

INSTITUTO FEDERAL

Sertão Pernambucano

Campus Petrolina Zona Rural

Aula 18

Escoamento em canais – elementos geométricos

Prof. José Sebastião Costa de Sousa

Dr. Engenharia Agrícola

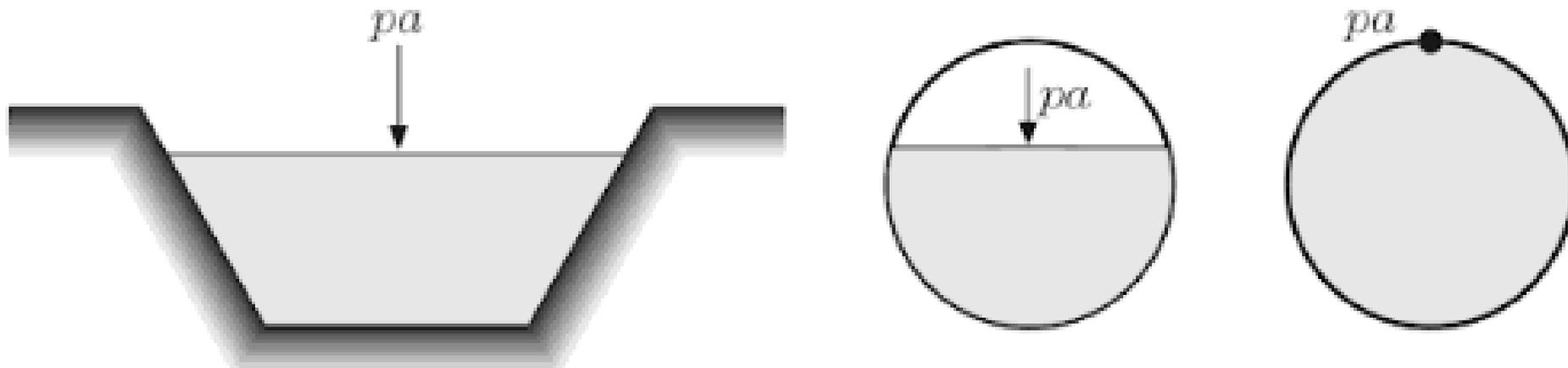
CPZR/IFSertãoPE

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.

