

## **ANÁLISE DO EFEITO DE MISTURA SOBRE A CELERIDADE DO TRANSITÓRIO HIDRÁULICO EM ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ESGOTO VIA MEDIÇÃO INDIRETA E FORMULAÇÕES ANALÍTICAS**

### **Rodrigo Alexandre da Silva Spakovskis<sup>(1)</sup>**

Tecnólogo em obras hidráulicas e obras de terra e pavimentação pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC/SP), Engenheiro civil pela universidade Nove de Julho (UNINOVE) e mestrando em recursos hídricos, energéticos e ambientais pela Faculdade de engenharia civil (FEC/UNICAMP). Analista de sistemas de saneamento da Unidade de Negócios Sul (MS) na Companhia de saneamento básico do Estado de São Paulo (SABESP).

### **Edevar Luvizotto Junior<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil (Unicamp). Mestre e Doutor em Engenharia Civil (USP). Pós-doutor pela Universidade Politécnica de Valência (Espanha). Professor da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Graham Bell, 647 - Alto da Boa Vista - São Paulo - SP - CEP: 04737-030 - Brasil - Tel: +55 (11) 5682-9841 - e-mail: rspakovskis@sabesp.com.br.

### **RESUMO**

Estabelecer um valor adequado para a celeridade é dificultado em misturas como as compostas por líquido, gás e sólido, típico de sistemas de esgotos sanitários. Por vezes a característica da mistura é negligenciada e o líquido, tratado apenas como fase única, resulta em análises imprecisas como atestam os valores obtidos na literatura e resultados deste estudo. O presente estudo confronta a celeridade avaliada de maneira indireta, por meio de registros de pressões em campo, com os valores obtidos por formulações propostas na literatura para misturas gasosas. Os resultados de campo indicam valores de celeridades diferentes aos obtidos diretamente com os das formulações, fornecendo um indicativo da aderência ou não de cada formulação aos resultados bem como estabelece um percentual típico de volume de gás em uma instalação de recalque de esgotos sanitários.

**Palavras-chave:** Transitório hidráulico. Celeridade. Estação elevatória de esgoto.

### **INTRODUÇÃO**

As operações das elevatórias de esgoto envolvem a acumulação dos efluentes em poços, secos ou úmidos, recalque do esgoto e esvaziamento do poço de acumulação. Este processo de operação é cíclico e os parâmetros hidráulicos como pressão e vazão são determinados para as condições de regime permanente (ou de período extensivo), ou seja, não se consideram alterações significativas dos valores destes parâmetros.

A condição denominada transitória decorre de variações bruscas que possam ocorrer no regime permanente inicial por diferentes causas como manobras operacionais de válvulas, partida ou parada de conjunto motobomba, dentre outras. A celeridade é uma grandeza importante que governa o fenômeno transitório definindo sua intensidade, frequência e sua valoração é fundamental para descrição e quantificação do fenômeno. Devido aos possíveis incidentes que possam decorrer deste fenômeno, THORLEY (2004) afirma que os sistemas elevatórios, tanto de abastecimento de água como o de afastamento de esgotos, devem ter como base o estudo dos transitórios hidráulicos na avaliação de riscos operacionais por ocorrências desta natureza.

Segundo MALEKPOUR et al. (2015), embora os transitórios hidráulicos em sistemas pressurizados sejam razoavelmente bem compreendidos, particularmente em relação aos sistemas de abastecimento de água, o comportamento dos sistemas de esgoto em condições transitórias é geralmente mal compreendido e, muitas vezes ignorado. O esgoto apesar de ter uma composição predominante de fase líquida, apresenta percentuais de fase sólida e gasosa que interferem em variáveis responsáveis pela resposta transitória.

Variações significativas na celeridade podem mudar drasticamente o valor das pressões transitórias. Segundo WYLIE e STREETER (1978) a celeridade de um líquido com uma pequena quantidade de gases dissolvidos é consideravelmente menor que no líquido puro. Os pesquisadores citam que os experimentos realizados por

KOBORI et al. (1955) e PEARSALL (1965), em estações de bombeamento de esgotos, mostraram que a redução na celeridade é cerca de 75% em relação a um líquido puro, como a água, dependendo do teor de gás.

Alguns autores propuseram equações para celeridade que expressam o comportamento de um líquido com um determinado teor de gás incorporado, assim como uma certa quantidade de sólidos em suspensão, o que é típico de um sistema de transporte de esgotos sanitários.

O trabalho faz um estudo comparativo entre as equações propostas, metodologia esta ainda não observada em literatura corrente de análise de fenômenos transitórios e, através da observação gráfica, verifica quais as equações possuem comportamentos semelhante. Por fim o estudo tem procura observar o percentual de gás típico em uma estação elevatória de esgotos.

## OBJETIVO

Observar quais as equações analisadas têm comportamentos semelhantes a um determinado gráfico referência usando dados de uma estação elevatória existente e, assim verificando quais equações podem ser utilizadas para o estudo do fenômeno transitiente em elevatórias de características semelhantes à do estudo. Através da verificação das equações que refletem a condição da elevatória em estudo, determinar qual o percentual de gás dissolvido na instalação avaliada.

## FUNDAMENTAÇÃO TEORICA – Revisão bibliográfica

Para BOULOS et al. (2005), o transitório hidráulico pode ser entendido como a conversão da energia cinética transportada pelo líquido em energia de tensão nas paredes do tubo, causando uma "onda de pulso" de pressão anormal que irá perturbar a instalação. O som de martelar que as vezes é ouvido indica que uma parte da energia cinética do líquido original é convertida não só em pressão, mas também em energia sonora. A figura 1 ilustra a variação de pressão no transcorrer de um determinado tempo ( $\Delta t$ ) após o fechamento de uma válvula à jusante da seção de análise. Na figura é possível observar os regimes permanente inicial, final e o regime transitório que transcorre num intervalo  $T_{RT}$ , onde ocorre a adequação entre os dois regimes permanentes.

