

# **EM 524 - FENÔMENOS DE TRANSPORTE**

## **Aulas 10 e 11**

---

Dra. Rosângela Zanoni Moreno  
Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
Departamento de Engenharia de Petróleo  
Cx.P. 6122 , Campinas – SP. CEP 13083-970  
e-mail: [zanoni@dep.fem.unicamp.br](mailto:zanoni@dep.fem.unicamp.br)

## EM 524 - FENÔMENOS DE TRANSPORTE

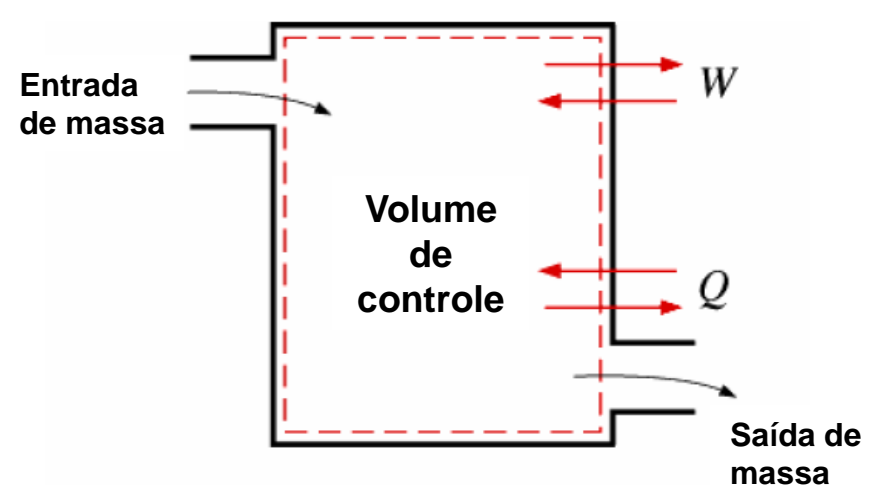
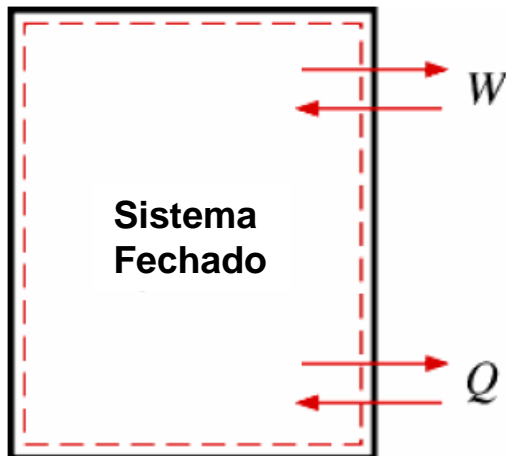
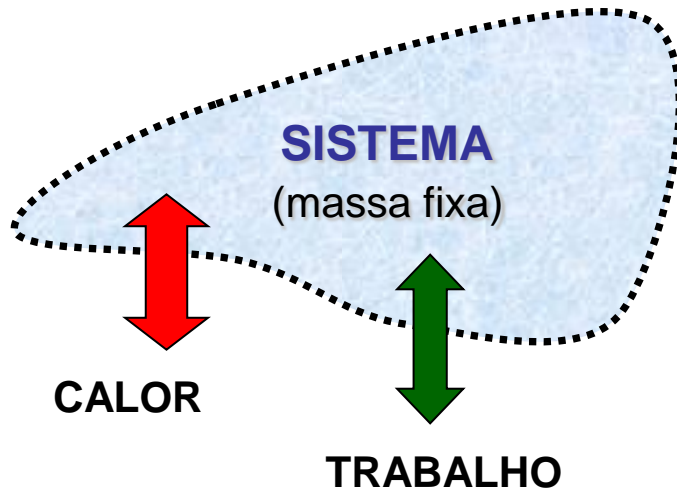
*As informações abaixo têm como objetivo auxiliar o aluno quanto à organização dos tópicos principais abordados em sala e não excluem a necessidade de estudo e de complementação de conhecimentos através das referências indicadas na Agenda da Aula ou no Programa do curso.*

**Dra. Rosângela B. Z. L. Moreno**  
**DEP/FEM –Bloco C/ Piso 3/ Sala 306**  
**e-mail: [zanoni@dep.fem.unicamp.br](mailto:zanoni@dep.fem.unicamp.br)**

- **Generalidades**
- **Teorema de Transporte de Reynolds**
- **Leis de Conservação p/ V. C.**
  - **Massa**
  - **Movimento**
  - **Energia**
  - **Entropia**
- **Seleção do V. C.**

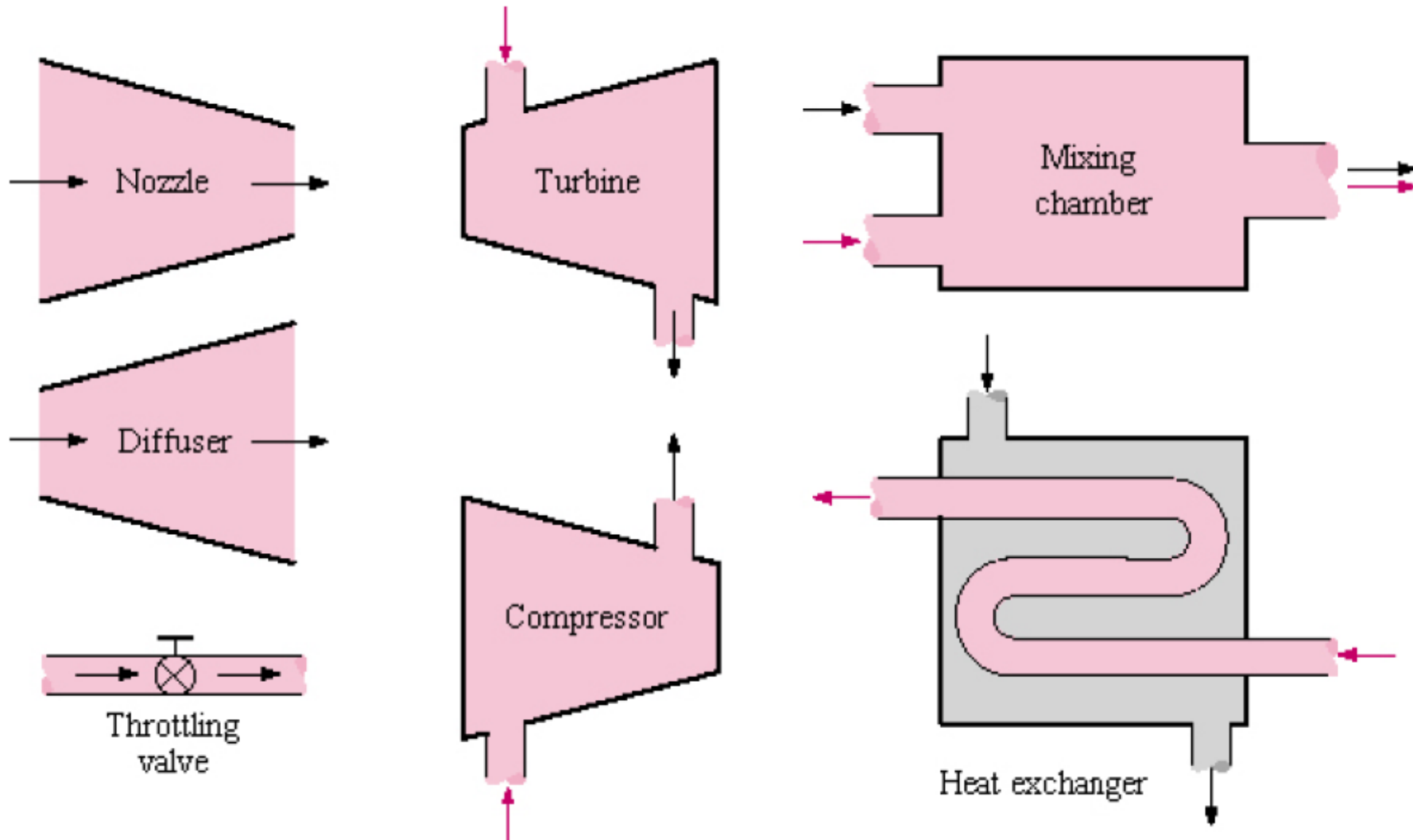
- **Sistemas  $\rightarrow$  foco: mudanças em  $p, v, T, u, h, s$**
- **Volume de Controle  $\rightarrow$  foco:**
  - mudanças nas propriedades ( $p, v, T, u, s, h$ ).
  - forças induzindo o movimento dos fluidos através da Superfície de Controle
  - reações de Superfície de Controle em relação às forças atuantes
- ***Sistema  $\leftarrow$  TTR  $\rightarrow$  Volume de Controle***
- **Possibilidades: Avaliação de difusores, bocais, turbinas, compressores, bombas, combinação de processos**

