

## MODELAGEM HIDRÁULICA DE CAIXAS DE PASSAGEM EM DESCIDAS DE ÁGUA

*BARATA, André Lara<sup>1</sup> & SALIBA, Aloysio Portugal Maia<sup>2</sup>*

**RESUMO** – Neste trabalho são apresentados os procedimentos de análise de uma mudança de direção em um escoamento em degraus de vazão variável. Foi utilizado um modelo reduzido de uma descida em degraus com dimensões de 5,0 cm de altura e 5,0 cm de patamar, conectado a um canal retangular a jusante. O canal de jusante simula a caixa de passagem e possibilita a análise do comportamento hidráulico do escoamento neste tipo de estrutura.

**ABSTRACT** – This research report presents the procedures to evaluate the effects of a change of direction in a stepped channel in nappe flow conditions. The experiment used a reduced model of a stepped channel, which has 1V:1H in slope, 5,0 cm high steps, 15,0 cm wide per 10,0 cm high rectangular cross-section, connected to a rectangular channel of the same cross-section and flat bottom downstream. The downstream channel simulates the passage box and allows the analysis of the hydraulic behavior of the flow in this type of structure. Two angles of direction change were tested. The results allowed the proposition of some design criteria to the passage box wall sizing for a 90 degrees direction change, in addition to the elaboration of recommendations for the improvement of the model for subsequent analysis on this subject.

**Palavras-chave:** Caixas de passagem, Canais em degraus, modelos reduzidos.

### 1 INTRODUÇÃO

O uso de modelos reduzidos como ferramentas para estudos relacionados à Engenharia de Recursos Hídricos tem grande importância no contexto atual da engenharia, por possibilitar a obtenção de resultados representativos da condição real de operação da estrutura simulada e auxiliar na calibração de modelos computacionais, reduzindo incertezas e avaliando a ocorrência de fenômenos hidráulicos de forma mais completa.

O comportamento hidráulico de uma estrutura ou de um conjunto de estruturas pode ser previsto por formulações teóricas, mas que têm aplicação limitada especialmente quando se trata de estruturas pouco convencionais, para as quais coeficientes utilizados nos equacionamentos foram previamente determinados.

Atualmente, a bibliografia focada na elaboração de critérios de dimensionamento de estruturas como caixas de passagem para mudança de direção é muito limitada. Isto faz com que frequentemente

---

1) Engenheiro de Recursos Hídricos, Geoestável Consultoria e Projetos, andre.barata@geoestavel.com.br.

2) Professor orientador, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG.

critérios excessivamente conservadores sejam utilizados no cálculo dessas estruturas, de modo a tentar compensar pela falta de estudos específicos sobre o tema.

## 2 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é avaliar o comportamento hidráulico de uma caixa de passagem por meio da análise das medições obtidas por experimentos no modelo reduzido da estrutura e propor critérios para o dimensionamento da caixa de passagem.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 O número de Froude e energia específica

Segundo Chanson (2004), o número de Froude é um número adimensional proporcional à raiz quadrada da razão das forças inerciais sobre o peso do fluido. O número de Froude nos permite classificar o escoamento em relação à sua energia como subcrítico ou supercrítico: se o valor de Fr for superior à unidade, o regime de escoamento pode ser considerado supercrítico; se Fr for inferior à unidade, o regime de escoamento pode ser considerado subcrítico. Quando o número de Froude é igual a 1, o regime de escoamento é crítico. A equação usualmente utilizada para o cálculo do número de Froude é apresentada a seguir:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot \frac{A}{B}}} \quad (1)$$

Sendo que V é a velocidade em m/s, A é a área em m<sup>2</sup>, B é a largura da superfície livre e g é a aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>.

