



I-759 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA EM TUBULAÇÃO DE PEAD SUBMETIDA A EVENTO DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS

Érico Schwarz Manzochi⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestrando no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

André Luiz Tonso Fabiani⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestre e doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFPR.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100 – Jardim das Américas
Caixa Postal 19011 – CEP: 81531-980 – Curitiba – Paraná – Brasil – Tel.: +55 (41) 3361-3210 – e-mail:
erico_sm@hotmail.com

RESUMO

O acesso à água é indiscutivelmente um dos direitos fundamentais do ser humano. Portanto, é de suma importância resguardar os sistemas de abastecimento municipais de fatores que possam interromper a distribuição. Nesse contexto, um dos principais fenômenos que podem afetar o sistema de distribuição são os transientes hidráulicos, rápidas variações de pressão que ocorrem quando existe alguma modificação nas condições do escoamento. No presente trabalho, buscou-se avaliar os efeitos da parada brusca de um sistema composto por estação elevatória e *booster* tendo como material o PEAD (polietileno de alta densidade), material polimérico que vem em crescente uso em sistemas de abastecimento de água. Objetivou-se verificar a sensibilidade da variação da espessura nos resultados. Para isso, utilizou-se um *software* específico para estudo desse fenômeno, gratuito e bastante utilizado em outros estudos brasileiros. Os resultados indicaram que a relação SDR é de suma importância para os transientes hidráulicos, visto que a relação D/e está presente no cálculo da celeridade. Uma variação de 13,5% na celeridade produziu um acréscimo de 19% tanto na sobrepressão como na subpressão. Os resultados também indicaram que os transientes se constituem em fenômeno complexo que deve ser estudado caso a caso.

PALAVRAS-CHAVE: Transientes Hidráulicos; Golpe de Aríete; Adutoras

INTRODUÇÃO

Sendo o acesso à água um dos direitos humanos fundamentais reconhecidos pela ONU, é de suma importância a garantia a esse direito por meio do correto projeto do sistema de abastecimento municipal, do qual as adutoras são parte essencial. Para se ter um sistema eficiente, confiável e resiliente, se faz necessário avaliar diversos incidentes que podem acometer as adutoras, danificando-as e causando transtornos de ordem ambiental, social e econômica. Um dos incidentes mais comuns e potencialmente graves são os transientes hidráulicos, fenômeno que ocorre quando há alguma modificação no escoamento permanente na tubulação, como no fechamento de válvulas e parada súbita de bombas.

Os transientes hidráulicos podem causar o colapso das adutoras, tanto por meio das elevadas pressões a qual submetem a tubulação quanto pela junção do escoamento após separação de coluna devido a pressões negativas. Além disso, pressões negativas também oferecem risco de intrusão de patógenos, o que pode comprometer a qualidade da água. Dessa forma, é de extrema importância o estudo desse fenômeno, pois pode acarretar significativos danos no sistema de abastecimento, negando aos cidadãos o direito fundamental do acesso à água.

Dentre os diversos parâmetros que influenciam na magnitude das ondas de pressão geradas pelos transientes, a espessura é uma das mais relevantes, pois afeta diretamente a celeridade, ou seja, a velocidade com que as ondas se propagam na tubulação. Dessa forma, é essencial o conhecimento sobre como esse parâmetro



modifica o resultado dos transientes hidráulicos para o correto dimensionamento das adutoras. O objetivo do presente trabalho é verificar a sensibilidade da mudança da espessura na tubulação de PEAD, de forma a contribuir com o projeto de sistemas de adução.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa consiste em um estudo de caso baseado em adutora de água bruta localizada no município de Bombinhas (SC). Os detalhes da adutora foram obtidos através de estudo realizado por CISM (2017). A adutora em questão conduz água da captação no Rio Tijucas, localizada no município de mesmo nome (SC), até a Estação de Tratamento de Água (ETA), localizada no bairro de Zimbros, no município de Bombinhas (SC).

