

Modelagem Computacional da Válvula Antecipadora de Onda como Mecanismo de Alívio para o Golpe de Aríete

João Marcelo Costa Barbosa*, Marco Aurélio Holanda de Castro*

jm_eng.quimico@hotmail.com; marco@ufc.br

Recebido: 21/03/12 - revisado: 14/06/13 - aceito: 31/03/14

RESUMO

Neste artigo foram realizadas simulações do transiente hidráulico na parada do conjunto moto-bomba, com a válvula antecipadora de onda (VAO) com abertura e fechamento completo e não instantâneo como mecanismo de alívio para o golpe de aríete. O objetivo dessa válvula é reduzir e minimizar os efeitos do transiente hidráulico num sistema de bombeamento. A válvula antecipadora inicia sua abertura quando a pressão mínima de regulação é excedida, logo após a passagem da onda de baixa pressão. É necessário que a válvula esteja próxima da bomba. As equações diferenciais de conservação de massa e de momento foram numericamente resolvidas pelo método das características. O programa computacional UFC6 foi escrito de modo a implementar esse método e as condições de contorno propostas para a válvula antecipadora. Esse código foi escrito na linguagem Visual Basic. Este artigo apresenta cinco casos da aplicação da válvula antecipadora nos sistemas de bombeamento, sendo duas adutoras hipotéticas e três reais e existentes no Brasil. Este artigo apresenta um guia para a modelagem da válvula antecipadora de onda.

Palavras-chave: Hidráulica Transiente, mecanismos de alívio do golpe de aríete, válvula antecipadora de onda.

INTRODUÇÃO

Em sistemas de distribuição de água, a análise do fenômeno transitório (golpe de aríete) é de fundamental importância, pois, com base nessa análise é possível projetar sistemas que suportem as oscilações de pressão e assim evitar prejuízos econômicos e sociais.

Os sistemas de abastecimento de água estão sujeitos à variação da vazão e pressão devido a diversos fatores, tais como: vazamento, demandas variáveis, acionamento ou desligamento de bombas (intencional ou por interrupção de energia). Desse modo, para um dimensionamento adequado, é necessário o estudo do regime transitório e a resolução das equações que descrevem o fenômeno.

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) recomenda o método das características, através da NBR-12215/1992, na elaboração de projetos de sistemas hidráulicos. Esse método transforma as equações diferenciais parciais da continuidade e quantidade de movimento, em equações diferenciais ordinárias.

Para a resolução numérica das equações diferenciais ordinárias utilizam-se diferenças finitas para uma manipulação numérica simples (WYLIE; STREETER, 1978), e então, determina-se a vazão (ou velocidade) e carga piezométrica.

Em decorrência da variabilidade da pressão e da possível contração e expansão da tubulação durante o fenômeno transitório, a tubulação e equipamentos podem sofrer com problemas de fadiga, ruptura da tubulação e quebra de equipamentos, além de danos a pessoas próximas as linhas de distribuição de água.

Por isso, para reduzir os problemas citados anteriormente, mecanismos que atenuem esses efeitos devem ser considerados nos projetos de adutoras e redes. Recomenda-se utilizar mecanismos atenuadores de pressão tais como: válvula antecipadora de onda, ventosa, chaminé de equilíbrio, tanque de alimentação unidimensional (TAU), entre outros.

Neste artigo, o mecanismo utilizado é a válvula antecipadora de onda (VAO), que tem a função de proteger a tubulação e o conjunto de bombas contra o transiente hidráulico decorrente da parada repentina do bombeamento. A válvula deve ser regulada para funcionar quando a pressão atingir um valor mínimo. Para proteger a bomba contra os problemas decorrentes do efeito transitório, a válvu-

*Universidade Federal do Ceará

la antecipadora deve ser instalada próximo ao conjunto de bombas.

Outro dispositivo utilizado como mecanismo proteção é a ventosa, que é projetada para admitir ou expulsar automaticamente grandes quantidades de ar durante o enchimento, esvaziamento ou operação de um sistema de adução de água (JÚNIOR, 2007). Assim, a ventosa atua na proteção das sobrepressões e subpressões.

A chaminé de equilíbrio é um dispositivo de proteção utilizado para minimizar os efeitos de fechamento rápido de válvulas ou variações bruscas de vazão em turbinas e bombas (BARBOSA, 2006).

O tanque de alimentação unidirecional (TAU) consiste num reservatório de baixa altura, aberto para a atmosfera e dotado de válvula de retenção, que impede a passagem de água da adutora para o reservatório (BARBOSA, 2006).

Neste artigo é apresentada uma nova metodologia para o cálculo do transiente hidráulico da válvula antecipadora de onda como mecanismo de alívio para o golpe de aríete, via simulação numérica, utilizando o software UFC6.

MEDOTOLOGIA

Neste artigo serão avaliados o comportamento da válvula antecipadora de onda como mecanismo de proteção contra o golpe de aríete, o amortecimento das pressões máximas que ocorre na tubulação e será feita uma breve comparação com outros dispositivos de proteção.

O primeiro nó das adutoras consideradas deve ser uma bomba, o segundo a válvula antecipadora (na verdade a válvula localiza-se na derivação da linha principal próximo a bomba) e o último um reservatório de nível constante.

Será apresentado na metodologia deste artigo, o método das características aplicado ao transiente hidráulico (golpe de aríete), o funcionamento básico da válvula antecipadora de onda, a sua modelagem, as restrições do modelo, os dados de entrada, as normas referentes ao funcionamento e o pré-dimensionamento da válvula.

Método das características

O método das características, quando aplicado às equações da quantidade de movimento e continuidade, que descrevem o golpe de aríete transforma as equações diferenciais parciais em equações ordinárias. Segundo (CHAUDHRY, 1979),

as equações da quantidade de movimento e continuidade são descritas por (1) e (2) respectivamente.

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Realizando-se uma transformação linear entre as equações 1 e 2 ($L=L_1+\lambda gA.L_2$), converte-se o sistema de equações diferenciais parciais em equações ordinárias, e utilizando diferenças finitas na discretização temporal; o resultado pode ser representado pelas equações de (3) até (10).

As equações características positivas são representadas por (3), (4) e (5).

$$C^+: Q_P = C_p - C_a.H_P \quad (3)$$

$$C_p = Q_A + C_a.H_A - R.Q_A|Q_A| \quad (4)$$

$$\frac{dt}{dx} = +\frac{1}{a} \quad (5)$$

As equações características negativas são representadas por (6), (7) e (8).

$$C^-: Q_P = C_n + C_a.H_P \quad (6)$$

$$C_n = Q_B - C_a.H_B - R.Q_B|Q_B| \quad (7)$$

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{1}{a} \quad (8)$$

Os parâmetros são descritos por (9) e (10).

