



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Aristides Campos Lemos

Avaliação das equações de vazão e coeficientes de descarga de vertedores
triangular e circular de parede delgada

Ouro Preto
2016

Aristides Campos Lemos

Avaliação das equações de vazão e coeficientes de descarga de vertedores
triangular e circular de parede delgada

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Ouro Preto como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de Engenheiro
Civil.

Orientador: Prof. Gilberto Queiroz da Silva

Ouro Preto
2016

L557a

Lemos, Aristides Campos.

Avaliação das equações de vazão e coeficientes de descarga de vertedores triangular e circular de parede delgada [manuscrito] / Aristides Campos Lemos. - 2016.

87f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Queiroz da Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Hidráulica. 2. Vertedor Triangular. 3. Vertedor Circular. 4. Vazão. 5. Coeficiente de Descarga. I. Queiroz da Silva, Gilberto. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

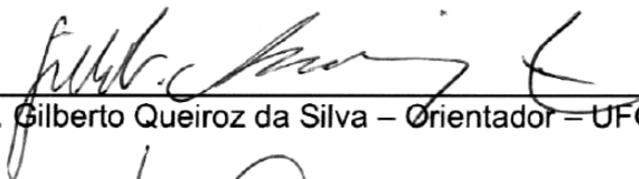
CDU: 624

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

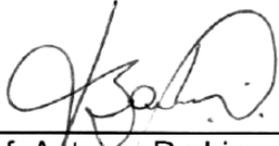
Aristides Campos Lemos

Avaliação das equações de vazão e coeficientes de descarga de vertedores
triangular e circular de parede delgada

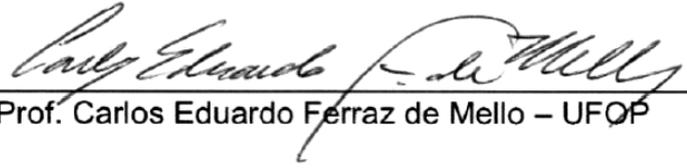
Monografia de conclusão de curso para
obtenção do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto,
defendida e aprovada em 20 de Maio de
2016, pela banca examinadora constituída
pelos professores:



Prof. Gilberto Queiroz da Silva – Orientador – UFOP



Prof. Antenor Rodrigues Barbosa Jr. – UFOP



Prof. Carlos Eduardo Ferraz de Mello – UFOP

RESUMO

Um vertedor de parede delgada é uma estrutura hidráulica constituída por uma parede com abertura de determinada forma geométrica, colocada perpendicularmente ao fluxo do escoamento. Há a elevação do nível d'água a montante até uma cota suficiente para produzir uma lâmina de água por sobre o obstáculo. É intensamente usado para medição e/ou controle de vazão de escoamento em um canal. A relação entre a carga hidráulica e a vazão provocada é dependente de vários fatores e características tanto do vertedor quanto do canal a montante. Portanto, a determinação de uma equação precisa que caracterize o comportamento da vazão é de uso específico para a estrutura e as condições testadas. Este trabalho apresenta um estudo geral sobre vertedores triangular e circular de parede fina. Também busca ajustar experimentalmente os coeficientes e equações de vazão e coeficiente de descarga existentes na literatura para que se adequem satisfatoriamente ao modelo estudado. Comprovou-se que as formulações de Thomson (curva de potência) e Vatankhah foram as que melhor se ajustaram aos vertedores triangular e circular, respectivamente. Também ficou evidenciado a tendência do coeficiente de descarga de ficar constante com o aumento da carga no vertedor triangular.

Palavras Chave: Hidráulica. Vertedor Triangular. Vertedor Circular. Vazão. Coeficiente de Descarga.

ABSTRACT

A sharp-crested weir is a hydraulic structure constituted by a wall with a particular geometric shape opening located perpendicular to the flow of an open channel. There is a raise of the upstream water level to a elevation high enough to form a nappe over the weir. It is largely used as a flow measuring and controlling device in an open channel. A stage-discharge relation is dependent of a lot of factors and characteristics of both, sharp-crested weir and upstream channel. Then, defining an accurate equation that characterize the flow rate behavior is of specific use for the structure and conditions tested. This paper presents a general study about sharp-crested weirs and pursue to fit experimentally coefficients and equations of flow and coefficient of discharge in order to suit them to the studied model. It was verified that Thomson's and Vatankhah's equations were the ones best fitted triangular and circular weirs, respectively. In addition, it was found the coefficient of discharge has tendency to be stable with head raising in the triangular weir.

Key Words: Hydraulics. Triangular Weir. Circular Weir. Flow Rate. Coefficient of Discharge

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	7
1.1	Nomeclatura	7
1.2	Classificação	8
2.	OBJETIVOS	10
3.	JUSTIFICATIVA	11
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4.1	Equação Geral de Vazão	12
4.2	Condições Gerais para Vertedores de Parede Delgada	16
4.3	Vertedor Triangular	18
4.4	Vertedor Circular	25
5.	MODELO FÍSICO	33
5.1	Considerações Iniciais	33
5.2	Descrição do Modelo	34
5.3	Metodologia	39
5.4	Resultados Experimentais	39
5.5	Análise de Erros	63
6.	DISCUSSÃO	64
6.1	Vertedor Triangular	64
6.2	Vertedor Circular	74
7.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	75
7.1	Vertedor Triangular	83
7.2	Vertedor Circular	84
	REFERÊNCIAS	85

1. INTRODUÇÃO

Um vertedor pode ser definido como uma parede com abertura de determinada forma geométrica, colocada, na maioria das vezes, perpendicularmente ao fluxo do escoamento. Ocorre a elevação do nível d'água a montante até uma cota suficiente para produzir uma lâmina de água por sobre o obstáculo. É, basicamente, um orifício de grandes dimensões sem a borda superior, usado para medição e/ou controle de vazão de escoamento em um canal (Porto, 2006).

Para Azevedo Netto (1998), a importância do estudo de vertedores é devida ao seu intenso uso como estrutura hidráulica para medir vazão em pequenos cursos d'água e condutos livres bem como para controlar o escoamento em canais e galerias. Seu uso como medidor de vazão também tem grande importância em laboratórios e indústrias devido a sua precisão e simplicidade de uso. Isso ocorre devido à relação existente entre a vazão sobre um vertedor e o nível d'água a montante. Essa relação pode ser parcialmente determinada por modelos matemáticos baseados nas leis da física; porém, tais modelos consideram situações teóricas ideais e englobam uma série de hipóteses simplificadoras que comprometem a acurácia dos resultados. De tal forma, o desenvolvimento de modelos ajustados por coeficientes experimentais é necessário e importante por permitir que tais estruturas funcionem satisfatoriamente e com precisão como medidoras de vazão e regularizadoras de nível.

1.1 Nomeclatura

Conforme a figura 1.1, as principais partes que compõem um vertedor, de maneira geral, são:

- a) Crista ou soleira é a aresta ou ponto da abertura da parede de menor cota por onde há o escoamento da lâmina vertente;
- b) Carga do vertedor "H" é a diferença de cotas entre o nível d'água a montante, fora da curvatura da lâmina vertente, e o nível da soleira;
- c) Altura da soleira "P" é a diferença de cotas entre o nível da soleira e o fundo do canal;
- d) Largura da soleira "L" é a dimensão da crista por onde há escoamento;

- e) Largura do canal de chegada “B” é a dimensão horizontal transversal do canal, aqui considerado de seção retangular;
- f) Altura do escoamento a jusante “p” é a diferença de cotas entre o nível do escoamento e o fundo do canal, ambas a jusante do vertedor.

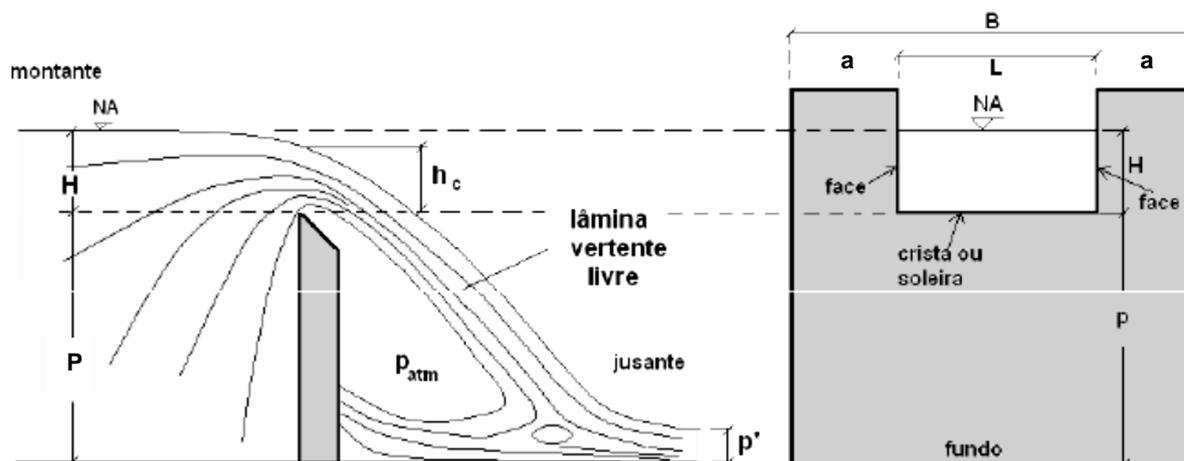


Figura 1.1 – Vistas lateral e longitudinal de um vertedor de parede delgada. Fonte: Silva (2014)

1.2 Classificação

Os vertedores podem apresentar diferentes formas e disposições, assumindo diferentes comportamentos para cada uma delas. Assim, há diversos fatores que servem de parâmetro para classificá-los, sendo eles abaixo listados, de acordo com Porto (2006).

- Forma: são classificados quanto à forma geométrica da abertura, sendo retangulares, triangulares, circulares, trapezoidais, mistos, etc;
- Natureza da parede: são classificados quanto à espessura “e” da parede em contato com a lâmina vertente, sendo denominados de (i) parede delgada quando $e < 2/3 H$; (ii) parede espessa quando $e > 2/3 H$; e (iii) ogee quando a forma da parede acompanha a face inferior da lâmina vertente;

- c) Largura relativa: são classificados quanto à largura da soleira, sendo denominados (i) sem contração lateral, se $L = B$; ou (ii) com contração lateral, se $L < B$;
- d) Natureza da lâmina: são denominados de (i) lâmina livre, se a região abaixo da lâmina vertente for suficientemente arejada para manter a pressão atmosférica; (ii) lâmina deprimida, se esta pressão for inferior à atmosférica; e (iii) lâmina aderente, se a lâmina colar à face de jusante do vertedor, sem que se torne afogada;
- e) Inclinação: são classificados quanto à inclinação da parede do vertedor em relação ao plano vertical, sendo denominados (i) verticais (ou retos) e (ii) inclinados;
- f) Altura relativa da soleira: são classificados quanto à altura da soleira em relação à altura (nível) do escoamento a jusante, sendo de (i) descarga livre, se $P > p'$ ou (ii) descarga submersa, se $P < p'$.

Para efeitos de simplificação, nesse trabalho só serão considerados e analisados os vertedores verticais, de parede delgada, com contração lateral, com lâmina livre e de descarga livre, de seção transversal (forma) circular ou triangular. Para as seções escolhidas, estas configurações representam a maioria dos casos reais existentes, bem como dispõe de uma quantidade de estudos e análises na literatura bem superior às demais.

2. OBJETIVOS

Este trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto e tem como objetivo analisar as correlações entre a carga hidráulica a montante e a respectiva vazão por sobre um vertedor de parede delgada, nas geometrias circular e triangular, presentes na literatura técnica. E, a partir de experimentos práticos em modelos reduzidos no canal hidrodinâmico do Laboratório de Hidráulica, obter coeficientes experimentais que permitam ajustar os modelos teóricos e desenvolver uma formulação própria, através de regressões não lineares obtidas computacionalmente pelo software Origin, que corresponda satisfatoriamente às condições locais do canal em questão e às limitações físicas impostas por este aos modelos de vertedores.

3. JUSTIFICATIVA

A motivação para se escrever sobre o tema proposto surgiu em decorrência de não haver formulações analíticas gerais que satisfaçam, de forma simples e precisa, a todos os conjuntos de canais e vertedores. A intenção deste trabalho é a de desenvolver formulações que expliquem a relação entre a carga hidráulica e a vazão nas condições exemplificadas do canal utilizado e que essa relação possa ser exportada para estruturas semelhantes, com a mesma precisão. Durante a realização dos testes pode-se observar diversos fatores que influenciam na vazão de um vertedor, bem como foi possível controlar alguns destes a fim de se minimizar interferências locais na análise global da relação entre carga e vazão.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido ao propósito de um vertedor de parede delgada, a determinação da relação entre a carga hidráulica e a vazão do líquido escoado por sobre a estrutura é de importância fundamental. Embora existam diversas fórmulas práticas, essa relação é constantemente estudada e analisada, uma vez que a multiplicidade de condições de instalação e características físicas da estrutura vertedora impede uma formulação analítica única com resultados satisfatórios para qualquer condição de aplicação. Portanto, para se obter uma relação satisfatória, é necessário que se realizem testes práticos que simulem as particularidades desejadas para se obter os coeficientes específicos do conjunto analisado. Nesse contexto, além das fórmulas práticas, existem vários estudos que, através de abordagens empíricas, sugerem formulações experimentais que representem adequadamente o comportamento da vazão para um conjunto amplo de condições de vertedores e canais.

4.1 Equação Geral de Vazão

4.1.1 Vazão Teórica

Como demonstrado por Bos (1989), Porto (2006) e Tuan (2011), é possível efetuar uma análise elementar da relação da vazão que passa por sobre um determinado vertedor em relação à carga hidráulica “h” e/ou a outros elementos geométricos e hidráulicos. Para tal, uma série de hipóteses simplificadoras são consideradas e, então, utiliza-se do princípio de Bernoulli ou da equação de Torricelli para se obter as relações que regem a vazão teórica, também chamada de vazão ideal, do fluido sobre a estrutura.

Para a análise preliminar e, conforme a Figura 4.1, as seguintes hipóteses são necessárias:

- i) A distribuição de velocidades a montante do vertedor é uniforme;
- ii) Os efeitos da viscosidade, tensão superficial, turbulência e escoamentos secundários são desprezados;
- iii) A pressão na seção AB imediatamente a jusante do vertedor é a atmosférica por toda sua extensão;

- iv) O fluxo não se contrai ao passar pelo vertedor;
- v) Não há perda de energia entre as seções consideradas.

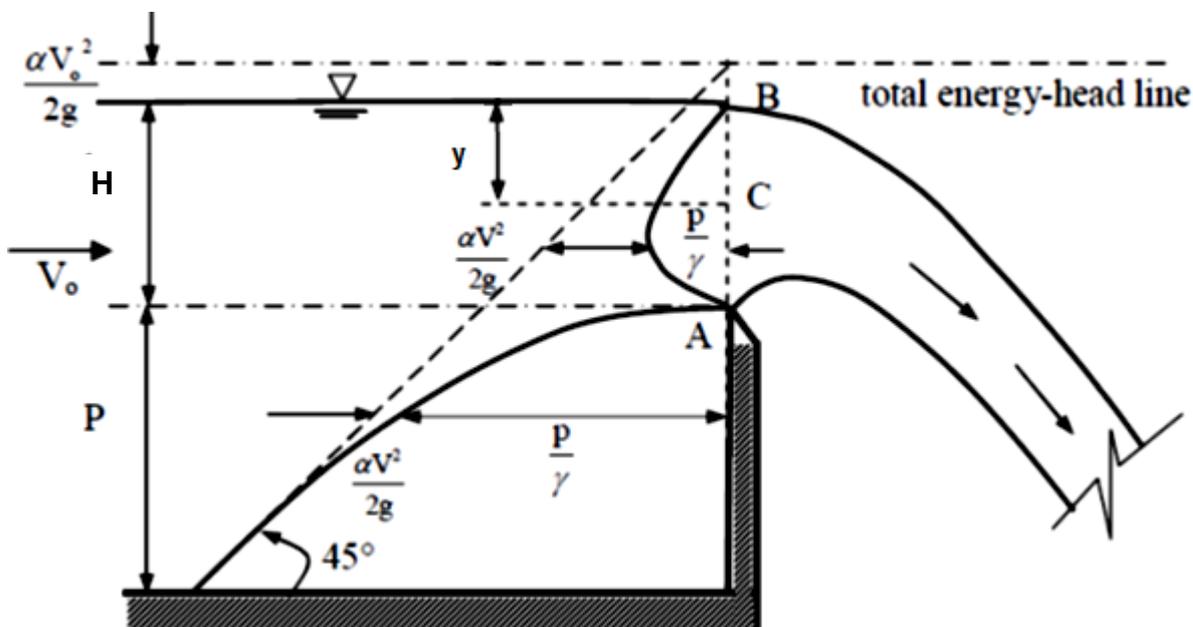


Figura 4. – Escoamento sobre um vertedor de seção qualquer. Fonte: Tuan (2011)

Considerando o plano horizontal que passa por “A” (crista) como plano de referência e aplicando-se o princípio de Bernoulli a dois pontos localizados, um (0) no nível d’água, pelo menos a 6 vezes o valor da carga de distância a montante do vertedor, e outro (1) imediatamente após a face do vertedor.

$$H_0 + \frac{P_0}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} = H_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \text{constante} \quad [4.1]$$

$$P_0 = P_1 = P_{atm} \text{ e } V_0 = V$$

$$h + \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} = (h - y) + \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$V_1^2 = 2g \left(y + \frac{V_0^2}{2g} \right)$$

$$V_1 = \sqrt{2g \left(y + \frac{v^2}{2g} \right)}$$

Sendo “q” a vazão unitária elementar em uma faixa de altura dy representada por $dq = V_1 dy$; e “Q” a vazão total representada por $dQ = V_1 dA$, a integração desta sobre a área de abertura da seção até o nível da carga hidráulica permite calcular a vazão total por sobre o vertedor.

$$dq = \sqrt{2g \left(y + \frac{v^2}{2g} \right)} dy$$

$$dQ = \sqrt{2g \left(y + \frac{v^2}{2g} \right)} dx dy \quad [4.2]$$

Desconsiderando-se a velocidade de aproximação, tem-se:

$$dQ = \sqrt{2gy} dA \quad [4.3]$$

$$Q = \int_0^A \sqrt{2gy} dA$$

4.1.2 Vazão Real

Na prática, a vazão real é sempre inferior à vazão teórica. Isso ocorre devido às diversas hipóteses assumidas para se chegar a uma formulação que descrevesse a vazão sobre um vertedor.

Introduz-se, então, um coeficiente, denominado Coeficiente de Descarga ou Coeficiente de Vazão “ C_d ”, que incorpora os efeitos reais desprezados nas hipóteses simplificadoras. Assim, os efeitos da contração dos filetes na lâmina vertente, efeitos da viscosidade, tensão superficial, rugosidade da parede do vertedor, padrão de escoamento a montante, variação da distribuição de velocidades e pressões e

demais efeitos negligenciados anteriormente são considerados no cálculo da vazão real.

Porto (2006) reconhece que, apesar dos diversos estudos na área ao longo de mais de um século, é impossível aceitar uma determinada formulação para obtenção do coeficiente de descarga. Cada formulação é específica para um determinado conjunto de fatores limites tais como as geometrias do canal e do vertedor, a faixa de vazão estudada, a altura da soleira, dentre outros. Assim, Porto (2006) conclui que qualquer formulação que apresente uma variação de resultados com os dados experimentais inferior a 5% é aceitável na prática.

A equação geral da vazão real total sobre um vertedor fica então definida por:

$$Q = C_d \int_0^A \sqrt{2gy} \, dA \quad [4.4]$$

4.1.2.1 Velocidade de Aproximação

Em uma análise elementar, como feito anteriormente, a velocidade de aproximação é descartada; porém, ela pode exercer considerável influência na vazão por sobre o vertedor. Além de ser um termo presente na formulação da vazão através do princípio de Bernoulli, tal velocidade pode reduzir a dimensão efetiva da crista, além de dificultar a medição da carga hidráulica e mudar a curvatura da lâmina vertente.

Os vertedores padrões, quando analisados dentro dos limites hidráulicos e geométricos estabelecidos pelas formulações escolhidas, não sofrem influência considerável da velocidade de aproximação, cujos efeitos já estão embutidos nos referidos coeficientes de descarga. Se existe a necessidade de se corrigir a relação de vazão devido à excessiva velocidade de aproximação, significa que os limites estabelecidos para o vertedor em questão foram extrapolados (USBR, 2001).

Em termos práticos, Bengston (2010) e USBR (2001) aceitam como válida e próxima da realidade a hipótese de se considerar a velocidade de aproximação, em

um canal retangular, como a relação entre vazão e a área da seção molhada do canal no local onde se afere a carga hidráulica. Assim, tem-se:

$$V_a = \frac{Q}{A_0} \quad [4.5]$$

Nos casos em que há influência da velocidade de aproximação na determinação da vazão, o termo cinético ($V_a^2/2g$) deve ser considerado. Nesse caso, a derivação de uma equação da vazão fica muito complicada, principalmente para formas geométricas diferentes da retangular, requisitando uma análise numérica mais avançada.

4.2 Condições Gerais para Vertedores de Parede Delgada:

Através de vários estudos e experimentos práticos é possível admitir que há vários requisitos comuns a todos os tipos de vertedores de parede fina necessários para que estes sejam usados como instrumento preciso de medição de vazão. USBR (2001) recomenda que as seguintes condições sejam atendidas:

- a) As faces do vertedor e do anteparo a montante devem ser regulares, lisas, aprumadas e normais ao eixo do canal;
- b) A crista deve ser nivelada para as formas retangular e trapezoidal, enquanto a bissetriz deve ser aprumada para a forma triangular;
- c) As arestas da abertura do vertedor devem estar locadas em um plano, enquanto as quinas devem ter os ângulos estabelecidos;
- d) A espessura da soleira e das faces laterais deve ter entre 0,75 e 2,00 milímetros (mm);
- e) A espessura deve ser a mesma em todas as arestas do vertedor por onde há fluxo. Se a espessura nas placas for maior que o descrito da seção "d", as arestas devem ser chanfradas a jusante da crista em um ângulo de, pelo menos 45 graus. No caso de vertedor triangular, recomenda-se um ângulo superior a 60 graus para evitar do líquido se aderir à placa;
- f) As arestas a montante devem ser retas e agudas. Podem necessitar de tratamento mecânico para retirar rebarbas e/ou preencher riscos. O uso

de pano ou papel abrasivo deve ser evitado. Quinas pontiagudas também devem ser evitadas por questões de segurança e por se danificarem facilmente;

- g) A aresta de fundo da placa e os apoios a montante devem ser locados a uma distância mínima de duas vezes a carga hidráulica. Se não for possível, as placas devem ser inseridas niveladas com a face a montante do anteparo e os fixadores devem ser embutidos no lado a montante. As faces a montante devem estar livres de graxas e óleos;
- h) A lâmina vertente deve apenas tocar as superfícies da crista e das faces laterais a montante;
- i) O nível máximo do escoamento a jusante do vertedor deve estar a, pelo menos, 6 centímetros (cm) abaixo da elevação da crista. Quando as medições são próximas à soleira, deve-se observar se a veia está completamente ventilada, sem que ondas do escoamento a jusante preencham constantemente a cavidade abaixo da mesma;
- j) Para evitar que a lâmina vertente cole na face a jusante do vertedor, é necessária uma carga hidráulica maior que 5 centímetros (cm). As condições “d”, “e” e “f” também ajudam a prevenir esse fenômeno. Caso haja a necessidade de se efetuar medições próximas ao valor limite da carga hidráulica por repetidas vezes, o operador deve se assegurar da precisão das medidas e sempre conferir se a lâmina não está colada na face do vertedor;
- k) A medição da carga hidráulica é a diferença de nível entre a superfície da água e a crista, em um ponto a montante do vertedor, localizado a, pelo menos, 4 vezes o valor da máxima carga aferida. Recomenda-se que esta distância seja superior a 6 vezes a carga (Bos, 1989);
- l) As proximidades da soleira devem ser mantidas livres de depósitos de sedimentos. O fluxo de chegada no vertedor deve ser livre de curvas, obstruções e ondas. Deve, também, ser subcrítico e completamente desenvolvido para minimizar erros.

Além destes requisitos, outras condições e limitações específicas estão associadas a cada tipo de vertedor, e serão tratadas posteriormente.

Deve-se ponderar, também, que muitas destas exigências variam com os diferentes autores da área.

4.3 Vertedor Triangular

Um vertedor triangular, também conhecido como vertedor com entalhe em “V” (V-notch weir) consiste em um vertedor cujo perfil da crista é de geometria triangular. Geralmente a bissetriz do vértice é vertical e equidistante das paredes laterais do canal.

Vertedores triangulares de parede fina são instrumentos muito precisos de medição de vazão, principalmente para pequenos fluxos. Isso ocorre porque a área da seção triangular e a vazão diminuem acentuadamente com a queda da carga hidráulica, permitindo, pois, uma medida mais precisa da carga para fluxos pequenos (Bengston, 2010).

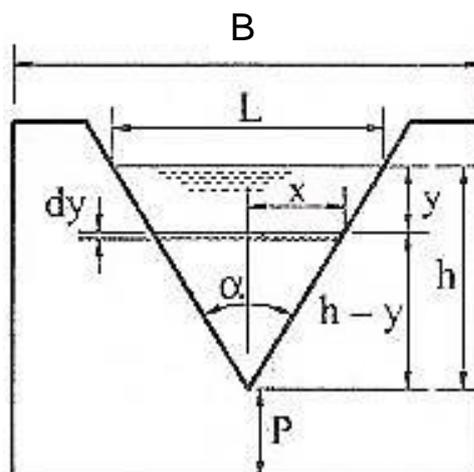


Figura 4.2 – Seção transversal de um vertedor triangular. Fonte: Porto (2006)

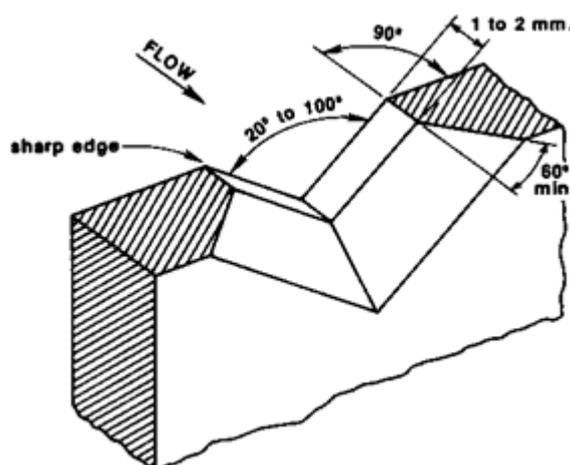


Figura 4.3– Detalhe da crista – condições segundo Bos (1989)

Considerando as Figuras 4.2 e 4.3 que mostram um vertedor triangular de carga “h” e ângulo de abertura “ α ” e, desprezando-se a velocidade de aproximação, pode-se chegar a uma relação entre carga hidráulica e a vazão total através do desenvolvimento da componente “dA” da Equação 4.4.

$$dA = 2 x dy$$

Sendo que:

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{x}{h-y}$$

Então:

$$dA = 2 (h-y) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) dy \quad [4.6]$$

Substituindo [4.6] em [4.4], tem-se:

$$Q = C_d \int_{y_1}^{y_2} (\sqrt{2gy}) \left[2 (h-y) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right] dy$$

Integrando-se a vazão entre os limites 0 e h, tem-se:

$$Q = C_d 2\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \int_0^h (h-y) \sqrt{y} dy$$

$$Q = \frac{8}{15} C_d (\sqrt{2g}) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) h^{\frac{5}{2}} \quad [4.7]$$

Sendo esta a equação fundamental da vazão para os vertedores triangulares de parede delgada, como demonstrado por Porto (2006).

Shen (1981) atribui as propriedades do fluido escoado e as características geométricas do canal de chegada e do vertedor como fatores que influenciam no coeficiente de descarga; porém, ao se considerar apenas um líquido dentro de um pequeno intervalo de temperatura, propriedades como o peso específico se mantêm constante, enquanto que os efeitos da tensão superficial e viscosidade dependem apenas do valor absoluto da carga hidráulica. Então, para um determinado líquido em um determinado intervalo de temperatura, têm-se:

$$C_d = f\left(\frac{h}{P}; \frac{P}{B}; \alpha; h\right)$$

4.3.1 Vertedor Thomson ($\alpha = 90^\circ$)

Dentre os vertedores de geometria triangular, o de abertura com ângulo reto, também conhecido como vertedor de Thomson em homenagem ao britânico James Thomson, professor de engenharia civil, é o mais estudado e, portanto, é aquele que possui maior acervo de dados e formulações. Dentre os vários estudos, cada qual foi feito sob condições específicas e, portanto, a validade e precisão de suas formulações são limitadas a estas condições (Porto, 2006).

Lencastre (1983) e Porto (2006) indicam, para $\alpha = 90^\circ$, a equação do próprio Thomson. Porto (2006), além desta, aconselha a fórmula de Gouley e Grimp. Por outro lado, Bengston (2010) e USBR (2001), indicam o uso da equação de Cone. Estas formulações, bem como seus limites de validade, são descritas adiante.

a) Thomson:

$$Q = 1,40 h^{\frac{5}{2}} \quad [4.8]$$

Sujeita aos limites: $P > 3h$; $b > 6h$; $0,05\text{m} < h < 0,38\text{m}$.

b) Gouley e Grimp:

$$Q = 1,32 h^{2,48} \quad [4.9]$$

Sujeita aos limites: $P > 3h$; $b > 6h$; $0,05\text{m} < h < 0,38\text{m}$.

c) Cone (já transformada para as unidades do sistema internacional):

$$Q = 1,36 h^{2,48} \quad [4.10]$$

Sujeita aos limites: $P \geq 2h_{\max}$; $0,06\text{m} < h < 0,38\text{m}$; $5,1\text{m}^3/\text{h} < Q < 433,2 \text{ m}^3/\text{h}$;
 $S \geq 2h_{\max}$; em que “S” representa a largura de uma contração lateral.

