

ESTUDO DE CASO: EFEITOS DOS TRANSIENTES EM ADUTORA POR GRAVIDADE

RODRIGO RIBEIRO FRANCO VIEIRA¹; RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN² E JOSÉ BONIFÁCIO MARTINS FILHO³

¹ *Doutorando no programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu., CODEVASF 6 SR Av Comissão do Vale, s/n, Piranga, 48901-900, Juazeiro, Bahia – Brasil, rodrigo.vieira1965@unesp.br*

² *Professor associado no programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu. Avenida Universitária, 3780 Altos do Paraíso, 18610034 - Botucatu, SP - Brasil, rodrigo.roman@unesp.br*

³ *Doutorando no programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, R. Nicola Zaponi, 1427, Vale do Sol, 18606-12, Botucatu - SP – Brasil, boni.martins@outlook.com.*

1 RESUMO

O estudo de transientes hidráulicos quando não realizados podem resultar em danos materiais e humanos. Sendo assim, é essencial propor soluções cabíveis para evitar tais danos, ainda em âmbito de projeto. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi modelar os possíveis efeitos dos transientes hidráulicos em uma adutora por gravidade para o município de Campo Formoso-BA. A adutora por gravidade estudada tem extensão de 1.584 m e inicia em um reservatório elevado com fuste de 10 m de altura, descarregando em um reservatório com 3 m de altura. Para realização das modelagens hidráulicas foram utilizados os softwares EPANET para determinação de vazões e pressões e o Sistema UFC para modelar o efeito dos transientes em diferentes tempos de fechamento. Os resultados obtidos sugerem que os efeitos transitórios em redes por gravidades podem ser tão ou mais graves do que em sistemas pressurizados, a depender do caso, e que a assunção do tempo mínimo de fechamento de válvulas, calculado através da determinação do período da tubulação é um procedimento equivocado para a solução dos transientes hidráulicos, exigindo a simulação computacional.

Palavras-chave: golpe de aríete; válvulas hidráulicas; abastecimento rural, adutora por gravidade, transiente hidráulico.

**VIEIRA, R. R. F.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; MARTINS FILHO, J. B.
CASE STUDY: EFFECTS OF TRANSIENTS IN GRAVITY SUPPLY**

2 ABSTRACT

The study of hydraulic transients when not performed can result in irreversible and human damage. Therefore, it is essential to propose reasonable solutions to avoid such damage, even at the project level. In this context, the objective of this work was to model the possible effects of hydraulic transients in a gravity pipeline for the municipality of Campo Formoso, Bahia State. The gravity pipeline studied has a length of 1584 m and starts in an elevated reservoir

with a 10 m high shaft, discharging into a 3 m high reservoir. To carry out hydraulic modeling, EPANET software was used to determine flows and pressures, and the UFC system was used to model the effects of transients at different closing times. The results suggest that the transient effects in gravity networks can be as serious or more serious than those in pressurized systems, depending on the case, and that the assumption of the minimum valve closing time, which is calculated by determining the piping period, is an incorrect procedure for solving hydraulic transients, which requires computer simulation.

Keywords: water hammer; hydraulic valves; rural supply, gravity pipeline, hydraulic transient.

3 INTRODUÇÃO

Os transientes ou transitórios hidráulicos, também popularmente conhecidos como golpe de aríete, são fenômenos físicos decorrente da variação de pressão abrupta no interior de uma tubulação, seja pelo acionamento ou desligamento do conjunto moto-bomba ou pela manobra de abertura e fechamento de válvulas e registros (TWYMAN, 2018; KERAMAT *et al.*, 2012). Transitórios de menor magnitude também podem ocorrer devido a mudanças extremamente lentas de vazão (VEIGA, 2014).

O método mais consensual para o cálculo dos transientes hidráulicos é o Método das características (MOC) (Schmidt, 2016), que converte as equações do movimento e da continuidade em equações parciais ordinárias (Gray, 1953; Streeter; Lai, 1962; Chaudhry, 1987). As condições de contorno do regime permanente são computadas, e que para se determinar o valor de pressão (H) e velocidade (V) - ou vazão (Q) - em um determinado trecho do conduto, no momento do transiente Chaudhry (2014).

As sobrepressões em decorrência dos transientes hidráulicos podem resultar em deformação e colapso da linha de adução (LOPES *et al.*, 2022). Portanto, essas variações de pressão devem ser consideradas no dimensionamento das tubulações durante a fase de projeto.

O estudo dos transientes hidráulicos é comumente realizado para sistemas

urbanos de abastecimento de água e esgoto (SOARES; COVAS; RAMOS, 2013; SOARES; COVAS, 2015; STARCZEWSKA; COLLINS; BOXALL, 2014). Entretanto, na hidráulica agrícola (irrigação e abastecimento rural) os fenômenos transitórios, seu diagnóstico e soluções adequadas ainda são muito incipientes e escassos. Tais setores, por diversos motivos - sejam institucionais, por falta de oportunidade e outros - ainda não despertaram para a importância e necessidade da adoção de soluções adequadas o que, nos tempos atuais torna-se inadmissível face as ferramentas disponíveis no mercado, incluindo algumas gratuitas.

No caso de redes por gravidade, o controle pode ser mais difícil e as suas soluções, agravada pela falsa ideia geral de que, por ser adutora desta natureza, não se deve preocupar com os transientes, quando comparada com sistemas pressurizados por conjuntos motobombas.

Para sistemas de recalque (com bombas), a onda de pressão tem valor em escala sônica, e não se trata do deslocamento do fluido na tubulação (VIEIRA, 2019). Nas redes por gravidade, o fenômeno transitório tem um comportamento distinto no que tange as ondas de pressão do que um sistema convencional, por bombeamento, posto que a primeira onda é sempre de alta pressão.

Culturalmente, na hidráulica agrícola e irrigação se atêm apenas ao regime permanente, regido pelo Teorema de Bernoulli. Considerando este Teorema, é impossível que a energia do sistema

(pressão) seja superior ao plano de carga efetivo, haja visto que energia não se cria. No entanto, os transientes hidráulicos transpõem esta premissa. Este estudo visa comprovar a complexidade dos sistemas por gravidade no tocante aos transientes, e apresentar uma solução mais segura, adequada e econômica, quebrando os supracitados paradigmas da hidráulica agrícola nacional. Além disso, demonstrar que a correta aplicação do Método das Características, empregado através do software UFC, permite a aplicação da solução mais adequada e econômica no dimensionamento da rede. Tendo em vista a importância dos sistemas de abastecimento para as zonas rurais do Brasil, este trabalho teve como objetivo realizar modelagens hidráulicas dos efeitos dos transientes possíveis em uma adutora por gravidade para o município de Campo Formoso-BA.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área de estudo e adutora

A adutora por gravidade objeto de estudo do presente trabalho, pertence a um sistema de abastecimento rural na cidade de Campo Formoso, Estado da Bahia, projetado pela Codevasf 6ª SR, vinculada à ART BA20210656087, o qual a partir do distrito de Tuiutiba, aduzirá água tratada, fornecida pela EMBASA (Empresa Baiana de Águas e Saneamento) para cinco localidades (distritos) daquele município: Baixio, Puxadeira, Cercadinho, Mandacaru e Vanvana.

O sistema possui: 2 Adutoras pressurizadas (Adutoras 01 e 03); 1 adutora por gravidade (Adutora 02, objeto do estudo); 5 reservatórios elevados e sistemas de distribuição; 3 Caixas de quebra-pressão; 1 Reservatório hidropneumático (RHO) para a adutora 03; Válvulas, hidrômetros e ventosas.

