



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP
REPOSITÓRIO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E INTELLECTUAL DA UNICAMP

Versão do arquivo anexado / Version of attached file:

Versão do Editor / Published Version

Mais informações no site da editora / Further information on publisher's website:

<http://revistadae.com.br/site/artigos/215>

DOI: 10.4322/dae.2019.001

Direitos autorais / Publisher's copyright statement:

©2019 by Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. All rights reserved.

DIRETORIA DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Cidade Universitária Zeferino Vaz Barão Geraldo

CEP 13083-970 – Campinas SP

Fone: (19) 3521-6493

<http://www.repositorio.unicamp.br>

Os perigos advindos de válvulas de ar em sistemas adutores e duas soluções eficazes testadas computacionalmente

The perils of air valves in water mains and two effective solutions tested computationally

• **Data de entrada:**
03/08/2017

• **Data de aprovação:**
05/12/2017

Elias Sebastião Amaral Tasca^{*}/Edevar Luvizotto Junior/José Gilberto Dalfré Filho

DOI: 10.4322/dae.2019.001

Resumo

Neste trabalho, mostrou-se a importância do controle da expulsão de ar por meio de válvulas ventosas. Como pano de fundo, fez-se breve exposição sobre válvulas ventosas e sobre transitórios hidráulicos. A adutora do estudo de caso é composta por tubos de PVC DN 200 mm e tem 1570,0 m de extensão. Simulou-se, computacionalmente, o transitório hidráulico nesta adutora devido ao desligamento repentino do sistema de bombeamento. Esse transitório gerou sobrepressões demasiadamente elevadas. Nesse contexto, o uso de válvulas ventosas sem controle de expulsão de ar acarretou em pressões máximas até 80,8 mH₂O (44,8 mH₂O na média) maiores do que na situação sem instalação de válvulas ventosas. Duas maneiras para controlar a expulsão de ar foram sugeridas. Para uma dessas maneiras, propõe-se um dispositivo com placa de orifício. Com o controle da expulsão de ar, conseguiu-se obter pressões máximas abaixo dos limites definidos pelas características da adutora.

Palavras-chave: Válvulas de ar. Transitórios hidráulicos. Adutoras. Simulação.

Abstract

In the present paper, the importance of controlled air expulsion through air valves is substantiated. A brief exposition about air valves and about hydraulic transients is presented. The water main of the case study is composed of PVC DN 200 mm and has a length of 1570.0 m. It was simulated, computationally, the hydraulic transient that comes from the abrupt turning off of the pumping system. This transient generated overpressures greater than the permitted ones. In this context, the use of air valves without air expulsion control generated maximum pressures even 80.8 mH₂O (44.8 mH₂O on average) greater than in the situation without any air valves. Two ways to control air expulsion were presented. For one of these ways, a device with an orifice plate was proposed. With air expulsion control, it was possible to obtain maximum pressures bellow the maximum allowed pressure.

Keywords: Air valves. Hydraulic transients. Water mains. Simulation.

Elias Sebastião Amaral Tasca – Mestre em engenharia civil pela Unicamp e doutorando na FEC-Unicamp.

Edevar Luvizotto Junior – Doutor em engenharia civil pela USP. Pós-doutorado na Universidade Politécnica de Valência. Docente da FEC-Unicamp.

José Gilberto Dalfré Filho – Doutor em engenharia civil pela Unicamp. Pós-doutorados na Universidade Politécnica de Milão e na Universidade de Toronto. Docente da FEC-Unicamp.

***Endereço para correspondência:** Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária Zeferino Vaz, CEP: 13083-889. Campinas – São Paulo. E-mail: elias.tasca@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Em sistemas de adução de água, os bolsões de ar podem ser responsáveis por transitórios hidráulicos perigosos (RAMEZANI et al., 2015). O ar desses bolsões tem duas origens principais: ar que sai da solução com a água transportada e ar externo que adentra na adutora.

O ar sai da solução com a água devido à queda de pressão a jusante de válvulas semiabertas, escoamento em cascata em tubos não completamente cheios, variação da velocidade do escoamento por causa de mudança de diâmetro ou de declividade, alterações no perfil da linha, variação de temperatura ou pressão (AWWA, 2016).

Quando, por causa de um transitório hidráulico, a pressão interna fica abaixo da pressão atmosférica, de acordo com Azevedo Netto (1971), o ar pode entrar das seguintes maneiras: por meio do poço de sucção, de reservatórios, quando houver bastante agitação ou nível baixo na tomada de água, de juntas de válvulas, de juntas de tubos.

Com o intuito de expulsar o ar, faz-se uso de válvulas ventosas. Segundo Koelle (2000), porém, válvulas de tríplex função sem controle de expulsão de ar não devem ser usadas para proteção do sistema contra transitórios hidráulicos. É comum que o rompimento de adutoras aconteça nas vizinhanças de válvulas ventosas sem controle de expulsão.

Tubos com grandes diâmetros merecem atenção especial, pois podem sofrer colapso se a pressão interna ficar muito reduzida. Para evitar pressões muito baixas, válvulas ventosas anti-ar/vácuo ou de tríplex função podem ser usadas. Dessa forma, admite-se ar para impedir o vácuo interno, formando, em consequência, um bolsão de ar que separa duas colunas líquidas. Assim que a pressão interna se restabelece, ultrapassando a pressão atmosférica, inicia-se a expulsão do ar, que termina quando as colunas líquidas se reencontram. A colisão entre as colunas líquidas, ou entre uma co-

luna líquida e a válvula ventosa, gera uma onda de sobrepressão que pode resultar em pressões além dos limites de resistência da adutora.

