Desenvolvimento de modelo computacional para simulação de transiente hidráulico em linhas de recalque

Development of a computational model for simulating hydraulic transients in pumping lines

• **Data de entrada:**
07/06/2020

• **Data de aprovação:**
22/06/2020

Ítalo Meireles Faria^{1*} | Erich Kellner²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.075>

ORCID ID

Faria IM <https://orcid.org/0000-0002-8841-2645>

Kellner E <https://orcid.org/0000-0002-7592-5580>

Resumo

O fenômeno do transiente hidráulico, também conhecido como golpe de aríete, pode causar sérios problemas nas instalações hidráulicas, além de transtornos ao abastecimento público, daí a necessidade de se conhecer as magnitudes desses eventos. Partindo desses pressupostos, o objetivo deste trabalho foi o de desenvolver um modelo computacional para calcular as pressões decorrentes do transiente hidráulico em linhas de recalque, empregando *Método das Características* e a partir de modelos gerados pelo *software Epanet*. O estudo foi aplicado na instalação de recalque de água tratada do bairro da Penha, operada pelo Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto de São José do Rio Preto (SEMAE), no estado de São Paulo. Além disso, os resultados simulados pelo modelo desenvolvido foram corroborados ao se comparar com os resultados obtidos com o *software Allievi®*. A metodologia utilizada, bem como os resultados obtidos e as discussões desenvolvidas, foi apresentada ao longo do trabalho.

Palavras-chave: Transiente hidráulico. Golpe de aríete. *Epanet*. *Allievi*.

Abstract

The phenomenon of hydraulic transient, also known as water hammer, can cause serious problems in hydraulic installations as well as disturbances to public supply, hence the need to know the magnitudes of these events. Thus and so, the objective of this work was to develop a computational model to calculate the pressures resulting from the hydraulic transient in settlement lines, using the Characteristics Method, based on models generated by the Epanet software. The study was developed in the water treatment plant located in Penha neighborhood, operated by Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto de São José do Rio Preto (SEMAE), São Paulo. Besides, the results simulated by the developed model were corroborated when compared with the results obtained with the Allievi ® software. The methodology, results and discussions developed were presented throughout the text.

Keywords: Hydraulic transient. Water hammer. *Epanet*. *Allievi*

¹ Serviço Autônomo de Água e Esgoto - São José do Rio Preto - São Paulo - Brasil.

² Universidade Federal de São Carlos - São Carlos - São Paulo - Brasil.

* **Autor correspondente:** eng.meireles@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

O abastecimento público de água potável é a base para o desenvolvimento econômico da sociedade. É fato que uma cidade que tem grande oferta de água atrai atividades em diversas áreas, seja na industrial, comercial e/ou turística. Desse modo, segundo Tsutiya (2006), uma das principais prioridades das populações é o atendimento por sistema de abastecimento de água em quantidade e qualidade adequadas, dada a sua importância para o suprimento de necessidades relacionadas à saúde e ao desenvolvimento industrial.

A escassez dos recursos hídricos com tratamento economicamente viável próximo aos conglomerados urbanos torna cada vez mais necessária a busca por fontes de água mais distantes. Essa busca exige projetos de captação e transporte complexos, a exemplo do desenvolvido pelo Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto de São José do Rio Preto (SeMAE). Em fevereiro de 2018, a autarquia deu início ao projeto de captação de água do Rio Grande, o qual resultará em uma adutora de aproximadamente 60km.

Planos assim tão complexos exigem ferramentas e *softwares* ainda mais sofisticados e com preço acessível. Um *software* gratuito muito utilizado para modelar sistemas pressurizados para distribuição de água é o *Epanet*, desenvolvido pela U. S. Environmental Protection Agency (USEPA), uma agência estatal norte-americana encarregada de proteger os recursos hídricos. Esse programa computacional tem ajudado várias autarquias e concessionárias de saneamento a avaliar características dimensionais e condições operacionais de sistemas de abastecimento. No entanto, algumas simulações, como a de transiente hidráulico, não podem ser feitas diretamente pelo *Epanet*.