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (9)$$

$$R = \frac{f.\Delta t}{2DA} \quad (10)$$

Onde:

g = aceleração gravitacional (m/s²);
 a = celeridade (m/s);
 A = área da seção transversal interna (m²);
 f = fator de atrito;
 Δt = intervalo de tempo computacional (s);
 D = diâmetro interno (m);
 Q = vazão (m³/s)
 H = carga piezométrica (m);
 Os subscritos "A" e "B" referem-se respectivamente a seção de montante e a seção de jusante a seção "P".

A curva característica positiva é representada pela linha C⁺ na Figura 1, que é descrita pela equação característica positiva, com inclinação positiva (Equação 5). Na mesma Figura representa-se a equação característica negativa por C com inclinação negativa descrita pela equação (8).

Para o cálculo de vazão e carga em cada passo de tempo, utiliza-se uma discretização espacial (ΔX) e temporal (Δt), conforme indicado na Figura 1. Calcula-se carga e vazão na seção hipotética (para seção interna) "P" com base nas seções "A" e "B", utilizando-se as equações de (3) até (10).

Para o cálculo na primeira seção, basta utilizar as equações características C representadas de (6) até (8) e as condições iniciais e de contorno. Para o cálculo na última seção, utilizam-se as equações características C+ representadas de (3) até (5) e as condições iniciais e de contorno.

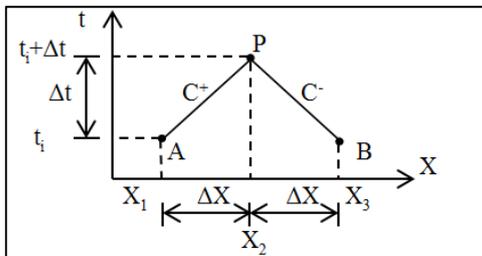


Figura 1 - Malha de cálculo

A discretização espacial e temporal deve atender ao critério de estabilidade e convergência, que é conhecido por condição de estabilidade de Courant, representado pela equação (11). Para a igualdade, pode-se determinar a relação entre Δt e Δx. Caso uma for definida, a outra pode ser calculada diretamente.

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{a} \quad (11)$$

Modelo da Válvula Antecipadora de Onda

A válvula antecipadora de onda deve ser instalada na derivação da linha principal próximo ao conjunto de bombas (no segundo nó da adutora). A equação que descreve o comportamento da válvula para cada passo de tempo, pode ser deduzida a partir da equação de Bernoulli entre as seções 3 e 4, conforme indicado na Figura 2. Deve-se enfatizar que esta equação é válida apenas para cada passo de tempo.

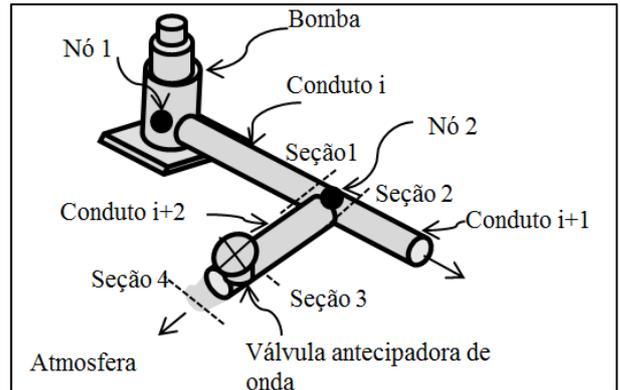


Figura 2 - Válvula Antecipadora de Onda (VALLOY, 2013)

A equação de Bernoulli entre as seções (3) e (4) é representada pela equação (12).

$$\frac{P_3 + P_{atm}}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2 \cdot g} + Z_3 = \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{V_4^2}{2 \cdot g} + Z_4 \quad (12)$$

Sendo:

- P₃ = pressão relativa na seção 3;
- P_{atm} = pressão atmosférica (seção 4);
- V₃ e V₄ = velocidade nas seções 3 e 4 respectivamente.

Devido a proximidade, as pressões nas seções 1, 2, 3 são consideradas iguais. Assim, considerando a igualdade entre as pressões, para cada passo de tempo, pode-se relacionar a vazão na válvula pelas equações (13) e (14).

$$Q_V = (A_V \cdot Cd_V) \sqrt{2g(H_1 - Z_{N2})} \quad (13)$$

$$Q_{V0} = (A_V \cdot Cd_V)_0 \sqrt{2g(H_{10} - Z_{N2})} \quad (14)$$

De acordo com a equação da continuidade, e para cada passo de tempo:

$$Q_1 = Q_V + Q_2 \quad (15)$$

Onde:

Q_1, Q_2 = vazão nas seções 1 e 2;

Q_V = vazão na válvula;

Q_{V0} = vazão na válvula para o estado permanente;

H_1 = carga na seção 1;

Z_{N2} = cota no segundo nó (entre as seções 1 e 2).

O subscrito "0" indica a condição para o estado permanente.

Com base na equação da continuidade (15) e nas equações características positivas (3, 4 e 5) e negativas (6, 7 e 8) do método das características, a carga piezométrica pode ser relacionada pela equação (16).

$$H_1 = \frac{(C_{p1} - C_{n2}) - Q_V}{Ca_1 + Ca_2} \quad (16)$$

No qual, C_{p1} é o parâmetro descrito pela equação 4 para a seção 1; C_{n2} é descrito pela equação 7 para a seção 2; Ca_1 e Ca_2 são os parâmetros das seções 1 e 2 descritos pela equação 9.

Combinando as equações (13) e (14) com a equação (16), pode-se representar a vazão pela equação (17).

$$Q_V = 0,5 \cdot \left[-C_V + \sqrt{C_V^2 + 4C_V \cdot \beta} \right] \quad (17)$$

Com os parâmetros descritos pelas equações (18), (19) e (20).

$$\tau = \frac{(A_V \cdot Cd_V)}{(A_V \cdot Cd_V)_0} \quad (18)$$

$$C_V = \frac{(\tau Q_{V0})^2}{(Ca_1 + Ca_2) \cdot (H_{10} - Z_{N2})} \quad (19)$$

$$\beta = (C_{p1} - C_{n2}) - (Ca_1 + Ca_2) \cdot Z_{N2} \quad (20)$$

No qual, τ relaciona os coeficientes de descarga (C_V) e área da válvula (A_V) do transiente hidráulico com o estado permanente; o termo C_V é função das características do sistema (área, pressão,

cota, vazão, coeficiente de descarga e área da válvula); o coeficiente β é função da geometria da tubulação e cota no local de instalação da válvula.

