Transientes hidráulicos em elevatória de água tratada na cidade de Porto Alegre/RS

Laura Gonçalves da Rocha[1], Eder Daniel Teixeira[2], Luiz Augusto Magalhães Endres [3], Mauricio Dai Prá[4], Daniela Guzzon Sanagiotto[5]

Resumo: Este trabalho apresenta a instrumentação utilizada em um sistema de recalque de água tratada da cidade de Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul, e analisa os dados obtidos. Foram realizadas medições em dois pontos de uma tubulação de recalque: um ponto de medição de pressão no início da tubulação de recalque, a jusante da válvula de retenção, e outro ponto de medição de pressão e vazão junto a uma estação pitométrica, localizada fora da estação elevatória. Foi utilizado um datalogger de pressão e de vazão, combinado com tubo Pitot, para registro dos dados. O período de monitoramento foi de 1 a 23 de agosto de 2021. Durante este intervalo não foram observados comportamentos inesperados, como a ocorrência de transientes hidráulicos não programados. A elevatória de água tratada tem 3 grupos motor-bomba, mas durante o período dos registros apenas um deles foi acionado. A partir da análise dos dados foi possível observar que os transientes hidráulicos registrados ocorreram devido ao desligamento e acionamento de grupo motor-bomba, com comportamentos distintos para desligamento e acionamento. As variações máximas ocorreram logo após o desligamento do grupo motor-bomba, com quedas de pressão entre 66 e 83 m.c.a.

Palavras-Chave: transientes hidráulicos, elevatórias de água, tubulação de recalque.

Abstract: This work presents the instrumentation used in a treated water pumping system in the city of Porto Alegre, Rio Grande do Sul state, and analyzes the data obtained. Measurements were taken at two points in a pumping pipeline: a pressure measurement point at the beginning of the pipeline, downstream of the check valve, and another pressure and flow measurement point next to a Pitot tube station, located outside the pumping station. A pressure and flow datalogger, combined with a Pitot tube, was used to record the data. The monitoring period was from August 1st to 23rd, 2021. During this interval, no unexpected behaviors were observed, such as the occurrence of unscheduled hydraulic transients. The treated water pumping station has 3 motor-pump groups, but during the recording period only one of them was activated. From the data analysis, it was possible to observe that the recorded hydraulic transients occurred due to the shutdown and activation of motor-pump groups, with distinct behaviors for shutdown and activation. The maximum variations occurred immediately after the motor-pump unit was switched off, with pressure drops between 66 and 83 m H_2O.

Keywords: Hydraulic transients, water pumping stations, discharge piping.

1) DMAE e IPH/UFRGS (laura.rocha134@gmail.com)
2) IPH/UFRGS (eder.teixeira@ufrgs.br)
3) IPH/UFRGS (endres@ufrgs.br)
4) IPH/UFRGS (mauricio.daipra@ufrgs.br)
5) IPH/UFRGS (dsanagiotto@ufrgs.br)

INTRODUÇÃO

Sistemas de recalque para abastecimento de água podem estar presentes na captação e condução de água bruta, na condução de água tratada das estações de tratamento de água aos reservatórios e em redes de distribuição, para garantir o fornecimento em locais elevados, distantes ou com baixa pressão.

A definição do diâmetro da tubulação e potência do conjunto motor-bomba passa por uma análise econômica que busca otimizar os custos fixos de implantação e os custos operacionais ao longo da vida útil do sistema. A escolha da tubulação de recalque (material e espessura da parede) deve considerar as pressões atuantes na condição mais desfavorável, para regimes operacionais normal e excepcional (NBR 12214/2020, NBR12215-1/2017). Nesse aspecto, as pressões extremas a que a tubulação de recalque está sujeita estão associadas à ocorrência de transientes hidráulicos de curta duração. Em fase de projeto são realizadas simulações para avaliar as variações de pressões associadas à ocorrência de transientes hidráulicos e para definição da melhor alternativa em relação ao tipo de tubulação (material e espessura) e a necessidade ou não da utilização de dispositivos de proteção aos transientes hidráulicos.