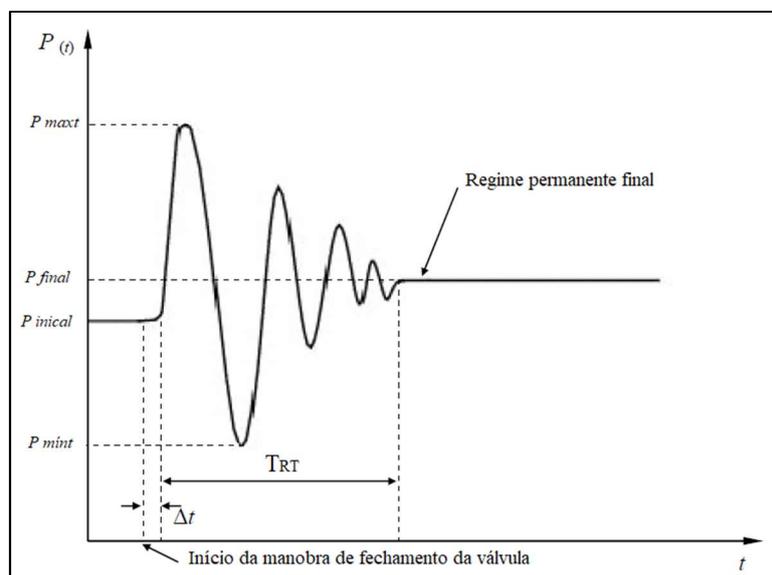


Figura 1 – Escoamentos em regime permanente e transitório hidráulico

Fonte: Adaptado de ELBASHIR e AMOAH (2007)

O cientista russo Nikolai Egorovich Joukowsky (1897), (LÜDECKE et al. (2006) e GUIDAOUI et al. (2005)), propôs uma equação simples para avaliar a variação de pressão ( $\Delta p$ ) como função da variação instantânea da velocidade ( $\Delta V$ ). Essa equação é conhecida como equação de Joukowsky (equação 1).

$$\Delta p = +/\!-\ \rho \cdot a \cdot \Delta V \quad (1)$$

Ou, em termos de carga de pressão,

$$\Delta H = +/\!-\ a/g \cdot \Delta V \quad (2)$$

Sendo,  $\Delta p$  = variação da pressão na seção de controle (m);  $\rho$  = massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ );  $a$  = celeridade (m/s);  $\Delta V$  = variação da velocidade média na seção de controle (m/s).

Por sua vez a compressão e decompressão, expressa pela mudança de sinal em (1), ocorre de maneira cíclica e o período “ $T$ ” das oscilações das cargas de pressão de uma tubulação pode ser descrito de forma ilustrativa como na figura 2, para uma instalação hipotética, com atrito negligenciado, composta por um reservatório a montante a nível constante, uma tubulação e uma válvula a jusante com manobra de fechamento instantâneo. A figura 2 ilustra o ciclo de compressão e decompressão na seção da válvula após o fechamento brusco e, mostrando que este ciclo tem um período bem definido ( $T = 4L/a$ ), que depende exclusivamente do comprimento da tubulação e da celeridade da onda de pressão ( $a$ ).

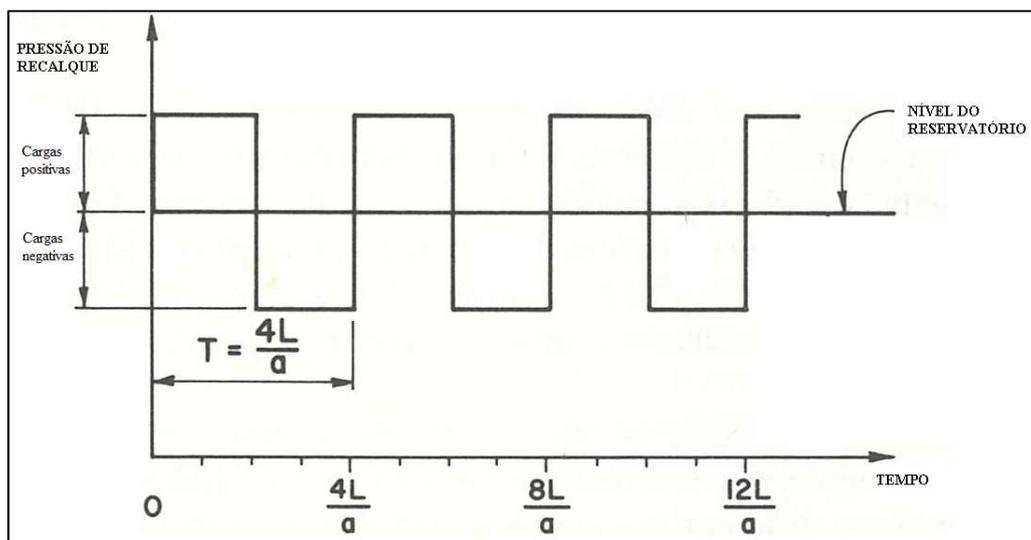


Figura 2 – Período de uma instalação  
Fonte: Adaptado de CHAUDRY (1979)

Assim, se este período pode ser obtido pela interpretação do registro de sinal de pressão na seção, a celeridade pode ser avaliada por meio da equação 3,

$$a = \frac{4L}{T} \quad (3)$$

Sendo,  $T$  = período do fenômeno físico (s);  $L$  = comprimento total da tubulação (m) e  $a$  = celeridade (m/s).

O comportamento ilustrado na figura 2 reflete, para a situação descrita, o que se obtém como solução das equações que governam o fenômeno transitório, obtidas originalmente por ALLIEVI (1903), com base nas equações de conservação de massa (4) e de quantidade de movimento (5) considerando o atrito:

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (4)$$



$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (5)$$

Sendo,  $Q$  = vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $H$  = carga piezométrica (m);  $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ );  $f$  = fator de atrito da fórmula universal da perda de carga (em regime permanente);  $D$  = diâmetro da tubulação (m);  $A$  = área da seção transversal da tubulação ( $\text{m}^2$ );  $a$  = celeridade (m/s);  $t$  = tempo transcorrido (s);  $x$  = distância medida ao longo do eixo da tubulação (m).

No caso ilustrado na figura 2, o terceiro termo da equação (5), referente ao atrito, foi negligenciado. Para casos com atrito, embora o amortecimento das ondas ocorra, desfazendo a forma de onda retangular, o comportamento cíclico e periódico é evidente e o período do fenômeno físico segue a mesma equação apresentada.

As equações (4) e (5) definem um sistema de equações diferenciais do tipo hiperbólicas usualmente resolvido de forma numérica. Na solução destas equações a celeridade tem fundamental importância para a quantificação das grandezas de interesse, ou seja, a carga ( $H$ ) e a vazão ( $Q$ ), nas seções de análise no transcorrer do tempo. O matemático Holandês Diederik Korteweg (1878), (ABREU et al. (1995) e CHAUDRY (1979)), desenvolveu a equação para o cálculo da celeridade de propagação de onda em um evento transitório. A equação 6 resulta das considerações adotadas por Korteweg, considerando uma única fase e a tubulação de parede fina com deformação elástica.

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \left(\frac{K}{E}\right) \left(\frac{D}{e}\right) \psi}} \quad (6)$$

Sendo,  $a$  = celeridade (m/s);  $K$  = módulo de compressibilidade volumétrica do fluido ( $\text{N}/\text{m}^2$ );  $\rho$  = massa específica do fluido ( $\text{N}/\text{m}^3$ );  $E$  = módulo de Young ou módulo de elasticidade do material da tubulação ( $\text{N}/\text{m}^2$ );  $D$  = diâmetro da tubulação (m);  $e$  = espessura das paredes da tubulação (m);  $\psi$  = coeficiente relacionado ao tipo de vinculação da tubulação (adimensional).

Segundo MALEKPOUR et al. (2015), a diferença significativa na compressibilidade do ar em relação à da água permite que o ar possa ser usado para absorver e atenuar pressões transitórias. O ar ou a mistura gasosa presente no sistema de esgoto sanitário pode alterar a celeridade e modificar as pressões a que este está exposto o que se evidencia na equação (1).

