

Motores Térmicos

8° Semestre

4° 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



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:

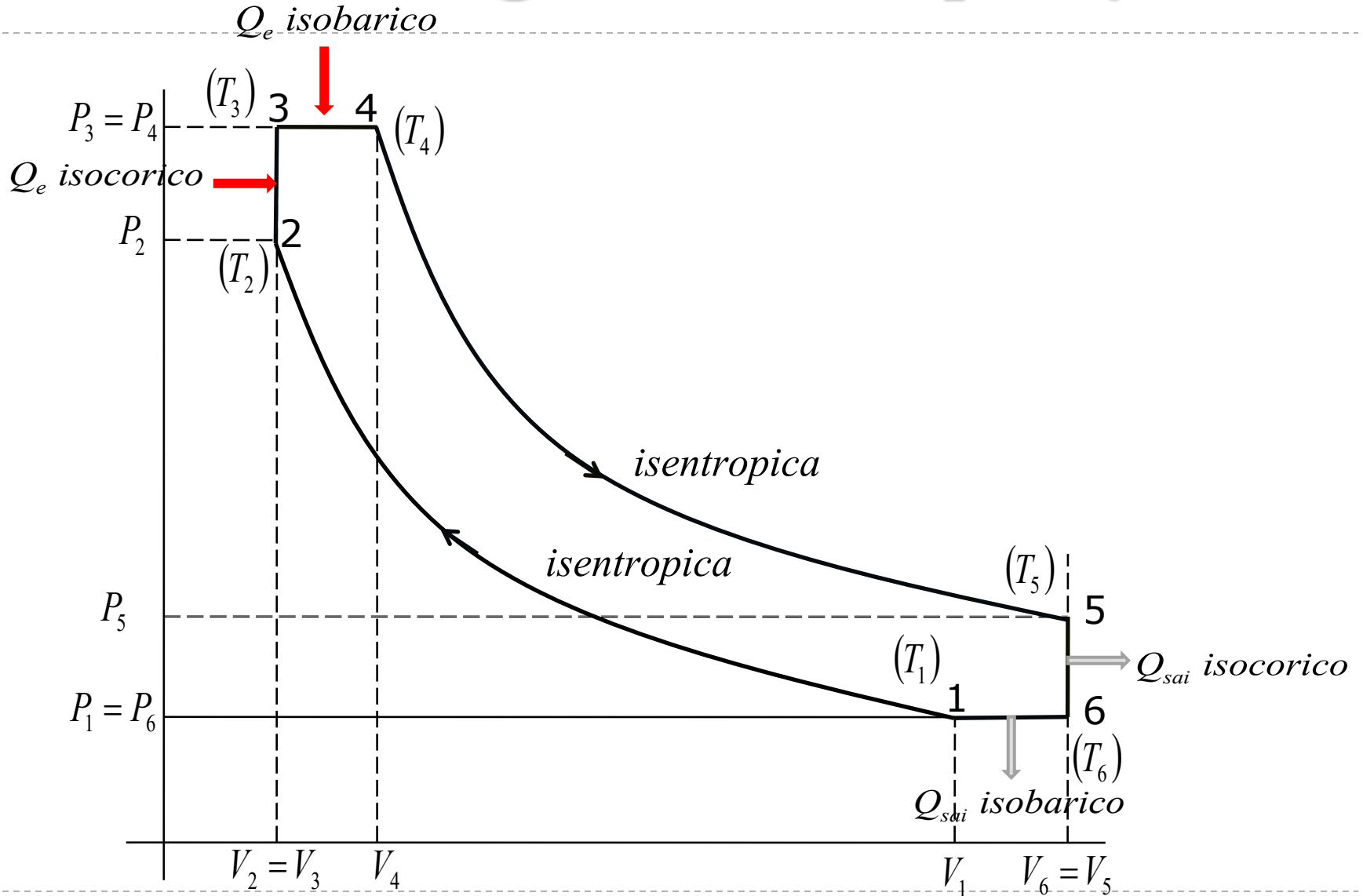
- ❖ A geometria do seu motor corresponda a do motor real;
- ❖ Durante o processo de admissão não sobre no interior do cilindro nenhum gás remanescente;
- ❖ A relação entre o gás combustível e o ar durante a combustão permaneça constante;
- ❖ A combustão seja perfeita;
- ❖ A combustão, quanto à forma 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:

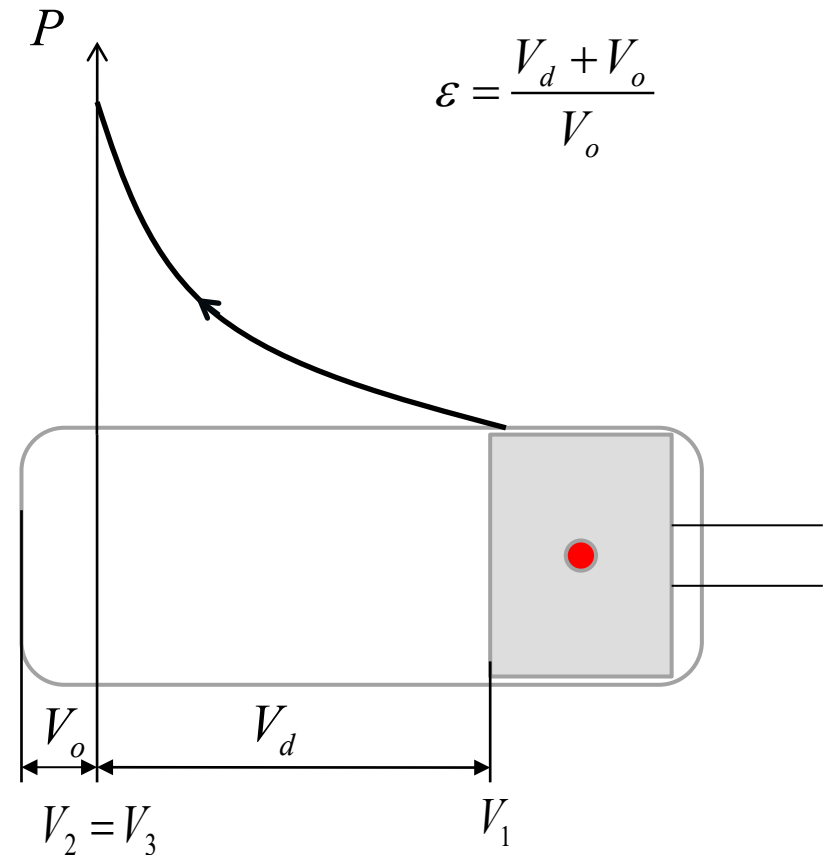
- Gases reais;
- Um enchimento perfeito do cilindro com mistura ou gás sob condições de aspiração;
- Compressão e expansão isentrópicas;
- Combustão que se dá à uma velocidade infinitamente grande e sem troca de calor com o ambiente;
- Combustão completa com os produtos na forma de dióxido de carbono, 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



