CAPÍTULO 11

- RESSALTO HIDRÁULICO

Tratamento de água

RESSALTO HIDRÁULICO

Ressalto → é a passagem brusca do escamento torrencial para o fluvial com grande dissipação de energia

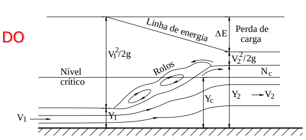
Aplicação principal → bacias de dissipação de energia a jusante de vertedores de barragens

Na saída do vertedor → V alta → torrencial
No rio → escoamento fluvial
A jusante do vertedor bacia de dissipação → fixa o ressalto nesse lugar → evita erosão a jusante

USINA LIMOEIRO – RIO PARDO

RESSALTO HIDRÁULICO

DESCRIÇÃO DO RESSALTO



- A montante torrencial → V_1 alta e y_1 baixo
- A jusante fluvial → V_2 baixa e y_2 alto
- Velocidade diminui de montante p/ jusante
- Formação de turbulência acentuada → rolos
- Perda de energia ΔE:

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2.g} = \Delta E + y_2 + \frac{V_2^2}{2.g} \longrightarrow$$

y_1 e y_2 são as **profundidades ou alturas conjugadas**

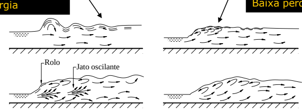
Altura do ressalto = $y_2 - y_1$

RESSALTO HIDRÁULICO

- Tipos de Ressalto → função do Fr_1 (Froude de montante)

Ressalto ondulado
$1<Fr_1<1,7$
Simples ondulação
Não é considerado ressalto
Baixa perda de energia

Ressalto fraco
$1,7<Fr_1<2,5$
Aparece separação das superfícies
Característica ondular. Ainda não é considerado ressalto
Baixa perda de energia



Ressalto oscilante
$2,5<Fr_1<4,5$
Ressalto bem desenvolvido só que oscilante
Tendência de se deslocar para jusante
Aumenta a perda de energia

Ressalto estacionário
$4,5<Fr_1<9,0$
Ressalto bem desenvolvido e fixo
Bom para bacias de dissipação
Grande a perda de energia (45 a 70%)

Fr_1 > 9 não é bom → abrasão, cavitação

RESSALTO HIDRÁULICO

- Equação das profundidades conjugadas – Equação fundamental do ressalto
  - Parte-se do teorema da quantidade de movimento
  - Hipóteses:
    - Regime permanente
    - Canal de declividade fraca
    - Peso na direção do escoamento e força de atrito são opostas e de pequena dimensão
  - T.Q.M → a resultante das forças é igual à variação da quantidade de movimento (ρQV)
  - Vamos ver a dedução!!!

RESSALTO HIDRÁULICO

Equação das profundidades conjugadas – Equação fundamental do ressalto

Parte-se do teorema da quantidade de movimento

Hipóteses:

Regime permanente

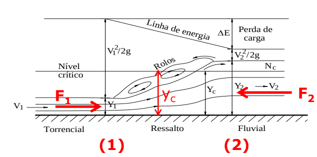
Canal de declividade fraca

Peso na direção do escoamento e força de atrito são opostas e de pequena dimensão

T.Q.M → a resultante das forças que atuam sobre o V.C. é igual à variação da quantidade de movimento (ρQV)

Vamos ver a dedução!!!

RESSALTO HIDRÁULICO



$$\textbf{T.Q.M}\ \sum F = \int_{S.C} (\rho \vec{V} \cdot \vec{dA})\vec{V}$$

$$F_1 - F_2 = -\rho Q V_1 + \rho Q V_2 = \rho Q (V_2 - V_1) = \rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right)$$

F_1 e F_2 são as forças de pressão nas seções 1 (montante) e 2 (jusante)

para uma seção qualquer $\boxed{F = \gamma . \bar{y} . A}$

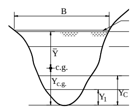
RESSALTO HIDRÁULICO

$$F_1 - F_2 = -\rho Q V_1 + \rho Q V_2 = \rho Q (V_2 - V_1) = \rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right)$$

F_1 e F_2 são as forças de pressão nas seções 1 (montante) e 2 (jusante)

para uma seção qualquer $\boxed{F = \gamma . \bar{y} . A}$

$\bar{y}$ é a distância vertical entre a superfície e o C.G. da seção então,



$$\gamma . \bar{y}_1 . A_1 - \gamma . \bar{y}_2 . A_2 = \rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right)$$

desenvolvendo a equação acima fica :

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{y}_1 . A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{y}_2 . A_2 \rightarrow \text{equação geral para qualquer forma de seção}$$

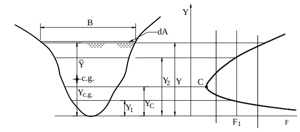
para um valor conhecido de $Q \rightarrow$ todos os demais termos são função de y

$$\boxed{\text{define- se força específica } \rightarrow F(y) = \frac{Q^2}{gA} + \bar{y} . A}$$

assim, $F(y_1) = F(y_2) \rightarrow$ que é a condição para o ressalto estacionário!!!

