

I-048 - ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TRÊS MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ANÁLISE DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM LINHAS ADUTORAS DE ÁGUA POR BOMBEAMENTO

Raynner Menezes Lopes ⁽¹⁾

Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Professor da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí (FAESA/CAMTUC/UFPA).

Marcelo Giulian Marques ⁽²⁾

Doutor pelo Département de Génie Civil na université Laval (1995) - Canadá. Professor Titular do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS).

Thaise Daniele Paixão Teixeira ⁽³⁾

Engenheira Sanitarista Ambiental (UFPA) e Engenheira de Segurança do Trabalho (ESTÁCIO).

Laíze de Lucena Pereira ⁽⁴⁾

Graduanda pela Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí (FAESA/CAMTUC/UFPA).

Davi Edson Sales E Souza ⁽⁵⁾

Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA-UFPA). Professor da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí (FAESA/CAMTUC/UFPA).

Endereço⁽¹⁾: Laboratório De Engenharia Sanitária E Ambiental, Campus Universitário De Tucuruí. Rua Itaipu, número 36, Vila Permanente, Tucuruí - PA - CEP: 68464-000 - Brasil - Tel: (94) 3778-3253 - e-mail: raynnerlopes@ufpa.br

RESUMO

Em linhas adutoras de água por bombeamento e que estão sob pressão, a ocorrência de transientes hidráulicos é um episódio normal e que está ligada a qualquer alteração nas condições estacionárias de funcionamento do sistema. No entanto, certos acontecimentos, como o fechamento rápido de válvulas ou corte de energia elétrica do bombeamento, podem ocasionar transientes hidráulicos de forte intensidade. A propagação das ondas de pressão geradas pode, então, danificar a tubulação e, por vezes, colocar todo o sistema em risco. O objetivo deste trabalho é utilizar métodos simplificados de análises para estimativas de pressões extremas e assim, mesmo com poucas informações, contribuir para a decisão do projetista ainda na fase de concepção do projeto. Os resultados expressam o parecer de cada método utilizado e norteiam o projetista a escolher o que mais for coerente ao seu projeto, endossando assim a importância deste seu estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Golpe de aríete, Método Mendiluce, Adução, Método Allievi, Método Tassinari.

INTRODUÇÃO

A análise de transitórios hidráulicos em uma linha adutora deve ser realizada em diferentes etapas do estudo e/ou projeto (concepção, projeto básico, projeto executivo), compreendendo desde a avaliação preliminar até a fase de detalhamento executivo (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Na fase inicial, isto é, no estudo de concepção de uma linha de adução de água, geralmente não se tem conhecimento de todos os parâmetros necessários para a análise de transientes por meio de softwares de modelagem matemática, que envolvam métodos numéricos, como recomenda a NBR 12215-1/2017 da ABNT. Todo sistema de bombeamento requer um estudo de avaliação do golpe de aríete, a fim de determinar a localização de potenciais obstáculos do sistema e assim propor uma revisão do seu perfil e do planejamento de operação. Para que sejam definidas estratégias de controle efetivas, afim de controlar situações extremas, deve-se identificar e calcular as pressões e velocidades às quais o sistema está sujeito, assim como qualquer comportamento atípico resultante da ocorrência de transientes hidráulicos.

Wood (2005) evidencia que a análise do golpe de arfete não recebe, na maioria das vezes, a atenção necessária nos currículos de engenharia, assim como nos projetos de sistemas de bombeamento, os quais requerem considerações de segurança contragolpes tanto na concepção do seu design quanto durante a operação ao longo de sua vida útil. A estimativa da severidade dos efeitos sobre o sistema durante o regime transiente permite a adequação dos projetos às cargas adicionais e, consequentemente, à definição dos materiais necessários, influenciando diretamente sobre os custos da instalação.

Consequente é obrigatória a análise da possibilidade de ocorrência do golpe de arfete em adutoras, isto, pois as consequências são irreversíveis e podem ser agressivas além de muito custosas para o sistema de abastecimento, define a Norma Brasileira 12.215 de 1991. Diante disso, é de grande importância que a identificação dos pontos críticos do sistema seja realizada durante a etapa de concepção do projeto. Existem diversos métodos de análise de transientes hidráulicos que, em sua maioria, requerem auxílio computacional para resolução.

