

# 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

---

- ▶ 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).

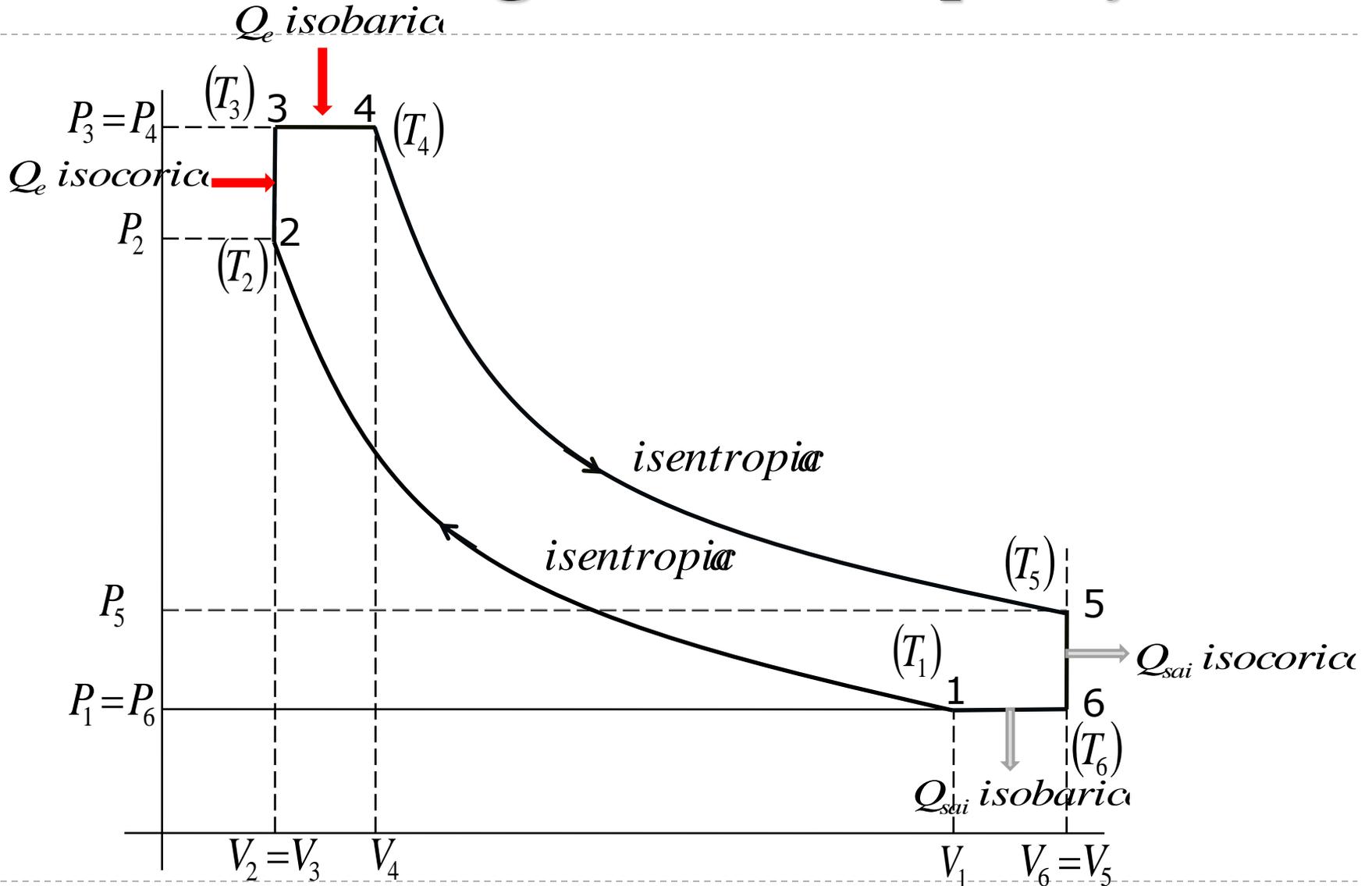
# 6.1 Processo geral de comparação

---

**Este processo é válido para:**

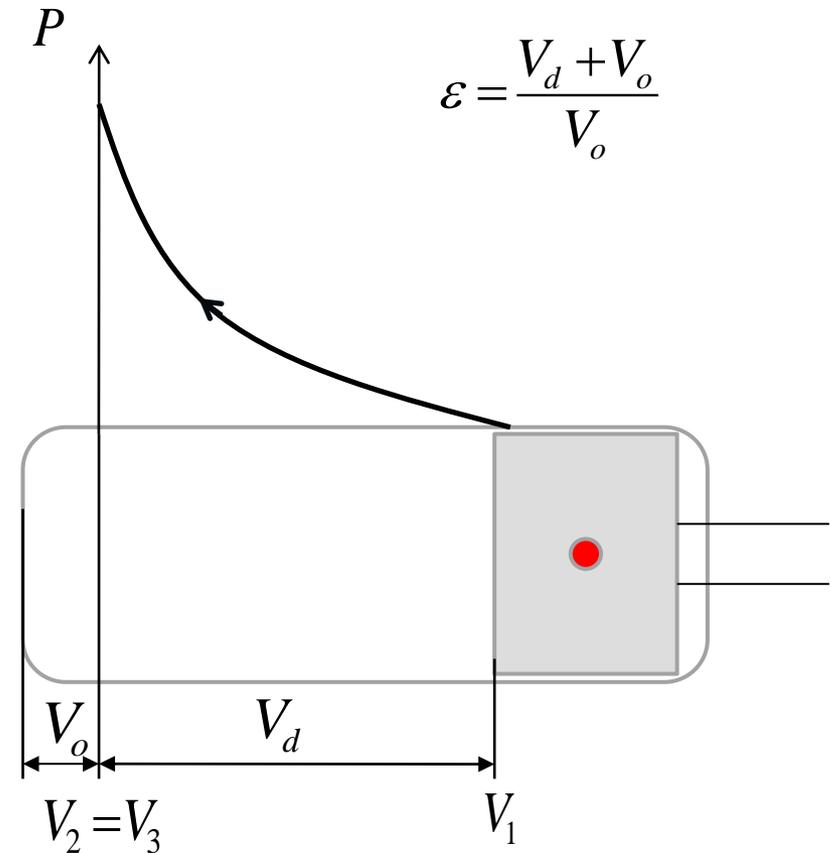
- Gases reais;
- Um enchimento perfeito do cilindro com mistura ou gás sob condições de aspiração;
- Compressão e expansão isentrópicas;
- Combustão que se dá à uma velocidade infinitamente grande e sem troca de calor com o ambiente;
- Combustão completa com os produtos na forma de dióxido de carbono,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



