Motores Térmicos

8º Semestre

4º ano

Aula 6 – Modelos de Ciclos Ideais

- Processo geral de comparação
- Processo de comparação de Seiliger
- Processo de comparação de Otto
- Processo de comparação de Diesel

6. Modelos de Ciclos Ideais

- O objectivo dos motores de combustão é o de transformar a maior quantidade de calor possível em energia mecânica. Com o objectivo de avaliar a qualidade desta transformação criaram-se diferentes processos de comparação ou ciclos teóricos.
- Os processos de comparação ou ciclos teóricos dos motores de combustão interna, são ciclos termodinâmicos através dos quais se pode comparar processos de motores perfeitos que funcionam com gases reais, à processos em motores que realmente existem.

6. Modelos de Ciclos Ideais

- Por meio dos ciclos teóricos pode-se determinar grandezas tais como rendimento térmico e outras que seriam teoricamente possíveis e compara-las com grandezas reais. Por outro lado os ciclos teóricos podem servir de base para o projecto de um novo motor.

6. Modelos de Ciclos Ideais

Um motor perfeito pressupõe que:

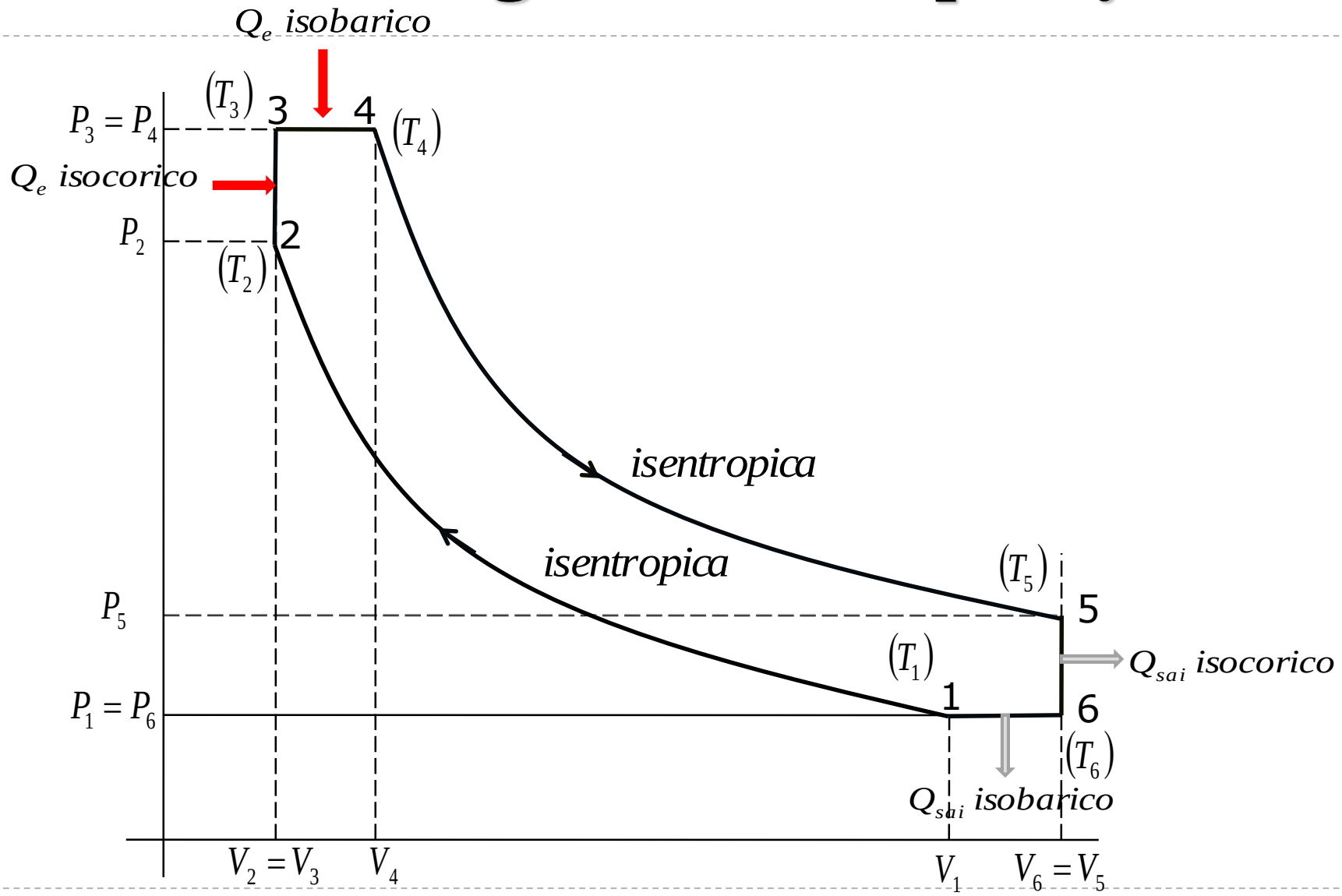
- A geometria do seu motor corresponda a do motor real;
- Durante o processo de admissão não sobre no interior do cilindro nenhum gás remanescente;
- A relação entre o gás combustível e o ar durante a combustão permaneça constante;
- A combustão seja perfeita;
- A combustão, quanto à forma e a velocidade da chama ocorra de acordo com a teoria;
- As paredes do cilindro sejam adiabáticas, isto é não se deixem atravessar pelo calor;
- Não haja perdas mecânicas, nem de fluxo (perdas hidráulicas).

6.1 Processo geral de comparação

Este processo é válido para:

- Gases reais;
- Um enchimento perfeito do cilindro com mistura ou gás sob condições de aspiração;
- Compressão e expansão isentrópicas;
- Combustão que se dá à uma velocidade infinitamente grande e sem troca de calor com o ambiente;
- Combustão completa com os produtos na forma de dióxido de carbono, água e nitrogénio, na forma de gás inerte;
- Troca de gases feita sem perdas de corrente;
- Motores de dois e quatro tempos.

