

I-082 – SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS EM TUBULAÇÕES DE PEAD E PVC

Arthur Brito Nunes Diniz⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH/UnB).

José Fernandes Junior⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Goiás (UFG). Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás (PPGEAS/UFG).

Alexandre Kepler Soares⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Mestre e Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Pós-Doutorado no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Portugal. Professor associado no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH/UnB).

Endereço ^{(1) e (3)}: Anexo SG-12, Térreo, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília – UnB, CEP: 70.910-900, Brasília – DF. E-mail⁽¹⁾: arthurbdiniz@gmail.com ; E-mail⁽³⁾: aksoares.unb@gmail.com

Endereço ⁽²⁾: Av. Universitária, 1488, Setor Universitário, CEP: 74.620-220, Goiânia – GO. E-mail⁽²⁾: jfslmb@gmail.com

RESUMO

A análise de transitórios hidráulicos em tubos plásticos tem sido extensivamente investigada, uma vez que o comportamento reológico viscoelástico de tais tubos não pode ser reproduzido pelo clássico modelo da coluna elástica. Assim, este trabalho realiza um estudo sobre a simulação hidráulica de transitórios em tubos de PVC e PEAD. O comportamento viscoelástico é simulado com o uso de funções de fluência já obtidas por outros autores. Os resultados obtidos mostraram que, para o sistema composto por tubos de PVC, o modelo elástico pode ser utilizado para a previsão dos picos de pressão, bem como para o decaimento e atenuação dos picos. No entanto, para fins de calibração do modelo hidráulico para, por exemplo, detecção de vazamentos ou bloqueios de tubulações e outras finalidades que dependam da reprodução do sinal de pressão, o modelo viscoelástico deve ser utilizado, pois reproduz com precisão a forma do sinal de pressão tanto nos tubos de PVC quanto nos tubos de PEAD.

PALAVRAS-CHAVE: Transitórios Hidráulicos, Viscoelasticidade, Tubos Plásticos.

INTRODUÇÃO

Redes de condutos forçados consistem em estruturas destinadas ao transporte de fluidos sob pressão, como sistemas de distribuição de água destinados ao abastecimento público e transporte de esgotos domésticos por sistemas de recalque. Associados aos transportes dos fluidos sob pressão estão os transitórios hidráulicos, regime de escoamento que apresenta variações de pressão e vazão causadas por perturbações no escoamento permanente. A parada programada das bombas, os ajustes das válvulas de controle e eventos acidentais, como queda de energia elétrica em sistemas de bombeamento, são fatores que geram condições transitórias nos condutos forçados. De acordo com Jung *et al.* (2007), o comportamento dos sistemas de abastecimento de água sob condições de escoamento transitório deve ser devidamente avaliado visando evitar falhas no abastecimento e proporcionar seu funcionamento confiável e seguro. Segundo Wichowski (2006), é importante considerar o escoamento transitório na concepção, manutenção e operação dos sistemas de distribuição de água. Para tanto, modelos hidráulicos são usualmente empregados para as simulações computacionais. Para que tais modelos sejam confiáveis na reprodução das condições de escoamento, é preciso que eles levem em consideração os fenômenos hidráulicos durante o escoamento transitório. Um dos fenômenos mais importantes na análise dos transitórios é a atenuação das variações de pressão devido ao comportamento dinâmico da tensão de atrito nas paredes do conduto e, também, do comportamento reológico do conduto.

De acordo com Karney (2006), eventos transitórios podem criar mudanças nas condições iniciais de escoamento, gerando picos de pressão no interior do conduto e, quando a tensão interna gerada excede a máxima tensão

resistida pelo material do conduto, o mesmo pode romper. Da mesma forma, picos de pressão negativa ocorrem, o que pode levar o fluido em escoamento a cavitatar, gerando a separação da coluna d'água no interior do conduto.