No processo de enchimento de uma adutora, segundo AWWA (2016), a velocidade do escoamento deve ser de no máximo 0,3 m/s, para que o golpe de aríete resultante não seja excessivo. De maneira análoga, deve-se limitar a velocidade de expulsão de bolsões de ar. Dessa forma, diminui-se a velocidade de aproximação das colunas líquidas na fase final da expulsão e, em consequência, a intensidade do golpe de aríete associado.

2 VÁLVULAS VENTOSAS

2.1 Tipos de válvulas ventosas

As válvulas ventosas podem ser instaladas em sistemas hidráulicos para permitir a expulsão ou a admissão de ar. Existem três tipos principais de válvulas ventosas (RAMEZANI et al., 2015):

- Válvulas para remoção de ar: essas válvulas ventosas também são chamadas de válvulas ventosas de efeito automático ou de alta pressão, pois expulsam automaticamente pequenas bolsas de ar que vão se acumulando em pontos elevados do perfil da adutora, na câmara da válvula ventosa, na situação de operação normal, ou seja, situação pressurizada. Os diâmetros dos orifícios variam de 1,0 mm até 5,0 mm.
- Válvulas anti-ar/vácuo: essas válvulas ventosas são também chamadas de válvulas ventosas de efeito cinético ou de baixa pressão. Essa designação se deve ao fato de essas válvulas ventosas operarem somente quando a adutora não está pressurizada. Não servem, portanto, para remover pequenas quantidades de ar acumulado na câmara da ventosa durante a operação normal. Servem para a expulsão e para a admissão de grandes vazões de ar durante as operações de enchimento e esvaziamento. Os diâmetros dos orifícios variam de 50,0 mm até 200,0 mm.

- Válvulas de tríplice função: essas válvulas ventosas combinam as funções dos dois tipos anteriormente descritos. Um modelo comum desse tipo de válvula ventosa possui dois flutuadores: o flutuador maior atua na função da válvula ventosa anti-ar/vácuo e o flutuador menor atua na função de válvula para remoção de ar. Essas válvulas ventosas agem em três momentos distintos: expulsão de ar no enchimento, entrada de ar na drenagem e eliminação de pequenas quantidades de ar durante a operação normal.

2.2 Localizações de válvulas ventosas

A distribuição adequada das válvulas ventosas ao longo do perfil é essencial para o funcionamento eficiente e seguro de uma adutora. Tem-se a seguir uma lista dos pontos onde as válvulas ventosas devem ser instaladas de acordo com AWWA (2016):

- Válvulas ventosas de tríplice função devem ser instaladas em todos os pontos altos do perfil da adutora.
- Válvulas ventosas de tríplice função devem ser instaladas em pontos em que há um aumento do módulo da declividade negativa em um trecho de descida. Válvulas ventosas nesses pontos servem para evitar formação de vácuo e separação de colunas de água.
- Válvulas ventosas devem ser instaladas em pontos de redução de declividade de trechos ascendentes. Deve-se usar válvula anti-ar/vácuo ou válvula de tríplice função nesse caso.
- Durante o esvaziamento, a ação de uma válvula anti-ar/vácuo ou válvula de tríplice função ao lado de uma válvula de drenagem pode ser essencial para evitar pressões muito baixas.
- Em descidas longas, válvulas para remoção de ar ou válvulas de tríplice função devem ser usadas, distanciadas de 400,0 m até 800,0 m.

- Em subidas longas, válvulas de tríplice função ou válvulas anti-ar/vácuo devem ser usadas, distanciadas de 400,0 m até 800,0 m.

- Em trechos horizontais longos, é necessário instalar válvulas de tríplice função nas extremidades e válvulas para remoção de ar ou válvulas de tríplice função na região intermediária com certo espaçamento. O espaçamento deve estar na faixa de 400,0 m até 800,0 m.

- Deve-se instalar válvula de remoção de ar a montante de medidores de vazão do tipo Venturi.

- Deve-se instalar válvula de remoção de ar ou válvula anti-ar/vácuo, com válvula de retenção para impedir a admissão, no ponto mais elevado de um sifão.

- Indica-se que válvulas anti-ar/vácuo devem ser instaladas na região de descarga de poços profundos e bombas de eixo vertical para permitir a saída do ar durante a partida da bomba e a entrada de ar quando a bomba for desligada.

Azevedo Netto (1971) faz as seguintes recomendações adicionais:

- Recomenda-se o uso de válvulas ventosas a montante e a jusante de válvulas de parada.
- Recomenda-se o uso de válvulas ventosas a montante de reduções de diâmetro.

Para Aquino (2013), deve-se instalar uma válvula anti-ar/vácuo a jusante de uma bomba e após a sua válvula de retenção. Servirá para expulsar ar durante o processo de partida da bomba e para admitir ar quando a bomba for desligada.

2.3 Golpe de aríete e expulsão de ar por válvulas ventosas

A intensidade do golpe de aríete, quando a válvula ventosa é atingida por uma coluna líquida, é função da Equação de Joukowski, indicada pela Equação 1 (TULLIS, 1989).

$$\Delta H = -\frac{a\Delta V}{g} \quad (1)$$

Na Equação 1, ΔH é a variação da carga hidráulica em mH_2O , a é a celeridade de propagação da onda de pressão em m/s , ΔV é a variação da velocidade da água ao chegar na ventosa em m/s e g é a aceleração da gravidade em m/s^2 .

A celeridade de propagação da onda de pressão pode ser calculada pela Equação 2, sendo função das características da tubulação e do fluido (TULLIS, 1989).

