

Modelagem computacional do golpe de aríete em condutos plásticos

Computational modeling of water hammer in plastics conduits

• **Data de entrada:**
25/01/2015

• **Data de aprovação:**
03/07/2015

Fábio Eduardo Franco Rodrigues Ferreira | João Marcelo Costa Barbosa | Marco Aurélio Holanda de Castro

DOI 10.4322/dae.2015.008

Resumo

O dimensionamento impreciso de condutos plásticos de adução torna o sistema vulnerável ao golpe de aríete. O emprego de modelos mais precisos para a descrição do comportamento dos condutos conduz a melhorias sensíveis no seu dimensionamento. Assim, esta pesquisa propõe uma adaptação do modelo viscoelástico a condutos pressurizados sujeitos a transientes gerados por falha no bombeamento. O modelo foi implementado, para fins de teste, em um módulo computacional, utilizado para simulação do golpe de aríete em adutoras. As simulações foram realizadas em uma adutora hipotética composta por um conjunto motobomba a montante e um reservatório a jusante, com condutos de material PVC. Os resultados confirmaram os efeitos esperados de atenuação e dispersão da onda de pressão, indicando que previsões com base no modelo viscoelástico resultam em um dimensionamento economicamente menos dispendioso.

Palavras-chave: Golpe de aríete. Interrupção no bombeamento. Viscoelasticidade.

Abstract

The inaccurate sizing of plastic conduits of adduction makes the system vulnerable to the water hammer. The use of more accurate models for the description of the performance of conduits conduces to significant improvements in its sizing. Thus, this research proposes an adaptation of the viscoelastic model to pressurized conduits exposed to transients generated by pump failure. For testing purposes, the model was implemented in a computational module, used for simulation of water hammer in adductors. The simulations were performed under a hypothetical adductor composed by an upstream pump, a downstream reservoir and conduits of PVC material. The results confirmed the expected effects of attenuation and dispersion of the pressure wave, indicating that the predictions based on viscoelastic model results in an economically less expensive sizing.

Keywords: Water hammer. Pump shutdown. Viscoelasticity.

Fábio Eduardo Franco Rodrigues Ferreira* – Doutorando em Engenharia Civil – Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Ceará. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).

João Marcelo Costa Barbosa – Doutorando em Engenharia Civil – Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Ceará.

Marco Aurélio Holanda de Castro – Ph.D. em Engenharia pela Drexel University (1994). Professor titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Ceará. Membro associado da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).

* **Endereço para correspondência:** Rua: Holanda, 183. Maraponga, Fortaleza -CE.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento de água possuem um papel fundamental na melhoria de aspectos sociais, sanitários e econômicos. Entre seus elementos constituintes, destacam-se os equipamentos e instalações de adução, que são de suma importância, pois conduzem a água para as unidades que precedem a rede de distribuição. Algumas instalações de adução funcionam com base na operação de Estações Elevatórias de Água (EEAs), seja para transportar água de um ponto de cota mais baixa para outro de cota mais elevada, seja para aumento de vazão em adutoras por gravidade. Nesses casos, são empregados conjuntos motobombas e o escoamento fica sujeito às condições de bombeamento.

A ocorrência de perturbações nesses escoamentos, como acionamento ou desligamento de bombas, produz os fluxos não permanentes. Esses fluxos são caracterizados por variações temporais e espaciais na velocidade e pressão do fluido. Um tipo especial de escoamento não permanente é aquele localizado temporalmente entre dois regimes permanentes. Esse tipo de escoamento intermediário é denominado transiente.

O transiente hidráulico é descrito matematicamente por meio das equações de continuidade e momento, porém não existe ainda uma formulação que modele com total precisão os dados observados. Isso se deve às simplificações inerentes ao equacionamento e aos esquemas numéricos utilizados para obtenção de soluções. No que diz respeito ao equacionamento, pode-se destacar a simplificação relativa ao comportamento mecânico das paredes dos condutos sob pressão. A abordagem clássica, denominada modelo da coluna elástica, considera que o material do tubo possui comportamento mecânico elástico linear (CHAUDHRY, 1987; WYLIE; STREETER, 1978), ou seja, a energia mecânica do sólido se conserva durante a deformação e a tensão e a deformação estão

relacionadas mediante uma equação linear. Essa aproximação é satisfatória para tubos de metal e concreto. Entretanto, conforme atestam Rieutord e Blanchard (1979), Gally, Güney e Rieutord (1979), Ramos et al. (2004), Covas et al. (2005) e Stephens, Simpson e Lambert (2007), ela é imprecisa na descrição do comportamento mecânico de condutos plásticos como o polietileno e o PVC, durante o transiente hidráulico. Essa imprecisão resulta em dimensionamentos incorretos dos dispositivos atenuadores do golpe de aríete, aumentando as probabilidades de incidentes provocados por eventos transitórios. Em consequência, o sistema de abastecimento fica sujeito a interrupções no fornecimento de água, prejudicando a manutenção da cadeia produtiva e da saúde pública.

