

LUÍS GUSTAVO HENRIQUES DO AMARAL

**REGULADOR AUTOMÁTICO DE VAZÃO PARA CONDUTOS
LIVRES: DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

A485r
2207

Amaral, Luís Gustavo Henriques do, 1979-
Regulador automático de vazão para condutos livres
: desenvolvimento e avaliação / Luís Gustavo Henriques
do Amaral. – Viçosa, MG, 2007.
xiv, 69f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Márcio Mota Ramos.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 60-64.

1. Irrigação agrícola. 2. Hidráulica - Equipamento e
acessórios. 3. Canais (Engenharia hidráulica).

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.587

LUÍS GUSTAVO HENRIQUES DO AMARAL

REGULADOR AUTOMÁTICO DE VAZÃO PARA CONDUTOS
LIVRES: DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 12 de novembro de 2007.



Prof. Demetrius David da Silva
(Co-orientador)



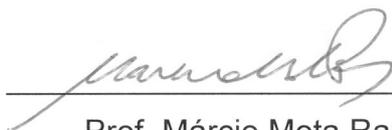
Prof. Wilson Deniculi



Prof. Tarlei Arriel Botrel



Prof. Daniel Fonseca de Carvalho



Prof. Márcio Mota Ramos
(Orientador)

Aos meus pais Carlos Guilherme e Maria da Graça.
Aos meus irmãos Carlos e Jonathan.
Às minhas avós Clotilde (*in memoriam*) e Maria Cleci.
À Daniela.

Precisamos dar um sentido humano
às nossas construções. E quando o
dinheiro ou o sucesso estiver nos
deixando cegos, saibamos fazer
pausas para olhar os lírios do
campo e as aves do céu.

(Érico Veríssimo – *Olhai os Lírios do Campo*, 1938)

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha família, pelo apoio incondicional.

À Daniela, pela confiança, compreensão e incentivo.

Ao professor Márcio Mota Ramos, pela orientação, profissionalismo, respeito e confiança.

Aos professores Demetrius David da Silva, Paulo Roberto Cecon e Paulo Marcos de Barros Monteiro, pelos aconselhamentos no decorrer deste trabalho.

Ao professor Fernando Falco Pruski, pela amizade, confiança e oportunidades concedidas.

Ao professor Wilson Denículi, pelos ensinamentos transmitidos e pelas valiosas sugestões.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudos e pelo financiamento do projeto de pesquisa.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Epamig), especialmente ao Édio Luiz da Costa e ao Otacílio Gomes, pelo apoio durante os trabalhos de campo.

Ao Leonardo Oliveira, pela paciência e capricho na fabricação das peças e dos moldes do regulador automático de vazão.

Aos servidores da UFV que contribuíram para a realização do projeto, especialmente a Francisco Viana Teixeira, Edna Maria Soares, Jesus Rodrigues Teixeira e Olindo Antônio da Silveira, pela colaboração e profissionalismo.

À estagiária Letícia Cibele da Silva Ramos Freitas, pela importante ajuda nas avaliações de laboratório, pela responsabilidade e pela paciência.

Aos amigos Wendy Fonseca Ataíde, Eduardo Luis da Silva e Samuel Martin, pelo companheirismo e pelos bons momentos de convivência.

Aos amigos da ABU-Pós, pelos momentos de conforto e amizade durante o período de permanência em Viçosa.

Aos colegas Franklin Valbuena Materán, Luciano Farias de Novaes e Renata del Giúdice Rodriguez, pela amizade e pelo importante apoio no início do curso.

Aos colegas Fernando, Marcelo Latuf, David, Welson, Solerne, Michel, Mário, Alisson, Walisson, Denise, Marcelo Rossi, Rafael, Delfran, Cristiano, Flávio, Roberto, Brasileiro, Marcos Caldeira, Luiz César, Agmar, Rodrigo, Carlos Cotrim e aos demais colegas de Pós-Graduação.

Aos amigos Eduardo, Juliano, Daniel Chuquer, Leandro, Talles, Gustavo, Clarisse, Daniel Azoulai, Júnior, Sérgio, Dalton, Filipe, Pedro, Danilo, Vitor, Clayton, Rodolfo e Alexandre, companheiros da república *Camposanto*.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

BIOGRAFIA

Luís Gustavo Henriques do Amaral, filho de Carlos Guilherme Vogel do Amaral e Maria da Graça Henriques do Amaral, nasceu em Cruz Alta, Rio Grande do Sul, em 4 de julho de 1979.

Em março de 1997, iniciou o curso de Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em Santa Maria, Rio Grande do Sul, graduando-se em fevereiro de 2002.

No mês seguinte, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFSM, em nível de Mestrado, na área de Irrigação e Drenagem, concluindo-o em fevereiro de 2004.

Em março de 2004, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais, em nível de Doutorado, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de tese em novembro de 2007.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Estruturas de controle em canais	4
2.1.1 Controle do nível da água nos canais.....	5
2.1.2 Controle da vazão nos canais de derivação	8
2.2 Vazão em orifícios.....	12
2.2.1 Velocidade do escoamento.....	13
2.2.2 Contração da veia líquida	16
2.2.3 Cálculo da vazão em orifícios	17
2.2.4. Coeficiente de descarga de orifícios retangulares sob cargas reduzidas	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 Projeto e construção do regulador automático de vazão	22
3.1.1 Dimensionamento do tubo deslizante	23
3.1.2 Dimensionamento do flutuador	25
3.1.3 Dimensionamento do tubo guia	26
3.1.4 Dimensionamento da caixa de captação	27

3.1.5 Materiais utilizados na confecção do regulador automático de vazão	28
3.2 Influência da curvatura da parede sobre o coeficiente de descarga de orifícios retangulares	28
3.3 Variação na vazão fornecida pelo regulador	31
3.3.1 Determinação da variação na carga hidráulica sobre os orifícios.....	33
3.3.2 Determinação da vazão na folga entre os tubos guia e deslizante	34
3.4 Curvas características do regulador automático de vazão	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 Regulador automático de vazão desenvolvido	36
4.2 Influência da curvatura da parede sobre o coeficiente de descarga de orifícios retangulares	44
4.3 Variação na vazão fornecida pelo regulador	46
4.4 Curvas características do regulador automático de vazão	52
5 CONCLUSÕES.....	56
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
8 APÊNDICES	65
APÊNDICE A.....	66

LISTA DE SÍMBOLOS

- A = área total de escoamento, L^2 ;
- A_O = área do orifício, L^2 ;
- A_C = área da seção contraída, L^2 ;
- B = altura do orifício, L ;
- C_F = comprimento da folga entre os tubos guia e deslizante, L ;
- C_D = coeficiente de descarga do orifício;
- C_C = coeficiente de contração do orifício;
- C_V = coeficiente de velocidade do orifício;
- d_{ext} = diâmetro externo do tubo deslizante, L ;
- D_{int} = diâmetro interno do tubo guia, L ;
- e = espessura da parede do orifício, L ;
- E_F = espessura da folga entre os tubos guia e deslizante, L ;
- g = aceleração da gravidade, $L T^{-2}$;
- h = carga hidráulica sobre um elemento infinitesimal de área, L ;
- h_1 = carga hidráulica sobre a borda superior do orifício, L ;
- h_2 = carga hidráulica sobre a borda inferior do orifício, L ;
- h_e = carga hidráulica na entrada da folga entre os tubos, L ;
- h_m = profundidade da partícula no ponto m , L ;
- h_s = carga hidráulica na saída da folga entre os tubos, L ;
- h_C = carga hidráulica sobre o centro de gravidade do(s) orifício(s), L ;

h_{Cmax} = carga hidráulica máxima observada, L;
 h_{Cmin} = carga hidráulica mínima observada, L;
 h_{NOM} = carga hidráulica nominal, L;
 H = carga ou energia total disponível em relação ao centro de gravidade do orifício, L;
 L = largura do orifício, L;
 p_A = pressão no compartimento A, $M L^{-1} T^{-2}$;
 p_B = pressão no compartimento B, $M L^{-1} T^{-2}$;
 Q = vazão real do orifício, $L^3 T^{-1}$;
 Q_F = vazão na folga entre os tubos guia e deslizante, $L^3 T^{-1}$;
 Q_{max} = vazão máxima observada, $L^3 T^{-1}$;
 Q_{med} = vazão média fornecida pelo regulador, $L^3 T^{-1}$;
 Q_{min} = vazão mínima observada, $L^3 T^{-1}$;
 Q_{reg} = vazão fornecida pelo regulador automático de vazão, $L^3 T^{-1}$;
 Q_T = vazão teórica do orifício, $L^3 T^{-1}$;
 Re = número de Reynolds;
 v_m = velocidade da partícula no ponto m , $L T^{-1}$;
 v_n = velocidade da partícula no ponto n , $L T^{-1}$;
 V = velocidade média real do fluido na seção contraída, $L T^{-1}$;
 V_A = velocidade média de aproximação das partículas, $L T^{-1}$;
 V_T = velocidade média teórica das partículas ao passarem pelo orifício, $L T^{-1}$;
 z = altura da partícula em relação ao centro do orifício no ponto m , L;
 α = ângulo entre o eixo do orifício e a reta tangente à sua parede;
 β_0 = coeficiente de regressão;
 β_1 = coeficiente de regressão;
 γ = peso específico do fluido, $M L^{-2} T^{-2}$;
 μ = viscosidade absoluta do fluido, $M L^{-1} T^{-1}$;
 ρ = massa específica do fluido, $M L^{-3}$;
 Δh = diferença de carga entre a entrada e a saída da folga, L;
 Δh_C = variação na carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios, L;
 ΔQ_{reg} = variação relativa na vazão fornecida pelo regulador.

RESUMO

AMARAL, Luís Gustavo Henriques do, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2007. **Regulador automático de vazão para condutos livres: desenvolvimento e avaliação.** Orientador: Márcio Mota Ramos. Co-orientadores: Demetrius David da Silva, Paulo Roberto Cecon e Paulo Marcos de Barros Monteiro.

O desenvolvimento da agricultura irrigada depende do uso racional dos recursos hídricos, havendo necessidade de redução das perdas que ocorrem desde a reservação até a aplicação da água nas áreas irrigadas. Nos locais onde a condução da água de irrigação é realizada por meio de canais, as constantes oscilações no nível da água associadas à alta sensibilidade das estruturas de distribuição provocam grandes variações nas vazões fornecidas aos lotes irrigados. Sendo assim, o objetivo geral desse trabalho foi desenvolver e avaliar um regulador de vazão capaz de minimizar o efeito das variações no nível da água a montante das estruturas de distribuição sobre a vazão derivada, utilizando orifícios retangulares perfurados em parede curva. Os objetivos específicos foram: projetar e construir o regulador de vazão; obter coeficientes de descarga para orifícios retangulares em parede delgada vertical curva; determinar a variação na vazão fornecida pelo regulador em toda a sua faixa de operação; e obter as curvas características do equipamento. O regulador, construído com fibra de

vidro como material básico, foi concebido para manter a carga hidráulica constante sobre os orifícios, mesmo que o nível da água no canal varie sensivelmente. O equipamento é composto de um tubo cilíndrico dotado de orifícios retangulares ao redor da sua circunferência. Esse tubo desliza dentro de um tubo fixo, que funciona como guia, e está preso a um flutuador que ajusta a posição dos orifícios conforme o nível da água no canal principal. O conjunto opera dentro de uma caixa de captação instalada junto à tomada de água lateral do canal. A regulação da vazão é feita pelo ajuste da carga hidráulica e pela alteração da área de escoamento. A avaliação do regulador foi realizada em um canal de concreto do Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, utilizando-se água limpa. Foram determinados os coeficientes de descarga de orifícios retangulares com 0,08 m de comprimento e 0,04 m de altura e ângulos de 1,57, 1,75, 1,80 e 1,89 rad entre o eixo do orifício e a reta tangente à sua parede. A variação na vazão fornecida pelo regulador foi determinada em função de uma alteração de 0,15 m no nível da água no canal principal, para todas as opções de regulação, abrangendo toda a faixa de vazões fornecidas. Também foram obtidas as curvas características do regulador relacionando a vazão com a carga hidráulica medida sobre o centro de gravidade dos orifícios. O equipamento apresentou desempenho adequado para a operação de redes de canais, minimizando o efeito das variações de nível sobre a vazão escoada. Verificou-se uma redução de 3,5%, em média, no coeficiente de descarga com o aumento de 0,32 rad no ângulo entre o eixo do orifício e a reta tangente à sua parede e uma variação média na vazão fornecida pelo equipamento de $\pm 2,3\%$. A principal causa da variação na vazão foi atribuída ao atrito estático entre as paredes dos tubos guia e deslizante, que não era vencido quando a variação no empuxo sobre o flutuador era pequena. Pela análise das curvas características, o regulador desenvolvido pode fornecer vazões entre 3,3 e 30,7 L s⁻¹, possibilitando sua utilização em lotes irrigados de pequeno e médio porte. O equipamento constitui-se numa boa alternativa tanto para regulação quanto para medição de vazão em condutos livres, uma vez que a variação na vazão do regulador automático desenvolvido é menor comparativamente aos equipamentos usualmente adotados para controle de vazão em canais.

ABSTRACT

AMARAL, Luís Gustavo Henriques do, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2007. **Automatic flow regulator for open channels: development and evaluation.** Adviser: Márcio Mota Ramos. Co-advisers: Demetrius David da Silva, Paulo Roberto Cecon and Paulo Marcos de Barros Monteiro.

The development of irrigated agriculture depends on the rational use of water resources. Hence, it is necessary to reduce the water loss that occurs from reservation to application of water in the irrigated areas. In open channel irrigation schemes, frequent water level fluctuations combined to high sensitivity of water delivery structures cause large variations on supplied discharge. The main objective of this work was to develop and evaluate a flow regulator able to minimize the effect of water level fluctuations upstream from delivery structures on supplied discharge, using rectangular orifices in curved plate to control the water passage from the main to the derivation channel. The specific objectives were: to design and construct the flow regulator; to obtain discharge coefficients for rectangular orifices in vertical curved thin plate; to determine the regulator supplied discharge variation for the entire operational range; and to obtain the characteristic curves of the equipment. The flow regulator, built from fiberglass, was conceived to keep a constant hydraulic head on the orifices, even if the water level varies

expressively. The equipment is composed of a cylindrical tube with rectangular orifices around its circumference. This tube slides within a fixed tube, which works as a guide, and is fastened to a float that adjusts the orifices position according to water level in the main channel. The set operates within a collection box installed close to the channel offtake. The flow regulation is made by adjusting the hydraulic head and altering the flow area. The evaluation of the automatic flow regulator was accomplished in a concrete channel belonging to the Hydraulic Laboratory of the Department of Agricultural Engineering of the Federal University of Viçosa, in Viçosa, Minas Gerais state, Brazil, using clean water. The discharge coefficient was determined for rectangular orifices 0.08 m long and 0.04 m high using four different angles between the orifice axis and its plate: 1.57, 1.75, 1.80 and 1.89 rad. The relative variation in the discharge supplied by the automatic flow regulator was determined for a variation of 0.15 m in the main channel's water level, for all discharge regulation options. Additionally, it was determined the characteristic curves of the automatic flow regulator by relating the discharge and the hydraulic head over the orifices' gravity center. The equipment presented an excellent performance. It is adequate for operating channel networks as it minimizes the effect of water level fluctuations over the supplied discharge. It was verified a reduction of 3.5% in the discharge coefficient against the increase of 0.32 rad in the angle between the orifice axis and its plate and a mean discharge variation supplied by the automatic flow regulator of $\pm 2.3\%$. The main cause for this discharge variation was attributed to the static friction between the walls of the guide and the sliding tubes that was not overcome when there was a small variation in the buoyancy force over the float. According to the analysis of the equipment's characteristic curves, the automatic flow regulator developed can supply discharges between 3.3 and 30.7 L s⁻¹, enabling its application in small and medium irrigated areas. The automatic flow regulator is a good alternative to the regulation and measuring of discharges in open channels, since the discharge variation of the developed equipment is smaller than the discharge variation of the structures commonly used to control the discharge in channels.

1 INTRODUÇÃO

A utilização dos recursos hídricos vem crescendo consideravelmente em função dos processos de urbanização e industrialização e da expansão da agricultura irrigada. Esse crescimento, aliado à poluição dos corpos d'água, tem reduzido a disponibilidade de água doce, tornando-a um fator limitante ao desenvolvimento sustentável (Keremane e McKay, 2007).

A água é fundamental para o desenvolvimento agrícola e a redução da sua disponibilidade constitui um dos maiores problemas relacionados à agricultura irrigada em âmbito mundial. Responsável por cerca de 70% do consumo de água no mundo (FAO e IFAD, 2006) e de aproximadamente 65% no Brasil (Tucci et al., 2001), a irrigação é de suma importância para o suprimento da crescente demanda por alimentos.

O desenvolvimento da agricultura irrigada depende do uso racional dos recursos hídricos, o que implica no aumento da eficiência de irrigação. De acordo com Paz et al. (2000), estima-se que, em média, a eficiência de irrigação, em nível mundial, seja da ordem de 37%, o que evidencia a necessidade urgente de redução das perdas que ocorrem desde a reservação até a aplicação da água nas áreas irrigadas.

No Brasil, a exemplo de muitos outros países, é comum a condução da água de irrigação em canais, seja nas regiões produtoras de arroz da região Sul, onde predominam os canais de terra, seja nos perímetros

irrigados da região Nordeste e do norte de Minas Gerais, onde os canais normalmente são revestidos. Um dos maiores desafios enfrentados nesses perímetros consiste na distribuição da quantidade correta de água às áreas irrigadas, em razão da multiplicidade de usuários que entram ou saem do sistema a cada instante, e das conseqüentes variações no nível da água nos canais.

Em geral, as estruturas utilizadas nas tomadas de água são as comportas verticais e os vertedores retangulares, que dependem de operação manual. Segundo Kumar et al. (2002), em redes de canais extensas, a regulação manual das inúmeras estruturas de controle é uma operação cara e trabalhosa. Ainda assim, as vazões distribuídas variam consideravelmente, em razão da alta sensibilidade dessas estruturas às variações no nível da água a montante.

Além de não compensarem as variações no nível da água nos canais, dificultando a distribuição da vazão ideal, as estruturas operadas manualmente não permitem uma estimativa confiável do volume de água fornecido aos lotes irrigados. Como a vazão fornecida é função da carga hidráulica e este parâmetro é variável no tempo, a cobrança pelo uso da água torna-se imprecisa.

Nas últimas décadas, os esforços de pesquisadores e inventores no intuito de facilitar o manejo da água em condutos livres resultaram em progressos significativos. O advento das comportas hidromecânicas automáticas, na década de 1930, marcou o início da automação hidráulica em canais de irrigação. A partir de 1960, os avanços da eletrônica e da informática possibilitaram a criação de diversos controladores eletromecânicos e modelos matemáticos, que passaram a ser utilizados no manejo da água em redes de canais (Burt e Piao, 2002).

A maioria dos controladores desenvolvidos nos últimos anos apresenta como desvantagem a necessidade de uma fonte de energia externa para o seu funcionamento. Normalmente, os sistemas são alimentados por uma bateria associada a um painel fotovoltaico, o que pode aumentar consideravelmente o custo de tais equipamentos.

Uma opção mais viável economicamente é o emprego de estruturas automáticas que utilizam a energia hidráulica para o seu acionamento. A

utilização desse tipo de equipamento nas tomadas de água dos perímetros irrigados brasileiros facilitaria o manejo da água nos canais, reduzindo o desperdício e, conseqüentemente, aumentando a eficiência de irrigação.

Considerando a escassez de recursos hídricos e as dificuldades enfrentadas no manejo da água em canais de condução, o objetivo geral desse trabalho foi desenvolver e avaliar um regulador de vazão para tomadas de água em condutos livres, capaz de minimizar o efeito das variações no nível da água a montante sobre a vazão escoada.

Os objetivos específicos foram: (i) projetar e construir o regulador automático de vazão; (ii) determinar coeficientes de descarga para orifícios retangulares em parede delgada vertical curva; (iii) determinar a variação na vazão fornecida pelo regulador em toda a sua faixa de operação; e (iv) obter as curvas características do equipamento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estruturas de controle em canais

A operação de uma rede de canais de irrigação tem como objetivo a condução da água, desde as fontes de abastecimento até os pontos de distribuição, de forma a satisfazer as necessidades hídricas das culturas (García, 1999; Shahrokhnia e Javan, 2005).

Um dos elementos de maior importância para o manejo adequado da água nas redes de canais são as estruturas de controle. Segundo a definição de Henderson (1966), uma estrutura de controle consiste em qualquer particularidade existente em um canal que estabelece, nos seus arredores, uma determinada relação entre profundidade e vazão.

Conforme a possibilidade de regulagem, as estruturas de controle podem ser classificadas em fixas e ajustáveis. As fixas, tais como os divisores proporcionais, não permitem nenhum tipo de ajuste após sua instalação. As ajustáveis admitem a sua regulagem conforme a necessidade, o que, por sua vez, pode ser feito de forma manual ou automática. Em ambos os casos, a regulagem pode ser do tipo abre/fecha, com posições prefixadas ou de forma contínua (Gowing, 1999).

Existem inúmeras estruturas de controle aplicáveis à operação de canais de irrigação. Estas podem ser empregadas em diversos pontos do

sistema, individualmente ou combinadas, gerando várias alternativas de utilização. Entretanto, há duas finalidades básicas a que se destinam: o controle do nível da água ao longo da rede de canais e a regulação da vazão nos canais de derivação que conduzem a água às parcelas irrigadas.

2.1.1 Controle do nível da água nos canais

O principal objetivo da operação de canais é manter uma carga hidráulica aproximadamente constante a montante das estruturas de distribuição para que a vazão fornecida seja mantida dentro de limites aceitáveis. Para tanto, é necessário controlar o nível da água nas diversas ramificações que fazem parte da rede utilizando-se reguladores transversais (Renault, 1999, 2000; Durdu, 2004).

