

# SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSIO EM ADUTORAS DURANTE EVENTOS TRANSIENTES UTILIZANDO O MODELO TPA<sub>cav</sub>

*Davi Tadeu Borges Marwell<sup>1</sup> & José Goes Vasconcelos<sup>2</sup>*

**RESUMO** - escoamentos em adutoras podem ocorrer em condições diversas daquelas preconizadas em projeto. Os eventos que resultam em tais condições incluem transitórios hidráulicos, a ocorrência de transição entre regimes de escoamento e a ocorrência de escoamentos bifásicos como consequência da queda de pressão nos condutos. Em se promovendo a análise transiente de escoamentos em adutoras, a avaliação conjunta desses efeitos pode ser de fundamental relevância para a precisão da simulação. Até o presente, modelos transientes que incorporavam os efeitos de transição de regimes de escoamento (TRE) não incorporavam apropriadamente efeitos decorrentes de quedas significativas de pressão. Este artigo apresenta um novo modelo para escoamentos transientes que incluem a capacidade de lidar simultaneamente com a ocorrência de TRE e com os efeitos da cavitação localizada e distribuída em adutoras. Um exemplo de aplicação é apresentado, e os resultados do modelo proposto são comparados com o tradicional modelo GCAV, apresentado em Wylie e Streeter (1993) para simulação de escoamentos pressurizados onde pode ocorrer tais eventos de cavitação. Os resultados da comparação entre modelos indicam boa concordância, e futuros desenvolvimentos do modelo proposto podem representar uma nova alternativa para a análise por períodos estendidos do escoamento em adutoras.

**ABSTRACT** – Flow in water mains may occur in conditions that differ from the predicted ones during the design. Events that result in such conditions includes hydraulic transients, flow regime transition occurrence and two-phase flows that result from pressure drop within the conduits. When performing transient analysis of water main flows, a combined evaluation of such events may of fundamental relevance for the accuracy of the simulation. To date, transient models able to handle flow regime transition (FRT) were not able to incorporate properly effects resulting from significant pressure drops. This paper presents a new model for transient flows that includes the ability to handle simultaneously FRT occurrence and the effects of local and distributed cavitation in water mains. An application example is presented, and the simulation results are compared with results from the traditional model GCAV, presented by Wylie and Streeter (1993) for the pressurized flow simulations where cavitation may occur. Good agreement is obtained from the comparison of model results, and future developments of the proposed model may represent a new alternative for extended period analysis of water main flows.

**Palavras-Chave:** Modelos Numéricos, Cavitação em Adutoras, Simulação Transiente

---

<sup>1</sup> Aluno do mestrado do Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos PTARH/ENC/FT – UnB, [davimarwell@gmail.com](mailto:davimarwell@gmail.com)

<sup>2</sup> Professor Adjunto da Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Faculdade de Tecnologia – Prédio SG 12 – Térreo. Campus Universitário – Asa Norte. 70910-900, Brasília, DF. +55(61)8449-9884. Fax: +55(61)3307-3785. Email [jvasconcelos@unb.br](mailto:jvasconcelos@unb.br)

## 1 INTRODUÇÃO

Como é sabido, o escoamento no interior de adutoras é projetado para ser pressurizado e homogêneo. Entretanto, em determinados casos onde condições preconizadas em projeto não sejam observadas, o escoamento pode se tornar livre ou até mesmo bifásico. Uma mudança no regime de escoamento pressurizado para o regime livre é conhecida como transição de regime de escoamento (TRE). A evolução dos modelos computacionais permite que esses efeitos possam ser incorporados na análise de eventos transientes. Dessa forma, torna-se possível incorporar mais física nas análises transientes o que auxilia a compreensão desses fenômenos complexos em adutoras.

De acordo com Vasconcelos e Marwell (2008) as vazões transportadas ao longo do dia variam de acordo com a produção e a demanda dos sistemas de abastecimento de água. Em certos casos, essas variações ocorrem de forma rápida gerando transientes hidráulicos, ou golpes de aríete. Os transientes hidráulicos podem ser causados por manobras de válvulas, durante o acionamento e a interrupção do funcionamento de bombas, por falhas operacionais ou no processo de enchimento de adutoras. Dependendo do evento transiente, o escoamento pode ser tornar bifásico homogêneo ou estratificado. Um exemplo de escoamento bifásico homogêneo é um escoamento pressurizado que contenha menos de 1% de ar livre no interior do conduto. Por outro lado, um escoamento bifásico estratificado pode ser observado durante eventos de transição de regime de escoamento (Estrada, 2007) ou devido à formação de um bolsão de vapor de água durante o processo de cavitação.

A rigor, a maioria dos escoamentos que ocorrem em adutoras são bifásicos porque a água não é um fluido puro e frequentemente os sistemas de abastecimento admitem a entrada de ar em adutoras por diversos mecanismos. Na prática, os escoamentos são considerados bifásicos em adutoras quando coexiste o escoamento de dois fluidos diferentes no interior do conduto, por exemplo, num escoamento que ocorre no interior de uma adutora com ar livre ou com ar dissolvido na água. De acordo com Little *et al.*(2008), a presença de bolsões de ar em condutos restringe a área da seção transversal e pequenas quantidade de ar podem reduzir a rugosidade dos condutos. Segundo esses autores, os bolsões tendem a acumular-se nos pontos mais altos e próximos de transições declividades acentuadas. Outro tipo de escoamento bifásico ocorre durante o escoamento de um mesmo fluido em fases diferentes, como no caso da cavitação distribuída.

Embora as condições de escoamento em adutoras sejam diversas, a maioria dos modelos hidráulicos desconsidera o escoamento bifásico e os feitos do ar na análise transiente. Como resultado, atualmente não existe um modelo transiente capaz lidar com a gama de condições transientes e bifásicas que podem ocorrer na prática dentro de adutoras. Em adição a isso, diversas

condições operacionais podem culminar em situações onde adutoras operam em regime livre e pressurizado ao mesmo tempo, em locais distintos (Estrada, 2007). Tal situação, denominada transição entre regimes de escoamento, também foi estudada em modelagem computacional apresentada por Vasconcelos e Marwell (2008). Portanto, a falta de habilidade dos modelos existentes para avaliar todas essas condições abre espaço para criação de novos modelos.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar um novo modelo de simulação de escoamentos transientes em adutoras. O modelo proposto, baseado na metodologia TPA (Vasconcelos *et al.* 2006), denominado TPAcav, deve ser capaz simular escoamentos em adutoras em diferentes condições operacionais, incluindo as condições anormais de operação onde a transição de regime de escoamentos pode ocorrer concomitantemente com situações onde há quedas significativas de pressão. Nessas condições, o modelo proposto deve ser capaz de simular:

- A cavitação localizada que ocorreria nos extremos da adutora resultante de manobras de válvulas que resultassem em quedas significativas de pressão;
- A influência da variação da quantidade de ar livre na celeridade da onda acústica, emulando os efeitos da cavitação distribuída na adutora.

Esse modelo parte da abordagem de cálculo de transição de regimes de escoamento utilizada pela metodologia TPA (Vasconcelos *et al.* 2006). O modelo proposto é testado para um caso hipotético, onde se avalia o efeito de parâmetros que controlam o problema.