Com o objetivo de obter soluções adequadas a esse problema, Ramos et al. (2004), Covas et al. (2005), Stephens, Simpson e Lambert (2007), Soares (2007) e Soares, Covas e Carriço (2012) utilizaram o modelo viscoelástico linear para condutos plásticos e obtiveram resultados satisfatórios para o caso de transientes provocados por fechamento de válvula. Nesses casos, lograram êxito ao incorporar ao modelo hidromecânico os efeitos de dispersão e amortecimento da onda de pressão, característicos dos dados experimentais observados. Contudo, não contemplaram o caso dos transientes provocados por falhas no conjunto motobomba, em adutoras de recalque. É importante frisar que nesses tipos de evento transiente, a primeira onda de pressão é negativa, devido ao decréscimo de vazão, e se propaga na direção de jusante, na linha de descarga, diferentemente dos cenários de fechamento de válvula, em que a primeira onda de pressão é positiva, devido à redução da velocidade próximo à válvula, e se propaga a partir dela (CHAUDHRY, 1987).

De modo geral, os resultados e simulações são escassos para os cenários de desligamento de bomba. Assim, o artigo visa à avaliação e delimitação

do campo de validade do modelo viscoelástico linear em transientes provocados por interrupção no bombeamento.

METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada em três etapas. Na primeira, o modelo viscoelástico linear foi incorporado ao modelo clássico da coluna elástica pela introdução da deformação lenta na equação da continuidade deste modelo. As expressões para carga, vazão e deformação lenta foram obtidas com base nas equações diferenciais de momento e continuidade por meio do emprego de métodos de diferenças finitas e integração numérica.

Na segunda etapa, foi desenvolvida uma rotina computacional, escrita em linguagem Visual Basic, para automatização dos processos de simulação do transiente hidráulico com a consideração do comportamento viscoelástico linear em condutos. A rotina foi elaborada em um módulo computacional, utilizado para simulação do golpe de aríete em adutoras. No módulo, já constava o algoritmo baseado no modelo da coluna elástica, então se estabeleceu uma integração entre a rotina do modelo viscoelástico e a rotina do modelo da coluna elástica, com a finalidade de evitar a redundância na codificação e tornar o módulo mais eficiente. Em adição, foram implementadas rotinas para a integração do modelo viscoelástico aos algoritmos associados aos seguintes dispositivos de alívio do golpe de aríete: *one-way*, chaminé de equilíbrio e válvula antecipadora de onda.

Na terceira etapa da pesquisa, foram estabelecidas simulações em uma adutora hipotética, denominada Cuiá, composta por um conjunto motobomba a montante, um conjunto de condutos de PVC em série e um reservatório a jusante. Nas simulações, foram utilizados como referência os valores de parâmetros viscoelásticos calibrados por Covas et al. (2003). Como se tratava de uma adutora hipotética, os resultados numéricos obtidos com a consideração do modelo viscoelástico linear foram

comparados com aqueles resultantes do modelo da coluna elástica. Além disso, para verificar a adequabilidade do modelo proposto ao sistema hipotético, partiu-se do pressuposto de que o simulador hidráulico em transientes produzidos por interrupção no bombeamento deveria reproduzir os mesmos efeitos de atenuação e dispersão da onda de pressão que os observados por Ramos et al. (2004), Covas et al. (2005), Stephens, Simpson e Lambert (2007), Soares (2007) e Soares, Covas e Carriço (2012) em transientes gerados pelo fechamento de válvula. Os modelos viscoelástico e elástico também foram simulados levando em consideração a inclusão de dispositivos de alívio do golpe de aríete com o *one-way*, a chaminé de equilíbrio e a válvula antecipadora de onda.

Modelo matemático

Tradicionalmente, a descrição matemática do escoamento transiente em condutos forçados é estabelecida por intermédio da consideração de um conjunto de pressupostos físicos, denominado modelo da coluna elástica. Essa abordagem consiste em considerar as paredes do conduto linearmente elásticas. Trata-se de um modelo unidimensional em que a dissipação de energia é expressa por meio de uma formulação quase permanente.

A descrição do escoamento transiente é feita em termos das equações de momento e continuidade:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0$$

(Equação 1)

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

(Equação 2)

Em que: Q indica a vazão através do conduto ($[L]^3 \cdot [t]^{-1}$); t é o tempo, medido a partir do início do

evento transiente ($[t]$); g é a aceleração da gravidade ($[L].[t]^{-2}$); A é a área da seção transversal ($[L]^2$); H representa a cota piezométrica ($[L]$); x representa a distância coordenada ao longo do eixo do tubo a partir de uma origem arbitrária ($[L]$); f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional); D é o diâmetro do tubo circular ($[L]$); a representa a celeridade da onda de pressão ($[L].[t]^{-1}$).

Essas equações podem ser convertidas em equações diferenciais ordinárias, sujeitas a restrições, por meio da aplicação do método das características. Nesse método numérico, as equações de continuidade e momento são primeiramente convertidas em equações diferenciais ordinárias e depois resolvidas por uma técnica de diferenças finitas explícita.

$$\frac{dQ}{dt} \pm \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0$$

(Equação 3)

$$\frac{dx}{dt} = \pm a$$

(Equação 4)

Segundo Chaudhry (1979), a hipótese de comportamento elástico linear é válida para alguns tipos de conduto, como os feitos de metal ou concreto. Por outro lado, alguns pesquisadores (COVAS, 2005; SOARES, 2007) têm mostrado que a formulação elástica não produz resultados muito precisos para transientes em condutos plásticos ou viscoelásticos. Esse tipo de material representa uma situação intermediária entre sólidos elásticos e fluidos viscosos.

