

ESTUDO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS EM ADUTORAS DE PEAD

Guilherme Batista Santos da Silva⁽¹⁾

Engenheiro Civil, formado em 2013 pela Escola Politécnica da USP, estudante de mestrado em engenharia civil na mesma instituição desde 2022. Trabalha com dimensionamento, modelagem hidráulica, projeto e análise de custos de sistemas de saneamento (reservatórios, adutoras, redes de água e esgoto).

Renato Carlos Zambon⁽²⁾

Professor Associado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da USP

Endereço⁽¹⁾: Av. São João, 2168, AP 61 - Santa Cecília – São Paulo - SP - CEP: 01211-002 - Brasil - Tel: +55 (11) 97124-3824 - e-mail: gui_batista350@hotmail.com

RESUMO

Nas tubulações sob pressão com maiores diâmetros nos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) e Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES), emprega-se principalmente tubulações de ferro fundido, aço e, mais recentemente, polietileno de alta densidade (PEAD). No Brasil, o uso de tubulações de PEAD tem sido difundido nas últimas décadas, no entanto, ainda não se pode dizer que se trata de um material de uso consolidado nos SAA e SES a nível nacional. Transitórios hidráulicos devem ser estudados no projeto e operação dos sistemas de adução de água e recalque de esgoto, muitas vezes exigindo o dimensionamento de dispositivos de proteção contra sobrepressão elevada e subpressão. O PEAD possui características muito distintas dos demais materiais utilizados em SAA e SES como o ferro fundido ou o aço, como a baixa celeridade de propagação das ondas de variação das pressões. Tal fato resulta em diferentes sistemas de proteção mais indicados. Utilizando o método das características e considerando os principais sistemas de proteção contra transitórios hidráulicos, esse trabalho explora estudos de caso de sistemas de adução onde são comparados os tipos e dimensões das proteções mais adequadas com alternativas em PEAD e ferro fundido para as tubulações.

PALAVRAS-CHAVE: adutoras, transitórios hidráulicos, PEAD.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de condução de água dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) e de Esgotamento Sanitário (SES) são compostos principalmente por tubos cilíndricos com água pressurizada ou sob pressão atmosférica. Para o caso dos tubos cilíndricos com água pressurizada citam-se as adutoras, redes de distribuição de água e linhas de recalque de esgoto.

Na maior parte do tempo o escoamento de água nas tubulações pressurizadas pode ser considerado em regime permanente, ou seja, sem variações bruscas de vazões ou pressões do fluido em seções transversais distintas da tubulação ao longo do seu eixo. No entanto, quando há interferência de um elemento externo acoplado à tubulação, como a abertura/fechamento de válvulas ou a partida/parada de conjuntos elevatórios, o regime de escoamento torna-se variável e há a ocorrência de transitórios hidráulicos ao longo da tubulação.

Os transitórios hidráulicos são regimes de escoamento variável que ocorrem durante a passagem de um regime permanente para outro regime permanente. Ele ocorre quando há uma perturbação no sistema que provoca uma variação na velocidade do escoamento do fluido no interior da tubulação. A perturbação dá origem a um regime não permanente que, posteriormente, passa para um novo estado de permanência (FRANÇA, 2006).

Durante o transitório hidráulico, as variações na velocidade de escoamento do fluido causam ondas de sobrepressão e subpressão que se propagam ao longo de toda a extensão da tubulação, submetendo a canalização e os equipamentos do sistema a esforços extraordinários. A propagação dessas ondas causa ruídos que se assemelham a pancadas, motivo pelo qual o transitório hidráulico também é conhecido como Golpe de Ariete (FRANÇA, 2006).

Os esforços causados pelas ondas de sobrepressão e subpressão podem exceder os limites suportados pela tubulação e/ou pelos equipamentos do sistema e, em casos extremos, causar a ruptura das estruturas e interrupções no seu funcionamento.

Por esse motivo, é fundamental que os transitórios hidráulicos sejam devidamente estudados no projeto e operação dos sistemas de adução de água. O estudo dos transitórios hidráulicos serve de base para o dimensionamento de dispositivos de proteção capazes de controlar adequadamente o efeito das sobrepressões e subpressões, garantindo segurança na operação dos sistemas.

Os transitórios hidráulicos ocorrem em todo tipo de tubulação e seus efeitos dependem de parâmetros relacionados à geometria e material da tubulação, duração da interferência externa sobre o sistema, equipamentos instalados ao longo da linha, existência e características de sistemas de proteção.

Nas tubulações sob pressão com maiores diâmetros nos SAA e SES, emprega-se principalmente tubulações de ferro fundido, aço e, mais recentemente, polietileno de alta densidade (PEAD). No presente estudo pretende-se abordar casos de adutoras constituídas de PEAD.

Uma vez que o efeito dos transitórios hidráulicos depende, entre outros parâmetros, do material constituinte da tubulação, o problema que se vislumbra ao conceber adutoras de PEAD é: como escolher e dimensionar o sistema de proteção para transitórios hidráulicos mais adequado para uma adutora de PEAD?

O problema citado acima possui relevância para a concepção e projeto de sistemas de adução de água que utilizam tubulações de PEAD uma vez que as características físicas das resinas plásticas usadas na confecção dessas tubulações conferem ao material um comportamento viscoelástico. A viscoelasticidade do material altera a resposta que ele fornece às solicitações a que é submetido, gerando maior dissipação de energia em comparação com outros materiais de comportamento elástico (ANDRADE; RACHID; TIJSSELING, 2022).

Em comparação com as tubulações metálicas, nas tubulações de PEAD, as ondas de sobrepressão e subpressão possuem velocidades ou celeridades muito menores de propagação. Como consequência, nas tubulações de PEAD, o tempo de propagação dessas ondas resulta algumas vezes maior. Por outro lado, a variação de pressão provocada por uma mesma variação de velocidades é muito inferior pois ela é diretamente proporcional à celeridade.

Em função do comportamento das tubulações de PEAD durante a ocorrência dos transitórios hidráulicos, o sistema de proteção mais adequado a ser previsto para esse caso pode ser diferente do que aquele previsto para uma adutora similar constituída de materiais com maior rigidez tais como ferro fundido ou aço.

Menciona-se ainda o fato de que o módulo de elasticidade dos materiais plásticos varia em função do tempo da solicitação, sendo maior para solicitações de curta duração e menor para solicitações de longa duração (ABPE, 2020). A variação do módulo de elasticidade não é levada em consideração nas simulações feitas pelos softwares de estudo de transitórios hidráulicos atualmente disponíveis no mercado. Na prática, utiliza-se o módulo de elasticidade correspondente às solicitações de curta duração na análise de transitórios hidráulicos, que resulta valores maiores mas ainda muito inferiores aos de materiais metálicos.

Dessa forma, a necessidade, escolha e dimensionamento do sistema de proteção para transitórios hidráulicos devem ser adaptados ao material constituinte da tubulação, considerando a espessura e suas demais características físicas.

OBJETIVO(S)

O presente trabalho pretende analisar comparativamente um conjunto de casos de sistemas de proteção para transitórios hidráulicos em tubulações de PEAD e de ferro fundido, com o objetivo de compará-los e verificar a sua adequação aos diferentes tipos de materiais.

Não será objeto do presente trabalho o estudo do módulo de elasticidade mais adequado aos tubos plásticos para os casos estudados. Também não fará parte desse trabalho o estudo da adequação dos softwares disponíveis atualmente no mercado para a simulação de transitórios hidráulicos em tubos plásticos. Tampouco

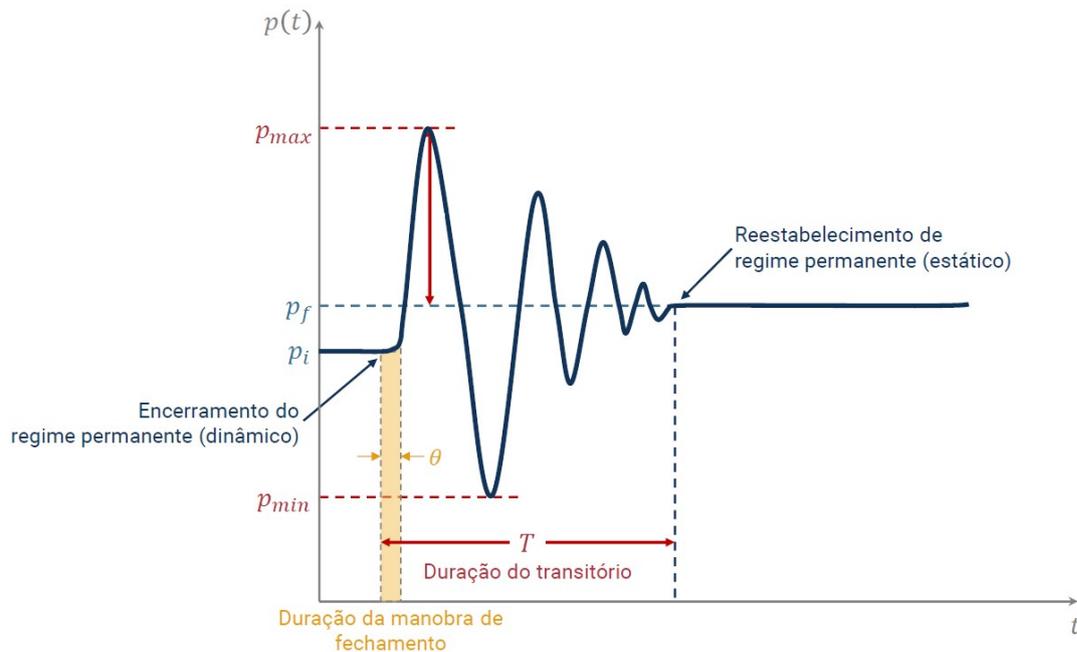
será estudado o desenvolvimento de novas ferramentas que possam ser mais adequadas à simulação de transitórios hidráulicos em tubos com materiais viscoelásticos.