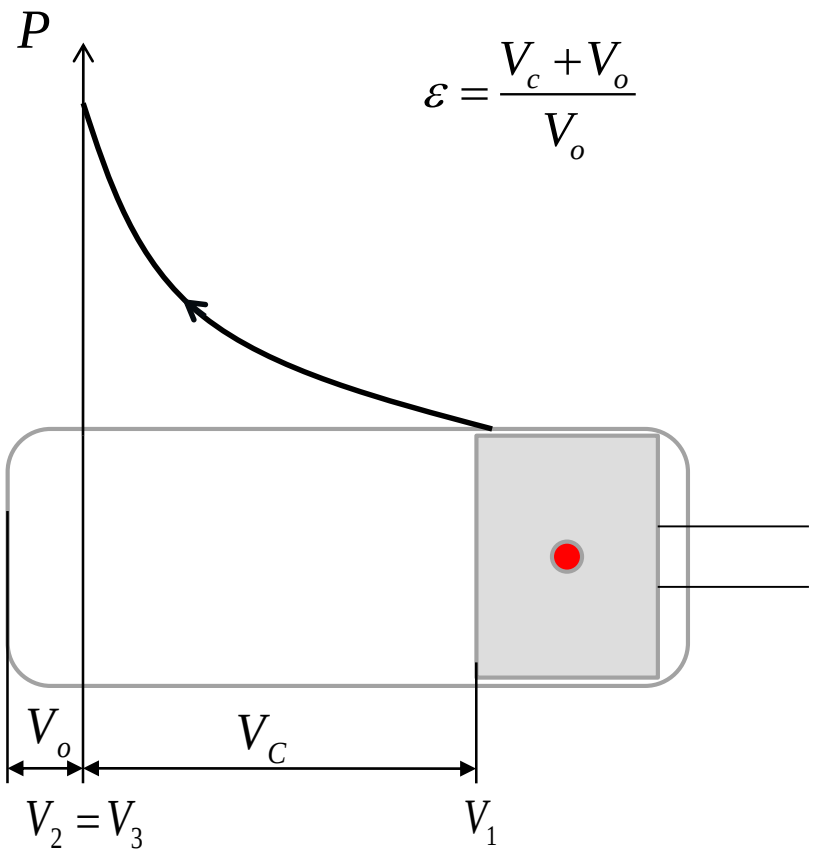
6.1 Processo geral de comparação



6.1 Processo geral de comparação

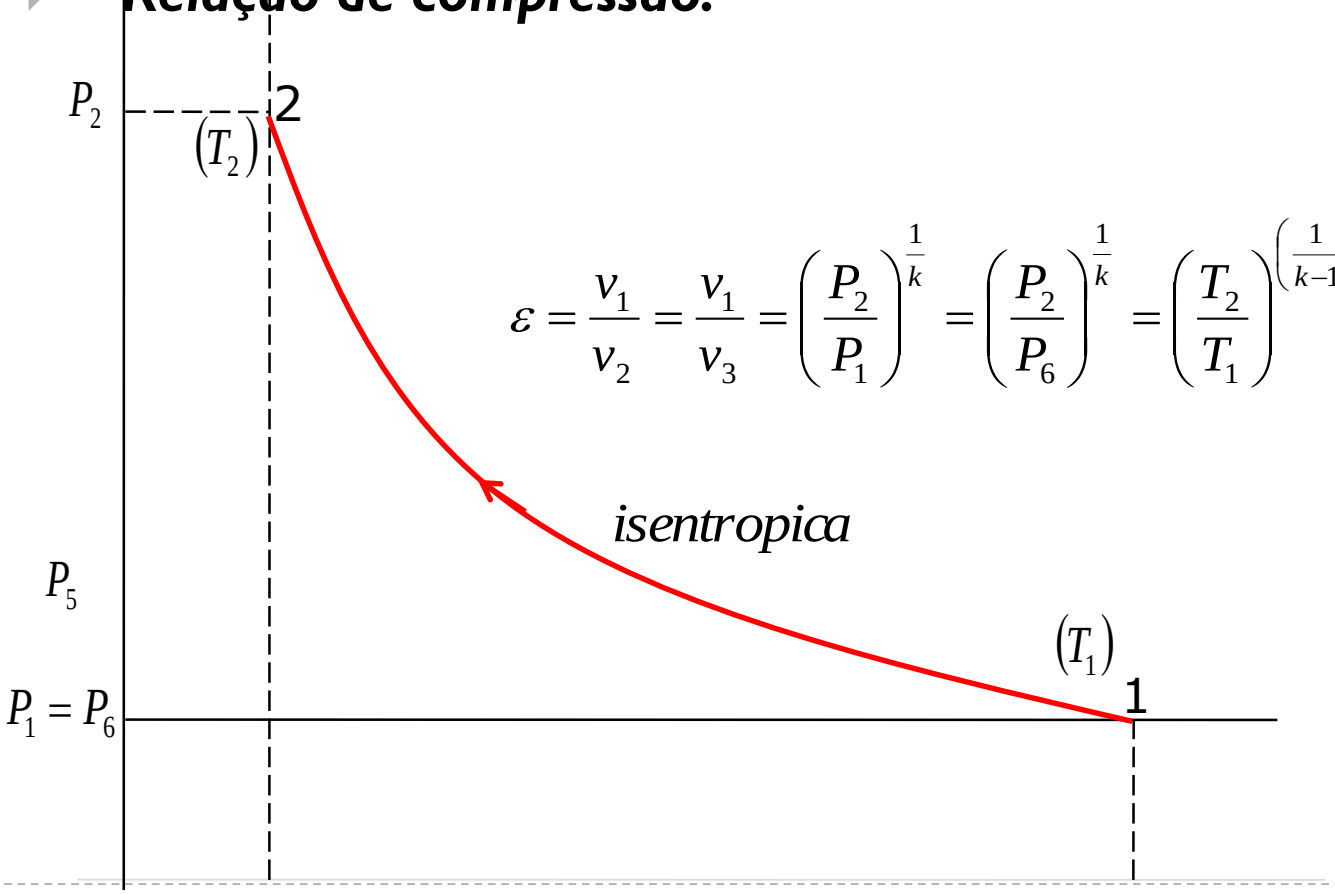
Em motores de êmbolo, a taxa de compressão é a soma do volume do cilindro V_c e o da câmara de combustão V_o, dividida por este último.

A taxa de compressão é um elemento físico-matemático que rege os motores dos ciclos Otto e Diesel, de 2 e 4 tempos e também dos rotativos, entre outros. Em todos esses motores, a compressão interna exerce papel fundamental no seu rendimento. Em geral, quanto maior for a taxa de compressão, maior é o rendimento termo-mecânico desses motores.



6.1 Processo geral de comparação

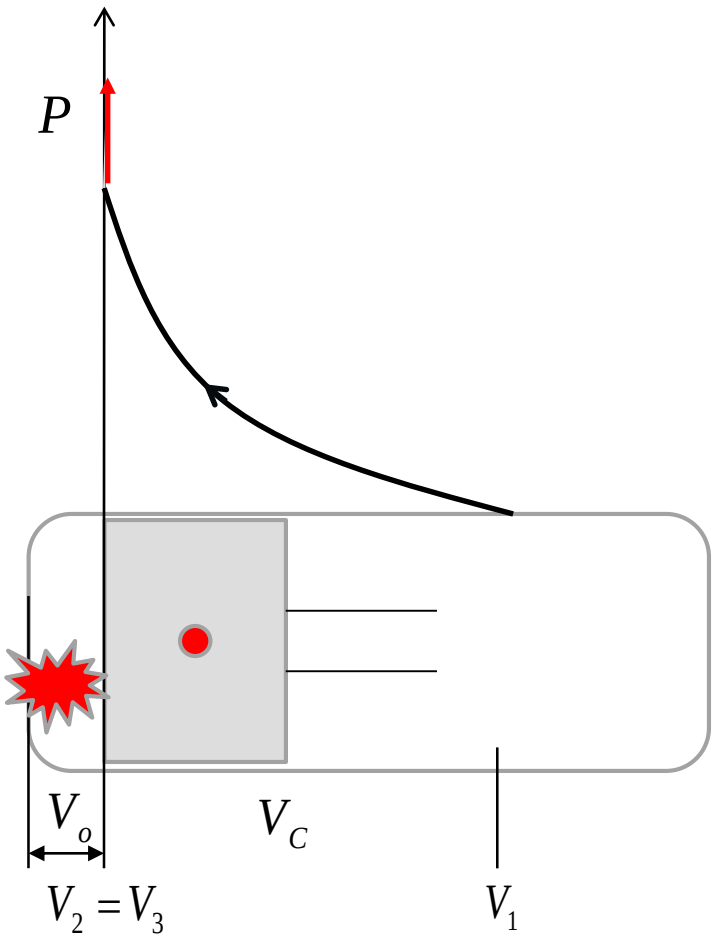
- ***Do processo indicado no diagrama pode-se deduzir as seguintes ralações, todas maiores que a unidade.***
  - ***Relação de compressão:***



$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_1}{v_3} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{k}} = \left(\frac{P_2}{P_6}\right)^{\frac{1}{k}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\left(\frac{1}{k-1}\right)} \quad (6.1)$$

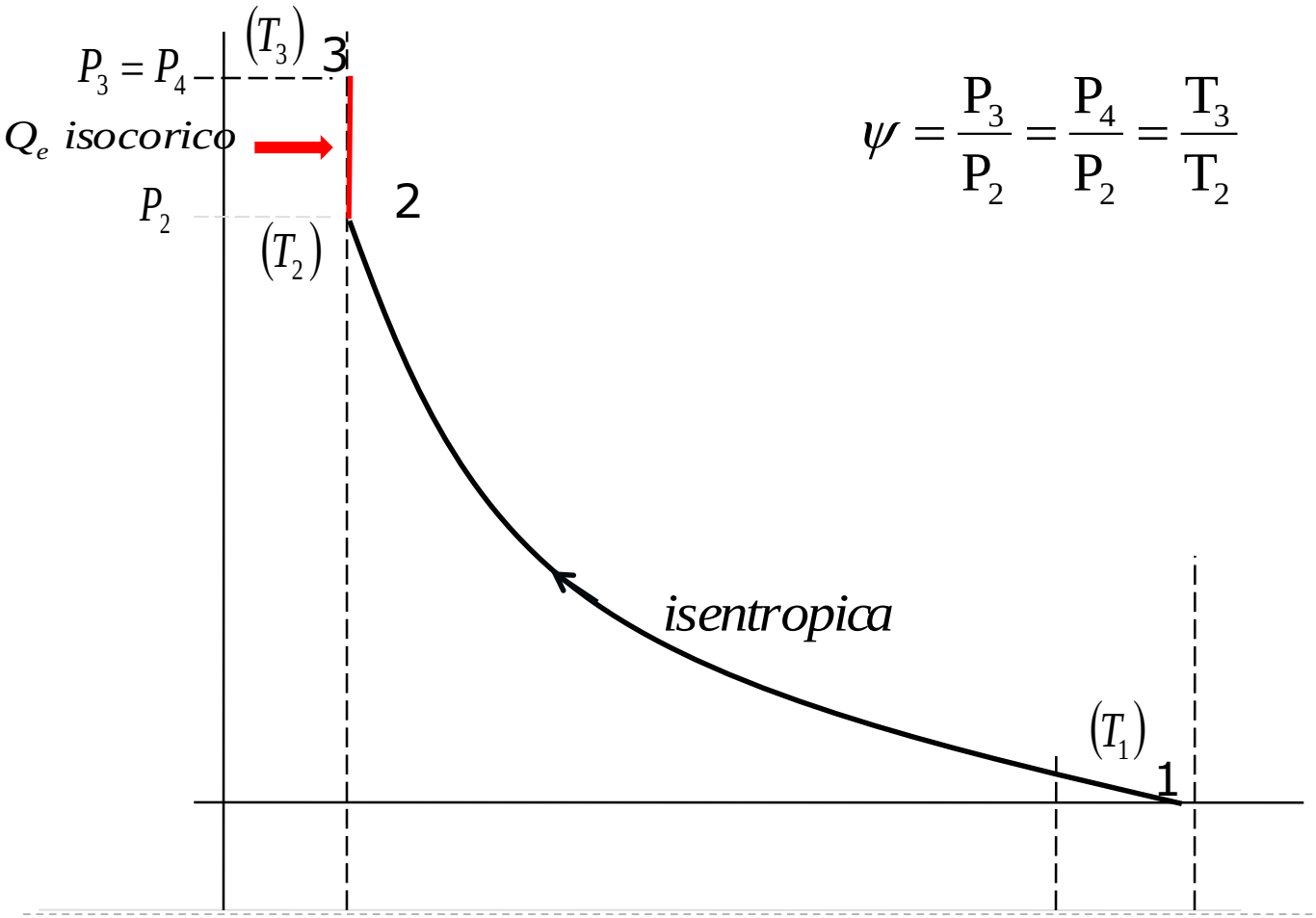
6.1 Processo geral de comparação

O processo de admissão de calor é feito isocoricamento, a explosão é instantânea e ocorre com o êmbolo parado no Ponto Morto Superior.