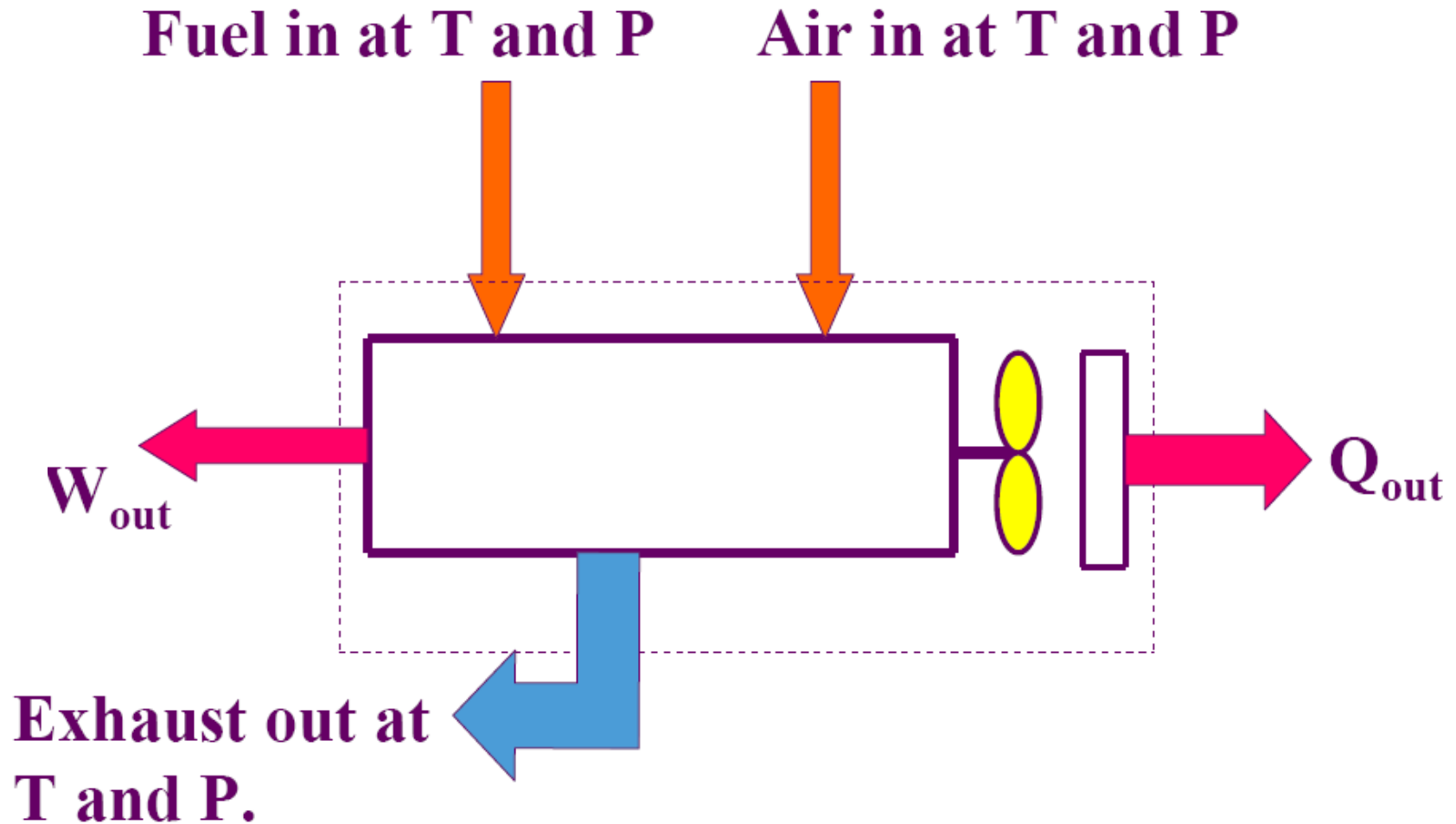
- Diferença entre **Sistemas Abertos** e **Sistemas Fechados**:



- **Sistema**: massa fixa, **não existe escoamento**
- **Volume de controle**: região do espaço na qual **existe escoamento de massa** (Ex: bombas, compressores, turbinas, difusores)
  - **Massa escoando através do volume de controle transporta energia (calor e trabalho)**
  - **Seleção do volume de controle (VC): é arbitrária, dependendo da informação disponível**
  - **Análise do volume de controle:**
    - Mudanças das propriedades do VC
    - Análise das forças agindo sobre o fluido escoando através da superfície de controle
    - Fluido = meio contínuo

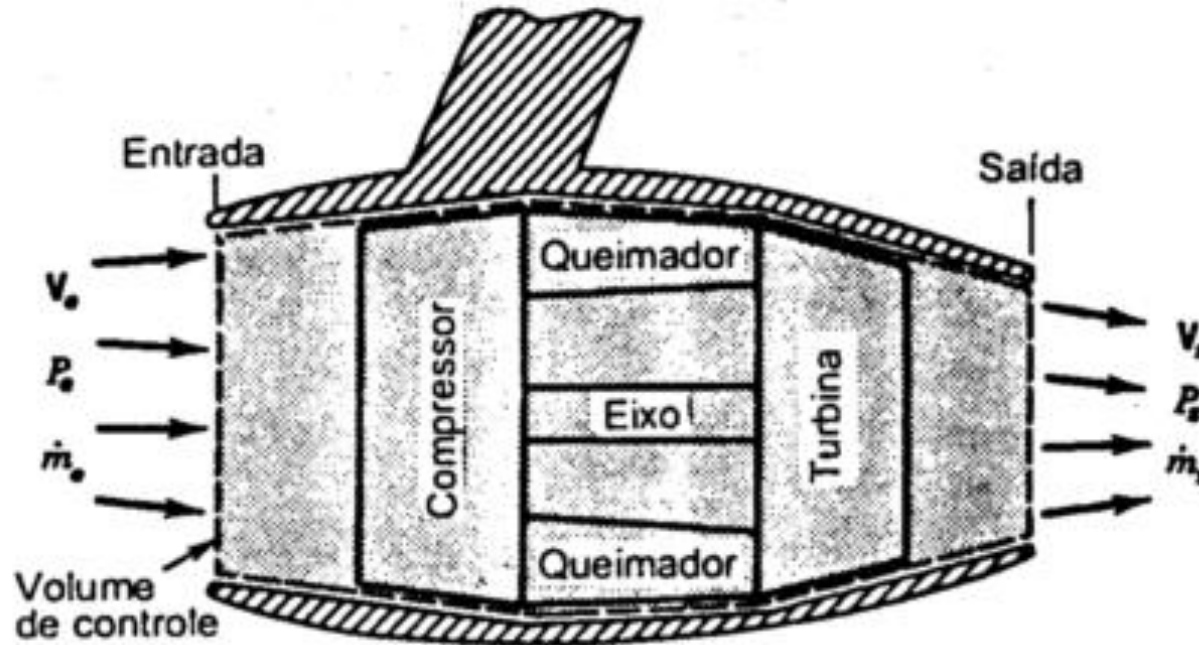
## Aula 10



**Motor de combustão interna (automóvel)**



# Volume de controle para um motor a jato



**Figura 5-1** Volume de controle para um motor a jato.  $P$  = pressão (Pa, lb<sub>f</sub>/ft<sup>2</sup>),  $V$  = velocidade (m/s, ft/s),  $\dot{m}$  = vazão mássica (kg/h, lb<sub>m</sub>/s).

trabalho = força.deslocamento

potência = força.velocidade

- **Conservação da massa**

$$\frac{dM}{dt} = 0$$

- **Conservação da quantidade de movimento**

- 2ª. Lei de Newton:

$$\sum \vec{F} = M\vec{a} = M \frac{D\vec{V}}{Dt}$$

- **M=cte.**  $\Rightarrow \sum \vec{F} = \frac{D(M\vec{V})}{Dt}$

Onde:

$M\vec{V}$  = quantidade de movimento linear do sistema ou “momentum”

## Aula 10

- Vetor velocidade do fluido

$$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$$

$$\vec{V} = \vec{i}u + \vec{j}v + \vec{k}w$$

$$u = f(x, y, z, t)$$

$$v = f(x, y, z, t)$$

$$w = f(x, y, z, t)$$

- Aceleração = derivada substantiva da velocidade

$$\vec{a} = \frac{D\vec{V}}{Dt} = \left( u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right) + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$$