Em condutos feitos de materiais plásticos, como o caso de polietileno e PVC, que apresentam comportamento reológico viscoelástico (propriedade de deformação lenta ao longo do tempo), o modelo clássico do golpe de aríete é consideravelmente impreciso (Covas *et al.*, 2005; Soares *et al.*, 2008). Isso se deve ao fato de que o modelo clássico considera que o material constituinte do conduto apresenta comportamento mecânico elástico linear, como é o caso de condutos feitos de concreto e metais.

O presente artigo apresenta um modelo viscoelástico para a simulação de transitórios hidráulicos em tubulações de PVC e PEAD. Dados experimentais de um sistema reservatório-tubo-válvula construído no Imperial College de Londres, Reino Unido, são utilizados para a validação do modelo hidráulico. A partir dos resultados obtidos por Covas *et al.* (2005) e Soares *et al.* (2008) para a caracterização do comportamento viscoelástico de tubos de PEAD e PVC, respectivamente, simulações hidráulicas são realizadas para a comparação dos sinais de pressão durante transitórios hidráulicos para os dois materiais. Os efeitos dinâmicos, como atenuação dos picos de pressão e atraso na onda de pressão, são comparados para os dois materiais e recomendações para as simulações hidráulicas são propostas.

MODELO HIDRÁULICO

O fluxo transitório em um conduto plástico sob pressão é governado por equações diferenciais parciais não-lineares, representativas das leis da quantidade de movimento (1) e de conservação de massa (2) (Chaudhry, 2014; Wylie e Streeter, 1993).

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{dQ}{dt} + h_f = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dH}{dt} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2c^2}{g} \frac{d\varepsilon_r}{dt} = 0 \quad (2)$$

nas quais Q é vazão de escoamento, H a carga piezométrica, c velocidade da onda elástica, g a aceleração da gravidade, A a área da seção transversal do conduto, x a coordenada ao longo do eixo do conduto, t o tempo, h_f a declividade da linha de energia, d/dt é a derivada total descrita por $d/dt = \partial/\partial t + v \partial/\partial x$, v é a velocidade absoluta do fluido em escoamento e ε_r a taxa de deformação lenta.

Uma das ferramentas utilizadas para se resolver o conjunto de equações diferenciais parciais é o Método das Características – MOC (*Method of Characteristics*). O MOC consiste em discretizar espacial e temporalmente o problema analisado, criando uma malha, no caso deste trabalho, retangular descrita no espaço e no tempo, em intervalos Δx e Δt . O MOC pode transformar o par de Equações (1) e (2) em um par de equações diferenciais ordinárias válidas ao longo das características positiva C^+ e negativa C^- completas, na malha característica.

$$C^\pm: \frac{dH}{dt} \pm \frac{c}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{2c^2}{g(V \pm c)} \left(V \frac{d\varepsilon_r}{dt} \pm c \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right) \pm ch_f = 0 \quad (3)$$

válidas em $dx/dt = V \pm c$, na qual o operador derivada total é descrito como $d/dt = \partial/\partial t + (V \pm c) \partial/\partial x$.

Usando-se as derivadas implícitas de primeira ordem, as características apresentadas na Equação (3) são resolvidas na malha do MOC e chega-se na solução dada por:

$$C^\pm: [H_{i,j} - H_{i\mp 1,j}] \pm \frac{c}{gA} [Q_{i,j} - Q_{i\mp 1,j}] \pm c \Delta t_{i,j\mp 1} h_f + \frac{2c^2/g}{Q_{i\mp 1,j-1} \pm c} \left[\frac{Q_{i\mp 1,j-1}}{A} (\varepsilon_r^{i,j} - \varepsilon_r^{i\mp 1,j}) \pm c \left(\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right)_{i,j\mp 1} \Delta t_{i,j\mp 1} \right] = 0 \quad (4)$$

válida em $\Delta x/\Delta t = V \pm c$.