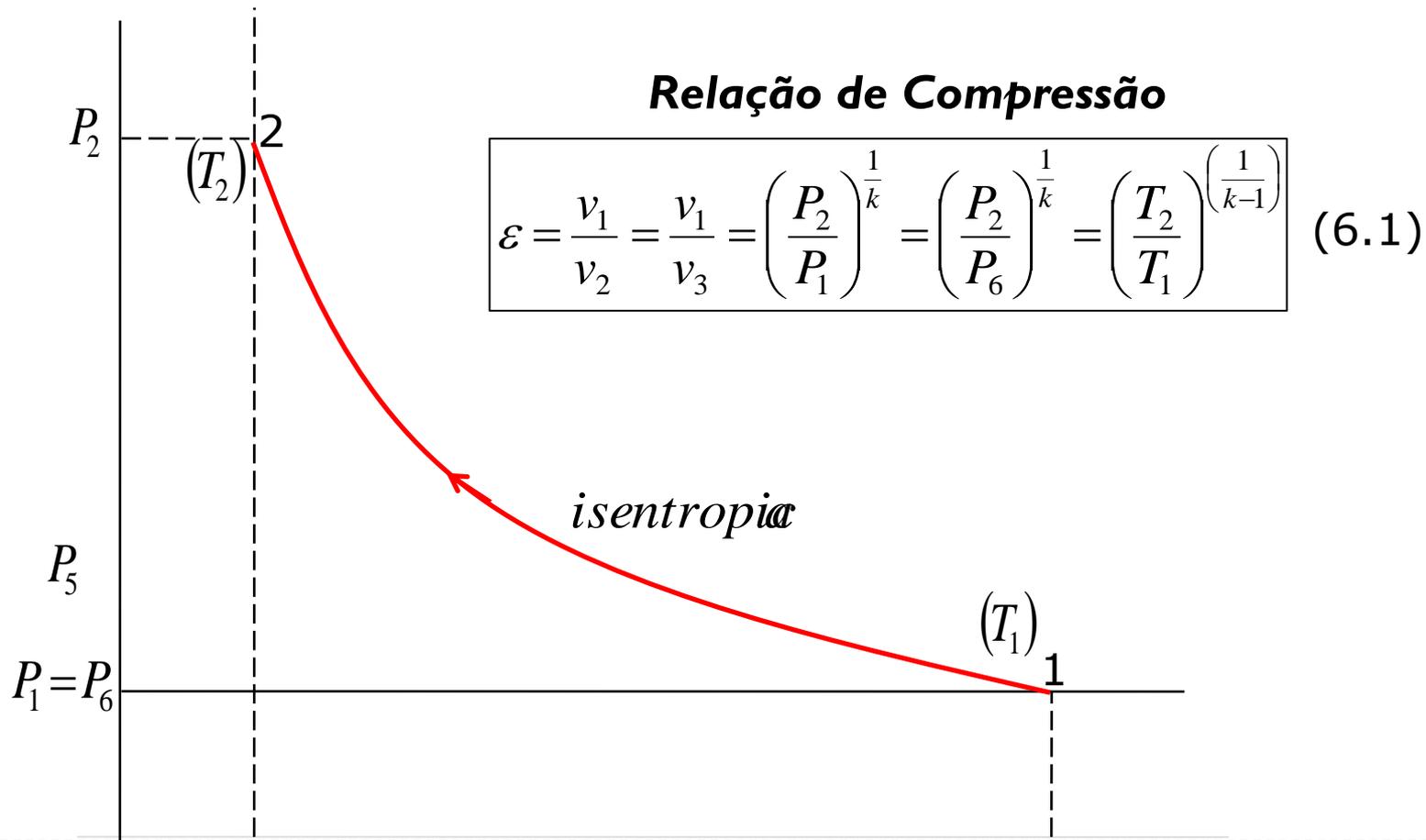
## 6.1 Processo geral de comparação

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

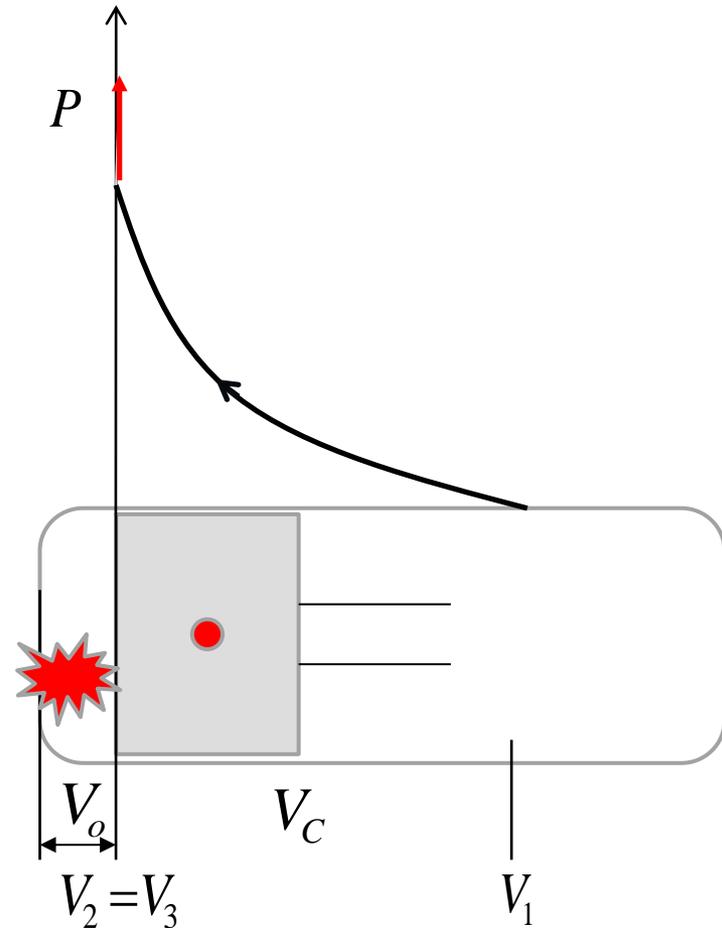
- Do processo indicado no diagrama pode-se deduzir as seguintes relações, todas maiores que a unidade.