Restrições do Modelo

O modelo não considera uma eventual aspiração de ar, pois isto não foi considerado na modelagem. Portanto, o modelo é válido apenas para vazões positivas (sentido válvula ambiente externo). Essa simplificação é plausível, pois a válvula deve ser projetada para expulsar o fluido.

Devido à localização da válvula próxima ao nó da derivação principal, com distância não especificada na norma da CEDAE (2006), a pressão do nó é considerada igual à pressão na válvula.

Dados de entrada do modelo

A válvula antecipadora apresenta uma lista de dados de entrada para a sua utilização no programa UFC6. Os dados são os seguintes: pressão máxima de regulagem, pressão mínima de regulagem, coeficiente de descarga, diâmetro nominal, tempo inicial de abertura da válvula, intervalo do tempo de abertura da válvula, intervalo do tempo de permanência da válvula completamente aberta e intervalo do tempo de fechamento da válvula.

A Pressão Máxima de Regulagem é limite máximo de pressão. A válvula abre como uma válvula de alívio comum, caso a pressão da tubulação exceda a pressão máxima. O valor padrão da pressão máxima de regulagem é 10% acima da pressão permanente no local de instalação da válvula.

Pressão Mínima de Regulagem é limite mínimo de pressão. Caso a pressão se aproxime da pressão mínima de regulagem, a válvula inicia a sua abertura. O valor padrão da pressão mínima de regulagem é 50% do valor da pressão permanente no local de instalação da válvula.

O Coeficiente de Descarga aproxima o comportamento da abertura da válvula. Neste artigo, o coeficiente de descarga adotado é o mesmo da válvula do tipo globo.

O Diâmetro Nominal é o diâmetro comercial da válvula antecipadora de onda. Devido à falta de dados, considera-se que o diâmetro interno é igual ao diâmetro nominal.

O tempo contado a partir do início da simulação até o tempo em que a válvula inicia a sua abertura é chamado de Tempo Inicial de Abertura da Válvula (TIAV).

O Intervalo do Tempo de Abertura da Válvula (ΔTAV) é o intervalo em que a válvula perma-

nece abrindo (o tempo que a válvula está completamente aberta menos TIAV).

O Intervalo do Tempo de Permanência da Válvula Completamente Aberta ($\Delta TPVA$) é o intervalo em que a válvula permanece completamente aberta.

O Intervalo do Tempo de Fechamento da Válvula (ΔTFV) é o intervalo em que a válvula executa o procedimento de fechamento completo.

Norma

De acordo com a norma geral para projeto e construção de estações elevatórias de água (CE-DAE, 2006):

- A descarga, quando da parada de funcionamento das bombas por qualquer motivo, deve ocorrer para um sistema de drenagem ligado ao sistema público de águas pluviais ou para um corpo receptor apropriado.
- Quando o sistema público de águas pluviais não tiver capacidade para receber diretamente a descarga, deve ser prevista a construção de uma caixa de concreto armado com volume suficiente para acumular a descarga da rede no tempo de abertura da válvula.
- O corpo de água escolhido para receber a descarga deve ter a capacidade para isso, devendo ser analisada a influência da vazão descarregada no seu escoamento.

Pré-dimensionamento da válvula

A análise a seguir, proposta por Barbosa (2010), é utilizado para a escolha inicial do diâmetro nominal da válvula. O diâmetro adequado deve ser determinado pela análise do amortecimento do transiente hidráulico via simulação computacional.

O processo de pré-dimensionamento das válvulas será demonstrado em cinco passos:

1. Determinar a vazão da tubulação no estado permanente (dado de entrada).
2. Determinar a pressão máxima e mínima da tubulação (para o transiente hidráulico).
3. Calcular o valor de K_V e arredondar para o valor superior próximo (ver Tabela 1).

Segundo Smith (2004), a equação 21 deve ser aplicada para uma única fase, considerando comportamento de líquidos newtonianos:

$$K_V = Q_{\text{Perm}} \left(\frac{G}{\Delta P} \right)^{1/2} \quad (21)$$

1. Determinar o Diâmetro Nominal com base no valor de K_V (ver Tabela 1).
2. Verificar se a velocidade máxima ($V_{\text{máx}} = Q_{\text{máx}}/A$) não excede o valor da velocidade recomendada pelo fabricante (para esse tipo de válvula recomenda-se uma velocidade máxima de 15 m/s). Caso exceda, recalcular a velocidade para um diâmetro nominal acima e abaixo do valor determinado.

Onde:

K_V = coeficiente para o dimensionamento da válvula;
 G = densidade relativa;
 Q = vazão para o estado permanente (m^3/h);
 ΔP = diferencial de pressão (bar);
 $Q_{\text{máx}}$ = Vazão máxima para o transiente hidráulico no local de instalação da válvula (m^3/s).

SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Nesta seção, analisa-se a influência do diâmetro nominal, do tempo de fechamento e do volume de líquido descarregado pela VAO das simulações A e B (devido às limitações de espaço, apenas duas das cinco simulações foram escolhidas). Verifica-se, também, o amortecimento das pressões para as adutoras A, B, C, D e E. No final da seção, apresenta-se uma breve análise de outros dispositivos de proteção.

As adutoras de A até E apresentam as seguintes particularidades:

- A. adutora real, com local não especificado;
- B. trecho da adutora do município Alto Sertão em Alagoas;
- C. adutora hipotética com tubulação de ferro fundido classe K7;
- D. outro trecho da adutora do município Alto Sertão em Alagoas;
- E. adutora hipotética com tubulação de PVC padrão.

A Tabela 2 mostra os dados gerais das simulações, a Tabela 3 os dados da tubulação, a Tabela 4

Tabela 1 - Coeficiente K_v e DN (Exemplo: considere que a válvula trabalha em serviço temporário, e um K_v calculado de 110 , o diâmetro nominal escolhido está indicado na segunda coluna da linha indicada).