## 3 REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se inicialmente duas estratégias para solução de escoamento em condições sub-atmosféricas em adutoras. Essas estratégias apresentadas são os modelos GCAV (*Discrete Free-Gas Cavity*) e o modelo *Drift Flux*, ambos discutidos com detalhes em Wallis (1969) e Wylie e Streeter (1993). Em seguida, apresenta-se a evolução e o estado da arte dos modelos capazes de incorporar a transição de regime de escoamento (TRE) no escoamento em condutos fechados.

### 3.1 Estratégias para solução de escoamentos sub-atmosféricos.

#### 3.1.1 Modelo *Drift Flux*

De acordo com Wallis (1969), o modelo *Drift Flux* é capaz de lidar com a separação de fase e o seu objetivo principal esta na determinação do movimento relativo entre as fases do

escoamento. Esse modelo é extremamente útil quando o movimento relativo das fases é determinado por poucos parâmetros e quando este independe da taxa de escoamento de cada fluido. A teoria proposta por esse modelo vem sendo bastante utilizada em regimes de escoamento contendo bolhas e bolsões de ar, bem como escoamentos que misturam partículas com líquidos, como é o caso da areia movediça. Por meio dele, construiu-se uma extensa teoria onde aspectos como densidade e variações de velocidade se tornassem relevantes na análise de escoamentos bi e tridimensionais. Os autores indicam que a abordagem é muito utilizada em outras aplicações, particularmente na solução de problemas de drenagem contendo sedimentos e espuma.

### 3.1.2 Modelo GCAV (Discrete Free-Gas Cavity)

O modelo GCAV é uma variação do modelo de solução clássica do MOC apresentado por Wylie e Streeter (1993). Esse modelo considera que os bolsões de gás são acumulados nos pontos computacionais e faz com que o aumento ou a redução do volume desses bolsões de ar dependa da variação das pressões nesse local. O modelo considera que entre as células computacionais não haja presença de gás livre. Entretanto, assume que nos nós de cálculo exista uma certa quantidade de gás, de forma que, a celeridade da onda acústica desse modelo se aproxime dos valores obtidos com uma mistura homogênea de ar e água. Esse modelo pode ser representado esquematicamente na Figura 1.

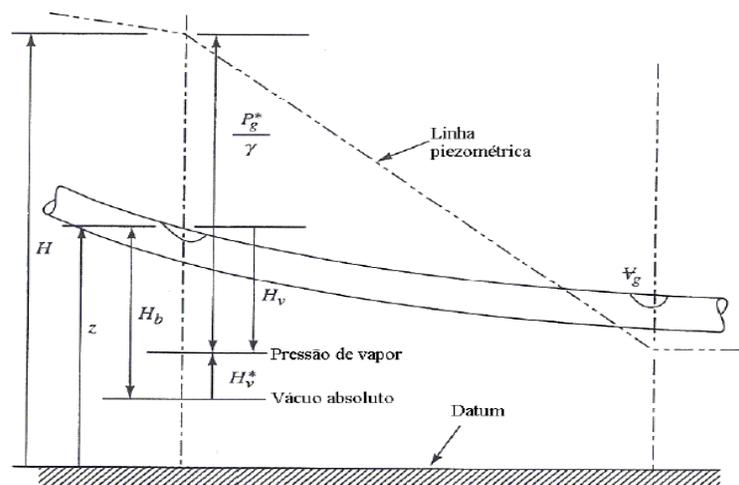


Figura 1 – Esquema do modelo GCAV. Adaptado de Wylie e Streeter (1993).

O *grid* esquemático relativo ao modelo GCAV é representado na Figura 2. Esse modelo permite que o bolsão de ar seja calculado a partir da variação de pressão no nó. O volume do bolsão de gás depende também da quantidade de ar considerado no início da análise, da densidade do líquido, da pressão atmosférica e da aceleração da gravidade.

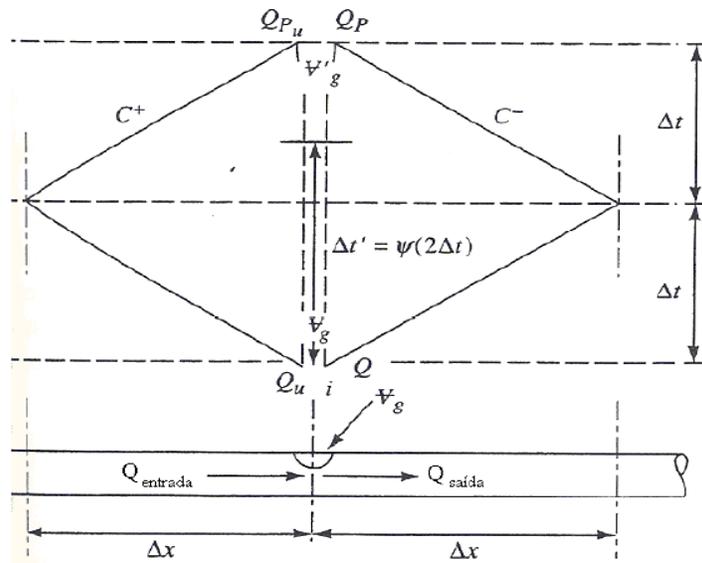


Figura 2 – Grid do MOC-GCAV para simulação de escoamentos transientes considerando o ar livre. Adaptado de Wylie e Streeter (1993).

No modelo GCAV o valor da pressão no nó de interesse é calculado por meio da equação 1. A partir disso, resolvem-se as equações características para a determinação vazões de chegada e saída no nó. Por fim, o modelo utiliza a equação 2 para determinar a evolução do tamanho dos bolsões de ar, conforme apresentado em Wylie e Streeter (1993).

$$p_g^* = \rho_l g (H - z - H_v) \quad (1)$$

$$V_g' = V_g + 2\Delta t [\varphi(Q_p - Q_{Pu}) + (1 - \varphi)(Q - Q_u)] \quad (2)$$

Em que  $p_g^*$  corresponde a pressão de referência,  $\rho_l$  a densidade do líquido,  $g$  a aceleração da gravidade,  $z$  distância do eixo do conduto até o datum de referência,  $H_v$  a pressão de vapor do líquido,  $V_g'$  o volume de gás no passo de tempo  $2\Delta t$ ,  $V_g$  volume de gás no passo de tempo  $\Delta t$ ,  $\Delta t$  intervalo de tempo,  $\varphi$  fator que varia entre 0,5 e 1,  $Q_p$  a vazão de saída no passo de tempo  $2\Delta t$ ,  $Q_{Pu}$  a vazão de entrada no passo de tempo  $2\Delta t$ ,  $Q$  a vazão de saída no passo de tempo  $\Delta t$ ,  $Q_u$  a vazão de entrada no passo de tempo  $\Delta t$ .