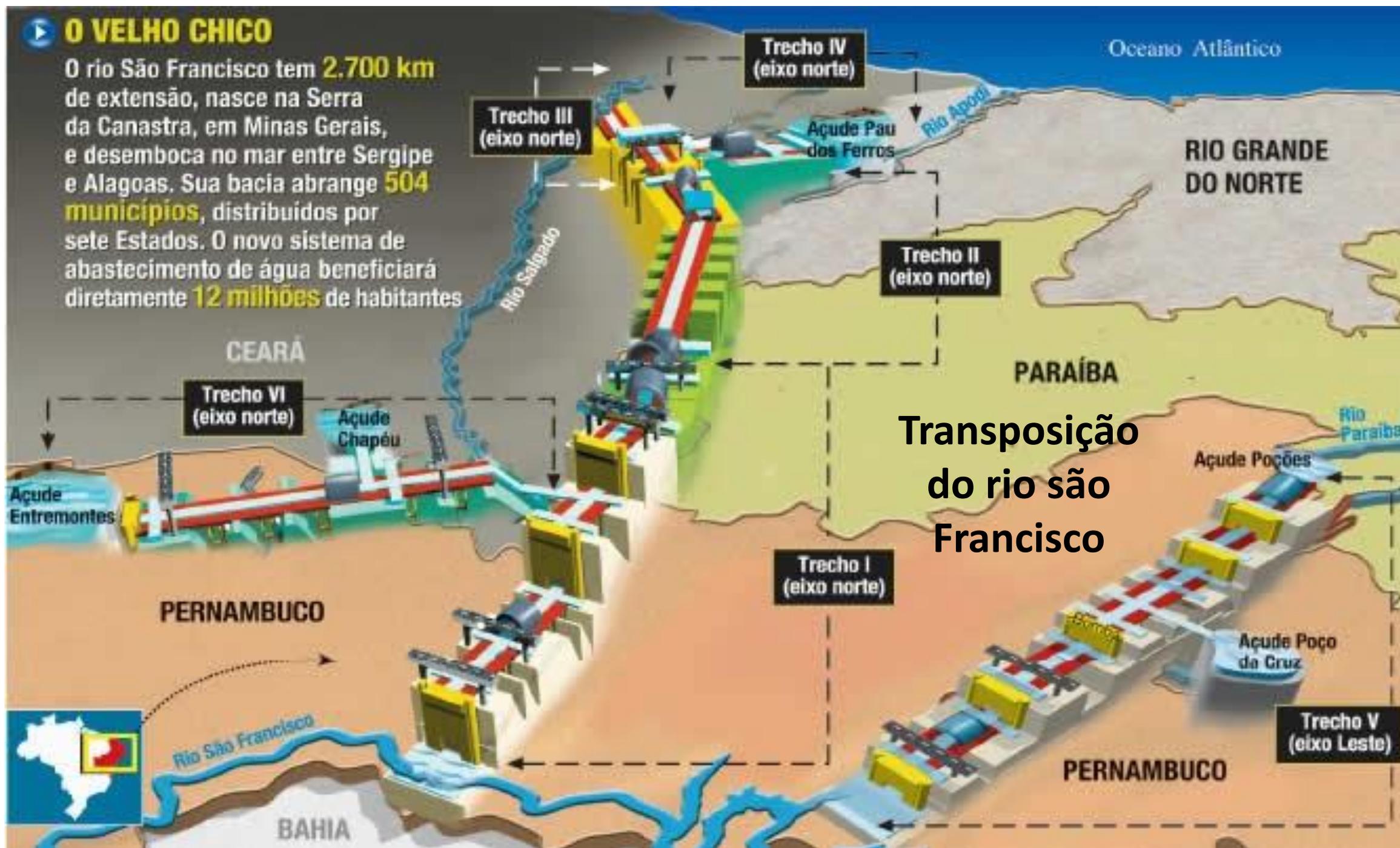
Transposição do rio São Francisco

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



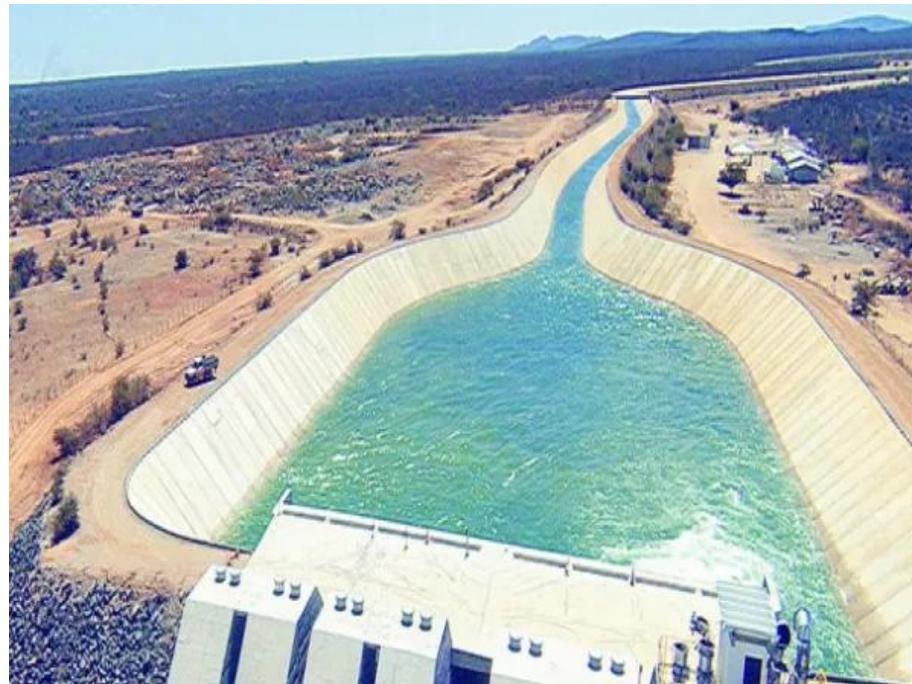
O VELHO CHICO

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

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

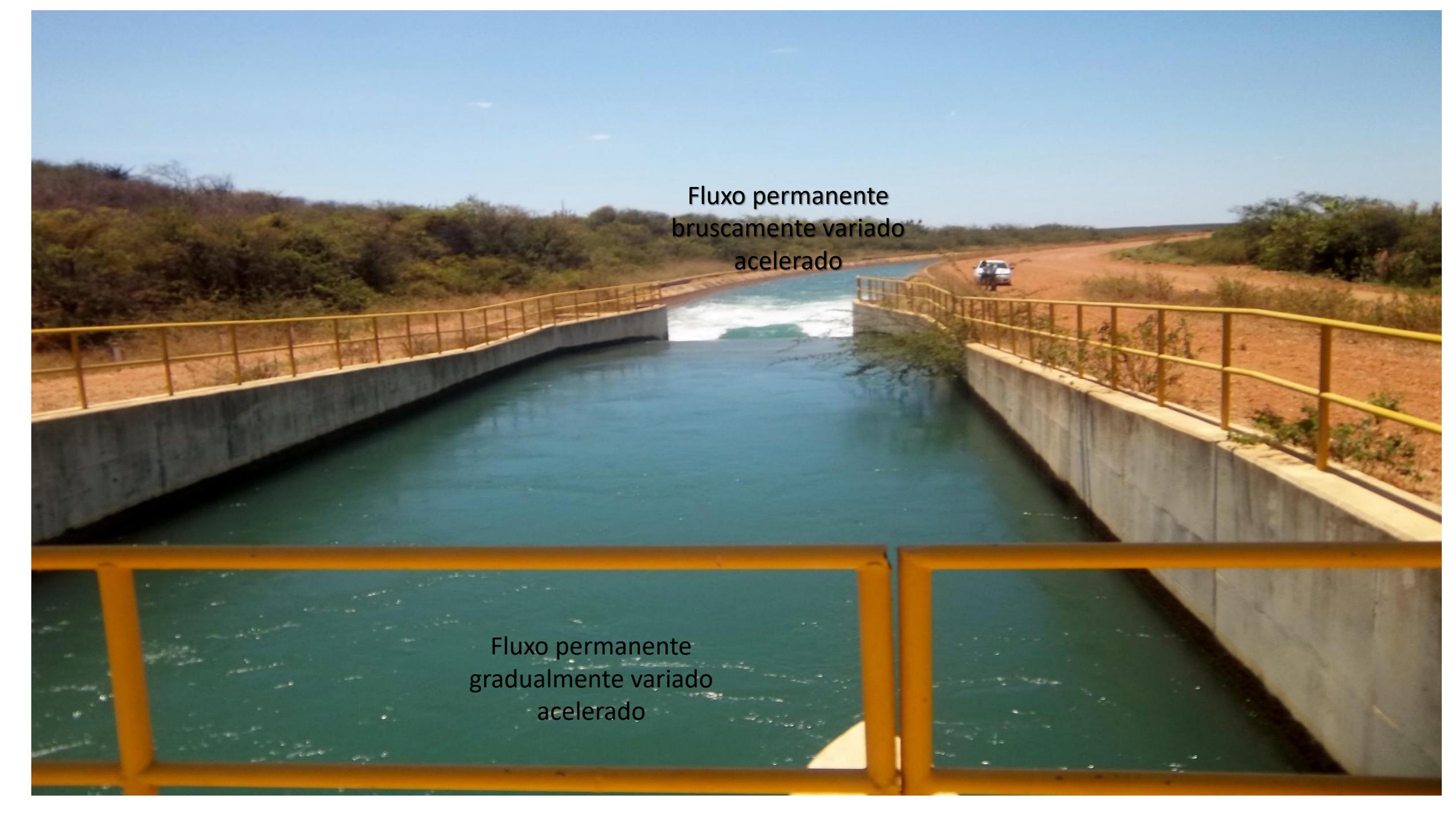


Comportas



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**).

