

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **CÁLCULO DAS ALTURAS CONJUGADAS DO RESSALTO HIDRÁULICO PARA CANAIS DE DIFERENTES GEOMETRIAS**

*Vitória Costa e Silva<sup>1</sup> ; Joel Roberto Guimarães Vasco<sup>2</sup>*

**RESUMO** – Na engenharia, o ressalto hidráulico é um assunto amplamente estudado. Isso porque erosões podem surgir em escoamentos com velocidade elevada, que pode causar danos tanto a canais artificiais, quanto aos naturais. No entanto, a quantificação da energia dissipada é restrita, comumente, à seção retangular. Por este motivo, este trabalho visa determinar as alturas conjugadas do ressalto para geometrias diferentes da retangular, para uma seção prismática qualquer. Parte-se do balanço de quantidade de movimento com a hipótese de fundo horizontal e hidrostática do perfil de pressão nos regimes subcríticos e supercríticos. A fim de verificar o equacionamento desenvolvido, particulariza-se a seção para dois casos: uma seção trapezoidal simétrica e uma seção de drenagem urbana (escoamento na sarjeta). Para a seção trapezoidal, fixou-se o número adimensional  $M$ , que relaciona a inclinação do talude, a altura conjugada  $y_1$  e a base do canal. O mesmo foi feito para seção pista com sarjeta. Para o caso da seção trapezoidal simétrica, os resultados apresentados pelo equacionamento reproduziram os resultados de Porto (2006). Já para a seção de drenagem urbana, ilustra-se a capacidade do equacionamento em resolver mudanças bruscas de seção.

**ABSTRACT**–The hydraulic jump is a widely studied subject in engineering due to the fact that high velocity flows can cause erosion to both artificial and natural channels. However, the dissipated energy equation is usually presented for rectangular section. Therefore, this work aims to determine the conjugate depths for any prismatic section. It starts from the momentum balance with the hypothesis of horizontal bed and hydrostatic pressure before and after the jump. In order to verify the developed equation, two cases are verified: a symmetrical trapezoidal section and an urban drainage section. The dimensionless number  $M$ , considering the trapezoidal section, is related to the inclination of the slope, the conjugate depth  $y_1$  and the base of the channel. The same dimensionless number was used for the urban drainage section. For the symmetrical trapezoidal section, the results presented by the developed equation reproduced the results of Porto (2006). As for the urban drainage section, the work shows a solution that solve the abrupt section changes problems.

**Palavras-Chave** – ressalto hidráulico; seção trapezoidal; seção pista com sarjeta

#### **INTRODUÇÃO**

Na engenharia, o ressalto hidráulico é um assunto amplamente estudado, com enfoque na dissipação de energia. Isto se deve ao fato que, em escoamentos com velocidade elevada, a erosão é um processo muito comum, que pode causar danos tanto a canais artificiais, quanto aos naturais. Sendo

1) UFG - EECA: Avenida Universitária, Quadra 86, Lote Área 1488 - Setor Leste Universitário, Goiânia - GO, 74605-220, (62) 99125-9554, vitóriaces10@gmail.com

2) UFG - EECA: Avenida Universitária, Quadra 86, Lote Área 1488 - Setor Leste Universitário, Goiânia - GO, 74605-220, (62) 3209-6187, joelvasco@ufg.br

assim, o ressalto é o principal método utilizado para promover uma acentuada perda localizada de energia.

Segundo Enciso e Navarrete (2007), existem diversos tipos de canais, que podem possuir diversas formas, desde irregulares, como é caso dos canais naturais, até trapezoidais e retangulares (passando por formas poligonais, parabólicas, circulares, etc). Os mais utilizados para grandes obras de hidráulica são os retangulares e trapezoidais, sendo o primeiro, utilizado em solos com maior estabilidade e o segundo, conseqüentemente, em solos com menor estabilidade. Apesar de estar presente, na maioria das vezes, em canais de grande proporção, é interessante atentar para o fato que este fenômeno pode surgir nos mais inesperados locais, tais como sarjetas de drenagem urbana. Nóbrega (2014) pontua que o ressalto é caracterizado geometricamente pelas profundidades conjugadas na seção de início e término ( $y_1$  e  $y_2$ ), pelo comprimento do rolo ( $L_r$ ), e pelo comprimento do ressalto ( $L_j$ ). Este trabalho tem como enfoque o cálculo das alturas conjugadas para diferentes geometrias de canais. Na literatura, é fácil encontrar métodos para obtenção das alturas conjugadas para um canal retangular, o mesmo não ocorre para as demais geometrias.