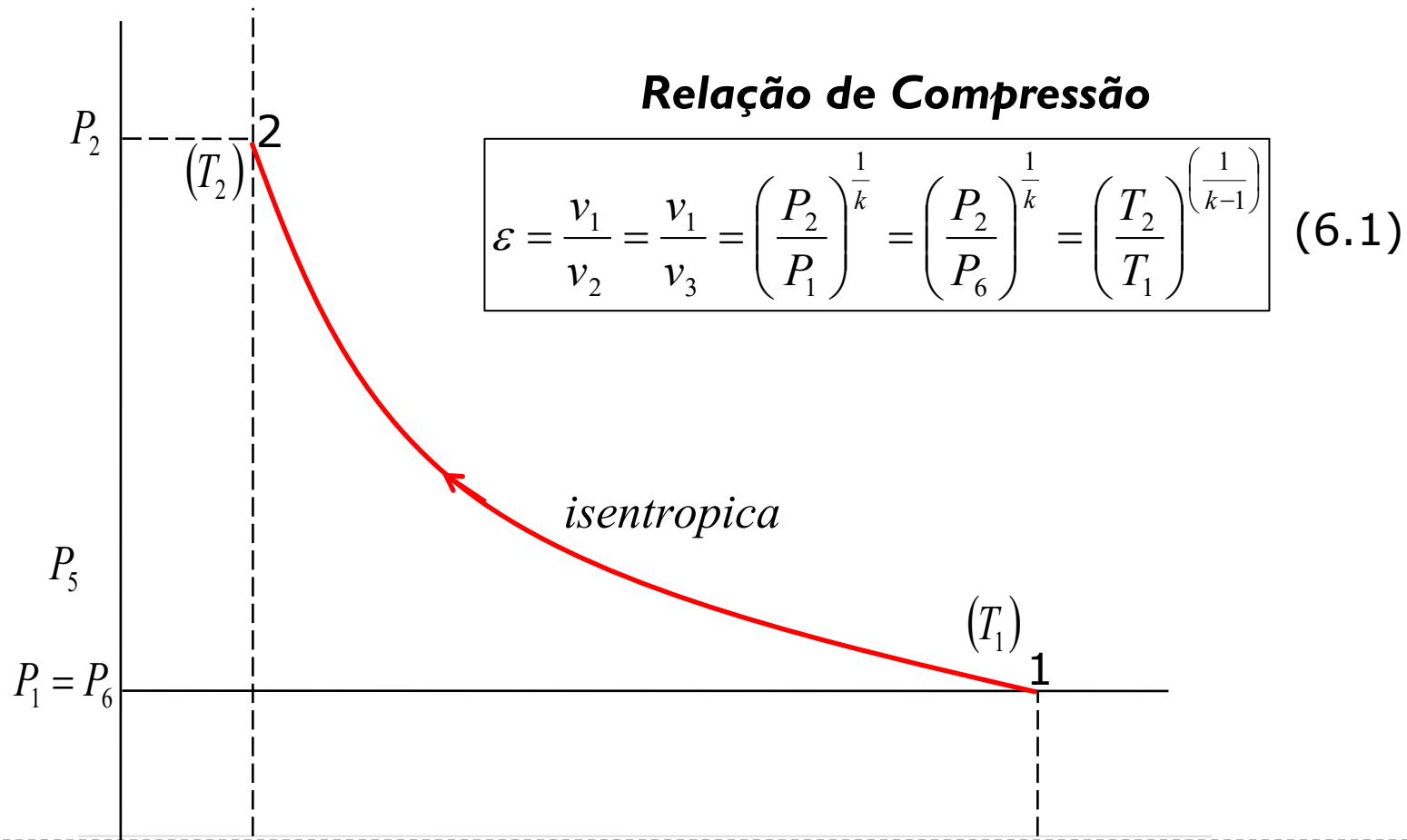
6.1 Processo geral de comparação

Em motores de êmbolo, a taxa de compressão é a soma do volume deslocado V_d 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.



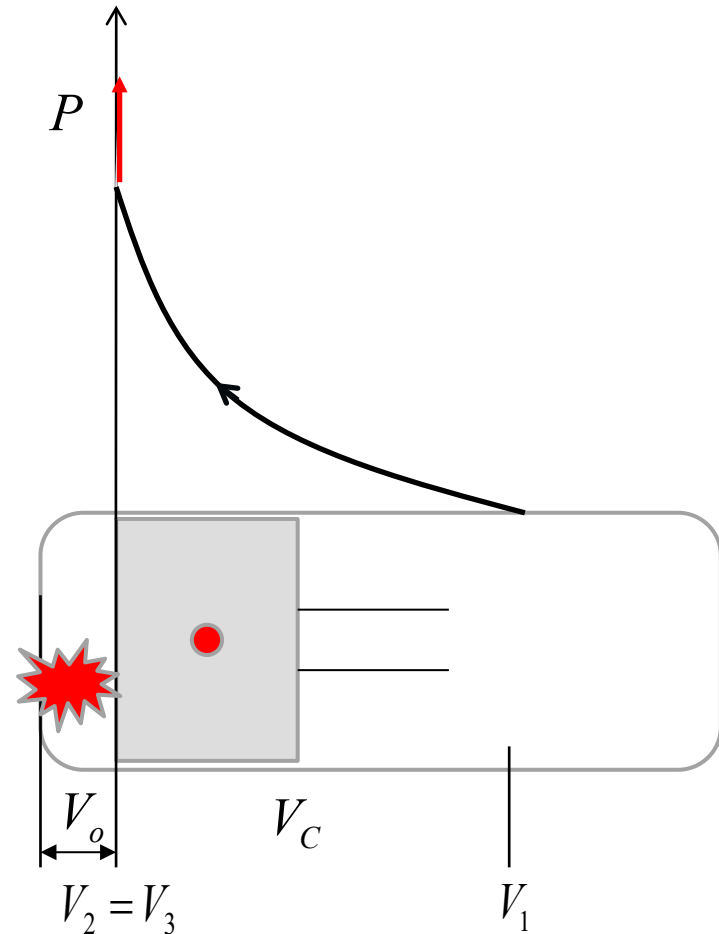
6.1 Processo geral de comparação

- ▶ Do processo indicado no diagrama pode-se deduzir as seguintes relações, todas maiores que a unidade.