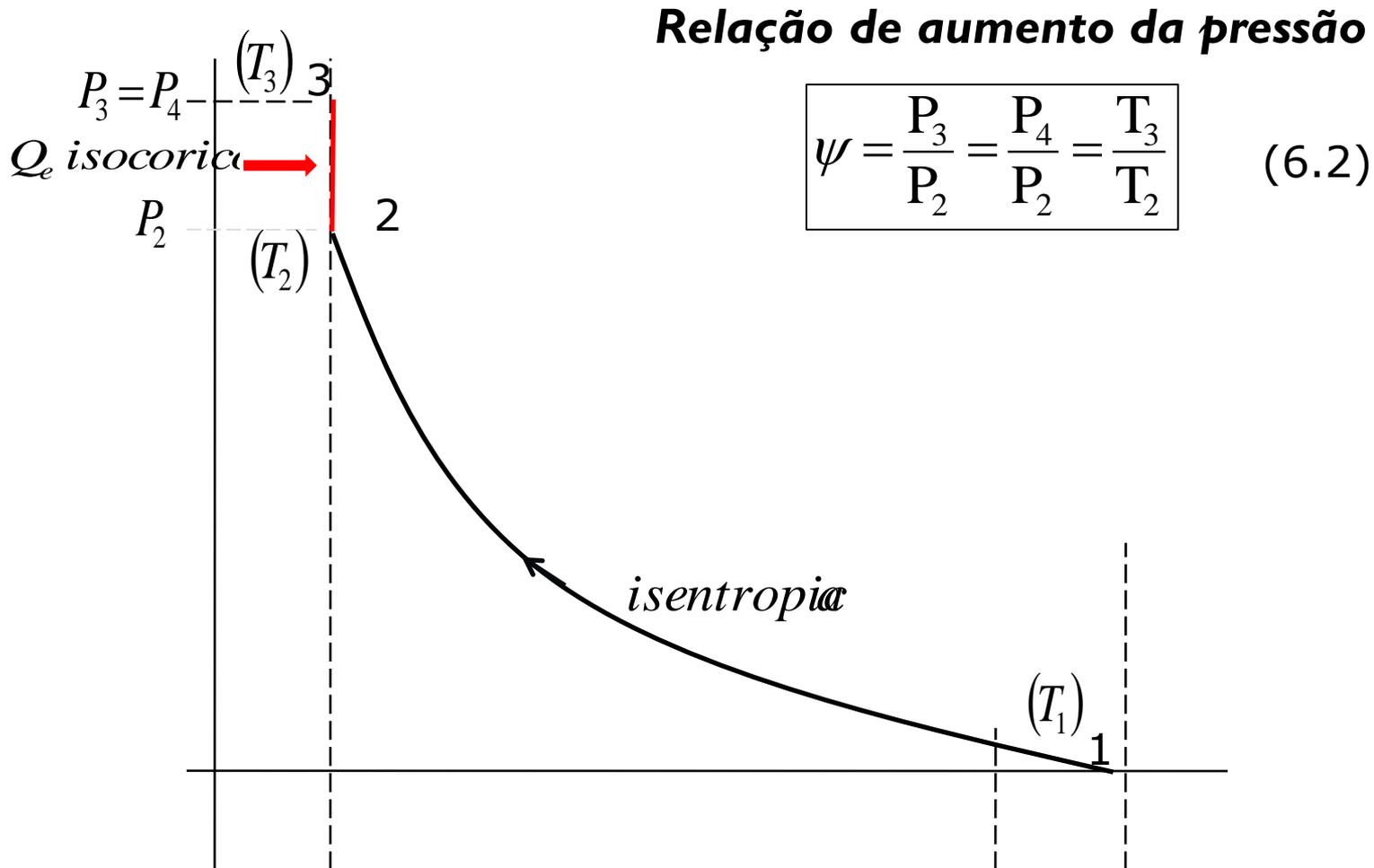
## 6.1 Processo geral de comparação

---

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

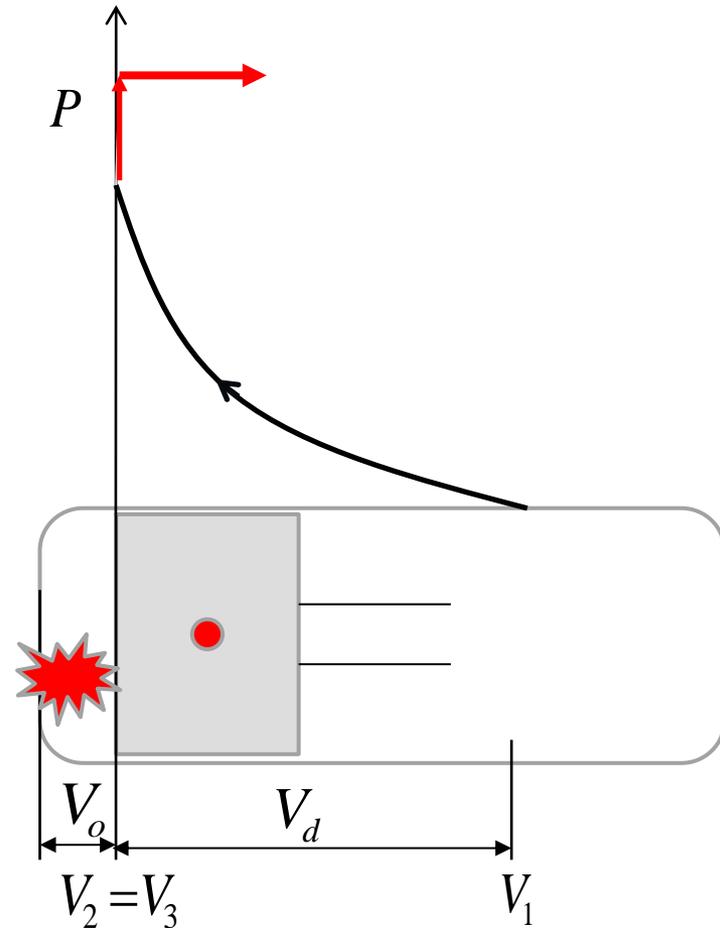


# 6.1 Processo geral de comparação

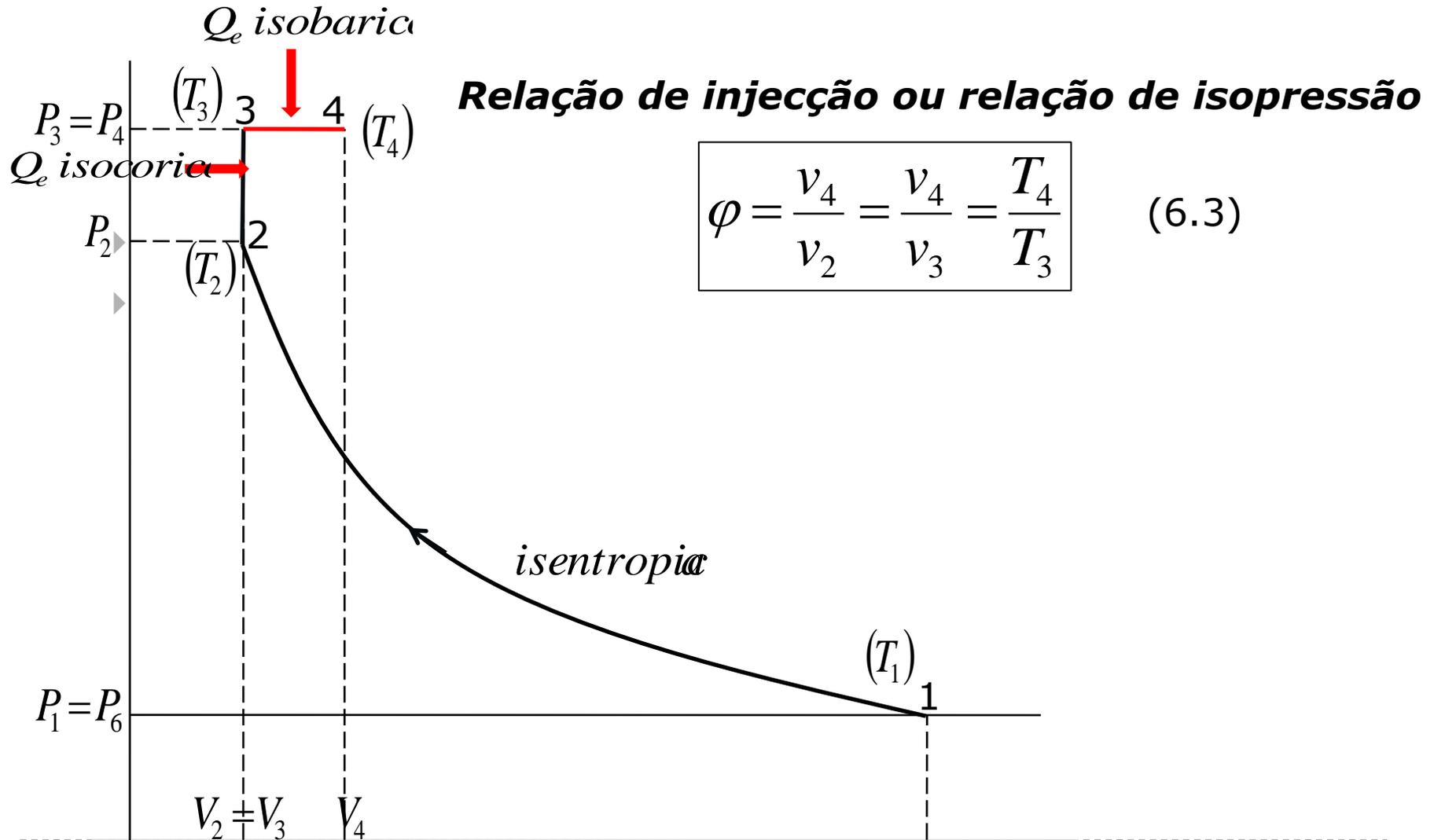


## 6.1 Processo geral de comparação

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.



