



## Caracterização de Ressalto Hidráulico em Escoamento Bruscamente Variado em Canais Retangulares

Ofélia de Lira Carneiro Silva<sup>1</sup>, Talita Mariana L. Carneiro Matias<sup>2</sup>, Silvestre Lopes da Nóbrega<sup>1</sup>, Pedro Alves da Silva Filho<sup>1</sup>, Alex Bortolon de Matos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil  
Universidade Federal de Roraima (UFRR) – Boa Vista, RR – Brazil

<sup>2</sup>Engenheira Civil – Casa Civil do Estado de Roraima e avaliadora da Caixa Econômica  
Boa Vista, RR – Brazil

ofelia.lira@ufrr.br, talitamatias@gmail.com,  
silvestre.lopes@ufrr.br, pedro.filho@ufrr.br,  
alex.ufrr@gmail.com

*Resumo. O ressalto hidráulico é uma das formas mais usuais de dissipação de energia do escoamento em canais. O ressalto hidráulico é uma das formas mais usuais de dissipação de energia do escoamento em canais. Este trabalho propôs a caracterização de ressalto hidráulico em escoamento bruscamente variado em canais retangulares. O procedimento experimental foi desenvolvido em um canal rectangular de acrílico. O estudo do ressalto deu-se com base nos valores dos números de Froude que variaram de 1,42 a 5,45 o que pode se determinar o regime do escoamento. O uso de obstáculos para gerar ressalto no canal possibilitaram a visualização de diferentes ressaltos que variaram de Ondulado a Estacionário. O ressalto forte não se pôde ser observado devido as diversas restrições do canal. O comprimento do ressalto, obtido através de equações experimentais comprovaram que o ressalto aconteceu em curta distância.*

*Abstract. The hydraulic jump is one of the most common forms of flow of energy dissipation in channels. For this work, using an artificial channel acrylic determine the Froude number. The main interest in making this work is to show the practical aspects involved in the analysis of free fluid flow in artificial channels of rectangular. The flow of free surface the hydraulic jump characteristics are conditioned to the Froude number, which in this study ranged from 1.42 to 5.45. It has aimed to address the main practical topics relevant to the design of artificial channels was determined roughness coefficient equal to 0.01375 and with Froude number can characterize the types of hydraulic jum indifferent ridges that varied from wavy to stationary.*

### 1. Introdução

No escoamento em canais, em longos trechos retilíneos admite-se que a energia decresce linearmente entre suas seções, partindo de montante a jusante. Entretanto, essa hipótese não é válida nas proximidades de um obstáculo que pode estar localizado no fundo do canal. Nessas regiões, o perfil d'água sofre alterações que podem ser bruscas,



ocorrendo em distâncias curtas, ou mais suaves, propagando-se por longos trechos do canal. As alterações dependem não só do obstáculo implantado, mas também das características do escoamento e da geometria do canal.

O ressalto hidráulico é a forma mais tradicional de dissipação de energia, existindo um consenso geral quanto às suas características de funcionamento, porém, pouco se conhece sobre o seu comportamento interno. O ressalto hidráulico é um fenômeno altamente turbulento que gera flutuações de pressão sobre o fundo da bacia ou canal aberto, e pode levar à destruição do dissipador de energia por diferentes mecanismos, tais como: fadiga, subpressão e cavitação, sendo similar a uma onda de choque estacionária. Ocorre sempre que o escoamento passa de torrencial para fluvial, ou ainda dizendo, ocorre sempre que a linha de água corta o nível crítico de baixo para cima. O ressalto hidráulico é utilizado em uma série de atividades: Dissipação de energia; Sobrecarga estrutural; Reduzir pressões elevadas; Aumentar o coeficiente de vazão de comportas e orifícios mantendo-os livre (Baptista e Coelho, 2010, Porto, 2006).

Caracteriza-se o ressalto pelo seu  $Fr_1$  (número de Froude inicial) e pelas variáveis básicas relacionadas a ele, que são as suas alturas conjugadas  $Y_1$  (altura conjugada na região supercrítica) e  $Y_2$  (altura conjugada na região subcrítica) (Porto, 2006, Netto, 1982). Para canais retangulares, é possível calcular analiticamente uma relação explícita entre  $Y_2/Y_1$  e  $Fr_1$ . Para Números de Froude inferiores a 4,5 o ressalto ainda é fraco e pouco caracteriza uma grande dissipação de energia. Para Números de Froude entre 4,5 e 9, o ressalto é bem caracterizado e localizado, sendo preferido no dimensionamento, principalmente para dissipação de energia. Para Números de Froude superiores a 9, apesar de indicar um potencial de dissipação maior, notam-se massas de fluido que rolam para baixo no início do ressalto, provocando ondas significativas para jusante impróprias aos dimensionamentos.

O ressalto é, principalmente, utilizado como dissipador de energia cinética de uma lâmina líquida no canal. Este fenômeno ocupa uma posição fixa em um leito uniforme, desde que o regime seja permanente, e pode ser considerado como uma onda de choque estacionária. Pelo fato do ressalto ocorrer frequentemente nas proximidades de uma comporta de regularização ou ao pé de um vertedor de barragem e apresentar grande potencial erosivo, em função de grande flutuação de pressão e de velocidade junto aos contornos do canal faz-se necessário conhecer as características do ressalto (Baptista e Coelho, 2010).

Pode-se observar também formação de ressalto nas vizinhanças de obstáculos submersos, como por exemplo nos pilares de pontes, vertedores, comportas, na expansão ou contração de canais. A quantificação desses fenômenos de escoamento e o traçado com precisão da variação do perfil d'água em escoamentos não uniformes é fundamental em vários problemas de hidráulica (Matias, 2015). Ao projetar um canal, por exemplo, quanto maior for o número de informações possíveis sobre os comportamentos de variações ou ocorrências de mudanças do escoamento, maior contribuição em prever e evitar nesses projetos consequências desastrosas mantendo a integridade estrutural da obra.