Segundo Baptista e Coelho, 2014, conforme demonstrado por Bakhmeteff, 1912, pode-se considerar a quantidade de energia medida a partir do fundo do canal obtendo-se a energia específica como uma função de y, composta por duas parcelas e correspondendo à distância vertical entre o fundo do canal e a linha de energia (Baptista e Coelho, 2014):

$$E = y + \frac{Q^2}{2gf(y)^2} \quad (2)$$

Para cada valor de energia específica, existem dois valores de profundidade. Estas profundidades são chamadas profundidades conjugadas, sendo uma no regime supercrítico e uma no regime subcrítico. No caso do regime supercrítico, a maior parte da energia se encontra na forma de energia cinética e a profundidade é pequena. O oposto acontece no regime subcrítico: a profundidade é maior, mas a velocidade é menor, isto é, a energia cinética não tem mais tanta expressão.

### 3.2 Descidas em Degraus

Segundo Guo (2009), um canal com declividade elevada tende a produzir escoamentos com velocidades também elevadas, instáveis e criar ondas, além de promover a erosão do leito do canal. É importante prevenir esse problema para que se evite danos aos canais e seu funcionamento ocorra de forma ininterrupta e de acordo com o definido em projeto.

A maneira mais comum de se mitigar este problema é a utilização de degraus para criar um alteamento no nível do canal a montante e uma bacia de dissipação a jusante (TOMAZ, 2014). Desta forma, descidas d'água em degraus são utilizadas como estruturas de dissipação de energia ao longo do escoamento.

Baseado na classificação de SORENSEN (1985), o regime de escoamento em degraus pode ser categorizado em dois tipos: *skimming flow* (Figura 1 b), e *nappe flow*, (Figura 1 a).

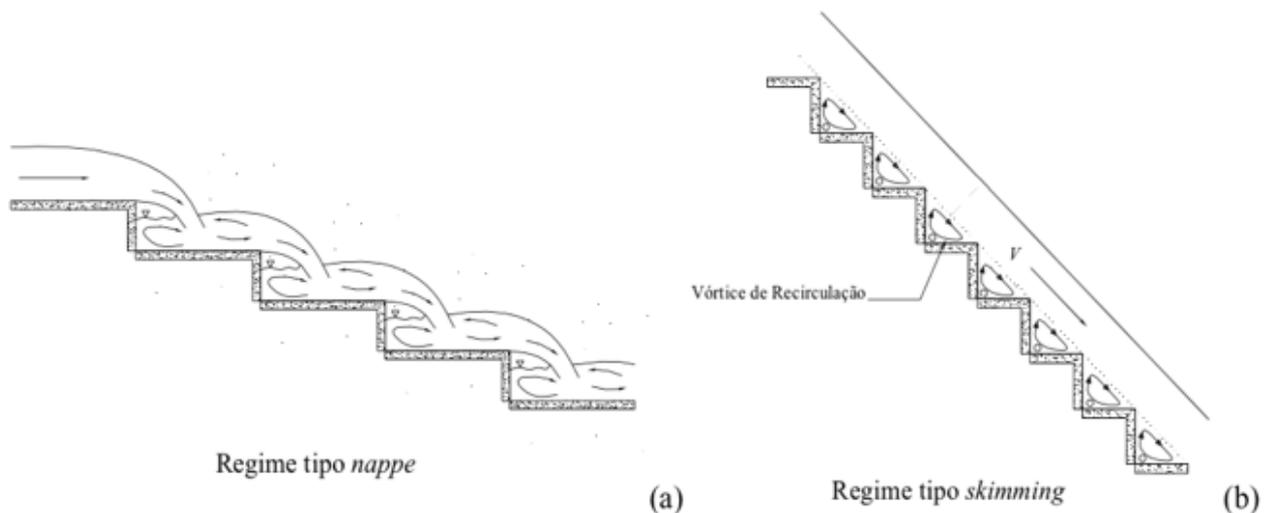


Figura 1 – Regimes de escoamento em degraus

O regime de escoamento do tipo *nappe flow* (ou em cascata, conforme TOMAZ, 2014 – Figura 1 a) é caracterizado pela sucessão de jatos de água caindo em cada degrau e pela presença de cavidades de ar abaixo deles (RENNA e FRATINO, 2010). Há a formação de pequenos ressaltos hidráulicos (não necessariamente completos) em cada degrau à medida que ocorre o escoamento.