COMPORTAMENTO DE TUBULAÇÕES PLÁSTICAS SUJEITAS A TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

Em suma, durante o transatório hidráulico, a tubulação é submetida a vários ciclos de tensões de sobrepressão seguidas de tensões de subpressão. Em um sistema real, essas tensões são atenuadas a cada ciclo devido à dissipação de energia no sistema, fazendo com que o módulo da variação das tensões diminua gradativamente até atingir o valor nulo. Consequentemente, a variação das velocidades de escoamento do fluido no interior da tubulação também diminui gradativamente até atingir um novo regime permanente.

Quando a variação das velocidades de escoamento dentro da tubulação cessa, se estabelece o regime permanente estático e encerra-se o transatório hidráulico. Nesse momento, a tubulação é solicitada apenas pela pressão estática do fluido no seu interior, não havendo acréscimos ou variações nos módulos dessa grandeza. A Figura 1 apresenta a variação da pressão sobre a tubulação do sistema usado como exemplo nesse capítulo durante a ocorrência de um transatório hidráulico.

Figura 1 – Variação da Pressão decorrente de um Transatório Hidráulico



Fonte: MARTINS; LOFRANO (2022)

As ondas de compressão e decompressão descritas acima são o principal motivo para a ocorrência de fissuras e colapso das tubulações durante um transatório hidráulico. Em tubulações de materiais plásticos, tais como as de PEAD, há ainda um fator agravante relacionado à ocorrência de fadiga devido ao caráter periódico das tensões decorrentes do transatório hidráulico.

As tubulações plásticas tais como o PVC, o PEAD, entre outras, são fabricadas com polímeros que lhes conferem propriedades viscoelásticas. Os materiais viscoelásticos apresentam um comportamento distinto que difere dos materiais elásticos como o ferro fundido ou aço. A resposta às solicitações mecânicas que são submetidos depende do tempo de duração da solicitação.

Ao serem solicitados, esses materiais descrevem uma resposta elástica instantânea seguida de uma resposta viscoelástica assintótica. Ou seja, para solicitações de longa duração, esses materiais apresentam uma curva de tensão-deformação próxima de uma reta horizontal (ANDRADE; RACHID; TIJSSELING, 2022).

Esse comportamento pode ser caracterizado como uma fluência do material polimérico que compõe as paredes dos tubos. COVAS et al. (2004) ainda evidenciaram em seus estudos que ao diminuírem as solicitações sobre as paredes do tubo, o material plástico tende a recuperar a sua forma original, porém a curva de tensão-deformação descreve uma trajetória diferente daquela descrita durante o aumento da solicitação.

Conforme pode-se observar na Figura 2, durante um transitório hidráulico, o tubo de PEAD apresenta uma trajetória diferente da curva de tensão-deformação para cada ciclo do transitório. Tal fato caracteriza o retardo na deformação devido ao material viscoelástico da tubulação.

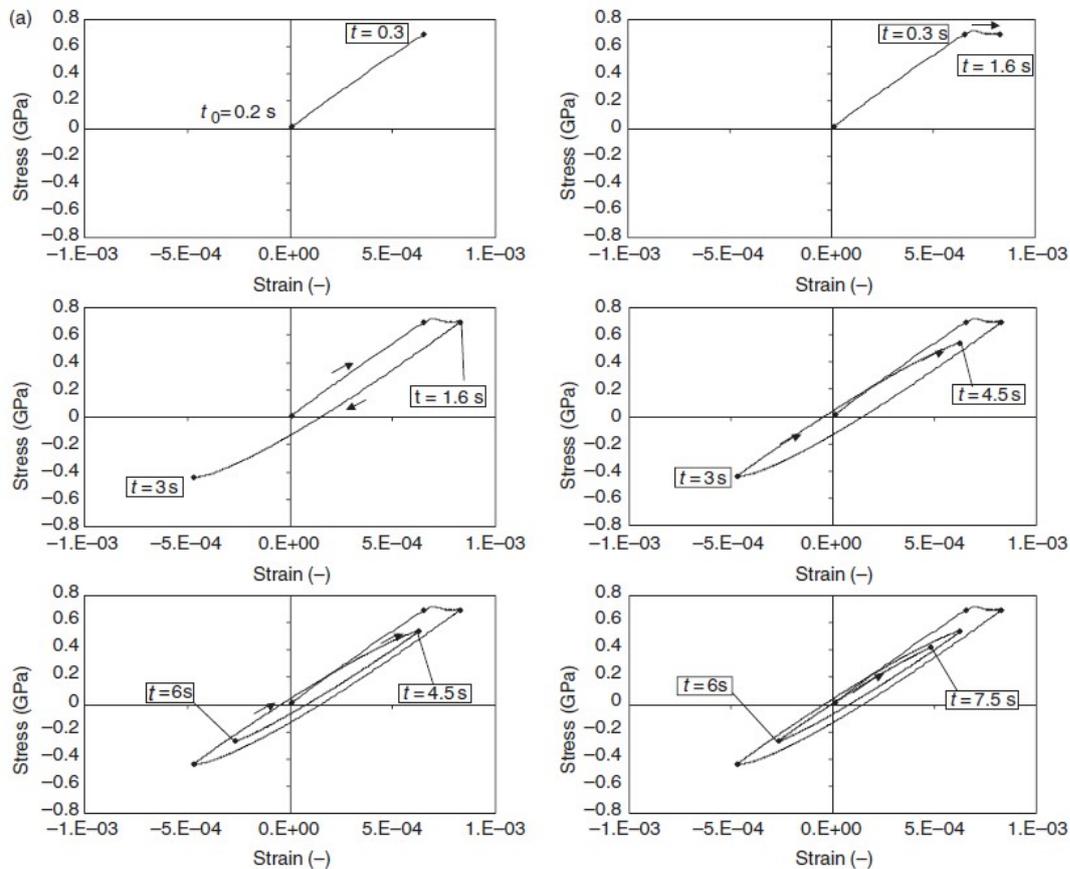
Outra diferença ocorre na dissipação de energia durante o transitório hidráulico. Durante o transitório uma parcela da energia é dissipada pelo fluido, quando entra em atrito com a parede da tubulação; e outra parte é dissipada pela tubulação ao resistir às solicitações mecânicas decorrentes da variação de pressão durante o transitório.

Quando comparado com as tubulações de materiais elásticos, as tubulações plásticas geram uma maior dissipação de energia nos primeiros instantes do transitório hidráulico, o que causa uma maior atenuação das pressões ao longo de toda a extensão da tubulação. A maior taxa de dissipação de energia conduz a uma maior queda de velocidade de escoamento do fluido e menor duração do evento transitórios (ANDRADE; RACHID; TIJSSELING, 2022).

Esse comportamento dependente do tempo geralmente não é levado em consideração durante o dimensionamento e estudo de transitórios hidráulicos em tubulações plásticas. Segundo COVAS et al. (2004), ainda que os ensaios de laboratório para determinação do comportamento viscoelástico do PEAD sejam importantes para a determinação das propriedades do material, tais ensaios não correspondem necessariamente ao comportamento de uma tubulação de PEAD real.

Isso se deve principalmente às demais características que deverão ter influência no comportamento de um sistema adutor de PEAD, tais como variabilidade das propriedades dos materiais conforme fabricantes, transporte, condições de armazenamento, etc; anisotropia do material; forma de ancoragem; frequência e duração das cargas e relaxamento do tubo após ser solicitado.

Figura 2 – Evolução das Curvas de Tensão-Deformação para um Tubo de PEAD submetido a um Transitório Hidráulico



Fonte: COVAS et al. (2004)

EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO DOS TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

O equacionamento dos transitórios hidráulicos tem o objetivo de determinar como se comporta, ao longo de cada ponto da tubulação (x) e de cada instante de tempo (t), a carga hidráulica (H) e a vazão (Q). Ou seja, pretende-se determinar as incógnitas $H(x, t)$ e $Q(x, t)$.

Para a determinação dessas incógnitas serão usados os dois princípios fundamentais elencados a seguir:

- Conservação da quantidade de movimento.
- Conservação da massa.

Esses princípios serão fundamentais para a definição das equações que regem os transitórios hidráulicos, a saber:

- Equação da Continuidade.
- Equação da Quantidade de Movimento.

Para a aplicação dos princípios acima, serão ainda consideradas as premissas abaixo acerca do sistema estudado (CHAUDHRY, 2014).

- O fluido é compressível.
- As paredes da tubulação são compostas por material linearmente elástico.
- O escoamento é unidimensional e a distribuição de velocidades e de pressões é uniforme em uma dada seção transversal da tubulação.
- A velocidade radial do fluido devido à expansão radial da tubulação é desprezível.
- A tubulação possui juntas de expansão ao longo do seu comprimento.