Sabendo a amplitude de vertentes que sofrem interferência do ressalto no campo da engenharia hidráulica, este trabalho busca mostrar características deste fenômeno, usando como base a influência do ressalto em canais retangulares, trabalhando com um canal artificial como modelo, tendo finalidade didática.

## 2. Metodologia

O processo metodológico empregado para o desenvolvimento deste trabalho consistiu nas seguintes etapas:

- a) Identificação do Local e Coleta de Dados;
- b) Procedimento Experimental;
- c) Calibração do canal;
- d) Classificação dos Tipos de escoamentos;
- e) Verificação da ocorrência do fenômeno de ressalto hidráulico.

O estudo desenvolveu-se em um canal experimental instalado nas dependências do laboratório NUPENG (Núcleo de Pesquisa em Engenharia), Figura 1, do Campus do Paricarana, da Universidade Federal de Roraima.

### 2.1. Descrição do sistema experimental

O sistema experimental é constituído por uma estrutura metálica confeccionada em perfis de aço SAE 1020 com 5 mm de espessura, com as dimensões (CxLxA) 3680 x 660 x 1250 mm. O canal hidráulico é abastecido por um circuito hidráulico fechado com reservatório confeccionado em chapas soldadas de aço INOX e de dimensões 1250 mm de comprimento, de largura 550 mm, altura 600 mm e sua capacidade volumétrica de 410 litros. A água é recalçada por uma bomba hidráulica através de tubulações de PVC. A descarga de água afluenta no sistema deu-se de forma com que o fluxo hidráulico, que ocorre de montante para jusante, ocorra em circuito fechado.



Figura 1. Canal modelo em acrílico cristal - Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do NUPENG da UFRR.

Para funcionamento do sistema experimental, foi utilizada uma bomba centrífuga da marca TEXIUS modelo TMI INOX com potência de 1,5 CV, tensão de 220V trifásica e frequência de 60Hz, rotação nominal de 3500 rpm, altura manométrica máxima de 41 m.c.a. e vazão volumétrica máxima de 9,60 m<sup>3</sup>/h. Tubulação de sucção e 1 1/4" (40 mm) e tubulação recalque de 1" (32 mm) conectada a tubulação do reservatório responsável pela alimentação do canal.

O funcionamento do sistema hidráulico é acionado por um painel em chapa metálica dobrada e protegido com pintura eletrostática e desenhada para abrigar os comandos elétricos. Composto de botoeira liga-desliga, botoeira de emergência, conector para acoplamento do controle remoto do macaco hidráulico, chave potenciométrica para variar a rotação da bomba e display indicativo da frequência da bomba (Figura 2).

O nível da água foi medido através de um aparelho denominado linímetro. As medições foram feitas pela subtração da profundidade total do canal menos a profundidade onde escoava a lâmina de água. A medição da vazão se deu através de um medidor nomeado rotâmetro, dispositivo utilizado para medir a vazão de um líquido e pertence à classe de medidores de área variável, é, em geral, constituído por um tubo transparente com escala onde um flutuador (ou bóia) move-se livremente dentro deste tubo. O equilíbrio é atingido quando a diferença de pressão e impulsão do fluido compensam a força gravitacional.



**Figura 2. Bomba marca TEXIUS modelo TMI INOX. Painel abrigo dos comandos elétricos do sistema hidráulico.**

Para possibilitar a ocorrência de ressaltos hidráulicos presentes à jusante de vertedores, foram utilizados dois obstáculos (peças triangulares), um semi circular com diâmetro de 20 cm e 7,5 cm de altura e um triangular com 20 cm de comprimento e 8,4 cm de altura em acrílico branco conforme Figura 3.



Figura 3. Dispositivo com geometria triangular utilizado para caracterização de ressalto

### 3. Procedimento Experimental

#### 3.1. Calibração do canal

Para calibração do canal retangular, fez-se necessário conectar a tubulação de alimentação do canal ao reservatório de alimentação. Em sequência ligou-se a bomba, com o registro fechado. Então abriu-se o registro para alimentação do reservatório e consequentemente do canal. Com auxílio de um rotâmetro fez se as medidas de vazões respectivas para cada frequência da bomba, e com um paquímetro e um macaco hidráulico determinou-se as inclinações do canal. Utilizando um linímetro, e já tendo conhecimento das vazões e inclinações coletou-se as alturas da lâmina de água em diversos pontos do canal, para diversas frequências da bomba, e por fim, pela equação de Manning, determinou-se o coeficiente de rugosidade ( $n$ ) do canal.

#### 3.2. Determinação das alturas conjugadas das seções

A literatura determina a altura  $Y_1$  como sendo a altura da lâmina de água pouco antes da formação do ressalto, quando o escoamento ainda é supercrítico. Já a altura  $Y_2$  é a lâmina de água na transição do escoamento, onde ele deixa de ser variado e passa a ser uniforme, onde já não ocorrem mais turbilhonamentos. A Figura 4 ilustra os limites do ressalto, onde devemos coletar as alturas  $Y_1$  e  $Y_2$ .



Figura 4. Determinação das alturas conjugadas  $Y_1$  e  $Y_2$  (PORTO,2006).

Para a determinação de  $Y_2$ , recorre-se à Equação 1, demonstrada a seguir:

$$Y_2 = \frac{Y_1}{2} x (\sqrt{(1 + 8xFr_1)} - 1) \quad (1)$$



Sendo:

Y1 = altura conjugada (m)

Y2 = altura conjugada (m)

Fr = Número de froude

O comprimento do ressalto pode ser estimado pela Equação 2 apresentada a seguir:

$$Lr \cong 6,9x (Y2 - Y1) \quad (2)$$

Sendo:

Lr = Comprimento do ressalto

Y1= Altura conjugada (m)

Y2 = Altura conjugada (m)

Para o procedimento das coletas estabeleceu-se os pontos a cada meio metro (0,50 m) de distância, partindo do início (cota 0,0 m) até o final (cota 5,0 m) do canal, após a estabilização do escoamento e coletou-se com auxílio de um linímetro a altura da lâmina de água em cada ponto determinado, repetiu-se para cada frequência da bomba. Por fim, determinou-se a média das alturas das lâminas de água correspondente a cada vazão, para cada declividade do canal. Inseriu-se peça (degrau ao fundo do canal), geradora de ressalto, nessa fase foram coletados dados de duas maneiras, a primeira usando unicamente uma peça de ressalto de fundo, a segunda, com duas peças de ressalto combinadas para melhor caracterização do ressalto.