Durante a operação dos sistemas, podem acontecer manobras diferentes das previstas em projeto, além de envelhecimento das tubulações e bombas, reparos e substituições de elementos, que podem resultar em condições diferentes das consideradas no projeto. Desta forma as medições de pressão em tubulações de recalque são úteis para a validação de modelos numéricos e para controle das condições operacionais. São poucos os trabalhos que relatam e analisam dados obtidos em sistemas reais. Soares et al. (2012) apresentam resultados de medições de campo de pressões em um sistema elevatório em Portugal, comparando os resultados com modelos numéricos. Bottelli (2022) utilizou dados medidos de transiente hidráulico em um sistema elevatório para validar um modelo matemático que considerava dispositivos de proteção de foram simplificadas. Arefi et al. (2021) apresenta dados de transientes hidráulicos decorrentes de desligamento de bombas obtidos em um sistema real de adução de cerca de 31 km.

No Plano Municipal de Saneamento Básico de Porto Alegre, no Volume 1 – Diagnóstico (PMPA, 2015a), e no Volume 2 – Prognóstico, Objetivos e Metas (PMPA, 2015b), se apresentou que a EBAT Oscar Pereira, instalação objeto deste trabalho, tem problemas de transientes hidráulicos e que se deveria ser projetado algum mecanismo de proteção às adutoras existentes. Nesse contexto foram realizadas medições de pressões na tubulação de recalque desta elevatória, com o objetivo de conhecer as características dos transientes hidráulicos, como frequência de ocorrência, duração, variações de pressões e pressões extremas.

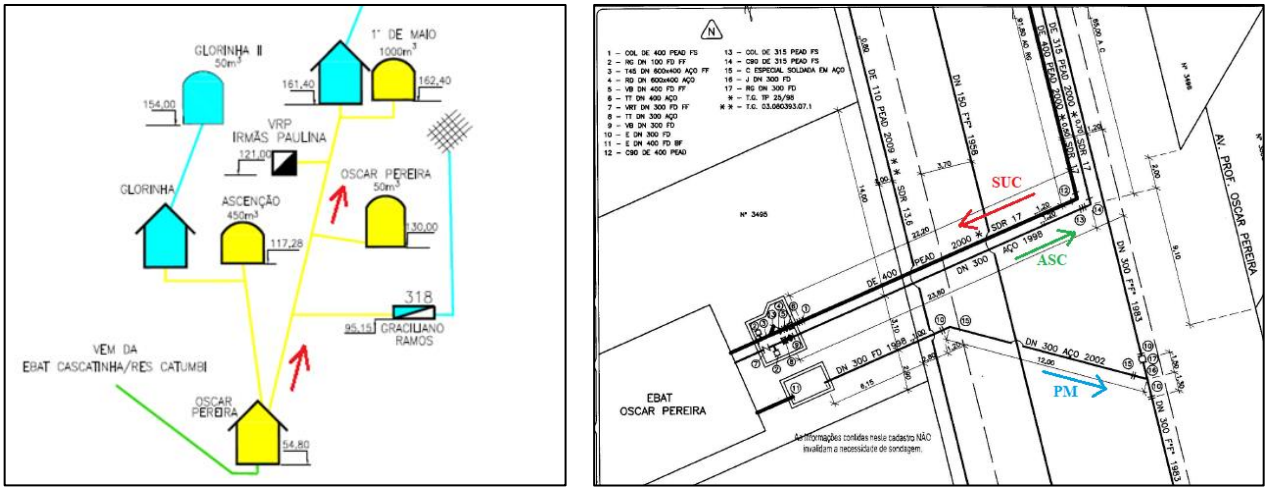
MÉTODOS

Área de Estudo

A área de estudo compreende uma linha de recalque de uma estação elevatória de água tratada do sistema de abastecimento da cidade de Porto Alegre, operado pelo DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgotos). A estação elevatória faz parte do sistema Menino Deus, subsistema Estação de Bombeamento de Água Tratada (EBAT) Oscar Pereira para o Reservatório Primeiro de Maio.

