

# Aula 10. Escoamento crítico e ressalto hidráulico

Hidráulica II

Maria M. Gamboa

1º Semestre de 2019. 27/05/2019

# Ressalto hidráulico

Acontece em diversos tipos de situações

- Canais naturais:  
Comum, e perigoso. (exemplo França, 2014)

Acontece em diversos tipos de situações

- Canais naturais:  
Comúm, e perigoso. (exemplo França, 2014)
- Comporta:  
Comporta em canal de fraca declividade  
Comporta em canal forte declividade

Acontece em diversos tipos de situações

- Canais naturais:  
Comúm, e perigoso. (exemplo França, 2014)
- Comporta:  
Comporta em canal de fraca declividade  
Comporta em canal forte declividade
- Após vertedor:  
Vertedor parede delgada  
Vertedor barragem

Acontece em diversos tipos de situações

- Canais naturais:  
Comum, e perigoso. (exemplo França, 2014)
- Comporta:  
Comporta em canal de fraca declividade  
Comporta em canal forte declividade
- Após vertedor:  
Vertedor parede delgada  
Vertedor barragem
- Calha Parshall:  
Calha Parshall ETA

# Ressalto hidráulico

Quando acontece ressalto hidráulico:

- Passagem de supercrítico para subcrítico

# Ressalto hidráulico

Quando acontece ressalto hidráulico:

- Passagem de supercrítico para subcrítico
- Escoamento rapidamente variado (ERV)

# Ressalto hidráulico

Quando acontece ressalto hidráulico:

- Passagem de supercrítico para subcrítico
- Escoamento rapidamente variado (ERV)
- $y_1$  e  $y_2$ : alturas conjugadas do ressalto



# Ressalto hidráulico

Quando acontece ressalto hidráulico:

- Passagem de supercrítico para subcrítico
- Escoamento rapidamente variado (ERV)
- $y_1$  e  $y_2$ : alturas conjugadas do ressalto
- $y_2 - y_1$ : Altura do ressalto

# Ressalto hidráulico

Quando acontece ressalto hidráulico:

- Passagem de supercrítico para subcrítico
- Escoamento rapidamente variado (ERV)
- $y_1$  e  $y_2$ : alturas conjugadas do ressalto
- $y_2 - y_1$ : Altura do ressalto
- Dissipação de energia  $\Delta E$

# Ressalto hidráulico

Quando acontece ressalto hidráulico:

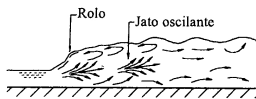
- Passagem de supercrítico para subcrítico
- Escoamento rapidamente variado (ERV)
- $y_1$  e  $y_2$ : alturas conjugadas do ressalto
- $y_2 - y_1$ : Altura do ressalto
- Dissipação de energia  $\Delta E$
- Tipo de ressalto, segundo  $Fr_1$ :



a) Ressalto ondulado  $1 < Fr_1 < 1,7$



b) Ressalto fraco  $1,7 < Fr_1 < 2,5$



c) Ressalto oscilante  $2,5 < Fr_1 < 4,5$



d) Ressalto estacionário  $4,5 < Fr_1 < 9,0$

# Força específica

Escoamento permanente rapidamente variado:

Energia não se conserva, mas somatoria de forças é igual a fluxo de quantidade de movimento.

# Força específica

Escoamento permanente rapidamente variado:

Energia não se conserva, mas somatoria de forças é igual a fluxo de quantidade de movimento.

$$F_1 - F_2 = V_1(-\rho V_1 A_1) + V_2(\rho V_2 A_2)$$

...

$$\frac{Q_1^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q_2^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2$$

Com  $\bar{y}$  = altura da superfície até o centro de gravidade da seção

# Força específica

Escoamento permanente rapidamente variado:

Energia não se conserva, mas somatoria de forças é igual a fluxo de quantidade de movimento.

$$F_1 - F_2 = V_1(-\rho V_1 A_1) + V_2(\rho V_2 A_2)$$

...

$$\frac{Q_1^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q_2^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2$$

Com  $\bar{y}$  = altura da superfície até o centro de gravidade da seção  
Definindo força específica (impulsão total):

$$F = \frac{Q^2}{gA} + \bar{y}A$$

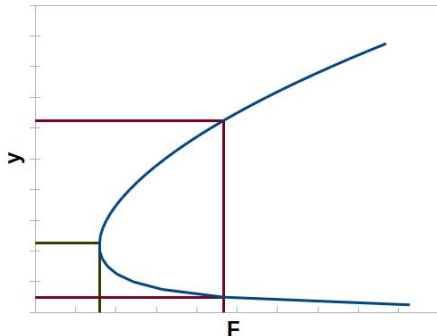
No ressalto:  $F(y_1) = F(y_2)$

# Força específica

Força específica (impulsão total):

$$F = \frac{Q^2}{gA} + \bar{y}A$$

Curva de força específica e altura,  $y$  vs.  $F$ :



