

## **I-153 - CALIBRAÇÃO DE MODELO DE ADUTORA POR BOMBEAMENTO DURANTE TRANSIENTES HIDRÁULICOS**

**Alexandre Kepler Soares<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Praça Universitária s/n – Setor Universitário - Goiânia - GO - CEP: 74605-220 - Brasil - Tel: (62) 3209-6095 - e-mail: [aksoares@gmail.com](mailto:aksoares@gmail.com)

### **RESUMO**

O presente trabalho incide na análise dos regimes transitórios induzidos pela parada súbita de um grupo motor-bomba num sistema de adução. Foram realizados ensaios de campo, com medições de vazão e pressão durante os regimes transitórios no sistema adutor por bombeamento Prado-IPG, localizado na cidade da Guarda, Portugal. A estação elevatória do Prado é composta por cinco grupos motor-bomba em paralelo e a adutora por 2.241 m de tubos de ferro fundido dúctil DN500. As medições de pressão durante os regimes transitórios foram comparados com os resultados obtidos por simulações hidráulicas no modelo MOC-EPANET, o qual combina o Método das Características (MOC) com o simulador EPANET 2. Foi observado um bom ajuste dos resultados numéricos aos dados coletados em termos do amortecimento e desfasamento das ondas de pressão apenas quando os efeitos devidos ao atrito em escoamento transitório foram levados em consideração no modelo matemático e a condição de contorno de jusante era corretamente definida. A última seção da adutora foi descrita numericamente por um pequeno tanque de nível variável e descarga livre para a atmosfera no reservatório. A presença de consideráveis variações nos níveis de água em tal condição de contorno de jusante produz alívio das pressões máximas ao longo da adutora e em particular imediatamente a jusante da válvula de retenção do grupo motor-bomba, além de mudanças na forma das ondas de pressão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transientes Hidráulicos, Adutora, Modelo Hidráulico, Calibração.

### **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 sobrepressões e subpressões excessivas induzidas pela abertura ou fechamento de válvulas, ou pela parada 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.

Karney (2000) comenta que, possivelmente, a ausência de análises hidráulicas no escoamento transitório se deve à mistificação frequentemente envolvida no desenvolvimento e entendimento do fenômeno transitório em condutos forçados. De fato, a complexidade das equações diferenciais parciais não-lineares e a natureza dinâmica dos sistemas podem intimidar o modelador. Ademais, e embora as equações que permitem a análise dos transitórios hidráulicos sejam conhecidas, o comportamento dos sistemas reais não é reproduzido com total exatidão, visto que resultados observados em campo ou laboratório nem sempre são os mesmos das simulações hidráulico-computacionais. Tal imprecisão vem motivando novos estudos com o intuito de desenvolver modelos matemáticos mais realistas para sistemas de condutos forçados. Além disso, diversas questões de ordem prática têm motivado estudos sobre os transitórios hidráulicos em sistemas de distribuição de água e, dentre elas, Filion e Karney (2002) citam três: (i) a necessidade de uma melhor estratégia de proteção contra os efeitos dos transitórios hidráulicos; (ii) a otimização dos algoritmos de comando dos diversos dispositivos de controle; e (iii) a necessidade de se construir melhores métodos numéricos para avaliação dos transitórios hidráulicos para que estes sejam empregados a contento em análises de calibração, localização de vazamentos, quantificação das demandas, e outros.

Na análise dos transitórios hidráulicos, questões sensíveis como o entendimento dos diferentes mecanismos de dissipação de energia, bem como a contribuição de cada um deles, e o conhecimento das limitações dos modelos é essencial para a interpretação dos resultados, julgamento da confiabilidade dos dados numéricos obtidos, minimização do mau uso dos modelos pelos pesquisadores e profissionais do meio prático, e correto delineamento dos processos físicos sob artifícios numéricos.

Neste trabalho, os regimes transitórios causados pela parada súbita de grupo de bombeamento são analisados. Uma campanha para a coleta de dados foi realizada no sistema adutor de água por bombeamento Prado-IPG da cidade da Guarda, Portugal. Os resultados obtidos com base no modelo matemático de regimes transitórios foram comparados com os dados de pressão medidos. O modelo hidráulico proposto, MOC-EPANET, combina o Método das Características (MOC) com o simulador EPANET 2 (Rossman, 2000). A clássica consideração de um reservatório de nível constante como condição de contorno a jusante da adutora foi imprecisa na descrição do comportamento do sistema. Na realidade, o sistema analisado possui descarga livre para a atmosfera na entrada do reservatório de jusante e, assim, foi imposto como condição de contorno de jusante um tanque de nível variável. Foi obtido um bom ajuste dos resultados numéricos aos dados observados em campo em termos de atenuação e dispersão das ondas de pressão quando os efeitos de atrito para escoamento transitório são considerados e a condição de contorno de jusante corretamente definida.

## **SISTEMA ADUTOR DA GUARDA**

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.

A elevatória de água tratada do Prado é constituída por cinco grupos motor-bomba, três dos quais submersíveis. Os grupos encontram-se instalados em paralelo, saindo de cada grupo uma tubulação de ferro fundido dúctil DN200, que liga à tubulação de compressão também em FoFo e com diâmetro DN300, 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 DN200. A tubulação de compressão DN300 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 FoFo DN500. Esta última desenvolve-se desde a caixa de visita até à entrada do reservatório do IPG, sendo o seu comprimento de 2.225 m. Ao longo do percurso, a adutora tem instalada uma ventosa (ponto C da Figura 1).