Shen (1981) cita os experimentos de Numachi, Kurokawa e Hutizawa realizados no Japão em 1940, como a mais extensiva investigação de um simples ângulo e um único líquido sobre vertedores triangulares. Eles usaram água e um vertedor Thomson ($\alpha = 90^\circ$) para, através da equação fundamental (Equação 4.7), quantificar o coeficiente de descarga, bem como determinar os fatores que exercem maior influência sobre este, chegando ao seguinte resultado, no sistema imperial (sistema inglês):

$$C_d = C = 0,574 + \frac{0,0055}{h} + \left(0,055 + \frac{0,278}{0,886+P}\right) \left[\frac{h}{B} - \left(0,1 - \frac{0,0098}{0,079+P}\right)\right]^2 \quad [4.11]$$

4.3.2 Vertedor Triangular ($20^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$)

Embora o vertedor triangular de ângulo reto tenha sido o mais estudado ao longo da história, vários cientistas se propuseram a expandir seus estudos e buscar relações que pudessem explicar o comportamento da vazão sobre vertedores triangulares de diferentes ângulos de aberturas. Há, portanto, na literatura, uma quantidade razoável de proposições e dados sobre o assunto.

Considerando a equação fundamental dos vertedores triangulares, as seguintes formulações visam a identificar e quantificar o coeficiente de descarga relativo aos experimentos de seus proponentes, sendo elas:

a) Experimentos de Greve (1932 apud Shen, 1981):

$$C_d = C = \frac{0,585}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{0,004} h^{0,03}} \quad [4.12]$$

Válida para $20^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ e limitada para as particularidades do canal experimental de Greve. As unidades estão no sistema imperial e precisam de correção para seu uso no sistema internacional.

b) Experimentos de Lenz (1943 apud Shen, 1981):

$$C_d = C = 0,560 + N/h^a \quad [4.13]$$

Válida para $28^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, sendo o escoamento de água a 21° C. Nesse caso, “N” e “a” são constantes tabeladas que dependem apenas do ângulo de abertura. As unidades estão no sistema imperial e precisam de correção para seu uso no sistema internacional.

Tabela 2.1 – Coeficientes “N” e “a”

Coeficientes "N" e "a" para a equação de Lenz						
Coeficiente	Ângulo de Abertura					
	90°	60°	45°	28°	20°	10°
N	0,0159	0,0203	0,0238	0,0315	0,039	0,0624
a	0,588	0,582	0,579	0,575	0,573	0,569

Fonte: Lenz (1943 apud Shen, 1981)

A formulação mais representativa de um vertedor triangular de ângulo de abertura genérico é a proposta por Kindsvater e Carter (1957), sendo recomendada por Bos (1989), Casey (2004), Lencastre (1983) e USBR (2001).

Kindsvater e Carter propuseram modificações à equação fundamental de vazão em vertedores triangulares, de forma a quantificar, através de ábacos, o valor do coeficiente de vazão. Assim, definiram-na como:

$$Q = \frac{8}{15} C_e (\sqrt{2g}) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) h_e^{5/2} \quad [4.14]$$

A carga efetiva “ h_e ” consiste no valor da carga hidráulica “ h ” acrescida de um fator de correção “ k_h ”. Este fator representa os efeitos combinados das propriedades do fluido (como viscosidade e tensão superficial) e pode ser obtido graficamente através do Gráfico 2.1, empírico, que o relaciona unicamente com o ângulo de

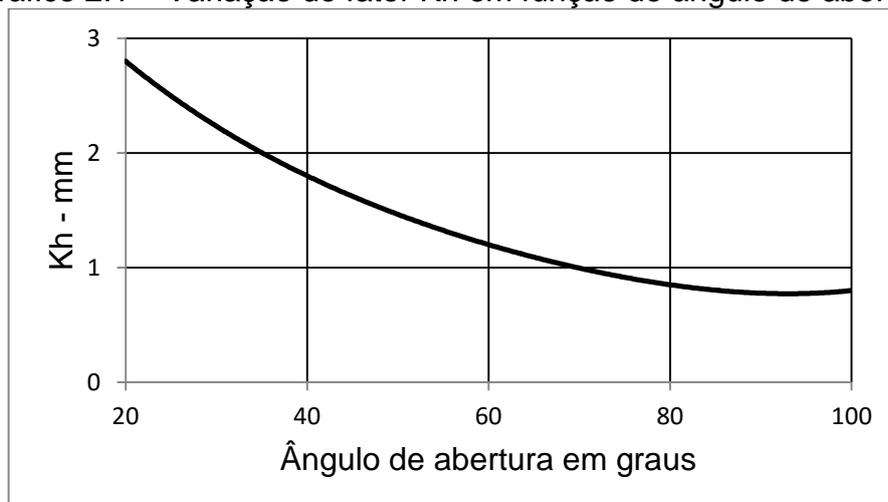
abertura. O coeficiente efetivo de descarga (C_e) fica dependente de 3 variáveis, sendo $C_e = f\left(\frac{h}{p}; \frac{P}{B}; \alpha\right)$. Porém, se o vertedor for completamente contraído, o coeficiente fica em função apenas do ângulo de abertura e pode, também, ser obtido graficamente. Os erros provenientes do uso dos ábacos para determinação do coeficiente efetivo de descarga ficam na ordem de 1% e 2%, respectivamente para vertedor contraído (Gráfico 2.2) e não contraído (Gráfico 2.3) (Bos, 1989).

Um vertedor triangular é completamente contraído se: $h/a \leq 0,4$; $a/L < 0,4$.

Os limites de aplicação do método de Kindsvater e Carter são:

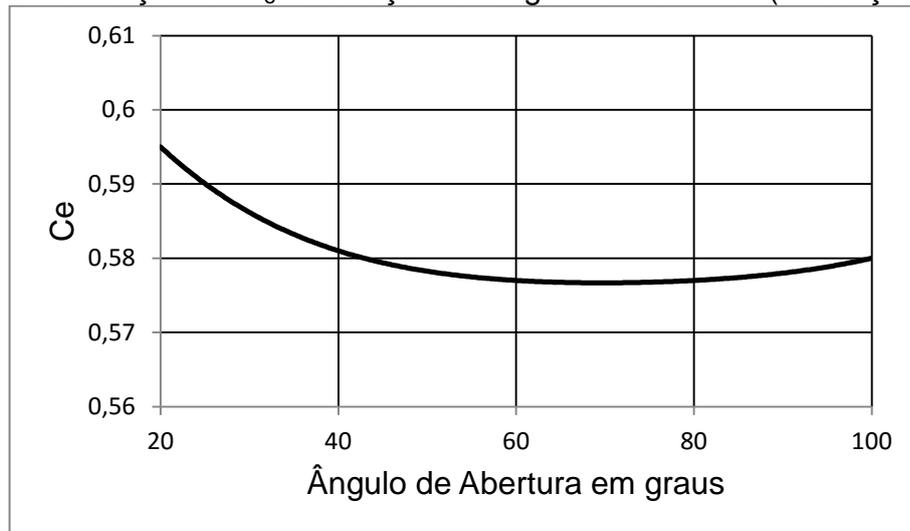
- (i) $0,05 \leq h \leq 0,60$ m;
- (ii) $25^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$;
- (iii) $P \geq 0,1$ m; $h/p \leq 1,2$ m; $h/L \leq 0,4$; $L > 0,6$ m;
- (iv) O nível d'água a jusante deve ficar abaixo do vértice do triângulo.

Gráfico 2.1 – Variação do fator K_h em função do ângulo de abertura



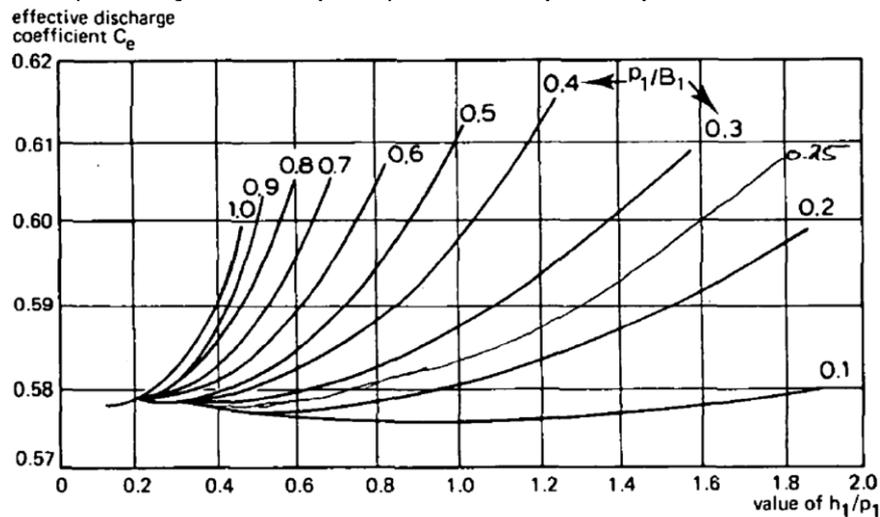
Fonte: Bos (1989)

Gráfico 2.2 – Variação de C_e em função do ângulo de abertura (contração completa)



Fonte: Bos (1989)

Gráfico 2.3 – Variação de C_e em função de h/p para diferentes relações de p/B (contração incompleta) – válido apenas para $\alpha = 90^\circ$



Fonte: Bos (1989)

Tabela 2.2 – Coeficientes “ K_h ” e “ C_e ”

Coeficientes para vertedor triangular contraído					
Coeficiente	Ângulo de Abertura				
	20°	40°	60°	80°	100°
K_h (mm)	2,8	1,8	1,2	0,85	0,8
C_e	0,595	0,581	0,577	0,577	0,58

Fonte: Bos (1989)

Nota-se que, para ângulos de abertura pequenos ou muito grandes, a lâmina vertente tende a aderir à face de jusante do vertedor, sendo estes, pois, considerados fatores limitantes nas diversas formulações descritas.

4.4 Vertedor Circular

Um vertedor é classificado como circular quando a seção transversal por onde há o fluxo de água é de geometria circular. Recomenda-se que seja locado ortogonalmente aos lados e ao fundo do canal e que seja centralizado ao mesmo. A sua geometria permite que sua crista seja biselada num torno e que o nivelamento da soleira seja desnecessário (Bos, 1989).

4.4.1 Formulação de Staus

Staus e Von Sanden (1931, apud Bos,1989) desenvolveram a primeira formulação a caracterizar a vazão num vertedor circular. Considerando as características geométricas da estrutura e, após o desenvolvimento de integrais elípticas de primeiro e segundo grau, chegaram a uma equação de aparência simplificada, mas com a existência de termos que necessitavam de várias substituições. Posteriormente Stevens (1957 apud Bos, 1989) tabelou os valores dos termos presentes nesta equação em função do coeficiente de enchimento H/D.

Considerando a Figura 2.5, a equação de Staus se apresenta como:

$$Q = C_e \frac{4}{15} \sqrt{2g} \omega D^{2,5} = C_e \Phi_i D^{2,5} \quad [4.15]$$

Os valores médios dos termos “ ω ” e “ Φ_i ” obtidos através de uma série de experimentos são mostrados na Tabela 2.3 em função da relação entre carga hidráulica e diâmetro (H/D). Valores médios para o coeficiente de descarga também foram determinados e são mostrados na Tabela 2.4.

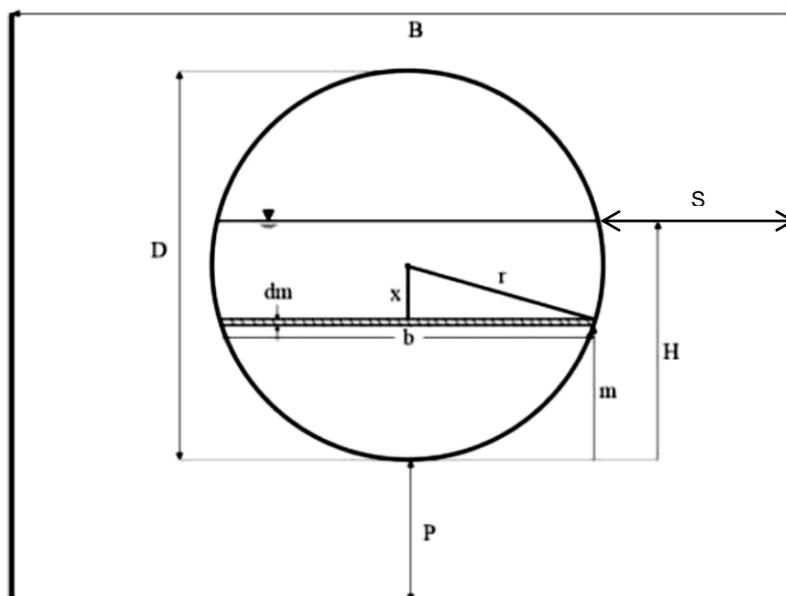


Figura 2.5 – Vertedor circular. Fonte: Spencer (2013)

Os limites de aplicação da equação de Staus são:

- (i) $P \geq D/2$; $P \geq 0,20$ m;
- (ii) $H/D \geq 0,10$; $H \geq 0,03$ m;
- (iii) $S < D/2$; “S” é a contração lateral;
- (iv) O nível d’água a jusante deve ser, pelo menos, 0,05 metros inferior ao da crista.

Tabela 2.3 – Valores de “ ω ” e “ Φ_i ” em função de H/D

H/D	ω	Φ_i	H/D	ω	Φ_i	H/D	ω	Φ_i
0,01	0,0004	0,00047	0,36	0,3451	0,4076	0,71	1,1804	1,3943
0,02	0,0013	0,00154	0,37	0,3633	0,4291	0,72	1,2085	1,4275
0,03	0,0027	0,00319	0,38	0,3819	0,4511	0,73	1,2368	1,4609
0,04	0,0046	0,00543	0,39	0,4009	0,4735	0,74	1,2653	1,4946
0,05	0,0071	0,00839	0,40	0,4203	0,4965	0,75	1,2939	1,5284
0,06	0,0102	0,012	0,41	0,4401	0,5199	0,76	1,3226	1,5623
0,07	0,0139	0,0164	0,42	0,4603	0,5437	0,77	1,3514	1,5963
0,08	0,0182	0,0215	0,43	0,4809	0,5681	0,78	1,3802	1,6303
0,09	0,0231	0,0273	0,44	0,5019	0,5929	0,79	1,4091	1,6644
0,10	0,0286	0,0338	0,45	0,5233	0,6182	0,80	1,438	1,6986
0,11	0,0346	0,0409	0,46	0,5451	0,6439	0,81	1,467	1,7328
0,12	0,0412	0,0487	0,47	0,5672	0,67	0,82	1,496	1,7671
0,13	0,0483	0,0571	0,48	0,5896	0,6965	0,83	1,525	1,8013
0,14	0,056	0,0661	0,49	0,6123	0,7233	0,84	1,554	1,8356
0,15	0,0642	0,0758	0,50	0,6354	0,7506	0,85	1,583	1,8699
0,16	0,0728	0,86	0,51	0,6588	0,7782	0,86	1,612	1,9041
0,17	0,0819	0,0967	0,52	0,6825	0,8062	0,87	1,641	1,9384
0,18	0,0914	0,108	0,53	0,7064	0,8344	0,88	1,6699	1,9725
0,19	0,1014	0,1198	0,54	0,7306	0,863	0,89	1,6988	2,0066
0,20	0,1119	0,1322	0,55	0,7551	0,892	0,90	1,7276	2,0407
0,21	0,1229	0,1452	0,56	0,7799	0,9212	0,91	1,7561	2,0743
0,22	0,1344	0,1588	0,57	0,805	0,9509	0,92	1,7844	2,1077
0,23	0,1464	0,1729	0,58	0,8304	0,9809	0,93	1,8125	2,1409
0,24	0,1589	0,1877	0,59	0,856	1,0111	0,94	1,8403	2,1738
0,25	0,1719	0,203	0,60	0,8818	1,0416	0,95	1,8678	2,2063
0,26	0,1854	0,219	0,61	0,9079	1,0724	0,96	1,895	2,2384
0,27	0,1994	0,2355	0,62	0,9342	1,1035	0,97	1,9219	2,2702
0,28	0,2139	0,2527	0,63	0,9608	1,1349	0,98	1,9484	2,3015
0,29	0,2289	0,2704	0,64	0,9876	1,1666	0,99	1,9744	2,3322
0,30	0,2443	0,2886	0,65	1,0147	1,1986	1,00	2,0000	-
0,31	0,2601	0,3072	0,66	1,042	1,2308			
0,32	0,2763	0,3264	0,67	1,0694	1,2632			
0,33	0,2929	0,346	0,68	1,0969	1,2957			
0,34	0,3099	0,366	0,69	1,1246	1,3254			
0,35	0,3273	0,3866	0,70	1,1524	1,3612			

Fonte: Bos (1989)

Tabela 2.4 – Valores médios do coeficiente de descarga para vertedor circular

H/D	C _e	H/D	C _e	H/D	C _e
1,00	0,606	0,65	0,595	0,30	0,600
0,95	0,604	0,60	0,594	0,25	0,604
0,90	0,602	0,55	0,593	0,20	0,610
0,85	0,600	0,50	0,593	0,15	0,623
0,80	0,599	0,45	0,594	0,10	0,650
0,75	0,597	0,40	0,595	0,05	0,750
0,70	0,596	0,35	0,597	0,00	-

Fonte: Bos (1989)

4.4.2 Formulação de Panuzio e Ramponi

A abordagem inicial, descrita por Ghobadian e Meratifashi (2012), era a seguinte:

$$Q = \mu \Phi D^{5/2} \quad [4.16]$$

Com

$$\mu = 0,555 + \frac{D}{110H} + 0,041 \frac{H}{D} \quad [4.17]$$

Em que:

(μ) é o termo que representa o coeficiente de vazão “C_d”;

(Φ) é um termo tabelado (Tabela 2.5) em função do coeficiente “H/D”;

Os limites de aplicação da formulação de Panuzio e Ramponi são:

(i) Velocidade de aproximação pequena ($V_a \cong 0$);

(ii) $H/D > 0,10$; $H > 0,30$ m;

(iii) O nível d’água a jusante deve estar, no mínimo, 0,05 m abaixo da crista.

Tabela 2.5 – Valores de Φ em função do coeficiente h/d

h/d	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Φ	0,0272	0,1072	0,4173	0,9119	1,5713	2,3734	3,2939	4,3047	5,3718	6,4511	7,4705

"d" em dm - "Q" em dm³/s

Fonte: Lencastre (1983)

4.4.3 Formulação de Hégly, modificada por Ramponi

Lencastre (1983) cita a abordagem de Hégly, posteriormente adaptada por Ramponi para generalizar a equação do coeficiente de vazão para um diâmetro qualquer. Ambas foram desenvolvidas através de experimentos laboratoriais realizados por seus proponentes.

Hégly propôs que:

$$Q = \mu S \sqrt{2gH} \quad [4.18]$$

Com

$$\mu = \left(0,350 + \frac{0,002}{H}\right) \left[1 + \left(\frac{S}{S'}\right)^2\right] \quad [4.19]$$

Em que:

(S) é a área do vertedor entre os níveis da soleira e da carga hidráulica “H”;

(S') é a área molhada do canal de chegada;

(μ) é o termo que representa o coeficiente de vazão “C_d”.

Ramponi transformou a equação anterior do coeficiente de descarga para:

$$Q = \mu S \sqrt{2gh}$$

Com

$$\mu = \left(0,350 + 0,002 \frac{d}{h}\right) \left[1 + \left(\frac{S}{S'}\right)^2\right] \quad [4.20]$$

Foi observado posteriormente que a modificação de Ramponi tem validade para diâmetros inferiores a 400 milímetros.

4.4.4 Formulação de Vatankhah

Devido à geometria circular deste vertedor, a derivação de uma equação que represente sua vazão teórica torna-se difícil e desagradável para propósitos práticos, requisitando a solução de integrais elípticas de primeiro e segundo graus, bem como diversas substituições. Vatankhah (2010) alega ter encontrado uma equação simples e eficiente que descreva o fluxo em um vertedor circular. Através da aplicação de um método de ajuste de curva, Vatankhah conseguiu simplificar a equação da vazão teórica com um erro associado inferior a 0,08%. Aplicando o mesmo método aos dados experimentais de Greve (1932), também conseguiu equacionar o coeficiente de descarga e, portanto, a vazão real.

$$Q_t = 2 \sqrt{2g} \eta^{1/2} H^{3/2} D F(\eta)$$

$$Q_r = 2 C_d \sqrt{2g} \eta^{1/2} H^{3/2} D F(\eta) \quad [4.21]$$

$$F(\eta) = 0,1963 \left(\sqrt{1 - 0,2200 \eta} + \sqrt{1 - 0,7730 \eta} \right) \quad [4.22]$$

$$C_d = \frac{0,728 + 0,240 \eta}{1 + 0,668 \sqrt{\eta}} \quad [4.23]$$

Em que:

(Q_t) é a vazão teórica;

(Q_r) é a vazão real;

(η) é o coeficiente de enchimento ($\eta = H/D$);

(C_d) é o coeficiente de descarga, cujo ajuste de curva é mostrado na Figura 2.6.

Para as condições gerais de instalação ($D/B \leq 0,5$ e $D/P \leq 2$) não há necessidade de se considerar a velocidade de aproximação. Para os demais casos, o coeficiente de descarga deve considerar o termo cinemático.

Comparando-se os valores obtidos através das equações de Vatankhah e Staus (através da tabela de Stevens) com os dados dos experimentos de Greve, percebe-se que a primeira se adequa melhor a realidade experimentada com erros entre -2,5% e +2,5% para 95% dos dados, como demonstrados nas Figuras 2.7 e 2.8.

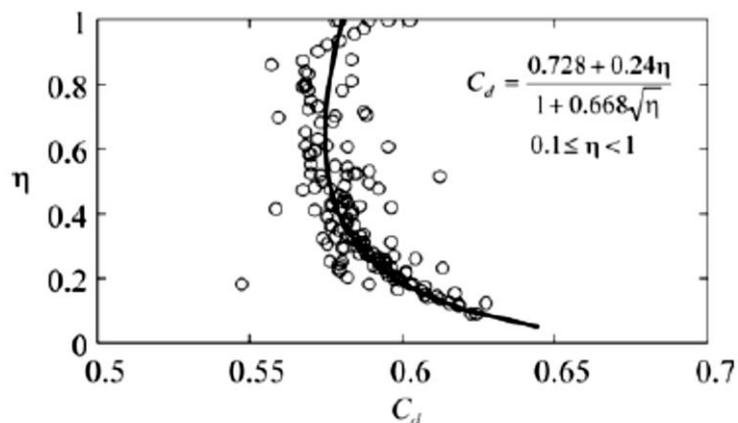


Figura 2.6 – Coeficiente de descarga experimental – ajuste de curva. Fonte: Vatankhah (2010)

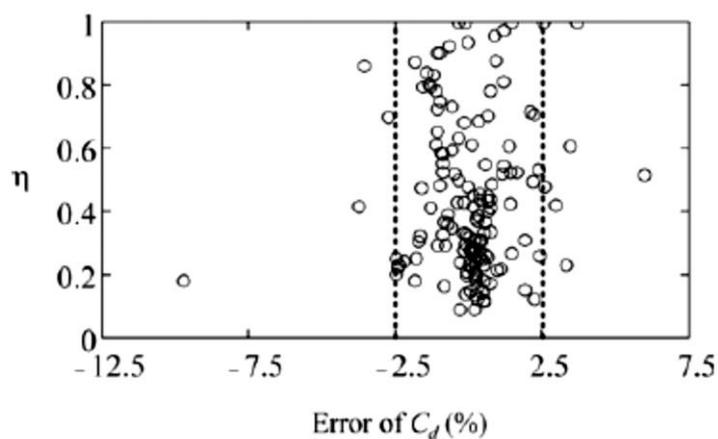


Figura 2.7 – Erro do coeficiente de descarga apresentado por Vatankhah (2010)

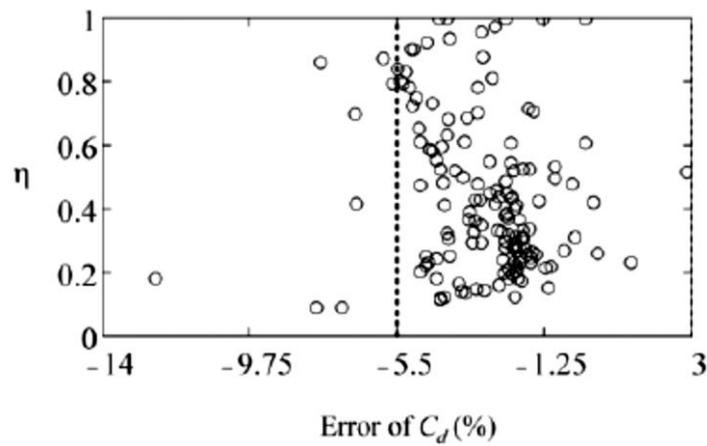


Figura 2.8 – Erro do coeficiente de descarga apresentado por Staus. Fonte: Vatankhah (2010)

4.4.5 Equações Práticas

Para fins práticos, em que não se necessita precisão exagerada para se medir a vazão de um escoamento sobre um vertedor circular, utiliza-se de algumas equações que simplificam a abordagem do assunto e fornecem resultados razoáveis e rápidos.

Azevedo Netto (1998) propõe a seguinte equação:

$$Q = 1,518 D^{0,693} H^{1,807} \quad [4.24]$$

Os limites de validade não são descritos pelo autor.

5. MODELO FÍSICO

5.1 Considerações Iniciais

Como demonstrado anteriormente no Capítulo 04, o modelo físico geral que rege a relação entre o nível d'água a montante e a vazão num vertedor incorpora uma série de simplificações que comprometem a eficiência da estrutura analisada. Para se conseguir uma relação fidedigna, é necessário que se utilize de coeficientes experimentais que incorporem tais simplificações e, assim, expliquem satisfatoriamente o comportamento do vertedor como instrumento de medição e/ou regularização de nível.

Em geral, os fatores que mais influenciam na determinação dos coeficientes experimentais e, portanto, na medição de vazão, são os fatores geométricos tanto do canal quanto do vertedor. Assim, esses são os fatores que limitam a validade das relações experimentais e condicionam o seu uso apenas para conjuntos hidráulicos semelhantes.

Embora as propriedades do fluido também exerçam grande influência na determinação da vazão, estas são desconsideradas, uma vez que há apenas um fluido analisado nesse trabalho, que é a água. Portanto, tal propriedade se mantém constantes ao longo de todo o estudo.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto entre os meses de dezembro de 2015 e janeiro de 2016.

Os modelos reduzidos dos vertedores foram instalados no canal hidrodinâmico do laboratório, adiante descrito. A medição do nível d'água a montante foi realizada com uma ponta limnimétrica, adiante descrita, instalada em um carrinho porta instrumentos que podia se deslocar sobre o canal. A vazão foi obtida por um medidor de vazão ultrassônico instalado no tubo adutor de água do canal para garantir sua precisão, mesmo para pequenos escoamentos.

5.2 Descrição dos Modelos

5.2.1 Canal Hidrodinâmico

O canal hidrodinâmico onde se foram realizados os experimentos possui dimensões internas de 31 cm x 45 cm x 499 cm (L x H x C). Seu tamanho é suficiente para que o vertedor, instalado em local apropriado, tenha um escoamento estável a montante e não sofra com interferências, nem no escoamento, nem na medição de carga, causadas pelo bombeamento do líquido feito por meio de uma bomba hidráulica de 7,5 cv com capacidade de produzir vazões de até 150 m³/h,.

A figura 5.1 mostra o canal utilizado nos testes.

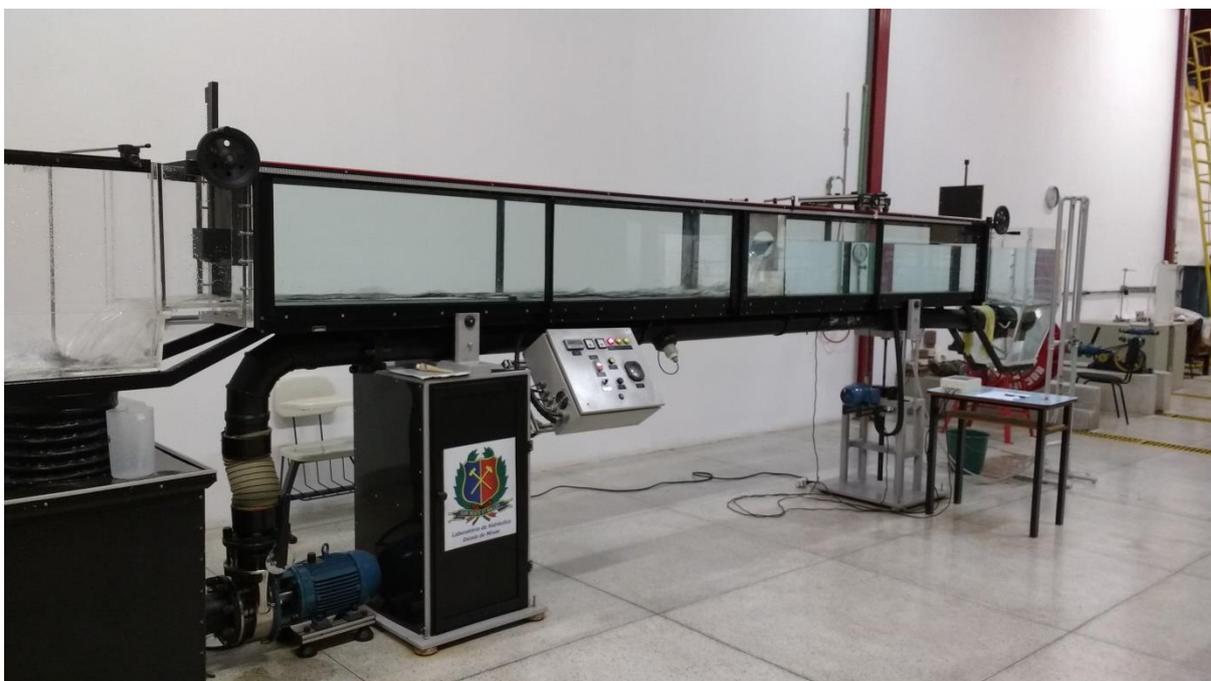


Figura 5.1 – Canal hidrodinâmico

5.2.2 Medidor de Carga Hidráulica

A medição da carga hidráulica foi realizada por meio de uma ponta limnimétrica acoplada a um paquímetro dotado de parafuso micrométrico e adaptado ao canal hidrodinâmico, resultando na medida de altura com precisão de 0,05 mm. Sua posição ao longo do canal era feita de forma que a distância horizontal até a

soleira do vertedor sempre ficava superior a seis vezes a carga hidráulica medida, como recomendado no Capítulo 04, ficando entre as posições de 100 cm e 130 cm. Ressalta-se que o escoamento no local da medição sempre estava estável (subcrítico), sem a interferência dos efeitos gerados pelo bombeamento da água ou da seção de entrada do canal.