O regime do tipo *skimming flow* é caracterizado pela formação de vórtices em cada degrau, como esquematizado na Figura 1 b, que fazem com que o escoamento se dê de forma deslizante acima desses vórtices, com significativa resistência imposta ao escoamento e pela dissipação de energia associada a macro-rugosidade inserida pelos degraus (SANAGIOTTO e MARQUES, 2008), porém não interferindo tanto na forma do fluxo.

Independentemente do regime no qual ocorrerá o escoamento, ao se utilizar degraus em descidas d'água, tem-se como objetivo a dissipação da energia para preservar o canal ou, conforme Sanagiotto e Marques (2008), projetar eventuais estruturas de dissipação a jusante com dimensões reduzidas de modo a diminuir os custos associados.

### **3.3 Estruturas de Mudança de Direção**

As mais comumente utilizadas estruturas de mudança de direção são as caixas de passagem, que são estruturas que têm entre suas finalidades a de auxiliar na mudança de direção do fluxo em uma dada estrutura, de maneira a impedir o extravasamento e conduzir corretamente o escoamento para a estrutura a jusante.

Pinheiro (2011) definiu as caixas de passagem como estruturas usadas em obras de drenagem, com a finalidade de promover a transição de regimes de escoamento, absorvendo as perdas de carga induzidas em mudanças de direção de fluxo e em bacias de dissipação a jusante de descidas de água. Neste trabalho este tipo de estrutura será de muita importância no que diz respeito a observação do seu comportamento hidráulico. As caixas de passagem também podem ser usadas como estruturas de dissipação de energia (seção de deságue frontal), por reduzir a velocidade de escoamento e possibilitar o melhor controle do fluxo no deságue.

Segundo Pinheiro (2011), preferencialmente deve-se evitar o projeto de canais com curvas horizontais. Isto se deve ao fato de que o desvio de fluxo pode resultar em ondas transversais, propagando-se para jusante, e na sobrelevação do nível de água, aumentando o perfil transversal no lado externo da curva. Com isso, existem maiores riscos de extravasamento nestes tipos de estrutura.

Quando realmente existir a necessidade de mudanças acentuadas de direção nos canais, devem ser adotadas, se possível, estruturas como as caixas de passagem, que possibilitem esta mudança aliada à redução do risco de maiores problemas que poderiam ser causados por curvas ou transições bruscas de escoamento nos canais.

Descidas d'água em degraus são caracterizadas por regimes bruscamente variados e, se necessárias mudanças bruscas de direção neste tipo de estrutura, o uso de caixas de passagem se torna ainda mais importante. Este será o caso explorado neste estudo, por meio do uso de um modelo reduzido.

## **4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Para a realização do estudo, utilizou-se um modelo reduzido de canal em degraus de declividade constante de 1,0V:1,0H (45°) feito em acrílico. Os 14 degraus possuem dimensões de 5,0 cm de

patamar e 5,0 cm de espelho. A largura é de 15,0 cm e o modelo possui um trecho com parede estendida para simular a caixa de passagem e o canal de jusante (ver Figura 2). Foi utilizado um medidor de vazão eletromagnético de PVC do tipo VMS 025 Pro, fabricado pela InControl.

O modelo é alimentado por um conjunto motor-bomba que conduz a água do tanque até a caixa de regularização de fluxo a montante da escada por uma tubulação de recalque. A vazão máxima da bomba é de 14m<sup>3</sup>/h. Na configuração montada, entretanto, a vazão máxima possível a ser atingida pela bomba foi menor (4,5 m<sup>3</sup>/h).

#### 4.1 Cenários de Medição

Nas medições foram avaliados diferentes cenários para que os resultados possam ser comparados e maior consistência seja obtida. Desta forma é possível obter resultados mais representativos e identificar e eliminar possíveis *outliers* mais facilmente. Os cenários avaliados diferem pela vazão no escoamento.