De uma forma geral, a velocidade do escoamento V pode ser negligenciada, de modo que dx/dt pode ser tomado como $\pm c$. Isso é equivalente a dizer que o termo convectivo das Equações (3) e (4) são negligenciados, levando às Equações simplificadas (5) e (6).

$$C^\pm: \frac{dH}{dt} \pm \frac{c}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{2c^2}{g} \left(\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right) \pm ch_f = 0 \quad (5)$$

$$C^\pm: [H_{i,j} - H_{i\mp 1,j}] \pm \frac{c}{gA} [Q_{i,j} - Q_{i\mp 1,j}] \pm c\Delta t h_f + \frac{2c^2\Delta t}{g} \left(\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right)_{i,j\mp 1} = 0 \quad (6)$$

O par de características positivas e negativas apresentadas na Equação (6) constituem a malha característica, como mostrada na Figura 1.

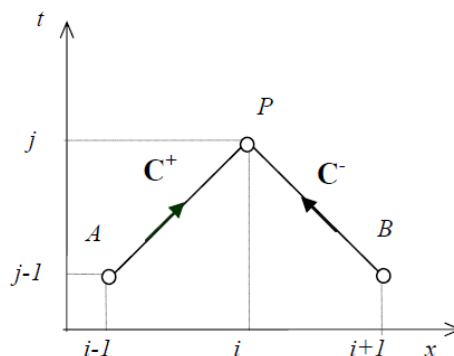


Figura 1: Malha característica do MOC.

Covas *et al.* (2005) apresentam o modelo mecânico para determinação da expressão analítica da função fluência $J(t)$, que é baseada em uma sequência em série de pistões com viscosidade μ_N e molas com módulo de elasticidade E_N , para $N = 0, 1, 2, \dots$, ligadas em paralelo. Esse modelo proposto é chamado de Modelo de Kelvin-Voigt generalizado de um sólido viscoelástico, que define a função de fluência do material plástico.

$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^N J_k \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \quad (7)$$

em que J_0 é a fluência da primeira mola do modelo, definida como $J_0 = 1/E_0$; J_k é a fluência da k -ésima mola do modelo, definida como $J_k = 1/E_k$, E_k é o módulo de elasticidade da k -ésimo elemento de mola, τ_k é o tempo de retardo do pistão do k -ésimo elemento, $\tau_k = \mu_k/E_k$, μ_k é a viscosidade do pistão do k -ésimo elemento do modelo.

RESULTADOS

Para verificação do modelo hidráulico desenvolvido, dados experimentais de um sistema reservatório-tubo-válvula construído no Imperial College de Londres, Reino Unido, e utilizados por Covas *et al.* (2005), foram utilizados. O sistema em série é composto por tubos de PEAD, 50,6 mm de diâmetro interno, 6,25 mm de espessura da parede, com extensão total de 271,50 m. Dados de carga de pressão e deformação circunferencial foram adquiridos com uma frequência de 600 Hz. Para este trabalho, foram utilizados os dados para vazão inicial de 1,008 L/s, celeridade de 395 m/s e função de fluência representada por três elementos Kelvin-Voigt ($\tau_1 = 0,05$ s; $\tau_2 = 0,50$ s; $\tau_3 = 10,0$ s; $J_1 = 1,04E-10$ Pa⁻¹; $J_2 = 1,24E-10$ Pa⁻¹; $J_3 = 4,10E-10$ Pa⁻¹). As Figuras 2a e 2b apresentam os resultados numéricos e os dados experimentais de carga de pressão e taxa de deformação, respectivamente, para o ponto de monitoramento mais próximo da válvula de jusante ($x = 271$ m). Os resultados demonstram que o modelo hidráulico prevê com precisão a atenuação e a dispersão da onda de pressão, ajustando-se aos dados experimentais.