### 3.2 Estado da arte em modelos de Transição de Regimes de Escoamento

#### 3.2.1 Modelos Full Dynamic

Os modelos *Full Dynamic* são utilizados para modelagem da transição de regimes de escoamento. Esses monitoram a interface do escoamento em cada passo de tempo. Por isso, esses modelos também são chamados de modelos de *interface tracking*. Como exemplo, tem-se o modelo

proposto por Song *et al.* (1983), (modelo SCL). Esse modelo utiliza o método das características para a resolução do regime livre e do regime pressurizado. Outro modelo do tipo *Full Dynamic* mais recente é o proposto por Politano *et al.* (2007)

O modelo SCL simula o escoamento livre e o escoamento pressurizado de forma separada, entretanto a união destes é dada pela posição da onda de choque (*shock fitting*, Cunge *et al.* 1981). Deste modo, o modelo de Song *et al.* (1983) monitora a velocidade, a intensidade e a posição da onda a cada passo computacional. O modelo é construído a partir das equações de continuidade e momento aplicado a um sistema unidimensional. Essas equações são derivadas a partir das variáveis primitivas. Como esse modelo utiliza o método das características ele apresenta a limitação de que todos os passos computacionais devem obedecer à condição de estabilidade de Courant. Isso requer que a velocidade máxima de uma linha característica existente no domínio de solução seja maior ou igual que a velocidade física de propagação das ondas no problema real.

O modelo proposto por Politano *et al.* (2007) propõem um melhoramento no modelo SCL. Esse modelo, assim como o modelo SCL, também monitora a posição da onda de choque em cada passo de tempo. A principal contribuição desse modelo está no fato dele ser capaz de modelar o processo de pressurização provocado por uma transição de regime de escoamento gradual. O modelo inclui um novo tratamento no comportamento da interface do ar com a água quando a vazão de entrada não apresenta energia suficiente para provocar um ressalto que preencha a seção transversal do tubo.

Segundo Politano *et al.* (2007), a principal falha no modelo SCL é que este modelo precisa manter um ressalto que preencha a tubulação por completo mesmo que a pressurização seja produzida por uma transição de regime de escoamento gradual. Além disso, outra desvantagem desse método é que ele requer interpolações nos cálculos na região da interface de escoamento. Isso se deve ao fato da utilização do método das características em ambos os escoamentos. Nessas interpolações aparecem erros significativos devido a não conservação da massa, principalmente se o *grid* de cálculo for muito esparsos. Para superar esses erros é necessária a utilização de uma malha muito refinada, o que demanda um grande esforço computacional.

Nos casos onde há uma mudança gradual da velocidade, a aceleração do escoamento entre duas células adjacentes pode ser desprezada, por exemplo, no caso de uma pressurização provocada pelo regime subcrítico após a formação de um ressalto hidráulico. Nesse caso, o escoamento nas proximidades da interface pode ser simulado utilizando o balanço de massa e momento em um volume de controle que engloba a interface de escoamento conforme apresentado por Politano *et al.* (2007).

### 3.2.2 Modelos de escoamento baseados nas equações de Saint-Venant

Esses modelos utilizam adaptações estruturais no escoamento pressurizado para que seja possível a utilização das equações de Saint-Venant tanto para o regime livre quanto para o regime pressurizado. Dessa forma, esses modelos são capazes de descrever a transição de regime de escoamento com apenas um tipo de equação. Alguns exemplos de modelos que utilizam esse conceito são modelo proposto por Trajkovic *et al.* (1999) e o modelo TPA (*Two-component Pressure Approach*).

O modelo utilizado por Trajkovic *et al.* (1999) é um modelo de captura de interface que utiliza o conceito da fenda de Preissmann (Cunge e Wegner 1964). Esse modelo simula com precisão a transição de regime de escoamento, mas não é capaz de simular escoamentos que ocorrem em pressões sub-atmosféricas. Além disso, esse modelo não lida com a formação de bolsões de ar e nem com o efeito da separação de coluna.

O modelo TPA, proposto por Vasconcelos *et al.* (2006), lida tanto com o escoamento pressurizado quanto com o escoamento livre. Esse modelo resolve as equações de forma explícita utilizando o método dos volumes finitos na modelagem da captura de ondas de choque. O objetivo desse método é descrever a transição do regime de escoamento utilizando as equações de Saint-Venant para os dois tipos de escoamento. Isso é possível a partir da incorporação da elasticidade das paredes do conduto e considerando que a água é um fluido incompressível.

Uma das vantagens do modelo TPA com relação aos modelos *Full Dynamic* é que esse é capaz de simular com mínima difusão numérica, ressaltos hidráulicos que não são capazes de preencher completamente a seção transversal do tubo. Para isso, deve-se adotar um esquema numérico não-linear de solução dos fluxos nas interfaces das células de cálculo. Outra vantagem desse modelo é que ele é capaz de lidar com pressões sub-atmosféricas desde que essas pressões não assumam valores inferiores à pressão de vapor da água.

O modelo TPA utiliza as equações de Saint-Venant na forma conservativa e escritas de forma vetorial como observado nas equações 3 e 4. Entretanto, o modelo TPA acrescenta a variável  $h_s$  na equação de momento, que representa o acréscimo de pressão provocado pela pressurização do escoamento e sua expressão matemática é apresentada na equação 5. Já o termo  $h_c$  representa a pressão advinda do peso da água que ocupa uma dada seção. Deste modo, estas variáveis permitem que a componente de pressão possa ser separada na equação de momento. Vasconcelos *et al.* (2006) demonstraram a identidade das equações de Saint-Venant com as equações do regime pressurizado transiente usando como hipóteses a tubulação com certa elasticidade e fluido incompressível. O modelo TPA pode ser expresso por meio das equações 3, 4 e 5.

$$\vec{U}_t + \vec{F}_x(\vec{U}) = \vec{S}(\vec{U}) \quad (3)$$

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix}, \quad \vec{F}(\vec{U}) = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gA(h_c + h_s) \end{bmatrix}, \quad \vec{S}(\vec{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$h_s = \frac{a^2}{g} \frac{\Delta A}{A_{pipe}} \quad (5)$$

Em que:  $\vec{U}=(A, Q)^T$  é o vetor das variáveis conservadas, sendo que  $A$  é a área da seção do escoamento,  $Q$  é a vazão do canal,  $\vec{F}(\vec{U})$  são os vetores de fluxo das variáveis,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $h_c$  é a profundidade do centróide da seção transversal do escoamento,  $a$  é a celeridade da onda acústica,  $h_s$  é a carga de pressurização no conduto,  $A_{pipe}$  é a área da seção transversal do conduto,  $\vec{S}(\vec{U})$  são os vetores dos termos fonte,  $S_0$  é a declividade do fundo do canal,  $S_f$  é a declividade da linha de energia.

O modelo TPA foi comparado com outros modelos de *interface tracking* como o modelo proposto por Song *et al.* (1983) no estudo da transição de regime de escoamento. De acordo com Vasconcelos e Wright (2007), o modelo TPA apresentou bons resultados nesta comparação bem como quando confrontado com resultados de um modelo baseado no método das características (MOC) na simulação de transientes provocados por fechamentos de válvulas em condutos fechados.

O modelo TPA foi usado também no trabalho de Vasconcelos e Marwell (2008), e nesse trabalho foi mostrado que o mesmo é mais preciso na simulação de adutoras que contenham trechos terminais como elevada declividade quando comparado com modelos baseados no MOC. Num estudo de caso, os autores mostraram que os modelos baseados no MOC indicam a formação de um grande bolsão de água vaporizada (cavitação) nesse trecho terminal. Para o mesmo caso, o modelo TPA indica a ocorrência de transição de regime de escoamento e que o trecho terminal da adutora escoar em regime livre. Isso indica uma limitação na aplicação de modelos baseados no MOC para certos casos, o que pode implicar em resultados inconsistentes.