Em virtude do que foi apresentado, nota-se que os estudos referentes ao ressalto hidráulico em diferentes tipos de canais são limitados. Por este motivo, este trabalho visa ampliar o conhecimento teórico do assunto, visando outras diversas geometrias prismáticas, diferentes da seção retangular. Para isto, será abordado o cálculo das alturas conjugadas do ressalto hidráulico para diferentes seções, bem como a determinação da perda de energia.

## **RESSALTO HIDRÁULICO**

Segundo Porto (2006), o ressalto hidráulico é um fenômeno que ocorre devido a transição de um escoamento torrencial (supercrítico) para um escoamento fluvial (subcrítico). Mudança brusca do nível d'água, perda considerável de energia em uma curta distância, formação de ondas, incorporação de ar no escoamento e turbulência caracterizam o ressalto. Sua principal utilização é focada na dissipação de energia, evitando que processos erosivos se formem no leito de canais.

“A aparência visual de um ressalto hidráulico forte o suficiente para produzir uma superfície quebrada com formação de bolhas de ar, parece ser a de uma cascata de água borbulhante em uma direção contra o fluxo que se aproxima” (HOYTE, SELLIN, 1989). O fenômeno geralmente irá se formar quando em uma corrente rápida existir um obstáculo ou houver uma mudança brusca de inclinação (ENCISO; NAVARRETE, 2007).

O termo “rolo” se refere ao escoamento acima do fluxo de entrada, que se encontra em alta velocidade, e o escoamento difuso subsequente. Nóbrega (2014) descreve que nesta região existe a formação de vórtices de grandes escalas e elevada incorporação de ar, tendo um comprimento

menor que o do próprio ressalto. Apesar da superfície livre antes e depois do ressalto ser praticamente lisa e sem perturbações, a mudança do regime de escoamento supercrítico para o subcrítico é caracterizada por um escoamento caótico, dando o aspecto de uma superfície espumante devido à incorporação de ar.

Os principais aspectos de um ressalto hidráulico são: os tipos, a localização, as alturas conjugadas, o comprimento e a dissipação de energia. Neste trabalho serão abordados o cálculo das alturas conjugadas e a perda de energia.

### Alturas Conjugadas do Ressalto Hidráulico

As alturas conjugadas de um ressalto,  $y_1$  e  $y_2$ , são dois parâmetros específicos do fenômeno, consistindo nas alturas imediatamente a montante e imediatamente a jusante do ressalto. Tais alturas podem ser relacionadas, tendo em conta o número de Froude,  $Fr$  (SOUSA, 2011), conforme a equação (1). Aplicando-se a Equação da Conservação de Quantidade de Movimento entre a seção de início, que possui altura  $y_1$ , e a seção final do ressalto, que possui altura  $y_2$ , em um canal retangular, e negligenciando a resistência do fundo, tem-se a equação (2), conhecida como a equação de Bélanger (NÓBREGA, 2014), de forma que  $v$  é a velocidade média do escoamento,  $A$  é a área do canal e  $B$  é a largura da superfície livre.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times A/B}} \quad (1)$$

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

Geralmente, esta formulação possui uma boa aproximação com dados experimentais. Porém, Beirami e Chamani (2006) observaram que quando não se consideram as tensões de cisalhamento no fundo do canal, os valores encontrados experimentalmente para as alturas conjugadas são um pouco inferiores às aquelas encontradas teoricamente pela equação de Bélanger.

### Dissipação de Energia no Ressalto Hidráulico

“Uma das propriedades mais importantes do ressalto hidráulico é a sua capacidade de dissipar eficientemente a energia do escoamento pela passagem de um escoamento rápido a um escoamento lento” (SOUSA, 2011). Chow (1959) reforça a ideia da utilização do ressalto para prevenir erosões no canal através da dissipação de energia no escoamento supercrítico.

A equação (3) permite calcular a perda de energia que ocorre no ressalto, partindo-se das seções de entrada e saída.