No extremo de jusante da adutora DN500, está instalado um medidor de vazão eletromagnético, seguido de uma redução para tubo de PVC DEFoFo DN400, o qual se estende até uma cruzeta que alimenta três tubulações de PVC DN200, que conduzem a vazão bombeada às três células do reservatório do IPG. O comprimento total do sistema, desde o interior da estação elevatória até à descarga nas células do reservatório do IPG, é de aproximadamente 2.241 m. Nas Figuras 1 e 2, são apresentados o perfil da adutora e um esquema simplificado do sistema adutor, respectivamente.

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 ultrassônico portátil; conversores de sinal de 4-20 mA para 0-10 V, dois computadores portáteis e *software* para aquisição de dados. A Figura 3 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 ultrassônico portátil, e Q2 o ponto de instalação do medidor de vazão eletromagnético.

$L_{AB} = 905.29 \text{ m}$   
 $L_{BC} = 464.35 \text{ m}$   
 $L_{CD} = 135.81 \text{ m}$   
 $L_{DE} = 740.17 \text{ m}$

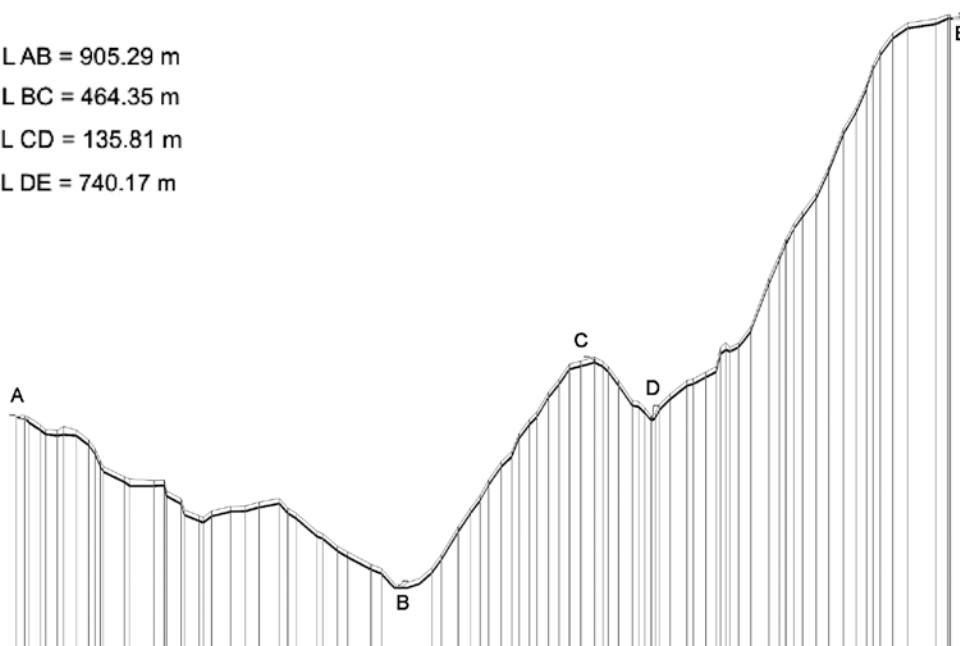


Figura 1: Perfil da adutora

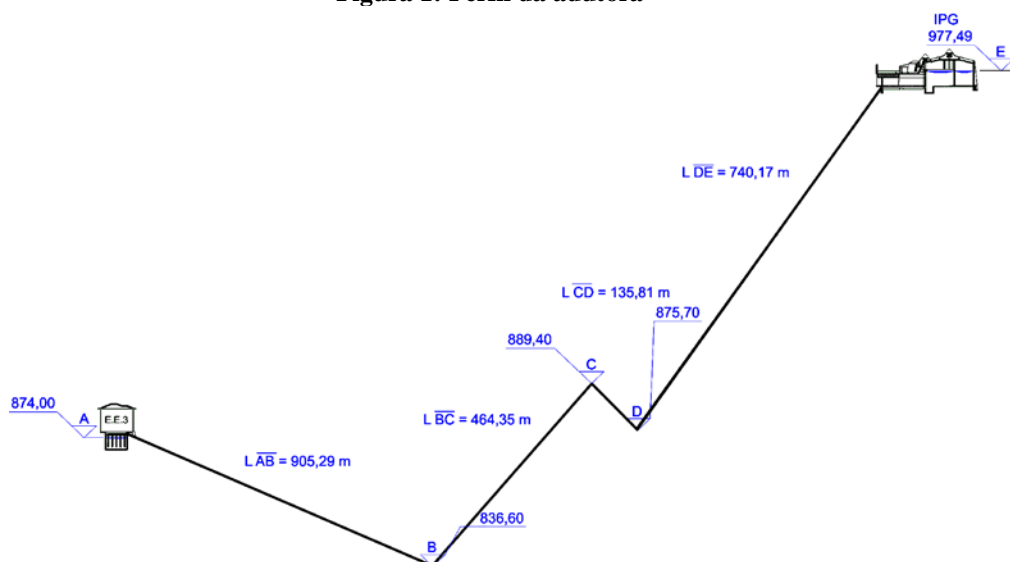


Figura 2: Esquema simplificado da adutora

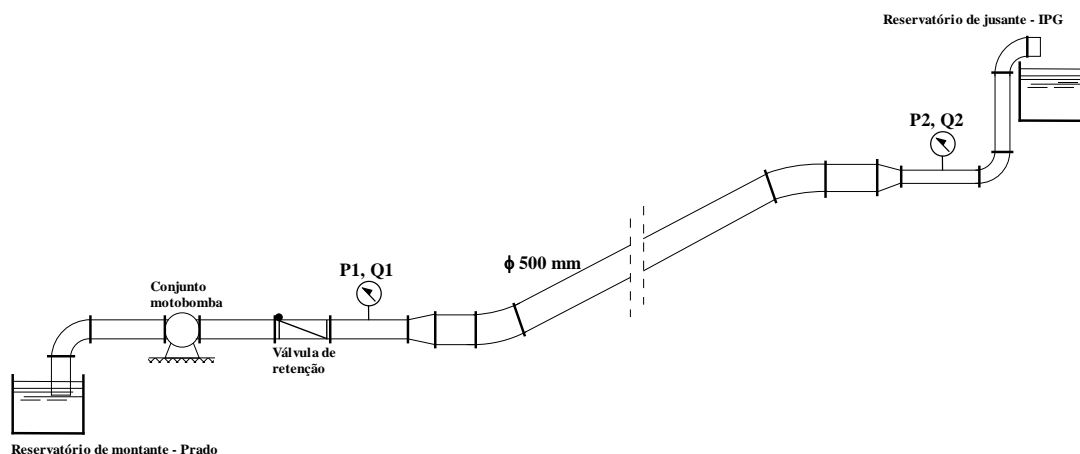


Figura 3: Localização dos pontos de medição de pressão e vazão

## MODELOS HIDRÁULICOS

### Modelo da Coluna Elástica

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):

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

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

sendo  $x$  a distância,  $t$  o tempo,  $H$  a carga piezométrica,  $Q$  a vazão,  $A$  a área da seção transversal da tubulação,  $a$  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):

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

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  $dx/dt = \pm a$ :

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

Utilizando uma malha computacional retangular (Figura 4), as equações simplificadas podem ser resolvidas numericamente pelo seguinte esquema numérico:

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

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

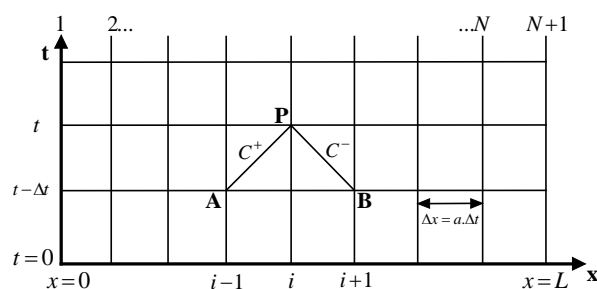


Figura 4: Linhas características no plano x-t

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.

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

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

Neste trabalho, é aplicado um esquema numérico proposto por Covas (2003), segundo o qual um esquema explícito de primeira ordem é utilizado para o cálculo do termo convectivo e um esquema implícito de primeira ordem para o termo local.

*Aceleração convectiva*

$$C^+ : \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i,t-\Delta t} - Q_{i-1,t-\Delta t}}{\Delta x} \quad (8)$$

$$C^- : \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i,t-\Delta t} - Q_{i+1,t-\Delta t}}{\Delta x} \quad (9)$$

*Aceleração local*

$$C^\pm : \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_{i,t} - Q_{i,t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (10)$$

*Operador de sinal*

$$C^+ : SGN(Q) = SGN(Q_{i-1,t-\Delta t}) \quad (11)$$

$$C^- : SGN(Q) = SGN(Q_{i+1,t-\Delta t}) \quad (12)$$

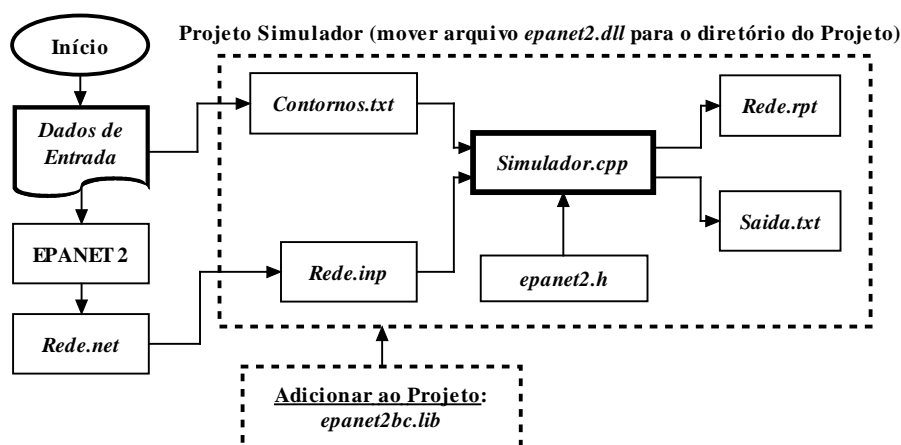
Os equacionamentos apresentados para a malha regular permitem a determinação de  $H$  e  $Q$  nas seções interiores da malha de cálculo. Nos pontos extremos, são necessárias equações complementares em termos de  $H$  e  $Q$  para a obtenção da solução nos contornos, pois se dispõe de apenas uma reta característica em cada extremidade. Equações específicas para a condição de contorno de montante (parada súbita de bomba) podem ser encontradas em Chaudhry (1987). Para a correta descrição da condição de fronteira de jusante, o último trecho da adutora foi considerado como sendo um tanque vertical com nível variável e descarga livre para a atmosfera. Os equacionamentos utilizados neste trabalho podem ser encontrados em Soares *et al.* (2013).