A figura 5.2 mostra em detalhes o medidor de carga utilizado.

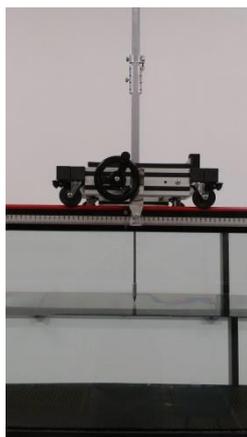


Figura 5.2 – Detalhe do medidor de carga

5.2.3 Medidor de Vazão

A medição da vazão foi feita por meio de um Medidor de Vazão Ultrassônico modelo UFM140 de fabricação da FMS. O aparelho mede vazões em tubulação, sem intrusão, através de um par de transdutores ultrassônicos, com linearidade de mais ou menos 0,5%.

A instalação foi feita de acordo com instruções do fabricante (método em V, transdutor tipo S1), respeitadas as distâncias mínimas de locação do medidor em relação à existência de curvas, bombas hidráulicas, etc.

Sua configuração foi feita anteriormente a todos os experimentos, onde se verificava o ponto zero, as condições de instalação, o fator de escala e demais configurações internas.

A fim de se garantir a precisão da calibração do aparelho, foram executadas medições de pequenas vazões pelo método gravimétrico através do recolhimento do líquido escoado no respectivo tempo. O procedimento era repetido por, pelo menos,

três vezes para a mesma carga hidráulica. Não houve necessidade de ajustes na calibração nem no fator de escala.

A figura 5.3 exemplifica o medidor utilizado.

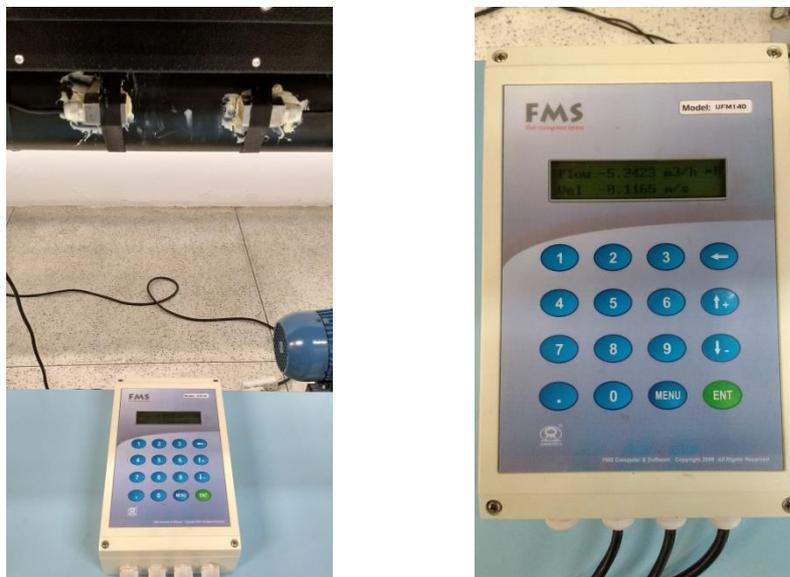


Figura 5.3 – Medidor de vazão ultrassônico

5.2.4 Modelos Reduzidos dos Vertedores

Os modelos reduzidos foram elaborados em chapa metálica de aço inoxidável, de espessuras de 1 mm e 2 mm, para os vertedores triangular e circular, respectivamente. A construção dos vertedores ocorreu na oficina do próprio laboratório, onde as chapas foram cortadas nas dimensões requeridas com acabamento nas arestas tanto das faces quanto da soleira. É importante destacar a importância de se garantir que a aresta da soleira esteja retilínea, lisa, bem acabada, livre de imperfeições e sujeiras, uma vez que é onde se dá o contato da estrutura com o líquido no momento do escoamento, tendo, pois, grande influência na forma da veia vertente e na determinação da vazão.

As chapas foram presas a suportes através de parafusos distantes de 5 cm entre si. Os suportes foram feitos em PP e PVC, também na oficina do laboratório, onde foram cortados e acabados. Foram feitos em forma de “U” para dar sustentabilidade às placas sem interferir na veia vertente, de forma a simplificar a sua instalação na seção de teste do canal hidrodinâmico. Para evitar seu

deslocamento rotacional, foram feitos dois apoios em forma de cunha colocados lateralmente e fixados a uma placa de apoio que servia para prender o suporte ao fundo do canal e evitar seu deslocamento transversal. Para grandes cargas hidráulicas foi necessário prender as extremidades superiores do suporte ao próprio canal para se evitar a flambagem da peça.

A vedação da lateral do vertedor foi feita através de tubos finos de silicone colocados entre a chapa metálica e o suporte. A vedação inferior foi feita com o uso de massa de calafetar. Não foram observados vazamentos durante a execução dos testes, de forma que toda a vazão medida pelo aparelho ultrassônico passava sobre o vertedor.

5.2.4.1 Vertedor Triangular

Os vertedores triangulares foram feitos em chapa de aço inoxidável de 300 mm de largura, 230 mm de altura e 1 mm de espessura. Produziram-se três modelos geométricos distintos quanto ao ângulo de abertura, sendo eles de 60 graus, 90 graus e 100 graus. Cada modelo foi testado para três diferentes alturas de soleira (P), de 100 mm, 150 mm e 200 mm.

As faces dos vertedores eram lisas e foram niveladas de forma que o eixo vertical do triângulo coincidissem com o eixo vertical do canal.

A figura 5.4 exemplifica um modelo de vertedor triangular utilizado nos testes.

5.2.4.2 Vertedor Circular

Os vertedores circulares foram feitos em chapa metálica de aço inoxidável de 300 mm de largura, 350 mm de altura e 2 mm de espessura (para aumentar sua rigidez). Produziram-se três modelos geométricos distintos quanto ao diâmetro, sendo eles de 100 mm, 150 mm e 200 mm. Cada modelo foi testado em três diferentes alturas de soleira (P), de 100 mm, 150 mm e 200 mm.

As soleiras de cada vertedor estavam lisas e o modelo foi instalado centralizado no canal, perpendicularmente a seu eixo.

A figura 5.5 exemplifica um modelo de vertedor circular utilizado nos testes.

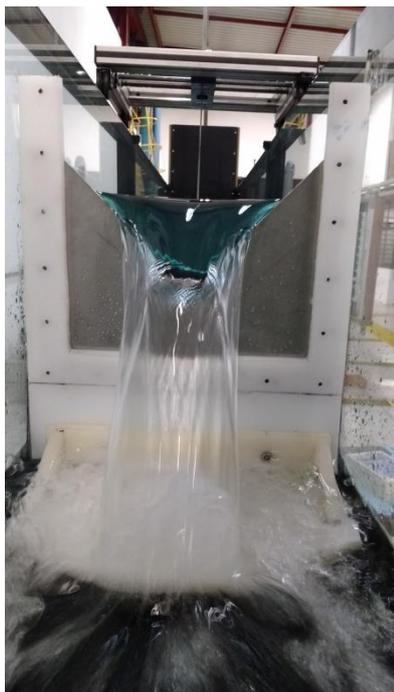


Figura 5.4 – Vertedor triangular – (esq.) vista frontal; (dir.) vista lateral ($\alpha = 90^\circ$ e $P = 200$ mm)

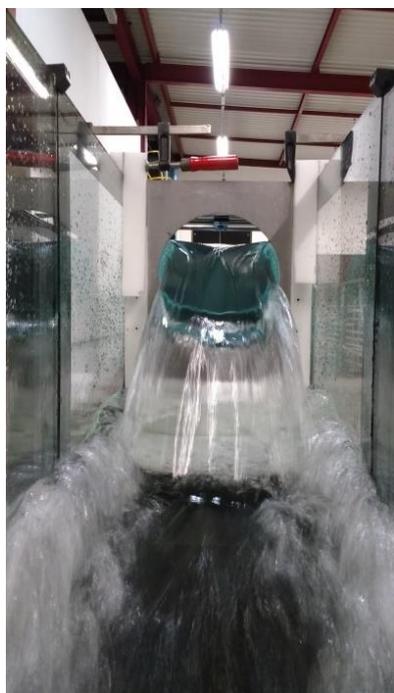


Figura 5.5 – Vertedor circular – (esq.) vista frontal; (dir.) vista lateral ($D = 200$ mm e $P = 250$ mm)

5.3 Metodologia

Para se obter uma relação prática acurada entre a vazão e a carga hidráulica em vertedores de parede delgada foram realizados vários ensaios com vertedores triangulares de diferentes ângulos de abertura e circulares de diferentes diâmetros seguindo-se, dentro das possibilidades, as recomendações da literatura quanto a aspectos geométricos e metodológicos.

O procedimento geral consistia, inicialmente, na locação do vertedor a ser ensaiado no canal hidrodinâmico. Após fixado ao fundo fazia-se a medição da altura da soleira com o uso de paquímetro e, então, a estrutura era vedada lateralmente através de tubos de silicone e no fundo através de massa de calafetar.

Antes de se iniciar o escoamento no canal, o medidor de vazão era ligado e, após o tempo de estabilização, ele era zerado para se excluir medidas residuais. Através do medidor de carga fazia-se a leitura do nível do fundo do canal.

Então se iniciava o escoamento no canal e elevava-se a vazão a fim de se expulsar possíveis bolhas de ar da tubulação que pudessem adulterar os resultados; então se reduzia o fluxo e mantinha-se o nível da água tocando a soleira. Após estabilização da água no nível da soleira, fazia-se a leitura do mesmo para obtenção das cargas. Com vazão nula conferia-se o valor apontado pelo medidor ultrassônico para averiguar a necessidade de zerá-lo novamente. Então a vazão era lenta e gradualmente aumentada para se estabelecer o escoamento sobre o vertedor. As leituras de carga sempre eram feitas após a veia se desprender completamente da face a jusante do vertedor (lâmina vertente livre) e até que o mesmo se encontrasse afogado (máxima vazão). Como dito anteriormente, a carga era sempre medida a uma distância mínima de seis vezes o valor da referida carga. Para cada carga hidráulica, obtinha-se a respectiva vazão pelo medidor.

Os ensaios foram repetidos diferentes vezes para cada geometria anteriormente descrita em todas as alturas de soleira previamente apontadas.

5.4 Resultados Experimentais

5.4.1 Resultados Experimentais dos Vertedores Triangulares

As tabelas 5.1(a) a 5.1 (c) mostram os resultados obtidos através da medição de vazão no vertedor triangular de ângulo de abertura de 60 graus para as alturas de soleira de 100 mm, 150 mm e 200 mm, respectivamente. As tabelas 5.2 (a) a 5.2 (c) mostram os resultados obtidos através da medição de vazão no vertedor triangular de ângulo de abertura de 90 graus para as alturas de soleira de 100 mm, 150 mm e 200 mm, respectivamente. E as tabelas 5.3 (a) a 5.3 (c) mostram os resultados obtidos através da medição de vazão no vertedor triangular de ângulo de abertura de 100 graus para as alturas de soleira de 100 mm, 150 mm e 200 mm, respectivamente. Nestas últimas tabelas também se encontram indicados os valores do termo cinético para demonstração de sua influência na determinação da vazão.

Nas tabelas, junto aos valores experimentais da vazão, indicaram-se os valores de vazão calculados para as referidas cargas pelas formulações existentes na literatura. Ressalta-se que muitas das condições de aplicação impostas pelas fórmulas não puderam ser satisfeitas em todo o intervalo abrangido pelos testes. Todavia, mesmo assim, há uma convergência de resultados na grande maioria dos pontos analisados.

5.4.2 Resultados Experimentais dos Vertedores Circulares:

As tabelas 5.4 (a) a 5.4 (c) mostram os resultados obtidos através da medição de vazão nos vertedores circulares de diâmetro de 100 mm para as alturas de soleira de 100 mm, 150 mm e 200 mm, respectivamente. As tabelas 5.5 (a) a 5.5 (c) mostram os resultados obtidos através da medição de vazão nos vertedores circulares de diâmetro de 150 mm para as alturas de soleira de 100 mm, 150 mm e 200 mm, respectivamente. E as tabelas 5.6 (a) a 5.6 (c) mostram os resultados obtidos através da medição de vazão nos vertedores circulares de diâmetro de 200 mm para as alturas de soleira de 100 mm, 150 mm e 200 mm, respectivamente.

Junto aos valores experimentais, encontram-se indicados nessas tabelas os valores de vazão calculada para as respectivas cargas a partir das formulações existentes na literatura e o valor do termo cinético. Ressalta-se que muitas das condições de aplicação não puderam ser satisfeitas em todo o intervalo abrangido pelos testes, mas há, mesmo assim, uma convergência de resultados na maioria dos pontos analisados.

Tabela 5.1 (a) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor triangular ($\alpha=60^\circ$, $P=100\text{mm}$)

Vertedor: TRIANGULAR $\alpha = 60^\circ$ $P = 101,6 \text{ mm}$		Data: 18/12/2015		Observações:			
		Início: 14:00					
		Término: 16:30					
		Experimento: 10					
Dados:							
Leitura inicial do fundo (mm)		1,2		tan ($\alpha/2$)		0,57735	
Leitura da soleira (mm)		102,8		Posições (cm)			
Altura da soleira (mm)		101,6		Vertedor		210	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)		101,6		Medidor de carga		120	
Vazão							
Leitura	Carga	Experimental		Kindsvater e Carter	Lenz	Greve	
(mm)	(mm)	(m ³ /h)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	
123,3	20,5	0,12	0,033	0,055	0,062	0,054	
125,4	22,6	0,21	0,058	0,069	0,078	0,069	
125,4	22,6	0,21	0,058	0,069	0,078	0,069	
125,4	22,6	0,22	0,061	0,069	0,078	0,069	
125,7	22,9	0,20	0,056	0,071	0,080	0,071	
130,0	27,2	0,30	0,083	0,107	0,121	0,109	
130,0	27,2	0,31	0,086	0,107	0,121	0,109	
130,5	27,7	0,32	0,089	0,112	0,126	0,114	
131,0	28,2	0,30	0,083	0,117	0,131	0,119	
131,0	28,2	0,32	0,089	0,117	0,131	0,119	
131,0	28,2	0,32	0,089	0,117	0,131	0,119	
131,7	28,9	0,37	0,103	0,124	0,139	0,126	
131,7	28,9	0,41	0,114	0,124	0,139	0,126	
136,5	33,7	0,48	0,133	0,179	0,201	0,185	
136,5	33,7	0,50	0,139	0,179	0,201	0,185	
139,9	37,1	0,68	0,189	0,226	0,252	0,234	
139,9	37,1	0,68	0,189	0,226	0,252	0,234	
142,5	39,7	0,85	0,236	0,266	0,297	0,277	
145,1	42,3	1,16	0,322	0,311	0,345	0,324	
151,4	48,6	1,60	0,444	0,435	0,481	0,456	
152,5	49,7	1,73	0,481	0,460	0,508	0,482	
154,6	51,8	1,85	0,514	0,509	0,561	0,534	
159,6	56,8	2,39	0,664	0,637	0,700	0,670	
161,0	58,2	2,57	0,714	0,677	0,742	0,712	
166,2	63,4	3,07	0,853	0,835	0,912	0,879	
173,2	70,4	4,06	1,128	1,079	1,175	1,139	
180,0	77,2	5,12	1,422	1,354	1,468	1,430	
180,4	77,6	5,12	1,422	1,372	1,487	1,448	
193,9	91,1	7,70	2,139	2,037	2,193	2,152	
199,6	96,8	8,96	2,489	2,366	2,541	2,500	
208,0	105,2	10,66	2,961	2,906	3,110	3,071	
214,3	111,5	12,32	3,422	3,355	3,582	3,545	
221,3	118,5	14,57	4,047	3,901	4,155	4,120	
227,1	124,3	16,50	4,583	4,390	4,667	4,636	

Tabela 5.1 (b) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor triangular ($\alpha=60^\circ$, $P=150\text{mm}$)

Vertedor: TRIANGULAR $\alpha = 60^\circ$ $P = 152,0 \text{ mm}$		Data: 10/12/2015		Observações:			
		Início: 15:20					
		Término: 17:30					
		Experimento: 5					
Dados:							
Leitura inicial do fundo (mm)		1,2		tan ($\alpha/2$)		0,57735	
Leitura da soleira (mm)		153,2		Posições (cm)			
Altura da soleira (mm)		152,0		Vertedor		210	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)		152,0		Medidor de carga		120	
Vazão							
Leitura (mm)	Carga (mm)	Experimental		Kindsvater e Carter (L/s)	Lenz (L/s)	Greve (L/s)	
		(m ³ /h)	(L/s)				
166,6	13,4	0,10	0,028	0,020	0,023	0,019	
168,4	15,2	0,10	0,028	0,027	0,031	0,026	
168,5	15,3	0,09	0,025	0,028	0,031	0,026	
171,3	18,1	0,11	0,031	0,041	0,046	0,040	
172,9	19,7	0,17	0,047	0,050	0,056	0,049	
174,1	20,9	0,25	0,069	0,057	0,065	0,057	
174,1	20,9	0,25	0,069	0,057	0,065	0,057	
174,1	20,9	0,26	0,072	0,057	0,065	0,057	
174,1	20,9	0,27	0,075	0,057	0,065	0,057	
175,2	22,0	0,26	0,072	0,065	0,073	0,064	
180,0	26,8	0,34	0,094	0,103	0,117	0,105	
181,3	28,1	0,48	0,133	0,116	0,130	0,118	
183,7	30,5	0,49	0,136	0,141	0,158	0,144	
185,5	32,3	0,72	0,200	0,162	0,181	0,166	
185,5	32,3	0,74	0,206	0,162	0,181	0,166	
185,5	32,3	0,75	0,208	0,162	0,181	0,166	
185,5	32,3	0,77	0,214	0,162	0,181	0,166	
185,5	32,3	0,54	0,150	0,162	0,181	0,166	
192,2	39,0	0,99	0,275	0,255	0,284	0,265	
196,8	43,6	1,38	0,383	0,334	0,371	0,349	
196,8	43,6	1,40	0,389	0,334	0,371	0,349	
199,5	46,3	1,59	0,442	0,387	0,429	0,404	
203,6	50,4	1,99	0,553	0,476	0,525	0,499	
209,9	56,7	2,54	0,706	0,635	0,697	0,667	
212,1	58,9	2,71	0,753	0,697	0,764	0,733	
216,4	63,2	3,17	0,881	0,828	0,906	0,872	
222,2	69,0	4,04	1,122	1,027	1,119	1,083	
230,5	77,3	5,26	1,461	1,359	1,473	1,434	
233,4	80,2	5,91	1,642	1,488	1,610	1,571	
237,3	84,1	6,33	1,758	1,672	1,806	1,766	
237,3	84,1	6,41	1,781	1,672	1,806	1,766	
237,8	84,6	6,61	1,836	1,697	1,832	1,792	
244,3	91,1	8,06	2,239	2,037	2,193	2,152	
244,8	91,6	7,99	2,219	2,064	2,222	2,181	
250,8	97,6	9,27	2,575	2,414	2,592	2,551	
257,0	103,8	10,51	2,919	2,811	3,010	2,971	
260,6	107,4	11,40	3,167	3,058	3,270	3,232	
262,4	109,2	11,76	3,267	3,187	3,405	3,367	
267,5	114,3	13,38	3,717	3,567	3,805	3,769	
270,5	117,3	14,33	3,981	3,804	4,053	4,018	
280,0	126,8	17,29	4,803	4,612	4,900	4,870	

Tabela 5.1 (c) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor triangular ($\alpha=60^\circ$, $P=200\text{mm}$)

Vertedor: TRIANGULAR $\alpha = 60^\circ$ $P = 195,5\text{mm}$		Data: 17/12/2015		Observações:			
		Início: 11:00					
		Término: 18:30					
		Experimento: 8 e 9					
Dados:							
Leitura inicial do fundo (mm)		1,2		tan ($\alpha/2$)		0,57735	
Leitura da soleira (mm)		196,7		Posições (cm)			
Altura da soleira (mm)		195,5		Vertedor		210	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)		195,5		Medidor de carga		120	
Vazão							
Leitura (mm)	Carga (mm)	Experimental		Kindsvater e Carter (L/s)	Lenz (L/s)	Greve (L/s)	
		(m ³ /h)	(L/s)				
210,5	13,8	0,06	0,017	0,022	0,025	0,020	
210,5	13,8	0,07	0,019	0,022	0,025	0,020	
210,9	14,2	0,07	0,019	0,023	0,026	0,022	
213,6	16,9	0,1	0,028	0,035	0,039	0,034	
214,4	17,7	0,14	0,039	0,039	0,044	0,038	
214,4	17,7	0,15	0,042	0,039	0,044	0,038	
214,6	17,9	0,12	0,033	0,040	0,045	0,039	
214,9	18,2	0,14	0,039	0,041	0,047	0,040	
214,9	18,2	0,14	0,039	0,041	0,047	0,040	
214,9	18,2	0,14	0,039	0,041	0,047	0,040	
216,8	20,1	0,17	0,047	0,052	0,059	0,051	
216,8	20,1	0,17	0,047	0,052	0,059	0,051	
218,5	21,8	0,23	0,064	0,063	0,072	0,063	
220,5	23,8	0,26	0,072	0,078	0,088	0,078	
220,5	23,8	0,27	0,075	0,078	0,088	0,078	
220,5	23,8	0,27	0,075	0,078	0,088	0,078	
221,9	25,2	0,31	0,086	0,089	0,101	0,090	
221,9	25,2	0,31	0,086	0,089	0,101	0,090	
222,7	26,0	0,36	0,100	0,096	0,108	0,097	
223,6	26,9	0,34	0,094	0,104	0,118	0,106	
223,6	26,9	0,35	0,097	0,104	0,118	0,106	
223,6	26,9	0,35	0,097	0,104	0,118	0,106	
223,6	26,9	0,36	0,100	0,104	0,118	0,106	
225,5	28,8	0,44	0,122	0,123	0,138	0,125	
225,5	28,8	0,44	0,122	0,123	0,138	0,125	
226,4	29,7	0,48	0,133	0,132	0,149	0,135	
228,0	31,3	0,50	0,139	0,150	0,168	0,154	
228,0	31,3	0,51	0,142	0,150	0,168	0,154	
228,0	31,3	0,53	0,147	0,150	0,168	0,154	
230,9	34,2	0,62	0,172	0,186	0,208	0,191	
230,9	34,2	0,63	0,175	0,186	0,208	0,191	
232,9	36,2	0,76	0,211	0,213	0,238	0,220	
232,9	36,2	0,77	0,214	0,213	0,238	0,220	
232,9	36,2	0,80	0,222	0,213	0,238	0,220	
235,6	38,9	0,98	0,272	0,253	0,283	0,263	
238,7	42,0	1,10	0,306	0,305	0,339	0,318	

Tabela 5.1 (c) – Continuação

Vertedor: TRIANGULAR $\alpha = 60^\circ$ P = 195,5mm		Data: 17/12/2015		Observações:			
		Início: 11:00					
		Término: 18:30					
		Experimento: 8 e 9					
Dados:							
Leitura inicial do fundo (mm)		1,2		tan ($\alpha/2$)		0,57735	
Leitura da soleira (mm)		196,7		Posições (cm)			
Altura da soleira (mm)		195,5		Vertedor		210	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)		195,5		Medidor de carga		120	
Vazão							
Leitura (mm)	Carga (mm)	Experimental		Kindsvater e Carter (L/s)	Lenz (L/s)	Greve (L/s)	
		(m ³ /h)	(L/s)				
238,7	42,0	1,12	0,311	0,305	0,339	0,318	
241,2	44,5	1,41	0,392	0,351	0,390	0,367	
241,8	45,1	1,34	0,372	0,363	0,402	0,379	
243,5	46,8	1,56	0,433	0,397	0,440	0,415	
247,8	51,1	1,94	0,539	0,492	0,543	0,516	
250,0	53,3	2,09	0,581	0,546	0,601	0,573	
250,9	54,2	2,17	0,603	0,568	0,626	0,597	
252,8	56,1	2,41	0,669	0,618	0,680	0,650	
256,6	59,9	2,78	0,772	0,726	0,796	0,764	
257,3	60,6	2,90	0,806	0,747	0,818	0,786	
260,0	63,3	3,22	0,894	0,831	0,909	0,876	
260,9	64,2	3,31	0,919	0,861	0,940	0,907	
263,5	66,8	3,61	1,003	0,949	1,035	1,000	
265,9	69,2	3,99	1,108	1,035	1,127	1,091	
266,8	70,1	4,09	1,136	1,068	1,163	1,127	
272,4	75,7	4,96	1,378	1,290	1,400	1,362	
274,0	77,3	5,19	1,442	1,359	1,473	1,434	
276,4	79,7	5,71	1,586	1,465	1,586	1,547	
279,6	82,9	6,18	1,717	1,614	1,744	1,705	
280,0	83,3	6,26	1,739	1,633	1,765	1,725	
285,0	88,3	7,17	1,992	1,886	2,033	1,992	
287,7	91,0	7,71	2,142	2,031	2,187	2,146	
289,8	93,1	8,12	2,256	2,149	2,311	2,271	
294,1	97,4	9,17	2,547	2,402	2,579	2,538	
294,8	98,1	9,44	2,622	2,445	2,624	2,584	
295,6	98,9	9,40	2,611	2,494	2,676	2,636	
299,8	103,1	10,40	2,889	2,764	2,961	2,921	
302,4	105,7	10,96	3,044	2,940	3,146	3,107	
305,1	108,4	11,50	3,194	3,129	3,345	3,306	
308,1	111,4	12,21	3,392	3,348	3,574	3,537	
310,5	113,8	13,08	3,633	3,529	3,765	3,728	
313,1	116,4	13,78	3,828	3,732	3,978	3,942	
319,7	123,0	15,89	4,414	4,278	4,549	4,517	
321,5	124,8	16,60	4,611	4,434	4,713	4,683	

Tabela 5.2 (a) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor triangular ($\alpha=90^\circ$, $P=100\text{mm}$)

Vertedor: TRIANGULAR $\alpha = 90^\circ$ $P = 100,2\text{mm}$		Data: 20/01/2016		Observações:				
		Início: 11:00						
		Término: 13:40						
		Experimento: 14						
Dados:								
Leitura inicial do fundo (mm)			1,1		tan ($\alpha/2$)		1,000	
Leitura da soleira (mm)			101,3		Posições (cm)			
Altura da soleira (mm)			100,2		Vertedor		210	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			100,2		Medidor de carga		120	
Vazão								
Leitura	Carga	Experimental		Kindsvater e Carter	Lenz	Greve	Thomson	Numachi, Kurazawa e Hutizawa
(mm)	(mm)	(m ³ /h)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)
120,9	19,6	0,19	0,053	0,081	0,097	0,084	0,076	0,079
124,5	23,2	0,34	0,094	0,122	0,144	0,127	0,116	0,120
124,5	23,2	0,34	0,094	0,122	0,144	0,127	0,116	0,120
124,5	23,2	0,34	0,094	0,122	0,144	0,127	0,116	0,120
124,5	23,2	0,35	0,097	0,122	0,144	0,127	0,116	0,120
124,6	23,3	0,35	0,097	0,123	0,145	0,128	0,118	0,122
126,8	25,5	0,39	0,108	0,153	0,179	0,160	0,147	0,152
129,2	27,9	0,55	0,153	0,190	0,222	0,200	0,185	0,190
129,2	27,9	0,56	0,156	0,190	0,222	0,200	0,185	0,190
129,7	28,4	0,57	0,158	0,199	0,232	0,209	0,193	0,199
132,8	31,5	0,78	0,217	0,256	0,296	0,270	0,250	0,257
134,9	33,6	0,99	0,275	0,299	0,345	0,317	0,294	0,301
136,7	35,4	1,16	0,322	0,340	0,391	0,360	0,335	0,343
136,9	35,6	1,20	0,333	0,345	0,396	0,365	0,340	0,348
140,8	39,5	1,51	0,419	0,445	0,508	0,472	0,440	0,450
141,3	40,0	1,63	0,453	0,458	0,523	0,487	0,454	0,464
145,5	44,2	2,05	0,569	0,586	0,664	0,623	0,583	0,595
148,1	46,8	2,36	0,656	0,674	0,762	0,718	0,673	0,685
148,7	47,4	2,40	0,667	0,696	0,785	0,741	0,695	0,707
151,8	50,5	2,88	0,800	0,813	0,914	0,866	0,814	0,827
152,3	51,0	2,95	0,819	0,833	0,936	0,887	0,834	0,848
152,7	51,4	3,00	0,833	0,849	0,954	0,905	0,851	0,864
158,4	57,1	3,88	1,078	1,100	1,228	1,173	1,106	1,122
165,0	63,7	5,21	1,447	1,441	1,598	1,537	1,454	1,472
167,1	65,8	5,85	1,625	1,562	1,729	1,665	1,577	1,595
171,8	70,5	6,60	1,833	1,852	2,042	1,975	1,874	1,893
180,1	78,8	8,70	2,417	2,439	2,672	2,599	2,475	2,494
185,8	84,5	10,30	2,861	2,900	3,165	3,089	2,947	2,966
185,8	84,5	10,27	2,853	2,900	3,165	3,089	2,947	2,966
193,6	92,3	12,82	3,561	3,609	3,920	3,841	3,675	3,692
199,1	97,8	14,99	4,164	4,166	4,511	4,432	4,248	4,262
205,1	103,8	17,35	4,819	4,829	5,214	5,134	4,929	4,940
208,6	107,3	19,00	5,278	5,243	5,651	5,572	5,355	5,363
212,8	111,5	21,10	5,861	5,767	6,205	6,126	5,895	5,899
216,1	114,8	22,60	6,278	6,200	6,661	6,584	6,341	6,342