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{CKD}{Ee}}} \quad (2)$$

Na Equação 2, K é o módulo volumétrico do líquido em Pa, que para a água vale $2,2 \times 10^9$ Pa; E é o módulo de Young do tubo em Pa; D é o diâmetro do tubo em m; C depende das condições de ancoragem; ρ é a massa específica do líquido em kg/m^3 ; e e é a espessura da parede do tubo em m.

A Equação 1 pode ser reescrita por meio da Equação 3 (TULLIS, 1989).

$$\sum \Delta H = -\frac{\sum(a\Delta V)}{g} \quad (3)$$

A Equação 3 é válida quando os incrementos de variação de velocidade acontecerem dentro do período da tubulação, que é dado pela Equação 4 (TULLIS, 1989).

$$T = \frac{2L}{a} \quad (4)$$

Na Equação 4, T é o período da tubulação em s, L é o comprimento da tubulação em m e a é a celeridade de propagação da onda de pressão em m/s .

Por meio das Equações 1 e 3, pode-se concluir que a diminuição de ΔV implicará na desejável redução de

ΔH . Uma maneira de reduzir ΔV é por meio da expulsão controlada (mais lenta) do ar pela válvula ventosa.

3 METODOLOGIA

3.1 Dispositivo proposto para controle da expulsão de ar

Propõe-se, neste trabalho, um dispositivo para o controle da expulsão de ar por válvulas ventosas, mostrado na Figura 1. O dispositivo deve ser conectado ao orifício de saída da válvula ventosa. Apesar da norma C512-07 da AWWA recomendar uso de ferro dúctil para dispositivos desta natureza (AWWA, 2008), indica-se aqui o uso de PVC, uma vez que o dispositivo estará exposto a pressões moderadas.

O trecho horizontal do dispositivo, que tem uma de suas extremidades conectada à válvula ventosa, é responsável pela expulsão de ar. Ligado ao trecho horizontal, tem-se um trecho vertical que é responsável pela admissão. No trecho vertical, tem-se uma válvula de retenção de ar, permitindo o escoamento somente como indicado pela seta adjacente.

No trecho horizontal, tem-se uma placa de orifício. A medição da vazão de ar na expulsão pode ser feita com base nos valores de queda de pressão por causa da presença da placa de orifício. Os valores mínimos de XD e YD devem ser estabelecidos de modo a permitir medições precisas. O tap de pressão a montante da placa deve ficar a uma distância D da placa. Já o tap de pressão a jusante deve ficar a uma distância D/2, conforme recomendado por Fox et al. (2006).

Li et al. (2009) mencionam que a simples instalação de um elemento com orifício reduzido na saída da válvula ventosa pode ser capaz de mitigar sobrepressões transitórias através do controle da expulsão de ar. Porém, um ponto negativo desta abordagem é a consequente diminuição da capacidade de admissão de ar. Esta inconveniência não ocorre com a aplicação do dispositivo da Figura 1.

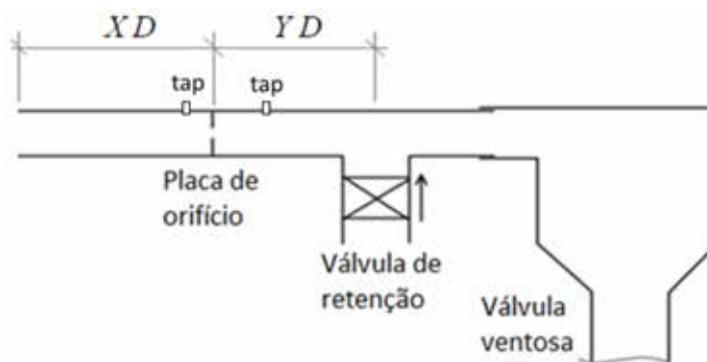


Figura 1: Dispositivo proposto para controle da expulsão de ar por válvulas ventosas.

3.2 Adutora do Estudo de Caso

O estudo de caso deste trabalho refere-se a uma adutora real. A Tabela 1 mostra os comprimentos dos trechos da adutora, sendo que o comprimento total vale 1570,0 m. As perdas localizadas serão desprezadas, visto que o comprimento da adutora é superior a $5000 \times D = 5000 \times 0,2 = 1000,0$ m. Esse critério é indicado por Luvizotto Junior (2010).

Tabela 1: Comprimentos dos trechos da adutora.

Trecho	Comprimento (m)	Trecho	Comprimento (m)
1-2	42	7-8	210
2-3	158	8-9	170
3-4	140	9-10	545
4-5	64	10-11	99
5-6	76	11-12	26
6-7	40		

A Figura 2 apresenta o posicionamento altimétrico da tubulação, sendo que o desnível geométrico total é 70,8 m. A cota mínima do reservatório de sucção é 671,8 m e a cota máxima do reservatório de chegada é 742,5 m.

