

## **I-126 - UTILIZAÇÃO DE VERTEDOUROS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA: LIMITAÇÕES NA APLICAÇÃO DAS FÓRMULAS DISPONÍVEIS PARA DIMENSIONAMENTO**

**Deyvid Wavel Barreto Rosa<sup>(1)</sup>**

Engenheiro ambiental, acadêmico de engenharia civil da Universidade FUMEC, Minas Gerais, Brasil.

**Marcos Rocha Vianna**

Engenheiro civil, Mestre em Hidráulica e Saneamento, Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Professor Adjunto da Universidade FUMEC, Minas Gerais, Brasil.

**Ludmila Stafani de Souza Filgueiras**

Acadêmica de engenharia ambiental da Universidade FUMEC, Minas Gerais, bolsista de Iniciação Científica patrocinada pela empresa Leadmec, Minas Gerais, Brasil.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Cobre, 200 - Cruzeiro - Belo Horizonte - MG - CEP: 30310-190 - Brasil - Tel: (31) 3228-3176 - e-mail: dwbarreto@gmail.com

### **RESUMO**

Vertedouros de diversos tipos, de descarga livre, especialmente retangulares com e sem contrações, triangulares e de Cipoletti, vêm sendo utilizados em estações de tratamento de água como medidores de vazão e reguladores de nível. Eventualmente são também utilizados para a mistura rápida de produtos químicos, especialmente coagulantes e floculantes. Para tanto, são utilizadas no seu dimensionamento, as fórmulas citadas na literatura técnica para essas unidades, tais como a fórmula de Francis para vertedouros retangulares e a fórmula de Thomson para vertedouros triangulares. Ocorre, entretanto, que nos locais em que essas unidades são utilizadas em estações de tratamento de água, as lâminas líquidas são pequenas, fazendo com que em muitos casos as citadas fórmulas estejam fora de seus limites de aplicação.

Este trabalho verifica alguns casos práticos em que a aplicação das fórmulas é inadequada e apresenta a proposta do trabalho, ora em curso, de determinar os ajustes necessários para que elas possam ser utilizadas com maior precisão em estações de tratamento de água.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estação de Tratamento de Água, Vertedouros retangulares, Vertedouros Triangulares, Vertedouros de Cipoletti, Fórmula de Francis.

### **INTRODUÇÃO**

Vertedouros são utilizados em estações de tratamento de água para controlar, estabilizar e regular o nível de água a montante, medição da vazão afluente e mistura rápida de coagulantes. Para todas essas aplicações, o dimensionamento dos vertedouros necessita de um nível de precisão adequado. As fórmulas utilizadas no dimensionamento, que relacionam a largura da soleira do vertedouro, a altura do nível d'água sobre o vertedouro e a vazão vertida, apresentam alguns elementos que são empíricos e estimados, de modo que todas elas possuem limites de aplicações apresentados pelos seus próprios autores (e.g. Bazin, Francis, Sociedade Suíça de Engenheiros e Arquitetos, Rehbock, Thomson, Gouley e Crimp).

Considerando as condições e os limites de aplicação das principais fórmulas utilizadas para o dimensionamento dos vertedouros, é notável o fato de que várias situações reais nas Estações de Tratamento de Água estão fora desses limites apresentados (VIANNA e ROSA, 2011).

Sendo assim, propõe-se a aferição empírica da certeza e da confiabilidade das fórmulas e condições aplicáveis. Os tipos de vertedouros estudados neste trabalho experimental são aqueles que são mais utilizados em projetos de estação de tratamento de água: retangulares (com e sem contração), trapezoidal de Cipoletti e triangulares.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Conforme apresentado por Vianna e Rosa (2012), a vazão  $Q$  de água através de um vertedouro depende de sua geometria e da elevação do nível d'água  $H$  acima da soleira. Assim, para cada formato de vertedouro, uma formulação diferente das relações entre as variáveis foi desenvolvida. De maneira geral, a vazão sobre os vertedouros pode ser descrita como função da altura da carga. Assim:

$$Q = f(H) \quad \text{equação (1)}$$

Observa-se, nos vários estudos hidráulicos realizados com vertedouros, que a vazão varia proporcionalmente com a variação da altura. No entanto, para a maioria dos formatos, essa relação não é de proporcionalidade direta, pela presença notável de uma potência sobre a altura da carga.