Tabela 5.2 (b) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor triangular ($\alpha=90^\circ$, $P=150\text{mm}$)

Vertedor: TRIANGULAR $\alpha = 90^\circ$ $P = 150,0\text{mm}$		<i>Data:</i> 21/01/2016		Observações:				
		<i>Início:</i> 10:20						
		<i>Término:</i> 12:30						
		<i>Experimento:</i> 15						
Dados:								
Leitura inicial do fundo (mm)			1,6		tan ($\alpha/2$)		1,000	
Leitura da soleira (mm)			151,6		Posições (cm)			
Altura da soleira (mm)			150,0		Vertedor		210	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			150,0		Medidor de carga		100	
Vazão								
Leitura	Carga	Vazão						
		Experimental		Kindsvater e Carter	Lenz	Greve	Thomson	Numachi, Kurazawa e Hutizawa
(mm)	(mm)	(m ³ /h)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)
163,9	12,3	0,07	0,019	0,027	0,033	0,026	0,024	0,025
163,9	12,3	0,07	0,019	0,027	0,033	0,026	0,024	0,025
163,9	12,3	0,08	0,022	0,027	0,033	0,026	0,024	0,025
168,0	16,4	0,17	0,047	0,053	0,064	0,054	0,049	0,051
168,0	16,4	0,17	0,047	0,053	0,064	0,054	0,049	0,051
168,0	16,4	0,17	0,047	0,053	0,064	0,054	0,049	0,051
171,1	19,5	0,28	0,078	0,080	0,095	0,083	0,075	0,078
171,1	19,5	0,28	0,078	0,080	0,095	0,083	0,075	0,078
176,4	24,8	0,45	0,125	0,143	0,168	0,150	0,138	0,142
176,4	24,8	0,47	0,131	0,143	0,168	0,150	0,138	0,142
179,4	27,8	0,61	0,169	0,189	0,220	0,198	0,183	0,188
179,4	27,8	0,62	0,172	0,189	0,220	0,198	0,183	0,188
184,1	32,5	0,97	0,269	0,276	0,319	0,292	0,270	0,277
188,7	37,1	1,48	0,411	0,381	0,437	0,404	0,376	0,385
194,0	42,4	1,98	0,550	0,529	0,601	0,562	0,526	0,536
200,5	48,9	2,71	0,753	0,751	0,846	0,800	0,751	0,764
205,6	54,0	3,51	0,975	0,959	1,074	1,022	0,962	0,977
211,3	59,7	4,56	1,267	1,228	1,367	1,309	1,237	1,253
216,1	64,5	5,51	1,531	1,486	1,647	1,585	1,500	1,518
220,0	68,4	6,30	1,750	1,719	1,898	1,832	1,738	1,756
225,0	73,4	7,62	2,117	2,046	2,251	2,181	2,073	2,092
229,5	77,9	8,83	2,453	2,371	2,599	2,527	2,405	2,424
233,4	81,8	9,71	2,697	2,675	2,925	2,851	2,718	2,736
237,9	86,3	11,05	3,069	3,055	3,331	3,254	3,107	3,125
243,3	91,7	12,84	3,567	3,551	3,859	3,780	3,616	3,633
246,7	95,1	14,06	3,906	3,886	4,215	4,136	3,960	3,976
254,1	102,5	16,91	4,697	4,680	5,056	4,977	4,776	4,788
259,3	107,7	19,17	5,325	5,292	5,703	5,624	5,405	5,413
261,4	109,8	20,51	5,697	5,551	5,977	5,898	5,673	5,678

Tabela 5.2 (c) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor triangular ($\alpha=90^\circ$, $P=200\text{mm}$)

Vertedor: TRIANGULAR $\alpha = 90^\circ$ $P = 194,2\text{mm}$		Data: 21/01/2016		Observações:				
		Início: 16:10						
		Término: 18:20						
		Experimento: 16						
Dados:								
Leitura inicial do fundo (mm)			1,0		tan ($\alpha/2$)		1,000	
Leitura da soleira (mm)			195,2		Posições (cm)			
Altura da soleira (mm)			194,2		Vertedor		210	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			194,2		Medidor de carga		120	
Vazão								
Leitura	Carga	Experimental		Kindsvater e Carter	Lenz	Greve	Thomson	Numachi, Kurazawa e Hutizawa
(mm)	(mm)	(m ³ /h)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)
207,5	12,3	0,07	0,019	0,027	0,033	0,026	0,024	0,025
207,5	12,3	0,07	0,019	0,027	0,033	0,026	0,024	0,025
207,5	12,3	0,09	0,025	0,027	0,033	0,026	0,024	0,025
207,5	12,3	0,09	0,025	0,027	0,033	0,026	0,024	0,025
214,0	18,8	0,22	0,061	0,073	0,088	0,075	0,069	0,071
214,0	18,8	0,22	0,061	0,073	0,088	0,075	0,069	0,071
214,0	18,8	0,24	0,067	0,073	0,088	0,075	0,069	0,071
217,9	22,7	0,35	0,097	0,115	0,136	0,120	0,110	0,114
217,9	22,7	0,36	0,100	0,115	0,136	0,120	0,110	0,114
223,9	28,7	0,64	0,178	0,204	0,237	0,214	0,198	0,204
223,9	28,7	0,67	0,186	0,204	0,237	0,214	0,198	0,204
223,9	28,7	0,67	0,186	0,204	0,237	0,214	0,198	0,204
226,7	31,5	0,82	0,228	0,256	0,296	0,270	0,250	0,257
226,7	31,5	0,82	0,228	0,256	0,296	0,270	0,250	0,257
230,4	35,2	1,15	0,319	0,335	0,386	0,355	0,330	0,338
234,7	39,5	1,62	0,450	0,445	0,508	0,472	0,440	0,450
238,0	42,8	1,92	0,533	0,541	0,615	0,576	0,538	0,549
241,6	46,4	2,31	0,642	0,660	0,746	0,703	0,659	0,671
246,6	51,4	3,03	0,842	0,849	0,954	0,905	0,851	0,864
251,9	56,7	3,86	1,072	1,081	1,208	1,153	1,087	1,103
256,2	61,0	4,81	1,336	1,295	1,440	1,381	1,305	1,322
262,0	66,8	5,92	1,644	1,621	1,793	1,728	1,638	1,656
266,7	71,5	6,90	1,917	1,918	2,112	2,044	1,941	1,960
269,3	74,1	7,69	2,136	2,095	2,303	2,233	2,122	2,141
273,2	78,0	8,72	2,422	2,378	2,607	2,535	2,413	2,432
276,2	81,0	9,48	2,633	2,611	2,857	2,782	2,652	2,670
279,3	84,1	10,21	2,836	2,866	3,129	3,053	2,913	2,931
282,2	87,0	11,13	3,092	3,117	3,396	3,319	3,170	3,188
285,9	90,7	12,14	3,372	3,456	3,757	3,679	3,518	3,535
290,0	94,8	13,67	3,797	3,856	4,183	4,103	3,929	3,945
294,3	99,1	15,20	4,222	4,304	4,659	4,579	4,390	4,404
299,2	104,0	17,11	4,753	4,852	5,238	5,158	4,953	4,963
306,3	111,1	20,60	5,722	5,716	6,151	6,072	5,842	5,847
309,2	114,0	22,10	6,139	6,094	6,549	6,471	6,231	6,233

Tabela 5.3 (a) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor triangular ($\alpha=100^\circ$, $P=100\text{mm}$)

Vertedor: TRIANGULAR $\alpha = 100^\circ$ $P = 99,8\text{mm}$		<i>Data:</i> 26/01/2016		Observações:			
		<i>Início:</i> 19:00					
		<i>Término:</i> 21:10					
		<i>Experimento:</i> 18					
Dados:							
Leitura inicial do fundo (mm)		0,7		tan ($\alpha/2$)		1,192	
Leitura da soleira (mm)		100,5		Posições (cm)			
Altura da soleira (mm)		99,8		Vertedor		210	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)		99,8		Medidor de carga		130	
Vazão							
Leitura (mm)	Carga (mm)	Experimental		Kindsvater e Carter (L/s)	Lenz (L/s)	Greve (L/s)	$V^2/2g$ (mm)
		(m^3/h)	(L/s)				
116,1	15,6	0,16	0,044	0,056	0,067	0,057	0,000
116,1	15,6	0,17	0,047	0,056	0,067	0,057	0,000
119,8	19,3	0,29	0,081	0,094	0,111	0,096	0,001
119,8	19,3	0,29	0,081	0,094	0,111	0,096	0,001
124,4	23,9	0,50	0,139	0,157	0,184	0,163	0,003
126,9	26,4	0,63	0,175	0,199	0,232	0,208	0,005
130,0	29,5	0,81	0,225	0,261	0,302	0,273	0,007
133,6	33,1	1,33	0,369	0,345	0,397	0,363	0,018
137,7	37,2	1,66	0,461	0,460	0,524	0,485	0,027
138,1	37,6	1,73	0,481	0,472	0,538	0,498	0,029
141,6	41,1	2,08	0,578	0,587	0,665	0,620	0,040
145,7	45,2	2,67	0,742	0,741	0,835	0,784	0,061
150,2	49,7	3,40	0,944	0,936	1,049	0,992	0,094
151,3	50,8	3,75	1,042	0,988	1,105	1,047	0,112
156,9	56,4	4,83	1,342	1,278	1,421	1,355	0,173
163,7	63,2	6,27	1,742	1,692	1,869	1,795	0,268
164,3	63,8	6,44	1,789	1,732	1,912	1,838	0,281
168,5	68,0	7,60	2,111	2,027	2,230	2,151	0,372
173,7	73,2	9,07	2,519	2,432	2,665	2,580	0,498
178,0	77,5	10,25	2,847	2,801	3,059	2,971	0,606
180,4	79,9	11,00	3,056	3,021	3,294	3,204	0,679
182,8	82,3	11,81	3,281	3,250	3,538	3,446	0,763
184,9	84,4	12,56	3,489	3,459	3,761	3,668	0,843
188,5	88,0	14,07	3,908	3,837	4,162	4,066	1,018
192,0	91,5	15,52	4,311	4,226	4,574	4,478	1,193

Tabela 5.3 (b) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor triangular ($\alpha=100^\circ$, $P=150\text{mm}$)

Vertedor: TRIANGULAR $\alpha = 100^\circ$ $P = 149,7\text{mm}$		<i>Data:</i> 26/01/2016		Observações:			
		<i>Início:</i> 15:40					
		<i>Término:</i> 17:50					
		<i>Experimento:</i> 17					
Dados:							
Leitura inicial do fundo (mm)		0,7		tan ($\alpha/2$)		1,192	
Leitura da soleira (mm)		150,4		Posições (cm)			
Altura da soleira (mm)		149,7		Vertedor		210	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)		149,7		Medidor de carga		130	
Vazão							
Leitura	Carga	Experimental		Kindsvater e Carter	Lenz	Greve	$V^2/2g$
(mm)	(mm)	(m^3/h)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(mm)
163,0	12,6	0,11	0,031	0,034	0,041	0,033	0,000
163,0	12,6	0,11	0,031	0,034	0,041	0,033	0,000
163,0	12,6	0,12	0,033	0,034	0,041	0,033	0,000
164,9	14,5	0,13	0,036	0,047	0,057	0,047	0,000
164,9	14,5	0,13	0,036	0,047	0,057	0,047	0,000
169,2	18,8	0,28	0,078	0,088	0,104	0,090	0,001
169,2	18,8	0,29	0,081	0,088	0,104	0,090	0,001
171,5	21,1	0,37	0,103	0,116	0,137	0,119	0,001
171,5	21,1	0,37	0,103	0,116	0,137	0,119	0,001
176,9	26,5	0,65	0,181	0,201	0,234	0,210	0,002
176,9	26,5	0,68	0,189	0,201	0,234	0,210	0,003
176,9	26,5	0,69	0,192	0,201	0,234	0,210	0,003
182,3	31,9	1,07	0,297	0,316	0,364	0,332	0,006
184,5	34,1	1,42	0,394	0,372	0,426	0,391	0,011
189,4	39,0	1,94	0,539	0,516	0,587	0,545	0,019
193,8	43,4	2,60	0,722	0,671	0,758	0,709	0,033
197,0	46,6	2,93	0,814	0,799	0,899	0,846	0,040
200,2	49,8	3,60	1,000	0,940	1,054	0,997	0,059
205,7	55,3	4,51	1,253	1,217	1,355	1,291	0,088
211,0	60,6	5,70	1,583	1,525	1,689	1,618	0,133
217,0	66,6	7,21	2,003	1,926	2,121	2,043	0,201
222,1	71,7	8,67	2,408	2,311	2,535	2,452	0,278
226,5	76,1	9,97	2,769	2,677	2,927	2,840	0,353
231,4	81,0	11,50	3,194	3,125	3,404	3,314	0,450
236,8	86,4	13,33	3,703	3,666	3,981	3,886	0,578
240,6	90,2	15,08	4,189	4,079	4,418	4,322	0,716

Tabela 5.3 (c) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor triangular ($\alpha=100^\circ$, $P=200\text{mm}$)

Vertedor: TRIANGULAR $\alpha = 100^\circ$ $P = 193,5\text{mm}$		<i>Data:</i> 27/01/2016		Observações:			
		<i>Início:</i> 11:10					
		<i>Término:</i> 13:10					
		<i>Experimento:</i> 19					
Dados:							
Leitura inicial do fundo (mm)		0,7		tan ($\alpha/2$)		1,192	
Leitura da soleira (mm)		194,2		Posições (cm)			
Altura da soleira (mm)		193,5		Vertedor		210	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)		193,5		Medidor de carga		130	
Vazão							
Leitura (mm)	Carga (mm)	Experimental		Kindsvater e Carter (L/s)	Lenz (L/s)	Greve (L/s)	$V^2/2g$ (mm)
		(m^3/h)	(L/s)				
206,4	12,2	0,07	0,019	0,031	0,038	0,031	0,000
206,4	12,2	0,07	0,019	0,031	0,038	0,031	0,000
210,7	16,5	0,16	0,044	0,064	0,077	0,065	0,000
210,7	16,5	0,17	0,047	0,064	0,077	0,065	0,000
215,2	21,0	0,34	0,094	0,115	0,135	0,118	0,000
215,2	21,0	0,34	0,094	0,115	0,135	0,118	0,000
220,6	26,4	0,57	0,158	0,199	0,232	0,208	0,001
220,6	26,4	0,57	0,158	0,199	0,232	0,208	0,001
224,3	30,1	0,83	0,231	0,274	0,317	0,287	0,002
224,3	30,1	0,83	0,231	0,274	0,317	0,287	0,002
229,1	34,9	1,34	0,372	0,393	0,450	0,414	0,006
229,1	34,9	1,34	0,372	0,393	0,450	0,414	0,006
233,6	39,4	1,85	0,514	0,529	0,601	0,559	0,011
238,0	43,8	2,45	0,681	0,686	0,775	0,726	0,019
242,6	48,4	3,13	0,869	0,877	0,984	0,929	0,030
247,3	53,1	4,01	1,114	1,101	1,229	1,168	0,048
250,7	56,5	4,63	1,286	1,283	1,427	1,361	0,062
256,2	62,0	5,95	1,653	1,614	1,785	1,712	0,098
259,9	65,7	6,78	1,883	1,862	2,053	1,976	0,124
263,7	69,5	7,77	2,158	2,139	2,351	2,270	0,158
270,0	75,8	9,63	2,675	2,651	2,899	2,813	0,232
275,2	81,0	11,24	3,122	3,125	3,404	3,314	0,304
280,6	86,4	13,10	3,639	3,666	3,981	3,886	0,397
285,3	91,1	15,00	4,167	4,180	4,526	4,429	0,504
289,3	95,1	16,78	4,661	4,650	5,023	4,925	0,613

Tabela 5.4 (a) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor circular (D=100mm, P=100mm)

Vertedor:		Data:	03/12/2015		Observações:					
	CIRCULAR	Início:	14:00							
	D = 103 mm	Término:	17:10							
	P = 105,7 mm	Experimento:	1							
Dados:										
Leitura inicial do fundo (mm)			0,5		Posições (cm)					
Leitura da soleira (mm)			106,2		Vertedor		210			
Altura da soleira (mm)			105,7		Medidor de carga		140			
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			105,7							
Vazão										
Leitura (mm)	Carga (mm)	η (h/D)	Vazão							V ² /2g (mm)
			Experimental (m ³ /h)	Netto (L/s)	Panuzio (L/s)	Staus (L/s)	Vatankhah (L/s)			
118,2	12	0,12	0,40	0,111	0,106	0,109	0,106	0,096	0,00	
119	12,8	0,12	0,42	0,117	0,119	0,124	0,124	0,109	0,00	
121,9	15,7	0,15	0,65	0,181	0,173	0,180	0,182	0,160	0,00	
123,2	17	0,17	0,74	0,206	0,199	0,205	0,204	0,187	0,00	
124,1	17,9	0,17	0,82	0,228	0,219	0,222	0,227	0,206	0,00	
130	23,8	0,23	1,43	0,397	0,366	0,371	0,387	0,353	0,00	
135,5	29,3	0,28	2,08	0,578	0,533	0,538	0,554	0,521	0,01	
135,8	29,6	0,29	2,09	0,581	0,543	0,547	0,553	0,531	0,01	
140,1	33,9	0,33	2,73	0,758	0,694	0,709	0,705	0,683	0,02	
146,8	40,6	0,39	3,70	1,028	0,961	0,981	1,006	0,954	0,03	
147	40,8	0,40	3,74	1,039	0,970	0,989	1,006	0,963	0,03	
156,8	50,6	0,49	5,38	1,494	1,431	1,472	1,516	1,426	0,05	
158,9	52,7	0,51	5,76	1,600	1,540	1,586	1,628	1,534	0,05	
168,1	61,9	0,60	7,57	2,103	2,059	2,116	2,169	2,044	0,08	
171,2	65	0,63	8,23	2,286	2,250	2,312	2,363	2,227	0,10	
176,4	70,2	0,68	9,08	2,522	2,585	2,644	2,690	2,544	0,11	
184,7	78,5	0,76	10,97	3,047	3,164	3,199	3,247	3,073	0,15	
187,4	81,2	0,79	11,61	3,225	3,363	3,383	3,395	3,250	0,16	
192,5	86,3	0,84	12,82	3,561	3,754	3,736	3,750	3,586	0,18	
193,3	87,1	0,85	13,20	3,667	3,818	3,791	3,820	3,639	0,19	
198,9	92,7	0,90	14,53	4,036	4,272	4,181	4,183	4,010	0,22	
201,1	94,9	0,92	14,99	4,164	4,457	4,327	4,395	4,154	0,23	
205,3	99,1	0,96	15,93	4,425	4,820	4,606	4,676	4,426	0,25	
206	99,8	0,97	16,01	4,447	4,882	4,653	4,676	4,471	0,25	
209,6	103,4	1,00	16,69	4,636	5,205	4,894	-	4,696	0,26	
212,3	106,1	1,03	17,37	4,825	5,453	5,075	-	4,859	0,28	

Tabela 5.4 (b) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor circular (D=100mm, P=150mm)

Vertedor:		Data:	04/12/2015		Observações: Experimento 04, 07/12/2015, das 14:45 as 17:00.					
	CIRCULAR	Início:	16:50							
	D = 103 mm	Término:	18:50							
	P = 154,8 mm	Experimento:	3 e 4							
Dados:										
Leitura inicial do fundo (mm)			1,2		Posições (cm)					
Leitura da soleira (mm)			156		Vertedor		210			
Altura da soleira (mm)			154,8		Medidor de carga		130			
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			154,8							
Leitura (mm)	Carga (mm)	η (h/D)	Vazão							V ² /2g (mm)
			Experimental (m ³ /h)	Netto (L/s)	Panuzio (L/s)	Staus (L/s)	Vatankhah (L/s)			
168,1	12,1	0,12	0,41	0,114	0,106	0,111	0,106	0,098	0,00	
170,3	14,3	0,14	0,60	0,167	0,119	0,153	0,142	0,134	0,00	
172,3	16,3	0,16	0,79	0,219	0,173	0,192	0,182	0,172	0,00	
172,3	16,3	0,16	0,78	0,217	0,199	0,192	0,182	0,172	0,00	
172,3	16,3	0,16	0,75	0,208	0,219	0,192	0,182	0,172	0,00	
172,3	16,3	0,16	0,73	0,203	0,366	0,192	0,182	0,172	0,00	
180,4	24,4	0,24	1,6	0,444	0,533	0,389	0,387	0,369	0,00	
180,5	24,5	0,24	1,8	0,500	0,543	0,393	0,387	0,372	0,00	
183,1	27,1	0,26	1,87	0,519	0,694	0,471	0,449	0,450	0,00	
188,4	32,4	0,31	2,67	0,742	0,961	0,648	0,627	0,628	0,01	
191,4	35,4	0,34	3,30	0,917	0,970	0,769	0,744	0,741	0,01	
198,8	42,8	0,42	4,36	1,211	1,431	1,084	1,101	1,051	0,02	
201,6	45,6	0,44	4,90	1,361	1,540	1,223	1,199	1,180	0,02	
211,3	55,3	0,54	5,76	1,600	2,059	1,735	1,742	1,673	0,03	
212,5	56,5	0,55	7,13	1,981	2,250	1,804	1,801	1,738	0,05	
220,6	64,6	0,63	8,96	2,489	2,585	2,287	2,299	2,203	0,07	
223	67	0,65	9,27	2,575	3,164	2,440	2,428	2,347	0,07	
231,8	75,8	0,74	11,13	3,092	3,363	3,016	3,038	2,899	0,10	
232,8	76,8	0,75	11,70	3,250	3,754	3,084	3,107	2,963	0,10	
238,9	82,9	0,80	13,12	3,644	3,818	3,500	3,464	3,362	0,12	
243,8	87,8	0,85	14,35	3,986	4,272	3,840	3,820	3,686	0,14	
244,3	88,3	0,86	14,27	3,964	4,457	3,875	3,890	3,719	0,14	
251,6	95,6	0,93	16,39	4,553	4,820	4,374	4,395	4,200	0,18	
253,5	97,5	0,95	17,05	4,736	4,882	4,500	4,537	4,323	0,19	
260,6	104,6	1,02	18,68	5,189	5,205	4,974	-	4,769	0,21	
264,1	108,1	1,05	19,48	5,411	5,453	5,210	-	4,975	0,22	
168,1	12,1	0,12	0,36	0,100	0,108	0,111	0,106	0,098	0,00	
168,1	12,1	0,12	0,36	0,100	0,108	0,111	0,106	0,098	0,00	
168,1	12,1	0,12	0,36	0,100	0,108	0,111	0,106	0,098	0,00	
170,1	14,1	0,14	0,52	0,144	0,142	0,150	0,142	0,131	0,00	
170,1	14,1	0,14	0,53	0,147	0,142	0,150	0,142	0,131	0,00	
170,1	14,1	0,14	0,52	0,144	0,142	0,150	0,142	0,131	0,00	
170,9	14,9	0,14	0,52	0,144	0,157	0,165	0,141	0,145	0,00	
175,6	19,6	0,19	1,07	0,297	0,258	0,255	0,250	0,244	0,00	
177	21	0,20	1,26	0,350	0,292	0,286	0,274	0,278	0,00	
178,7	22,7	0,22	1,34	0,372	0,336	0,338	0,328	0,322	0,00	

Tabela 5.4 (b) – Continuação

Vertedor:		Data:	04/12/2015		Observações: Experimento 04, 07/12/2015, das 14:45 as 17:00.					
	CIRCULAR	Início:	16:50							
	D = 103 mm	Término:	18:50							
	P = 154,8 mm	Experimento:	3 e 4							
Dados:										
Leitura inicial do fundo (mm)			1,2		Posições (cm)					
Leitura da soleira (mm)			156		Vertedor		210			
Altura da soleira (mm)			154,8		Medidor de carga		130			
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			154,8							
Leitura (mm)	Carga (mm)	η (h/D)	Vazão							V ² /2g (mm)
			Experimental (m ³ /h)	(L/s)	Netto (L/s)	Panuzio (L/s)	Staus (L/s)	Vatankhah (L/s)		
178,7	22,7	0,22	1,30	0,361	0,336	0,338	0,328	0,322	0,00	
181,8	25,8	0,25	1,82	0,506	0,424	0,432	0,417	0,410	0,00	
184,8	28,8	0,28	2,22	0,617	0,517	0,523	0,517	0,504	0,01	
188,5	32,5	0,32	2,58	0,717	0,643	0,652	0,666	0,632	0,01	
192,2	36,2	0,35	3,15	0,875	0,781	0,802	0,786	0,772	0,01	
196,7	40,7	0,40	3,94	1,094	0,965	0,985	1,006	0,958	0,02	
201,3	45,3	0,44	4,62	1,283	1,171	1,209	1,199	1,166	0,02	
203	47	0,46	4,87	1,353	1,252	1,293	1,302	1,247	0,02	
207,6	51,6	0,50	5,92	1,644	1,482	1,523	1,516	1,477	0,03	
210,9	54,9	0,53	6,48	1,800	1,658	1,712	1,685	1,651	0,04	
218,7	62,7	0,61	8,28	2,300	2,108	2,166	2,169	2,090	0,06	
220,2	64,2	0,62	8,58	2,383	2,200	2,262	2,232	2,179	0,06	
225,7	69,7	0,68	9,82	2,728	2,552	2,612	2,629	2,513	0,08	
228,5	72,5	0,70	10,42	2,894	2,740	2,793	2,762	2,688	0,09	
236,6	80,6	0,78	12,25	3,403	3,318	3,343	3,319	3,210	0,11	
237,9	81,9	0,80	12,6	3,500	3,416	3,431	3,464	3,296	0,12	
244,3	88,3	0,86	14,28	3,967	3,913	3,875	3,890	3,719	0,14	
250,6	94,6	0,92	15,88	4,411	4,432	4,307	4,327	4,135	0,17	
252,1	96,1	0,93	16,40	4,556	4,560	4,407	4,395	4,233	0,17	
253,8	97,8	0,95	16,76	4,656	4,707	4,520	4,537	4,343	0,18	
258,1	102,1	0,99	17,89	4,969	5,087	4,807	4,812	4,615	0,20	
263,5	107,5	1,04	19,23	5,342	5,584	5,169	-	4,940	0,22	

Tabela 5.4 (c) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor circular (D=100mm, P=200mm)

Vertedor:		Data:	15/12/2015		Observações: Q0 = 0 m³/s; F=1. Experimento 07, 16/12/2015, das 15:15 as 18:45.					
	CIRCULAR	Início:	16:30							
	D = 103 mm	Término:	20:40							
	P = 199,0 mm	Experimento:	6 e 7							
Dados:										
Leitura inicial do fundo (mm)			1,4		Posições (cm)					
Leitura da soleira (mm)			200,4		Vertedor		210			
Altura da soleira (mm)			199,0		Medidor de carga		120			
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			199,0							
Leitura (mm)	Carga (mm)	η (h/D)	Vazão							V²/2g (mm)
			Experimental (m³/h)	Netto (L/s)	Panuzio (L/s)	Staus (L/s)	Vatankhah (L/s)			
213,5	13,1	0,13	0,44	0,122	0,124	0,130	0,124	0,114	0,00	
213,5	13,1	0,13	0,44	0,122	0,124	0,130	0,124	0,114	0,00	
216,2	15,8	0,15	0,56	0,156	0,175	0,182	0,161	0,162	0,00	
216,2	15,8	0,15	0,57	0,158	0,175	0,182	0,161	0,162	0,00	
216,2	15,8	0,15	0,57	0,158	0,175	0,182	0,161	0,162	0,00	
218,0	17,6	0,17	0,65	0,181	0,212	0,217	0,203	0,199	0,00	
218,0	17,6	0,17	0,67	0,186	0,212	0,217	0,203	0,199	0,00	
218,0	17,6	0,17	0,68	0,189	0,212	0,217	0,203	0,199	0,00	
218,0	17,6	0,17	0,68	0,189	0,212	0,217	0,203	0,199	0,00	
218,0	17,6	0,17	0,72	0,200	0,212	0,217	0,203	0,199	0,00	
218,9	18,5	0,18	0,91	0,253	0,232	0,234	0,226	0,219	0,00	
218,9	18,5	0,18	0,91	0,253	0,232	0,234	0,226	0,219	0,00	
218,9	18,5	0,18	0,92	0,256	0,232	0,234	0,226	0,219	0,00	
218,9	18,5	0,18	0,93	0,258	0,232	0,234	0,226	0,219	0,00	
218,9	18,5	0,18	0,93	0,258	0,232	0,234	0,226	0,219	0,00	
220,2	19,8	0,19	0,97	0,269	0,263	0,258	0,250	0,249	0,00	
221,6	21,2	0,21	1,10	0,306	0,297	0,292	0,301	0,283	0,00	
222,2	21,8	0,21	1,23	0,342	0,312	0,310	0,301	0,299	0,00	
222,2	21,8	0,21	1,25	0,347	0,312	0,310	0,301	0,299	0,00	
222,2	21,8	0,21	1,26	0,350	0,312	0,310	0,301	0,299	0,00	
225,9	25,5	0,25	1,69	0,469	0,415	0,423	0,418	0,401	0,00	
226,6	26,2	0,25	1,80	0,500	0,436	0,444	0,417	0,422	0,00	
230,5	30,1	0,29	2,27	0,631	0,560	0,562	0,553	0,548	0,00	
231,1	30,7	0,30	2,29	0,636	0,580	0,581	0,590	0,568	0,00	
234,4	34,0	0,33	2,78	0,772	0,698	0,713	0,705	0,687	0,01	
236,5	36,1	0,35	3,08	0,856	0,777	0,798	0,786	0,768	0,01	
241,5	41,1	0,40	3,89	1,081	0,983	1,001	1,006	0,976	0,01	
241,6	41,2	0,40	3,96	1,100	0,987	1,005	1,006	0,980	0,01	
241,8	41,4	0,40	3,97	1,103	0,996	1,013	1,006	0,989	0,01	
247,7	47,3	0,46	5,1	1,417	1,267	1,308	1,302	1,262	0,02	
248,7	48,3	0,47	5,25	1,458	1,315	1,358	1,355	1,310	0,02	
251,5	51,1	0,50	5,82	1,617	1,456	1,497	1,516	1,451	0,02	
257,7	57,3	0,56	7,05	1,958	1,791	1,850	1,860	1,782	0,03	
262,0	61,6	0,60	8,04	2,233	2,041	2,098	2,107	2,026	0,04	
267,5	67,1	0,65	9,37	2,603	2,383	2,446	2,428	2,353	0,05	
267,8	67,4	0,65	9,25	2,569	2,402	2,465	2,428	2,371	0,05	
273,1	72,7	0,71	10,48	2,911	2,754	2,806	2,829	2,701	0,06	