6.1 Processo geral de comparação

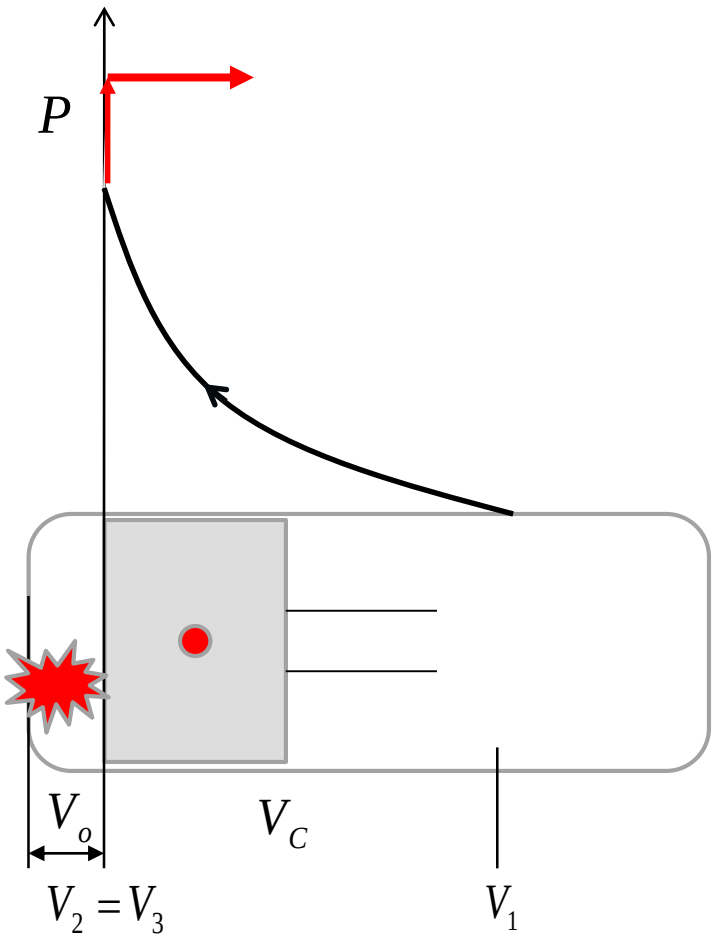
- ***Relação de aumento da pressão***



$$\psi = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_2} = \frac{T_3}{T_2} \qquad (6.2)$$

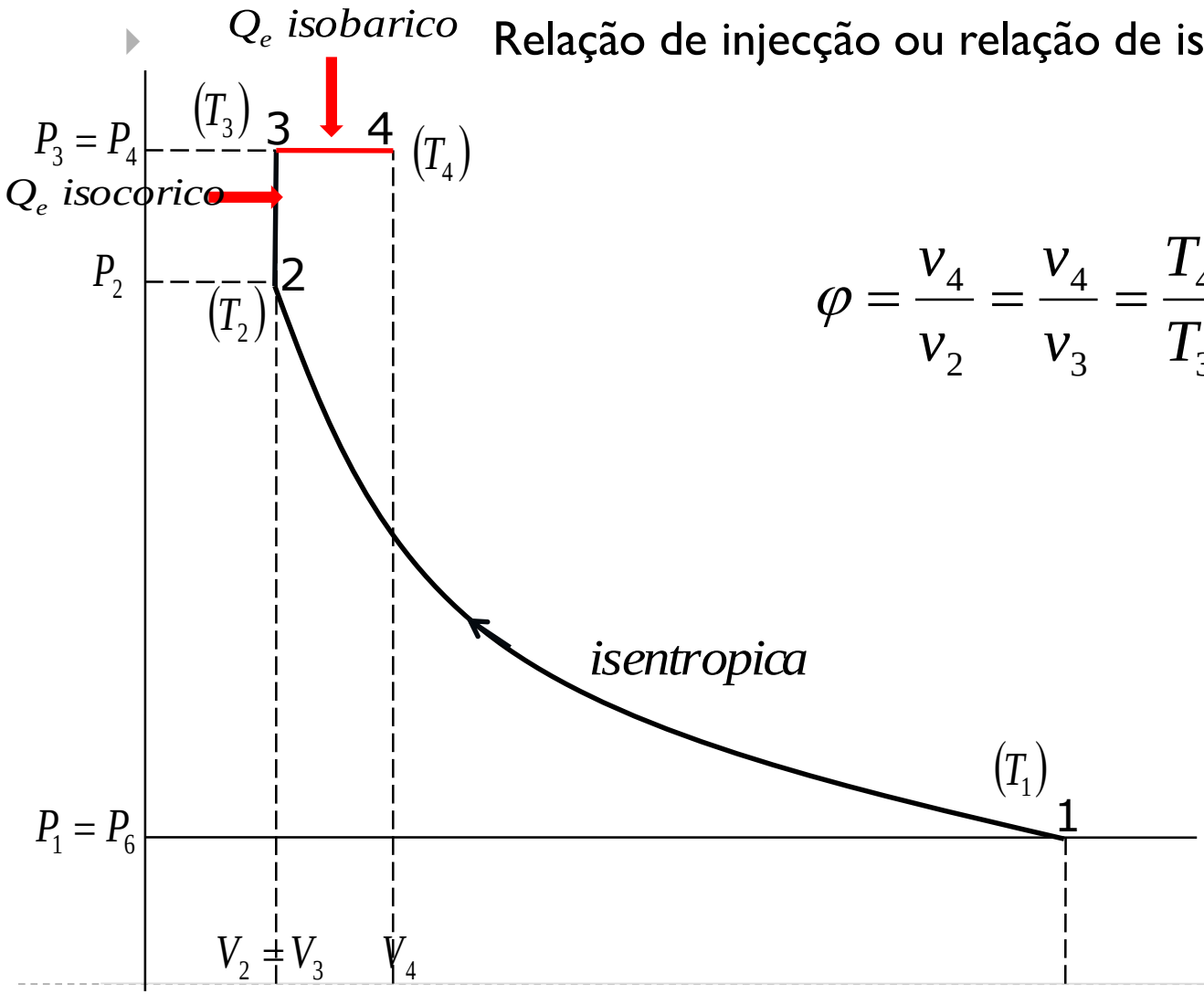
6.1 Processo geral de comparação

O processo de admissão de calor é feito isobaricamente, isto é, a combustão continua enquanto o êmbolo começa a mover-se do Ponto Morto Superior, em direcção ao Ponto Morto Inferior.



