frac{Q_{41}}{Q_{23}}$$

Le trasformazioni 2-3 e 4-1 sono trasformazioni isocore posso quindi determinare la formula del calore come segue:

$$Q_{41} = c_v(T_4 - T_1)$$

$$Q_{23} = c_v(T_3 - T_2)$$

Sostituisco nella formula del rendimento le formule di Q_{41} e Q_{23} , dopo di che metto in evidenza T_1 e T_2 :

$$\eta = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Essendo $\frac{T_4}{T_1} - 1 = \frac{T_3}{T_2} - 1$.

DIMOSTRAZIONE: $\frac{T_4}{T_1} - 1 = \frac{T_3}{T_2} - 1$

Le trasformazioni **1-2** e **3-4** sono adiabatiche per le quali vale la seguente legge:

$$TV^{k-1} = \text{cost}$$

Questa legge applicata rispettivamente nei punti 3 e 4 dell'adiabatica **3-4** e nei punti 1 e 2 dell'adiabatica **1-2** risulta:

$$T_4 V_4^{k-1} = T_3 V_3^{k-1}$$

$$T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1}$$

Divido membro a membro le due equazioni ed ottengo:

$$\frac{T_4 V_4^{k-1}}{T_1 V_1^{k-1}} = \frac{T_3 V_3^{k-1}}{T_2 V_2^{k-1}}$$

$$\left(\frac{T_4}{T_1} \right) \left(\frac{V_4}{V_1} \right)^{k-1} = \left(\frac{T_3}{T_2} \right) \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^{k-1}$$

Essendo le trasformazioni **2-3** e **4-1** delle isocore ($v = \text{cost}$) risulta $V_4 = V_1$ e $V_3 = V_2$

$$\left(\frac{T_4}{T_1} \right) \left(\frac{V_4}{V_1} \right)^{k-1} = \left(\frac{T_3}{T_2} \right) \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^{k-1} \text{ risulta che } \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

Per cui possiamo affermare che anche $\frac{T_4}{T_1} - 1 = \frac{T_3}{T_2} - 1$ ed il rendimento del ciclo OTTO

risulta pari a $\mu = 1 - \frac{T_1}{T_2}$.

I punti 1 e 2 appartengono alla stessa trasformazione adiabatica $TV^{k-1} = \text{cost}$ per cui

$$T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1} \text{ e } \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2^{k-1}}{V_1^{k-1}} \right) \text{ sostituisco nella formula del rendimento che diventa:}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1}$$

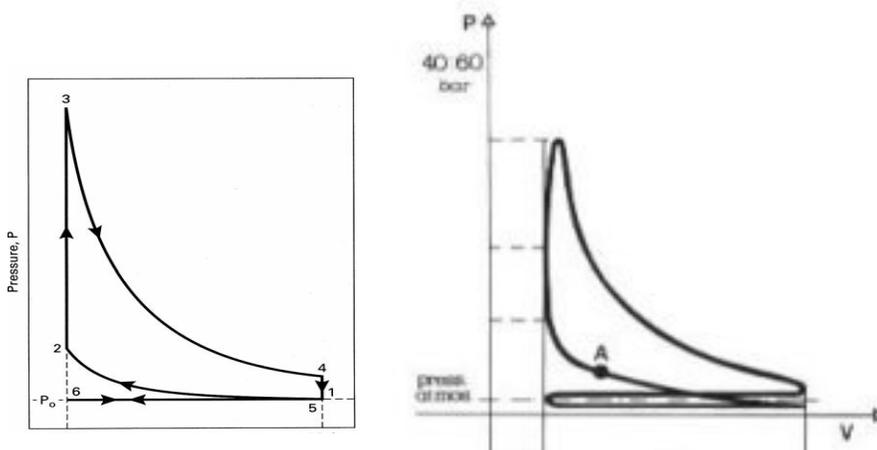
Ricordando che $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$ è il *RAPPORTO GEOMETRICO DI COMPRESSIONE* (o *RAPPORTO VOLUMETRICO DI COMPRESSIONE*) il rendimento può essere così espresso:

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{k-1}$$

Da questa espressione si deduce che il rendimento dipende soltanto dal rapporto volumetrico ε , e dal coefficiente k , in particolare *all'aumentare di ε il valore del rendimento aumenta e viceversa.*

2.4 CICLO OTTO pratico a quattro tempi²

Le differenze tra il ciclo OTTO pratico e quello teorico risultano evidenti dalla figura:



Analizziamo le singole fasi del ciclo OTTO pratico:

Fase 6-1: fase di ammissione

Rispetto all'isobara teorica, in pratica l'ammissione avviene completamente in depressione (con $p < p_{ATM}$), questa fase termina quando la pressione risulta pari a quella atmosferica $p = p_{ATM}$. La miscela a causa dell'inerzia, entra nel cilindro con un certo ritardo, di

² Integrare questo paragrafo con gli appunti della lezione.

conseguenza quando il pistone giunge al PMI, la miscela per inerzia, continua ad entrare nel cilindro (è consigliabile mantenere ancora aperta per un certo periodo la valvola di ammissione per permettere un maggior riempimento).

Fase 1-2: fase di compressione

Questa fase è un'adiabatica che coincide quasi con quella teorica, almeno fino al punto **A**, dopo tale punto, in cui scocca la scintilla con un certo anticipo rispetto al PMS, la curva dell'adiabatica di compressione si scosta da quella teorica.

Fase 2-3: fase di combustione

La combustione non è istantanea, ma impiega un certo tempo per avvenire con la conseguenza che, nel frattempo, il pistone si muove e la trasformazione non può essere a volume costante. La combustione inizia prima che il pistone raggiunga il PMS, e si protrae anche dopo che esso ha raggiunto il PMS ed ha iniziato la corsa di espansione. Si assiste in questa fase ad una perdita di lavoro utile.

Fase 3-4: fase di espansione

Questa fase avviene mediante un'adiabatica che si trova al di sotto di quella teorica, di conseguenza, si verifica una perdita di calore utile.

Fase 4-1 e 1-6: fase di scarico

Lo scarico in questo ciclo non avviene né a $v=\text{cost}$ e né a $p=\text{cost}$. inizia in anticipo rispetto al PMI a seguito dell'apertura della valvola di scarico e termina con un certo ritardo dopo che il pistone ha raggiunto il PMS a seguito della chiusura della valvola di scarico³ (con tale accorgimento si ottiene un miglior svuotamento dei gas combusti all'interno del cilindro). All'interno di questa fase si realizza una perdita di lavoro utile.

2.5 CICLO DIESEL teorico

Il ciclo diesel a quattro tempi, oggi è ampiamente utilizzato nella trazione terrestre, ed in alcuni rari casi anche nella propulsione aeronautica ad elica.

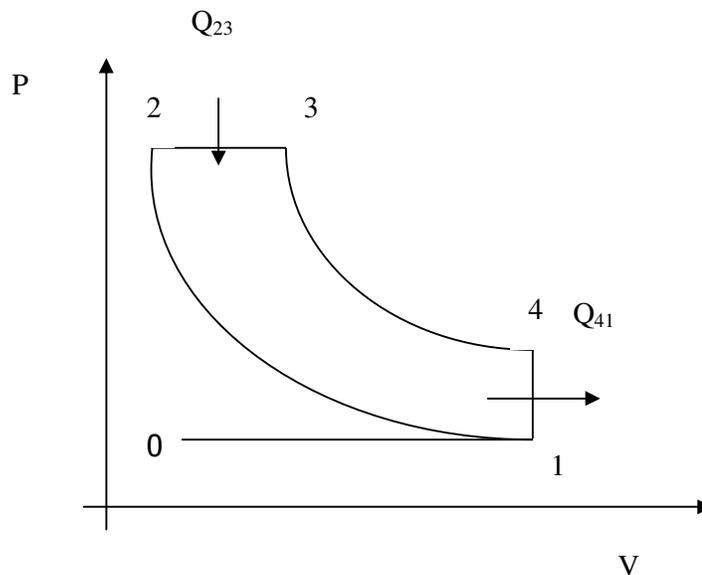
³ Al termine della fase di scarico si preferisce anticipare l'apertura della valvola di aspirazione per consentire l'entrata della miscela anche grazie alla depressione che si crea nel cilindro al termine di questa fase.

