

**INSTITUTO FEDERAL**

Sertão Pernambucano

Campus Petrolina Zona Rural

# Aula 18

## Escoamento em canais – elementos geométricos

Prof. José Sebastião Costa de Sousa

Dr. Engenharia Agrícola

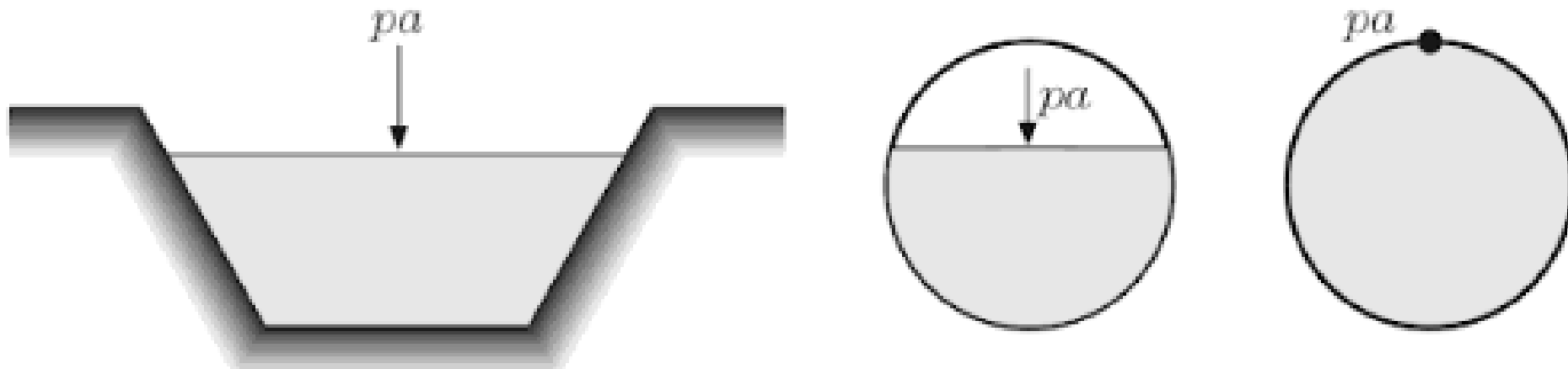
CPZR/IFSertãoPE

# Sumário

- ✓ Conceitos
- ✓ Geometria de canais
- ✓ Classificação do tipo de fluxo
- ✓ Perfil da velocidade de fluxo no canal
- ✓ Carga específica

# Condução livre

- Também chamada de condução por gravidade, ou canais, tem como característica principal a presença da **pressão atmosférica** atuando sobre a superfície livre do líquido.

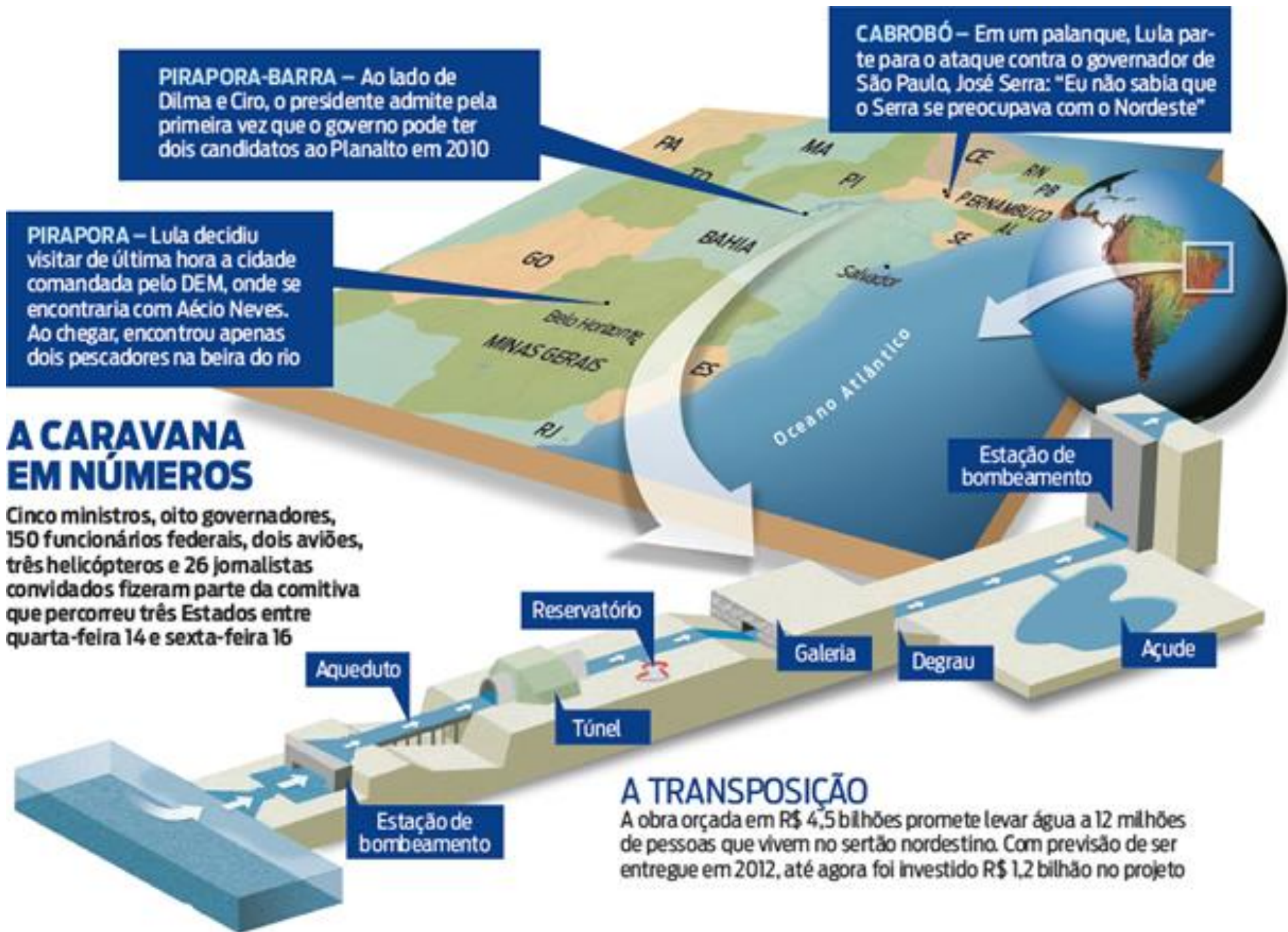


Fonte: Azevedo Netto – Manual de Hidráulica , Vol. 9.

- Podem ser naturais (rios, etc.) ou artificiais (drenos, etc.).
- Denominam-se **prismáticos** quando a seção transv. e a declividade são constante.

# Transposição do rio São Francisco

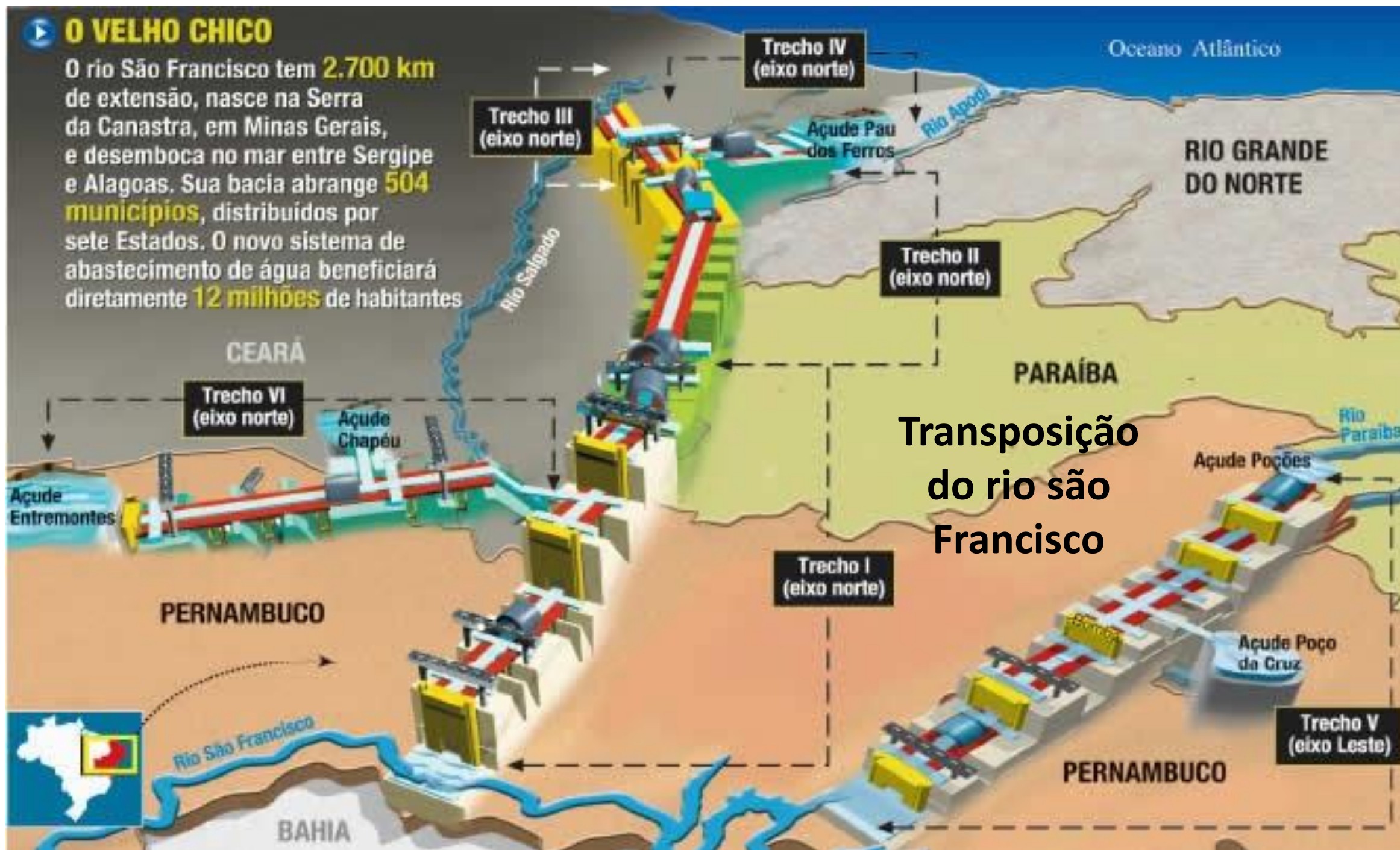
<https://manuelzaovaiascola.wordpress.com/2014/02/24/transposicao-do-rio-sao-francisco-em-30-imagens/>