POTHOF et al. (2011) elenca algumas formas de incorporação de ar nos sistemas elevatórios de esgotos:

- Vazamentos nas redes;
- Jato em queda livre no poço de sucção;
- Processos bioquímicos.

JÖNSSON (1985) apud BURROWS e QUI (1995) afirma que há um limite sobre a quantidade de ar que conduz a amortecimento do transitório, pela sua influência direta sobre a celeridade. Os pesquisadores observaram que enquanto uma grande cavidade de ar atua como um acumulador e suprime o máximo de pressão transitória, após o desligamento de uma bomba por exemplo, esse volume dividido entre várias bolsas de ar pode substancialmente potencializar pressões transitórias. No experimento realizado por LUBBERS e CLEMENS (2005) foram observadas as condições de perfil topológico para atendimento das condições de formação de bolsas da ar. O perfil que atende essas condições tem forma totalmente ascendente, sem grandes deflexões verticais.

A influência que uma pequena quantidade de gases dissolvidos exerce sobre a celeridade é ilustrada na figura 3. Para KOBORI et al. (1955) apud WYLIE e STREETER (1978) a presença de gases em sistemas de esgotamento sanitário varia ente 0,1 a 1% em relação ao volume total.

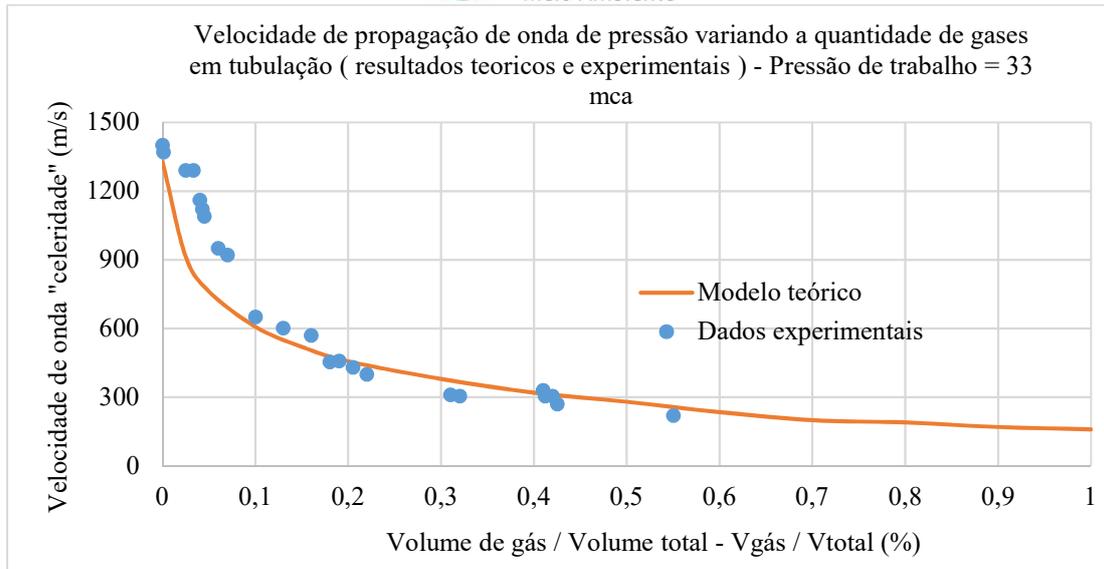


Figura 3 – Celeridade x volume de mistura gás-líquido  
Fonte: Adaptado de WYLIE e STREETER (1978)

A influência do ar ou gás dissolvido na equação da celeridade não é trivial pois envolve um processo termodinâmico complexo. Assim as equações encontradas na literatura baseiam-se em hipóteses simplificadoras tais como;

- A mistura gás-líquido é homogênea, isto é, as bolhas de gás são distribuídas uniformemente no líquido;
- As bolhas de gás seguem a lei isotérmica;
- A pressão dentro das bolhas é independente da tensão superficial e da pressão de vapor e seu valor não se altera.

Como base em hipóteses desta natureza, alguns autores propõem equações para celeridade com incorporação de gases. As equações 7, 8, 9 10 são, respectivamente, apresentadas por WYLIE e STREETER (1978), CHAUDRY (1979), EWING (1980) e LEE e PEJOVIC (1996):

$$a_{ws} = \sqrt{\frac{[Km] / (\rho m)}{1 + \left[ Km \cdot \left( \frac{D}{Ee} \right) \cdot \psi \right]}} \quad (7)$$

$$a_{CH} = \sqrt{\frac{1}{\left[ \left\{ \rho l \cdot \left( 1 - \left[ \frac{(\alpha) \cdot Pmaxt}{Pt} \right] \right\} + \rho gas \cdot Pmaxt \right] \cdot \left[ \left( \frac{(\alpha) \cdot Pmaxt}{Pt^2} \right) + \frac{1}{Kl} + \frac{D}{Ee} \right] \cdot \psi}} \right)} \quad (8)$$

$$a_{EW} = \left[ \left\{ (1 - \alpha) \left( \frac{\rho m}{Km} \right) \right\} + \left\{ \frac{\rho m \cdot \alpha}{Pt} \right\} \right]^{-1/2} \quad (9)$$

$$a_{LP} = \left[ \rho l (1 - Vg) \cdot \left( \frac{1}{Kl} + \frac{Vg}{Pt} + \frac{\psi \cdot D}{e \cdot E} \right) \right]^{-1/2} \quad (10)$$

Onde:  $a_{ws}$  = celeridade da mistura proposta por Wylie e Streeter (m/s);  $a_{CH}$  = celeridade da mistura proposta por Chaudry (m/s);  $a_{EW}$  = celeridade da mistura proposta por Ewing (m/s);  $a_{LP}$  = celeridade da mistura proposta Lee e Pejovic (m/s);  $Kl$  = módulo de elasticidade do líquido (N/m<sup>2</sup>);  $Kgas$  = módulo de elasticidade do gás (N/m<sup>2</sup>);  $Km$  = módulo de elasticidade da mistura (N/m<sup>2</sup>);  $Vgas$  = volume ocupado pelo gás na mistura do sistema (m<sup>3</sup>);  $Vt$  =

volume total da mistura (líquido + gás) ( $m^3$ );  $\rho_{gas}$  = massa específica do gás ( $N/m^3$ );  $\rho_l$  = massa específica do líquido ( $N/m^3$ );  $\rho_m$  = massa específica da mistura ( $N/m^3$ );  $P_{max}$  = pressão máxima transiente ( $N/m^2$ );  $P_t$  = pressão de trabalho da linha de recalque ( $N/m^2$ );  $E$  = módulo de Young ou módulo de elasticidade do tubo ( $N/m^2$ );  $D$  = diâmetro do tubo (m);  $e$  = espessura das paredes de tubo (m);  $\psi$  = tipo de vinculação, ancoragem da tubulação (adimensional);  $\alpha$  = relação entre volume do gás e volume total (adimensional).