A captação é feita por duas bombas anfíbias operando simultaneamente com um desnível geométrico de 10,88 metros, vazão de 105 L/s cada uma e altura manométrica de 12,58 metros de coluna de água (mca). Depois de um trecho de adutora que se estende por 85 metros, a água passa por um sistema de retirada de areia e por um medidor Parshall. Esse trecho é denominado de baixo recalque. Para essa pesquisa, os efeitos do trecho de baixo recalque foram substituídos por um reservatório que fornece a mesma pressão para o sistema que as bombas de baixo recalque.

Posteriormente, a água é conduzida para uma estação elevatória, denominada de alto recalque. A estação é composta de três bombas centrífugas modelo horizontal. A bomba escolhida para a estação elevatória foi a KSB WKL 125/3, com um rotor de 320 mm, operando com 3 estágios e com inversor de frequência. Para essa pesquisa, porém, foi adotada a simplificação da bomba operando sem inversor de frequência, operando com uma vazão de 210 l/s e 113 mca.

Após sair da elevatória alto recalque, a água é conduzida até uma elevatória intermediária (*booster*), percorrendo 26.936 m. O *booster* é composto de duas bombas Higr R3-360B de rotor 315 mm operando com inversor de frequência. A vazão do sistema considerada foi de 210 l/s e a altura manométrica de 124 mca. A água é então conduzida por um trecho de adutora de 1.123 metros de comprimento até chegar à ETA. Um desenho esquemático da adutora é exibido na Figura 1.



Figura 1: Localização da adutora de água bruta analisada no município de Bombinhas (SC)

Na Tabela 1, pode-se verificar as cotas de cada um desses pontos. Ressalta-se que a cota da elevatória de baixo recalque se refere não apenas à cota em si, mas também à pressão por ela fornecida, que simplificada não foi considerada nas simulações.

Tabela 1 – Cota dos Pontos Analisados

Ponto	Cota (m)
Baixo Recalque	10,00
Alto Recalque	6,55
Booster	53,95
ETA	163,00

Como pode ser observado na Tabela 1 e no mapa de elevações da Figura 2, a localização da captação e da elevatória de baixo recalque é em cota próxima ao nível do mar, enquanto a ETA se localiza em uma cota bem mais elevada, por estar junto de um reservatório de água tratada que abastece a cidade. Dessa forma, fez-se necessário a utilização da elevatória de alto recalque e do *booster* para suprir a pressão demandada para elevar a água até a localização da ETA. Percebe-se também que a adutora necessita contornar uma região montanhosa de considerável elevação, o que aumenta o seu comprimento significativamente.