## O VELHO CHICO

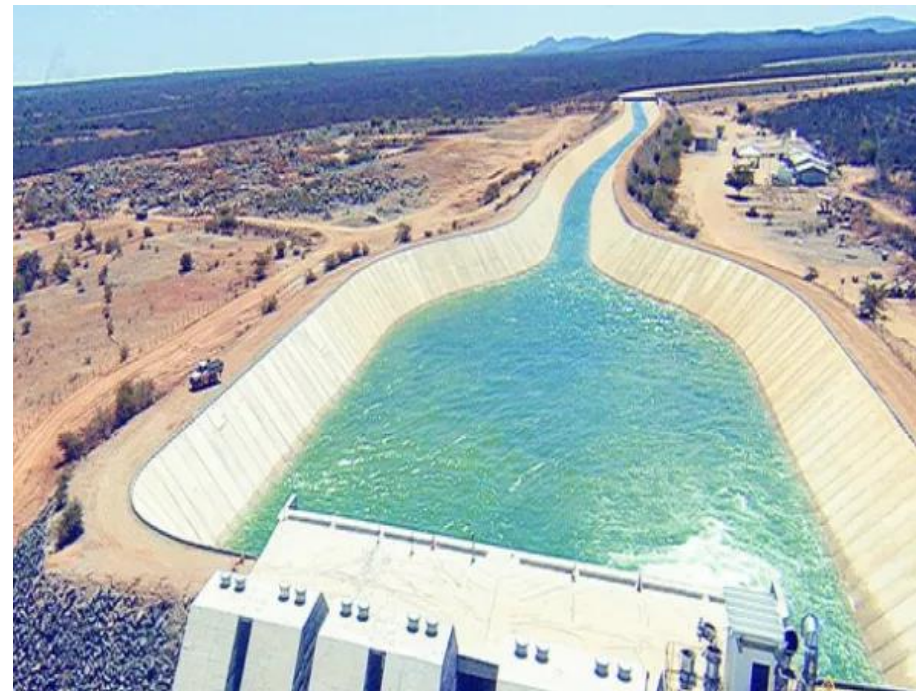
O rio São Francisco tem **2.700 km** de extensão, nasce na Serra da Canastra, em Minas Gerais, e desemboca no mar entre Sergipe e Alagoas. Sua bacia abrange **504 municípios**, distribuídos por sete Estados. O novo sistema de abastecimento de água beneficiará diretamente **12 milhões** de habitantes



Transposição  
do rio São  
Francisco



# Transposição do rio São Francisco



Fontes: Diversas  
cnnbrasil.com









## Aqueduto Romano no Mediterrâneo, do sec III d.c.

[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1888933/mod\\_resource/content/2/Hidr%C3%A1ulica2.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1888933/mod_resource/content/2/Hidr%C3%A1ulica2.pdf)

### Aquedutos do PISNC Petrolina



Fontes: Diversas





Canal prismático – seção transversal igual em toda a extensão do canal.



Estrutura para bombeamento flutuante do  
PISNC



Quedas para  
dissipar energia





# Comportas

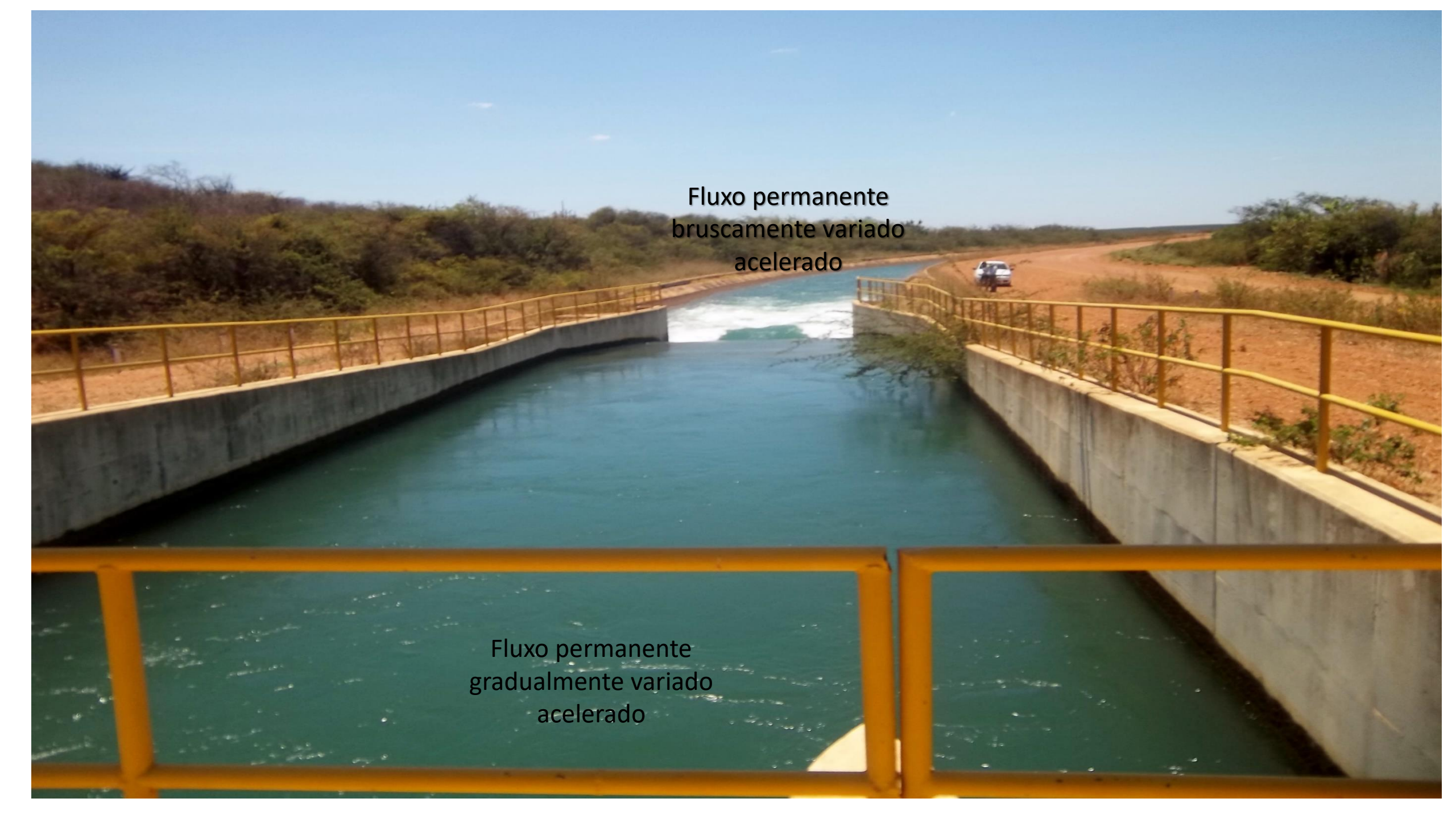




Comportas







Fluxo permanente  
bruscamente variado  
acelerado

Fluxo permanente  
gradualmente variado  
acelerado





Ressalto hidráulico  
Fluxo bruscamente variado

# Tipos de escoamento nos canais

1 - PERMANENTE (**vazão constante**); 2 – NÃO PERMANENTE (**não será estudado neste curso**).