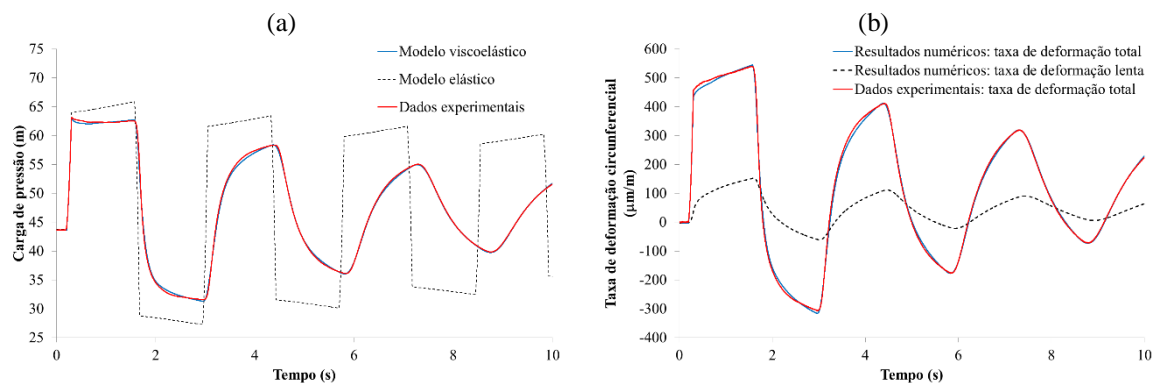


Figura 2: Dados experimentais e resultados numéricos: (a) carga de pressão; e (b) taxa de deformação total e taxa de deformação lenta.

Considerando as mesmas características do ensaio e da instalação experimental do Imperial College, simulações foram realizadas para o caso do sistema ser composto por tubos de PVC. Soares *et al.* (2008) calibraram o modelo viscoelástico para um sistema com tubos de PVC e obtiveram a celeridade de 460 m/s e função de fluência representada por apenas um elemento Kelvin-Voigt ($\tau_1 = 0,05$ s; $J_1 = 0,225E-10$ Pa⁻¹). A Figura 3 apresenta os resultados das simulações hidráulicas para o sistema reservatório-tubo-válvula com tubos de PEAD e PVC em termos das cargas de pressão, e a Figura 4 apresenta os resultados de taxa de deformação lenta.

Pode-se verificar na Figura 3 que, para tubos de PEAD, o regime permanente do modelo viscoelástico é alcançado dentro do tempo de simulação de 50 s. No entanto, e ao contrário do que ocorre com os tubos de PEAD, os resultados mostram que, para os tubos de PVC, praticamente não houve atenuação dos picos de carga de pressão quando são comparados os resultados dos modelos elástico e viscoelástico (ver Figura 5). Há apenas um atraso na onda de pressão e uma suavização do sinal de pressão. Neste caso, os resultados mostram que a utilização do modelo elástico pode ser satisfatória para a identificação dos picos de pressão em tubos de PVC.