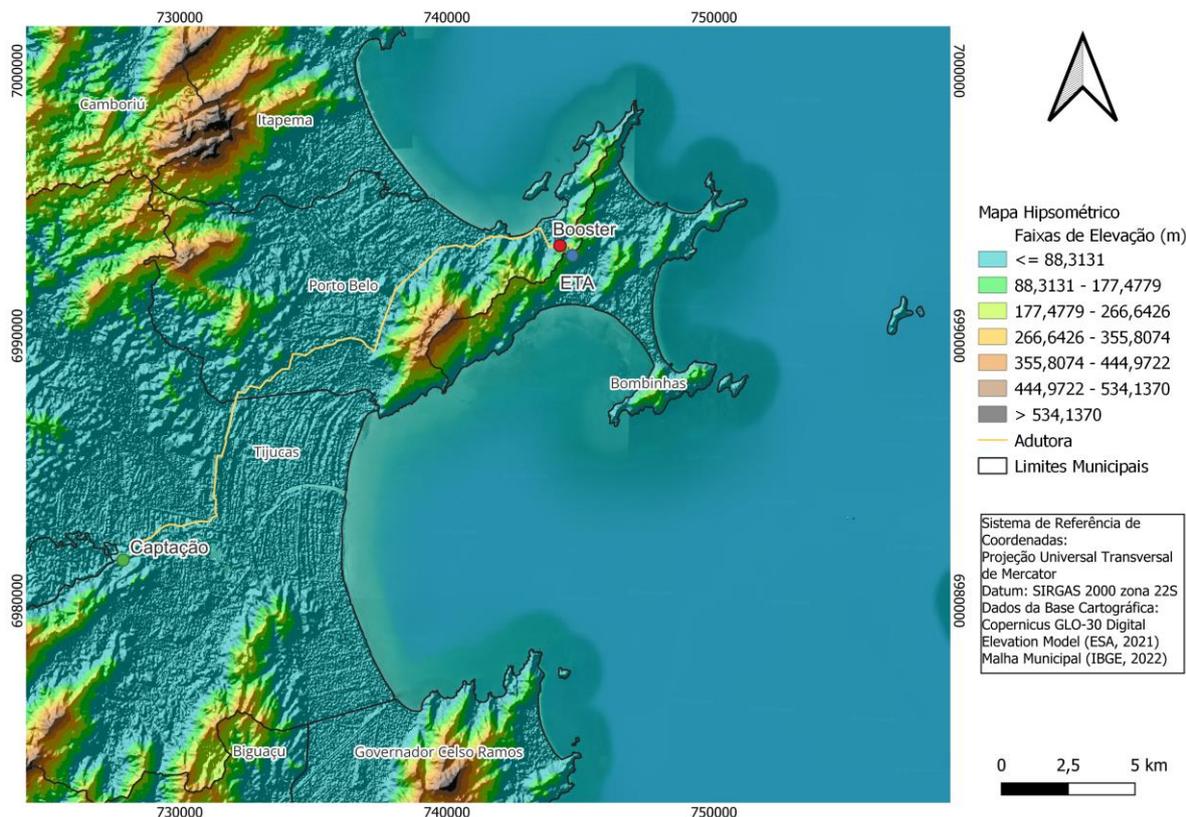


Figura 2: Mapa de elevação com a localização da adutora

A adutora foi, então, modelada no *software* Allievi, um programa gratuito para cálculo dos transientes hidráulicos elaborado pela Universidad Politécnica de Valencia, o qual utiliza o método das características para resolver as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento. Como não existe solução



análítica para as equações diferenciais parciais governantes do fenômeno, o *software* as resolve por meio do método das diferenças finitas. Tais equações são exibidas a seguir.

$$H_i^{n+1} - H_{i-1}^n + \frac{c}{g}(u_i^{n+1} - u_{i-1}^n) + \frac{f_{i+1}^n \Delta x}{D} \cdot u_{i+1}^n \cdot |u_{i+1}^n| = 0$$

$$H_i^{n+1} - H_{i-1}^n - \frac{c}{g}(u_i^{n+1} - u_{i-1}^n) - \frac{f_{i+1}^n \Delta x}{D} \cdot u_{i+1}^n \cdot |u_{i+1}^n| = 0$$

Em que:

H é a altura de pressão relativa;

u é a velocidade;

x é o espaço;

g é a aceleração da gravidade;

f é o fator de resistência de Darcy-Weisbach;

D é o diâmetro da tubulação; e

c é a celeridade da onda.

Para cálculo de celeridade da onda, foi utilizada a seguinte equação, extraída de Chaudhry (2014).

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho \cdot \left[1 + \left(\frac{K}{E}\right) \cdot \psi\right]}}$$

Em que:

K é o módulo de compressibilidade do fluido;

ρ é a massa específica do fluido;

E é o módulo de elasticidade do material da tubulação; e

e é a espessura da tubulação.

E o coeficiente ψ varia de acordo com o ancoramento. Para esse trabalho, foram consideradas juntas de expansão frequentes ao longo de toda a seção da tubulação, o que torna ψ igual à relação entre o diâmetro e a espessura (D/e).

Para esse trabalho, foi comparado o desempenho de tubulações de PEAD (polietileno de alta densidade), que vem tendo crescente utilização em tubulações de água e esgoto. Foi simulado a parada simultânea tanto da elevatória de alto recalque como do *booster* intermediário.