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left( y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left( y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad (3)$$

Segundo Porto (2006), também é importante avaliar a inter-relação entre as curvas de energia específica e força específica no ressalto. Esta relação está apresentada na Figura 1.

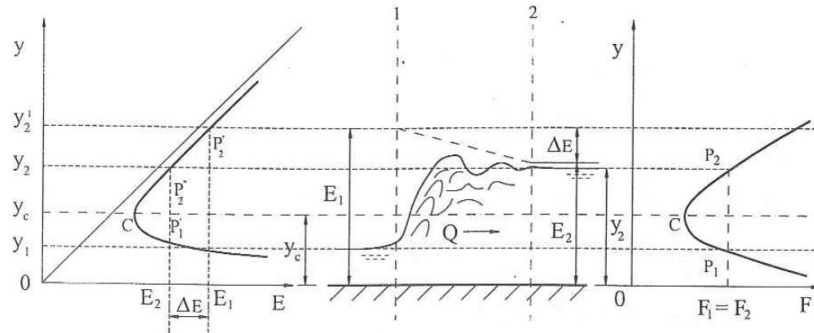


Figura 1 – Inter-relação entre as curvas  $y \times E$  e  $y \times F$  (PORTO, 2006)

## FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO RESSALTO HIDRÁULICO

A seguir, será apresentado o desenvolvimento da formulação matemática do problema, para que seja possível se realizar a implementação de um código computacional. Tal código é responsável pelo cálculo das alturas conjugadas e perda de energia para um ressalto. As equações desenvolvidas a seguir, valem para uma seção prismática qualquer.

### Considerações Iniciais

Afim de se determinar as equações que irão reger o ressalto, parte-se do cálculo da força específica a partir do Teorema da Conservação da Quantidade de Movimento, aplicado a um volume de controle limitado pelas seções nas quais irão ocorrer as alturas conjugadas, como é possível observar na Figura 2.

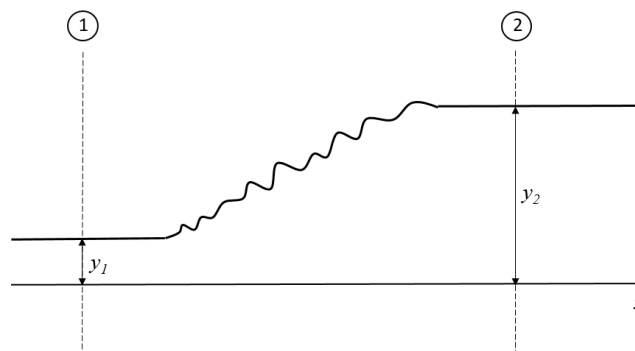


Figura 2 – Seções do Ressonho Hidráulico

Para o desenvolvimento das equações que regem o fenômeno é necessário realizar algumas suposições, são elas:

1. O escoamento é permanente, ou seja, a resultante das forças que atuam sobre o Volume de Controle (VC) é igual ao fluxo de quantidade de movimento através da Superfície de Controle (SC);
2. O canal possui fraca declividade, portanto assume-se a hidrostaticidade do perfil de pressão;
3. As componentes do peso e a força tangencial nas paredes e fundo do canal são opostas e de pequena magnitude, desta forma pode-se desprezá-las;
4. Sobre o volume de controle atua apenas a forças de pressão;
5. O escoamento é unidimensional.

### Cálculo das Alturas Conjugadas do Ressalto Hidráulico para uma Seção Prismática Qualquer

Pelo balanço integral de quantidade de movimento tem-se a equação (3).

$$\underbrace{\sum F_x}_1 = \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} v_x \rho dVol}_2 + \underbrace{\int_{SC} v_x \rho \vec{v} \cdot d\vec{A}}_3 \quad (4)$$

Como se verifica a permanência no escoamento em questão, tem-se que o termo 2 da equação (4) é nulo. Partindo-se do termo 1, e a partir da suposição 4, é possível obter a equação (5).

$$(1) \sum F_x = F_{p_1} - F_{p_2} \quad (5)$$

Sendo a força de pressão no líquido dada pela integração da pressão ( $p$ ) em função da área ( $A$ ) é possível obter a equação (6).