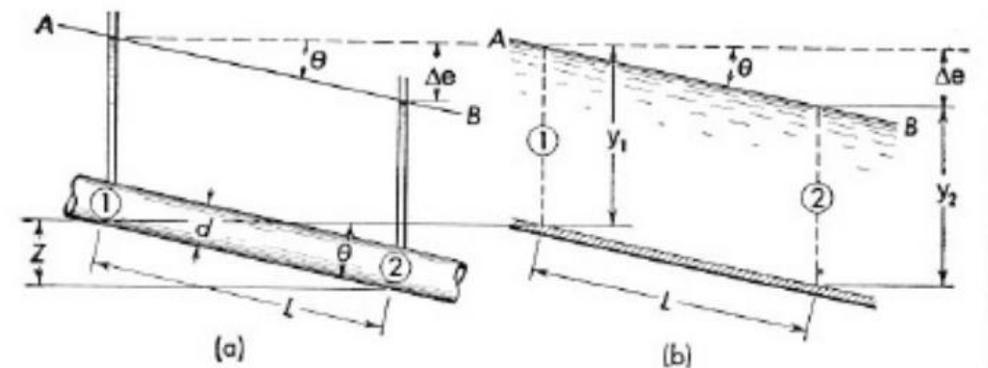
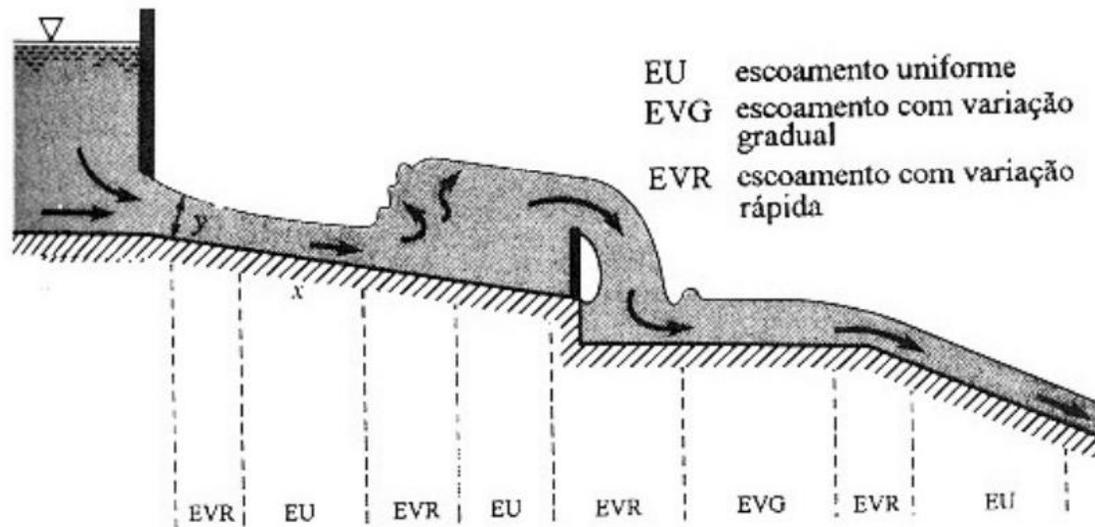
1.1 Uniforme (**velocidade e declividade constante**);

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



a) conduto forçado ou sobressão

b) conduto livre

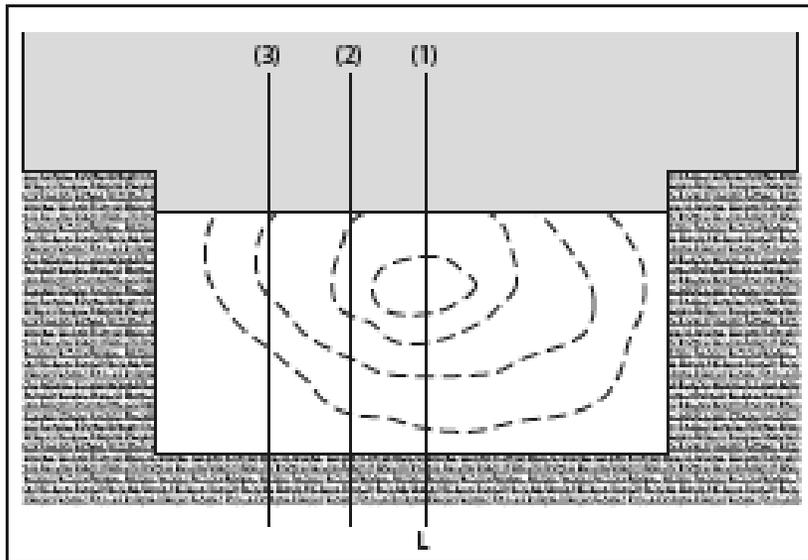


Figura A-14.2.3-a – Curvas isotáquicas em seção transversal de canal onde $v_1 > v_2 > v_3$.

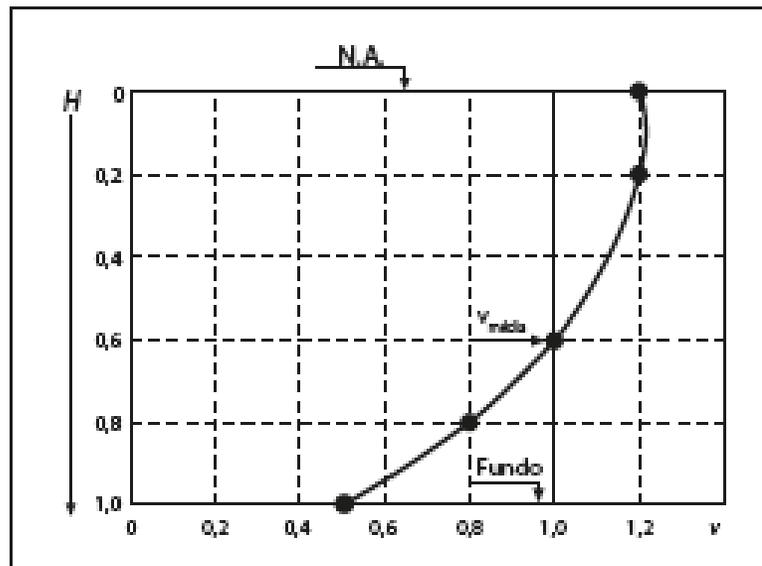


Figura A-14.2.3-d – Diagrama de variação da velocidade com a profundidade de um canal.