6.1 Processo geral de comparação

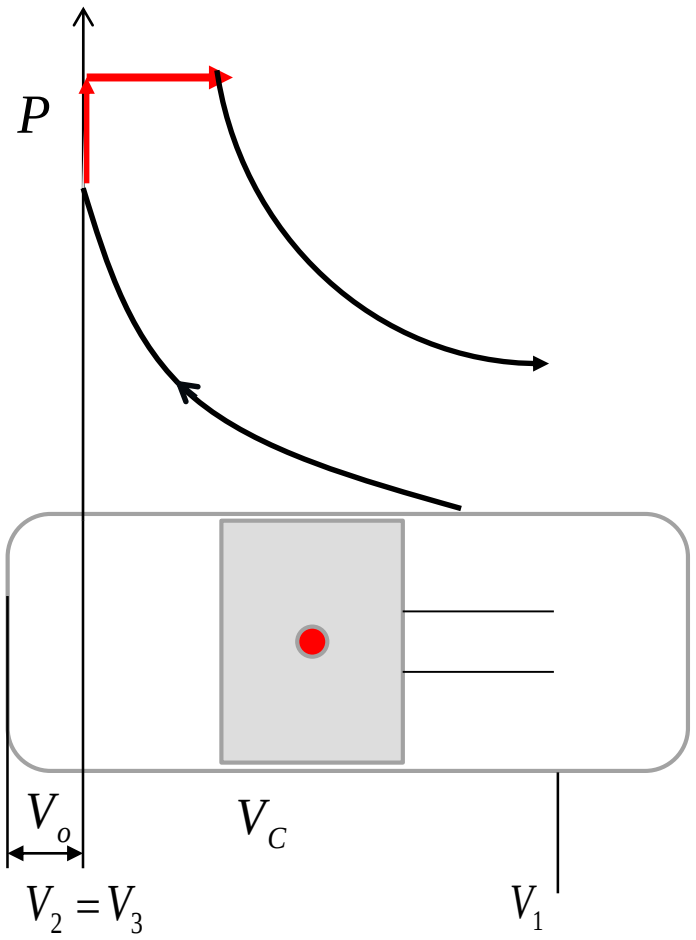
Relação de injecção ou relação de isopressão



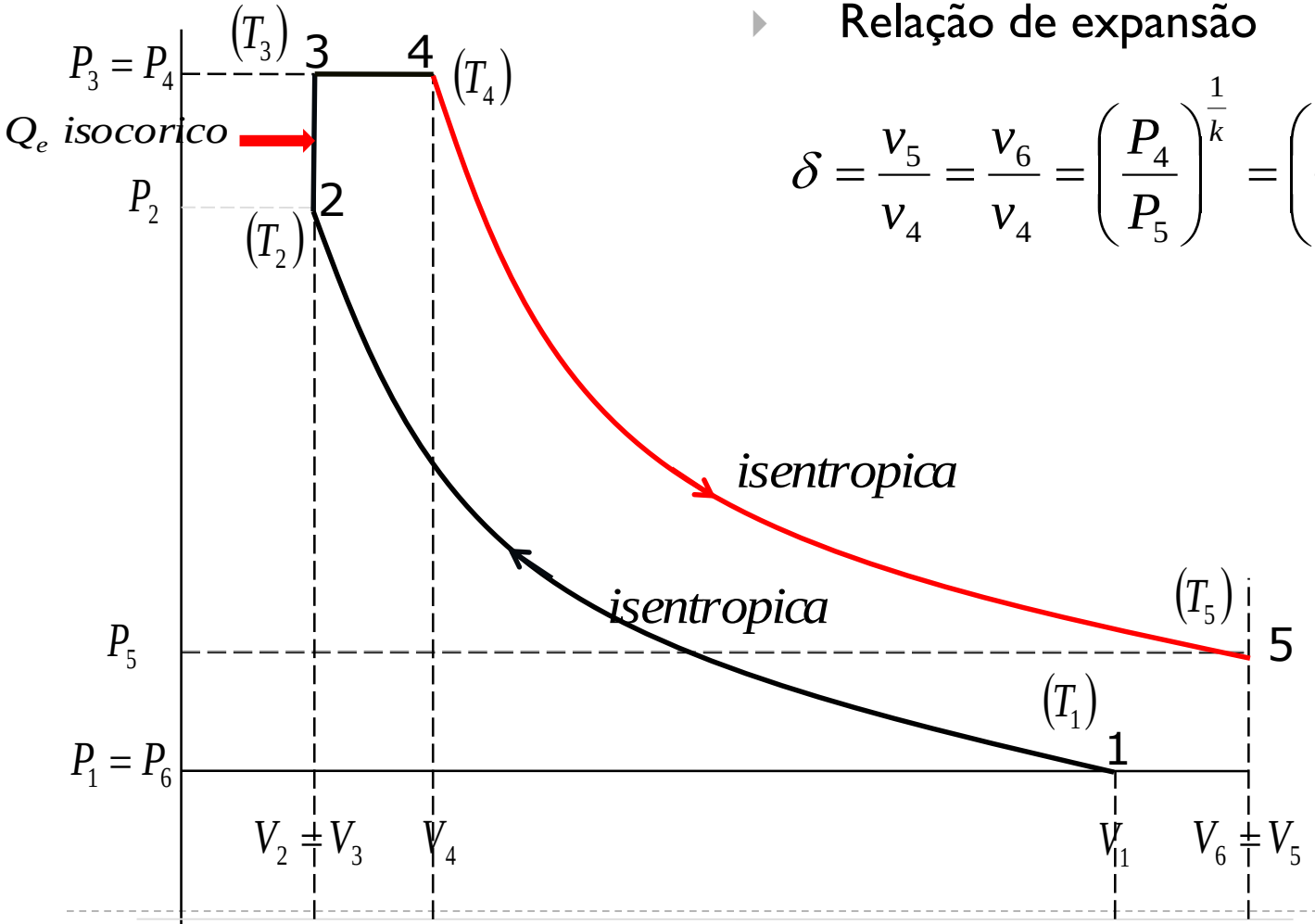
$$\varphi = \frac{v_4}{v_2} = \frac{v_4}{v_3} = \frac{T_4}{T_3} \quad (6.3)$$

6.1 Processo geral de comparação

O processo de expansão é politrópico e acontece quando o êmbolo continua o seu movimento do Ponto Morto Superior, até ao Ponto Morto Inferior.