$$F_{p_1} - F_{p_2} = \int_{A_1} p_1 dA - \int_{A_2} p_2 dA \quad (6)$$

Desenvolvendo-se (6), obtêm-se a equação (7).

$$F_{p_1} + F_{p_2} = p_{CG1} A_1 - p_{CG2} A_2 \quad (7)$$

Como a pressão é dada por  $\gamma \bar{y}$ , a equação (7) se torna (8). De forma que  $\gamma$  é peso específico do fluido e  $\bar{y}$  é a distância vertical da superfície livre até o centro de gravidade área em que atua a pressão.

$$F_{p_1} - F_{p_2} = \gamma \bar{y}_1 A_1 - \gamma \bar{y}_2 A_2 \quad (8)$$

Partindo-se do termo 3, é possível obter a equação (9).

$$(3) \int_{SC} v_x \rho \vec{v} \cdot d\vec{i} = v_1 (-\rho v_1 A_1) + v_2 (\rho v_2 A_2) \quad (9)$$

Pela equação da continuidade, tem-se a vazão ( $m^3/s$ ) é dada por  $Q = v A$ , com isso (8) se torna a equação (10).

$$\int_{SC} v_x \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \rho Q (v_2 - v_1) \quad (10)$$

Deixando a equação (10) em função da vazão e área tem-se (11).

$$\int_{SC} v_x \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \rho Q^2 \left( \frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) \quad (11)$$

Substituindo (8) e (11) em (4) obtêm-se (12).

$$\gamma \bar{y}_1 A_1 - \gamma \bar{y}_2 A_2 = \rho Q^2 \left( \frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) \quad (12)$$

Sabendo-se que  $\gamma = \rho g$  e reorganizando os termos de (12) tem-se a equação (13).

$$\frac{Q^2}{g A_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q^2}{g A_2} + \bar{y}_2 A_2 \quad (13)$$

## RESULTADOS

Nesta seção serão abordados os testes feitos para duas seções: uma trapezoidal simétrica e outra triangular composta. A seção trapezoidal possui solução analítica para o cálculo das alturas conjugadas (PORTO, 2006), que será comparado com o código computacional proposto. Já a seção triangular composta simula o ressalto em um canal de drenagem, ilustrando a capacidade do código desenvolvido em calcular as alturas conjugadas mesmo com variações bruscas de seção.

### Seção Trapezoidal

Considerando-se uma seção trapezoidal simétrica (Figura 3), com uma largura de fundo  $b$  e inclinação dos taludes  $1V:ZH$ , é possível desenvolver uma relação para as alturas conjugadas. Para isso considera-se  $Y = y_2/y_1$  e  $M = Z y_1/b$ . Partindo-se da equação (13) obtém-se (24).

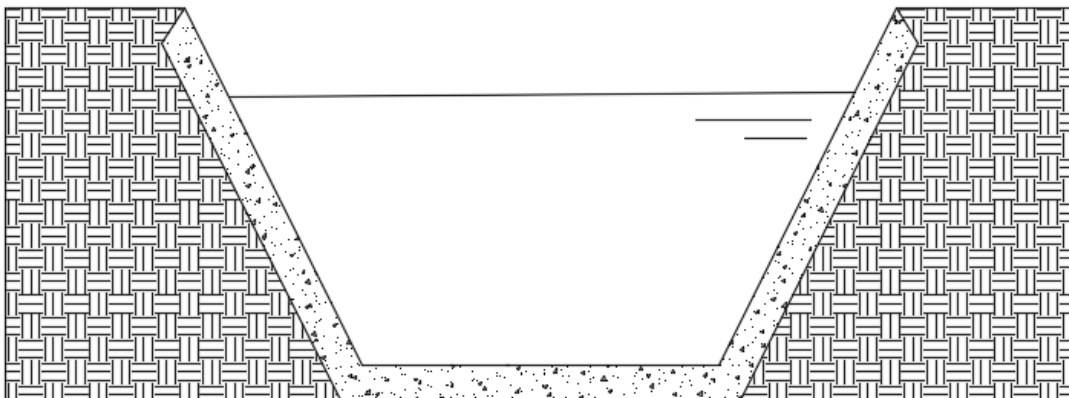


Figura 3 – Seção trapezoidal simétrica

$$\frac{1}{2}[1 - Y^2] + \frac{M}{3}[1 - Y^3] = Fr_1^2 \left[ \frac{(1 + M)^2}{1 + 2M} \right] \left[ \frac{(1 + M)}{Y(1 + MY)} - 1 \right] \quad (14)$$

Desta forma, partindo-se da equação (24), foi possível traçar o ábaco obtido por Porto (2006), representado por linhas na Figura 4. Com isso, através do código computacional que se utiliza da equação (13), foram traçados os pontos na Figura 4, afim de se comparar os resultados, o que permite atestar a eficiência do código quanto aos resultados.