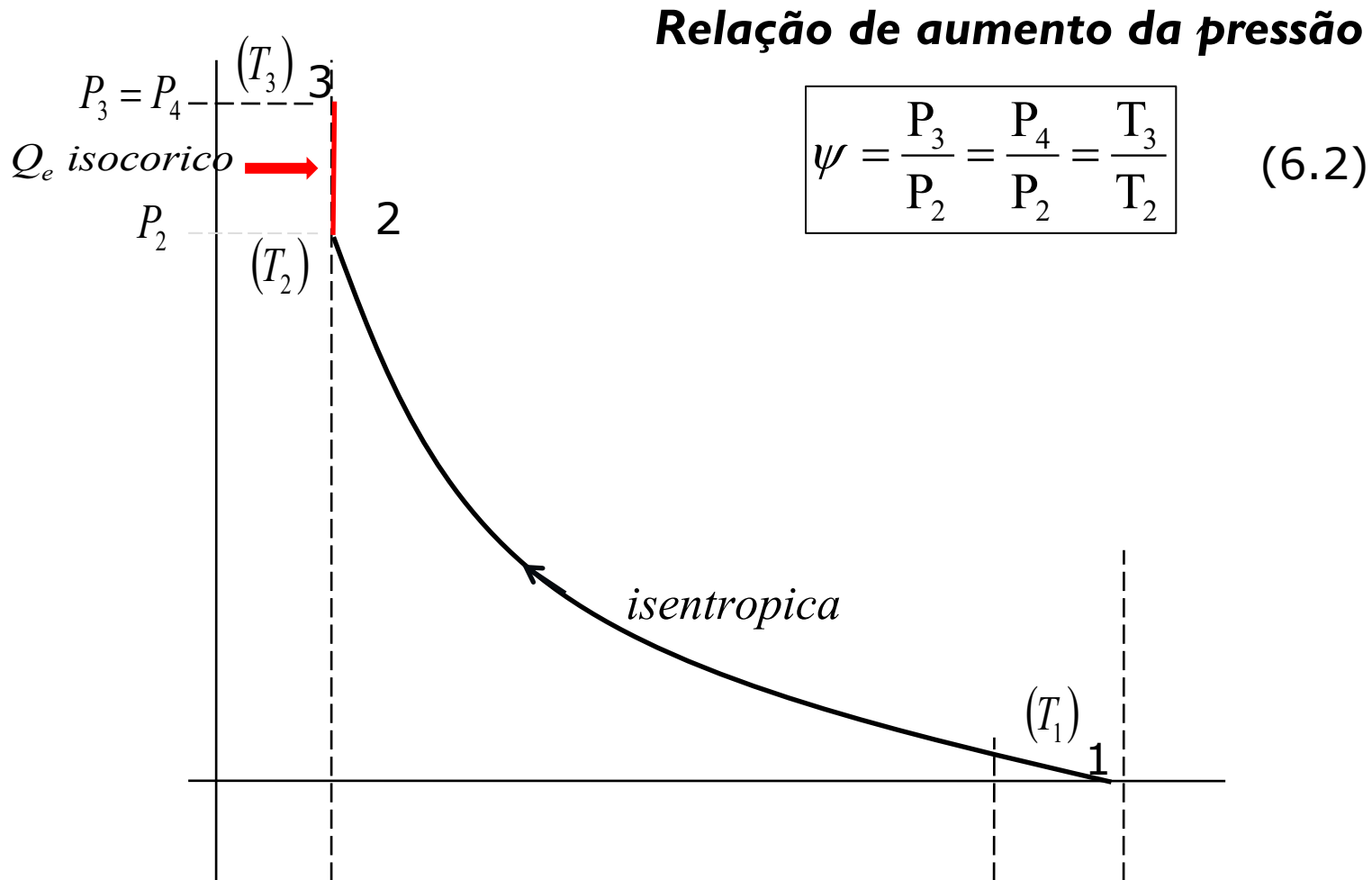


6.1 Processo geral de comparação

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

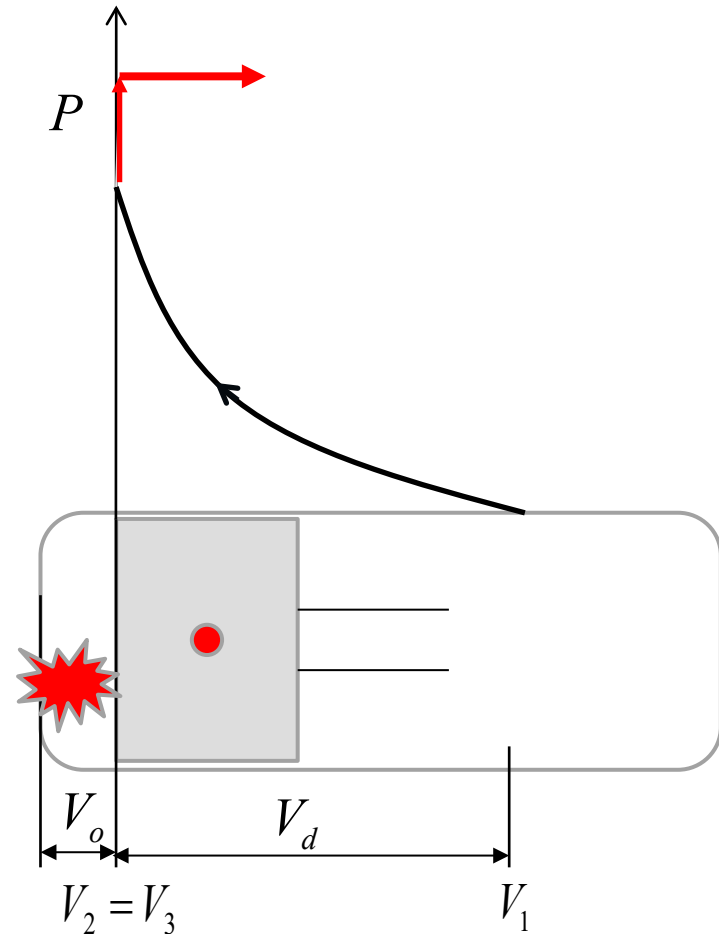


6.1 Processo geral de comparação

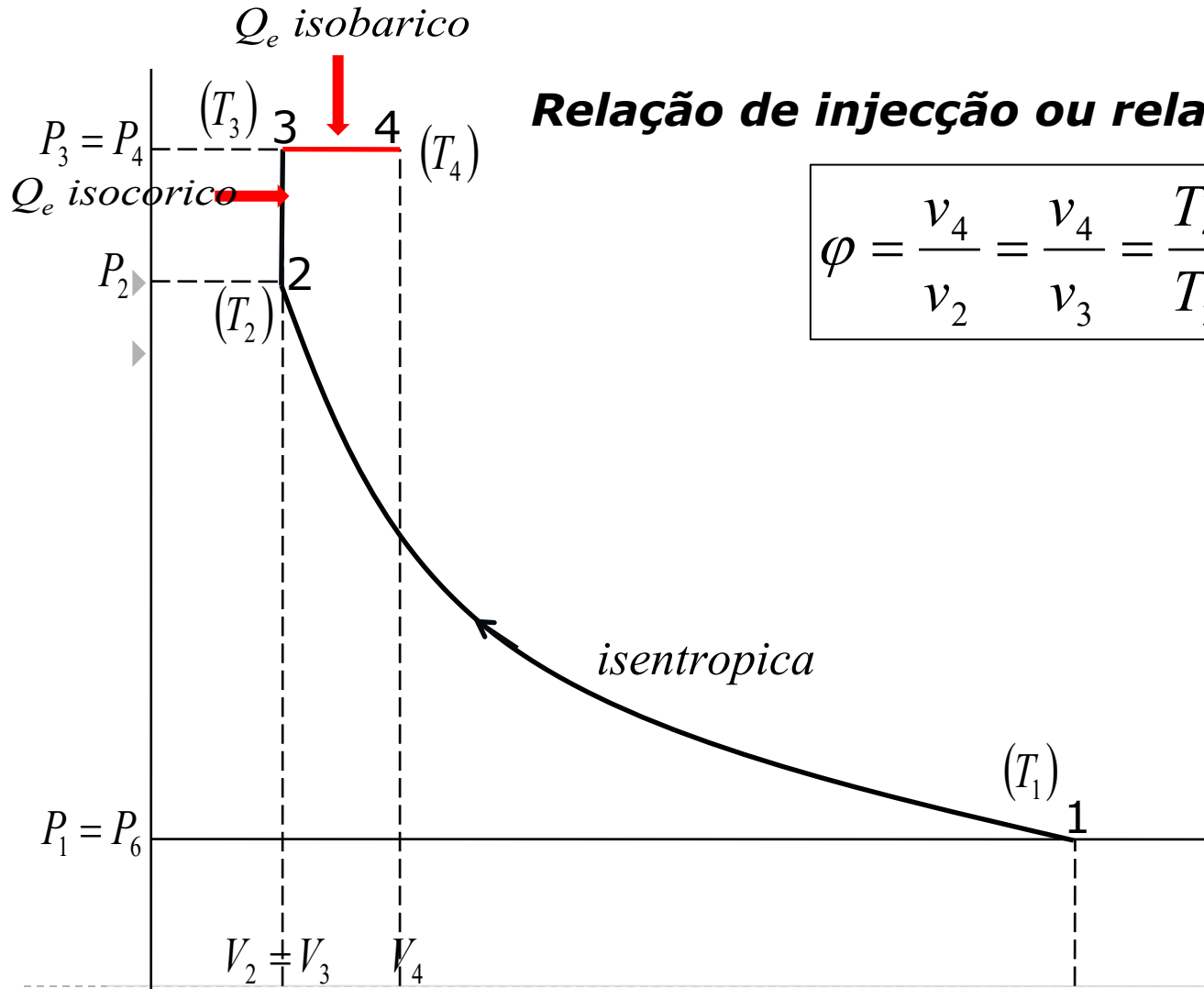


6.1 Processo geral de comparação

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

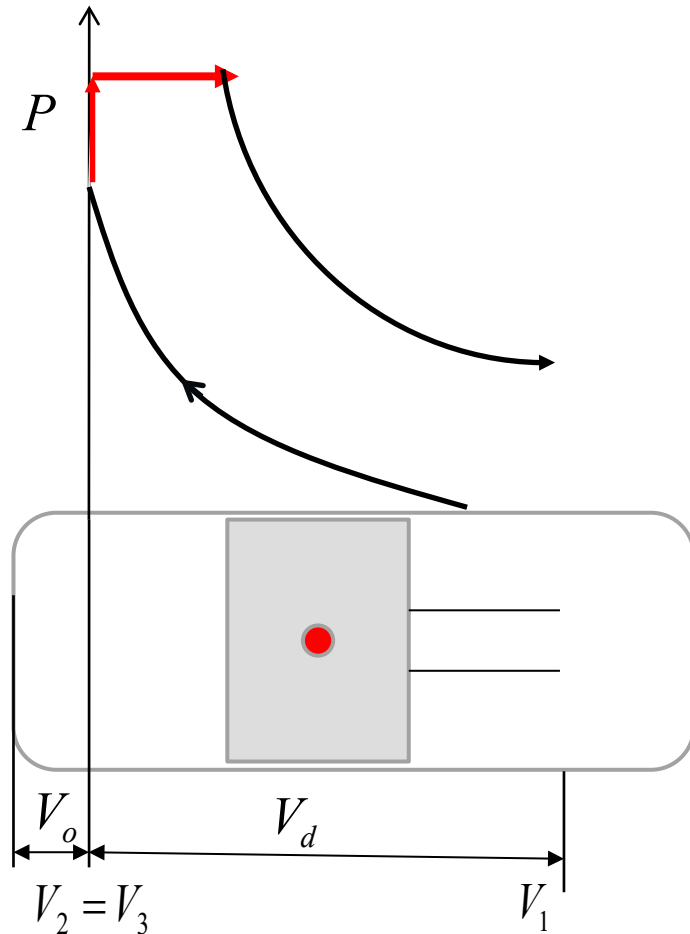


Relação de injeção ou relação de isopressão

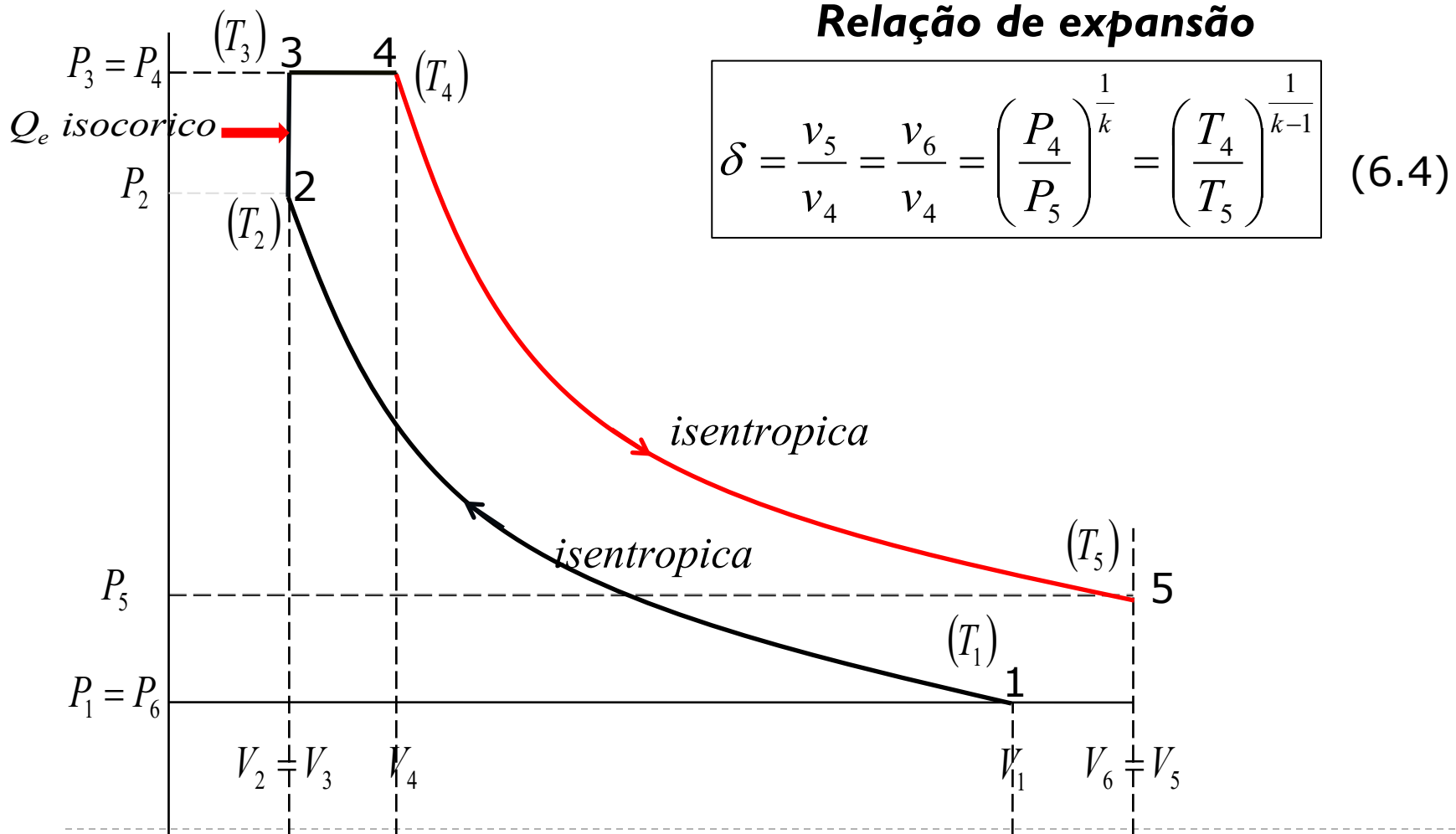
$$\varphi = \frac{v_4}{v_2} = \frac{v_4}{v_3} = \frac{T_4}{T_3} \quad (6.3)$$