Em um sólido viscoelástico, a deformação total é dada pela soma de duas parcelas, a deformação elástica instantânea e a deformação lenta. A deformação lenta está relacionada à fluência, que corresponde à razão entre deformação e tensão,

e é explicada pelo princípio da superposição de Boltzman, o qual está pautado na ideia de que a tensão aplicada em cada instante tem uma contribuição independente na deformação final, de modo que a deformação total pode ser obtida como a integral de todas as contribuições diferenciais. Além disso, de acordo com esse princípio, a fluência é função do histórico de carregamento da amostra. Dessa forma, a deformação total dada em um tempo t é:

$$\varepsilon(t) = J_0 \sigma(t) + \int_0^t J(t-t') \frac{\partial \sigma(t')}{\partial t'} dt'$$

(Equação 5)

Em que: $J(t)$ é a função fluência do sólido viscoelástico ($[L]^2[F]^{-1}$); σ é a tensão aplicada no sólido viscoelástico ($[F][L]^{-2}$); $\varepsilon(t)$ é a deformação associada à tensão aplicada (adimensional); J_0 é o coeficiente de fluência elástico ($[L]^2[F]^{-1}$).

A função fluência, nesse caso, define o peso ou importância de cada tensão incremental no cálculo da deformação. A primeira parcela do segundo membro representa a deformação instantânea e a segunda, a deformação lenta.

Para a avaliação da integral de convolução explicitada na Equação 5, é necessária a definição de uma expressão analítica para a função fluência. Essa expressão é estabelecida pelo modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt generalizado, que tem validade assegurada para sólidos viscoelásticos, entre os quais se enquadram o PVC e o polietileno em condições normais de temperatura. De acordo com o modelo generalizado de Kelvin-Voigt, o comportamento mecânico de um material viscoelástico é equivalente ao do sistema de molas e amortecedores representado pela Figura 1. As molas têm massas desprezíveis e satisfazem à lei de Hooke e os amortecedores estão sujeitos ao comportamento mecânico descrito pela lei da viscosidade de Newton.

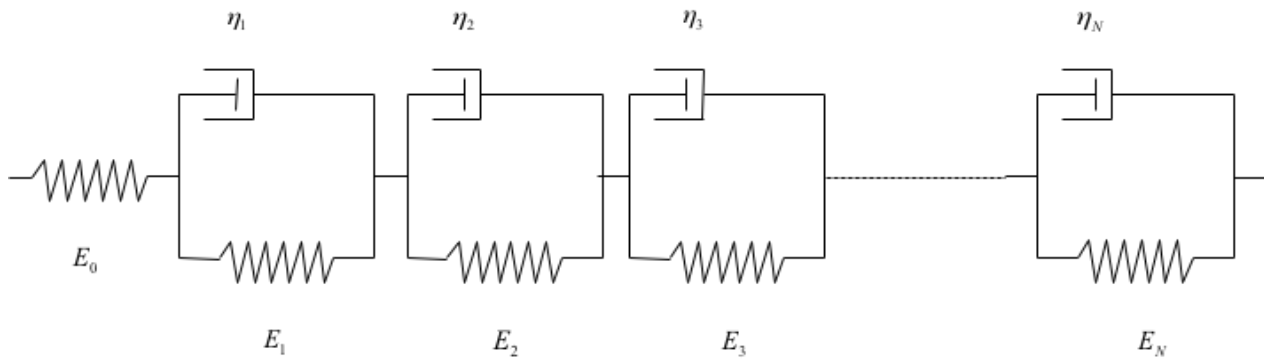


Figura 1 – Modelo generalizado de Kelvin-Voigt para um sólido viscoelástico.

O comportamento de fluência do material é descrito como um somatório das funções fluência de cada unidade de Kelvin-Voigt (FERRY,1980):

$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^n J_k (1 - e^{-t/\tau_k})$$

(Equação 6)

Em que: J_0 é a fluência do primeiro elemento mola definida por $J_0 = 1/E_0$ ($[L]^2[F]^{-1}$); J_k é a fluência da mola do k-ésimo elemento de Kelvin-Voigt definida por $J_k = 1/E_k$ ($[L]^2[F]^{-1}$); E_k é o módulo de elasticidade da mola do k-ésimo elemento ($[F].[L]^{-2}$); τ_k é o tempo de relaxamento do amortecedor no k-ésimo elemento ($[t]$); η_k é a viscosidade do amortecedor no k-ésimo elemento ($[F][t][L]^{-2}$). Os parâmetros J_k e τ_k da função fluência não são conhecidos *a priori* e podem ser determinados experimentalmente em um teste mecânico independente ou calibrados por meio de dados transientes.

Considerando a tensão circunferencial $\sigma = \alpha \Delta P / 2e$ (CHAUDRY, 1987; WYLIE; STREETER, 1978), a equação de deformação para um conduto circular pode ser explicitada como:

$$\varepsilon(t) = \frac{\alpha_0 D_0}{2e_0} [P(t) - P_0] J_0 + \int_0^t \frac{\alpha(t-t') D(t-t')}{2e(t-t')} [P(t-t') - P_0] \frac{\partial J(t')}{\partial t'} dt'$$

(Equação 7)

Em que: J_0 é a função fluência instantânea ($[L]^2[F]^{-1}$); $J(t)$ é a função fluência no tempo t ($[L]^2[F]^{-1}$); $\alpha(t)$ e α_0 são os coeficientes de ancoragem nos tempos t e $t = 0$, respectivamente (adimensional); D é o diâmetro interno do tubo ($[L]$); e é a espessura da parede do conduto ($[L]$); ΔP é a variação da pressão interna ($[F][L]^{-2}$).