RESSALTO HIDRÁULICO

- **Gráfico y X F**
  - **Propriedades:**



no caso do ressalto estacionário, $F_1 = F_2$

1) Se $y \rightarrow 0 \therefore F \rightarrow \infty$ curva assintótica ao eixo das abscissas $\rightarrow$ y diminui $\rightarrow$ F aumenta

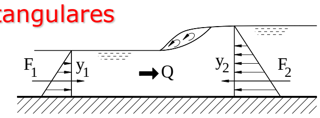
2) Se $y \rightarrow \infty \therefore F \rightarrow \infty$ curva cresce para direita $\rightarrow$ F aumenta com y

3) Se F é mínimo $\rightarrow y = y_c$ (ver dedução na pág. 338) análogo ao caso de E mínimo

4) Para um dado valor de $F \rightarrow$ tem- se dois valores de y, que são as $\boxed{\text{profundidades conjugadas } (y_1 \text{ e } y_2)}$

RESSALTO HIDRÁULICO

- Caso de canais retangulares

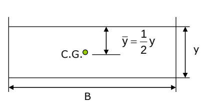


Teorema da quantidade de movimento :

seção retangular $\rightarrow A = B . y$ e $\bar{y} = \frac{1}{2} y$

$$\frac{Q^2}{gBy_1} + \frac{y_1}{2} \cdot By_1 = \frac{Q^2}{gBy_2} + \frac{y_2}{2} \cdot By_2$$

dividindo por B, fica :



$$\frac{Q^2}{gB^2 y_1} + \frac{y_1^2}{2} = \frac{Q^2}{gB^2 y_2} + \frac{y_2^2}{2} \rightarrow \text{como } q = \frac{Q}{B}, \text{fica :}$$

$$\frac{q^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{2} = \frac{q^2}{gy_2} + \frac{y_2^2}{2} \quad \text{ou} \quad y_1^2 - y_2^2 = \frac{2q^2}{g} \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right)$$

desenvolvendo, fica :

$$(y_1 - y_2)(y_1 + y_2) = \frac{2q^2}{g} \left(\frac{(y_1 - y_2)}{y_2 . y_1} \right) \text{ ou } (y_1 + y_2) = \frac{2q^2}{g} \left(\frac{1}{y_2 . y_1} \right)$$

multiplicando por $(y_2 . y_1)$, tem-se :

$$y_2 y_1^2 + y_1 y_2^2 = \frac{2q^2}{g} \rightarrow \text{continua ....}$$

RESSALTO HIDRÁULICO

continuação :

$$y_2 y_1^2 + y_1 y_2^2 = \frac{2q^2}{g}$$

dividindo por y_1^3, tem- se :

$$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 + \frac{y_2}{y_1} = \frac{2q^2}{gy_1^3} \quad \text{como } \boxed{Fr_1^2 = \frac{q^2}{gy_1^3}}, \text{ tem- se :}$$

$$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 + \frac{y_2}{y_1} - 2Fr_1^2 = 0 \rightarrow \text{eq. do segundo 2o. grau } ax^2 + bx + c = 0$$

$$\text{com } x = \frac{y_2}{y_1}, a = 1, b = 1 \text{ e } c = -2Fr_1^2$$

RESSALTO HIDRÁULICO

solução $\rightarrow \dfrac{y_2}{y_1} = \dfrac{-1 \pm \sqrt{1+8\,Fr_1^2}}{2}$

fisicamente, só vale a raiz positiva, pois para ocorrer o ressalto $\dfrac{y_2}{y_1} > 1$

então, rearrajando a equação acima, fica :

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

ou, analogamente:

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

Equações das profundidades conjugadas para canais retangulares

$\rightarrow$ conhecidas as condições de montante, usa-se a eq. 1 e determina-se y_2

$\rightarrow$ conhecidas as condições de jusante, usa-se a eq. 2 e determina-se y_1