As tubulações de PEAD são classificadas em termos de diâmetro externo (DE), SDR (*Standard Dimension Ratio*), que é a relação entre o diâmetro externo e espessura, e PN, ou seja, a classe de pressão.

Assim, foi selecionado o diâmetro externo de 630 mm e foram comparados os SDR11 PE100 PN10 e SDR13,6 PE100 PN16.

RESULTADOS

Primeiramente, foi necessário o cálculo da celeridade da tubulação. Para isso, foi consultada a norma NBR15561:2017 para se obter os valores de espessura e, dessa forma, calcular-se o diâmetro interno, a relação D/e (que deve ser calculada com o diâmetro interno) e a celeridade. Os dados e resultados calculados para todos os diâmetros externos presentes na norma encontram-se representados na Tabela 2, com os resultados para DE 630 mm em negrito.

Tabela 2 – Dados extraídos da NBR15561:2017 e resultados de celeridade para tubulações SDR13,6 e SDR11

	SDR 13,6						SDR 11					
PE 80	PN 10						PN 12,5					
PE 100	PN 12,5						PN 16					
DE	e min	e max	e méd	Dint	D/e	a	e min	e max	e méd	Dint	D/e	a
63	4,7	5,3	5,0	53,0	10,6	269,9	5,8	6,5	6,2	50,7	8,2	304,6
90	6,7	7,5	7,1	75,8	10,7	269,0	8,2	9,2	8,7	72,6	8,3	302,8
110	8,1	9,1	8,6	92,8	10,8	267,6	10,0	11,1	10,6	88,9	8,4	301,4
160	11,8	13,1	12,5	135,1	10,9	266,9	14,6	16,2	15,4	129,2	8,4	302,0
180	13,3	14,8	14,1	151,9	10,8	267,4	16,4	18,2	17,3	145,4	8,4	301,8
200	14,7	16,3	15,5	169,0	10,9	266,3	18,2	20,2	19,2	161,6	8,4	301,6
225	16,6	18,4	17,5	190,0	10,9	266,8	20,5	22,7	21,6	181,8	8,4	301,6
250	18,4	20,4	19,4	211,2	10,9	266,5	22,7	25,1	23,9	202,2	8,5	300,8
280	20,6	22,8	21,7	236,6	10,9	266,3	25,4	28,1	26,8	226,5	8,5	300,7
315	23,2	25,7	24,5	266,1	10,9	266,5	28,6	31,6	30,1	254,8	8,5	300,7
355	26,1	28,9	27,5	300,0	10,9	266,2	32,2	35,6	33,9	287,2	8,5	300,6
400	29,4	32,5	31,0	338,1	10,9	266,0	36,3	40,1	38,2	323,6	8,5	300,6
450	33,1	36,6	34,9	380,3	10,9	266,2	40,9	45,1	43,0	364,0	8,5	300,7
500	36,8	40,6	38,7	422,6	10,9	266,1	45,4	50,1	47,8	404,5	8,5	300,6
560	41,2	45,5	43,4	473,3	10,9	266,1	50,8	56,0	53,4	453,2	8,5	300,4
630	46,3	51,1	48,7	532,6	10,9	265,9	57,2	63,1	60,2	509,7	8,5	300,6
710	52,2	57,6	54,9	600,2	10,9	265,9	64,5	71,1	67,8	574,4	8,5	300,6
800	58,8	64,8	61,8	676,4	10,9	265,8	72,6	80,0	76,3	647,4	8,5	300,4
900	66,2	73,0	69,6	760,8	10,9	265,9	81,7	90,0	85,9	728,3	8,5	300,4
1000	72,5	79,9	76,2	847,6	11,1	263,7	90,2	99,4	94,8	810,4	8,5	299,3

O que se pode perceber é que a relação diâmetro/espessura, representada pelo SDR, é de suma importância para o cálculo da celeridade de onda, a qual vai impactar no fenômeno dos transientes hidráulicos, como se observa na Figura 3. Porém, é importante lembrar que, enquanto o SDR calcula a relação usando o diâmetro externo, a celeridade é calculada pelo diâmetro interno.