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.*

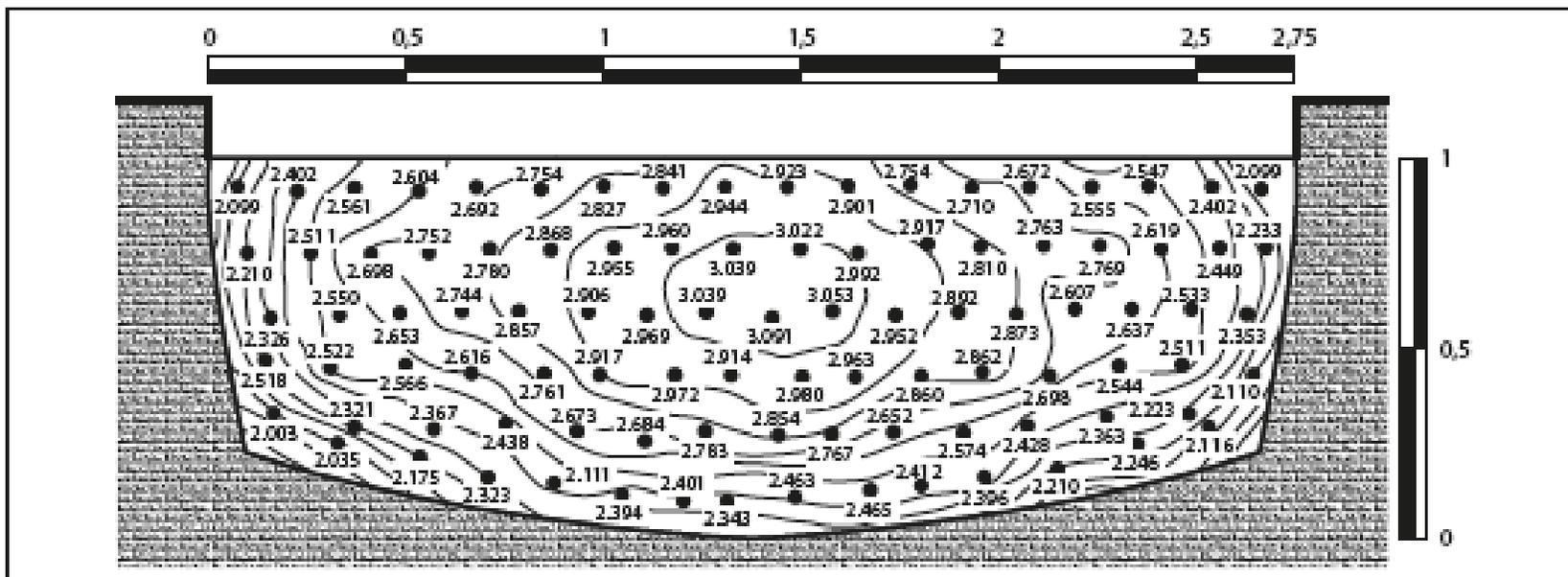


Figura A-14.2.3-b – Exemplo de curvas isotáquicas em seção transversal de canal, com as velocidades em m/s.

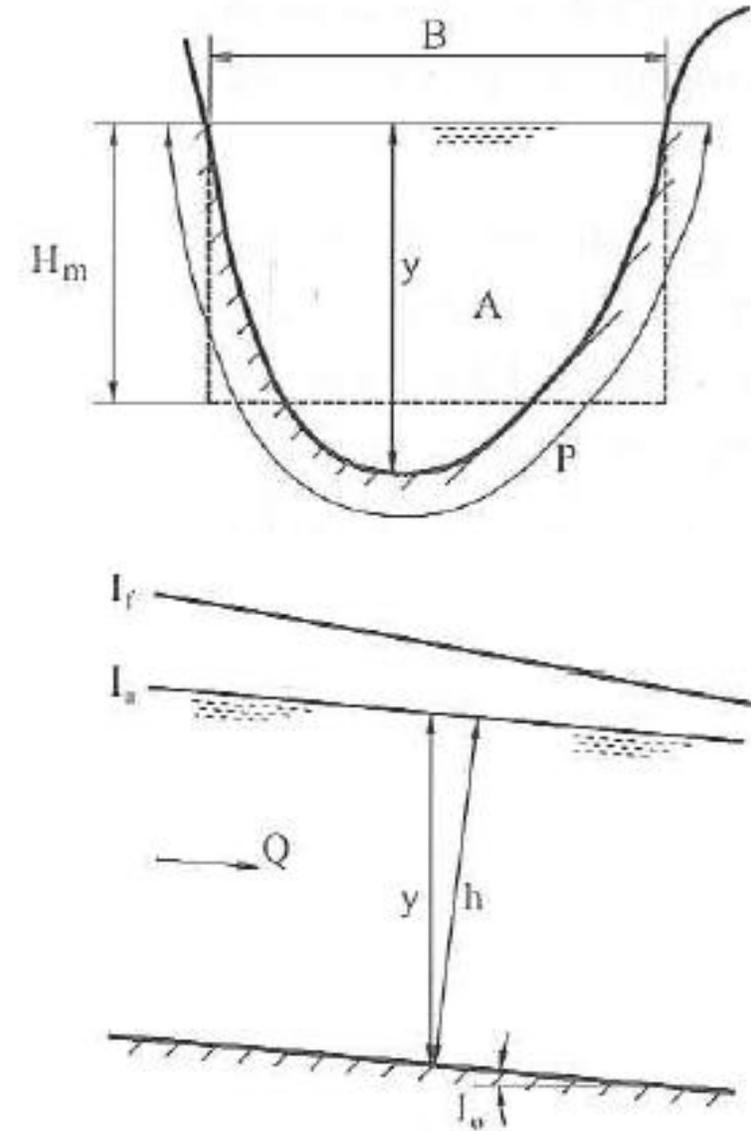
Limites práticos de velocidades em canais

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.

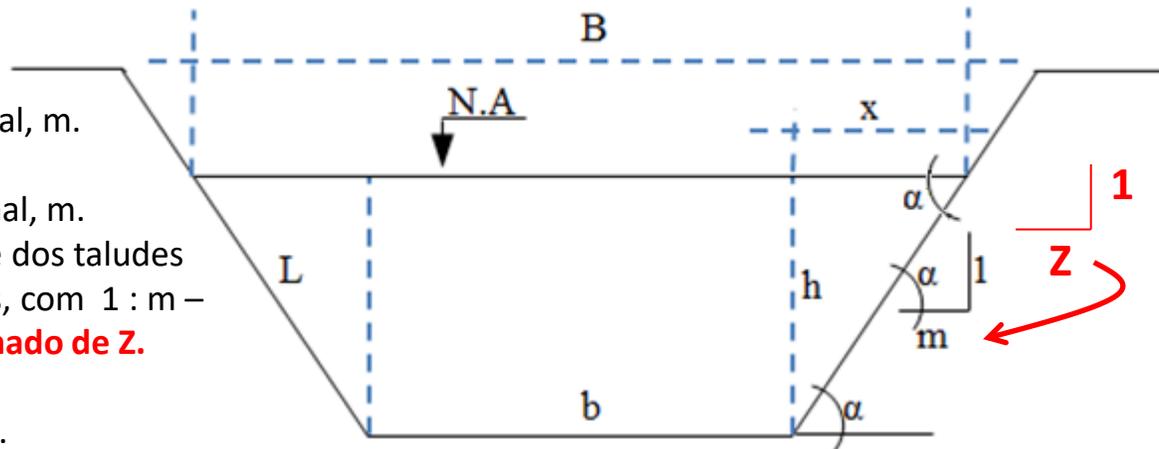
b – base do canal, m.

h – carga hidráulica no canal, m.

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

A – área molhada, m².

P – perímetro molhado, 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.



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

Deduções

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

$$x = h \cdot m$$

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

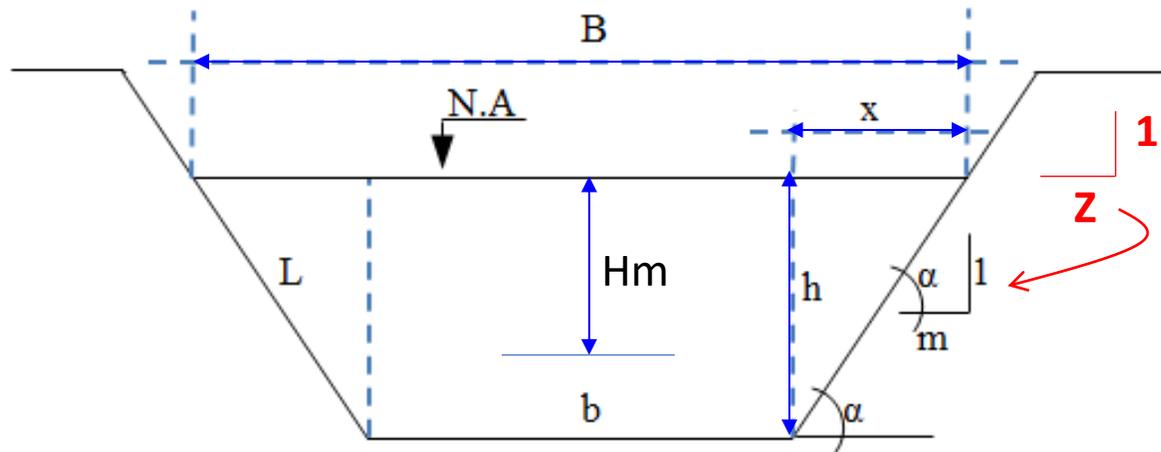
$$B = b + 2 \cdot h \cdot m$$

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

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

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, m².

b – base do canal, m.