Entretanto há diversas formas de se proteger os sistemas quanto à ocorrência de transientes hidráulicos e um grande número de técnicas e dispositivos anti-golpe são utilizados com este fim. Visto isso este trabalho utilizou-se de três métodos simplificados para análises de transientes, sendo eles o método de Mendiluce, que é clássico, preza a segurança e muito citado nas biografias pertinentes. O método de allievi que propôs que a celeridade poderia ser calculada em função do diâmetro da tubulação, espessura dos tubos e material de construção, e um novo método recomendado por Tassinari (2017) que é expresso por um conjunto detalhado de expressões aplicados em três pontos fazendo-se assim, as envoltórias desse método não lineares, e as pressões decaem menos ao longo da linha de adução.

OBJETIVO

Estudar três métodos simplificados de análise de transientes hidráulicos, destacando seus pontos positivos e limitações, para que essas informações auxiliem na tomada de decisão de projetistas quanto ao método mais apropriado para o estudo inicial (concepção) das linhas adutoras.

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, foram utilizados três métodos de análise simplificada de transientes hidráulicos, sendo eles, o método de Mendiluce, o método de Allievi e um novo método proposto por Tassinari (2017).

O método de Mendiluce, sendo clássico, e estando a favor da segurança, tem sido citado ao longo de décadas por inúmeros autores, como Lencastre (1972), Pimenta (1981), Abreu *et al.* (1995), Macintyre (2013), Azevedo Netto *et al.* (2015), dentre outros. O referido método pode ser aplicado utilizando-se as equações de (1) a (5), conforme segue:

Para o cálculo da celeridade “a” da onda, usa a equação (1):

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k \frac{D}{e}}} \quad (1)$$

Onde “k” é coeficiente que leva em conta os módulos de elasticidade, “D” é o diâmetro interno do conduto e “e” é a espessura do tubo.

O cálculo do período “τ” da tubulação pode ser obtido pela equação (2)

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

Onde “L” é o comprimento da tubulação.

O tempo de parada “ t_p ” é obtido pela equação (3).

$$t_p = C + \frac{KL_v}{gH_m} \quad (3)$$

Onde C é um coeficiente obtido por meio de experimentos, em função do parâmetro adimensional Altura manométrica/L é e K um coeficiente que representa o efeito da inercia das partes girantes do conjunto motor e bomba.

Para o caso de Se $t_p \leq \tau$, a manobra é classificada como lenta, e a equação a ser utilizada para o cálculo da sobre pressão $+\Delta H$ e sub pressão $-\Delta H$ é a equação (4).

$$\Delta H = \frac{2Lv}{gt_p} \quad (4)$$

Onde v é a velocidade da água na tubulação e g é a aceleração da gravidade.

Para o caso de Se $t_p > \tau$, a manobra é classificada como rápida, e a equação a ser utilizada é a (5).

$$\Delta H = \frac{av}{g} \quad (5)$$

O próximo método a ser descrito é o método gráfico de Allievi, cuja sobrepressão ou subpressão (h_s) podem ser determinadas pela equação (6).

$$h_s = (z^2 - 1) \cdot H_m \quad (6)$$

Onde h_s é a sobre pressão ou subpressão em m.c.a; z^2 é um parâmetro obtido por meio dos gráficos de sobre pressão e subpressão, elaborados por Allievi. Esses gráficos apresentam dupla entrada de dados dos parâmetros adimensionais ρ e θ . Sendo a relação ρ/θ obtida pela equação (2):

$$\frac{\rho}{\theta} = \frac{v \cdot L}{g \cdot H_m \cdot t} \quad (7)$$

Onde ρ é uma constante da tubulação pressurizada; θ é o número de intervalos de tempo de propagação da onda de pressão contidos no tempo t . As equações (8) e (9), relativas às curvas dos gráficos de sobre pressão e depressão, respectivamente (ambos elaborados por Allievi), podem, de acordo com Centrais Elétricas Brasileiras (não datado) serem aplicados para o seguinte limite: $h_s \leq 0,35 \cdot H_m$.

$$(z^2 - 1) = \left[131,13 \cdot \left(\frac{\rho}{\theta} \right)^{1,0996} \right] \cdot 0,01 \quad (8)$$

$$(z^2 - 1) = \left[-219,82 \cdot \left(\frac{\rho}{\theta} \right)^2 + 212,55 \cdot \left(\frac{\rho}{\theta} \right) - 1,0081 \right] \cdot 0,01 \quad (9)$$

O método gráfico de Allievi citado por Centrais Elétricas Brasileiras (não datado) não apresenta métodos para se traçar as envoltórias de máximos e mínimos. Neste caso, foi utilizada a mesma metodologia de Mendiluce para traçar essas envoltórias.