A equação (1) é uma forma simplificada da Equação da Continuidade apresentada por CHAUDHRY (2014). Já a equação (2) é uma forma simplificada da Equação da Quantidade de Movimento apresentada pelo mesmo autor. Ambas as equações são válidas para sistemas hidráulicos conforme as premissas apresentadas acima. Tais premissas abrangem a maioria dos sistemas hidráulicos típicos usados no transporte de fluidos.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{equação (1)}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad \text{equação (2)}$$

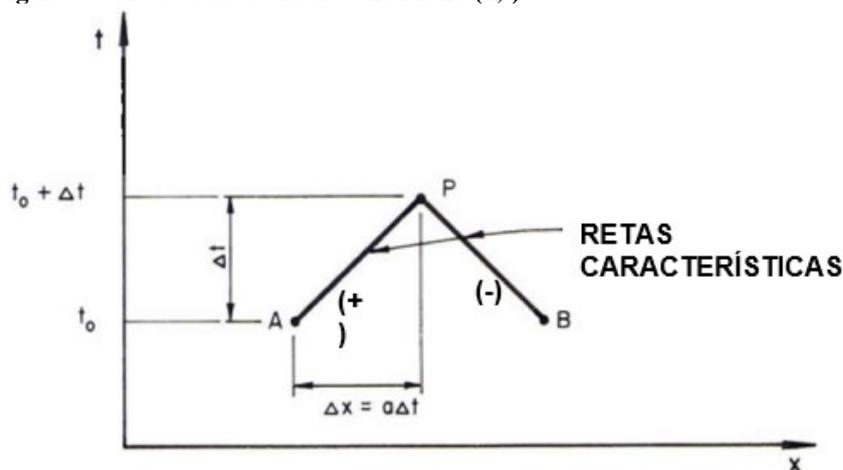
MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

O Método das Características é um método numérico atualmente amplamente usado para a resolução das equações que regem os escoamentos transitórios em condutos forçados. Trata-se de um método particularmente adequado para a resolução de sistemas de escoamentos transitórios unidimensionais, principalmente nos casos em que a celeridade da onda é constante (CHAUDHRY, 2014).

O Método das Características atualmente configura como um dos métodos numéricos recomendados pela norma brasileira NBR 12215-1 que trata sobre o projeto de adutoras de água e condutos forçados e que está em vigência atualmente. De acordo com a norma, o estudo dos transitórios hidráulicos deve ser realizado com a aplicação de software específico que use algum dos métodos numéricos a seguir: das características, métodos das ondas planas, método de diferenças finitas, método de elementos finitos (ABNT, 2017).

A partir do Método das Características, partindo-se de dois pontos A e B cujas características $H(x, t)$ e $Q(x, t)$ são conhecidas, é possível determinar as características de um terceiro ponto, P, intermediário entre A e B, no instante $t = t_0 + \Delta t$. As retas que ligam os pontos A e B ao ponto P representam o caminhamento de uma perturbação no plano (x,t) e são chamadas de retas características. A Figura 3 apresenta uma exemplificação do método.

Figura 3 – Retas Características no Plano (x,t)



Fonte: Adaptado de CHAUDHRY (2014)

Uma vez que todos os valores de QP e HP para o instante $t = t_0 + \Delta t$ forem determinados, é possível aplicar o método novamente para determinar os valores dessas incógnitas para o próximo passo, ou seja os valores de QP e HP para o instante $t = t_0 + 2\Delta t$. Ao aplicar o método sucessivamente, determina-se os valores da carga e da vazão, ao longo de toda a tubulação, durante diversos passos de tempo até se cobrir todo o período de estudo (CHAUDHRY, 2014).

METODOLOGIA UTILIZADA

O presente trabalho traz uma análise comparativa dos sistemas de proteção para transitórios hidráulicos em tubulações de PEAD e ferro fundido. Para tanto são analisados três estudos de casos reais de tubulações projetadas para o qual foi feita a seleção e o dimensionamento dos sistemas de proteção considerando o emprego de ferro fundido e PEAD para a tubulação.

O comportamento hidráulico das adutoras foi estudado por meio do software Hammer, em sua versão educacional. Desenvolvido pela Bentley, trata-se de um software especializado no cálculo de transitórios hidráulicos em condutos forçados, e que é bastante usado por estudantes e profissionais da área no mundo todo.

Os resultados dos sistemas modelados no Hammer já foram validados e comprovados em diversos projetos espalhados pelo mundo. O motor de cálculo usado pelo software é baseado no Método das Características, um método que traz bons resultados para estudos em transitórios hidráulicos.

Foi realizada a modelagem e simulação das adutoras no Hammer considerando as suas características físicas, alterando-se apenas o material das mesmas. Foi considerado o escoamento por bombeamento entre os pontos de montante e de jusante.

As simulações foram realizadas primeiramente para o sistema sem dispositivos de proteção, para o caso de regime permanente e para partidas e paradas bruscas da EEA, de forma a simular situações de quedas de energia. Ao término das simulações, os resultados obtidos foram usados para analisar se a troca do material traria vantagens quanto ao sistema de proteção para os transitórios hidráulicos e para a operação do sistema como um todo.

CASO 1

Trata-se de uma Adutora de Água Bruta (AAB1) executada com tubulação em PE80 e chaminé de equilíbrio no ponto alto intermediário do perfil. Os dados gerais de projeto da AAB considerados são os seguintes:

- Adução de água bruta a temperatura ambiente;
- Vazão: 197 l/s;
- Comprimento: 3.050 m;
- Início em: $Z = 10,0$ m;
- Final em: $Z = 49,0$ m (calha Parshall na ETA);
- Tubulação PE80 DE450 mm no trecho inicial até a montante da chaminé de equilíbrio (800 m) e PE80 DE400 mm no trecho após a chaminé até o final da AAB (2.250 m).

A Figura 4 apresenta o perfil e a envoltória das linhas piezométricas da AAB1. Em um primeiro momento foi feita a simulação da adutora estudada sem nenhum sistema de proteção para transitórios. A seguir estão os parâmetros usados para a simulação do sistema estudado:

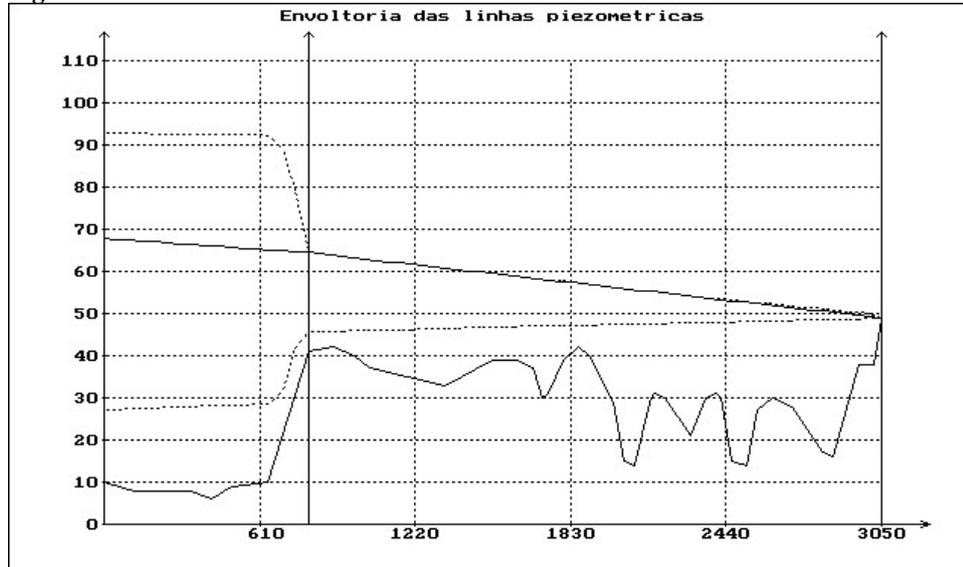
- Barrilete e Chegada na ETA: ferro fundido DN 450, Ponta e bolsa, K7, espessura da parede de 6,7 mm, revestimento de 5,0 mm, DI 456,60 mm.
- Linha de Recalque com dois trechos:
 - Trecho 1 – até a chaminé de equilíbrio: PEAD PE80, SDR17, PN 8, DE450, DI 396,60 mm.
 - Trecho 2 – após a chaminé de equilíbrio: PEAD PE80, SDR26, PN 5, DE400, DI 369,40 mm.
- Desnível Geométrico: 39 m.
- Perda de Carga no Trecho: 19 m (calculado no modelo hidráulico).
- Bombas: modelo Xylem NSCF 200-400; 1790 rpm. Ponto de Operação 198 l/s; 58 mca. Rendimento 84%. rotor Φ 362. BEP (Best Efficiency Point): 203 l/s, 57 mca, eficiência de 85%. Potência de 180,5 HP (135,0 kW) (XYLEM, 2024). As curvas da bomba escolhida estão apresentadas na Figura 5.

Em um segundo momento foi feita a simulação do sistema com a adoção de uma chaminé de equilíbrio na posição $X = 800$ m. A seguir são apresentadas as características da chaminé:

- Diâmetro da chaminé: 2,0 m;
- Altura: 30 m;

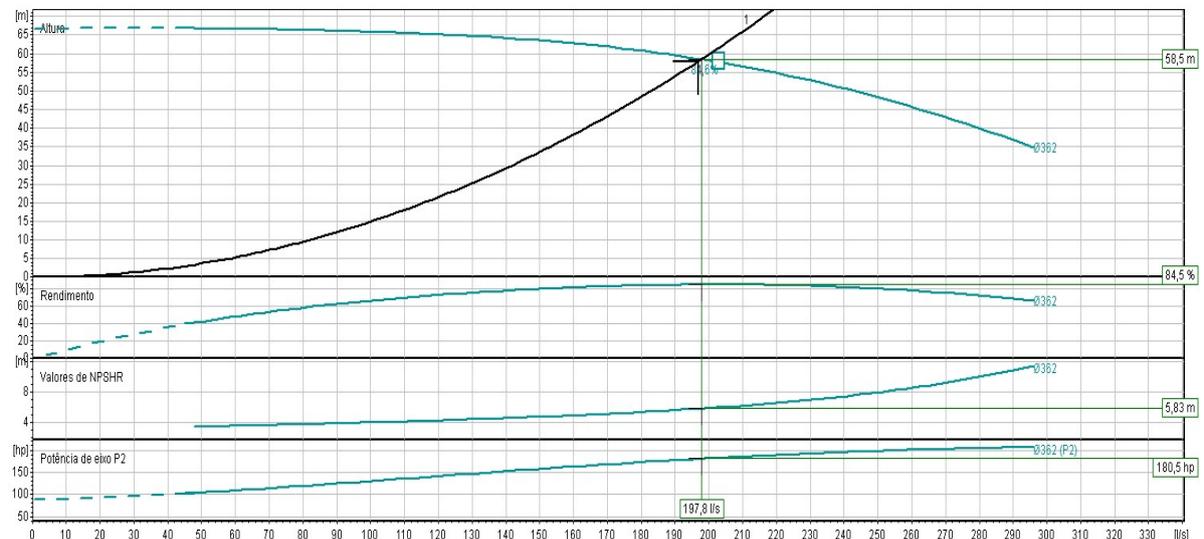
- Cota da base: 41,0 m;
- Cota de topo: 71,0 m;
- Volume útil da chaminé: 94,2 m³;
- Diâmetro do ramal de alimentação da chaminé: 450 mm.