Tabela 5.4 (c) – Continuação

Vertedor:		Data:	15/12/2015		Observações: Q0 = 0 m³/s; F=1. Experimento 07, 16/12/2015, das 15:15 as 18:45.					
	CIRCULAR	Início:	16:30							
	D = 103 mm	Término:	20:40							
	P = 199,0 mm	Experimento:	6 e 7							
Dados:										
Leitura inicial do fundo (mm)			1,4		Posições (cm)					
Leitura da soleira (mm)			200,4		Vertedor			210		
Altura da soleira (mm)			199,0		Medidor de carga			120		
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			199,0							
Leitura (mm)	Carga (mm)	η (h/D)	Vazão							V²/2g (mm)
			Experimental (m³/h)	(L/s)	Netto (L/s)	Ramponi (L/s)	Staus (L/s)	Vatankhah (L/s)		
279,5	79,1	0,77	11,96	3,322	3,208	3,240	3,250	3,112	0,08	
280,0	79,6	0,77	12,09	3,358	3,244	3,274	3,250	3,145	0,08	
283,7	83,3	0,81	13,05	3,625	3,522	3,528	3,534	3,388	0,09	
285,1	84,7	0,82	13,4	3,722	3,630	3,625	3,604	3,480	0,09	
289,9	89,5	0,87	14,59	4,053	4,010	3,958	3,967	3,798	0,10	
292,0	91,6	0,89	15,21	4,225	4,181	4,105	4,113	3,937	0,11	
296,0	95,6	0,93	16,27	4,519	4,517	4,374	4,395	4,200	0,12	
300,6	100,2	0,97	17,5	4,861	4,917	4,680	4,676	4,496	0,14	
303,2	102,8	1,00	18,15	5,042	5,150	4,854	-	4,659	0,15	
306,2	105,8	1,03	18,82	5,228	5,425	5,055	-	4,841	0,16	
307,7	107,3	1,04	19,25	5,347	5,565	5,156	-	4,929	0,16	
214,4	14,0	0,14	0,45	0,125	0,140	0,148	0,142	0,129	0,00	
214,4	14,0	0,14	0,46	0,128	0,140	0,148	0,142	0,129	0,00	
215,6	15,2	0,15	0,58	0,161	0,163	0,171	0,161	0,151	0,00	
215,6	15,2	0,15	0,59	0,164	0,163	0,171	0,161	0,151	0,00	
215,6	15,2	0,15	0,60	0,167	0,163	0,171	0,161	0,151	0,00	
216,8	16,4	0,16	0,63	0,175	0,187	0,194	0,182	0,174	0,00	
216,8	16,4	0,16	0,63	0,175	0,187	0,194	0,182	0,174	0,00	
216,8	16,4	0,16	0,64	0,178	0,187	0,194	0,182	0,174	0,00	
217,5	17,1	0,17	0,62	0,172	0,201	0,207	0,204	0,189	0,00	
217,5	17,1	0,17	0,62	0,172	0,201	0,207	0,204	0,189	0,00	
218,5	18,1	0,18	0,72	0,200	0,223	0,226	0,227	0,210	0,00	
218,5	18,1	0,18	0,73	0,203	0,223	0,226	0,227	0,210	0,00	
218,5	18,1	0,18	0,73	0,203	0,223	0,226	0,227	0,210	0,00	
219,2	18,8	0,18	0,84	0,233	0,239	0,239	0,226	0,226	0,00	
220,0	19,6	0,19	0,95	0,264	0,258	0,255	0,250	0,244	0,00	
220,0	19,6	0,19	0,95	0,264	0,258	0,255	0,250	0,244	0,00	
220,0	19,6	0,19	0,83	0,231	0,258	0,255	0,250	0,244	0,00	
221,4	21,0	0,20	0,99	0,275	0,292	0,281	0,274	0,278	0,00	
221,4	21,0	0,20	0,98	0,272	0,292	0,281	0,274	0,278	0,00	
223,0	22,6	0,22	1,34	0,372	0,333	0,335	0,329	0,320	0,00	
225,1	24,7	0,24	1,42	0,394	0,392	0,399	0,387	0,378	0,00	
225,1	24,7	0,24	1,50	0,417	0,392	0,399	0,387	0,378	0,00	
225,1	24,7	0,24	1,51	0,419	0,392	0,399	0,387	0,378	0,00	
227,2	26,8	0,26	1,79	0,497	0,454	0,462	0,450	0,441	0,00	
227,4	27,0	0,26	1,90	0,528	0,460	0,468	0,450	0,447	0,00	
231,9	31,5	0,31	2,36	0,656	0,608	0,611	0,627	0,596	0,00	

Tabela 5.4 (c) – Continuação

Vertedor:		Data:	15/12/2015		Observações: Q0 = 0 m³/s; F=1. Experimento 07, 16/12/2015, das 15:15 as 18:45.					
	CIRCULAR	Início:	16:30							
	D = 103 mm	Término:	20:40							
	P = 199,0 mm	Experimento:	6 e 7							
Dados:										
Leitura inicial do fundo (mm)			1,4		Posições (cm)					
Leitura da soleira (mm)			200,4		Vertedor		210			
Altura da soleira (mm)			199,0		Medidor de carga		120			
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			199,0							
Leitura (mm)	Carga (mm)	η (h/D)	Vazão							V²/2g (mm)
			Experimental (m³/h)	(L/s)	Netto (L/s)	Ramponi (L/s)	Staus (L/s)	Vatankhah (L/s)		
235,1	34,7	0,34	2,87	0,797	0,724	0,741	0,745	0,714	0,01	
237,0	36,6	0,36	3,21	0,892	0,797	0,818	0,829	0,788	0,01	
239,9	39,5	0,38	3,63	1,008	0,915	0,936	0,915	0,907	0,01	
245,2	44,8	0,43	4,58	1,272	1,148	1,184	1,149	1,143	0,01	
248,5	48,1	0,47	5,27	1,464	1,306	1,348	1,355	1,301	0,02	
249,9	49,5	0,48	5,49	1,525	1,375	1,417	1,416	1,370	0,02	
254,9	54,5	0,53	6,53	1,814	1,636	1,689	1,685	1,630	0,03	
263,5	63,1	0,61	8,34	2,317	2,132	2,192	2,169	2,114	0,04	
263,6	63,2	0,61	8,33	2,314	2,138	2,198	2,169	2,120	0,04	
270,2	69,8	0,68	9,81	2,725	2,559	2,618	2,629	2,519	0,05	
274,7	74,3	0,72	10,83	3,008	2,864	2,914	2,897	2,803	0,06	
274,9	74,5	0,72	10,90	3,028	2,878	2,928	2,897	2,815	0,07	
280,9	80,5	0,78	12,26	3,406	3,311	3,336	3,319	3,204	0,08	
286,2	85,8	0,83	13,70	3,806	3,715	3,701	3,680	3,553	0,09	
286,3	85,9	0,83	13,81	3,836	3,723	3,708	3,680	3,560	0,10	
290,4	90,0	0,87	14,61	4,058	4,050	3,993	3,967	3,831	0,10	
292,8	92,4	0,90	15,42	4,283	4,248	4,160	4,183	3,990	0,11	
295,9	95,5	0,93	16,30	4,528	4,509	4,367	4,395	4,193	0,13	
296,9	96,5	0,94	16,60	4,611	4,594	4,433	4,470	4,259	0,13	
299,3	98,9	0,96	17,12	4,756	4,803	4,593	4,603	4,413	0,14	
302,6	102,2	0,99	17,98	4,994	5,096	4,813	4,812	4,622	0,15	
307,3	106,9	1,04	19,14	5,317	5,528	5,129	-	4,906	0,16	

Tabela 5.5 (a) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor circular
(D=150mm, P=100mm)

Vertedor:		Data:		21/12/2015		Observações:			
CIRCULAR		Início:		15:30					
D = 151,9 mm		Término:		17:45					
P = 103,0 mm		Experimento:		11					
Dados:									
Leitura inicial do fundo (mm)				1,1		Posições (cm)			
Leitura da soleira (mm)				104,5		Vertedor		210	
Altura da soleira (mm)				103,4		Medidor de carga		130	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)				103,4					
Vazão									
Leitura	Carga	η	Vazão						
(mm)	(mm)	(H/D)	Experimental	Netto	Ramponi	Staus	Vatankhah	V ² /2g	
		-	(m ³ /h)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(mm)	
123,6	19,1	0,13	0,99	0,275	0,322	0,336	0,327	0,293	0,00
128,5	24,0	0,16	1,75	0,486	0,487	0,505	0,480	0,453	0,01
132,7	28,2	0,19	2,26	0,628	0,651	0,648	0,661	0,616	0,01
136,1	31,6	0,21	2,80	0,778	0,800	0,789	0,795	0,764	0,02
140,5	36,0	0,24	3,59	0,997	1,012	1,030	1,022	0,977	0,03
146,4	41,9	0,28	4,78	1,328	1,332	1,350	1,368	1,298	0,04
152,0	47,5	0,31	6,14	1,706	1,671	1,690	1,655	1,641	0,07
158,8	54,3	0,36	7,84	2,178	2,128	2,185	2,187	2,104	0,10
164,7	60,2	0,40	9,23	2,564	2,563	2,614	2,657	2,545	0,13
169,5	65,0	0,43	10,52	2,922	2,945	3,031	3,035	2,929	0,16
175,0	70,5	0,46	12,23	3,397	3,410	3,521	3,440	3,397	0,20
179,0	74,5	0,49	13,61	3,781	3,768	3,877	3,857	3,754	0,24
183,0	78,5	0,52	15,13	4,203	4,141	4,269	4,299	4,126	0,28
188,7	84,2	0,55	17,14	4,761	4,700	4,855	4,757	4,677	0,34
192,1	87,6	0,58	18,56	5,156	5,049	5,205	5,240	5,018	0,39
197,7	93,2	0,61	20,58	5,717	5,647	5,805	5,728	5,598	0,45
201,7	97,2	0,64	22,26	6,183	6,093	6,260	6,242	6,025	0,50
205,3	100,8	0,66	23,88	6,633	6,506	6,671	6,586	6,417	0,56
211,7	107,2	0,71	26,22	7,283	7,272	7,410	7,473	7,132	0,63
215,6	111,1	0,73	27,78	7,717	7,757	7,883	7,830	7,577	0,69
221,2	116,7	0,77	30,26	8,406	8,478	8,564	8,584	8,226	0,77
226,5	122,0	0,80	32,15	8,931	9,186	9,212	9,150	8,848	0,83
231,8	127,3	0,84	34,52	9,589	9,920	9,870	9,904	9,476	0,92
238,1	133,6	0,88	37,35	10,375	10,825	10,655	10,661	10,223	1,02
244,1	139,6	0,92	39,93	11,092	11,719	11,387	11,429	10,931	1,11
248,9	144,4	0,95	42,02	11,672	12,457	11,958	11,984	11,489	1,18
252,5	148,0	0,97	43,55	12,097	13,024	12,388	12,351	11,901	1,23
256,2	151,7	1,00	45,31	12,586	13,619	12,831	-	12,315	1,29
260,3	155,8	1,03	46,82	13,006	14,291	13,323	-	12,761	1,34
263,2	158,7	1,04	47,79	13,275	14,775	13,673	-	13,066	1,36

Tabela 5.5 (b) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor circular
(D=150mm, P=150mm)

Vertedor:		Data:	21/12/2015		Observações:				
	CIRCULAR	Início:	18:45						
	D = 151,9 mm	Término:	21:15						
	P = 154,8 mm	Experimento:	12						
Dados:									
Leitura inicial do fundo (mm)			1,0		Posições (cm)				
Leitura da soleira (mm)			155,8		Vertedor		210		
Altura da soleira (mm)			154,8		Medidor de carga		130		
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			154,8						
Leitura (mm)	Carga (mm)	η (H/D)	Vazão						V ² /2g (mm)
			Experimental (m ³ /h)	(L/s)	Netto (L/s)	Ramponi (L/s)	Staus (L/s)	Vatankhah (L/s)	
170,7	14,9	0,10	0,62	0,172	0,206	0,188	0,198	0,182	0,00
170,7	14,9	0,10	0,62	0,172	0,206	0,188	0,198	0,182	0,00
170,7	14,9	0,10	0,63	0,175	0,206	0,188	0,198	0,182	0,00
174,4	18,6	0,12	0,99	0,275	0,307	0,319	0,279	0,279	0,00
174,4	18,6	0,12	1,00	0,278	0,307	0,319	0,279	0,279	0,00
174,4	18,6	0,12	1,02	0,283	0,307	0,319	0,279	0,279	0,00
179,2	23,4	0,15	1,63	0,453	0,465	0,485	0,424	0,432	0,00
184,7	28,9	0,19	2,46	0,683	0,681	0,672	0,660	0,645	0,01
189,7	33,9	0,22	3,35	0,931	0,908	0,915	0,867	0,872	0,01
196,7	40,9	0,27	4,67	1,297	1,275	1,296	1,260	1,241	0,02
202,2	46,4	0,31	5,87	1,631	1,601	1,610	1,657	1,571	0,03
207,4	51,6	0,34	7,26	2,017	1,940	1,988	1,967	1,914	0,05
212,3	56,5	0,37	8,65	2,403	2,286	2,345	2,300	2,264	0,07
217,7	61,9	0,41	9,87	2,742	2,696	2,756	2,782	2,678	0,08
221,8	66,0	0,43	11,01	3,058	3,027	3,120	3,035	3,012	0,10
227,2	71,4	0,47	12,71	3,531	3,489	3,601	3,579	3,476	0,13
230,8	75,0	0,49	14,04	3,900	3,814	3,922	3,857	3,800	0,15
235,2	79,4	0,52	15,60	4,333	4,227	4,361	4,299	4,211	0,18
239,9	84,1	0,55	16,98	4,717	4,690	4,844	4,757	4,667	0,21
244,8	89,0	0,59	19,25	5,347	5,196	5,350	5,401	5,161	0,26
249,1	93,3	0,61	20,83	5,786	5,658	5,816	5,728	5,609	0,29
252,6	96,8	0,64	22,19	6,164	6,047	6,215	6,242	5,982	0,32
256,1	100,3	0,66	23,78	6,606	6,448	6,614	6,586	6,362	0,36
259,9	104,1	0,69	25,34	7,039	6,896	7,049	7,104	6,783	0,39
264,8	109,0	0,72	27,21	7,558	7,494	7,628	7,651	7,336	0,44
269,5	113,7	0,75	29,02	8,061	8,088	8,199	8,206	7,877	0,48
274,2	118,4	0,78	30,83	8,564	8,702	8,772	8,767	8,425	0,52
278,2	122,4	0,81	32,55	9,042	9,241	9,262	9,334	8,895	0,56
281,8	126,0	0,83	34,15	9,486	9,738	9,708	9,719	9,321	0,61
286,4	130,6	0,86	36,05	10,014	10,390	10,281	10,274	9,867	0,65
291,0	135,2	0,89	38,29	10,636	11,060	10,855	10,863	10,412	0,71
296,7	140,9	0,93	40,31	11,197	11,917	11,541	11,609	11,083	0,76
301,3	145,5	0,96	42,50	11,806	12,629	12,089	12,158	11,616	0,82
305,9	150,1	0,99	44,60	12,389	13,360	12,639	12,710	12,137	0,88
310,4	154,6	1,02	46,27	12,853	14,093	13,179	-	12,632	0,92
314,3	158,5	1,04	48,04	13,344	14,742	13,649	-	13,045	0,96

Tabela 5.5 (c) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor circular
(D=150mm, P=200mm)

Vertedor:		Data:	18/01/2016		Observações:				
	CIRCULAR	Início:	17:10						
	D = 151,9 mm	Término:	20:10						
	P = 198,3 mm	Experimento:	13						
Dados:									
Leitura inicial do fundo (mm)			1,1		Posições (cm)				
Leitura da soleira (mm)			199,4		Vertedor		210		
Altura da soleira (mm)			198,3		Medidor de carga		130		
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			198,3						
Leitura (mm)	Carga (mm)	η (H/D)	Vazão						V ² /2g (mm)
			Experimental (m ³ /h)	Netto (L/s)	Ramponi (L/s)	Staus (L/s)	Vatankhah (L/s)		
217,1	17,7	0,12	0,80	0,222	0,281	0,287	0,281	0,254	0,00
217,1	17,7	0,12	0,82	0,228	0,281	0,287	0,281	0,254	0,00
217,1	17,7	0,12	0,83	0,231	0,281	0,287	0,281	0,254	0,00
221,7	22,3	0,15	1,42	0,394	0,426	0,447	0,426	0,394	0,00
225,2	25,8	0,17	1,82	0,506	0,554	0,567	0,537	0,520	0,00
228,3	28,9	0,19	2,33	0,647	0,681	0,672	0,660	0,645	0,00
232,1	32,7	0,22	2,89	0,803	0,851	0,849	0,868	0,815	0,01
234,9	35,5	0,23	3,40	0,944	0,987	1,002	0,942	0,951	0,01
240,3	40,9	0,27	4,40	1,222	1,275	1,296	1,276	1,241	0,01
243,6	44,2	0,29	5,34	1,483	1,467	1,475	1,461	1,435	0,02
250,3	50,9	0,34	6,81	1,892	1,893	1,937	1,968	1,866	0,03
253,2	53,8	0,35	7,48	2,078	2,092	2,148	2,075	2,068	0,04
256,8	57,4	0,38	8,51	2,364	2,352	2,410	2,418	2,331	0,05
262,0	62,6	0,41	9,67	2,686	2,751	2,818	2,782	2,734	0,06
264,1	64,7	0,43	10,48	2,911	2,920	3,005	3,035	2,905	0,07
267,8	68,4	0,45	11,65	3,236	3,229	3,334	3,302	3,215	0,08
273,1	73,7	0,49	13,19	3,664	3,695	3,806	3,857	3,682	0,10
276,5	77,1	0,51	14,47	4,019	4,009	4,125	4,150	3,994	0,11
281,9	82,5	0,54	16,16	4,489	4,530	4,680	4,602	4,510	0,14
287,2	87,8	0,58	18,04	5,011	5,070	5,226	5,240	5,039	0,16
290,8	91,4	0,60	19,51	5,419	5,452	5,601	5,564	5,409	0,19
294,1	94,7	0,62	20,81	5,781	5,812	5,976	5,895	5,757	0,21
297,0	97,6	0,64	22,04	6,122	6,138	6,306	6,242	6,068	0,23
299,2	99,8	0,66	23,05	6,403	6,390	6,557	6,586	6,307	0,24
302,8	103,4	0,68	24,41	6,781	6,813	6,969	6,945	6,705	0,27
306,3	106,9	0,70	25,89	7,192	7,235	7,373	7,296	7,098	0,29
310,2	110,8	0,73	27,51	7,642	7,719	7,846	7,830	7,542	0,32
314,1	114,7	0,76	29,08	8,078	8,217	8,320	8,402	7,993	0,35
318,9	119,5	0,79	31,07	8,631	8,849	8,906	8,966	8,554	0,39
325,4	126,0	0,83	33,39	9,275	9,738	9,708	9,719	9,321	0,43
330,4	131,0	0,86	35,68	9,911	10,447	10,330	10,274	9,915	0,48
335,4	136,0	0,90	37,90	10,528	11,179	10,955	11,048	10,507	0,53
339,5	140,1	0,92	39,67	11,019	11,795	11,446	11,429	10,989	0,56
344,9	145,5	0,96	41,85	11,625	12,629	12,089	12,158	11,616	0,61
350,1	150,7	0,99	44,19	12,275	13,457	12,711	12,710	12,204	0,66
354,4	155	1,02	45,48	12,633	14,159	13,227	-	12,675	0,68
357,8	158,4	1,04	47,25	13,125	14,725	13,636	-	13,035	0,72

Tabela 5.6 (a) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor circular (D=200mm, P=100mm)

Vertedor:		Data:	27/01/2016		Observações:				
CIRCULAR		Início:	17:15						
D = 199,7 mm		Término:	20:45						
P = 102,9 mm		Experimento:	20						
Dados:									
Leitura inicial do fundo (mm)			1,5		Posições (cm)				
Leitura da soleira (mm)			104,4		Vertedor		210		
Altura da soleira (mm)			102,9		Medidor de carga		120		
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)			102,9						
Leitura (mm)	Carga (mm)	η (H/D)	Vazão						V ² /2g (mm)
			Experimental (m ³ /h)	Netto (L/s)	Ramponi (L/s)	Staus (L/s)	Vatankhah (L/s)		
126,6	22,2	0,11	1,78	0,494	0,511	0,513	0,469	0,459	0,01
132,2	27,8	0,14	2,59	0,719	0,767	0,807	0,741	0,706	0,02
136,5	32,1	0,16	3,48	0,967	0,995	1,030	0,951	0,928	0,03
142,3	37,9	0,19	4,76	1,322	1,343	1,327	1,308	1,272	0,05
145,1	40,7	0,20	5,44	1,511	1,527	1,494	1,436	1,456	0,06
149,5	45,1	0,23	6,59	1,831	1,839	1,857	1,870	1,767	0,08
153,4	49,0	0,25	7,83	2,175	2,136	2,177	2,186	2,066	0,11
157,0	52,6	0,26	8,73	2,425	2,428	2,473	2,353	2,360	0,13
160,9	56,5	0,28	9,91	2,753	2,763	2,792	2,708	2,698	0,16
165,3	60,9	0,30	11,45	3,181	3,164	3,180	3,084	3,104	0,20
169,4	65,0	0,33	12,86	3,572	3,559	3,629	3,690	3,504	0,24
173,9	69,5	0,35	14,60	4,056	4,017	4,122	4,114	3,967	0,29
178,0	73,6	0,37	16,32	4,533	4,455	4,572	4,558	4,411	0,35
182,9	78,5	0,39	18,59	5,164	5,006	5,110	5,021	4,968	0,43
187,8	83,4	0,42	20,64	5,733	5,584	5,732	5,765	5,552	0,50
191,2	86,8	0,43	22,48	6,244	6,003	6,188	6,014	5,973	0,57
195,3	90,9	0,46	24,35	6,764	6,525	6,738	6,816	6,498	0,65
198,9	94,5	0,47	26,17	7,269	6,999	7,221	7,093	6,973	0,72
203,8	99,4	0,50	28,72	7,978	7,669	7,880	7,932	7,641	0,83
208,0	103,6	0,52	30,78	8,550	8,264	8,521	8,520	8,233	0,91
212,9	108,5	0,54	33,30	9,250	8,984	9,280	9,120	8,944	1,02
216,7	112,3	0,56	35,52	9,867	9,560	9,870	9,735	9,510	1,12
224,1	119,7	0,60	39,76	11,044	10,729	11,022	11,026	10,648	1,31
228,0	123,6	0,62	42,42	11,783	11,369	11,688	11,682	11,265	1,44
232,5	128,1	0,64	45,06	12,517	12,128	12,460	12,370	11,991	1,56
237,8	133,4	0,67	48,50	13,472	13,049	13,372	13,395	12,864	1,72
243,2	138,8	0,70	52,12	14,478	14,019	14,304	14,458	13,771	1,90
249,5	145,1	0,73	56,81	15,781	15,190	15,446	15,517	14,849	2,15
253,8	149,4	0,75	60,81	16,892	16,013	16,233	16,261	15,596	2,38
257,3	152,9	0,77	63,58	17,661	16,698	16,876	17,012	16,209	2,53
261,0	156,6	0,78	67,71	18,808	17,435	17,556	17,375	16,862	2,79
265,8	161,4	0,81	70,80	19,667	18,413	18,445	18,498	17,715	2,94
269,7	165,3	0,83	76,43	21,231	19,224	19,174	19,261	18,410	3,32
273,0	168,6	0,84	83,21	23,114	19,923	19,792	19,628	19,000	3,85
285,7	181,3	0,91	88,76	24,656	22,717	22,167	22,254	21,267	3,99

Tabela 5.6 (b) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor circular
(D=200mm, P=150mm)

Vertedor:		Data:		28/01/2016		Observações:			
CIRCULAR		Início:		17:30					
D = 199,7 mm		Término:		18:20					
P = 152,5 mm		Experimento:		21					
Dados:									
Leitura inicial do fundo (mm)				1,6		Posições (cm)			
Leitura da soleira (mm)				154,1		Vertedor		210	
Altura da soleira (mm)				152,5		Medidor de carga		100	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)				152,5					
Leitura	Carga	η (h/D)	Vazão						V ² /2g
			Experimental		Netto	Ramponi	Staus	Vatankhah	
(mm)	(mm)	-	(m ³ /h)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(mm)
173,3	19,2	0,10	0,96	0,267	0,393	0,351	0,393	0,348	0,00
179,5	25,4	0,13	1,92	0,533	0,652	0,682	0,647	0,594	0,00
180,0	25,9	0,13	2,03	0,564	0,675	0,708	0,645	0,617	0,01
182,8	28,7	0,14	2,49	0,692	0,813	0,854	0,738	0,750	0,01
185,9	31,8	0,16	3,04	0,844	0,978	1,014	0,951	0,912	0,01
196,6	42,5	0,21	5,44	1,511	1,652	1,643	1,575	1,580	0,03
203,0	48,9	0,24	7,18	1,994	2,128	2,169	2,023	2,058	0,05
209,8	55,7	0,28	9,36	2,600	2,693	2,727	2,710	2,627	0,08
219,1	65,0	0,33	12,55	3,486	3,559	3,629	3,690	3,504	0,14
226,3	72,2	0,36	15,39	4,275	4,303	4,418	4,337	4,257	0,19
233,0	78,9	0,40	18,23	5,064	5,052	5,154	5,265	5,015	0,25
238,9	84,8	0,42	20,91	5,808	5,755	5,920	5,765	5,724	0,32
244,8	90,7	0,45	23,84	6,622	6,499	6,711	6,544	6,472	0,39
250,5	96,4	0,48	26,61	7,392	7,255	7,477	7,373	7,229	0,47
255,8	101,7	0,51	29,43	8,175	7,992	8,227	8,224	7,963	0,55
262,1	108,0	0,54	32,82	9,117	8,909	9,202	9,120	8,870	0,65
267,0	112,9	0,57	35,52	9,867	9,653	9,963	10,049	9,601	0,73
272,9	118,8	0,59	39,04	10,844	10,583	10,882	10,703	10,507	0,85
277,0	122,9	0,62	41,92	11,644	11,253	11,568	11,682	11,153	0,95
286,6	132,5	0,66	47,75	13,264	12,891	13,217	13,051	12,714	1,15
292,9	138,8	0,70	52,01	14,447	14,019	14,304	14,458	13,771	1,30
304,4	150,3	0,75	59,72	16,589	16,188	16,398	16,261	15,753	1,59
312,3	158,2	0,79	68,60	19,056	17,758	17,851	17,768	17,146	2,00
314,7	160,6	0,80	66,77	18,547	18,248	18,296	18,133	17,572	1,86
321,4	167,3	0,84	71,34	19,817	19,647	19,549	19,628	18,768	2,04
326,7	172,6	0,86	75,95	21,097	20,786	20,543	20,360	19,716	2,23
330,9	176,8	0,89	77,96	21,656	21,709	21,334	21,528	20,466	2,29
336,4	182,3	0,91	82,20	22,833	22,944	22,346	22,254	21,445	2,47
341,2	187,1	0,94	84,95	23,597	24,048	23,206	23,399	22,291	2,56
348,4	194,3	0,97	90,20	25,056	25,746	24,500	24,477	23,538	2,77
354,0	199,9	1,00	93,24	25,900	27,102	25,511	-	24,483	2,87
359,4	205,3	1,03	96,99	26,942	28,439	26,489	-	25,365	3,01

Tabela 5.6 (c) – Valores experimentais de medição de vazão em vertedor circular
(D=200mm, P=200mm)

Vertedor:		Data:		28/01/2016		Observações:			
CIRCULAR		Início:		19:10					
D = 199,7 mm		Término:		21:00					
P = 197,2 mm		Experimento:		22					
Dados:									
Leitura inicial do fundo (mm)				1,6		Posições (cm)			
Leitura da soleira (mm)				198,8		Vertedor		210	
Altura da soleira (mm)				197,2		Medidor de carga		100	
Altura da soleira (com paquímetro) (mm)				197,2					
Leitura	Carga	η (h/D)	Vazão						V ² /2g
			Experimental		Netto	Ramponi	Staus	Vatankhah	
(mm)	(mm)	-	(m ³ /h)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(mm)
218,7	19,9	0,10	1,03	0,286	0,419	0,389	0,392	0,373	0,00
226,2	27,4	0,14	2,23	0,619	0,747	0,786	0,742	0,687	0,00
231,5	32,7	0,16	3,24	0,900	1,029	1,061	0,949	0,962	0,01
239,3	40,5	0,20	4,90	1,361	1,514	1,478	1,436	1,443	0,02
246,4	47,6	0,24	6,94	1,928	2,027	2,063	2,025	1,956	0,03
255,5	56,7	0,28	9,64	2,678	2,781	2,808	2,708	2,716	0,06
261,1	62,3	0,31	11,63	3,231	3,297	3,333	3,281	3,238	0,08
269,5	70,7	0,35	14,79	4,108	4,143	4,254	4,113	4,095	0,12
278,3	79,5	0,40	18,37	5,103	5,121	5,219	5,265	5,085	0,18
284,4	85,6	0,43	21,86	6,072	5,853	6,027	6,014	5,823	0,24
285,5	86,7	0,43	21,76	6,044	5,990	6,174	6,014	5,961	0,24
295,2	96,4	0,48	26,41	7,336	7,255	7,477	7,373	7,229	0,33
301,1	102,3	0,51	29,50	8,194	8,078	8,320	8,224	8,048	0,40
308,0	109,2	0,55	33,20	9,222	9,089	9,389	9,427	9,047	0,48
315,0	116,2	0,58	37,59	10,442	10,169	10,476	10,384	10,104	0,59
322,7	123,9	0,62	42,02	11,672	11,419	11,739	11,682	11,313	0,70
332,9	134,1	0,67	48,54	13,483	13,173	13,493	13,395	12,980	0,88
339,9	141,1	0,71	52,97	14,714	14,442	14,715	14,810	14,162	1,00
347,4	148,6	0,74	57,77	16,047	15,859	16,087	15,902	15,457	1,14
356,5	157,7	0,79	64,57	17,936	17,657	17,759	17,768	17,057	1,36
363,6	164,8	0,83	69,30	19,250	19,119	19,081	19,261	18,321	1,50
371,0	172,2	0,86	74,35	20,653	20,699	20,468	20,360	19,645	1,66
375,7	176,9	0,89	77,63	21,564	21,731	21,353	21,528	20,484	1,76
380,6	181,8	0,91	81,25	22,569	22,831	22,256	22,254	21,356	1,88
385,8	187,0	0,94	84,37	23,436	24,024	23,188	23,399	22,273	1,97
392,8	194,0	0,97	89,19	24,775	25,674	24,446	24,477	23,487	2,13
401,2	202,4	1,01	94,50	26,250	27,718	25,964	-	24,896	2,29
405,3	206,5	1,03	97,30	27,028	28,740	26,707	-	25,557	2,38

5.5 Análise de Erros

O processo de medição de vazão através de um vertedor é suscetível a erros de diferentes origens. A existência de imperfeições na estrutura vertente, principalmente na soleira, modifica o comportamento da veia vertente e, portanto, a relação entre carga e vazão. Erros na obtenção dos dados de carga e vazão também influenciam na precisão da relação obtida. A principal fonte de erro encontrada nos experimentos relativos a este trabalho foi relacionada à leitura de pequenas vazões, relacionadas com as pequenas cargas hidráulicas. Mesmo com o uso de um aparelho preciso para obtenção deste dado, pequenas variações podem significar um erro relativo considerável em escoamentos de pequena intensidade. Nestes casos também foi observada uma influência muito grande de fatores de segunda ordem na vazão, tais como viscosidade da água, tensão superficial, etc. Conhecendo-se as possíveis fontes de erro, foi possível adotar as providências necessárias para minimizar seus efeitos. Para tal, em fluxos de pequena intensidade, a vazão era conferida de forma manual por, pelo menos, três vezes, e o intervalo de tempo gasto para sua medição através do medidor ultrassônico era aumentada, de forma a diluir as variações. Quanto à influência de fatores de segunda ordem, os dados que se distanciaram muito da lógica encontrada foram descartados.