- Conservação de energia (1ª Lei da TMD)

$$\delta Q - \delta W = dE$$

- Processos contínuos:  $\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt}$

- Na ausência de forças elétricas, magnéticas e tensão superficial:

$$E = Me = U + Ec + Ep$$

- 2ª. Lei da TMD:  $\frac{dS}{dt} \geq \frac{\dot{Q}}{T}$

- Escoamento permanente
- Escoamento transiente
- Escoamento uniforme
- Escoamento não uniforme
- Escoamento unidimensional
- Escoamento laminar
- Escoamento turbulento
- Escoamento compressível
- Escoamento incompressível

## Condições uniformes (médias)

### Escoamento em regime permanente (RP)

- Velocidade média nos planos de entrada e saída ( $\bar{V}$ );
- Propriedades médias do fluido;

$$\frac{D\Phi_{\text{sist}}}{Dt} = [\varphi \dot{m}]_s - [\varphi \dot{m}]_e$$

Onde :

$\Phi$  = propriedade genérica (extensiva);

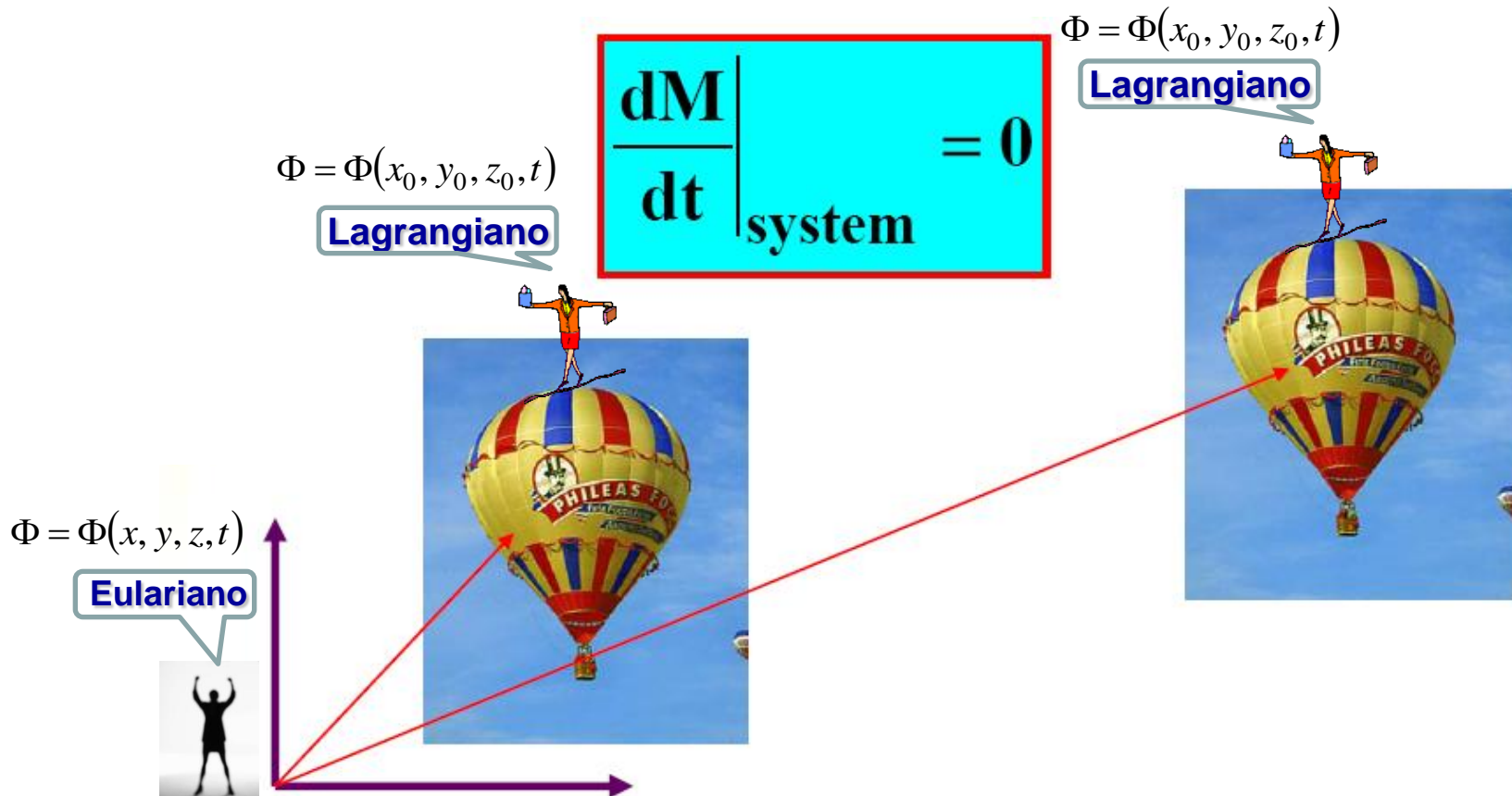
$\varphi$  = propriedade genérica por unidade de massa (intensiva,  $\varphi = \frac{\Phi}{M}$  );

$\dot{m}$  = vazão mássica [kg/s]     $\dot{m} = \rho \cdot \bar{V} \cdot A$

$\dot{V}$  = vazão volumétrica [m<sup>3</sup>/s]     $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$

## Leis de Conservação de Massa

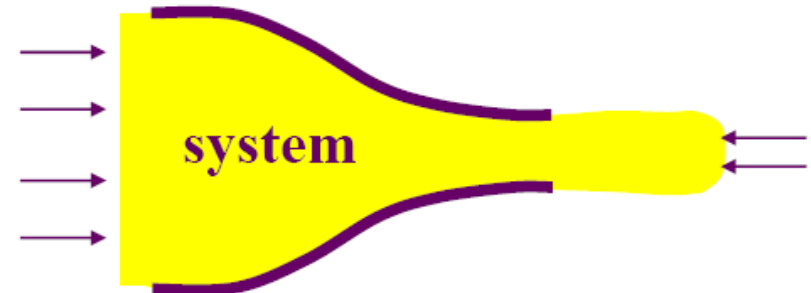
A massa dentro do **sistema** é constante. Se seguirmos o sistema, a partir de um ponto de referência Lagrangiano, não se observa mudança de massa.



## Leis de Conservação de Momentum

Se seguirmos o **sistema**, a partir de um ponto de referência Lagrangiano, a mudança de momentum é igual a resultante de todas as forças agindo sobre o sistema: pressão, gravidade, tensão, etc...

$$\left. \frac{d(\mathbf{M}\vec{V})}{dt} \right|_{\text{system}} = \underbrace{\sum \vec{F}}_{\text{external forces}}$$