RESSALTO HIDRÁULICO

- Importante: $\dfrac{y_2}{y_1} = \dfrac{-1 \pm \sqrt{1+8\,Fr_1^2}}{2} > 1$

$$\therefore \sqrt{1+8\,Fr_1^2} > 3$$

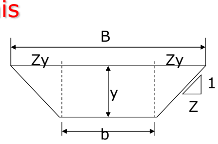
$$\Rightarrow \boxed{Fr_1 > 1}$$

Conclusão: a condição necessária para a existência do ressalto é que o escoamento a montante seja torrencial

Esta condição não é suficiente, embora necessária para a ocorrência do ressalto

RESSALTO HIDRÁULICO

- Caso de canais trapezoidais



$\bar{y}$ e a área são diferentes :

$\bar{y} = \left(\dfrac{y^2 b/2 + Zy^3/3}{by + Zy^2}\right)$ e $A = \left(by + Zy^2\right)$

a força de pressão é dada por $F = \gamma . \bar{y} . A$

substituindo no teorema da quantidade de movimento, fica :

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

a equação acima pode ser adimensionalizada em função de 3 parâmetros :

$\rightarrow \boxed{Fr_1 = \dfrac{Q^2 B}{gA_1^3}} \Rightarrow$ No. de Froude na seção de montante (torrencial)

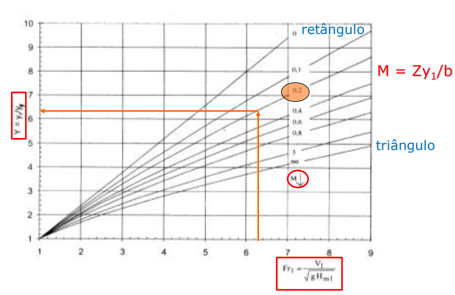
$\rightarrow \boxed{Y = \dfrac{y_2}{y_1}} \Rightarrow$ relação entre as profundidades conjugadas $\quad \dfrac{1}{2}\left[1 - Y^2\right] + \dfrac{M}{3}\left[1 - Y^3\right] = Fr_1^2\left[\dfrac{(1+M)^2}{1+2M}\right]\left[\dfrac{(1+M)}{Y(1+MY)} - 1\right]$

$\rightarrow \boxed{M = \dfrac{Zy_1}{b}} \Rightarrow$ razão de aspecto

a equação foi colocada em forma gráfica em função dos 3 parâmetros $\rightarrow$.........

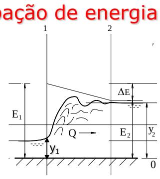
RESSALTO HIDRÁULICO

PROFUNDIDADES CONJUGADAS PARA CANAIS TRAPEZOIDAIS



RESSALTO HIDRÁULICO

- Perda de carga no ressalto – dissipação de energia



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

para o caso de canais retangular es, a expressão fica :

$$\boxed{\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 y_2 . y_1} \text{ (m)}}$$

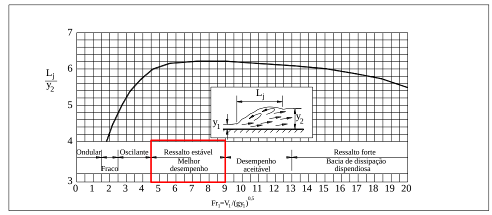
OBSERVAÇÃO IMPORTANTE : é fundamenta l em muitas aplicações usar as equações na forma ADIMENSIONAL

$$\boxed{\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 y_2 . y_1} \rightarrow \frac{\Delta E}{y_1} = \frac{y_1^3 (y_2/y_1 - 1)^3}{4 y_2 y_1^2} = \frac{(y_2/y_1 - 1)^3}{4 y_2/y_1}}$$

$$\boxed{E_1 = y_1 + \frac{q^2}{2 g y_1^2} \rightarrow \frac{E_1}{y_1} = (1 + \frac{Fr_1^2}{2})}$$

RESSALTO HIDRÁULICO

- Comprimento do ressalto (canal retangular)
  - Dimensionamento da bacia de dissipação
  - Estudos experimentais para canais retangulares:



Região de melhor desempenho → $4,5<Fr_1<9$ → Lj ~ $6y_2$

RESSALTO HIDRÁULICO

- Eficiência do ressalto: capacidade de dissipação da energia do escoamento torrencial

$$\boxed{\eta = \frac{\Delta E}{E_1}}$$

Energia específica: $E_1 = Y_1 + {V_1}^2/2g$

RESSALTO HIDRÁULICO

- Problemas: 11.5, 11.12 e 11.15
- $\sum F = \int_{s.c} (\rho \vec{V} \circ \overrightarrow{dA})\ \vec{V}$
- $\sum F = \int_{s.c} (\rho \vec{V} \cdot \overrightarrow{dA}) \vec{V}$
- (m) y_1 ↕
- Tratamento de água M = Z y_1/b