As vazões calculadas para o abastecimento dos cinco reservatórios estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1. Vazões calculadas ($L.s^{-1}$) para os reservatórios elevados 1,2,3,4 e 5

Reservatório	Q ($L.s^{-1}$)
Reservatório Elevado 01	0,34
Reservatório Elevado 02	3,14
Reservatório Elevado 03	6,14
Reservatório Elevado 04	4,29
Reservatório Elevado 05	4,13

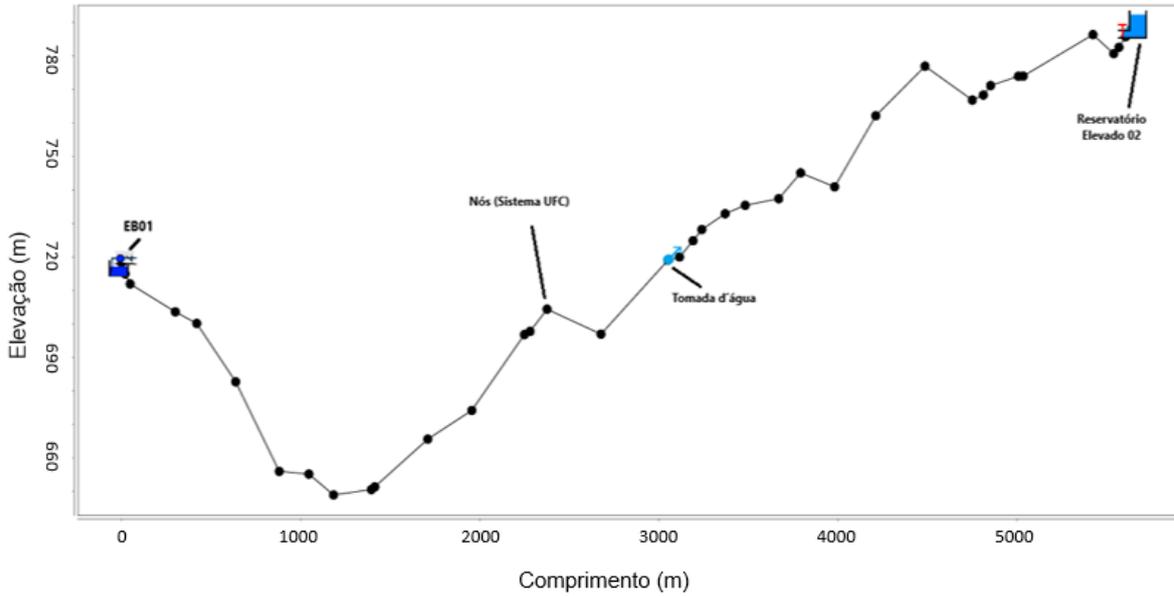
Fonte: elaborado pelos autores

A somatória das vazões dos reservatórios 03 a 05 é igual a $14,56 L.s^{-1}$, que é exatamente aquela desejada na adutora 02, trecho por gravidade.

As figuras 1, 2 e 3 demonstram os trechos das adutoras 01, 02 e “03 A”,

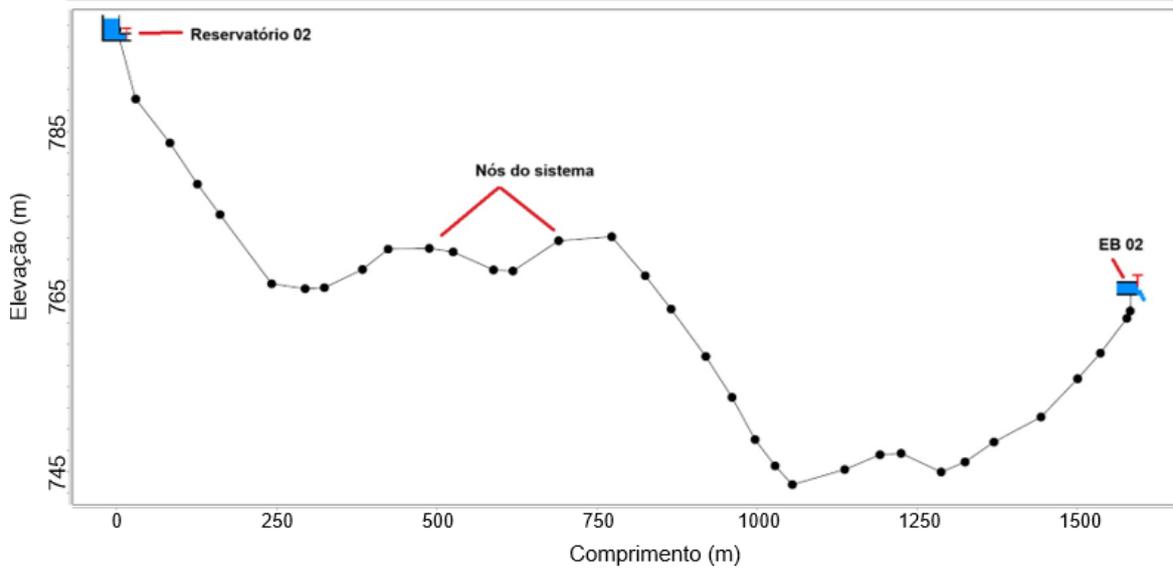
apontando as estações de bombeamento (EBP's ou elevatórias), entradas de ramais, reservatórios elevados e dispositivo antigolpe exigido na adutora 03, um Reservatório Hidropneumático (RHO).

Figura 1. Trecho EB 01 – reservatório elevado 02.



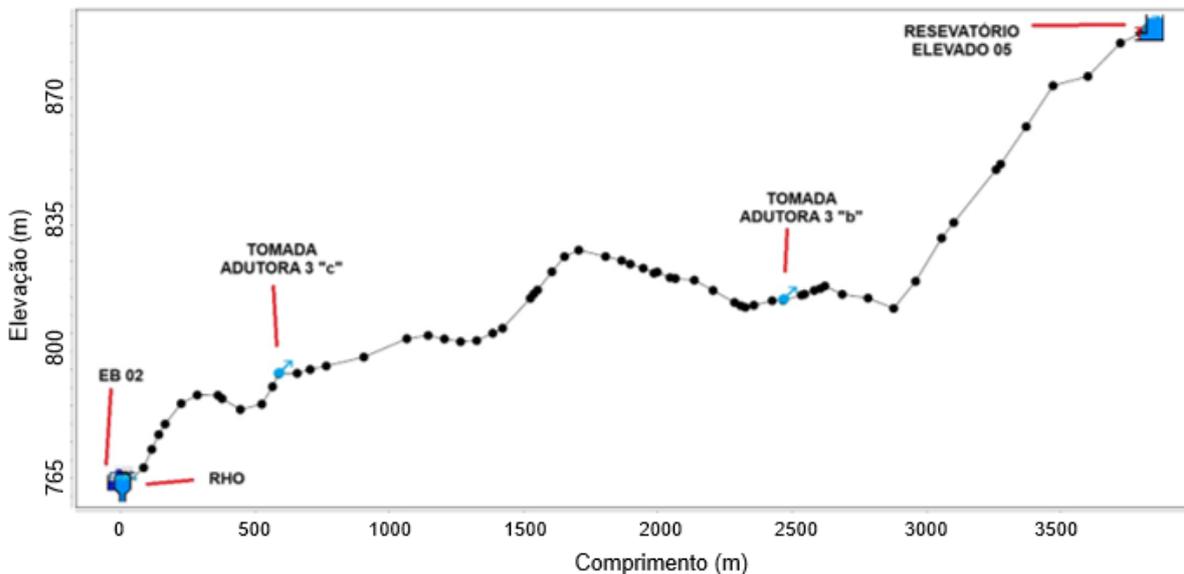
Fonte: elaborado pelos autores – Sistema UFC.

Figura 2. Trecho reservatório elevado 02 – eb 02 (estudo de caso – gravidade).



Fonte: elaborado pelos autores – Sistema UFC.

Figura 3. Trecho – Estação Elevatória 02 – Reservatório Elevado 05 – com reservatório hidropneumático (RHO) e ramais (“3b” e “3c”).



Fonte: elaborado pelos autores – Sistema UFC.

A vazão total do sistema de abastecimento é de $17,50 \text{ L.s}^{-1}$, sendo que pelo trecho em questão, por gravidade, deseja-se a vazão de $14,56 \text{ L.s}^{-1}$, que atenderá as comunidades de jusante, abastecidas pelos reservatórios 3, 4 e 5, sendo esta portanto a vazão ali desejada. A obtenção de tal fluxo, mantidas as condições de contorno do sistema, ocorre apenas se implantado um dispositivo de controle, mas especificamente uma válvula limitadora de vazão pois, caso este não exista, a vazão máxima seria de $20,33 \text{ L.s}^{-1}$.

As simulações foram realizadas utilizando no Sistema UFC, software que realiza simulações do Golpe de Aríete em adutoras possibilitando o dimensionamento eficiente de componentes hidráulicos para atenuar os riscos dos transientes (LAHC, 2023).