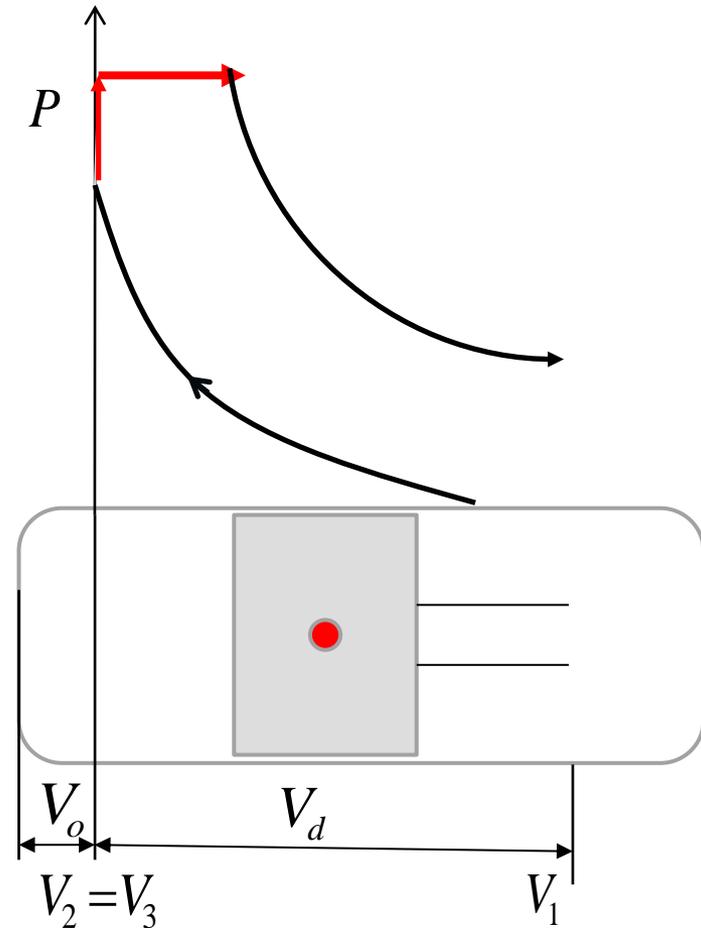
# 6.1 Processo geral de comparação



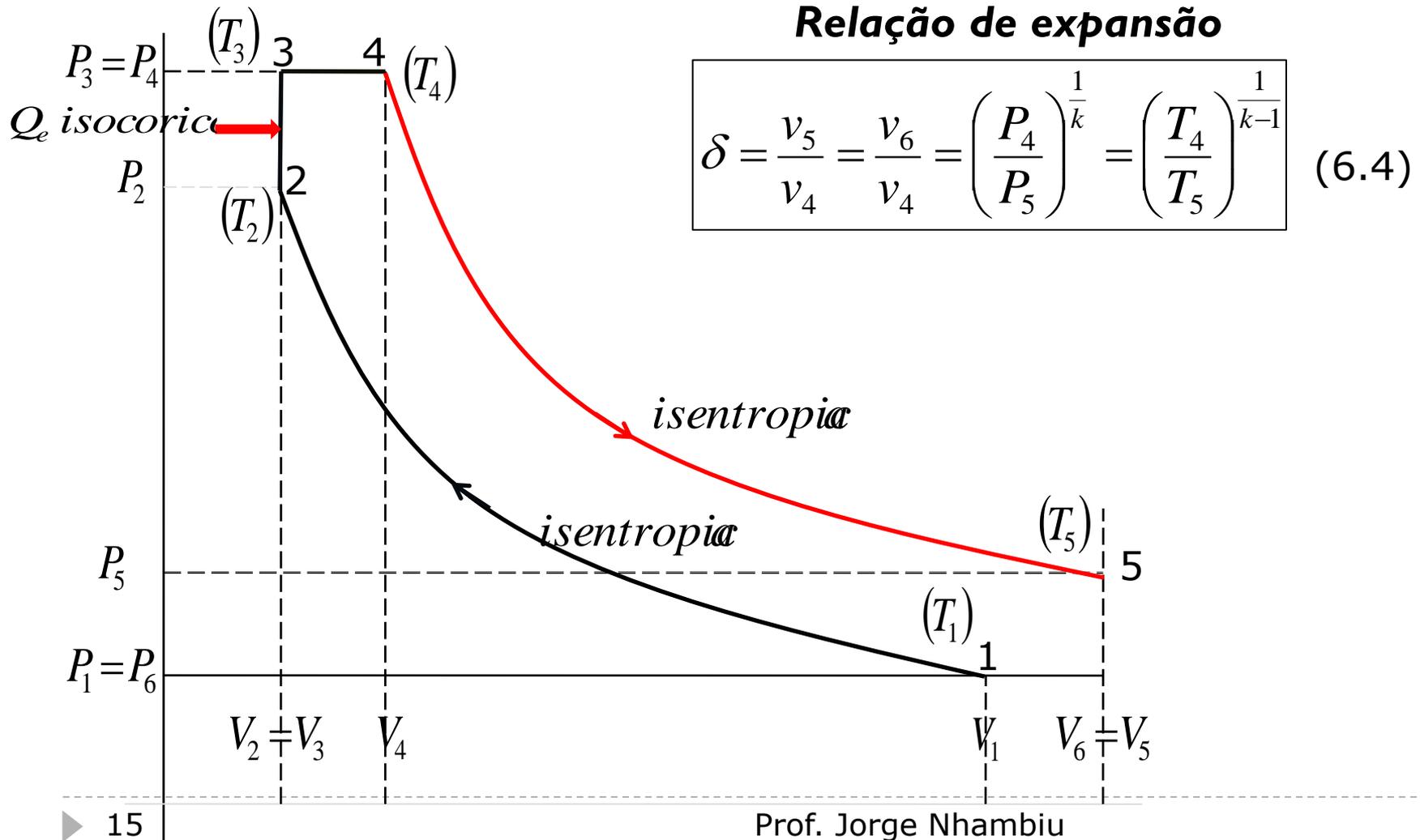
## 6.1 Processo geral de comparação

---

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



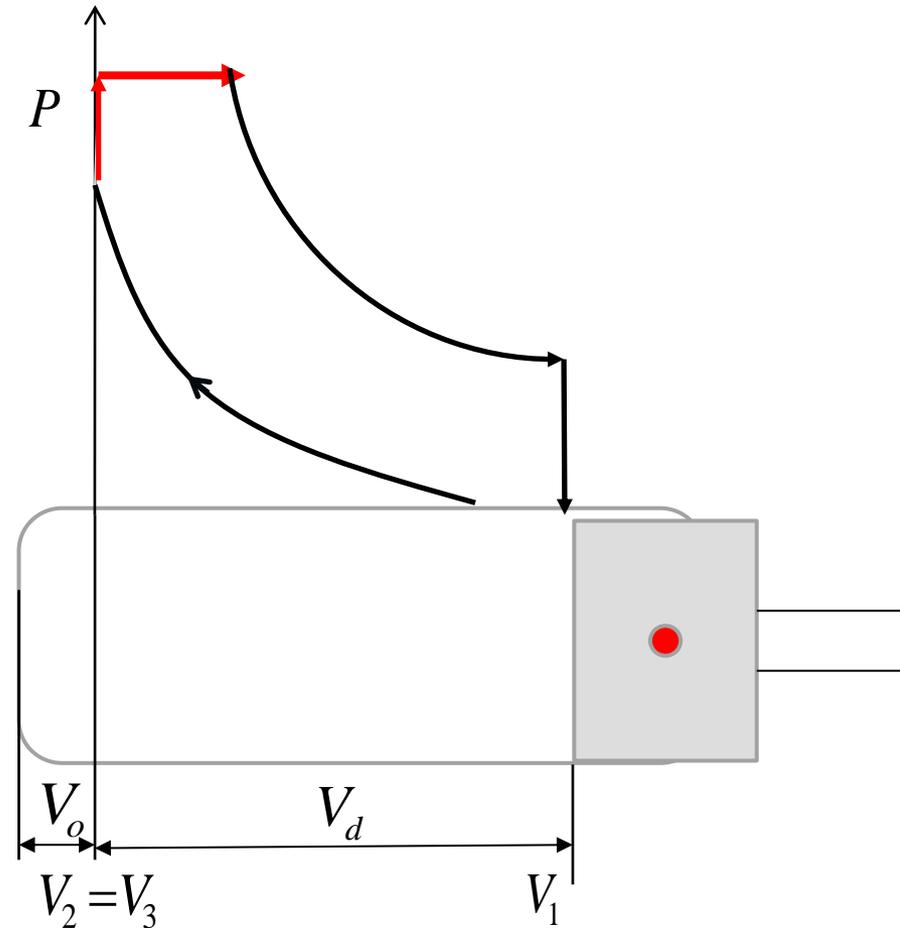
# 7.1 Processo geral de comparação



## 6.1 Processo geral de comparação

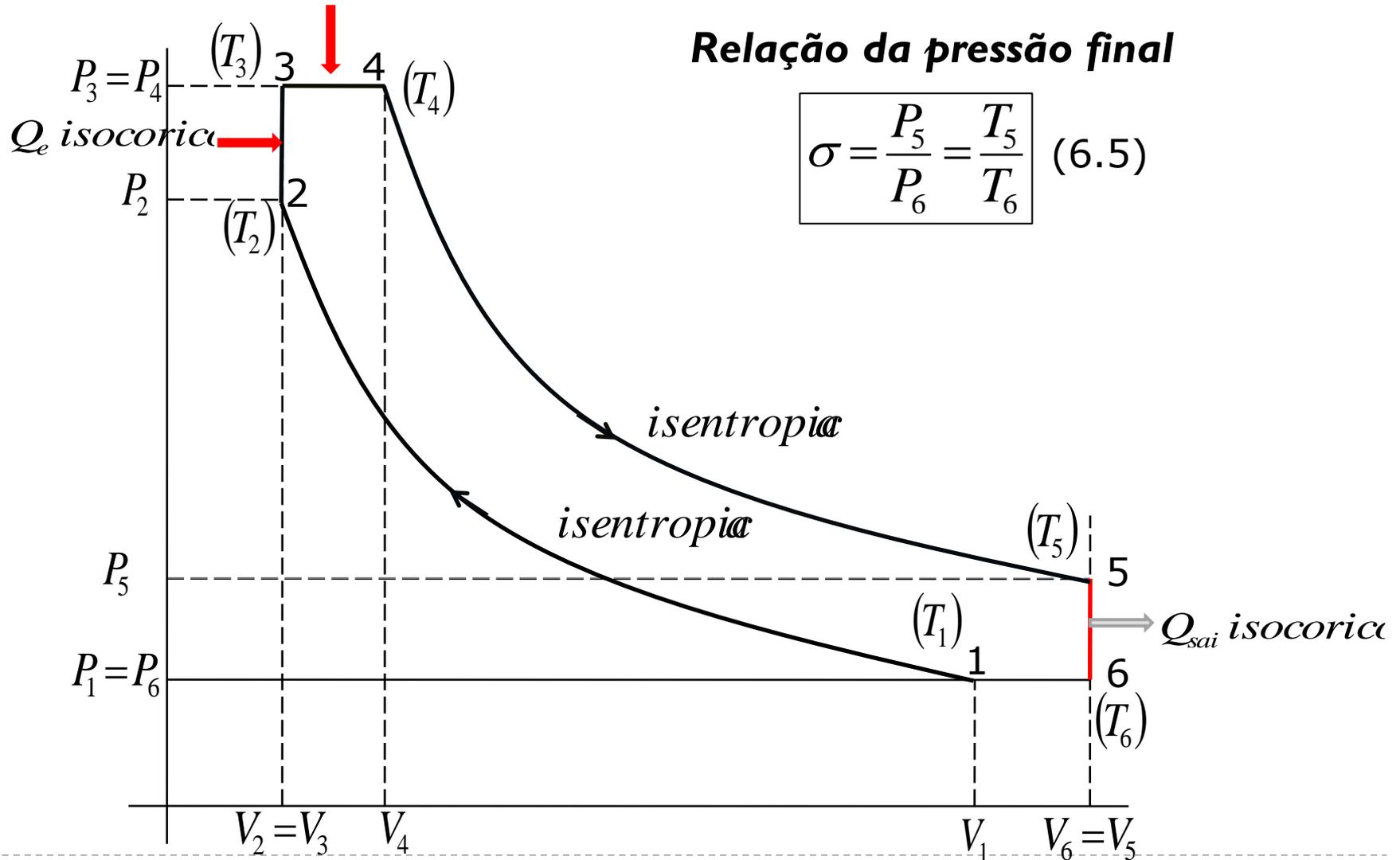
---