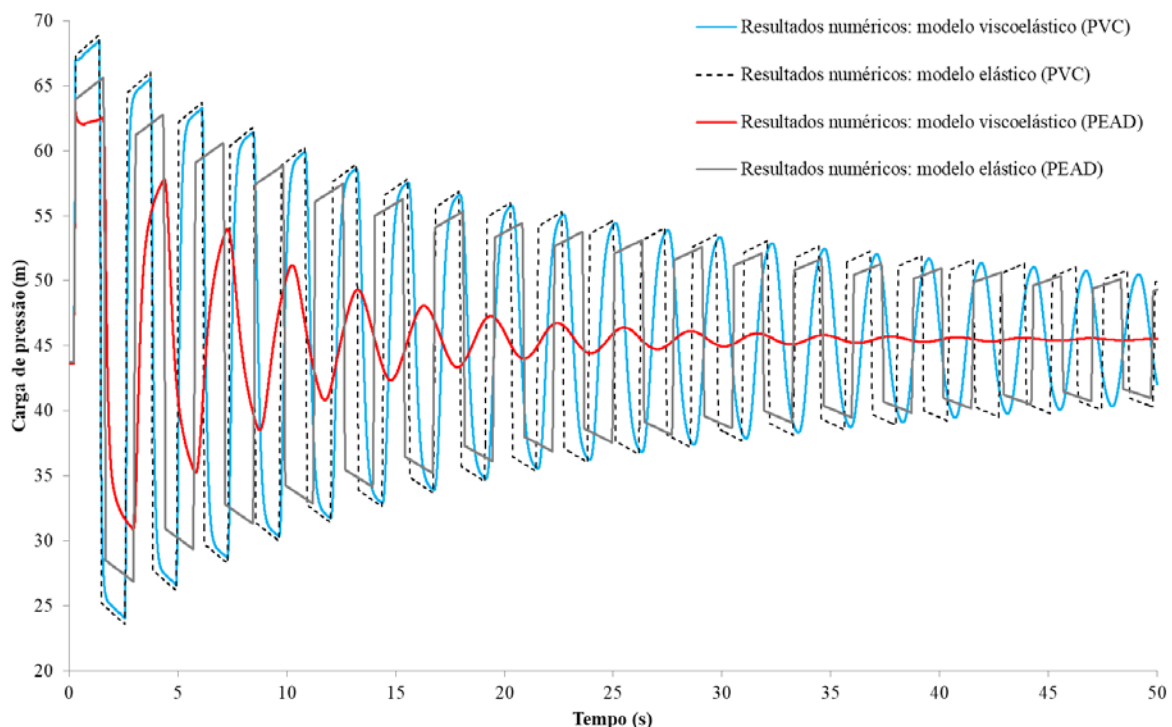


Figura 3: Cargas de pressão dos modelos elástico e viscoelástico para tubos de PEAD e PVC.

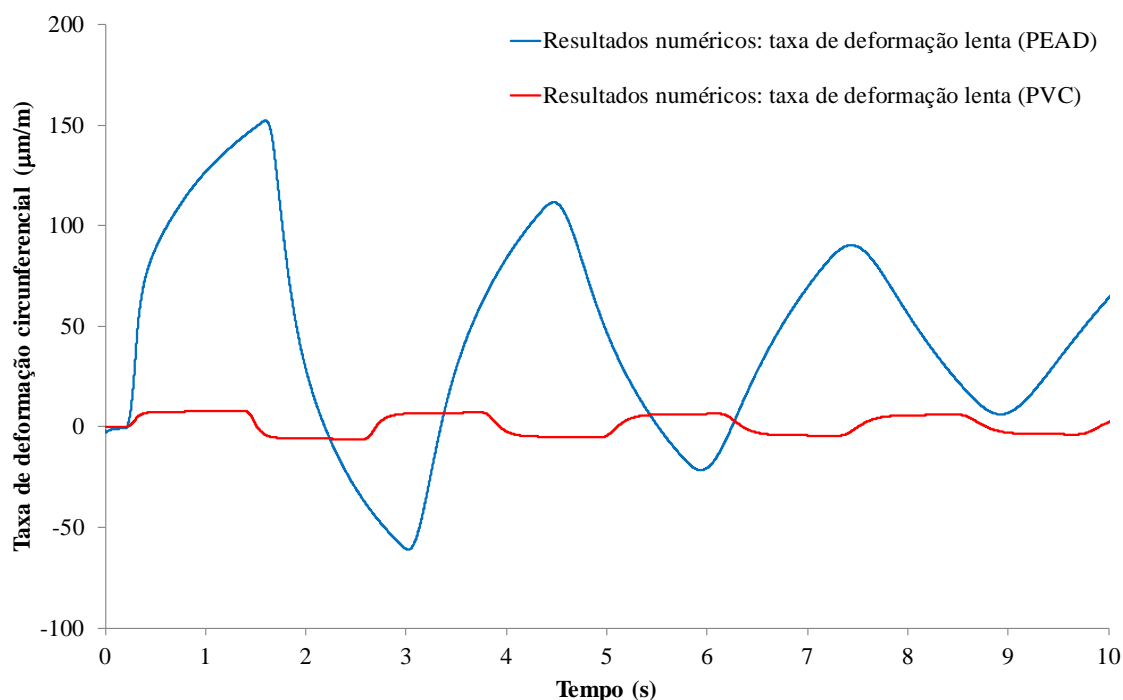


Figura 4: Taxas de deformação lenta do modelo viscoelástico para tubos de PEAD e PVC.