Diversas estruturas podem ser utilizadas como reguladores transversais. Uma das mais simples é a comporta vertical do tipo gaveta, definida por Swamee et al. (2000) como uma abertura retangular criada pelo deslizamento de um paramento. Essa estrutura apresenta pouca capacidade de minimizar as flutuações do nível da água a montante (Gowing, 1999). Conforme a equação geral que rege o escoamento em comportas (Henderson, 1966), grandes variações na carga hidráulica causam alterações relativamente pequenas na vazão fornecida, tornando-a mais eficaz na regulação de vazão do que no controle de profundidades.

Comparados às comportas verticais, os vertedores são mais eficientes no controle de nível. Quanto maior a extensão da sua soleira, maior a sua capacidade de minimizar a variação no nível da água a montante, fazendo com que pequenas variações na carga hidráulica provoquem grandes variações na vazão extravasada (Gowing, 1999). Dentre os diversos modelos existentes, destaca-se o vertedor tipo bico de pato, pertencente à categoria dos vertedores de soleira longa, amplamente estudados por Williams et al. (1993).

Estruturas mais complexas, como as comportas automáticas para controle da profundidade a montante ou a jusante, utilizadas a partir de 1930 nos EUA e por volta de 1940 na Holanda (Burt e Piao, 2002), possuem ampla aplicação na regulação do nível da água em canais de irrigação. As mais conhecidas são as comportas hidromecânicas AMIL, AVIO e AVIS,

surgidas na década de 1950, cujas patentes foram registradas pela companhia francesa Neyrtec (Erbiste, 1987).

As comportas AMIL são utilizadas para controlar a profundidade da água a montante, enquanto as comportas AVIO e AVIS são utilizadas para o controle da profundidade a jusante. A do tipo AVIO controla o escoamento proveniente de uma descarga de fundo ou orifício, enquanto que a do tipo AVIS controla o escoamento na superfície da água (Alstom, 2005).

A comporta AMIL (Figura 1) dispõe de um flutuador para controle da abertura de um paramento radial, e sua regulação é realizada por um sistema de contrapesos. O equilíbrio da comporta depende dos momentos

diminuir, fazendo com que o empuxo sobre o flutuador decresça. Assim, a abertura da comporta aumenta até que o sistema atinja o ponto de equilíbrio. Caso a demanda diminua, o aumento da profundidade a jusante fará com que haja um incremento no empuxo. Dessa forma, a abertura da comporta diminui até que o sistema atinja uma nova posição de equilíbrio. A alteração da área de escoamento promove a manutenção da profundidade à jusante em um valor aproximadamente constante (Erbiste, 1987; Alstom, 2005).

Por serem comportas radiais, a força necessária para o movimento das comportas hidromecânicas é mínima, desde que a posição do eixo de rotação coincida com os centros de curvatura do paramento e do flutuador. Outra vantagem é que, associando-a com estruturas fixas, é possível obter vazões aproximadamente constantes no tempo.

Entretanto, depois de projetada, a comporta hidromecânica possibilita uma alteração muito pequena no valor da profundidade controlada. Além disso, a comporta é bastante suscetível às perturbações na superfície da água e à ação do vento, sendo necessária a utilização de amortecedores para minimizar o problema (Collischonn et al., 2001).

O controle automático do nível de montante também pode ser obtido com comportas basculantes. Burt et al. (2001) propuseram um novo procedimento para o projeto de comportas basculantes automáticas, com o objetivo de reduzir as diferenças entre a profundidade de projeto e a profundidade efetivamente mantida após a instalação do equipamento.

De forma similar à comporta AMIL, o funcionamento da comporta basculante consiste no equilíbrio de momentos em relação ao seu eixo de rotação: o momento causado pela pressão da água sobre o seu paramento – que tende a abrí-la – e o momento contrário gerado pelas massas do contrapeso e da própria comporta – que tende a fechá-la. Qualquer alteração na profundidade a montante gera um ajuste na vazão descarregada pela mudança na abertura da comporta, fazendo com que a profundidade se mantenha próxima a um valor predeterminado.

Ainda que a automação hidráulica por intermédio de comportas hidromecânicas tenha facilitado a operação de canais, outras alternativas surgiram nas últimas décadas. A modelagem matemática do escoamento em condutos livres, associada aos avanços da eletrônica e da informática,

possibilitou a criação de diversos controladores eletromecânicos e softwares de manejo. O desenvolvimento e a aplicação de modelos matemáticos na operação de canais de irrigação vêm sendo abordados em diversos trabalhos científicos, tais como os realizados por Kumar et al. (2002), Rijo (2003), Clemmens et al. (2005), Lecina e Playan (2006a, 2006b) e Wahlin e Clemmens (2006).

Um exemplo bem sucedido da aplicação da eletrônica na automação de canais de irrigação é o trabalho de Mareels et al. (2005), que apresentaram um sistema de distribuição de água em canais equipado com reguladores transversais automáticos. O sistema conta com um algoritmo de controle para comandar o acionamento dos diversos reguladores a partir de dados básicos como profundidade da água e posição do paramento da comporta. Na rede de distribuição onde o sistema foi implantado, a eficiência na distribuição de água aumentou de 70% para 90%, após a substituição da operação manual pela operação automática. A patente de invenção relativa ao regulador apresentado por Mareels et al. (2005) foi concedida a Aughton et al. (2007). Segundo os inventores, a principal vantagem desse regulador é o torque relativamente pequeno necessário para o seu acionamento.

Muitos outros inventos interessantes aplicáveis ao controle de profundidades em canais de irrigação surgiram nos últimos anos, tais como os equipamentos apresentados por Townshend (2001) e Obermeyer (2006). Ainda que alguns não necessitem de energia externa para sua operação, a maioria apresenta regulagens complexas, o que limita a sua aplicabilidade.

2.1.2 Controle da vazão nos canais de derivação

Em redes de canais de irrigação, a distribuição da água para as parcelas irrigadas é realizada por intermédio de estruturas hidráulicas denominadas tomadas de água, que controlam a vazão em pontos específicos do sistema (Renault e Hemakumara, 1999; Collischonn et al., 2001).

Uma estrutura de grande uso em tomadas de água é o vertedor retangular. Diversos autores analisaram o escoamento através de vertedores retangulares posicionados em tomadas laterais, entre eles Swamee et al. (1994a, 1994b), Singh et al. (1994) e Muslu (2001). Geralmente, os

vertedores oferecem pouca ou nenhuma opção de regulagem. Além disso, apresentam uma variação muito grande na vazão com a alteração da carga hidráulica, não sendo recomendados para a regulagem de vazões. Por outro lado, são estruturas muito simples, de fácil construção e instalação, e também podem ser usados como medidores de vazão.

Outra estrutura simples, provavelmente a mais utilizada em tomadas de água, é a comporta vertical do tipo gaveta. É comum a sua instalação na lateral dos canais principais, regulando a vazão para um canal secundário. As características hidráulicas das comportas verticais posicionadas lateralmente foram estudadas por Swamee et al. (1993) e Ghodsian (2003), entre outros. As principais vantagens dessa comporta são a simplicidade de uso, o baixo custo e a possibilidade de servir como medidor de vazão, desde que devidamente calibrada. Contudo, apresenta a desvantagem de ser sensível às alterações na carga hidráulica, permitindo variação significativa na vazão, ainda que seja mais eficiente que o vertedor retangular.

Um equipamento menos sensível à alteração na carga hidráulica é o módulo de máscaras, constituído por um conjunto de comportas construídas de forma a minimizar as variações na vazão a jusante frente às variações na profundidade da água a montante. Ao contrário das comportas hidromecânicas, o módulo de máscaras não possui nenhuma parte móvel, e o controle da vazão é obtido de forma estática. O escoamento ocorre entre uma soleira de perfil especial e um paramento (máscara) fixo. Se a profundidade da água estiver abaixo do início da máscara, o escoamento se dá em superfície livre (Figura 2a). Se a profundidade aumentar, tocando a máscara, o escoamento passa a ocorrer como em uma comporta de fundo (Figura 2b). A forma da máscara foi projetada de forma que a contração do jato aumente à medida que a carga hidráulica aumenta (Figura 2c). Assim, o coeficiente de descarga vai decrescendo com o aumento da carga, e o aumento da vazão é relativamente pequeno.

O equipamento é composto de módulos diferenciados pela vazão fornecida. Cada módulo pode operar nas posições aberto ou fechado, pela ação de um paramento vertical. A vazão é regulada pela abertura ou fechamento dos diversos módulos. De acordo com Alstom (2005), podem ser obtidos módulos de máscaras com vazão nominal de 0,03 a 3,0 m³ s⁻¹. O

módulo de máscaras modelo X₂, com vazão nominal de 0,03 m³ s⁻¹, possui três módulos, sendo que cada um fornece uma vazão diferente: 0,005, 0,010 e 0,015 m³ s⁻¹. Com a combinação dos diferentes módulos, é possível obter vazões de 0,005 a 0,030 m³ s⁻¹, com intervalos de 0,005 m³ s⁻¹.

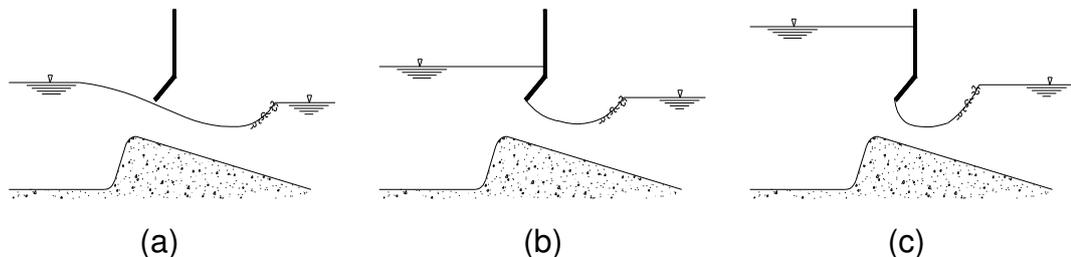


Figura 2. Esquema de funcionamento do módulo de uma máscara. Fonte: Alstom (2005).

Além dos equipamentos citados, diversos controladores eletromecânicos estão disponíveis para regulagem de vazão em tomadas de água, como o desenvolvido por Stringam e Pugh (2002). Esse controlador é composto de uma comporta vertical provida de um atuador linear, um sensor de posição, um medidor de vazão e um sensor de altura de lâmina de água colocados no canal secundário, além de uma unidade de processamento de dados. O sensor de altura de lâmina permite a quantificação da vazão no medidor. A partir da vazão e da altura de abertura da comporta obtida com o sensor de posição, a central de processamento de dados aciona o atuador linear, para ajustar a área de escoamento, mantendo a vazão constante no tempo. O atuador é composto de um motor elétrico e necessita de uma fonte de energia externa.

Craig et al (2006) desenvolveram um sistema semelhante para o controle da vazão em canais (Figura 3), dotado de uma comporta com dois paramentos (10) movidos por atuadores (20 e 32). O movimento dos atuadores é comandado por um controlador (22) que processa o sinal enviado por um sensor de nível (24) situado a montante. A comporta permite o controle da vazão a jusante e pode ser construída em diversos tamanhos.

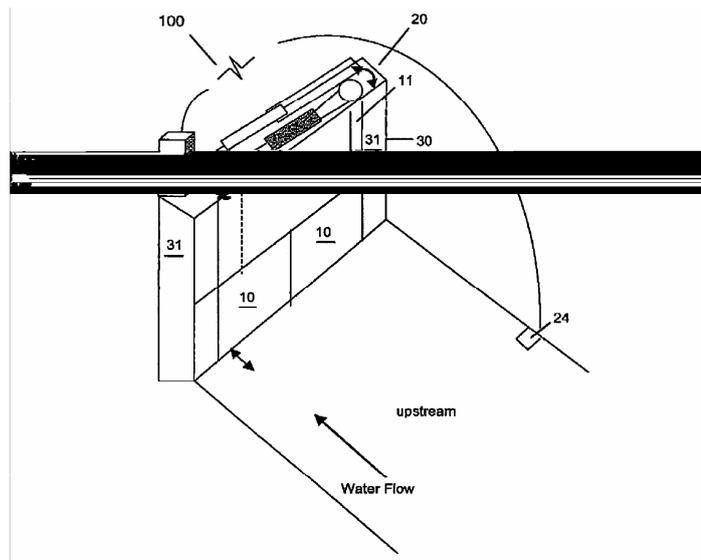


Figura 3. Croqui da comporta para controle de vazão a jusante. Fonte: Craig et al. (2006).

A principal desvantagem dos controladores eletromecânicos citados é a necessidade de energia externa para o seu funcionamento. Apesar de os autores não tratarem os sistemas de alimentação como parte integrante dos equipamentos, sugerem que a alimentação seja realizada por uma bateria associada a um painel fotovoltaico, o que pode aumentar consideravelmente o custo de tais equipamentos.

Uma estrutura automática que não necessita de fonte de energia externa é o regulador de vazão desenvolvido por Amaral et al. (2005), cujo projeto foi baseado no princípio de funcionamento do *Autoregulator* (Hernandez, 1969). O regulador (Figura 4) possui um tubo deslizante com orifícios laterais perfurados ao redor da sua parede que permitem a passagem da água para o canal secundário. Esse tubo é conectado a um flutuador que acompanha as variações na profundidade da água no canal principal. O movimento vertical do tubo deslizante é guiado por um tubo fixo que funciona como uma luva. Quando a profundidade da água no canal principal se altera, o tubo deslizante é movimentado pela ação do flutuador até atingir uma nova posição de equilíbrio. Dessa forma, a carga hidráulica sobre os orifícios e, por conseguinte, a vazão fornecida ao canal secundário permanecem aproximadamente constantes.

Nos testes preliminares, o regulador automático de vazão apresentou variação de apenas 5,6% na vazão com a alteração de 0,20 m no nível da

água no canal principal. Com esse desempenho, seu emprego em tomadas de água submetidas a variações expressivas na profundidade a montante permitiria controle satisfatório da vazão descarregada. Contudo, o projeto ainda depende de diversos aperfeiçoamentos para que sua fabricação em série seja viável, tais como a padronização da forma e do material dos seus componentes, bem como a sua calibração em toda a sua faixa de operação.

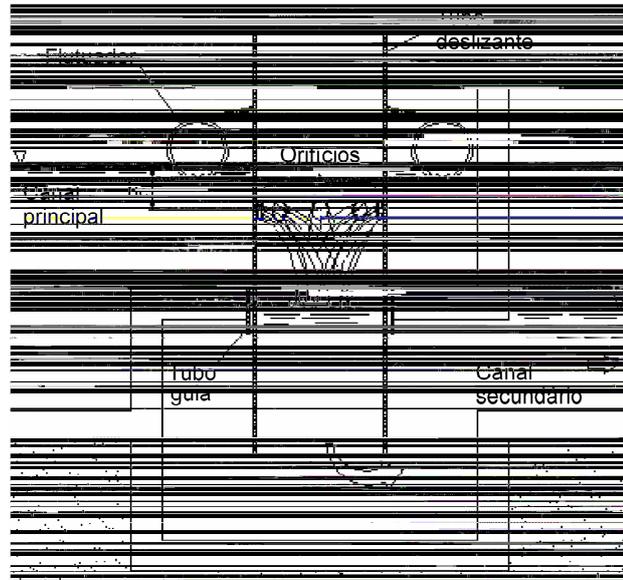


Figura 4. Croqui do regulador automático de vazão. Fonte: Amaral et al. (2005).

2.2 Vazão em orifícios

Os orifícios são dispositivos comumente utilizados para controle e medição de vazão (Chanson et al., 2002; Shammaa et al., 2005), tendo grande importância em hidráulica e irrigação. Segundo a definição de Porto (1998), do ponto de vista hidráulico, orifício é uma abertura de perímetro fechado e forma geométrica conhecida praticada nas paredes de um reservatório, canal ou conduto sob pressão. O escoamento se dá pela ação das energias potencial e cinética que o líquido possui, sendo que todo o perímetro interno da abertura está em contato com o líquido.

Várias classificações, com base em diversos critérios, foram propostas para facilitar o estudo dos orifícios. Quanto à dimensão relativa, os orifícios podem ser classificados em pequenos (quando a dimensão vertical é igual

ou inferior a um terço da profundidade da água em relação ao seu centro de gravidade) ou grandes (nos demais casos). Quanto à natureza da parede, esta pode ser considerada delgada (quando sua espessura é menor que 1,5 vezes a menor dimensão do orifício, caso em que o jato toca a perfuração em apenas uma linha) ou espessa (nos casos em que o jato adere ao interior da parede do orifício). Quando a espessura da parede corresponde a um valor entre 2 e 3 vezes a menor dimensão do orifício, tem-se um bocal (Netto et al., 1998).

2.2.1 Velocidade do escoamento

Para demonstrar o cálculo da velocidade do escoamento em um orifício, King et al. (1945) representaram o problema conforme a Figura 5. Considerando que os compartimentos fechados A e B estão submetidos às pressões p_A e p_B , de forma que o movimento ocorra de A para B, pode-se tomar uma partícula que, ao escoar, percorre a trajetória mn . No ponto m , a partícula está situada a uma profundidade h_m e a uma altura z acima do orifício. Ao passar pelo orifício (ponto n), a partícula atinge a profundidade h_C . Tomando-se as velocidades da partícula em m e n como v_m e v_n , respectivamente, e desprezando-se as perdas de carga, a equação de Bernoulli entre esses dois pontos pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{v_m^2}{2g} + \left(h_m + \frac{p_A}{\gamma} \right) + z = \frac{v_n^2}{2g} + \frac{p_B}{\gamma} \quad (1)$$

em que:

v_m = velocidade da partícula no ponto m , $m \text{ s}^{-1}$;

g = aceleração da gravidade, $m \text{ s}^{-2}$;

h_m = profundidade da partícula no ponto m , m ;

p_A = pressão no compartimento A, $N \text{ m}^{-2}$;

γ = peso específico do fluido, $N \text{ m}^{-3}$;

z = altura da partícula em relação ao centro do orifício no ponto m , m ;

v_n = velocidade da partícula no ponto n , $m \text{ s}^{-1}$; e

p_B = pressão no compartimento B, $N \text{ m}^{-2}$.

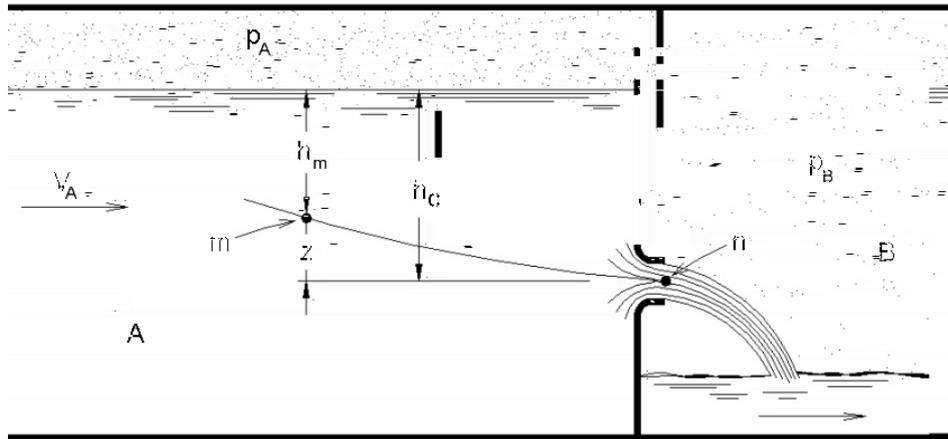


Figura 5. Escoamento por um orifício. Fonte: King et al. (1945).

Fazendo $h_m + z = h_c$, e isolando-se v_n , obtém-se a expressão geral da relação entre a velocidade e a carga, em qualquer ponto da trajetória:

$$v_n = \sqrt{2g \left[h_c + \frac{v_m^2}{2g} + \left(\frac{\rho_A}{\gamma} - \frac{\rho_B}{\gamma} \right) \right]} \quad (2)$$

em que:

h_c = profundidade ou carga hidráulica do fluido em relação ao centro de gravidade do orifício, m.

Como as partículas fluidas estão passando pelo orifício sob diferentes cargas, suas velocidades também são diferentes. Entretanto, quando as dimensões do orifício são pequenas em relação à carga, considera-se que a velocidade média das partículas corresponde à carga média (Bos, 1989). Assim, desprezando-se a distribuição desigual das velocidades na seção transversal da veia líquida, pode-se escrever a equação de Bernoulli para toda a veia:

$$\frac{V_A^2}{2g} + h_c + \frac{\rho_A}{\gamma} = \frac{V_T^2}{2g} + \frac{\rho_B}{\gamma} \quad (3)$$

em que:

V_A = velocidade média de aproximação das partículas, $m\ s^{-1}$; e

V_T = velocidade média teórica das partículas ao passarem pelo orifício, $m\ s^{-1}$.

Isolando-se V_T :

$$V_T = \sqrt{2g \left[h_C + \frac{V_A^2}{2g} + \left(\frac{\rho_A}{\gamma} - \frac{\rho_B}{\gamma} \right) \right]} \quad (4)$$

Se o líquido no compartimento A e o jato no compartimento B estiverem sob a mesma pressão, $\rho_A = \rho_B$, e:

$$V_T = \sqrt{2g \left[h_C + \frac{V_A^2}{2g} \right]} \quad (5)$$

Os termos entre colchetes nas equações (4) e (5) representam a carga responsável pelo escoamento (H). Portanto, estas equações podem ser reescritas da seguinte forma:

$$V_T = \sqrt{2gH} \quad (6)$$

em que:

H = carga total disponível em relação ao centro de gravidade do orifício, m.

A equação (6) é a mesma que representa a velocidade adquirida por um corpo em queda livre no vácuo. Este princípio é conhecido como teorema de Torricelli (Neves, 1989). Se a área da superfície do reservatório for grande em relação à seção do orifício, pode-se desprezar a velocidade de aproximação (King et al., 1945), obtendo-se a seguinte expressão:

$$V_T = \sqrt{2gh_C} \quad (7)$$

Em termos práticos, Bos (1989) e Netto et al. (1998) afirmam não ser necessário considerar a velocidade de aproximação quando a área do orifício é inferior a 10% da área da superfície do reservatório.