Dentre as restrições de simulação do *Epanet*, a limitação quanto ao transiente hidráulico é a que merece maior atenção. No início deste trabalho, alguns *softwares* disponibilizavam uma versão de

demonstração com limitação de nós ou de tempo de uso para o cálculo do transiente hidráulico, mas ainda assim essa condição dificulta a adoção contínua e rotineira de tal ferramenta.

Desse modo, as pequenas autarquias, ao fazer uso desses aplicativos por não terem condições financeiras de adquirir programas comerciais, podem projetar redes com problemas de grande variação de pressão. Como consequência, podem acontecer rompimentos, poluição sonora, perda de água real, contaminação da água e até graves acidentes de trabalho.

Para ilustrar essa situação, o SeMAE possui uma adutora pertencente ao Sistema de Abastecimento da Penha, em São José do Rio Preto, que passou por diversas manutenções corretivas resultantes do golpe de aríete. Segundo levantamento da autarquia, entre janeiro de 2017 e maio de 2018 a bomba e a válvula de retenção da adutora passaram por manutenção seis vezes.

Levando em consideração o exposto acima, a criação de uma aplicação dentro do *Epanet* que avalia o transiente hidráulico ajudaria pequenas empresas de saneamento a desenvolver projetos adequados de adução, com mecanismos para suportar os fenômenos de variação de pressão causados pelo golpe de aríete.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa foi o de desenvolver um modelo computacional para a análise do transiente hidráulico em linhas de recalque, empregando o *Método das Características* e considerando a condição de escoamento permanente a partir do *software Epanet*. Além disso, buscou-se (1) escrever a rotina computacional em linguagem acessível ao *Epanet*; (2) implementar rotina para interpolação e transposição dos dados iniciais do *Epanet* para a matriz do *Método das Características*; (3) calibrar o modelo computacional.

3 METODOLOGIA

3.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo desta pesquisa foi a instalação de recalque de água tratada do bairro da Penha, no município de São José do Rio Preto, estado de São Paulo, o qual é operado pelo SeMAE. A motivação da escolha desse objeto de estudo deu-se pelo histórico de ocorrências de manutenção das instalações civil e hidráulica, relacionadas aos efeitos do transitório hidráulico nessa linha de recalque.

3.2 Adutora de água tratada

A adutora de água tratada, que foi construída há aproximadamente 40 anos, tem início na Estação Elevatória de Água Tratada, localizada na Área da Penha, e tem a maior parte de seu traçado desenvolvido pela Rua Jales até o Sistema de Abastecimento do Eldorado. Sua extensão é de 1606 metros, sendo constituída por tubos e conexões em Ferro Fundido, os quais contam com juntas flangeadas e ponta bolsa com diâmetro nominal (DN) de 350 mm, vencendo desnível geométrico de 46,88 m.

Ademais, logo após o início da linha de recalque, junto ao conjunto motor-bomba, há três dispositivos dispostos sequencialmente: o Registro de manobra, a Válvula de retenção tipo portinhola e a Válvula de retenção tipo mola.

3.3.3 Instalações da estação elevatória de água tratada (EEAT) – Penha

O conjunto de bombas que recalca a água desde a Área da Penha até o Sistema de Abastecimento Eldorado é composto por duas bombas de mesmo modelo, as quais operam em paralelo e de modo alternado durante a operação. Cada um dos conjuntos recebeu a denominação CMB1 e CMB2, e suas características são apresentadas na Tabela 1 e na Fig. 1:

Tabela 1 - Características da adutora

Característica	CMB1 e CMB2
Marca da Bomba	IMBIL
Tipo da Bomba	Bi-Partida
Modelo da Bomba	BP 150450 A
Marca do Motor	WEG
Rotação (rpm)	1785
Potência (cv)	250
Modelo do Motor	315 SM
Dispositivo de partida	Soft-Starter SSW06 WEG

Figura 1 - Pontos característicos da EEAT: (1) ponto de medição de pressão; (2) caixa de registros; (3) Casa de bombas; (4) Poço de sucção

Fonte: Faria e Kellner (2019)

3.4 Obtenção dos dados de campo

A fim de avaliar o modelo computacional, foram coletados dados em campo da adutora objeto de estudo. Como não havia espaço disponível para instalação dos equipamentos de medição a jusante das duas válvulas de retenção, foi necessário abrir uma vala ao lado da caixa de manobra dos registros, a qual contava com as dimensões 1x1,20x1,30 de largura, comprimento e profundidade, respectivamente, em metros. No processo de abertura da vala foi empregada equipe do SeMAE, a qual realizou o trabalho manualmente, devido às condições existentes no local.