Simulação	$\alpha = \frac{\sum \left(\frac{P_{MÁX.COM} - P_{PERM}}{P_{MÁX.SEM} - P_{PERM}} \right) \Delta x}{L}$			Dados da válvula						
	α	DP Amostrado	α_{VAO}	Distância da bomba	DN (mm)	Pmin (mca)	TIAV (s)	ΔTAV (s)	$\Delta TPVA$ (s)	ΔTFV (s)
A	0,357	0,098	0,559	2,86	65	39,35	11,67	0,31	10,0	30,0
B	0,515	0,011	0,534	1,97	100	36,78	20,97	0,42	10,0	30,0
C	0,188	0,290	0,000	10,53	25	94,88	18,09	1,00	10,0	30,0
D	0,521	0,223	0,577	1,46	125	13,29	11,48	1,44	10,0	30,0
E	0,353	0,243	0,252	1,92	75	26,50	10,34	1,43	10,0	30,0

Fonte: Dimensionamento de válvulas auto-operadas do tipo “Y”. Valloy fabricante (algumas linhas da tabela foram omitidas por questões de espaço). *valores interpolados

Tabela 2 - Dados gerais da Simulação

Simulação	L (m)	Tempo da simulação TS, (S)	Celeridade (m/s)	Número de trechos	Passos de tempo, PT	Intervalo de discretização temporal, DT (s)	Intervalo de discretização Espacial, DX (m)
A	2103,44	100	361,86	106	12666	0,007895	2,857
B	3720,00	96	354,32	22	17249	0,005565	1,972
C	11300,00	100	1319,93	23	12540	0,007974	10,526
D	1980,00	90	354,32	21	21842	0,004120	1,460
E	1770,00	89	362,02	8	16687	0,005303	1,920

Tabela 3 - Dados da Tubulação

Simulação	Diâmetro interno (mm)	Espessura (mm)	Rugosidade (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Pressão de serviço (mca)
A	252,0	11,0	0,0015	3,0	0,38	100
B	462,0	19,2	0,0015	3,0	0,38	100
C	154,6	7,7	0,2600	172,0	0,28	785
D	462,0	19,2	0,0015	3,0	0,38	100
E	299,8	13,1	0,0015	3,0	0,38	100

Tabela 4 - Dados da Bomba

Simulação	Nº de bombas	Vazão por bomba (m^3/s)	Nº de Rotações (rpm)	Altura manométrica (m)	Rendimento por bomba	Momento de inércia ($kg.m^2$)
A	1	0,0610	1750	78,64	0,71	0,970
B	2	0,0825	1750	73,59	0,76	1,930
C	1	0,0160	3550	190,00	0,48	0,900
D	2	0,0980	1750	26,62	0,74	0,520
E	1	0,1010	1750	53,00	0,73	3,559

Tabela 5 - Dados da válvula antecipadora de onda e coeficiente de amortecimento máximo

DN (Pol)	DN (mm)	K _v	Válvula On- Off	Serviço Contínuo		Serviço intermitente	Serviço Esporádico
			V = 0,5 m/s Q _{Mín} (m ³ /h)	V = 2,0 m/s Q _{Mín} (m ³ /h)	V = 5,0 m/s Q _{Máx} (m ³ /h)	V = 8,0 m/s Q _{Máx} (m ³ /h)	V = 15,0 m/s Q _{Máx} (m ³ /h)
1	25	13,0	0,90	3,60	8,60	14,00	17,60
1.1/2	40	33,0	2,10	8,20	20,50	32,80	61,20
2	50	50,0	3,55	14,20	35,30	56,50	106,20
2.1/2	65	68,0	6,00	23,70	59,80	95,80	179,30
3	75	120,0	8,00	32,00	79,60	127,10	238,30
4	100	205,0	14,20	56,70	141,50	226,10	424,10
5	125	430,0	23,00*	91,95*	229,25*	367,40*	689,05*
6	150	580,0	31,80	127,20	317,90	508,70	954,00

os dados da bomba e a Tabela 5 os dados da válvula antecipadora de onda e coeficiente de amortecimento máximo.

As Figuras de 13 até 17 (em anexo) representam as envoltórias máximas e mínimas com e sem a válvula antecipadora de onda das simulações A, B, C, D e E para os dados apresentados nas Tabelas de 2 até 5.

Na simulação A, a válvula inicia a abertura em 11,67 segundos, abre completamente de forma não instantânea em 0,31 segundos, permanece completamente aberta em 10 segundos e fecha de forma suave em 30 segundos.

Na simulação B, a válvula inicia a abertura em 20,97 segundos, abre completamente de forma não instantânea em 0,42 segundos, permanece completamente aberta em 10 segundos e fecha de forma suave em 30 segundos. Nas demais simulações os dados são apresentados nas Tabelas de 2 até 5.

Análise do diâmetro nominal

A escolha do diâmetro nominal da válvula deve ser analisada de forma criteriosa. Caso o diâmetro for muito superior ao adequado, as oscilações de pressão podem acarretar na formação de onda de subpressão e/ou sobrepressão e ainda ocorrer a aspiração de ar.

Na Figura 3, observa-se que na válvula com diâmetro nominal de 125 mm ocorre a formação de subpressão e sobrepressão no local de instalação da válvula. Esse efeito se propaga por todo o sistema. No caso da válvula com dimensionamento adequado (DN=65 mm, determinado pela análise do amortecimento do transiente hidráulico), a válvula além de

proteger contra sobrepressão, tende a estabilizar a pressão de forma mais rápida.

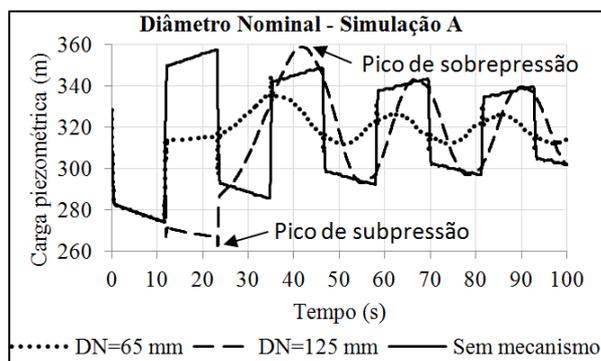


Figura 3 - Gráfico do DN (simulação A)

Na simulação B (Figura 4), observa-se um pico de máxima pressão em 52,3 segundos, com pressão de 115,79 mca e carga piezométrica de 397,83 m. Esse máximo de pressão formou-se por causa do acréscimo de 50% do diâmetro da válvula.

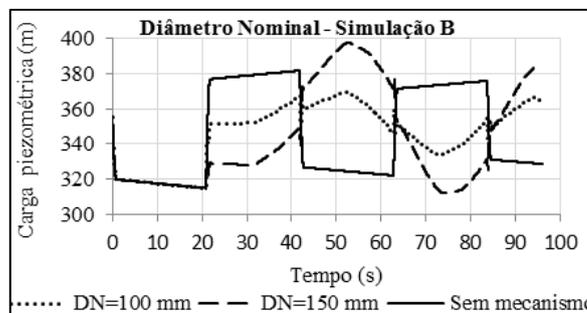


Figura 4 - Gráfico do DN (simulação B)

Intervalo do tempo de fechamento da válvula (ΔT_{FV})

A perturbação ocasionada pela mudança de fluxo, devido à manobra de fechamento, pode acarretar em ondas de sobrepressão, podendo causar danos aos equipamentos. Por isso, o tempo de fechamento deve ser suficiente para minimizar essa perturbação.