6.1 Processo geral de comparação

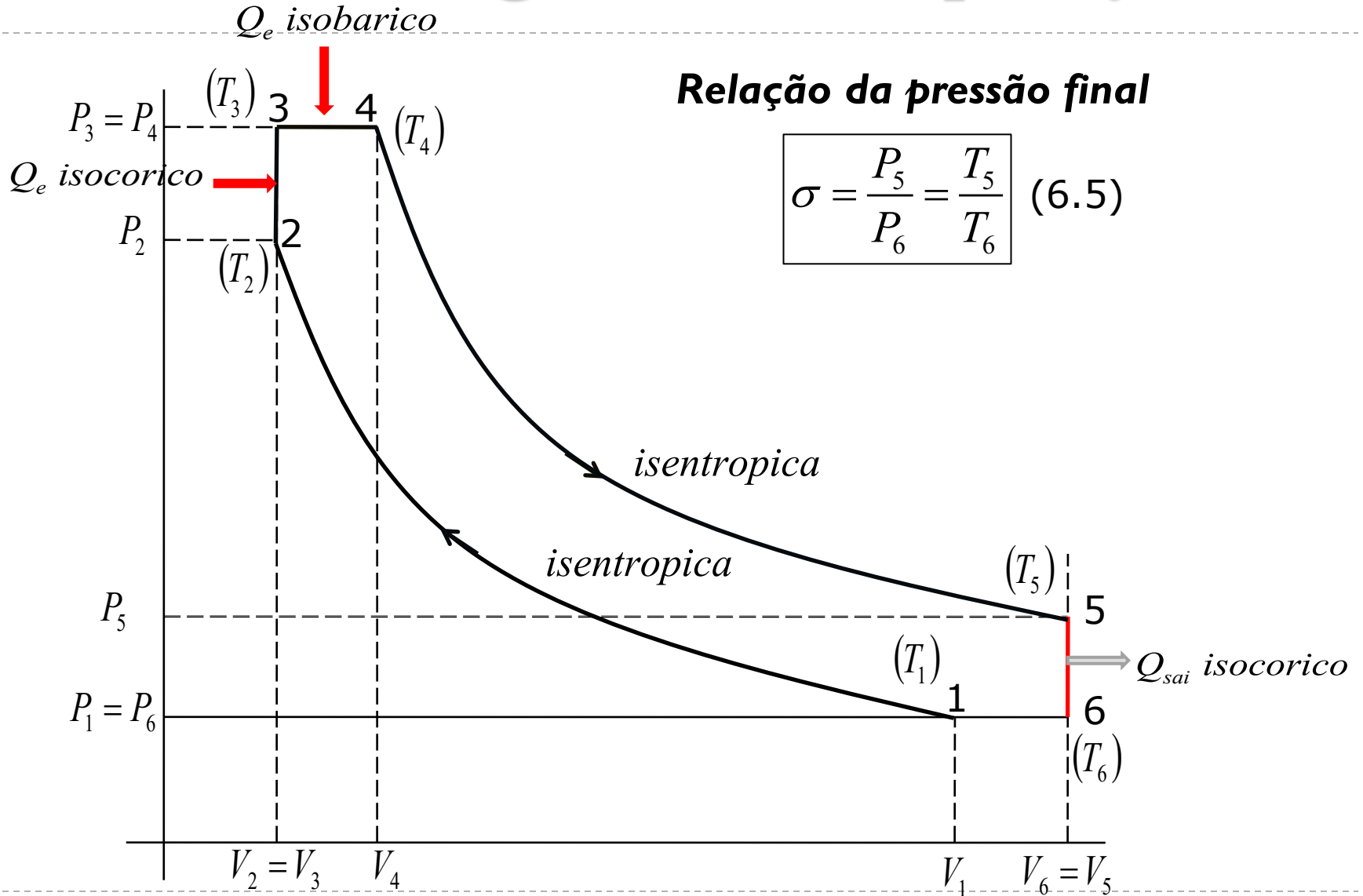
O processo de expansão é politrópico e acontece quando o êmbolo continua o seu movimento do Ponto Morto Superior, até ao Ponto Morto Inferior.



7.1 Processo geral de comparação

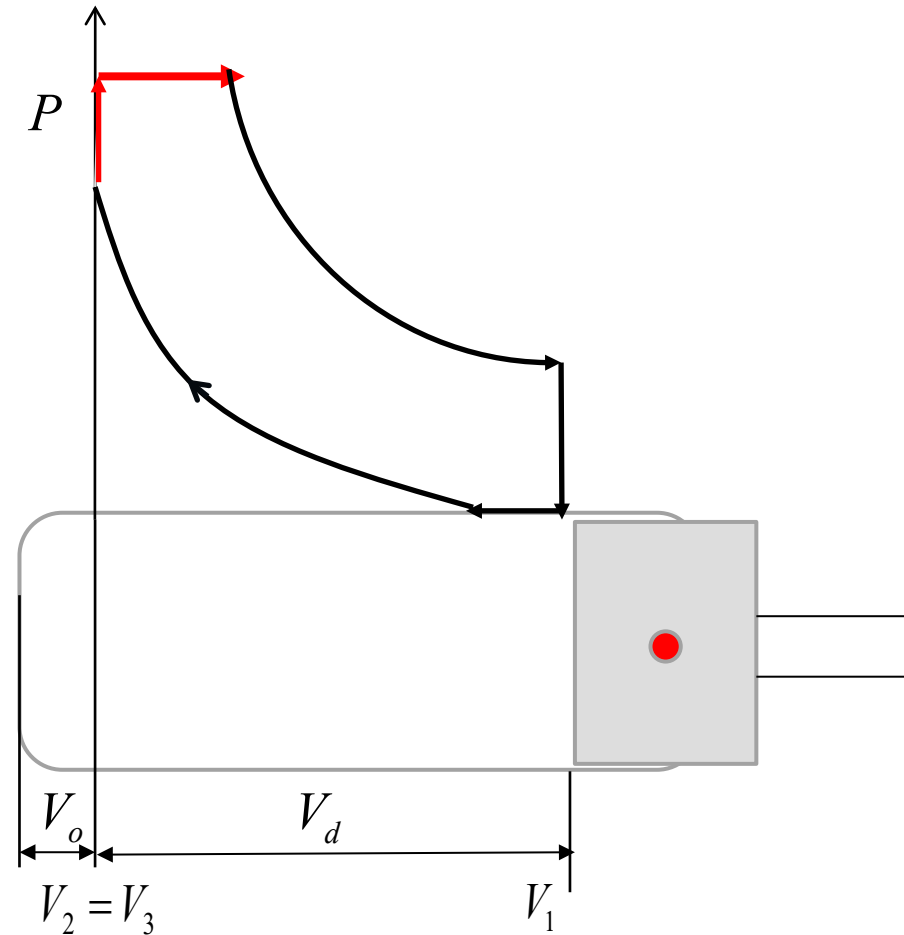


6.1 Processo geral de comparação



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:

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

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.