A EBAT Oscar Pereira recebe água da EBAT Cascatinha – Reservatório Catumbi. Possui duas tubulações de recalque, uma para o reservatório Primeiro de Maio e outra para o reservatório Ascenção. Essa estação elevatória possui seis grupos motor-bomba, três para o reservatório Primeiro

de Maio e três para o reservatório Ascenção (que não está em análise nesse trabalho). A tubulação de recalque é de ferro fundido e tem diâmetro de 300 mm. A Figura 1 mostra um esquema do perfil hidráulico e um croqui da EBAT Oscar Pereira. A estação elevatória possui conversor de frequência, que foi instalado em 2019, que permite o acionamento e desligamento do grupo motor-bomba de forma gradual.



(a) (b)

Figura 1 – (a) Esquema do perfil hidráulico das tubulações de recalque da EBAT Oscar Pereira – Primeiro de Maio; (b) Croqui com o detalhamento das tubulações de recalque e sucção da EBAT Oscar Pereira (SUC – linha de sucção, PM - linha de recalque para o reservatório Primeiro de Maio, ASC – linha de recalque para o reservatório. Fonte: (a) PMPA (2015a); (b) DMAE.

Equipamentos e condições de medições

Neste estudo são avaliados dados obtidos a partir de equipamentos instalados nas tubulações de recalque. Foram instalados dispositivos de medição em pontos estratégicos: (i) medidor de pressão junto à estação elevatória, nas proximidades dos manômetros, a jusante da válvula de retenção, e (ii) medidor de pressão e vazão na estação pitométrica localizada na tubulação de recalque. Para a aquisição dos dados, utilizaram-se dataloggers de pressão e vazão, sendo este último associado a um tubo Pitot. Os equipamentos foram configurados para registrar dados a cada 3 minutos, e com maior frequência quando detectado regime transiente. Os dados coletados foram transmitidos via sistema GSM (*Global System for Mobile Communications*) e posteriormente analisados em ambiente digital.

O datalogger utilizado nas medições de pressão é da marca Microcom, modelo Nemos N200+, com proteção IP68, comunicação GSM, quatro entradas digitais e duas analógicas. Para a medição de vazão foram utilizados dataloggers da mesma marca e modelo do medidor de pressão, mas dotado de mais uma sonda. A Figura 2 mostra o equipamento instalado na tubulação de recalque da EBAT Oscar Pereira-Reservatório Primeiro de Maio e em uma estação pitométrica (nesse caso é um exemplo, semelhante ao instalado na estação pitométrica da tubulação de recalque).

O período de monitoramento foi de 01 a 23 de agosto de 2021. Durante esse período, foram registrados parâmetros como pressão, vazão, velocidade do escoamento e ocorrência de transientes hidráulicos. Neste trabalho serão apresentados alguns dias deste monitoramento, representativos do comportamento observado.


(a)

(b)

Figura 2 – Dataloggers instalados (a) na tubulações de recalque da EBAT Oscar Pereira/RES Primeiro de Maio; (b) e exemplo de datalogger instalado em estação pitométrica. Fonte: Rocha, 2021.

Análise dos dados

A análise dos dados consistiu na avaliação das séries de dados medidos para identificação de eventos transientes associados às operações do sistema, especialmente acionamento e desligamento de grupos motor-bomba. Adicionalmente, os resultados foram confrontados com formulação teórica simplificada a fim de avaliar a coerência entre valores medidos e estimados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3a mostra, para o dia 18/08/2021, as séries de pressões medidas no início da tubulação de recalque (P2) e na estação pitométrica (P1). Pode-se observar que o comportamento das pressões é semelhante nos dois pontos de medição. Há uma variação média de 6 m.c.a. entre os dois pontos, que corresponde, aproximadamente, ao desnível geométrico dos dois pontos de medição.