Neste artigo, foram abordados os ensaios referentes à mudança de direção a 90°, para três vazões diferentes de escoamento: 1,5 m<sup>3</sup>/h, 3,0 m<sup>3</sup>/h, e 4,5 m<sup>3</sup>/h, denominados Cenários 1, 2 e 3.

#### 4.2 Procedimento de Realização dos Testes

As medições feitas consistem no uso do software Kinovea Video Editor para se obter a profundidade no final da descida em degraus (a Figura 2), e na leitura da fita métrica acoplada à parede da caixa de passagem. Com a leitura das profundidades pode-se estimar a energia do escoamento nos pontos medidos, com o intuito de estabelecer uma relação entre essa energia no trecho de curva e a sobrelevação do nível d'água na parede da caixa.

É possível fazer a estimativa da energia do escoamento a partir de sua profundidade com o uso da Equação 2, utilizando-se a área molhada da seção transversal retangular no ponto de medição da profundidade. No ponto de leitura da profundidade na parede da caixa, a câmera foi posicionada do lado de fora do canal, apontada para a fita de forma a se obter a leitura de maneira mais clara.

Após as realizações dos testes, as filmagens foram importadas para o Kinovea, tratadas e analisadas de modo a se obter a profundidade do escoamento na saída da descida. Após sua obtenção e tratamento, esses dados foram compilados e analisados em conjunto com as leituras de sobrelevação na parede e os valores de energia calculados.



Figura 2 – Detalhe do ponto de medição da profundidade do escoamento no fim da descida

### 4.3 Resultados

Com a intenção de se obter maior consistência para as medições realizadas no software Kinovea, tomou-se o cuidado de se realizar três leituras em três diferentes pontos de cada vídeo: uma leitura no início do vídeo ( $y_i$ ), uma leitura no final do vídeo ( $y_f$ ) e uma leitura intermediária ( $y_m$ ), sempre buscando quadros que permitam a visualização mais clara possível da linha d'água. As dimensões do modelo foram calibradas antes das análises, utilizando como referência os degraus que têm comprimento de 5,0 cm.

Após a calibração foi possível obter as profundidades, que foram medidas perpendicularmente à quina do degrau (por maior facilidade de medição, associada à maior clareza das imagens nesse ponto) e multiplicadas pelo cosseno de  $45^\circ$ , a fim de se obter a profundidade perpendicular ao patamar do degrau, imediatamente acima da quina (Figura 3-a). A Figura 3-b apresenta o ponto de vista da câmera situada atrás da parede da caixa de passagem. O fundo do canal foi posicionado no valor 22,50 cm da fita métrica.

As profundidades foram medidas sempre no mesmo degrau e no mesmo ponto da parede da caixa, buscando valores de máxima e mínima profundidades no degrau, que foram posteriormente associadas às profundidades na parede da caixa (Figura 3-b). Esta forma de se fazer as medidas

permite a obtenção de uma faixa de valores, ou uma envoltória, tendo em vista que as profundidades variam substancialmente durante o escoamento.