B – largura do topo do canal, m.

h – carga hidráulica no canal, m.

m – inverso da declividade dos taludes (α – 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, m²/s;

g – acel. grav., m/s²;

H_m – altura média ou

hidráulica, m. $H_m = A/B$

A – área da seção

transversal de fluxo,

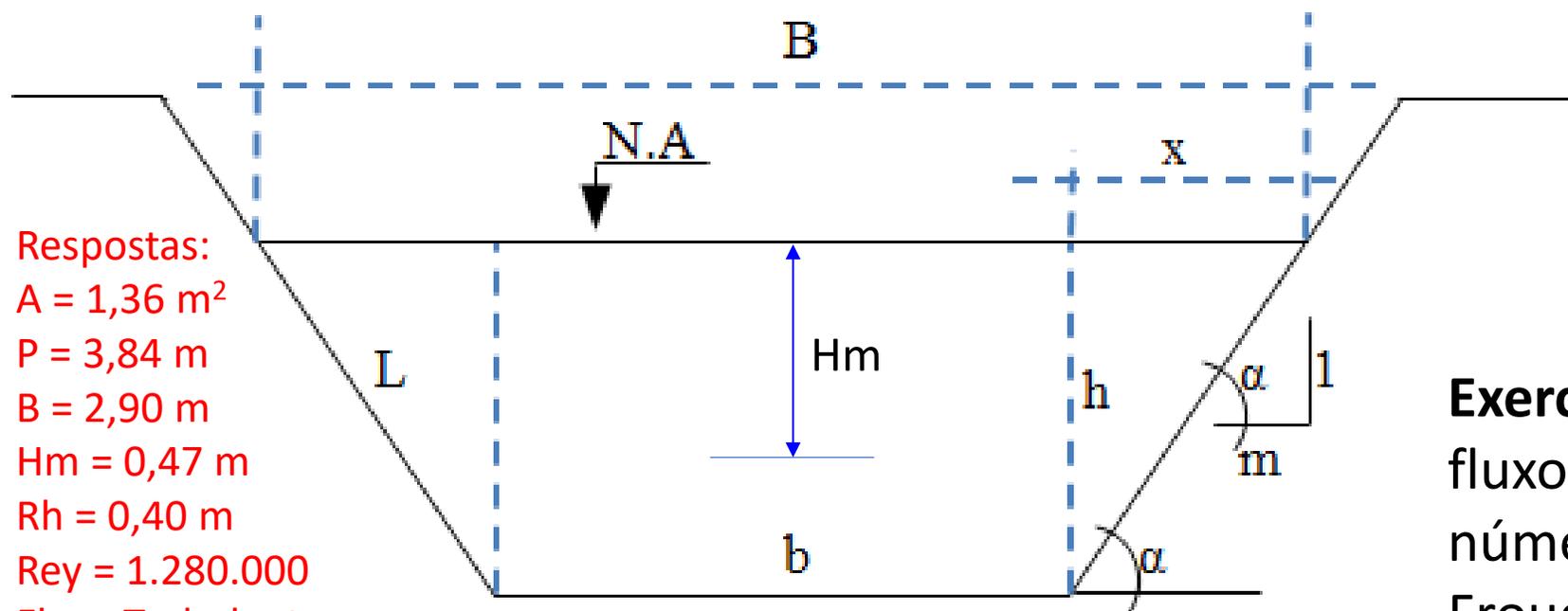
m²;

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^o 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;
 ν – viscosidade cinemática do fluido, m²/s.

- Outra classificação é feita em função do N^o de Froude (Fr):

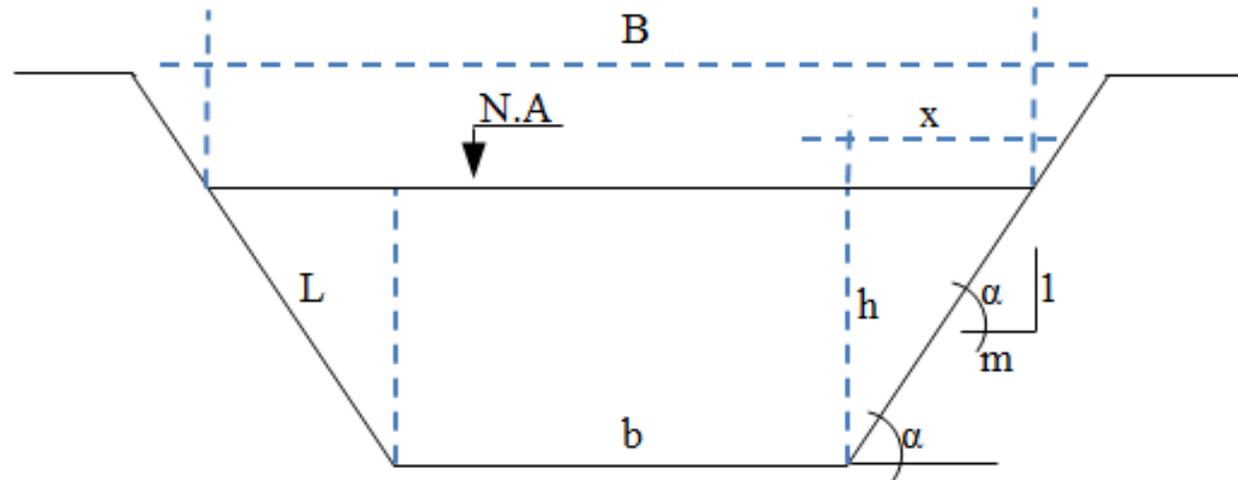
- Subcrítico ou fluvial ($Fr < 1$)
- Crítico ($Fr = 1$)
- Supercrítico ou torrencial ($Fr > 1$)

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

V – velocidade, m/s;
 g – acel. grav., m/s²;
 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.