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

6.1 Processo geral de comparação

- ▶ O calor fornecido é dado por:

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

- ▶ O calor retirado obtém-se de:

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

6.1 Processo geral de comparação

▶ Como:

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

▶ Então:

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

▶ Dividindo tudo por c_v :

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

6.1 Processo geral de comparação

As temperaturas divididas por T_1 transformam-se em:

$$\frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{k-1} \quad (6.13)$$

$$\frac{T_6}{T_1} = \frac{T_6}{T_5} \frac{T_5}{T_4} \frac{T_4}{T_3} \frac{T_3}{T_2} \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{1}{\delta^{k-1}} \cdot \varphi \cdot \psi \cdot \varepsilon^{k-1} \quad (6.17)$$

$$\frac{T_3}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \psi \cdot \varepsilon^{k-1} \quad (6.14)$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_4}{T_3} \cdot \frac{T_3}{T_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \varphi \cdot \psi \cdot \varepsilon^{k-1} \quad (6.15)$$

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{T_5}{T_4} \cdot \frac{T_4}{T_3} \cdot \frac{T_3}{T_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \frac{\varphi \cdot \psi}{\delta^{k-1}} \cdot \varepsilon^{k-1} \quad (6.16)$$

6.1 Processo geral de comparação

- ▶ Dividindo a expressão 6.12 por T_1 obtém-se:

$$\begin{array}{c}
 \frac{T_5}{T_1} = \frac{\varphi \cdot \psi}{\delta^{k-1}} \cdot \varepsilon^{k-1} \qquad \frac{T_6}{T_1} = \frac{\varphi \cdot \psi}{\sigma \cdot \delta^{k-1}} \cdot \varepsilon^{k-1} \\
 \swarrow \qquad \qquad \qquad \nearrow \qquad \qquad \nearrow \\
 \eta_{per} = 1 - \frac{\left(\frac{T_5}{T_1} - \frac{T_6}{T_1} \right) + k \cdot \left(\frac{T_6}{T_1} - 1 \right)}{\left(\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} \right) + k \cdot \left(\frac{T_4}{T_1} - \frac{T_3}{T_1} \right)} \qquad (6.18) \\
 \swarrow \qquad \downarrow \qquad \downarrow \qquad \downarrow \qquad \searrow \\
 \frac{T_3}{T_1} = \psi \cdot \varepsilon^{k-1} \qquad \frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{k-1} \qquad \frac{T_4}{T_1} = \varphi \cdot \psi \cdot \varepsilon^{k-1} \qquad \frac{T_3}{T_1} = \psi \cdot \varepsilon^{k-1}
 \end{array}$$

6.1 Processo geral de comparação

▶ Chega-se a:

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

$$\eta_{per} = 1 - \frac{\frac{\varphi \cdot \psi}{\sigma} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^{k-1} \cdot (\sigma + k - 1) - k}{(\psi - 1) + k \cdot \psi \cdot (\varphi - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (6.19)$$

▶ Então obtém-se:

$$\eta_{per} = 1 - \frac{\varphi \cdot \left(\frac{\delta}{\varepsilon}\right) \cdot (\sigma + k - 1) - k}{(\psi - 1) + k \cdot \psi \cdot (\varphi - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (6.20)$$

6.1 Processo geral de comparação

A pressão média perfeita (PMP), mais comumente chamada de pressão média efectiva (PME), é um conceito utilizado para avaliar o desempenho de motores de combustão interna. Ela representa a pressão média teórica que, se actuasse de forma constante sobre o pistão durante todo o ciclo, produziria o mesmo trabalho que o ciclo real.

- ▶ A PME é uma métrica importante para comparar motores de tamanhos diferentes, pois está relacionada à eficiência do motor e à sua capacidade de gerar potência.
- ▶ Motores com maior PME geram mais trabalho útil por ciclo para um mesmo volume deslocado, sendo mais eficientes. A PME efectiva pode ser calculada experimentalmente a partir da potência do motor:

$$P_{mp} = \frac{2 \cdot \pi \cdot T \cdot N}{V_d \cdot n} \quad (6.21)$$

- ▶ onde:
- T é o torque, N é a rotação do motor (rpm), n é o número de ciclos por revolução (2 para motores de 4 tempos, 1 para motores de 2 tempos).

6.1 Processo geral de comparação

A pressão média do motor perfeito é dada pela seguinte expressão:

$$P_{mp} = \frac{Q_e - Q_s}{V_c} = \frac{W_t}{V_c} \quad (6.22)$$

▶ Que também pode ser escrita:

$$P_{mp} = \frac{c_v \cdot (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3) - c_v (T_5 - T_6) - c_p (T_6 - T_1)}{V_6 - V_2} \quad (6.23)$$

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:

$$\frac{P_{mp}}{P_1} = \varepsilon \cdot \frac{\varepsilon^{k-1} \left[(\psi - 1) + k \cdot \psi(\varphi - 1) - \frac{\varphi \cdot \psi}{\sigma \cdot \delta^{k-1}} (\sigma + k + 1) \right] + k}{(k - 1) \cdot (\delta \cdot \varphi - 1)} \quad (6.24)$$

Que também pode ser escrita:

$$\frac{P_{mp}}{P_1} = \varepsilon^k \cdot \frac{(\psi - 1) + k \cdot \psi(\varphi - 1)}{(k - 1) \cdot (\delta \cdot \varphi - 1)} \cdot \eta_{per} \quad (6.25)$$