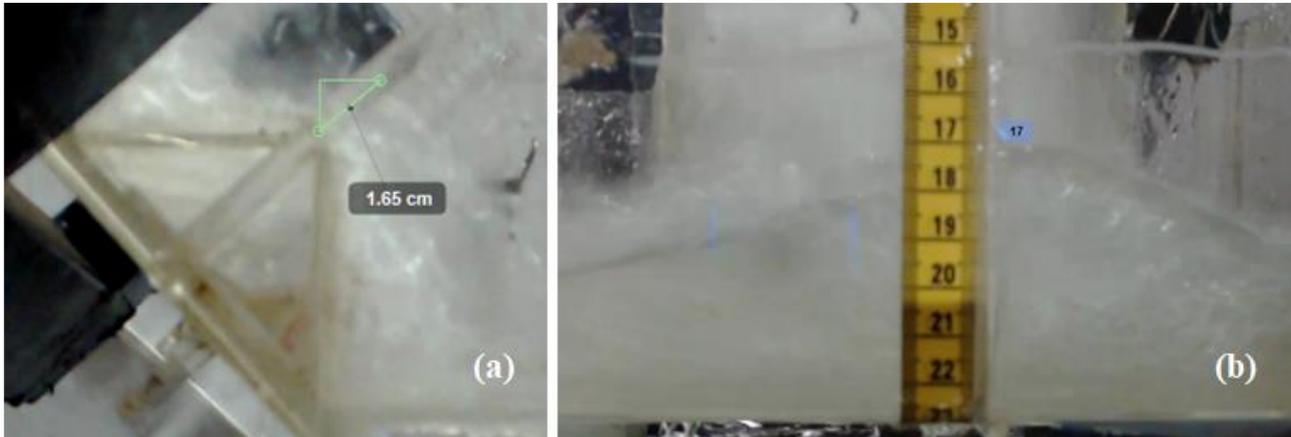


Figura 3 – (a) Detalhe da medição da profundidade no Kinovea (Profundidade máxima, Cenário 1,  $y_m$ ); (b) Detalhe da medição da altura do nível d’água na parede da caixa no Kinovea (Profundidade máxima, Cenário 3,  $y_f$ ).

Os resultados dos Cenários 1, 2 e 3 para as profundidades mínimas e máximas no degrau estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Profundidades mínimas observadas no ponto de medição no penúltimo degrau.

Cenário	Vazão ( $m^3/h$ )	Profundidade (mínima, cm)				Profundidade (máxima, cm)			
		$y_i$	$y_m$	$y_f$	$y_{média}$	$y_i$	$y_m$	$y_f$	$y_{média}$
1	1,5	0,35	0,25	0,40	<b>0,33</b>	0,93	0,87	0,96	<b>0,92</b>
2	3,0	0,49	0,50	0,57	<b>0,52</b>	1,01	1,05	1,09	<b>1,05</b>
3	4,5	0,64	0,72	0,68	<b>0,68</b>	1,30	1,40	1,39	<b>1,36</b>

É esperado que o valor de profundidade mínima no degrau esteja associado ao valor de profundidade máxima na parede da caixa pois, para uma dada vazão, uma profundidade menor (ou maior) está relacionada a uma velocidade maior (ou menor), então espera-se que por ter maior (ou menor) velocidade, o escoamento atinja um nível mais alto (ou mais baixo) na parede da caixa. Pode-se observar que a profundidade máxima média ( $y_{média}$ ) encontrada cresce juntamente com o valor da vazão aplicada na descida.

O nível d’água varia muito na fita métrica, o que pode prejudicar a leitura, por esta razão tomou-se a precaução de se realizar três leituras, assim como foi feito no outro ponto de medição. Essas leituras foram nomeadas de maneira similar às anteriores ( $y_i$ ,  $y_m$  e  $y_f$ ).

A Tabela 2 apresenta os dados obtidos nesta análise. Novamente pode-se observar que o valor da altura atingida pelo nível d'água aumenta com o incremento da vazão.

Tabela 2 – Profundidades máximas no ponto de medição na parede da caixa de passagem.

Cenário	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Altura mínima na parede (cm)				Altura máxima na parede (cm)			
		y <sub>i</sub>	y <sub>m</sub>	y <sub>f</sub>	y <sub>média</sub>	y <sub>i</sub>	y <sub>m</sub>	y <sub>f</sub>	y <sub>média</sub>
1	1,5	1,00	1,00	0,90	<b>0,97</b>	1,90	2,20	2,10	<b>2,07</b>
2	3,0	2,00	1,50	2,00	<b>1,83</b>	3,50	3,50	3,70	<b>3,57</b>
3	4,5	2,50	2,50	2,50	<b>2,50</b>	6,50	5,50	5,50	<b>5,83</b>

Por meio da Equação 2 pode-se estimar a energia do escoamento nos pontos de medição para que se estabeleça uma relação entre a energia aproximada com a qual o escoamento passa no penúltimo degrau (ponto escolhido devido à maior facilidade de aferição da medida) e a energia do escoamento na parede da caixa de passagem.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos cálculos de energia do escoamento nos pontos de medição, calculadas para a profundidade mínima e máxima observada no penúltimo degrau.