Na simulação A (Figura 5), avaliou-se o efeito do intervalo para o tempo de fechamento de 10 e 30 segundos. Nesta simulação, um fechamento completo da válvula em 10 segundos não é suficiente para minimizar a sobrepressão provocada pela mudança de fluxo, pois o primeiro pico de pressão, após o início de manobra de fechamento, apresenta uma pressão próxima da máxima no local de instalação da válvula antecipadora.

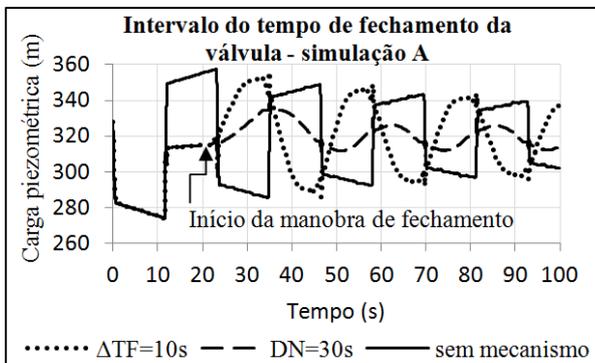


Figura 5 - Gráfico do ΔT_{FV} (simulação A)

Na simulação B (Figura 6), observa-se que a redução do tempo de fechamento da válvula acarreta na formação de um pico de máxima pressão após o início da manobra de fechamento da válvula.

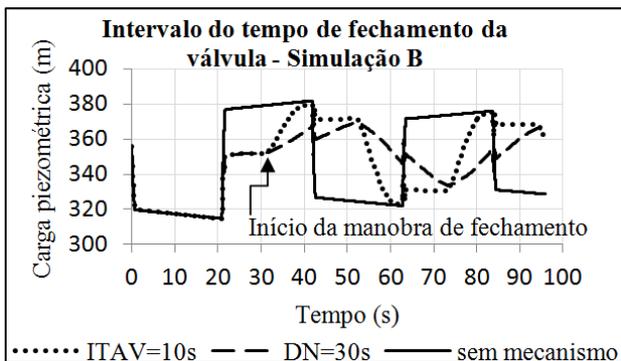


Figura 6 - Gráfico do ΔT_{FV} (simulação B)

Análise do volume de líquido descarregado pela válvula

A válvula deve descarregar o líquido em todo o tempo do alívio de pressão de forma adequada, para dessa forma, evitar danos ambientais.

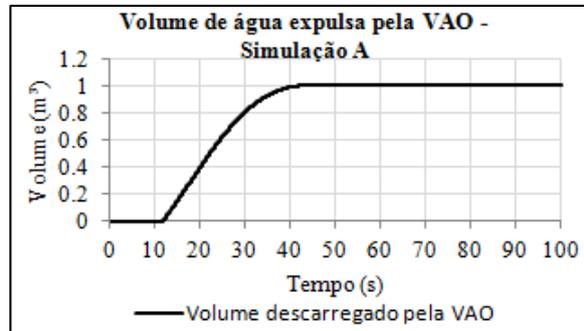


Figura 7 - Gráfico do volume descarregado (simulação A)

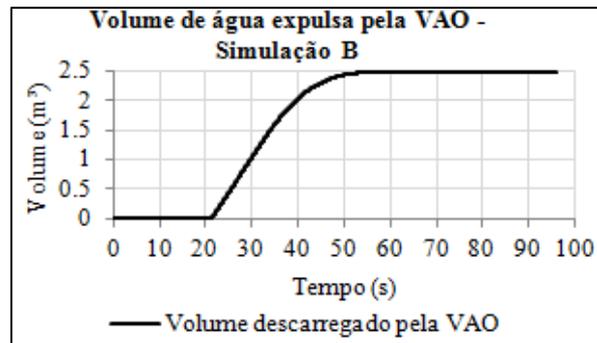


Figura 8 - Gráfico do volume descarregado (simulação B)

Com base no volume previsto, para que ocorra o amortecimento adequado de pressão, deve-se destinar o fluido, nesse caso a água, de acordo com as normas vigentes. Pode-se construir uma caixa de concreto para armazenar o fluido expulso, ou ainda, despejar diretamente num corpo hídrico próximo.

Nas simulações A e B (Figuras 7 e 8) a válvula antecipadora de onda descarregou 1,0 m³ e 2,5 m³ respectivamente.

Amortecimento das pressões

Nesta seção, realizou-se um estudo de cinco adutoras (com características descritas nas Tabelas 2, 3 e 4) para o amortecimento das máximas pressões em função do espaço.

O amortecimento das envoltórias máximas foi analisado pela equação, que é descrita pelo coeficiente de amortecimento máximo para o transiente hidráulico (α).

Esse coeficiente é um parâmetro que avalia o efeito do amortecimento dos picos de máximo, que ocorre ao longo da tubulação, e pode ser descrito pela equação 22.

$$\alpha = \frac{\int_0^L \frac{P_{MÁX,COM} - P_{PERM}}{P_{MÁX,SEM} - P_{PERM}} dx}{L} \quad (22)$$

Sendo: L o comprimento da tubulação; P_{PERM} a pressão para o estado permanente na seção x (mca); $P_{MÁX,SEM}$ a pressão máxima, sem mecanismo de proteção, na seção x (mca); $P_{MÁX,COM}$ a pressão máxima, com a válvula antecipadora de onda, na seção x (mca); dx o intervalo de discretização espacial (m).

Esse coeficiente apresenta um valor máximo unitário e mínimo nulo. Quanto maior for o amortecimento das pressões máximas em cada seção, menor será o coeficiente de amortecimento.

A pressão permanente é calculada com base na equação de Bernoulli, considerando, apenas, a perda de carga distribuída.

A pressão máxima, em cada seção com e sem mecanismo, pode ser determinada verificando o valor máximo de cada seção para o tempo da simulação.

Fazendo uma discretização espacial, a equação para o coeficiente de amortecimento máximo pode ser simplificada para:

$$\alpha = \frac{\sum \left(\frac{\bar{P}_{MÁX,COM} - \bar{P}_{PERM}}{\bar{P}_{MÁX,SEM} - \bar{P}_{PERM}} \right) \Delta x}{L} \quad (23)$$

O somatório é calculado para cada espaço entre duas seções da tubulação, utilizando a média dos valores das pressões entre as seções.

Os dados gerais das adutoras consideradas estão indicados na Tabela 2, os dados da tubulação na Tabela 3, e os dados das bombas na Tabela 4.

Os dados da válvula antecipadora de onda, o coeficiente de amortecimento máximo em toda a tubulação, o desvio padrão e o coeficiente de amortecimento na válvula estão ilustrados na Tabela 5.