All'inizio della fase di aspirazione si mantiene ancora aperta la valvola di scarico per consentire la completa fuoriuscita dei gas di scarico: questa fase viene detta anche **lavaggio**.

Il funzionamento del motore diesel a 4 tempi è simile a quello del motore alternativo a quattro tempi, con la differenza che:

- l'esplosione della miscela non è comandata dalla scintilla provocata dalla candela, bensì dall'autoesplosione conseguente all'alto rapporto di compressione e quindi alla temperatura che viene a crearsi;
- il pistone comprime solo aria e non una miscela di aria+combustibile;
- la combustione avviene mediante una trasformazione a $p=\text{cost}$ e non a $v=\text{cost}$.
- in questo tipo di motore inoltre, i rapporti di compressione sono più elevati, per poter consentire l'autoaccensione del combustibile; i rapporti di compressione più elevati permettono un rendimento più alto rispetto a quello OTTO, anche se a parità di rapporti il ciclo OTTO rende di più.

Il diagramma P-V è rappresentato dalle seguenti fasi:



Fase 0-1: fase di ammissione

Durante tale fase il pistone si sposta dal PMS al PMI. Tale fase si realizza, teoricamente, mediante una trasformazione ISOBARA ($p=p_{\text{ATM}}$) e si ottiene l'ammissione dell'aria attraverso l'apposito condotto a seguito dell'apertura della valvola di ammissione (o di aspirazione). Al termine di tale fase l'aria si trova ad una temperatura T_1 che dipende da quella dell'aria aspirata e da quella dei gas combusti.

Fase 1-2: fase di compressione

Durante tale fase il pistone si sposta dal PMI al PMS. Tale fase si realizza teoricamente, mediante una trasformazione adiabatica ($pV^k = \text{cost}$ oppure $TV^{k-1} = \text{cost}$). In questa fase il volume diminuisce, mentre la temperatura T e la pressione p aumentano. Con un certo anticipo rispetto al PMS avviene l'iniezione del combustibile polverizzato che, per effetto dell'alta temperatura dell'aria, si incendia spontaneamente. Al termine della compressione si raggiungono temperature dell'ordine di 600°C .

Fase 2-3: Fase di combustione

La combustione si realizza mediante un isobara. Il carburante brucia gradualmente man mano che viene iniettato, mentre il pistone ha già cominciato la sua corsa verso il PMI. La combustione lenta e graduale, l'aumento di volume dovuto allo spostamento del pistone, fanno sì che non ci sia alcun aumento di pressione (infatti la trasformazione è un isobara!!).

Fase 3-4: Fase di espansione

Terminata la combustione comincia l'espansione adiabatica, esattamente come nel ciclo OTTO, il pistone spinto dall'elevata pressione, si sposta dal PMS al PMI, il volume all'interno del cilindro continua ad aumentare e si ha un'espansione che terminerà quando il pistone raggiunge il PMI con entrambe le valvole chiuse.

Fase 4-1: Fase di scarico spontaneo

In questa fase la trasformazione è isocora, il pistone è teoricamente fermo al PMI, la valvola di scarico è aperta, la pressione inoltre si porta al valore atmosferico.

Fase 1-0 Fase di scarico forzato

La trasformazione è isobara si completa in questa fase lo scarico dei gas combusti attraverso l'apposito condotto. Il pistone si porta dal PMI al PMS. Durante questa fase la pressione rimane teoricamente uguale a quella atmosferica, ed al termine della fase, può iniziare un nuovo ciclo identico a quello precedente.

2.6 Rendimento del ciclo DIESEL

Ricordando quanto espresso dal secondo principio della Termodinamica (enunciato di CARNOT):

Ogni ciclo termico percorso in senso orario comporta l'introduzione di un calore Q_1 e la perdita di un calore Q_2 , con la produzione di un lavoro utile $L=Q_1-Q_2$.