$$Q = f(H^n) \quad \text{equação (2)}$$

Essa potência deve ser multiplicada por um coeficiente de descarga  $C_d$ , que “incorpora todas as hipóteses simplificadoras e os efeitos secundários da viscosidade, tensão superficial, rugosidade da placa e do padrão de escoamento a montante” (PORTO, 2003). O  $C_d$  é obtido, quase sempre, através de ensaios laboratoriais que visam a calibrar determinado vertedouro. Assim, pode-se definir a vazão sobre um vertedouro genérico como:

$$Q = C_d \cdot f(H^n) \quad \text{equação (3)}$$

A partir desse formato básico, diversos ensaios e experimentos têm sido realizados a fim de torná-la utilizável para fins práticos. As fórmulas desenvolvidas mais utilizadas são apresentadas a seguir (AZEVEDO NETTO, 1998; NEVES, 1960).

### Fórmulas para vertedouros retangulares

#### Fórmula de Francis

A fórmula para cálculo de vazão no vertedouro retangular mais frequentemente empregada é a desenvolvida pelo engenheiro James B. Francis, publicada em 1868, e que não leva em consideração a velocidade de aproximação da água.

$$Q = 1,838 (L - 0,2H) H^{3/2} \quad \text{equação (4)}$$

Sendo (Figura 1):

$L$  = largura da soleira do vertedouro;

$H$  = altura da carga;

$P$  = altura da soleira do vertedouro.

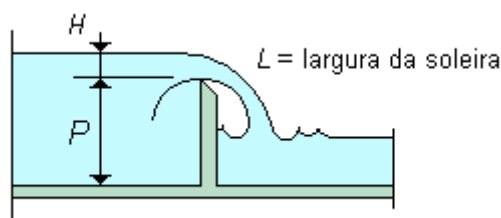


Figura 1: Elementos de um vertedouro

A fórmula de Francis está sujeita às seguintes condições:  $0,25 < H < 0,80$  m,  $P > 0,30$  m e  $H < P$ .

#### Fórmula de Bazin

$$Q = \left( 0,405 + \frac{0,002}{H} \right) \left[ 1 + 0,55 \left( \frac{H}{H+P} \right)^2 \right] LH \sqrt{2gH} \quad \text{equação (5)}$$

Condições de aplicação da fórmula, definidas pelo autor:  $0,08 < H < 0,50$  m,  $0,20 < P < 2,0$  m.

*Fórmula de Rehbock (1929)*

$$Q = \frac{2}{3} \left[ 0,6035 + 0,0813 \left( \frac{h+0,0011}{P} \right) \right] \left[ 1 + \frac{0,0011}{H} \right]^{3/2} \sqrt{2g} L H^{3/2} \quad \text{equação (6)}$$

Condições de aplicação da fórmula, definidas pelo autor:  $0,03 < H < 0,75$  m,  $L > 0,30$  m,  $P > 0,30$  m e  $H < P$ . Segundo Porto (2003), essa equação é indicada para trabalhos de laboratórios, por sua precisão.

*Fórmula da Sociedade Suíça de Engenheiros e Arquitetos*

$$Q = \left( 1,816 + \frac{1,816}{1000H+1,6} \right) \left[ 1 + 0,5 \left( \frac{H}{H+P} \right)^2 \right] L H^{3/2} \quad \text{equação (7)}$$

Condições de aplicação da fórmula, definidas pelo autor:  $P > 0,3$  m;  $0,10 < H < 0,80$  m;  $P > H$ .

### Fórmulas para vertedouros triangulares

Vertedouros triangulares são particularmente interessantes na medição de pequenas vazões, visto que possuem uma maior precisão (Bureau of Reclamation, 1997). São “recomendados para medição de vazões abaixo dos 30 l/s, com cargas entre 0,06 e 0,50 m” (PORTO, 2003). A fórmula geral para cálculo das vazões em vertedouros triangulares pode ser definida como:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan(\alpha/2) h^{5/2} \quad \text{equação (8)}$$

Sendo que  $\alpha$  é o ângulo de abertura do vertedouro triangular. O mais frequentemente utilizado é o de  $90^\circ$ , para o qual existem várias fórmulas experimentais (PORTO, 2003):

*Fórmula de Thomson*

$$Q = 1,40 h^{5/2} \quad \text{equação (9)}$$

*Fórmula de Gouley e Crimp*

$$Q = 1,32 h^{2,48} \quad \text{equação (10)}$$

*Limites de aplicações para vertedouros triangulares*

As fórmulas apresentadas para vertedouros triangulares (Eq. 9 e 10) são limitadas para aplicação, sendo sujeitas a  $h$  entre 0,05 e 0,38 m,  $P > 3h$  e  $b > 6h$ . Ainda, segundo Bos (1989), os limites de aplicações para vertedouros triangulares são (TAB. 1):

**Tabela 1: Limites de aplicações para vertedouros triangulares.**

$h/P \leq 0,4$
$h/B \leq 0,2$
$0,05 \text{ m} < h \leq 0,38 \text{ m}$
$P \geq 0,45 \text{ m}$
$B \leq 0,90 \text{ m}$

Fonte: Adaptado de Bos (1989).