### Modelo MOC-EPANET

Neste trabalho, o *software* EPANET 2 é utilizado com o intuito de gerar os valores de vazões e cargas piezométricas. Tais valores são, então, utilizados nos cálculos da estimativa inicial pelo Método das Características (MOC). Conhecidas as condições de escoamento permanente do sistema, a análise em escoamento transitório é, então, realizada também pelo MOC. O uso do EPANET 2 tem como objetivo acelerar o procedimento de inicialização, por reduzir a alocação de memória computacional durante as simulações e assim evitar o uso de diversas matrizes de elevadas dimensões, e facilitar a entrada de dados da

rede por meio da utilização do arquivo padronizado de extensão INP gerado pelo EPANET 2, a partir do desenho da rede e das características introduzidas para os seus elementos.

Um diagrama da rotina implementada para análise hidráulica em escoamento transitório (MOC-EPANET) é apresentado na Figura 5. A unidade principal (*Simulador.cpp*) foi implementada em linguagem C++ e possui dois arquivos de entrada: *Rede.inp* e *Contornos.txt*. O primeiro deles concentra os dados da rede propriamente dita, relativos aos nós, demandas, cotas topográficas, tubulações, conectividade, diâmetros, comprimentos, rugosidade, reservatórios, níveis dos reservatórios, sistema de unidades, e outros. O arquivo *Rede.inp* pode ser criado através da versão visual do EPANET 2 a partir do arquivo *Rede.net*. O arquivo *Contornos.txt* reúne, como o próprio nome indica, as condições de contorno da rede e demais parâmetros necessários para a sua avaliação hidráulica em regime transitório como passo de tempo, número de iterações, tipo de cada elemento, número de válvulas em linha, válvulas de descarga livre, válvulas de retenção, válvulas de alívio, reservatórios hidropneumáticos, reservatórios de nível constante ou variável, bombas de rotação fixa ou variável, orifícios, vazamentos ou demandas dependentes da pressão, variação temporal da demanda, todos com os respectivos parâmetros, além da especificação de efeitos dinâmicos relativos às perdas de carga em regimes variáveis e do modelo viscoelástico para a análise de transitórios hidráulicos em condutos plásticos (PVC e PEAD).



**Figura 5: Diagrama da rotina computacional para simulação hidráulica (MOC-EPANET)**

Em virtude da utilização do simulador EPANET 2 versão *Toolkit*, alguns procedimentos devem ser realizados tais como a inclusão do arquivo *epanet2.h* na unidade *Simulador.cpp* com o respectivo endereço da pasta ou diretório; adicionar ao projeto criado no compilador C++ *Builder* a biblioteca *epanet2bc.lib*; e mover ou copiar a biblioteca de vínculo dinâmico *epanet2.dll* para a pasta (diretório) de origem do projeto.

Por fim, a rotina possui dois arquivos de saída: *Rede.rpt* e *Saida.txt*. O primeiro deles é o arquivo de saída do EPANET 2, com os valores calculados de pressão nos nós, vazão e velocidade nas tubulações, perda de carga unitária, um resumo da rede avaliada, bem como o número de iterações para a convergência em regime permanente dos valores fornecidos à estimativa inicial. O arquivo *Saida.txt* reúne os valores calculados no escoamento transitório como pressão nos nós, vazão nas tubulações, vazamentos, em cada passo de tempo. É um arquivo que possui maior flexibilidade, pois pode apresentar qualquer informação que seja do interesse do usuário.

Na Figura 6, é apresentado o fluxograma do modelo MOC-EPANET para análise hidráulica de redes de distribuição de água. O processo tem início com a determinação das pressões nos nós e vazões nos tubos com a utilização do EPANET 2. Tais valores são, então, empregados pelo Método das Características (MOC) no cálculo da estimativa inicial e para a análise hidráulica em escoamento transitório. Como critério de convergência, pode-se adotar o tempo máximo do evento transitório que se pretende analisar e/ou a convergência para o estado de escoamento permanente.