Il rendimento di tale ciclo risulterà pari:

$$\eta = \frac{L}{Q_{\text{ASSORBITO}}} = \frac{L}{Q_1}$$

Nel caso del ciclo DIESEL:

Il calore assorbito $Q_1 = Q_{23}$ mentre il calore ceduto $Q_2 = Q_{41}$.

Il Lavoro utile risulta $L = Q_{23} - Q_{41}$

Il rendimento per il ciclo DIESEL:

$$\eta = \frac{L}{Q_{23}} = \frac{Q_{23} - Q_{41}}{Q_{23}} = 1 - \frac{Q_{41}}{Q_{23}}$$

Le trasformazioni 2-3 è un isobara mentre la 4-1 è isocora posso quindi determinare la formula del calore come segue:

$$Q_{41} = c_v(T_4 - T_1)$$

$$Q_{23} = c_p(T_3 - T_2)$$

Sostituisco nella formula del rendimento le formule di Q_{41} e Q_{23} :

$$\eta = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} \quad \text{e ricordando che se } k = \frac{c_p}{c_v} \text{ allora risulta che } \frac{c_v}{c_p} = \frac{1}{k} :$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

Metto in evidenza T_1 al numeratore e T_2 al denominatore:

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

Ricordando che i punti 1 e 2 appartengono alla stessa trasformazione adiabatica 1-2 regolata dalla legge $TV^{k-1} = \text{cost}$ per cui applicata nei due punti:

$$T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1} \text{ e } \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2^{k-1}}{V_1^{k-1}} \right) \text{ che può essere anche scritta } \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1}$$

Ma sappiamo che $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$ è il *RAPPORTO GEOMETRICO DI COMPRESSIONE* (o *RAPPORTO*

VOLUMETRICO DI COMPRESSIONE) allora l'espressione $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1}$ diventa:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{k-1}$$

Sostituisco all'interno della formula del rendimento:

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - \frac{1}{k} \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

La trasformazione 2-3 è una isobara regolata dalla legge $TV^{-1} = \text{cost}$ per cui posso scrivere:

$$T_3 V_3^{-1} = T_2 V_2^{-1} \text{ che diventa } \frac{T_3}{V_3} = \frac{T_2}{V_2} \text{ che può essere ancora scritta } \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2}$$

Ma sappiamo che $\beta = \frac{V_3}{V_2}$ è il *RAPPORTO di INTRODUZIONE* (o *RAPPORTO VOLUMETRICO*

DI COMBUSTIONE) allora $\frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \beta$

Sostituisco β nella formula del rendimento al posto di $\frac{T_3}{T_2}$

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{(\beta - 1)}$$

Per scrivere la formula finale di η bisogna adesso solo semplificare $\frac{T_4}{T_1}$:

moltiplico e divido per le quantità T_3 e T_2

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_4}{T_1} \frac{T_3}{T_3} \frac{T_2}{T_2} \text{ effettuo i prodotti incrociati } \frac{T_4}{T_3} \frac{T_3}{T_2} \frac{T_2}{T_1}$$

- Trasformazione adiabatica $\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1}$ essendo $V_4=V_1$ $\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_1}\right)^{k-1}$

- Trasformazione isobara $\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)$

- Trasformazione adiabatica $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$

Sostituisco quanto trovato sopra in $\frac{T_4}{T_3} \frac{T_3}{T_2} \frac{T_2}{T_1}$ ed ottengo

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_4}{T_3} \frac{T_3}{T_2} \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^k \text{ sapendo che } \beta = \frac{V_3}{V_2} \text{ allora } \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_4}{T_3} \frac{T_3}{T_2} \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^k = \beta^k$$

per cui

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{(\beta^k - 1)}{(\beta - 1)}$$

Poiché $\beta > 1$ sempre, a parità di ε , p e T il rendimento del ciclo OTTO è maggiore del rendimento del ciclo DIESEL.

Nella pratica il rendimento del ciclo DIESEL è maggiore in quanto non esistendo problemi di autoaccensione si raggiungono rapporti di compressione più elevati.