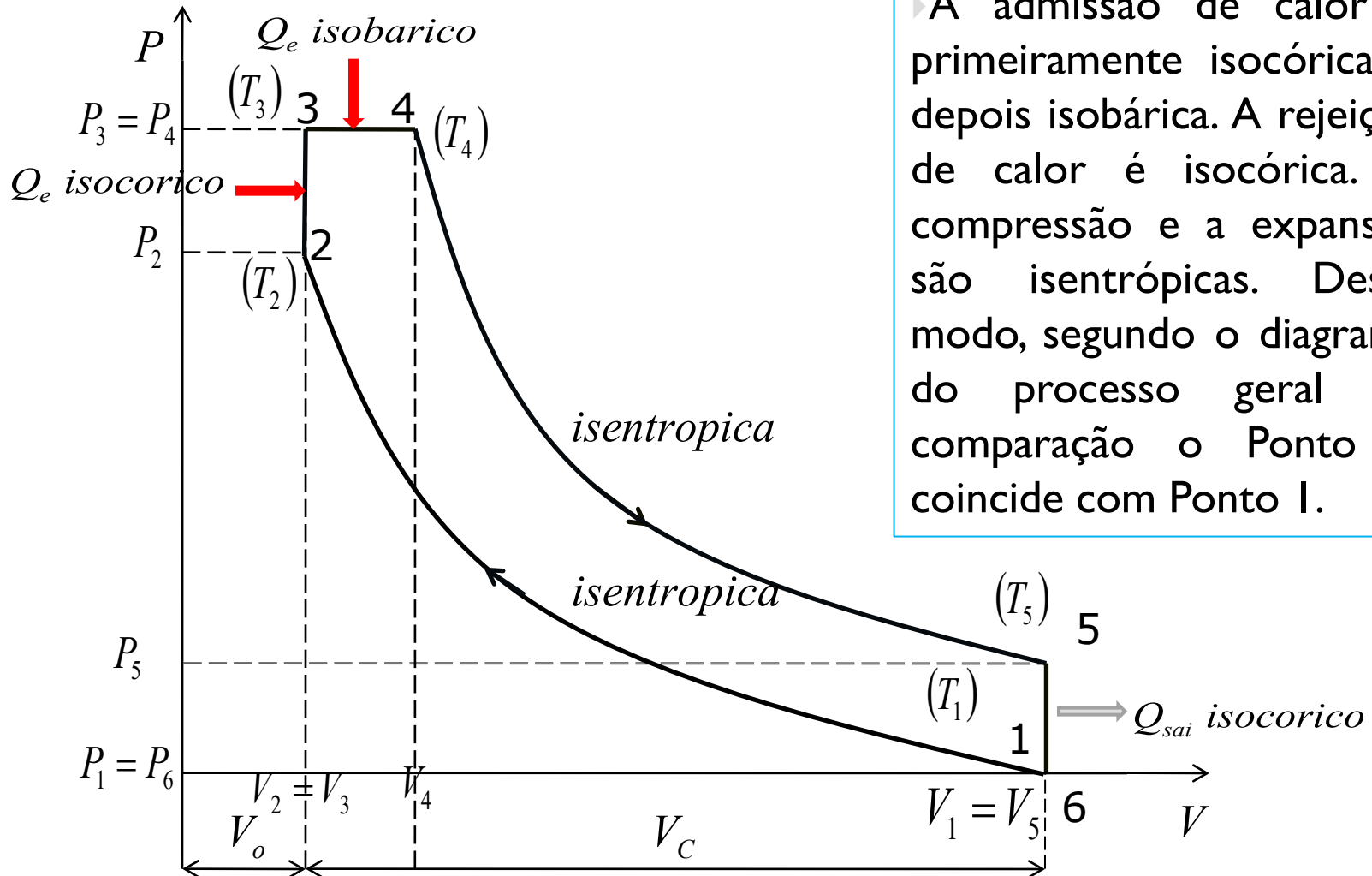
6.2 Processo de comparação de Seiliger

O ciclo de Seiliger, também conhecido como ciclo misto, ciclo de combustão dupla ou ciclo Sabathé, é um ciclo termodinâmico que combina características dos ciclos Otto e Diesel. Ele representa de forma mais precisa o funcionamento de muitos motores de combustão interna modernos, especialmente aqueles que operam com injeção directa de combustível.

A dedução das fórmulas do ciclo Seiliger baseia-se na combinação de processos isocóricos (volume constante), isobáricos (pressão constante) e adiabáticos, tornando-o uma versão intermediária entre o ciclo Diesel e o ciclo Otto.



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

► **Onde:**
$$V_1 = V_o + V_d \quad (6.26)$$

V_d – volume deslocado

V_o – volume do espaço morto

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_o + V_d}{V_o} = 1 + \frac{V_d}{V_o} \quad (6.27)$$

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

A relação de injeção $\varphi > 1$

6.2 Processo de comparação de Seiliger

O rendimento perfeito de Seiliger

$$\eta_{per,s} = 1 - \frac{(T_5 - T_1)}{k(T_4 - T_3) + (T_3 - T_2)} \quad (6.28)$$

Usando as expressões 6.13 a 6.17 então pode-se escrever:

$$\eta_{per,s} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\psi \cdot \varphi^k - 1}{(\psi - 1) + k \cdot \psi (\varphi - 1)} \quad (6.29)$$

Ou de outra forma:

$$\eta_{per,s} = f(\varepsilon, k, \psi, \varphi) \quad (6.30)$$

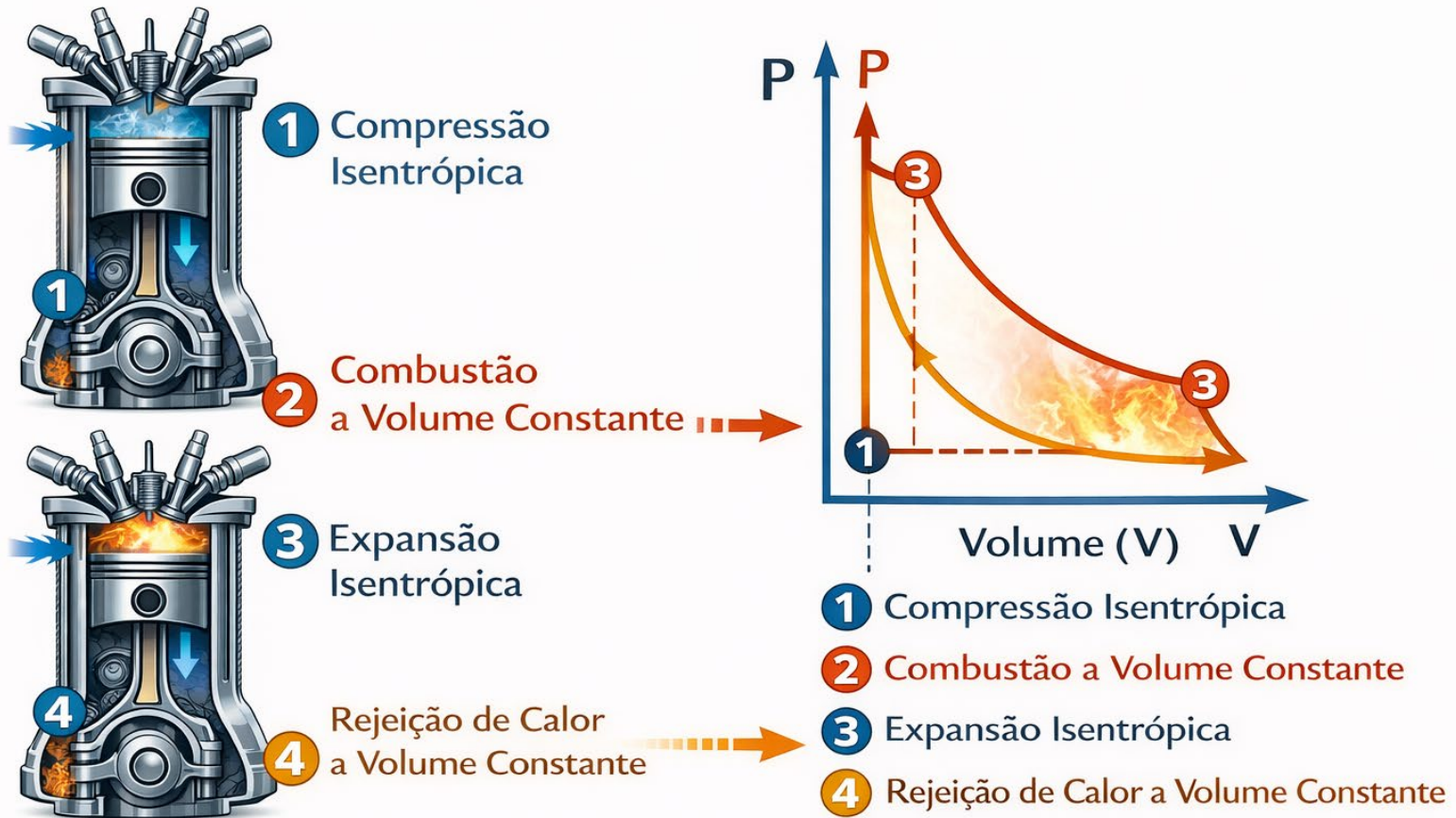
O rendimento perfeito cresce com o aumento de “ ε ” e “ ψ ” e diminui com o aumento de “ φ ” porque a temperatura do cilindro aumenta e o gás fresco aquece também.