A consideração da deformação lenta resulta em uma reformulação da equação da continuidade, que deve ser deduzida novamente a partir do teorema de transporte de Reynolds. As equações de continuidade e momento resultantes são trans-

formadas em equações diferenciais ordinárias pelo método das características:

$$\frac{dH}{dt} \pm \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{2a^2}{g} \left(\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right) \pm a \frac{fQ|Q|}{2gDA^2} = 0$$

(Equação 8)

$$\frac{dx}{dt} = \pm a$$

(Equação 9)

Em que: ε_r é a deformação lenta do material do conduto (adimensional).

Esse método de diferenças finitas não permite o cálculo direto da taxa de variação da deformação lenta, exigindo uma discretização numérica adicional. A discretização da derivada da deformação lenta depende do estabelecimento de uma relação funcional entre a deformação lenta e as variáveis e parâmetros apresentados na Equação 7. A derivada da deformação lenta é obtida pela derivação da segunda parcela da mesma equação. Já a deformação lenta e sua taxa de variação são fornecidas pelas expressões:

$$\varepsilon_r(i,t) = \sum_{k=1,\dots,N} \varepsilon_{rk}(i,t) = \sum_{k=1,\dots,N} \left\{ \int_0^t F(i,t-t') \frac{J_k}{\tau_k} e^{-\frac{t-t'}{\tau_k}} dt' \right\}$$

(Equação 10)

$$\frac{\partial \varepsilon_r(i,t)}{\partial t} = \sum_{k=1,\dots,N} \frac{\partial \varepsilon_{rk}(i,t)}{\partial t}$$

(Equação 11)

Em que: $\varepsilon_r(i,t)$ é a deformação lenta de um elemento de Kelvin-Voigt para um dado trecho, em um passo de tempo (adimensional). A função $F(i,t)$ é definida por:

$$F(i,t) = \frac{\alpha D}{2e} \gamma [H(i,t) - H_0(i)]$$

(Equação 12)

Em que: γ é o peso específico do fluido ($[F].[L]^{-3}$).

A diferenciação analítica da Equação 10, para cada elemento de Kelvin-Voigt, resulta na relação:

$$\frac{\partial \varepsilon_{rk}(i,t)}{\partial t} = -\frac{\varepsilon_{rk}(i,t)}{\tau_k} + \frac{J_k}{\tau_k} F(i,t)$$

(Equação 13)

A partir daí, faz-se necessária a utilização de algum esquema numérico para a determinação da deformação lenta para cada elemento de Kelvin-Voigt. Covas et al. (2005) empregam algumas manipulações analíticas e integração numérica para determinar recursivamente a deformação lenta de um elemento de Kelvin-Voigt:

$$\varepsilon_{rk}(i,t) = J_k [F(i,t) - F(i,t - \Delta t) e^{-\Delta t/\tau_k}] + J_k \tau_k \frac{F(i,t) - F(i,t - \Delta t)}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/\tau_k}) + \varepsilon_{rk}(i,t - \Delta t) e^{-\Delta t/\tau_k}$$

(Equação 14)

Assim, a derivada da deformação lenta para cada elemento de Kelvin-Voigt é calculada iterativamente por meio da Equação 14. A deformação lenta nas equações características é calculada pela soma das taxas de variação das deformações lentas de cada elemento dadas pela Equação 11.

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

As simulações foram realizadas em um módulo computacional denominado UFC6, utilizado para simulação do golpe de aríete em adutoras. Utilizou-se um sistema hipotético, denominado adutora Cuiá, composto por um conjunto moto-bomba na extremidade de montante, um perfil de sete trechos de tubulação de PVC DeFofo dispostos em série, perfazendo um total de 1.770 m de comprimento, e um reservatório na extremidade de jusante em nível constante. Os dados utilizados para a bomba, gerados pelo módulo UFC6, estão dispostos na Figura 2, apresentada a seguir.

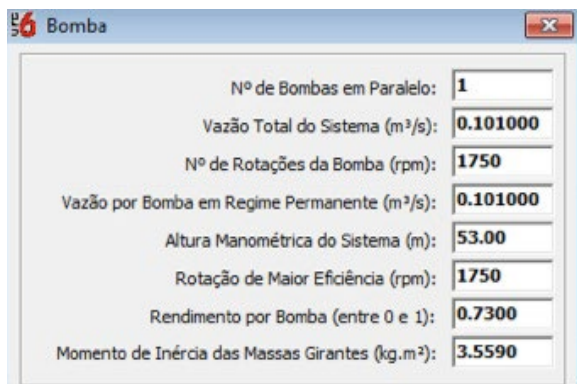


Figura 2 – Dados da bomba utilizados no sistema hipotético.

Foram empregados, para a descrição das propriedades geométricas e mecânicas da tubulação, os valores explicitados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades geométricas e mecânicas da tubulação.

Diâmetro interno (mm)	Espessura (mm)	Rugosidade (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Pressão de serviço (mca)
299,8	13,1	0,0015	3,0	0,38	100

Na Tabela 2, são mostrados os dados referentes ao perfil da adutora, comprimento de cada trecho, tipo de ancoragem e tipo de material. O tipo de ancoragem designado por “1” indica que os condutos estão ancorados de modo que não haja movimento longitudinal. O tipo de material representado por “4” indica que os condutos são feitos de material PVC DeFofo.