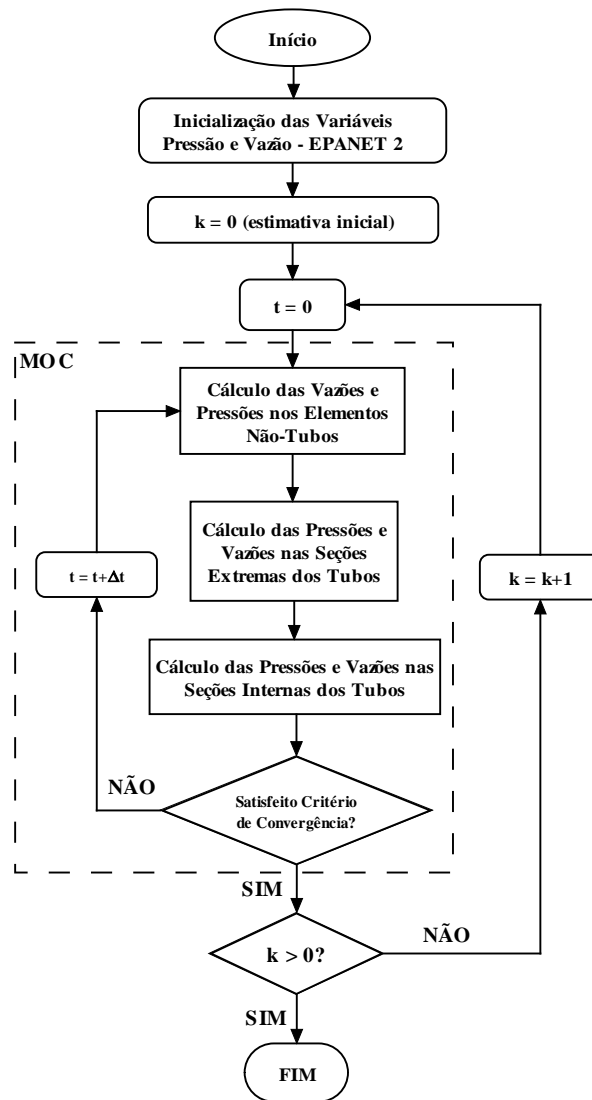


Figura 6: Fluxograma do modelo de simulação hidráulica MOC-EPANET

## CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO

### Dados do conjunto de bombeamento

A estação elevatória do Prado é composta por cinco conjuntos motor-bomba dispostos em paralelo. Os ensaios de campo foram realizados utilizando apenas um grupo composto por bomba submersível com os seguintes parâmetros nominais: vazão bombeada  $Q_R = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ , altura manométrica  $H_R = 105 \text{ mca}$ , potência  $P_R = 110 \text{ kW}$ , velocidade de rotação  $N_R = 3000 \text{ rpm}$ , e eficiência  $\eta_R = 0,78$ . Com tais valores nominais, o momento polar de inércia do conjunto motor-bomba foi calculado de acordo com a equação proposta por Thorley e Faithfull (1992), em que  $I = I_1 + I_2$ , sendo  $I_1$  o momento de inércia do rotor e do fluido e  $I_2$  o momento de inércia do motor, dados por:

$$I_1 = 0,038 \left( \frac{P_R}{(N_R / 1000)^3} \right)^{0,96} = 0,038 \left( \frac{110}{3^3} \right)^{0,96} = 0,146 \text{ kg.m}^2 \quad (13)$$

$$I_2 = 0,0043 \left( \frac{P_R}{(N_R / 1000)} \right)^{1,48} = 0,0043 \left( \frac{110}{3} \right)^{1,48} = 0,888 \text{ kg.m}^2 \quad (14)$$



Assim, o momento polar de inércia do conjunto motor-bomba foi estimado em  $I = 1,034 \text{ kg.m}^2$ .

### **Celeridade e discretização da malha de cálculo**

Estabelecidos os parâmetros do conjunto de bombeamento, partiu-se para a determinação da celeridade (velocidade da onda elástica), a qual pode ser estimada *a priori* por fórmulas teóricas (Chaudhry, 1987; Wylie e Streeter, 1993) com valores tabelados do módulo de elasticidade do material do tubo.

Utilizando a Equação (3), a celeridade foi estimada em 1.132 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 FoFo ( $E_0$ ) de 170 GPa; e coeficiente de Poisson de FoFo igual a 0,25.

A discretização adotada foi de trechos de cálculo com espaçamentos de 11,1 m ( $\Delta x = 11,1 \text{ m}$ ) e passo de cálculo no tempo  $\Delta t = 0,009806 \text{ s}$ .

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.

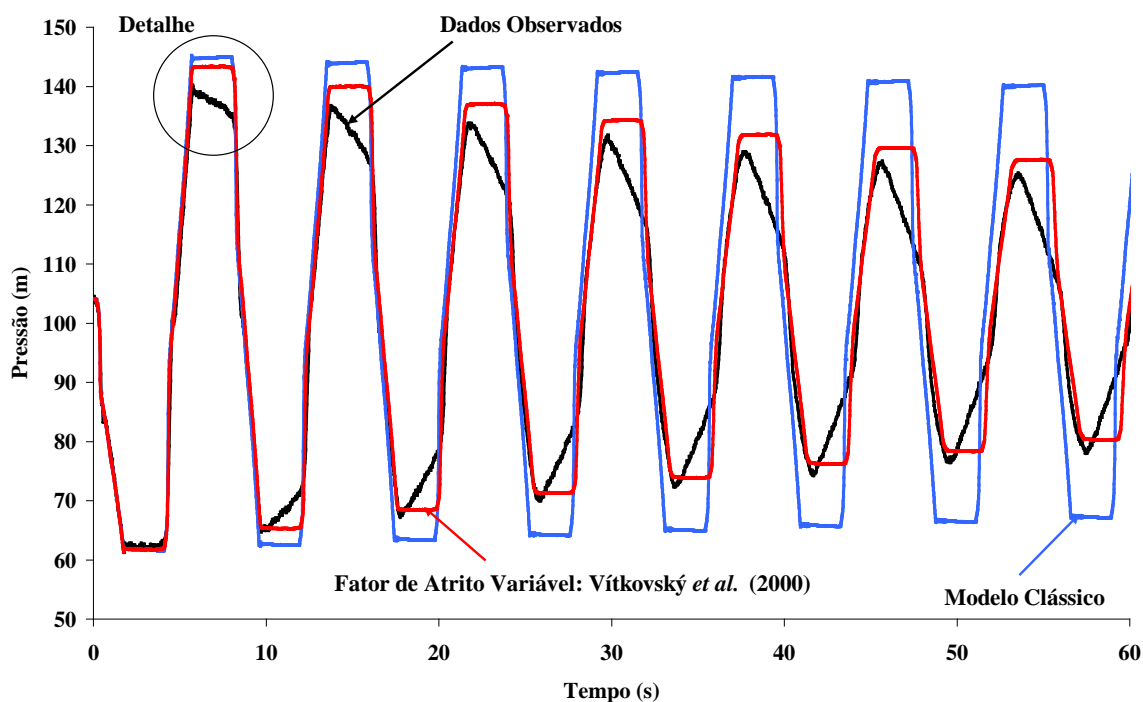
### **Cenário 1 – Reservatório de nível constante como condição de fronteira de jusante**

Na primeira tentativa de calibração do modelo hidráulico desenvolvido, um reservatório de nível constante foi assumido como condição de fronteira de jusante. Além disso, as perdas de carga devido ao atrito foram calculadas com formulações tanto para condições de escoamento permanente (sem fator de atrito variável) como para escoamento transitório utilizando o modelo proposto por Vítkovský *et al.* (2000). A rugosidade absoluta da tubulação foi estimada em 2 mm e o coeficiente de amortecimento  $k' = 0,020$ . A Figura 7 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. Tal válvula, depois da parada súbita do conjunto motor-bomba, fecha completamente em 1,77 s.