Sendo,

$$Km = \left[ \frac{Kl}{1 + [(V_{gas}/V_t) \cdot \{(Kl/K_{gas}) - 1\}]} \right] \quad (11)$$

$$\rho_m = \left( \left[ \rho_{gas} \cdot \left( \frac{V_{gas}}{V_t} \right) \right] + \left[ \rho_l \cdot \left( \frac{V_l}{V_t} \right) \right] \right) \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{V_{gas}}{V_t} \quad (13)$$

## METODOLOGIA

A pesquisa avaliou uma linha de recalque de esgotos com características de perfil suave ascendente, com o intuito de não formação de bolsões de ar que ocupassem a seção total da tubulação, descaracterizando o problema abordado por fenômenos anteriormente descritas.

A metodologia empregada considerou o registro de dados de pressão coletados em campo durante a ocorrência de um evento transitório, decorrente de manobras (desligamento de conjunto motobomba), para obtenção indireta do valor da celeridade da instalação (conforme descrito anteriormente (equação (3)) e, com o valor obtido, investigou-se a aderência das equações propostas por WYLIE e STREETER (1978), CHAUDRY (1979), EWING (1980) e LEE e PEJOVIC (1996) ao valor obtido e a quantidade de gás dissolvido necessário para obtê-lo. As incertezas sobre cada uma das variáveis que entram no computo das equações analisadas foi limitada pelas restrições impostas por faixas de valores obtidos da literatura e catálogo de fabricantes.

Foi usado o módulo de otimização baseado no algoritmo Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) disponível no solver do Microsoft Excel® cuja função objetivo é não linear, com restrições lineares. Para KÖKSOY e YALCINOZ (2006) o GRG é o método muito empregado na resolução de problemas de otimização de múltiplas variáveis, caso das equações analisadas pelo presente estudo, por ser de fácil implantação. A maior dificuldade na utilização do GRG deve-se do fato de que é necessário que a estimativa inicial das variáveis esteja próxima ao valor do ponto ótimo para uma garantia de convergência. Segundo MOTULSKY e RANSNAS (1987) as estimativas iniciais das variáveis, podem ou devem ser especificadas tendo em consideração a experiência do investigador ou eventuais análises preliminares. A escolha dos valores iniciais é mais influente e, por isso, mais importante nos casos em que os modelos incluem muitos parâmetros.

No problema analisado envolvendo as equações estudadas a variável de maior importância é o volume de gás ( $V_{gás}$ ) incorporado à mistura. Para uma melhor compreensão do procedimento empregado apresenta-se o fluxograma da figura 4.

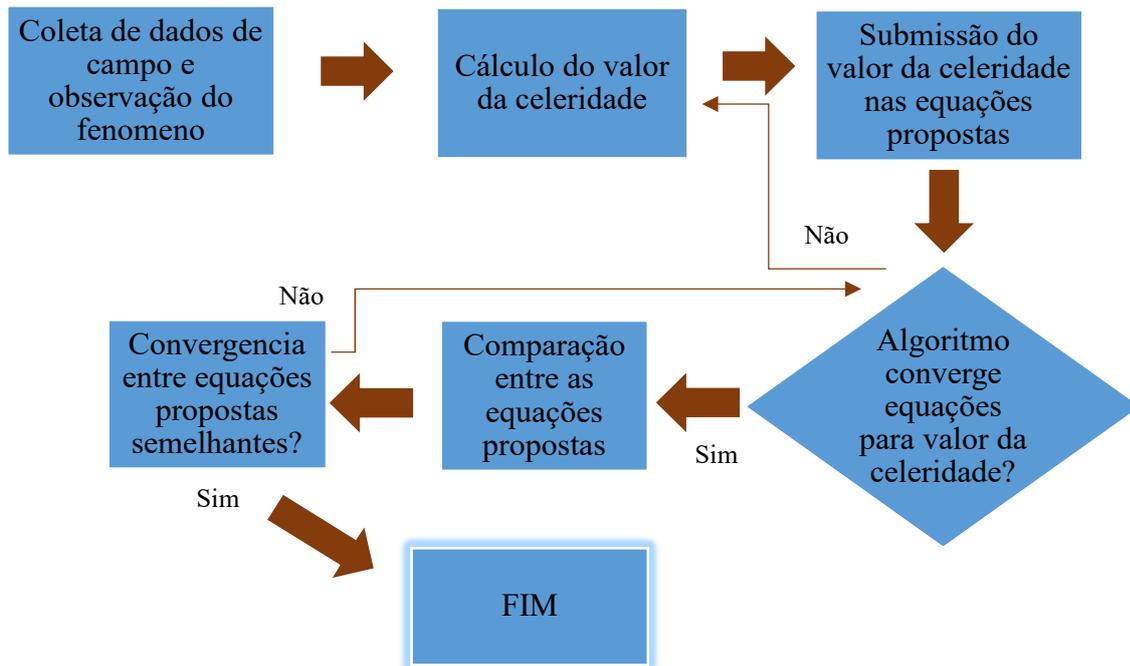


Figura 4 – Fluxograma geral do processo do estudo.

## ESTUDO DE CASO

O estudo foi realizado no município de Itapeccerica da Serra, localizado na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A linha de recalque de esgotos pertence à Estação Elevatória de Esgotos (EEE) Jardim Jacira e possui 1.873,00 metros de extensão, o material da rede é ferro fundido classe K7 e espessura das paredes de 6,0 mm. A linha de recalque parte da cota 734,00 m e segue uma linha de aclave suave até a cota 750,00m, tendo percorrido aproximadamente 800,00m de extensão. A partir deste ponto a inclinação da linha passa a ser mais íngreme até o ponto de descarte, na cota 801,00m. No ponto final da linha de recalque o efluente é lançado em um Poço de Visita (PV) de transição e posteriormente os esgotos são encaminhados para a estação elevatória à jusante, a elevatória Jardim Capela. A figura 5 ilustra o perfil da linha de recalque da EEE Jardim Jacira tendo como uma de suas principais características o perfil suave e totalmente ascendente.

A bacia de esgotamento da elevatória em estudo possui como característica a contribuição de esgotos basicamente toda do tipo residencial. Na bacia não há indústria e, assim, caracterizando os esgotos afluentes na estação como tipo predominantemente residencial.