Vale notar que há vários fatores que podem influenciar no resultado. Existe grande dificuldade para medir com precisão o nível d'água em um escoamento que varia de maneira acentuada, como é o caso do escoamento em degraus. Por mais que tenham sido tomadas algumas precauções, como o uso de profundidades médias provenientes de diversas leituras e a análise quadro a quadro em vídeo, os resultados ainda possuem um grau significativo de incertezas.

Tabela 3 – Energias do escoamento e relação de energia conservada, em porcentagem (profundidade mínima no penúltimo degrau).

Cenário	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Profundidade Mínima			Profundidade Máxima		
		Energia do escoamento (cm)		Energia conservada na parede da caixa (%)	Energia do escoamento (cm)		Energia conservada na parede da caixa (%)
		Entrada	Parede		Entrada	Parede	
1	1,5	3,92	2,07	52,7%	1,38	0,97	69,8%
2	3,0	6,30	3,57	56,6%	2,48	1,83	74,0%
3	4,5	8,31	5,83	70,2%	3,27	2,50	76,5%

A Figura 5 apresenta uma visualização gráfica do comportamento do escoamento à medida que a vazão aumenta, para o ângulo fixo de 90 graus. As curvas representam as situações de profundidade mínima no degrau combinada à máxima na parede (Curva 1) e de profundidade máxima no degrau

combinada à mínima na parede (Curva 2). Pode-se observar que o percentual de energia conservada é diretamente proporcional à vazão aplicada pela bomba no sistema.