Figura 4 – Perfil e Envoltória das Linhas Piezométricas da AAB1



Fonte: Acervo Interno Prof. ZAMBON (2023)

Figura 5 – Curva de Performance das Bombas Xylem NSCF 200-400



Fonte: XYLEM (2024)

A perda de carga na entrada da chaminé foi calculada com a ajuda da equação (3). Foi adotado o valor de K de 1,30 para tê de saída lateral (PORTO, 2006). A velocidade V foi extraída do modelo hidráulico e tem valor de 1,53 m/s. A partir desses dados, o valor da perda de carga foi de $h_f = 0,16$ m.

$$h_f = \frac{KV^2}{2g}$$

equação (3)

Por fim, foi feita uma terceira simulação onde a chaminé foi mantida e a tubulação foi substituída por uma tubulação de ferro fundido com dois trechos com as seguintes características:

- Trecho 1 – até a chaminé de equilíbrio: FoFo DN450, Ponta e Bolsa, K7, espessura da parede de 6,7 mm, espessura do revestimento de 5,0 mm, DI 456,60 mm.
- Trecho 2 – após a chaminé de equilíbrio: FoFo DN350, Ponta e Bolsa, K7, espessura da parede de 5,9 mm, espessura do revestimento de 5,0 mm, DI 356,20 mm.

CASO 2

Trata-se de uma Adutora de Água Bruta (AAB2) executada com tubulação em PE80, dois TAUs em pontos altos intermediários do perfil e um volante de inércia na EEA. Os dados gerais de projeto da AAB considerados são os seguintes:

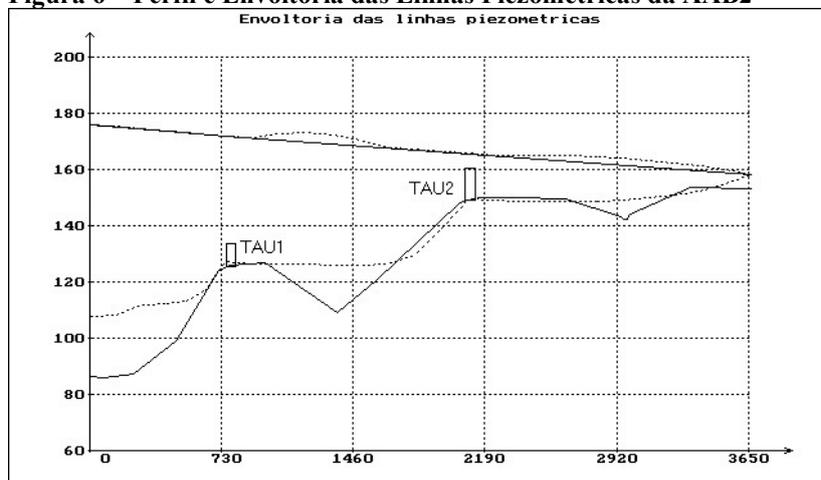
- Adução de água bruta em temperatura ambiente;
- Vazão: 500 l/s;
- Comprimento: 3.666 m;
- Captação em represa: Z = 86,5 m;
- Final na ETA: Z = 153,3 m e NA = 5,0 m;
- Tubulação PE80 DE630 mm.

Quanto ao efeito dos transitórios na AAB2, para evitar a elevada subpressão que ocorreria em maior parte da linha, são indicados no projeto original dois TAU's nos pontos altos intermediários das posições X1 = 750 m e X2 = 2.100 m conforme indicados no gráfico do perfil apresentado na Figura 6.

Em um primeiro momento foi feita a simulação da adutora estudada sem nenhum sistema de proteção para transitórios. A seguir estão os parâmetros usados para a simulação do sistema estudado:

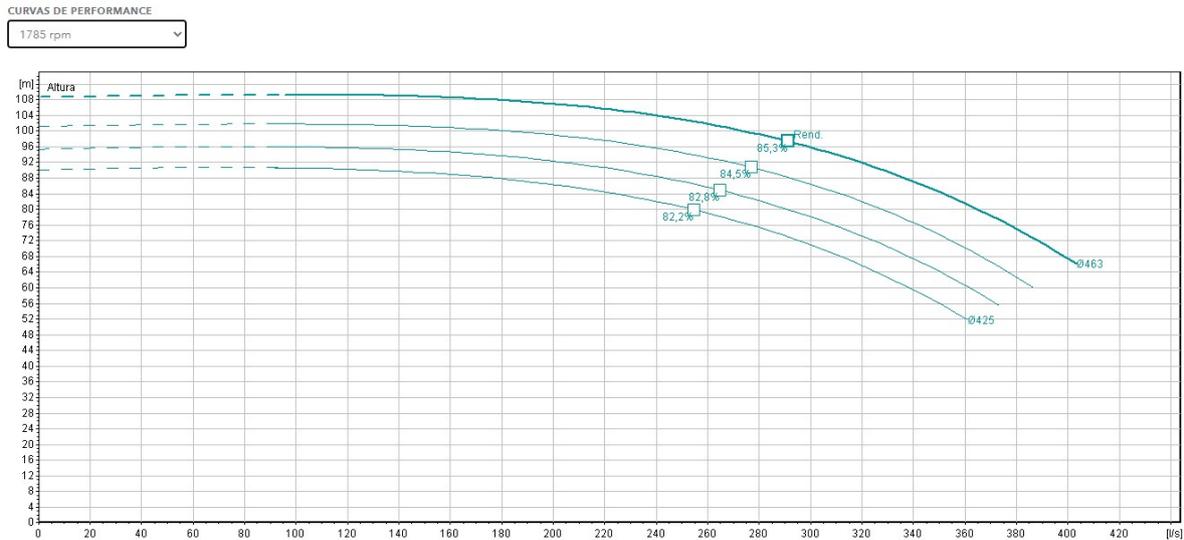
- Barrilete e Chegada na ETA: ferro fundido DN 600, Ponta e bolsa, K7, espessura da parede de 7,7 mm, revestimento de 5,0 mm, DI 609,60 mm.
- Linha de Recalque: PEAD PE80, DE630 em três trechos conforme segue:
 - Trecho 1 – X de 0,00 a 476,00 m: SDR13,6, PN 10, DI 537,40 mm, espessura da parede de 46,3 mm;
 - Trecho 2 – X de 476,00 a 750,00 m (TAU-1): SDR17, PN 8, DI 555,20 mm, espessura da parede de 37,4 mm;
 - Trecho 3 – X de 750,00 a 3666,00 m: SDR21, PN 6, DI 570,00 mm, espessura da parede de 30,0 mm.
- Desnível Geométrico: 72 m.
- Perda de Carga no Trecho: 20 m (calculado no modelo hidráulico).
- Bombas: modelo Xylem NSC 250-500; 1785 rpm. Ponto de Operação 280 l/s; 98 mca. Rendimento 85%. rotor Φ 463. BEP (Best Efficiency Point): 292 l/s, 97 mca, eficiência de 85,3%. Potência de 503,54 CV (370,35 kW) (XYLEM, 2024). Adotado 2 bombas em paralelo. As curvas da bomba escolhida estão apresentadas na Figura 7.

Figura 6 – Perfil e Envoltória das Linhas Piezométricas da AAB2



Fonte: Acervo Interno Prof. ZAMBON (2023)

Figura 7 – Curva de Performance das Bombas Xylem NSC 250-500



Fonte: XYLEM (2024)

Em um segundo momento foi feita a simulação do sistema com a adoção de dois TAUs nas posições indicadas no projeto original, conforme descrito acima, além de um volante de inércia na EEA. A seguir são apresentadas as características dos dois TAUs.

TAU1:

- Posição x: 750 m;
- Diâmetro da derivação: 300 mm;
- Altura útil do tanque: 4,0 m;
- Diâmetro do tanque: 1000 mm;
- Área útil do tanque: 0,78 m²;
- Volume útil do tanque: 3,14 m³;
- Diâmetro do ramal de realimentação: 63 mm.

TAU2:

- Posição x: 2.100 m;
- Diâmetro da derivação: 500 mm;
- Altura útil do tanque: 6,0 m;
- Diâmetro do tanque: 3000 mm;
- Área útil do tanque: 7,07 m²;
- Volume útil do tanque: 42,41 m³;
- Diâmetro do ramal de realimentação: 63 mm.

O volante de inércia foi adotado de forma que a inércia do conjunto moto-bomba de cada EEA fique em 50 kg.m². A perda de carga na entrada dos TAUs foi calculada com a ajuda da equação (3). Foi adotado o valor de K de 1,30 para tê de saída lateral (PORTO, 2006). A velocidade V foi extraída do modelo hidráulico e tem valor de 2,58 m/s. A partir desses dados, o valor da perda de carga foi de $h_f = 0,44$ m.

Por fim, foi feita uma terceira simulação onde os TAUs e o volante de inércia foram mantidos e a tubulação foi substituída por uma tubulação de ferro fundido com as seguintes características: DN600, Ponta e Bolsa, K7, espessura da parede de 7,7 mm, revestimento de 5,0 mm, DI 609,60 mm.