Ressalta-se aqui que os valores reais de altura da soleira e diâmetro tiveram ligeira variação em relação aos valores nominais de projeto devido a aspectos construtivos, mas não exerceram influência nos resultados.

6. DISCUSSÃO

6.1 Vertedor Triangular

Primeiro verificou-se o comportamento do coeficiente de descarga experimental e, portanto, da vazão em relação à carga hidráulica. Buscou-se analisar a variação deste coeficiente para vertedores triangulares de diferentes aberturas e alturas de soleira e encontrar um valor médio que pudesse indicar uma tendência passível de ser extrapolada para cargas superiores.

Os Gráficos 6.1 (a) 6.1 (c) ilustram o comportamento do coeficiente de descarga experimental em relação à carga hidráulica. É possível notar que o coeficiente de descarga tem uma tendência de crescimento acentuado para pequenas vazões e, após certa carga hidráulica, tende a ficar constante com pequenas variações em torno de um valor médio. Isso pode ser explicado pela grande participação dos efeitos de segunda ordem (tensão superficial, viscosidade, etc) nas pequenas vazões. Percebe-se também que a altura da soleira exerce alguma influência no valor do coeficiente de vazão, pois as curvas, embora muito próximas, são visivelmente distintas para cada valor de altura de soleira, especialmente nas pequenas cargas hidráulicas. Ressalta-se que esta influência diminui com o acréscimo de carga de tal forma que as curvas “ $C_d \times h$ ” de diferentes alturas de soleira tendem a se sobrepor. Porém não se pode determinar tal relação apenas com os dados coletados, uma vez que a variedade de alturas de soleira é pequena e a influência no coeficiente de descarga não segue uma lógica óbvia de ser percebida nem determinada, conforme ilustrado pelo Gráfico 6.2.

Observou-se também que, a partir de uma determinada carga, o coeficiente de descarga possui tendência a ficar constante, nos valores de 0,61; 0,59 e 0,60 para as aberturas de 60°, 90° e 100°, respectivamente, com variações da ordem de +- 0,01 entre as medições de vertedores de diferentes alturas de soleira para o mesmo ângulo de abertura e mesma carga hidráulica.

Gráfico 6.1 (a) – Variação do coeficiente de descarga experimental vertedor triangular $\alpha = 60^\circ$ - $C_d \rightarrow (0,61)$

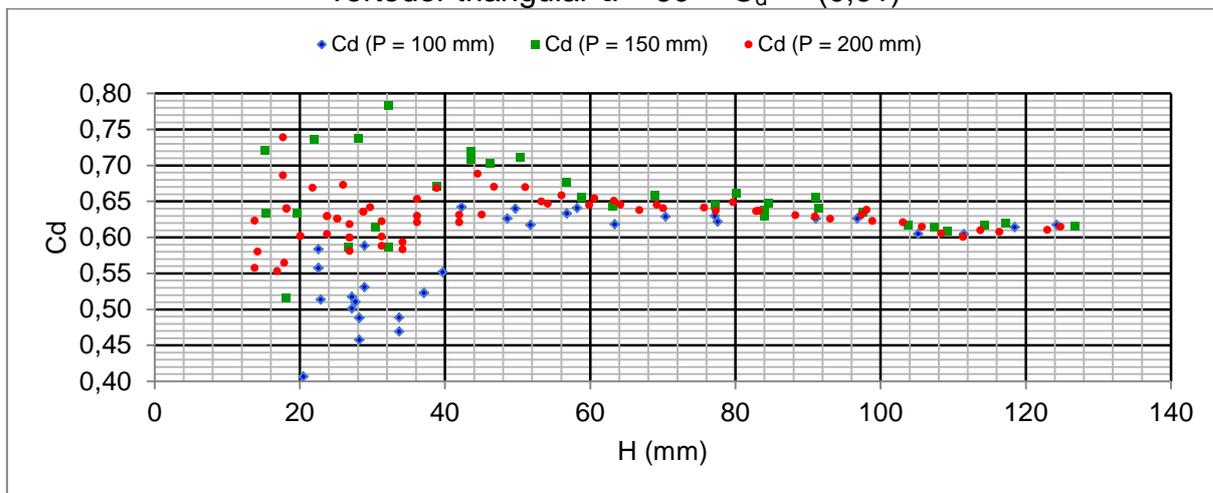


Gráfico 6.1 (b) – Variação do coeficiente de descarga experimental vertedor triangular $\alpha = 90^\circ$ - $C_d \rightarrow (0,59)$

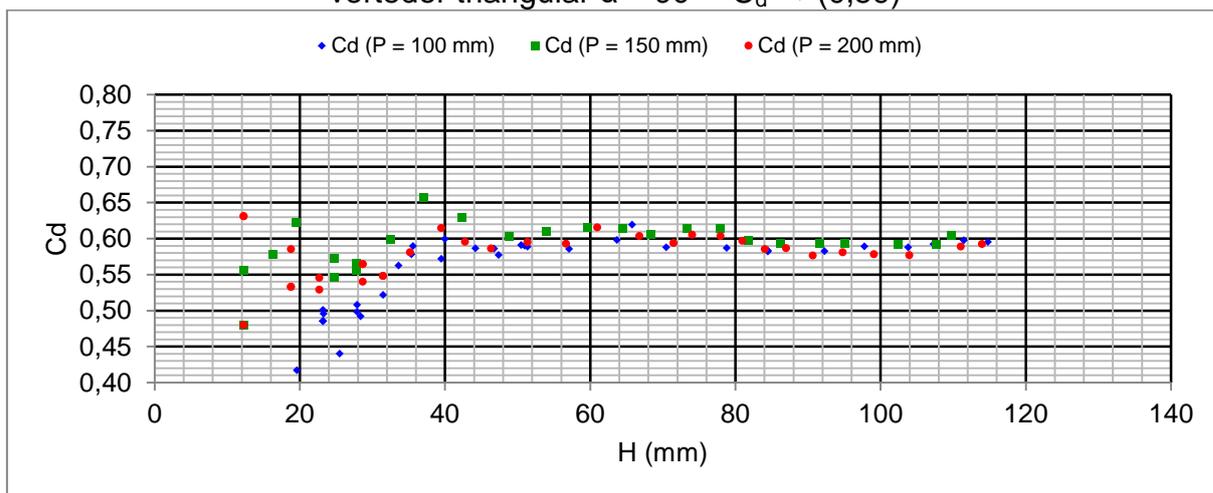
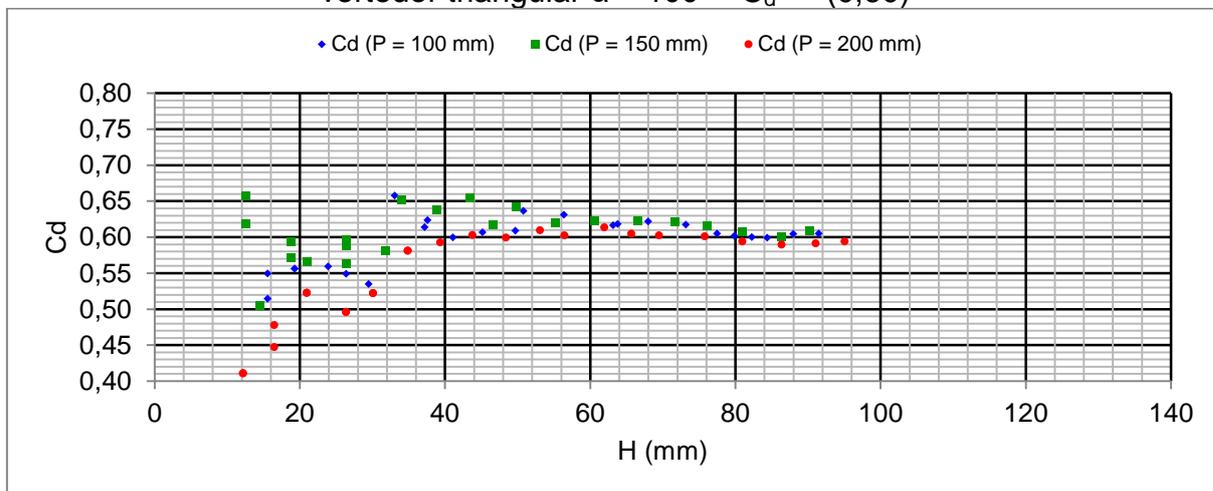


Gráfico 6.1 (c) – Variação do coeficiente de descarga experimental vertedor triangular $\alpha = 100^\circ$ - $C_d \rightarrow (0,60)$



Esses valores de tendência do coeficiente de vazão podem ser confirmados ao se considerar a Equação 4.7, por onde se tem que:

$$Q = f(\alpha, C_d, h^{2,5})$$

Então, para um determinado ângulo de abertura α , e considerando-se o coeficiente de descarga constante, a linha de tendência que representa a curva gráfica $Q \times h^{2,5}$ passa a ser uma reta, cuja inclinação permite quantificar o valor do coeficiente de vazão. Uma vez que a reta se ajuste bem aos pontos, então se pode afirmar matematicamente que o coeficiente de descarga é constante (ou pelo menos, tende a ser).

Os Gráficos 6.3 (a) a 6.3 (c) apresentam as retas provenientes dessa abordagem para cada ângulo de abertura. Por suas inclinações encontram-se os valores dos coeficientes de descarga médios para cada abertura. Que são mostrados pela Tabela 6.1. Assim, ratifica-se a observação de que o coeficiente de descarga possui tendência de ficar constante, nos valores previamente sugeridos pelos Gráficos 6.1 (a) a 6.1 (c).

Tabela 6.1 – Valores médios do coeficiente de descarga

α (°)	P (mm)	Cd	Cd médio	α (°)	P (mm)	Cd	Cd médio	α (°)	P (mm)	Cd	Cd médio
60	100	0,61	0,61	90	100	0,59	0,59	100	100	0,61	0,60
	150	0,62			150	0,60			150	0,61	
	200	0,59			200	0,59			200	0,59	

Gráfico 6.2 – Variação de “ C_d ” em função de “P” para diferentes aberturas

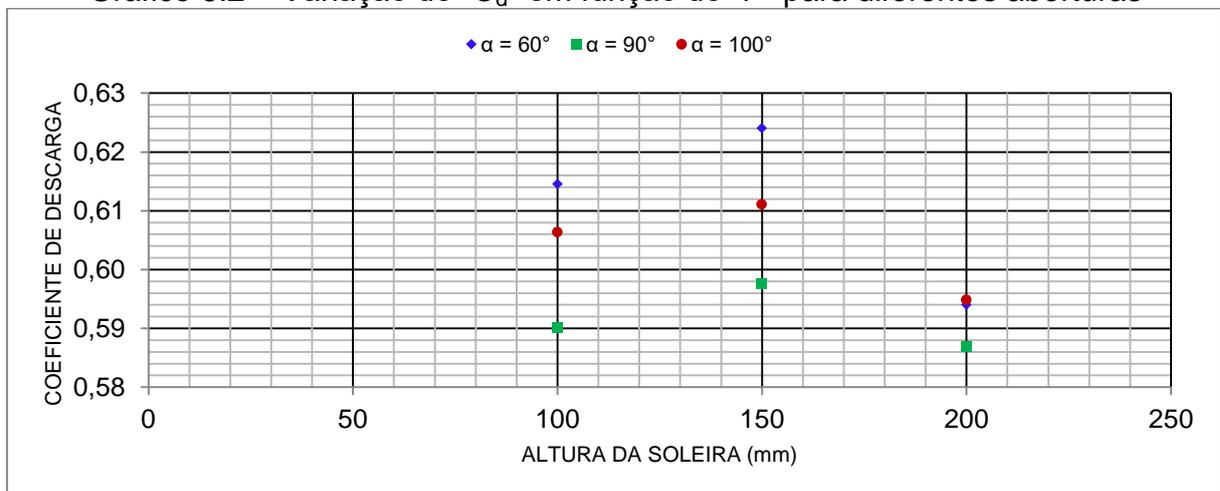


Gráfico 6.3 (a) – Curva de tendência linear da função $Q = f(h^{2,5})$
vertedor triangular $\alpha = 60^\circ$

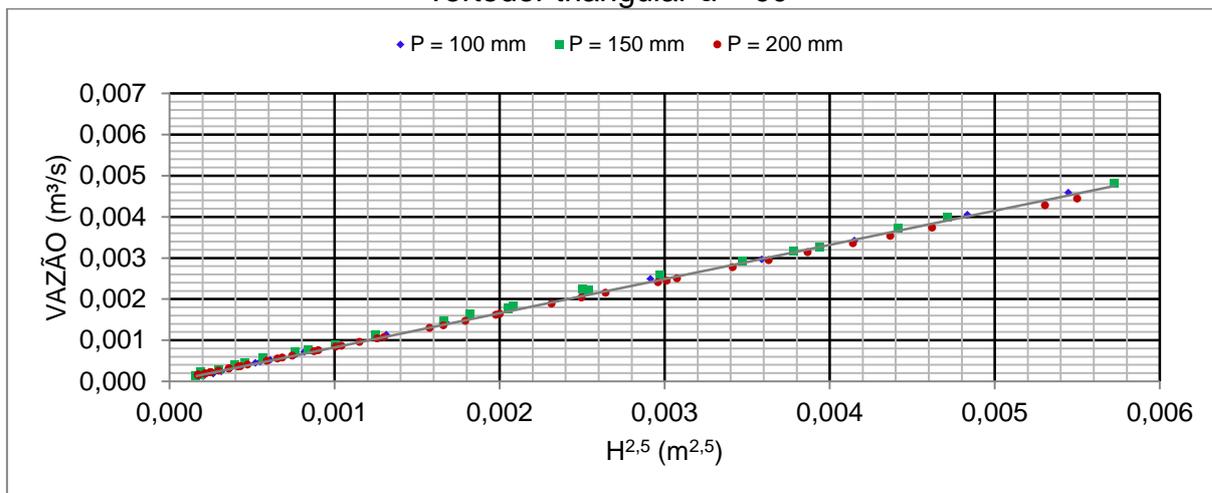


Gráfico 6.3 (b) – Curva de tendência linear da função $Q = f(h^{2,5})$
vertedor triangular $\alpha = 90^\circ$

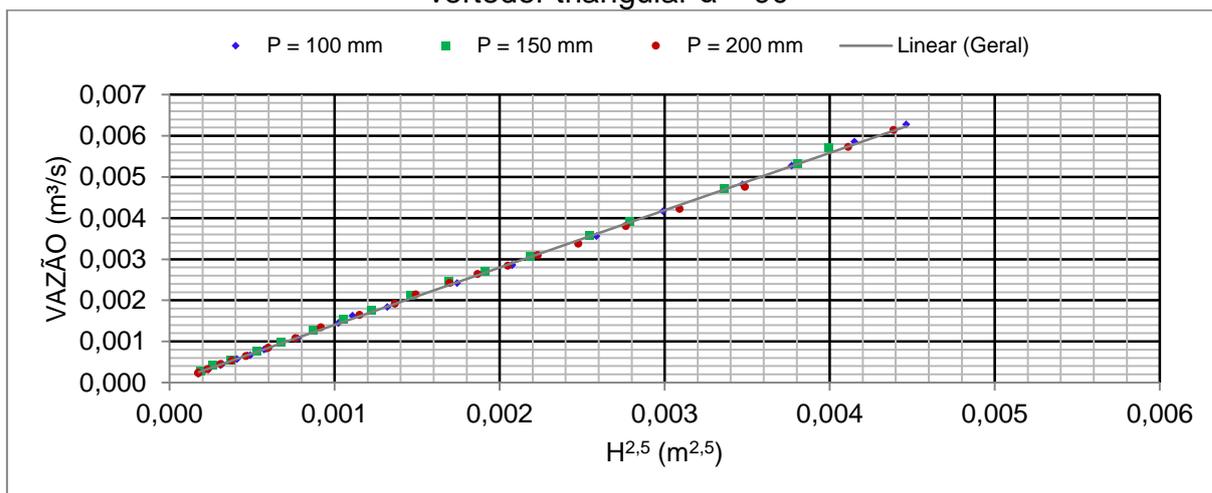
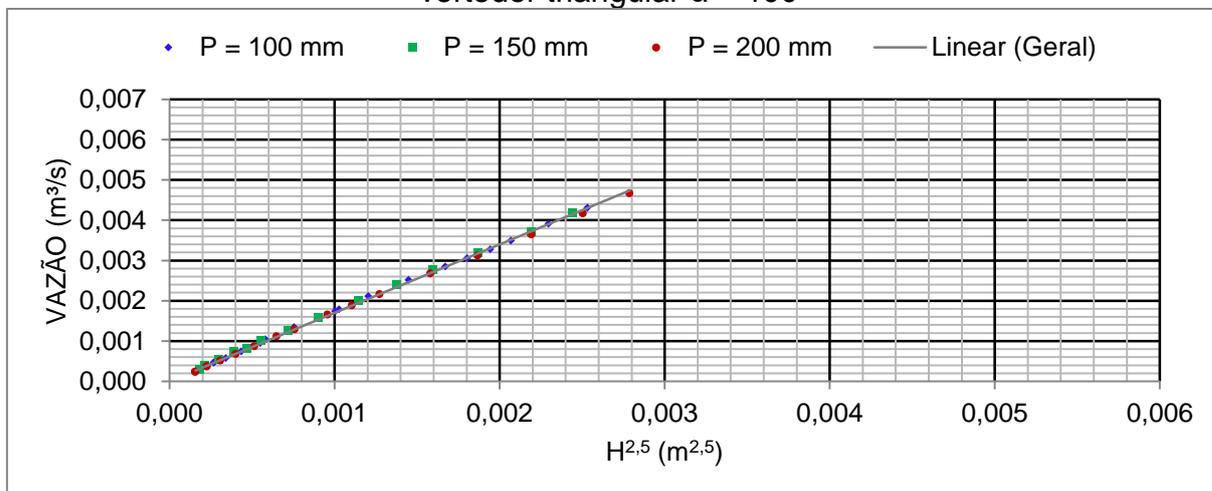


Gráfico 6.3 (c) – Curva de tendência linear da função $Q = f(h^{2,5})$
vertedor triangular $\alpha = 100^\circ$



Após isso, utilizando-se das formulações consagradas na literatura e exemplificadas no Capítulo 04, buscou-se ajustar seus parâmetros a fim de que as equações se adequassem aos dados experimentais o mais precisamente possível.

Os ajustes foram feitos através de regressão não linear aplicada aos dados experimentais de vazão e carga hidráulica por meio do uso do software Origin. Para cada formulação respeitou-se a forma original proposta por seu autor e apenas se ajustaram seus coeficientes numéricos. Alguns dos coeficientes precisaram ser mantidos iguais para garantir a melhor precisão.

Como explicado no Capítulo 04, vazões referentes a pequenas cargas não se enquadram nos modelos propostos devido a vários fatores. Assim, restringiu-se o uso de dados apenas aos relacionados a cargas hidráulicas superiores a 30 mm (trinta milímetros) para efetuar as análises com maior precisão. A maioria dos autores sugere que o limite seja de 50 mm, porém, para se garantir uma quantidade razoável de dados devido as limitações geométricas do canal utilizado, escolheu-se um limite inferior.

Os efeitos da velocidade de aproximação se mostraram insignificantes perante a magnitude da carga hidráulica em cada medição, como evidenciado nas Tabelas 5.3 (a) a 5.3 (c) para um vertedor de abertura de 100° . Para uma mesma carga, quanto maior a abertura, maior é a vazão e, por conseguinte, maior é a velocidade de aproximação. Assim, a magnitude desse efeito é ainda menor nos vertedores de menor aberturas. Portanto, a contribuição do termo cinético pode ser desconsiderada nas análises, sem que isso acarrete em perdas de precisão.

As Tabelas 6.2 (a) a 6.2 (c) mostram as equações clássicas da literatura originais e modificadas pelos coeficientes experimentais encontrados através de regressão não linear. Também evidenciam a diferença provocada pela limitação mínima da carga hidráulica a 30 mm a suas formulações.

Tabela 6.2 (a) – Equações de vazão e coeficiente de descarga ajustadas experimentalmente - vertedor triangular $\alpha = 60^\circ$

Autor / Abordagem	Equação	Equação Ajustada ($h > 0$ mm)	Equação Ajustada ($h > 30$ mm)
Curva de Potência	$Q = P1 h^{P2}$	$Q = 0,74 h^{2,45}$	$Q = 0,73 h^{2,44}$
Greve	[4.12]	$C_d = \frac{0,594}{(3,28 h)^{0,03} \tan\left(\frac{60}{2}\right)^{0,004}}$	$C_d = \frac{0,605}{(3,28 h)^{0,03} \tan\left(\frac{60}{2}\right)^{0,004}}$
Lenz	[4.13]	$C_d = 0,564 + \frac{0,0203}{(3,28 h)^{0,582}}$	$C_d = 0,583 + \frac{0,0203}{(3,28 h)^{0,582}}$
Kindsvater e Carter	[4.14]	$Kh = 0,0012$ $C_e = 0,591$	$Kh = 0,0012$ $C_e = 0,591$

Tabela 6.2 (b) – Equações de vazão e coeficiente de descarga ajustadas experimentalmente - vertedor triangular $\alpha = 90^\circ$

Autor / Abordagem	Equação	Equação Ajustada ($h > 0$ mm)	Equação Ajustada ($h > 30$ mm)
Thomson	[4.8]	$Q = 1,38 h^{2,49}$	$Q = 1,36 h^{2,49}$
Greve	[4.12]	$C_d = \frac{0,553}{(3,28 h)^{0,03} \tan\left(\frac{90}{2}\right)^{0,004}}$	$C_d = \frac{0,565}{(3,28 h)^{0,03} \tan\left(\frac{90}{2}\right)^{0,004}}$
Lenz	[4.13]	$C_d = 0,627 - \frac{0,016}{(3,28 h)^{0,582}}$	$C_d = 0,551 + \frac{0,016}{(3,28 h)^{0,588}}$
Kindsvater e Carter	[4.14]	$Kh = 0,00078$ $C_e = 0,580$	$Kh = 0,00078$ $C_e = 0,579$

Tabela 6.2 (c) – Equações de vazão e coeficiente de descarga ajustadas experimentalmente - vertedor triangular $\alpha = 100^\circ$

Autor / Abordagem	Equação	Equação Ajustada ($h > 0$ mm)	Equação Ajustada ($h > 30$ mm)
Curva de Potência	$Q = P1 h^{P2}$	$Q = 1,51 h^{2,45}$	$Q = 1,47 h^{2,44}$
Greve	[4.12]	$C_d = \frac{0,556}{(3,28 h)^{0,03} \tan\left(\frac{100}{2}\right)^{0,004}}$	$C_d = \frac{0,583}{(3,28 h)^{0,03} \tan\left(\frac{100}{2}\right)^{0,004}}$
Lenz	[4.13]	$C_d = 0,643 - \frac{0,015}{(3,28 h)^{0,582}}$	$C_d = 0,624 + \frac{0,0062}{(3,28 h)^{0,582}}$
Kindsvater e Carter	[4.14]	$Kh = 0,0008$ $C_e = 0,588$	$Kh = 0,0008$ $C_e = 0,588$

Os gráficos 6.4 (a) a 6.4 (c) comparam os dados de vazão obtidos através da aplicação das fórmulas mencionadas nas Tabelas 6.2 (a) a 6.2 (c) com os dados reais obtidos em laboratório. É possível notar que, embora todas apresentem a mesma tendência, algumas tendem a subestimar os valores da vazão, enquanto outras superestimam os mesmos.

Os desvios relativos médios e o desvio padrão atribuídos a cada diferente formulação são mostrados na Tabela 6.3, por onde é possível se notar uma precisão reduzida na análise de pequenas vazões (cargas hidráulicas inferiores a 30 mm). Os desvios relativos representam a média dos módulos dos desvios percentuais das respectivas formulações em relação às vazões experimentais. Os Gráficos 6.5 (a) a 6.5 (c) ilustram os desvios relativos correspondentes ao uso da formulação de Curva de Potência, a qual melhor se adequou aos dados experimentais com o menor desvio associado. Percebe-se que, para cargas superiores a 30 mm, 90% dos desvios se encontram entre -5% e +5%, evidenciando a boa precisão desse modelo ajustado para análises práticas.