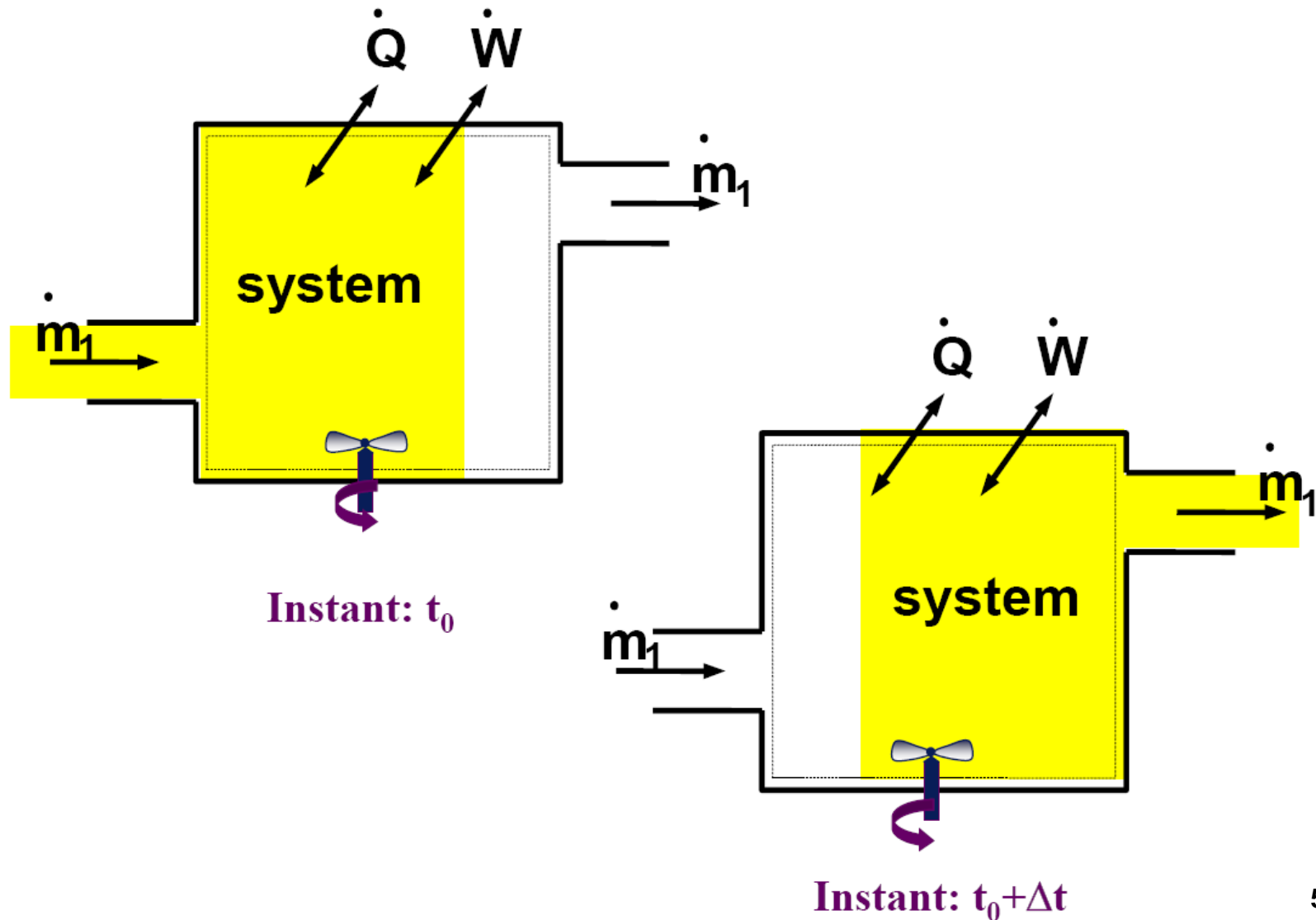
## Leis de Conservação de Energia

Se seguirmos o **sistema**, a partir de um ponto de referência Lagrangiano, a mudança de energia é igual ao fluxo líquido de calor e de trabalho que atravessa as fronteiras dos sistema

$$\left. \frac{d(Me)}{dt} \right|_{\text{system}} = \oint_{\text{boundary}} (\dot{q} - \dot{w}) dA$$

- $e = u + gz + v^2/2$  specific energy (J/kg)
- $\dot{q}$  and  $\dot{w}$  = energy flux, ( $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ )

## Leis de Conservação de Energia



## Conservação da massa para um volume de controle

$$\Phi = M \qquad \varphi = \frac{\Phi}{M} = 1$$

- **Variação de massa no volume de controle**

$$\frac{DM}{Dt} = \dot{M}_s - \dot{M}_e$$

- **Derivada substantiva**

$$\frac{DM}{Dt} = \frac{\partial M}{\partial t} + \left( \frac{\partial M}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial M}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial M}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right)$$

- **VC homogêneo**

$$\frac{DM}{Dt} = \frac{\partial M}{\partial t}$$

- **Escoamento permanente**

$$\frac{DM}{Dt} = 0 \qquad \dot{M}_s = \dot{M}_e$$

## Equação da conservação da massa em um VC

- Regime Permanente

$$\dot{M} = \rho \bar{V} A$$

$$\dot{M}_s = \dot{M}_e$$

$$\rho_s \bar{V}_s A_s = \rho_e \bar{V}_e A_e$$

- Escoamento incompressível:

$$\rho_s = \rho_e$$

$$\bar{V}_s = \bar{V}_e \frac{A_e}{A_s}$$

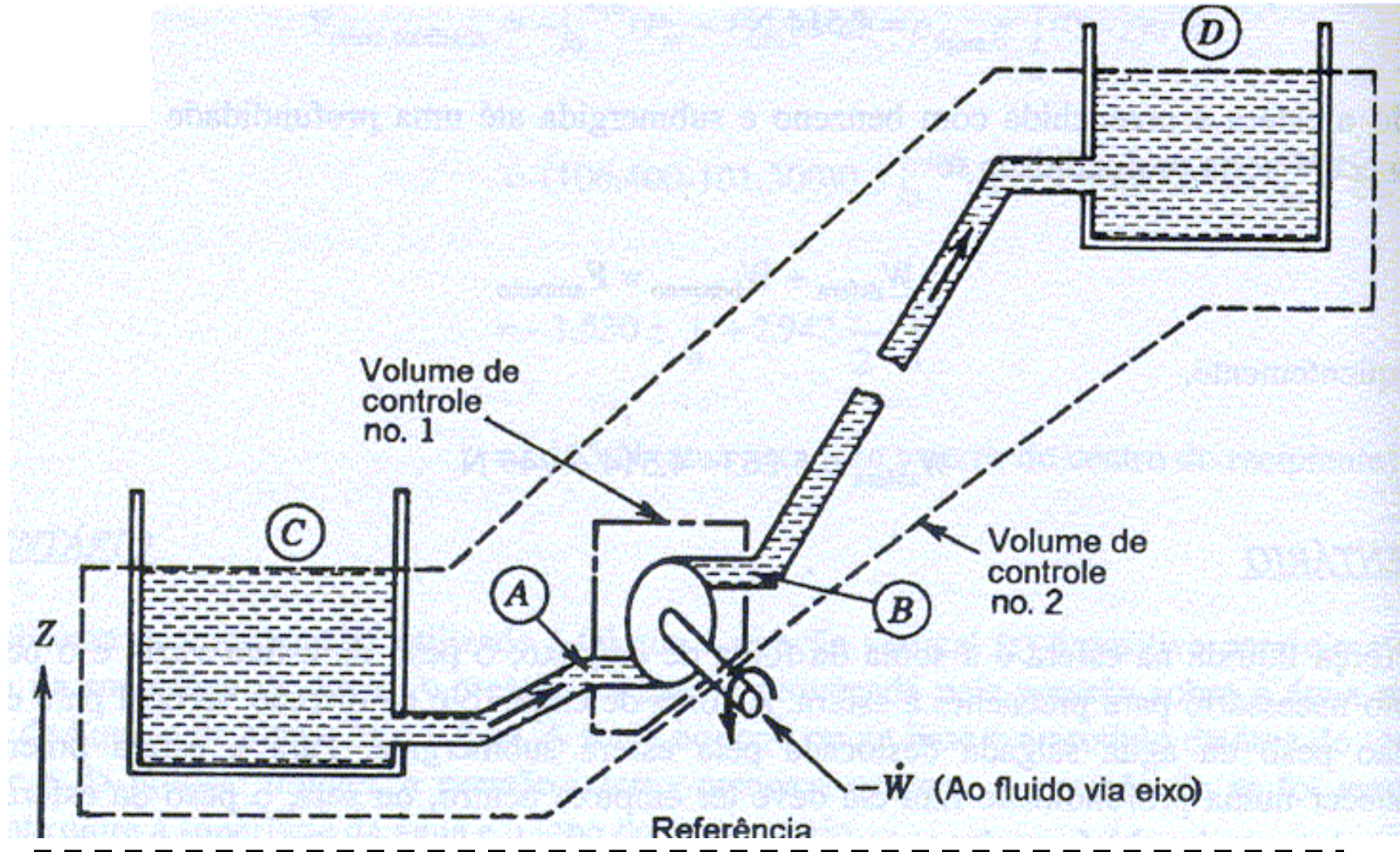
## Leis de Conservação - Sistema

<b>Massa</b>	$\frac{dm}{dt} = 0$
<b>Movimento</b>	$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt}(m \vec{v}) \qquad \sum \vec{T} = \frac{d}{dt}(I \vec{\Omega})$
<b>Energia</b>	$dE = \delta Q - \delta W, \qquad \frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$
<b>Entropia</b>	$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta I, \qquad \frac{dS}{dt} = \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{I}$

# Leis de Conservação – Volume de Controle

<b>Massa</b>	$\frac{dm}{dt} = (\dot{m})_{saíndo} - (\dot{m})_{entrando}$
<b>Movimento</b>	$\sum \vec{F}_{VC} = (\dot{m} \vec{v})_{saíndo} - (\dot{m} \vec{v})_{entrando}$
<b>Energia</b>	$\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}} = \left[ h + \frac{v^2}{2} + gz \right]_{saíndo} - \left[ h + \frac{v^2}{2} + gz \right]_{entrando}$
<b>Entropia</b>	$\frac{dS_{VC}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{I} + (s \dot{m})_{entrando} - (s \dot{m})_{saíndo}$