Quando o fluido atravessa o orifício, ocorre dissipação de energia devido ao atrito interno oriundo da sua viscosidade e ao atrito do fluido com as bordas do orifício, ocasionando redução da velocidade do jato. À relação

entre a velocidade real e a velocidade teórica denomina-se coeficiente de velocidade (King et al., 1945). Desta forma:

$$C_V = \frac{V}{V_T} \quad (8)$$

em que:

- C_V = coeficiente de velocidade, adimensional; e
- V = velocidade média real do fluido na seção contraída, $m\ s^{-1}$.

Assim, pode-se reescrever a equação (6) da seguinte maneira:

$$V = C_V \sqrt{2gH} \quad (9)$$

Netto et al. (1998) recomendam a utilização de $C_V = 0,985$ para orifícios pequenos em parede delgada.

2.2.2 Contração da veia líquida

De acordo com Bos (1989), as partículas líquidas afluem ao orifício de todas as direções, segundo trajetórias convergentes. A combinação da sua inércia com as componentes de velocidade paralelas ao plano do orifício evita que as partículas mudem bruscamente de direção ao se aproximarem do orifício. Assim, as partículas movem-se em trajetórias curvilíneas, obrigando o jato a se contrair pouco além do orifício. A seção do jato que corresponde à contração máxima, na qual as trajetórias das partículas são sensivelmente paralelas entre si, é denominada *vena contracta*.

À relação entre a área da seção contraída e a área do orifício denomina-se coeficiente de contração (Ávila, 1974). Desta forma:

$$C_C = \frac{A_C}{A_O} \quad (10)$$

em que:

- C_C = coeficiente de contração, adimensional;
- A_C = área da seção contraída, m^2 ; e
- A_O = área do orifício, m^2 .

Quando a contração da veia líquida ocorre ao redor de todo o contorno do orifício, diz-se que a contração é completa (Bos, 1989). Nesse caso, o valor médio prático de C_C é 0,62 (Netto et al., 1998). Para assegurar a contração completa da veia líquida em um orifício de parede delgada, Ávila (1974) afirma que o orifício deve estar afastado das paredes laterais e do fundo por uma distância de, no mínimo, três vezes a sua menor dimensão.

2.2.3 Cálculo da vazão em orifícios

A vazão teórica que escoar por um orifício é obtida pelo produto da velocidade média teórica pela área do orifício:

$$Q_T = A_O \sqrt{2gH} \quad (11)$$

em que:

$$Q_T = \text{vazão teórica através do orifício, m}^3 \text{ s}^{-1}.$$

A vazão real, entretanto, é menor do que Q_T , devido à redução da velocidade e à contração da veia líquida. Para se obter a vazão real, é necessário introduzir C_C e C_V na equação (11):

$$Q = (C_C C_V) (A_O \sqrt{2gH}) \quad (12)$$

em que:

$$Q = \text{vazão real através do orifício, m}^3 \text{ s}^{-1}.$$

O produto $C_C C_V$ é denominado coeficiente de vazão ou de descarga (C_D), podendo a equação (12) ser reescrita como:

$$Q = C_D A_O \sqrt{2gH} \quad (13)$$

em que:

$$C_D = \text{coeficiente de descarga, adimensional.}$$

Para orifícios em geral, adota-se $C_D = 0,61$ como valor médio (Netto et al., 1998). Entretanto, devido às inúmeras configurações em que os orifícios podem ser aplicados, a utilização do valor médio deve ser feita com cautela, devido, principalmente, às variações no coeficiente de contração.

A contração da veia líquida pode ser suprimida parcial ou completamente, provocando alteração no coeficiente de descarga. A supressão da contração pode ser obtida aumentando-se a espessura da parede do orifício, arredondando-se as suas bordas internas, reduzindo-se a distância entre as bordas do orifício e as laterais e/ou o fundo do reservatório, reduzindo-se a carga para um valor abaixo da altura mínima requerida para contração completa ou colocando-se dois ou mais orifícios lado a lado na mesma parede (Hughes e Safford, 1924).

Outro fator que reduz a contração da veia líquida é a rugosidade da face interna da parede onde o orifício está instalado. Quando a superfície adjacente à entrada do orifício é áspera, as componentes de velocidade paralelas ao plano da parede do orifício se retardam. Conseqüentemente, a contração da veia líquida se reduz (Bos, 1989).

Definidas as características de um determinado orifício (forma, área e espessura da parede), e considerando que o escoamento ocorre com contração completa da veia e descarga livre, o valor de C_D dependerá, exclusivamente, do número de Reynolds (Re) (Ávila, 1974).

Hughes e Safford (1924) apresentaram uma coletânea de valores de C_D de orifícios retangulares com diversas dimensões, submetidos a diferentes cargas hidráulicas. Os dados foram atribuídos a Smith, Ellis, Bovey, Poncelet e Lesbros, e são pertinentes a orifícios retangulares com dimensão horizontal maior do que a vertical, perfurados em parede delgada vertical e operando com contração completa da veia. Na Figura 6 são apresentados os valores de C_D em função de Re , para 94 condições diferentes. Os valores de Re foram calculados pela seguinte equação (Netto et al., 1998), considerando-se água limpa a 20 °C:

$$Re = \frac{\rho \sqrt{2gH}(4R_H)}{\mu} \quad (14)$$

em que:

- Re = número de Reynolds, adimensional;
- ρ = massa específica do fluido, kg m⁻³;
- R_H = raio hidráulico, m; e
- μ = viscosidade absoluta do fluido, N s m⁻².

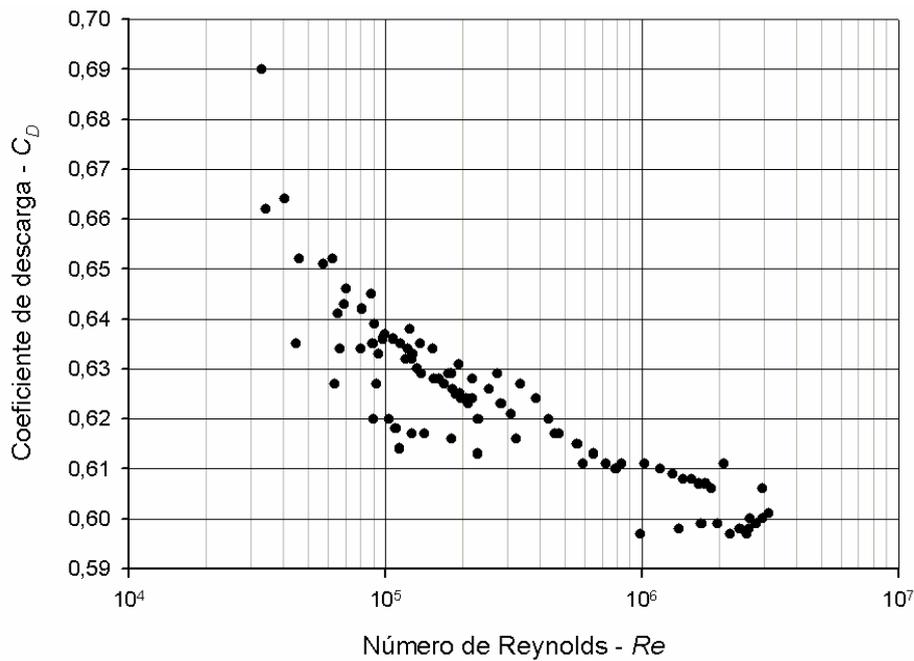


Figura 6. Coeficientes de descarga de orifícios retangulares em parede plana em função do número de Reynolds. Fonte: adaptado de Hughes e Safford (1924).

Conforme a Figura 6, C_D diminui com o aumento de Re na faixa de valores avaliados. Essa mesma tendência é observada nas curvas apresentadas por Rouse (1951) e Ávila (1974) para orifícios circulares em parede delgada vertical.

2.2.4. Coeficiente de descarga de orifícios retangulares sob cargas reduzidas

A vazão em orifícios retangulares pode ser calculada com a equação (13), desde que o valor de C_D seja conhecido. Entretanto, King et al. (1945) afirmam que quando a carga é pequena em relação à altura do orifício, há uma diferença apreciável entre a vazão calculada com a equação (13), onde se considera a carga média (H), e a vazão real.

De acordo com Porto (1998), se a dimensão vertical de um orifício é relativamente grande, a carga hidrostática que produz o escoamento é substancialmente menor na borda superior do orifício, e não se pode admitir que as velocidades dos filetes líquidos sejam iguais desde o topo até a borda inferior. Como a variação na carga ao longo da altura do orifício é considerável, a utilização de H provocaria erro no cálculo da vazão. Nesses casos, o cálculo deve ser realizado considerando-se faixas elementares do orifício, de

altura infinitesimal (Porto, 1998), conforme a Figura 7. Desprezando-se V_A e assumindo-se que as pressões na superfície da água e sobre o jato são iguais, a vazão escoada por um elemento infinitesimal de área Ldh é dada por:

$$dQ = C_D L dh (2gh)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

em que:

L = largura do orifício, m; e

h = carga hidráulica sobre o elemento infinitesimal de área, m.

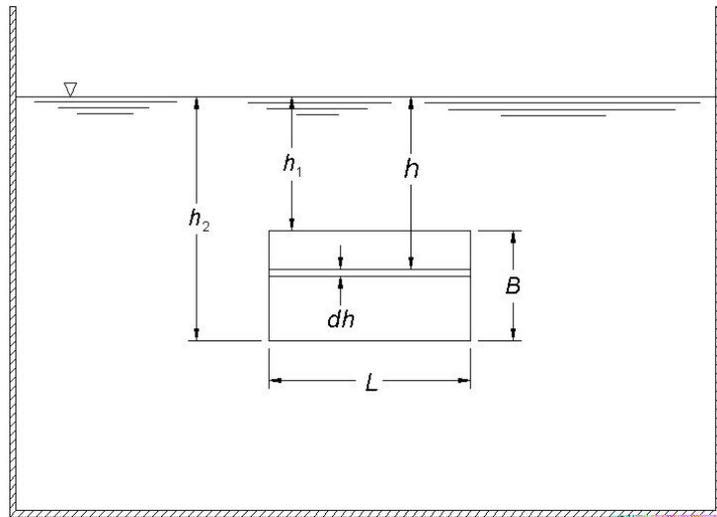


Figura 7. Orifício retangular sob carga reduzida. Fonte: King et al. (1945).

Integrando-se a equação (15) entre os limites h_1 e h_2 , admitindo-se que C_D seja praticamente o mesmo em todas as faixas, obtém-se:

$$Q = C_D L (2g)^{\frac{1}{2}} \int_{h_1}^{h_2} h^{\frac{1}{2}} dh = \frac{2}{3} C_D L (2g)^{\frac{1}{2}} \left(h_2^{\frac{3}{2}} - h_1^{\frac{3}{2}} \right) \quad (16)$$

em que:

h_1 = carga hidráulica sobre a borda superior do orifício, m; e

h_2 = carga hidráulica sobre a borda inferior do orifício, m.

Segundo Neves (1989), o erro no cálculo da vazão com a equação (13) pode ser desprezado quando $h_C > 2B$. A maioria dos autores, entretanto, é mais conservadora, admitindo que a equação (13) pode ser utilizada sem erro considerável quando $h_C > 3B$ (Hughes e Safford, 1924; Netto et al., 1998; Porto, 1998). Para os casos em que $h_C \leq 3B$, o cálculo da vazão deve ser feito com a equação (16).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Visando à utilização racional da água em projetos de irrigação, desenvolveu-se um regulador de vazão que permite o ajuste automático da carga hidráulica, para manutenção de vazões aproximadamente constantes mesmo com variações no nível da água a montante.

A concepção e o dimensionamento do regulador foram baseados em conhecimentos teóricos, na observação de estruturas com finalidades similares e no conhecimento prático adquirido durante a construção e a avaliação de dois protótipos que antecederam a criação do equipamento avaliado no presente trabalho.

O equipamento foi projetado para possibilitar o escoamento da água do canal principal para o canal de derivação através de orifícios retangulares praticados na parede de um tubo de seção circular. Visando a um melhor entendimento do escoamento através desses orifícios, procedeu-se à determinação de coeficientes de descarga para o caso de orifícios retangulares perfurados em parede delgada vertical curva.

Em seguida, construiu-se um protótipo do equipamento em escala real, sendo este avaliado em laboratório para determinação da variação na vazão fornecida e das suas curvas características, visando à sua aplicação em condições de campo.

3.1 Projeto e construção do regulador automático de vazão

O projeto foi baseado no princípio de funcionamento do *Autoregulator* (Hernandez, 1969) e nas características construtivas do regulador automático de vazão (Amaral et al., 2005) apresentado na seção 2.1.2 (Figura 4).

No presente trabalho, foram propostas modificações no regulador automático de vazão com a finalidade de possibilitar a sua fabricação em série, padronizando as dimensões e os materiais dos seus componentes e facilitando sua instalação e operação em canais com características dimensionais diversas. Além disso, visando à obtenção de um equipamento durável e de preço acessível, priorizou-se o emprego de materiais de baixo custo, com durabilidade e resistência satisfatórias.

O regulador automático de vazão construído é composto de um tubo deslizante dotado de orifícios laterais para escoamento da água. Com liberdade de movimento na direção vertical, esse tubo desliza dentro de um tubo guia e está unido a um flutuador que possibilita o ajuste da sua posição vertical conforme o nível da água no canal principal. O conjunto está posicionado dentro de uma caixa de captação que possui dois compartimentos: o superior, onde a profundidade da água corresponde à do canal principal, e o inferior, onde a profundidade corresponde à do canal de derivação (Figura 8).

O equipamento foi projetado para operar em canais onde a variação na profundidade a montante da tomada de água atinge, no máximo, 0,15 m e a diferença entre as superfícies da água nos canais de abastecimento e de derivação alcança, no mínimo, 0,50 m. Tais condições são necessárias para que haja possibilidade de ampla regulação na vazão fornecida pelo regulador e, apesar de restritivas, são observadas na maioria dos projetos de irrigação existentes no país. A vazão máxima de projeto foi definida em $0,030 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, possibilitando a utilização do equipamento em tomadas que derivam água a lotes de pequeno e médio porte (com área de até 30 ha, aproximadamente).

As cargas hidráulicas nominais mínima e máxima sobre os orifícios foram fixadas em 0,10 m e 0,20 m, respectivamente, em função das pequenas diferenças de nível que normalmente se observam entre as superfícies da água nos canais de abastecimento e de derivação das redes de distribuição.

Visando à regulagem da carga hidráulica, o flutuador foi projetado com

entre orifícios. As bordas dos orifícios foram confeccionadas em ângulo reto, sem bisel, com faces verticais seguindo o prolongamento do raio do tubo.

Os orifícios foram dimensionados a partir da área total de escoamento (A) necessária para suprir a vazão máxima de projeto, calculada pela equação (13), utilizando-se $H = 0,20$ m, $C_D = 0,61$, arbitrado com base na recomendação de Netto et al. (1998), e desprezando-se a carga cinética de aproximação. Nessas condições, obteve-se $A = 0,0248$ m², correspondente a uma área por orifício (A_O) igual a $0,0031$ m². A partir do valor obtido para a área de cada orifício e arbitrando-se que a largura do orifício seria igual ao dobro da altura ($L/B = 2$), obteve-se $L = 0,08$ m (medida sobre a circunferência do tubo deslizante) e $B = 0,04$ m. O valor das áreas foi então recalculado, obtendo-se $A_O = 0,0032$ m² e $A = 0,0256$ m².

O diâmetro externo do tubo deslizante (d_{ext}) foi calculado em função da circunferência necessária para conter os oito orifícios. Sem considerar o espaçamento entre orifícios, seria necessário um diâmetro de $0,204$ m. Dessa forma, optou-se pela utilização de um tubo deslizante com $d_{ext} = 0,250$ m, possibilitando um espaçamento de aproximadamente $0,018$ m entre orifícios. Na seleção do diâmetro, levou-se em conta também a possibilidade de utilização de um tubo de PVC de diâmetro comercial como modelo para a fabricação do molde do tubo deslizante.

Para que a faixa de vazões fornecidas pelo equipamento fosse mais ampla, o regulador foi projetado de forma que os orifícios pudessem ser obstruídos parcial ou totalmente e, assim, diferentes áreas de escoamento fossem utilizadas de acordo com a vazão necessária. Desse modo, três tipos de tampões foram projetados para obstruir os orifícios. Um deles foi projetado para permitir a utilização de 75% da área de escoamento do orifício (tampão tipo A); o segundo, a utilização de 50% da área (tipo B); e o terceiro, a obstrução total do orifício (tipo C). Diversas áreas de escoamento foram obtidas com a combinação dos diferentes tampões, tornando possível a utilização do regulador em uma ampla faixa de vazões.

Na Tabela 1 são apresentados os tipos de tampão a serem utilizados nos orifícios em cada uma das nove combinações previstas e, na Tabela 2, as áreas de escoamento e as vazões estimadas correspondentes a cada combinação. Após a construção do regulador, as dimensões para o cálculo

das áreas dos orifícios do tubo deslizante e dos tampões foram medidas com o auxílio de um paquímetro universal com resolução de 0,05 mm.

Tabela 1. Tipo de tampão utilizado em cada orifício nas diferentes combinações previstas

Combinação	Número do orifício							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	B*	C*	C	C	B	C	C	C
2	A*	C	C	C	A	C	C	C
3	L*	C	C	C	L	C	C	C
4	C	A	C	B	C	A	C	B
5	C	L	C	B	C	L	C	B
6	C	L	C	L	C	L	C	L
7	A	B	A	B	A	B	A	B
8	A	L	B	L	A	L	B	L
9	L	L	L	L	L	L	L	L

* A = tampão do tipo A (75% da área de escoamento; B = tampão do tipo B (50% da área); C = tampão do tipo C (obstrução total); L = orifício totalmente aberto (100% da área).

Tabela 2. Área total de escoamento e vazões mínima e máxima estimadas para as diferentes combinações previstas

Combinação	Área total* - A (m ²)	Vazão mínima** (m ³ s ⁻¹)	Vazão máxima*** (m ³ s ⁻¹)
1	0,0032	0,0027	0,0039
2	0,0048	0,0041	0,0058
3	0,0064	0,0055	0,0077
4	0,0080	0,0068	0,0097
5	0,0096	0,0082	0,0116
6	0,0128	0,0109	0,0155
7	0,0160	0,0137	0,0193
8	0,0208	0,0177	0,0251
9	0,0256	0,0218	0,0309

* Soma das áreas dos orifícios totalmente abertos e/ou parcialmente abertos;

** Calculada com a equação (16), com $C_D = 0,61$ e $h_C = 0,10$ m;

*** Calculada com a equação (16), com $C_D = 0,61$ e $h_C = 0,20$ m.

3.1.2 Dimensionamento do flutuador

O flutuador foi construído com uma parede de aproximadamente 3 mm, possuindo interior oco. Optou-se por uma seção transversal retangular, para que houvesse proporcionalidade entre a variação no nível da água e a variação no empuxo. Além disso, foi escolhida uma seção com a maior

largura de base possível, de forma que uma pequena alteração no nível da água causasse uma variação relativamente grande no empuxo, tornando o equipamento mais sensível às alterações na profundidade da água.

O dimensionamento do flutuador foi realizado pelo método das tentativas, procurando-se obter um flutuador com volume suficiente para produzir, quando totalmente submerso, um empuxo igual ao dobro da soma do seu peso com o peso do tubo deslizante. As estimativas do peso do conjunto e do empuxo produzido pelo flutuador foram obtidas por simulação computacional com o software AutoCAD (Autodesk, 2003).

3.1.3 Dimensionamento do tubo guia

O tubo guia foi dimensionado de forma que o vazamento de água na folga entre os tubos fosse o menor possível. Conforme Fox e McDonald (2001), o vazamento entre as paredes de dois tubos pode ser considerado como um escoamento laminar completamente desenvolvido entre placas paralelas infinitas, desde que a folga seja suficientemente pequena e que $Re \leq 1400$. Nessas condições, tem-se que:

$$Q_F = \frac{\pi d_{ext} E_F^3 \gamma \Delta h}{12 \mu C_F} \quad (17)$$

em que:

- Q_F = vazão na folga entre os tubos, $m^3 s^{-1}$;
- d_{ext} = diâmetro externo do tubo deslizante, m;
- E_F = espessura da folga, m;
- Δh = diferença de carga entre a entrada e a saída da folga, m; e
- C_F = comprimento da folga, m.

Com base na equação (17), procurou-se reduzir ao máximo o diâmetro interno do tubo guia (D_{int}), para que o valor de E_F fosse pequeno, e aumentar ao máximo o comprimento desse tubo, para que C_F fosse grande, reduzindo o valor da vazão na folga.

Dessa forma, definiu-se $E_F = 0,3$ mm, valor mínimo necessário para o deslizamento apropriado do tubo deslizante, conforme avaliações práticas preliminares, obtendo-se $D_{int} = 0,2506$ m.

O valor de C_F e, conseqüentemente, do comprimento do tubo guia, foi fixado em 0,25 m, valor suficiente para assegurar o alinhamento vertical do tubo deslizante. Valores maiores proporcionariam a redução do contato linear entre os dois tubos em algumas posições assumidas pelo tubo deslizante, acarretando redução de C_F e, conseqüentemente, maior variação na vazão da folga.

3.1.4 Dimensionamento da caixa de captação

A largura e o comprimento da caixa de captação foram definidos em função do diâmetro do flutuador e do espaço necessário para instalação de uma estrutura de dissipação de energia (Figura 9), necessária para redução da turbulência no compartimento superior. Por outro lado, evitou-se que o espaço requerido para a instalação da caixa de captação fosse demasiadamente grande, o que limitaria sua aplicabilidade no campo.