1.1 Uniforme (**velocidade e declividade constante**);

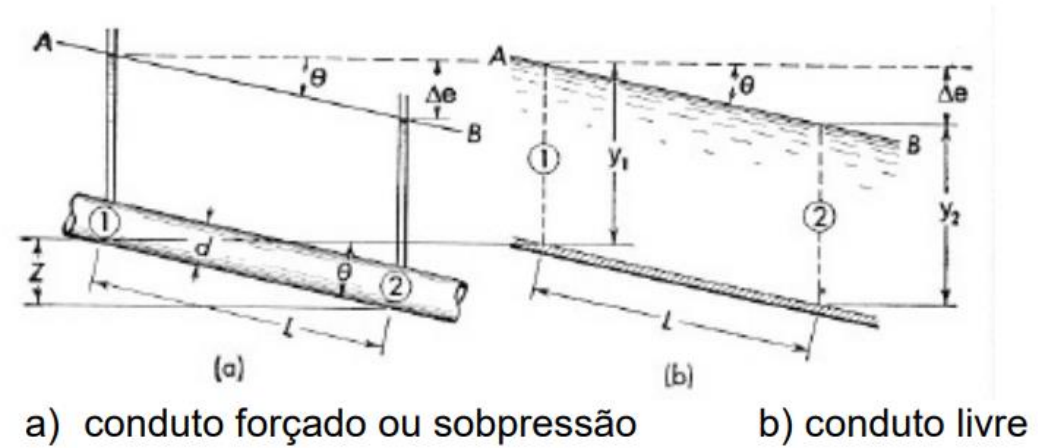
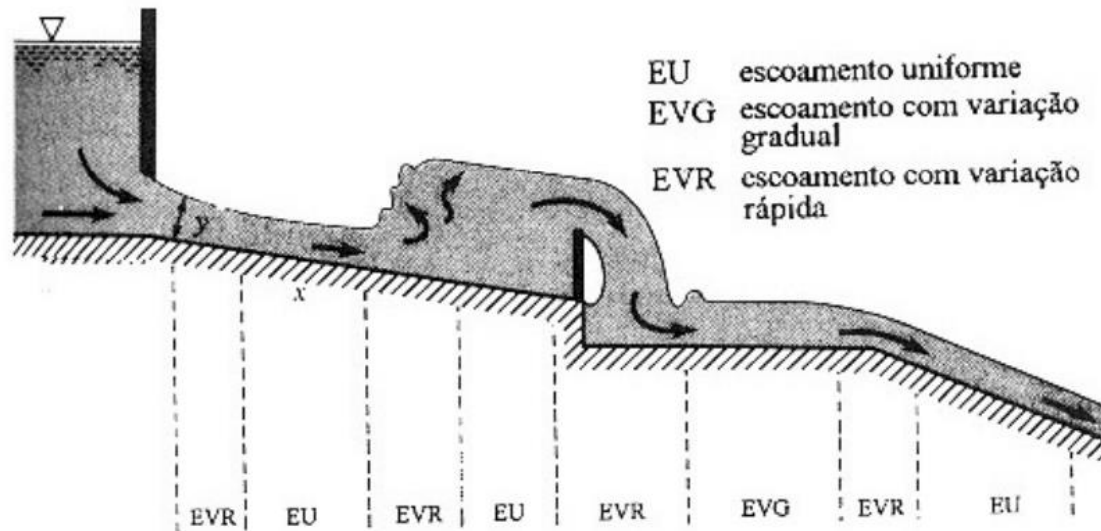
1.2 Variável (**velocidade se altera**):

1.2.1 Acelerado ou Retardado, sendo gradual ou bruscamente variado.





- [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/188893/3/mod\\_resource/content/2/Hidr%C3%A1ulica2.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/188893/3/mod_resource/content/2/Hidr%C3%A1ulica2.pdf)



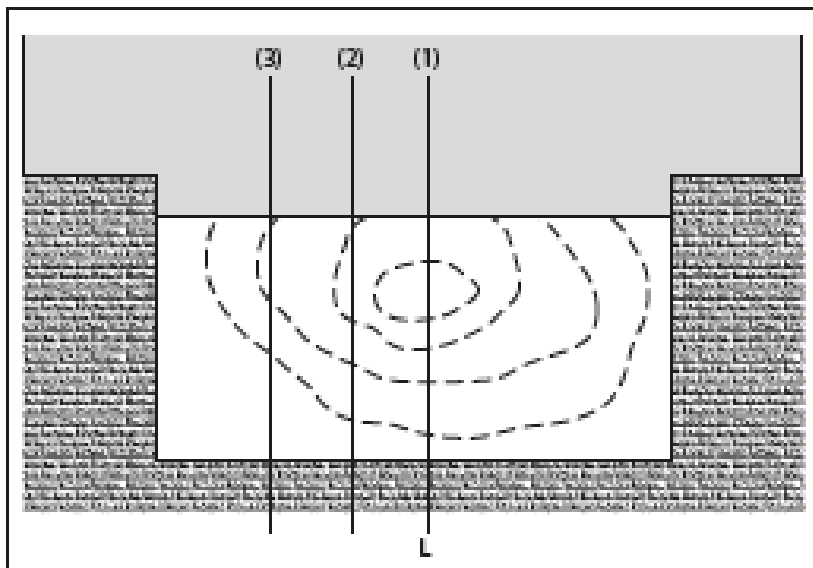


Figura A-14.2.3-a – Curvas isotáquicas em seção transversal de canal onde  $v_1 > v_2 > v_3$ .

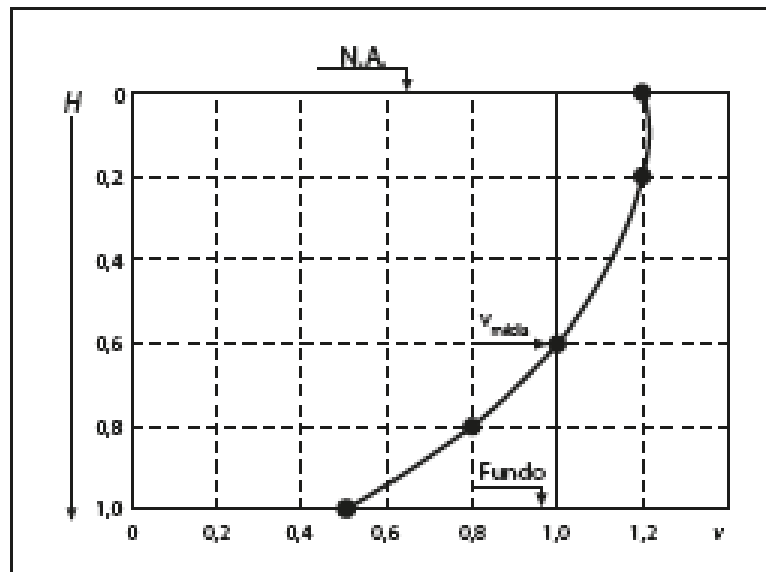


Figura A-14.2.3-d – Diagrama de variação da velocidade com a profundidade de um canal.

## Distribuição das velocidades nos canais

As *velocidades são maiores no centro da massa líquida, tornando-se nula no fundo do canal. Devido a resistência do ar a velocidade superficial é pouco menor do que a de camadas inferiores.*