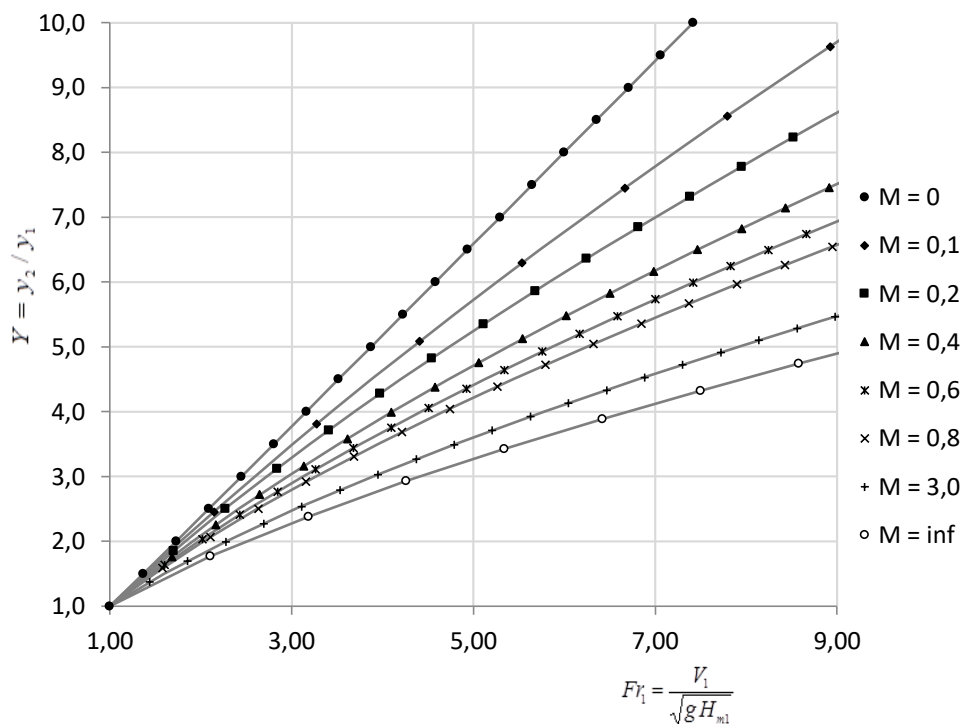


Figura 4 - Relação das alturas conjugadas em função de  $Fr_1$  e  $M$ , canais trapezoidais

### Seção pista com sarjeta

Para ilustrar a eficiência do código computacional, utilizou-se a meia seção de pista com sarjeta de drenagem urbana como exemplo de uma seção prismática composta. Para isto, foi utilizada a seção padrão para cidade de Goiânia (medidas em cm), ilustrada na Figura 5.



Figura 5 – Seção pista com sarjeta

Desta forma, a partir da seção ilustrada, obteve-se um gráfico (Figura 5) que relaciona as alturas conjugadas para o ressalto hidráulico, assim como para o canal trapezoidal. Porém, como a seção é fixa, a curva é única, variando somente a vazão e, conseqüentemente, a altura da lâmina d'água.