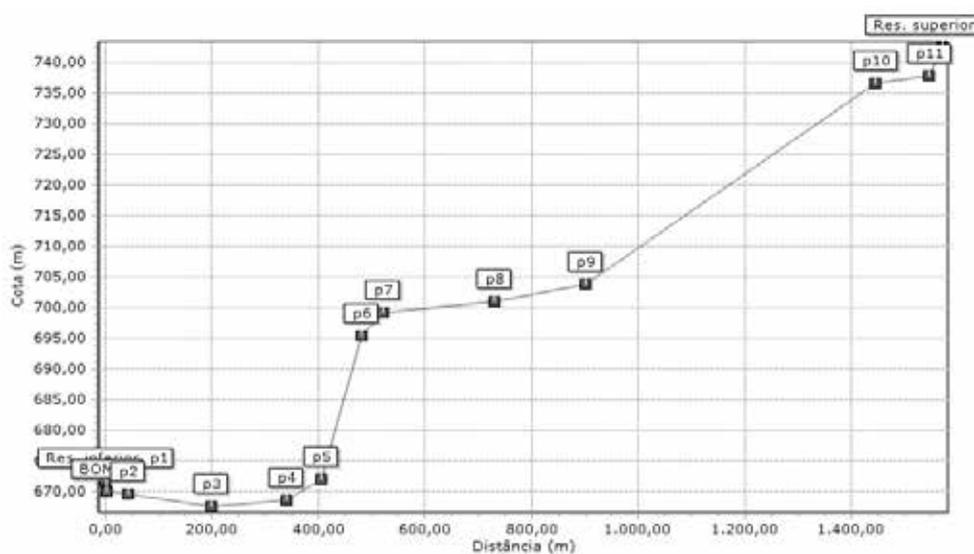


Figura 2: Perfil da adutora estudada.

O material das tubulações é PVC do tipo de DE-FoFo. Os tubos da adutora principal têm diâmetro interno de 204,2 mm, com espessura de parede de 8,9 mm. Os demais tubos têm diâmetro interno de 108,4 mm, com espessura de 4,8 mm. A tubulação de sucção tem um diâmetro comercial acima da tubulação de recalque, segundo o que é recomendado por Porto (2006).

Considerando o material dos tubos e valores de diâmetro e espessura, temos as seguintes pressões de projeto para a adutora principal: pressão máxima em regime permanente de 100,0 mH₂O e pressão máxima em regime transitório de 120,0 mH₂O.

A bomba tem as seguintes características: bomba afogada com válvula de retenção do tipo portinhola dupla; bomba seccionada KSB ETA 100-50/2; rotor de 340,0 mm; rotação de 1760,0 rpm; rendimento de 70,0%; potência de 60,0 HP; inércia do conjunto motor-bomba de 2,5 kg×m²; vazão de projeto de 38,9 L/s; altura manométrica de 89,0 mH₂O; e distância de 10 m do reservatório inferior.

3.3 Definição dos pontos de instalação das válvulas ventosas

Será instalada uma válvula ventosa anti-ar/vácuo no ponto P2 a jusante da bomba e de sua respectiva válvula de retenção, conforme indicado por Aquino (2013). Nos pontos P7 e P10, tem-se diminuição da declividade do trecho ascendente e, portanto, em cada um desses pontos será instalada uma válvula de tríplex função, como indicado por AWWA (2016). Com a configuração descrita até agora, ter-se-ia um trecho demasiadamente longo de subida entre os pontos P7 e P10 sem presença de válvula ventosa. Por esse motivo, uma válvula ventosa anti-ar/vácuo será instalada no ponto P9.

Conforme também recomendado por AWWA (2016), o tubo que liga a válvula ventosa à adutora deve ter declividade ascendente na direção da válvula ventosa. Neste estudo de caso, optou-se por tubos de ligação com 6,0 m de comprimento e declividade de 25,0%.

3.4 Software para simulação

A análise computacional de transitórios hidráulicos é essencial para a verificação da segurança de instalações que têm válvulas ventosas instaladas (AWWA, 2016). Usou-se para as simulações o software HAMMER, da Bentley Systems.

Os tipos de válvulas ventosas oferecidos por este software são os seguintes: anti-ar/vácuo (*double acting*), fechamento lento (*slow closing*), tríplex função (*triple action*) e quebra-vácuo (*vacuum breaker*).

No caso da válvula ventosa anti-ar/vácuo, deve-se definir o diâmetro do orifício de expulsão de ar e o diâmetro do orifício de admissão. Para a válvula de tríplex função, deve-se estabelecer a maneira pela qual será feita a troca do orifício de expulsão, que pode ser com base em um volume ou pressão de transição. Deve-se, então, definir os diâmetros dos dois orifícios de expulsão e do orifício de admissão de ar.

3.5 Simulação de desligamento do conjunto motor-bomba

A manobra simulada neste trabalho é referente ao desligamento repentino do conjunto motor-bomba. Nessa situação, uma onda de pressão negativa parte do conjunto motor-bomba para o restante da adutora.

Nesse contexto, as válvulas ventosas vão admitir ar para evitar o vácuo. Quando a pressão for restabelecida, o ar admitido será expulso, resultando na colisão entre colunas líquidas, gerando-se, assim, grandes surtos de pressões positivas. As estratégias serão testadas quanto à eficácia na mitigação das ondas de sobrepressão.

A válvula ventosa com dispositivo com placa de orifício acoplado foi simulada como sendo uma válvula anti-ar/vácuo com diâmetro de entrada de 3 cm e diâmetro de saída de 1 cm. A solução com válvula gaveta a montante da ventosa foi simulada usando-se tubos longos o bastante de modo a evitar que o software precisa-se ajustar estes comprimentos excessivamente.

Apenas como dimensionamento preliminar, para efeito deste trabalho, considera-se a recomendação de Koelle (2000), que indica um diâmetro de orifício da ordem de 10,0% do valor do diâmetro da adutora principal. Para a adutora deste estudo de caso, teríamos um valor de 2,0 cm para o orifício da válvula ventosa. O valor adotado nas simulações é de 3,0 cm, que deve ser suficiente para as operações quase-estáticas na adutora.

Como referência para dimensionamento das válvulas ventosas, para as situações quase-estáticas de enchimento, drenagem e operação normal, tem-se o manual M51 da AWWA (AWWA, 2016). Azevedo Netto (1971) cita também as formulações de Parmakian e de Sweeten. Mais recentemente, Bianchi et al. (2007) desenvolveram fórmulas práticas para o dimensionamento de válvulas ventosas. Duas condições foram consideradas: máxima sobrepressão permissível e máxima velocidade de enchimento.