As diferenças apresentadas para a atenuação dos picos de pressão podem ser explicadas em termos da análise das taxas de deformação lenta, mostradas na Figura 4 para os tubos de PEAD e PVC. O valor máximo simulado de expansão do PEAD foi de 152,2 $\mu\text{m/m}$ e a do PVC foi de 7,9 $\mu\text{m/m}$, tendo o PEAD, portanto, cerca de 19 vezes mais expansão do material do tubo do que o PVC. Para o caso de contração, o valor máximo simulado de contração do PEAD foi de 61,0 $\mu\text{m/m}$ e a do PVC foi de 6,1 $\mu\text{m/m}$, tendo o PEAD, portanto, cerca de 10 vezes mais contração do material do tubo do que o PVC.

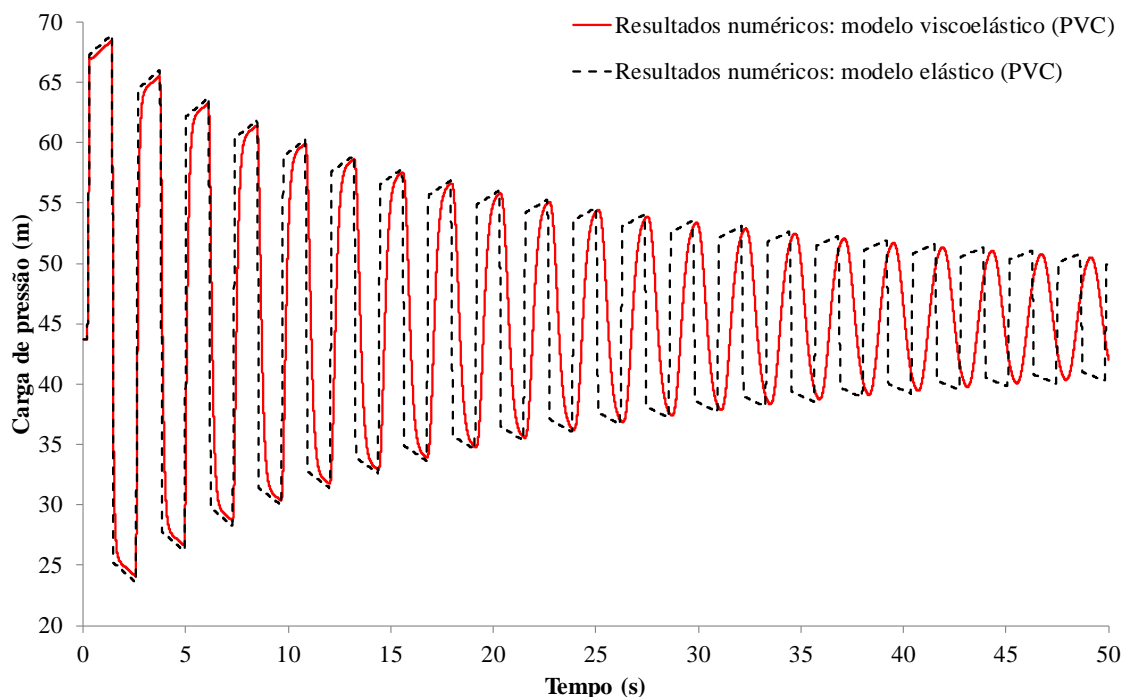


Figura 5: Cargas de pressão dos modelos elástico e viscoelástico para tubos de PVC.

Um estudo do decaimento dos valores extremos (picos) do sinal de pressão foi realizado. Ramos *et al.* (2004) apresentaram dois modelos de decaimento dos extremos de pressão, cujos valores extremos de carga de pressão podem ser estimados por:

Modelo elástico:

$$H = H_f \pm \frac{K_1 Q_0}{(1 + K_2 t)} \quad (8)$$

Modelo viscoelástico:

$$H = H_f \pm K_1 Q_0 e^{-K_2 t} \quad (9)$$

sendo H_f a carga de pressão em regime permanente após o transitório hidráulico, Q_0 a vazão em regime permanente antes do transitório hidráulico, K_1 o coeficiente de decaimento do pulso de pressão (*overpressure*), K_2 o coeficiente de atenuação do sinal de pressão (*damping*), t o tempo e o sinal \pm para sobrepressão e subpressão, respectivamente.