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



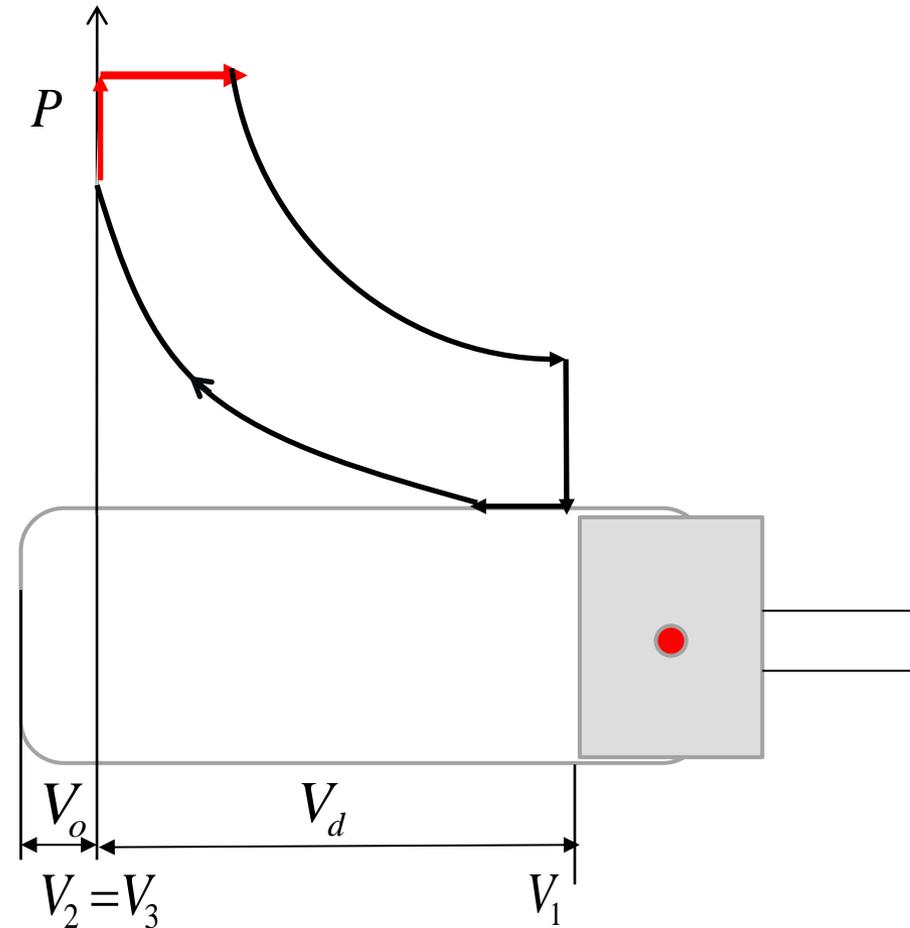
# 6.1 Processo geral de comparação

$Q_e$  isobarica



# 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:

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

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

▶ 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

---