O tempo de simulação adotado foi de 40 s, bastante superior ao período da adutora, que é de apenas 7,6 s.

3.6 Estratégias para controle da expulsão de ar

Koelle (2000) sugere o uso de válvula de retenção com furos e mola de ação logo a montante da válvula ventosa como estratégia para controlar a expulsão de ar. Quando o ar entra pela válvula ventosa, a válvula de retenção com furos não interfere na passagem do ar, e este escoo livremente. Li et al. (2009) também indicam essa solução. Quando ocorre expulsão, a válvula de retenção com furos se fecha com a chegada da água, dificultando o escoamento devido à diminuição da área aberta da seção transversal do tubo.

De acordo com Koelle (2000), pode-se também controlar a expulsão de ar com a aplicação de tubo de imersão. Nesse caso, quando a abertura inferior do tubo de imersão ficar submersa, haverá ar preso no domo de acumulação, que só poderá sair pelo pequeno orifício do furo de alívio. Supostamente haverá amortecimento do golpe devido ao bolsão de ar acumulado no domo. Esse sistema, que é apresentado na Figura 3, tem o inconveniente de gerar obstrução na seção transversal do tubo.

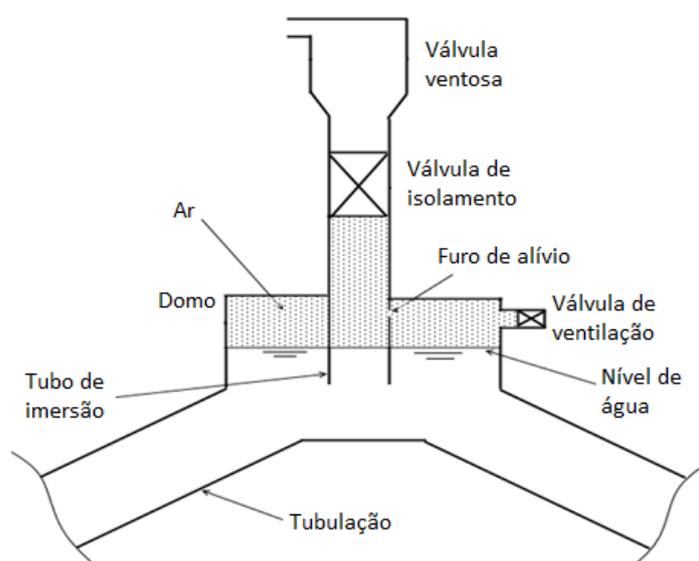


Figura 3: Tubo de imersão para válvula ventosa, adaptado de Koelle (2000).

As estratégias usadas neste trabalho para o controle da expulsão de ar são as seguintes:

- A tubulação que liga a válvula ventosa à adutora tem uma válvula de retenção que só permite o escoamento da válvula ventosa para a adutora. Em paralelo com essa tubulação, existe uma válvula gaveta aberta com 1,0 cm de diâmetro. Essa configuração está apresentada na Figura 4.

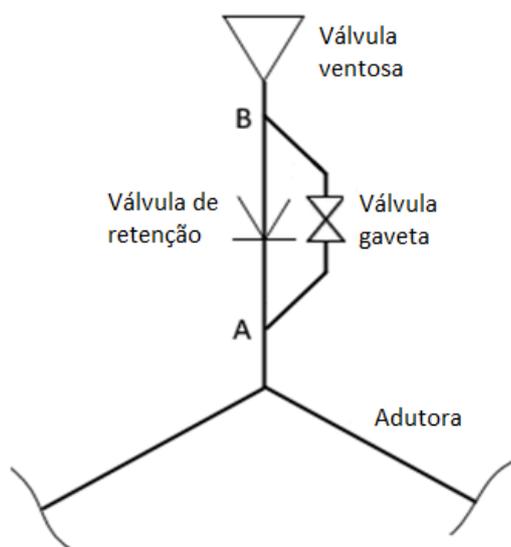


Figura 4: Válvula gaveta em paralelo ao tubo de ligação para controle da expulsão de ar.

- O dispositivo proposto neste trabalho é conectado ao orifício de saída da válvula ventosa conforme Figura 1. O diâmetro da sua placa de orifício é de 1,0 cm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em uma primeira etapa, comparou-se o comportamento das seguintes configurações: ausência de válvulas ventosas ao longo da adutora; válvulas ventosas sem controle de expulsão de ar; válvulas ventosas com controle de expulsão de ar por meio de válvulas do tipo gaveta, conforme a Figura 4; e válvulas ventosas com dispositivos de controle acoplados, conforme a Figura 1. Os resultados dessa primeira etapa estão nas Figuras 5 e 6.

Pela Figura 5, observa-se que a pressão de vapor da água é atingida quando não são usadas válvulas ventosas ou quando estas são usadas sem controle de expulsão. A aplicação do dispositivo proposto, assim como a aplicação da válvula gaveta, impediu que a pressão atingisse a pressão de vapor.

Em relação às pressões máximas, Figura 6, observa-se que a situação em que não há nenhuma válvula ventosa resulta em pressões máximas menores (na média 44,8 mH₂O menores, desconsiderando-se os reservatórios) do que na situação em que há válvulas ventosas sem controle de expulsão de ar. No ponto onde a bomba está instalada, a pressão máxima com as válvulas ventosas sem controle de expulsão é 80,8 mH₂O maior do que quando não se tem ventosas instaladas. Isso mostra que o controle da expulsão é essencial.