Após a abertura da vala, procedeu-se a instalação de um registro TAP, com diâmetro de 1", diretamente na linha de recalque. Além disso, no ponto de amostragem, foi instalado um sensor de pressão da marca WIKA, modelo S-11, gentilmente cedido pelo SeMAE. Esse medidor permite medir carga de pressão entre zero e cem metros de coluna d'água, por meio de um diafragma que converte sua variação em sinais elétricos. Ressalta-se que o intervalo mínimo entre duas leituras do sensor de pressão é de dois milissegundos (0,002 s).

Para registrar os valores de pressão, ligou-se o sensor de pressão a um dispositivo para armazenamento digital dos dados coletados denominado *Field Logger*, da marca Novus e modelo IHM, com capacidade de armazenamento de dados de 1 milissegundo (0,001 s). Para o teste de campo, o dispositivo foi programado para ler e armazenar os dados de pressão à taxa de 4 leituras/segundo, ou seja, a cada 0,25 s. Os registros de pressão foram armazenados em um cartão de memória e, posteriormente, foram transferidos para um computador.

Para evitar erros devido ao mau ajuste do sensor de pressão ou por abertura insuficiente do registro TAP, foi utilizado um indicador digital para averiguar qual pressão o Sensor de Pressão esta-

va lendo antes de ligá-lo ao *Field Logger*. Caso a pressão na adutora, que estava sujeita apenas à pressão da coluna de água, apresentasse um valor muito diferente do desnível de terreno entre o primeiro ponto e o último ponto, seria necessário averiguar o Sensor ou o TAP.

Além dos valores de pressão, registrou-se, durante todo o experimento, a corrente de trabalho do conjunto motor-bomba, utilizando-se uma câmera para filmagem acoplada a um microcomputador a fim de registrar o funcionamento da *soft-starter* durante os ensaios. Ressalta-se que esse é um dispositivo que tem como função controlar a tensão de partida dos motores elétricos trifásicos de alta potência.

3.5 Desenvolvimento da solução numérica

A solução numérica foi desenvolvida a partir da Equação do Movimento (1) e da Equação da Continuidade (2), ambas equações diferenciais parciais:

$$g \cdot H_x + V_t + \frac{f \cdot V \cdot |V|}{2 \cdot D} \quad (1)$$

$$\frac{a^2 \cdot V_x}{g} + H_t = 0 \quad (2)$$

Aplicando o Método das Características nas equações e considerando a condição específica do objeto de estudo são obtidas as seguintes equações discretas:

$$QP_{t,x} = \frac{C_P - C_M}{B_P + B_M} = \frac{C_P - C_M}{B} \quad (3)$$

$$HP_{t,x} = \frac{C_P \cdot B_M + C_M \cdot B_P}{B_P + B_M} = \frac{C_P + C_M}{2} \quad (4)$$

Após a simulação dos valores de QP e HP para cada ponto da malha, os resultados foram comparados com os dados de pressão medidos na posição $x=0$ da linha de recalque.

Segundo Chaudhry (2014), a estabilidade do modelo de discretização aqui empregado é estável se o número de Courant (C_N) for menor ou igual a um ($C_N \leq 1$), sendo este obtido pela Eq. 5:

$$C_N = a \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (5)$$

Sendo a a celeridade de propagação da onda (m/s); Δt o intervalo de tempo entre duas simulações consecutivas (s) e; Δx a discretização espacial do conduto considerado na simulação (m).

Dessa maneira, a partir da definição do Número de Courant e do intervalo de tempo da simulação, calcula-se a celeridade nos condutos e a discretização espacial da simulação.

