

# AVALIAÇÃO DO GOLPE DE ARÍETE CONSIDERANDO OS EFEITOS DINÂMICOS ASSOCIADOS AO MATERIAL DA TUBULAÇÃO

*Alexandre Kepler Soares<sup>1</sup>; Dídida I. C. Covas<sup>2</sup>, Luisa Fernanda R. Reis<sup>3</sup> & Helena M. Ramos<sup>4</sup>*

**RESUMO** --- O presente trabalho tem como objetivo o estudo dos transitórios hidráulicos em sistemas de condutos forçados compostos por diferentes tipos de material das tubulações. Para tanto, são apresentados três distintos estudos, sendo um sobre observações de campo em uma adutora composta por tubos de ferro fundido, e dois sobre ensaios experimentais em duas instalações de laboratório, a primeira composta por tubos de policloreto de vinila (PVC), e a segunda com tubos de polietileno de alta densidade (PEAD). São dadas recomendações sobre como efetuar a análise de regimes transitórios hidráulicos em condutos de materiais metálicos e plásticos, face aos modelos comerciais disponíveis, seja para projeto, exploração e operação de sistemas de abastecimento de água, bem como do dimensionamento de dispositivos de controle e proteção.

**ABSTRACT** --- The current research work focuses on the analysis of hydraulic transients in three pipe systems composed of different pipe material. Transient data collection tests have been carried out in a real life system - a cast iron water pipeline - and in two pipe rigs, being one composed of polyvinyl chloride (PVC) pipes and the other one composed of high density polyethylene (HDPE) pipes. Numerical results incorporating different unconventional dynamic effects in the hydraulic simulator are compared with collected data. Comments are drawn on hydraulic transient analyses in metal and in plastic pipes for design and operation of water pipe systems.

**Palavras-chave:** Transitórios hidráulicos, Tubos metálicos, Tubos plásticos.

- 
- 1) Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia – Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá/MT. E-mail: [aksoares@ufmt.br](mailto:aksoares@ufmt.br).
  - 2) Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. E-mail: [didia.covas@civil.ist.utl.pt](mailto:didia.covas@civil.ist.utl.pt).
  - 3) Professora Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos/SP. E-mail: [fernanda@sc.usp.br](mailto:fernanda@sc.usp.br).
  - 4) Professora do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. E-mail: [hr@civil.ist.utl.pt](mailto:hr@civil.ist.utl.pt).

# 1. INTRODUÇÃO

O controle da operação de sistemas de abastecimento de água, em particular no que diz respeito aos transitórios hidráulicos, é uma preocupação constante dos engenheiros projetistas e das entidades gestoras dos sistemas, por razões que se prendem com a segurança, estabilidade, confiabilidade e bom funcionamento do sistema. Exemplos típicos de problemas resultantes de transitórios hidráulicos são a ocorrência de sobrepensões e subpensões excessivas induzidas pela abertura ou fechamento de válvulas, ou pelo desligamento ou arranque de grupos elevatórios, causando a ruptura de tubulações e, por consequência, a interrupção do abastecimento para reparação do sistema. Tais regimes transitórios correspondem a variações bruscas de vazão e pressão, e são inevitáveis em qualquer sistema hidráulico.

Existem diversas formas de se prever a ocorrência dos regimes transitórios que vão desde a utilização de fórmulas simplificadas (como a fórmula de Frizel-Joukowsky para manobras rápidas e Michaud para manobras lentas), modelos de simulação clássicos ou modelos comerciais, e modelos de simulação completos, os quais incluem diferentes efeitos dinâmicos não contemplados pelos modelos anteriores, como comportamento não linear do material da tubulação, interação fluido-estrutura e outros. Usualmente, os resultados obtidos pelos modelos comerciais, embora baseados na análise clássica do Golpe de Aríete, são satisfatórios para projeto e permitem estimar com alguma margem de segurança as pressões máximas e mínimas ocorridas nos sistemas e dimensionar dispositivos de proteção adequados. No entanto, estes modelos podem não ser suficientes para se efetuar o diagnóstico e análise de sistemas existentes, principalmente porque não permitem descrever todos os fenômenos ocorridos nesses sistemas, sendo necessário recorrer a modelos mais completos geralmente não disponíveis no mercado.

No presente trabalho, são analisados transitórios hidráulicos em sistemas de condutos forçados compostos por diferentes tipos de material das tubulações. Para tanto, são apresentados três distintos estudos, sendo um sobre observações de campo em uma adutora composta por tubos de ferro fundido, e dois sobre ensaios experimentais em duas instalações de laboratório, a primeira construída no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos e composta por tubos de policloreto de vinila (PVC), e a segunda no Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal, com tubos de polietileno de alta densidade (PEAD). São dadas recomendações sobre como efetuar a análise de regimes transitórios hidráulicos em condutos de materiais metálicos e plásticos, face aos modelos comerciais disponíveis, seja para projeto, exploração e operação de sistemas de abastecimento de água.

## 2. TRANSITÓRIOS EM TUBULAÇÕES METÁLICAS

### 2.1 O sistema elevatório da cidade da Guarda, Portugal

O sistema elevatório, que liga o reservatório do Prado ao do IPG, explorado pela entidade gestora Águas do Zêzere e Côa da cidade da Guarda, Portugal, é analisado no presente trabalho durante a ocorrência de regimes transitórios provocados pela parada súbita de grupo de bombeamento (ver esquemas do sistema adutor na Figura 1 e na Figura 2).

A estação elevatória do Prado é constituída por cinco grupos motor-bomba, três dos quais submersíveis. Os grupos encontram-se instalados em paralelo, saindo de cada um deles uma tubulação de ferro fundido dúctil (FFD) de 200 mm, que liga à tubulação de compressão também em FFD e com 300 mm de diâmetro, sendo que em cada ligação da bomba à tubulação de compressão, há uma válvula de controle automático e uma válvula de gaveta. Como dispositivo de segurança, na extremidade de montante dos grupos motor-bomba, há uma válvula de alívio de 200 mm e uma válvula de gaveta. A tubulação de compressão de 300 mm desenvolve-se até o interior de uma caixa de visita, que se situa à saída da estação elevatória, onde é feita a transição desta para a tubulação principal de FFD 500 mm. Esta última desenvolve-se desde a caixa de visita até a entrada do reservatório do IPG, sendo o seu comprimento de 2225 m. Ao longo do percurso, a adutora tem instalada uma ventosa (ponto C da Figura 2).

No extremo de jusante da adutora de FFD 500 mm, está instalado um medidor de vazão eletromagnético, seguido de uma redução para tubo de PVC 400 mm, o qual se estende até uma cruzeta que alimenta três tubulações de PVC 200 mm, que conduzem a vazão bombeada às três células do reservatório do IPG. O comprimento total do sistema, desde o interior da estação elevatória até a descarga nas células do reservatório do IPG, é de aproximadamente 2240 m.