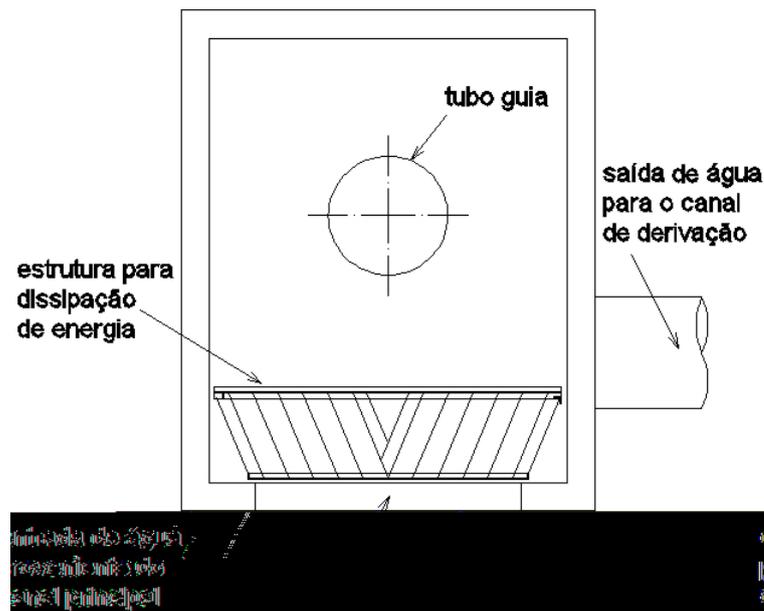


Figura 9. Croqui da caixa de captação (vista de topo).

A altura do compartimento superior foi fixada em 0,50 m, valor da diferença mínima entre as superfícies da água nos canais de abastecimento e de derivação fixada no projeto. A altura do compartimento inferior foi definida a partir do comprimento do tubo deslizante, prevendo-se um espaço mínimo de 0,35 m entre a borda inferior do tubo deslizante e o fundo do compartimento inferior.

3.1.5 Materiais utilizados na confecção do regulador automático de vazão

Todos os componentes do regulador foram construídos em fibra de vidro, em função do custo relativamente baixo, da alta inércia química e da resistência a intempéries desse material, o que o torna aplicável em ambientes agressivos a materiais convencionais como aço e madeira. Além disso, a fibra permite a moldagem de peças complexas e possui grande resistência à tração, ao impacto e à flexão (Matheus, 2002).

Para fabricação dos componentes do regulador, foram confeccionados modelos em escala real que permitiram a obtenção dos moldes das peças. Os modelos dos tampões dos orifícios e dos tubos guia e deslizante foram confeccionados em PVC, o da caixa de captação foi confeccionado em madeira e o do flutuador, em fibra de vidro. Os moldes das peças foram confeccionados em fibra de vidro, com a utilização de resinas específicas para lhes conferir maior durabilidade e resistência.

Uma das principais limitações oriundas do processo de fabricação de peças em fibra de vidro é que a superfície moldada só apresenta acabamento satisfatório na face que está em contato com o molde. O acabamento da outra face só é conseguido com processos posteriores, como lixamento. Por esse motivo, os moldes dos tubos guia e deslizante foram construídos de forma que a superfície interna do primeiro e a externa do segundo apresentassem melhor acabamento, já que

estudo foram utilizados orifícios retangulares praticados em parede plana (testemunha) e em paredes com diferentes curvaturas.

Foram utilizados quatro tubos de PVC, sendo um deles de seção quadrada com 0,350 m de aresta (construído a partir de lâminas de PVC de 5 mm de espessura) e os outros três de seção circular, com diâmetro externo de 0,250, 0,350 e 0,450 m e espessura de 3, 4 e 5 mm, respectivamente.

Nesses tubos foram perfurados orifícios retangulares com as mesmas dimensões adotadas para os orifícios do regulador automático de vazão, ou seja, $L = 0,08$ m (medido sobre o arco de circunferência do tubo) e $B = 0,04$ m. O controle das dimensões dos orifícios foi realizado com um paquímetro universal com resolução de 0,05 mm. Para o tubo de seção quadrada, as bordas dos orifícios foram construídas em ângulo reto, sem bisel (Figura 10a). Para os tubos de seção circular, a face das bordas verticais dos orifícios foi construída seguindo o prolongamento do raio do tubo (Figura 10b).

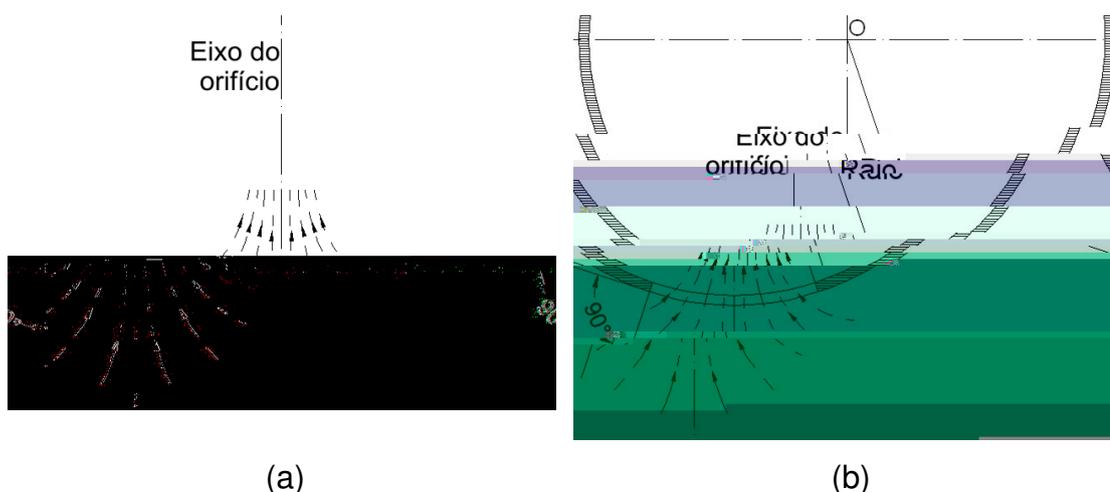


Figura 10. Forma das bordas verticais dos orifícios: (a) em parede plana e (b) em parede curva.

Os tubos foram ensaiados em um reservatório metálico com capacidade de 2 m³ equipado com um vertedor lateral de altura regulável para manutenção de nível constante (Figura 11). Além de estruturas para dissipação de energia, o reservatório continha um cone soldado ao seu fundo, que permitia a fixação dos tubos na vertical e a saída da água proveniente do orifício. O reservatório foi posicionado sobre um canal de concreto, possibilitando a transferência da água escoada pelo orifício até

outro reservatório de 5 m² de área superficial, dotado de uma régua linimétrica com resolução de 0,1 mm, para medição do volume escoado. A vazão no orifício foi obtida pelo método direto.

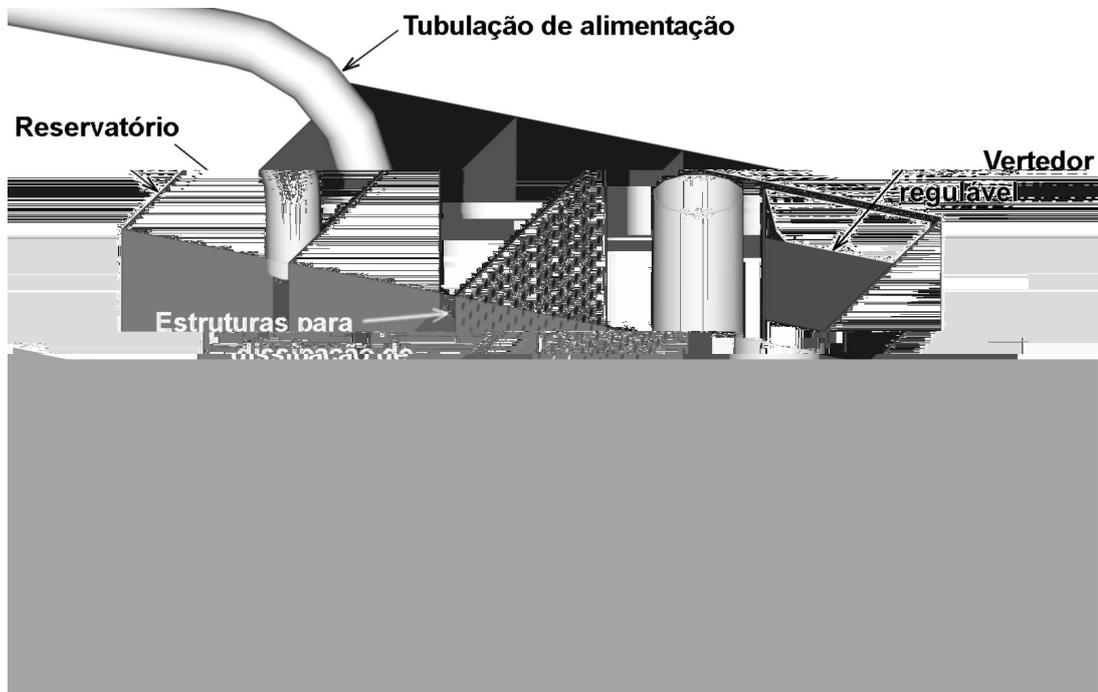


Figura 11. Desenho esquemático do reservatório de nível constante utilizado nos ensaios.

O experimento foi realizado segundo um esquema de parcelas subdivididas, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos principais (quantitativos) foram quatro diferentes ângulos entre o eixo do orifício e a reta tangente à sua parede (Figura 12): $\alpha = 1,57$ rad, correspondente ao orifício em parede plana, e $\alpha = 1,75, 1,80$ e $1,89$ rad para os tubos com diâmetro externo de 0,450, 0,350 e 0,250 m, respectivamente. Os tratamentos secundários (quantitativos) consistiram de cinco diferentes cargas hidráulicas medidas a partir do centro de gravidade dos orifícios: $h_C = 0,10, 0,20, 0,30, 0,40$ e $0,50$ m. A variável analisada foi o coeficiente de descarga dos orifícios, obtido a partir da equação (16).

Os dados foram submetidos a análise de regressão, tendo como variável dependente o C_D e independentes α e h_C . Para realizar a análise, utilizou-se o software SAS (SAS Institute Inc., 1999), e o modelo foi escolhido com base na significância dos coeficientes de regressão

utilizando-se o teste “t”, ao nível de 1% de probabilidade de erro, e no coeficiente de determinação ajustado aos graus de liberdade.

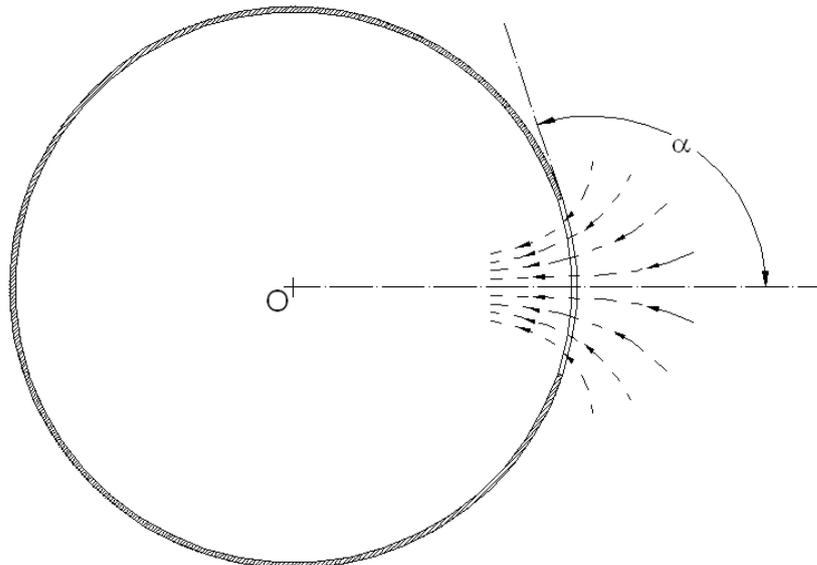


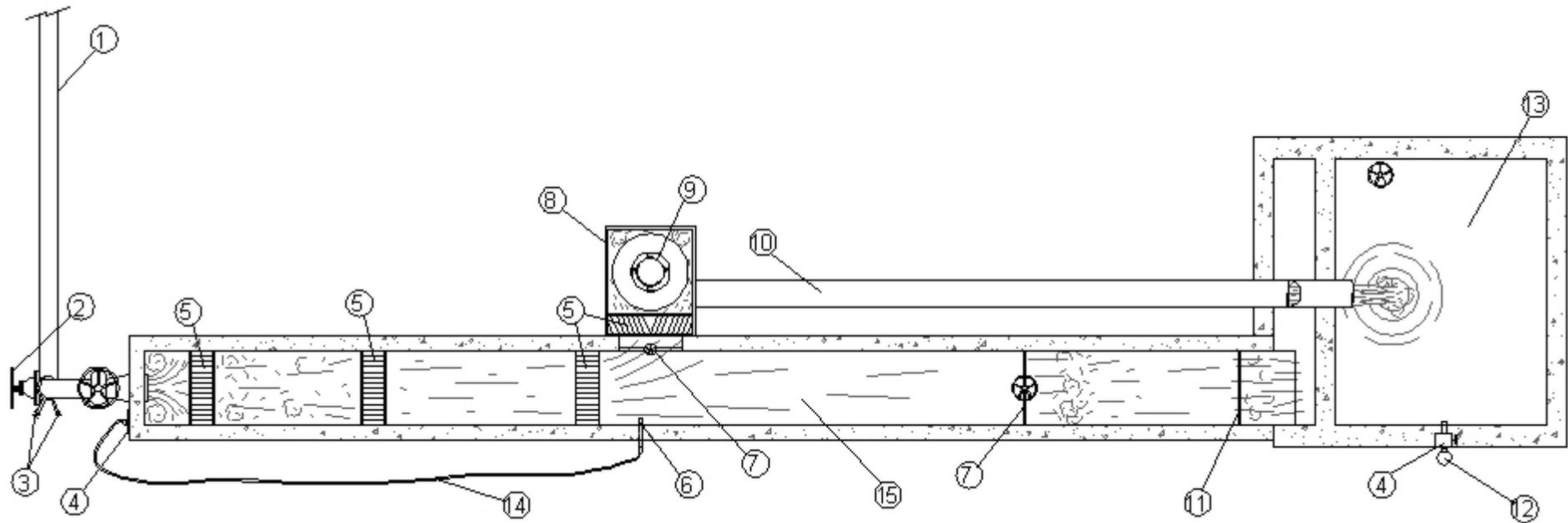
Figura 12. Ângulo entre o eixo do orifício e a reta tangente à sua parede.

Para facilitar a comparação entre os valores de C_D obtidos no experimento e aqueles citados na literatura, determinou-se Re para cada repetição utilizando-se a equação (14). A temperatura da água foi monitorada durante todo o experimento, possibilitando a determinação de ρ e μ a partir da tabela de propriedades da água fornecida por Fox e McDonald (2001).

3.3 Variação na vazão fornecida pelo regulador

Após a sua construção, o protótipo do regulador automático de vazão foi instalado em um canal de concreto do Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. O esquema da instalação é apresentado na Figura 13.

A variação na vazão fornecida pelo regulador automático de vazão foi determinada para todas as combinações de tampões previstas na Tabela 1. Em cada uma das nove combinações, foi determinada a variação na vazão para as cargas hidráulicas nominais (h_{NOM}) de 0,100, 0,125, 0,150, 0,175 e 0,200 m sobre o centro de gravidade dos orifícios, em três repetições.



Legenda:

- 1 – tubulação de alimentação
- 2 – válvula de gaveta para ajuste grosseiro da vazão
- 3 – válvula de gaveta para ajuste fino da vazão
- 4 – régua linimétrica
- 5 – estruturas de dissipação de energia
- 6 – tomada de nível
- 7 – comporta vertical
- 8 – caixa de captação

- 9 – regulador automático de vazão
- 10 – tubulação de saída
- 11 – vertedor retangular
- 12 – poço tranquilizador
- 13 – reservatório para coleta do volume escoado
- 14 – mangueira
- 15 – canal principal

Figura 13. Esquema de instalação do regulador automático de vazão em laboratório (vista de topo em escala 1:60).

Cada repetição consistiu em oito determinações da vazão fornecida pelo regulador (Q_{reg}), sendo quatro com o nível da água no canal principal em ascensão e quatro com o nível em descensão. Q_{reg} foi determinada nas profundidades de 0,30, 0,35, 0,40 e 0,45 m, tanto na ascensão quanto na descensão, utilizando-se o método direto. O volume escoado pelo equipamento foi determinado em um reservatório de 5 m² de área superficial, dotado de uma régua linimétrica com resolução de 0,1 mm, cada vez que o nível da água atingia as profundidades pré-estabelecidas.

A variação relativa na vazão fornecida pelo regulador em cada repetição foi calculada pela seguinte equação:

$$\Delta Q_{reg} = 100 \frac{(Q_{max} - Q_{min})}{Q_{med}} \quad (18)$$

em que:

ΔQ_{reg} = variação relativa na vazão fornecida pelo regulador em uma dada repetição, %;

Q_{max} = vazão máxima observada na repetição, m³ s⁻¹;

Q_{min} = vazão mínima observada na repetição, m³ s⁻¹; e

Q_{med} = vazão média fornecida pelo regulador na repetição, m³ s⁻¹.

Para alterar o nível da água no canal, a vazão na sua entrada era regulada com três válvulas de gaveta de diâmetros diferentes, uma para ajuste grosseiro e duas para ajuste fino da vazão. Quando o nível atingia o valor preestabelecido, a abertura das válvulas era ajustada de forma a manter o nível constante até o final da coleta. O monitoramento do nível da água foi realizado com uma régua linimétrica com resolução de 1 mm. Uma comporta vertical situada a jusante do regulador permitia a manutenção de escoamento subcrítico no trecho de canal onde o equipamento foi instalado.

3.3.1 Determinação da variação na carga hidráulica sobre os orifícios

Apesar de ser regulado para operar com um determinado valor de h_{NOM} , a carga hidráulica real que se observava sobre o centro de gravidade dos orifícios nem sempre correspondia ao valor nominal. Visando ao melhor entendimento das variações na vazão do regulador, os valores de h_C foram determinados para todos os valores de Q_{reg} obtidos no experimento,

utilizando-se uma régua com resolução de 1 mm na parede do tubo deslizante. Assim, a variação de h_C em cada repetição foi obtida aplicando-se a seguinte equação:

$$\Delta h_C = h_{C_{\max}} - h_{C_{\min}} \quad (19)$$

em que:

Δh_C = variação na carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios do regulador em uma dada repetição, m;

$h_{C_{\max}}$ = carga hidráulica máxima observada na repetição, m; e

$h_{C_{\min}}$ = carga hidráulica mínima observada na repetição, m.

3.3.2 Determinação da vazão na folga entre os tubos guia e deslizante

Uma pequena parcela da vazão fornecida pelo regulador é oriunda do vazamento de água na folga entre os tubos guia e deslizante. Quantificar esse vazamento foi importante para o entendimento das causas da variação na vazão do regulador e, para tanto, foi realizado um experimento à parte.

Nesse experimento, todos os orifícios do regulador foram vedados com os tampões do tipo C para que a vazão fornecida fosse unicamente aquela oriunda da folga entre os tubos. O valor de Q_F foi determinado para diferentes valores de Δh que, por sua vez, foram obtidos pela regulagem das profundidades da água no canal principal e no compartimento inferior da caixa de captação. O valor de Δh foi calculado por:

$$\Delta h = h_e - h_s \quad (20)$$

em que:

h_e = carga hidráulica na entrada da folga, m; e

h_s = carga hidráulica na saída da folga, m.

A determinação de Q_F foi realizada para h_e variando de 0,30 m a 0,45 m, com intervalos de 0,05 m, e h_s variando de 0 a 0,25 m, também com intervalos de 0,05 m, abrangendo toda a faixa de valores possíveis de serem obtidos para as condições em que o regulador foi projetado.

A vazão foi determinada para todas as combinações entre h_e e h_s , em três repetições. Aor ser relativamente pequena,

predeterminado). O volume escoado foi coletado e transferido a uma balança marca Ohaus modelo Explorer com resolução de 0,1 g. A conversão da massa em volume foi realizada considerando-se a massa específica da água $\rho = 998 \text{ kg m}^{-3}$, conforme tabela fornecida por Fox e McDonald (2001), uma vez que a temperatura da água durante os ensaios variou entre 20 °C e 21 °C.

Após a coleta dos dados, procedeu-se à análise de regressão de Q_F em função de Δh com o software SAS (SAS Institute Inc., 1999). O modelo foi escolhido com base no coeficiente de determinação ajustado aos graus de liberdade e na significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste “t”, ao nível de 1% de probabilidade de erro.

3.4 Curvas características do regulador automático de vazão

As curvas características do regulador automático de vazão foram obtidas para todas as combinações de tampões previstas na Tabela 1, relacionando-se os valores de h_C com os valores de Q_{reg} obtidos durante os ensaios para determinação da variação na vazão fornecida pelo equipamento (item 3.3).

Optou-se pela utilização da carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios (h_C) como variável dependente de forma a simplificar as equações e facilitar a sua aplicação prática, ainda que, para orifícios de pequenas dimensões (no caso dos orifícios do regulador automático de vazão, quando $h_C \leq 0,12 \text{ m}$), a maioria dos autores recomende que o cálculo da vazão seja feito utilizando-se as cargas sobre as bordas superior e inferior do orifício (h_1 e h_2).

As equações foram obtidas por análise de regressão com o software SAS (SAS Institute Inc., 1999). O modelo matemático, escolhido com base no processo físico envolvido, foi o seguinte:

$$Q_{reg} = \beta_0 h_C^{\beta_1} \quad (21)$$

em que:

β_0 e β_1 = coeficientes de regressão, adimensionais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Regulador automático de vazão desenvolvido

Em função de algumas limitações surgidas durante a fabricação dos modelos e dos moldes das peças, algumas dimensões previstas durante o projeto do equipamento foram modificadas: d_{ext} passou de 0,250 m para 0,265 m e, com isso, D_{int} passou de 0,2506 para 0,2656 m. Além disso, não foi possível manter constante o valor da espessura da parede dos tubos guia e deslizante, devido à dificuldade em promover acabamento nas duas faces de cada peça.

O tubo deslizante (Figura 14a), com massa de 2,3 kg, é dotado de oito orifícios laterais que podem estar totalmente abertos, parcial ou totalmente obstruídos, conforme as combinações previstas na Tabela 1. Há também uma escala no tubo para facilitar a regulagem e o monitoramento de h_C (Figura 14b).