Tabela 2 – Dados relacionados ao perfil e aos trechos da adutora.

Trecho	Cota de montante (m)	Cota de jusante (m)	Comprimento (m)	Tipo de ancoragem	Tipo de material
1	3,61	2,5	200	1	4
2	2,5	11	500	1	4
3	11	8	430	1	4
4	8	27,69	60	1	4
5	27,69	37,8	110	1	4
6	37,8	39,35	50	1	4
7	39,35	40	420	1	4

Nas Figuras 3 a 7, estabeleceu-se uma comparação entre o modelo viscoelástico e o modelo elástico no sistema de adução por recalque hipotético. Os modelos simulados incluem rotinas que envolvem os seguintes dispositivos de atenuação do golpe de aríete: *one-way*, chaminé de equilíbrio e válvula antecipadora de onda.

Para a determinação de um mecanismo de alívio adequado a um sistema hidráulico e para o di-

mensionamento eficaz desse dispositivo, é necessário que o modelador avalie o comportamento da onda de pressão no sistema sem mecanismo de proteção. A onda de pressão é avaliada em um nó representativo da adutora. Em adutoras por recalque, esse nó encontra-se próximo à bomba. Os efeitos do transiente produzido por falha no funcionamento da bomba para a adutora Cuiá são apresentados na Figura 3.

Verifica-se que o modelo viscoelástico reproduz os efeitos de atenuação e dispersão da onda de pres-

ção. Trabalha-se com a hipótese de que, em um sistema real, os dados de carga apresentam esse tipo de comportamento, uma vez que, no modelo da coluna elástica, são feitas algumas hipóteses simplificadoras acerca da perda de energia.

Na Figura 4, são apresentadas as envoltórias máximas e mínimas considerando os modelos elástico e viscoelástico. É importante perceber que os valores de carga mínima e máxima devem mudar e, com isso, o dimensionamento de alguns dispositivos de atenuação do golpe de aríete.

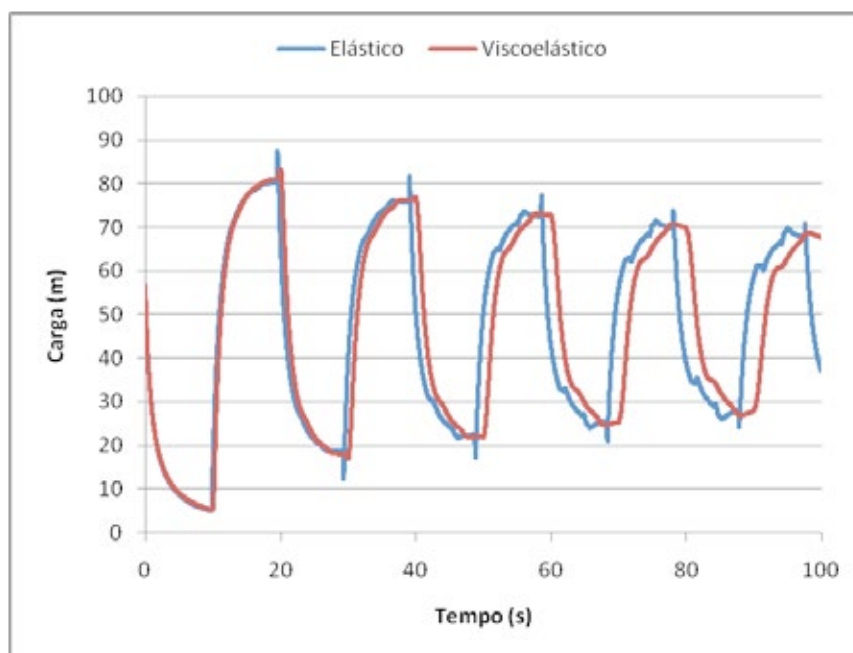


Figura 3 – Carga no nó 1: resultados numéricos para os modelos elástico e viscoelástico.