No método proposto por Tassinari (2017), existe um conjunto de equações ajustadas a partir do *software* Allievi¹, que permitem determinar envoltórias de máximos e mínimos em três pontos distintos da linha de adução, sendo o primeiro ponto, próximo ao conjunto elevatório (a 0% de L), o segundo a 50% de L e o terceiro a 75% de L. As equações (5) e (6) são utilizadas para determinar as sobrepressões (H+) e subpressões (H-), respectivamente, a 0% de L. As equações (7) e (8) determinam os transientes a 50% de L, enquanto que as equações (9) e (10) os determina a 75% de L:

$$H+ = -0,0183.th^2 + 0,1484.th + 0,4261 \quad (10)$$

$$H- = -0,0064.th^3 + 0,0864.th^2 - 0,3686.th - 0,3473 \quad (11)$$

$$H+ = -0,0160.th^2 + 0,1207.th + 0,2886 \quad (12)$$

$$H- = -0,0061.th^3 + 0,0784.th^2 + 0,3279.th - 0,2066 \quad (13)$$

$$H+ = -0,0145.th^2 + 0,1213.th + 0,146 \quad (14)$$

$$H- = -0,00337.th^3 + 0,0494.th^2 - 0,2283.th - 0,1083 \quad (15)$$

th (tempo de aceleração do escoamento, em s) pode ser obtido pela equação (11):

$$th = \frac{v.L}{g.H_m} \quad (16)$$

O método de Tassinari (2017) pode ser aplicado para tubos de ferro fundido, aço e PRFV (Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro), para as seguintes faixas: $0,7 \text{ m/s} \leq v \leq 2,6 \text{ m/s}$ e $29 \text{ m.c.a} \leq H_m \leq 95 \text{ m.c.a}$

Esses três métodos de análise foram aplicados a três linhas de adução fictícias, por bombeamento, ainda em fase de concepção. Conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – características gerais das linhas adutoras analisadas.

ADUTORA	1	2	3	4	5	6
Vazão de bombeamento (Q) - L/s:	150	250	400	380	750	900
Velocidade (v) - m/s:	0,67	1,05	0,77	0,73	0,95	1,14
Desnível Geométrico (H) - m:	52,00	27	47,00	11	72,00	49
Diâmetro interno (Di) - mm:	532,00	738	813,00	700	1000,00	700
Comprimento da adutora - m:	300,00	500	900,00	900	1000,00	900
Material da tubulação:	FoFo (K7)	FoFo (K7)	PRFV 150 PSI	PRFV 150 PSI	Aço	Aço
Sobre pressão admissível (máxima) - m.c.a:	336,27	336,27	105,5	105,5	278,19	278,19

Como o objetivo deste trabalho é mostrar as diferenças dos três métodos simplificados de análise de transientes hidráulicos, foi necessário se fazer algumas suposições, tais como: desprezar a perda de carga distribuída na sucção e barrilete da estação elevatória, considerar temperatura da água a 20°C.

¹ O *software* Allievi é um *software* profissional para o cálculo e simulação de transitórios hidráulicos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 e Figura 2 estão apresentadas as envoltórias das cotas piezométricas máximas e mínimas para os três métodos aplicados ao caso da Adutora 1 e da adutora 2, cujo material das tubulações é o ferro fundido.

Para a adutora 1 (Figura 1), pode-se observar que as pressões atuantes na tubulação a partir do método de Mendiluce resultam em valores negativos após a distância de 210 m. Estes valores ficaram próximos a 0 m.c.a., sendo que o valor máximo de sobrepressão junto à bomba, foi próximo a 80 m.c.a.