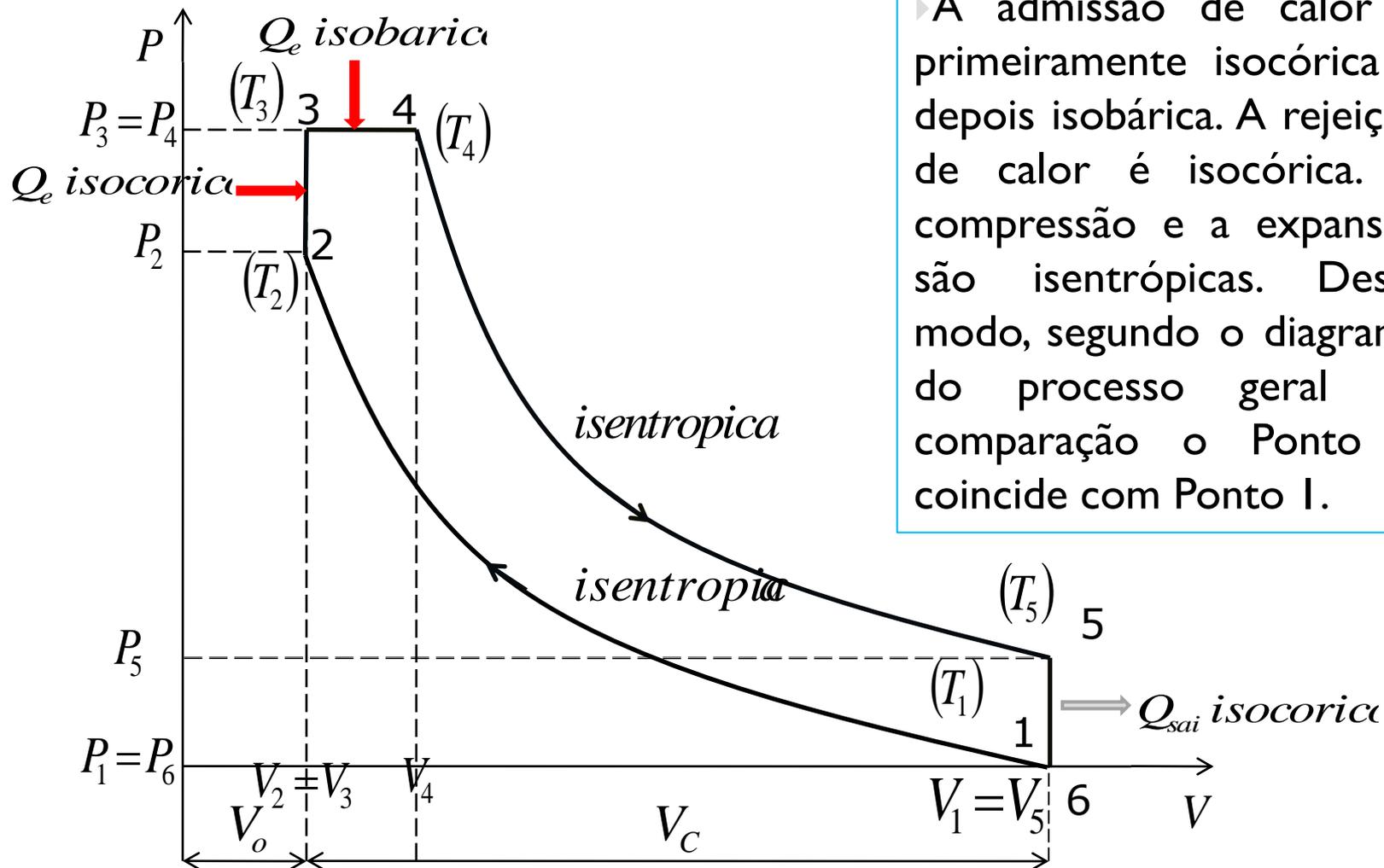
O ciclo de Seiliger, também conhecido como ciclo misto, ciclo de combustão dupla ou ciclo Sabathé, é um ciclo termodinâmico que combina características dos ciclos Otto e Diesel. Ele representa de forma mais precisa o funcionamento de muitos motores de combustão interna modernos, especialmente aqueles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