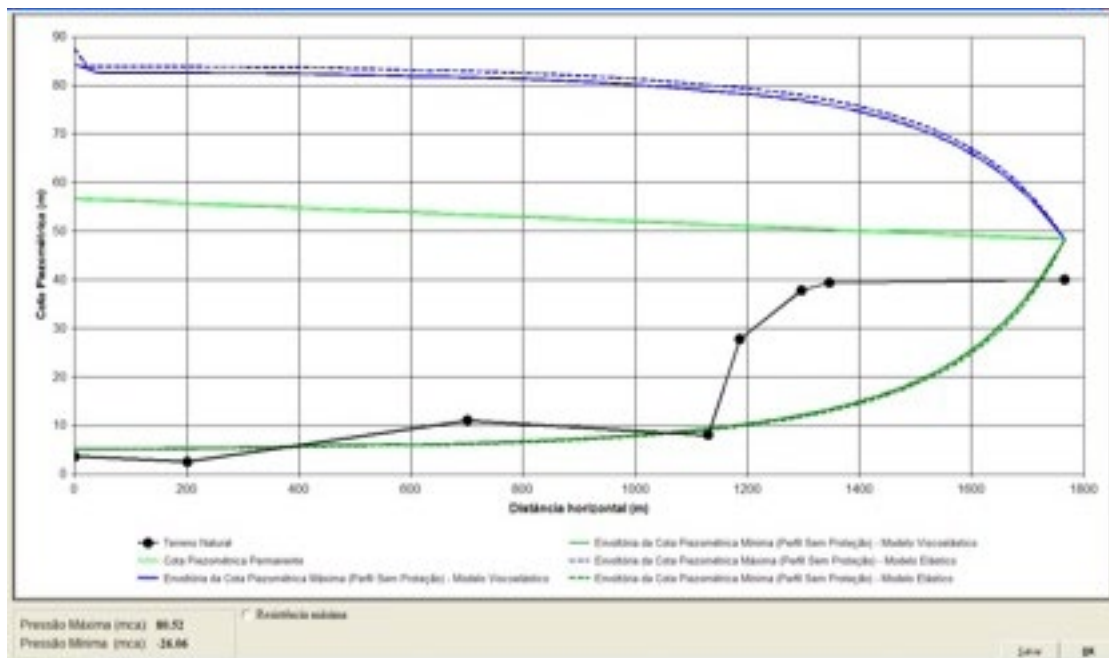


Figura 4 – Gráfico das envoltórias máximas e mínimas: comparação entre os modelos elástico e viscoelástico sem mecanismo de proteção contra o golpe de aríete.

Considerando a inserção de dispositivos de atenuação do golpe de aríete, os modelos elástico e viscoelástico foram comparados para os seguintes casos: adutora com tanque de alimentação unidi-

recional (*one-way*), adutora com chaminé de equilíbrio e adutora com instalação de válvula antecipadora de onda. Os dados de entrada para esses dispositivos são apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5:

Tabela 3 – Dados de entrada para o dispositivo *one-way*.

Dados do <i>one-way</i>		Dados do tubo de ligação	
Diâmetro (m)	Nível de água inicial (m)	Diâmetro (mm)	Coefficiente de perda localizada
1,50	10,00	300	2,50

Tabela 4 – Dados de entrada para o dispositivo chaminé de equilíbrio.

Dados da chaminé de equilíbrio		Dados do tubo de ligação	
Diâmetro (m)	Nível de água inicial (m)	Diâmetro (mm)	Coefficiente de perda na entrada
2,00	10,00	300	1,00

Tabela 5 – Dados de entrada para o dispositivo válvula antecipadora de onda.

Função de alívio		Função antecipadora de onda			Dados da tubulação	
Pressão máxima de regulagem (mca)	Pressão mínima de regulagem (mca)	Tempo inicial de abertura da válvula (s)	Intervalo do tempo de abertura da válvula (s)	Intervalo do tempo de permanência da válvula (s)	Intervalo do tempo de fechamento da válvula (s)	Diâmetro nominal (mm)
58,48	26,58	10,71	1,30	1,00	30,00	75

Nas Figuras 5 a 7, estabelece-se um paralelo entre os resultados da simulação para os modelos elástico e viscoelástico com proteção de um dado dispositivo de alívio. São apresentadas comparações entre os dois modelos de simulação, considerando a instalação do *one-way*, da chaminé de equilíbrio e da válvula antecipadora de onda, res-

pectivamente. O *one-way* e a chaminé de equilíbrio são inseridos no nó 6 e a válvula antecipadora de onda, no nó 2 a montante do conjunto motobomba, localizado no ponto de referência para a distância horizontal. A linha pontilhada indica a utilização do modelo elástico e a linha cheia, a utilização do modelo viscoelástico.

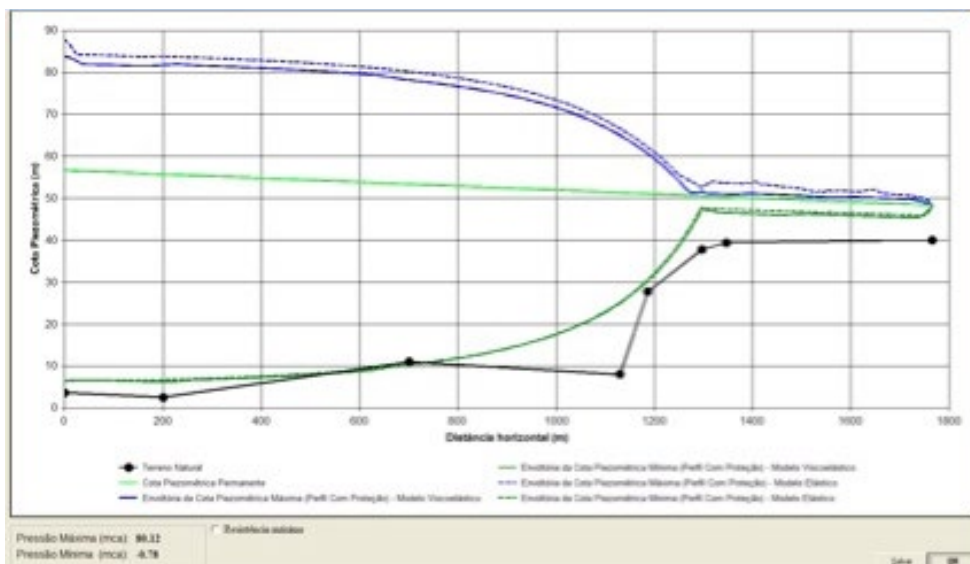


Figura 5 – Dados das envoltórias máximas e mínimas: comparação entre os modelos elástico e viscoelástico considerando a utilização do *one-way*.