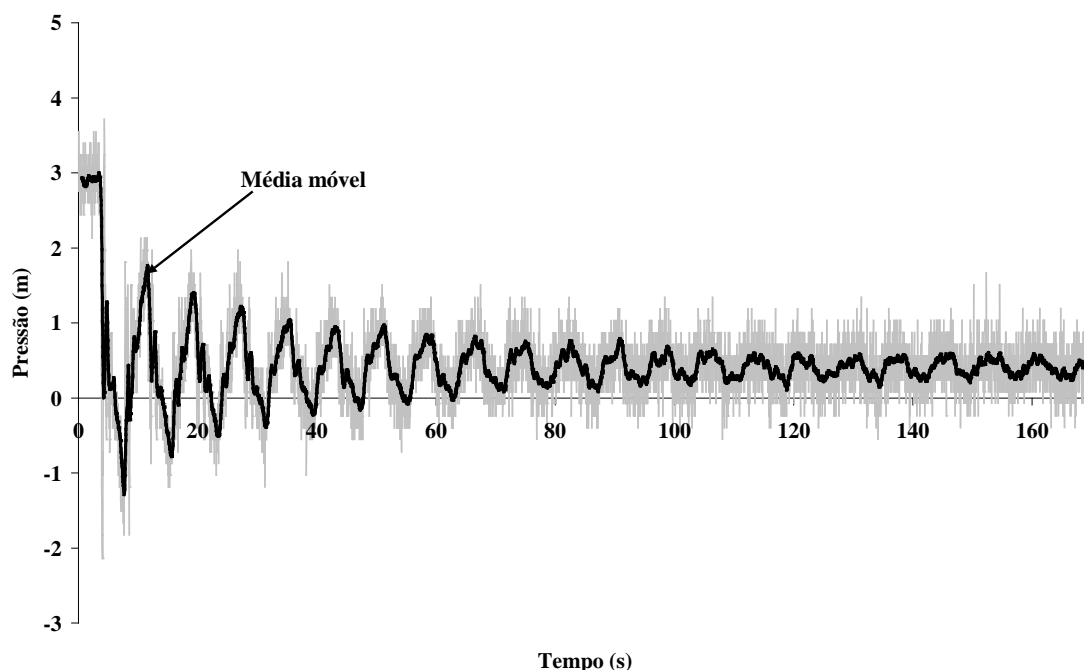
A subpressão inicial é reproduzida com bastante precisão pelos dois modelos elásticos, mas a atenuação e a dispersão da onda de pressão não se ajustam aos valores observados, nem mesmo com o uso de fator de atrito variável nas simulações numéricas. Comparando o modelo clássico com o modelo elástico com fator de atrito variável, uma maior atenuação dos picos de pressão pode ser observada com o uso do fator de atrito variável. Além disso, ocorre um atraso na onda de pressão e um ajuste aos dados observados quanto ao período da onda, mas a forma desta não é reproduzida logo no primeiro pico de pressão máxima (Detalhe na Figura 7).

Uma análise da variação de pressão observada no Ponto P2 do sistema (entrada do reservatório do IPG) mostra que, após a parada do grupo de bombeamento, a carga de pressão disponível sofre um alívio e tende a estabilizar em cerca de 2,5 mca abaixo do regime permanente anterior (Figura 8). Isto se deve ao fato de que, depois da parada do grupo de bombeamento, ainda há saída de água para o reservatório do IPG enquanto a onda de pressão devido à parada da bomba ainda não atinge o ponto extremo de jusante. Assim, e depois da inversão da onda de pressão, esta viaja ao longo do sistema no sentido jusante para montante e passa pelo Ponto P1 já com um alívio de pressão e comportamento ligeiramente modificado, conforme os dados de pressão observados (Detalhe na Figura 7).





**Figura 7:** Cargas de pressão observadas no Ponto P1 e resultados numéricos dos modelos clássico e elástico com fator de atrito variável (reservatório de nível constante como condição de fronteira de jusante) ( $Q_0 = 72 \text{ L/s}$ )



**Figura 8:** Carga de pressão observada no Ponto P2 (entrada do reservatório do IPG)

### **Cenário 2 – Tanque de nível variável como condição de fronteira de jusante**

A segunda tentativa de calibração do modelo hidráulico considerou que a condição de fronteira de jusante como um tanque de nível variável, tendo em vista a reprodução do alívio observado na sobrepressão nos dados de pressão medidos. Além disso, as perdas de carga foram calculadas incluindo as duas componentes de