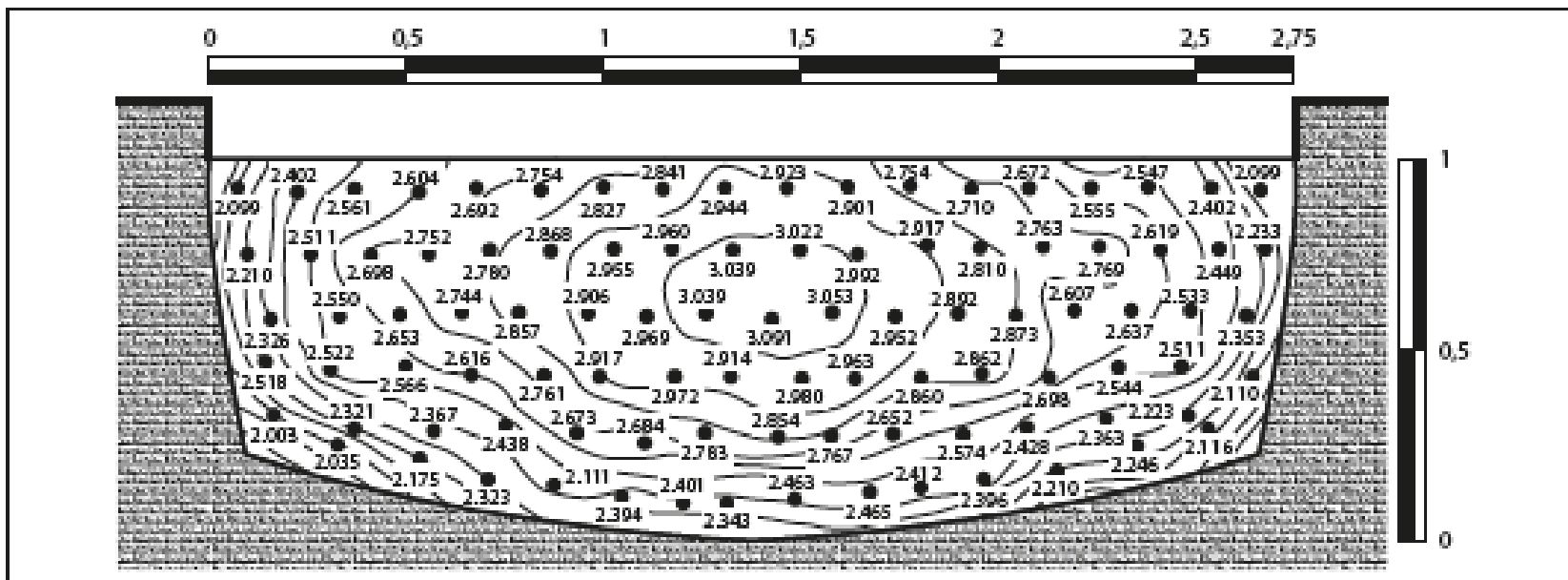


Figura A-14.2.3-b – Exemplo de curvas isotáquicas em seção transversal de canal, com as velocidades em m/s.



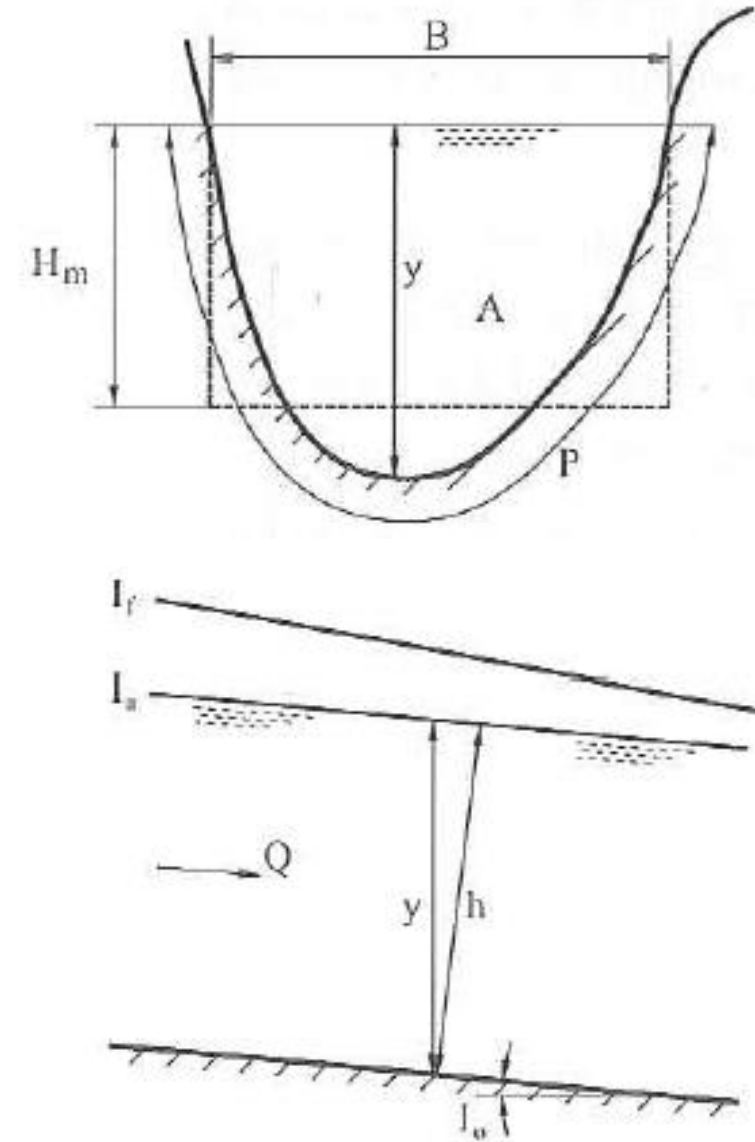
# Limites práticos de velocidades em canais

Fonte de consulta: Azevedo Netto - Manual de Hidráulica, Vol. 8, pg. 412.

| Limite inferior p/evitar deposição |         | Limite superior p/ evitar erosão |         |
|------------------------------------|---------|----------------------------------|---------|
| Tipos de água                      | V (m/s) | Tipos de canais                  | V (m/s) |
| Com suspensão fina                 | 0,30    | Arenosos                         | 0,30    |
| Carregando areia fina              | 0,45    | Saibro                           | 0,40    |
| De esgoto                          | 0,60    | Seixos                           | 0,80    |
| Pluviais                           | 0,75    | Aglomerados consist.             | 2,00    |
|                                    |         | Alvenaria                        | 2,50    |
|                                    |         | Em rocha ou concreto             | 4,00    |
| Valor prático V = 0,80 m/s         |         |                                  |         |

# Elementos geométricos dos canais

- ✓ Área da seção transversal de fluxo ( $A$ ) – área de fluxo;
- ✓ Perímetro molhado ( $P$ ) – soma dos taludes e base do canal;
- ✓ Raio hidráulico ( $R_h$ ) – razão entre área e perímetro molhado;
- ✓ Altura ou tirante d'água ( $Y$ ) – maior profundidade do canal;
- ✓ Altura de escoamento ( $h$ ) – profundidade perpendicular ao fundo do canal, ou carga hidráulica de escoamento;
- ✓ Largura do topo ( $B$ ) – largura da superfície livre da água;
- ✓ Largura do canal ou da base ( $b$ ) – largura da base;
- ✓ Altura hidráulica ou altura média ( $H_m$ ) – razão entre a área molhada e a largura do topo ( $H_m = A/B$ ).
- ✓ Declividade de fundo ( $l_o$ ) – declividade longitudinal do canal; em geral podem ser expressas por  $l_o \approx \text{tg } \alpha \approx \text{sen } \alpha$  ( $\alpha < 5^\circ$ )
- ✓ Declividade piezométrica ou da linha d'água ( $l_a$ ) e da linha de energia ( $l_f$ ).





# Geometria de canais (ou elementos geométricos)

- Seção transversal de fluxo – comumente trapezoidal;

Onde:

B – largura de topo do canal, m.

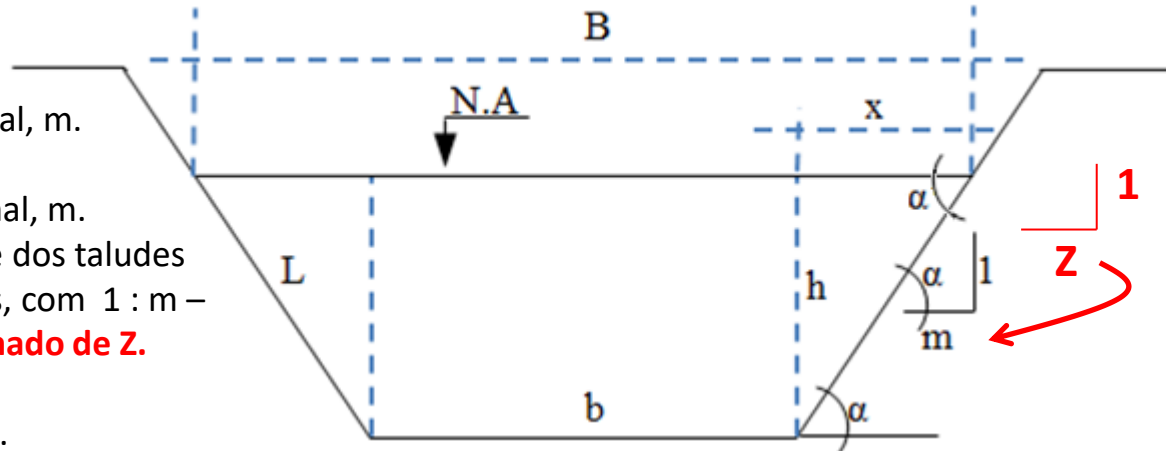
b – base do canal, m.

h – carga hidráulica no canal, m.

**m** – inverso da declividade dos taludes ( $\alpha$  – inclinação dos taludes, com 1 : m – vertical : horizontal), **chamado de Z**.

A – área molhada, m<sup>2</sup>.

P – perímetro molhado, m.