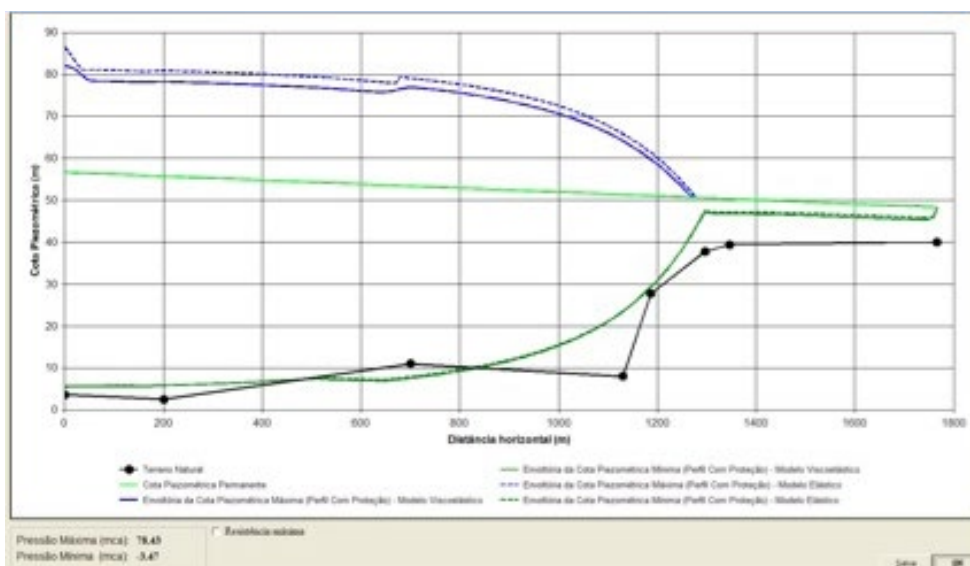


Figura 6 – Gráfico das envoltórias máximas e mínimas: comparação entre os modelos elástico e viscoelástico considerando a utilização da chaminé de equilíbrio.

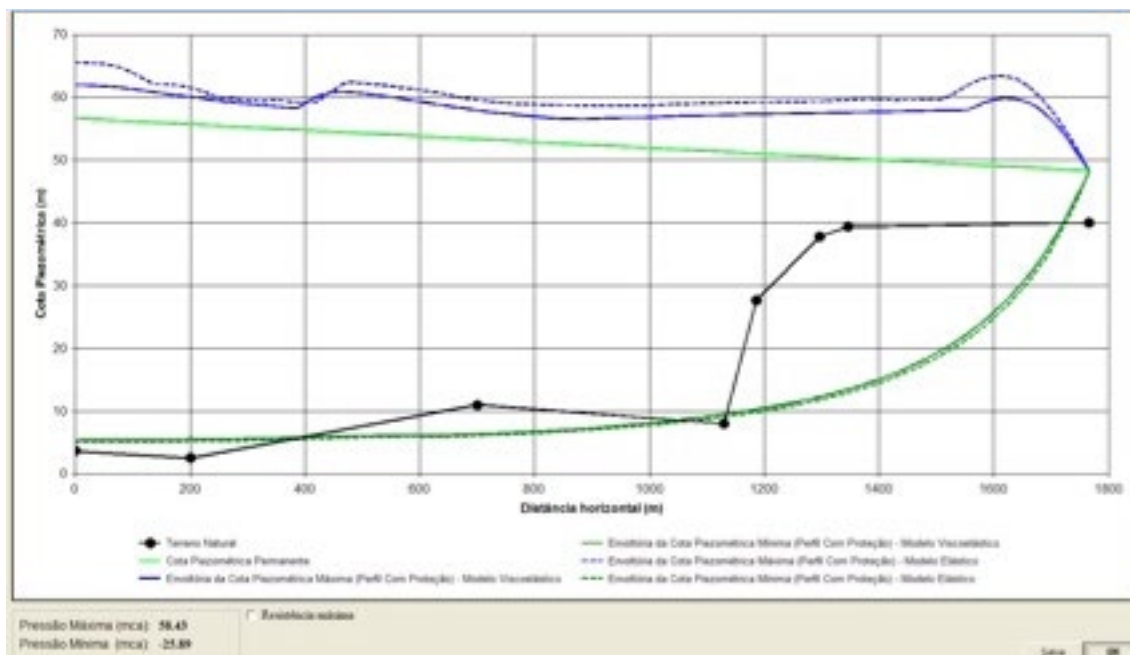


Figura 7 – Gráficos das envoltórias máximas e mínimas: comparação entre os modelos elástico e viscoelástico considerando a utilização da válvula antecipadora de onda.

Observa-se, em todos os casos, uma atenuação mais acentuada na envoltória máxima para o modelo viscoelástico. Também fica evidente o efeito de dispersão, observado pelo deslocamento lateral da envoltória máxima. Pode-se constatar que a hipótese proposta para o comportamento da onda de pressão em tubos plásticos se confirma nas simulações.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi elaborado um código computacional para simulação de transientes hidráulicos em condutos plásticos, produzidos por falha no bombeamento em sistemas de adução por recalque. As rotinas foram implementadas no módulo computacional UFC6, utilizado para simulação do golpe de aríete em adutoras.