### Fórmulas para vertedouros trapezoidais (Cipoletti)

O vertedouro Cipoletti tem a forma de um trapézio isósceles, com uma inclinação dos lados de razão 1:4. Essa geometria permite que os efeitos das contrações laterais do vertedouro retangular sejam compensados pelas

inclinações laterais. A fórmula para o cálculo de vazões sobre vertedouros Cipoletti, determinada experimentalmente é (PORTO, 2003):

$$Q = 1,861 L h^{3/2} \quad \text{equação (11)}$$

Segundo Bos (1989), os limites de aplicação dos vertedouros Cipoletti são:

- A altura do vertedouro deve ser de não deve ser menor que duas vezes a carga ( $P > 2h$ ) com, no mínimo, 30 cm.
- A distância dos lados do vertedouro até os lados do canal de aproximação não deve ser menor que duas vezes a carga ( $P > 2h$ ) com, no mínimo, 30 cm.
- A carga sobre o vertedouro ( $h$ ) deve estar entre 0,06 m e 0,60 m.
- A razão entre a carga e o comprimento da soleira ( $h/b$ ) deve ser menor ou igual a 0,5.
- Para garantir a ventilação da lâmina d'água, a carga sobre a crista do vertedouro deve ser de, no mínimo, 0,05 m.

## METODOLOGIA UTILIZADA

Para a realização da pesquisa, a metodologia consistiu em revisão bibliográfica, definição dos parâmetros a serem estudados experimentalmente, experimentos no laboratório, tratamento dos dados obtidos e discussão dos resultados. Para os ensaios laboratoriais, um circuito hidráulico construído em alvenaria foi utilizado para fixação dos vertedouros estudados, confeccionados em chapas metálicas de espessura de 2 mm. Os dados obtidos nesses experimentos são: elevação do nível d'água acima da soleira do vertedouro ( $H$ ), lida através de piezômetros instalados ao longo do canal; e a vazão vertida ( $Q$ ), obtida através do método volumétrico. Esses dados foram tabelados, analisados e os resultados apresentados em seguida.

## RESULTADOS PARA VERTEDOUROS RETANGULARES

Os resultados apresentados correspondem ao ensaio de um vertedouro retangular com largura da soleira igual a 20 cm e altura da soleira de 5 cm. O vertedouro foi estudado com alturas do nível d'água acima da soleira de 10 mm, 15 mm, 20 mm e 30 mm. Para cada um desses valores a vazão foi lida em seis ciclos. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2: Vazão em vertedouro retangular com largura da soleira de 20 cm.**

Medição	Vazão medida (L/s)			
	H (mm)			
	10	15	20	30
1	0,617	0,995	1,229	2,083
2	0,538	0,975	1,272	2,110
3	0,568	0,963	1,225	2,112
4	0,600	0,936	1,287	2,084
5	0,575	0,969	1,299	2,072
6	0,584	0,949	1,280	2,077
Média	0,580	0,965	1,265	2,090
Mediana	0,579	0,966	1,276	2,084
Desvio padrão	0,030	0,021	0,034	0,018

Observa-se que o método utilizado para medição de vazão apresenta uma melhoria na sua precisão com o aumento da carga, variando de um desvio padrão relativo de 5,2% com  $H=10$  mm a 0,8% com  $H=30$  mm.

Os resultados obtidos no ensaio laboratorial foram comparados com as vazões obtidas através de quatro fórmulas desenvolvidas para vertedouros retangulares: Francis (Eq. 4), Bazin (Eq. 5), Rehbock (Eq. 6) e Sociedade Suíça de Engenheiros e Arquitetos - SSEA (Eq. 7).