4.2 Caracterização do sistema estudado

O sistema trata-se de uma adutora por gravidade com as seguintes características: Comprimento Total (L) = 1.584 m; Desnível Geométrico Total Res Elev. 02 – EB 02 (Δ_{GEO}) = 30.27 m; Rede – Trecho 01 - Tubo 01 - PVC IRRIGA LF PBS

150 mm PN 40 – 772.60 m; Trecho 02 - Tubo 02 - PVC IRRIGA LF PBS 125 mm PN 40 – 92.71 m; Trecho 03 - Tubo 03 - PVC IRRIGA LF PBS 125 mm PN 60 – 634.82m; Trecho 04 - Tubo 04 - PVC IRRIGA LF PBS 125 mm PN 40 – 84.31 m; Vazão desejada (Q_1) = $14,56 \text{ L.s}^{-1}$;

A adutora por gravidade inicia em um reservatório elevado com fuste de 10 m de altura, descarregando em um reservatório, a 3 m de altura de sua base (cota de entrada). Importante ressaltar que o limite estabelecido para o tempo simulado de fechamento, no UFC, foi aquele no qual a resistência da tubulação foi suficiente, em todos os pontos da adutora, para suportar a sobrepressão incidente.

4.3 Casos analisados

Foram analisados dois casos distintos para a mesma adutora, os quais, conforme descrito, tiveram como variável o tempo de fechamento da válvula a jusante, comparando-se o período da tubulação e o tempo mínimo que evita os danos causados pelos transientes.

Assim, a modelagem teve três casos (vazões), cada um com duas variáveis

(tempo de fechamento segundo o período da tubulação – 11,27 s - e em função do tempo mínimo ideal de fechamento), resultando em seis análises no total.

Em todas as opções, foram simulados os efeitos transitórios considerando o fechamento no período da tubulação e um tempo de fechamento maior da adutora, até que se estabelecesse aquele que não traria nenhum dano ao sistema. Em todas as simulações foi empregado o software UFC.

Há algumas premissas importantes empregadas neste estudo, de forma que fosse possível se comparar dados advindos de conceitos semelhantes.

Dentre estas, destacam-se: O período da tubulação do trecho objeto da análise foi calculado em 11,27 segundos, empregando-se a Equação 2. A vazão total sem controle é aquela representada pelo Teorema de Bernoulli, no qual o fluxo máximo é aquele que dissipa toda a energia potencial representada pelo Plano de Carga Efetivo (PCE) na rede estabelecida, calculada em 20,33 L.s⁻¹. A vazão após a instalação da válvula “Função 49” – “F 49” - (BERMAD), plástica, de 100 mm, foi calculada em 20,16 L.s⁻¹, e foi resultante da perda de carga imposta por esta ao sistema. A perda de carga gerada modificou a condição de contorno do sistema, alterando, portanto, a sua vazão. Na terceira alternativa, considerou-se a aplicação de mais uma válvula em série, de igual modelo e diâmetro, porém com a função limitadora de vazão (FR), a qual impôs a vazão de 14,56 L.s⁻¹.

As válvulas necessitam, geralmente, de uma pressão mínima de 10 mca para que possam exercer qualquer função determinada (VIEIRA, 2019).

As combinações analisadas podem ser assim discriminadas:

a) Caso 1a - Vazão total do sistema - 20,33 L.s⁻¹ – sem nenhum dispositivo de

controle com fechamento no período da tubulação (11,27 s);

- b) Caso 1b - Vazão total do sistema - 20,33 L.s⁻¹ - (com válvula “F 49”) com fechamento no tempo mínimo antigolpe simulado no UFC, de 75 s;
- c) Caso 2a - Vazão máxima com válvula “F 49” - 20,16 L.s⁻¹ - e tempo fechamento no período da tubulação (11,27 s);
- d) Caso 2b - Vazão máxima com válvula “F 49” - 20,16 L.s⁻¹ - com fechamento no tempo mínimo antigolpe simulado no UFC, de 76 s.
- e) Caso 3a - Vazão desejada com válvula FR - 14,56 L.s⁻¹ - e tempo fechamento no período da tubulação (11,27 s);
- f) Caso 3b - Vazão máxima com válvula “F 49” e válvula FR - 14,56 L.s⁻¹ - com fechamento no tempo mínimo antigolpe simulado no UFC, de 107 s.
- g) Caso 3c - Vazão máxima com válvula FR - 14,56 L.s⁻¹ - com fechamento mecânico no tempo de 76 s.

4.4 Determinação dos parâmetros físicos

4.4.1 Celeridade ou velocidade acústica

Celeridade é a velocidade de propagação das ondas de sobre e subpressões em redes pressurizadas (AZEVEDO NETO; FERNÁNDEZ, 2015), cuja equação é demonstrada a seguir (STREETER; WYLIE, 1978, CHAUDHRY, 1987):

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \left(1 + \frac{K D}{E e}\right)}} \quad (1)$$

Em que “a” é a celeridade (m s⁻¹), K é o módulo de elasticidade volumétrica do fluido (no caso específico, água) (GPa), ρ é a massa específica do líquido (kg m⁻³), “E” é o módulo de elasticidade (ou módulo de Young) da tubulação (GPa); D é o diâmetro

interno da tubulação (m) e “e” é a espessura de parede da tubulação (m).

4.4.2 Período da tubulação

Período (dado em segundos) é o tempo que leva a onda de pressão de percorrer todo o trecho de tubulação a partir do ponto de bloqueio (válvula, registro), e é regido pela equação:

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

Sendo:

ζ = Período (s)

a = Celeridade ou velocidade da onda de pressão ($m.s^{-1}$);

L = Comprimento da tubulação (m).

O período da tubulação, para todos os casos é de $11,27 L.s^{-1}$ pois, sendo esta função da celeridade e do comprimento da rede, a vazão e a velocidade do fluxo não interferem em seu resultado.

Portanto, mantidos os diâmetros, material e as classes de pressão dos tubos, o aumento da vazão, que implica em aumento da velocidade do fluido, não interfere em nada no cálculo do período da tubulação.

4.4.3 Equações para determinação dos transientes hidráulicos

O cálculo dos transientes hidráulicos tem como equações iniciais a de quantidade de movimento (Equação 3) e da continuidade ou conservação das massas (Equação 4) (CARVALHO, 2011), e são muito complexas para uma solução algébrica.

- Equação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial H_m}{\partial x} + \frac{Q}{AT^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{AT} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2gDAT^2} = 0 \quad (3)$$

O termo em módulo significa que o fluxo pode se dar em ambo os sentidos.

- Equação da continuidade ou conservação da massa:

$$\frac{\partial H_m}{\partial t} + \frac{Q}{AT} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{a^2}{gAT} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

Em que: H_m é a altura manométrica (mca), ∂t é o intervalo de tempo elementar (s), ∂x é a distância elementar entre duas seções da tubulação (m), Q é a vazão ($m^3 s^{-1}$), g é a aceleração da gravidade ($m s^{-2}$), A_T é a área da tubulação (m^2), f é o coeficiente de atrito, adimensional (Darcy-Weisbach) e a é a celeridade ($m s^{-1}$).

4.4.4 Cálculo da perda de carga na válvula

Para o mero cálculo de perda de carga na válvula eleita, com circuito de 3 vias, para determinada vazão, considerando apenas a passagem do fluido no corpo da válvula, deve-se aplicar a equação 3:

$$H_f = kQ^2 \rightarrow k = \frac{H_f}{Q^2} \quad (5)$$

Sendo:

Q = vazão ($m^3 h^{-1}$);

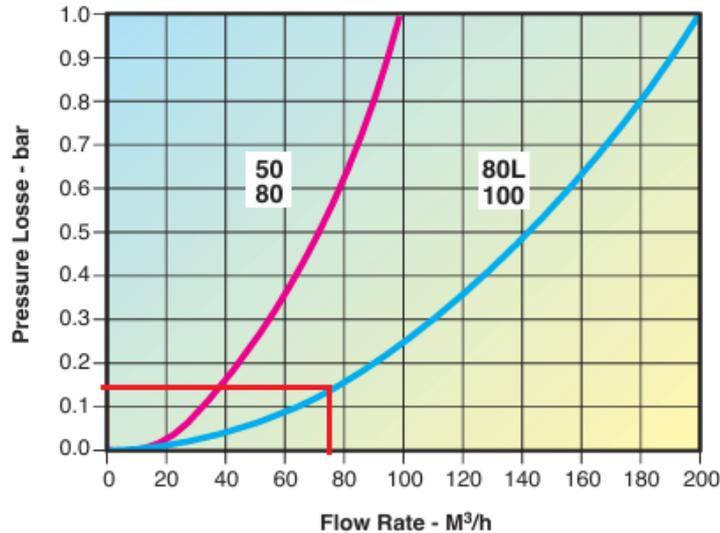
H_f = Perda de carga (mca).