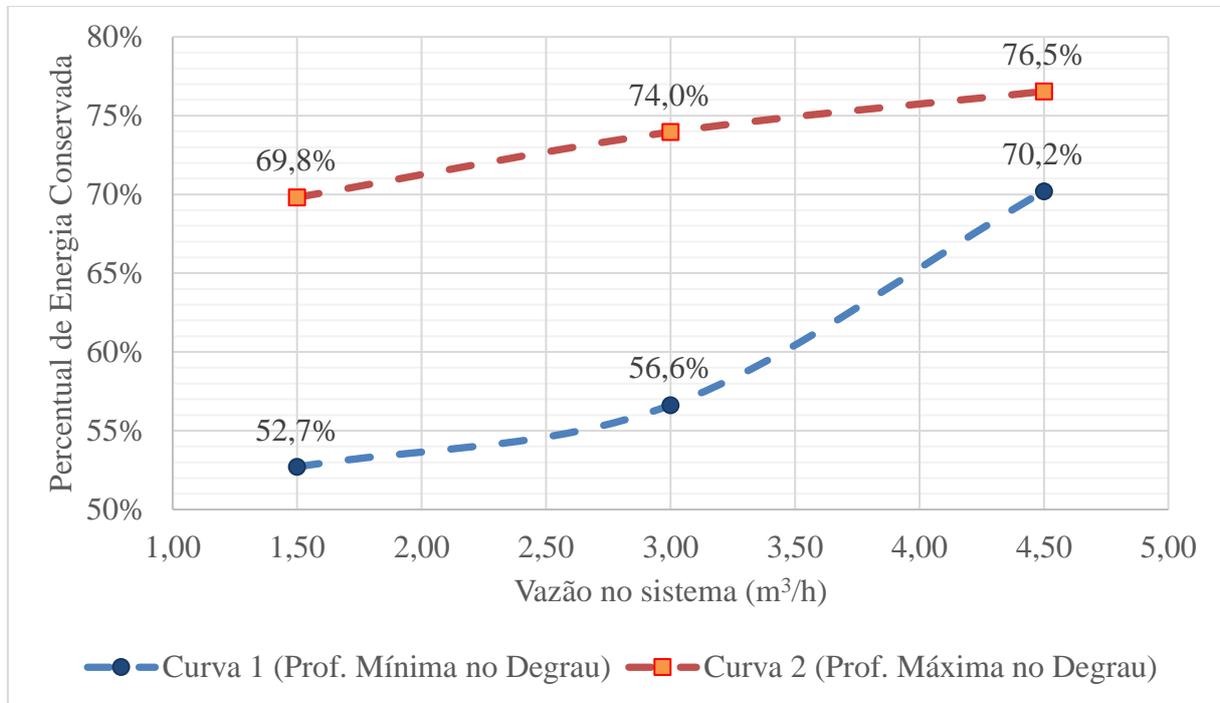


Figura 5 – Percentual de energia conservada na parede da caixa de passagem

#### 4.4 Análise dos resultados e discussão

Avaliando os resultados apresentados na Tabela 3, pode-se concluir que o percentual de energia conservada aumenta com a vazão. Este resultado era esperado, tendo em vista que as vazões menores estão mais diretamente associadas ao regime *nappe flow*, trazendo maior dissipação de energia (principalmente se for possível completar o ressalto entre os degraus), enquanto vazões maiores se aproximam da zona de transição para o regime do tipo *skimming flow*, dissipando uma quantidade menor de energia cinética.

Foi feita a simplificação de que, na parede, toda a energia neste ponto do escoamento está presente na forma de energia potencial, ou seja, é representada pela profundidade. Esta simplificação é razoável pois nesta situação a velocidade do escoamento na direção do escoamento torna-se próxima de nula, tendo em vista que a água atingiu a parede. Na realidade, ainda há energia cinética na direção perpendicular à parede que pode ser desprezada se comparada com a energia potencial.

A partir da análise da Figura 5 pode-se concluir que para o caso de uma mudança de direção de 90° e inclinação da descida de 45°, a energia do escoamento conservada, medida entre o penúltimo degrau e a parede da caixa de passagem varia entre valores da ordem de 52% e 77%, aumentando conforme a vazão no sistema aumenta.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados obtidos do experimento, foi possível observar que a metodologia utilizada para realizar os testes foi conclusiva para as situações de mudança de direção a 90° em descidas inclinadas a 45°. Entretanto, vale ressaltar que os testes apresentam resultados iniciais, indicando a necessidade de mais pesquisas acerca do tema, com variações de ângulos de mudança de direção e aprimoramento das medições para a obtenção de resultados mais assertivos.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que para uma mudança de direção com um ângulo de 90°, no que diz respeito ao dimensionamento da parede da caixa de passagem, a adoção de uma altura de parede próxima à ordem de grandeza de 80% da energia do escoamento no fim da descida d'água se daria satisfatória.

Uma das metodologias conservadoras usualmente adotadas no dimensionamento desse tipo de estrutura é a de emboque de canal, que considera uma condição de reservatório a montante do canal de saída da caixa (condição que não ocorre) para a obtenção da lâmina d'água necessária para a transposição da soleira. Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram a importância da experimentação laboratorial no contexto de desenvolvimento e aprimoramento de soluções na engenharia de recursos hídricos.

## 6 REFERÊNCIAS

BAPTISTA, M. B. e COELHO, M. M. L. P. (2014). *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*. Editora UFMG. Belo Horizonte.

CHANSON, H. (2004). *The Hydraulics of Open Channel Flow: an Introduction*. Amsterdam Boston: Elsevier Butterworth Heinemann.

GUO, JAMES C. Y. (2009). *Drop height for channel erosion control*. Prof. de engenharia civil da Universidade do Colorado localizada em Denver.

RENNA, F. M. e FRATINO, U. (2010). “*Nappe flow over horizontal stepped chutes*”. *Journal of Hydraulic Research*, 48:5, 583-590, DOI: 10.1080/00221686.2010.507016.

SANAGIOTTO, D. G. e MARQUES, M. G. (2008). “*Características do Escoamento em Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H*”. *RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 13 No.4, 17-31.

SORENSEN, R. M. (1985). “*Stepped spillway hydraulic model investigation*”. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, v. 111. No. 12, p. 1461 – 1472.

TOMAZ, P. (2014). *Curso de Manejo de Águas Pluviais Capítulos 18 e 74*.