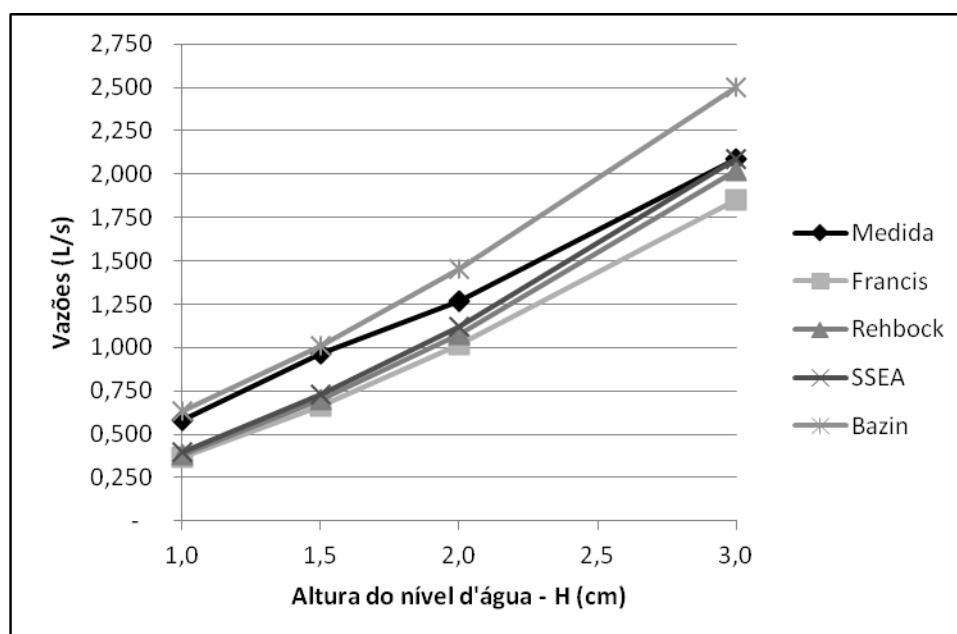
A comparação entre as vazões obtidas no experimento e as vazões calculadas através das fórmulas evidencia a imprecisão dessas quando aplicadas para pequenas cargas. As variações percentuais entre as vazões medidas e as calculadas são significativas, como pode ser observado na Tabela 3. A fórmula de Francis, particularmente, é aquela que apresenta a maior variação percentual entre as quatro fórmulas utilizadas.

**Tabela 3: Comparação das vazões medidas e calculadas em vertedouro retangular.**

H (cm)	Vazões (L/s)							
	Medida	Francis	$\Delta\%$	Rehbock	$\Delta\%$	SSEA	$\Delta\%$	Bazin
1,0	0,580	0,364	-37,3%	0,380	-34,5%	0,400	-31,1%	0,633
1,5	0,965	0,665	-31,0%	0,696	-27,8%	0,726	-24,7%	1,012
2,0	1,265	1,019	-19,5%	1,079	-14,8%	1,119	-11,6%	1,451
3,0	2,090	1,853	-11,3%	2,020	-3,3%	2,084	-0,3%	2,501

Analisando os dados tabelados, observa-se uma tendência de redução da variação percentual, no caso das fórmulas de Francis, Rehbock e SSEA, ou seja, com o aumento da carga, aproxima-se do limite inferior de aplicação da fórmula, melhorando a precisão dos resultados encontrados. O mesmo não aconteceu com a fórmula de Bazin, cujos resultados crescentes da variação percentual indicam a diminuição da precisão. No entanto, a única situação na qual a carga de 30 mm se aproxima significativamente do limite de aplicação da fórmula é o caso da de Rehbock.

Na Figura 2 é possível notar ainda que a variação da vazão medida não acompanha a mesma tendência de variação observada em nenhuma das quatro fórmulas. A análise do comportamento das curvas num intervalo maior das abscissas permitiria uma discussão mais fundamentada. Desse modo, faz-se necessária a realização de mais ensaios laboratoriais para obtenção de dados que permitam a ampliação da discussão iniciada.



**Figura 2: Vazões medidas e calculadas em vertedouro retangular**

## RESULTADOS PARA VERTEDOUROS TRIANGULARES

Os resultados apresentados correspondem ao ensaio de um vertedouro triangular com ângulo de abertura de 90°. O vertedouro foi estudado com alturas do nível d'água acima da soleira variando entre 14 mm e 47 mm.

Os resultados obtidos no ensaio laboratorial foram comparados com as vazões calculadas a partir das duas fórmulas mais utilizadas para vertedouros triangulares: Thomson (Eq. 9), Gouley e Crimp (Eq. 10).