6.3 Processo de comparação de Otto

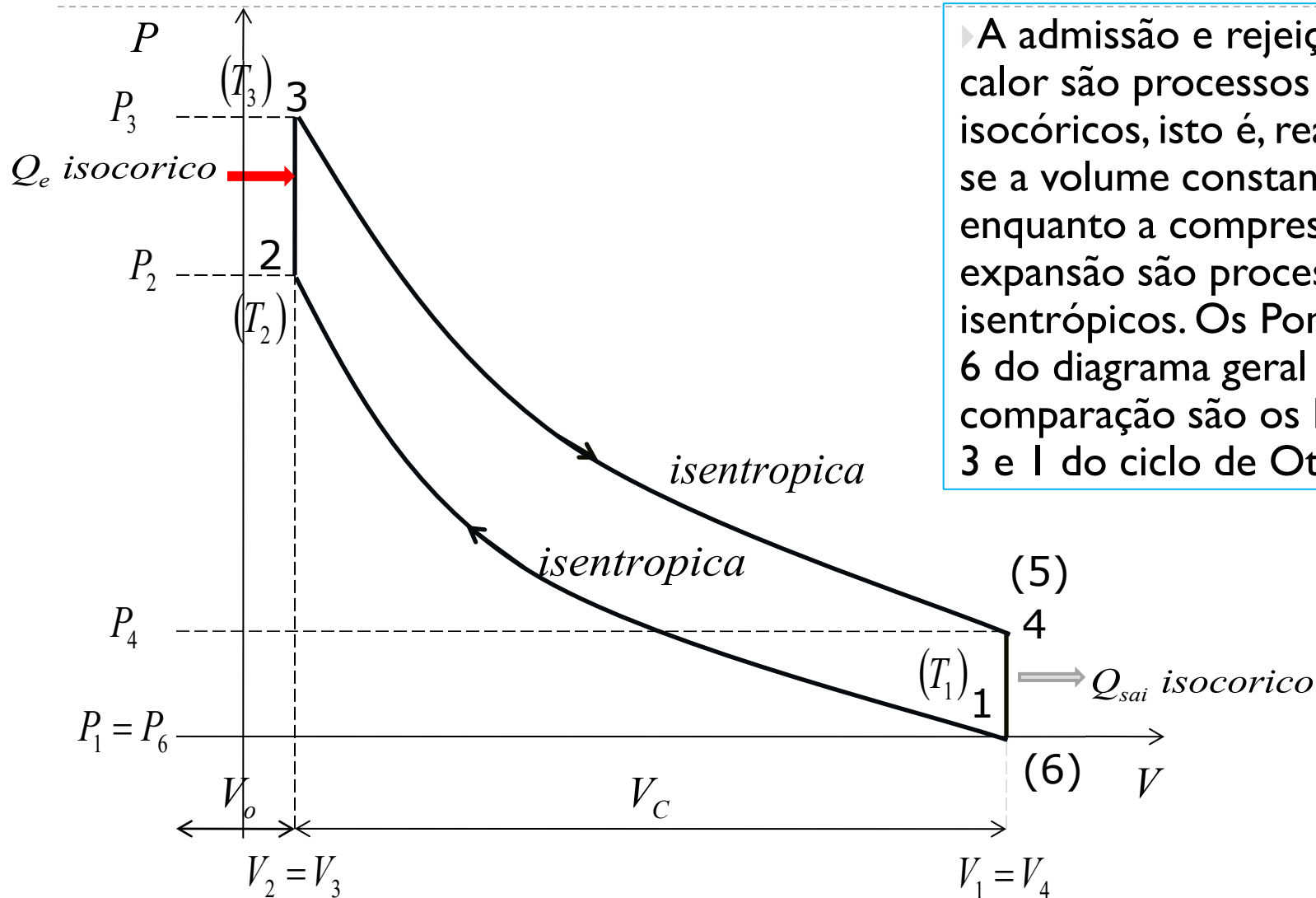
- ▶ O ciclo de Otto é o ciclo ideal para motores a gasolina. O nome advém de Nikolaus A. Otto, que construiu com êxito um motor a quatro tempos na Alemanha em 1876, utilizando um ciclo proposto pelo francês Beau de Rochas em 1862.

6.3 Processo de comparação de Otto

Ciclo de Otto



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 injeção $\varphi = 1$

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

$$\psi = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_5}{P_6} = \frac{P_5}{P_1} \quad (6.31)$$

A relação de compressão é:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_6}{V_4} \quad (6.32)$$

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

6.3 Processo de comparação de Otto

- ▶ O rendimento perfeito de Seiliger é:

$$\eta_{per,s} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\psi \cdot \varphi^k - 1}{(\psi - 1) + k \cdot \psi (\varphi - 1)} \xrightarrow{\text{como } \varphi = 1} \quad (6.33)$$

$$\eta_{per,O} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (6.34)$$

- ▶ Ou de outra forma:

$$\eta_{per,O} = f(\varepsilon, k) \quad (6.35)$$

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

6.3 Processo de comparação de Otto

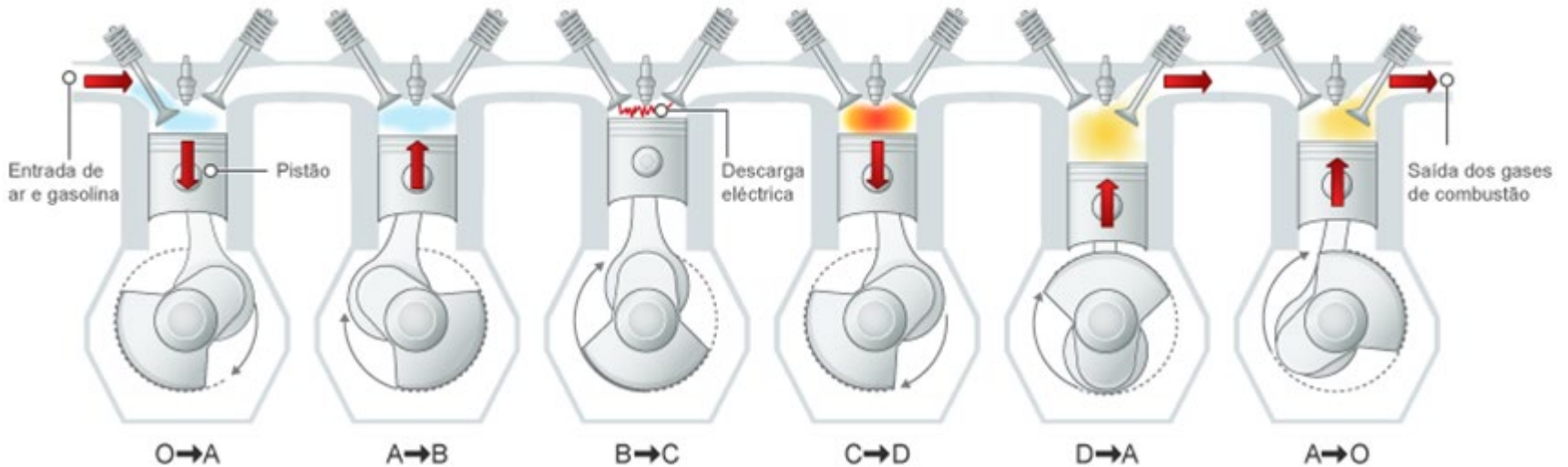
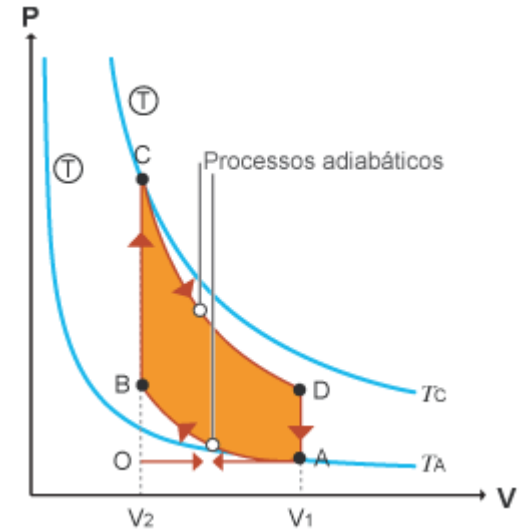
A pressão média perfeita é dada por:

$$\frac{P_{mp,O}}{P_1} = \varepsilon \cdot \frac{\varepsilon^{k-1} \left[(\psi - 1) - \frac{\psi}{\delta^{k-1}} \right] + 1}{(k - 1) \cdot (\varepsilon - 1)} \quad (6.36)$$

A PME no ciclo Otto aumenta com a razão de compressão ε , o que significa que motores com maior ε geram mais potência para um mesmo volume deslocado. Como a pressão real no cilindro varia ao longo do ciclo, a PME fornece uma forma simplificada de análise, permitindo comparar motores de diferentes tamanhos sem precisar considerar a variação exacta de pressão e temperatura. A PME teórica geralmente superestima a PME real, pois desconsidera perdas mecânicas, atrito e variações na combustão.