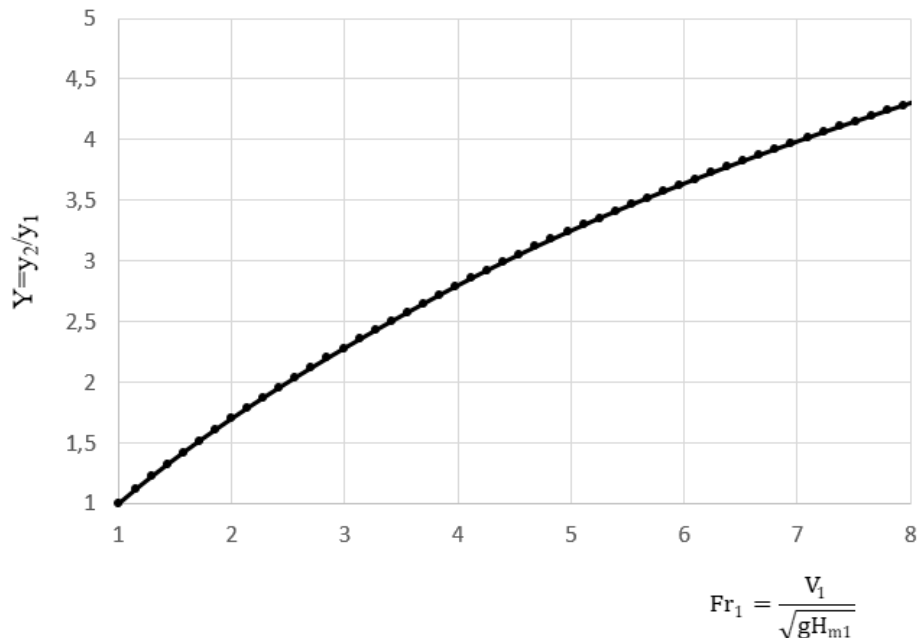


Figura 6 - Relação das alturas conjugadas em função de  $Fr_1$  e  $M$ , seção pista com sarjeta

## CONCLUSÕES

O trabalho em questão abordou o cálculo das alturas conjugadas do ressalto hidráulico em seções compostas prismáticas, diferentes da seção retangular tradicional. A partir do balanço de quantidade de movimento linear, na direção do escoamento, obtém-se uma equação implícita para  $y_1$  (ou  $y_2$ ). Então, um código computacional foi desenvolvido para resolver estas equações, lançando mão do Método de Newton Modificado. Para avaliar a eficiência do código desenvolvido, dois estudos de caso foram propostos: uma seção trapezoidal simétrica e uma seção típica de drenagem urbana (escoamento na calha na sarjeta). Para o caso da seção trapezoidal simétrica, os resultados apresentados pelo código reproduziram os resultados de Porto (2006). Já para a seção de drenagem urbana, ilustra-se a capacidade do código em resolver mudanças bruscas de seção.



## REFERÊNCIAS

- BEIRAMI, M. K. e CHAMANI, M. R.** HYDRAULIC JUMPS IN SLOPING CHANNELS: SEQUENT DEPTH RATIO. *Jornal of Hydraulic Engineering*. 2006, Vol. 132, p. 1061-1068.
- CHOW, V.** OPEN-CHANNEL HYDRAULICS. New York : McGRAW-HILL, 1959, p.393-438.
- CHANSON, H.** CURRENT KNOWLEDGE IN HYDRAULIC JUMPS AND RELATED PHENOMENA. A SURVEY OF EXPERIMENTAL RESULTS. Brisbane : *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 2009, Vol. 28, p. 191-210.
- ENCISO, C. A. A.: NAVARRETE, J. A. A.** ESTUDIO DEL RESALTO HIDRÁULICO EN UN CANAL SEMICIRCULAR. Bogotá: Universidad de la Salle, 2007.
- HOYTE, J. W. e SELLIN, R. H. J.** HYDRAULIC JUMP AS "MIXING LAYER". *Jornal of Hydraulic Engineering*. 1989, Vol. 115, 12, p. 1607-1614.
- NÓBREGA, J. D. 2014.** METODOLOGIA TEÓRICA E EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO RESSALTO HIDRÁULICO CLÁSSICO. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, 2014.
- PETERKA, A. J.** HYDRAULIC DESIGN OF STILLING BASINS AND ENERGY DISSIPATORS. Colorado : United States Bureau of Reclamation, 1984.
- PORTO, R. M. 2006.** HIDRÁULICA BÁSICA. 4ª. São Carlos : EESC-USP, 2006. p. 335-347.
- SOUSA, P. M. B. M. 2011.** ESTUDO DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO A JUSANTE DE DESCARREGADORES NÃO CONVENCIONAIS. Porto : Universidade do Porto, 2011.