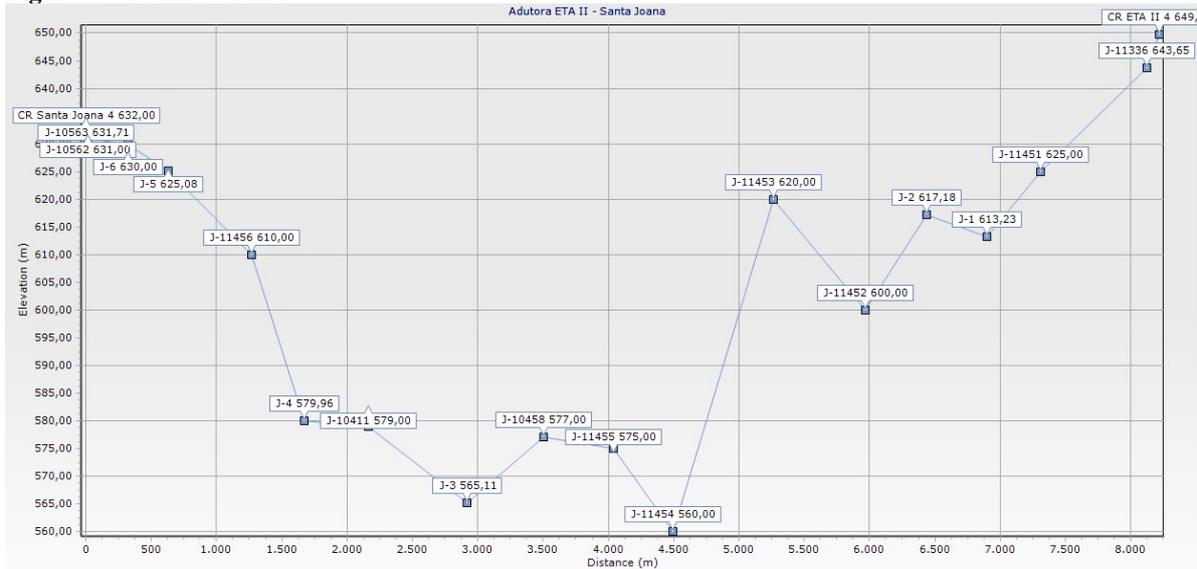
CASO 3

Trata-se de uma Adutora de Água Tratada (AAT) fictícia com tubulação em PE100 usada como linha de recalque entre dois centros de reservação. Para proteção dos transitórios optou-se por um volante de inércia na

EEA. O perfil da AAT é apresentado na Figura 8. Os dados gerais de projeto da AAT considerados são os seguintes:

- Adução de água tratada em temperatura ambiente;
- Vazão: 300 l/s;
- Comprimento: 8.500 m;
- Cota do reservatório de montante: $Z = 630$ m e $NA = 5,0$ m;
- Cota do reservatório de jusante: $Z = 650$ m e $NA = 9,0$ m;
- Tubulação PE100 DE560 mm.

Figura 8 – Perfil da AAT



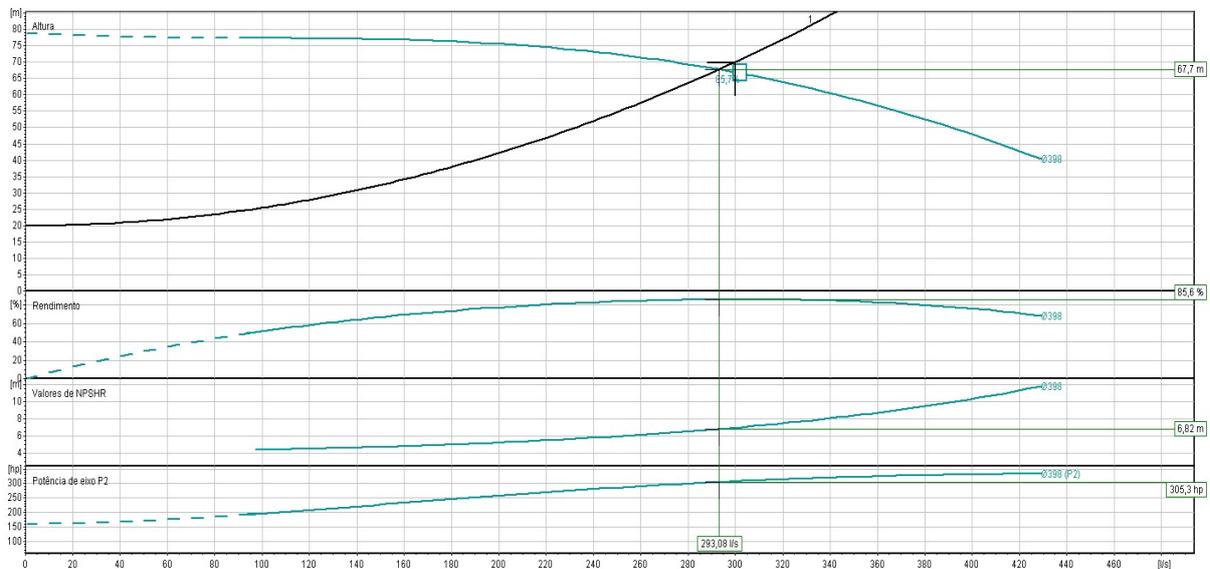
Fonte: Elaboração Própria (2024)

Em um primeiro momento foi feita a simulação da adutora estudada sem nenhum sistema de proteção para transitórios. A seguir estão os parâmetros usados para a simulação do sistema estudado:

- Barrilete e Chegada no reservatório de jusante: ferro fundido DN 500, Ponta e bolsa, K7, espessura da parede de 7,0 mm, revestimento de 5,0 mm, DI 508,00 mm;
- Linha de Recalque: PEAD PE100, SDR13,6, DE560, DI 477,60 mm, espessura da parede de 41,20 mm;
- Desnível Geométrico: 20 m;
- Perda de Carga no Trecho: 29 m (calculado no modelo hidráulico);
- Bombas: modelo Xylem NSCF 250-400; 1788 rpm. Ponto de Operação 293 l/s; 68 mca. Rendimento 85%. rotor Φ 398. BEP (Best Efficiency Point): 302 l/s, 66 mca, eficiência de 85,7%. Potência de 312,53 CV (229,87 kW) (XYLEM, 2024). As curvas da bomba escolhida estão apresentadas na Figura 9.

Em um segundo momento foi feita a simulação do sistema com a adoção de um volante de inércia na EEA. O volante foi escolhido de forma que a inércia do conjunto moto-bomba da EEA fique em 13 kg.m². Por fim, foi feita uma terceira simulação onde o volante de inércia foi mantido e a tubulação foi substituída por uma tubulação de ferro fundido com as seguintes características: DN500, Ponta e Bolsa, K7, espessura da parede de 7,0 mm, revestimento de 5,0 mm, DI 508,00 mm.

Figura 9 – Curva de Performance das Bombas Xylem NSC 250-400



Fonte: XYLEM (2024)

RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados das simulações do Caso 1 sem nenhum sistema de proteção, com tubo de PEAD e sistema de proteção, e com tubo de ferro fundido e sistema de proteção estão apresentados nas Figura 10, Figura 11 e Figura 12 respectivamente. Analogamente, os resultados das simulações do Caso 2 estão apresentados nas Figura 13, Figura 14 e Figura 15, e por fim, os resultados das simulações do Caso 3 estão apresentados nas Figura 16, Figura 17 e Figura 18.

Nessas figuras, representa-se em verde a altimetria da tubulação; em preto a linha piezométrica durante o regime permanente; em vermelho a linha piezométrica de máximos (envoltória) durante a ocorrência do transitório; e em azul a linha piezométrica de mínimos durante o transitório.

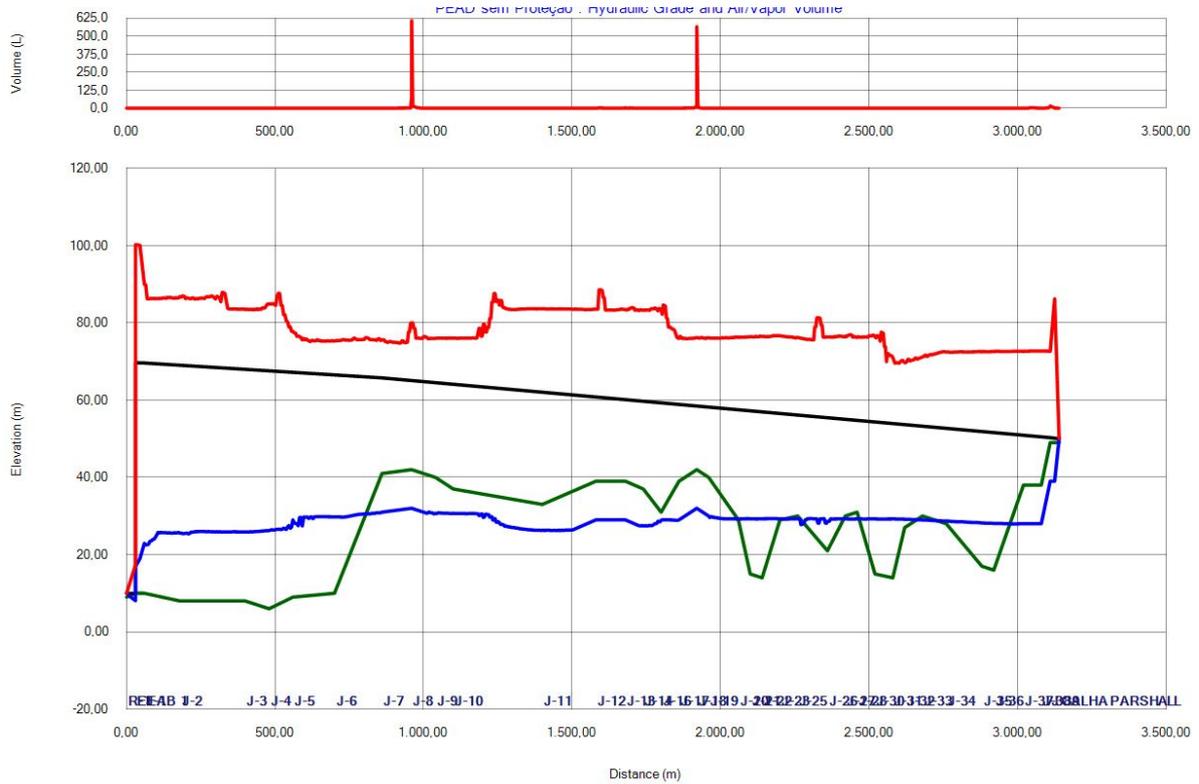
Em alguns gráficos são observadas pequenas instabilidades nas envoltórias, efeito numérico da interpolação do método das características na transição entre trechos de tubos com diferentes características ou na passagem por equipamentos de proteção, mas que não comprometem os resultados gerais obtidos.