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

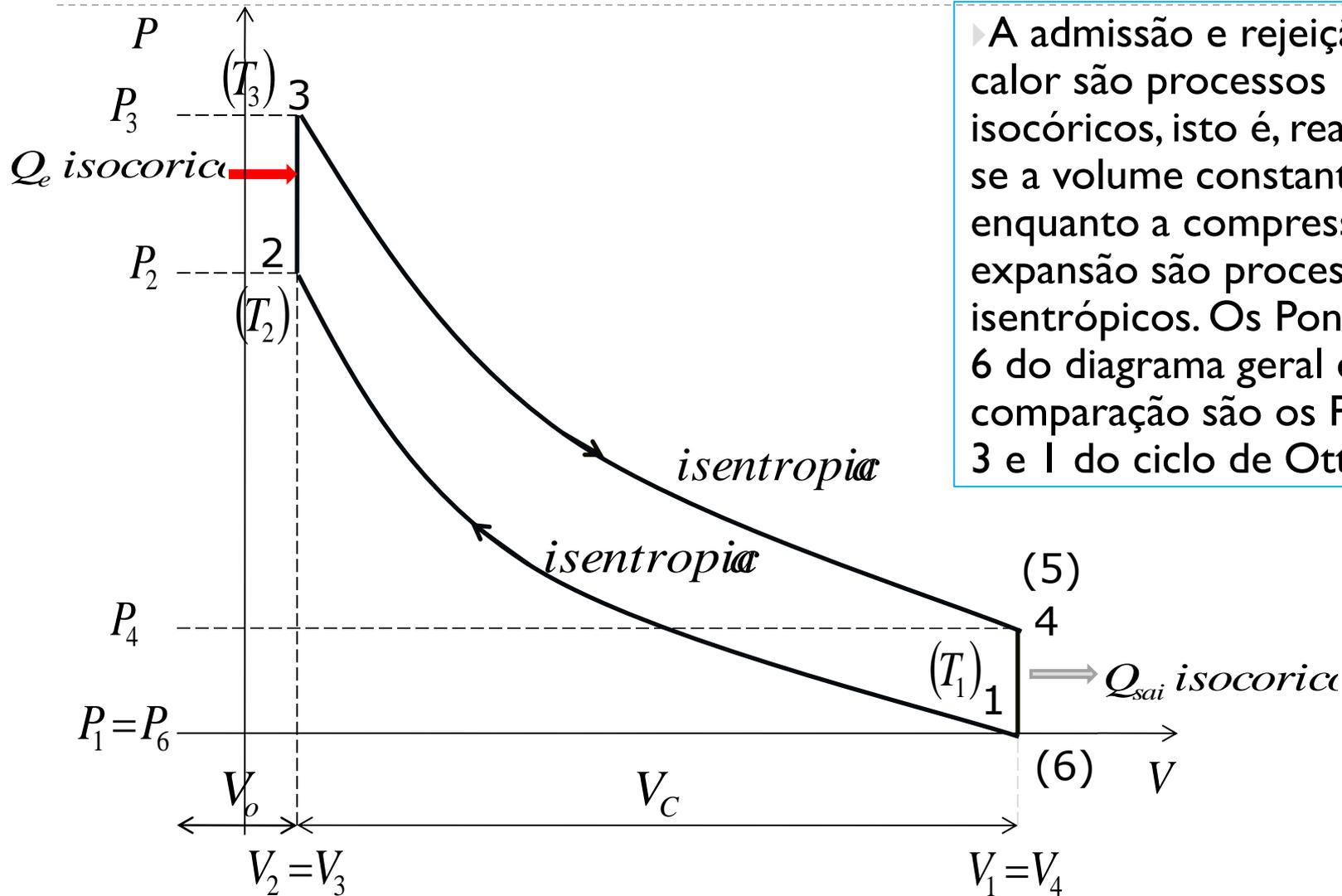
O rendimento perfeito cresce com o aumento de “ $\varepsilon$ ” e “ $\psi$ ” e diminui com o aumento de “ $\varphi$ ” porque a temperatura do cilindro aumenta e o gás fresco aquece também.

## 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 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

---

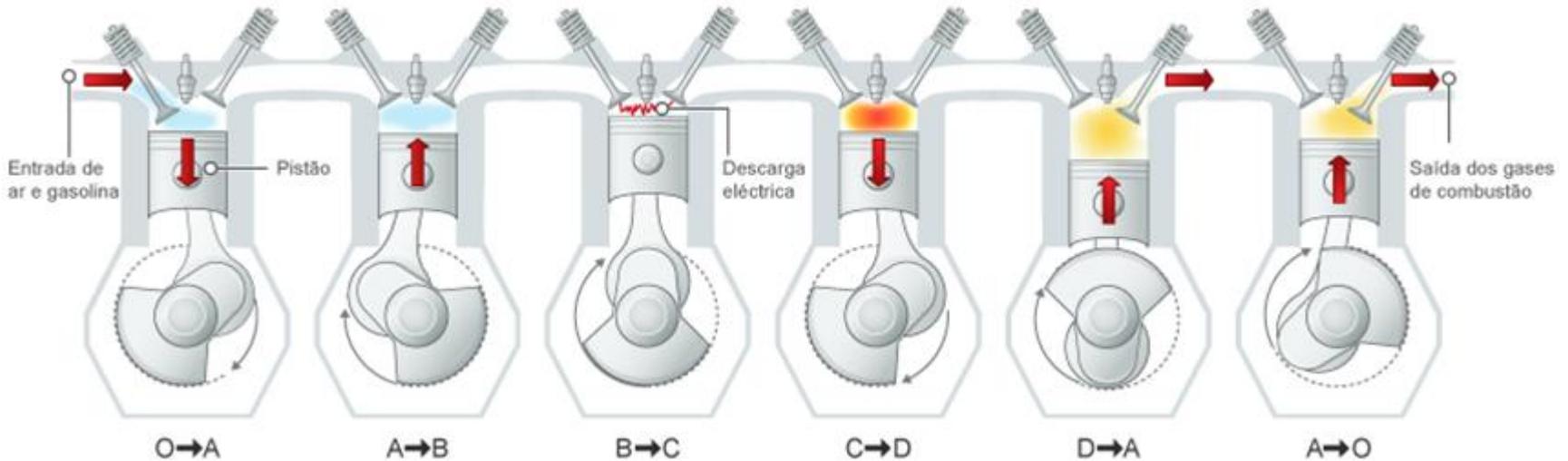
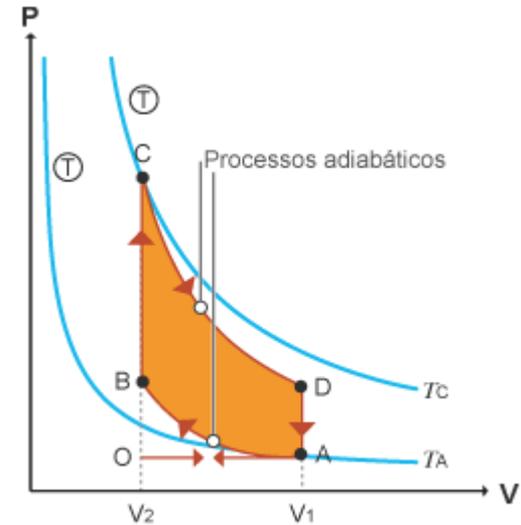
A pressão média perfeita é dada por:

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

A PME no ciclo Otto aumenta com a razão de compressão  $\varepsilon$ , o que significa que motores com maior  $\varepsilon$  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.