Os orifícios do tubo deslizante são numerados, facilitando a colocação dos tampões, ainda que os três tipos de tampão (Figura 15) sejam intercambiáveis, podendo ser fixados em qualquer orifício. Para satisfazer todas as combinações previstas na Tabela 1 são necessários quatro tampões do tipo A, quatro do tipo B e seis do tipo C.

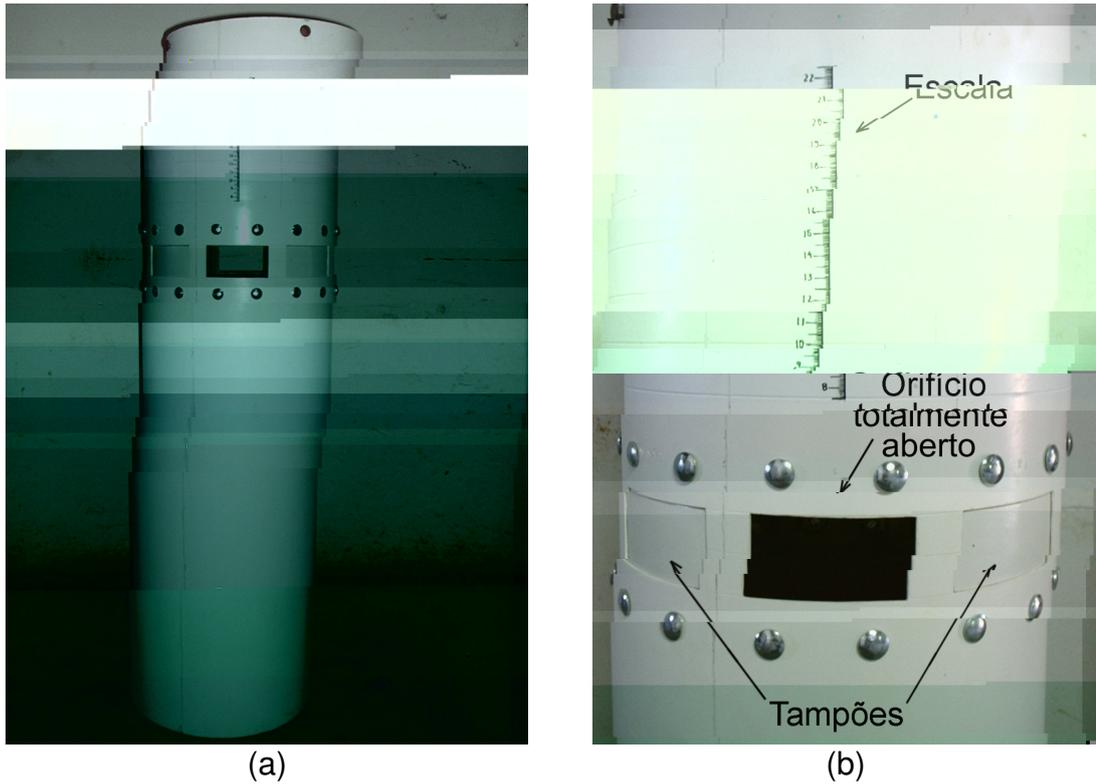


Figura 14. Tubo deslizante: (a) vista geral e (b) escala, orifícios e tampões.

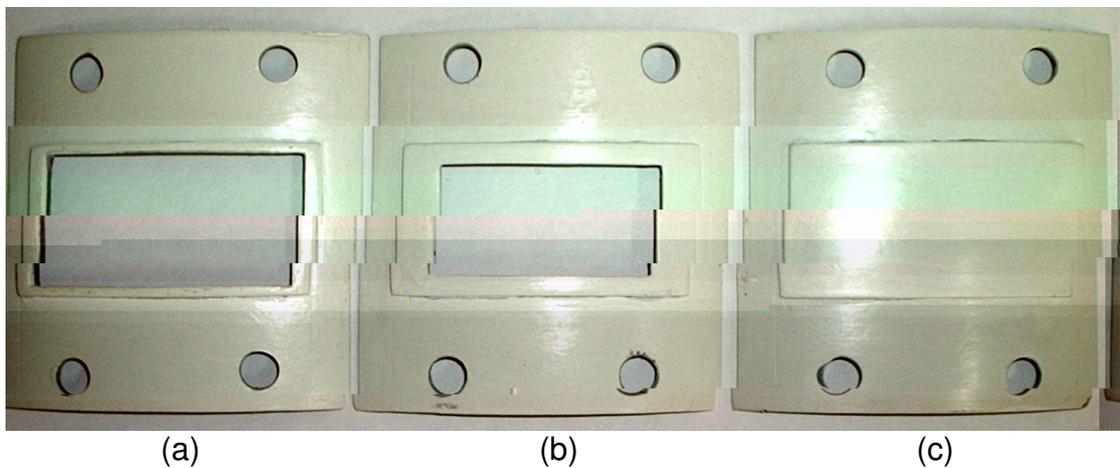


Figura 15. Tampões: (a) tipo A, (b) tipo B e (c) tipo C.

A fixação de cada tampão é realizada com quatro parafusos tipo francês, de bitola 6,35 mm x 38,1 mm ($\frac{1}{4}$ " x $1\frac{1}{2}$ "), associados a uma arruela de borracha, uma arruela de metal e uma porca tipo borboleta. Apenas a cabeça dos parafusos fica do lado externo da parede do tubo deslizante, reduzindo possíveis interferências no escoamento. Para uma vedação eficiente, uma junta de borracha (Figura 16a) é colocada entre o tampão e a

parede do tubo deslizante (Figura 16b). O lixamento da superfície interna do tubo deslizante, na região onde os tampões são assentados, torna a superfície mais lisa e uniforme, favorecendo a vedação.

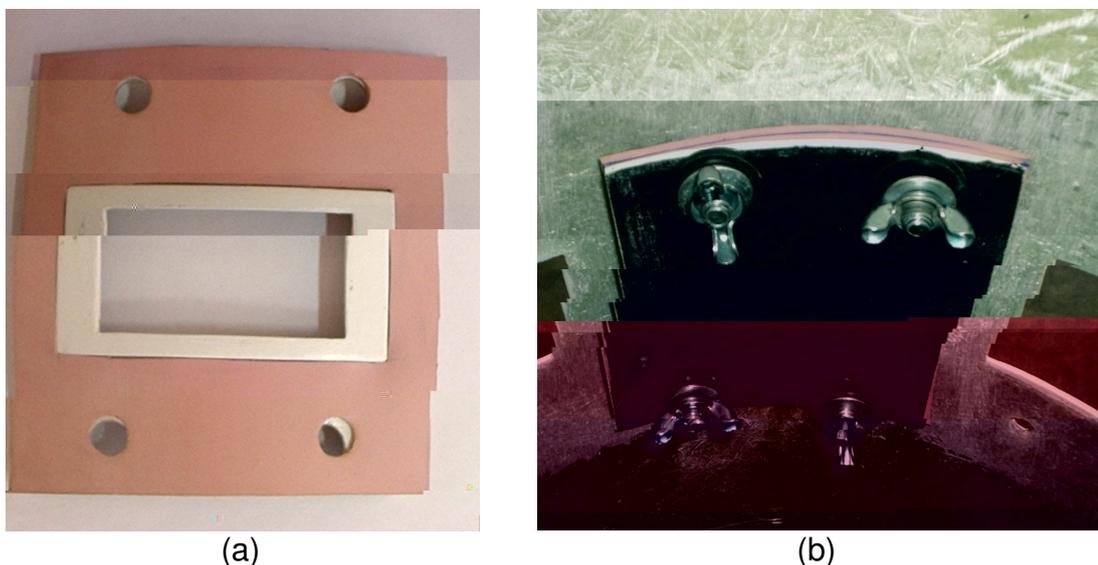


Figura 16. Fixação do tampão: (a) junta de borracha e (b) interior do tubo deslizante.

Na Tabela 3 são apresentadas as áreas médias dos orifícios do regulador. Os desvios padrão obtidos foram pequenos, evidenciando que a uniformidade na fabricação dos orifícios foi satisfatória. Por outro lado, houve diferença entre as áreas médias e as áreas previstas, o que se deve às dificuldades encontradas na confecção de modelos totalmente fiéis ao projeto. O tampão do tipo A permite a utilização de 73,8% da área total de escoamento, enquanto o do tipo B permite a utilização de 50,8%.

Tabela 3. Área média de escoamento, desvio padrão e percentagem da área do orifício totalmente aberto dos orifícios do regulador automático de vazão

Tipo de orifício (tamanho da amostra)	Área média (mm ²)	Desvio padrão (mm ²)	Percentagem da área do orifício totalmente aberto (%)	Área prevista no projeto (mm ²)
Orifício livre (8)	3.179	9,18	100,00	3.200
Tampão tipo A (4)	2.347	5,50	73,83	2.400
Tampão tipo B (4)	1.616	5,74	50,83	1.600

Na Figura 17a apresenta-se o flutuador, com corpo construído em fibra de vidro e suportes em alumínio, totalizando 4,3 kg. A fixação do flutuador ao tubo deslizante (Figura 17b) é realizada com parafusos de aço galvanizado tipo francês, de bitola 6,35 mm x 38,1 mm (1/4" x 1 1/2") associados a porcas tipo borboleta.



Figura 17. Flutuador: (a) vista geral e (b) fixado ao tubo deslizante.

A caixa de captação tem 1,4 m de altura, 0,8 m de largura e 1,0 m de comprimento (Figura 18) e é reforçada internamente com barras de aço para evitar que a pressão sobre as suas paredes cause deformações. O tubo guia foi construído de forma conjugada com o fundo horizontal que separa os compartimentos superior e inferior da caixa de captação (Figura 19).

Nas maiores vazões de operação, a turbulência no compartimento superior da caixa de captação afeta o funcionamento do equipamento, prejudicando o movimento do tubo deslizante e interferindo sobre o escoamento nos orifícios. Para minimizar esse efeito, o regulador conta com uma estrutura para dissipação de energia e direcionamento do escoamento composta de tubos de PVC de 50 mm de diâmetro (Figura 20), localizada à entrada do compartimento superior. Os tubos são posicionados em ângulo de 20° para evitar que os orifícios mais próximos da entrada da caixa de captação recebam a água com velocidade de aproximação elevada.



Figura 18. Vista externa da caixa de captação.

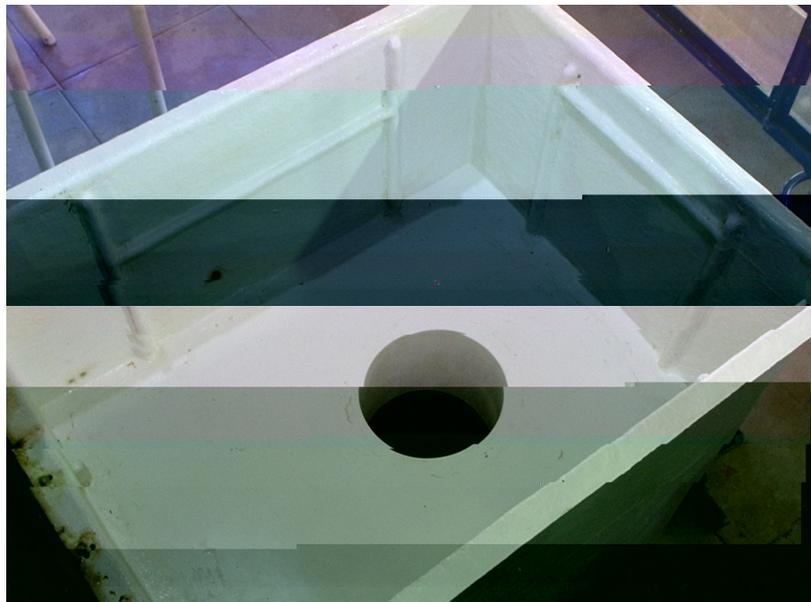


Figura 19. Vista interna do compartimento superior da caixa de captação.

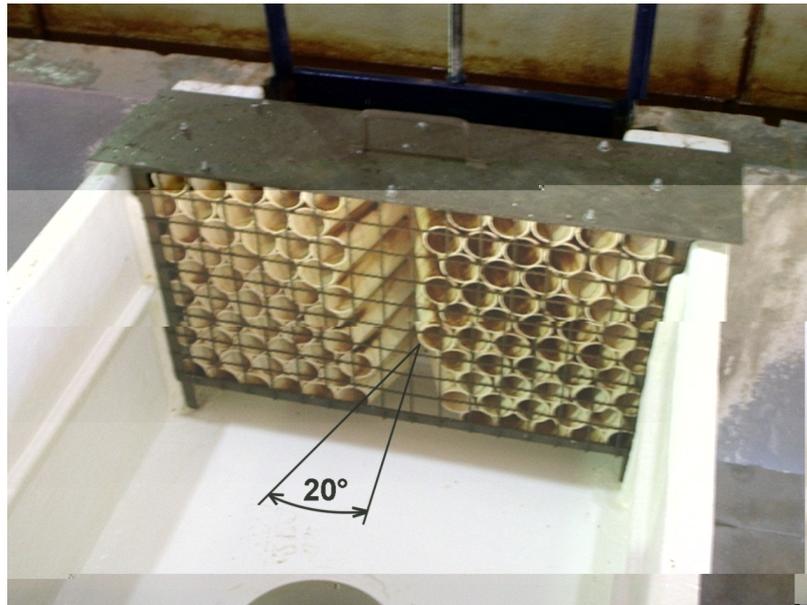


Figura 20. Estrutura para dissipação de energia e direcionamento do escoamento.

Na Figura 21, tem-se o regulador em funcionamento. O equipamento pode operar em qualquer profundidade da água no canal principal, e não necessita de intervenção para iniciar o funcionamento quando o nível parte de zero. Entretanto, a faixa ótima de operação é de 0,30 a 0,45 m de profundidade no compartimento superior. O funcionamento fora dessa faixa não é recomendado, uma vez que observações práticas evidenciaram alterações expressivas na carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios quando a profundidade da água era inferior a 0,30 m e superior a 0,45 m, acarretando grandes alterações na vazão fornecida.

Os materiais e os processos utilizados na fabricação das peças promoveram um excelente acabamento na superfície externa do tubo deslizante e na superfície interna do tubo guia. Com isso, o atrito entre essas superfícies foi reduzido, havendo deslizamento suave. Contudo, recomenda-se a lubrificação periódica das superfícies para o melhor desempenho do regulador. O lubrificante recomendado é a graxa líquida lubrificante HHS 2000, distribuída pela Würth do Brasil Peças de Fixação Ltda. Deve-se aplicar uma camada fina dessa graxa, espalhando-a nas superfícies secas com auxílio de um pincel.

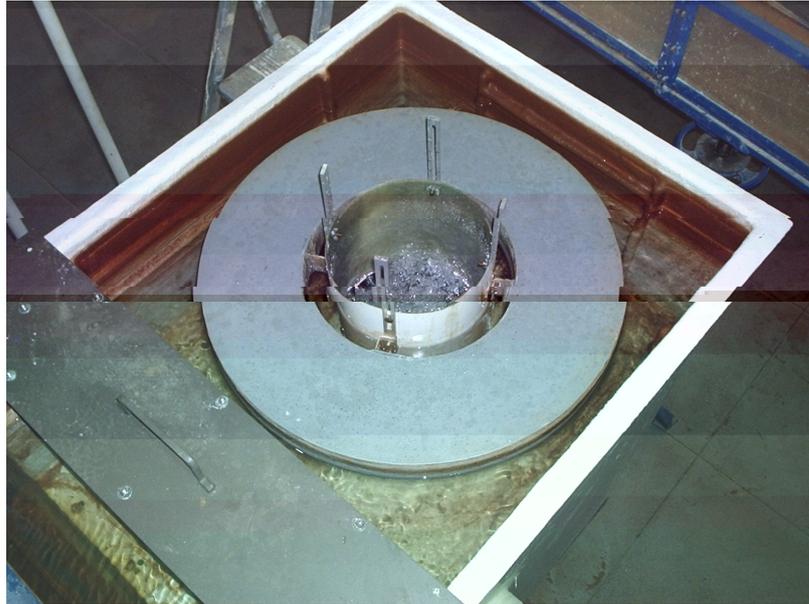


Figura 21. Regulador automático de vazão em funcionamento.

Em locais onde a água apresenta grande quantidade de partículas em suspensão, o desempenho do regulador pode ser prejudicado, uma vez que essas partículas podem penetrar na folga entre os tubos guia e deslizante e aumentar o atrito necessário para o movimento relativo entre eles. Como o equipamento foi avaliado em laboratório utilizando-se água limpa, esse inconveniente não ocorreu; entretanto, sugere-se a utilização de estruturas para filtração da água antes da entrada do regulador caso a quantidade de partículas em suspensão seja elevada.

A regulagem da carga hidráulica sobre os orifícios deve ser feita com o equipamento em funcionamento. Reduzindo-se o aperto dos parafusos de fixação dos suportes do flutuador (Figura 22), é possível alterar a posição vertical do tubo deslizante e, conseqüentemente, o valor de h_C . Este deve ser regulado numa posição entre 0,10 e 0,20 m, com auxílio da escala impressa no tubo. A regulagem de h_C permite o ajuste fino da vazão, e deve ser realizada após a escolha da combinação de tampões mais adequada para atender a vazão desejada.

Os custos dos componentes do regulador automático de vazão instalado em laboratório, bem como o seu custo total, encontram-se na Tabela 4. Nos valores apresentados estão incluídos os custos de material e mão-de-obra referentes aos componentes fabricados, sem contemplar o custo dos moldes e modelos utilizados.

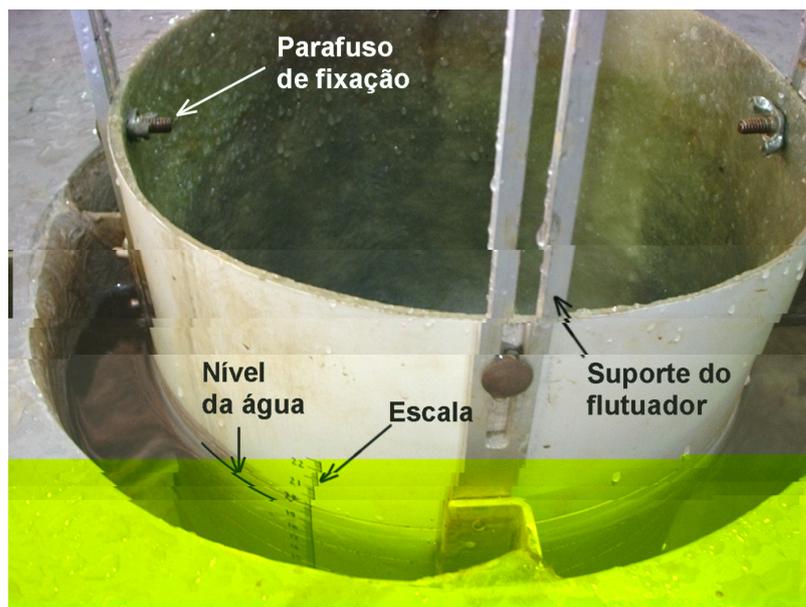


Figura 22. Suportes do flutuador e escala para regulagem da carga hidráulica sobre os orifícios.

Tabela 4. Custo dos componentes do regulador automático de vazão

Item	Quant.	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
Caixa de captação	1	650,00	650,00
Tubo deslizante	1	100,00	100,00
Flutuador	1	150,00	150,00
Tampão do tipo A	4	8,00	32,00
Tampão do tipo B	4	8,00	32,00
Tampão do tipo C	6	8,00	48,00
Junta de borracha para os tampões	8	1,15	9,20
Estrutura para dissipação de energia	1	150,00	150,00
Parafuso francês de aço galvanizado bitola 6,35 mm x 38,1 mm (1/4" x 1 1/2")	36	0,25	9,00
Arruela lisa de aço galvanizado bitola 6,35 mm (1/4")	36	0,10	3,60
Arruela de borracha	32	0,30	9,60
Porca borboleta de aço galvanizado bitola 6,35 mm (1/4")	36	0,35	12,60
Total (R\$)			1.206,00

Comparado ao custo de estruturas com acionamento eletromecânico, o do regulador automático de vazão pode ser considerado baixo, uma vez que somente o sistema de acionamento de uma comporta eletromecânica

(painel fotovoltaico, bateria e motor) pode custar mais do que o valor total do regulador construído. Além disso, é provável que o seu custo total, de R\$ 1.206,00, apresente queda considerável caso o equipamento seja fabricado em série, já que os valores apresentados na Tabela 4 referem-se ao custo de fabricação de um único exemplar.

A maior dificuldade encontrada durante o desenvolvimento do equipamento foi a fabricação dos tubos guia e deslizante nos diâmetros adequados, já que a folga entre ambos é bastante pequena. Contudo, o regulador automático de vazão atendeu às especificações de projeto e, do ponto de vista construtivo, apresentou desempenho satisfatório.

4.2 Influência da curvatura da parede sobre o coeficiente de descarga de orifícios retangulares

Na Tabela 5 são apresentadas as médias dos coeficientes de descarga obtidos para as diferentes cargas hidráulicas (h_C) e ângulos entre o eixo do orifício e a reta tangente à sua parede (α). O coeficiente de variação do experimento foi de 0,19%, e a média geral foi de 0,612. Tanto o aumento de h_C quanto de α causaram redução no coeficiente de descarga.

Tabela 5. Médias obtidas para o coeficiente de descarga (C_D) em função da carga hidráulica e do ângulo entre o eixo do orifício e a reta tangente à sua parede

Carga hidráulica – h_C (m)	Ângulo entre o eixo do orifício e a sua parede – α (rad)			
	1,57	1,75	1,80	1,89
0,10	0,633	0,616	0,616	0,612
0,20	0,628	0,610	0,610	0,607
0,30	0,625	0,609	0,608	0,604
0,40	0,623	0,607	0,606	0,601
0,50	0,621	0,605	0,604	0,597

Os valores de C_D obtidos para os orifícios em parede plana ($\alpha = 1,57$ rad) são muito próximos dos coeficientes apresentados na literatura. Durante os ensaios, Re variou de aproximadamente $7,6 \times 10^4$ (para $h_C = 0,10$ m) a

$1,9 \times 10^5$ (para $h_C = 0,50$ m). Nessa faixa de Re , os valores de C_D para orifícios em parede plana apresentados na literatura variam de aproximadamente 0,645 a 0,614 (Figura 6), enquanto os obtidos no experimento variaram de 0,633 a 0,621, o que evidencia a confiabilidade do experimento.