O “k” da válvula é função de seu diâmetro e material, e foi empregada uma válvula de 100 mm, plástica, modelo “4 100”, tipo “Y” BERMAD, “hyflow”. A partir dos pontos de perda de carga e vazão, presentes no catálogo técnico, obtém-se o “k” da válvula para o cálculo da perda de carga localizada (Vieira, 2019). O valor de “k” para a válvula eleita foi obtido através do catálogo técnico específico, no qual se obteve o **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, aplicando-se a vazão máxima sem controle, de $20,33 L.s^{-1}$, que equivale a $73,18 m^3 h^{-1}$. Neste, para esta vazão, tem-se uma perda de carga de 0,14 bar, valor este que equivale a $0,14 \times 10,20 = 1,428 \approx 1,43$ mca, considerando um circuito de 3 vias (3W). Esta relação se traduz através das

linhas vermelhas horizontal e vertical demonstradas no **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 4.

Figura 4. Perda de carga válvula BERMAD 4" 100 "Y"- Hyflow

**100 Series DN, 50-80 ; 80L-100
Flow Charts (Metric)**



Fonte: Bermad (2020)

Adotando-se a vazão máxima sem controle, de $Q = 73,18 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (ou $20,33 \text{ L.s}^{-1}$):

$$k = \frac{H_f}{Q^2} = \frac{10,2 \times 0,43}{73,18^2} = 0,000267 \quad (6)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Controle de vazão – Aplicação de Válvula controladora de vazão (FR)

Na elaboração do projeto original, apenas foi aplicada uma válvula limitadora de vazão (FR) plástica de 3", com piloto de três vias (BERMAD, 2017), controlando o fluxo. Tal medida mostrou-se equivocada, pois esta válvula controla a vazão do sistema, mas não os efeitos transitórios nocivos ao mesmo e, trata-se de um sistema de abastecimento por gravidade, ou seja, a imposição de qualquer dispositivo irá alterar a vazão do sistema, baseado no Teorema da

Conservação de Energia Mecânica (Equação de Bernoulli).

A despeito da vazão de projeto ser $14,56 \text{ L.s}^{-1}$, o fato da rede ser por gravidade, a vazão incidente será aquela que dissipará toda a energia do sistema, resultante da interação entre a natureza das tubulações empregadas, topografia e dispositivos de controle aplicados, incluindo-se as válvulas hidráulicas.

A aplicação de tal função é válida para sistemas ramificados, abastecidos por um mesmo reservatório ou elevatória comum, porém em tese não se justificaria quando se conectam 02 pontos apenas, no caso específico, o reservatório elevado 02 e o reservatório apoiado EB02, pois a vazão é constante, sem variação de consumo ao longo da rede, pois seria mais importante o controle dos efeitos transitórios do que a limitação das vazões. No entanto, os parâmetros vazão (Q) e carga (H) são determinantes para a magnitude dos transientes hidráulicos (equações 3 e 4).

Assim, as vazões analisadas nos casos 1 e 2 foram aquelas calculadas via EPANET, com e sem dispositivos de controle dos transientes, já que a vazão se ajustou às perdas de carga existentes na rede, enquanto a do caso 3 ($14,56 \text{ L s}^{-1}$) foi incluída diretamente no Sistema UFC para a análise do golpe de aríete.

Nos casos “1b”, “2b” e “3b” empregaram-se válvulas de fechamento controlado, ou “Função 49” (BERMAD), voltada para proteção contra os transientes, que permite o seu fechamento gradual quando enchimento do reservatório de jusante, tempo este determinado pelo próprio sistema de forma segura e automática, enquanto para os casos “3a”, “3b” e “3c” adicionou-se uma válvula limitadora de vazão (FR).

Antes de se proceder com análise dos efeitos transitórios para a vazão máxima do

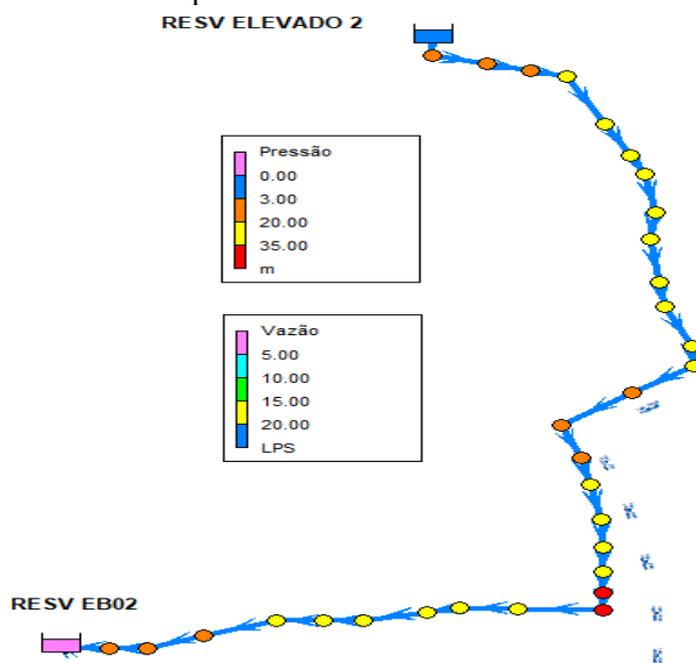
sistema, empregou-se o software EPANET, exceto para o caso 3. O tempo de fechamento mínimo foi estabelecido após simulações no Sistema UFC.

5.2 Caso 1 - Vazão Máxima do Sistema sem controle

A vazão apontada foi de $20,33 \text{ L s}^{-1}$ e se trata apenas do regime permanente, e este valor representa a vazão que dissipa toda a energia do sistema, ou seja, é a aquela máxima se não imposto qualquer tipo de controle, seja através de orifícios, registros ou válvulas.

A Figura 5 resume o traçado e a vazão da adutora, e as setas representam o sentido do fluxo, considerando que não há nenhum dispositivo de controle de vazão ou pressão (EPANET).

Figura 5. Linha adutora, vazão e sentido do fluxo, considerando que não há nenhum dispositivo de controle de vazão ou pressão



Fonte: elaborado pelos autores EPANET

Neste 1ª caso é pertinente ao regime permanente, sem qualquer dispositivo de controle, resultou em uma pressão de apenas 5,52 mca sobre a válvula de controle do

reservatório de jusante, conforme expressa o **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, ou seja, toda a energia

dissipada pelo sistema resultou na supracitada vazão.

Esta rede, se operada sem nenhuma espécie de controle e sujeita ao fechamento, mesmo que obedecendo ao período calculado (11,27 segundos), resultaria nos efeitos transitórios a seguir descritos.

5.2.1 Caso 01a – 20,33 L s⁻¹ - Aplicando o período da tubulação (11,27 s)

Pode ser observado na Figura 6 que:

- Considerando apenas o Regime Permanente, a tubulação (linha vermelha) suportará tranquilamente as pressões constantes na linha piezométrica (linha verde);
- No entanto, com o fechamento em 11,27 segundos, quase toda a tubulação sofrerá uma ruptura por sobrepressão (linha azul escura), porém sendo a pressão incidente < 10 mca, não é possível aplicar uma válvula hidráulica;
- A sobrepressão máxima atingida foi de 93,57 mca;