Os ajustes das Equações (8) e (9) para os resultados numéricos das simulações hidráulicas para os tubos de PVC e PEAD são mostrados na Figura 6. Os valores obtidos dos coeficientes de decaimento e dados para as Equações (8) e (9) são apresentados na Tabela 1. Para os tubos de PEAD, o modelo de decaimento para tubos viscoelásticos se ajusta muito bem aos resultados de cargas de pressão extremas, com Erro Quadrático Total (EQT) de apenas 0,1241 m². Já para os tubos de PVC, o modelo de decaimento viscoelástico apresentou EQT de 11,0288 m² contra EQT de 1,2261 m² para o modelo de decaimento elástico. Assim, para o sistema composto por tubos de PVC, o modelo elástico pode ser utilizado para a previsão dos picos de pressão, bem como para o decaimento e atenuação dos picos. No entanto, para fins de calibração do modelo hidráulico, detecção de vazamentos ou bloqueios de tubulações, por exemplo, o modelo viscoelástico deve ser utilizado, pois reproduz com precisão a forma do sinal de pressão.

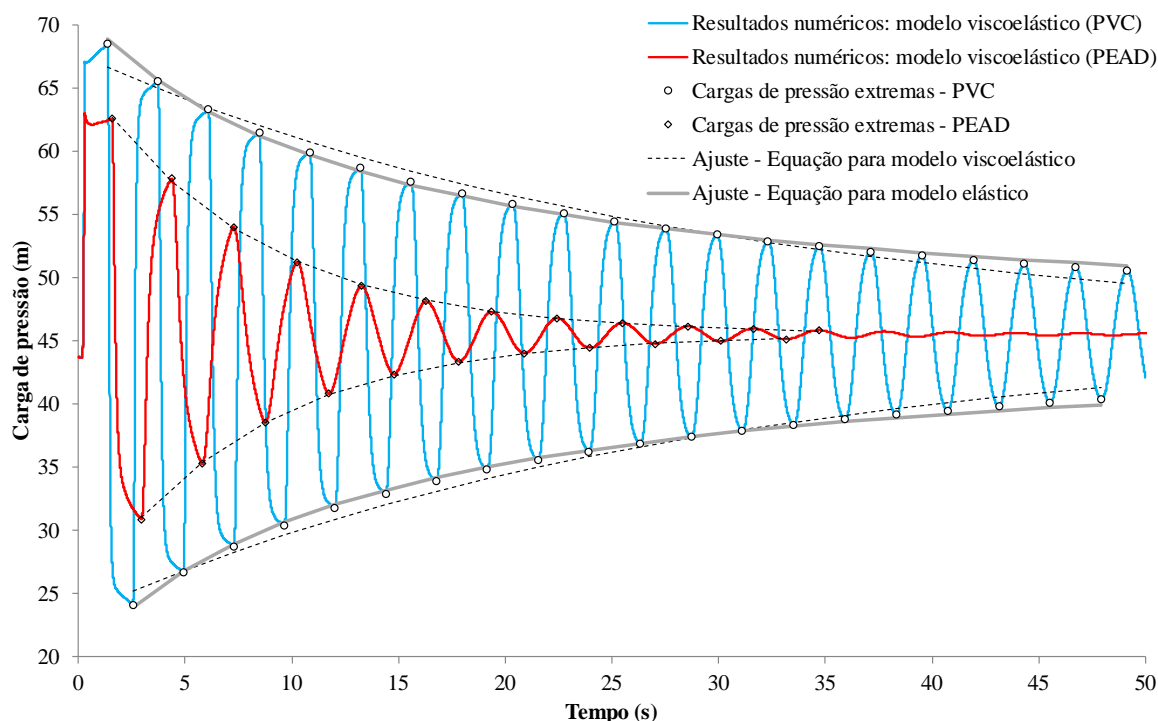


Figura 6: Cargas de pressão dos modelos elástico e viscoelástico para tubos de PEAD e PVC e ajustes das equações de decaimento das cargas de pressão extremas.