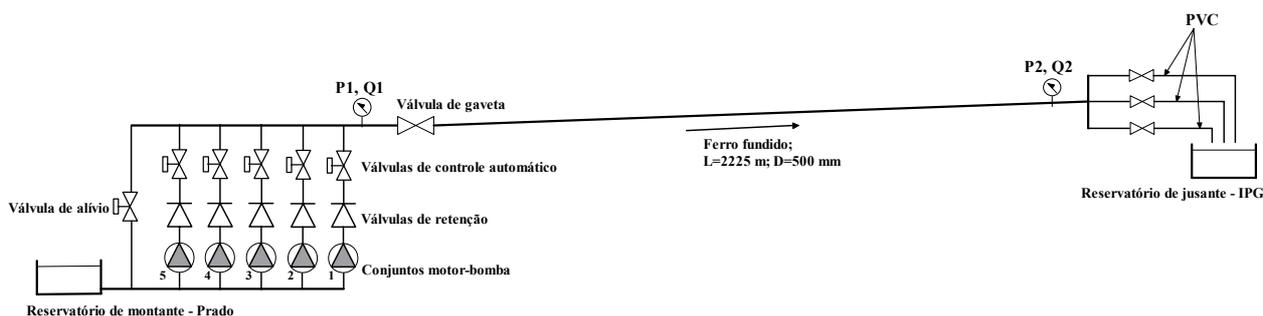


Figura 1: Esquema do sistema adutor analisado

Na realização dos ensaios de campo foram utilizados os seguintes equipamentos: dois transdutores de pressão (faixa de medição 0-25 bar); duas caixas de alimentação para os sensores de pressão; dois osciloscópios com 4 canais cada; um medidor de vazão ultra-sônico portátil; conversores de sinal de 4-20 mA para 0-10 V, dois computadores portáteis e *software* para aquisição de dados. A Figura 1 mostra os pontos de medição de pressão e vazão, sendo P1 e P2

pontos de medição de pressão a uma frequência de 50 Hz, Q1 o ponto de instalação do medidor de vazão ultra-sônico portátil, e Q2 o ponto de instalação do medidor de vazão eletromagnético.

Na Figura 11 (Apêndice), são mostrados detalhes do sistema adutor da Guarda, como os grupos de bombeamento, válvula de alívio e caixa de visita da estação elevatória do Prado, e os pontos de medição de vazão e pressão na tubulação de entrada do reservatório do IPG.

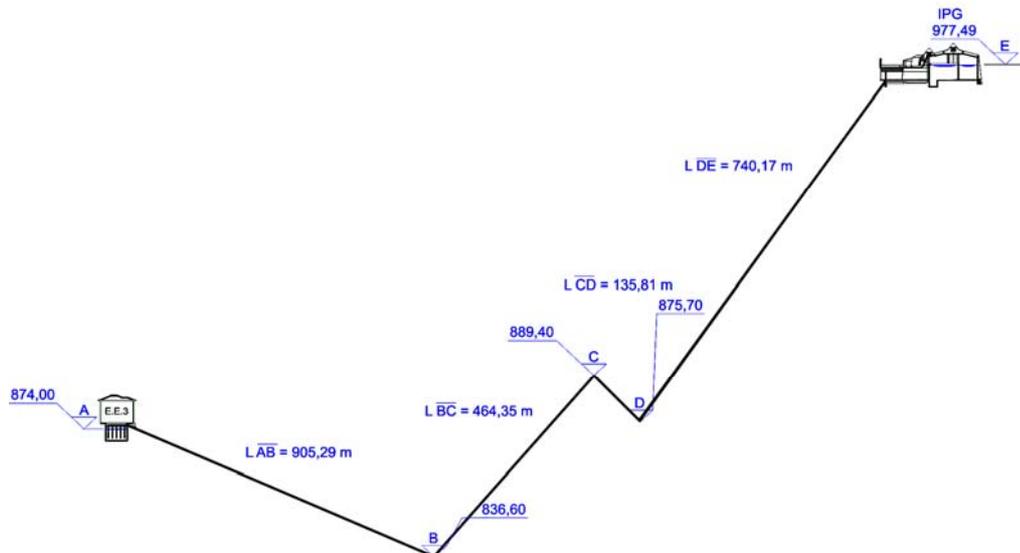


Figura 2: Esquema simplificado da adutora

## 2.2 Modelo hidráulico

Na análise elástica, o fluxo transitório em um conduto sob pressão é governado por equações diferenciais parciais não-lineares, representativas dos princípios de quantidade de movimento (Equação 1) e de conservação de massa (Equação 2) (Chaudhry, 1987; Almeida e Koelle, 1992; Wylie e Streeter, 1993):

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

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a_0^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

sendo  $x$  a distância,  $t$  o tempo,  $H$  a carga piezométrica,  $Q$  a vazão,  $A$  a área da seção transversal da tubulação,  $a_0$  a celeridade da onda de pressão,  $g$  a aceleração da gravidade e  $h_f$  a perda de carga devido ao atrito.

Considerando um comportamento elástico da parede do tubo, a celeridade pode ser estimada por (Wylie e Streeter, 1993):

$$a_0 = \sqrt{\frac{K_2}{\rho[1 + \psi(D/e)(K_2/E_0)]}} \quad (3)$$

sendo  $K_2$  o módulo de elasticidade do fluido,  $\rho$  a massa específica do fluido,  $E_0$  o módulo de elasticidade do tubo (Young),  $e$  a espessura da parede do tubo,  $D$  o diâmetro interno da tubulação e

$\psi$  um parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto (dimensões da seção transversal, condições de ancoragem da tubulação, coeficiente de Poisson).

O conjunto de equações diferenciais pode ser resolvido pelo Método das Características (MOC), o qual permite a transformação das Equações (1) e (2) num conjunto de equações diferenciais totais válidas ao longo das linhas características com declividades  $dx/dt = \pm a_0$ :

$$C^\pm : \frac{dH}{dt} \pm \frac{a_0}{gA} \frac{dQ}{dt} \pm a_0 h_f = 0 \quad (4)$$

Utilizando uma malha computacional retangular (Figura 3), estas equações simplificadas podem ser resolvidas pelo seguinte esquema numérico:

$$C^\pm : (H_{i,t} - H_{i\mp 1,t-\Delta t}) \pm \frac{a_0}{gA} (Q_{i,t} - Q_{i\mp 1,t-\Delta t}) \pm a_0 \Delta t \cdot h_f = 0 \quad (5)$$

válido ao longo de  $\Delta x/\Delta t = \pm a_0$ , respectivamente.

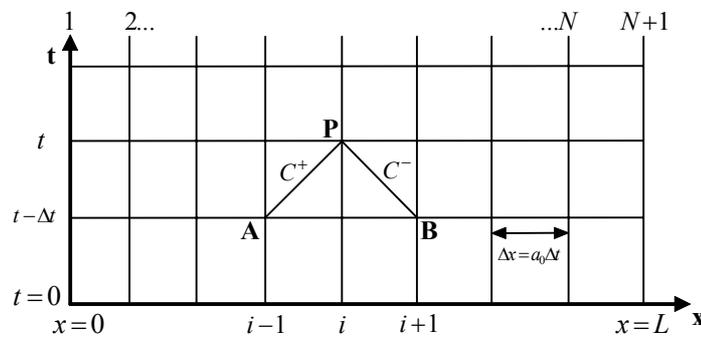


Figura 3: Linhas características no plano  $x-t$

Para o cálculo das perdas de carga em condições de escoamento transitório, o termo  $h_f$  da equação da quantidade de movimento é representado por duas componentes:

$$h_f = h_{fs} + h_{fu} = \frac{fQ|Q|}{2gDA^2} + h_{fu} \quad (6)$$

sendo  $h_{fs}$  a perda de carga para condições de escoamento permanente turbulento,  $h_{fu}$  a perda de carga para condições de escoamento transitório, e  $f$  o fator de atrito de Darcy-Weisbach (calculado para condição de escoamento permanente).