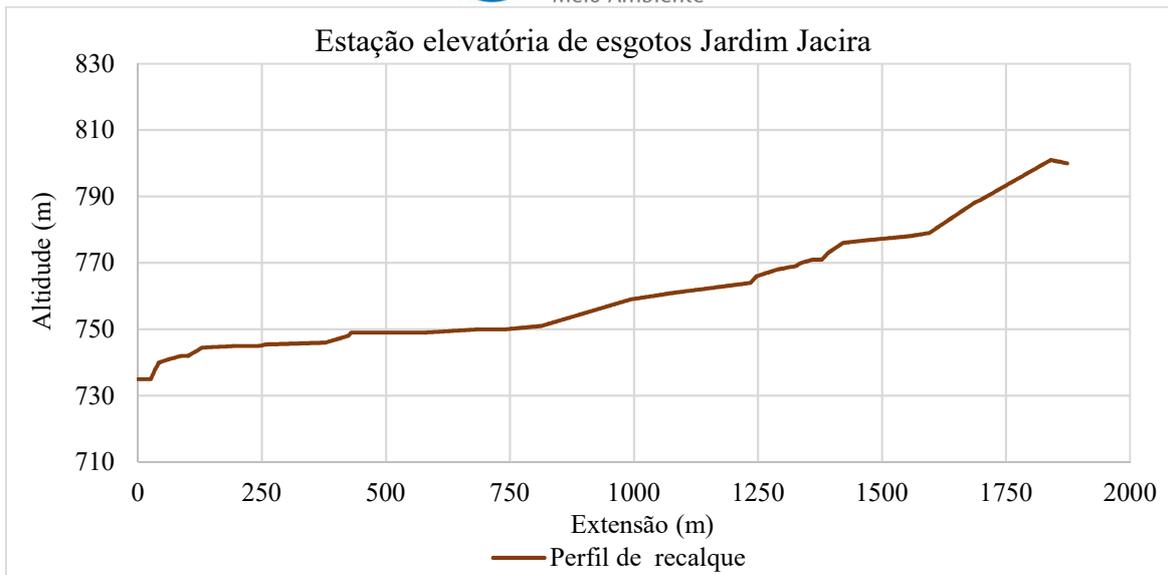


Figura 5 – Perfil da linha de recalque da EEE Jardim Jacira.

Foram instalados equipamentos registradores de pressão tipo “DataLoggers”, no barrilete de recalque, após a válvula de retenção. Os equipamentos registravam os dados de pressão a cada segundo e a coleta de dados foi feita no dia 13/09/2019. A figura 6 apresenta os dados coletados que evidenciam o fenômeno transitório estudado.

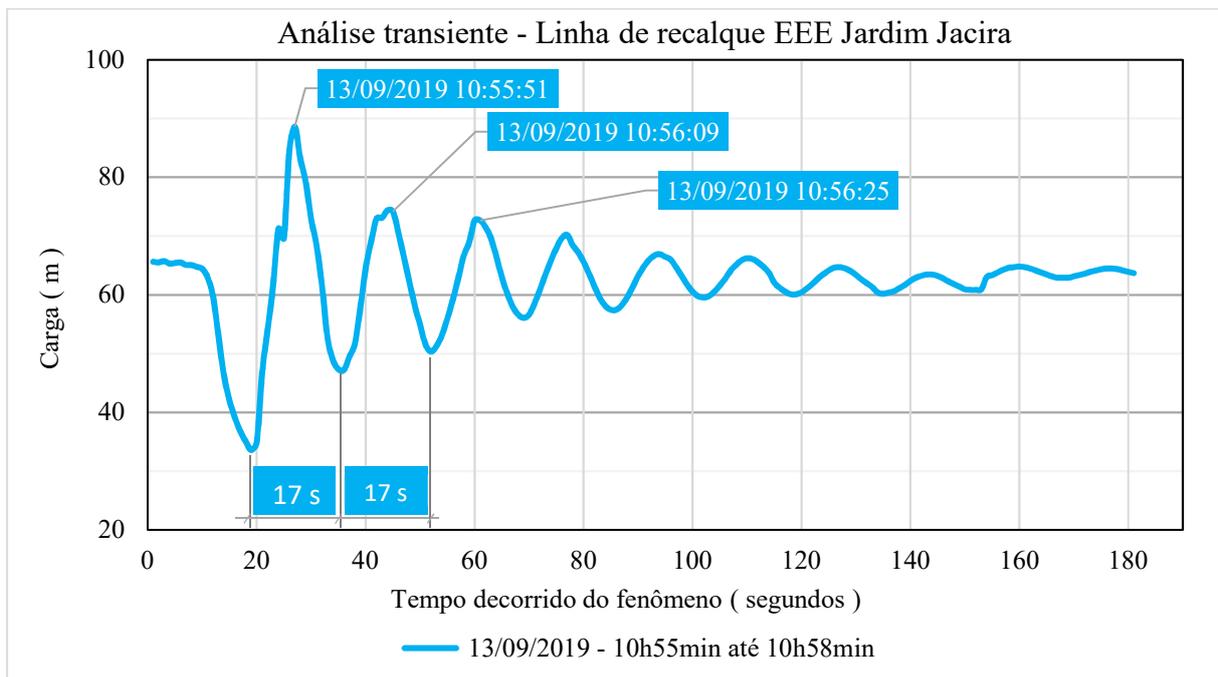


Figura 6 – Coleta de dados das pressões transitórias na EEE Jardim Jacira – Setembro/2019.

Observando os dados de campo ilustrados na figura 6 pode-se observar que o período “*T*” do fenômeno é de aproximadamente 17 segundos e pela figura 5 é possível observar que a extensão de toda a rede de recalque é de 1.873,00 metros, assim é possível obter:

$$a = \frac{4 \times 1873}{17} = 440,71 \text{ m/s}$$

O presente estudo buscou desenvolver a otimização do processo de comparação entre a celeridade de campo, calculada conforme acima, e a celeridade teórica apontada na literatura conforme a revisão bibliográfica

apresentada. A função objetivo desenvolvida buscou minimizar a diferença dos valores das celeridades partindo de um valor pré-determinado.

A função objetivo fica:

$$F(x) = \min(a_{campo} - a_{teórico})^2 \quad (14)$$

Sendo  $a_{teórico}$  o valor aplicado a cada uma das equações propostas na literatura para,  $a_{WS}$ ,  $a_{CH}$ ,  $a_{EW}$  e  $a_{LP}$

a) Para a celeridade  $a_{WS}$  temos as variáveis em função de:

$$g1(x) = (K_m, \rho_m, D, E, e, \psi)$$

resultando a equação 14 na forma:

$$F(x) = \min(a_{campo} - a_{g1(x)})^2 \quad (15)$$

b) Para a celeridade  $a_{CH}$  temos as variáveis em função de:

$$g2(x) = (\alpha, P_{max}, P_{min}, \rho_{gas}, \rho_l, P_t, K_l, D, E, e, \psi)$$

resultando a equação 14 na forma:

$$F(x) = \min(a_{campo} - a_{g2(x)})^2 \quad (16)$$

c) Para a celeridade  $a_{EW}$  temos as variáveis em função de:

$$g3(x) = (K_m, \rho_m, V_g, P_t, D, E, e, \psi)$$

resultando a equação 14 na forma:

$$F(x) = \min(a_{campo} - a_{g3(x)})^2 \quad (17)$$

d) Para a celeridade  $a_{LP}$  temos as variáveis em função de:

$$g4(x) = (\rho_l, V_g, P_t, K_l, D, E, e, \psi)$$

resultando a equação 14 na forma:

$$F(x) = \min(a_{campo} - a_{g4(x)})^2 \quad (18)$$

As equações 15, 16, 17 e 18 então foram utilizadas no Solver do Microsoft Excel®. As variáveis (x) das funções  $g1...n(x)$  são os parâmetros que cada equação analisada leva em conta para o tipo de mistura gás-líquido.