6.3 Processo de comparação de Otto

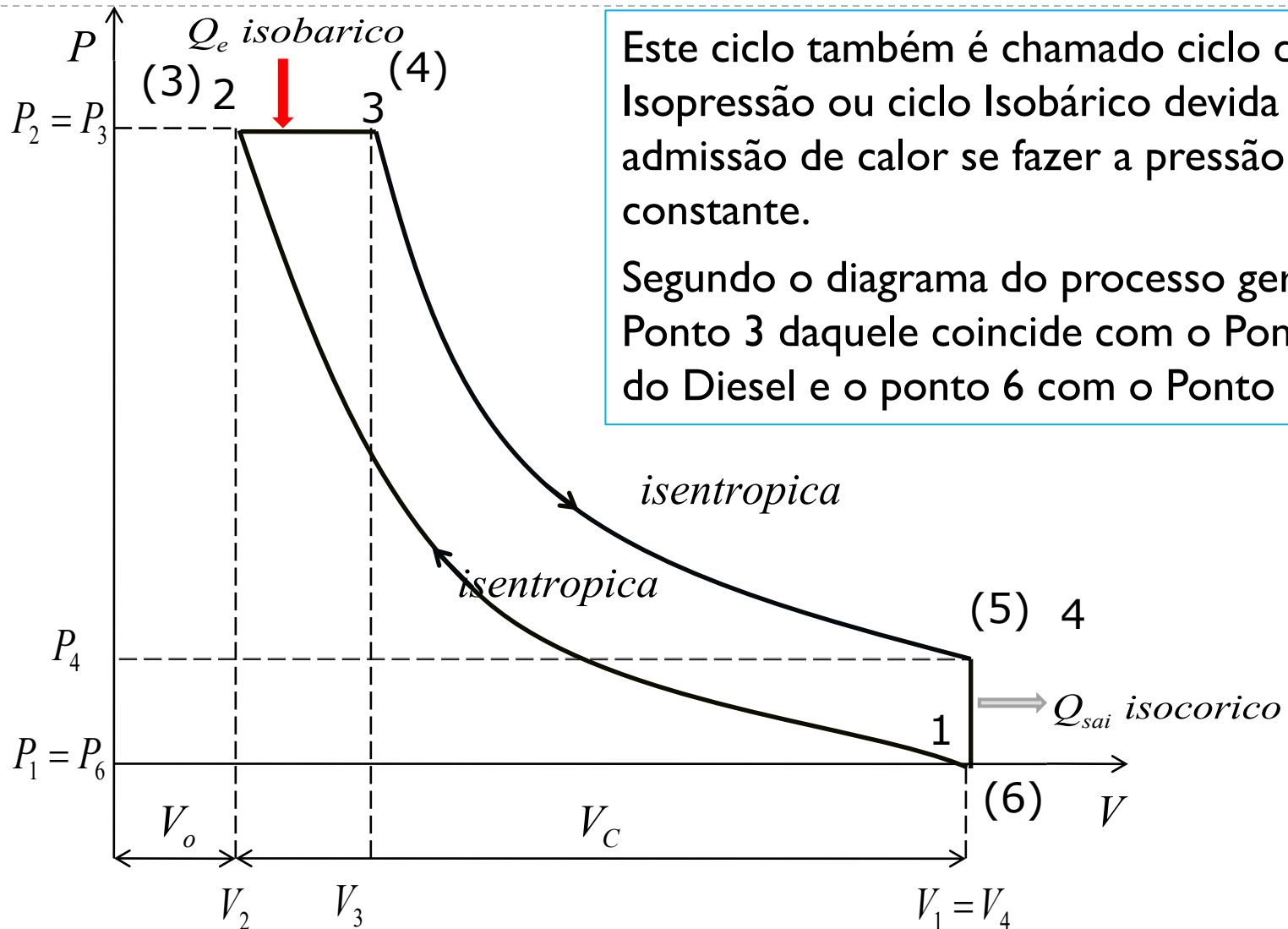
Nas figuras e no diagrama apresentam-se as várias etapas de um motor que funciona segundo o ciclo OTTO.



6.4 Processo de comparação de Diesel

O processo de injeção 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



6.4 Processo de comparação de Diesel

A relação de injeção $\varphi > 1$

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

$$\psi = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_2} = 1 \quad (6.37)$$

O rendimento perfeito de Seiliger é dado por:

$$\eta_{per,s} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\psi \cdot \varphi^k - 1}{(\psi - 1) + k \cdot \psi (\varphi - 1)} \xrightarrow{\text{Como: } \psi = 1} \psi = 1 \quad (6.38)$$

▶ **Então:**

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

ou

$$\eta_{per,d} = f(\varepsilon, k, \varphi) \quad (6.39)$$

6.4 Processo de comparação de Diesel

A pressão média perfeita é dada por:

$$\frac{P_{mp,d_s}}{P_1} = \varepsilon \cdot \frac{\varepsilon^{k-1} \left[k \cdot (\varphi - 1) - \frac{\varphi}{\delta^{k-1}} \right] + 1}{(k - 1) \cdot (\varepsilon - 1)} \quad (6.40)$$

Os Motores Diesel operam com combustão a pressão constante, o que faz com que a PME seja influenciada tanto pela razão de compressão ε quanto pela relação de injeção φ . A PME maior indica um motor mais eficiente, pois significa que ele está convertendo mais energia da combustão em trabalho útil. A PME do ciclo Diesel tende a ser maior do que a do ciclo Otto, pois os motores Diesel trabalham com compressões mais altas.

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:
$$\frac{\varphi^k - 1}{k(\varphi - 1)} \quad (6.41)$$

$$\eta_{per,O} > \eta_{per,d} \quad (6.42)$$

- quando ambos os ciclos funcionam com a mesma taxa de compressão

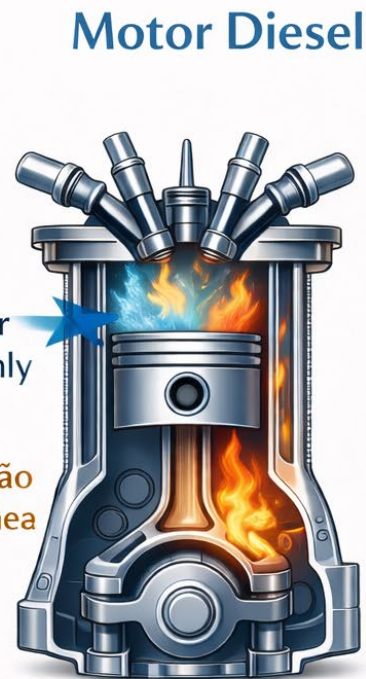
6.4 Processo de comparação de Diesel

*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 em que o rendimento térmico varia entre **25** e **35%**.*

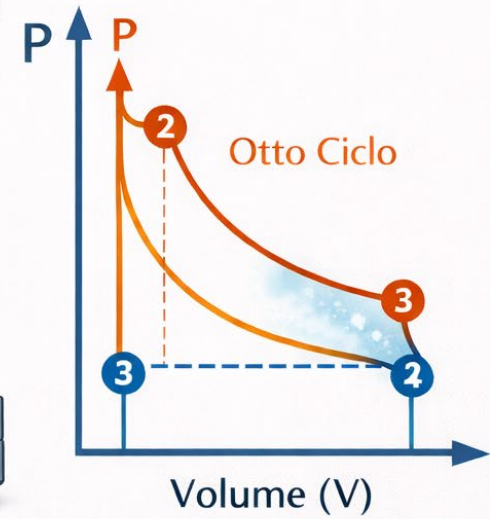
6.4 Processo de comparação de Diesel



Taxa de Compressão
8:1 a 12:1

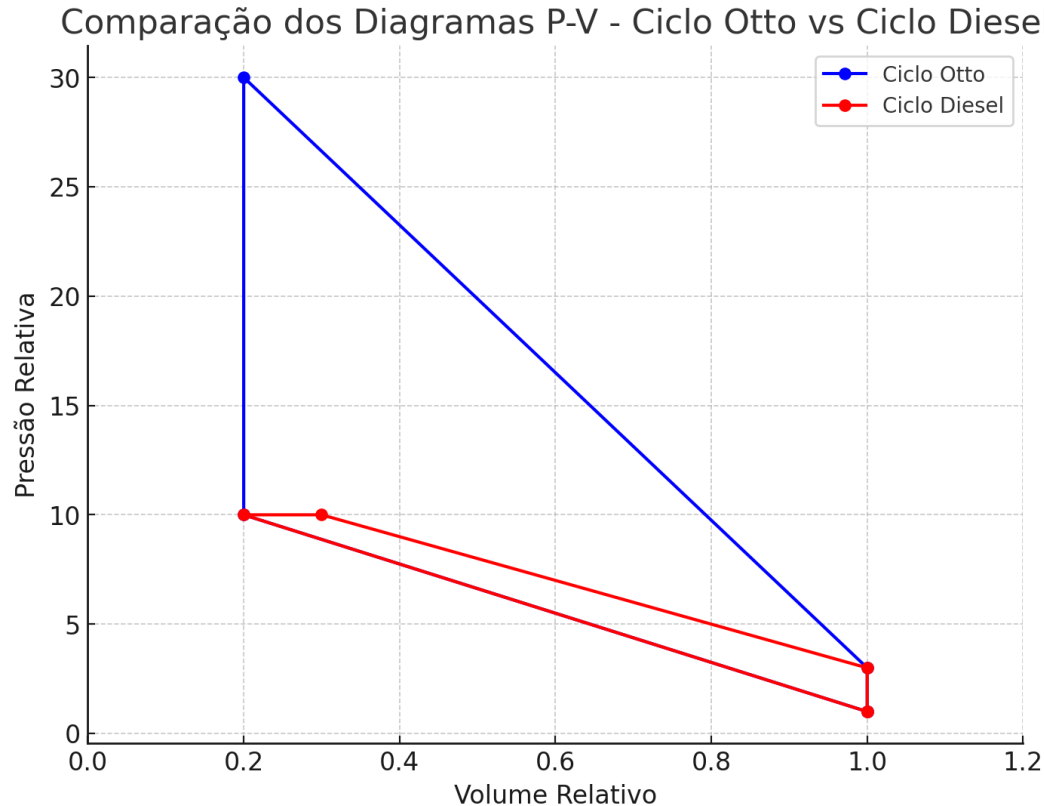


Taxa de Compressão
14:1 a 25:1



Comparação Taxa de Compressão & Rendimento Térmico

6.4 Processo de comparação de Diesel



Se a razão de compressão for igual, o Ciclo Otto é mais eficiente ($\eta_{Otto} > \eta_{Diesel}$). Na prática, motores Diesel são mais eficientes porque operam com razões de compressão muito maiores do que os motores 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.