O método de Tassinari (2017) gerou valores negativos após a distância de 165 m, ficando os valores mínimos em torno de -5 m.c.a. O valor máximo de sobrepressão junto à bomba resultou próximo de 80 m.c.a. Os resultados para esse método estiveram em todos os casos, a favor da segurança.

Pelo método gráfico de Allievi foram obtidos valores sempre positivos. O valor mínimo ficou próximo a 0 m.c.a. a partir da posição 225 m. O valor máximo de sobrepressão junto à bombada foi da ordem de 65 m.c.a.

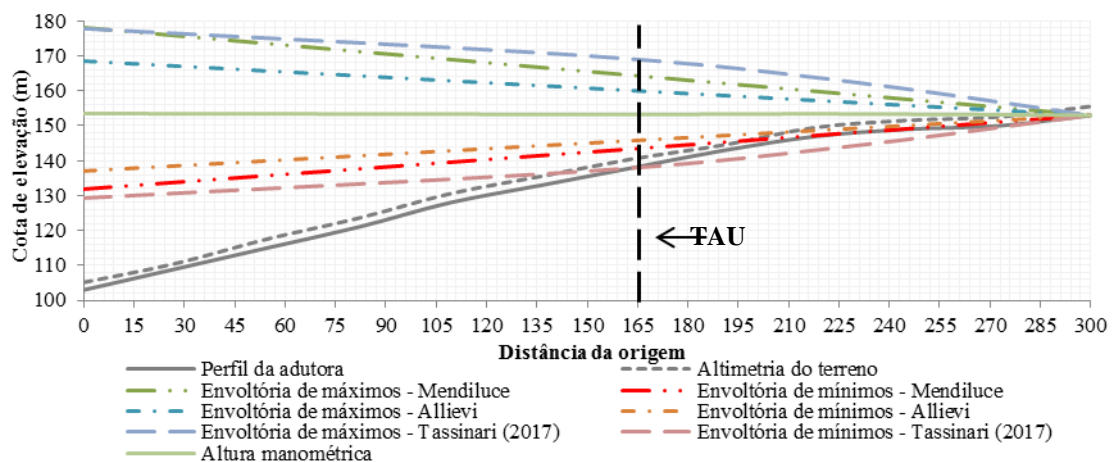


Figura 1 – Envoltórias de máximos e mínimos ao longo da linha de adução 1.

Observa-se que para a Adutora 1, haverá o risco de ocorrência de pressões negativas, em decorrência do fenômeno de separação de coluna líquida que pode acarretar no rompimento da adutora a partir da posição 165 m. Devendo neste caso ser adotado algum dispositivo de proteção contra as pressões negativas, por exemplo um TAU (Tanque de Alimentação Unidirecional) ou chaminé de equilíbrio, entre outros. Além desse fator, a tubulação deverá suportar pressão superior à sobrepressão máxima junto à bomba, que é da ordem de 80 m.c.a. Assim, como a classe de pressão do tubo suporta até 336,27 m.c.a, em relação às pressões máximas, não há riscos de rompimento da linha de adução.

Para a adutora 2 (Figura 2), pode-se observar que as pressões atuantes na tubulação a partir do método de Mendiluce resultam em próximos a 0 m.c.a à distância de 175 m, apresentando valores ligeiramente negativos (em torno de - 2 m.c.a) a 375 m de distância. O valor máximo de sobrepressão junto à bomba, foi próximo a 50 m.c.a.

O método de Tassinari (2017) gerou valores próximos a 0 m.c.a a distância de 400 m, no entanto, sempre positivos. O valor máximo de sobrepressão junto à bomba resultou em torno de 40 m.c.a. Os resultados para esse método estiveram em todos os casos, a favor da segurança.