### 3.3. Cálculo do coeficiente de rugosidade de Manning 'n'

A partir das características geométricas do canal modelo e utilizando-se da equação de Manning (Equação 3), pode-se determinar os valores médios do coeficiente de rugosidade do canal de acrílico (n) para declividades de 5% e 1,0%.

$$Q = \frac{1}{n} x Ax Rh^{2/3} x I^{1/2} \quad (3)$$

Sendo:

Q – Vazão (m<sup>3</sup>/s)

A – Área molhada = Bxh (m<sup>2</sup>)

B – Largura do canal;

h- Altura média das lâminas coletadas;

P – Perímetro molhado = B+2h

Rh – Raio Hidráulico = área/perímetro (m)

I – Declividade do canal (m/m)

n - Coeficiente de rugosidade de Manning

### 3.4. Classificação dos tipos de escoamentos

Para classificação dos fenômenos de escoamentos o canal foi dividido em seis seções de estudo, Figura 5, posicionou-se os obstáculos de fundo, em seções distintas e variou-se as declividades, para determinar e comparar as alturas conjugadas em cada seção, o que pode se determinar o número de Froude e assim classificou-se o escoamento em subcrítico ou supercrítico.

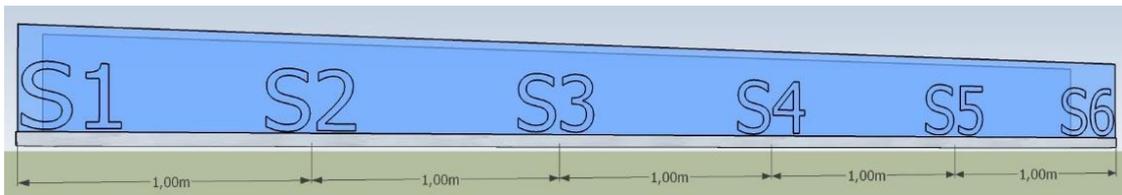


Figura 5. Localização das seções no canal

### 3.5. Ocorrência do fenômeno de ressalto hidráulico

Para provocar a ocorrência de ressalto colocou-se a peça de ressalto de fundo em várias seções, e ainda se trabalhou com duas peças de ressalto simultaneamente, alterou-se as declividades. Para determinar as declividades, utilizou-se do prumo que rege o nivelamento da bancada e conseqüentemente do canal, e como também fez necessário a utilização de um paquímetro digital, bem como determinação de pontos com distâncias conhecidas entre os mesmos, Figura 6.

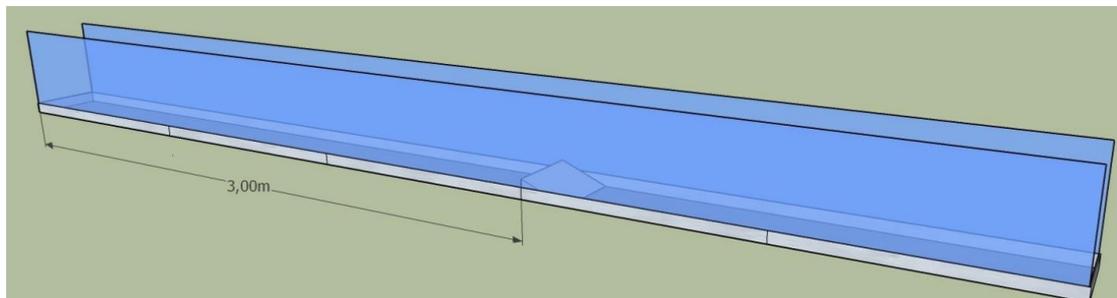


Figura 6. Obstáculo de fundo posicionado na seção 4 do canal.

Utilizou-se três inclinações de canal (2%, 3% e 4%) para perceber a variação do ressalto com base em cada declividade. A Figura 7 representa as inclinações para o cálculo das declividades.

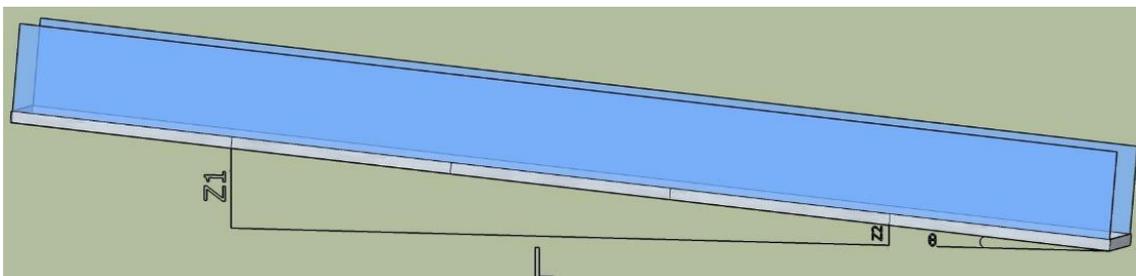


Figura 7. Modelo para cálculo das declividades

Com o auxílio do macaco, adotou-se diversas declividades para o canal, sendo os valores determinados através da Equação 4.

$$I = (Z_1 - Z_2)/L \quad (4)$$

Sendo:

I = declividade m/m

$Z_1$  = cota à montante

$Z_2$  = cota à Jusante

L = distância linear entre a cota a montante e a cota a jusante

### 3.6. Caracterização do ressalto através do número de Froude

A caracterização do ressalto se deu a partir dos valores obtidos das alturas conjugadas a montante e jusante do fenômeno e assim, para a caracterização utilizou-se de fórmulas publicadas na literatura referente o número de Froude caracterizando assim cada ressalto quanto a sua força, Porto (2006).