Na Figura 9, observa-se que a adutora C apresenta um amortecimento máximo em aproximadamente 40% da tubulação, pois o seu

valor é nulo. A adutora D apresenta o pior coeficiente de amortecimento.

A válvula antecipadora de onda amortece as máximas pressões na adutora, e esse coeficiente mostra o efeito do amortecimento das máximas pressões em toda a tubulação.

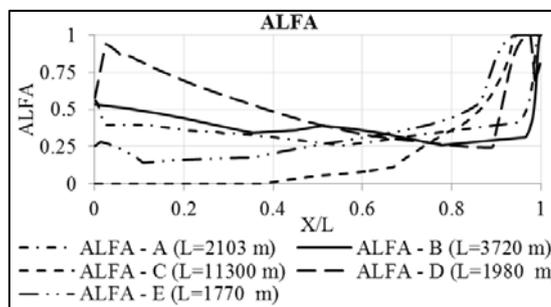


Figura 9 - Coeficiente de amortecimento máximo

Comparação com outros dispositivos

Nesta simulação instalou-se a ventosa no local indicado na Figura 10. A ventosa localiza-se a 1563 metros da bomba. Esse dispositivo atenua as máximas e mínimas pressões da adutora.

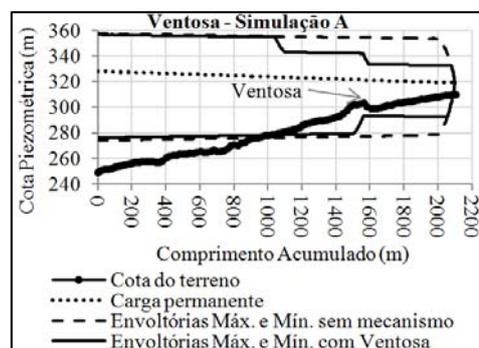


Figura 10 - Simulação A com Ventosa



Figura 11 - Simulação A com Válvula de Alívio

Na Figura 11, instalou-se a válvula de alívio a 2,85 metros de distância da bomba. Esse dispositivo atenuou as máximas pressões na adutora A.

Na Figura 12, verificou-se que o mecanismo tanque de alimentação unidirecional (TAU) minimizou os efeitos das máximas e mínimas pressões da adutora.

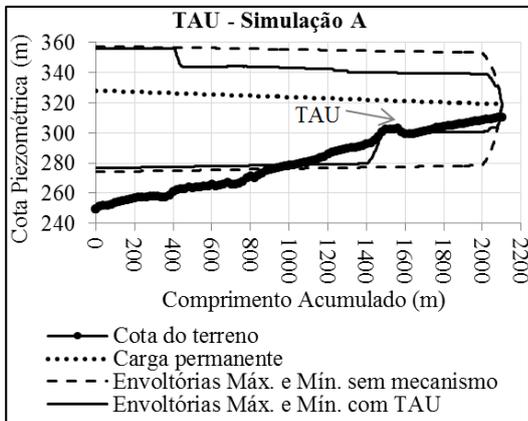


Figura 12 - Simulação A com TAU

CONCLUSÕES

A válvula antecipadora, além de proteger contra as sobrepressões, atua de forma a estabilizar mais rapidamente a pressão em toda a tubulação, contribuindo, assim, para minimizar os efeitos decorrentes do golpe de aríete.

Um fechamento repentino ocasiona a formação de onda de sobrepressão, isso ocorre devido à desaceleração repentina do escoamento, podendo ser evitada com um intervalo do tempo de fechamento próximo de 30 segundos.

O líquido deve ser descarregado num corpo hídrico próximo, respeitando os limites de vazão, ou ainda armazenado numa caixa de concreto, por isso, é de suma importância a verificação da vazão máxima e do volume de líquido descarregado.

O amortecimento das máximas pressões ao longo do espaço é bastante útil para verificar se a válvula está aliviando as máximas pressões de acordo com o esperado. Esse efeito pode ser determinado pela análise do coeficiente de amortecimento máximo para o transiente hidráulico.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, M. P. R. (2006). Golpe de Ariete: Modelagem computacional de chaminés de equilíbrio e tanques de alimen-

tação unidirecional como dispositivos atenuantes do Golpe de Ariete em adutoras. Dissertação - Universidade Federal do Ceará.

BARBOSA, J. M. C. (2010). Modelagem computacional da válvula antecipadora de onda como mecanismo de alívio para o golpe de aríete. Dissertação - Universidade Federal do Ceará.

CEDAE, Companhia Estadual de Aguas e Esgotos (2006). Norma geral para projeto e construção de estações elevatórias de água. Disponível em: http://www.cedae.com.br/div/norma_cedaeelevatoriaagua.pdf. Acessado em abril de 2013.

CHAUDHRY, M. H. Applied hydraulic transients. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1979.

JÚNIOR, F. P. (2007). Golpe de Ariete: Modelagem Computacional de ventosas de duplo efeito como mecanismo de alívio do golpe de aríete. Dissertação - Universidade Federal do Ceará.

SMITH, PETER; ZAPPE, R.W. Valve Selection Handbook: engineering fundamentals for selecting the right valve design for every industrial flow application. 5th Ed. Oxford: Elsevier Science, 2004.

VALLOY fabricante. Válvula antecipadora de onda – princípio de funcionamento. Disponível em: <http://www.valloy.com.br/PDF/YAO3D01.pdf>. Acessado em: Abril de 2013.

VALLOY fabricante. Dimensionamento de válvulas auto-operadas tipo "Y". Disponível em: <http://www.valloy.com.br/PDF/YTD01.pdf>. Acessado em: Abril de 2013.

WYLIE, E. BENJAMIN; STREETER, VICTOR LYLE. Fluid transients. McGraw-Hill International Book Co., 1978.

Modeling Of Anticipation Control Valve As A Relief Mechanism For Water Hammer

ABSTRACT

This work presents a computer modeling study of the effect of Non-instantaneous Anticipation Control Relief Valves installed in pipelines of a pumping system. The purpose of these valves is to decrease and minimize the effects of the Water Hammer phenomena on pumping systems. The anticipation valve starts its process of opening when the minimum pressure value allowed by its controlling mechanism is achieved, after the passage of the first pressure wave. It is required that the valve be installed near

the pump. The partial differential equations of the conservation of mass and conservation of moment were numerically solved using the Method of the Characteristics. A specific boundary condition for anticipation valve is proposed by this work. A computer code called UFC6 was written in order to implement this method and the specific boundary conditions proposed for the anticipation relief valve. This code was written using the Visual Basic Computer language. This study presents five cases showing the effects of non-instantaneous Anticipation Control on pumping systems. Two of the pipelines were hypothetical pipelines and three were real, existing pumping systems. This work also presents a guideline for the practical design of anticipation relief valves.