Tanto para o orifício em parede plana quanto para os orifícios em parede curva, C_D diminuiu com o incremento de h_C . Esse comportamento também pode ser explicado pela Figura 6, já que na faixa de Re em que o experimento foi realizado, a tendência é que ocorra redução em C_D com o aumento de Re (e, conseqüentemente, de h_C). A redução de C_D foi, em média, de 2,0% para um incremento de 0,40 m em h_C .

A redução de C_D foi de 3,5%, em média, para um aumento de 0,32 rad no ângulo α entre o eixo do orifício e a reta tangente à sua parede. Esses resultados são coerentes com os estudos de Weisbach, apresentados por Hughes e Safford (1924), acerca do comportamento do coeficiente de descarga de orifícios circulares em função de α . Tais estudos demonstraram que, para um orifício circular com diâmetro de 10 mm, o coeficiente de descarga diminui cerca de 4,1% com um incremento de 0,39 rad no ângulo α .

A redução no coeficiente de descarga com o aumento de α provavelmente está relacionada com o aumento da contração da veia líquida, já que, quanto maior a curvatura da parede, maior a inclinação, em relação ao eixo do orifício, das linhas de corrente próximas à parede do tubo. Isso implica em aumento das componentes de velocidade perpendiculares ao eixo do orifício, podendo causar aumento na contração da veia líquida.

A superfície de resposta obtida e os parâmetros do modelo ajustados para os dados do ensaio relativo à curvatura da parede são apresentados na Figura 23. Na equação obtida, mantendo-se fixo o valor de h_C , o incremento de uma unidade em α provoca uma redução de 0,07 unidades em C_D . Por outro lado, C_D reduz 0,03 unidades com o incremento de uma unidade em h_C , mantendo-se fixo o valor de α .

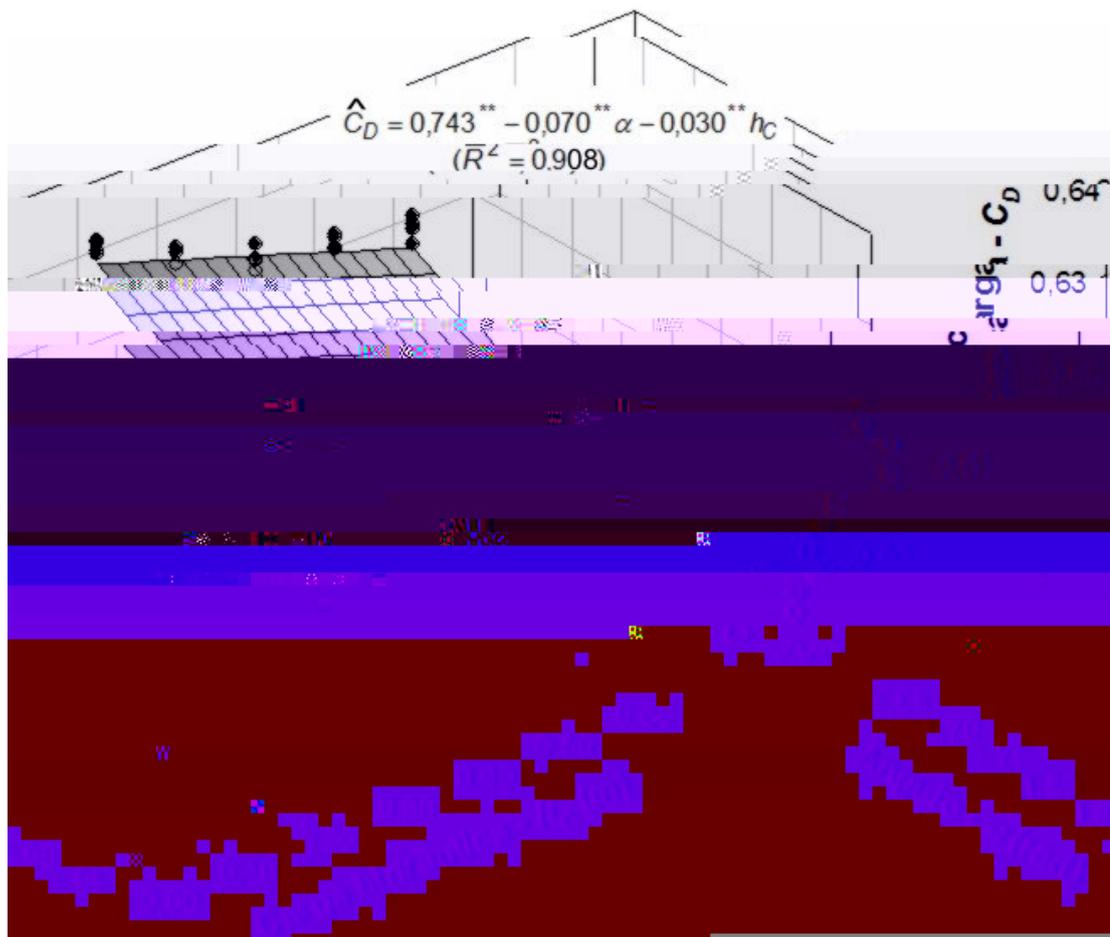


Figura 23. Coeficientes de descarga em função da carga hidráulica e do ângulo entre o eixo do orifício e a reta tangente à sua parede (**: significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro pelo teste “t”).

4.3 Variação na vazão fornecida pelo regulador

As médias da variação relativa na vazão obtidas no experimento são apresentadas na Tabela 6. Pode-se observar que a maior variação foi de 8,51% ($\pm 4,25\%$), obtida na Combinação 9, com $h_{NOM} = 0,20$ m, enquanto a menor variação, de 1,96% ($\pm 0,98\%$), foi obtida na Combinação 1, com $h_{NOM} = 0,175$ m.

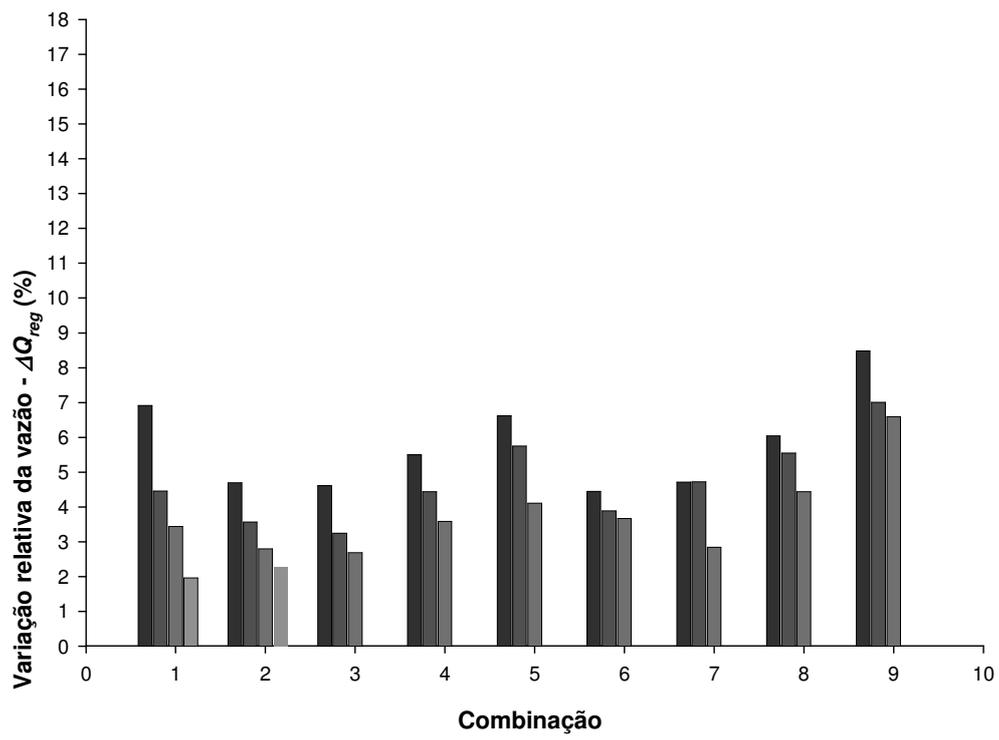
A principal causa da variação na vazão fornecida pelo regulador foi atribuída ao atrito estático entre as paredes dos tubos guia e deslizante, que não era vencido quando a variação no empuxo sobre o flutuador era pequena. As dificuldades encontradas na fabricação do modelo e do molde dos tubos não permitiram que sua seção transversal fosse perfeitamente

circular, assumindo uma forma levemente elipsóide. Esse efeito foi mais acentuado nas extremidades do tubo deslizante, mas também ocorreu, em menor grau, no tubo guia. Apesar de ter sido pequena, essa distorção influenciou o deslizamento entre os tubos, ocasionando uma leve pressão de um tubo sobre a parede do outro, aumentando o atrito entre as superfícies. Na prática, isso fez com que a carga hidráulica real fosse maior do que a nominal quando o nível estava em ascensão, e menor do que a nominal quando o nível estava em descensão.

Tabela 6. Médias da variação relativa na vazão fornecida pelo regulador (ΔQ_{reg}) (%) para as diferentes cargas hidráulicas nominais e combinações de tampões utilizadas no experimento

Combinação	Carga hidráulica nominal – h_{NOM} (m)				
	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200
1	6,92	4,46	3,44	1,96	2,79
2	4,70	3,57	2,80	2,26	2,88
3	4,62	3,25	2,69	2,47	3,96
4	5,50	4,44	3,59	4,07	3,87
5	6,62	5,75	4,11	4,21	3,77
6	4,45	3,89	3,67	4,08	4,20
7	4,72	4,72	2,85	3,48	4,49
8	6,05	5,55	4,44	5,42	6,84
9	8,48	7,01	6,59	8,08	8,51

Na Figura 24, estão confrontadas as variações na vazão fornecida e na carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios. Pela figura, percebe-se a tendência de aumento em ΔQ_{reg} com o aumento em Δh_C . Em geral, Δh_C foi maior para as cargas nominais de 0,10 m e 0,20 m, assumindo valores menores nas vazões intermediárias. Os valores de ΔQ_{reg} acompanharam essa mesma tendência; entretanto, houve um aumento mais acentuado de ΔQ_{reg} para as menores cargas nominais. Como a vazão é função da carga elevada à potência 0,5 (equação 13), a mesma variação na carga provoca maior variação de vazão quando os valores da carga são menores.



necessária. Da Combinação 4 até a Combinação 1, foram mais 107 horas de funcionamento, sem necessidade de uma nova lubrificação.

A histerese causada pelo atraso na resposta do regulador automático de vazão ocorreu em todas as combinações avaliadas, e pode ser visualizada na Figura 25. Nesta figura, referente ao ensaio com a Combinação 4 (os gráficos referentes às demais combinações encontram-se no Apêndice A), as setas indicam o sentido de variação da profundidade da água no canal principal. Para uma dada profundidade, a vazão era maior se o nível da água estivesse em ascensão antes de se estabilizar, pois a carga hidráulica real atingia valores superiores ao nominal. Se o nível estivesse em descensão antes de se estabilizar, a carga real assumia valores inferiores ao nominal e, conseqüentemente, a vazão diminuía. A variação na carga hidráulica foi, em média, de $\pm 5,7$ mm em relação ao valor nominal, atingindo $\pm 9,8$ mm para a Combinação 9, na carga nominal de 0,20 m.

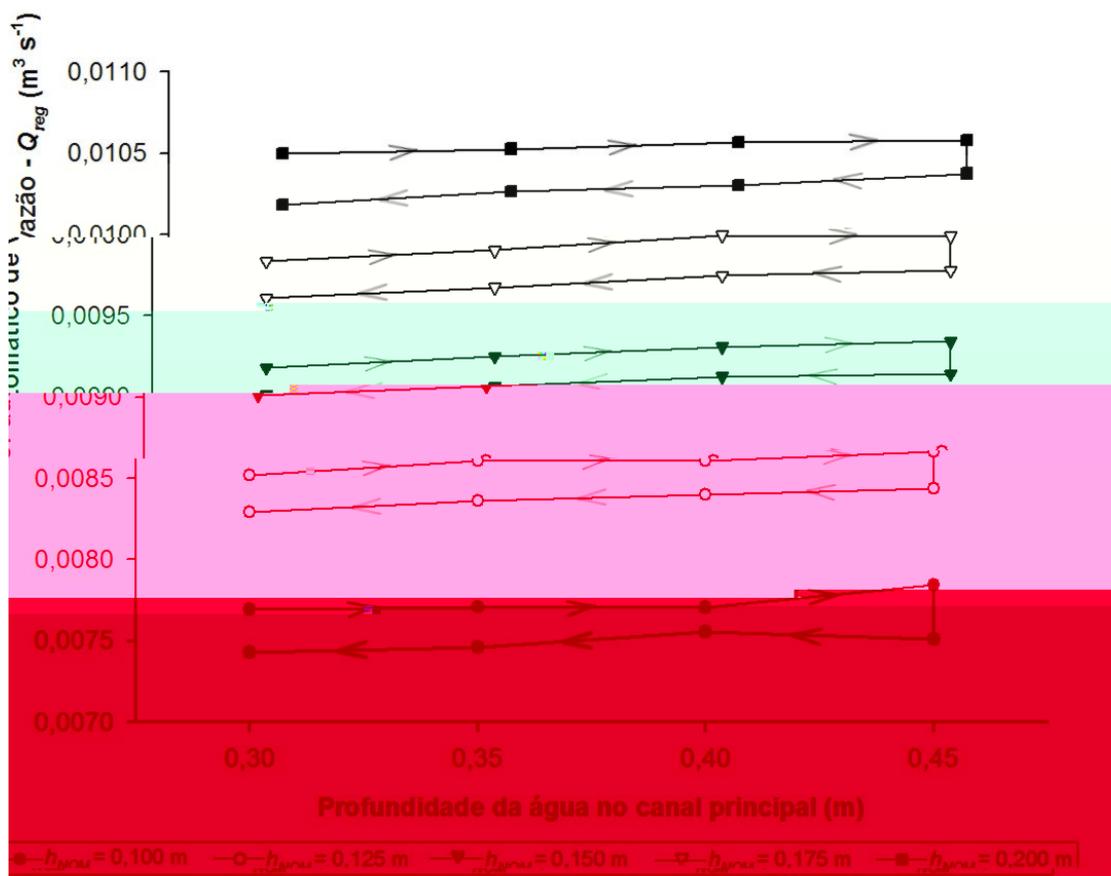


Figura 25. Médias das vazões fornecidas pelo regulador automático de vazão na Combinação 4, para as diferentes cargas nominais e profundidades da água no canal principal utilizadas no experimento.

Além da variação na carga hidráulica, outro fator que influenciou a variação na vazão fornecida pelo regulador automático de vazão foi o vazamento de água na folga entre os tubos guia e deslizante. Como pode ser visto na Figura 26, esse vazamento aumentou com o incremento na diferença de carga entre a entrada e a saída da folga (Δh). A variação em Δh se deve, basicamente, à alteração do nível da água no canal principal, que ocasiona um grande aumento em h_e (equação 20), enquanto h_s permanece aproximadamente constante.

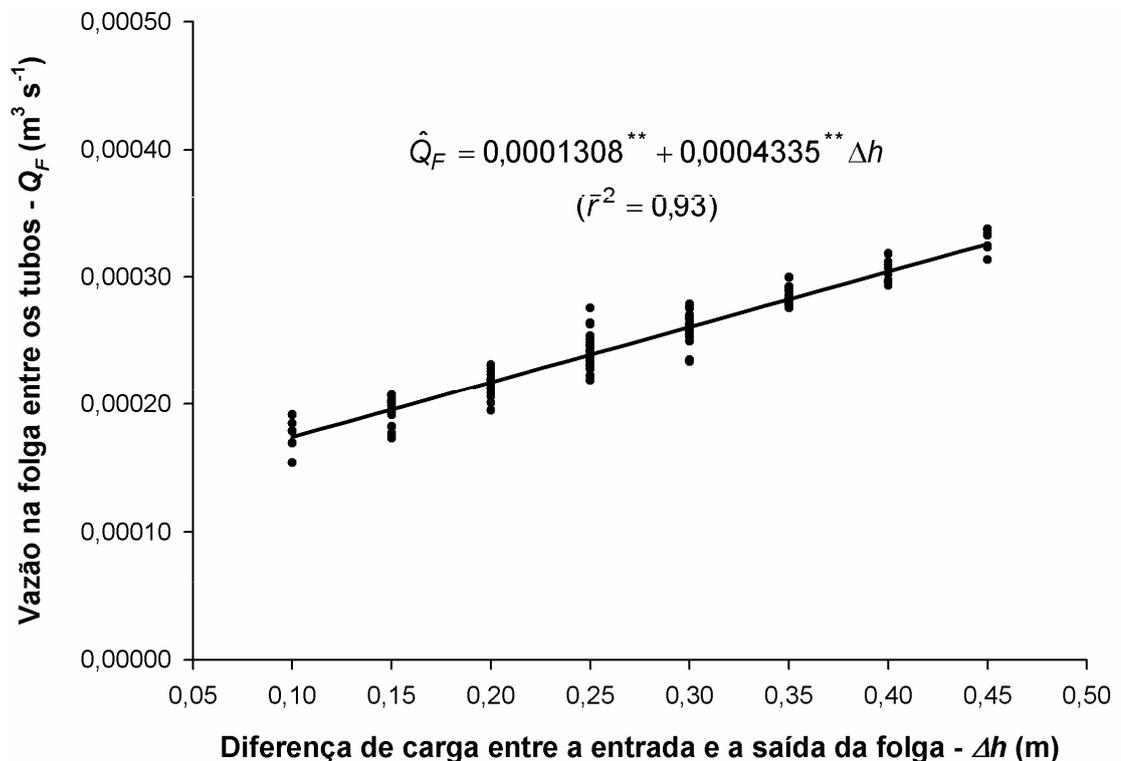


Figura 26. Vazão na folga entre os tubos guia e deslizante em função da diferença de carga entre a entrada e a saída da folga (**: significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro pelo teste "t").

Pela equação empírica obtida para o vazamento na folga entre os tubos (Figura 26), o incremento de uma unidade em Δh causa um aumento de 0,0004335 unidades em Q_F . Isso significa que um incremento de 0,15 m em Δh (equivalente à variação máxima da profundidade do canal principal para a qual o regulador foi projetado) ocasiona aumento de 0,065 $L s^{-1}$ em Q_F . Esse valor, apesar de pequeno, representa cerca de 2% da menor vazão

fornecida pelo equipamento, de $3,3 \text{ L s}^{-1}$ para a Combinação 1, com $h_{NOM} = 0,10 \text{ m}$. Nessas condições, a variação na vazão do regulador foi de 6,92%, indicando que uma parcela razoável desta variação pode ser atribuída à vazão da folga. Por outro lado, quando se compara a variação na vazão da folga com a vazão máxima fornecida, de $31,0 \text{ L s}^{-1}$ para a Combinação 9, com $h_{NOM} = 0,20 \text{ m}$, aquela representa apenas 0,21% desta. Ou seja, à medida que a vazão fornecida aumenta, a influência da variação na vazão da folga entre os tubos guia e deslizante sobre a variação na vazão do regulador torna-se desprezível.

As vazões ocorridas na folga entre os tubos foram maiores do que as que seriam obtidas com a equação (17) utilizando-se $E_F = 0,3 \text{ mm}$. Enquanto a vazão calculada com a equação (17) para $\Delta h = 0,45 \text{ m}$ resulta em $0,031 \text{ L s}^{-1}$, a vazão calculada pela equação empírica obtida no experimento, nas mesmas condições, é de aproximadamente $0,326 \text{ L s}^{-1}$, aproximadamente 10 vezes maior. Isso ocorre porque uma pequena variação em E_F causa um grande aumento de Q_F , já que, pela equação (17), Q_F é proporcional à E_F elevada à terceira potência. Como a seção transversal dos tubos não é perfeitamente circular, assumindo uma forma elipsóide, o valor médio de E_F não se observa em toda a circunferência, podendo assumir valores bem maiores que $0,3 \text{ mm}$, causando aumento em Q_F .

Em comparação com as comportas verticais usualmente utilizadas em tomadas de água, nas quais a variação na vazão fornecida pode ser superior a $\pm 10\%$ da vazão média para uma alteração de $0,20 \text{ m}$ no nível da água a montante (Amaral et al., 2005), a variação na vazão fornecida pelo regulador automático de vazão é pequena. Com o desempenho apresentado, o equipamento pode ser recomendado, inclusive, como medidor de vazão em locais onde há cobrança pelo uso da água.

Mesmo quando comparado ao módulo de máscaras, estrutura apresentada na seção 2.1.2, percebe-se que a variação na vazão fornecida pelo regulador automático de vazão desenvolvido é menor. O módulo de uma máscara modelo X_1 , que opera na mesma faixa de vazões que o regulador, apresenta variação de aproximadamente $\pm 10\%$ com a alteração de $0,07 \text{ m}$ na profundidade a montante (Alstom, 2005). A variação máxima na vazão fornecida pelo regulador, para $0,15 \text{ m}$ de variação na profundidade

a montante, foi de $\pm 4,25\%$, e a variação média foi de $\pm 2,3\%$. Para os mesmos 0,15 m de variação a montante, o módulo de duas máscaras modelo X₂ apresenta variação de $\pm 5\%$ na vazão fornecida (Alstom, 2005), o que demonstra que o regulador automático de vazão é mais preciso. Além disso, os módulos de máscaras citados só permitem a regulagem gradual da vazão, em intervalos de $0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto o regulador automático de vazão possibilita a regulagem contínua da vazão fornecida.

Embora o regulador automático de vazão tenha apresentado desempenho adequado para a operação de redes de canais, a variação na vazão do equipamento pode ser ainda menor se a seção transversal dos tubos guia e deslizante for perfeitamente circular. Isso reduziria o atrito entre as superfícies dos tubos, minimizando a histerese apresentada pelo equipamento.