A perda de carga devido ao atrito para condições de escoamento transitório,  $h_{fu}$ , é calculada utilizando a formulação proposta por Vítkovský *et al.* (2000), segundo a qual a perda por atrito resulta da soma entre as parcelas referentes às acelerações local e convectiva do fluido.

$$h_{fu} = \frac{k'}{gA} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + a_0 \cdot \text{SGN}(Q) \left| \frac{\partial Q}{\partial x} \right| \right) \quad (7)$$

sendo  $k'$  o coeficiente de amortecimento e  $\text{SGN}$  o operador de sinal do sentido da vazão no tubo.

As equações de compatibilidade (Eq. 5) podem ser resolvidas por um conjunto de equações generalizadas do modelo elástico linear, úteis para a análise hidráulica de sistemas hidráulicos complexos (Soares *et al.*, 2008a):

$$C^+ : Q_{Pi} = C_P - C_{a+} H_{Pi} \quad (8)$$

$$C^- : Q_{Pi} = C_N + C_{a-} H_{Pi} \quad (9)$$

sendo  $i$  a seção do tubo,  $C_P$ ,  $C_N$ ,  $C_{a+}$  e  $C_{a-}$  coeficientes que dependem do esquema numérico empregado para descrever as perdas de carga em escoamento permanente e transitório. Tais constantes, numa forma genérica, podem ser definidas como:

$$C_P = \frac{Q_{i-1,t-\Delta t} + Ca_i H_{i-1,t-\Delta t} + C_{P1}' + C_{P1}''}{1 + C_{P2}' + C_{P2}''} \quad (10)$$

$$C_N = \frac{Q_{i+1,t-\Delta t} - Ca_i H_{i+1,t-\Delta t} + C_{N1}' + C_{N1}''}{1 + C_{N2}' + C_{N2}''} \quad (11)$$

$$C_{a+} = \frac{Ca_i}{1 + C_{P2}' + C_{P2}''} \quad (12)$$

$$C_{a-} = \frac{Ca_i}{1 + C_{N2}' + C_{N2}''} \quad (13)$$

sendo  $Ca_i = gA/a_0$ .

Os sobrescritos ' e '' referem-se às componentes de perda de carga em escoamento permanente e transitório, respectivamente. A descrição numérica de cada coeficiente utilizado neste trabalho é apresentada na Tabela 1 (Soares *et al.*, 2008a), em que  $\theta$  é um coeficiente de relaxação do esquema numérico para modelagem das perdas por atrito em escoamento transitório. De acordo com Covas (2003), se  $\theta = 0$ , o termo derivativo da vazão torna-se explícito e instável para certas condições; se  $\theta > 0$ , o esquema numérico é implícito e incondicionalmente estável. Para minimizar o esforço computacional, a autora emprega  $\theta = 1$ , e o mesmo valor é adotado neste trabalho.

Tabela 1: Coeficientes  $C_{P1}$ ,  $C_{P2}$ ,  $C_{N1}$  e  $C_{N2}$

Perda de carga em escoamento permanente [']			
<i>Sem atrito</i>	$C_{P1}' = C_{P2}' = 0$	$C_{N1}' = C_{N2}' = 0$	
<i>Termo de primeira ordem</i>	$C_{P1}' = -R\Delta t  Q_{i-1,t-\Delta t}   Q_{i-1,t-\Delta t}$	$C_{N1}' = -R\Delta t  Q_{i+1,t-\Delta t}   Q_{i+1,t-\Delta t}$	
	$C_{P2}' = 0$	$C_{N2}' = 0$	$R = f / 2DA$
Perda de carga em escoamento transitório [']			
<i>Sem fator de atrito variável</i>	$C_{P1}'' = C_{P2}'' = 0$	$C_{N1}'' = C_{N2}'' = 0$	
<i>Formulação de Vitkovský et al. (2000)</i>	$C_{P1}'' = k'\theta Q_{i,t-\Delta t} - k'(1-\theta)(Q_{i-1,t-\Delta t} - Q_{i-1,t-2\Delta t}) - k' SGN(Q_{i-1,t-\Delta t})  Q_{i,t-\Delta t} - Q_{i-1,t-\Delta t} $		
	$C_{N1}'' = k'\theta Q_{i,t-\Delta t} - k'(1-\theta)(Q_{i+1,t-\Delta t} - Q_{i+1,t-2\Delta t}) - k' SGN(Q_{i+1,t-\Delta t})  Q_{i,t-\Delta t} - Q_{i+1,t-\Delta t} $		
	$C_{P2}'' = C_{N2}'' = k'\theta$		

Os equacionamentos apresentados para a malha regular permitem a determinação de  $Q_{Pi}$  e  $H_{Pi}$  nas seções interiores da malha de cálculo (ponto  $P$  na seção  $i$ ). Nos pontos extremos, são necessárias equações complementares em termos de  $Q_{Pi}$  e  $H_{Pi}$  para a obtenção da solução nos

contornos, pois se dispõe de apenas uma reta característica em cada extremidade. Equações específicas para cada tipo de fronteira (parada súbita de bomba com sucção curta, válvula de retenção e tanque de jusante com nível variável) são apresentadas por Soares *et al.* (2008b; 2009).

### 2.3 Calibração do Modelo

A estação elevatória do Prado é composta por cinco conjuntos motor-bomba dispostos em paralelo. Os ensaios de campo foram realizados utilizando apenas o Grupo 1, composto por bomba submersível com os seguintes parâmetros nominais: vazão bombeada 300 m<sup>3</sup>/h, altura manométrica 105 m, potência 110 kW, velocidade de rotação 3000 rpm, e eficiência 78%. Com tais valores nominais, o momento polar de inércia do conjunto motor-bomba foi calculado de acordo com equação proposta por Thorley e Faithfull (1992), em que o momento polar de inércia é igual à soma do momento de inércia do motor e do momento de inércia do rotor e do fluido. Assim, o momento polar de inércia do conjunto motobomba foi estimado em 1,034 kg.m<sup>2</sup> (Soares *et al.*, 2008b).

Utilizando a Equação (3), a celeridade foi estimada em 1132 m/s, considerando os seguintes parâmetros: diâmetro externo do tubo de 532 mm; espessura da parede do tubo igual a 9 mm; valor médio da espessura da argamassa de revestimento dos tubos de 4,5 mm; módulo de elasticidade da água ( $K_2$ ) de 2,19 GPa; massa específica da água ( $\rho$ ) igual a 999 kg/m<sup>3</sup>; módulo de elasticidade do tubo de FFD ( $E_0$ ) de 170 GPa; e coeficiente de Poisson de FFD igual a 0,25. A discretização adotada foi de trechos de cálculo com espaçamentos de 11,1 m ( $\Delta x = 11,1$  m) e passo de cálculo no tempo  $\Delta t = 0,009806$  s.