Uma primeira estimativa para o presente estudo foi de um volume de gás, cerca de 0,5%, em relação ao volume total. Os valores extremos das variáveis das equações obtidos na literatura, foram tomados como restrições do processo de otimização conforme a tabela 1.



Tabela 1 - Faixa de variação das componentes das equações estudadas

| Variável   | Faixa dos valores obtidos na literatura           | Referência |
|--|---|------------|
| $K_l$ - Módulo de compressibilidade volumétrica do líquido (N/m <sup>2</sup> ) | 1,92 x 10 <sup>9</sup> a 2,27 x 10 <sup>9</sup>   | (1) e (2)  |
| $E$ - Módulo de elasticidade do tubo (N/m <sup>2</sup> )                       | 0,80 x 10 <sup>11</sup> a 1,70 x 10 <sup>11</sup> | (1) e (2)  |
| $\rho_l$ - massa específica do líquido (kg/m <sup>3</sup> )                    | 9,80 x 10 <sup>2</sup> a 1,05 x 10 <sup>3</sup>   | (2)        |
| $D$ - Diâmetro do tubo (m)   | 3,95 x 10 <sup>-1</sup> a 4,16 x 10 <sup>-1</sup> | (4)        |
| $e$ - Espessura das paredes de tubo (m)  | 5,95 x 10 <sup>-3</sup> a 6,5 x 10 <sup>-3</sup>  | (4)        |
| $\psi$ - tipo de vinculação, ancoragem da tubulação (adimensional)             | 0,85 a 1  | (2)        |
| $\rho_{gas}$ - massa específica do gás na mistura (N/m <sup>3</sup> )          | 1,23 x 10 <sup>3</sup> a 1,25 x 10 <sup>3</sup>   | (3)        |
| $V_G$ - Volume de gás na mistura (m <sup>3</sup> )                             | 5,0 x 10 <sup>-2</sup> a 1,0                      | (5)        |
| $K_{GAS}$ = módulo de elasticidade do gás (N/m <sup>2</sup> )                  | 1,92 x 10 <sup>5</sup> a 2,27 x 10 <sup>5</sup>   | (3)        |

(<sup>1</sup>) PARMAKIAN (1955), (<sup>2</sup>) CHAUDRY (1979), (<sup>3</sup>) ABREU et al. (1995), (<sup>4</sup>) CATÁLOGO SAINT GOBAIN, (<sup>5</sup>) WILYE e STREETER (1978).

## RESULTADOS

Os resultados obtidos do processo de otimização são apresentados na tabela 2 que mostra os valores iniciais estimados para a celeridade das equações estudadas, evidenciando a incorreção em percentual da estimativa inicial em relação ao valor obtido pela otimização. Também é possível observar as diferenças percentuais de cada variável, evidenciando quais tiveram maior impacto sobre o valor ótimo. Os valores em *negrito* destacam os valores dos parâmetros de cada equação analisada que tiveram as maiores alterações verificadas.

Para a análise de resultados será usado como referência o comportamento da celeridade variando seu percentual de gás assim como na figura 3, procurando observar qual das equações analisadas apresentou comportamento semelhante ao do chamado “gráfico referência”.

Tabela 2 – Resultado da otimização das equações propostas

| EQUAÇÕES UTILIZADAS                        | WILYE e<br>STREETER (1978) |          |             | CHAUDRY (1979)  |               | EWING (1980)    |              | LEE e PEJOVIC<br>(1996) |               |                 |              |
|--|----------------------------|----------|-------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------|-------------------------|---------------|-----------------|--------------|
| FUNÇÃO OBJETIVO                            | <b>440,71</b>              |          |             | <b>440,71</b>   |               | <b>440,71</b>   |              | <b>440,71</b>           |               |                 |              |
| VALOR INICIAL                              | <b>196,01</b>              |          |             | <b>607,93</b>   |               | <b>111,75</b>   |              | <b>155,40</b>           |               |                 |              |
| Diferença em módulo                        | 244,70                     |          |             | 167,22          |               | 328,96          |              | 285,31                  |               |                 |              |
| $F(x) = \min(a_{campo} - a_{g1...n(x)})^2$ | 0                          |          |             | 0               |               | 0               |              | 0                       |               |                 |              |
| <b>VALOR DA CELERIDADE NO MODELO</b>       | <b>440,71</b>              |          |             |                 |               |                 |              |                         |               |                 |              |
| VARIÁV<br>EIS                              | RESTRICÇÕES                |          | BASE        | R*              | Var.**        | R*              | Var.**       | R*                      | Var.**        | R*              | Var.**       |
|  | Menor                      | Maior    |             |                 |               |                 |              |                         |               |                 |              |
| $K_l$ (N/m <sup>2</sup> )                  | 1,92E+09                   | 2,27E+09 | 1,92E+09    | 1,92E+09        | 0,0%          | 1,92E+09        | 0,0%         | 1,92E+09                | 0,0%          | 1,92E+09        | 0,0%         |
| $K_{gas}$<br>(N/m <sup>2</sup> )           | 1,92E+05                   | 2,27E+05 | 1,92E+05    | 1,92E+05        | 0,0%          |                 |              | <b>2,27E+05</b>         | <b>18,2%</b>  |                 |              |
| $\rho_l$ (N/m <sup>3</sup> )               | 9,80E+02                   | 1,05E+03 | 9,80E+02    | <b>1,05E+03</b> | <b>7,1%</b>   | <b>1,00E+03</b> | <b>2,1%</b>  | 9,80E+02                | 0,0%          | 9,80E+02        | 0,0%         |
| $E$ (N/m <sup>2</sup> )                    | 8,00E+10                   | 1,2E+11  | 8,00E+10    | 8,00E+10        | 0,0%          | 8,00E+10        | 0,0%         | 8,00E+10                | 0,0%          | 8,00E+10        | 0,0%         |
| $D$ (m)                                    | 3,95E-01                   | 4,16E-01 | 4,00E-01    | <b>4,16E-01</b> | <b>4,0%</b>   | <b>4,16E-01</b> | <b>4,0%</b>  | <b>3,95E-01</b>         | <b>-1,2%</b>  | <b>3,95E-01</b> | <b>-1,3%</b> |
| $e$ (m)                                    | 5,95E-03                   | 6,30E-03 | 6,00E-03    | <b>5,95E-03</b> | <b>-0,8%</b>  | <b>5,95E-03</b> | <b>-0,8%</b> | 6,00E-03                | 0,0%          | <b>6,30E-03</b> | <b>5,0%</b>  |
| $\psi$ (adim.)                             | 8,50E-01                   | 1,00E+00 | 8,50E-01    | 8,50E-01        | 0,0%          | <b>1,00E+00</b> | <b>17,6%</b> | 8,50E-01                | 0,0%          | 8,50E-01        | 0,0%         |
| $P_{max}$<br>(N/m <sup>2</sup> )           | 6,00E+01                   | 9,00E+01 | 8,00E+01    |                 |               | <b>9,0E+01</b>  | <b>12,5%</b> |                         |               |                 |              |
| $P_{mint}$<br>(N/m <sup>2</sup> )          | 2,50E+01                   | 3,00E+01 | 3,00E+01    |                 |               | 3,00E+01        | 0,0%         |                         |               |                 |              |
| $P_t$ (N/m <sup>2</sup> )                  | 3,00E+06                   | 9,00E+06 | 6,00E+06    |                 |               |                 |              | <b>6,56E+06</b>         | <b>9,3%</b>   | 6,00E+06        | 0,0%         |
| Dados da rede                              |                            |          |             |                 |               |                 |              |                         |               |                 |              |
| Extensão<br>(m)                            | 1873,00                    | 1873     | 1873,00     | 1873,00         | 0,0%          | 1873,00         | 0,0%         | 1873,00                 | 0,0%          | 1873,00         | 0,0%         |
| Volume<br>total (m <sup>3</sup> )          | 229,52                     | 254,57   | 235,37      | 229,95          | -2,3%         | 235,37          | 0,0%         | <b>254,57</b>           | <b>8,2%</b>   | 235,37          | 0,0%         |
| Volume<br>gás (m <sup>3</sup> )            | 0,02                       | 2,55     | 1,18        | <b>0,17</b>     | <b>-85,4%</b> | <b>2,35</b>     | <b>100%</b>  | <b>0,07</b>             | <b>-94,1%</b> | <b>0,06</b>     | <b>-95%</b>  |
| Volume<br>líquido<br>(m <sup>3</sup> )     | 229,50                     | 252,03   | 234,19      | 229,75          | -1,9%         | 234,19          | -0,5%        | <b>252,03</b>           | <b>7,6%</b>   | 235,31          | 0,5%         |
| (%) gás<br>adotado                         | 0,01                       | 1        | <b>0,50</b> | <b>0,084</b>    | <b>-83,2%</b> | <b>1,00</b>     | <b>100%</b>  | <b>0,025</b>            | <b>-95%</b>   | <b>0,030</b>    | <b>-95%</b>  |
| (%) total<br>de líquido                    | 99,99                      | 99,00    | 99,50       | 99,92           | 0,4%          | 99,00           | -0,5%        | 99,97                   | 0,5%          | 99,97           | 0,5%         |
| $\rho_{ar}$<br>(kg/m <sup>3</sup> )        | 1,20                       | 1,25     | 1,23        | 1,23            | 0,0%          | 1,23            | 0,0%         | 1,23                    | 0,0%          | 1,23            | 0,0%         |
| $\rho_{mistura}$<br>(kg/m <sup>3</sup> )   | 926,35                     | 1.023,86 | 975,11      | 975,11          | 0,0%          | 971,01          | -0,4%        | 970,20                  | -0,5%         | 979,75          | 0,5%         |