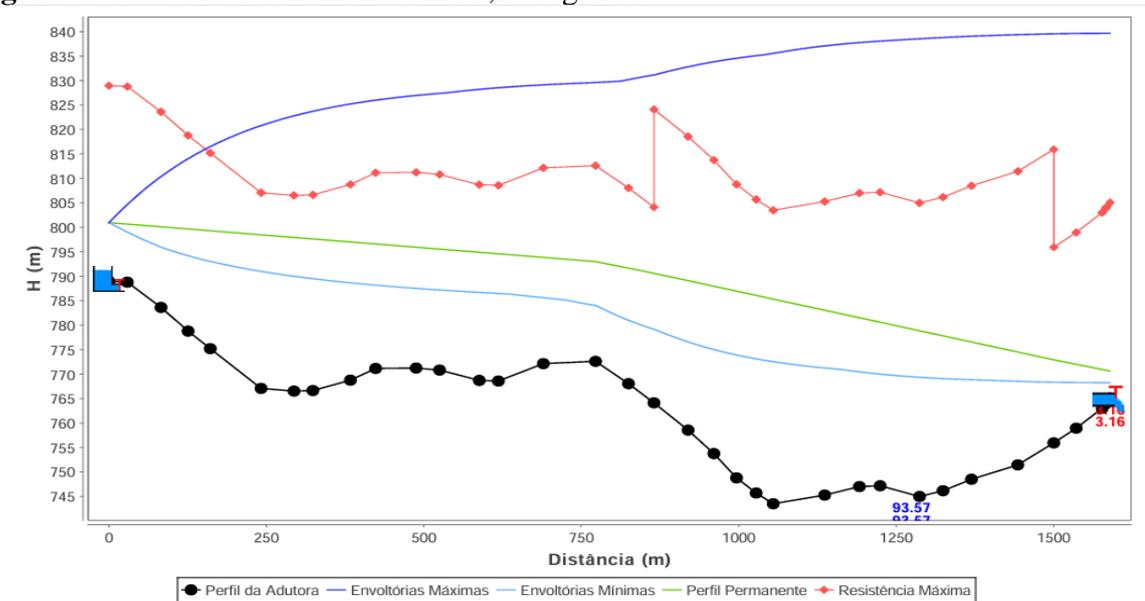
5.2.2 Caso 01b – 20,33 L s⁻¹ – Aplicando o tempo de fechamento de 75 s

Pode ser observado na Figura 7 que:

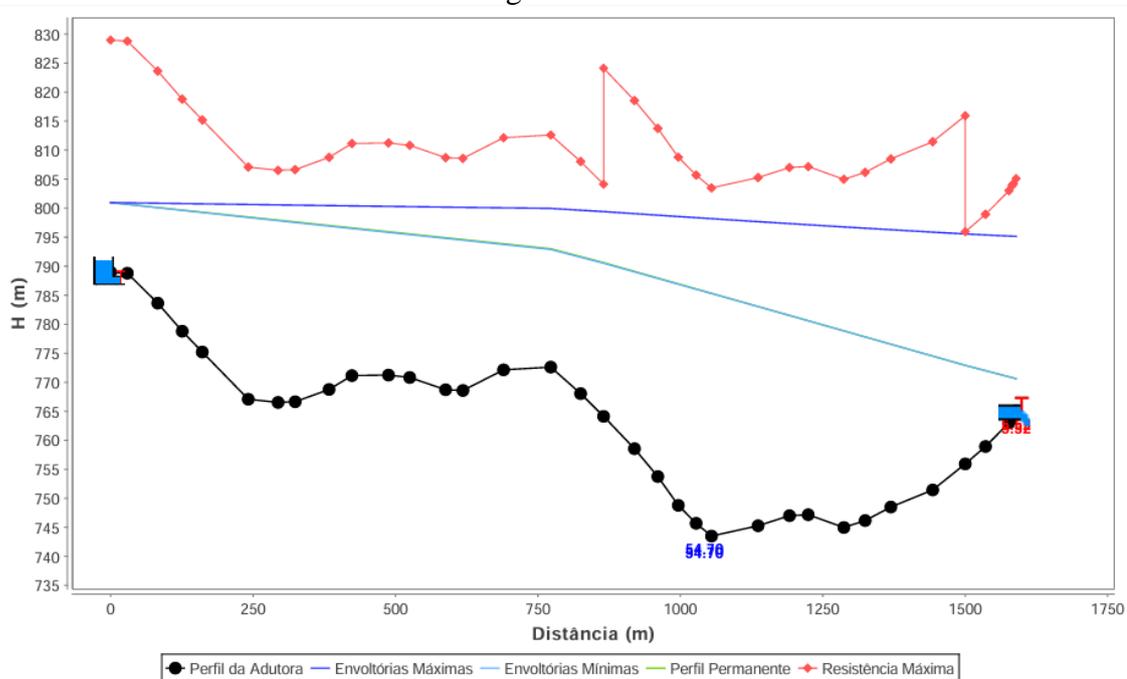
- Considerando apenas o Regime Permanente, a tubulação (linha vermelha) suportará tranquilamente as pressões constantes na linha piezométrica (linha verde);
- Com o fechamento em 75 segundos, a tubulação não sofrerá ruptura devido a sobrepressão (linha azul escura), porém sendo a pressão incidente < 10 mca, não é possível aplicar uma válvula hidráulica;
- Também neste caso não haverá problema algum de subpressão (linha azul clara) a ser resolvido.

A sobrepressão máxima atingida foi de 54,70 mca.

Figura 6. Caso 01a -Fechamento em 11,27 segundos



Fonte: elaborado pelos autores – Sistema UFC

Figura 7. Caso 01b -Fechamento em 75 segundos

Fonte: elaborado pelos autores – Sistema UFC

Para a adução da máxima vazão, evitando-se os efeitos do golpe de aríete, seria necessário um período de fechamento do reservatório de 75 segundos, o que dificilmente ocorre na prática, se for operação manual.

Mesmo se empregada uma boia de alta vazão, para evitar o transbordamento do reservatório de jusante, esta dificilmente poderia ser programada para um fechamento definitivo no tempo requerido, porque tais elementos não possuem regulagem de nenhum tipo.

Caso se interrompa o fluxo obedecendo ao período, a rede estará sujeita a graves efeitos transitórios e constantes rompimentos.

5.3. Caso 02 - Vazão Máxima do Sistema com controle de transientes (“Função 49”)

Por se tratar de opção com controle, deve-se prever válvula com a capacidade de fechamento controlada, de forma a se evitarem os efeitos transitórios nocivos.

Simulou-se então, no EPANET, a vazão máxima incluída uma válvula plástica, com a “Função 49”, cuja aplicação resultou, após a dissipação total da energia do sistema, em uma vazão de $20,16 \text{ L s}^{-1}$.

Conclui-se, pois, que a colocação do dispositivo e a perda de carga gerada (1.43 mca) reduziram a vazão de $20,33 \text{ L s}^{-1}$ para $20,16 \text{ L s}^{-1}$, ou seja, a redução foi irrisória, ressaltando que se trata de efeito sobre o regime permanente.

Um dos critérios para a eleição de válvulas hidráulicas, além da pressão incidente mínima (10 mca), é a velocidade permitida no seu corpo, podendo ser de até $3,5 \text{ m s}^{-1}$ nas metálicas e até $5,5 \text{ m s}^{-1}$ para as plásticas (Vieira, 2019), sendo que no estudo esta foi de $2,57 \text{ m s}^{-1}$, dentro da faixa permitida.

Este modelo possui um volume de câmara (CCDV – Control Chamber Displacement Value) de 0,62 L, o que interfere no enchimento e esvaziamento da câmara de controle, em função do “Kv” do piloto empregado.

A Figura e a Figura apresentam os efeitos transitórios quando o fechamento da válvula ocorre no mesmo tempo calculado do período da tubulação (11,27 s) e no tempo mínimo para arrefecer os transientes hidráulicos (76 s), respectivamente.

5.3.1 Caso 02a – $20,16 \text{ L s}^{-1}$ - Aplicando o período da tubulação (11,27 s)

Pode ser observado na Figura 8 que:

- Considerando apenas o Regime Permanente, a tubulação (linha vermelha) suportará tranquilamente as pressões constantes na linha piezométrica (linha verde);