Para a análise das variações de pressão no sistema, foram considerados dois cenários diferentes: (i) a utilização de reservatório de nível constante como condição de fronteira de jusante sem e com fator de atrito variável (calculado para condições de escoamento transitório); e (ii) consideração de tanque com nível variável com fator de atrito variável. Em todos os ensaios, a válvula de alívio foi isolada através do fechamento da válvula de gaveta. Assim, tal dispositivo de proteção não teve influência no comportamento do sistema, o que diminui o nível de incerteza no que diz respeito aos efeitos nas variações de pressão, tanto do atrito para condições de escoamento transitório como do tanque de nível variável de jusante. A Figura 4 apresenta as comparações entre os resultados obtidos para as simulações numéricas utilizando o modelo clássico do golpe de aríete (com perdas de carga calculadas para condições de escoamento permanente) e o modelo clássico incorporando o fator de atrito variável, e os valores observados de pressão imediatamente a jusante da válvula de retenção (cenário 1). Tal válvula, depois da parada súbita do conjunto motor-bomba, fecha completamente em 1,77 s. A Figura 5 mostra os resultados numéricos do modelo elástico obtidos com o uso de fator de atrito variável, bem como dos dados de pressão observados em escoamento transitório para o ponto imediatamente a jusante da válvula de retenção (cenário 2).

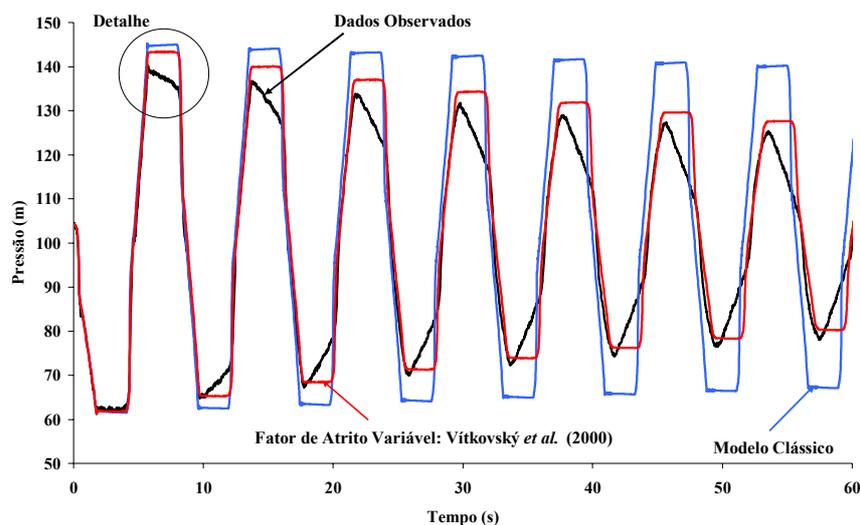


Figura 4 – Pressões observadas e resultados numéricos dos modelos clássico e elástico com fator de atrito variável e reservatório de nível constante como condição de fronteira de jusante ( $Q_0 = 72 \text{ L/s}$ )

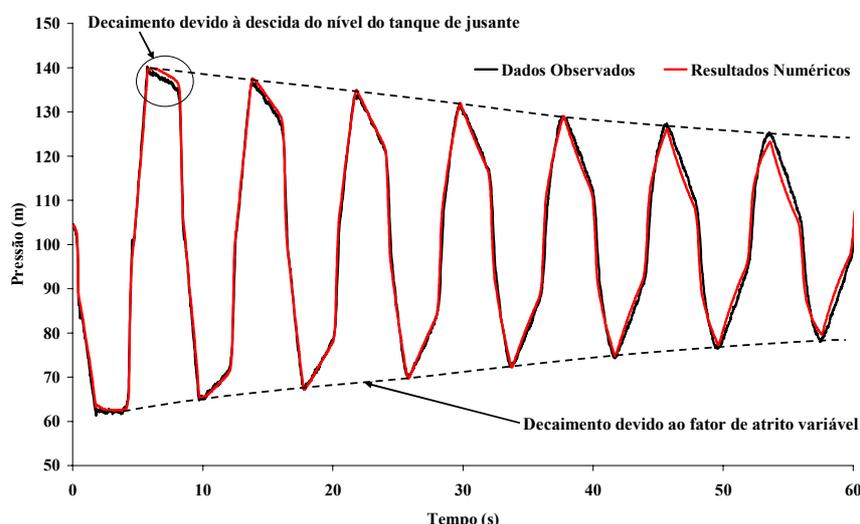


Figura 5 – Pressões observadas e resultados numéricos do modelo elástico com fator de atrito variável e tanque com nível variável como condição de fronteira de jusante ( $Q_0 = 72 \text{ L/s}$ )

O modelo hidráulico que leva em consideração as perdas de carga calculadas para condições de escoamento transitório bem como a condição de fronteira de jusante sendo um tanque com nível variável reproduz a atenuação e dispersão das variações de pressão durante o evento transitório observado. Pode ser notado também, o ajuste do modelo quanto ao alívio de pressão no primeiro pico de pressão máxima devido ao efeito da condição de fronteira de jusante ser modelada como tanque de nível variável. Pode-se dizer que, para fins de dimensionamento de dispositivos de segurança e verificação da especificação do tubo, a consideração de um reservatório de nível constante é a mais conservadora e, portanto, está ao lado da segurança para o projetista. O modelo clássico (elástico e fator de atrito calculado para condições de escoamento permanente) fornece maiores sobrepressões junto à estação elevatória (de até 145,3 m) e no ponto B (de até 182,3 m) do

que o modelo com fator de atrito variável e tanque com nível variável. A Figura 6a mostra as envoltórias para a parada de um grupo motor-bomba apenas. No entanto, a solução obtida pelo modelo clássico não se adéqua para fins de calibração e operação de sistemas adutores por bombeamento, uma vez que tipicamente as tubulações de entrada nos reservatórios descarregam livremente para a atmosfera, fazendo com que a sobrepressão máxima, neste caso, seja de 139,8 m junto à estação elevatória e de 176,5 m no ponto B. As envoltórias para a parada de dois e três grupos são mostradas na Figura 6b. Neste caso, as simulações hidráulicas partiram dos seguintes pressupostos (simplificações): (i) parada simultânea dos grupos e válvula de retenção com fechamento rápido (1,77 s); (ii) desprezou-se a ventosa no Ponto C; (iii) desprezou-se a válvula de alívio na estação elevatória; e (iv) o modelo hidráulico não leva em consideração cavitação. Tais análises serão objeto de estudo em trabalhos futuros.