R\* = Resultado da otimização do Solver®; Var\*\* = Variação em (%)

A figura 7 mostra a variação da celeridade em função do percentual de gás presente na mistura, que resulta de cada uma das formulações empregadas e o resultado particular objetivado para a instalação.

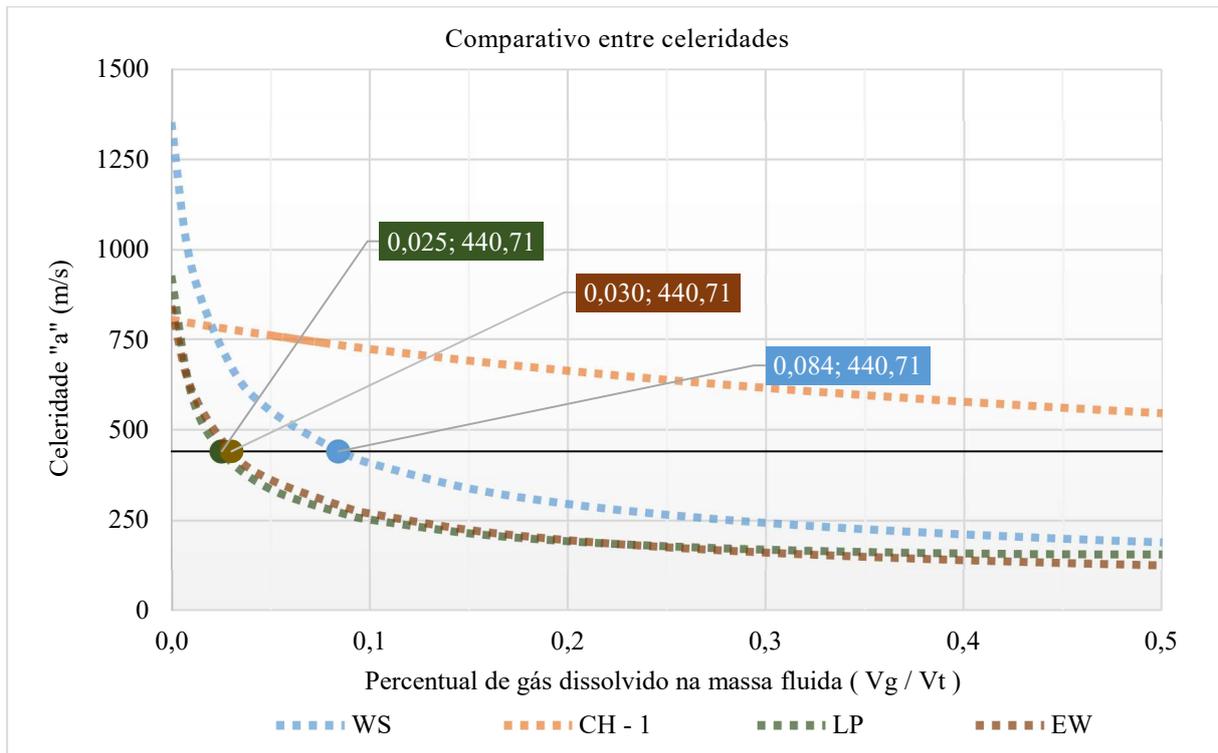


Figura 7 – Influência da variação do volume de gás dissolvido em relação a celeridade para as equações estudadas.