Na Figura 3b, se observa com mais detalhes o comportamento dos transientes que ocorreram no dia 18/08/21. Foram quatro eventos: dois com tempo de duração em torno de 30 segundos, que comparados com os dados de operação dos grupos motor-bomba (Figura 3c), evidenciam que foram ocasionados pelo desligamento da bomba; e os outros dois que têm duração em torno de 15 segundos, ocasionados pelo acionamento da bomba. Na Figura 3c se observa que o grupo motor-bomba 02 foi o único acionado neste dia. Comparando-se com os horários de ocorrência, fica claro que os transientes ocorreram devido ao desligamento do grupo e à retomada do bombeamento. A Figura 3d apresenta os dados de vazão e velocidade, confirmando a condição de vazão e velocidades nulas nos períodos entre desligamento e o acionamento do grupo motor-bomba.

A análise dos dados para outros dias de medições, resultaram em informações semelhantes às obtidas no dia 18/08/2021 (Figura 3). As Tabelas 1, 2 e 3 resumem as principais características dos transientes hidráulicos observados em três dias na tubulação de recalque da EBAT Oscar Pereira para o Reservatório Primeiro de Maio. Os medidores de pressão e vazão, ao registrarem variações bruscas de valores, passavam a registrar os dados com mais frequência e, ao cessarem as variações bruscas, retornavam o registro com menor frequência. As informações que constam das Tabelas 1, 2 e 3 consideram o tempo de duração do transiente esse período de registro com maior frequência. O valor da pressão média em regime permanente foi avaliado a partir dos dados obtidos antes da ocorrência do transiente. Também se apresentam os valores máximos e mínimos medidos durante o transiente e as variações acima (ΔH máx) e abaixo (ΔH mín) da pressão em regime permanente.