No caso de as perdas de carga devido ao atrito serem representativas, Chaudhry (2014) apresenta um termo de análise C_R , o qual, para uma aproximação de primeira ordem dos termos não lineares da Equação da Quantidade de Movimento (1), conforme apresentado, deverá ser inferior a 0,5 ($C_R \leq 0,5$). Esse termo é calculado pela Eq. 6:

$$C_R = \frac{f \cdot Q \cdot \Delta x}{4 \cdot D \cdot S} \quad (6)$$

3.6 Desenvolvimento do modelo computacional

O modelo computacional foi escrito em linguagem Visual Basic, empregando-se a plataforma Visual Studio 2010. O programa desenvolvido, por sua vez, foi denominado *Ariete 1.0*, e a figura a seguir exibe sua tela inicial.

(a) **(b)**
Figura 2 - Tela inicial do programa computacional Ariete 1.0 (a) e da janela para seleção e abertura de arquivos com extensão .INP (b)

Ao iniciar o programa computacional *Ariete 1.0*, podem ser visualizadas seis opções: “Abrir Arquivo .INP”, “Abrir o Epanet”, “Calcular Transiente”, “Exportar”, “Informação” e “Sair”. Inicialmente, as opções “Calcular Transiente” e “Exportar” ficam desabilitadas, pois somente pode-se calcular o transiente hidráulico ou mesmo exportar os dados após a abertura de algum arquivo .INP.

Desse modo, após a abertura de um arquivo .INP, a opção “Abrir Arquivo .INP” fica assinalada e a

opção “Calcular Transiente” é habilitada. Ao selecionar a opção “Calcular Transiente”, uma caixa de diálogo é aberta para inserção de alguns dados característicos da bomba, do material da tubulação e do número de passos para simulação.

A Fig. 2 apresenta a tela inicial do programa computacional *Ariete 1.0* após a abertura de um arquivo com extensão .INP (a) e janela para inserção manual de dados característicos da bomba, do material da adutora e no número de passos para simulação (b).

Figura 3 - Tela do programa computacional Ariete 1.0 após a abertura de um arquivo com extensão . INP

Após a inserção manual dos dados característicos do sistema de bombeamento, o transiente é calculado e os resultados são apresentados no monitor do computador.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Avaliação dos resultados da simulação computacional

A fim de melhor avaliar a qualidade do resultado da simulação, foram elaborados os gráficos apresentados nas Fig. 2, 3 e 4 com os dados simulados e aqueles medidos na coleta de dados:

Figura 4 - Comparação entre o resultado simulado e os dados de pressão obtidos no primeiro ensaio da campanha de coleta - Tempo de simulação: 17 s

Figura 5 - Comparação entre o resultado simulado e os dados de pressão obtidos no segundo ensaio da campanha coleta - Tempo de simulação: 17 s

Figura 6 - Comparação entre o resultado simulado e os dados de pressão obtidos no terceiro ensaio da campanha coleta - Tempo de simulação: 17 s

As figuras apresentadas trazem os resultados dos primeiros 17 segundos da simulação. No primeiro e no segundo ensaio, observa-se aderência entre os dados simulados e aqueles obtidos em campo, principalmente no primeiro período da onda de propagação.

No gráfico apresentado na Fig. 4 percebe-se que no tramo ascendente, durante o primeiro período da onda, os dados coletados da carga de pressão estão ligeiramente atrasados. Essa diferença pode ter sido causada pelo tempo transcorrido entre o segundo e o terceiro ensaio, já que o transitório pode não ter terminado e, com isso, as ondas de pressão do segundo ensaio podem ter interferido nos dados do terceiro ensaio.

Em termos da magnitude da amplitude da primeira onda, nota-se que nos três ensaios o valor simulado foi muito próximo do valor obtido nas medições, em especial aquele apresentado na Fig. 2.

De acordo com Wylie, Streeter e Suo (1993), razoável precisão entre a simulação e os dados

experimentais é observada para os primeiros (2-3) segundos, os quais representam o período da tubulação e que, neste caso, equivalem a 2,3 segundos. Segundo os autores, o comportamento inelástico não linear da parede da tubulação; o comportamento inelástico não linear do fluido; o gás livre ou dissolvido no fluido; ou o fator de perda de carga são alguns dos fatores que podem caracterizar a propagação dessa diferença.