4.4 Curvas características do regulador automático de vazão

As curvas características do regulador, relacionando a vazão fornecida com a carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios, são apresentadas na Figura 27. Os coeficientes de determinação obtidos demonstram a boa precisão do experimento.

As estimativas dos coeficientes de regressão ($\hat{\beta}_1$) das curvas características obtidas assumiram valores próximos ao valor teórico que, pela equação (13), é de 0,5. A diferença entre os valores das estimativas de β_1 e o valor teórico pode ser explicada pelo fato de que, nas curvas características obtidas, a variação de C_D em função de h_C não é considerada (o valor de C_D está incluído no coeficiente β_0), enquanto, na prática, o valor de C_D diminui com o aumento da carga hidráulica (Figuras 6 e 23). Essa variação se reflete nas estimativas de β_1 , fazendo com que seus valores sejam, de um modo geral, menores que o valor teórico.

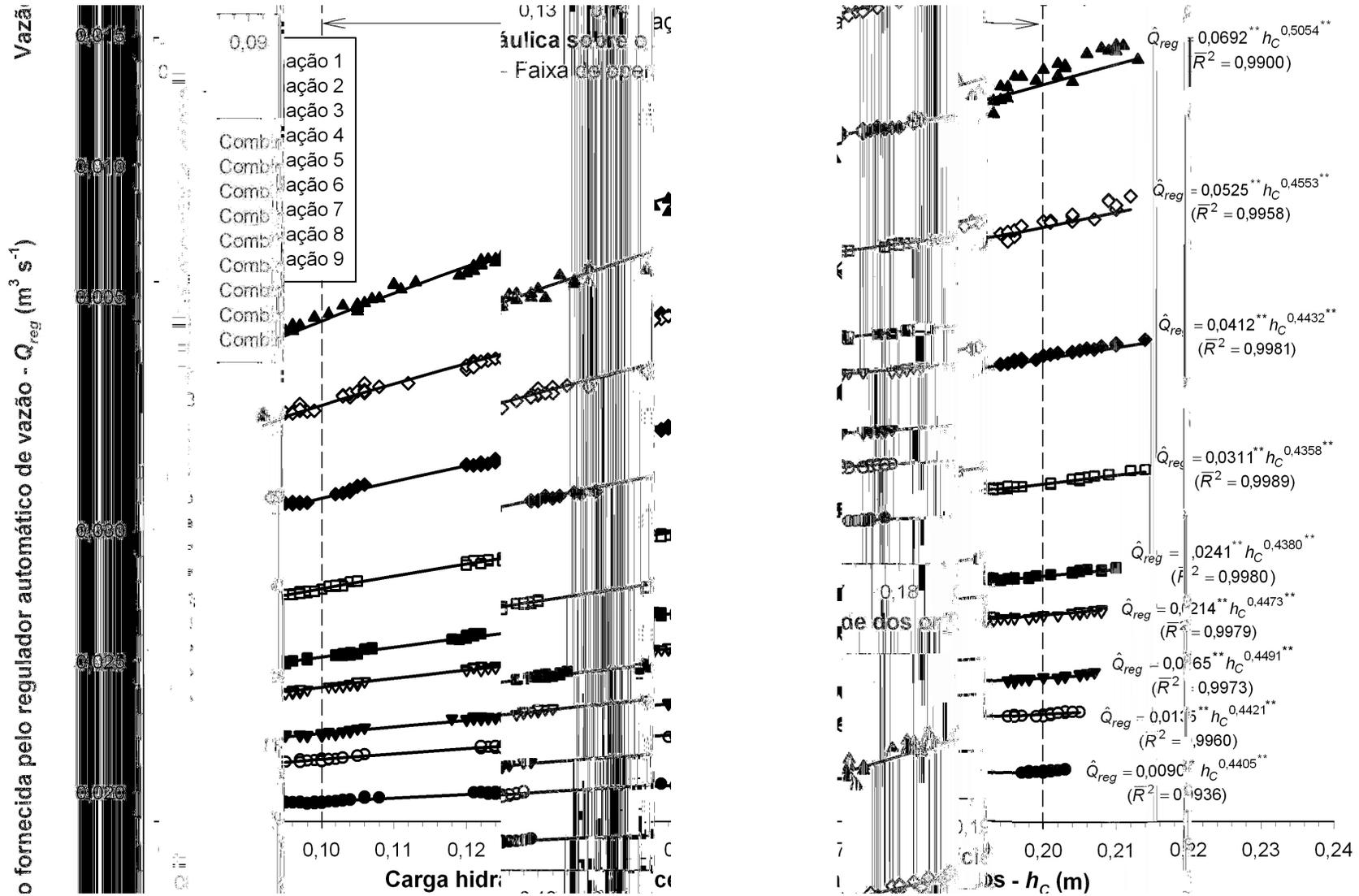


Figura 27. Curvas características do regulador (**: significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro pelo teste “t”).

Para a curva característica referente à Combinação 9, $\hat{\beta}_1 = 0,5054$, aproximando-se do expoente da carga hidráulica da equação (13). Nessa combinação, as vazões fornecidas são relativamente altas e a velocidade da água na entrada da caixa de captação assume valores consideráveis (da ordem de $0,25 \text{ m s}^{-1}$ para os maiores valores de h_C). É provável que o efeito da velocidade de aproximação não tenha sido totalmente controlado pela estrutura de dissipação de energia e, com isso, a vazão dos orifícios mais próximos à entrada da caixa de captação tenha sofrido aumento expressivo, compensando a redução de C_D .

Na Tabela 7 são apresentadas as faixas de vazões abrangidas em cada combinação de tampões. O regulador pode fornecer qualquer vazão entre $0,0033$ e $0,0307 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com exceção do intervalo entre $0,0044$ e $0,0049 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para suprir as vazões abrangidas nesse intervalo, poderia ser incluída uma nova combinação de tampões com área intermediária entre as áreas das combinações 1 e 2. Entretanto, isso implicaria no dimensionamento de um novo tipo de tampão, influenciando negativamente na praticidade de fabricação, ou na utilização de dois tampões com áreas diferentes, acarretando assimetria entre os jatos oriundos dos orifícios e uma provável inclinação do tubo deslizante em relação ao eixo vertical.

Tabela 7. Área total de escoamento e vazões mínima e máxima obtidas com as curvas características, para as diferentes combinações de tampões

Combinação	Área total* - A (m^2)	Vazão mínima** ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Vazão máxima*** ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
1	0,003232	0,003271	0,004439
2	0,004694	0,004859	0,006602
3	0,006359	0,005875	0,008020
4	0,007926	0,007634	0,010409
5	0,009590	0,008796	0,011916
6	0,012717	0,011388	0,015403
7	0,015852	0,014851	0,020192
8	0,020644	0,018386	0,025208
9	0,025435	0,021622	0,030693

* Soma das áreas dos orifícios totalmente abertos e/ou parcialmente abertos;

** Calculada com a curva característica da combinação correspondente, com $h_C = 0,10 \text{ m}$;

*** Calculada com a curva característica da combinação correspondente, com $h_C = 0,20 \text{ m}$.

A regulagem da vazão fornecida pelo regulador deve ser realizada a partir da Tabela 7, determinando-se a combinação de tampões cuja faixa de vazões abrange a vazão desejada. Definida a combinação a ser utilizada, deve-se determinar a carga hidráulica correspondente a essa vazão utilizando-se a curva característica da combinação escolhida (Figura 27). Para tanto, traça-se uma reta horizontal que intercepte o eixo das ordenadas no ponto correspondente à vazão desejada. Posteriormente, traça-se uma reta vertical que passe pela intersecção entre a curva da combinação escolhida e a reta horizontal previamente traçada. Finalmente, determina-se o ponto de intersecção entre a reta vertical e o eixo das abscissas, que fornecerá o valor da carga hidráulica correspondente à vazão desejada.

Se, por exemplo, a vazão a ser fornecida ao canal de derivação fosse de $0,020 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, tanto a Combinação 7 quanto a Combinação 8 poderiam ser utilizadas, como pode ser visto na Tabela 7. Optando-se pela Combinação 8 e seguindo-se o método gráfico descrito no parágrafo anterior, obter-se-ia uma carga hidráulica de 0,120 m. Caso a Combinação 7 fosse escolhida, a carga hidráulica obtida seria de 0,196 m.

Após a definição da combinação e da carga hidráulica a serem utilizadas, bem como da fixação dos tampões de acordo com a disposição apresentada na Tabela 1, coloca-se o regulador em funcionamento e posiciona-se o flutuador de forma que o nível da água na escala do tubo deslizante corresponda à carga hidráulica obtida.

5 CONCLUSÕES

Para as condições em que o experimento foi realizado, a análise dos resultados permitiu concluir que:

(i) o regulador automático de vazão desenvolvido é um equipamento de baixo custo apropriado para a operação de redes de canais, minimizando o efeito das variações no nível da água a montante sobre a vazão escoada;

(ii) para orifícios retangulares em parede delgada vertical curva com face interna convexa, o aumento do ângulo entre o eixo do orifício e a reta tangente à sua parede provoca redução no coeficiente de descarga;

(iii) nas condições de operação para as quais o regulador automático de vazão foi projetado, com vazões fornecidas entre $0,0033$ e $0,0307 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a amplitude de variação média na vazão fornecida é de $\pm 2,3\%$ em relação à vazão média;

(iv) as amplitudes de variação na vazão fornecida pelo regulador automático de vazão são maiores para as maiores áreas de escoamento, sendo que a amplitude de variação máxima, de $\pm 4,25\%$ em relação à vazão média, ocorre para a Combinação 9.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De um modo geral, o desempenho apresentado pelo regulador automático de vazão foi considerado adequado para a operação de redes de canais. Sendo assim, o equipamento pode ser recomendado tanto para regulação quanto para medição de vazão, uma vez que a variação de vazão proporcionada é menor do que a que ocorre nas estruturas usualmente utilizadas para controle de vazão em canais. Entretanto, por tratar-se de um produto com potencial de utilização em larga escala, tornam-se necessárias avaliações intensivas em condições de campo para identificação das possíveis limitações do equipamento.

Os primeiros testes em condições de campo foram realizados no Perímetro Irrigado do Gorutuba, em uma área pertencente à Fazenda Experimental da Epamig de Nova Porteirinha, MG. Para tanto, construiu-se um novo protótipo do equipamento, conforme as especificações utilizadas na fabricação do protótipo avaliado em laboratório. A caixa de captação foi construída em alvenaria, mas o tubo guia e o fundo que separa os compartimentos superior e inferior foram fabricados em fibra de vidro, da mesma forma que para o protótipo testado em laboratório.

O regulador automático de vazão foi instalado em uma tomada que deriva água a uma área experimental da fazenda (Figura 28), sendo mantido em funcionamento por três meses. A vazão máxima do canal que abastece a

tomada de água onde o regulador foi instalado é de aproximadamente $0,060 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto a vazão utilizada para irrigar o lote durante o período em que o regulador foi testado era da ordem de $0,010 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.



Figura 28. Regulador automático de vazão instalado na Fazenda Experimental da Epamig de Nova Porteirinha, MG.

Nas avaliações preliminares realizadas, constatou-se que a presença de sedimentos em suspensão na água de irrigação, principalmente areia e matéria orgânica, penetravam na folga entre os tubos guia e deslizante, aumentando o atrito entre as superfícies e dificultando o movimento do tubo deslizante.

A primeira tentativa de solucionar o problema consistiu na filtragem da água na entrada da caixa de captação utilizando-se de telas com aberturas variando de $0,25$ a 1 mm^2 , aproximadamente. Essa medida foi ineficiente devido ao acúmulo de sedimentos nas telas, o que aumentou sensivelmente a perda de carga na entrada da caixa de captação e reduziu drasticamente o nível da água no compartimento superior, inviabilizando a manutenção da vazão previamente regulada.

A segunda tentativa consistiu na filtragem da água após a entrada na caixa de captação, nas proximidades da entrada da folga entre os tubos.

Para tanto, utilizou-se um elemento em forma de sanfona, confeccionado com tecido sintético de malha bastante fina (cerca de $0,01 \text{ mm}^2$ de abertura). A extremidade superior desse elemento foi fixada ao tubo deslizante, enquanto a inferior foi fixada ao fundo que separa os dois compartimentos da caixa de captação (Figura 29), filtrando somente a água que escoava pela folga entre os tubos.

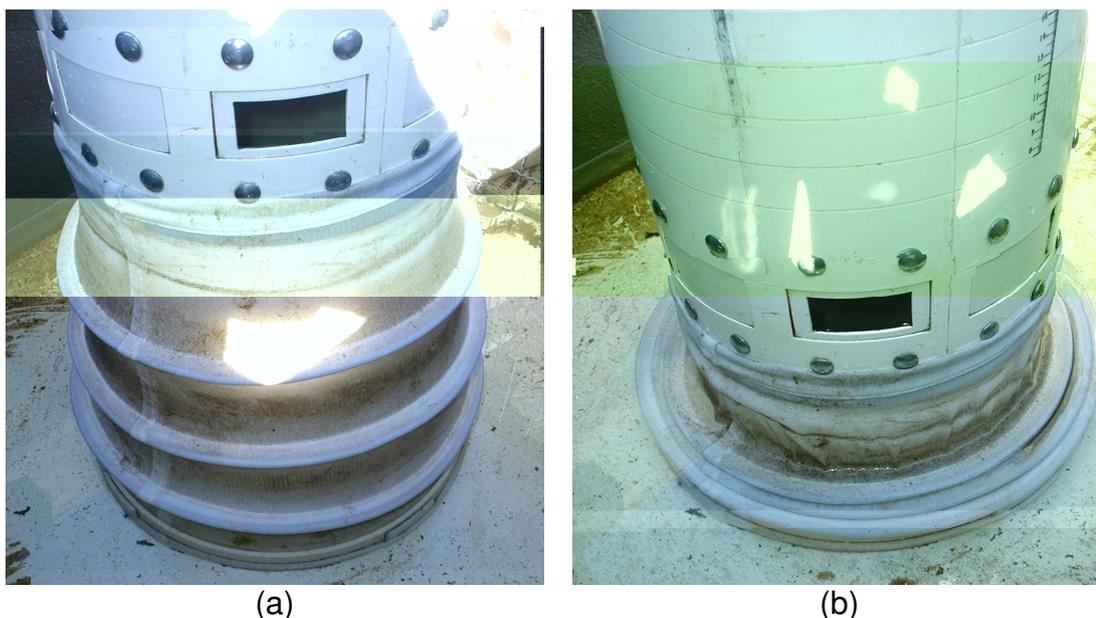


Figura 29. Elemento sanfonado para filtragem da água que escoava pela folga entre os tubos guia e deslizante: (a) totalmente esticado e (b) totalmente retraído.

Os testes preliminares realizados com o elemento sanfonado revelaram a eficácia do dispositivo. Como o elemento filtra apenas a água que escoava na folga entre os tubos, não há redução apreciável na vazão fornecida pelo equipamento, uma vez que não se produz perda de carga expressiva na entrada da caixa e o nível da água no compartimento superior é praticamente o mesmo do canal principal.

Apesar de esta solução ter se mostrado eficiente, há necessidade de realização de testes com o elemento sanfonado para verificar se o mesmo é adequado à operação intensiva e se a frequência de limpeza da tela torna viável a utilização desse dispositivo. Contudo, acredita-se que a utilização do elemento sanfonado é suficiente para solucionar os problemas oriundos da condução de água com grande quantidade de sedimentos em suspensão.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSTOM. **Equipamentos para irrigação e saneamento**. Taubaté, SP: Alstom Brasil Ltda. 2005. 1 CD-ROM.

AMARAL, L. G. H.; RIGHES, A. A.; SOUZA FILHO, P. S.; DALLA COSTA, R. Automatic regulator for channel flow control on flooded rice. **Agricultural Water Management**, v. 75, n. 3. p. 184-193, 2005.

AUGHTON, D.; MAREELS, I.; WEYER, E. **Control gates**. Int. Cl. E02B 7/40. U.S. n. 7.244.078 B2. 27 Set. 2005. 20 Abr. 2006. 17 Jul. 2007.

AUTODESK. **AutoCAD**, version 2004. Autodesk, 2003. 1 CD-ROM.

ÁVILA, G. S. **Hidráulica General: fundamentos**. v. 1. México: Editorial Limusa S. A., 1974.

BOS, M .G. (ed). **Discharge measurement structures**. 3 ed. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1989. 401 p.

BURT, C. M.; ANGOLD, R.; LEHMKUHL, M.; STYLES, S. Flap gate design for automatic upstream canal water level control. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 127, n. 2, p. 84-91, 2001.

BURT, C. M.; PIAO, X. Advances in PLC-based channel automation. In: CONFERENCE ON ENERGY, CLIMATE, ENVIRONMENT AND WATER: issues and opportunities for irrigation and drainage, 2002, San Luis Obispo, EUA. **Anais...** San Luis Obispo: USCID, 2002. p. 409-422.

CHANSON, H.; AOKI, S.; MARUYAMA, M. Unsteady two-dimensional orifice flow: a large-size experimental investigation. **Journal of Hydraulic Research**, v. 40, n. 1, p. 63-71, 2002.

CLEMMENS, A. J.; BAUTISTA, E.; WAHLIN, B. T.; STRAND, R. J. Simulation of automatic canal control systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 4, p. 324-335, 2005.

COLLISCHONN, W.; MEIRELLES, F. S. C.; ENDRES, L. A. M. Simulação numérica de canais de irrigação controlados por comportas automáticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 119-131, 2001.

CRAIG, K. R.; ELSER, P. G.; ALLEN, L.; LANGEMAN, P. **Irrigation gate system**. Int. Cl. E02B 7/40. U.S. n. 7.114.878 B2. 19 Nov. 2004. 16 Jun. 2005. 3 Out. 2006.

DURDU, O. F. Regulation of Irrigation Canals Using a Two-Stage Linear Quadratic Reliable Control. **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, v. 28, n. 2, p. 111-120, 2004.

ERBISTE, P. C. F. **Comportas Hidráulicas**. Rio de Janeiro: Campus/Eletróbrás, 1987. 358 p.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations; IFAD – International Fund for Agriculture Development. Water for Food, Agriculture and Rural Livelihoods. In: UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **Water, a shared responsibility**: the United Nations world water development report 2. New York: Berghahn Books, 2006. p. 243-273.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001. 504 p.

GARCÍA, N. H. Perspectivas en automatización fluidica de canales. In: CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN, 9., 1999, Culiacán. **Anais...** Culiacán : ANEI, 1999. p.39-49.

GHODSIAN, M. Flow through side sluice gate. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 129, n. 6, p. 458-463, 2003.

GOWING, J. Limitations of water-control technology. **Agricultural Water Management**, v. 40, n. 1, p. 95-99, 1999.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**. New York: Macmillan Publishing Co., Inc., 1966. 522 p.

HERNANDEZ, N. M. Irrigation Structures. In: DAVIS, C. V.; SORENSEN, K. E. **Handbook of Applied Hydraulics**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1969. p. 34.1-34.53.

HUGHES, H. J.; SAFFORD, A. T. **A treatise on hydraulics**. New York: The Macmillan Company, 1924. 505 p.

KEREMANE, G. B.; MCKAY, J. Successful wastewater reuse scheme and sustainable development: a case study in Adelaide. **Water and Environment Journal**, v. 21, n. 2, p. 83-91, 2007.

KING, H. W.; WISLER, C. O.; WOODBURN, J. O. **Hidráulica**. Porto Alegre: Publicações Pan-Americanas Ltd., 1945. 352 p.

KUMAR, P.; MISHRA, A.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. J. Application of unsteady flow hydraulic model to a large and complex irrigation system. **Agricultural Water Management**, v. 54, n. 1, 2002, p. 49-66.

LECINA, S. PLAYAN, E. Model for the simulation of water flows in irrigation districts I: description. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 132, n. 4, p. 310-321, 2006a.

LECINA, S. PLAYAN, E. Model for the simulation of water flows in irrigation districts II: application. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 132, n. 4, p. 322-331, 2006b.

MAREELS, I.; WEYER, E.; OOI, S. K.; CANTONI, M.; LI, Y.; NAIR, G. Systems engineering for irrigation systems: successes and challenges. **Annual Reviews in Control**, v. 29, n. 2, p. 191-204, 2005.

MATHEUS, M. A. **Aprenda fiberglass**: fibra de vidro. Ribeirão Preto: o Autor, 2002. 132 p.

MUSLU, Y. Numerical analysis for lateral weir flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 127, n. 4, p. 246-253, 2001.

NETTO, J. M. A.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.

NEVES, E. T. **Curso de hidráulica**. 9 ed. São Paulo: Globo, 1989. 577 p.

OBERMEYER, H. K. **Water control gate and actuator therefore**. Int. Cl. E02B 3/16. U.S. n. 7.114.879. 9 Jul. 2002. 31 Jul. 2003. 3 Out. 2006.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 465-473, 2000.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos: EESC/USP, 1998. 519 p.

RENAULT, D. Offtake Sensitivity, Operation Effectiveness, and performance of irrigation system. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 125, n. 3, p. 137-147, 1999.

RENAULT, D. Operational sensitivity of irrigation structures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 126, n. 3, p. 157-162, 2000.

RENAULT, D.; HEMAKUMARA, H. M. Irrigation Offtake Sensitivity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 125, n. 3, p. 131-136, 1999.

RIJO, M. Local automatic control modes in an experimental irrigation canal. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 17, n. 3, p. 179–193, 2003.

ROUSE, H. **Hidraulica**: mecanica elemental de fluidos. Buenos Aires: Dossat, 1951. 337 p.

SAS INSTITUTE. **SAS System for Windows**, version 8.0. SAS Institute Inc., 1999. 2 CD-ROM.

SHAHROKHANIA, M. A.; JAVAN, M. Performance assessment of Doroodzan irrigation network by steady state hydraulic modeling. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, n. 2, p. 189-206, 2005.

SHAMMAA, Y.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N. Flow upstream of orifices and sluice gates. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 131, n. 2, p. 127-133, 2005.

SINGH, R.; MANIVANNAN, D.; SATYANARAYANA, T. Discharge coefficient of rectangular side weirs. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 120, n. 4, p. 814-819, 1994.