## Deduções

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{m} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{x} \quad \frac{1}{m} = \frac{h}{x}$$

$$x = h \cdot m$$

$$A = \frac{(B + b)}{2} \times h$$

$$B = b + 2 \cdot h \cdot m$$

$$A = \frac{(b + 2 \cdot h \cdot m + b)}{2} \times h$$

$$A = \frac{(2 \cdot b + 2 \cdot h \cdot m)}{2} \times h$$

- Área molhada** – área útil de escoamento;



$$A = b \cdot h + m \cdot h^2$$

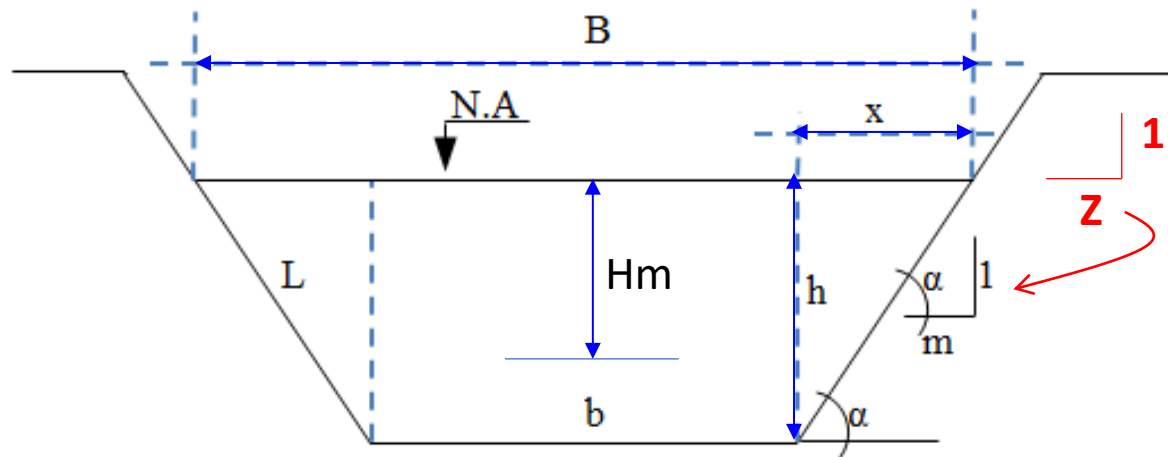
- Perímetro molhado** – linha que limita a área molhada as paredes do canal. Não abrange a superfície livre.



$$P = b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{(1 + m^2)}$$

# Equações básicas de canais

- **Seção transversal** de fluxo – comumente trapezoidal



$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{m}$$

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{h}{x}$$

$$x = h \cdot m$$

Em que:

A – área, m<sup>2</sup>.

b – base do canal, m.

B – largura do topo do canal, m.

h – carga hidráulica no canal, m.

**m** – inverso da declividade dos taludes ( $\alpha$  – inclinação dos taludes, com 1:m – vertical:horizontal), **chamado de Z**.

P – perímetro molhado, m.

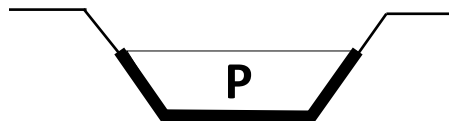
Hm – altura média ou hidráulica, m.

- **Área molhada** – área útil de escoamento;



$$A = b \cdot h + m \cdot h^2$$

- **Perímetro molhado** – linha que limita a área molhada as paredes do canal. Não abrange a superfície livre.



$$P = b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{(1 + m^2)}$$

- **Largura do topo** – B

$$B = b + 2 \cdot h \cdot m$$

- **Altura média** – Hm

$$Hm = \frac{A}{B}$$



# Classificação de fluxo em canais

- **Número de Reynolds (Rey)**

- *Laminar (Rey < 500)*
- *Transitórios (500 < Rey < 2.000)*
- *Turbulento (Rey > 2.000)*

- **Número de Froude (Fr):**

- *Subcrítico ou fluvial (Fr < 1)*
- *Crítico (Fr = 1)*
- *Supercrítico ou torrencial (Fr > 1)*

$$Rey = \frac{4 \cdot V \cdot Rh}{\nu}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{(g \cdot H_m)}}$$

Em que:

*V* – velocidade, m/s;

*Rh* – raio hidráulico, m;

*ν* – viscosidade cinemática, m<sup>2</sup>/s;

*g* – acel. grav., m/s<sup>2</sup>;

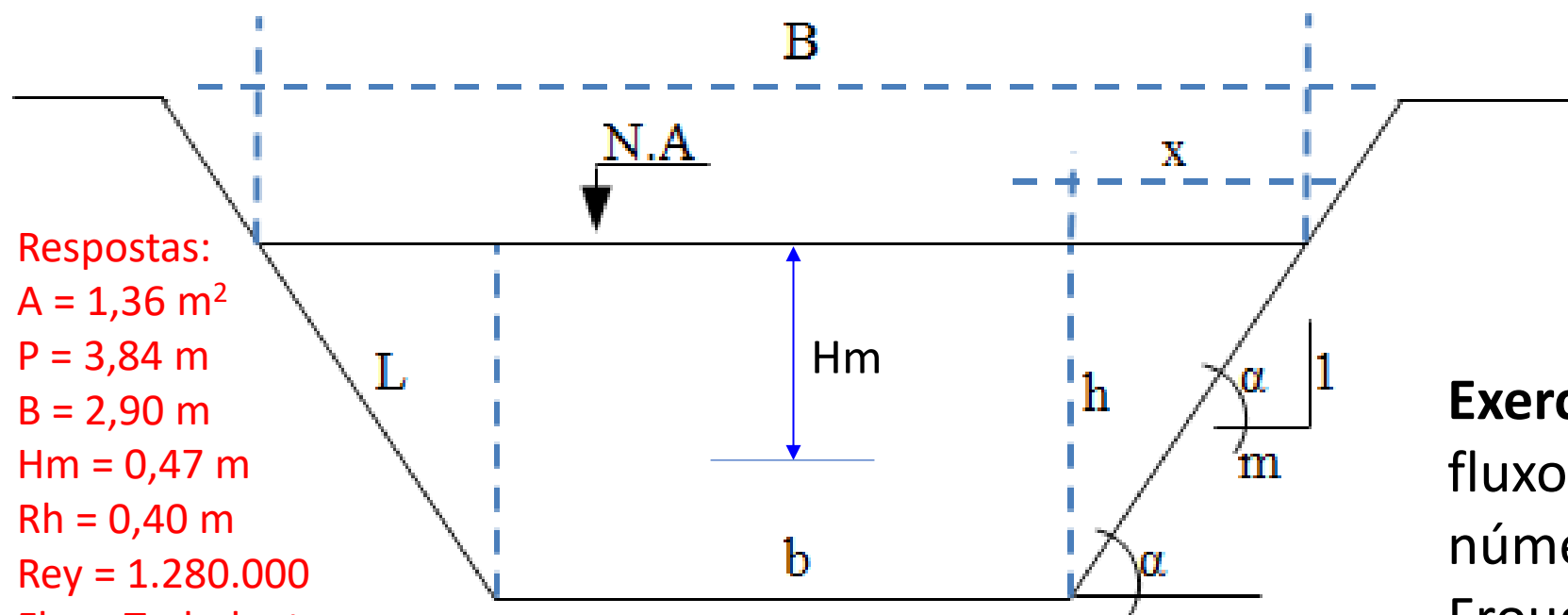
*H<sub>m</sub>* – altura média ou hidráulica, m. *H<sub>m</sub>* = *A*/*B*

*A* – área da seção transversal de fluxo, m<sup>2</sup>;

*B* – largura do topo do canal, m

# Exercícios

**Exercício 1** – Determinar a Área, o Perímetro molhado, a Largura do topo e a Altura hidráulica para um canal com taludes inclinados 1:1,5, carga hidráulica de 0,80 m e base inferior de 0,50 m.



Respostas:

$$A = 1,36 \text{ m}^2$$

$$P = 3,84 \text{ m}$$

$$B = 2,90 \text{ m}$$

$$H_m = 0,47 \text{ m}$$

$$R_h = 0,40 \text{ m}$$

$$Re_y = 1.280.000$$

Fluxo Turbulento

$$Fr = 0,37$$

Regime subcrítico (ou fluvial)

**Exercício 2** – classifique o fluxo em função dos números de Reynolds e Froude, para o caso da vazão no canal ser 1.090 L/s.



# Observações sobre a geometria do canal

Com os valores de vazão e velocidades conhecidas a área da seção transversal será determinada a partir da equação da continuidade e as dimensões (b e h) serão obtidas para duas situações:

$$A = b \cdot h + m \cdot h^2$$

- Altura de fluxo fixa (h)
  - A base inferior é obtida de forma linear.
- Base inferior fixa (b)
  - A altura de fluxo é obtida por equação quadrática, Eq. Bhaskara:

$$b = \frac{A - m \cdot h^2}{h}$$

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Para dados geométricos do canal:

$$m \cdot h^2 + b \cdot h - A = 0 \quad \Rightarrow \quad h = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - (4 \cdot m \cdot -A)}}{2 \cdot m}$$

# Classificação de fluxo em canais

- O número de Reynolds é dado por,  $Rey = V \cdot D / \nu$ , para seções circulares. Para outras seções deve-se substituir  $D$  por  $R_h$ :
  - ✓  $R_h = A/P$ ;  $R_h = (\pi \cdot D^2/4)/(\pi \cdot D)$ ;  $R_h = D/4$ . N<sup>o</sup> Reynolds portanto:
  - ✓  $Rey = V \cdot 4 \cdot R_h / \nu$  *para qualquer seção transversal de fluxo.*

- Os escoamentos livres são classificados em:

- Laminar ( $Rey < 500$ )
- Transitório ( $500 < Rey < 2.000$ )
- Turbulento ( $Rey > 2.000$ )

$$Rey = \frac{4 \cdot V \cdot R_h}{\nu}$$

$V$  – velocidade, m/s;  
 $R_h$  – raio hidráulico, m;  
 $\nu$  – viscosidade cinemática do fluido, m<sup>2</sup>/s.