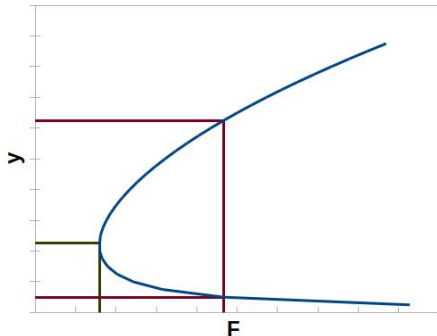
# Força específica

Força específica (impulsão total):

$$F = \frac{Q^2}{gA} + \bar{y}A$$

Curva de força específica e altura,  $y$  vs.  $F$ :

- Para cada  $F$ , duas alturas:  
alturas conjugadas do ressalto





# Força específica

Força específica (impulsão total):

$$F = \frac{Q^2}{gA} + \bar{y}A$$

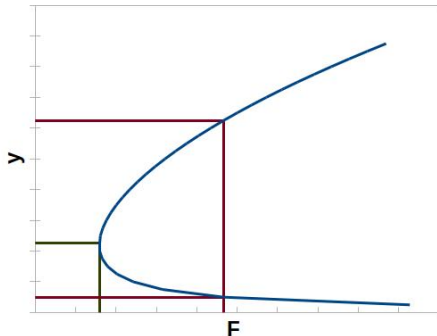
Curva de força específica e altura,  $y$  vs.  $F$ :

- Para cada  $F$ , duas alturas: alturas conjugadas do ressalto

- Ponto de inflexão  $F_{min}$

$$F_{min} \rightarrow \frac{Q^2 B}{gA^3} = 1$$

$$\rightarrow Fr = 1 \rightarrow y_c$$



# Força específica - Canal retangular

$$F(y_1) = F(y_2) \quad \rightarrow \quad \frac{Q_1^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q_2^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2$$

Para seção retangular:  $\frac{q^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{2} = \frac{q^2}{gy_2} + \frac{y_2^2}{2}$

# Força específica - Canal retangular

$$F(y_1) = F(y_2) \quad \rightarrow \quad \frac{Q_1^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q_2^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2$$

Para seção retangular:  $\frac{q^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{2} = \frac{q^2}{gy_2} + \frac{y_2^2}{2}$

**Alturas conjugadas em função de  $Fr$  (retangular):**

Desenvolvendo, e lembrando que  $Fr = \frac{q}{\sqrt{gy^3}}$ :

# Força específica - Canal retangular

$$F(y_1) = F(y_2) \quad \rightarrow \quad \frac{Q_1^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q_2^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2$$

Para seção retangular:  $\frac{q^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{2} = \frac{q^2}{gy_2} + \frac{y_2^2}{2}$

**Alturas conjugadas em função de  $Fr$  (retangular):**

Desenvolvendo, e lembrando que  $Fr = \frac{q}{\sqrt{gy^3}}$ :

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right)$$

ou

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1 \right)$$

# Exercicio

Um ressalto hidráulico ocorre em um canal retangular e horizontal. As alturas de água antes e após o ressalto valem, respectivamente,  $0.6m$  e  $1.5m$ .  
Determine a altura crítica.

# Força específica - Canal não retangular

Para qualquer seção:

$$F(y_1) = F(y_2) \quad \rightarrow \quad \frac{Q^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2$$

# Força específica - Canal não retangular

Para qualquer seção:

$$F(y_1) = F(y_2) \quad \rightarrow \quad \frac{Q^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2$$

Para canais trapezoidais:

$$\bar{y} = \frac{y}{3} \frac{B + 2b}{B + b} = \frac{3by + 2Zy^2}{6(b + Zy)}$$

...

# Força específica - Canal não retangular

Para qualquer seção:

$$F(y_1) = F(y_2) \quad \rightarrow \quad \frac{Q^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2$$

Para canais trapezoidais:

$$\bar{y} = \frac{y}{3} \frac{B + 2b}{B + b} = \frac{3by + 2Zy^2}{6(b + Zy)}$$

...

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \frac{by_1^2}{2} + \frac{Zy_1^3}{3} = \frac{Q^2}{gA_2} + \frac{by_2^2}{2} + \frac{Zy_2^3}{3}$$



# Força específica - Canal não retangular

Para qualquer seção:

$$F(y_1) = F(y_2) \quad \rightarrow \quad \frac{Q^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2$$

Para canais trapezoidais:

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \frac{by_1^2}{2} + \frac{Zy_1^3}{3} = \frac{Q^2}{gA_2} + \frac{by_2^2}{2} + \frac{Zy_2^3}{3}$$