Analisando os resultados do Caso 1, observa-se que a introdução da chaminé de equilíbrio resultou na eliminação das pressões negativas e na geração de vapor d'água durante o transitório. Já em relação às cargas máximas, observa-se que elas ficaram atenuadas, principalmente no trecho após a chaminé, no qual a linha piezométrica de máximos fica coincidente com a piezométrica do regime permanente.

Já, ao comparar os resultados da simulação com tubulação de PEAD e ferro fundido, observa-se diferenças mais significativas. Enquanto o trecho após a chaminé permanece com resultados semelhantes, independente do material da adutora, no trecho a montante observa-se uma maior carga piezométrica máxima e menor carga piezométrica mínima na proximidade da EEA, na simulação com ferro fundido.

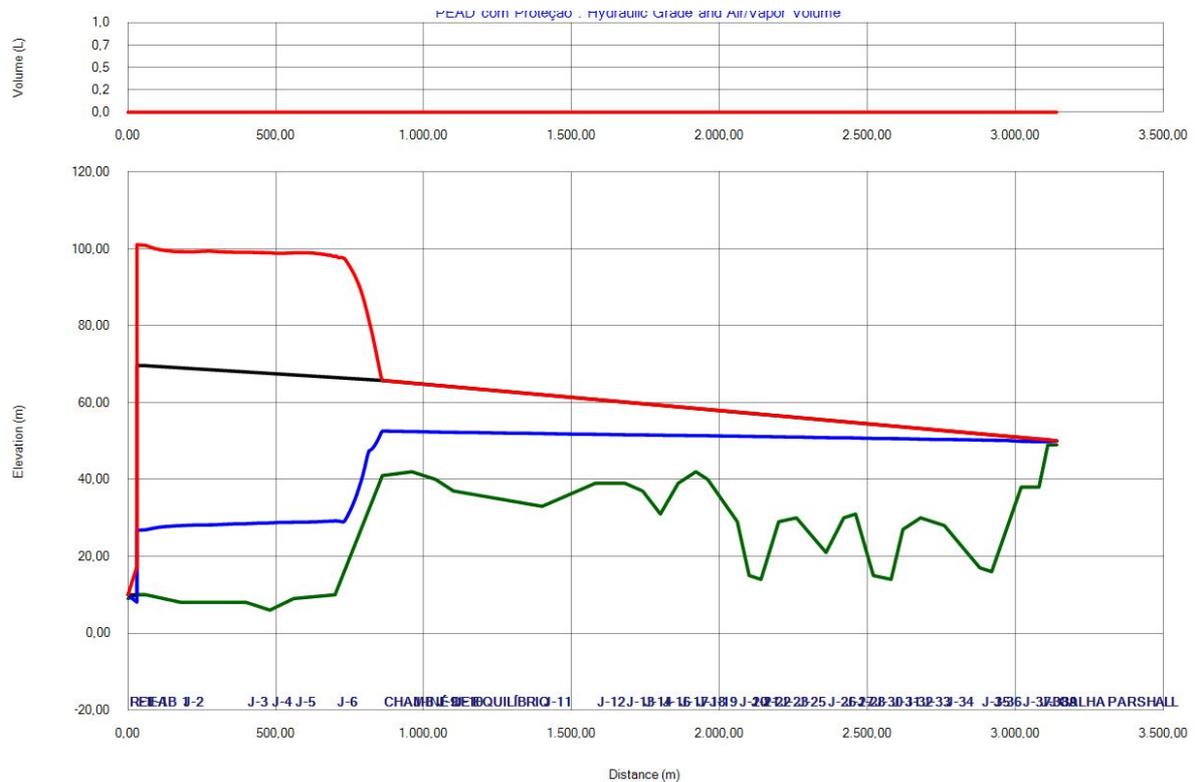
Na simulação com PEAD, a carga piezométrica máxima próximo da EEA resultou em 101 mca, o que representa uma pressão de 90 mca na tubulação. Já na simulação com ferro fundido, a carga máxima piezométrica e a pressão nesse ponto foram de 113 mca e 103 mca respectivamente. Em relação às cargas piezométricas mínimas, nesse mesmo ponto, para a tubulação de PEAD, a carga mínima e a pressão 27 mca e 17 mca respectivamente. Já no teste com ferro fundido, esses valores resultam em 10 mca para a carga mínima e 0 mca para a pressão.

Figura 10 – Caso 1 – Resultados da Simulação da AAB1, sem nenhum Dispositivo de Proteção



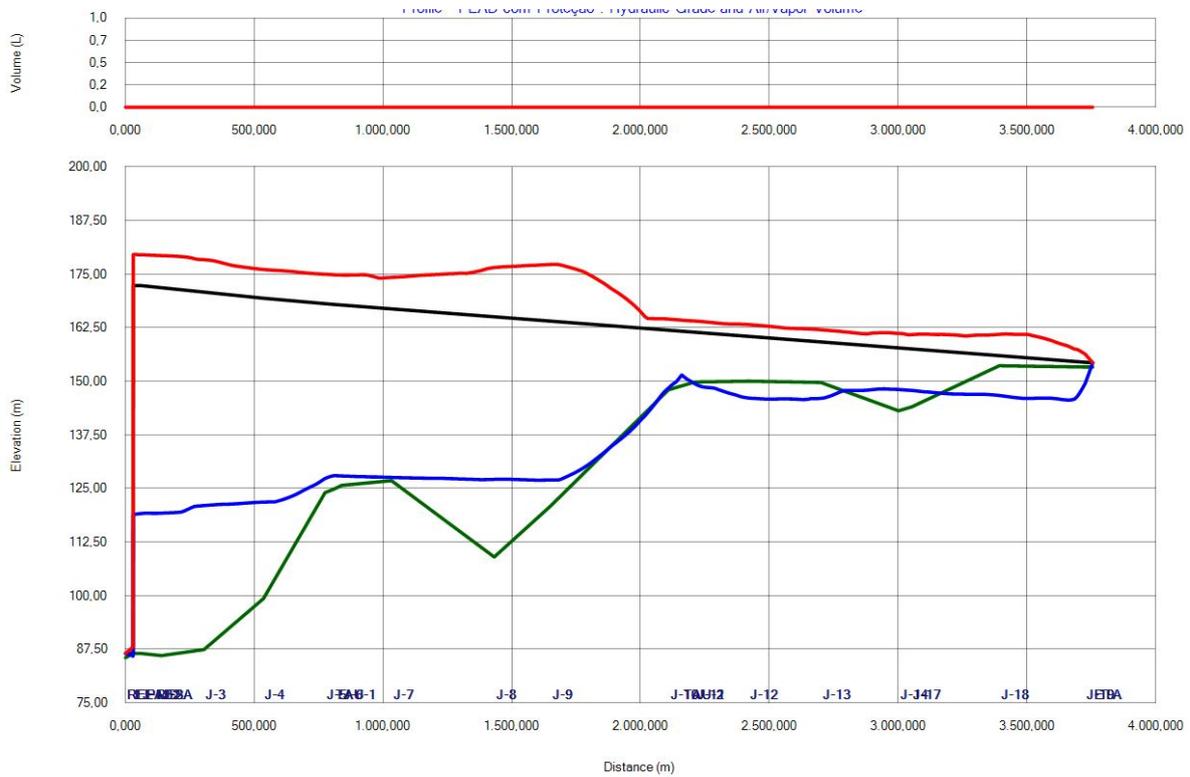
Fonte: Elaboração Própria (2024)

Figura 11 – Caso 1 – Resultados da Simulação da AAB1, em PEAD e com Chaminé de Equilíbrio