No algoritmo de avaliação hidráulica, as equações diferenciais parciais representativas do es-

coamento transitório em condutos pressurizados foram resolvidas pelo método das características. O simulador hidráulico foi objeto de testes em um sistema hipotético composto por um conjunto motobomba a montante e um reservatório a jusante, com condutos de material PVC e transiente gerado pela interrupção do bombeamento. Além disso, foram realizadas simulações levando em consideração a inclusão de dispositivos de atenuação do golpe de aríete.

A formulação viscoelástica conseguiu reproduzir, em um cenário de falha no bombeamento, efeitos de atenuação e dispersão da onda de pressão similares aos observados por Ramos et al. (2004), Covas et al. (2005), Stephens, Simpson e Lambert (2007), Soares (2007) e Soares, Covas e Carriço (2012) em transientes gerados pelo fechamento de válvula. Entretanto, para as condições de escoamento ana-

lisadas, as diferenças entre os modelos elástico e viscoelástico não foram significativas.

Para pesquisas futuras, propõe-se a utilização de um sistema de adução experimental ou de campo, com vistas à avaliação da precisão do modelo viscoelástico em relação ao modelo da coluna elástica, como também a comparação entre esses modelos e os dados experimentais considerando variados regimes de escoamento no sistema de recalque, de modo a verificar se as diferenças entre os modelos estão dentro dos intervalos previstos por coeficientes de segurança do projeto.

Outra proposta de trabalho futuro é estender a análise para elementos de topologia mais complexa, como as redes de distribuição, componentes do sistema de abastecimento de água. Nesse contexto, sugere-se também a consideração de transientes provocados por falha no bombeamento.

REFERÊNCIAS

- CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transients**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1979.
- CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transients**. 2nd. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1987.
- COVAS, D. ; GRAHAM, I. N.; MAKSIMOVIC, C.; RAMOS, H.; KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A.. An Assessment of the Application of Inverse Transient Analysis for Leak Detection: Part II - Collection and Application of Experimental Data. In: MAKSIMOVIC, C.; BUTLER, D.; MEMON F. A. (Ed.). **Advances in Water Supply Management**. Lisse: Swets and Zeitlinger, 2003.
- COVAS, D. ; STOIANOV, I.; MANO, J. F.; RAMOS, H.; GRAHAM, N.; MAKSIMOVIC,
- C. The Dynamic Effect of Pipe-Wall Viscoelasticity in Hydraulic Transients. Part I - Experimental Analysis and Creep Characterization. **Journal of Hydraulic Research**, v. 42, n. 5, p. 516-530, 2004.
- COVAS, D.; STOIANOV, I.; MANO, J. F.; RAMOS, H.; GRAHAM, N.; MAKSIMOVIC, C. The Dynamic Effect of Pipe-Wall Viscoelasticity in Hydraulic Transients. Part II - Model Development, Calibration and Verification. **Journal of Hydraulic Research**, v. 43, n. 1, p. 56-70, 2005.
- FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- GALLY, M.; GUNEY, M.; RIEUTORD, E.. An investigation of pressure transients in viscoelastic pipes. **Journal of Fluids Engineering**. V. 101, n. 04, p. 495-499, 1979.
- KOELLE, E. ; ALMEIDA, A. B.. **Fluid transients in pipe networks**. Elsevier applied science, 1992.
- LISTER, M. The Numerical Solution of Hyperbolic Partial Differential Equations by the Method of Characteristics In: RALSTON, A. e WILF, H. S. (Ed.). **Mathematical Methods for Digital Computers**. New York: Wiley and Sons, 1960.
- MOREIRA T.. **Saneamento básico: desafios e oportunidades**. Revista do BNDES, 1996.
- MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. 4. Ed. São Paulo: Edgard Blücher , 2004.
- PEZZINGA, G.; SCANDURA, P. Unsteady flow in installations with polymeric additional pipe. **Journal of Hydraulic Division**, v.121, n.11, p. 802-811, 1995.
- RAMOS, H.; COVAS, D.; BORG, A. ; LOUREIRO, D. . Surge Damping Analysis in Pipe Systems: Modelling and Experiments. **Journal of Hydraulic Research**. v. 42, n.4, p. 413-425, 2004.
- RIEUTORD, E.; BLANCHARD, A. . Ecoulement Non-permanent em Conduite Viscoelastique – Coup de Bélier. **Journal of Hydraulic Research**, v. 17, n.1, p. 217 – 229, 1979.
- SOARES, A. K. **Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório**. Tese de doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, 2007.
- SOARES, A. K.; COVAS, D.; CARRIÇO, N. . Transient Vaporous cavitation in viscoelastic Pipes. **Journal of Hydraulic Research**. V.50. n.2. p.228-235, 2012.
- STEPHENS, M.; SIMPSON, A.; LAMBERT, M.. Hydraulic Transient Analysis and leak detection on transmission pipelines: Field tests, model calibration, and inverse modeling. **World Environmental and Water Resources Congress**. p. 1 - 17, 2007.
- WARD, I. M.; SWEENEY, J. **An introduction to the mechanical properties of solid polymers**. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- WHITE, F. M. **Viscous Fluid Flow. 2nd Edition**. New York: McGraw-Hill, Inc, 1991.
- WYLIE, E. Benjamim; STREETER, Victor L. **Fluid Transients**. São Paulo: McGraw-Hill doBrasil, 1978.