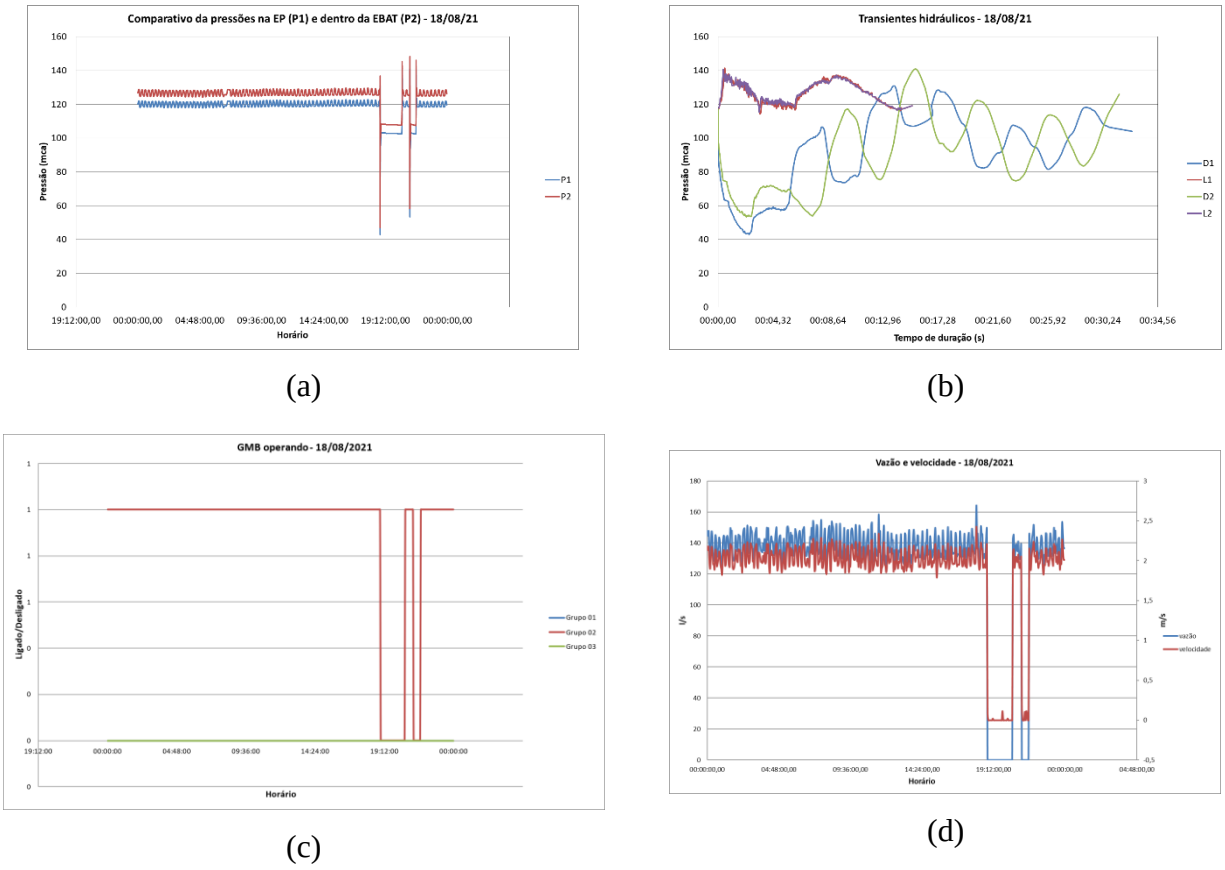


Figura 3 – Dados medidos na EBAT Oscar Pereira/RES Primeiro de Maio no dia 18/08/2021: (a) pressões em um ponto no início da tubulação de recalque (P2) e na estação pitométrica (P1); (b) detalhes dos transientes observados; (c) condição dos grupos motor-bomba (1) ligado, (0) desligado; (d) vazões e velocidades.

Nas Tabelas 1, 2 e 3 há dados de transientes hidráulicos que ocorrem de forma repetida, alguns ocasionados pelo desligamento da bomba e os outros pelo acionamento da bomba. Há alguns eventos de depressão severa, com queda de pressão em torno de 80 m.c.a. e duração de cerca de 32 segundos, relacionados com o desligamento das bombas. A segunda categoria de eventos transientes está relacionada com sobressões de cerca de 38 m.c.a e duração de 16 segundos, resultante do acionamento das bombas. Como há uma elevada repetibilidade dos valores os transientes observados estão associados a monobras operacionais rotineiras da estação de bombeamento.

Tabela 1: Resumo das ocorrências dos transientes no dia 18/08/2021– EBAT Oscar Pereira/RES Primeiro de Maio.

Evento	Horário de ocorrência	P permanente (mca)	P máx (mca)	P mín (mca)	ΔH máx (mca)	ΔH mín (mca)	Tempo de duração do transiente (s)
1	18:46:29,49	120,2	130,9	42,9	10,7	77,2	00:00:32,53
2	20:28:59,74	102,6	141,4	109,9	38,8	7,3	00:00:15,26
3	21:04:47,58	119,7	140,9	53,4	21,2	66,3	00:00:31,53
4	21:33:57,92	101,9	140,7	115,3	38,8	13,3	00:00:15,26

Tabela 2: Resumo das ocorrências dos transientes no dia 19/08/2021– EBAT Oscar Pereira/RES Primeiro de Maio.