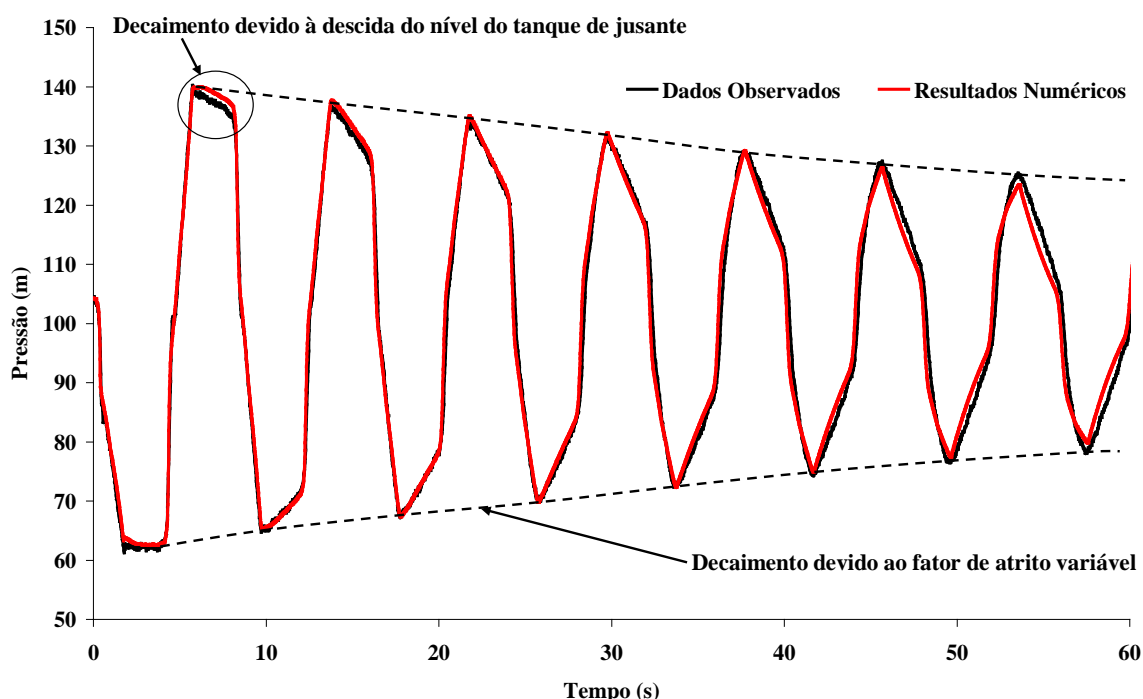
escoamento permanente e de escoamento transitório sendo, neste último caso, utilizada a formulação de Vítkovský *et al.* (2000).

Neste sentido, dois parâmetros devem ser estimados: (i) a área da seção transversal do tanque,  $A_s$ ; e (ii) o coeficiente de amortecimento  $k'$  do modelo de Vítkovský *et al.* (2000). No primeiro caso, foi considerado um tanque com seção transversal circular de área correspondente ao diâmetro equivalente dos três tubos de PVC de 200 mm que alimentam as três células do reservatório do IPG. Assim, o diâmetro do tanque de nível variável foi estimado em 315 mm, sendo, então, um tanque com diâmetro menor do que a tubulação principal da adutora (500 mm). Tal consideração, embora correta do ponto de vista conceitual, causou erros numéricos nas simulações sem a consideração de fator de atrito variável.

Nas simulações com fator de atrito variável, não foram constatados erros numéricos e o coeficiente de amortecimento foi estimado em  $k' = 0,033$ . Além disso, a cota da crista do tanque de nível variável foi adotada como sendo a diferença de cota entre o reservatório do IPG e a estação elevatória do Prado, ou seja,  $H_T = 103,5$  m.

A Figura 9 mostra os resultados numéricos do modelo elástico obtidos com os valores ajustados do coeficiente de amortecimento  $k' = 0,033$ , bem como dos dados de carga de pressão observados em escoamento transitório para o Ponto P1.

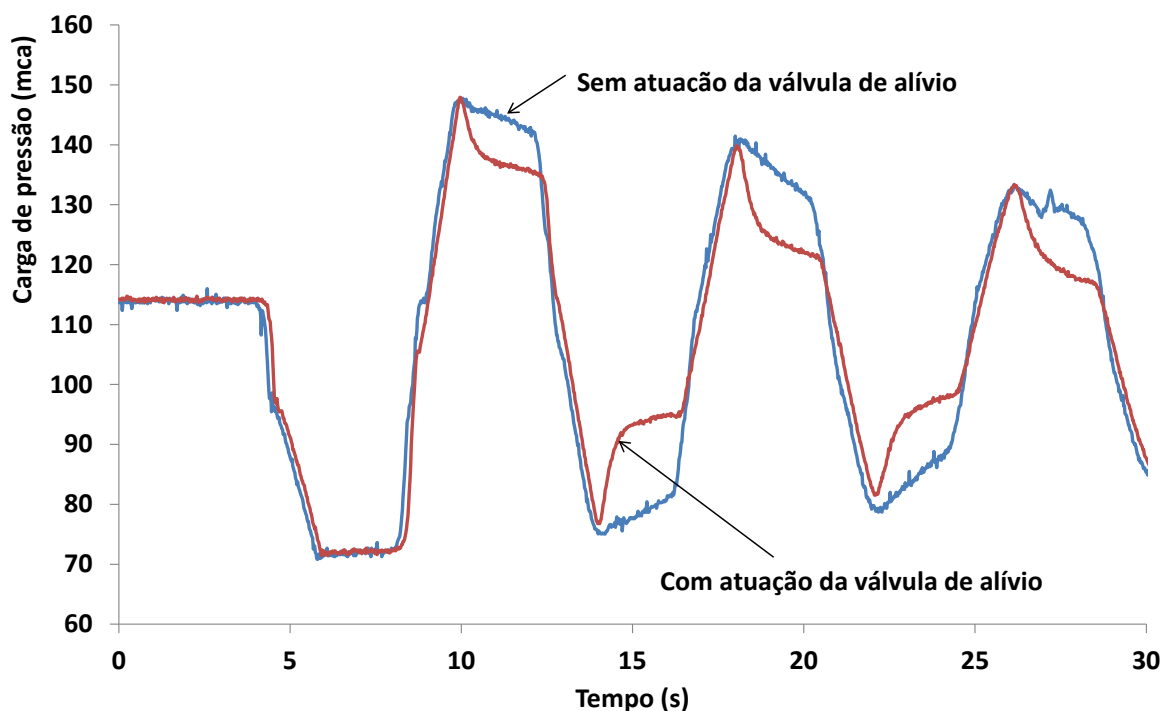
O modelo hidráulico que leva em consideração as perdas de carga calculadas para condições de escoamento transitório bem como a condição de fronteira de jusante sendo um tanque com nível variável reproduz a atenuação e dispersão das variações de pressão durante o evento transitório observado. Pode ser 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. Existe ainda um pequeno desajuste, possivelmente devido à descrição da condição de fronteira (rígida) sem levar em consideração as propriedades elásticas do tubo e da água, sendo, assim, a causa dos erros numéricos apresentados.