Apesar da versatilidade dos métodos baseados na equação de Saint-Venant, eles ainda apresentam a limitação de não serem capazes de lidar com os efeitos da redução significativa de pressão no escoamento, tal como o efeito da separação da coluna d'água e com a variação do volume dos bolsões de ar livre. Além disso, eles também não são capazes de incorporar os efeitos da cavitação distribuída e da liberação de ar em solução.

## 4 METODOLOGIA

O modelo proposto, TPAcav, leva em consideração o material e a espessura do conduto, a quantidade de ar livre no interior do conduto e o tipo de fluido utilizado para determinação da celeridade da onda acústica na condição padrão da análise. Essa celeridade é calculada por meio da equação 6. Durante os eventos transientes, o modelo permite que haja uma variação da celeridade da onda acústica nas células de cálculo dependendo da variação da pressão local de cada célula. O modelo permite que o volume de ar no interior da célula aumente ou diminua dependendo da pressão. Dessa forma a celeridade da onda acústica pode ser alterada modificando assim a magnitude dos efeitos transientes.

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K_{liq}}{\rho}}{1 + \frac{K_{liq}D}{Ee} + (\forall_{gas}) \left[ \left( \frac{K_{liq}}{\rho} \right) - 1 \right]}} \quad (6)$$

Em que  $a$  representa a celeridade da onda acústica da água,  $K_{liq}$  corresponde ao módulo de compressibilidade da água,  $\rho$  a densidade da água,  $E$  o módulo de elasticidade do material do conduto,  $e$  a espessura do conduto e  $\forall_{gas}$  o volume de gás presente no interior do conduto.

O modelo TPAcav se diferencia do modelo TPA pois ele permite que a celeridade da onda acústica seja ajustada de acordo com a pressão e do volume de gás contido no interior de cada célula de cálculo. Além disso, o modelo TPAcav limita a queda de pressão ao valor da pressão de vapor da água e permite a formação de bolsões de vapor de água. Por outro lado, o modelo TPA considera que a celeridade da onda acústica é sempre constante, independente do histórico pressões do conduto. Como resultado, o modelo TPA permite que o termo  $h_s$  assumam valores inferiores até mesmo ao vácuo absoluto, o que é fisicamente impossível. Ressalta-se que, sem as devidas adaptações, modelos baseados no MOC também podem prever pressões abaixo daquelas do vácuo absoluto.

O modelo proposto está adaptado para lidar com os efeitos decorrentes da cavitação localizada, que ocorre em pontos do contorno e do domínio de solução, bem como efeitos da cavitação distribuída, que ocorrem ao longo das células internas. Considera-se cavitação localizada quando há a formação de bolsões de vapor de água nas condições de contorno devido a uma queda de pressão que atinja a pressão de vapor da água. No caso da cavitação distribuída podem ser formados bolsões de vapor de água nas células internas do conduto quando a pressão também atingir a pressão de vapor da água.

Para reproduzir o efeito da cavitação localizada, o modelo proposto permite o desenvolvimento e colapso de cavidades de vapor de água quando a pressão, na condição de contorno, atinge o valor da pressão de vapor da água. Essas cavidades variam de tamanho e atuam com uma mola amortecendo a propagação dos pulsos de pressão até o eventual colapso das mesmas, quando as pressões sobem abruptamente. A equação 7 é usada para calcular a variação do volume dos bolsões de vapor de água caso ocorra cavitação nesses locais:

$$\forall_{vap}[N] = \forall_{vap}[N] - (Q[N] + Q_{out})dt \quad (7)$$

Em que  $\forall_{vap}[N]$  representa o volume de vapor na condição de contorno de jusante,  $Q[N]$  a vazão de meio de célula da condição de contorno de jusante,  $Q_{out}$  a vazão de saída da adutora controlada pela válvula e  $dt$  a variação de tempo.

Já para reproduzir o efeito da cavitação distribuída, o modelo TPAcav utiliza a mesma formulação apresentada por Wylie e Streeter (1993) representada pela equação 8.

$$\forall_{gas}[i] = \frac{P_0 \alpha_0 \forall}{H[i] - z - H_v} \quad (8)$$

Em que  $\forall_{gas}[i]$  é o volume de gás na célula de cálculo,  $P_0$  a pressão de referência do local,  $\alpha_0$  a proporção de ar no interior da célula,  $\forall$  o volume total da célula,  $H[i]$  a pressão na célula,  $z$  a cota de referência e  $H_v$  a pressão de vapor da água.

O modelo TPAcav pode fazer uso do conceito do fluxo híbrido (Vasconcelos *et al.*, 2009) para mitigar oscilações numéricas na solução decorrentes das variações bruscas ao longo do espaço nos valores da celeridade da onda acústica calculados pela equação 6. Esse fluxo introduz difusão numérica na vizinhança de um local onde haja grandes diferenças na celeridade da onda acústica, atenuando as oscilações numéricas resultantes dessas variações e melhorando a estabilidade numérica nos cálculos. O parâmetro principal do fluxo híbrido FH pode variar entre 1,0 (sem difusão incluída) até 0,0, quando há difusão elevada e comparável ao esquema de Lax-Friedrichs (Toro, 2001). Nos casos em que fez-se uso desse fluxo, o número de Courant usado nas simulações foi bem próximo à unidade ( $Cr=0,95$ ) para que fosse evitada excessiva difusão das frentes de pressão na simulação.

## 5 APLICAÇÃO DO MODELO

O sistema considerado na análise, apresentado na Figura 3 foi uma adutora fictícia de PRFV(plástico reforçado de fibra de vidro), sem declividade, com 1000 metros de comprimento, 400 milímetros de diâmetro, fator de atrito de Darcy de 0,011. O reservatório de montante tinha 5 metros de carga, pressão atmosférica ao nível do mar, vazão inicial de 0,2368 m<sup>3</sup>/s, celeridade da

onda acústica de 500 m/s, pressão de vapor da água -10 m.c.a. (relativa), e discretização em 200 células computacionais.

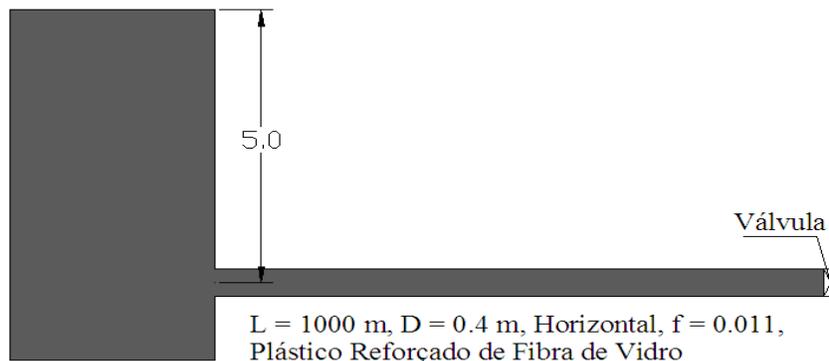


Figura 3 – Esquema do sistema adutor utilizado nas análises.