Pelo método gráfico de Allievi foram obtidos valores sempre positivos, não favorecendo a ocorrência de pressões negativas. O valor máximo de sobre pressão junto à bomba foi da ordem de 40 m.c.a, sendo que o limite do método ($hs \leq 0,35 \cdot H_m$), não foi atendido, ficando o valor igual a 0,49.Hm

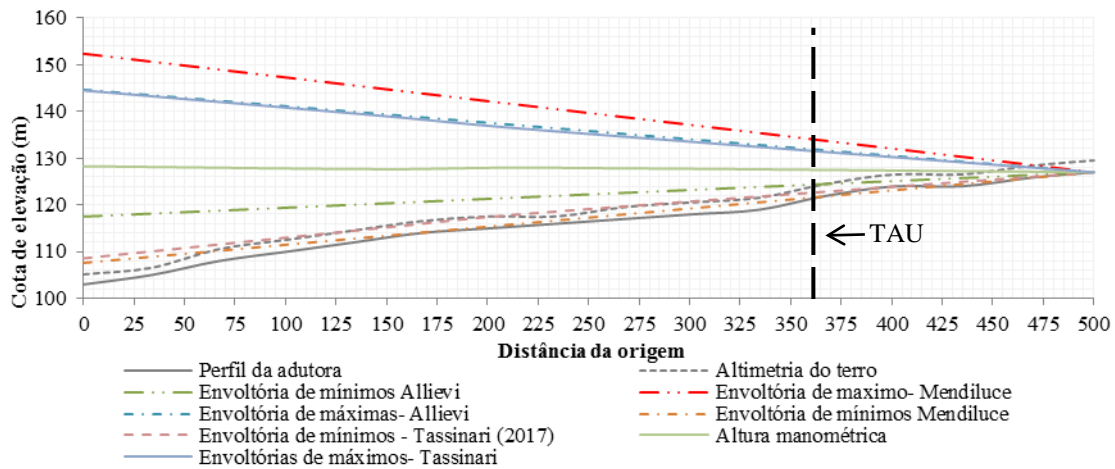


Figura 2 – Envoltórias de máximos e mínimos ao longo da linha de adução 2.

De acordo as informações obtidas para a Adutora 2, haverá o risco de ocorrência de pressões negativas, a partir da posição 375 m. Sendo recomendado o uso de dispositivo de proteção. Quanto às sobre pressões, não haverá riscos, uma vez que as pressões máximas observadas foram da ordem de 50 m.c.a., estando abaixo do limite de sobre pressão da tubulação de ferro fundido classe k7.

Para a adutora 3 (Figura 3) cujo material da tubulação é o PRFV, os resultados estão apresentados na Figura 3, onde se observa que as pressões sempre foram positivas para os três métodos, sendo que o método de Mendiluce resultou em valor máximo de sobre pressão junto à bomba próximo a 90 m.c.a. Até a posição 400 m, os valores de pressão foram a favor da segurança.

Pelo método de Tassinari (2017) foi observado valor máximo de sobrepressão junto à bomba esteve me torno de 80 m.c.a, sendo que até as proximidades de 400 m, os valores de pressão foram a favor da segurança.

Para o método gráfico de Allievi, os valores resultantes foram sempre positivos. O valor máximo de sobre pressão junto à bomba foi próximo a 75 m.c.a., sendo que, se comparados aos outros métodos, os valores das pressões obtidas foram sempre inferiores. Vale ressaltar que neste caso, não foi atendido o limite de uso do método de Allievi ($h_s \leq 0,35$ Hm), ficando o valor igual a 0,56. Hm.