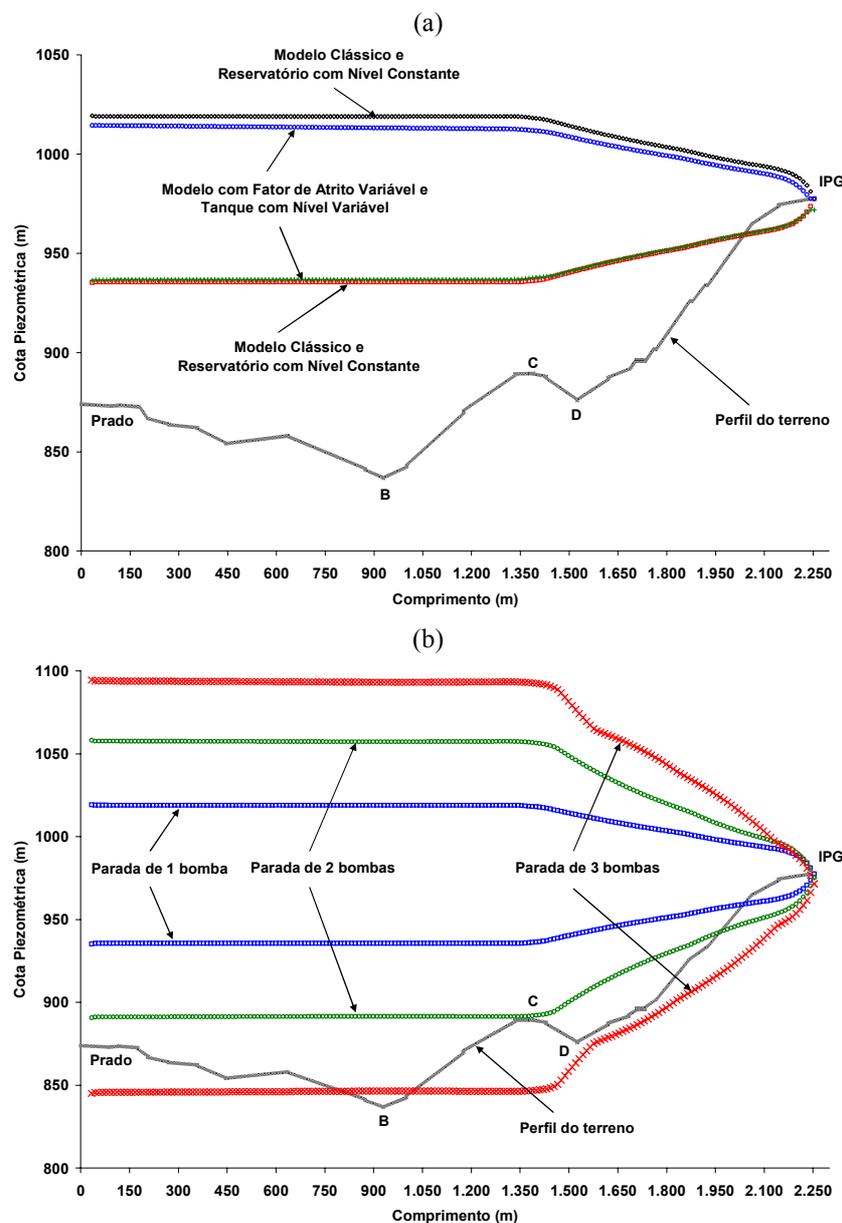


Figura 6 – Envoltória de Cargas Piezométricas para a parada de (a) um grupo motor-bomba e (b) parada de um, dois e três grupos

### 3. TRANSITÓRIOS EM TUBULAÇÕES PLÁSTICAS

#### 3.1 Modelo Viscoelástico Linear

O modelo elástico linear prevê com razoável nível de exatidão o fenômeno transitório em um conduto forçado metálico. No entanto, tubos plásticos, tais como policloreto de vinila (PVC) e polietileno (PE), respondem às solicitações de maneira instantânea elástica e retardada viscosa (lenta) sendo, então, chamados de materiais viscoelásticos. Assim, a deformação total pode ser decomposta em deformação instantânea elástica e uma parcela de deformação lenta.

As equações de compatibilidade (Eqs. 8 e 9) podem também ser empregadas, mas com os seguintes coeficientes (Covas, 2003; Soares *et al.*, 2008a):

$$C_P = \frac{Q_{i-1,t-1} + Ca_i H_{i-1,t-1} + C_{P1}' + C_{P1}'' + C_{P1}'''}{1 + C_{P2}' + C_{P2}''} \quad (14)$$

$$C_N = \frac{Q_{i+1,t-1} - Ca_i H_{i+1,t-1} + C_{N1}' + C_{N1}'' + C_{N1}'''}{1 + C_{N2}' + C_{N2}''} \quad (15)$$

$$C_{a+} = \frac{Ca_i + C_{P2}'''}{1 + C_{P2}' + C_{P2}''} \quad (16)$$

$$C_{a-} = \frac{Ca_i + C_{N2}'''}{1 + C_{N2}' + C_{N2}''} \quad (17)$$

Os sobrescritos ' e '' também se referem às componentes de perda de carga em escoamento permanente e transitório, respectivamente (Tabela 1). Os sobrescritos ''' referem-se à componente reológica do material do tubo, elástica linear ou viscoelástica linear, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Coeficientes  $C_{P1}'''$ ,  $C_{P2}'''$ ,  $C_{N1}'''$  e  $C_{N2}'''$

Comportamento reológico da parede do conduto [''']	
<i>Elástico linear</i>	$C_{P1}''' = C_{P2}''' = 0$ <span style="float: right;"><math>C_{N1}''' = C_{N2}''' = 0</math></span>
<i>Viscoelástico linear</i>	$C_{P1}''' = -C_{N1}''' = -2a_0 A \Delta t \sum_{k=1}^{N_{KV}} \left\{ -C_0 \frac{J_k}{\tau_k} H_{i,0} + C_0 \frac{J_k}{\tau_k} \left[ 1 - \left( 1 - e^{-\Delta t / \tau_k} \right) \frac{\tau_k}{\Delta t} \right] H_{i,0} + \right.$ $\left. - C_0 \frac{J_k}{\tau_k} \left[ \left( 1 - e^{-\Delta t / \tau_k} \right) \frac{\tau_k}{\Delta t} - e^{-\Delta t / \tau_k} \right] (H_{i,t-1} - H_{i,0}) - \frac{e^{-\Delta t / \tau_k}}{\tau_k} \varepsilon_{rk(i,t-1)} \right\}$ $C_{P2}''' = C_{N2}''' = 2a_0 A \Delta t C_0 \sum_{k=1}^{N_{KV}} \left[ \frac{J_k}{\Delta t} \left( 1 - e^{-\Delta t / \tau_k} \right) \right]$ $C_0 = \frac{\alpha_0 D_0 \gamma}{2e_0}$

Obs.:  $J_k$  = coeficiente de fluência do elemento Kelvin-Voigt  $k$ ;  $\tau_k$  = tempo de relaxação do elemento Kelvin-Voigt  $k$ ;  $N_{KV}$  = número de elementos Kelvin-Voigt;  $\varepsilon_{rk}$  = taxa de deformação lenta do elemento Kelvin-Voigt  $k$ ;  $\gamma$  = peso específico do fluido,  $H_0$  = carga piezométrica em regime de escoamento permanente;  $\alpha_0$  = coeficiente dependente do tipo de ancoragem do tubo;  $D_0$  = diâmetro interno do tubo para escoamento permanente;  $e_0$  = espessura do tubo para escoamento permanente.

### 3.2 Condutos de PVC

Foram efetuadas medições experimentais de vazão e de pressão durante a ocorrência de regimes transitório e permanente através de testes de laboratório sobre o Painel Hidráulico Experimental (PHE), construído no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (Soares, 2007). O PHE é constituído, basicamente, por um total de 203 m de condutos em PVC (PN 750 kPa), material adotado devido ao seu peso reduzido (fator importante na concepção vertical adotada) e baixa celeridade de propagação das ondas de pressão (fator relevante para a investigação de situações de regime transitório). A alimentação do sistema hidráulico é feita através de uma estação de bombeamento, equipada com duas bombas centrífugas de 1 e 5 cv de potência, ligadas em paralelo e com uma válvula de retenção imediatamente a jusante. A jusante da estação de bombeamento há um reservatório mantido com nível constante de 5 m durante os experimentos (Figura 7).