Key-words: *Hydraulic transient, relief mechanisms for water hammer, anticipation valve.*

ANEXO

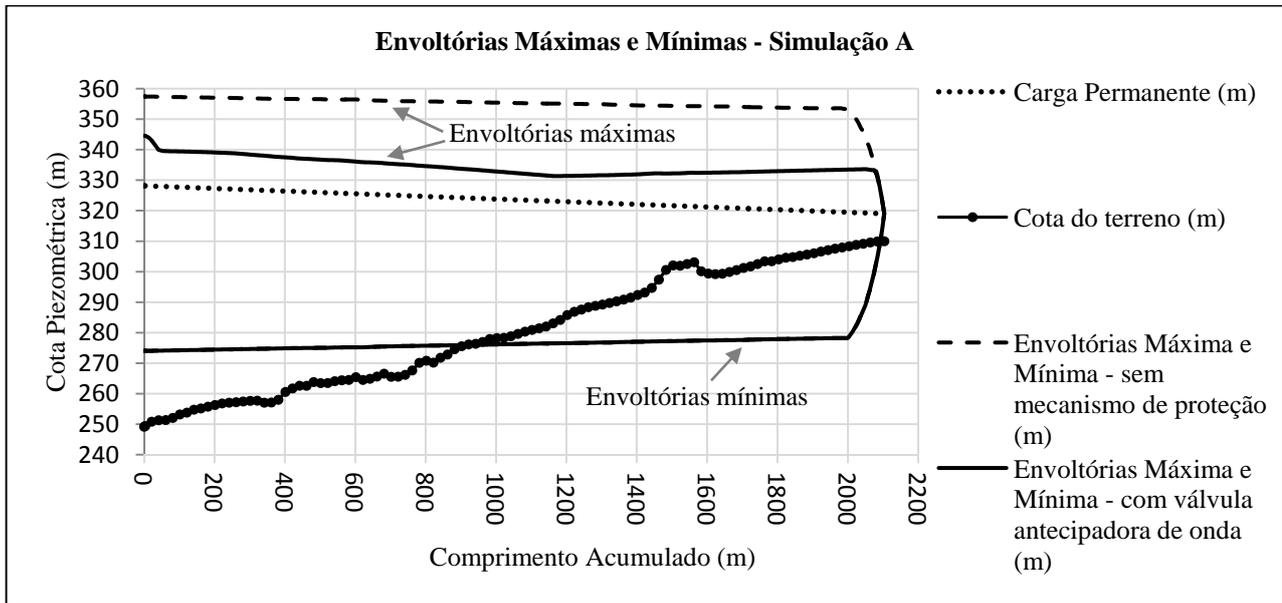


Figura 13 – Gráfico das envoltórias máximas e mínimas com e sem a válvula antecipadora de onda – simulação A

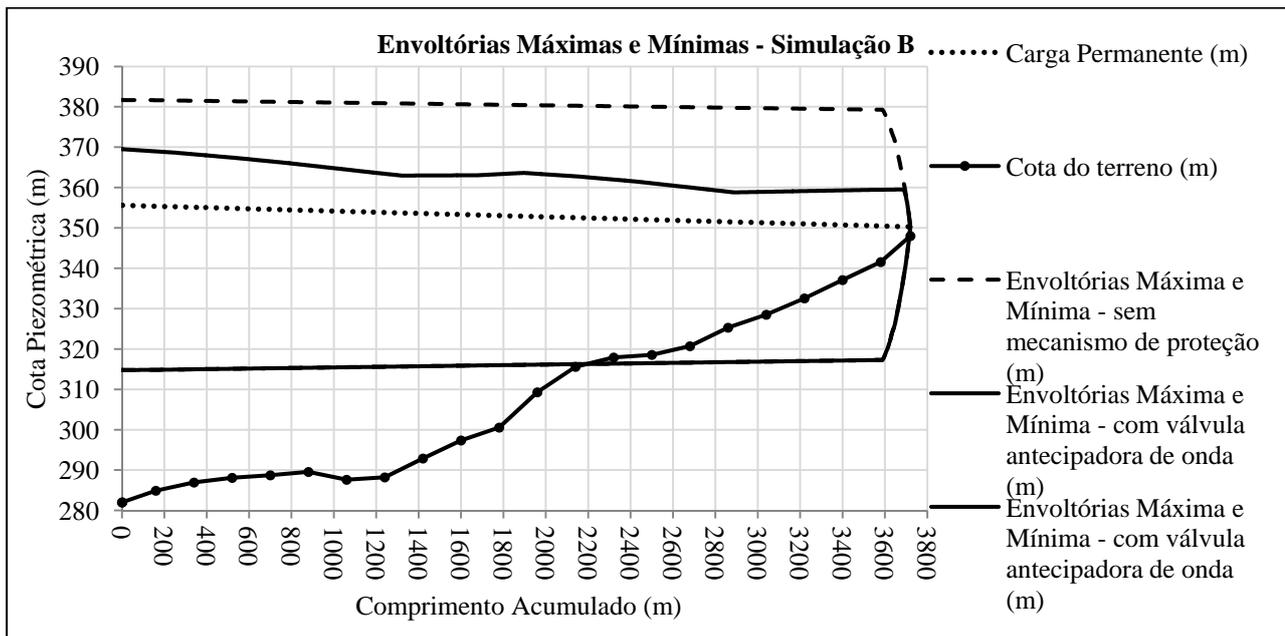


Figura 14 – Gráfico das envoltórias máximas e mínimas com e sem a válvula antecipadora de onda – simulação B