## 4. Resultados e discussões

### 4.1. Calibração do canal retangular experimental

As Figuras 8 e 9 apresentam o coeficiente de Manning (n) para as declividades de 0,5% e 1,0% e pode-se traçar a linha de tendência, com sua respectiva equação.

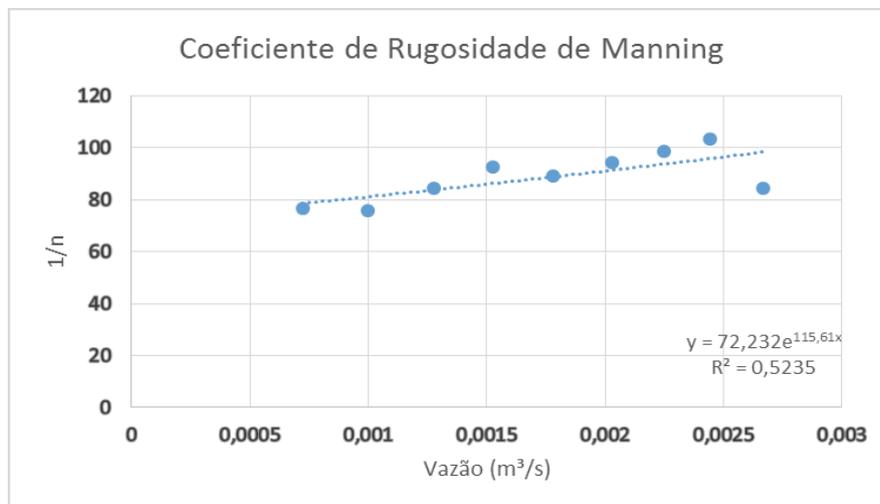


Figura 8. Coeficiente de rugosidade de Manning (n) para I = 0,5%

Observou-se que os valores médios do coeficiente de rugosidade não apresentaram grandes discrepâncias entre cada uma das vazões analisadas, o que tornou o resultado de rugosidade bem mais representativo do que os valores encontrados em resultados de ensaios experimentais já que a literatura pouco publica dados sobre canais experimentais de acrílico e que apresentam variações entre 0,009 e 0,015. O valor do coeficiente de rugosidade n para este canal experimental de acrílico cristal será então:  $n = 0,01375$ .

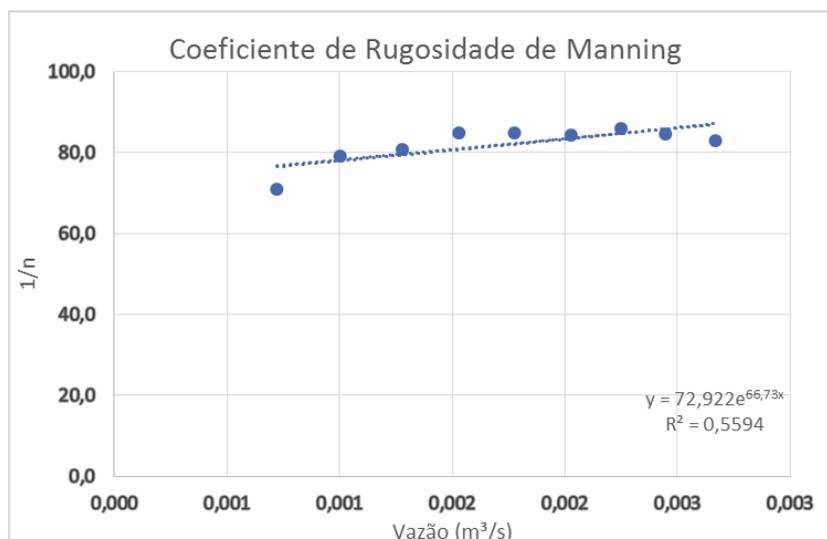


Figura 9. Coeficiente de rugosidade de Manning para I = 1,0%

#### 4.2. Regimes de escoamento no canal retangular

A partir dos valores das velocidades e das alturas das lâminas de água pode-se calcular o número de Froude representativo para cada seção e caracterizar o tipo de escoamento ocorrente. O número de Froude desempenhou importante papel no estudo do canal experimental que identificou os regimes de escoamento para cada seção simulada.

Utilizando a Equação 5 e sabendo a classificação que relaciona número de Froude e regime de escoamento, observou-se claramente onde houve mudança de regimes de escoamento.

$$Fr = v\sqrt{g \times H} \quad (5)$$

Sendo:

v - Velocidade do escoamento na seção

g – força gravitacional

H – altura da lâmina

A classificação a seguir relaciona número de Froude e regime de escoamento:

→  $Fr < 1$  → regime subcrítico → Escoamento lento ou fluvial

→  $Fr = 1$  → regime crítico → Escoamento Crítico

→  $Fr > 1$  → regime supercrítico → Escoamento rápido ou torrencial

A Tabela 1 mostra o regime para o obstáculo de fundo gerador de ressalto assentado na seção 4 o que pode ser observado a formação de ressalto para as declividades de 3% e 4%. Observou-se em alguns momentos a alteração no regime de escoamento e para cada situação distinta, o número de Froude aumenta ou diminui consideravelmente de uma seção para a outra.

Tabela 1. Dados referentes aos ressaltos com obstáculo na seção 4.

Declividade 3%					
Seção	Regime	Situação	Y1	Froud	Y2
S1	Supercrítico	Ressalto	0,0223	1,420	0,035007
S2	Subcrítico				
Declividade de 4%					
Seção	Regime	Situação	Y1	Froud	Y2
S1	Supercrítico	Ressalto	0,0145	2,709	0,048767
S2	Subcrítico				

Para o obstáculo de fundo gerador de ressalto assentado na seção 5, como consta na Tabela 2, conseguiu-se observar a formação de ressalto para as declividades de 2%, 3% e 4%.