- Outra classificação é feita em função do N<sup>o</sup> de Froude ( $Fr$ ):

- Subcrítico ou fluvial ( $Fr < 1$ )
- Crítico ( $Fr = 1$ )
- Supercrítico ou torrencial ( $Fr > 1$ )

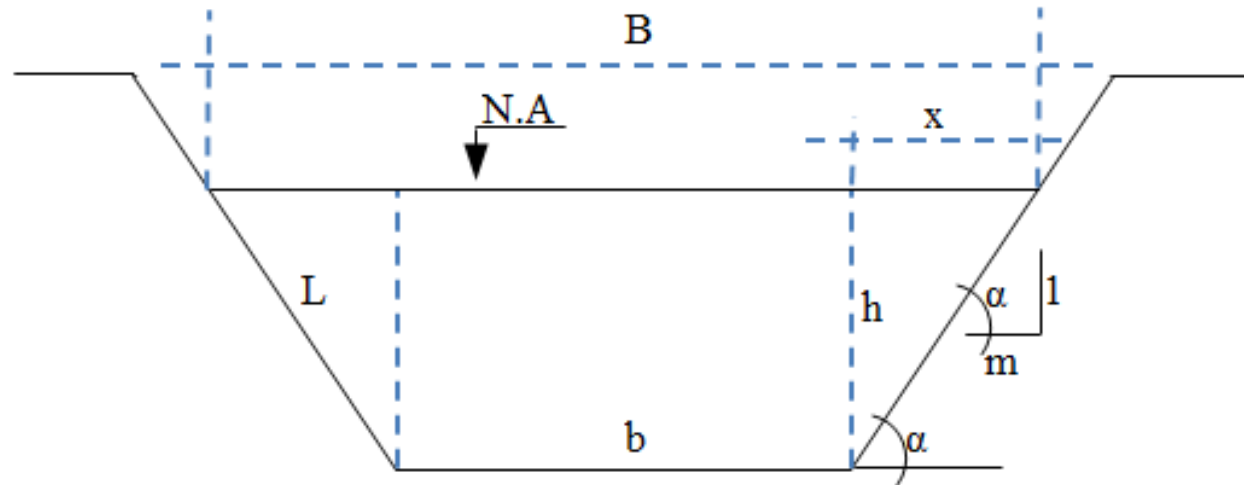
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot H_m}}$$

$V$  – velocidade, m/s;  
 $g$  – acel. grav., m/s<sup>2</sup>;  
 $H_m$  – profundidade hidráulica, m.  
Lembrando:  $H_m = A/B$



# Exercícios

**Exercício 1** – Determinar o raio hidráulico de um canal trapezoidal com taludes inclinados 1:1,50 que conduz 400 L/s de água limpa a uma velocidade de fluxo de 0,80 m/s e base inferior de 50 cm.

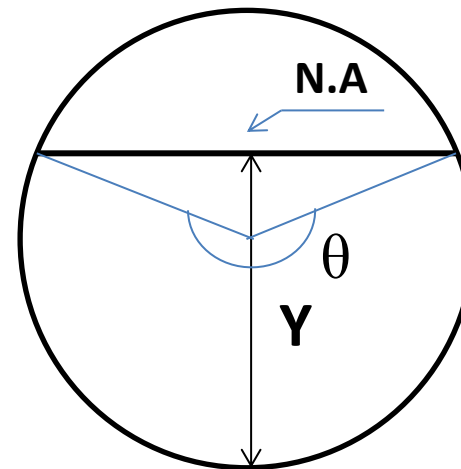
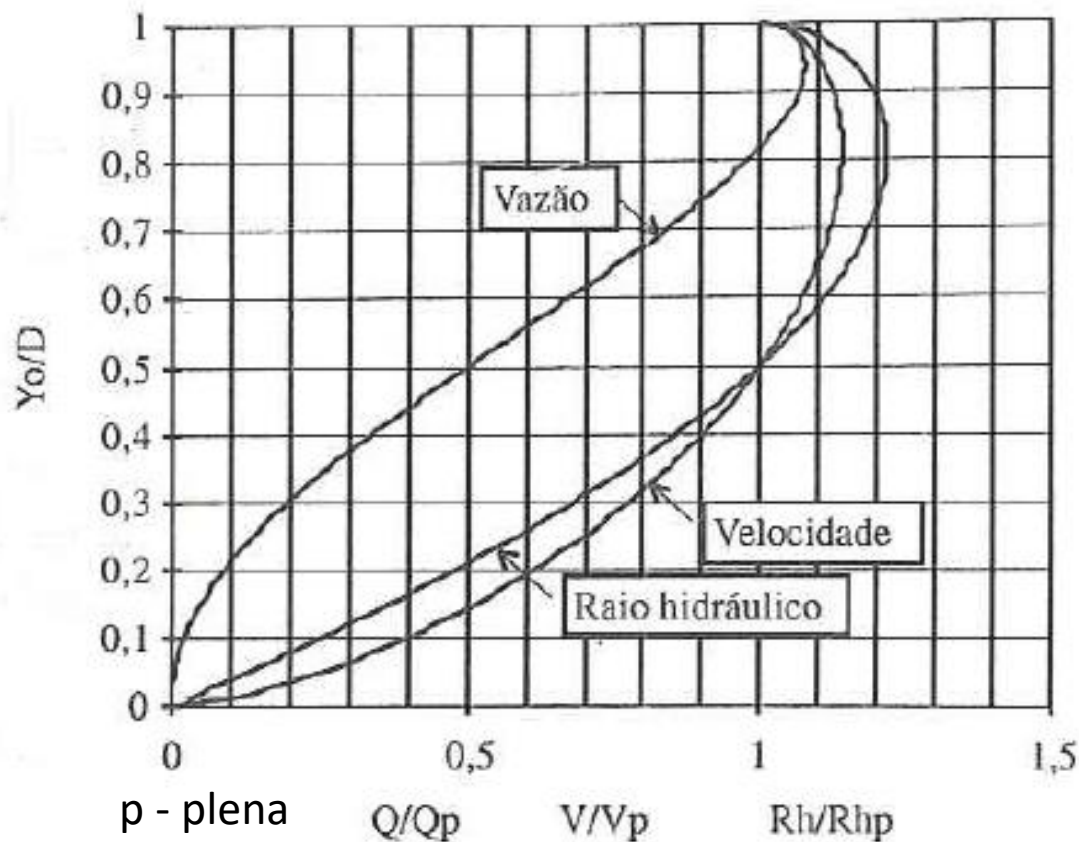


**Exercício 2** – Classifique os tipos de fluxo do exercício 1 ( $n^{\circ}$  Reynolds e  $n^{\circ}$  Froude) para velocidades de fluxo de 0,2; 0,6; 0,8 e 1,6 m/s.

# Canais circulares

- Nestes a velocidade máxima de fluxo ocorre para  $Y = 0,81 D$ , ou seja, acima da meia seção; Já a vazão é maximizada quando  $Y = 0,95 D$ .

Fonte: Porto, 2006 – Hidráulica Básica, 4ª Ed.



$$Y = D * [1 - (\cos \theta) / 2] / 2$$

$$\theta = 2 \cos^{-1}(1 - 2 * Y / D)$$

$$A = D^2 * (\theta - \text{sen} \theta) / 8 \quad \theta \text{ em rad}$$

$$P = D * \theta / 2$$

$$B = D * \text{sen}(\theta / 2)$$

Fonte: Porto, 2006  
– Hidráulica Básica,  
4ª Ed. Pg. 250-251.

Figura 8.7 Elementos hidráulicos da seção circular.