Gráfico 6.4 (a) – Vazão para as diferentes equações ajustadas experimentalmente vertedor triangular $\alpha = 60^\circ$

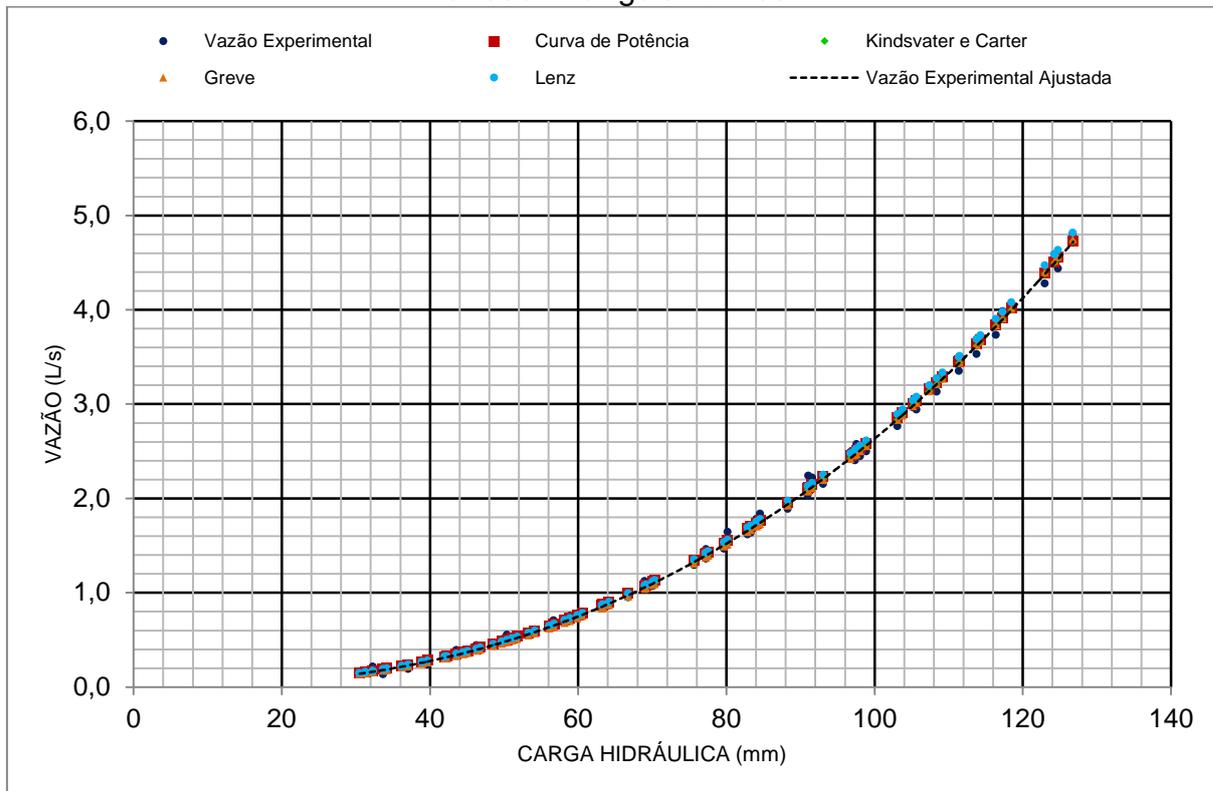


Gráfico 6.4 (b) – Vazão para as diferentes equações ajustadas experimentalmente vertedor triangular $\alpha = 90^\circ$

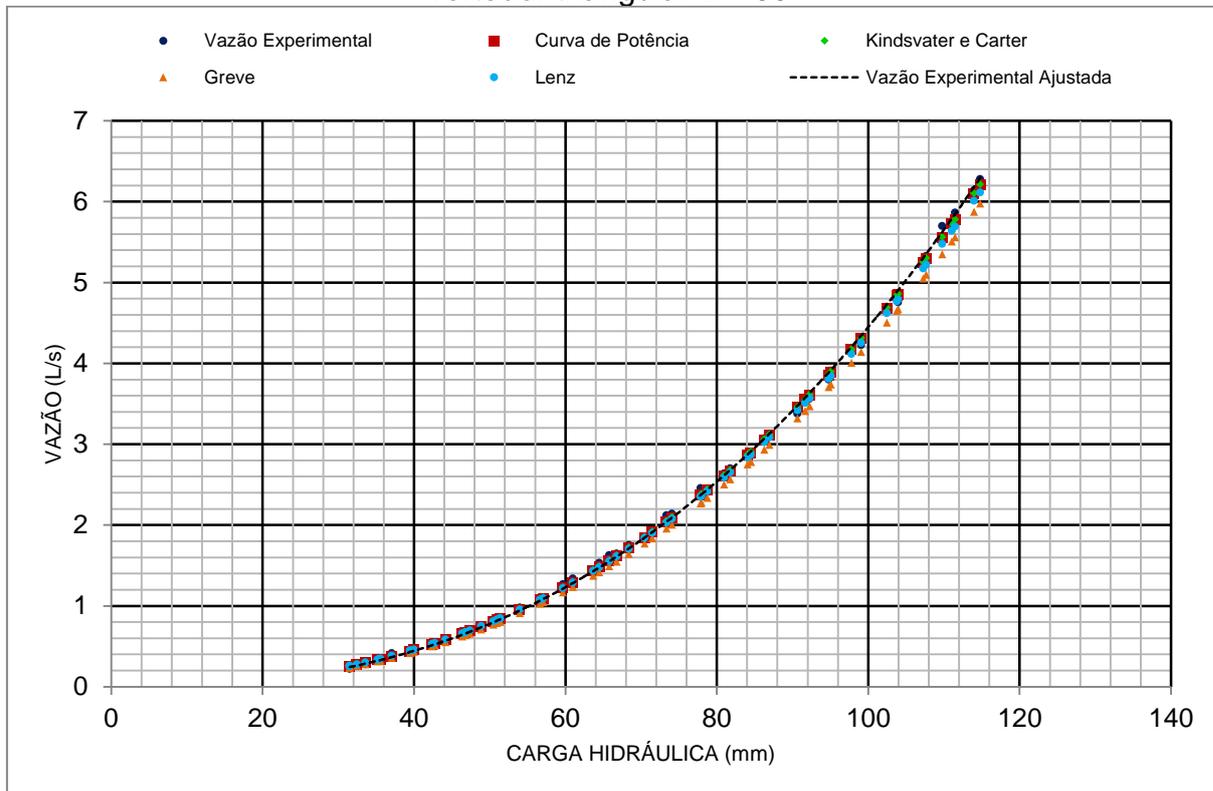


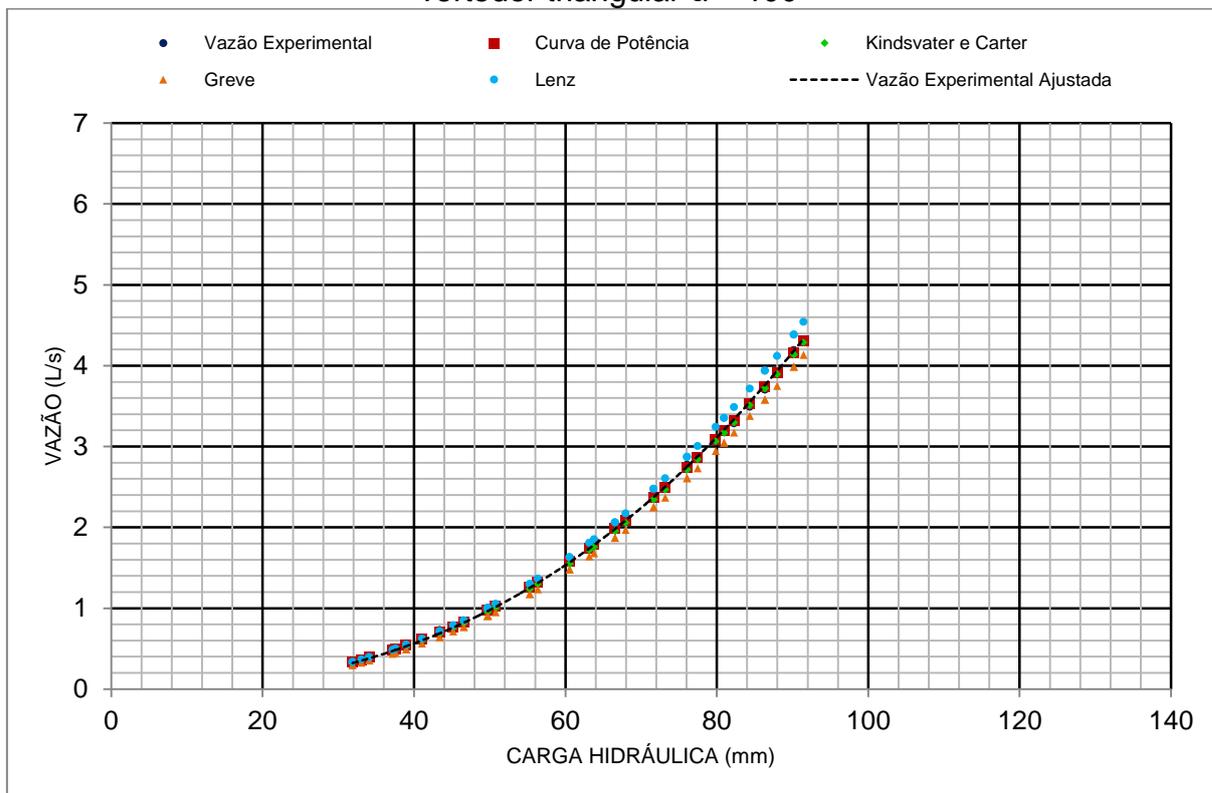
Gráfico 6.4 (c) – Vazão para as diferentes equações ajustadas experimentalmente vertedor triangular $\alpha = 100^\circ$ 

Tabela 6.3 – Desvios relativos e desvio padrão provenientes das equações modificadas em relação aos dados experimentais

Vertedor Triangular $\alpha = 60^\circ$				
	Curva de Potência	Kindsvater e Carter	Greve	Lenz
Desvio Médio (%)	7,7	7,7	7,5	7,8
Desvio Médio ($h > 30$ mm) (%)	3,3	3,3	3,3	3,5
Desvio Padrão ($h > 30$ mm) (L/s)	0,051	0,050	0,052	0,060
Vertedor Triangular $\alpha = 90^\circ$				
	Curva de Potência	Kindsvater e Carter	Greve	Lenz
Desvio Médio (%)	6,8	8,9	7,0	5,1
Desvio ($h > 30$ mm) (%)	1,7	1,9	4,3	2,0
Desvio Padrão ($h > 30$ mm) (L/s)	0,029	0,030	0,088	0,041
Vertedor Triangular $\alpha = 100^\circ$				
	Curva de Potência	Kindsvater e Carter	Greve	Lenz
Desvio Médio (%)	9,2	9,1	5,1	4,9
Desvio ($h > 30$ mm) (%)	1,9	2,4	6,1	3,9
Desvio Padrão ($h > 30$ mm) (L/s)	0,022	0,033	0,106	0,101

Gráfico 6.5 (a) – Desvios relativos atribuídos à formulação de curva de potência
Vertedor triangular $\alpha=60^\circ$

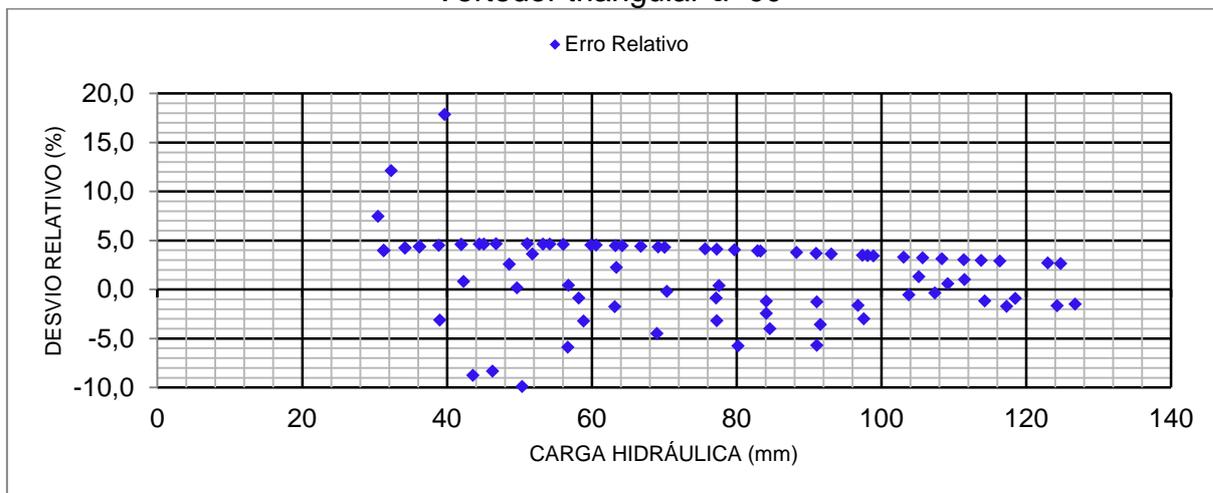


Gráfico 6.5 (b) – Desvios relativos atribuídos à formulação de curva de potência
Vertedor triangular $\alpha=90^\circ$

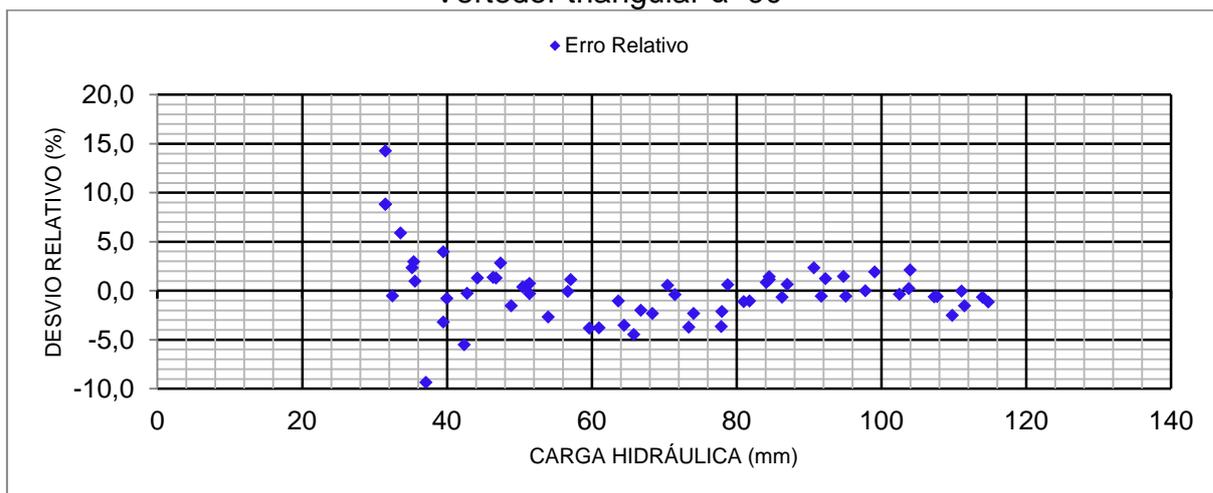
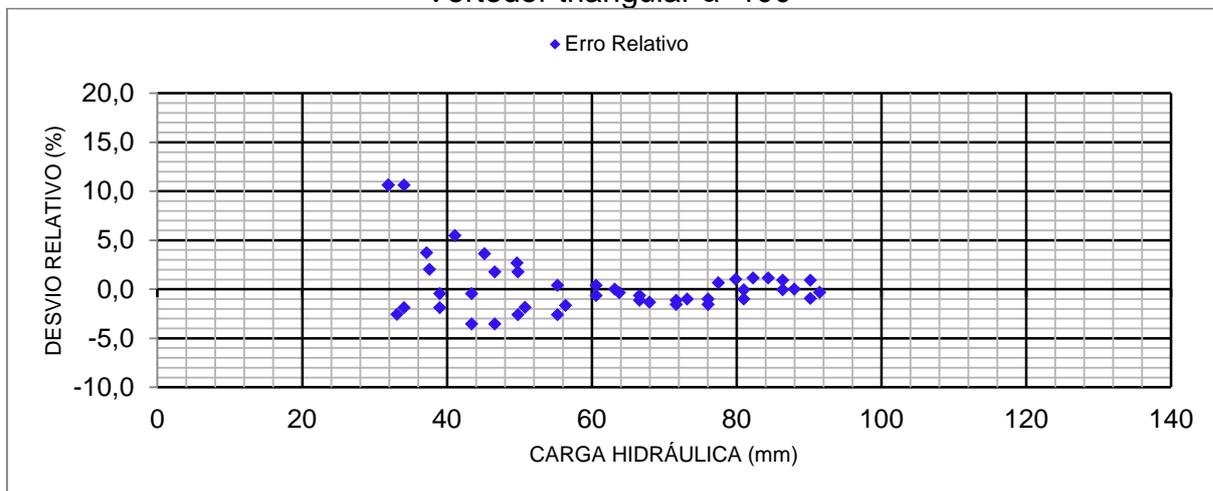


Gráfico 6.5 (c) – Desvios relativos atribuídos à formulação de curva de potência
Vertedor triangular $\alpha=100^\circ$



6.2 Vertedor Circular

Diferentemente do vertedor triangular, aqui não foi possível verificar o comportamento do coeficiente de descarga uma vez que a integração da Equação 4.4 é extremamente complexa e, portanto, não permite uma análise simples e objetiva desse coeficiente em função da carga hidráulica.

No caso do vertedor circular, a primeira análise foi a da variação da vazão em função da carga hidráulica para se averiguar a influência da altura da soleira em uma seção de mesmo diâmetro. Como demonstrado nos Gráficos 6.6 (a) a 6.6 (c), a altura da soleira não exerce influência perceptiva na determinação da vazão na faixa de vazões estudadas. Ressalta-se que nas pequenas vazões a escala gráfica não permite visualizar com clareza as variações de resultados. Independentemente da altura da soleira, as curvas “ Q ” x “ H ” permanecem as mesmas, sem deslocamentos ou variações significativas, exceto nos de diâmetro de 100 mm e 200 mm com altura da soleira de 100 mm, que são explicados por erros de medidas da vazão. É importante destacar a diferença de análise aqui quando comparada à análise feita no vertedor triangular, da influência da altura da soleira no coeficiente de descarga.

Gráfico 6.6 (a) – Variação da vazão experimental vertedor circular – $D = 100$ mm

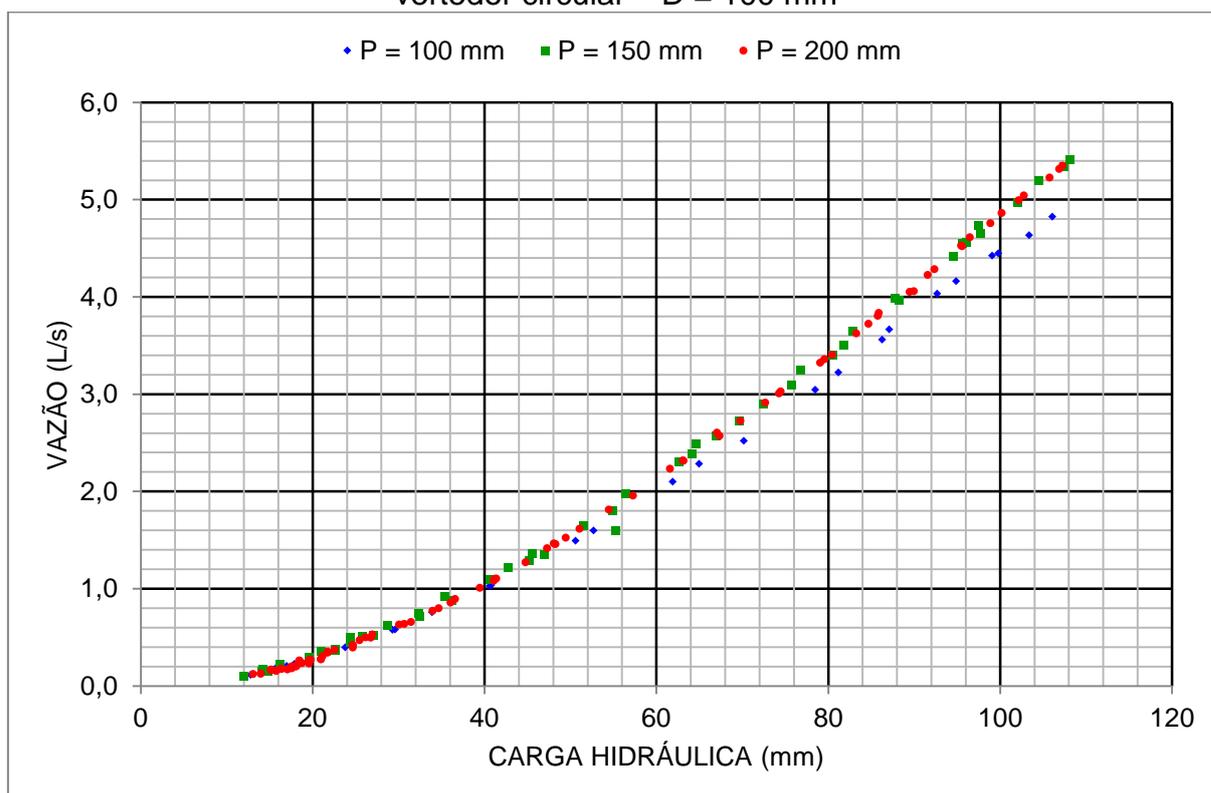


Gráfico 6.6 (b) – Variação da vazão experimental
vertedor circular – D = 150 mm

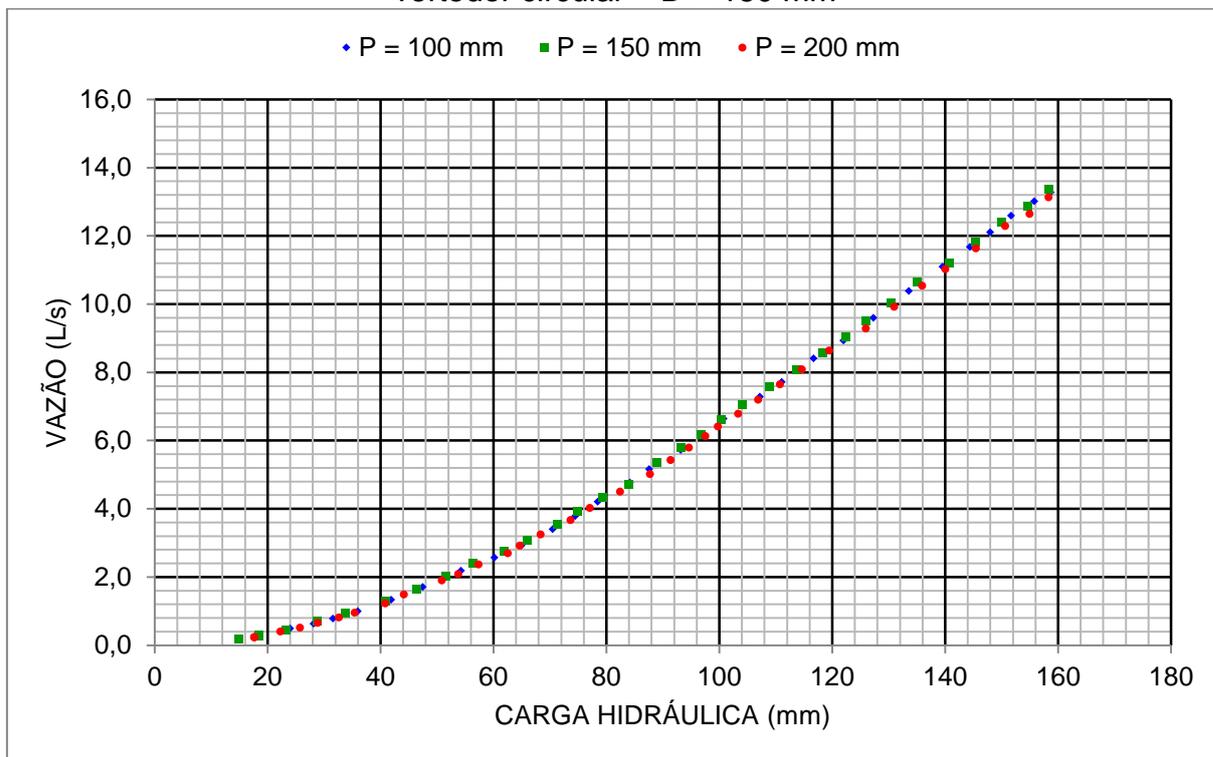
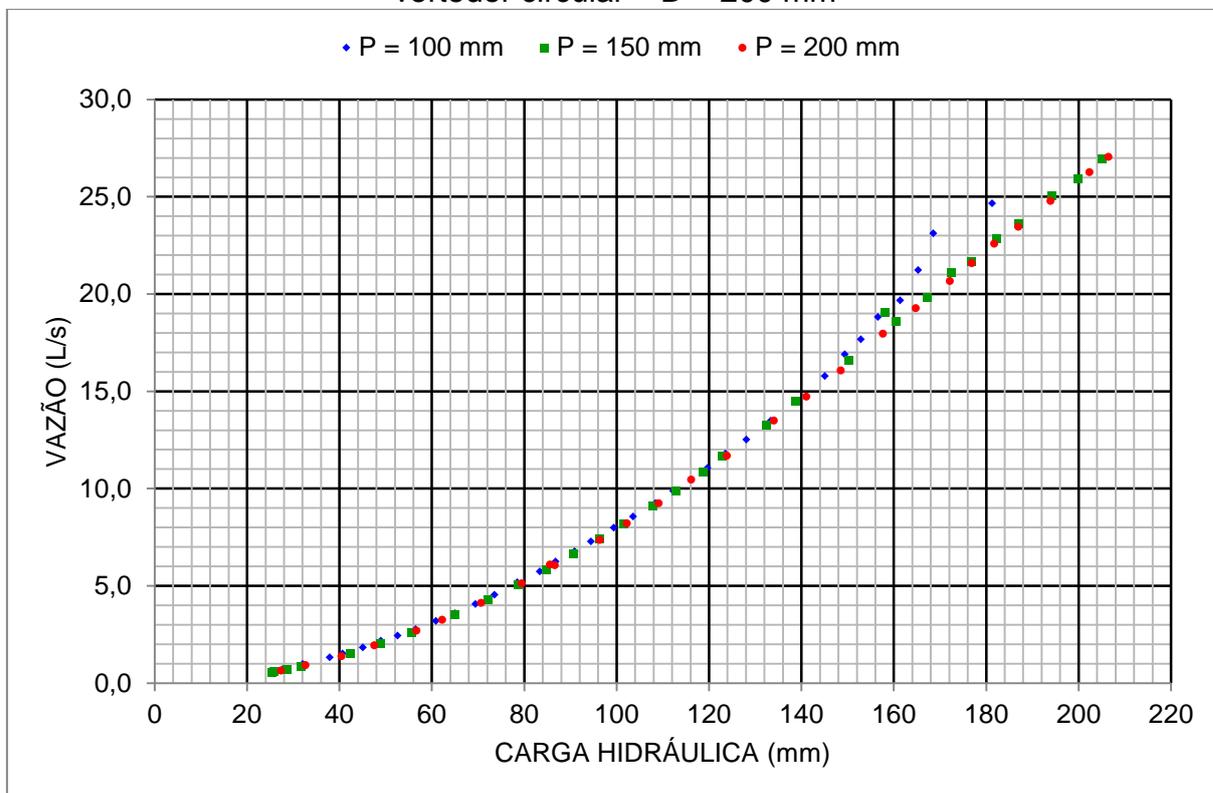


Gráfico 6.6 (c) – Variação da vazão experimental
vertedor circular – D = 200 mm



Após isso, analogamente ao vertedor triangular, utilizando-se das formulações consagradas na literatura e exemplificadas no Capítulo 04, buscou-se ajustar seus parâmetros a fim de que as equações se adequassem aos dados experimentais o mais precisamente possível.

Os ajustes foram feitos através de regressão não linear aplicada aos dados experimentais de vazão e carga hidráulica. Para cada formulação respeitou-se a forma original proposta por seu autor e apenas se ajustaram seus coeficientes numéricos.

O uso de dados foi restrito apenas aos relacionados a cargas hidráulicas superiores a 30 mm (trinta milímetros) para efetuar as análises com maior precisão, conforme explicado anteriormente, uma vez que esses dados apresentam desvio relativo bem superior aos demais.

Os efeitos da velocidade de aproximação se mostraram insignificantes perante a magnitude da carga hidráulica na medições (inferior a 3%), como evidenciado nas Tabelas 5.4 a 5.6. Assim, a contribuição do termo cinético foi desconsiderada nas análises, sem que isso acarretasse em perdas de precisão significativa.

A Tabela 6.5 mostra as equações clássicas da literatura originais e modificadas pelos coeficientes experimentais encontrados através de regressão não linear.

Na equação de Staus, considerou-se que os valores do termo " Φ_i " em função do coeficiente de enchimento provenientes da Tabela 2.3 e ilustrados pelo gráfico 6.7, estavam corretos e que o termo a ser ajustado seria o coeficiente de descarga " C_e ". Com os dados reais de vazão acompanhados dos respectivos " Φ_i ", gerou-se uma nuvem de dados do valor médio do coeficiente de descarga em função dos respectivos coeficientes de enchimento, encontrando-se uma curva de tendência, exemplificada pelo Gráfico 6.8. Os resultados de " C_e " obtidos por esta curva e os valores de " Φ_i " foram tabelados em função do coeficiente de enchimento e são demonstrados pela Tabela 6.4.

Analogamente a abordagem anterior, na equação de Panuzio e Ramponi também se considerou o termo " Φ_i " como correto, encontrando-se uma equação para descrevê-lo através dos valores já tabelados. A partir daí, com os dados reais de vazão, obteve-se os respectivos coeficientes de descarga (μ). Através de

regressão não linear, ajustaram-se os coeficientes da equação do coeficiente de descarga para representarem os valores reais de vazão.

A formulação de Vatankhah, por sua vez, não possui termos tabelados, sendo todos equacionados em função do coeficiente de enchimento. Assim, ajustou-se os coeficientes de sua equação aos dados reais de vazão, através de regressão em curva.

Ao modelo prático de Azevedo Netto foi feita a regressão não linear em uso dos valores reais de vazão para se obter os coeficientes modificados.

Gráfico 6.7 – Valores de “ Φ_i ” em função de “H/D” relativos à equação de Staus

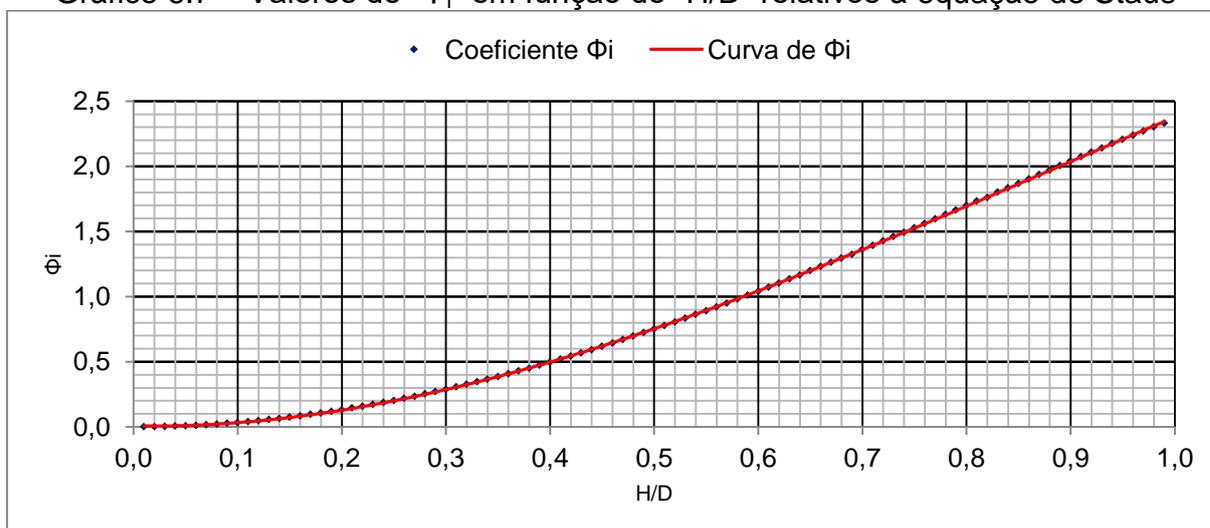


Gráfico 6.8 – Curva de tendência dos valores médios de coeficiente de descarga em função do coeficiente de enchimento relativos à equação de Staus

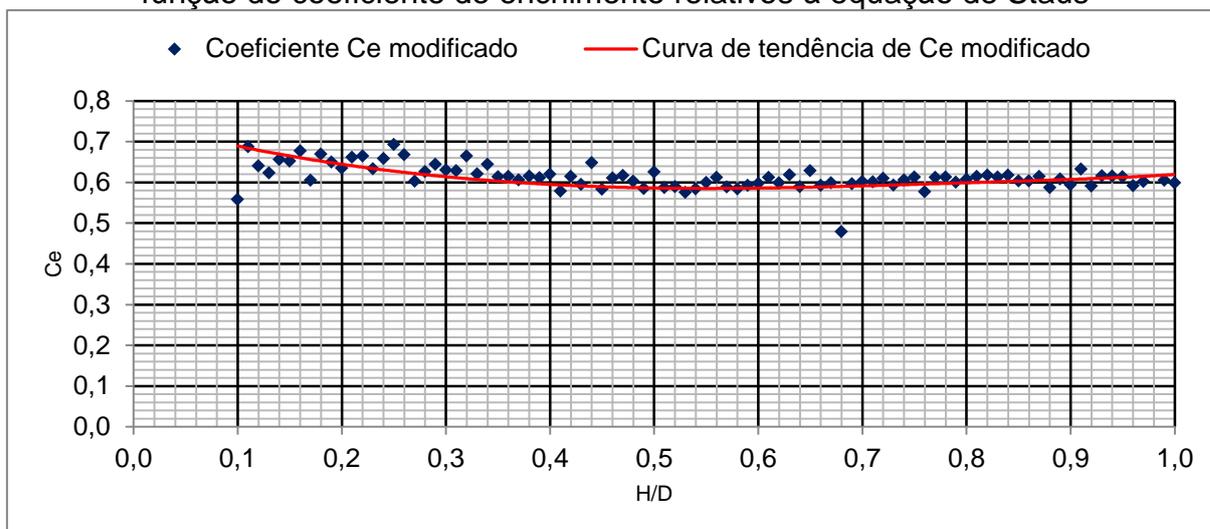


Tabela 6.4 – Valores modificados experimentalmente de “ Φ_i ” e “ C_e ” em função do coeficiente de enchimento “H/D” relativos à equação de Staus.