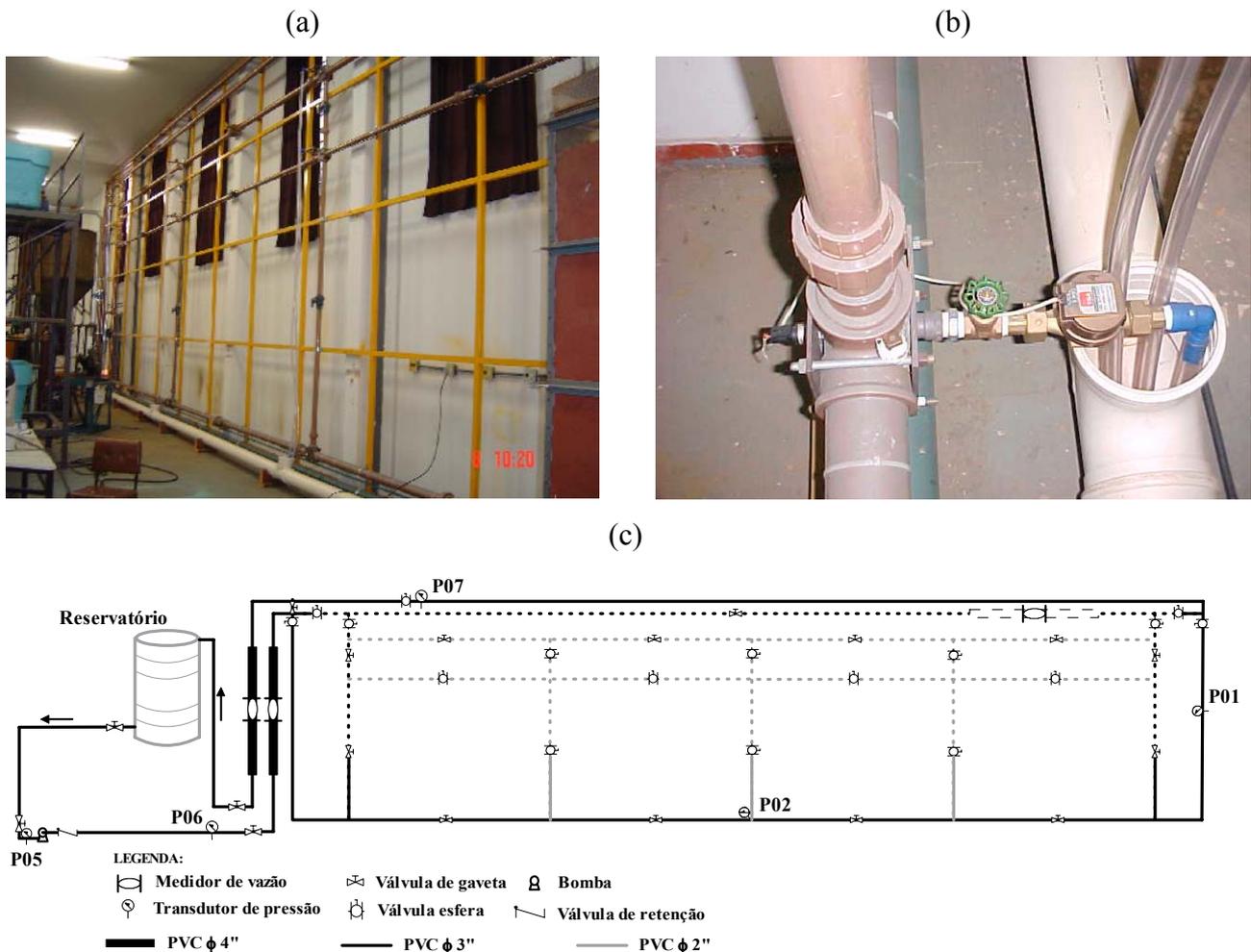


Figura 7 – (a) Vista do Painel Hidráulico Experimental (PHE); (b) ponto para simulação de vazamentos; (c) configuração do sistema simplificado (linha contínua) e parte do sistema não considerada nos ensaios (linha tracejada)

O sistema de aquisição de dados é constituído de três medidores de vazão eletromagnéticos de 100 mm de diâmetro destinados à leitura de vazões no escoamento permanente, nove medidores de vazão tipo roda d'água (hidrômetro) nos pontos de vazamento, 16 transdutores de pressão, placa de aquisição de dados, microcomputador, *software* para registro de pressões e vazões, geração de gráficos, armazenamento de dados e controle da válvula automática (tempo de fechamento através do torque do motor).

Neste trabalho, são apresentados os resultados baseados em investigações sobre o circuito em série (simplificado) do PHE, conforme Figura 7. Com isto, reduziram-se as incertezas e complexidades envolvidas no isolamento dos diferentes fenômenos e reflexões durante os transitórios hidráulicos. O sistema, com a topologia escolhida, possui comprimento total de 97,20 m, sendo 18,10 m do reservatório à bomba, 67,30 m da bomba à válvula de esfera (P07) e 11,80 m ao longo de ramais.

Durante os experimentos, a vazão na entrada do sistema foi medida somente em condições de escoamento permanente, e os conjuntos de dados de pressão foram coletados com uma frequência de aquisição de 1000 Hz, por cinco transdutores instalados nos pontos (Figura 7): P05 – localizado a montante da bomba; P06 – 7,20 m a jusante da bomba; P02 – 32,40 m a jusante da bomba; P01 – 46,10 m a jusante da bomba; e P07 – 67,00 m a jusante da bomba e imediatamente a montante da válvula de esfera, a qual é utilizada para promover os eventos transitórios.

Considerando valores fornecidos por fabricantes, o módulo de elasticidade do PVC varia de 2,40 a 2,75 GPa, o que equivale a celeridades de 411 a 438 m/s. Já através da avaliação dos tempos de propagação da onda de pressão entre os transdutores, a velocidade da onda de pressão foi estimada em torno de 440 m/s, o que equivale a um módulo de elasticidade igual a 2,78 GPa. No entanto, foi constatado nas simulações numéricas que tais valores das celeridades não resultavam em bons ajustes entre os valores simulados e observados durante os experimentos. A onda de pressão resultante das simulações computacionais estava sempre atrasada em relação à variação de pressão levantada nos ensaios, e as sobrepressões eram inferiores às observadas. Isto se deve à utilização do módulo de elasticidade estático para o material dos tubos e à dispersão da onda de pressão devido ao fator de atrito variável, efeitos inerciais do fluido e à deformação lenta das paredes do tubo (viscoelasticidade).

Sendo assim, o valor de 460 m/s mostrou-se satisfatório na reprodução das sobrepressões. Tal valor conduz a um módulo de elasticidade dinâmico correspondente a 3,069 GPa. Para a reprodução das variações de pressão, foi empregado o modelo viscoelástico linear. Os resultados numéricos do modelo viscoelástico linear e dos dados de pressão coletados em escoamento transitório são mostrados na Figura 8 para os pontos a jusante da bomba centrífuga (P06) e a montante da válvula de esfera (P07). O modelo viscoelástico linear apresentou excelente ajuste aos dados de pressão

coletados nos ensaios de laboratório. O modelo reproduz os efeitos de atenuação e dispersão observados nos experimentos, bem como o período da onda de pressão.

Assim, para a correta reprodução do comportamento hidráulico de sistemas em escoamento transitório, devem-se utilizar valores majorados para o módulo de elasticidade do PVC. Neste trabalho, foi constatado erro de até 28% no valor do módulo de elasticidade do PVC. Para fins de dimensionamento de dispositivos de segurança e verificação da classe do tubo o valor do módulo de elasticidade deve ser majorado em até 28%. Caso o projetista opte pelo uso do modelo clássico do Golpe de Ariete (sem viscoelasticidade), o mesmo procedimento deve ser obedecido para a obtenção das envoltórias de cargas piezométricas.