Tabela 2. Dados referentes aos ressaltos com obstáculo na seção 5.

Declividade 2%					
Seção	Regime	Situação	Y1	Froud	Y2
S1	Supercrítico	Ressalto	0,0164	2,252	0,044669
S2	Subcrítico				
Declividade 3%					
Seção	Regime	Situação	Y1	Froud	Y2
S2	Supercrítico	Ressalto	0,0145	2,709	0,048767
S3	Subcrítico				
Declividade de 4%					
Seção	Regime	Situação	Y1	Froud	Y2
S3	Supercrítico	Ressalto	0,0102	4,591	0,061323
S4	Subcrítico				

### 4.3. Classificação do ressalto

A classificação do ressalto em função do número de Froude, seguiu Porto (2006) em: Ressalto ondulado; Ressalto fraco; Ressalto oscilante; Ressalto estacionário e Ressalto forte. A Tabela 3 consta a classificação do ressalto gerado em cada situação adotada.

**Tabela 3 Classificação dos ressaltos em função do número de Froude**

Situação			Fr	Ressalto
Nº de Obstáculos	Seção do Obstáculo	Declividade do Canal		
1 Peça (Triangular)	Seção 4	3%	1,420	Ressalto Ondulado
1 Peça (Triangular)	Seção 4	4%	2,709	Ressalto Oscilante
1 Peça (Triangular)	Seção 5	2%	2,252	Ressalto Fraco
1 Peça (Triangular)	Seção 5	3%	2,709	Ressalto Oscilante
1 Peça (Triangular)	Seção 5	4%	4,591	Ressalto Estacionário
2 Peças (Formas Distintas)	Seção 4	3%	4,099	Ressalto Oscilatório
2 Peças (Formas Distintas)	Seção 4	4%	5,190	Ressalto Estacionário
2 Peças (Formas Distintas)	Seção 5	2%	3,835	Ressalto Oscilatório
2 Peças (Formas Distintas)	Seção 5	3%	4,524	Ressalto Estacionário
2 Peças (Formas Distintas)	Seção 5	4%	5,028	Ressalto Estacionário

Observa-se que o número de Froude aumenta com o aumento da declividade, o que gera uma relação ressalto x declividade. Observa-se ainda que o ressalto aumenta com o aumento da distância entre a peça de ressalto de fundo e a montante do canal. Então tem-se mais uma relação a ser observada: ressalto x distância acumulada. Pode-se observar o ressalto mais acentuado quando se pôs a peça na seção 5 com declividade de 4%. Ainda, observou-se que o ressalto aumenta com o aumento da declividade, porém, se torna mais acentuado com a presença de duas peças simultaneamente. Então percebe-se que o aumento da declividade, o aumento da distância acumulada e a presença de duas peças simultaneamente provocam aumento significativo no ressalto do canal. O que pode se verificar que o ressalto em canais inclinados pode assumir diferentes configurações e posicionamentos.

A Figura 10 mostra o ressalto ocorrido para uma declividade de 3% para um obstáculo locado na seção 4. E a Figura 11 mostra o ressalto ocorrido na presença de dois obstáculos, quando o segundo é assentado na seção 5 do canal, e a declividade é igual a 3%.


**Figura 10. Ressalto ocorrido para declividade de 3% para o obstáculo locado na seção 4.**



**Figura 11. Ressalto ocorrido com  $I = 3\%$  com dois obstáculos com segundo na seção 5.**

Percebe-se nitidamente a formação de ondas (rolos) e que corresponde à mudança de regime de uma profundidade menor que a crítica para outra maior que esta ao longo do canal e que corresponde à mudança de velocidade de maior para menor que a crítica. Ou seja, ocorrência da transição entre a montante e a jusante. E que há instabilidade na superfície com ondulações e “rolos” responsáveis por incorporação de ar no escoamento.

Na aplicação prática a mudança do regime supercrítico para o subcrítico é observada, por exemplo, em mudanças de declividade e em saídas de comportas. Assim, a menor mudança de energia específica provocará sensível mudança da profundidade de água no canal. O comprimento do maior ressalto neste canal de acordo com o seu número de Froude pode ser dado pela equação 4.5  $Lr \cong 6,9x (0,0657 - 0,0091) \cong 40 \text{ cm}$ .

#### 4.4. Gráficos comparativos

Para estudo comparativo os dados experimentais foram lançados em gráficos. Para um único obstáculo locado na seção 4, observa-se que o ressalto para as declividades de 3% e 4% são gerados no mesmo intervalo entre seções, porém com o aumento da declividade ele se torna mais visível.

A Figura 12 mostra que para  $I = 3\%$  o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 21 mm em S1 a 40 mm em S2.

Com  $Fr_1 = 1,42$  tem-se um ressalto classificado como Ondulado.

Para  $I = 4\%$ , Figura 12, na mesma situação o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 14 mm em S1 a 40 mm em S2, iniciando-se pouco após a seção 1 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x (4,88 - 1,45) \cong 24 \text{ cm}$ . Com  $Fr_1 = 2,71$  tem-se um ressalto classificado como Oscilante.