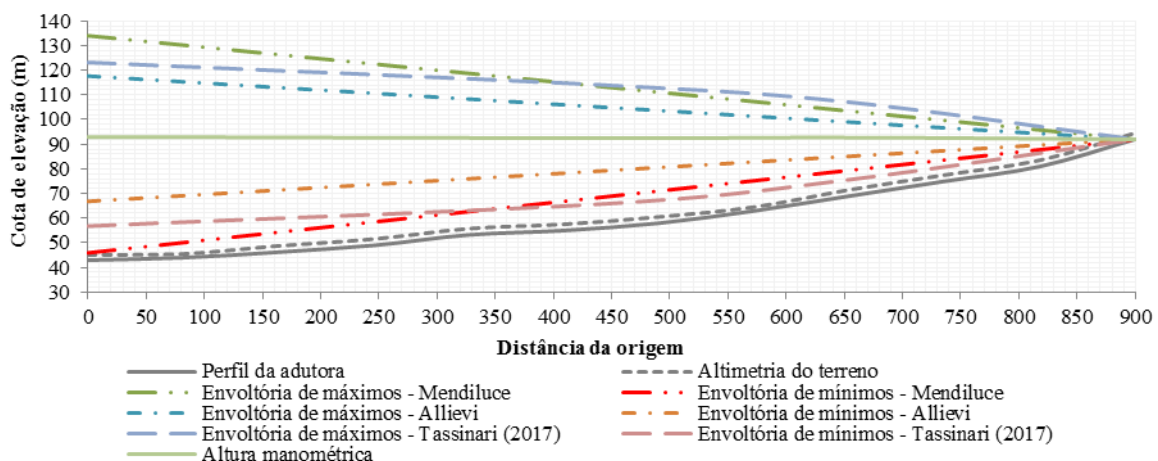


Figura 3 – Envoltórias de máximos e mínimos ao longo da linha de adução 3.

As sub pressões na adutora 3 não serão negativas e a sobre pressão máxima é da ordem de 90 m.c.a., sendo o valor abaixo do limite de pressão para tubos PRFV 150 PSI, que é de 150,5 m.c.a., logo, não haverá problemas.

Na adutora 4 (Figura 4), o método de Mendiluce gerou sobre pressões da ordem de 30 m.c.a, enquanto que as sub pressões foram sempre negativas, sendo o valor mínimo da ordem de -3 m.c.a.

Pelo método de Tassinari (2017), as pressões negativas ocorreram a partir dos 160 m e foram da ordem de -4 m.c.a, enquanto que as sobre pressões máximas foram da ordem de 27 m.c.a.

O método de gráfico Allievi gerou sobre pressões da ordem de 24 m.c.a, e subpressões pouco acima de -1 m.c.a. O limite $hs \leq 0,35 \cdot H_m$ não foi cumprido, sendo o valor máximo de $hs = 0,74 \cdot H_m$

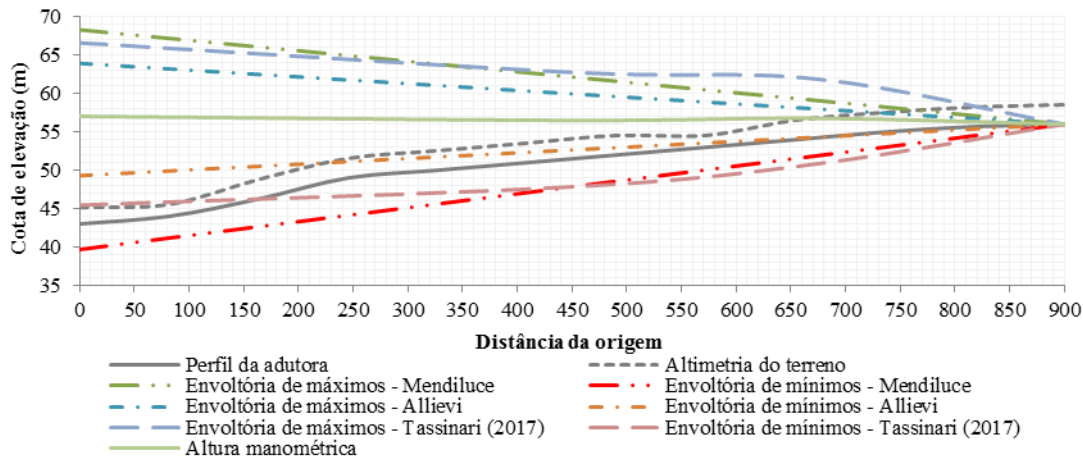


Figura 4 – Envolvórias de máximos e mínimos ao longo da linha de adução 4.

Para a adutora 4, em que grande parte de sua extensão as pressões são negativas, recomenda-se o uso de dispositivo de proteção contra transiente. Para este caso, em primeiro plano, poderia ser utilizada uma chaminé de equilíbrio, que se apresenta como uma solução mais robusta, se comparada ao TAU, no entanto, apresenta a desvantagem de ter um custo consideravelmente maior.

As sobre pressões para adutora 4 estão a baixo do limite da classe de pressão da tubulação de PRFV, ficando essas pressões ainda menores com o uso de uma chaminé de equilíbrio como dispositivo de proteção.

Para a adutora 5 os resultados estão apresentados na Figura 5, onde se observa que as pressões sempre foram positivas para os três métodos.

No método de Mendiluce foi obtido valor de sobre pressão junto à bomba, de 137 m.c.a. Até as proximidades dos 400 m, os valores de pressão estiveram a favor da segurança.