O transiente foi provocado por um fechamento instantâneo da válvula de jusante, e foi simulado durante 40 segundos pelos modelos TPAcav e MOC-GCAV. Optou-se pela utilização do modelo MOC-GCAV para comparação, pois esse modelo apresenta bons resultados quando comparado com resultados experimentais conforme apresentado em Wylie e Streeter (1993).

Foram simulados três casos considerando diferentes quantidades de ar livre no interior da adutora. No primeiro, caso considerou-se que em cada célula de cálculo continha inicialmente (antes do transiente) uma fração de ar livre na seção transversal de  $5 \cdot 10^{-3} \%$  (fração ocupada por ar livre  $\alpha = 5 \cdot 10^{-5}$ ). Para o segundo e terceiro casos estudados foram consideradas respectivamente as porcentagens de  $10^{-3} \%$  ( $\alpha = 10^{-5}$ ) e  $10^{-2} \%$  ( $\alpha = 10^{-4}$ ). É importante ressaltar que, para que fosse possível obter a mesma celeridade da onda acústica inicial mantendo o mesmo material e o diâmetro, foram necessárias pequenas alterações na espessura da parede dos materiais variando de 11,5 mm a 14,2 mm. O resultado dessa análise são as hidrógrafas de pressão e vazão na célula para 40 segundos de simulação. Essas análises foram realizadas com o Modelo TPAcav e os resultados dessa análise foram comparados ao Modelo MOC-GCAV, baseado na teoria apresentada por Wylie e Streeter (1993), usando os mesmos valores para as frações de ar livre na seção transversal.

As Figuras 4(a) e 4(b) indicam resultados de medição de pressão e vazão no ponto intermediário ( $x=500$  m) da adutora, respectivamente, para o caso de  $\alpha = 5 \cdot 10^{-5}$  e para valores do número de Courant de 0,95. A comparação dos resultados dos modelos MOC-GCAV e TPAcav indica que há boa concordância entre os modelos na descrição do comportamento geral do evento transiente. A hidrógrafa de pressão do modelo TPAcav simulou muito bem a cavitação e a região compreendida entre os dois picos de pressão. Da mesma forma, a hidrógrafa de vazão obtida pelo modelo TPAcav também mostrou-se bem compatível com a apresentada pelo modelo MOC-GCAV.

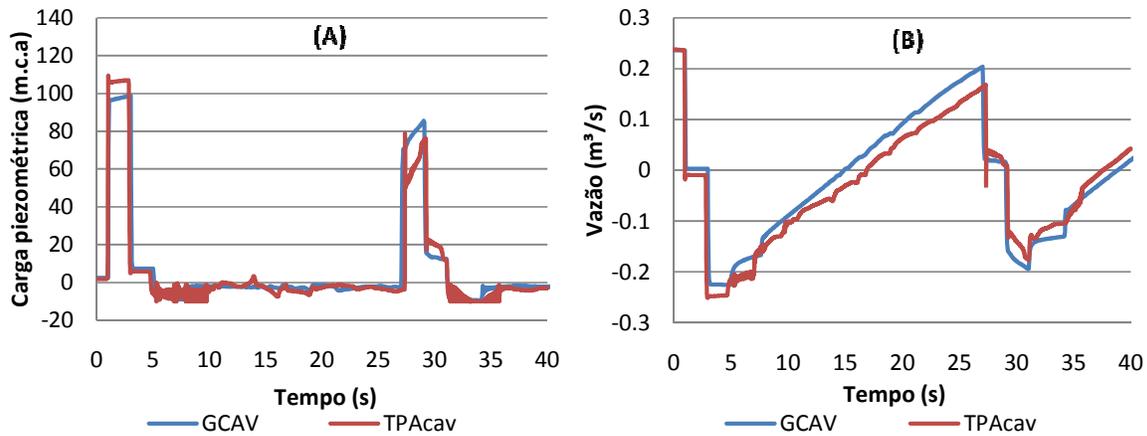


Figura 4: (a) Hidrógrafa de pressão considerando  $Cr = 0.95$ , parâmetro  $FH = 1$  e fração de ar  $\alpha = 5 \times 10^{-5}$  na célula  $x = 500$  m (b) Hidrógrafa de Vazão para as mesmas condições

Por outro lado, o modelo TPAcav superestimou o primeiro pico de pressão em aproximadamente 15 m.c.a. e subestimou o segundo pico em aproximadamente 12 m.c.a., conforme apresentado na Figura 4(a). Isso é explicável porque a celeridade da onda acústica, fundamental no cálculo da carga de pressurização  $h_s$ , aumenta quando da passagem de ondas de pressão elevadas, resultando por sua vez num incremento de  $h_s$ . Esses resultados são refletidos na hidrógrafa de vazão, muito embora haja boa concordância na vazão prevista pelos modelos durante a fase de subpressurização na adutora conforme apresentado na Figura 4(b).

Os resultados simulados para o segundo caso adotando-se um valor de  $\alpha = 10^{-5}$  em cada célula de cálculo foram menos precisos que no primeiro caso conforme observado na Figura 5(a) e 5(b). Observa-se que embora o primeiro pico de pressão simulado esteja mais aproximado entre os dois modelos, houve maior discrepância no instante da ocorrência do segundo pico de pressão, decorrente do colapso do bolsão na válvula de jusante.

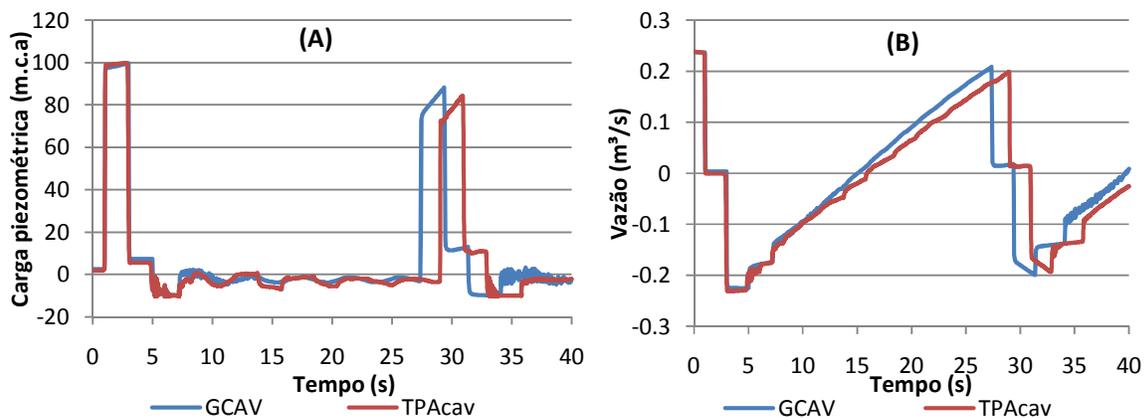


Figura 5: (a) Hidrógrafa de pressão considerando  $Cr = 0.95$ , parâmetro  $FH = 1$  e fração de ar  $\alpha = 10^{-5}$  na célula  $x = 500$  m (b) Hidrógrafa de Vazão para as mesmas condições

O terceiro valor adotado de  $\alpha=10^{-4}$  permitiu avaliar a capacidade do modelo para simular o problema com quantidades maiores de ar livre inicial, conforme apresentado nas figuras 6(a) e 6(b). Embora haja concordância entre os modelos nas feições principais do escoamento, o modelo TPAcav mostrou-se mais discrepante do modelo MOC-GCAV quando o escoamento dá-se em regime sub-atmosférico. O segundo pico de pressão ocorre 0,9 segundos depois do previsto pelo modelo MOC-GCAV e primeiro pico foi superestimado em cerca de 20 m.c.a.