Pode-se ver que a relação entre SDR e celeridade é inversamente proporcional. Ou seja, quanto maior o SDR, menor será a celeridade e, dessa forma, menores serão as ondas de pressão e o consequente impacto dos transientes hidráulicos. Pode-se verificar também que a relação entre as variáveis tem o formato típico de uma relação matemática da forma potência.

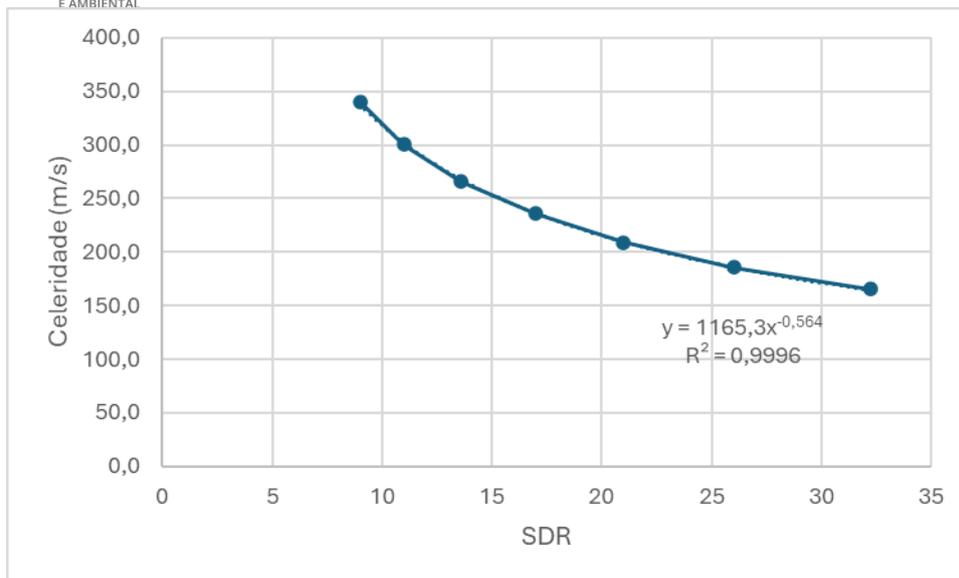


Figura 3: Variação da celeridade de onda com o SDR da tubulação

Com base nesses resultados de celeridade de onda, prosseguiu-se à análise do cálculo do escoamento em regime permanente e transiente no *software*.

A Figura 4 mostra o gráfico de envoltórias de pressão de ambas as tubulações. Na figura, a simulação 8 representa a tubulação de SDR11 e a simulação 9 representa a tubulação de SDR13,6. Ressalta-se que esses valores de SDR foram escolhidos pela semelhança de diâmetro e espessura em relação à adutora original (que é de ferro fundido dúctil), o que permite uma melhor comparação dos resultados hidráulicos. Porém, a norma NBR15561:2017 indica preferencialmente o SDR11 e o SDR17 para redes de água.

No caso do regime permanente, houve pouca diferença entre as tubulações com SDR diferente. Como o material e o sistema são os mesmos, houve apenas uma pequena diferença devido à mudança no diâmetro interno da tubulação (apesar de as tubulações terem mesmo diâmetro externo, a tubulação de SDR maior tem um diâmetro interno maior, por ter uma espessura menor). Com esse pequeno aumento de diâmetro interno na tubulação com maior SDR, houve uma diminuição na perda de carga, o que ocasionou pressões permanentes levemente maiores e uma mudança no ponto de operação na bomba, que está condicionada às condições de contorno dos reservatórios de montante e jusante.

Já no regime transiente, pode-se perceber que a tubulação de menor SDR apresenta maiores pressões máximas e menores pressões mínimas, ou seja, maiores sobrepressões e menores subpressões. A Tabela 3 exibe os resultados numericamente, com a comparação em percentual entre as sobrepressões e subpressões, a celeridade e a relação diâmetro interno/espessura (as pressões máximas e mínimas não foram comparadas, pois também dependem das condições de escoamento permanente). Percebe-se que a variação relativa, em porcentagem, na sobrepressão e subpressão obtidas é levemente superior à variação na celeridade entre as duas tubulações.