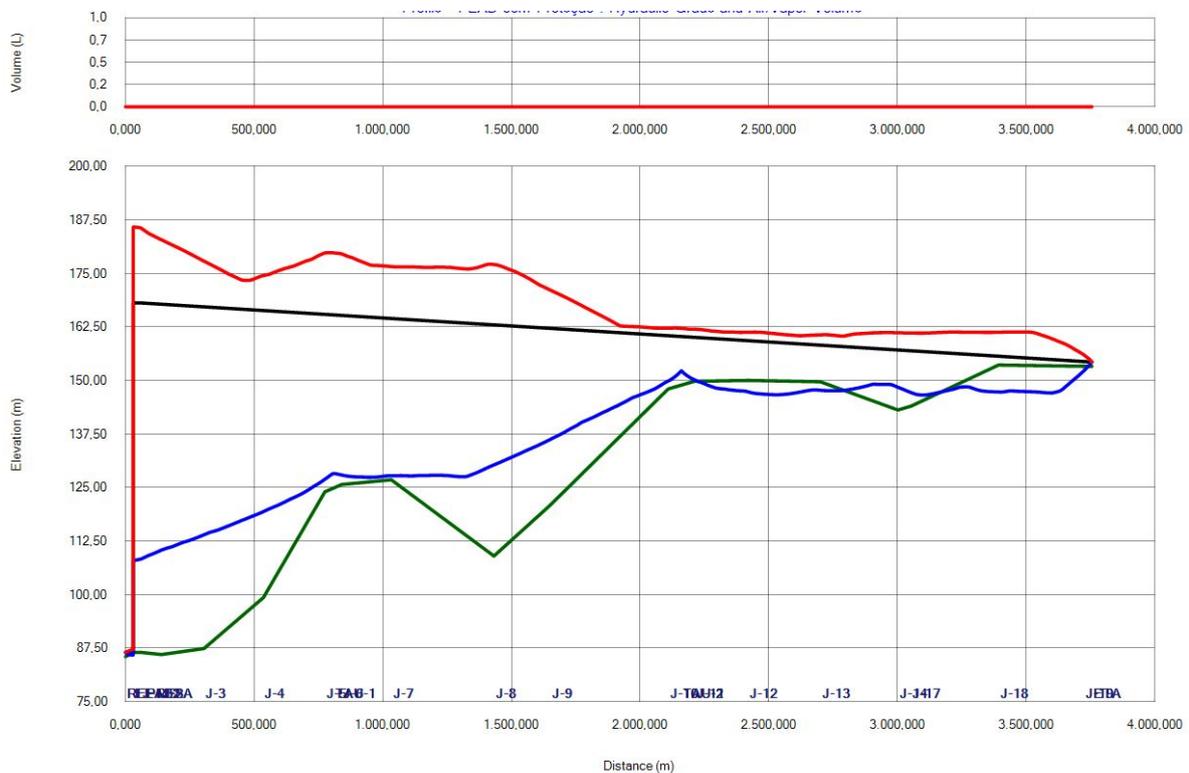
Fonte: Elaboração Própria (2024)

Figura 14 – Caso 2 – Resultados da Simulação da AAB2, em PEAD e com dois TAUs e Volante de Inércia



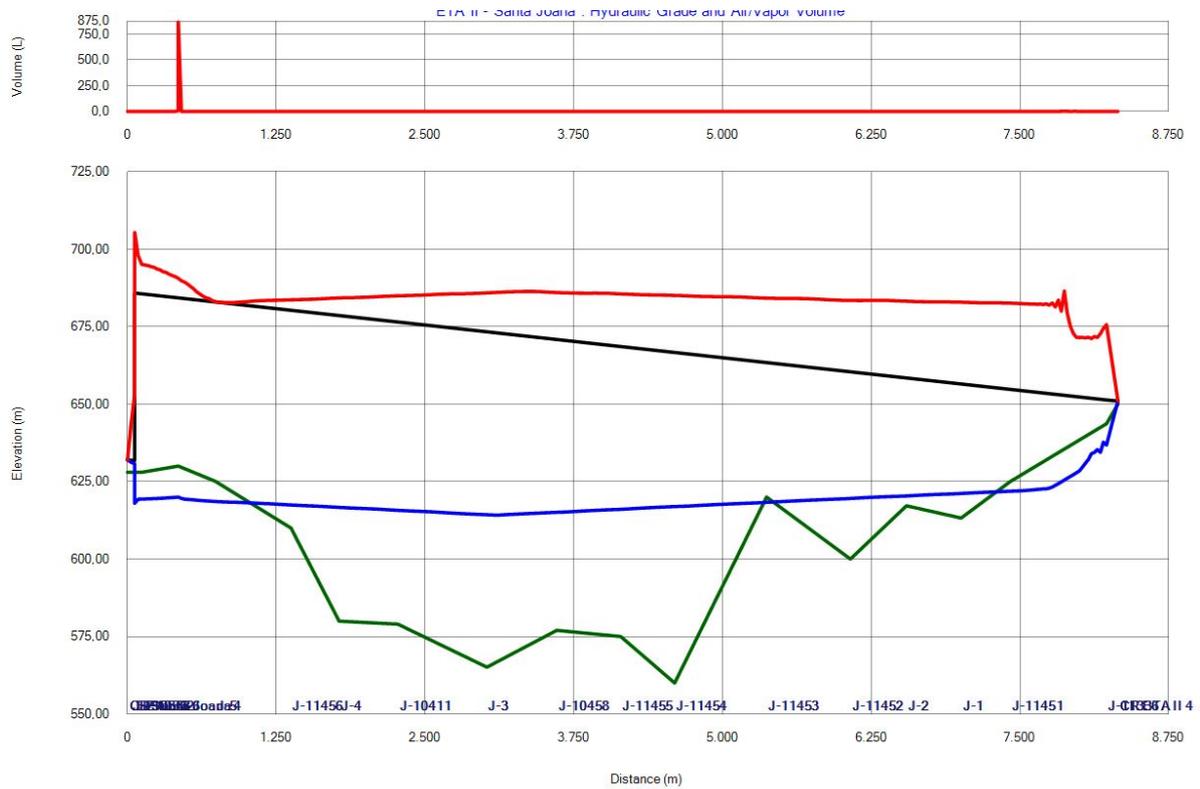
Fonte: Elaboração Própria (2024)

Figura 15 – Caso 2 – Resultados da Simulação da AAB2, em FoFo e com dois TAUs e Volante de Inércia



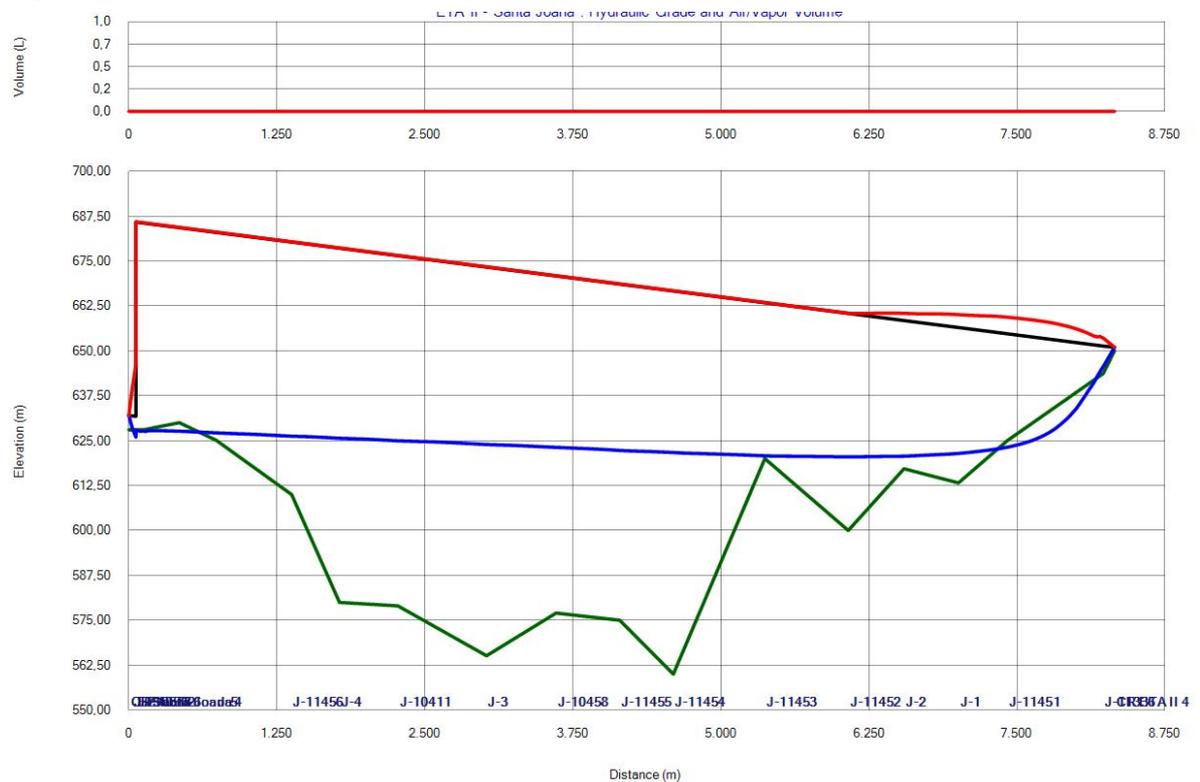
Fonte: Elaboração Própria (2024)

Figura 16 – Caso 3 – Resultados da Simulação da AAT, sem nenhum Dispositivo de Proteção



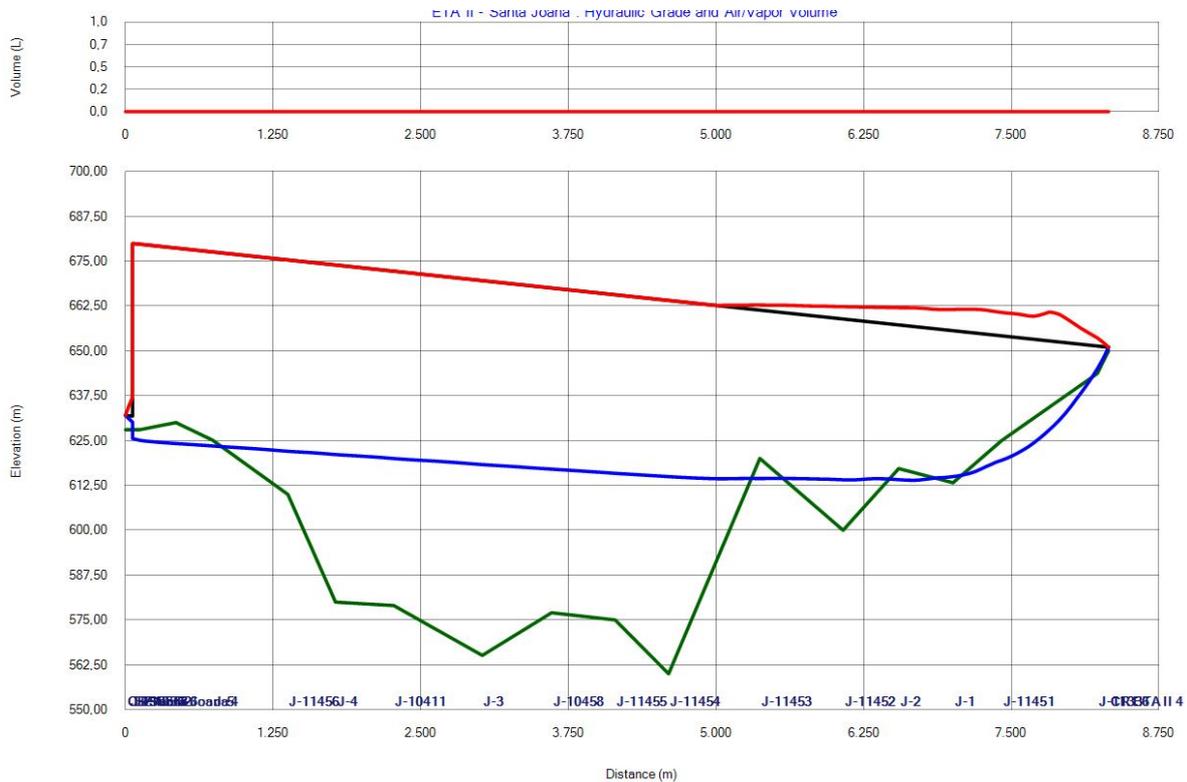
Fonte: Elaboração Própria (2024)