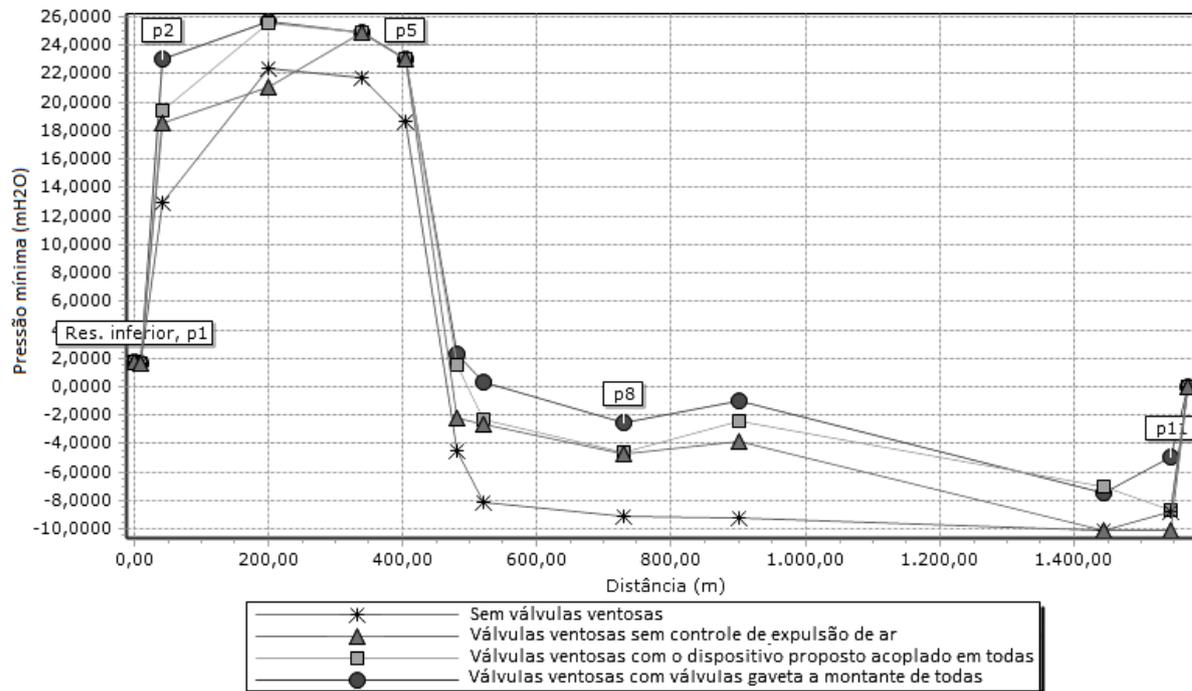


Figura 5: Pressões mínimas no desligamento da bomba para diversas configurações de adutora.

As pressões, porém, para o caso sem válvulas ventosas, estão além do valor máximo aceitável de 120,0 mH₂O. Com o uso do dispositivo acoplado às válvulas ventosas, conseguiu-se pressões máximas abaixo do limite, exceto para o ponto onde está a bomba, com pressão máxima de 123,3 mH₂O. A diferença de 3,3 mH₂O, porém, não deve ser problemática. A configuração com válvulas do tipo gaveta a montante das ventosas mostrou pequena vantagem em relação à configuração com o dispositivo proposto, sendo todas as pressões máximas inferiores ao limite.

Usando-se o dispositivo proposto, encontram-se, na média, pressões máximas 11,9 mH₂O menores do que no caso em que não há presença de válvulas ventosas. O ponto em que ocorreu maior redução da pressão máxima transitória foi P2, com uma redução de 25,3 mH₂O.

Usando-se a válvula gaveta em paralelo, encontram-se, na média, pressões máximas 19,7 mH₂O menores do que no caso em que não há válvulas ventosas. O ponto em que ocorreu maior redução da pressão máxima transitória foi na bomba, com uma redução de 28,1 mH₂O.