Evento	Horário de ocorrência	P permanente (mca)	P máx (mca)	P mín (mca)	ΔH máx (mca)	ΔH mín (mca)	Tempo de duração do transiente (s)
1	06:02:08,00	127,1	136,5	46,4	9,4	80,8	00:00:32,78
2	06:31:13,32	107,1	145,1	113,6	37,9	6,4	00:00:15,76
3	08:15:34,75	126,8	136,8	46,4	10,0	80,4	00:00:32,28
4	09:52:14,00	107,7	144,6	107,4	36,9	0,2	00:00:15,27
5	10:27:23,05	126,7	136,5	46,6	9,8	80,1	00:00:32,03
6	11:14:40,42	107,4	147,8	115,3	40,3	7,8	00:00:15,76
7	19:24:27,59	127,8	136,8	45,1	9,0	82,7	00:00:32,53
8	20:54:11,29	107,5	143,6	110,4	36,1	2,9	00:00:15,77

Tabela 3: Resumo das ocorrências dos transientes no dia 22/08/2021 – EBAT Oscar Pereira/RES Primeiro de Maio.

Evento	Horário de ocorrência	P permanente (mca)	P máx (mca)	P mín (mca)	ΔH máx (mca)	ΔH mín (mca)	Tempo de duração do transiente (s)
1	10:00:52,00	119,7	130,2	41,0	10,5	78,7	00:00:32,78
2	10:45:57,00	101,9	140,2	104,0	38,3	2,1	00:00:15,52
3	11:12:00,92	119,9	130,9	41,7	11,0	78,2	00:00:32,29
4	11:53:32,52	101,8	141,4	102,1	39,6	0,3	00:00:15,51
5	12:25:38,35	119,3	131,2	41,2	11,8	78,1	00:00:32,78
6	13:19:09,22	102,1	138,5	106,0	36,4	3,9	00:00:16,02
7	13:41:32,53	119,2	130,7	40,7	11,5	78,5	00:00:29,47
8	14:16:36,12	102,5	140,9	107,0	38,5	4,5	00:00:16,02

Em uma análise inicial, se buscou calcular a variação de pressão máxima esperada no tipo de tubulação utilizado na tubulação de recalque. A tubulação é de ferro fundido, mas na análise cadastral não havia clareza sobre a classe da tubulação. Dessa forma, consideraram-se duas classes possíveis: de acordo com a NBR 7675/2022, para tubo ponta e bolsa de ferro fundido, o diâmetro externo é de 326 mm, espessura da tubulação de 5,7 mm para classe k7 e espessura 7,2 mm para classe k9. Esses dados resultam em celeridades de 961,5 m/s (classe k7) e 1021,14 m/s (classe k9). Considerando a velocidade média medida em regime permanente de 2 m/s, utilizando a equação de Joukowsky ($\Delta h_{máx} = (\text{celeridade} \,.\, \text{velocidade})/g$), obtêm-se valores de variações de pressão máximas de cerca de 200 m.c.a. para tubo de classe k7 e de cerca de 212 m.c.a. para tubo de classe k9. Embora esses valores tenham sido obtidos de uma forma extremamente simplificada, eles são bastante superiores aos transientes registrados na EBAT Oscar Pereira – Reservatório Primeiro de Maio. Essa diferença era esperada pois a operação de acionamento / desligamento dos grupos motor-bomba ocorre de forma controlada com o uso do controlador de frequência, que está instalado nessa elevatória desde 2019. Ressalta-se que há três grupos motor-bomba nessa elevatória, dois para operação e um de reserva. No entanto, durante o período da realização das medições, apenas um grupo motor-bomba estava em operação e os transientes registrados permitem a avaliação apenas para essa condição. O acompanhamento das variações de pressão decorrentes dos transientes hidráulicos quando da operação de dois grupos motor-bomba deve ser realizada em avaliações futuras.

Nesse artigo foram apresentados resultados obtidos em alguns dias das medições. Dados e análises adicionais podem ser consultadas em Rocha (2021).

CONCLUSÃO

As pressões (e também as vazões) se mantêm, na maior parte do tempo, dentro de uma faixa relativamente estreita, com pressões médias entre 119 e 129 m.c.a., o que indica operação estável da estação de bombeamento.