H/D	Φ_i	C_e	H/D	Φ_i	C_e	H/D	Φ_i	C_e	
0,10	0,0330	0,688	0,40	0,4984	0,598	0,70	1,3609	0,592	
0,11	0,0396	0,684	0,41	0,5221	0,597	0,71	1,3936	0,593	
0,12	0,0468	0,679	0,42	0,5462	0,595	0,72	1,4265	0,593	
0,13	0,0548	0,675	0,43	0,5708	0,594	0,73	1,4596	0,595	
0,14	0,0634	0,670	0,44	0,5958	0,592	0,74	1,4928	0,596	
0,15	0,0727	0,666	0,45	0,6211	0,591	0,75	1,5262	0,597	
0,16	0,0827	0,661	0,46	0,6469	0,590	0,76	1,5597	0,597	
0,17	0,0933	0,658	0,47	0,6731	0,589	0,77	1,5933	0,598	
0,18	0,1046	0,654	0,48	0,6996	0,588	0,78	1,6270	0,598	
0,19	0,1165	0,649	0,49	0,7265	0,587	0,79	1,6608	0,599	
0,20	0,1291	0,644	0,50	0,7538	0,585	0,80	1,6947	0,599	
0,21	0,1422	0,642	0,51	0,7814	0,585	0,81	1,7287	0,600	
0,22	0,1560	0,639	0,52	0,8093	0,584	0,82	1,7627	0,600	
0,23	0,1704	0,635	0,53	0,8376	0,584	0,83	1,7968	0,601	
0,24	0,1854	0,631	0,54	0,8662	0,584	0,84	1,8310	0,602	
0,25	0,2009	0,627	0,55	0,8952	0,584	0,85	1,8652	0,603	
0,26	0,2171	0,623	0,56	0,9244	0,584	0,86	1,8995	0,604	
0,27	0,2338	0,621	0,57	0,9539	0,585	0,87	1,9338	0,605	
0,28	0,2510	0,618	0,58	0,9837	0,585	0,88	1,9681	0,606	
0,29	0,2688	0,615	0,59	1,0139	0,586	0,89	2,0024	0,607	
0,30	0,2872	0,612	0,60	1,0442	0,586	0,90	2,0367	0,608	
0,31	0,3061	0,610	0,61	1,0749	0,587	0,91	2,0710	0,609	
0,32	0,3255	0,608	0,62	1,1057	0,587	0,92	2,1053	0,609	
0,33	0,3454	0,607	0,63	1,1369	0,588	0,93	2,1396	0,610	
0,34	0,3658	0,605	0,64	1,1682	0,588	0,94	2,1738	0,610	
0,35	0,3867	0,603	0,65	1,1998	0,589	0,95	2,2080	0,613	
0,36	0,4081	0,600	0,66	1,2316	0,589	0,96	2,2422	0,615	
0,37	0,4300	0,600	0,67	1,2637	0,590	0,97	2,2762	0,616	
0,38	0,4524	0,599	0,68	1,2959	0,590	0,98	2,3102	0,617	
0,39	0,4752	0,599	0,69	1,3283	0,591	0,99	2,3442	0,618	
$\Phi_i = 0,008 - 0,135 \eta + 4,001 \eta^2 - 1,496 \eta^3$							1,00	2,3780	0,619

Tabela 6.5 – Equações de vazão e coeficiente de descarga ajustadas experimentalmente - vertedor circular

Abordagem	Equação	Equação Ajustada
Staus	[4.15]	Valores tabelados de C_e e Φ_i
Panuzio e Ramponi	[4.17]	$\Phi_i = 7,714 \left(\frac{H}{D} \right)^{1,609} - 0,116$ $\mu = Cd = 0,494 + \frac{D}{60,53 H} + 0,113 \frac{H}{D}$
Vatankhah	[4.23] [4.22]	$Cd = \frac{0,475 + 1,365\eta}{1 + 3,320\eta}$ $f(\eta) = 0,246 \left((\sqrt{1+0,618\eta}) + (\sqrt{1-0,921\eta}) \right)$
Azevedo Netto	[4.24]	$Q = 1,518 D^{0,892} H^{1,710}$

Os Gráficos 6.9 (a) a 6.9 (c) comparam os valores da vazão obtidos por cada formulação modificada experimentalmente com os valores reais da mesma. Os erros relativos e o desvio padrão associados a estas formulações são demonstrados pela Tabela 6.6, por onde se percebe quais métodos se adequam melhor aos dados laboratoriais. Percebe-se também uma melhor acurácia dos métodos para cargas hidráulicas superiores a 3 cm, pelos motivos abordados anteriormente.

Os Gráficos 6.10 (a) a 6.10 (c) mostram os desvios relativos percentuais associados ao uso da formulação de Vatankhah que se mostrou a mais precisa para representar os dados experimentais.

Gráfico 6.9 (a) - Vazão para as diferentes equações ajustadas experimentalmente
Vertedor circular – D = 100 mm

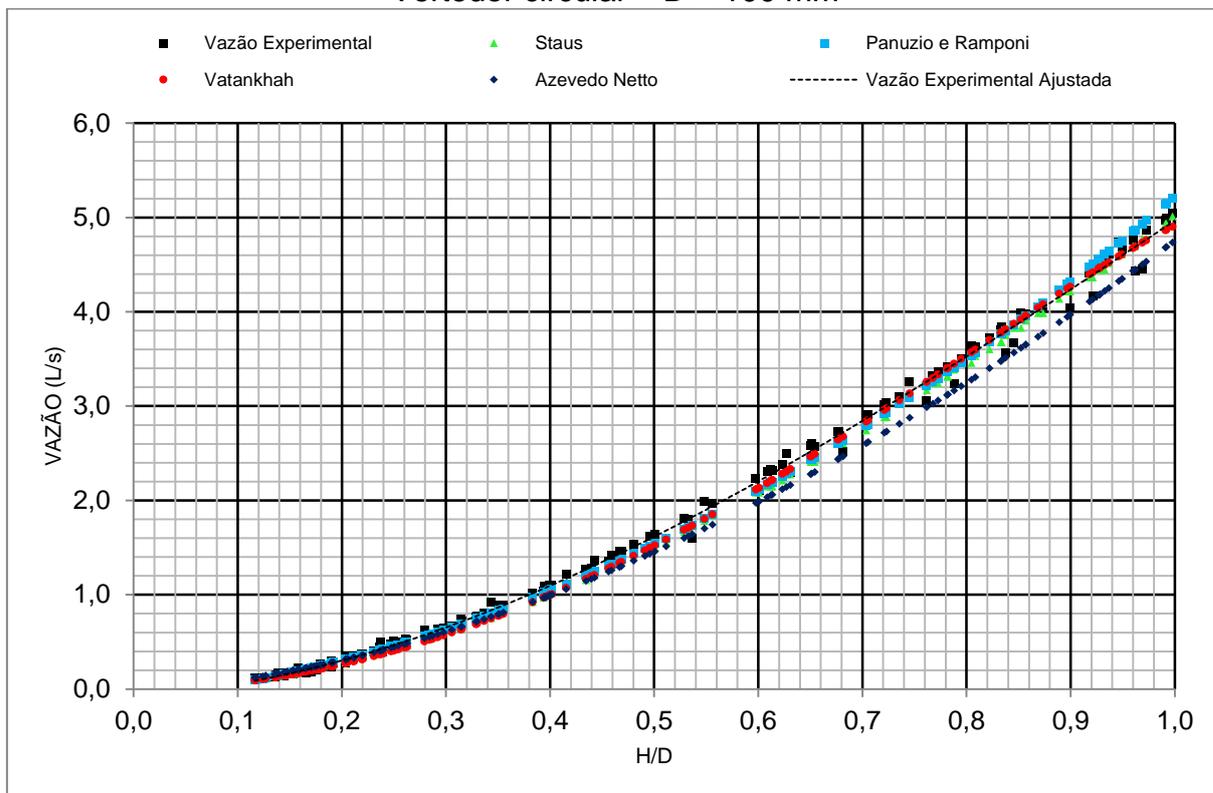


Gráfico 6.9 (a) - Vazão para as diferentes equações ajustadas experimentalmente
Vertedor circular – D = 150 mm

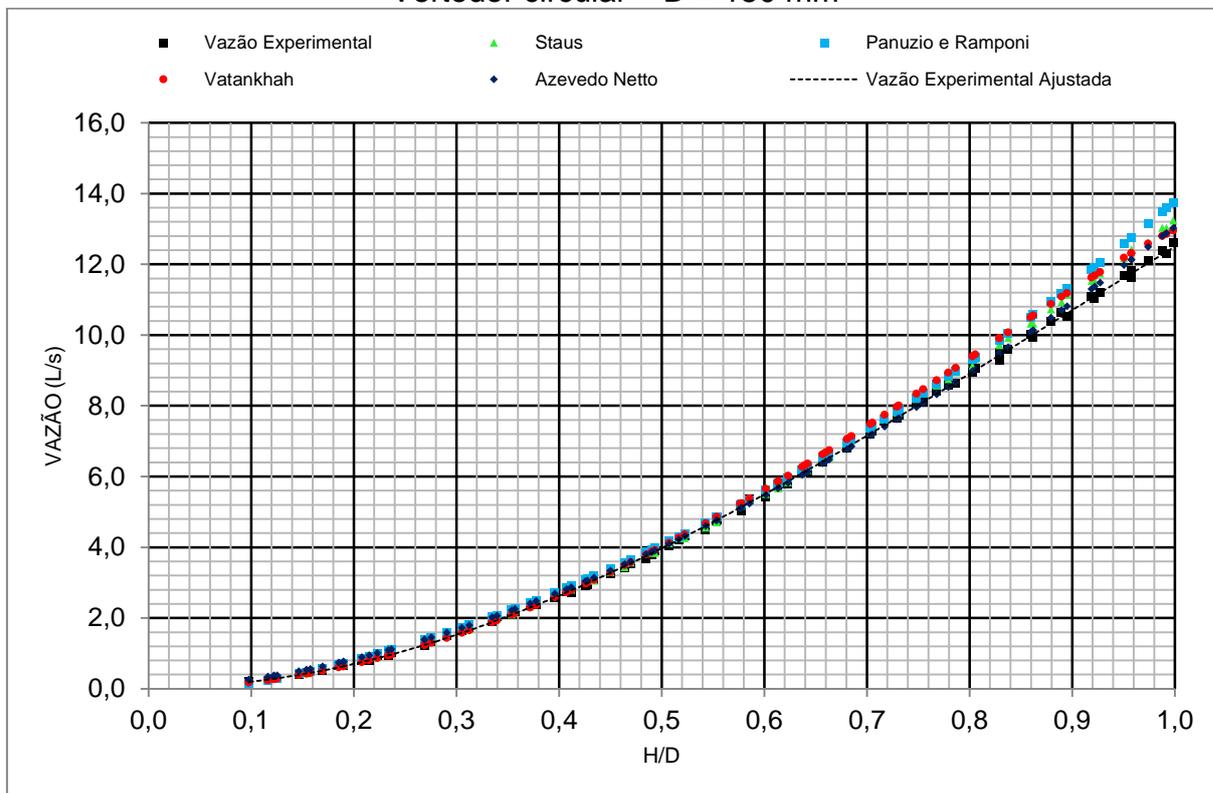


Gráfico 6.9 (c) - Vazão para as diferentes equações ajustadas experimentalmente
Vertedor circular – D = 200 mm

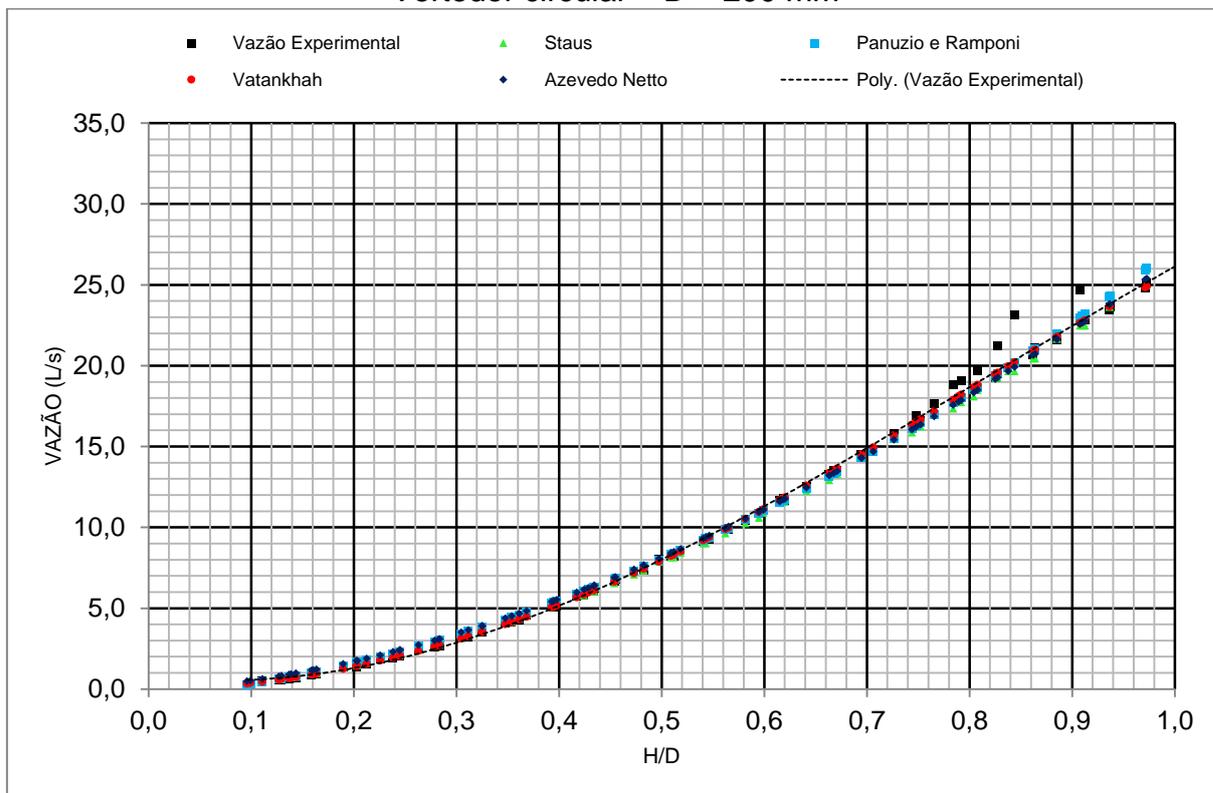


Tabela 6.6 – Desvios relativos e desvio padrão provenientes das equações modificadas

Vertedor Circular				
	Staus	Panuzio e Ramponi	Vatankhah	Azevedo Netto
Desvio Médio (%)	5,4	5,6	5,3	9,2
Desvio Médio (h>30 mm) (%)	3,3	4,3	3,0	5,4
Desvio Padrão (L/s)	0,318	0,427	0,279	0,345

Gráfico 6.10 (a) – Desvios relativos atribuídos à formulação de Vatankhah vertedor circular – $D = 100$ mm

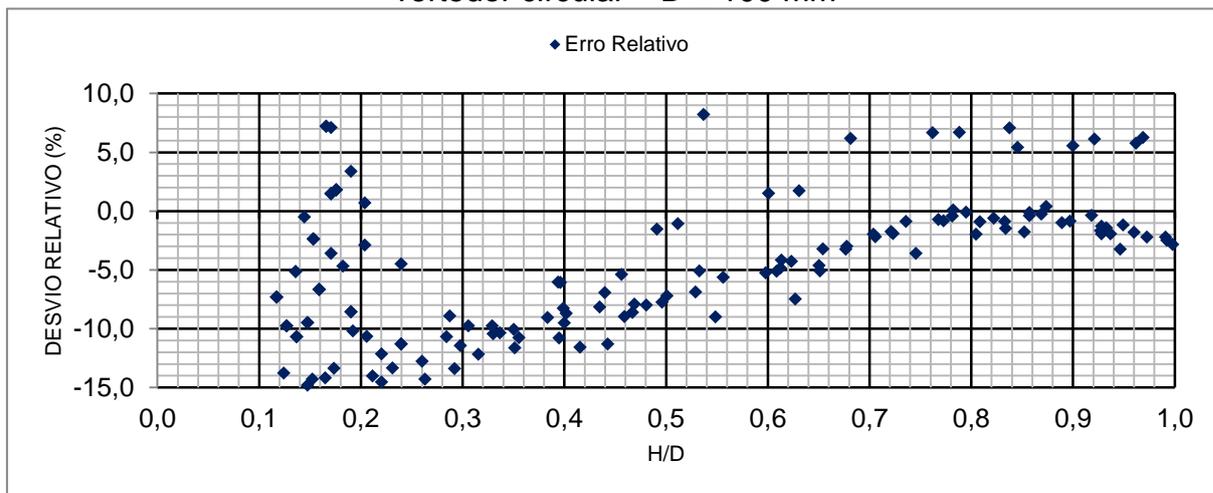


Gráfico 6.10 (b) – Desvios relativos atribuídos à formulação de Vatankhah vertedor circular – $D = 150$ mm

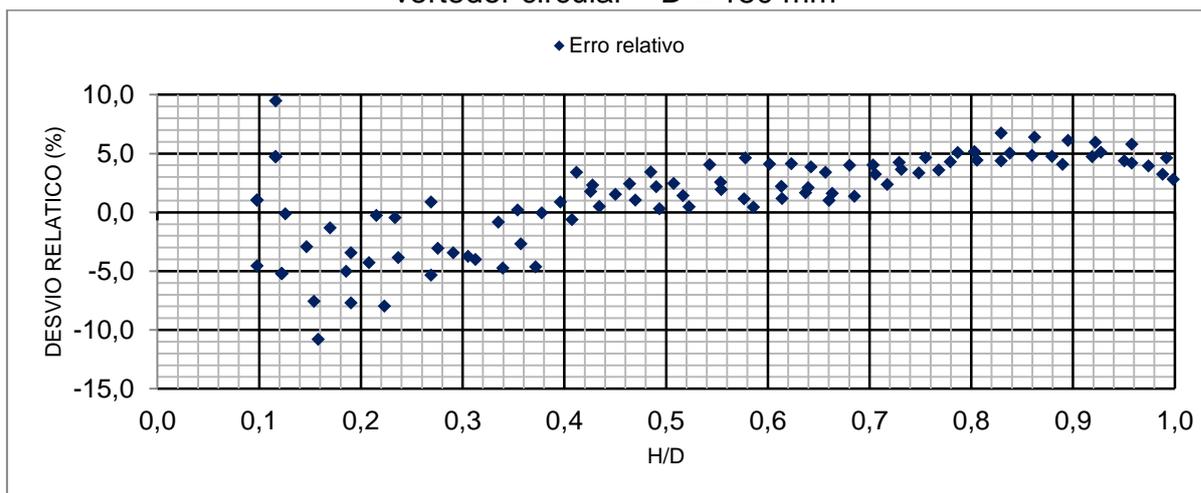
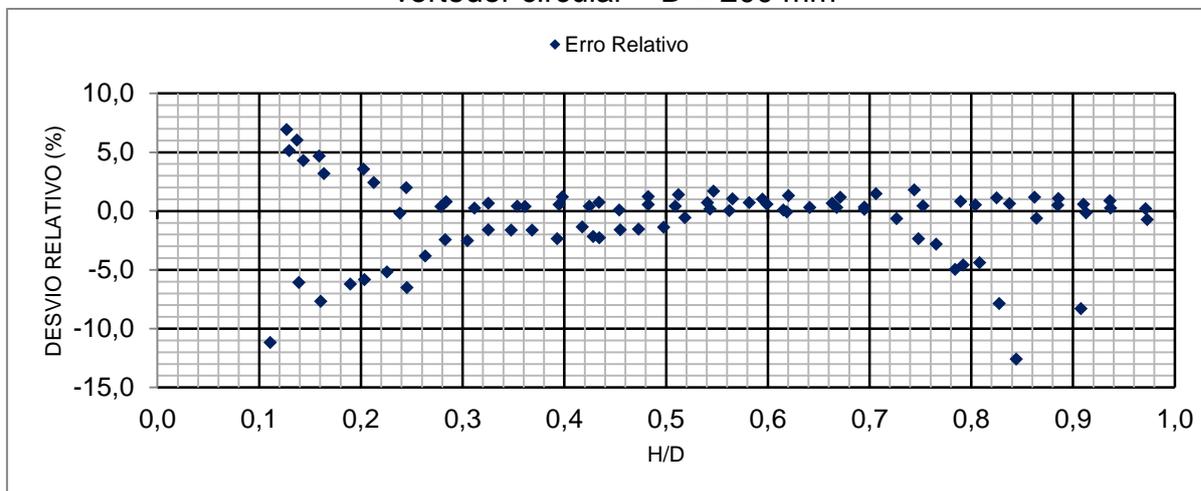


Gráfico 6.10 (c) – Desvios relativos atribuídos à formulação de Vatankhah vertedor circular – $D = 200$ mm



7. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

As informações abordadas no trabalho, exemplificadas pelos experimentos práticos, expõe a influência de fatores geométricos de um vertedor, tanto circular quanto triangular, na determinação de sua vazão. A análise destes fatores se apresenta de forma variada conforme se modificam as relações geométricas de vertedor e canal, de tal forma que cada estrutura vertedora apresenta diferentes comportamentos dependendo das características e dimensões do canal a montante. Portanto, uma análise prática restringe sua precisão às condições estudadas e testadas, enquanto uma formulação global necessita que se considerem vários fatores e condições, sendo, pois, uma área a se aprofundar ainda mais nas pesquisas, com o estudo amplo dos diferentes fatores geométricos de canal e vertedores.

Em termos gerais aconselha-se, para trabalhos posteriores, uma análise mais detalhada das relações de vazão para pequenas cargas hidráulicas em ambos vertedores, uma vez que nessa faixa muitos dados foram descartados por apresentarem grande variância devido a dificuldade de se medir pequenas vazões com precisão e estabilidade.

7.1 Vertedor Triangular

Os resultados práticos comprovaram a aplicabilidade das diversas formulações estudadas e modificadas, com ligeira variação de precisão entre elas.

De maneira geral, o coeficiente de vazão apresentou uma tendência de estabilização conforme aumentava-se a carga hidráulica devido a menor influência de efeitos secundários nesses casos. Percebeu-se uma influência da altura da soleira na determinação do coeficiente de vazão para pequenas cargas, sendo tal influência também reduzida para cargas maiores. A influência do termo cinético se mostrou praticamente nula podendo ser desconsiderada para qualquer altura do nível de água dentro das condições do canal estudado.

As Equações de Greve e Lenz para determinação do coeficiente de descarga e, por consequência, da vazão, mostraram-se competitivas quando se consideravam todas as cargas hidráulicas possíveis, desde o início da lâmina livre

até o afogamento da estrutura. Porém, nestes casos, o erro médio variou de 5% a 7%, o que não se pode considerar satisfatório.

A dificuldade de se analisar vazões produzidas por pequenas cargas é reconhecida e descrita nas mais diversas obras técnicas, muitas demonstradas no Capítulo 04. Para se refinar as equações propostas, os autores limitam suas validades a um valor mínimo de carga, da ordem de 5 cm. Ao se aplicar um limite semelhante aos dados experimentais (carga mínima de 3 cm) as equações de Kindsvater & Carter e Thomson (Curva de Potência), modificadas experimentalmente, melhor se adequaram aos dados colhidos, apresentando erro médio inferior a 3,3%, o que se pode considerar bem preciso em uma análise prática.

É importante evidenciar que os limites geométricos do conjunto canal/vertedor utilizados nos experimentos impõe uma faixa de validade das conclusões limitada quando comparada às faixas de validade presentes na literatura.

Para trabalhos futuros recomenda-se um estudo mais aprofundado da real influência da altura da soleira, com o uso de um número maior dessa variável na análise de vazão e coeficiente de descarga.

7.2 Vertedor Circular

Quanto ao vertedor circular, os principais fatores que exerceram influência na determinação da vazão foram a carga hidráulica, o diâmetro e o coeficiente de enchimento. A altura da soleira não é considerada pelos autores como fator de grande influência sendo automaticamente contabilizada pelo coeficiente de descarga. A influência do termo cinético, nas condições do canal estudado, é crescente conforme aumenta-se o diâmetro do vertedor, mas, ainda assim, apresentou valores não significativos e foi desconsiderada. Percebeu-se uma mudança na inclinação da curva de vazão para os dados referentes a altura de soleira de 100 mm tanto para o diâmetro de 100 mm quanto para o de 200 mm.

As equações de Staus e Vatankhah foram as que mais se aproximaram dos dados reais de vazão. Mas, enquanto este baseia seu método numa equação analítica simples dependente apenas do coeficiente de enchimento, o primeiro necessita de substituições de termos empíricos previamente tabelados.

Assim, o método de Vatankhah, com erro médio de 3,0 %, mostra-se como o mais adequado aos dados coletados, reunindo eficiência e simplicidade de uso.

Ressalta-se, também, a dificuldade em se analisar os dados cuja carga hidráulica seja inferior a 0,03 metros devido aos fatores já mencionados no Capítulo 04, sendo estes, portanto, descartados nas análises efetuadas.

A faixa de validade dos experimentos também representa uma parcela limitada das faixas presentes na literatura devido às limitações geométricas descritas anteriormente.

Para trabalhos futuros recomenda-se uma investigação mais aprofundada dos efeitos da velocidade de aproximação, que se mostraram com significância crescente com o aumento da carga.

REFERÊNCIAS

- ARAUZ, I. J. **Vertedor de superfície e escoamento sob comportas**. 2005. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2005
- AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de hidráulica**. 8 ed. São Paulo-SP. Editora Edgard Blücher. 1998.
- BAPTISTA, M; LARA, M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 2 ed. Belo Horizonte-MG. Editora UFMG. 2003.
- BENGTSON, H. H. **Open channel flow measurement – weirs and flumes**. SunCam. 2010.
- BOS, M. G. **Discharge measurement structures**. 3 ed. Holanda. ILRI. 1989.
- CASEY, T. J. **Water and wastewater engineering hydraulics**. Irlanda. Aquavarra Research Company. 2004.
- CHANSON, H. **The hydraulics of open channel flow: an introduction**. 2 ed. Grã-Bretanha. Elsevier Butterworth-Heinemann. 2004.
- GHOBADIAN, R; MERATIFASHI, E. **Modified theoretical stage-discharge relation for circular sharp-crested weirs**. Water Science and Engineering journal, v. 5, n.1, p. 26-33, 2012.
- KINDSVATER, C. E.; CARTER, R. W. C. **Discharge characteristics of rectangular thin-plate weirs**. Journal of the Hydraulics Division of the ASCE, EUA, v. 83, HY 6, p. 1-36, 1957.
- LENCASTRE, A. **Hidráulica geral**. Portugal. Gráfica de Coimbra. 1983.
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4 ed. São Carlos-SP. Editora Rima. 2006.
- SILVA, G. Q. **Hidráulica II: vertedores**. Disponível na internet via http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~gilbertoqueiroz/CIV225-Aula3_Vertedores.pdf. Acesso em 07 de dez. de 2014.
- SHEN, J. **Discharge characteristics of triangular-notch thin-plate weirs**. Geological Survey Watter-Supply paper. Estados Unidos. 1981. 62 p.
- SOUZA, P. A. **Experiências de laboratório**. 2000. Roteiro de Laboratório. USP, São Paulo-SP, 2000.
- SPENCER, P. R. **Investigation of discharge behavior from a sharp-edged circular orifice in both weir and orifice flow regime using an unsteady experimental procedure**. 2013. 73 f. Dissertação (Mestrado)-University of Western Ontario, Canadá, 2013.
- TUAN, L. A. **Open channel hydraulics for engineers**. Holanda. Lap Lambert Publishing. 2011.

UNITED STATES. Department of Interior – Bureau of Reclamation. **Water measurement manual**. EUA. 2001.

VATANKHAH, A. L. **Flow measurement using circular sharp-crested weirs**. Flow Measurement and Instrumentation journal, v. 21, p. 118-122, 2010.