Para o método de Tassinari (2017) o valor máximo de sobrepressão junto à bomba foi de 119 m.c.a, sendo que a partir da posição 400m os valores de pressão estiveram a favor da segurança.

No método gráfico de Allievi os valores foram sempre positivos. O valor máximo de sobrepressão junto a bomba, foi de 113,39 m.c.a. Da mesma forma que na adutora 4, o limite de uso do método de Allievi ($hs \leq 0,35 \cdot H_m$) não foi atendido, obtendo-se valor máximo de $0,54 \cdot H_m$

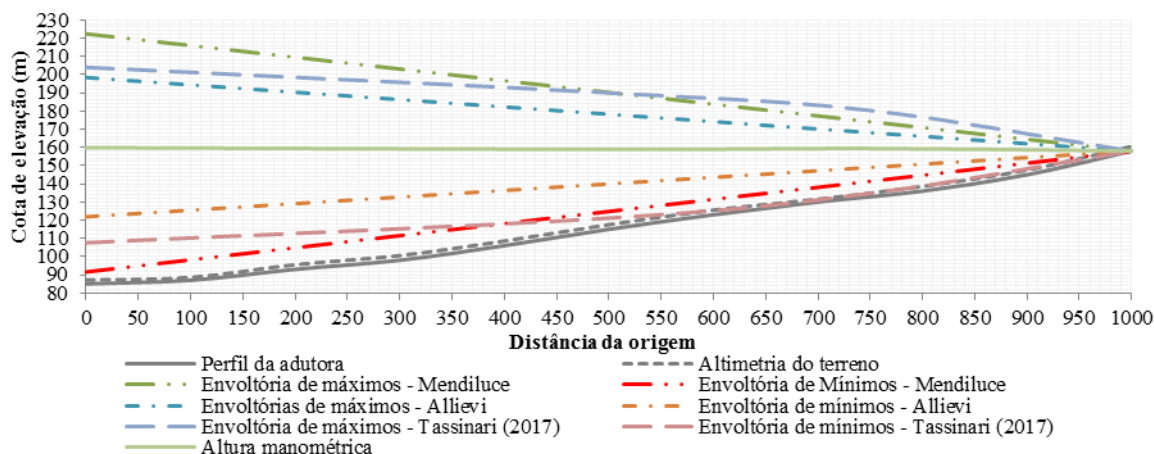


Figura 5 – Envoltórias de máximos e mínimos ao longo da linha de adução 5.

As sub pressões na adutora 3 não serão negativas e a sobre pressão máxima é da ordem de 137 m.c.a., valor este que está abaixo do limite máximo de pressão do tubo de aço, que é 278,19 m.c.a.

Para a adutora 6 (Figura 6), o método de Mendiluce gerou valores negativos de sub pressão, da ordem de -5 m.c.a, junto à bomba e da ordem de - 10 m.c.a por volta dos 525 m da linha de adução. O valor de sobre pressão foi de aproximadamente 100 m.c.a.

Pelo método de Tassinari (2017), foram obtidos valores de sobre pressão em torno de 90 m.c.a. E as pressões negativas ocorreram a partir dos 320 m de extensão.

O método gráfico de Allievi gerou sobre pressões da ordem de 85 m.c.a e sub pressões próximas a 0 m.c.a a partir dos 700 m de comprimento da linha.

Para o método de Allievi, o limite $h_s \leq 0,35$. Hm não foi atendido, ficando o valor em 0,61.Hm.