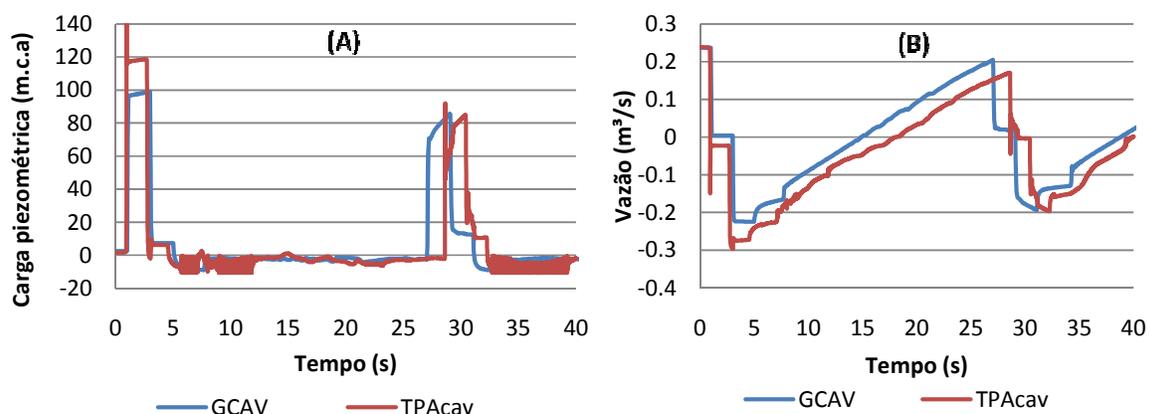


Figura 6: (a) Hidrógrafa de pressão considerando  $Cr=0.95$ ,  $FH=1$  e  $\alpha=10^{-4}$  em cada célula de cálculo (b) Hidrógrafa de Vazão considerando  $\alpha=10^{-4}$  em cada nó de cálculo,  $Cr=0.95$  e  $FH=1$ .

Como apresentado nas Figuras 9 e 10, a celeridade de propagação da onda acústica é variável no modelo TPAcav, e essa variação pode ser significativa. A variação súbita desse parâmetro pode causar problemas de estabilidade nos cálculos, e um remédio para isso é usar os valores dos parâmetros do fluxo híbrido menores do que 1, o que atenua a variação dessas celeridades. Como é mostrado nas Figuras 7 e 8, representando o caso em que  $\alpha=10^{-5}$ , percebe-se que valores mais baixos do parâmetro FH tende a melhorar a aproximação dos resultados entre os modelos.

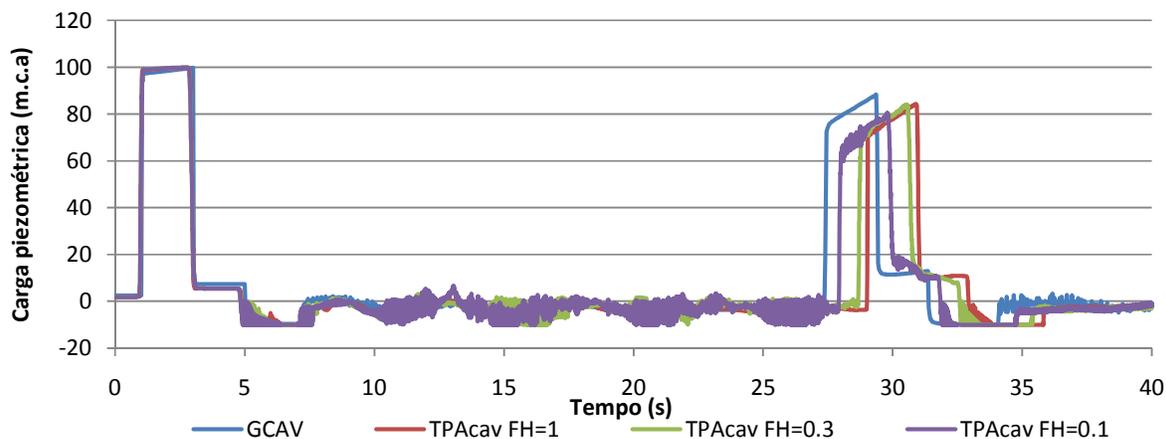


Figura 7: Hidrógrafa de pressão em  $x=500$  m considerando  $Cr = 0.95$ ,  $\alpha=10^{-5}$  e variando os valores do coeficiente de fluxo híbrido FH entre 0,1, 0,3 e 1,0

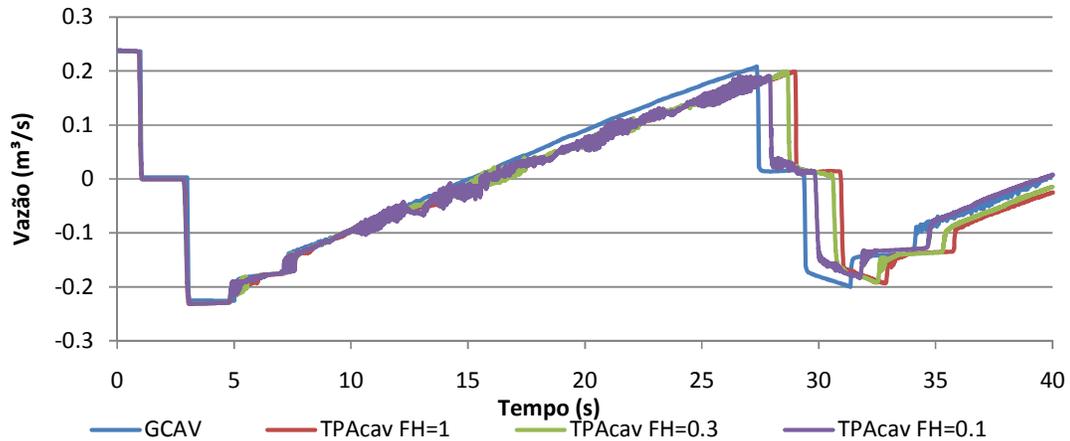


Figura 8: Hidrógrafa de vazão em  $x=500$  m considerando  $Cr = 0.95$ ,  $\alpha=10^{-5}$  e variando os valores dos coeficientes de fluxo híbrido FH entre 0,1, 0,3 e 1,0

Considerando a variação da celeridade da onda acústica, analisou-se o comportamento da mesma com a variação do fluxo híbrido durante o evento transiente. Os valores máximos e mínimos observados para a celeridade em todas as células e durante a simulação (para o caso onde  $\alpha=10^{-5}$ ) são apresentados na Figura 9. Os valores mínimos da celeridade, da ordem de 330 m/s, são observados quando da ocorrência das pressões mínimas, correspondentes à pressão de vapor da água. Os valores máximos, levemente acima de 500 m/s, são observados quando da propagação de ondas de pressão elevadas quando do fechamento da válvula ou quando do colapso de bolsões de cavitação. É possível perceber que os diferentes valores do parâmetro do fluxo híbrido não afetaram a faixa de variação da celeridade da onda acústica, muito embora essa variação ocorra de forma mais gradual quando o valor de FH é menor que um.