7.1 Processo geral de comparação

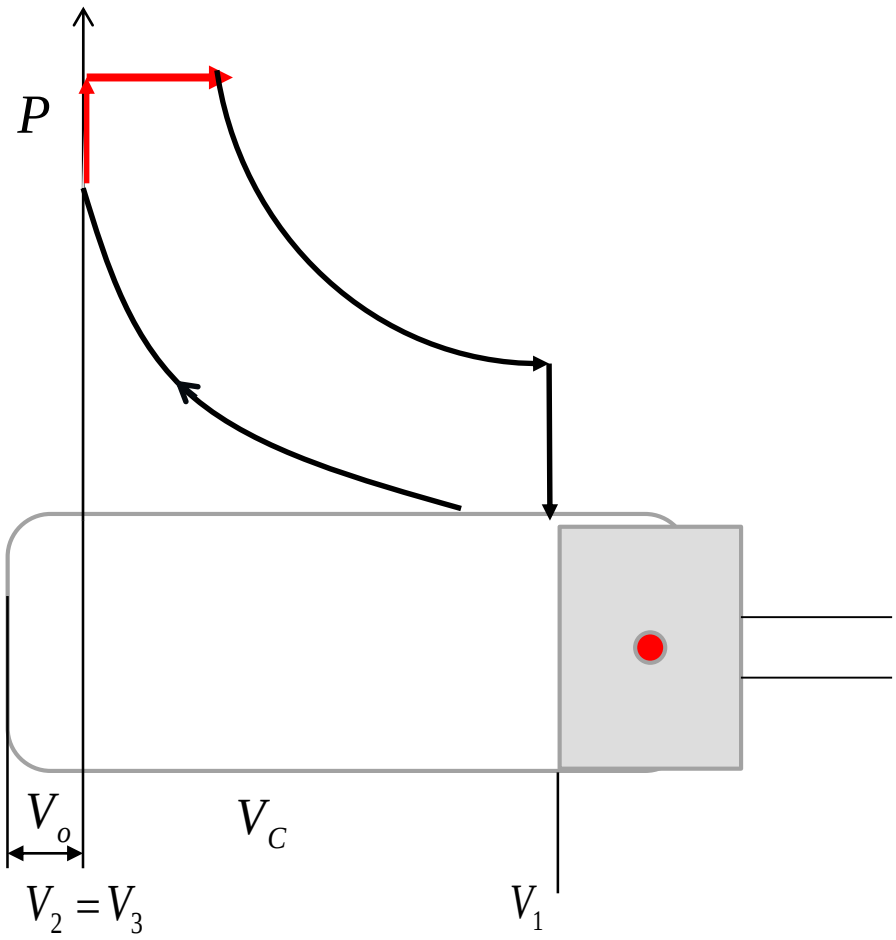


- Relação de expansão

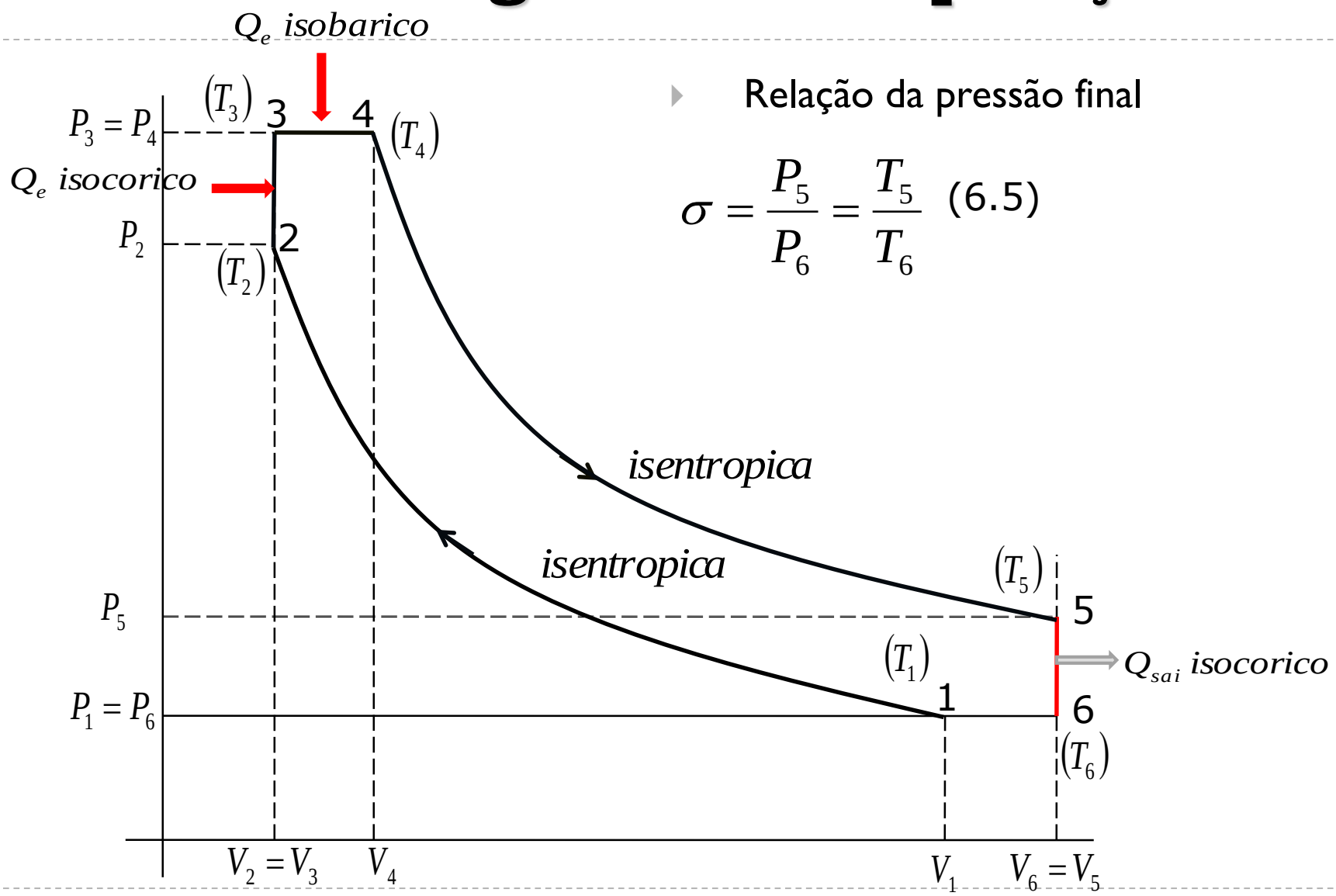
$$\delta = \frac{v_5}{v_4} = \frac{v_6}{v_4} = \left(\frac{P_4}{P_5}\right)^{\frac{1}{k}} = \left(\frac{T_4}{T_5}\right)^{\frac{1}{k-1}} \qquad (6.4)$$

6.1 Processo geral de comparação

O processo de rejeição de calor é realizado isocoricamente, com o êmbolo parado no Ponto Morto Inferior.



6.1 Processo geral de comparação

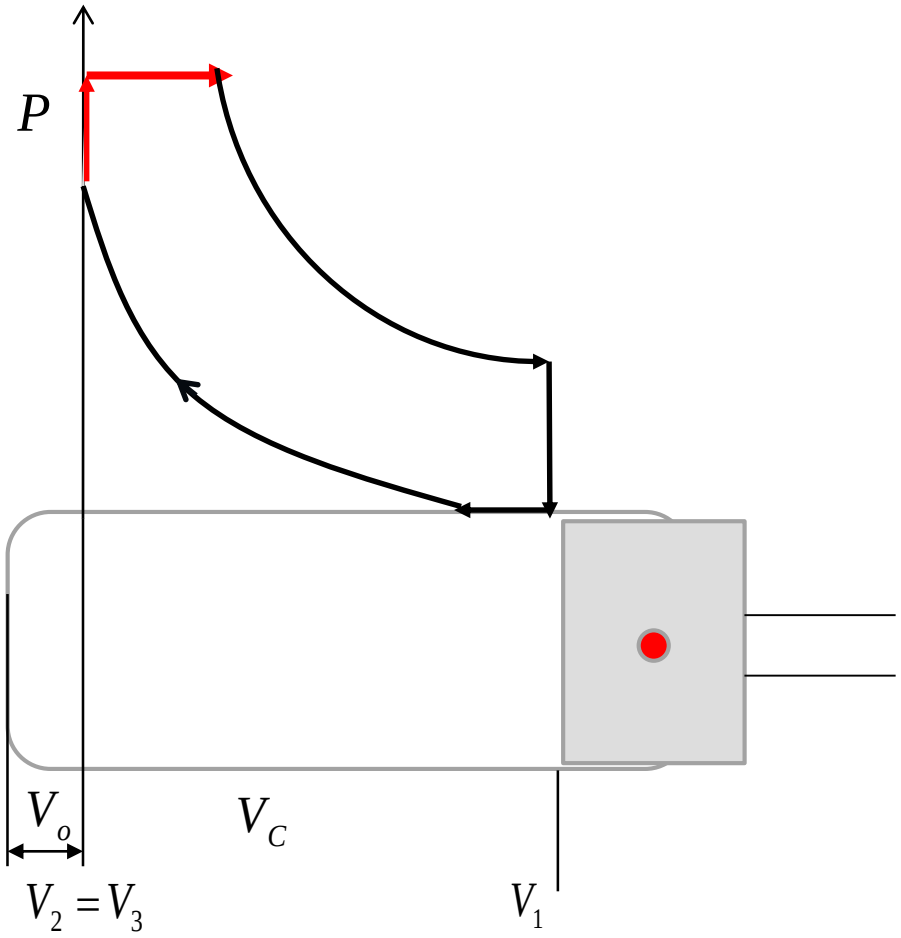


- Relação da pressão final

$$\sigma = \frac{P_5}{P_6} = \frac{T_5}{T_6} \quad (6.5)$$

6.1 Processo geral de comparação

O resto do processo de rejeição de calor é realizado isobaricamente, com o êmbolo a iniciar o seu movimento do Ponto Morto Inferior em direcção ao Superior.



6.1 Processo geral de comparação

Para além das relações atrás apresentadas é válida e de bastante utilidade seguinte expressão que relaciona a taxa de compressão, a relação da pressão final, a relação de aumento da pressão, e a relação de expansão:

$$\frac{\psi}{\sigma} = \left(\frac{\delta}{\varepsilon}\right)^k \qquad (6.6)$$

6.1 Processo geral de comparação

Este processo geral de comparação, bem como os outros processos todos de comparação, só são aplicáveis para motores perfeitos. Sendo assim pode-se escrever que o rendimento perfeito é a relação entre a energia mecânica e a energia química do combustível.

$$\eta_{per} = \frac{Q_e - Q_s}{Q_e} = 1 - \frac{Q_s}{Q_e} < 1 \qquad (6.7)$$

6.1 Processo geral de comparação

- O calor fornecido é dado por:

$$Q_e = Q_{e,V} + Q_{e,P} = c_v\left(T_3 - T_2\right) + c_p\left(T_4 - T_3\right) \quad (6.8)$$

- O calor retirado obtém-se de:

$$Q_s = Q_{s,V} + Q_{s,P} = c_v\left(T_5 - T_6\right) + c_p\left(T_6 - T_1\right) \quad (6.9)$$

6.1 Processo geral de comparação

- Como:

$$k = \frac{c_p}{c_v} \qquad (6.10)$$

- Então:

$$\eta_{per} = 1 - \frac{c_v(T_5 - T_6) + k \cdot c_v(T_6 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2) + k \cdot c_v(T_4 - T_3)} \qquad (6.11)$$

- Ou por outra:

$$\eta_{per} = 1 - \frac{(T_5 - T_6) + k \cdot (T_6 - T_1)}{(T_3 - T_2) + k \cdot (T_4 - T_3)} \qquad (6.12)$$

6.1 Processo geral de comparação

- Dividindo a expressão por T_1 obtém-se:

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{\varphi \cdot \psi}{\delta^{k-1}} \cdot \varepsilon^{k-1} \qquad \frac{T_6}{T_1} = \frac{\varphi \cdot \psi}{\sigma \cdot \delta^{k-1}} \cdot \varepsilon^{k-1}$$

$$\eta_{per} = 1 - \frac{\left(\frac{T_5}{T_1} - \frac{T_6}{T_1}\right) + k \cdot \left(\frac{T_6}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1}\right) + k \cdot \left(\frac{T_4}{T_1} - \frac{T_3}{T_1}\right)} \qquad (6.13)$$

$$\frac{T_3}{T_1} = \psi \cdot \varepsilon^{k-1} \qquad \frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{k-1} \qquad \frac{T_4}{T_1} = \varphi \cdot \psi \cdot \varepsilon^{k-1} \qquad \frac{T_3}{T_1} = \psi \cdot \varepsilon^{k-1}$$