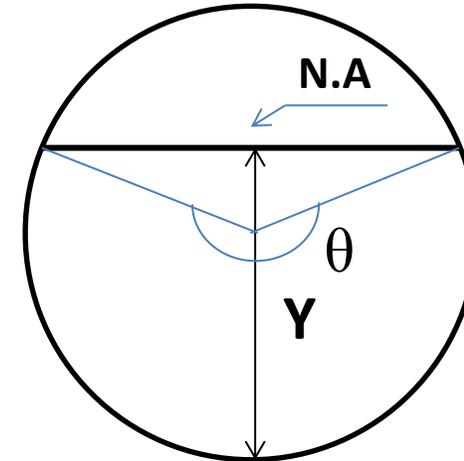
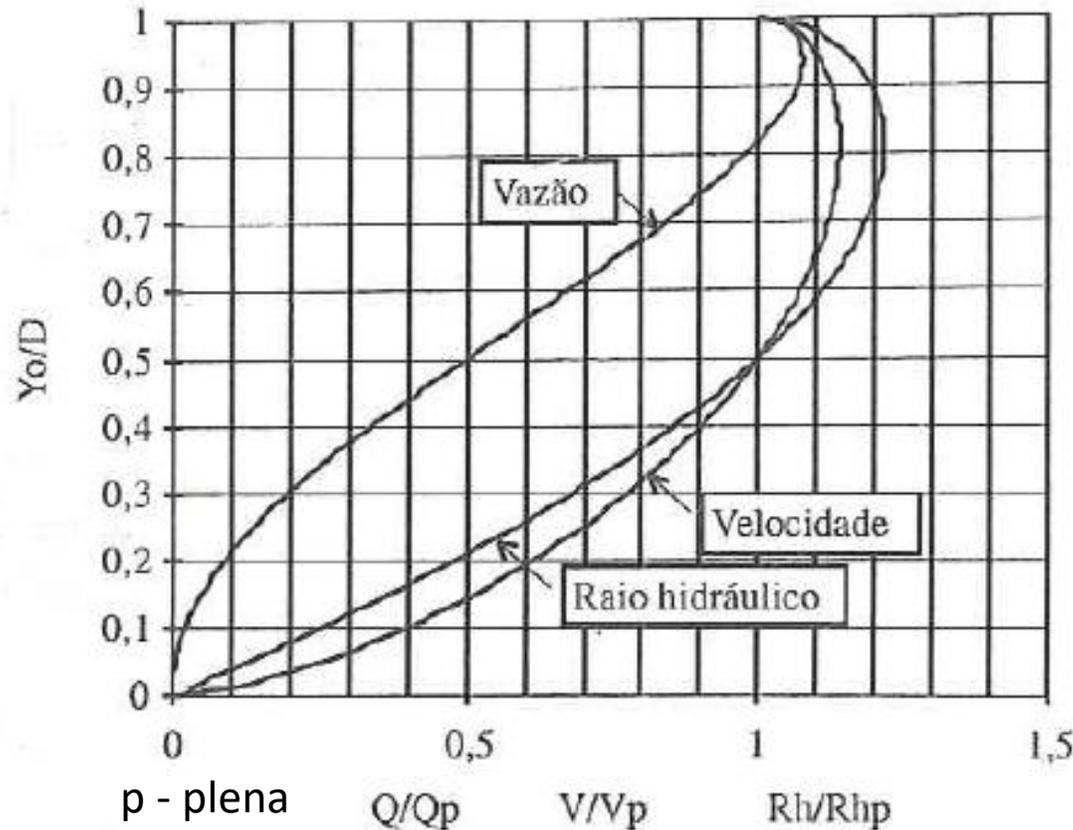


Exercício 2 – Classifique os tipos de fluxo do exercício 1 (n° Reynolds e n° Froude) para velocidades de fluxo de 0,2; 0,6; 0,8 e 1,6 m/s.

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.



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

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

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

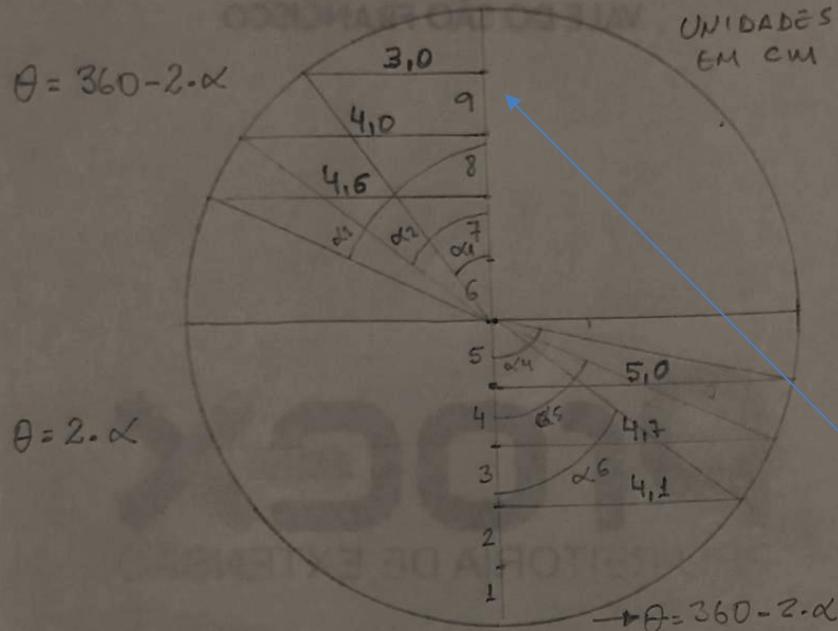
$$P = D * \theta / 2$$

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

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

Figura 8.7 Elementos hidráulicos da seção circular.

TESTE PRÁTICO COM TRANSFERIDOR,
COMPASSO E ESQUADROS.