## Seleção de um Volume de Controle









## Seleção de um Volume de Controle

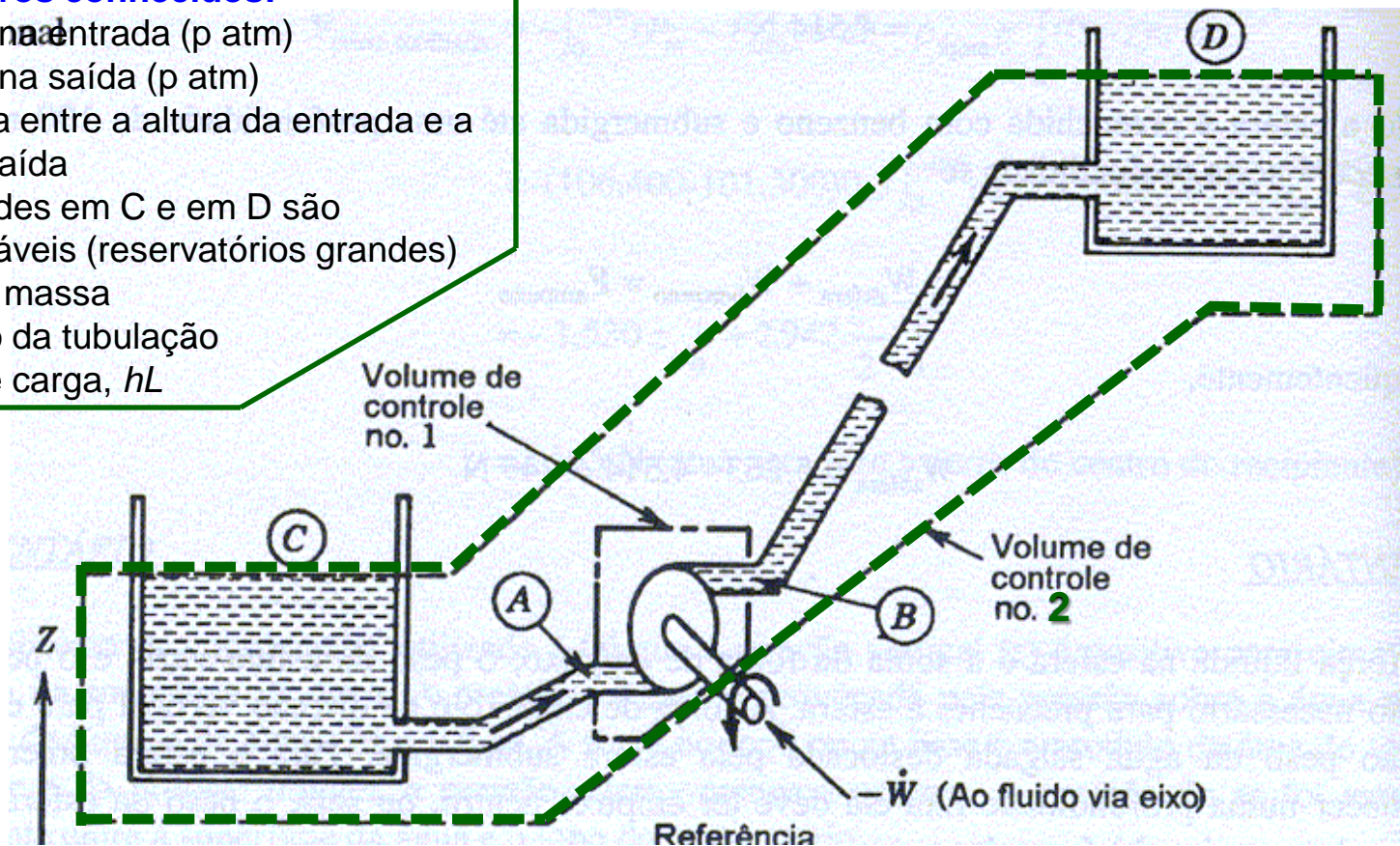
### Volume de Controle 2:

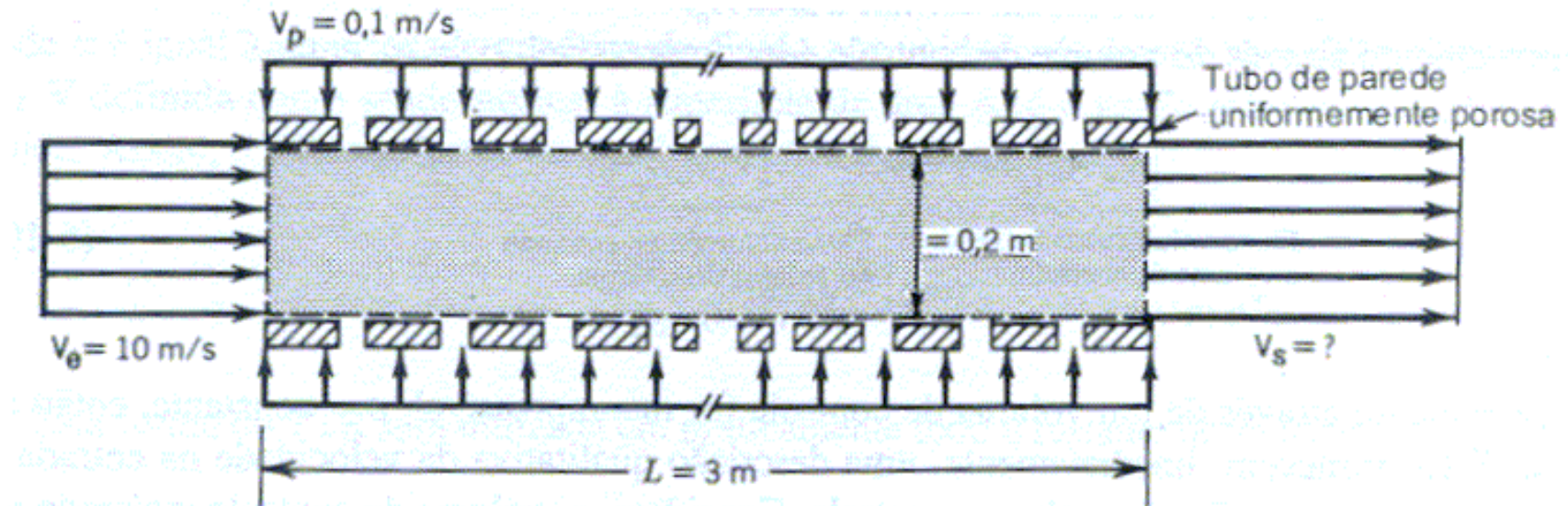
#### ▪ UMA incógnitas:

- Potência (quantidade a ser determinada)

#### ▪ SETE parâmetros conhecidos:

- Pressão na entrada ( $p$  atm)
- Pressão na saída ( $p$  atm)
- Diferença entre a altura da entrada e a altura da saída
- Velocidades em C e em D são negligenciáveis (reservatórios grandes)
- Fluxo de massa
- Diâmetro da tubulação
- Perda de carga,  $h_L$



**Exemplo 5.1****Escoamento de ar através de um tubo c/paredes porosas**

**Dados:**  $p_1 = 101,0\text{ kPa}$ ,  $T_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$   
 $\rho = \text{Constante}$