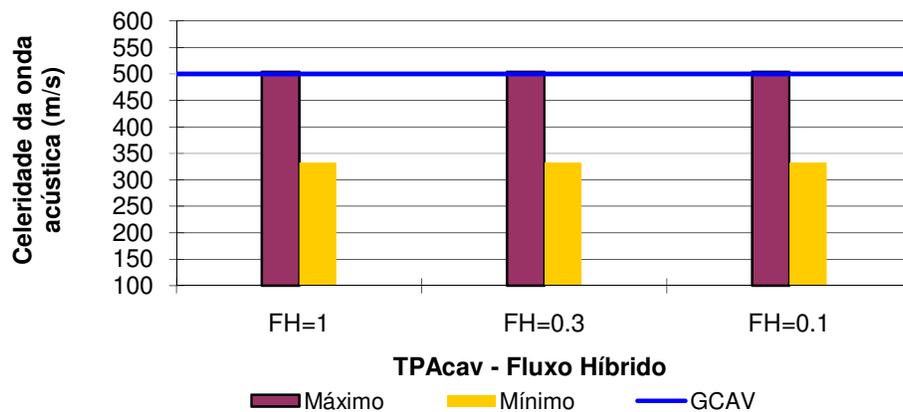


Figura 9: Envoltória de celeridades da onda acústica simulada com o modelo TPAcav considerando  $Cr=0.95$ ,  $\alpha=10^{-5}$  e variando o fluxo híbrido para todas as células de cálculo.

De forma a avaliar o efeito da porcentagem de ar livre na variação da celeridade da onda acústica no modelo TPAcav, calculou-se a faixa de valores da celeridade da onda acústica para diferentes porcentagens de ar livre no interior do domínio de cálculo, considerando todas as células computacionais. O resultado, apresentado na Figura 10, indica a forte dependência da celeridade da onda com o aumento da quantidade inicial de ar livre. A passagem de ondas de sub-pressurização causam um aumento significativo na fração de ar livre, que por sua vez diminui a celeridade calculada com a equação 6. Para a variação do valor de  $\alpha$  de  $10^{-4}$  para  $10^{-5}$ , há uma queda no valor da celeridade mínima de mais de 300%. Por outro lado observa-se um aumento na celeridade máxima também com o aumento da quantidade de ar livre inicial. Isso é explicado porque, quando a seção possui mais ar livre, há mais volume passível de compressão por uma onda de pressão positiva. A passagem dessa onda causa a redução de um volume maior de ar livre, provocando um aumento na celeridade, acima dos valores observados no início do cálculo (linha azul). Por contraste, o modelo MOC-GCAV não considera explicitamente essas variações da celeridade ao longo dos cálculos.

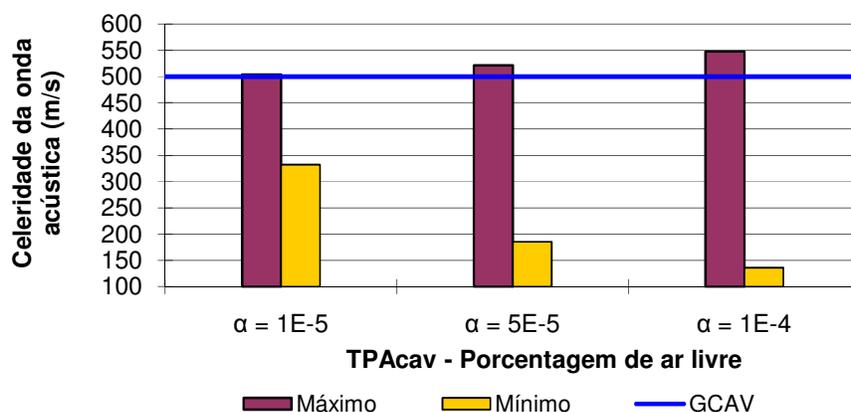


Figura 10: Envoltória de celeridades da onda acústica simulada com o modelo TPAcav considerando  $Cr=0,95$ ,  $FH=1$  e variando a porcentagem de ar livre no interior das células.

Por fim, analisou-se a variação espacial dos valores médios da celeridade da onda acústica ao longo de toda a adutora. Considerando que o fechamento da válvula resulta em pressões baixas durante boa parte da simulação, enquanto na extremidade de montante a carga do reservatório de montante é mantida constante, é de se supor que quanto mais próximo da válvula maior é a prevalência das pressões baixas. E, enquanto as pressões em um determinado local são mantidas em valores baixos, a celeridade naquele local será também reduzida pelo aumento do volume ocupado por ar livre. Os resultados apresentados na Figura 11 são consistentes com essa hipótese. Os resultados da celeridade média ao longo do tempo obtidos com o modelo TPAcav indicam que esse parâmetro cai à medida que se aproxima da válvula, e essa queda é mais pronunciada com

maiores valores da fração de ar livre, o que é consistente com o resultado apresentado na figura 10. Essa ocorrência é interessante, e especula-se se tal situação poderia ser confirmada por investigações experimentais.

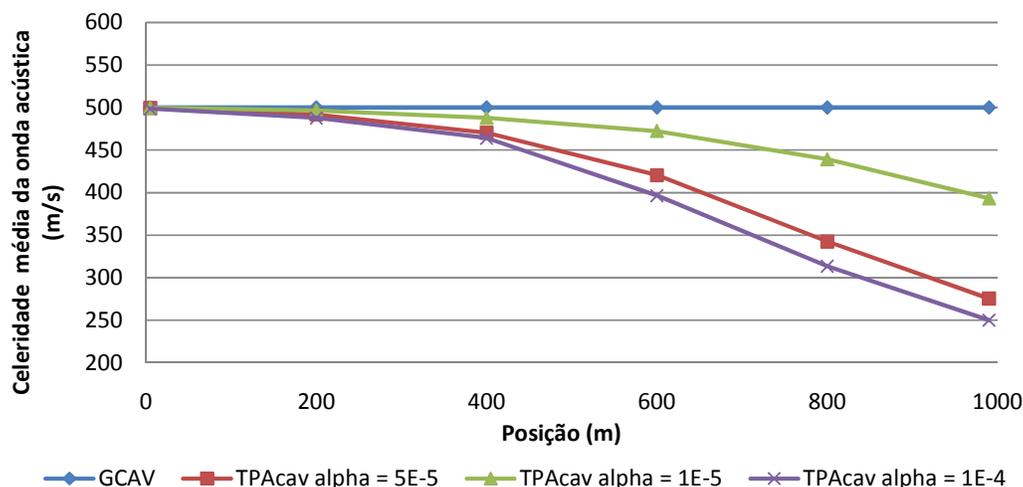


Figura 11: Celeridades da onda acústica média ao longo do tempo avaliada em pontos na adutora, calculada com o modelo TPAcav ( $Cr= 0.95$ ,  $FH=1$ ) para diferentes porcentagens de ar livre.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A modelagem de escoamentos em adutoras vem sendo aperfeiçoada com a introdução de modelos transientes que permitem avaliar as condições operacionais das mesmas em situações diversas daquelas observadas em projeto. Nesse contexto, modelos como o MOC-GCAV vêm sendo usados com sucesso em análises transientes em adutoras onde se observa escoamentos bifásicos causados por cavitação distribuída. Embora tais modelos tenham capacidade de avaliar uma série de situações operacionais relevantes em adutoras, os mesmos estão condicionados a simular apenas escoamentos pressurizados.