# Canais de seção irregular - siameses

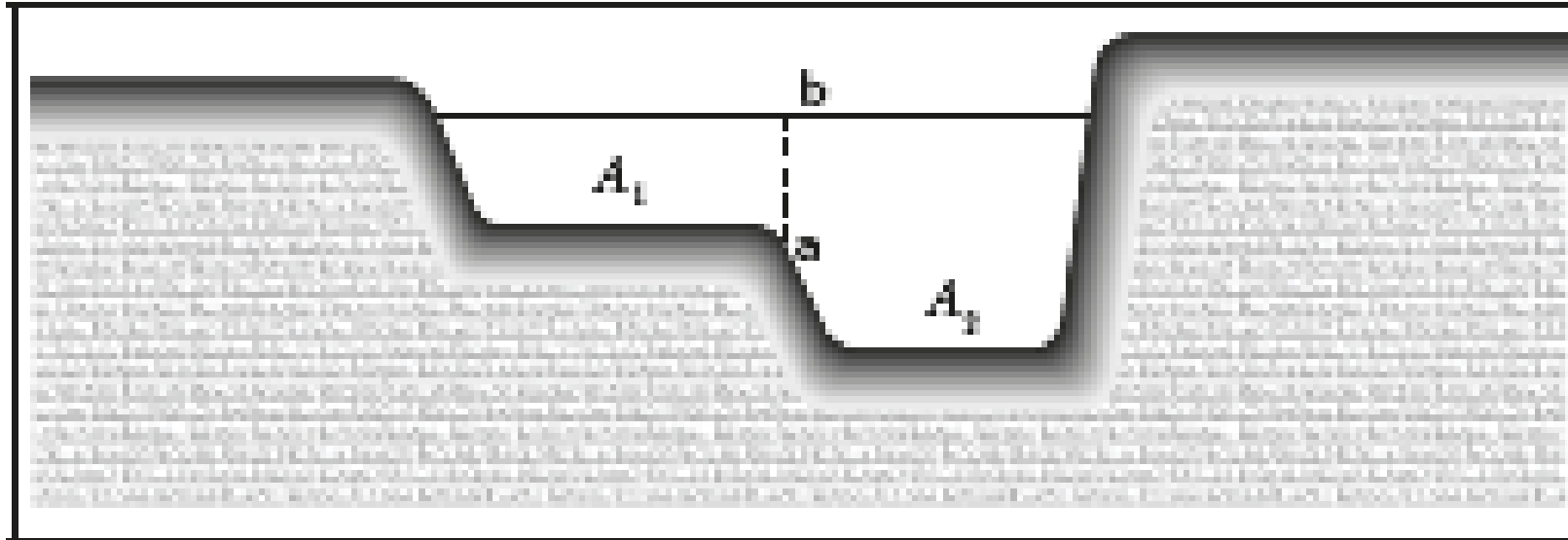
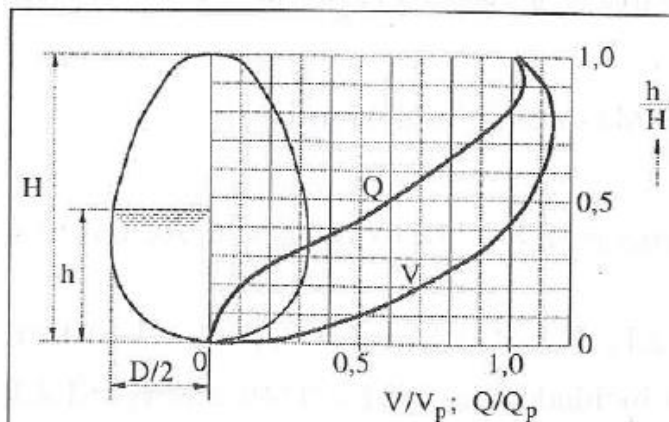


Figura A-14.4.5.1-a – Canais siameses. Fonte: Azevedo Netto – Manual de Hidráulica , Vol. 9.

- Deve-se dividir o canal em duas partes e calcular  $A_1$  e  $A_2$ .
- Para o perímetro molhado não se deve considerar a linha, imaginária, a-b.

# Seções especiais



## OVAL NORMAL INVERTIDO

Valores para a seção plena:

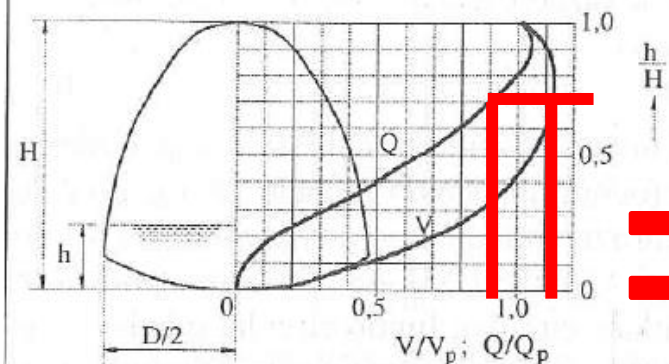
$$D = 0,667 H$$

$$H = 1,5 D$$

$$A_p = 1,149 D^2 = 0,511 H^2$$

$$P_p = 3,965 D = 2,643 H$$

$$R_{hp} = 0,289 D = 0,193 H$$



## CAPACETE

Valores para a seção plena:

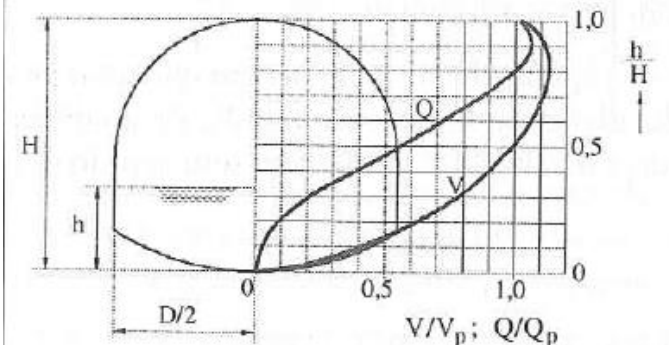
$$D = 0,88 H$$

$$H = 1,13 D$$

$$A_p = 0,847 D^2 = 0,656 H^2$$

$$P_p = 3,441 D = 3,028 H$$

$$R_{hp} = 0,246 D = 0,216 H$$



## ARCO DE CÍRCULO ALTO

Valores para a seção plena:

$$D = 1,13 H$$

$$H = 0,88 D$$

$$A_p = 0,734 D^2 = 0,937 H^2$$

$$P_p = 3,118 D = 3,523 H$$

$$R_{hp} = 0,235 D = 0,267 H$$

## EXEMPLO 8.5

Determine a capacidade de vazão de uma galeria em concreto em boas condições, com seção capacete, funcionando com uma lâmina d'água igual a  $h = 0,70 H$ , em que  $H$  é a altura interna da seção. "Diâmetro" da seção igual a 1,80 m e declividade de fundo  $I_o = 0,15\%$ . Calcule a velocidade média.

Na Tabela 8.5, tira-se o valor do coeficiente de rugosidade,  $n = 0,014$ .

Na Figura 8.8 para a seção capacete, a área molhada e o raio hidráulico na seção plena valem, respectivamente:

$$A_p = 0,847 D^2 = 0,847 \cdot 1,80^2 = 2,744 \text{ m}^2$$

$$R_{hp} = 0,246 D = 0,246 \cdot 1,80 = 0,443 \text{ m}$$

Da fórmula de Manning, calcula-se a vazão à seção plena:

$$Q_p = \frac{\sqrt{I_o}}{n} A_p R_{hp}^{2/3} = \frac{\sqrt{0,0015}}{0,014} 2,744 \cdot 0,443^{2/3} = 4,41 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tema da próxima aula

Do gráfico da Figura 8.8 para  $h/H = 0,70 \rightarrow Q/Q_p = 0,90$ , daí  $Q = 3,97 \text{ m}^3/\text{s}$ .

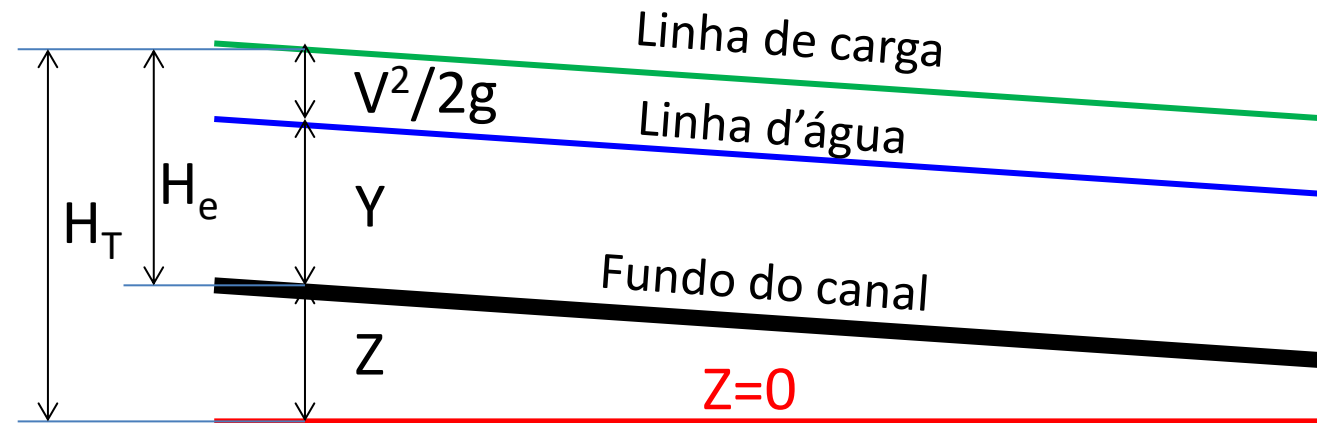
A velocidade à seção plena vale:  $V_p = Q_p/A_p = 4,41/2,744 = 1,61 \text{ m/s}$ .