**Figura 9:** Cargas de pressão observadas no Ponto P1 e resultados numéricos do modelo elástico com fator de atrito variável e tanque com nível variável como condição de fronteira de jusante ( $Q_0 = 72$  L/s)

### **Válvula de alívio**

Monitoramentos para as situações com e sem a atuação da válvula de alívio são mostrados na Figura 10. Os ensaios de parada do conjunto motor-bomba foram realizados para a mesma vazão. Verificou-se que a válvula de alívio atenua as sobrepressões quando a carga de pressão atinge 150 mca. A variação da carga de pressão apresenta um formato de cunha quando a válvula se abre e descarrega água no reservatório de sucção das bombas.



**Figura 10: Pressões observadas com e sem a atuação da válvula de alívio**

### **CONCLUSÕES**

Uma análise da modelagem de transitórios hidráulicos num sistema adutor de água por bombeamento foi apresentada neste trabalho. Um modelo hidráulico, denominado MOC-EPANET, que combina o Método das Características (MOC) e o simulador EPANET 2 foi utilizado, o qual considera as perdas de carga calculadas para condições de escoamento transitório (fator de atrito variável). Uma campanha para a coleta de dados foi promovida e os eventos transitórios foram provocados pela parada súbita de um conjunto motor-bomba. Tais dados foram utilizados para a calibração e a verificação do modelo matemático apresentado.

Pode-se dizer que, além da teoria clássica do golpe de aríete mostrar-se ineficaz na reprodução do comportamento hidráulico do sistema analisado, a consideração de um reservatório de nível constante como condição de fronteira de jusante também não foi satisfatória. Embora para fins de dimensionamento tal consideração seja a mais conservadora e, portanto, esteja do lado da segurança para o projetista, dado que induz maiores sobrepressões, esta não se adequa para os 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. Somente com a consideração do efeito dinâmico relativo ao fator de atrito variável e, também, a consideração de um tanque com nível variável como condição de fronteira de jusante, os valores de pressão observados foram reproduzidos pelo modelo hidráulico.

Considerando as análises realizadas neste trabalho, os efeitos relativos ao fator de atrito no escoamento transitório em sistemas de bombeamento devem ser mais bem avaliados. Além disso, o estudo de novas técnicas numéricas em substituição ao tradicional Método das Características pode ser uma alternativa para a solução de problemas numéricos.

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.

## **AGRADECIMENTOS**

O autor agradece à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos de estágio pós-doutoral no exterior, à entidade gestora Águas do Zêzere e Côa, aos Doutores Fábio Gonçalves e Nuno Melo pelo suporte durante os ensaios de campo, e às Professoras Dídia Covas e Helena Ramos pelo suporte nas simulações hidráulicas.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. ALMEIDA, A. B.; KOELLE, E. (1992). Fluid Transients in Pipe Networks. Computational Mechanics Publications, Glasgow.
2. CHAUDHRY, M. H. (1987). Applied Hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold Company, 2nd Ed., New York.
3. COVAS, D.I.C. (2003). Inverse Transient Analysis for Leak Detection and Calibration of Water Pipe Systems - Modelling Special Dynamic Effects. PhD, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, UK.
4. FILION, Y. R.; KARNEY, B. W. (2002). A Numerical Exploration of Transient Decay Mechanisms in Water Distribution Systems. Proceedings of the 2002 Conference on Water Resources Planning and Management, Roanoke, Virginia, USA.
5. KARNEY, B. W. (2000). Hydraulics of Pressurized Flow. In: Mays, L. W. (ed.): Water Distribution Systems Handbook, McGraw-Hill, USA, p. 2.1-2.43.
6. ROSSMAN, L. A. (2000). EPANET 2 users manual. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
7. SOARES, A. K.; COVAS, D.I.C.; RAMOS, H.M. (2013). Damping analysis of hydraulic transients in pump-rising main systems. Journal of Hydraulic Engineering, v.139, n.2, p.233-243.
8. 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, Pub. Bettess & Watts (eds), Balkema, Rotterdam, The Netherlands, p. 285-289.
9. VÍTKOVSKÝ, J. P.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R. (2000). Advances in unsteady friction modelling in transient pipe flow. In: 8th International Conference on Pressure Surges - Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems, Eds. Anderson, A., Pub. BHR Group Ltd., Publication No. 39, Suffolk, UK, 471-498.
10. WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. (1993). Fluid transients in Systems. Prentice-Hall, New Jersey.