Conforme colocado por Estrada (2007), diversas situações operacionais podem resultar em adutoras operando em regimes livre e pressurizado simultaneamente. Esses casos requerem abordagens metodológicas específicas, como o modelo TPA (Vasconcelos et al. 2006), e se tais abordagens não forem aplicadas, resultados muito inconsistentes podem aparecer, tal como foi demonstrado por Vasconcelos e Marwell (2008). Embora o modelo TPA tenha a capacidade de simular uma ampla gama de situações operacionais em adutora, até momento o mesmo não computava completamente os efeitos da subpressão na celeridade das ondas de propagação resultantes de cavitação distribuída.

Este trabalho buscou incorporar as potencialidades do modelo MOC-GCAV proposto por Wylie e Streeter (1993) ao modelo TPA proposto por Vasconcelos *et al.* (2006), criando o modelo TPAcav para simular o escoamento transientes em adutoras unindo a habilidade de simular a transição de regimes de escoamento à possibilidade de ajustar a celeridade da onda acústica como resposta à expansão e contração da fração de ar livre presente na seção transversal do escoamento.

Um exemplo de aplicação foi proposto e simulado com os modelos MOC-GCAV e com o modelo TPAcav. Os resultados da comparação entre modelos MOC-GCAV e TPAcav indicam similaridades no comportamento geral da simulação de um fechamento rápido de válvula conforme representando nas hidrógrafas de pressão que mostraram a ocorrência de dois picos de pressão sendo o primeiro relativo ao fechamento da válvula e o segundo relativo a ruptura do bolsão de cavitação. Entre os resultados obtidos, a simulação promovida com a fração de ar livre  $\alpha=5.10^{-5}$  foi a que resultou maior aproximação entre os modelos.

Entretanto, o modelo TPAcav apresentou algumas discrepâncias quando comparado como modelo MOC-GCAV, por exemplo, na posição do pico de pressão relativo à ruptura do bolsão de cavitação para simulações com  $\alpha=10^{-4}$  e  $\alpha=10^{-5}$ . Além disso, o modelo TPAcav tende a superestimar a magnitude pico de pressão relativo ao fechamento da válvula quando confrontado com o modelo MOC-GCAV. Essas discrepâncias também tiveram reflexos nas hidrógrafas de vazão para os mesmos casos.

Ao longo da simulação, a celeridade da onda acústica varia significativamente, o que causa problemas de estabilidade na simulação. Para mitigar tais problemas, foi avaliado neste estudo o uso do fluxo híbrido, proposto por Vasconcelos *et al.* (2009). Os resultados com o uso desse fluxo nos cálculos apresentaram melhorias nos resultados simulados para o caso onde  $\alpha=10^{-5}$ .

Este trabalho se constitui em mais um passo na direção de desenvolver um modelo geral de escoamentos em adutoras, considerando os mais diversos fatores que podem ocorrer durante o escoamento. Modelos aptos a lidar com a transição de regime de escoamento são promissores nesse sentido, e espera-se que a aplicação dos mesmos possa se tornar mais comum no contexto da simulação de adutoras. Nesse sentido, o modelo TPAcav é uma contribuição no sentido de permitir simulações estendidas em adutoras. Desenvolvimentos futuros devem incluir a capacidade de simular o movimento de bolsões de ar em adutoras, e o cálculo dos efeitos desses bolsões em termos de perda de energia. Além disso, mais investigações experimentais acerca do escoamento em adutoras em condições anormais (tal como o trabalho apresentado por Estrada, 2007) precisam ser executadas, e a observação de feições do escoamento deve ser incorporada nos futuros modelos para modelagem de escoamentos em adutoras.

## BIBLIOGRAFIA

- CUNGE, J.A.; WEGNER, M. (1964). “*Intégration numérique des équations d’écoulement de Barré de Saint-Venant par un schéma implicite de différences finies: Application au cas d’une gellerie tantôt em charge, tantôt à surface libre*”, La Houille Blanche, (1), pp.33-39.
- ESTRADA, O. P. (2007). *Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines*. Tese de Doutorado, Universidade de Stuttgart, Alemanha.
- LITTLE, M.J., POWELL, J.C., CLARK, P.B. (2008), “*Air movement in water pipelines – some new developments*” in 10<sup>a</sup> International Conference in Pressure Surges. Edinburgh, Reino Unido, Maio 2008 pp.111-121.
- POLITANO, M., ODGAARD, A.J., ASCE, M., KLECAN, W.(2007). “*Case Study: Numerical Evaluation of Hydraulic Transients in a Combined Sewer Overflow Tunnel System*”, Journal of Hydraulics Engineering, 133(10),pp. 1103-1110.
- SONG, C.C.S., CARDLE, J.A., LEUNG, K.S. (1983). “*Transient Mixed-Flow Models for Storm Sewers.*”, Journal of Hydraulics Engineering, 109(11), pp.1487-1504.
- TORO, E.F.(2001). “*Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows*”.John Wiley and Sons Ltd, 309p.
- TRAJKOVIC, B.,IVETIC, M.,CALOMINO, F., D’IPPOLITO, A. (1999). “*Investigation of transition from free surface to pressurized flow in a circular pipe.*”, Water Science Technology,39(9), pp. 105-112.
- VASCONCELOS, J.G., MARWELL, D.T.B. (2008). “*Aplicabilidade de Modelos Transientes para Aduoras Sujeitas à Transição entre Regimes de escoamento*”, In: XXXI Congresso Interamericano AIDIS. Santiago, Chile, Otu.2008,1,pp 1-8.
- VASCONCELOS, J.G., WRIGHT, S.J. (2007). “*Comparison between the two-component pressure approach and current transient flow solvers.*”, Journal of Hydraulics Research, 45(2), pp.178-187.
- VASCONCELOS, J.G., WRIGHT, S.J., ROE, P.L.(2006). “*Improved simulation of flow regime transition in sewers: The two-component pressure approach.*”, Journal of Hydraulics Engineering, 132(6), pp. 553-562.
- VASCONCELOS, J.G., WRIGHT, S.J., ROE, P.L.(2009). “*Numerical Oscillation in Pipe-Filling Bore Predictions by Shock-Capturing.*” Journal of Hydraulics Engineering, 135(4), pp.296-305.
- WALLIS, G.B. (1969). *One-dimensional Two-phase Flow*. McGraw-Hill,408p.
- WYLIE, E.B., STREETER, V.L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. Prentice Hall, 463p.