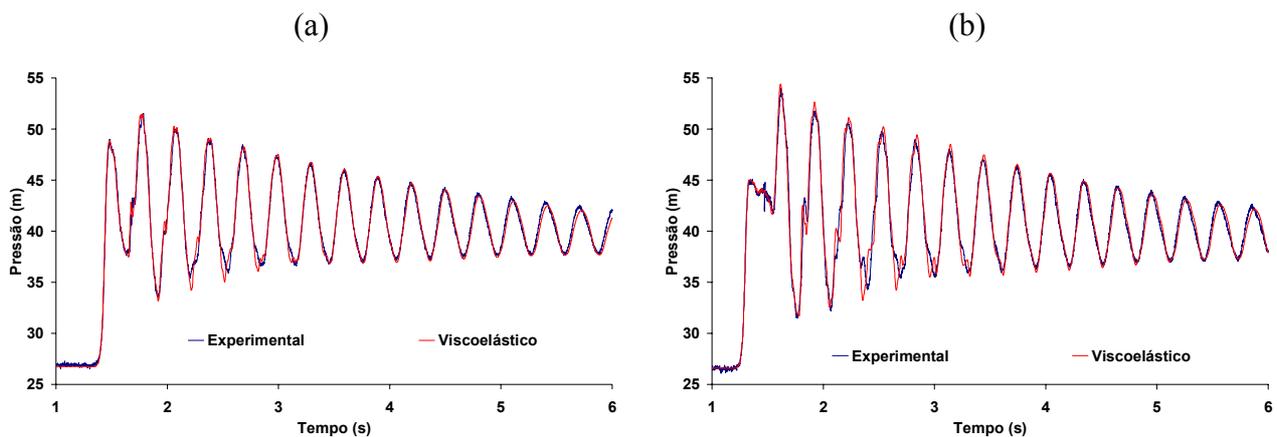


Figura 8 – Resultados numéricos do modelo viscoelástico linear e pressões coletadas nos pontos: (a) a jusante da bomba centrífuga, P06; e (b) a montante da válvula esfera, P07.

### 3.3 Conduitos de PEAD

Foi utilizada a instalação experimental do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico (IST) de Lisboa, Portugal, para a análise de transitórios hidráulicos em tubos de polietileno de alta densidade (PEAD). A instalação experimental tem uma configuração do tipo Reservatório-Tubo-Válvula (RTV) com comprimento total de 203 m. Na Figura 9, apresenta-se a vista geral da instalação experimental. O conduto possui diâmetro interno igual a 44 mm, espessura da parede igual a 3 mm e classe de pressão nominal igual a 10 kgf/cm<sup>2</sup>, disposto de forma helicoidal, com um raio de curvatura de 1 m (Figura 9).

Para verificação do modelo matemático desenvolvido e implementado, dados coletados na instalação experimental foram utilizados. Partiu-se para a avaliação do modelo viscoelástico linear levando-se em consideração as perdas de carga para regime variável com o modelo de Vítkovský *et al.* (2000). Nas análises inversas, foi empregado o método Levenberg-Marquardt para a busca dos valores dos coeficientes de fluência e de amortecimento do modelo viscoelástico ( $J_k$  e  $\tau_k$ ). A velocidade da onda elástica foi estimada em 350 m/s, o que equivale a um módulo de elasticidade dinâmico de 1,8 GPa, muito acima da faixa de valores fornecida pelos fabricantes (0,7 a 1,0 GPa).

Os resultados para um evento transitório de 20 s são apresentados na Figura 10, para o ponto imediatamente a montante da válvula de esfera (jusante do sistema).

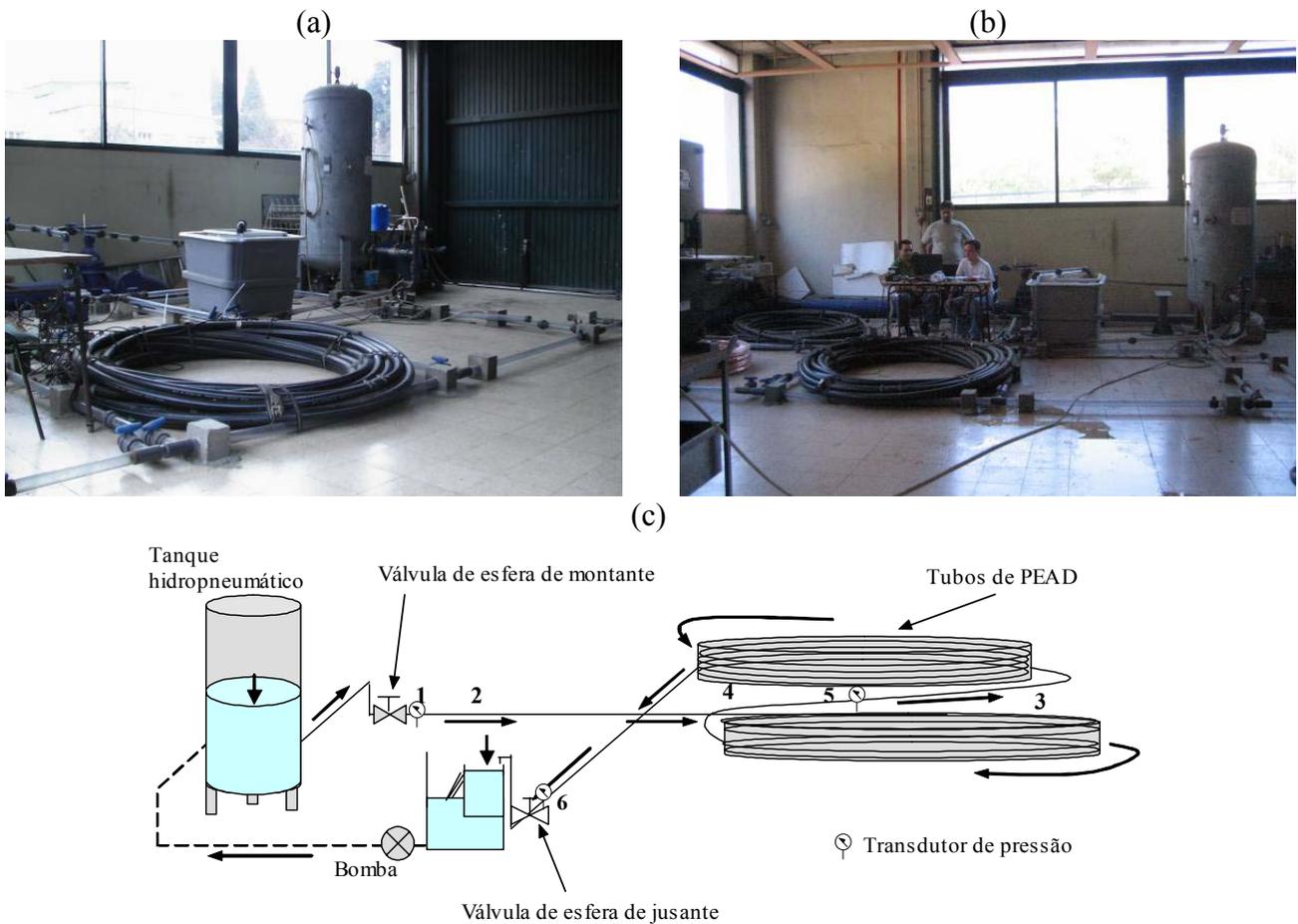


Figura 9 – (a), (b) Vista geral da instalação experimental com tubos de PEAD; (c) ponto para simulação de vazamentos; (c) esquema simplificado do aparato experimental