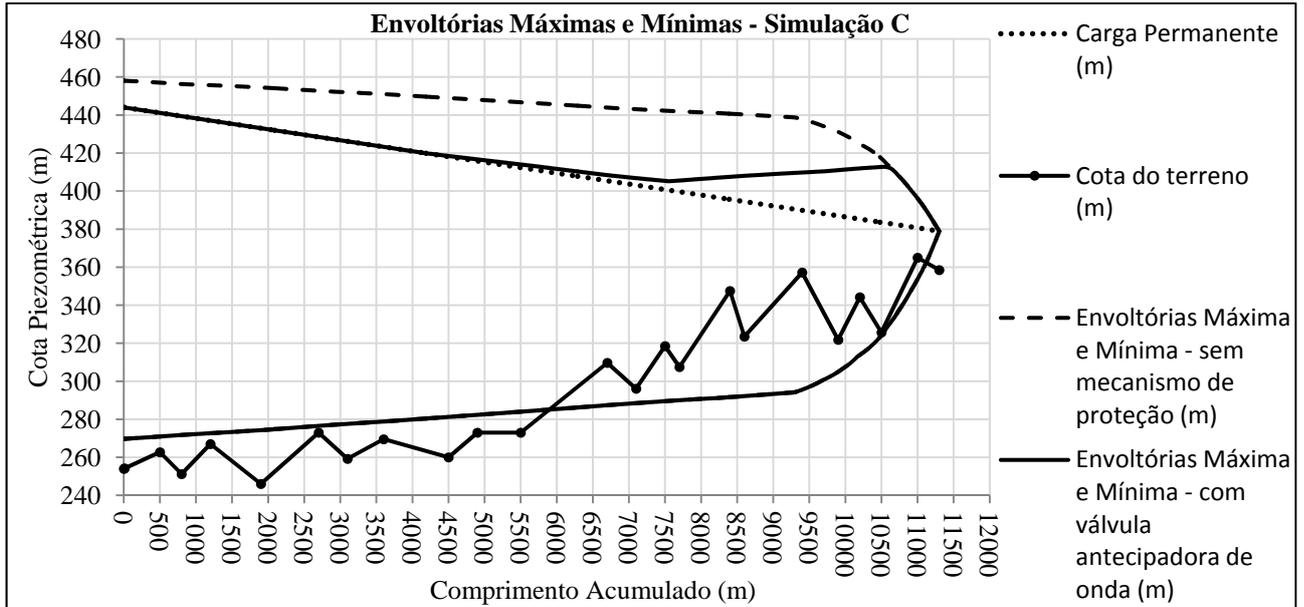


Figura 15 – Gráfico das envoltórias máximas e mínimas com e sem a válvula antecipadora de onda – simulação C

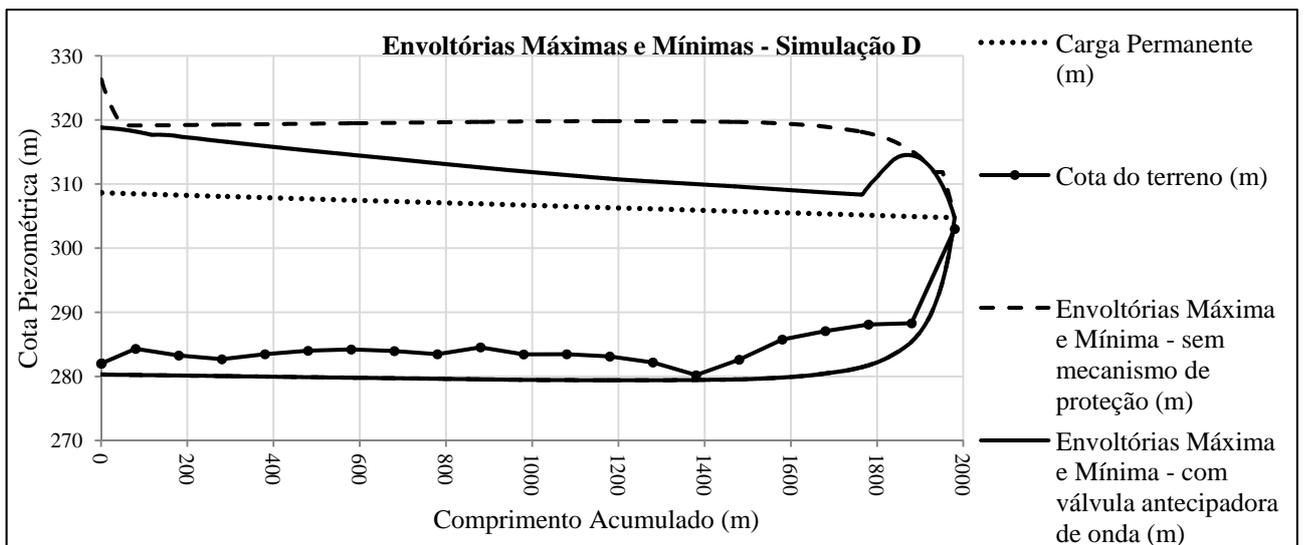


Figura 16 – Gráfico das envoltórias máximas e mínimas com e sem a válvula antecipadora de onda – simulação D

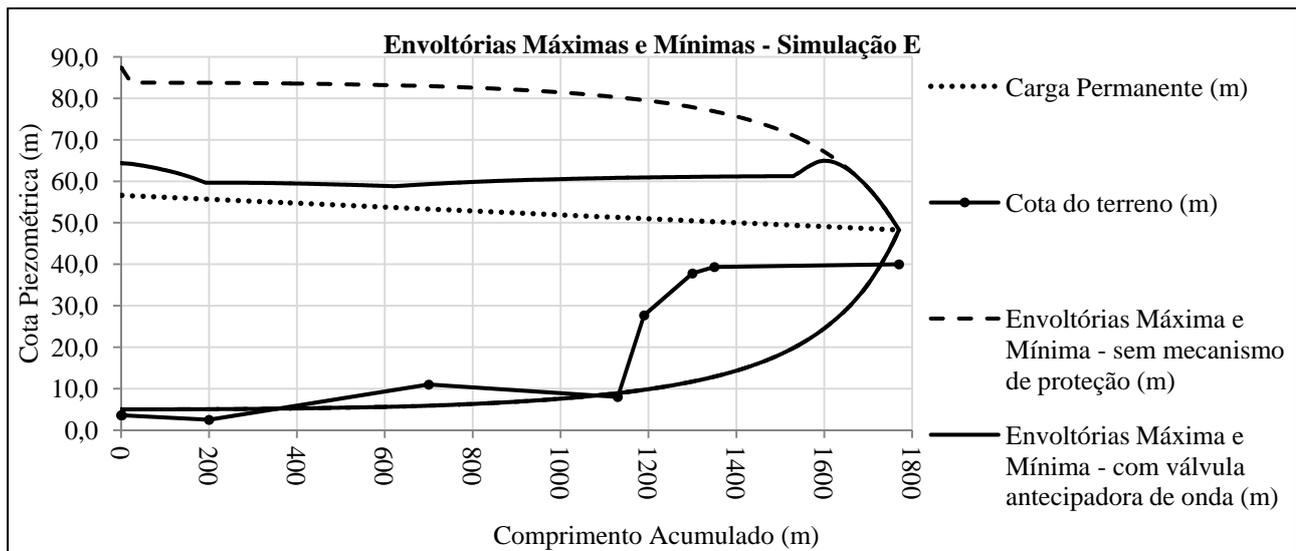


Figura 17 – Gráfico das envoltórias máximas e mínimas com e sem a válvula antecipadora de onda – simulação E