**Pede-se:**  $v_s = ?$

**Conceitos Necessários:**

- ***Balço de Massa***

***Soluções na lousa e no livro-texto!***



**Exemplo 5.2**

Escoamento através de um sistema de tubulação

Dados:

$$\dot{m}_3 = 0,25 \dot{m}_1$$

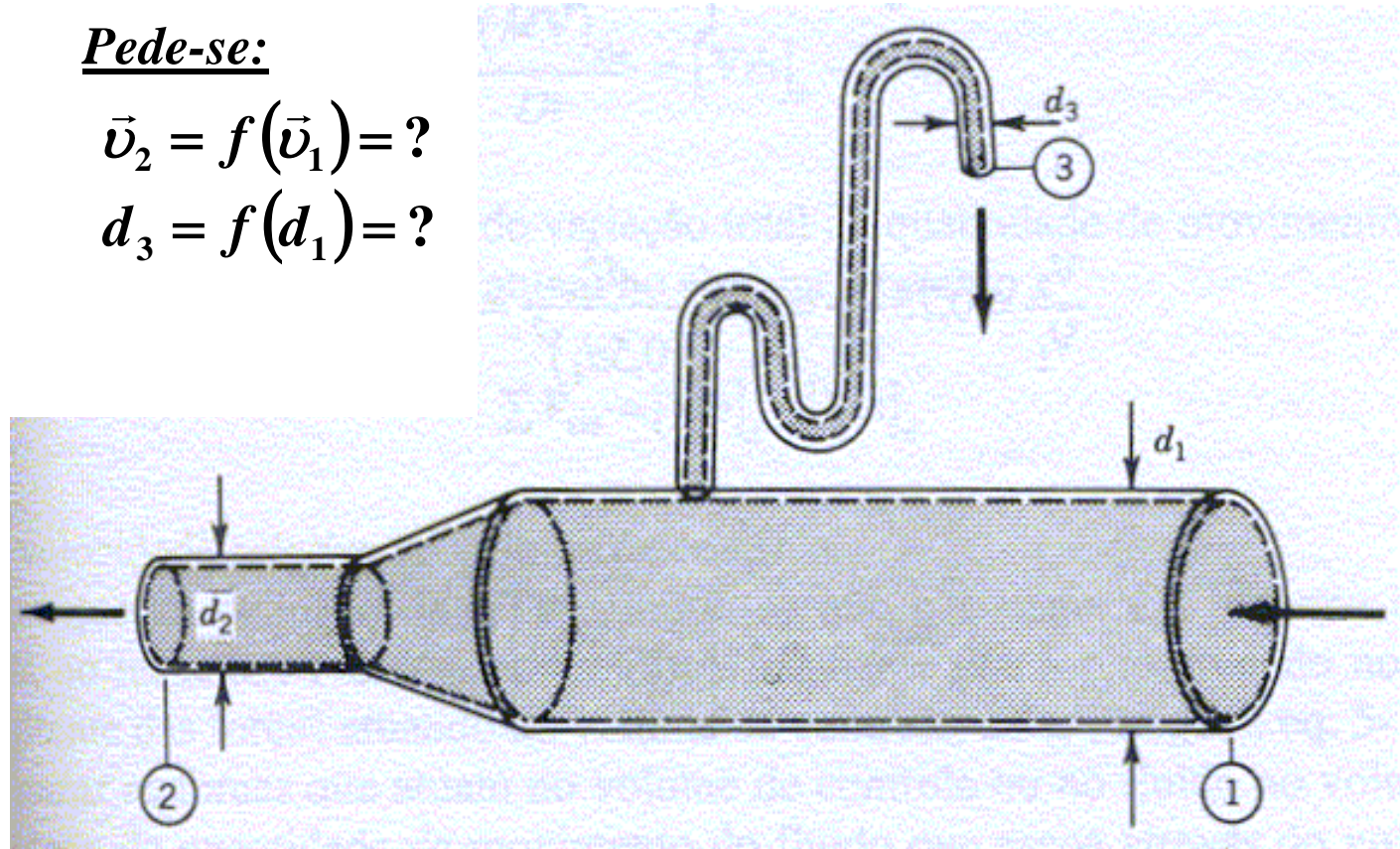
$$d_2 = 0,5 d_1$$

$$\vec{v}_3 = 0,5 \vec{v}_1$$

 $\rho = \text{Constante}$ Pede-se:

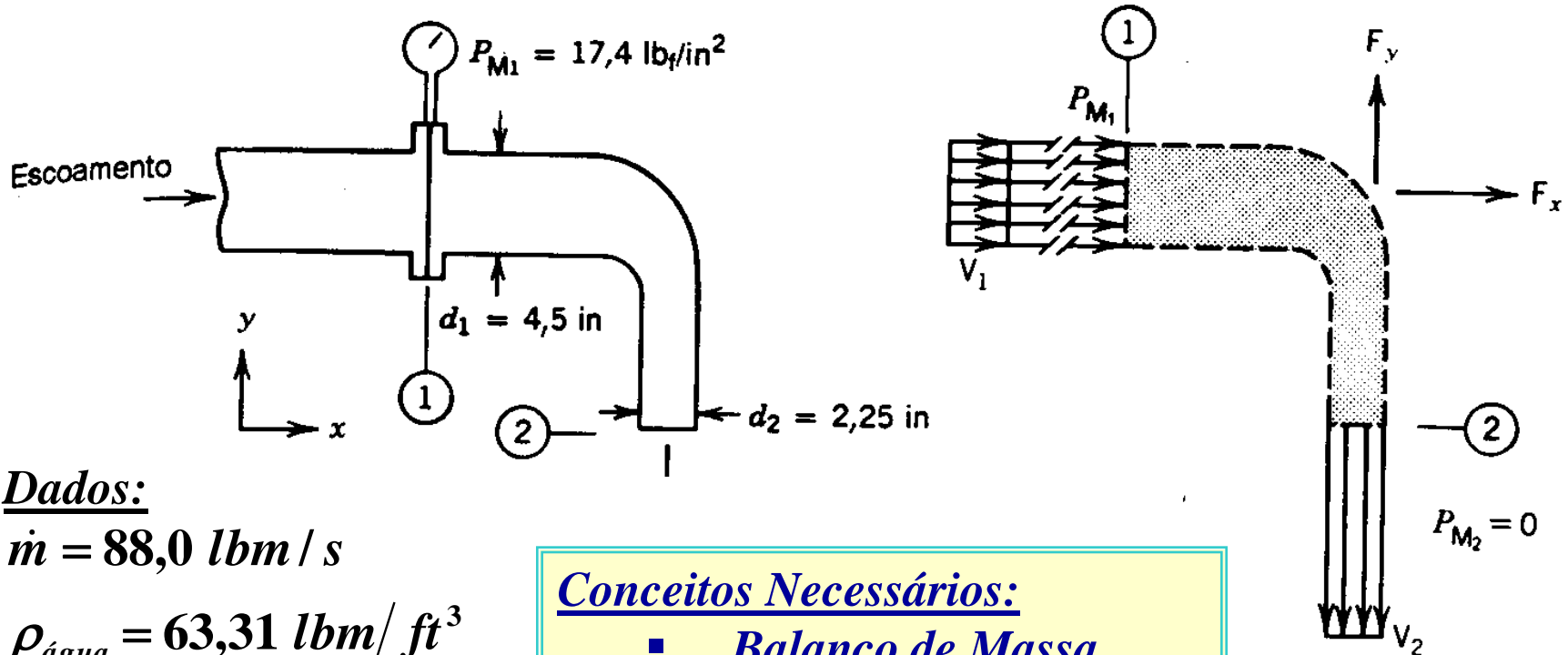
$$\vec{v}_2 = f(\vec{v}_1) = ?$$

$$d_3 = f(d_1) = ?$$

Conceitos Necessários:

- *Balanco de Massa*

*Soluções na lousa e no livro-texto!*

**Exemplo 5.3** Escoamento através de um cotovelo 90°**Dados:**

$$\dot{m} = 88,0 \text{ lbm} / \text{s}$$

$$\rho_{\text{água}} = 63,31 \text{ lbm} / \text{ft}^3$$

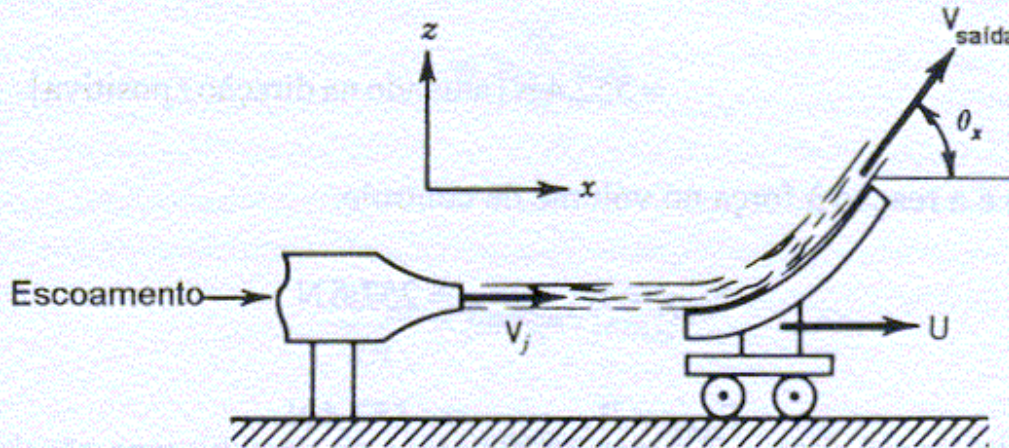
**Pede-se:**

$$F_x = ?, F_y = ?$$

**Conceitos Necessários:**

- *Balanço de Massa*
- *Balanço de Movimento*

***Soluções na lousa e no livro-texto!***

**Exemplo 5.4** Jato de água em anteparo em movimentoDados:

$$\vec{U} = 8 \text{ m/s}$$

$$\rho_{\text{água}} = 998 \text{ kg/m}^3$$

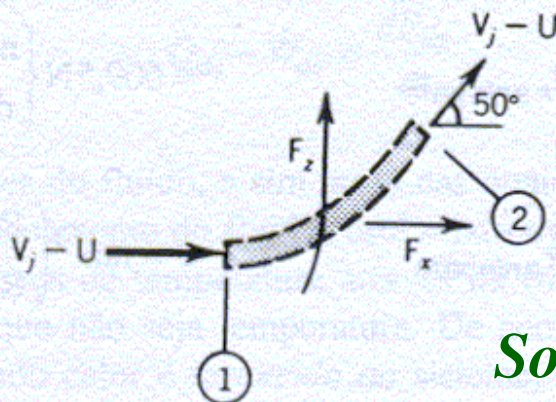
$$V_j = 25 \text{ m/s}$$

$$\theta_x = 50^\circ$$

$$A_{\text{bocal}} = 0,0025 \text{ m}^2$$

Pede-se:

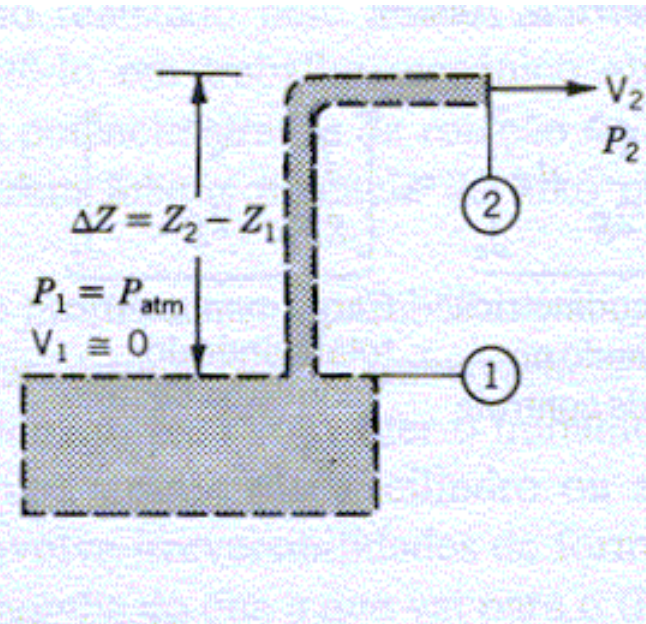
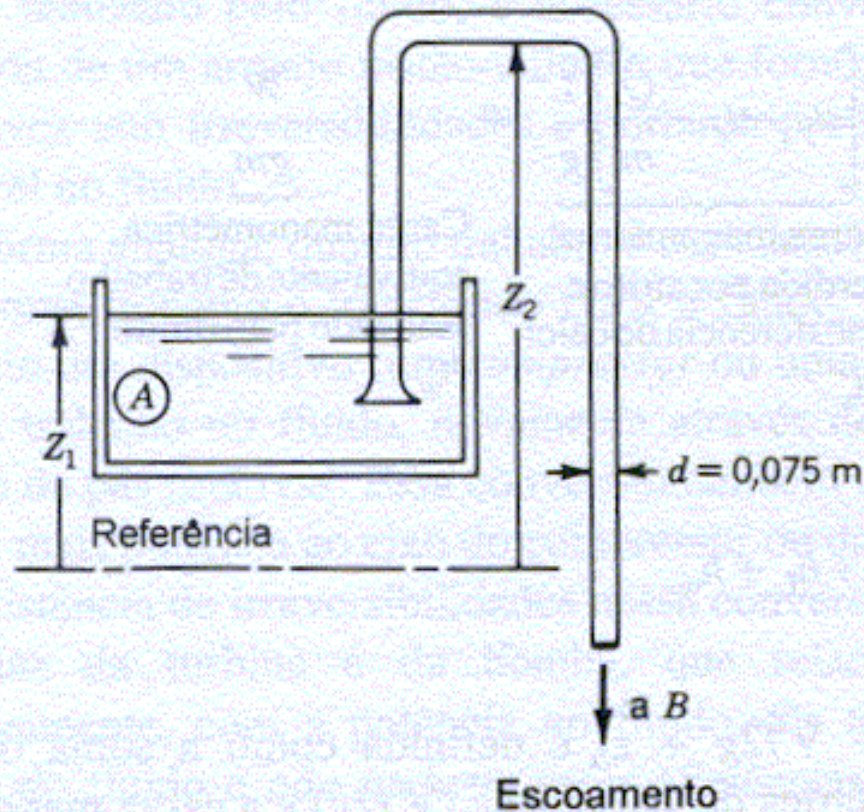
$$\vec{R}_{\text{anteparo}} = ?$$

Conceitos Necessários:

- *Balanço de Massa*
- *Balanço de Movimento*

*Soluções na lousa e no livro-texto!*



**Exemplo 5.5** Sistema de Sifão**Dados:**

$$\dot{V} = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho_{\text{água}} = 998,3 \text{ kg/m}^3$$

$$T = 20^\circ \text{C}$$

$$p_v = 2,339 \text{ kPa}$$

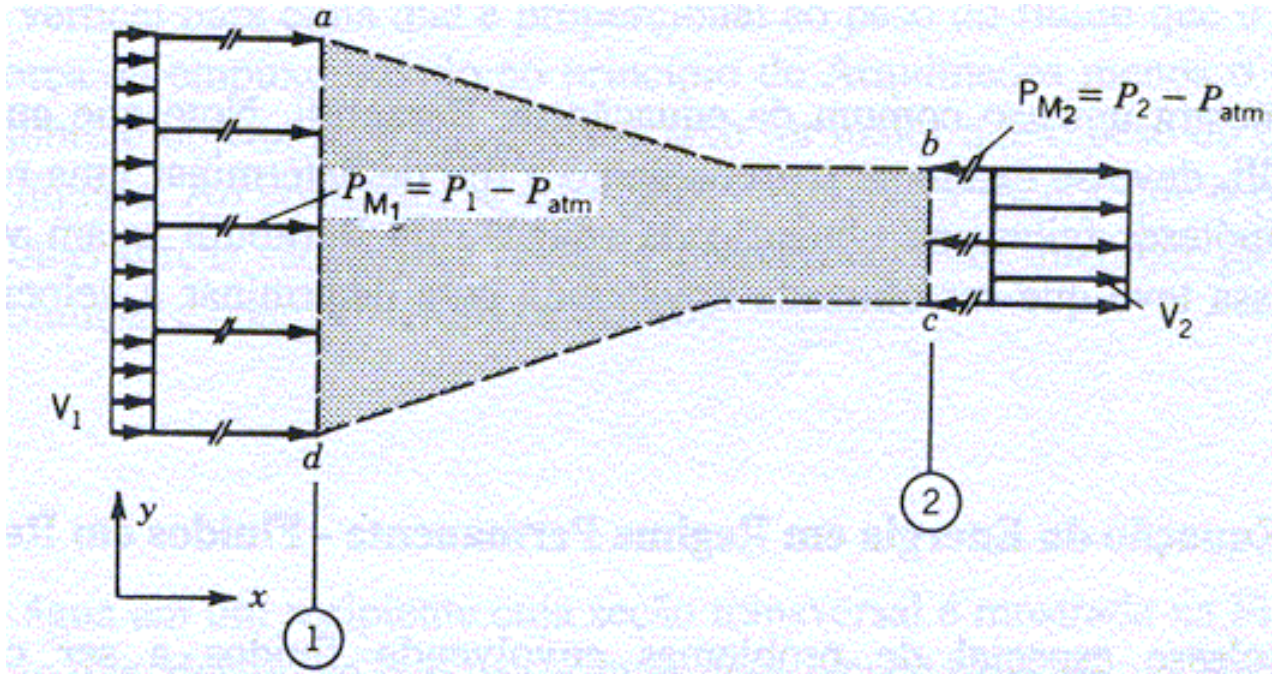
**Pede-se:**

$$\Delta Z = ?$$

**Conceitos Necessários:**

- *Balanco de Massa*
- *Balanco de Energia*

***Soluções na lousa e no livro-texto!***

**Exemplo 5.6** Bocal**Dados:**

$$\dot{m}_{ar} = 2,2 \text{ kg/s}$$

$$p_2 = p_{atm} = 101 \text{ kPa}$$

$$A_1 = 0,15 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,03 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$$