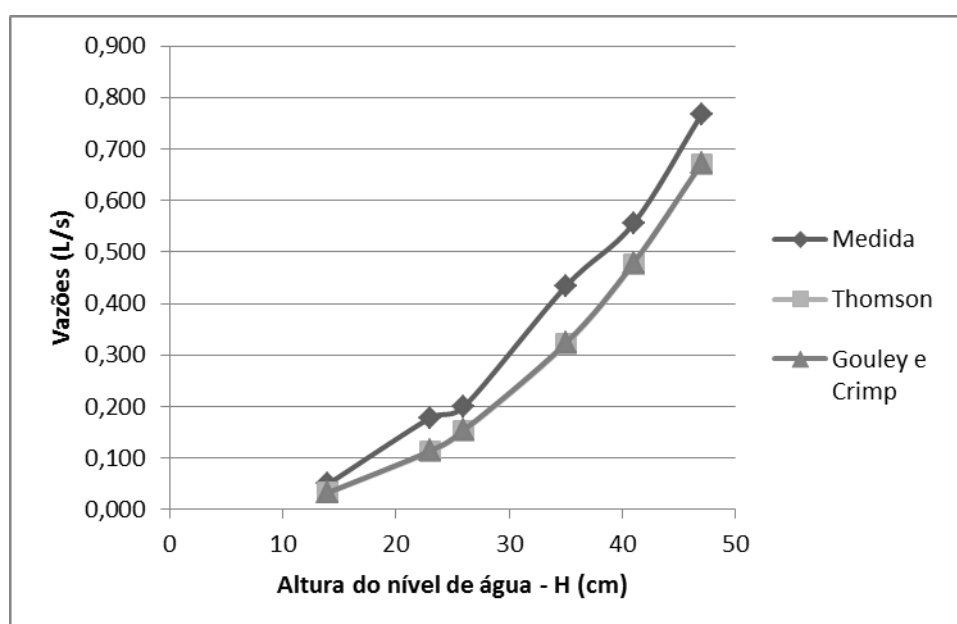
A comparação entre as vazões obtidas no experimento e as vazões calculadas através das fórmulas evidencia a imprecisão dessas quando aplicadas para pequenas cargas. As variações percentuais entre as vazões medidas e as calculadas são significativas, como pode ser observado na Tabela 4. As fórmulas de Thomson e de Gouley e Crimp apresentam valores próximos entre si, ainda que a fórmula de Thomson apresente variação percentual ligeiramente maior.

**Tabela 4: Comparação das vazões medidas e calculadas em vertedouro retangular.**

H (mm)	Vazões (L/s)				
	Medida	Thomson	$\Delta\%$	Gouley e Crimp	$\Delta\%$
14	0,050	0,032	-35,1%	0,033	-33,3%
23	0,178	0,112	-36,8%	0,114	-35,8%
26	0,200	0,153	-23,7%	0,155	-22,6%
35	0,433	0,321	-26,0%	0,323	-25,3%
41	0,556	0,477	-14,2%	0,479	-13,8%
47	0,767	0,670	-12,5%	0,672	-12,3%

Analisando os dados tabelados, observa-se uma tendência de redução da variação percentual, ou seja, com o aumento da carga, aproxima-se do limite inferior de aplicação das fórmulas (50 mm), melhorando a precisão dos resultados encontrados.

Na Figura 3 é possível notar que a variação da vazão medida acompanha a mesma tendência de variação observada nas duas fórmulas. A análise do comportamento das curvas num intervalo maior das abscissas permitiria uma discussão mais aprofundada, envolvendo o coeficiente de descarga e a potência indicada nas fórmulas. Desse modo, faz-se necessária a realização de mais ensaios laboratoriais para obtenção de dados que permitam a ampliação da discussão iniciada.