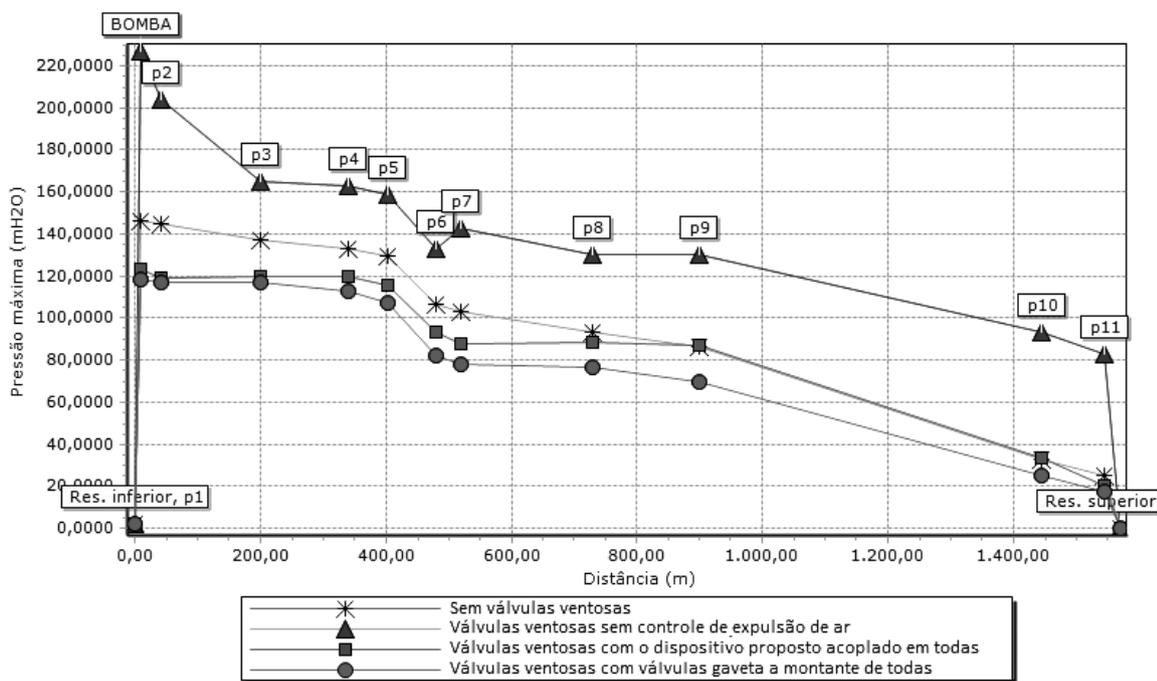


Figura 6: Pressões máximas no desligamento da bomba para diversas configurações de adutora.

Na segunda etapa, tendo em vista a eficácia das duas maneiras de controlar a expulsão de ar, foi verificada a possibilidade de reduzir a quantidade de pontos de controle da expulsão, sem prejudicar a adutora em relação aos transitórios.

Testou-se o uso de controle de expulsão com válvula gaveta a montante da válvula ventosa em pontos únicos da adutora, mantendo-se os outros pontos com válvulas ventosas sem controle de expulsão. Os resultados destes testes estão na Figura 7.

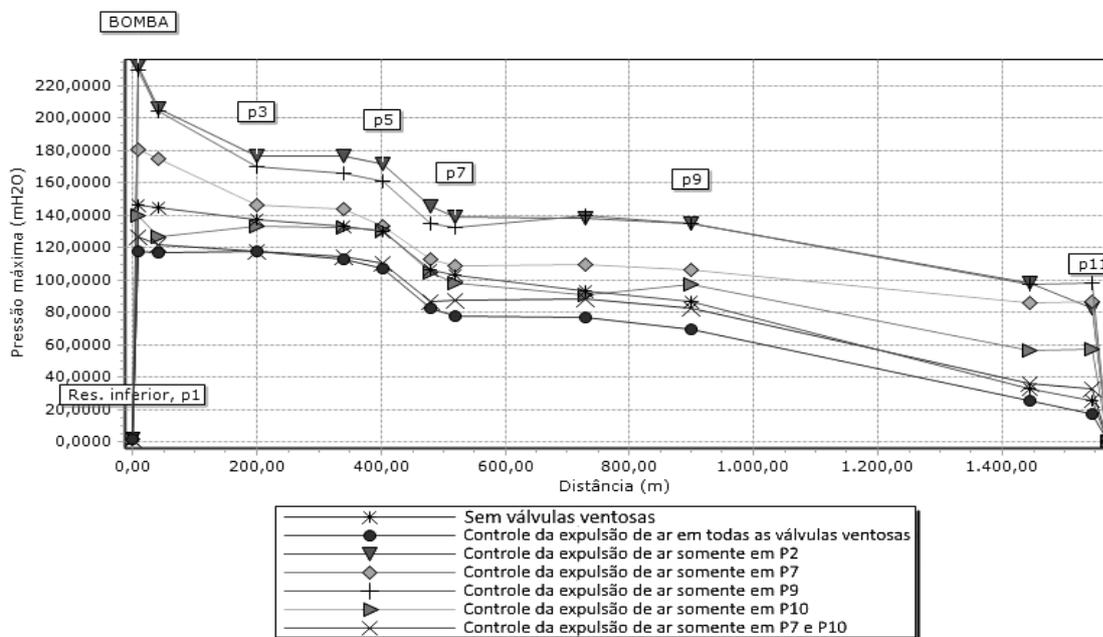


Figura 7: Comparação de diversas configurações usando válvula gaveta a montante de válvula ventosa.

Observa-se que há uma tendência de ter resultados melhores para pontos de aplicação do controle de expulsão que estão em cotas mais elevadas, com exceção do ponto P7, que se revela mais importante do que o ponto P9. Isso se deve, talvez, ao fato de que o ponto P7 é um ponto em que há grande diminuição da declividade ascendente, ao passo que o ponto P9 é apenas um ponto intermediário. A sequência de localização do controle de expulsão por meio da válvula gaveta, indo da pior situação para a melhor, é a seguinte: P2, P9, P7, sem válvulas ventosas, P10, e P7 junto com P10.

Além disso, conclui-se que o uso de controle da expulsão nos pontos P7 e P10 é suficiente para

se conseguir um resultado equivalente àquele de quando se faz controle da expulsão em todos os pontos com válvula ventosa, pois excede em apenas 6,3 mH₂O o valor limite no ponto da bomba. Tem-se assim uma economia de recursos.

Na figura 8, têm-se os resultados dos testes realizados com controle de expulsão por meio do dispositivo proposto, análogo ao que foi feito no caso da Figura 7. A sequência de localização do controle de expulsão por meio do dispositivo proposto, indo da pior situação para a melhor, é a seguinte: P2, P9, P7, P10, sem válvulas ventosas, e P7 junto com P10.

