

PROGRAMA DA DISCIPLINA SHS-410 – HIDRÁULICA DOS CONDUTOS LIVRES

- CAP - 7 - CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO LIVRE
- CAP – 8 – ESCOAMENTO PERMANENTE E UNIFORME – DIMENSIONAMENTO DE CANAIS
- CAP – 9 - OBSERVAÇÕES SOBRE PROJETO E CONSTRUÇÃO DE CANAIS
- **CAP – 10 – ENERGIA OU CARGA ESPECÍFICA**
- CAP – 11 – RESSALTO HIDRÁULICO
- CAP – 12 – ORIFÍCIOS – VERTEDORES – COMPORTAS – TUBOS CURTOS
- CAP – 13 - ESCOAMENTO PERMANENTE GRADUALMENTE VARIADO – CURVAS DE REMANSO

ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- **Condutos forçados** → seção plena, fechada, pressão diferente da atmosférica, gravidade ou bombeamento.
- **Condutos livres** → seção aberta ou fechada, mas pressão na superfície é atmosférica, gravidade → rios, córregos, ribeirões, canais artificiais, galerias, etc.
- Canais **naturais** ou **artificiais** – **prismáticos** ou **não prismáticos**



Calha do Tietê em SP

ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- Linha de energia e linha piezométrica:

$$\frac{V^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\gamma} + z \rightarrow \text{em geral} \rightarrow \frac{p}{\gamma} = y \rightarrow \text{lâmina d'água}$$

- Rugosidade:

- **Condutos forçados:** mais uniforme → tubos de aço, ferro fundido, concreto, PVC
- **Condutos livres:**
 - **Artificiais** → mais uniforme: concreto, grama, pedras, etc.
 - **Naturais** → muito irregular → mesmo numa seção transversal pode variar: lodo, areia, cascalho, vegetação, etc.

ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

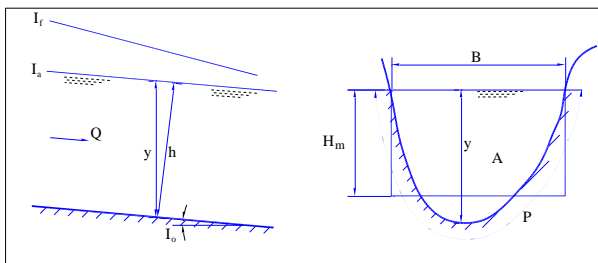
- Geometria

- **Condutos forçados:** seções regulares → geralmente circulares.
- **Condutos livres:**
 - **Artificiais** → retangular, trapezoidal, circular, elipsoidal, mistas, etc
 - **Naturais** → seções muito irregulares → dificuldades de representação geométrica

- Responsabilidade técnica

ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- Elementos geométricos dos canais
 - Área molhada $\rightarrow A$
 - Perímetro molhado $\rightarrow P$
 - Raio hidráulico $\rightarrow A/P$
 - Altura d'água $\rightarrow y$
 - Altura do escoamento $\rightarrow h$
 - Largura de topo ou boca $\rightarrow B$
 - **Altura hidráulica ou altura média $\rightarrow H_m = A/B$**
 - Declividade do fundo $\rightarrow I_o = \text{tg } \alpha \approx \text{sen } \alpha$
 - Declividade da linha d'água $\rightarrow I_a$
 - Declividade da linha de energia $\rightarrow I_f$

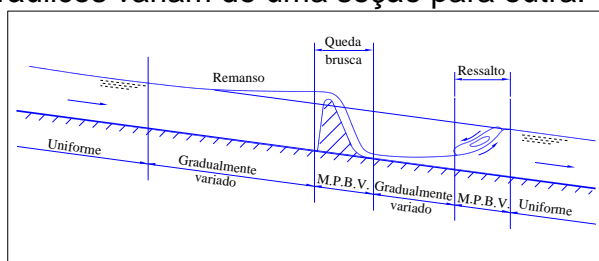


ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- Tipos de escoamento
 - Variação no tempo
 - **Permanente**: velocidade média é **constante no tempo** \rightarrow as características do escoamento **numa mesma seção** (profundidade, vazão, área) também são constantes no tempo.
 - **Não permanente ou variável**: **velocidade** e os demais parâmetros hidráulicos **numa mesma seção** também **variam no tempo** \rightarrow passagem de uma onda de cheia por um canal \rightarrow para um observador na margem \rightarrow a vazão, a velocidade e a profundidade variam no tempo.
 - **Gradualmente variado** \rightarrow remanso
 - **Bruscamente variado** \rightarrow ressalto

ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- Variabilidade do espaço:
 - **Uniforme:** velocidades paralelas e constantes ao longo de uma mesma trajetória → trajetórias retilíneas e paralelas → linha d'água paralela ao fundo → $l_o=l_a=l_f$
 - **Não uniforme ou variado:** trajetórias não paralelas → linha d'água não é paralela ao fundo → parâmetros hidráulicos variam de uma seção para outra.



ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- **Número de Reynolds:** relação entre força de inércia e força viscosa:

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

ν é a viscosidade cinemática

para água $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à temperatur a de 25°C

- Escoamento laminar → $Rey < 500$
- Escoamento turbulento → $Rey > 2000$
- Escoamento de transição → $500 < Rey < 2000$

ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

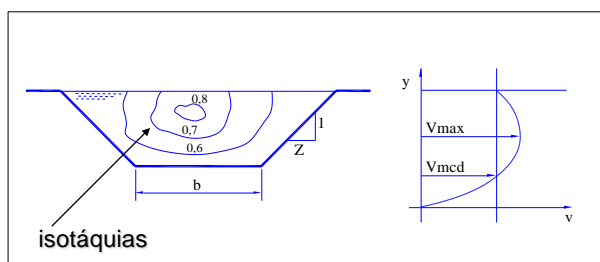
- **Número de Froude:** raiz quadrada da relação entre a força de **inércia** e a força de **gravidade**:

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

- Escoamento subcrítico ou fluvial → $Fr < 1$
- Escamento supercrítico ou torrencial → $Fr > 1$
- Escoamento crítico → $Fr = 1$

ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- **Distribuição de velocidades** → as velocidades das partículas da água não são uniformes ao longo de uma seção → **canais prismáticos** → distribuição vertical é aproximadamente **parabólica**

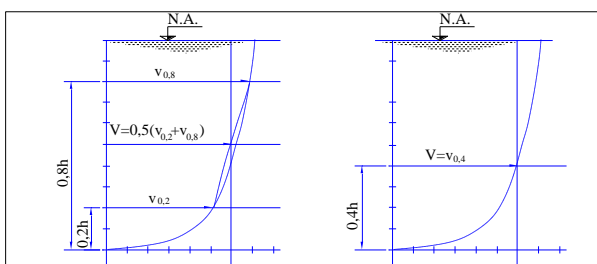


ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- Na prática, adota-se uma **velocidade média**:

$$V = \left(\frac{V_{0,2h} + V_{0,8h}}{2} \right)$$

h é a profundidade da seção na vertical onde se está medindo a velocidade



ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- Como a velocidade varia ao longo da profundidade, em algumas situações é necessário considerar **coeficientes** para correção da velocidade média.
- Para canais retangulares e largos ($B > 10y$):

$$\alpha = \frac{1}{y} \int_0^y V^3 dy \rightarrow \text{coef. de Coriolis} \rightarrow \text{para cálculo da energia cinética}$$

$$\beta = \frac{1}{y} \int_0^y V^2 dy \rightarrow \text{coef. de Boussinesq} \rightarrow \text{para cálculo da quantidade de movimento}$$

$$V = \frac{1}{y} \int_0^y v \cdot dy \rightarrow \text{velocidade média na seção}$$

deve-se conhecer a função $v(y)$ por meio de pontos ou por sua forma analítica

Dessa forma, a carga cinética será dada por: **$\alpha \cdot V^2 / 2g$**

Para canais retilíneos e prismáticos:

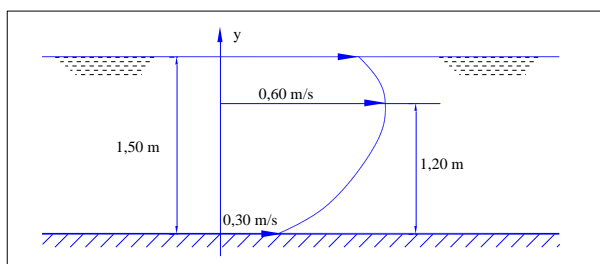
α varia entre 1,03 a 1,36 e β entre 1,01 a 1,12

Na prática, para canais retilíneos e com seção transversal regular \rightarrow adotam-se esses coeficientes iguais a 1

ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

■ Exemplo 7.1:

- V média?
- α e β ?
- Laminar ou turbulento?
- Fluvial ou torrencial?



ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

■ Distribuição de pressão

- Canais “paralelos”** → linhas de corrente são retilíneas e paralelas → $y = p/\gamma$ (distribuição hidrostática de pressões → como se estivesse parado)
- Canais curvilíneos** → linhas de corrente não são retas → efeito de acelerações normais → força centrífuga → **como fica?**

ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

Equilíbrio de forças na direção n (normal)

para um elemento de fluido

$$-\frac{\partial p}{\partial n} - \rho g \frac{\partial z}{\partial n} = \rho \frac{V^2}{r}$$

$\rho \frac{V^2}{r}$ é a aceleração da massa líquida

na trajetória de raio r

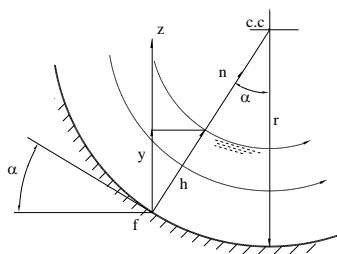
integrando :

$$(p + \gamma z) = -\rho \int_0^n \frac{V^2}{r} dn + cte$$

para $n = 0$ ($z = 0$) $\rightarrow p = p_f \rightarrow$ pressão no fundo do canal

para $n = h$ ($z = y$) $\rightarrow p = p_a = 0 \rightarrow$ pressão atmosférica

$$\Rightarrow \gamma \cdot y = -\rho \frac{V^2}{r} h + p_f \Rightarrow p_f = \gamma \cdot y + \rho \frac{V^2}{r} h$$

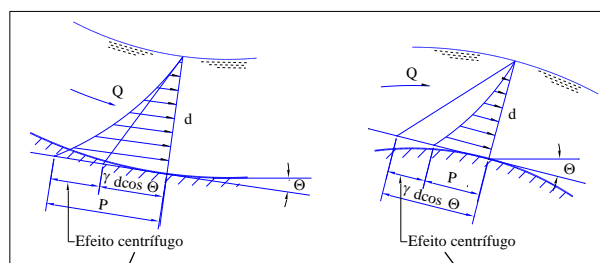


ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

$$p_f = \gamma \cdot y + \rho \frac{V^2}{r} h$$

Efeito hidrostático

Efeito centrífugo



Curvatura côncava

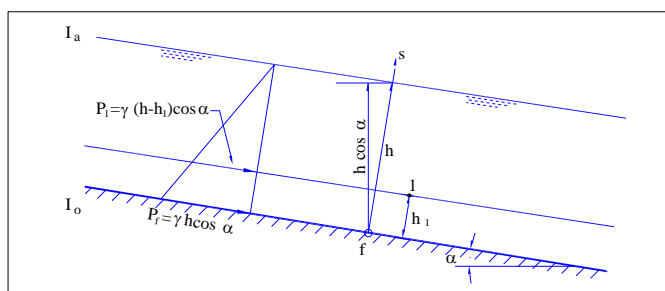
Curvatura convexa

ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- Escoamento **paralelo** → r tende a **infinito** e a **aceleração** normal tende a **zero**:

$$p_f = \gamma \cdot y = \gamma \cdot h \cdot \cos \alpha$$

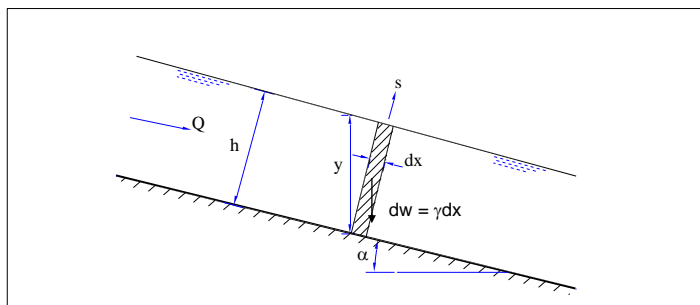
Se α é pequeno → $\cos \alpha \approx 1 \rightarrow y \approx h$



ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- Canais com grande declividade (vertedores):
 - **Canal retilíneo** → trajetórias paralelas → equilíbrio de forças numa “fatia” dx de largura unitária → a componente do peso é igual à pressão na base

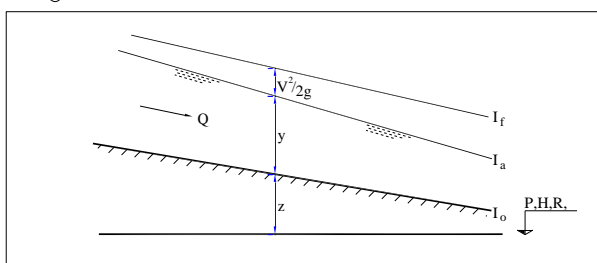
$$p \cdot dx = \gamma \cdot h \cdot dx \cdot \cos \alpha \rightarrow h = y \cdot \cos \alpha \rightarrow p = \gamma \cdot y \cdot \cos^2 \alpha$$



ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- Portanto → **superfície da água = linha piezométrica** se distribuição de pressões é hidrostática $p = \gamma \cdot y$ → trajetórias aproximadamente paralelas e declividade baixa → a carga total em metros numa seção pode ser definida como: (com $\alpha = 1$)

$$H = z + \left(\frac{p}{\gamma}\right) + \frac{V^2}{2g} = z + (y) + \frac{V^2}{2g}$$



ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

- Problemas: 7.2, 7.7 e 7.8**