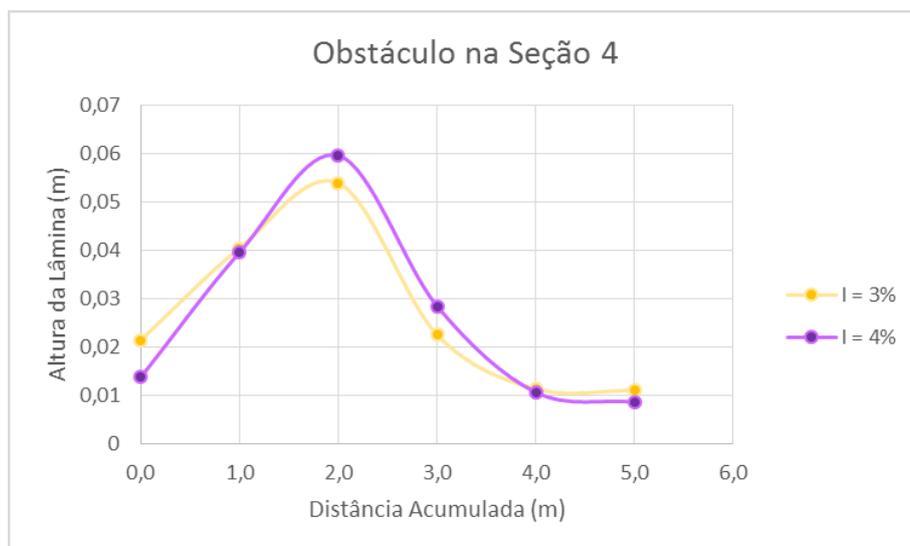


Figura 12. Comparação de diferentes declividades com obstáculo na seção 4.

Já para um único obstáculo locado na seção 5, observa-se que o ressalto para as declividades de 2%, 3% e 4% são gerados em seções distintas, para a declividade de 2% o ressalto se localiza no primeiro intervalo entre seções, para 3% o ressalto se localiza no segundo intervalo entre seções, e para a declividade de 4% o ressalto se localiza no terceiro intervalo entre as seções e se tornam mais visíveis a medida em que aumenta a declividade do canal.

A Figura 13 demonstra que para  $I = 2\%$  o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 14 mm em S1 a 48 mm em S2. Com os valores de  $Y1 = 16,4$  mm,  $Y2 = 44,7$  mm, iniciando-se próximo a seção 2 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x (4,47-1,64) \cong 20$  cm. Com  $Fr1 = 2,25$  tem-se um ressalto classificado como Fraco.

Para  $I = 3\%$  na mesma situação o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 15 mm em S2 a 49 mm em S3. Com os valores de  $Y1 = 14,5$  mm,  $Y2 = 48,8$  mm, iniciando-se após a seção 2 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x (4,88-1,45) \cong 24$  cm. Com  $Fr1 = 2,71$  tem-se um ressalto classificado como Oscilante.

Para  $I = 4\%$  na mesma situação o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 10 mm em S3 a 62 mm em S4. com os valores de  $Y1 = 10,2$  mm,  $Y2 = 61,3$  mm, iniciando-se após a seção 3 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x (6,13-1,02) \cong 35$  cm. Com  $Fr1 = 4,59$  tem-se um ressalto classificado como Estacionário.

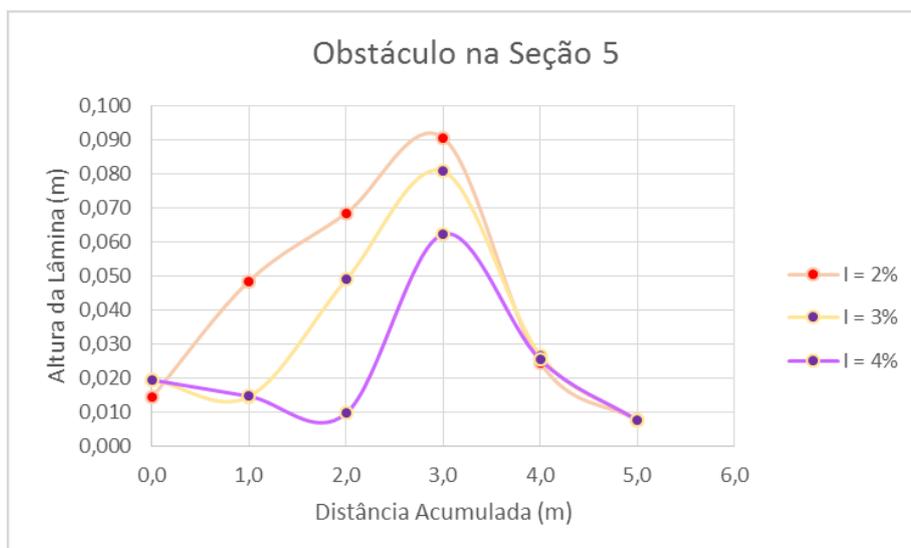


Figura 13. Comparação de diferentes declividades com obstáculo na seção 5.

A Figura 14 ilustra que para obstáculo assentado na seção 4 o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 21 mm em S1 a 40 mm em S2. Com os valores de  $Y1 = 22,3$  mm,  $Y2 = 35$  mm, iniciando-se pouco após a seção 1 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x (3,5 - 2,23) \cong 9$  cm. Com  $Fr1 = 1,42$  tem-se um ressalto classificado como Ondulado.

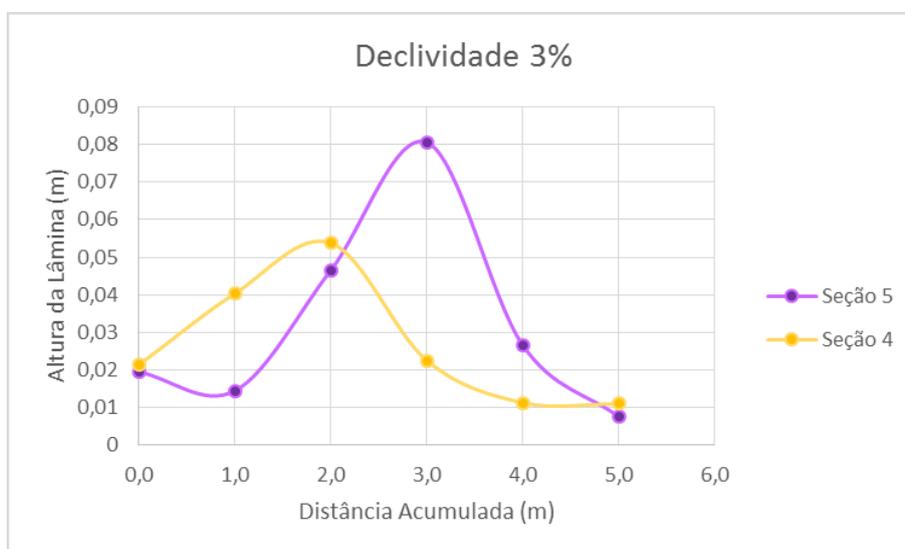


Figura 14. Comparação para diferentes posições do obstáculo para  $I = 3\%$ .