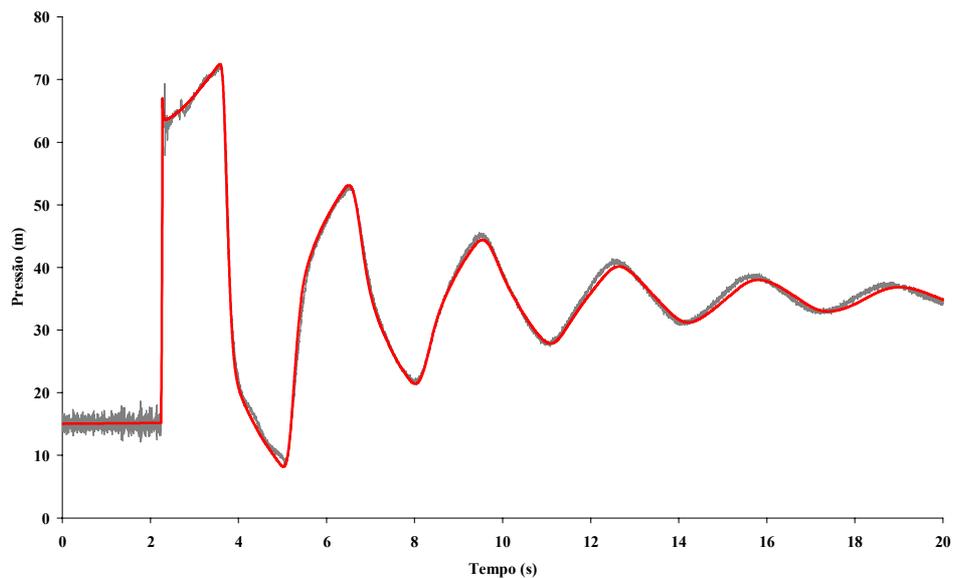


Figura 10: Dados experimentais (linha cinza) e resultados numéricos (linha vermelha) considerando viscoelasticidade e fator de atrito variável para regime turbulento (válvula de esfera a jusante do sistema)

A solução pelo modelo viscoelástico linear prevê corretamente a atenuação e dispersão das pressões ajustando-se aos dados experimentais. Assim, e de acordo com os resultados obtidos neste trabalho, há um erro de até 157% no valor do módulo de elasticidade do PEAD para análises hidráulicas durante escoamento transitório. Para fins de dimensionamento de dispositivos de segurança e verificação da classe de tubos o valor do módulo de elasticidade deve ser também majorado em até 2,57 vezes.

#### **4. CONCLUSÕES**

As análises desenvolvidas sobre o sistema adutor de água da cidade da Guarda, Portugal, revelaram a necessidade de um melhor estudo sobre as condições de contorno de um sistema real. Além disso, para que os resultados numéricos pudessem ser ajustados às medições de campo no sistema contendo tubulações metálicas (ferro fundido), o cálculo das perdas de carga deve ser realizado considerando modelos para regimes variáveis. No entanto, para o dimensionamento de dispositivos de controle e proteção e verificação da classe dos tubos, o clássico modelo do Golpe de aríete juntamente com a condição de reservatório de jusante com nível constante favorece a segurança nos cálculos.

Os resultados dos ensaios em laboratório demonstraram a necessidade da consideração do comportamento não elástico dos materiais plásticos (PVC e PEAD), durante a ocorrência dos regimes transitórios hidráulicos. Assim, foi empregado um novo modelo de simulação que incorpora o comportamento viscoelástico característico de condutos plásticos. Este modelo foi calibrado e validado com medições de pressão, tendo-se observado um excelente ajustamento do andamento, amplitude e fase da variação de pressão estimada pelo modelo e medida. Para efeitos de projeto de sistemas constituídos por este tipo de material, os modelos clássicos permitem obter uma previsão conservativa da envolvente das pressões, desde que se assuma um módulo de elasticidade dinâmico majorado em cerca de 1,3 vezes o valor estático recomendado pelos fabricantes para o caso do PVC e 2,5 vezes para o PEAD.

#### **AGRADECIMENTOS**

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa de estudos concedida ao primeiro autor durante seu doutoramento, à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos de estágio de doutorando no exterior concedida também ao primeiro autor, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT), pelo auxílio financeiro na forma do projeto “Modelagem Integrada e Calibração Automática para Avaliação e Controle de Sistemas de Distribuição de Água”. Os autores

agradecem também a Nuno Melo, Fábio Gonçalves e Nelson Carriço pelo suporte durante os ensaios de laboratório e de campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A.B.; KOELLE, E. (1992). *Fluid Transients in Pipe Networks*. Computational Mechanics Publications, Glasgow.
- CHAUDHRY, M.H. (1987). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Company, 2<sup>nd</sup> Ed., New York.
- COVAS, D.I.C. (2003). *Inverse Transient Analysis for Leak Detection and Calibration of Water Pipe Systems Modelling Special Dynamic Effects*. PhD Thesis – Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK.
- SOARES, A.K. (2007). *Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório*. 336 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SOARES, A.K., COVAS, D.I.C., REIS, L.F.R. (2008a). Analysis of PVC Pipe-Wall Viscoelasticity during Water Hammer. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.134, n.4, p.1389 - 1394.
- SOARES, A.K., MELO, N., GONÇALVES, F.V., COVAS, D.I.C., RAMOS, H.M. (2008b). Modelagem de Transitórios Hidráulicos em Sistemas Adutores por Bombeamento. In: *Alterações Climáticas e Gestão da Água e Energia em Sistemas de Abastecimento e Drenagem*. Lisboa, Portugal: Dossier, p. 418-431.
- SOARES, A.K., COVAS, D.I.C., RAMOS, H.M. (2009). Damping Analysis of Hydraulic Transients in Pump-rising Main Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*. Submetido
- THORLEY, A.R.D.; FAITHFULL, E.M. (1992). Inertias of Pumps and their Driving Motors. In: *Proceedings of the International Conference on Unsteady Flow and Fluid Transients*, Balkema, Rotterdam, the Netherlands, p. 285-289.
- VÍTKOVSKÝ, J.P.; LAMBERT, M.F.; SIMPSON, A.R.; BERGANT, A. (2000). Advances in Unsteady Friction Modelling in Transient Pipe Flow. In: *VIII International Conference on Pressure Surges: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems*, The Hague, the Netherlands. BHR Group 2000 Pressure Surges, vol. 1, p. 471-482.
- WYLIE, E.B.; STREETER, V.L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. Prentice-Hall, New Jersey.

# APÊNDICE



Figura 11: Sistema adutor da Guarda, Portugal – (a) estação elevatória do Prado; (b) bombas submersíveis e válvula de alívio; (c) grupos 4 e 5; (d) caixa de visita na estação elevatória do Prado; (e) medidor de vazão ultra-sônico; (f) transdutor de pressão na estação elevatória do Prado; (g) medidor de vazão eletromagnético e tubo de entrada de PVC no reservatório do IPG; (h) cruzeta e ramais de PVC para alimentação das três células do IPG; (i) e (j): transdutor de pressão no reservatório do IPG