Na Figura 8.8, na curva da velocidade, para  $h/H = 0,70 \rightarrow V/V_p = 1,12$ , a velocidade média correspondente à vazão escoada vale  $V = 1,80 \text{ m/s}$ .

# Carga específica - $H_e$

- A carga total num ponto qualquer do canal é:

$$H_T = Z + Y + \frac{V^2}{2 \cdot g}$$



- Tomando o fundo do canal como referencial a carga passa a:

$$H_e = Y + \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

*A linha de carga para escoamento permanente uniforme em canais de pequena declividade pode ser considerada paralela ao fundo do canal.*



# Exercícios propostos

**Exercício 1** – Determinar as dimensões e a inclinação de um canal trapezoidal de taludes regulares e inclinados em 1,5:1, coeficiente de Manning igual a 0,014, carga hidráulica de 0,70 m e a vazão escoante de 1,20 m<sup>3</sup>/s.

**Exercício 2** – Determinar as dimensões e a inclinação de um canal não revestido de taludes pouco regulares em solo franco argiloso (para funcionar sempre limpo) base inferior de 0,50 m e a vazão escoante de valor igual a 0,95 m<sup>3</sup>/s.

# Exercícios propostos

**Exercício 3** – Determinar a inclinação de fundo de um canal não revestido com taludes em solo argilo-arenoso que conduz 500 L/s de água limpa a uma velocidade de fluxo de 0,80 m/s e base inferior de 50 cm.

**Exercício 4** – Classifique os tipos de fluxo do exercício anterior para velocidades de fluxo de 0,2; 0,6; 0,8 e 1,6 m/s.

**Exercício 5** – Determine a cota de jusante do canal considerando cota de montante de 412 m. considerar as velocidades do exercício anterior.

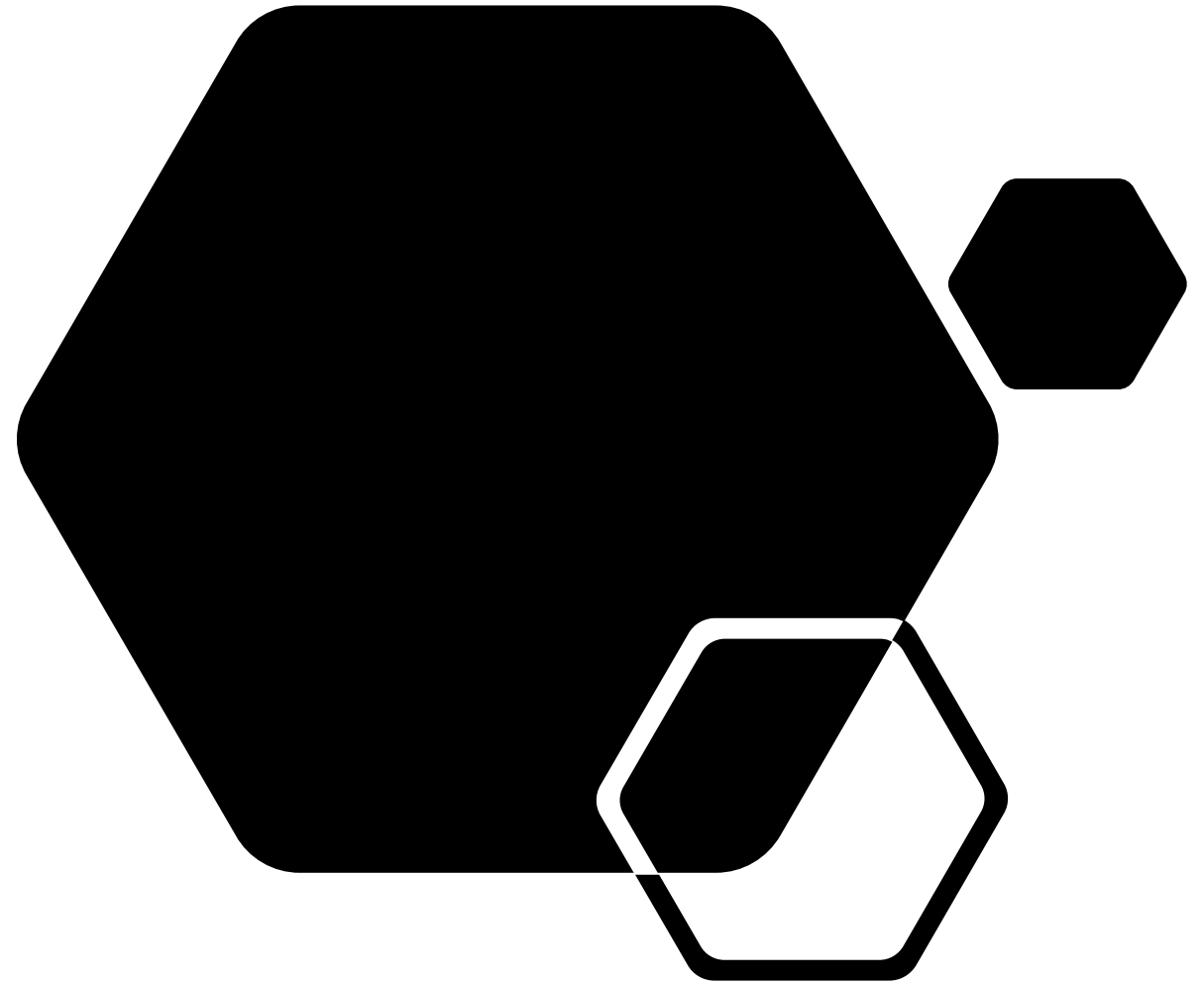


**FIM**



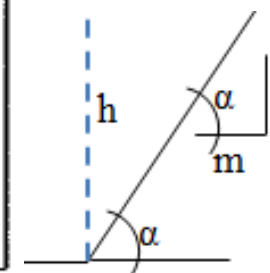
# ANEXOS

anexos



# Valores recomendados para m

| QUADRO 15.1 – Taludes usuais dos canais         |             |                 |
|---|-------------|-----------------|
| Natureza das paredes                            | $tg \alpha$ | $\alpha$        |
| Canais em terra em geral, sem revestimento      | 1:2,5 a 1:5 | 21°48' a 11°19' |
| Saibro, terra porosa                            | 1:2         | 26°34'          |
| Cascalho roliço                                 | 1:1,75      | 29°45'          |
| Terra compacta, sem revestimento                | 1:1,5       | 33°41'          |
| Terra muito compacta, paredes rochosas          | 1:1,25      | 38°40'          |
| Rochas estratificadas, alvenaria de pedra bruta | 1:0,5       | 63°26'          |
| Rochas compactas, alvenaria acabada, concreto   | 1:0         | 90°             |



Fonte: Azevedo Netto – Manual de Hidráulica , Vol. 8.

| Autor: Batista et al. (2002) |               |           | Autor: Bernardo et al. (2006) |               |
|------------------------------|---------------|-----------|-------------------------------|---------------|
| TIPO DE SOLO                 | TALUDES (V:H) |           | MATERIAL                      | TALUDES (H:V) |
| Solo turfoso                 | 1: 0,00       | a 1: 0,25 | Rocha firme                   | 0,25:1        |
| Argiloso pesado              | 1: 0,50       | a 1: 1,00 | Rocha fissurada               | 0,50:1        |
| Argiloso e franco siltoso    | 1: 1,00       | a 1: 1,50 | Solo firme                    | 1,00:1        |
| Franco arenoso               | 1: 1,50       | a 1: 2,00 | Solo argilo-arenoso           | 1.50:1        |
| Areia                        | 1: 2,00       | a 1: 3,00 | Solo areno-argiloso           | 2,50:1        |

BATISTA, M.J.; NOVAES, F.; SANTOS, D.G.; et.al. Drenagem como instrumento de dessalinização e prevenção da salinização de solos. 2ª ed. Brasília: CODEVASF, 2002. 216 p. (Série Informes Técnicos). Pagina 25.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. 8ª ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p. Pagina 149.

# Observações sobre a geometria do canal

- Determinação da declividade longitudinal do canal (i), para base inferior (b) fixa:

$$A = (b + h \cdot m) \cdot h$$

$$A = b \cdot h + m \cdot h^2$$

$$f(x) = m \cdot h^2 + b \cdot h - A \quad (\text{equação do 2º grau} \rightarrow Y = ax^2 + bx + c)$$

Tem-se que:

$$a = m$$

$$b = b$$

$$c = -A$$

Da fórmula de Bhaskara:

$$X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

Para dos dados geométricos do canal:

$$h' = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot m \cdot (-A)}}{2 \cdot m}$$

$$h'' = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot m \cdot (-A)}}{2 \cdot m}$$

h será, portanto, o valor positivo de h' e h''.