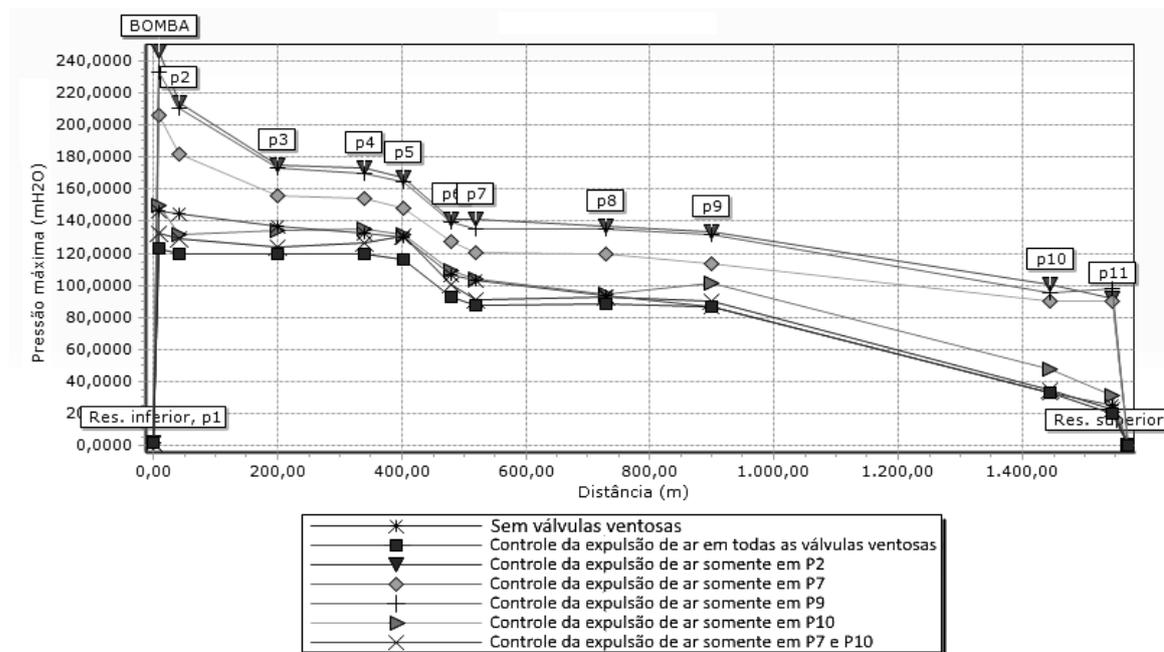


Figura 8: Comparação de diversas configurações usando dispositivo proposto acoplado à válvula ventosa.

Com o uso do dispositivo proposto nos pontos P7 e P10, sendo as outras válvulas ventosas sem controle, não se obteve uma situação aceitável na bomba. Nesse ponto, a pressão máxima excede em 12,3 mH₂O o valor aceitável, aproximadamente o dobro de excesso de pressão que ocorre no caso com válvula gaveta.

Em relação ao uso de válvula gaveta em P7 e P10, comparado ao uso do dispositivo proposto nestes mesmos pontos, encontrou-se diferença de 6,5 mH₂O na média. A maior diferença, porém, foi de 21,0 mH₂O.

5 CONCLUSÕES

Por meio deste trabalho, mostrou-se que é essencial para a segurança e eficiência de adutoras o controle da expulsão de ar por meio de válvulas ventosas. A ausência de controle de expulsão pode acarretar em pressões demasiadamente elevadas, muito maiores do que no caso sem instalação de válvulas ventosas.

A aplicação de válvula gaveta a montante da válvula ventosa para controle da expulsão se mostrou bastante eficaz. Pode-se regular o grau de abertura da válvula gaveta como desejado. Esse fato é uma vantagem dessa concepção em relação ao uso de válvula de retenção com furos e mola de ação.

O dispositivo proposto neste trabalho também se mostrou eficaz. Precisa-se, porém, de mais pontos com controle de expulsão para se conseguir os mesmos resultados obtidos com o uso da válvula gaveta, apesar dos diâmetros serem iguais.

O dispositivo proposto possui algumas características positivas que se destacam: simplicidade e baixo custo; pode ser acoplado a válvulas ventosas já instaladas sem a necessidade de grandes alterações nas configurações do sistema; pode-se medir a vazão de ar na expulsão, com uso de transdutor de pressão nos taps de montante e de jusante da placa de orifício; não apresenta risco de entupimento; simples manutenção e substituição.

6 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, G. A. **Caracterização do escoamento de ar em adutoras e válvulas ventosas**. 2013. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2013.

AWWA. **AWWA C512-07 Air-Release, Air/Vacuum, and Combination Air Valves for Waterworks Service**. 2. ed. Denver, 2008.

AWWA. **Manual of water supply practices-M51: Airvalves: air-release, air/vacuum and combination air valves**. 2. ed. Denver, 2016.

AZEVEDO NETTO, J. Ventosas. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA. [S.l.: s.n.], 1971.

BIANCHI, A.; MAMBRETTI, S.; PIANTA, P. Practical formulas for the dimensioning of air valves. **J. Hydraul. Eng.**, v. 133, n. 10, p. 1177-1180, 2007.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

KOELLE, E. **Análise de válvulas de ar e ventosas**. São Paulo: Sapesp, 2000.

LI, G.; BAGGETT, C. C.; ROSARIO, R. A. Air/vacuum valve breakage caused by pressure surges: analysis and solution. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2009: GREAT RIVERS, 2009, Kansas City. **Proceedings...** Kansas City: ASCE, 2009.

LUVIZOTTO JR, E. **Sistemas de transporte fluido: bombas e adutoras**. Campinas: LHC-DRH-Unicamp, 2010.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

RAMEZANI, L.; KARNEY, B.; MALEKPOUR, A. The challenge of air valves: a selective critical literature review. **J. Water Resour. Plann. Manage.**, v. 141, 2015.

TULLIS, J. P. **Hydraulics of Pipelines: pumps, valves, cavitation, transients**. New York: John Wiley and Sons, 1989.