$$\theta = 360 - 2 \cdot \alpha$$

$$\theta = 2 \cdot \alpha$$

$$\theta = 360 - 2 \cdot \alpha$$

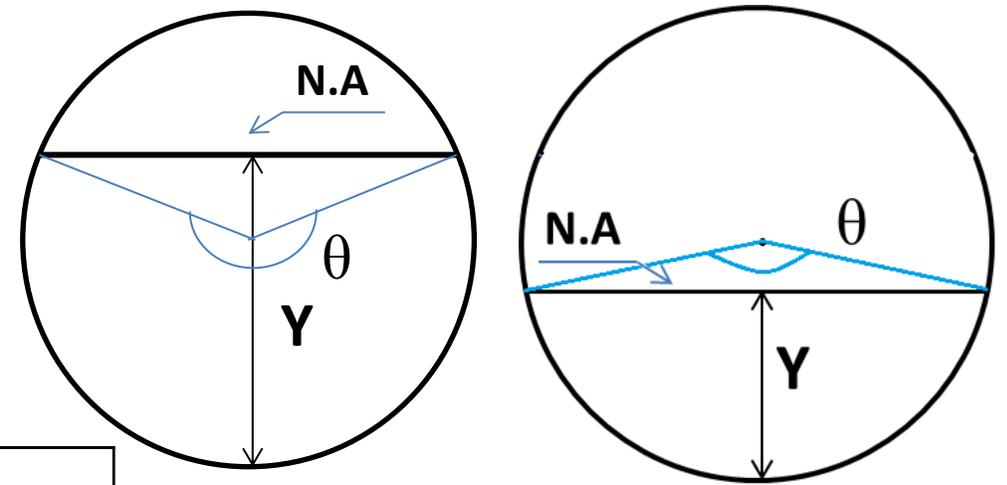
$\alpha_1 = \arctg \frac{3}{4} = 36,87^\circ$	$\theta_1 = 286,26^\circ$
$\alpha_2 = \arctg \frac{4}{3} = 53,13^\circ$	$\theta_2 = 253,74^\circ$
$\alpha_3 = \arctg \frac{4,5}{2} = 66,50^\circ$	$\theta_3 = 227,00^\circ$
$\alpha_4 = \arctg \frac{5}{1} = 78,69^\circ$	$\theta_4 = 157,38^\circ$
$\alpha_5 = \arctg \frac{4,7}{2} = 66,95^\circ$	$\theta_5 = 133,90^\circ$
$\alpha_6 = \arctg \frac{4,1}{3} = 53,21^\circ$	$\theta_6 = 107,62^\circ$

Para o laboratório

Nota: cálculos trigonométricos em radianos

D	10,00 cm
Y	9,00 cm
Y/D	0,90 adm
θ	5,00 rad
θ	286,26 °
A	74,45 cm ²
P	24,98 cm
B	6,00 cm

Canais circulares



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

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

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

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

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

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

Canais de seção irregular - siameses

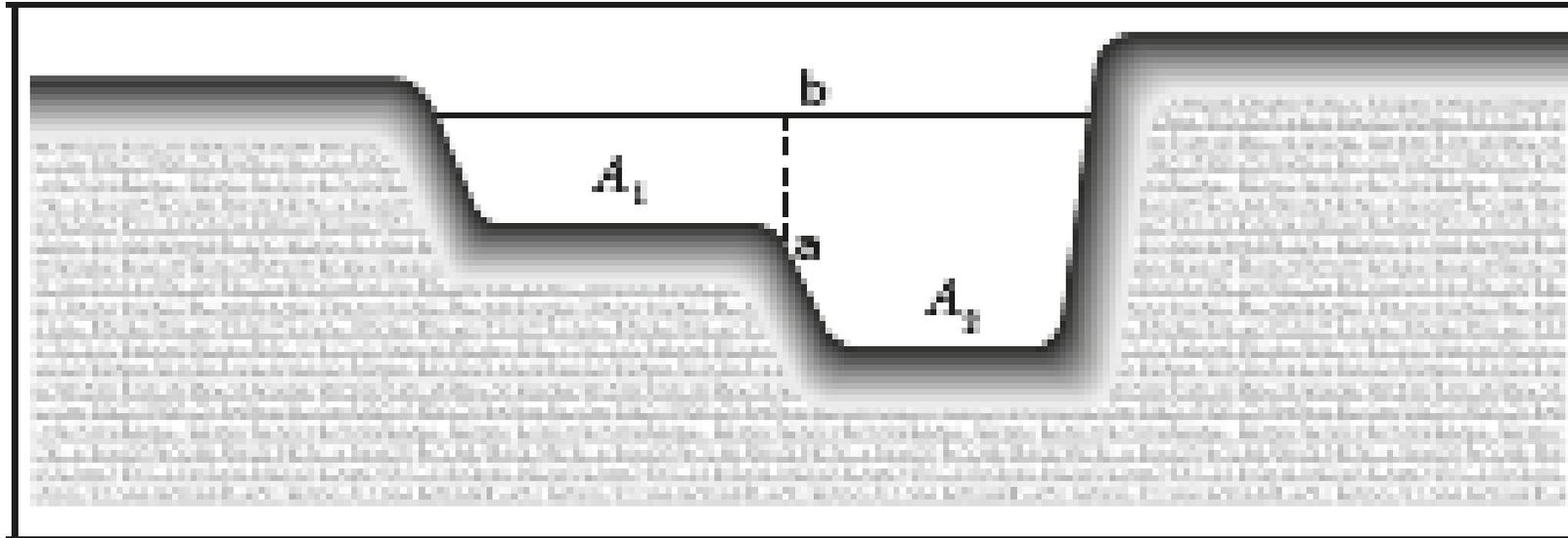
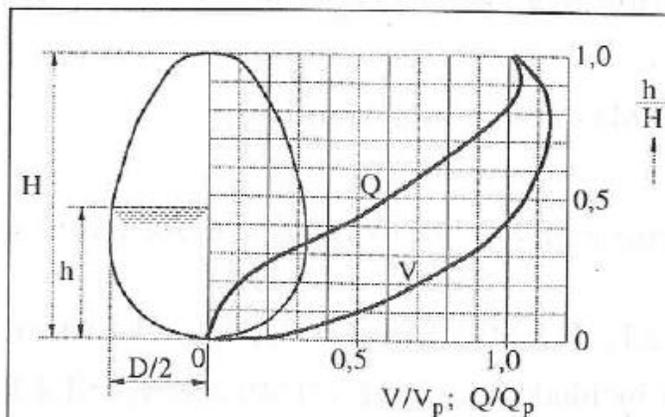


Figura A-14.4.5.1-a – Canais siameses. Fonte: Azevedo Netto – Manual de Hidráulica , Vol. 9.

- 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:

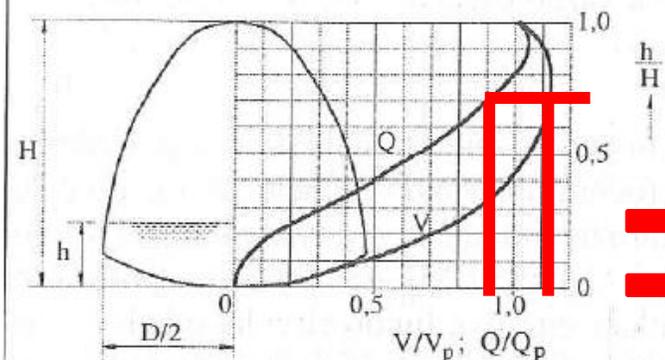
$$D = 0,667 H$$

$$H = 1,5 D$$

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

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

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



CAPACETE

Valores para a seção plena:

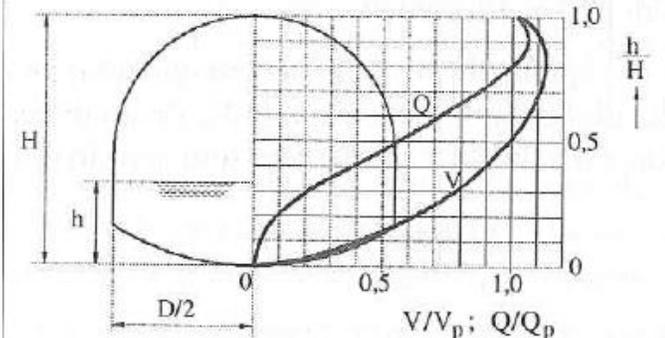
$$D = 0,88 H$$

$$H = 1,13 D$$

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

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

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



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 $Q = 3,97 \text{ m}^3/\text{s}$.