## DISCUSSÃO

Considerando as quatro formulações analisadas é possível observar que cada uma considera distintas formas de equacionar a celeridade para misturas líquido e gás. Apenas a equação  $a_{CH}$  considerou as pressões atuantes durante o evento transitório,  $P_{maxt}$  e  $P_{mint}$  na sua formulação enquanto as equações  $a_{EW}$  e  $a_{LP}$  consideraram a pressão em regime permanente,  $P_t$ . Para que as estimativas iniciais dos valores das celeridades fossem coerentes adotou-se no estudo os mesmos valores das componentes e, assim, os valores iniciais foram discrepantes entre si. A maior diferença percentual negativa foi para  $a_{WS}$  que foi de -75% e que possuía o maior número de variáveis na composição da equação, oito variáveis. A maior diferença percentual positiva foi para  $a_{CH}$  que foi de 38%. A menor diferença, em módulo, entre o valor estimado inicial e o valor da celeridade da instalação foi encontrado em  $a_{CH}$  um valor absoluto 167,22 m/s.

Na análise das variáveis presentes em cada equação, sem considerar o percentual de gás na mistura, observou-se que as equações que tinham mais variáveis eram  $a_{CH}$  e  $a_{EW}$ , com oito variáveis cada e  $a_{WS}$  e  $a_{LP}$  com sete cada. Na análise de variação percentual dessas componentes observou-se que  $a_{CH}$  teve cinco das variáveis alteradas da estimativa inicial e sendo umas delas, o coeficiente de vinculação  $\psi$ , o maior valor percentual alterado, cerca de 17,6%. Já a equação  $a_{LP}$  teve apenas duas variáveis modificadas da estimativa inicial, a variável de espessura da parede  $e$  e o diâmetro da tubulação  $D$  com cerca de 5,0% e -1,3% respectivamente, aparentando ser a equação mais estável.

Um fato que vale destaque é que todas as equações tiveram a adequação da variável diâmetro  $D$  e três das equações tiveram as espessuras de parede  $e$  também que ser adequados. A variável que teve o maior percentual de modificação foi o módulo de elasticidade volumétrica do gás ( $K_{gas}$ ) com 18,2% de alteração, indicando a influência do gás dissolvido na equação  $a_{EW}$ .

Para a análise apenas do percentual de gás observa-se que, de forma inversamente proporcional aos valores iniciais da celeridade, a equação  $a_{CH}$  foi a de maior alteração percentual, cerca de 100% de aumento do volume inicial de

gás presente na mistura e sendo esta equação a que mais aproximou seu valor inicial da celeridade da instalação em módulo. Na análise de qual equação teve seu valor de gás presente na mistura reduzido temos a equação  $a_{WS}$ , com cerca de 83,2% de redução em relação ao valor inicial estimado e é a única equação que em sua formulação não considera nenhum tipo de pressão, seja permanente ou transiente.

## CONCLUSÕES

Pela verificação gráfica, conforme a figura 7, foi possível observar que as equações  $a_{WS}$ ,  $a_{EW}$  e  $a_{LP}$  foram as que mais se assemelharam com o “gráfico referência”. A equação  $a_{CH}$  com cerca de 1,0% de volume de gás ficou distante em termos de comportamento. Dentre as que mais se assemelharam, as que possuem trajetórias praticamente idênticas variando o percentual de volume de gás na mistura ( $V_{gas}$ ), temos as equações  $a_{EW}$  e  $a_{LP}$ . Assim a primeira conclusão é de que das equações analisadas as que mais representam o comportamento da instalação de recalque do presente estudo são as propostas por EWING (1980),  $a_{EW}$  e LEE e PEJOVIC (1996)  $a_{LP}$  e, sendo assim, qualquer uma das duas equações poderia ser aplicada para o estudo do fenômeno do transitório hidráulico em uma elevatória de esgotos que possuísse as características semelhantes com as da elevatória Jardim Jacira.

Por fim pode-se observar que, uma vez estabelecido que as equações  $a_{EW}$  e  $a_{LP}$  são as que representam melhor a elevatória em estudo, o teor de gás obtido pelo processo de otimização usado representa a realidade do sistema. Assim é possível estabelecer que o percentual de gás dissolvido na mistura de esgotos sanitários na bacia da elevatória Jardim Jacira está em torno de 0,028%, valor esse que pode ser usado como parâmetro para outros estudos do fenômeno para sistemas de características semelhantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABREU, J. M.; GUARCA, R.; IZQUIERDO, J. Transitórios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión. 1º Ed. Universidade Politécnica de Valencia, Espanha, 1995.
2. ALLIEVI, L. Teoria generale del moto perturbato dell' acqua nei tubi in pressione. Estratto dagli Atti, Associazione eletrotécnica Italiana. Roma, Itália, 1903.
3. BOULOS, P. F.; KARNEY, B.W.; WOOD, D. J.; LINGIREDDY, S. Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. Journal American Water Works Association, v. 97, n.5, p. 111-124, 2005.
4. BURROWS, R.; QIU, D. Q. Effect of air pockets on pipeline surge pressure. Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy, p. 349-361, 1995.
5. CHAUDHRY, M. H. Applied hydraulic transients, 1º Edition, Van Nostrand Reinhold, New York. 1979.
6. ELBASHIR, M. A. M.; AMOAH, S. O. K. Hydraulic transient in a pipeline using computer model to calculate and simulate transient. Master Thesis, Department of Building and Environmental Technology, Lund University, Sweden, 2007.
7. EWING, D. J. F. Allowing for free air in water hammer Analysis. Proc., 3rd Int. Conf. On Pressure Surges, BHRA, Canterbury, U.K., pp. 127- 146, 1980.
8. GHIDAOU, M. S.; ZHAO, M.; MCLNNIS, D. A.; AXWORTHY, D. H. A Review of Water Hammer Theory and Practice. Journal Applied Mechanics Reviews, V. 58, p. 49-76, 2005.

9. KÖKSOY, O.; YALCINOZ, T. Mean square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, v. 175, n. 2, p. 1657-1674, 2006.
10. LEE, T. S.; PEJOVIC, S. Air Influence on Similarity of Hydraulic Transients and Vibrations. *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.118, No.4, December 1996, pp. 706-709.
11. LUBBERS, C. L.; CLEMENS, F. Air and gas pockets in sewerage pressure mains. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Section of Sanitary Engineering, Holland, 2005.
12. LÜDECKE, H. J.; KOTHE, B. KSB Know-how Water Hammer, Volume 1, KSB, 2006.
13. MALEKPOUR, A.; PAPA, F.; RADULJ, D.; KARNEY, B. Understanding hydraulic transients in sewer systems. WEAO Technical Conference, Toronto, Ontario, p. 1-15, 2015.
- MOTULSKY, H. J.; RANSNAS, L. A. Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and nonmathematical review. Department of Pharmacology, University of California, USA, 1987.
14. PARMAKIAN, J. Waterhammer analysis. Dover Publication, Denver, 1955.
15. POTHOF, I. W. M.; TUKKER, M.; KOOJI, K.; CLEMENS, F. Guidelines for capacity reducing gas pockets in wastewater mains. Technische Universiteit Delft, Holland, 2011.
16. THORLEY, A. R. D. Fluid Transients in Pipeline Systems - A Guide to the Control and Suppression of Fluid Transients in Liquids in Closed Conduits, ASME Press, Second Edition, New York, 2004.
17. WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. Fluid Transients. McGraw-Hill, USA, 1978.