Tabela 1: Variáveis dos modelos de decaimento para os tubos de PEAD e PVC

Modelo de decaimento	Material	H_f (m)	Q_0 (l/s)	K_1	K_2	Erro Quadrático Total – EQT (m ²)
Viscoelástico	PEAD	45,50	1,008	20,7671	0,1256	0,1241
Viscoelástico	PVC	45,50	1,008	21,9765	0,0346	11,0288
Elástico	PVC	45,50	1,008	25,5741	0,0759	1,2261

CONCLUSÕES

O presente estudo apresenta um modelo viscoelástico para a simulação de transitórios hidráulicos em tubos plásticos. Testes realizados com dados de um sistema reservatório-tubo-válvula demonstraram que o modelo hidráulico reproduz com precisão o comportamento do escoamento transitório em tubos de PEAD, sendo, portanto, validado.

Uma comparação entre os resultados dos tubos de PEAD e PVC foi realizada utilizando dados de funções de fluência publicados na literatura. Os estudos demonstraram que os tubos de PEAD apresentam cerca de 19 vezes mais taxa de deformação lenta máxima na expansão e 10 vezes mais taxa de deformação lenta máxima na contração do que os tubos de PVC. Enquanto que, para os tubos de PEAD, o regime permanente é alcançado dentro do período de 50 s de simulação, o modelo viscoelástico para os tubos de PVC apresentou picos de carga de pressão muito próximos daqueles obtidos pelo modelo elástico. Neste caso, a maior contribuição do modelo viscoelástico para os tubos de PVC foi no atraso da onda de pressão e na suavização dos picos de carga de pressão.

Um estudo do decaimento dos valores extremos (picos) do sinal de pressão foi realizado por meio da aplicação de dois modelos de decaimento dos extremos de pressão. Os resultados mostraram que, para o sistema composto por tubos de PVC, o modelo elástico pode ser utilizado para a previsão dos picos de pressão, bem como para o decaimento e atenuação dos picos. No entanto, para fins de calibração do modelo hidráulico para, por exemplo, detecção de vazamentos ou bloqueios de tubulações ou outra finalidade que demande reprodução do sinal de pressão, o modelo viscoelástico deve ser utilizado, pois reproduz com precisão a forma do sinal de pressão.

AGRADECIMENTOS

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos de mestrado ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHAUDHRY, M. H. Applied Hydraulic Transients. 3ª ed. Columbia, South Carolina, USA: Springer. 2014.
- COVAS, D. I. C., STOIANOV, I., MANO, J. F., RAMOS, H. M., 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.
- JUNG, B. S., BOULOS, P. F., WOOD, D. J. Impacts of Skeletonization on Distribution System Hydraulic Transient Models. Anais do World Environmental and Water Resources Congress, Tampa, Florida, USA, 2007.
- KARNEY, B. W. Assessing the Degree of Unsteadiness in Flow Modeling: From Physics to Numerical Solution. Cincinnati – Ohio: 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, 2006.
- RAMOS, H., COVAS, D., BORGA, A., LOUREIRO, D. Surge damping analysis in pipe systems: modelling and experiments. Journal of Hydraulic Research, v.42, n.4, p.413-425, 2004.
- SOARES, A. K., COVAS, D. I. C., REIS, L. F. R. Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer. Journal of Hydraulic Engineering, v.134, n.9, p.1389-1394, 2008.
- WICHOWSKI, R. Hydraulic Transients Analysis in Pipe Networks by the Method of Characteristics (MOC). Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, v.53, n.3, pp.267-291, 2006.
- WYLIE, E.B., STREETER, V.L. Fluid transients in systems. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 1993.