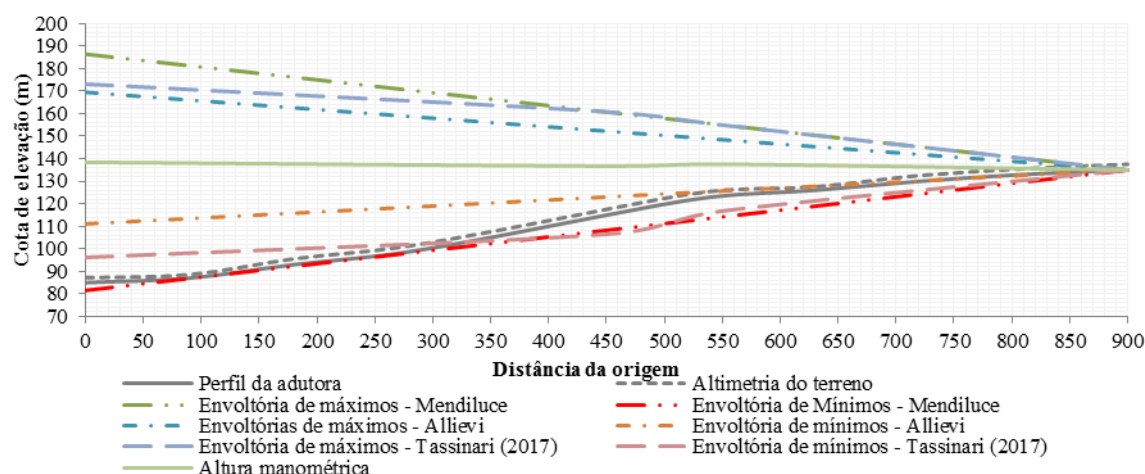


Figura 6 – Envoltórias de máximos e mínimos ao longo da linha de adução 6.

Por meio dos resultados para a adutora 6, é possível observar que haverá o risco de ocorrência de pressões negativas na linha de adução, sendo necessário o uso de dispositivo de proteção. A pressão máxima suportada pelo tubo, sendo de 278,19 m.c.a., impedirá a ocorrência de problemas relacionados à sobre pressão, uma vez que o valor máximo observado foi de aproximadamente, 100 m.c.a,

CONCLUSÕES

O método de Mendiluce, como foi observado neste trabalho, pode ser utilizado para os casos em que o projetista busque segurança maior em detrimento do custo da linha de adução, optando pela especificação de tubos mais resistentes, com maiores classes de pressão e uso de dispositivos de proteção contra transientes.

O método gráfico de Allievi, para atender ao seu limite $h_s \leq 0,35 \cdot H_m$, deve ser aplicado a tubulações com declividades elevadas e comprimentos relativamente curtos, o que dificulta o seu uso para certos projetos de linhas adutoras. Por outro lado, mesmo que, dos seis sistemas fictícios descritos nesse estudo, apenas o primeiro (adutora 1) tenha atendido ao limite do método de Allievi, as envoltórias de mínimos e máximos de todos os três sistemas foram inferiores aos valores das envoltórias de Mendiluce e Tassinari (2017), mas apresentaram valores viáveis, o que sugere que, mesmo fora do limite proposto, o método de Allievi gere resultados coerentes. Assim, propõe-se, para o método gráfico de Allievi, estudar a possibilidade de ampliação do limite atual desse método, para valores da ordem de, pelo menos 0,70. H_m , para que este método possa ser aplicado com mais facilidade ao caso de linhas adutoras, da mesma forma como é aplicado aos casos de minicentrals hidrelétricas.

O método de Tassinari (2017) gera pressões extremas intermediárias às pressões de Mendiluce e Allievi, e de modo geral, favorece a redução de custos de implantação das adutoras. Além desse fator, a construção das envoltórias é mais detalhada, pois é realizada por diferentes equações, aplicadas a três pontos ao longo do comprimento da linha adutora, isto é, a 0% de L, a 50% de L e a 75% de L. Assim, as envoltórias desse método não são lineares e sugerem que as pressões extremas declinem menos ao longo da linha de adução, propondo ao projetista um estudo mais cauteloso das pressões ao longo de toda a linha de adução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M.F. ARAUJO, R; ITO, A.E. Manual de Hidráulica. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015.
2. MACINTYRE, A.J. Bombas e instalações de bombeamento. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
3. PIMENTA, C.F. Curso de Hidráulica Geral. V.2. 4ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
4. TASSINARI, L.C.S. Transientes Hidráulicos em sistemas de bombeamento: influência do material do conduto e dispositivo de proteção. 2017. 183 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
5. TSUTIYA, M.T. Abastecimento de Água. 4 eds. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 643 p.
6. WOOD, D. J. Waterhammer Analysis — Essential and Easy (and Efficient). Asce, v. 131, n. August, p. 1123–1131, 2005.
7. NBR 12215: Projeto de adutora de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 8 p., 1991.