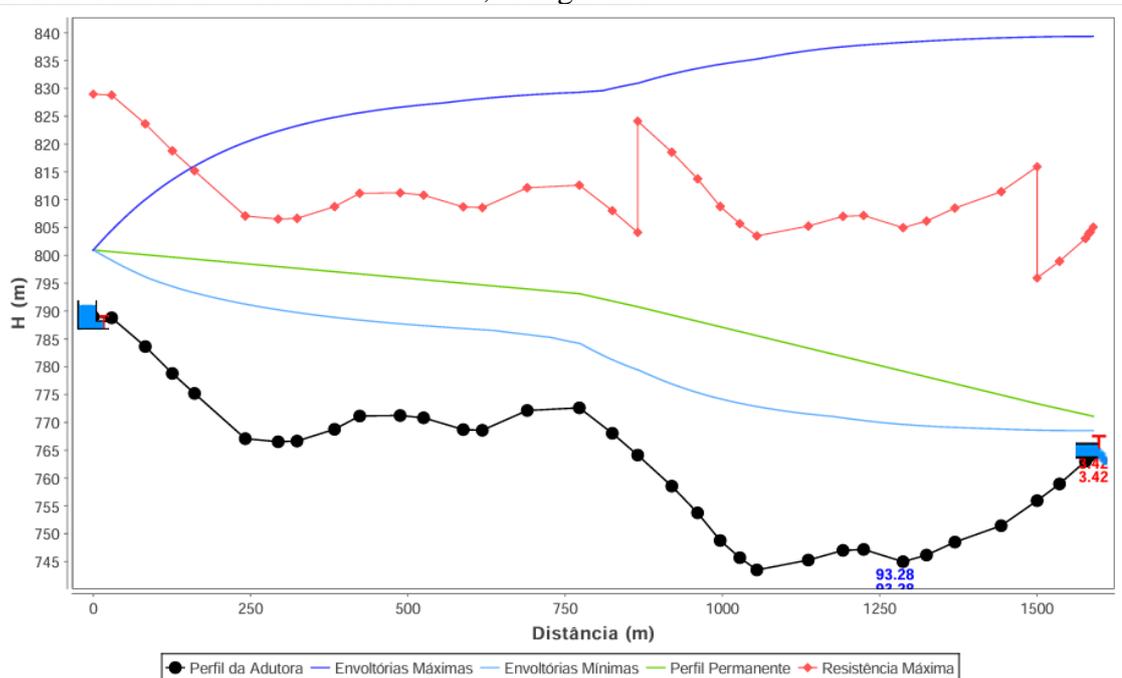
- No entanto, com o fechamento em 11,27 segundos, quase toda a tubulação sofrerá uma ruptura por sobrepressão (linha azul escura);
- A sobrepressão máxima atingida foi de 93,28 mca.

5.3.2 Caso 02b – $20,16 \text{ L s}^{-1}$ Aplicando o tempo de fechamento de 76 s

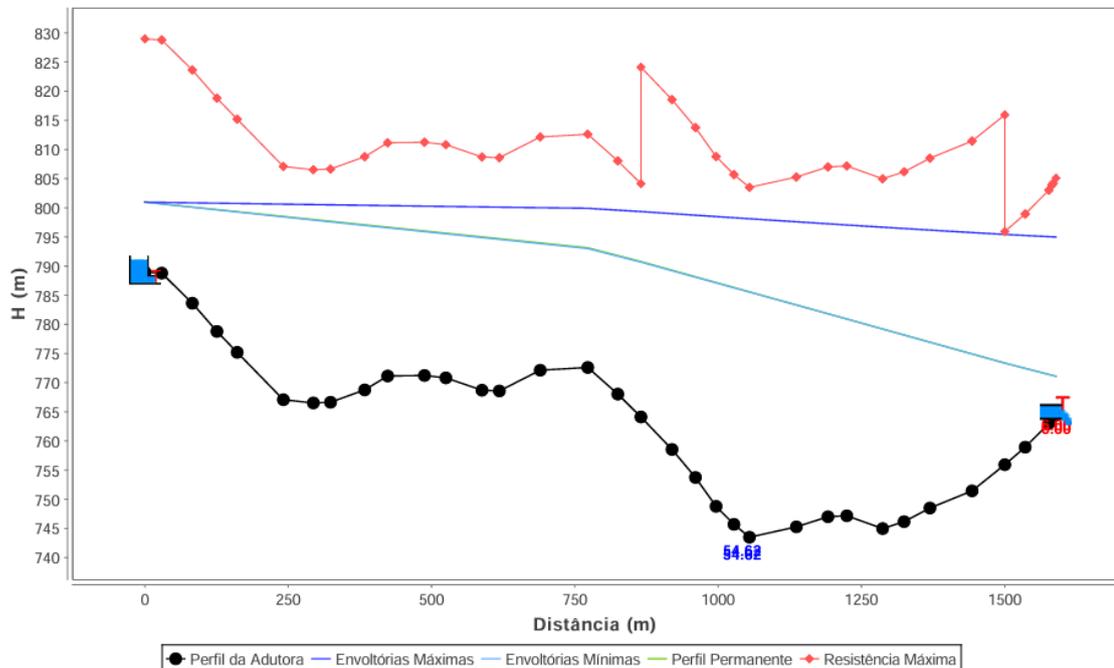
Pode ser observado na Figura 9 que:

- Considerando apenas o Regime Permanente, a tubulação (linha vermelha) suportará tranquilamente as pressões constantes na linha piezométrica (linha verde);
- Com o fechamento em 76 segundos, a tubulação não sofrerá ruptura devido a sobrepressão (linha azul escura)
- Também neste caso não haverá problema algum de subpressão (linha azul clara) a ser resolvido.
- A sobrepressão máxima atingida foi de 54,62 mca.

Figura 8. Caso 02a – Fechamento em 11,27 segundos



Fonte: elaborado pelos autores – Sistema UFC

Figura 9. Caso 02b – Fechamento em 76 segundos

Fonte: elaborado pelos autores – Sistema UFC

5.4. Caso 03 - Vazão do sistema com controle de vazão (válvula FR)

Nesta opção empregou-se uma válvula limitadora de vazão, no caso 3a, e depois incluiu-se a válvula “F49”, e tais opções foram simuladas apenas no Sistema UFC, que permite a determinação das vazões em redes por gravidade.

5.4.1 Caso 03a – $14,56 \text{ L s}^{-1}$ - Aplicando o período da tubulação (11,27 s)

Pode ser observado na Figura 10 que:

- Considerando apenas o Regime Permanente, a tubulação (linha vermelha) suportará tranquilamente as pressões constantes na linha piezométrica (linha verde);
- No entanto, com o fechamento em 11,27 segundos, quase toda a tubulação

sofrerá uma ruptura por sobrepressão (linha azul escura);

- A sobrepressão máxima atingida foi de 83,38 mca.

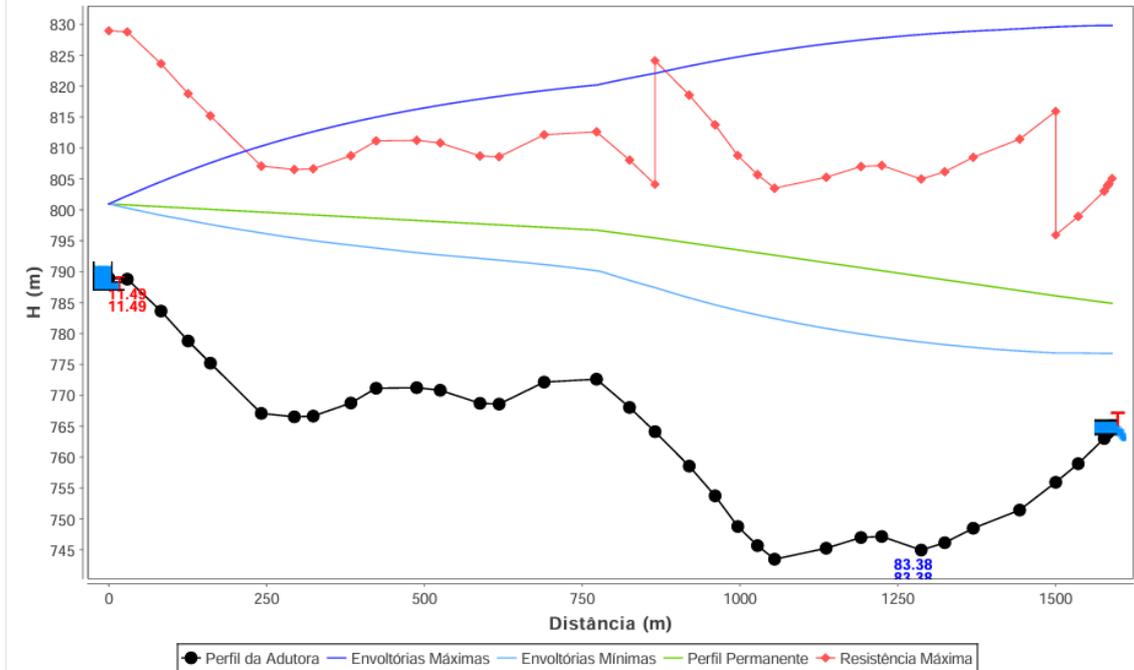
5.4.2 Caso 03b – $14,56 \text{ L s}^{-1}$ - Aplicando o tempo de fechamento de 107 s

Pode ser observado na Figura 11 que:

- Considerando apenas o Regime Permanente, a tubulação (linha vermelha) suportará tranquilamente as pressões constantes na linha piezométrica (linha verde);
- Com o fechamento em 76 segundos, a tubulação não sofrerá ruptura devido a sobrepressão (linha azul escura)
- Também neste caso não haverá problema algum de subpressão (linha azul clara) a ser resolvido.