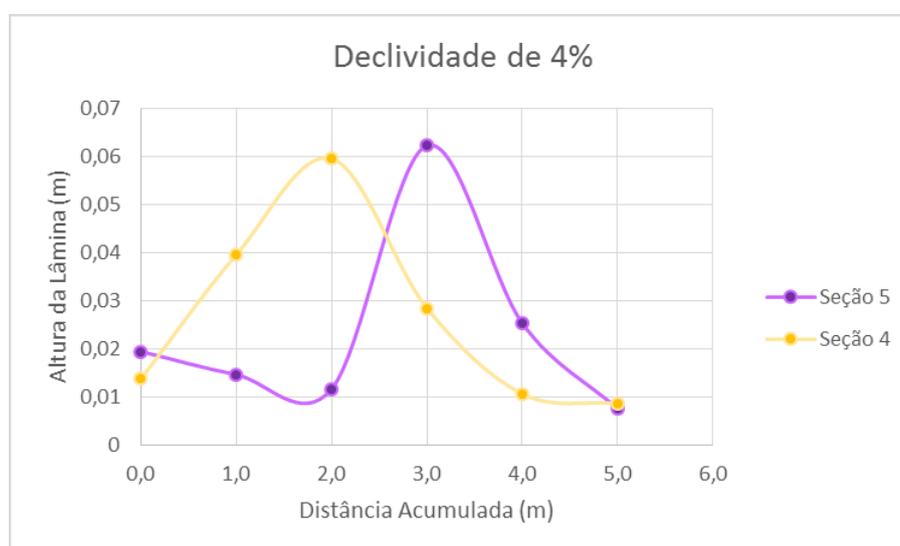
Para obstáculo assentado na seção 5 na mesma declividade ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 15 mm em S2 a 49 mm em S3. Com valores de  $Y1 = 14,5$  mm,  $Y2 = 48,8$  mm, iniciando-se após a seção 2 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x (4,88 - 1,45) \cong 24$  cm. Com  $Fr1 = 2,71$  tem-se um ressalto classificado como Oscilante.

Para um único obstáculo com declividade fixa de 4% e variando a seção de assentamento, observa-se que o ressalto para a locação da peça nas seções 4 e 5 são

gerados em intervalos entre seções distintos, porém com o aumento da distância acumulada ele se torna mais visível.

A Figura 15 demonstra que para obstáculo assentado na seção 4 o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 14 mm em S1 a 40 mm em S2. Com os valores de  $Y1 = 14,5$  mm,  $Y2 = 48,8$  mm, iniciando-se pouco após a seção 1 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x$  ( $4,88 - 1,45$ )  $\cong 24$  cm. Com  $Fr1 = 2,71$  tem-se um ressalto classificado como Oscilante.

Para obstáculo assentado na seção 5 na mesma declividade o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 10 mm em S3 a 62 mm em S4. com os valores de  $Y1 = 10,2$  mm,  $Y2 = 61,3$  mm, iniciando-se após a seção 3 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x$  ( $6,13 - 1,02$ )  $\cong 35$  cm. Com  $Fr1 = 4,59$  tem-se um ressalto classificado como Estacionário.

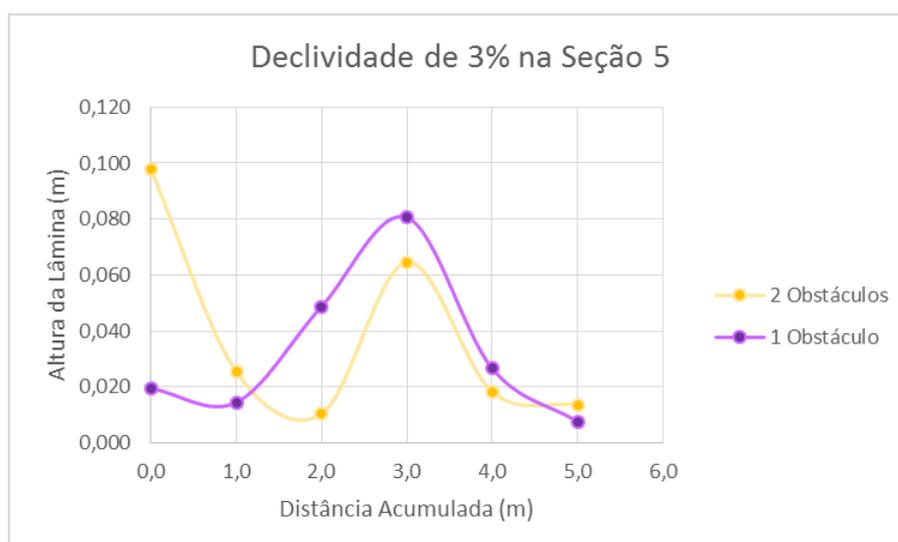


**Figura 15. Comparação para diferentes posições do obstáculo para  $I = 4\%$ .**

Para uma declividade fixa de 3% e e uma seção de assentamento também fixa (seção 5), observa-se que o ressalto para a colocação de um obstáculo e dois obstáculos são gerados em intervalos entre seções distintos, porém com a utilização de dois obstáculos ele se torna mais visível.

A Figura 16 aponta que, para 1 obstáculo assentado na seção 5, o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 15 mm em S2 a 49 mm em S3. Com os valores de  $Y1 = 14,5$  mm,  $Y2 = 48,8$  mm, iniciando-se após a seção 2 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x$  ( $4,88 - 1,45$ )  $\cong 24$  cm. Com  $Fr1 = 2,71$  tem-se um ressalto classificado como Oscilante.