Pode-se perceber também que, embora as sobrepressões e subpressões tenham sido maiores na tubulação com menor SDR, no caso a tubulação de SDR11, na tubulação de SDR13,6 tem uma pressão negativa menor, chegando inclusive à pressão de vapor de água, o que gera cavitação. Isso ocorre bem no ponto onde se localiza a bomba no início da adutora, o que sugere um efeito das condições de bombeamento nos resultados de transientes hidráulicos, o que demonstra a complexidade do fenômeno.

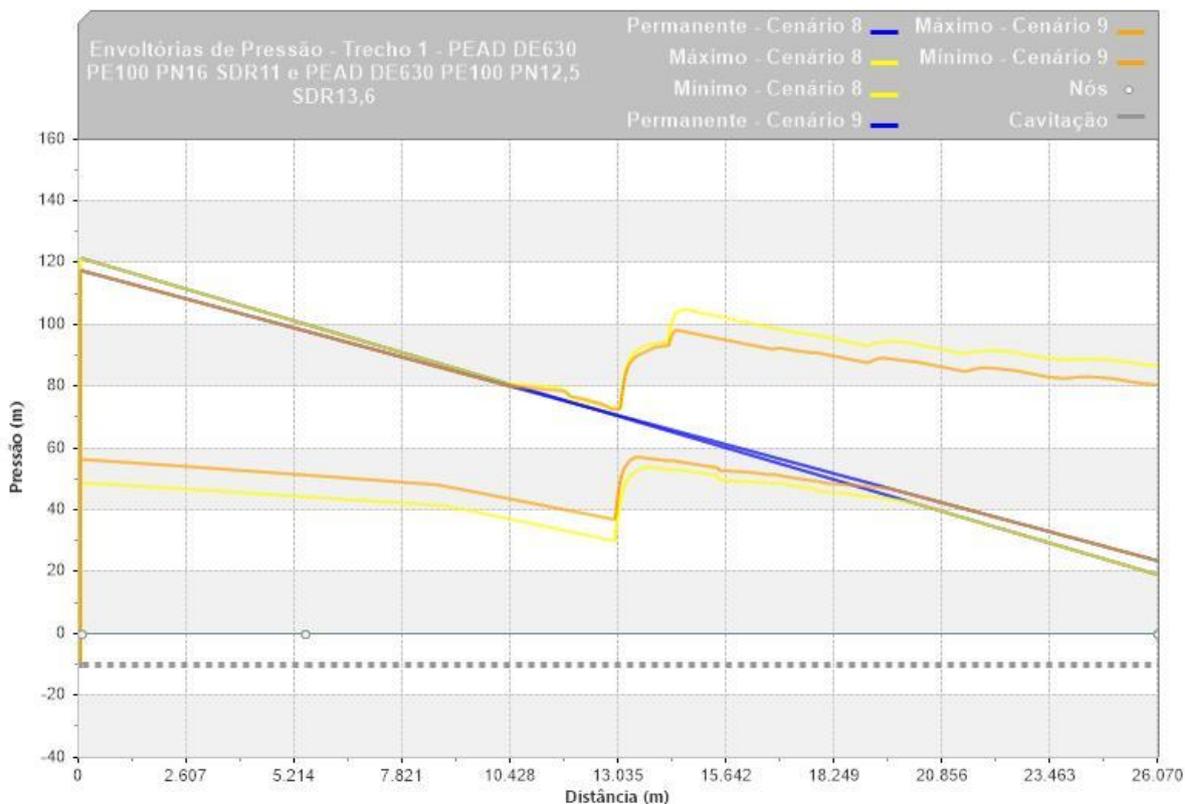


Figura 4: Envoltórias de pressão para as tubulações analisadas

Tabela 3: Resultados obtidos nas simulações

Simulação	Material	Especificação	D/e	Celeridade de Onda (m/s)	Pressão Máxima (mca)	Pressão Mínima (mca)	Sobrepresão Máxima (mca)	Subpressão Máxima (mca)
8	PEAD	DE630 PE100 PN16 SDR11	8,47 (77,48%)	261,47 (113,61%)	121,60	-6,24	67,68 (118,86%)	-72,71 (118,87%)
9	PEAD	DE630 PE100 PN12,5 SDR13,6	10,94	230,15	117,61	-10,00	56,94	-61,17



CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Tubulações com maior celeridade produzem maiores ondas de pressão, com maiores subpressões e sobrepressões. Tubulações de PEAD de mesmo diâmetro com maior SDR tem menor celeridade e, portanto, produzem ondas de pressão menos intensas. Isso decorre devido à relação diâmetro interno por espessura entrar na equação da celeridade. A relação entre SDR e celeridade é inversamente proporcional e se aproxima bastante da função matemática da potência. Ressalta-se, porém, que a relação SDR é baseada no diâmetro externo da tubulação, enquanto a relação D/e que entra na equação da celeridade envolve o diâmetro interno. Dessa forma, a correlação entre os parâmetros não é perfeita. Verificou-se que uma diminuição de aproximadamente 22,5% na relação D/e gerou um aumento de 13,5% na celeridade, que, por sua vez, gerou uma variação de 19% na sobrepressão e subpressão máximas.

Ressalta-se também que o fenômeno dos transientes hidráulicos é complexo e multifatorial. Dessa maneira, embora a tubulação com menor SDR tenha produzido resultados de sobrepressão e subpressão mais intensos, a tubulação com SDR maior teve uma pressão negativa mais baixa. No caso, isso se deve provavelmente a questões de condições de contorno do sistema de bombeamento. Além disso, a variação na pressão máxima foi pequena, devido à influência das condições permanentes e das variações de sobrepressão e subpressão em cada nó analisado. Desse modo, ressalta-se que questões adicionais devem sempre ser investigadas caso a caso.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15802 - *Sistemas enterrados para distribuição e adução de água e transporte de esgotos sob pressão - Requisitos para projetos em tubulação de polietileno PE 80 e PE 100 de diâmetro externo nominal entre 63 mm e 1600 mm*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2010.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12215-1 - *Projeto de Adução de Água - Parte 1: Conduto Forçado*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2017.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15561 - *Tubulação de Polietileno PE80 e PE100 para Transporte de Água e Esgoto sob Pressão - Requisitos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2017.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS. *Manual de Boas Práticas - ABPE*. Associação Brasileira de Tubos Poliolefinicos e Sistemas. 2013.
5. AZEVEDO NETTO E FERNANDES Y FERNANDES, M. *Manual de Hidráulica (9a ed.)*. São Paulo: Blucher. 2015.
6. CHAUDHRY, M. Hanif. *Applied Hydraulic Transients*. 3. ed. New York: Springer. 583 p. 2014.
7. CISM Engenheiros Consultores Ltda. *Projeto básico e executivo de captação, adutora, estação de tratamento de água de Bombinhas-SC: memorial descritivo e de cálculo*. Curitiba: Cism, 2017.
8. ESA. *Copernicus DEM*. Copernicus DEM. [S. l.]: European Space Agency, 2022. DOI 10.5270/esa-c5d3d65. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>. 2022.
9. HELLER, L. & DE PÁDUA, V. L., 2016. *Abastecimento de Água para Consumo Humano - Volume 2*. 3a ed. Belo Horizonte: Editora UFMG. 2016.
10. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Malha Municipal Digital e Áreas Territoriais*. 2022.
11. LECHEVALLIER, M. W. et al., 2003. *The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution system from pressure transients*. Journal of Water and Health. 2003.
12. TSUTIYA, Milton Tomoyuki. *Abastecimento de Água*. 4. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 643 p. 2006.
13. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA (Org.). *Allievi: Manual Técnico*. V 1.0.1. Valência: Ita, 2010.