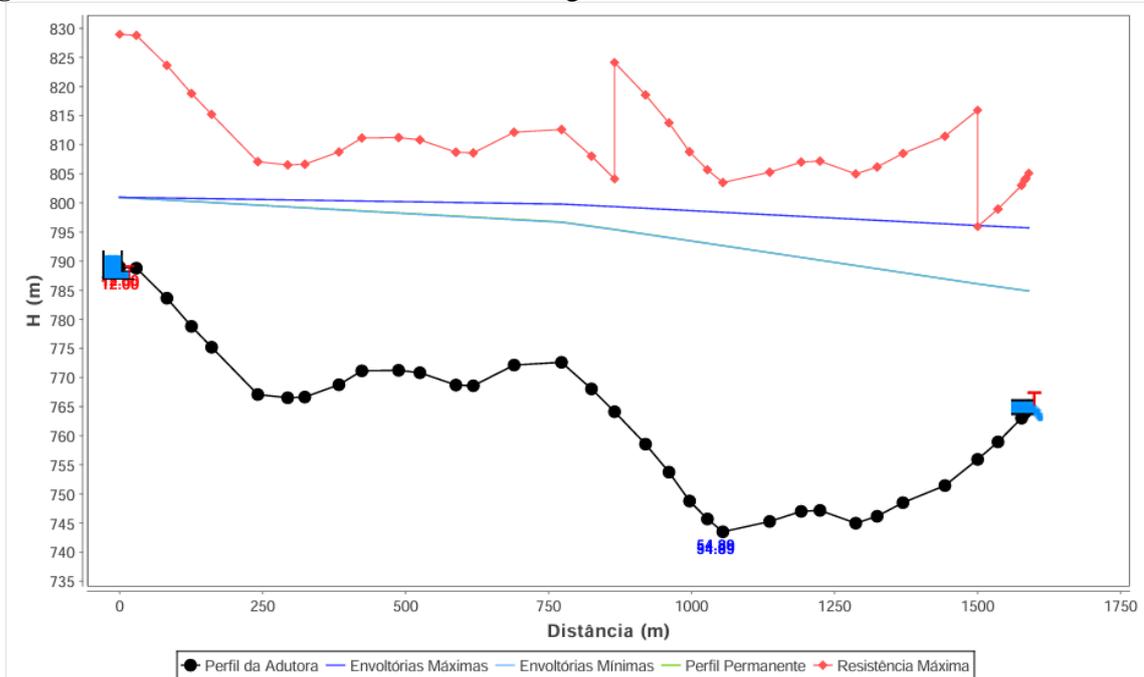
- d) A sobrepressão máxima atingida foi de 54,89 mca.

Figura 10. Caso 03a – Fechamento em 11,27 segundos



Fonte: elaborado pelos autores – Sistema UFC

Figura 11. Caso 03b – Fechamento em 107 segundos



Fonte: elaborado pelos autores – Sistema UFC

A Tabela 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** retrata um comparativo entre as 03 alternativas estudadas, no que tange as vazões, o tempo de fechamento, a pressão e sobrepressão máximas na válvula de controle (final da adutora) e custos com tubulação apenas e totais de cada alternativa. Foi simulada uma

7ª opção denominada de “3c” na qual empregou-se a menor vazão (14,56 L s⁻¹), porém com o tempo de fechamento, de forma mecânica, de 76 segundos, equivalente aos casos 1b e 2b. Nesta, não foi prevista válvula Função 49, apenas a limitadora de vazão.

Tabela 2. Dados dos casos analisados

Caso	Tf (s)	Vazão (L s ⁻¹)	PPvc (mca)	Smax (mca)	Ctub (R\$)	CT (R\$)
1a	11,27	20,33	5,52	93,57	63.936,10	63.936,10
1b	75,00	20,33	5,52	54,70	48.164,76	52.764,76
2a	11,27	20,16	6,01	93,26	65.571,68	65.571,68
2b	76,00	20,16	6,01	54,62	48.164,76	52.764,76
3a	11,27	14,56	19,78	83,38	62.643,98	67.243,98
3b	107,00	14,56	19,78	54,89	48.652,26	57.852,26
3c	76,00	14,56	19,78	58,65	48.944,76	53.544,76

Tf= tempo de fechamento; PPvc = Pressão permanente na válvula de controle; Smax= Sobrepressão máxima; Ctub = Custo de tubulação; CT= Custo total.

Fonte: elaborado pelos autores – Retirado do Sistema UFC.

Os resultados demonstram que é importante se relacionar o custo final das alternativas com a magnitude do golpe de aríete, pois fica evidenciado, ao se comparar os casos 1 e 2 com o caso 3, no qual em todas as opções houve o controle de vazão. Remetendo-se ao Teorema de Bernoulli, uma vazão menor foi fixada na mesma tubulação que as outras, implicando em uma maior pressão final, na zona da válvula de controle (19,78 mca).

Aludindo-se às equações 3 e 4, verifica-se que a vazão (Q) e carga (H) afetam diretamente no valor dos transientes hidráulicos, e neste caso, a carga (H) foi preponderante sobre a vazão (Q), que no caso era de menor valor. Sendo assim, não se pode definir qual dos dois parâmetros possuem maior influência sobre o fenômeno, exigindo a devida simulação.

Todas as alternativas nas quais empregou-se o tempo de fechamento de 11,23 segundos se mostraram mais onerosas no item “tubulação”, devido a necessidade

de aplicar materiais com maior classe de pressão, ou resistência ao rompimento, já que as sobrepressões máximas foram as de maior magnitude em todas elas.

O emprego das válvulas Função 49 (alternativas 1b, 2b e 3b) implicaram em sobrepressões menores e, por conseguinte, na necessidade de tubulações mais econômicas. Assumindo-se uma operação mecânica na opção 3c, de modo a simular os efeitos transitórios com um tempo de fechamento equivalente das opções 1b e 2b, a diferença entre elas foi de pequena monta. No entanto, considerando os custos totais, esta obteve a 3ª colocação entre as mais baratas, no entanto, em termos práticos, é bastante improvável que se consiga o fechamento neste tempo preciso.

Em todas as alternativas, a obediência ao período da tubulação (11,27 segundos) sempre se mostrou a mais onerosa, devido a necessidade de aplicação de tubos com maior classe de pressão.

Os Casos 1b e 2b, com vazões de 22,30 L.s⁻¹ e 22,16 L.s⁻¹ para o tempo de fechamento de 75 e 76 segundos, respectivamente, seriam os mais baratos em função das maiores vazões considerando a mesma estrutura implantada.

Tendo em vista que a rede não foi alterada em nenhuma das alternativas no que

concerne ao diâmetro, o diferencial estabelecido foi o tempo de fechamento e as sobrepressões incidentes, implicando em ajustes na classe de pressão das tubulações.

As Tabelas de 3 a 5 detalham os custos dos casos estudados.

Tabela 3. Custos comparativos - casos 1a e 1b

Item	preço unitário	Alternativa			
		caso 01a		caso 01b	
		qtd.	p. total	qtd.	p. total
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 40*	185,00	23	4255,00	134	24790,00
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 60*	252,00	112	28224,00	0	0,00
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 80*	303,43	0	0	0	0,00
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 125*	329,17	0	0,00	0	0,00
Tubo PVC ILF PBL 125 mm PN 40*	130,28	0	0,00	42	5471,76
Tubo PVC ILF PBL 125 mm PN 60*	179,03	0	0,00	100	17903,00
Tubo PVC ILF PBL 125 mm PN 125*	223,10	141	31457,10	0	0,00
subtotal tubulações			63936,10		48164,76
Válvula plástica 4" 100 Y "Função 49" 03 VIAS MOD 50-40-69**	4,600.00	0	0,00	1	4600,00
Válvula plástica 4" 100 Y "FR" 03 VIAS**	4,600.00	0	0,00	0,00	0.00
Total			63936,10		52764,76

*unidade: tubo de 6 m; **unidade: peça.

Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 4. Custos comparativos - casos 2a e 2b

Item	preço unitário	Alternativa			
		caso 02a		caso 02b	
		qtd.	p. total	qtd.	p. total
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 40*	185,00	22	4070,00	134	24790,00
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 60*	252,00	112	28224,00	0	0,00
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 80*	303,43	6	1820,58	0	0,00
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 125*	329,17	0	0,00	0	0,00
Tubo PVC ILF PBL 125 mm PN 40*	130,28	0	0,00	42	5471,76
Tubo PVC ILF PBL 125 mm PN 60*	179,03	0	0,00	100	17903,00
Tubo PVC ILF PBL 125 mm PN 125*	223,10	141	31457,10	0	0,00
subtotal tubulações			65571,68		48164,76

Válvula plástica 4" 100 Y "Função 49" 03 VIAS MOD 50-40-69**	4,600.00	0,00	0,00	1	4600,00
Válvula plastica 4" 100 Y "FR" 03 VIAS**	4,600.00	0,00	0,00	0,00	0.00
Total					65571,68
					52764,76

*unidade: tubo de 6 m; **unidade: peça.

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 5. Custos comparativos - casos 3a, 3b e 3c

Item	preço unitário	Alternativa					
		caso 03a		caso 03b		caso 03c	
		qtd.	p. total	qtd.	p. total	qtd.	p. total
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 40	185,00	28	5180,00	134	24790,00	134	24790,00
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 60	252,00	106	26712,00	0	0,00	0	0,00
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 80	303,43	0	0	0	0,00	0	0,00
Tubo PVC ILF PBL 150 mm PN 125	329,17	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Tubo PVC ILF PBL 125 mm PN 40	130,28	0	0,00	32	4168,96	26	3387,28
Tubo PVC ILF PBL 125 mm PN 60	179,03	16	2864,48	110	19693,30	116	20767,48
Tubo PVC ILF PBL 125 mm PN 125	223,10	125	27887,50	0	0,00	0	0,00
subtotal tubulações			62643,98		48652,26		48944,76
Válvula plástica 4" 100 Y "Função 49" 03 VIAS MOD 50-40-69	4.600,00	0	0,00	1	4600,00	0	0,00
Válvula plástica 4" 100 Y "FR" 03 VIAS	4.600,00	1	4600,00	1	4600,00	1	4600,00
Total			67243,98		57852,26		53544,76

*unidade: tubo de 6 m; **unidade: peça.

Fonte: elaborado pelos autores.

Os efeitos transitórios em redes por gravidades podem ser tão ou mais graves do que em sistemas pressurizados, a depender do caso e o emprego da válvula "Função 49" implicou em uma economia total entre 14 % e 20 % no total das inversões, comparando-se para cada caso as alternativas "a" e "b".

O caso 3c não foi considerado, pois a sua execução em campo é improvável.

6 CONCLUSÕES

O fato de uma adutora ser por gravidade não implica que os fenômenos

transitórios sejam desprezíveis, ao contrário, estas podem estar sujeitas ao rompimento total, e é errado se projetar sem se analisar os transientes hidráulicos através de sistemas computacionais, de igual modo que nas adutoras por recalque.

O dimensionamento das adutoras e a previsão e controle dos transientes hidráulicos pode levar à economia nos investimentos, além de segurança operacional.

O controle da vazão através de válvulas limitadoras de vazão não necessariamente implica em redução das envoltórias de pressão, podendo até gerar outras de maior valor.

O mero cálculo do período da tubulação (Equação 2) para se definir um tempo de fechamento de válvulas - conforme apresentado em boa parte da literatura sobre hidráulica - com vistas a se evitar os efeitos danosos dos transientes se mostrou uma estratégia equivocada, que não deve ser adotada indiscriminadamente. A única forma de definir este parâmetro se dá através de análise computacional com software apropriado.

Ao se analisar o fechamento no tempo pertinente ao período das alternativas (11,27 segundos), percebe-se que o plano de carga efetiva apresentado pelo Teorema de Bernoulli foi superado pela sobrepressão, o que denota a diferença dos regimes permanente e transitório.

A adoção da “Função 49” se mostrou bem mais do que um mero tecnicismo hidráulico de alto gabarito para controle do golpe de aríete, na rede por gravidade estudada pois se trata de uma questão de economia das inversões necessárias permitindo o aproveitamento máximo da rede para uma mesma estrutura implantada, já que o fechamento do reservatório obedecerá ao sistema hidráulico de forma natural e sem interferências, de modo autorregulável.

7 REFERÊNCIAS

AZEVEDO NETO, J. M.; FERNANDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Edigar Blucher, 2015.

BERMAD. **Integrated Irrigation Management Solutions**. Fresno: Bermad, 2020 Disponível em: https://www.bermad.com/app/uploads/IR_Product-Guide_English_1-2020.pdf. Acesso em: 26 out. 2022.

BERMAD. **Válvula limitadora de vazão**. Modelo: VA-160. [S. l.]: Bermad, 2017. (Linha Valloy 100). Disponível em: <https://www.bermad.com/app/uploads/sites/8/WW-VA-160.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2022.

CARVALHO, A. L. B. **Interação fluido-estrutura sob ação de transiente hidráulico**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.

CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transients**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987.

CHAUDHRY, M. **Applied hydraulic transients**. 3. ed. London: Springer New York Heidelberg Dordrecht, 2014. DOI: 10.1007/978-1-4614-8538-4. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-8538-4>. Acesso em: 15 jul. 2023.

GRAY, C. A. M. Analysis of the dissipation of energy in water hammer. **Proceedings of ASCE**, Amsterdam, v. 119, n. 274, p. 1176-1194, 1953.

KERAMAT, A.; TIJSSELING, A. S.; HOU, Q.; AHMADI, A. Fluid–structure interaction with pipe-wall viscoelasticity during water hammer. **Journal of Fluids and Structures**, Amsterdã, v. 28, p. 434-

455, 2012. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.11.001>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0889974611001770?via%3Dihub>.

Accessed on: 19 Nov. 2022.

b. Acesso em: 19 nov. 2022.

LAHC. Manuais do Sistema UFC.

Fortaleza: Universidade Federal do Ceará,

2023. Disponível em:

<http://www.lahc.ufc.br/manual/>. Acesso em: 14 jun. 2023.

LOPES, R. M.; MARQUES, M. G.; PRÁ, M. D.; PEREIRA, J. A. R. Análise de transientes hidráulicos e de chaminés de equilíbrio em sistemas de bombeamento de água por meio de otimização das vazões e dos volumes de reservação. **Revista DAE**, São Paulo, v. 70, n. 235, p. 90-103, 2022.

SCHIMIDT, M. J. A. **Simulação de transiente hidráulico e combinação econômica da adutora para abastecimento público do município de torrinha. 2016.** Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

SOARES, A. K.; COVAS, D. I. C.; RAMOS, H. M. Damping Analysis of Hydraulic Transients in Pumping Main Systems. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 139, n. 2, p. 233-243, 2013.

SOARES, A. K.; COVAS, D. I. C. Análises Hidráulicas e Experimentais de Transitórios

Hidráulicos em Estação Elevatória de Esgotos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., Brasília, DF, 2015. **Anais [...]**. Brasília, DF: ABRHidro, 2015. p. 1-8.

STARCZEWSKA, D.; COLLINS, R.; BOXALL, J. Transient behavior in complex distribution network: a case study. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 70, p. 1582-1591, 2014.

STREETER, V. L.; LAI, C. Waterhammer Analysis Including Fluid Friction. **Journal of Hydraulics Division**, New York, v. 88, n. 79, p. 79-112, 1962.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. **Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

TWYMAN, J. Golpe de ariete en una red de tuberías debido al cierre rápido de una válvula. **Revista de Ingeniería en Construcción**, Santiago, v. 33, n. 2, p. 193-200, 2018.

VEIGA, F. **Curso de Transientes Hidráulicos** - Uma abordagem inovadora e prática. Fundamentos dos Transientes Hidráulicos. Salvador: Veiga, F., 2014. Disponível em: <https://inovagri.org.br/wp-content/uploads/2023/08/VEIGA-FEP-Curso-de-Transientes-Hidraulicos-Uma-abordagem-inovadora-e-pratica-2014.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

VIEIRA, R. R. F. **Manual de Válvulas hidráulicas**. Brasília, DF: Codevasf, 2019.