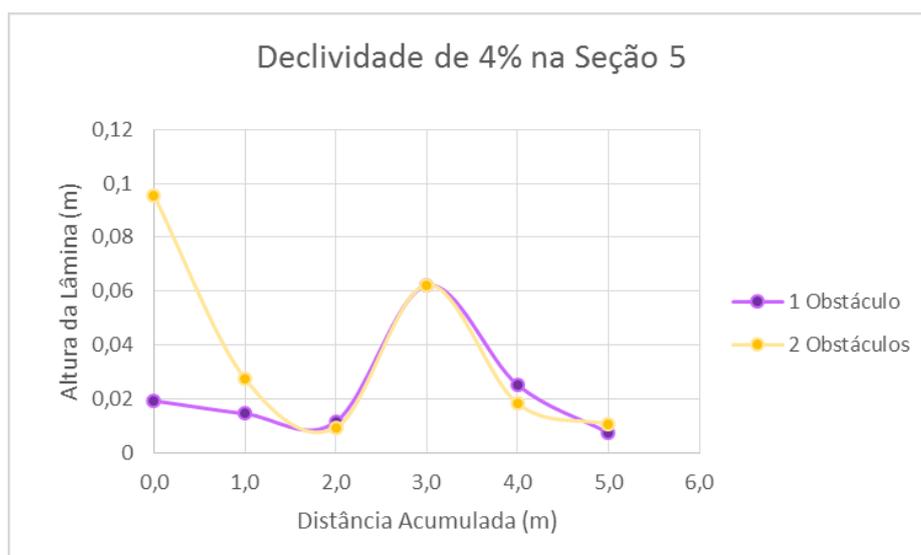
Para utilização de dois obstáculos, com o segundo obstáculo assentado na seção 5 na mesma declividade o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 10 mm em S3 a 65 mm em S4. Com os valores de  $Y1 = 10,3$  mm,  $Y2 = 61$  mm, iniciando-se após a seção 3 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x$  ( $6,1 - 1,03$ )  $\cong 35$  cm. Com  $Fr1 = 4,52$  tem-se um ressalto classificado como Estacionário.



**Figura 16. Comparação de diferentes números de obstáculos para  $I = 3\%$  com seção 5.**

A Figura 17 ilustra que, para 1 obstáculo assentado na seção 5, o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 10 mm em S3 a 62 mm em S4. Com os valores de  $Y1 = 10,2$  mm,  $Y2 = 61,3$  mm, iniciando-se após a seção 3 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x$  ( $6,13 - 1,02$ )  $\cong 35$  cm. Com  $Fr1 = 4,59$  tem-se um ressalto classificado como Estacionário.

Para utilização de dois obstáculos, com o segundo obstáculo assentado na seção 5 na mesma declividade o ressalto ocorre bruscamente no intervalo onde a altura da lâmina passa de 9 mm em S3 a 62 mm em S4. Com os valores de  $Y1 = 9,1$  mm,  $Y2 = 65,7$  mm, iniciando-se após a seção 3 e tendo comprimento aproximado de  $Lr \cong 6,9x$  ( $6,57 - 0,91$ )  $\cong 39$  cm. Com  $Fr1 = 5,459$  tem-se um ressalto classificado como Estacionário.



**Figura 17. Comparação de diferentes números de obstáculos para  $I = 4\%$  com seção fixa.**



## 5. Conclusão

O presente estudo apresentou-se eficiente no entendimento do escoamento de um canal a partir da experimentação da ocorrência do fenômeno de ressalto hidráulico através de diversas situações simuladas com auxílio de um canal modelo retangular em acrílico, permitindo concluir que: O conhecimento do correto coeficiente de rugosidade deve refletir no comportamento esperado da obra ao longo de sua vida útil, garantindo que o mesmo tenha escoamento igual ou maior ao do projeto. Na calibração do canal, o valor do coeficiente de rugosidade de Manning para o canal de paredes de acrílico foi 0,01375. O estudo de regime de escoamento pode ser determinado com base no número de Froude, e com este foi possível fazer a classificação do ressalto nas diversas situações criadas para gerar ressalto em um canal retangular, permitindo a visualização de diferentes tipos de ressalto. Para o canal retangular foi possível determinar experimentalmente as alturas conjugadas e calcular analiticamente uma relação explícita entre  $Y_2/Y_1$  e  $Fr_1$ . Os números de Froude calculados variaram de 1,42 a 5,45, gerando ressaltos que variaram de Ondulado a Estacionário. O ressalto forte não pôde ser observado devido as diversas restrições do canal, que iam desde vazão de pequeno porte a declividades pouco acentuadas. O comprimento teórico do ressalto, obtido através de equações experimentais mostrou que o ressalto acontece em curta distância. Concluiu-se que acentuar a declividade do canal gera ressaltos de maior intensidade. Aumentar a distância entre a posição de início do obstáculo e a montante do canal também torna o ressalto mais acentuado. Por fim, observou-se que, caso haja necessidade de acentuar ainda mais o ressalto, pode-se refazer todos as situações anteriores, porém, com a combinação de dois ou mais obstáculos.

## Referências

- Baptista, M. B., Coelho, M. M. L. P. (2010) “Fundamentos de Engenharia Hidráulica”, Editora UFMG, Belo Horizonte, MG.
- Matias, T. M. L. C. (2015) “Caracterização do Fenômeno Ressonância Hidráulica em Escoamento Brusco Variado em Canais Retangulares”, Universidade Federal de Roraima.
- Netto, J. M. A., Alvarez, G. A. (1982) “Manual de Hidráulica”, Edgard Blücher, 7 Edição, São Paulo.
- Porto, R. M. (2006) “Hidráulica Básica”, Suprema Gráfica e Editora Ltda, São Carlos, SP.