**Pede-se:**

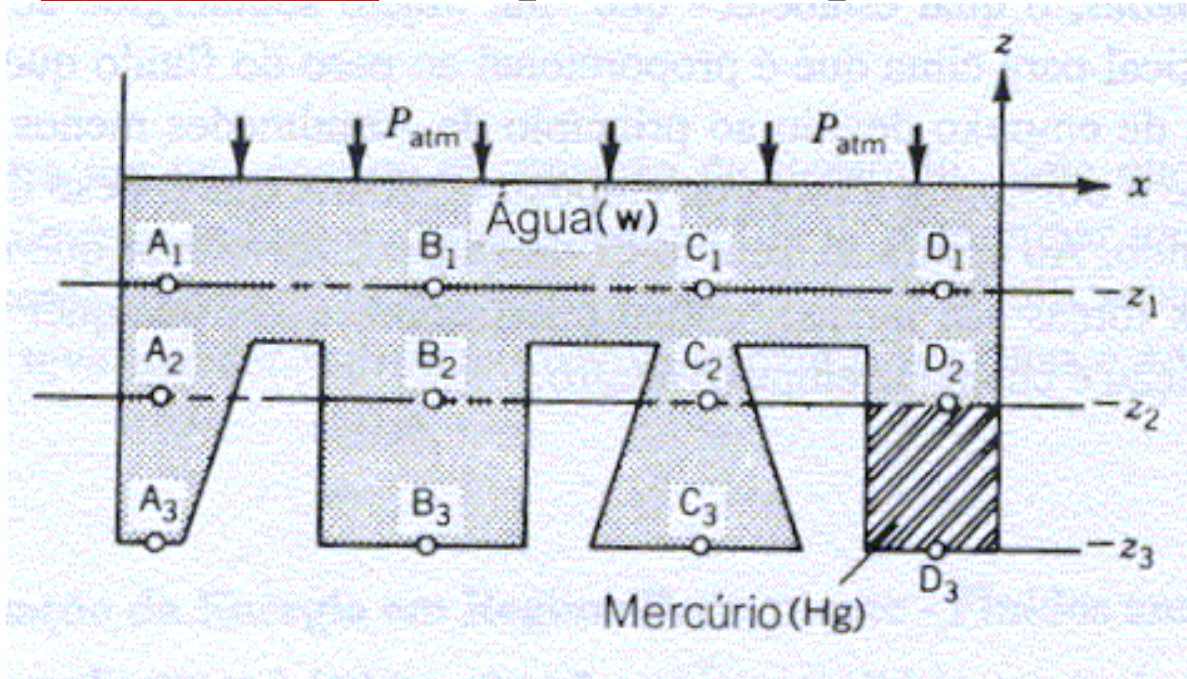
$$p_{M1} = ?$$

**Conceitos Necessários:**

- Balanço de Massa
- Balanço de Energia

*Soluções na lousa e  
no livro-texto!*



**Exemplo 5.7** Líquido em repousoDados:

$$\rho_{Hg} = 13,55 \rho_{\text{água}}$$

Pede-se:

pressões = ?

Conceitos Necessários:

- Balanço de Energia

*Soluções na lousa e  
no livro-texto!*



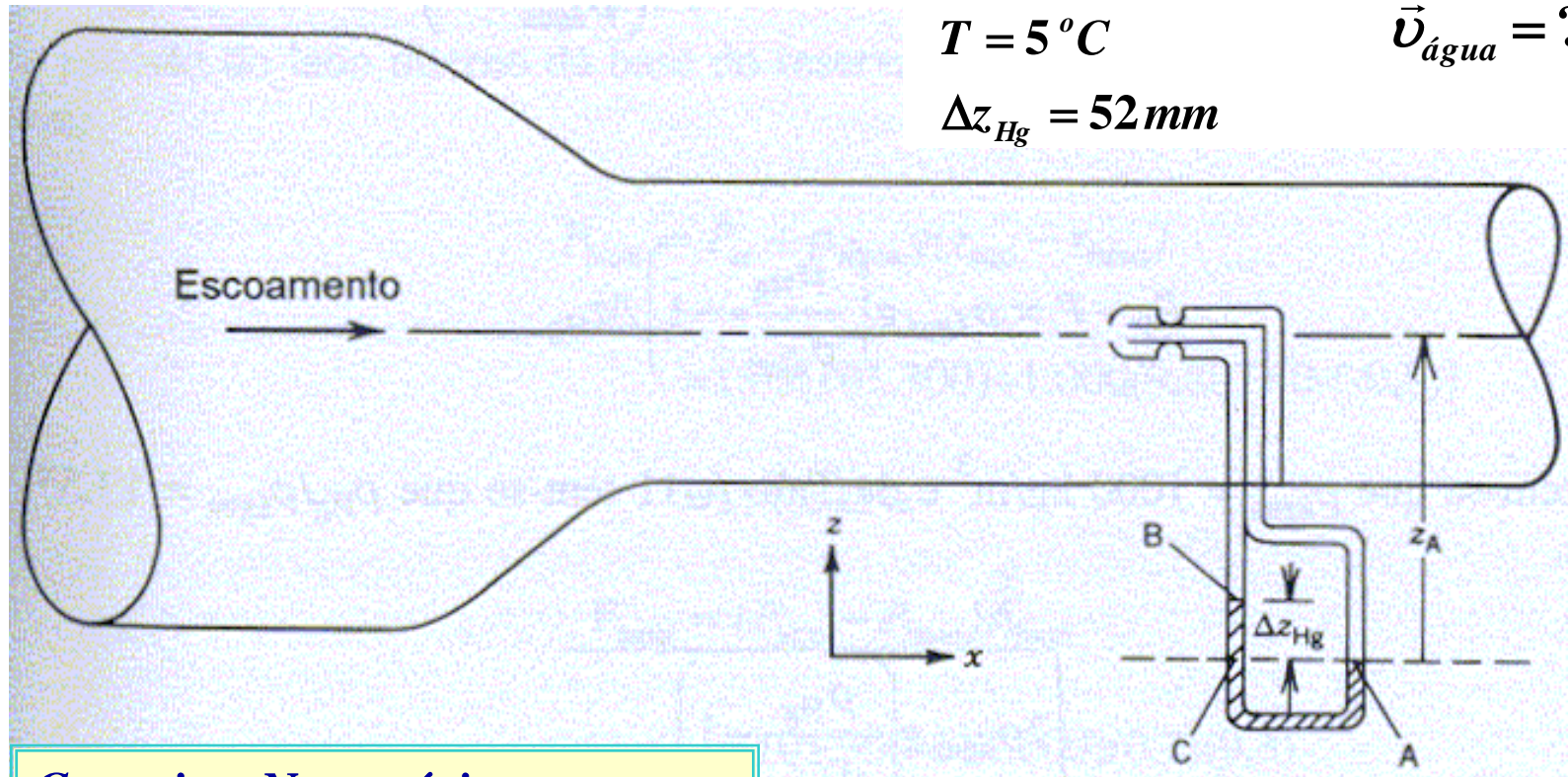
**Exemplo 5.8** Tubo de Pitot**Dados:**

$$T = 5^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta z_{\text{Hg}} = 52\text{ mm}$$

**Pede-se:**

$$\vec{U}_{\text{água}} = ?$$

**Conceitos Necessários:**

- *Balanço de Massa*
- *Balanço de Energia*

*Soluções na lousa e  
no livro-texto!*

## Aula 10

**Livro Texto:**

- Schmidt, F. W., Henderson, R. E., Wolgemuth, C. H., "Introduction to Thermal Sciences - Thermodynamics, Fluid Dynamics, Heat Transfer", John Wiley, 1993.
- Schmidt, F. W., Henderson, R. E., Wolgemuth, C. H., "Introdução às Ciências Térmicas", Editora Edgar Blücher Ltda, 1996. **Cap. 2. Itens 2.1 a 2.9.**

**Outros livros sobre o assunto:**

- Moran, Shapiro, Munson and Dewitt, "Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos", LTC, 2005
- Potter and Scott, "Ciências Térmicas: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transmissão de Calor", Thomson, 2007
- Turner and Cengel, "Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences", McGraw Hill, 2004
- Sissom and Pitts, "Fenômenos de Transporte", LTC, 1979
- Livenspiel, O., "Termodinâmica Amistosa para Engenheiros", Editora Edgar Blucher Ltda, 2002.
- Fox and McDonald, "Introdução à Mecânica dos Fluidos", 5ed, LTC editora, 1998.
- Incropera and DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed, John Wiley, 1996.
- Çengel and Boles, "Thermodynamics: an Engineering Approach", 4th ed, McGraw Hill 2002.