Figura 17 – Caso 3 – Resultados da Simulação da AAT, em PEAD e com Volante de Inércia



Fonte: Elaboração Própria (2024)

Figura 18 – Caso 3 – Resultados da Simulação da AAT, em FoFo e com Volante de Inércia



Fonte: Elaboração Própria (2024)

Analisando os resultados do Caso 2, observa-se que os sistemas de proteção foram suficientes para mitigar os efeitos dos transitórios hidráulicos, havendo diferenças sensíveis entre as simulações com PEAD e com ferro fundido. As cargas piezométricas máximas foram maiores no teste com ferro fundido, principalmente no entorno do TAU1 e próximo da EEA. Os valores máximos da carga piezométrica e da pressão ocorreram próximo da EEA e foram de 186 mca e 99 mca respectivamente. Já para o teste com PEAD, os resultados foram de 180 mca e 93 para a carga máxima e pressão respectivamente.

Em relação às cargas piezométricas mínimas, observa-se que os valores resultaram menores nos testes com ferro fundido, principalmente em três trechos, a saber: após a EEA, no trecho ascendente a montante do TAU2 e no final da adutora, próximo à ETA. O ponto de menor piezométrica observado foi após a EEA, cujos valores da carga piezométrica e pressão são de 108 mca e 21 mca respectivamente. Para o teste em PEAD, esses valores são de 119 mca e 32 mca para a carga mínima e pressão respectivamente.

Porém, o trecho mais crítico observado foi no final da adutora, na chegada à ETA, onde foram observadas pressões negativas. No teste com o ferro fundido, os valores das cargas mínimas e pressões mínimas foram 147 mca e -6 mca respectivamente. Para o teste com PEAD, esses valores foram de 146 mca e -8 mca para a carga mínima e pressão respectivamente. Observa-se que as pressões negativas foram próximas, porém com valores menores para o teste com PEAD.

Por fim, no Caso 3, os resultados das simulações indicaram também diferenças sensíveis entre os testes com ferro fundido e PEAD. Tal como nos casos anteriores, as piezométricas máximas foram maiores no teste com ferro fundido, porém essa diferença foi observada apenas nos últimos 3.500 m da adutora. Antes desse ponto, as piezométricas máximas ficam similares nos dois testes e coincidem com a piezométrica durante o regime permanente.

A maior diferença observada entre os dois casos ocorreu no ponto $X = 6.076$ m. Os valores observados para a piezométrica e pressão máximas para o teste com ferro fundido foram de 662 mca e 62 mca respectivamente. Para o teste com o PEAD, esses valores foram de 660 mca e 60 mca. Em relação às cargas piezométricas

mínimas, observa-se que no teste com ferro fundido as pressões mínimas são menores ao longo de toda a extensão da adutora.

Dessa forma, são observados quatro pontos com pressão negativa no teste com ferro fundido, que correspondem aos pontos de cotas mais altas localizados no início e final da adutora e em alguns trechos intermediários. Em comparação, no teste de PEAD são observadas pressões negativas em apenas dois pontos, sendo no início e no final da adutora. No teste com ferro fundido, os valores mais críticos das cargas e pressões negativas ocorrem no ponto $X = 7.650$ m e resultam em 623 mca e -7 mca respectivamente. Para o teste com PEAD, esses valores resultam em 625 mca e -5 mca para a carga mínima e pressão respectivamente.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Observa-se que em todas as simulações, o mesmo sistema de proteção foi capaz de mitigar os efeitos dos transitórios hidráulicos, reduzindo as cargas piezométricas máximas e eliminando a geração de vapor d'água no interior da tubulação. No entanto, observa-se uma sensível diferença nos resultados obtidos quando se procede a alteração do material da tubulação.

Observa-se que, de forma geral, as cargas piezométricas máximas resultam menores nas simulações com PEAD em comparação com o ferro fundido. Tal fato indica que, para um mesmo sistema de proteção, a redução das pressões máximas na tubulação será maior ao empregar-se o PEAD. No Caso 1, notou-se que a pressão máxima na tubulação foi 14% maior no teste com ferro fundido. No Caso 2, a pressão máxima reduziu de 135 mca para 99 mca com o ferro fundido, e para 93 mca com o PEAD, ou seja, a redução no teste com PEAD foi 17% maior. No Caso 3, o mesmo resultado é observado, com a pressão máxima reduzindo de 83 mca para 62 mca (ferro fundido), e para 60 mca (PEAD), indicando que a redução com o PEAD foi 10% maior.

Analogamente, observa-se que, de forma geral, as pressões mínimas são maiores nos testes com PEAD. Enquanto no Caso 1 foi observada uma pressão mínima de 17 mca, para o ferro fundido observou-se uma pressão mínima de 0 mca. Já no Caso 3, observa-se que as pressões mínimas são menores para o ferro fundido em todo o trecho da adutora, resultando em quatro pontos com pressões negativas, sendo o valor mínimo 40% maior em módulo para o ferro fundido.

Os resultados das simulações realizadas decorrem das diferenças no módulo de elasticidade dos materiais das tubulações. Em comparação com o ferro fundido, as tubulações plásticas possuem módulo de elasticidade menor e, devido às suas propriedades viscoelásticas, podem amortecer os impactos das ondas de sobrepressão e subpressão decorrentes do transitório. Dessa forma, durante a ocorrência do transitório, as tubulações de PEAD se deformam, absorvendo parte da energia das ondas e mitigando a ocorrência pressões excessivas ao longo da tubulação. Sendo assim, há uma atenuação maior das pressões máximas e mínimas para as tubulações de PEAD.

Em uma tubulação de ferro fundido, com maior rigidez e menor deformação do material como forma de amortecimento, as ondas de maior intensidade deverão ser mitigadas pelos sistemas de proteção, indicando a necessidade de sistemas com maiores capacidades de amortecimento e/ou com maiores dimensões.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Os resultados das simulações indicam que a menor elasticidade do PEAD pode gerar benefícios para sistemas sujeitos a transitórios hidráulicos. Devido ao seu menor módulo de elasticidade, em comparação com o ferro fundido, e à sua viscoelasticidade, as tubulações de PEAD, quando sujeitas a um evento transitório, se deformam, absorvendo uma parte da energia das ondas de sobrepressão e subpressão. Essa deformação pode acarretar a necessidade de um sistema de proteção de menor porte e, portanto, mais barato.

Salienta-se que esse estudo abordou apenas a substituição do material de ferro fundido para PEAD, não sendo considerados os custos de aquisição, implantação e manutenção das tubulações ou dos sistemas de proteção. Uma abordagem mais completa poderá ser estudada futuramente de forma a comparar se a troca do material traria economia real para todo o sistema envolvendo a tubulação e os dispositivos de proteção ao longo de toda a sua vida útil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. NBR 12215-1: Projeto de Adutora de Água. Parte 1: Conduto Forçados. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, p. 1-26. 2017.
2. ABPE. Manual de Aplicação, Manutenção e Reparos em Tubos e Acessórios de PEAD. ABPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS. São Paulo, p. 1-243. 2020.
3. ANDRADE, D. M.; RACHID, F. B. D. F.; TIJSSELING, A. S. Fluid Transients in Viscoelastic Pipes via an Internal Variable Constitutive Theory. Applied Mathematical Modelling, Swansea, 21 Outubro 2022., p. 846-869
4. CHAUDHRY, M. H. Applied Hydraulic Transients. 3ª. ed. Nova York: Springer, 2014. p. 1-583.
5. COVAS, D. et al. The Dynamic Effect of Pipe-wall Viscoelasticity in Hydraulic Transients. Part I — Experimental Analysis and Creep Characterization. Journal of Hydraulic Research, Beijing, 42, n. 5, 2004., p. 517-531 Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641221>. Acesso em: Abril 2024.
6. FRANÇA, F. V. P. Verificação da adequação do Esquema Numérico de MacCormack na solução de Transientes Hidráulicos em condutos forçados. USP - Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 1-108. 2006.
7. MARTINS, J. R. S.; LOFRANO, F. C. PHA3005 - Transitórios Hidráulicos - Aula de Transitórios Hidráulicos em Condutos Forçados. USP - Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 1-22. 2022.
8. MARTINS, J. R. S.; SOUZA, P. A. PHA3005 - Transitórios Hidráulicos - Apostila de Transitórios em Condutos Forçados. USP - Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 1-12. 2022.
9. PORTO, R. D. M. Hidráulica Básica. 4ª. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. p. 1-540.
10. XYLEM. Xylem. Xylem - Selection Tool fo Xylem Products, 2024. Disponível em: www.xylect.com. Acesso em: 01 Abril 2024.