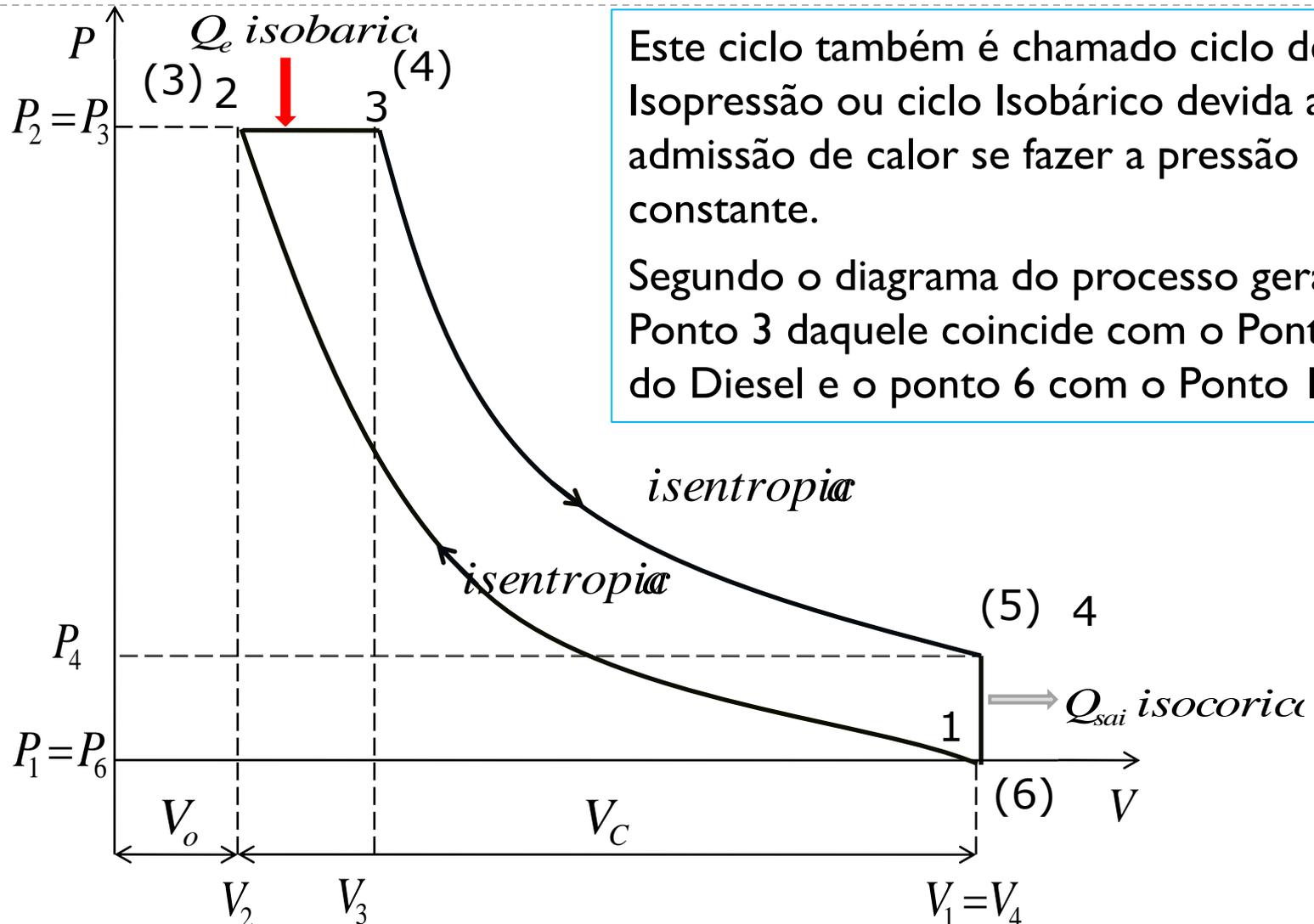


## **6.4 Processo de comparação de Diesel**

---

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:

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

▶ **Então:**

$$\eta_{per,d} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\varphi^k - 1}{k \cdot (\varphi - 1)} \quad \text{ou} \quad \eta_{per,d} = f(\varepsilon, k, \varphi) \quad (6.39)$$

## 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  $\varepsilon$  quanto pela relação de injeção  $\varphi$ . 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: 
$$\frac{\varphi^k - 1}{k(\varphi - 1)} \quad (6.41)$$

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

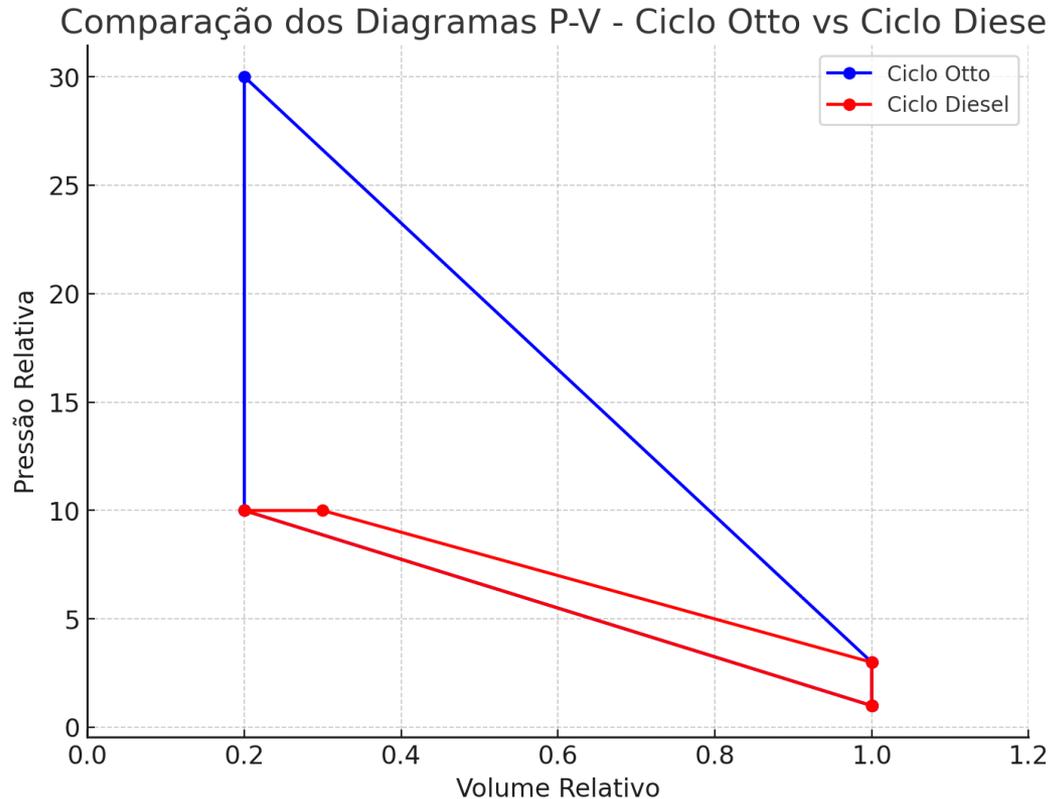
- quando ambos os ciclos funcionam com a mesma taxa de compressão

## 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



*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.