Para avaliar o comportamento geral do transitório, construíram-se os gráficos apresentados nas Fig. 5, 6 e 7.

Ao analisar as figuras acima, percebe-se que, embora as simulações apresentem o formato senoidal com a redução da amplitude ao longo do tempo, elas ocorrem de maneira menos intensa se comparadas aos valores obtidos nos ensaios. Isso pode indicar que o coeficiente de perda de carga (f) considerado pelo modelo esteja subestimado, conforme possibilidade apontada por Wylie, Streeter e Suo (1993).

Figura 7 - Comparação entre o resultado simulado e os dados de pressão obtidos no primeiro ensaio da primeira campanha de coleta - Tempo de simulação: 49,28 s

Figura 8 - Comparação entre o resultado simulado e os dados de pressão obtidos no segundo ensaio da primeira campanha de coleta - Tempo de simulação: 49,28 s

Figura 9 - Comparação entre o resultado simulado e os dados de pressão obtidos no terceiro ensaio da primeira campanha de coleta - Tempo de simulação: 49,28 s

4.2 Comparação entre os resultados simulados pelos modelos computacionais *Ariete 1.0* e *Allievi*®

A fim de avaliar os resultados da simulação computacional do *Ariete 1.0*, empregou-se o *software Allievi* versão 13.0.0 como parâmetro de comparação. A Fig. 8 permite comparar, visualmente, os resultados da carga de pressão obtidos a partir da leitura em campo no 1º Ensaio da 1ª Campanha com os resultados obtidos das simulações pelo *Ariete 1.0* e pelo *Allievi*, para o nó imediatamente a jusante da válvula de retenção do sistema de recalque.

Ao analisar os gráficos apresentados na figura acima, é possível observar que o modelo computacional *Ariete 1.0* resultou em uma melhor aderência aos pontos lidos em campo, principalmente no primeiro período da onda de propagação, havendo proximidade entre os tempos de ocorrência do primeiro pico de pressão, assim como pela magnitude da carga de pressão.

Já o modelo *Allievi*, por sua vez, previu o pico com alguma antecedência em relação aos valores lidos em campo. No entanto, as pressões mínimas obtidas pela aplicação do modelo foram mais próximas das magnitudes lidas em campo.

Figura 10 - Resultados obtidos para a carga de pressão no ponto a jusante da válvula de retenção do sistema de recalque por meio da leitura dos dados em campo e das simulações empregando o *Ariete 1.0* e o *Allievi*

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados e discutidos, conclui-se que o modelo computacional *Ariete 1.0* logrou êxito na interpolação e transposição dos dados proveniente do Epanet para a malha do Método das Características para o tempo inicial ($t=0$). Além disso, o modelo foi capaz de avaliar as máximas e mínimas cargas de pressão da adutora Penha de maneira satisfatória.

O modelo computacional *Ariete 1.0* também parece ter subestimado o fator de perda de carga universal (f). Ademais, o cálculo das cargas de pressão realizado pelo modelo *Ariete 1.0* resultou em maior aderência aos resultados obtidos em campo, principalmente para o primeiro período da onda de pressão medida, se comparado com os resultados simulados pelo *Allievi*.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradecemos ao Serviço Municipal Autônomo de São José do Rio Preto por fornecer dados, equipamentos e profissionais necessários para esta pesquisa.

7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

8 REFERÊNCIAS

- CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transients**. 3 ed. New York: Springer, 2014. 591 p.
- FARIA, I. M.; KELLNER, Erich. Transiente Hidráulico em Adutoras – Análise comparativa de duas diferentes configurações da Soft-Starter. **Revista nacional de gerenciamento de cidades**. V. 7. N. 51. 2019. 12p. Disponível em: https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/2144/1989. Acesso em: 05 jan. 2019. <https://doi.org/10.17271/2318847275120192144>
- TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- WYLIE, B.; STREETER, V.; SUO, L. **Fluids Transients in Systems**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993.