**Alturas conjugadas em função de  $Fr$ :**

Lembrando:  $Fr^2 = \frac{Q^2 B}{gA^3} = \frac{Q^2(b+2Zy)}{g(by+Zy^3)^3} \dots$

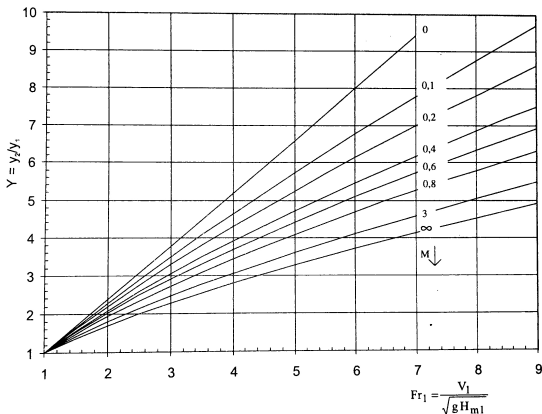
$$\frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^2 \right] + \frac{Zy_1}{3b} \left[ 1 - \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^3 \right] = Fr_1^2 \left[ \frac{\left( 1 + \frac{Zy_1}{b} \right)^2}{1 + 2 \frac{Zy_1}{b}} \right] \left[ \frac{1 + \frac{Zy_1}{b}}{\frac{y_2}{y_1} \left( 1 + \frac{Zy_1}{b} \frac{y_2}{y_1} \right)} - 1 \right]$$

# Força específica - Canal trapezoidal

Alturas conjugadas em função de  $Fr$ :

$$\frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^2 \right] + \frac{Z y_1}{3b} \left[ 1 - \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^3 \right] = Fr_1^2 \left[ \frac{(1 + \frac{Z y_1}{b})^2}{1 + 2 \frac{Z y_1}{b}} \right] \left[ \frac{1 + \frac{Z y_1}{b}}{\frac{y_2}{y_1} (1 + \frac{Z y_1}{b} \frac{y_2}{y_1})} - 1 \right]$$

Gráfico que relaciona  $Fr_1$ ,  $\frac{y_2}{y_1}$ , e  $\frac{Z y_1}{b} = M$  :



## Exercicio proposto

Um canal trapezoidal com largura de fundo igual a  $2.0m$ , inclinação dos taludes  $1H : 1V$ , transporta uma vazão de  $10.0m^3/s$  com altura de água  $0.50m$ .

Ocorrendo um ressalto hidráulico, calcule a altura conjugada no escoamento fluvial.

(Resposta:  $y_2 = 2.10m$ )

# Perda de carga no ressalto

No ressalto hidráulico existe perda de carga:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left( y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left( y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right)$$

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$$

# Perda de carga no ressalto

No ressalto hidráulico existe perda de carga:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left( y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left( y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right)$$

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$$

**Eficiência** na dissipação de energia (carga) pelo ressalto:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \quad (1)$$

# Exercicio proposto

Determine as alturas conjugadas de um ressalto hidráulico em um canal retangular de  $9.15m$  de largura e vazão de  $8.51m^3/s$ , sabendo que a perda de carga vale  $1.51m$

# Comprimento do ressalto

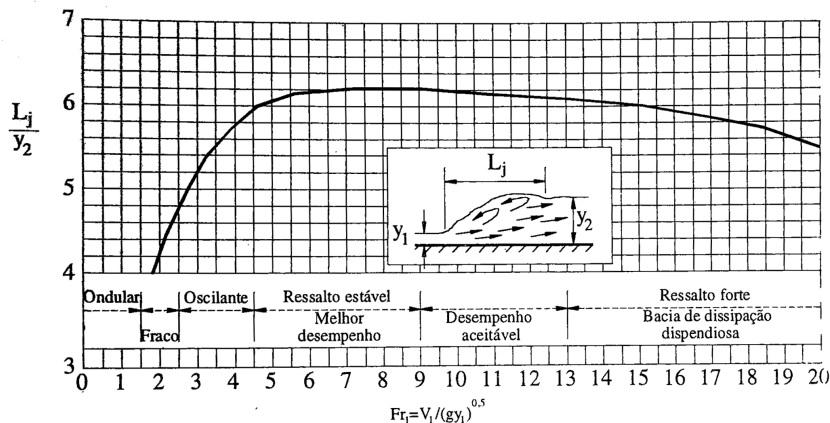
Distância entre seções com alturas conjugadas : **comprimento**

# Comprimento do ressalto

Distância entre seções com alturas conjugadas : **comprimento**

Não existe equação analítica, mas resultados experimentais

**Para canais retangulares:**





# Exercício proposto

O comprimento de um ressalto hidráulico em um canal retangular, no qual  $Fr_1 = 6.5$  vale  $L_j = 8.0m$ . Estime a vazão unitária.

# Exercício

Em um canal retangular de  $1.20\text{m}$  de largura há uma comporta plana e vertical, da mesma largura. Um ressalto hidráulico ocorre imediatamente a jusante da comporta.

Determine a vazão. Despreze as perdas de carga pela comporta, mas não a carga cinética a montante.