**Figura 3: Vazões medidas e calculadas em vertedouro triangular**

## RESULTADOS PARA VERTEDOUROS CIPOLETTI

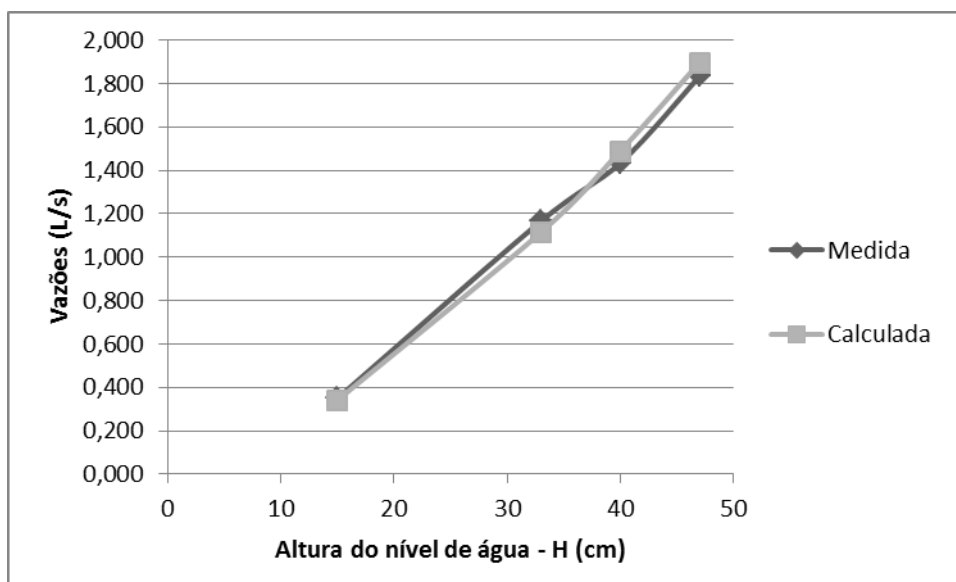
Os resultados apresentados correspondem ao ensaio de um vertedouro trapezoidal com largura da soleira de 10 cm. O vertedouro foi estudado com alturas do nível d'água acima da soleira variando entre 1,5 cm e 4,7 cm.

Os resultados obtidos no ensaio laboratorial foram comparados com as vazões obtidas através da fórmula para vertedouros Cipoletti (Eq. 11) e são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5: Comparação das vazões medidas e calculadas em vertedouro trapezoidal.**

H (mm)	Vazões (L/s)		
	Medida	Calculada	$\Delta\%$
15	0,350	0,342	-2,3%
33	1,167	1,116	-4,4%
40	1,433	1,489	3,9%
47	1,833	1,896	3,4%

Através da comparação entre as vazões obtidas no experimento e as vazões calculadas através da fórmula (Eq. 11) é possível verificar a proximidade entre os resultados (Figura 4), mesmo para a condição de pequenas cargas. Ainda que todas as alturas de carga utilizadas nos ensaios estejam abaixo do limite mínimo de aplicação da fórmula (60 mm), as variações percentuais entre as vazões medidas e as calculadas são pequenas, podendo ser atribuídas ao erro experimental relacionado ao pequeno intervalo amostral. A realização de ensaios laboratoriais considerando um maior intervalo de amostragem permitirá a confirmação da aplicabilidade da fórmula nessas situações de pequenas cargas.



**Figura 4: Vazões medidas e calculadas em vertedouro Cipoletti**

## CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos até o momento evidenciam os equívocos que vêm sendo cometidos no projeto de vertedouros de estações de tratamento de água utilizando, sem os cuidados necessários, as fórmulas tradicionais. Os ensaios laboratoriais realizados demonstram que para pequenas cargas (até 5,0 cm), as fórmulas mais comumente utilizadas para o dimensionamento de vertedouros retangulares, a de Francis, e triangulares, a de Thomson, apresentam diferença expressiva com os resultados observados. Já a fórmula utilizada para cálculo da vazão dos vertedouros Cipoletti forneceu valores próximos aos observados nos ensaios.

A realização de mais ensaios laboratoriais, considerando maior intervalo de amostragem e outros vertedouros com medidas variadas de largura e altura da soleira, permitirá o aprofundamento da discussão e a confirmação dos resultados observados. Dessa forma será possível inferir possíveis alternativas de cálculo para as situações de pequenas cargas, abaixo dos limites mínimos de aplicação recomendados pelos autores das fórmulas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZEVEDO NETTO, José Martiniano de. Manual de Hidráulica. 8ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998, 669 p.
2. BOS, M. G. Discharge measurement structures. 3rd ed. Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, 1989, 402 p.
3. BUREAU OF RECLAMATION. U.S. Department of the Interior. Water Measurement Manual. 3rd ed. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1997.
4. NEVES, Eurico Trindade. Curso de hidráulica. 8. ed. Porto Alegre: Globo, c1960. 577p.
5. PORTO, Rodrigo de Melo. Hidráulica básica. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 2003, 519p.
6. VIANNA, Marcos Rocha; ROSA, Deyvid Wavel Barreto. Utilização de vertedouros em estações de tratamento de água: aplicações práticas e limitações. In: Simpósio Luso-brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SILUBESA), 15, 2011, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABES, 2011.