Há registros de quedas significativas de pressão em determinados instantes, seguidas de aumentos de pressão e sucessivas oscilações cada vez mais atenuadas (Figura 3b, linhas D1 e D2). Essas variações são pontuais e não contínuas, indicando eventos transitórios rápidos. Esses eventos estão associados ao desligamento do grupo motor-bomba. Se observaram entre 2 e 4 desligamentos por dia. Os desligamentos do grupo motor-bomba resultaram em transientes hidráulicos com duração em torno de 30 segundos, queda da pressão máxima entre 66 e 83 m.c.a. e acréscimo de pressão máximo de cerca de 10 m.c.a.

O outro comportamento transiente observado está associado ao acionamento do grupo motor-bomba, que se caracterizou por um acréscimo de pressão inicial, seguida de quedas e sucessivamente alternâncias entre acréscimos e quedas (Figura 3b, linhas L1 e L2). Se observaram entre 2 e 4 acionamentos do grupo motor-bomba por dia. As oscilações de pressão em relação ao regime permanente indicaram acréscimos de pressão máxima de cerca de 40 m.c.a. e quedas máximas inferiores a 8 m.c.a.

As variações de pressão medidas durante a ocorrência dos transientes hidráulicos são menores do que as previstas a partir de equações simplificadas, o que era esperado já que o acionamento e desligamento dos grupos motor-bomba ocorre com uso de conversor de frequência, que permite o aumento ou redução da rotação de forma gradual, reduzindo as variações de pressões. Essas avaliações aconteceram com o funcionamento de apenas um grupo motor-bomba. Os autores sugerem que seja avaliado o comportamento dos transientes hidráulicos nessa tubulação quando do acionamento de dois grupos motor-bomba.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgotos da Prefeitura Municipal de Porto Alegre pela disponibilização dos dados que foram utilizados pela primeira autora no seu trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil e também neste artigo. Agradecem também ao Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, à Capes e ao CNPq pelo apoio fornecido durante a pesquisa,

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7675/2022 – Tubos e conexões de ferro dúctil e acessórios para sistemas de adução e distribuição de água – Requisitos. Rio de Janeiro. 134 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12214/2020 – Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de água — Requisitos. Rio de Janeiro. 41 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12215-1/2017 – Projeto de adutora de água. Parte 1: Conduto forçado. Rio de Janeiro. 32 p.

Arefi, M. H., Ghaeini-Hessaroeyeh, M., Memarzadeh, R. "*Numerical modeling of water hammer in long water transmission pipeline"* Applied Water Science, 2021, 11:140.

Bottelli, D. N. "*Hydraulic transiente modeling of a water pipeline system, protection design and comparison of model results with pressure measurements after commissioning*" Proceedings of the 39th IAHR World Congress, Granada, Spain. 2022.

Prefeitura Municipal de Porto Alegre (2015a). "*Plano Municipal de Saneamento Básico. Diagnóstico. Volume 1"* Acessado em 27/04/2026 (https://prefeitura.poa.br/sites/default/files/usu_doc/sites/dmae/01_PMSB_Diagn%C3%B3stico_web.pdf).

Prefeitura Municipal de Porto Alegre (2015b). "*Plano Municipal de Saneamento Básico. Prognóstico, objetivos e metas. Volume 2"* Acessado em 27/04/2026 (https://prefeitura.poa.br/sites/default/files/usu_doc/sites/dmae/02_PMSB_Progn%C3%B3stico%2C%20Objetivos%20e%20Metas_web.pdf).

Rocha, L. G. (2021). "*Análise de dados de transientes obtidos por instrumentação em sistema de recalque de água na cidade de Porto Alegre.*" Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. UFRGS. 117p.

Soares, A. K., Covas, D. I. C., Ramos, H. M. "*Damping analysis of hydraulic transientes in pump-rising main systems."* Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(2): 23-243.