STRINGAM, B. L.; PUGH, C. A. **Automated farm turnout**. Int. CI⁷. F16K 21/18. U.S. n. 2002/0066484 A1. 06 Dez. 2000. 06 Jun. 2002.

SWAMEE, P. K.; PATHAK, S. K.; ALI, M. S. Analysis of rectangular side sluice gate. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 119, n. 6, p. 1026-1035, 1993.

SWAMEE, P. K.; PATHAK, S. K.; MOHAN, M.; AGRAWAL, S. K.; ALI, M. S. Subcritical flow over rectangular side weir. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 120, n. 1, p. 212-217, 1994a.

SWAMEE, P. K.; PATHAK, S. K.; ALI, M. S. Side-weir analysis using elementary discharge coefficient. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 120, n. 4, p. 742-755, 1994b.

SWAMEE, P. K.; PATHAK, S. K.; MANSOOR, T.; OJHA, C. S. P. Discharge characteristics of skew sluice gates. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 126, n. 5, p. 328-334, 2000.

TOWNSHEND, P. D. **Water control gate**. Int. CI⁷. E02B 7/40. U.S. n. 6.171.023. 12 Fev. 1997. 21 Ago. 1997. 9 Jan. 2001

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; NETTO, O. M. C. **Gestão da água no Brasil**. Brasília: UNESCO, 2001. 156 p.

WAHLIN, B. T.; CLEMMENS, A. J. Automatic downstream water-level feedback control of branching canal networks: simulation results. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 132, n. 3, p. 208-219, 2006.

WILLIAMS, M. L.; REDDY, J. M.; HASFURTHER, V. **Calibration of long crested weir discharge coefficient**: technical report. Laramie: Wyoming Water Resources Center, 1993. 87 p. Disponível em: <<http://www.wrds.uwyo.edu/library/wrp/93-13/93-13.pdf>> Acesso em: 06 ago. 2007.

8 APÊNDICES

APÊNDICE A

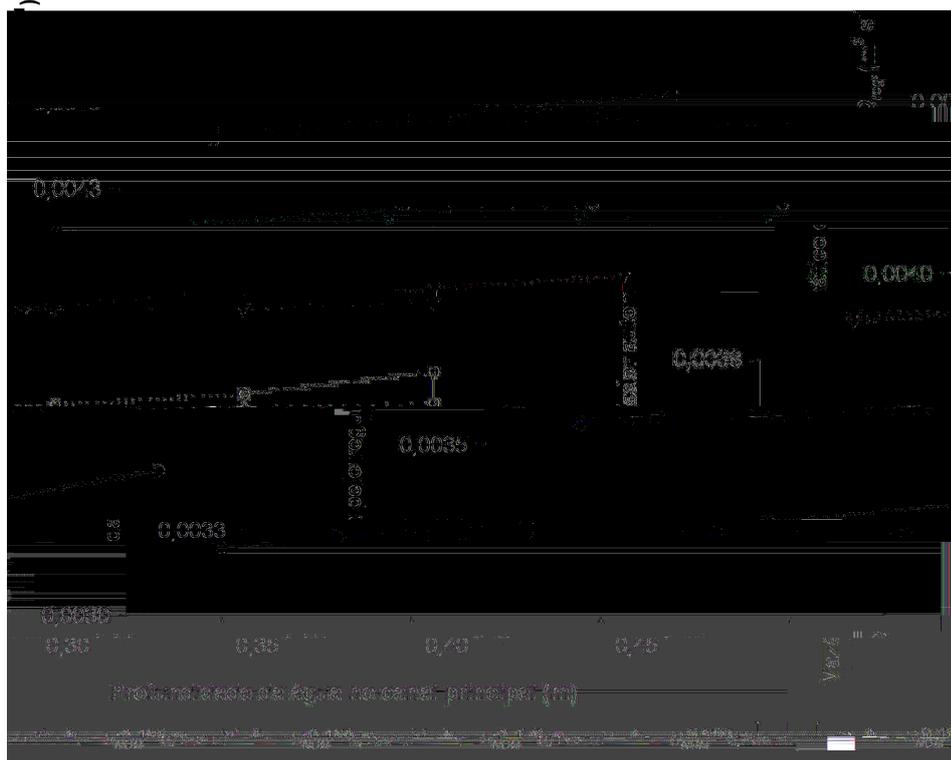


Figura 1A. Médias das vazões fornecidas pelo regulador na Combinação 1, para as diferentes cargas nominais e profundidades da água no canal principal utilizadas no experimento.

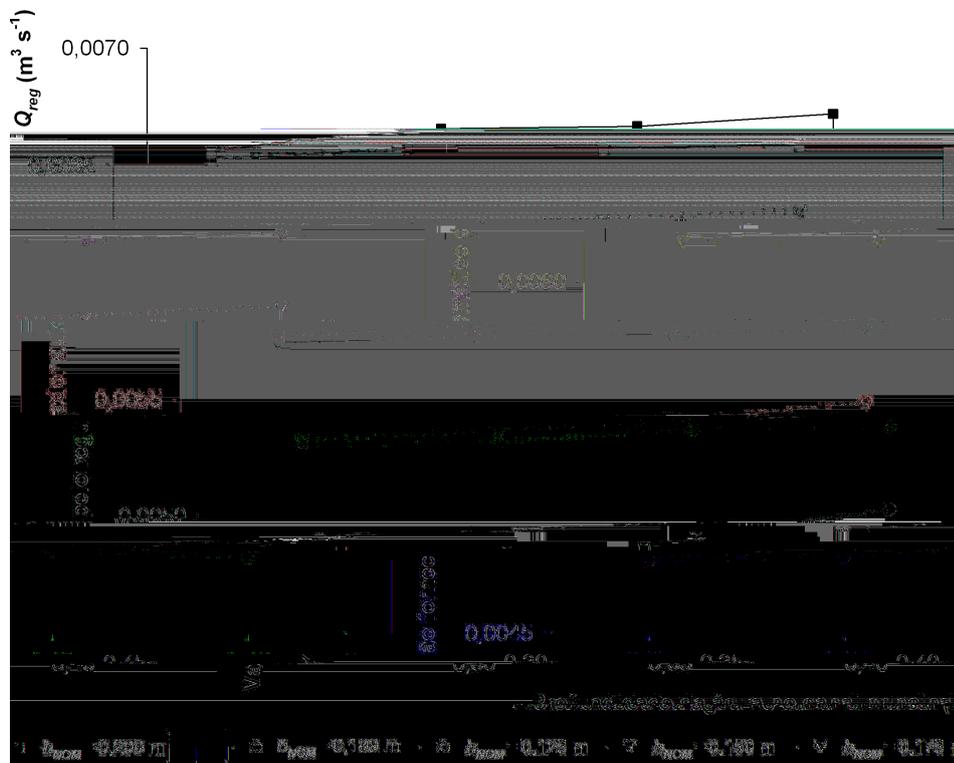


Figura 2A. Médias das vazões fornecidas pelo regulador na Combinação 2, para as diferentes cargas nominais e profundidades da água no canal principal utilizadas no experimento.

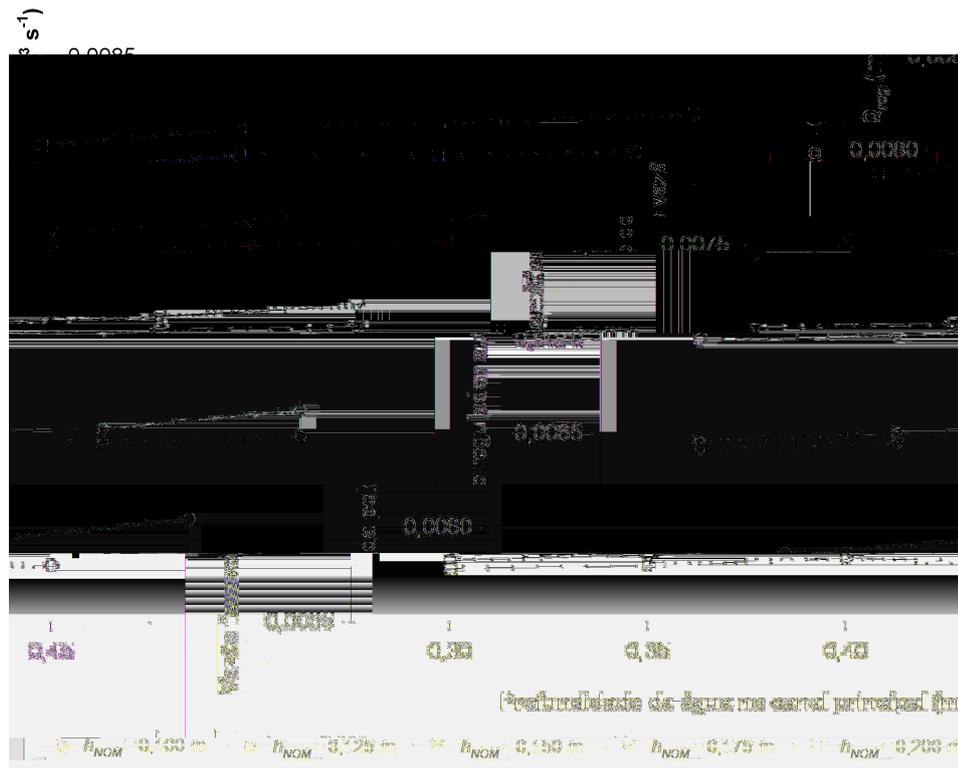


Figura 3A. Médias das vazões fornecidas pelo regulador na Combinação 3, para as diferentes cargas nominais e profundidades da água no canal principal utilizadas no experimento.

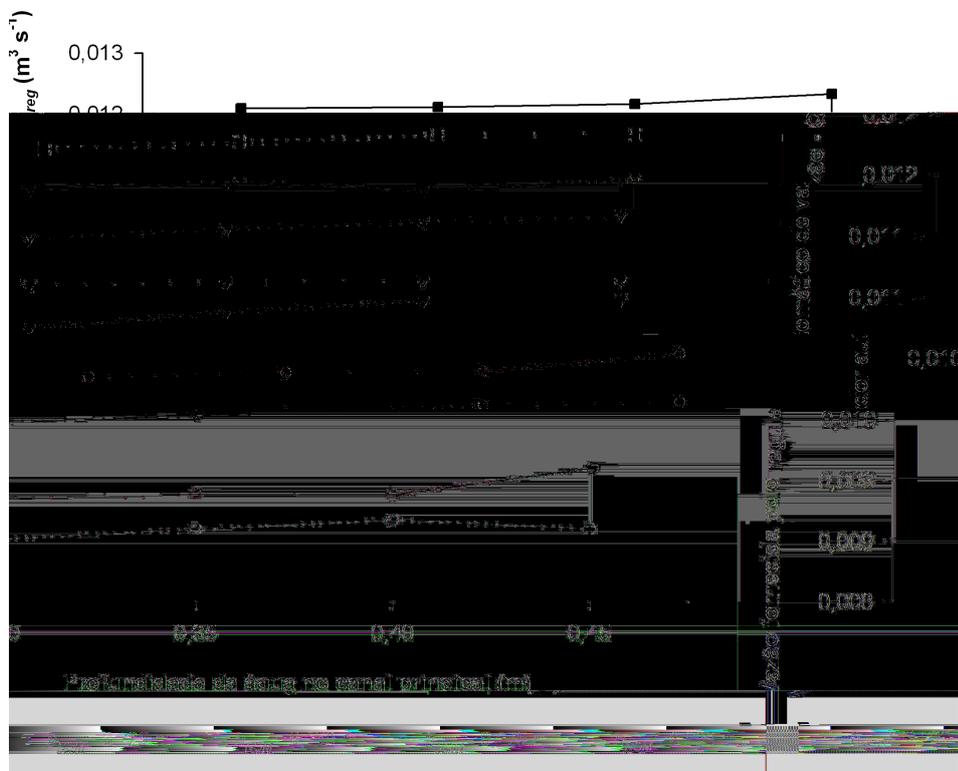


Figura 4A. Médias das vazões fornecidas pelo regulador na Combinação 5, para as diferentes cargas nominais e profundidades da água no canal principal utilizadas no experimento.

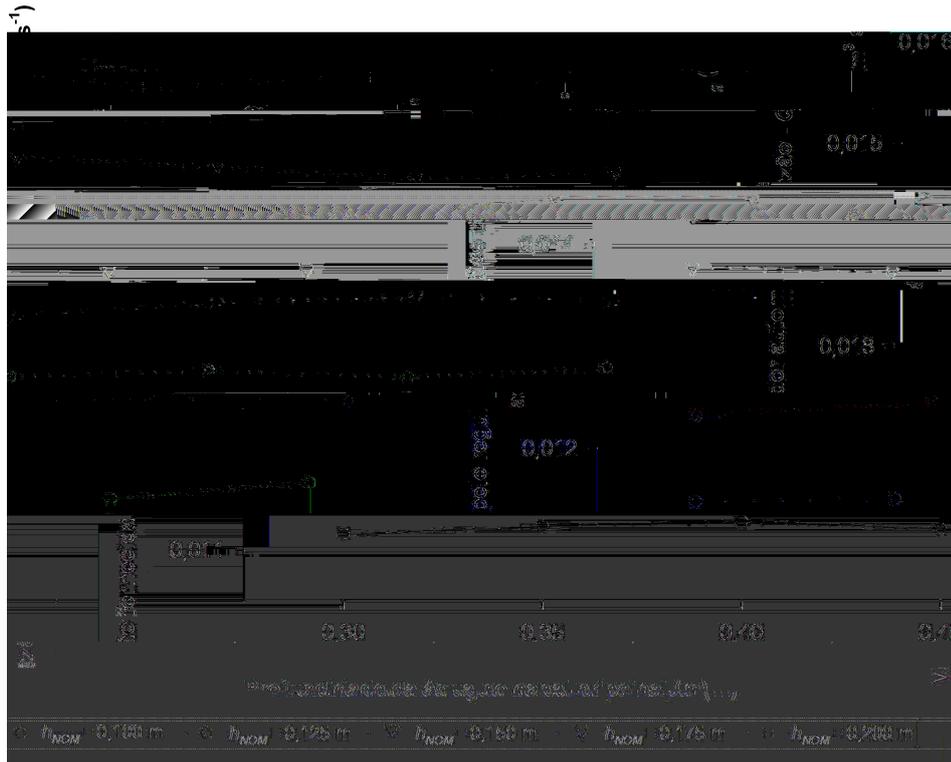


Figura 5A. Médias das vazões fornecidas pelo regulador na Combinação 6, para as diferentes cargas nominais e profundidades da água no canal principal utilizadas no experimento.

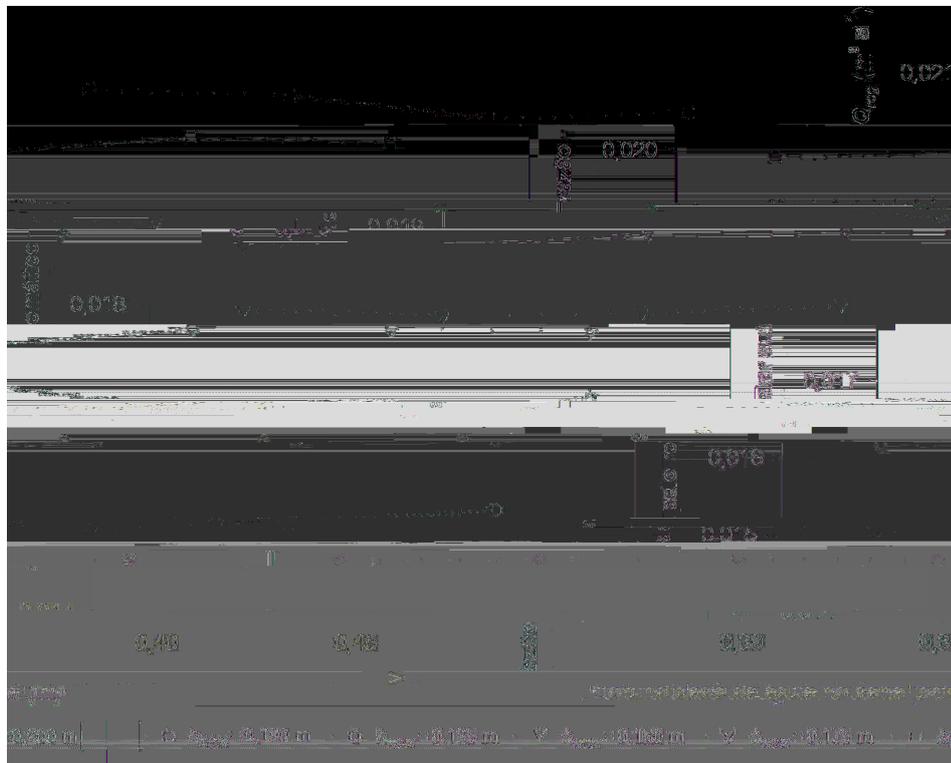


Figura 6A. Médias das vazões fornecidas pelo regulador na Combinação 7, para as diferentes cargas nominais e profundidades da água no canal principal utilizadas no experimento.

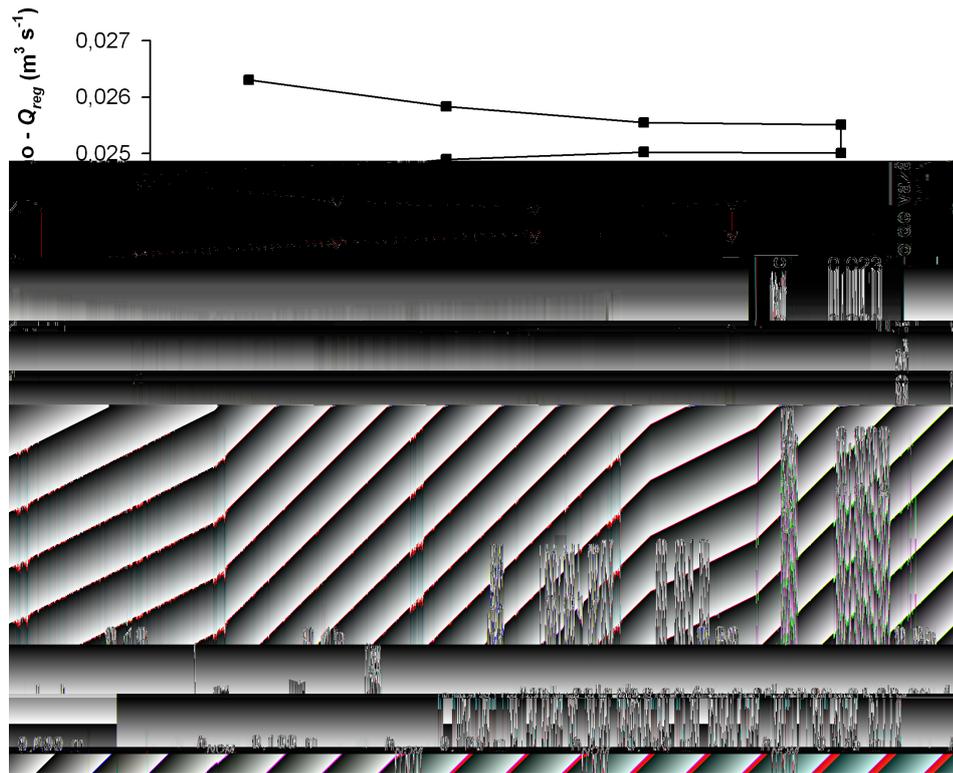


Figura 7A. Médias das vazões fornecidas pelo regulador na Combinação 8, para as diferentes cargas nominais e profundidades da água no canal principal utilizadas no experimento.

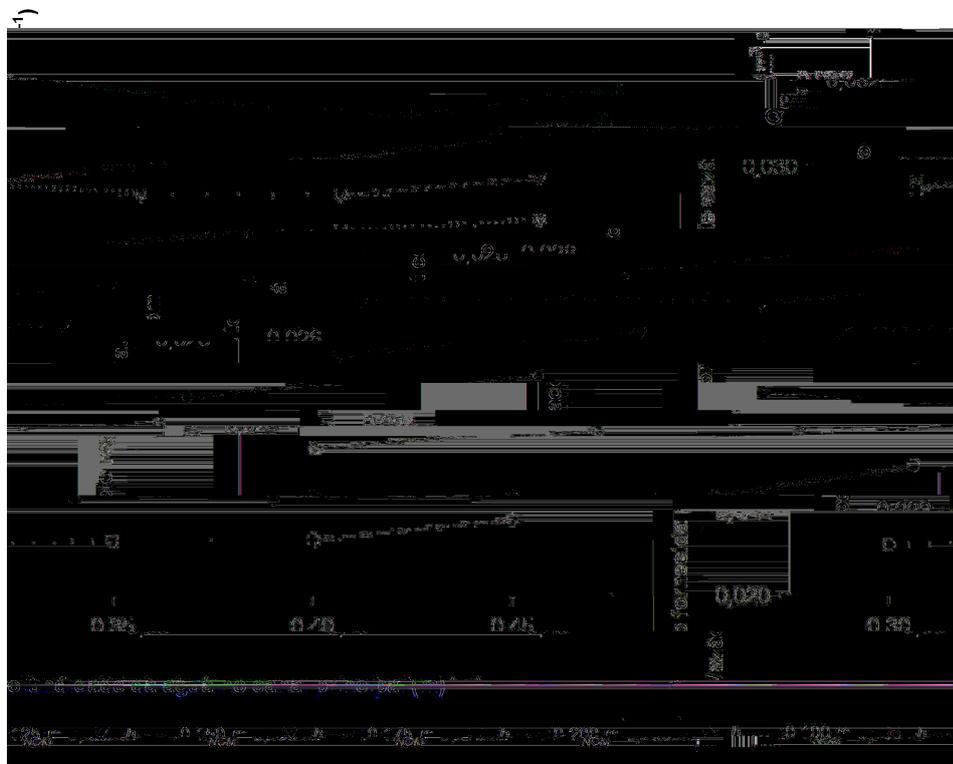


Figura 8A. Médias das vazões fornecidas pelo regulador na Combinação 9, para as diferentes cargas nominais e profundidades da água no canal principal utilizadas no experimento.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)