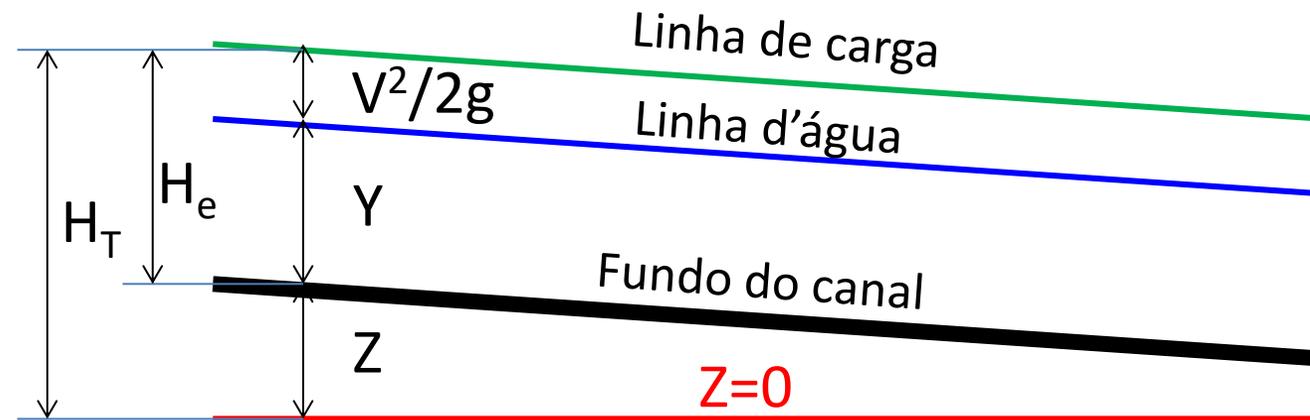
A velocidade à seção plena vale: $V_p = Q_p/A_p = 4,41/2,744 = 1,61 \text{ m/s}$.

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 m³/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 m³/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.

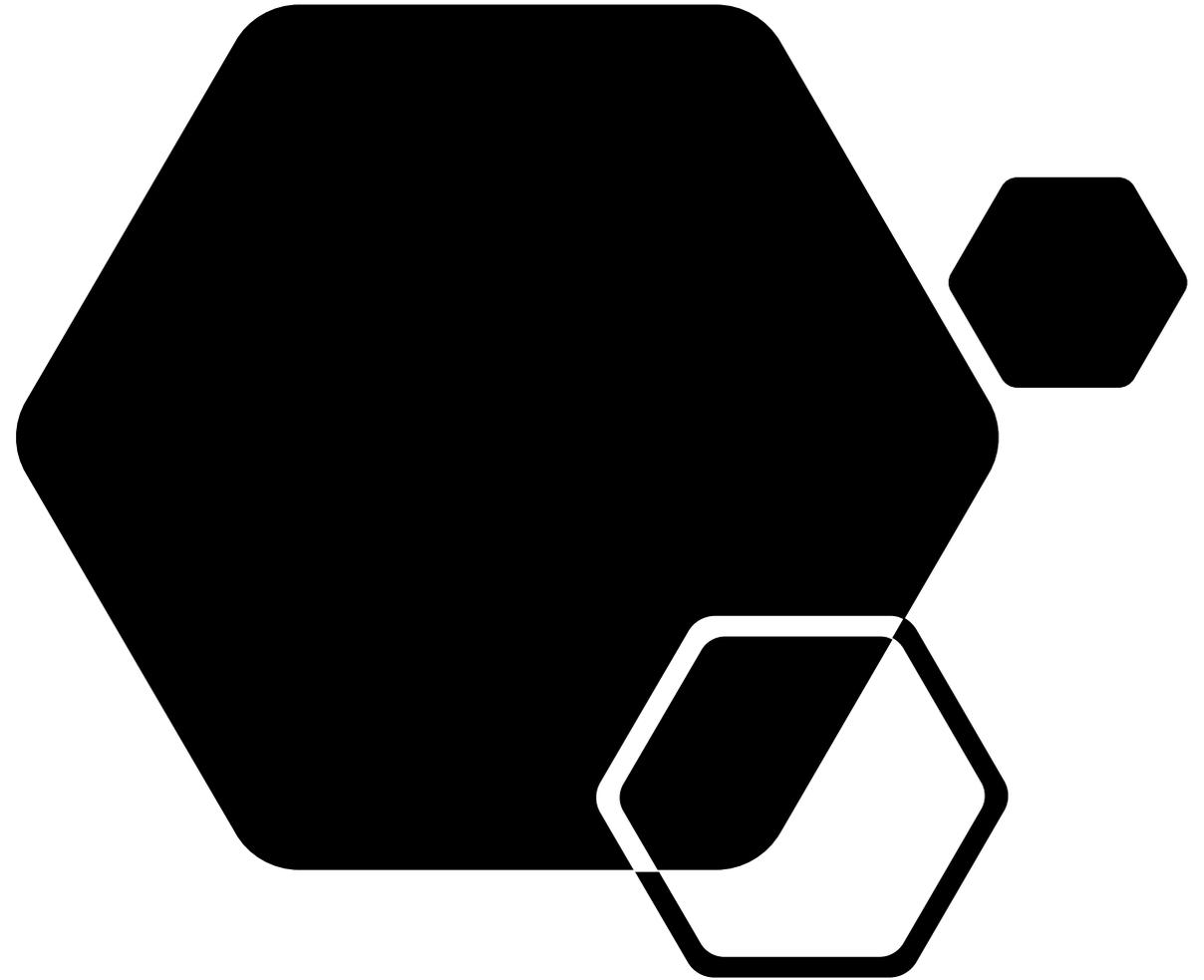
Exercício 5 – Determine a cota de jusante do canal considerando cota de montante de 412 m. considerar as velocidades do exercício anterior.



FIM

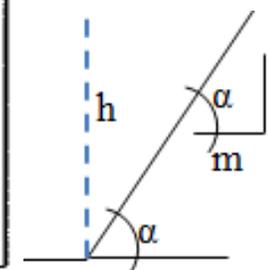
ANEXOS

anexos



Valores recomendados para m

QUADRO 15.1 – Taludes usuais dos canais		
Natureza das paredes	$tg \alpha$	α
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''.