6.1 Processo geral de comparação

- Chega-se a:

$$\frac{\psi}{\sigma}=\left(\frac{\delta}{\varepsilon}\right)^{k}$$

como

$$\eta_{per}=1-\frac{\frac{\varphi\cdot\psi}{\sigma}\cdot\left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^{k-1}\cdot\left(\sigma+k-1\right)-k}{\left(\psi-1\right)+k\cdot\psi\cdot\left(\varphi-1\right)}\cdot\frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \qquad (6.14)$$

- Obtém-se:

$$\eta_{per}=1-\frac{\varphi\cdot\left(\frac{\delta}{\varepsilon}\right)\cdot\left(\sigma+k-1\right)-k}{\left(\psi-1\right)+k\cdot\psi\cdot\left(\varphi-1\right)}\cdot\frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \qquad (6.15)$$

6.1 Processo geral de comparação

- A pressão média do motor perfeito é a relação entre o trabalho útil por ciclo e o volume do cilindro e é dada pela seguinte expressão:

$$P_{mp} = \frac{Q_e - Q_s}{V_c} = \frac{W_t}{V_c} \qquad (6.16)$$

- Que também pode ser escrita:

$$P_{mp} = \frac{c_v \cdot (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3) - c_v (T_5 - T_6) - c_p (T_6 - T_1)}{V_6 - V_2} \qquad (6.17)$$

6.1 Processo geral de comparação

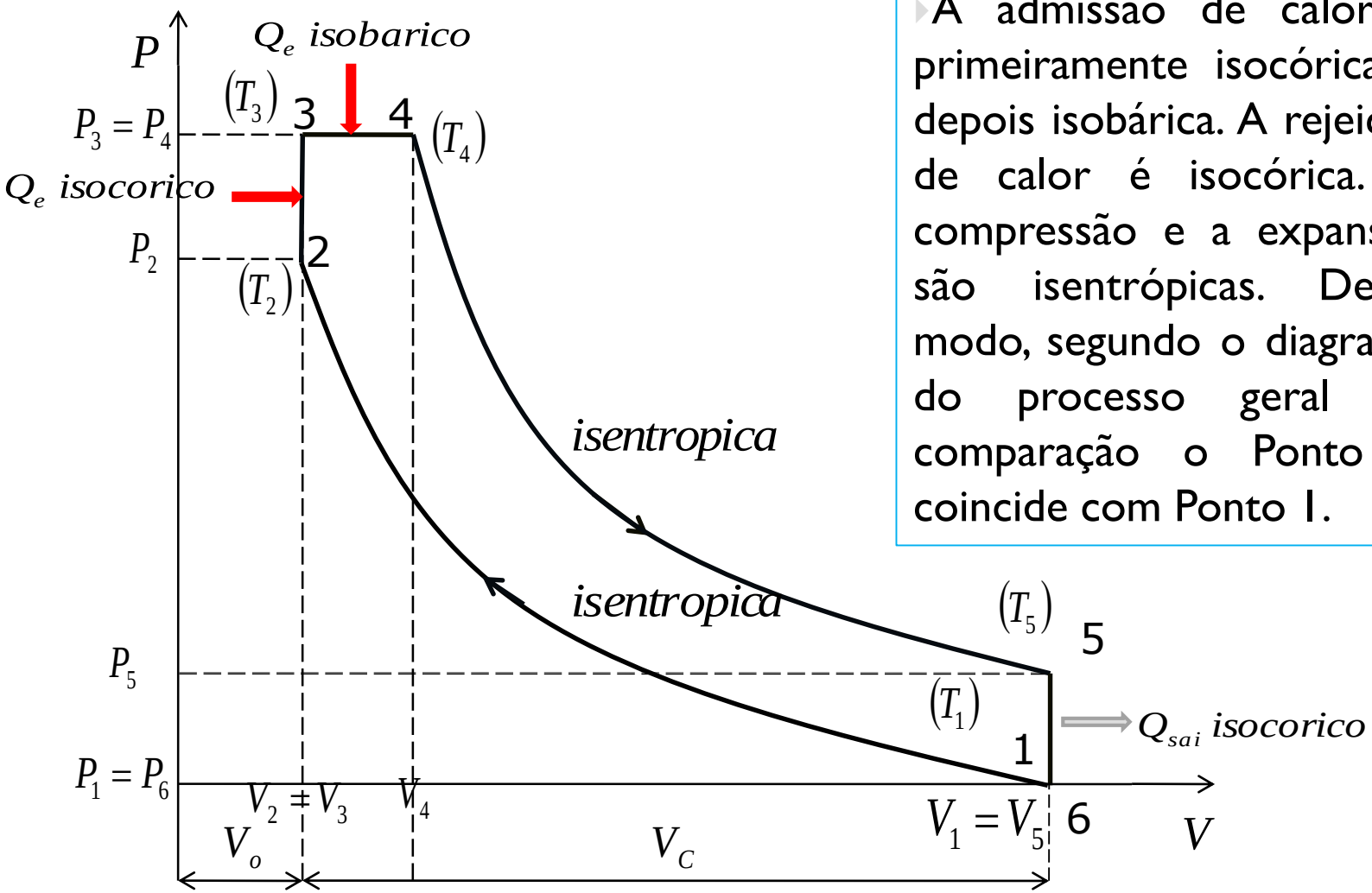
- Sabendo-se que a constante universal dos gases perfeitos é a diferença entre o calor específico a pressão constante e a volume constante pode-se escrever:

$$\frac{P_{mp}}{P_1} = \varepsilon \cdot \frac{\varepsilon^{k-1}\left[(\psi - 1) + k \cdot \psi(\varphi - 1) - \frac{\varphi \cdot \psi}{\sigma \cdot \delta^{k-1}}(\sigma + k + 1)\right] + k}{(k-1)\cdot(\delta \cdot \varphi - 1)} \qquad (6.18)$$

- Que também pode ser escrita:

$$\frac{P_{mp}}{P_1} = \varepsilon^k \cdot \frac{(\psi - 1) + k \cdot \psi(\varphi - 1)}{(k-1)\cdot(\delta \cdot \varphi - 1)} \cdot \eta_{per} \qquad (6.19)$$

6.2 Processo de comparação de Seiliger



A admissão de calor é primeiramente isocórica e depois isobárica. A rejeição de calor é isocórica. A compressão e a expansão são isentrópicas. Deste modo, segundo o diagrama do processo geral de comparação o Ponto 6 coincide com Ponto 1.

6.2 Processo de comparação de Seiliger

- ***Apresenta-se em seguida as relações deduzidas do ciclo geral de comparação para o ciclo de Seiliger***

$$V_1 = V_o + V_c \qquad (6.20)$$

- ***Onde:***

Vc – volume do cilindro

Vo – volume do espaço morto

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_o + V_c}{V_o} = 1 + \frac{V_c}{V_o} \qquad (6.21)$$

A relação de aumento de pressão $\psi > 1$

A relação de injecção $\varphi > 1$

6.2 Processo de comparação de Seiliger

- O rendimento perfeito de Seiliger

$$\varepsilon = \delta \cdot \varphi$$

$$\eta_{per,s} = 1 - \frac{\varphi \cdot \psi . \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^{k-1} - 1}{(\psi - 1) + k \cdot \psi . (\varphi - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \qquad (6.22)$$

- Então pode-se escrever

$$\eta_{per,s} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\psi . \varphi^{k} - 1}{\psi - 1 + k \cdot \psi (\varphi - 1)} \qquad (6.23)$$

- Ou de outra forma:

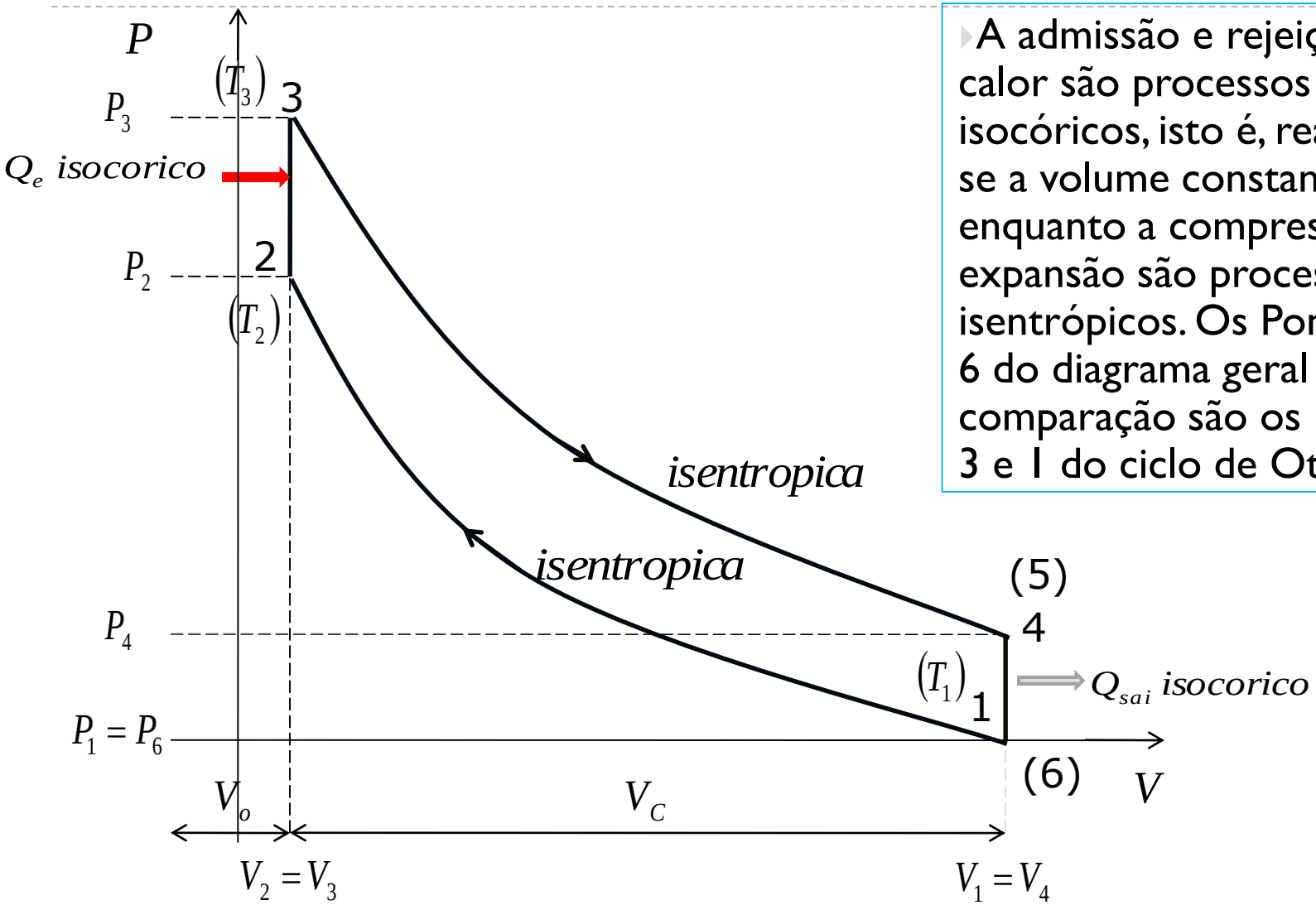
$$\eta_{per,s} = f(\varepsilon, k, \psi, \varphi) \qquad (6.24)$$

- O rendimento perfeito cresce com o aumento de "ε" e "ψ" e diminui com o aumento de "φ " porque a temperatura do cilindro aumenta e o gás fresco aquece também.

6.3 Processo de comparação de Otto

- O ciclo de Otto é o ciclo ideal para motores a gasolina. O nome advém de Nikolaus A. Otto, que construiu com êxito um motor a quatro tempos na Alemanha em 1876, utilizando um ciclo proposto pelo francês Beau de Rochas em 1862.

6.3 Processo de comparação de Otto



- A admissão e rejeição de calor são processos isocóricos, isto é, realizam-se a volume constante enquanto a compressão e a expansão são processos isentrópicos. Os Pontos 4 e 6 do diagrama geral de comparação são os Pontos 3 e 1 do ciclo de Otto.

6.3 Processo de comparação de Otto

A relação de injecção $\varphi = 1$

A relação de aumento de pressão $\psi > 1$

$$\psi = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_5}{P_6} = \frac{P_5}{P_1} \qquad (6.25)$$

A relação de compressão é:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_6}{V_4} \qquad (6.26)$$

- ***Como :*** $V_1 = V_6$ ***Então:*** $V_4 = V_2$

6.3 Processo de comparação de Otto

- O rendimento perfeito de Otto

$$\eta_{per,O} = 1 - \frac{\psi \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^{k-1} - 1}{(\psi - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \qquad (6.27)$$

como $\varepsilon = \delta$

- Então pode-se escrever

$$\eta_{per,O} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \qquad (6.28)$$

- Ou de outra forma:

$$\eta_{per,O} = f(\varepsilon, k) \qquad (6.29)$$

- O rendimento perfeito do ciclo de Otto não depende da carga do motor

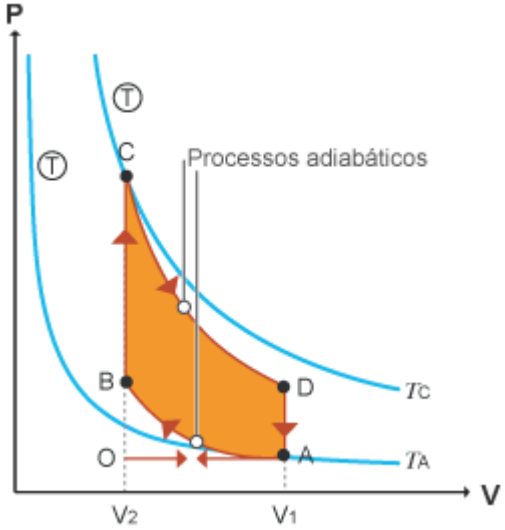
6.3 Processo de comparação de Otto

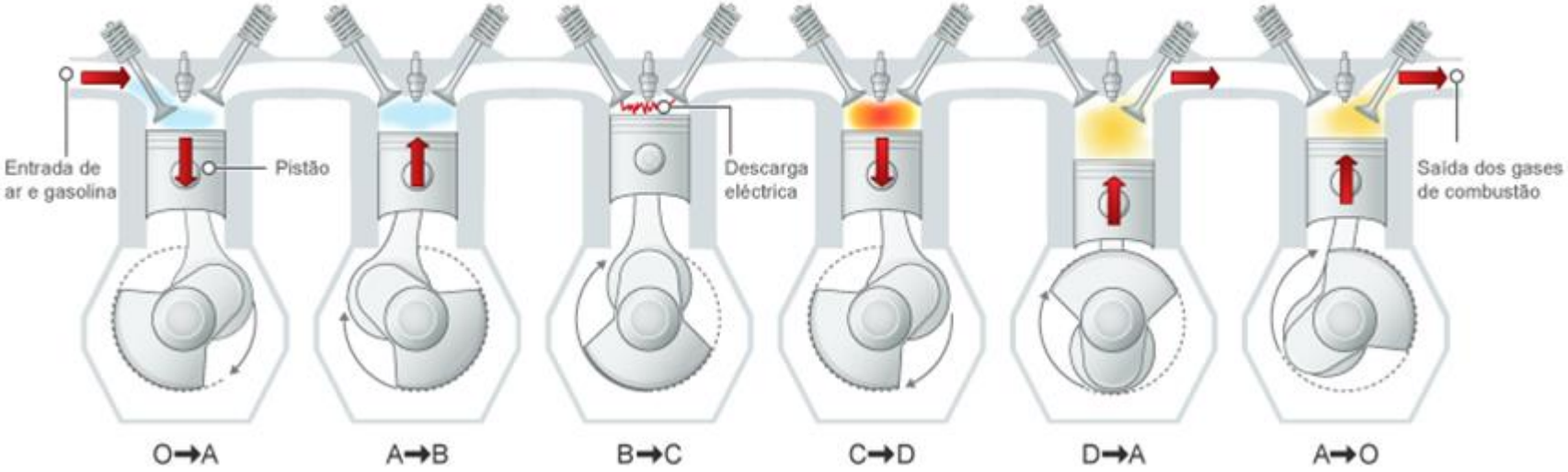
- A pressão média perfeita é dada por:

$$\frac{P_{mp,O}}{P_1} = \varepsilon \cdot \frac{\varepsilon^{k-1}\left[\left(\psi - 1\right) - \frac{\psi}{\delta^{k-1}}\right] + 1}{\left(k-1\right)\cdot\left(\varepsilon - 1\right)} \qquad (6.30)$$

6.3 Processo de comparação de Otto

Nas figuras e no diagrama apresentam-se as várias etapas de um motor que funciona segundo o ciclo OTTO.

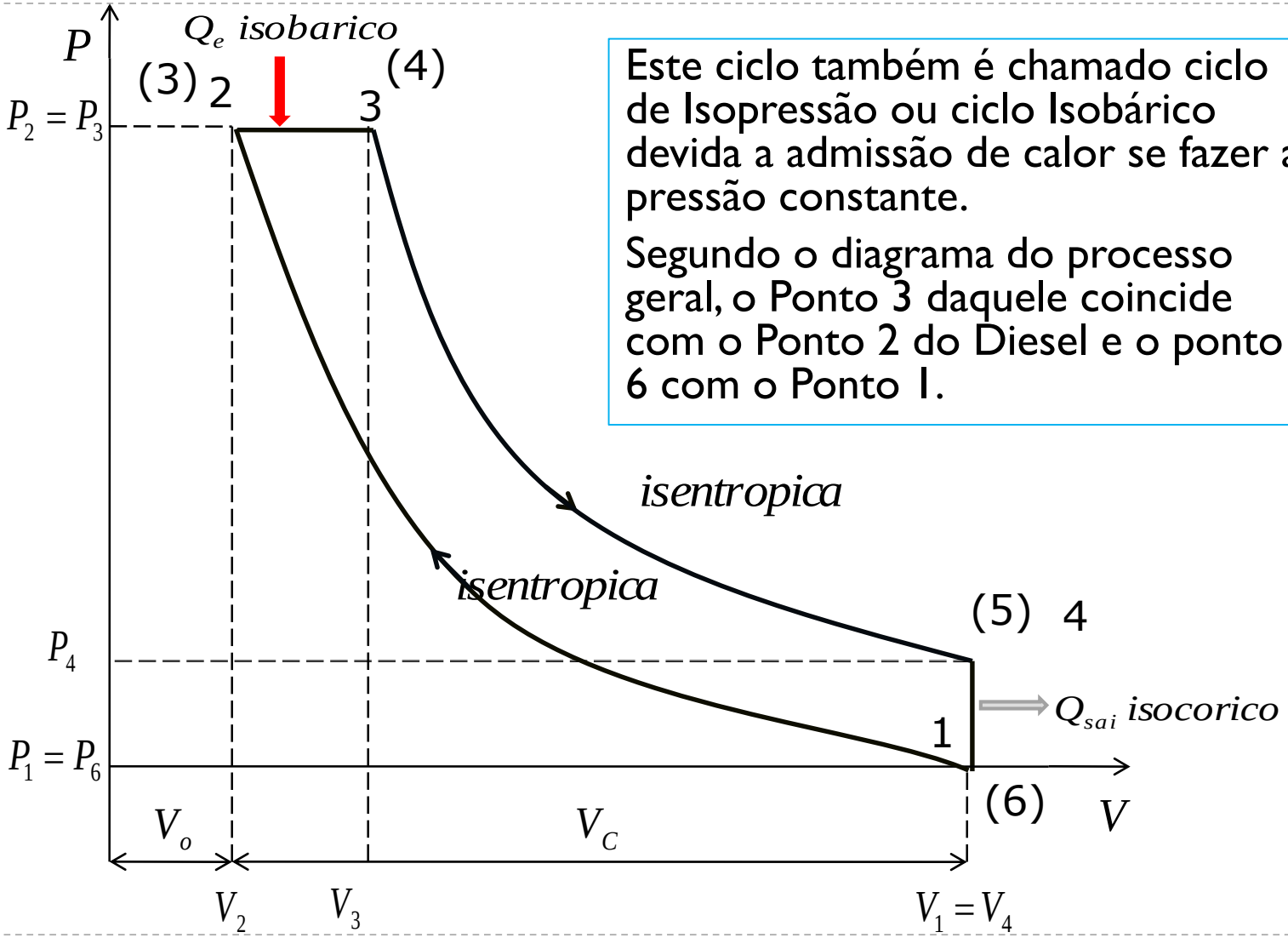




6.4 Processo de comparação de Diesel

O processo de injecção de combustível nos motores Diesel inicia-se quando o êmbolo aproxima-se do PMS e continua durante a primeira parte do curso de expansão. Assim o processo de combustão neste tipo de motores ocorre durante um intervalo maior que nos motores que funcionam segundo o ciclo Otto. Devido a isto o processo de combustão no ciclo de Diesel aproxima-se a um processo de adição de calor a pressão constante. Este é o único processo em que os ciclos Diesel e Otto diferem.

6.4 Processo de comparação de Diesel



Este ciclo também é chamado ciclo de Isopressão ou ciclo Isobárico devida a admissão de calor se fazer a pressão constante.

Segundo o diagrama do processo geral, o Ponto 3 daquele coincide com o Ponto 2 do Diesel e o ponto 6 com o Ponto 1.

6.4 Processo de comparação de Diesel

A relação de injecção $\varphi > 1$

A relação de aumento de pressão $\psi = 1$

$$\psi = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_2} = 1 \qquad (6.31)$$

O rendimento perfeito é dado por:

$$\eta_{per,d} = 1 - \frac{\varphi \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^{k-1} - 1}{k \cdot (\varphi - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \qquad (6.32)$$

Como: $\varepsilon = \delta \cdot \varphi$

- ***Então:***

$$\eta_{per,d} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\varphi^k - 1}{k \cdot (\varphi - 1)}$$

ou

$$\eta_{per,d} = f(\varepsilon, k, \varphi) \qquad (6.33)$$

6.4 Processo de comparação de Diesel

- ***A pressão média perfeita é dada por:***

$$\frac{P_{mp,d_s}}{P_1} = \varepsilon \cdot \frac{\varepsilon^{k-1}\left[k\cdot(\varphi-1)-\frac{\varphi}{\delta^{k-1}}\right]+1}{(k-1)\cdot(\varepsilon-1)} \qquad (6.34)$$

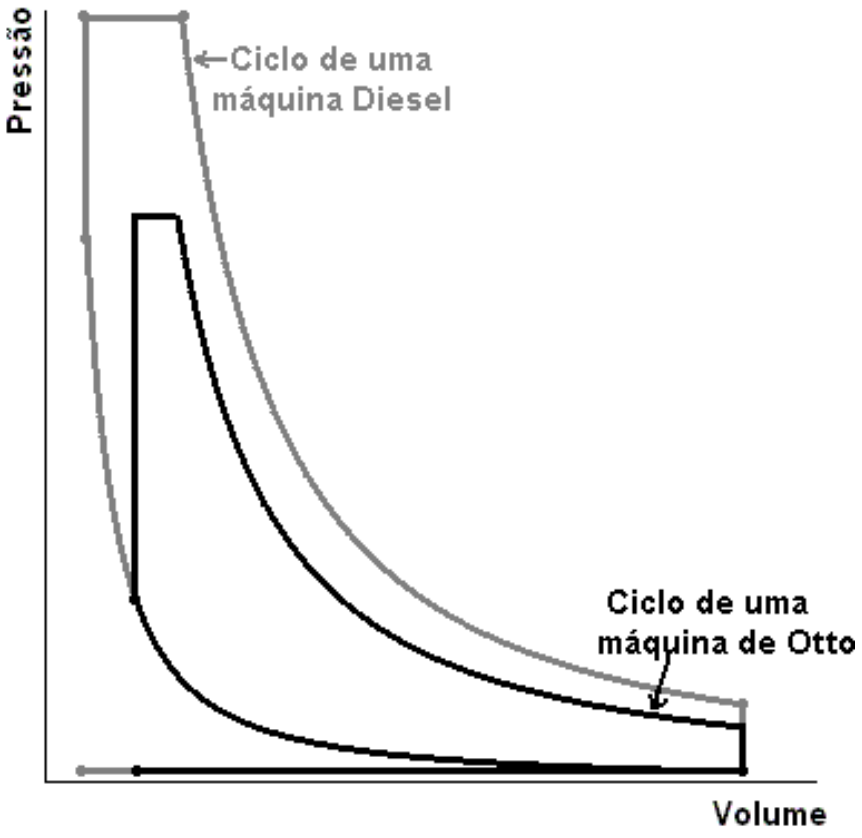
- Pode-se notar que o rendimento é inversamente proporcional à relação de injecção ou de isopressão, o que significa que com o aumento da carga do motor tem-se uma diminuição do rendimento.

6.4 Processo de comparação de Diesel

- Consegue notar-se que o rendimento Diesel difere do Otto pela relação sempre superior que a unidade:
  - Então: $$\frac{\varphi^k - 1}{k(\varphi - 1)} \qquad (6.35)$$
  - $$\eta_{per,O} \rangle \eta_{per.d} \qquad (6.36)$$
  - quando ambos os ciclos funcionam com a mesma taxa de compressão

6.4 Processo de comparação de Diesel

Os motores diesel funcionam com taxas de compressão muito superiores a dos que funcionam segundo o ciclo Otto, sendo mais eficientes que estes últimos. Os motores Diesel queimam o combustível de uma forma mais completa, visto que geralmente funcionam a velocidades inferiores que os do ciclo Otto. O rendimento térmico de motores de grandes dimensões encontra-se entre 35 e 40%, o que significa que a transformação da energia química do combustível, nos motores que funcionam segundo o ciclo Diesel faz-se de melhor forma que nos do ciclo Otto.

6.4 Processo de comparação de Diesel

- A figura permite que se comparem os ciclos das máquinas de Otto e Diesel; ambos com o mesmo volume máximo. Esta figura representa o ciclo uma máquina Otto com *taxa de compressão* de 8:1 e o ciclo de uma máquina Diesel com *taxa de compressão* de 18:1.