

MODELAGEM DA CAVITAÇÃO EM CONDUTOS VISCOELÁSTICOS DURANTE TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

Alexandre Kepler Soares¹; Dídida I. C. Covas², Helena M. Ramos³ & Luisa Fernanda R. Reis⁴

RESUMO --- O presente trabalho tem como objetivo o estudo do fenômeno da cavitação durante transitórios hidráulicos em condutos de polietileno, os quais são caracterizados pelo comportamento reológico viscoelástico. Um simulador hidráulico, capaz de descrever os efeitos dinâmicos associados à dissipação de energia, ao comportamento mecânico viscoelástico e à cavitação, foi desenvolvido. Para a reprodução do escoamento transitório com cavitação, dois modelos foram implementados: DVCM (*Discrete Vapour Cavity Model*) e DGCM (*Discrete Gas Cavity Model*). Para verificação dos modelos, uma extensa campanha de testes experimentais foi realizada em uma instalação de laboratório composta por tubos de polietileno de alta densidade (PEAD). Os regimes transitórios com cavitação foram originados pelo fechamento rápido de válvula de esfera localizada a montante do sistema hidráulico em série. Uma vez determinados os parâmetros do modelo viscoelástico, simulações computacionais foram realizadas na tentativa de reproduzir o escoamento cavitante observado nos ensaios. Os efeitos associados à viscoelasticidade das paredes dos tubos de PEAD e a ocorrência de pressões de vapor durante os eventos transitórios são discutidos.

ABSTRACT --- The current paper focuses on the analysis of transient cavitating flow in pressurised polyethylene pipes, which are characterized by viscoelastic rheological behaviour. A hydraulic transient solver that describes fluid transients in plastic pipes has been developed. This solver incorporates the description of dynamic effects related to the energy dissipation, the rheological mechanical behaviour of the viscoelastic pipe and the cavitating pipe flow. The Discrete Vapour Cavity Model (DVCM) and the Discrete Gas Cavity Model (DGCM) have been used to describe transient cavitating flow. An extensive experimental programme has been carried out in an experimental set-up composed of high-density polyethylene (HDPE) pipes. Transient cavitating flow tests were carried out by the fast closure of the ball valve located at upstream end of the pipeline. Once the rheological behaviour of HDPE pipes were known, computational simulations have been run in order to describe the hydraulic behaviour of the system for the cavitating pipe flow. The effects related to the viscoelasticity of HDPE pipes and to the occurrence of vapour pressures during the transient event are discussed.

Palavras-chave: Cavitação, Modelos, Viscoelasticidade.

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

1. INTRODUÇÃO

Transitórios hidráulicos são, geralmente, analisados na fase de projeto de sistemas hidráulicos, para que a operação de tais sistemas seja realizada com segurança, confiabilidade e boa performance frente às diversas condições operacionais (Chaudhry, 1987; Almeida e Koelle, 1992; Wylie e Streeter, 1993). Tais análises são também importantes no estágio de operação do sistema para o diagnóstico de possíveis problemas existentes, bem como para simulações de diferentes cenários. A avaliação das sobrepressões máximas é realizada para verificar se o material escolhido para os tubos, classes de pressão e espessuras dos tubos são suficientes para evitar quebras e outros danos ao sistema. Por outro lado, a verificação das subpressões é importante para evitar desprendimento ou aprisionamento de ar, cavitação e separação da coluna líquida, e, conseqüentemente, o colapso do tubo e intrusão de patogênicos no sistema devido à ocorrência de pressões negativas.

Para o cálculo das envolventes de sobrepressões e subpressões, a clássica teoria do Golpe de Ariete (modelo elástico), presente em diversos *softwares* comerciais, é usualmente empregada, já que ela descreve razoavelmente bem as pressões extremas. No entanto, o modelo clássico nem sempre é válido para as análises de fenômenos que rapidamente atenuam ou acentuam as pressões em escoamento transitório, tais como atrito para transitórios rápidos (Brunone *et al.*, 1991), comportamento mecânico de tubos plásticos (Covas *et al.*, 2005; Ramos *et al.*, 2004, Soares *et al.*, 2008), ar dissolvido ou aprisionado (Martin, 1976), interação fluido-estrutura (Tijsseling, 1996), cavitação (Bergant *et al.*, 2006).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é apresentar os resultados obtidos da combinação de diferentes efeitos dinâmicos (viscoelasticidade e cavitação) durante transitórios hidráulicos, bem como discutir a importância de cada fenômeno. Para isso, dados foram medidos em uma instalação experimental composta por tubos de polietileno de alta densidade (PEAD), construída no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal. Diversos testes em escoamento transitório foram realizados e pressões foram medidas em diferentes locais do sistema em série do tipo Reservatório-Válvula-Tubo-Válvula. Um simulador hidráulico, que incorpora os efeitos da viscoelasticidade e da cavitação, foi desenvolvido e utilizado para a comparação dos dados experimentais aos resultados numéricos. Os resultados são apresentados e a influência de cada fenômeno nas análises hidráulicas para projeto ou operação do sistema é discutida.

2. MODELOS HIDRÁULICOS

2.1 Viscoelasticidade de tubos plásticos durante transitórios hidráulicos

Quando submetidos a uma solicitação, o comportamento de materiais plásticos, como polietileno (PE) e policloreto de vinila (PVC), é usualmente considerado em termos de dois tipos de materiais ideais: o sólido elástico e o líquido viscoso. Isso evoca a analogia entre a Lei de Hooke para sólidos elásticos e a Lei de Newton para líquidos viscosos. Na primeira, a tensão é linearmente relacionada à deformação e, na última, a tensão é linearmente dependente da taxa de variação da deformação. Portanto, uma relação constitutiva para o comportamento de um sólido viscoelástico linear pode ser obtida pela combinação dessas duas leis (Ward e Hadley, 1993).

No que diz respeito à análise do fluxo transitório em condutos viscoelásticos sob pressão, duas equações diferenciais parciais não-lineares, representativas dos princípios de quantidade de movimento (Equação 1) e de conservação de massa (Equação 2), são estabelecidas (Almeida e Koelle, 1992; Covas *et al.*, 2005):

$$\frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} + g \frac{\partial H}{\partial x} + gh_f = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a_0^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2a_0^2}{g} \frac{d\varepsilon_r}{dt} = 0 \quad (2)$$

sendo x a distância, t o tempo, H a carga piezométrica, Q a vazão, A a área da seção transversal da tubulação, a_0 a celeridade da onda de pressão, g a aceleração da gravidade, ε_r a componente de deformação lenta (em tubos viscoelásticos, a taxa de deformação total é decomposta em deformação elástico-instantânea e deformação lenta), e h_f a perda de carga devido ao atrito, dada por $h_f = h_{fs} + h_{fu}$, sendo h_{fs} a perda de carga calculada para condições de escoamento permanente ($h_{fs} = fQ|Q|/2DA^2$ em regime turbulento, sendo f o fator de atrito e D o diâmetro interno da tubulação) e h_{fu} a perda de carga calculada para condições de escoamento transitório.

A taxa de deformação total gerada pelo carregamento contínuo de uma tensão $\sigma(t)$ é dada por:

$$\varepsilon(t) = J_0 \sigma(t) + \int_0^t \sigma(t-t') \frac{\partial J(t')}{\partial t'} dt' \quad (3)$$

sendo J_0 o coeficiente de fluência instantânea e $J(t')$ a função de fluência no tempo t' .

Neste trabalho, o conjunto de equações diferenciais (Equações 1, 2 e 3) é resolvido pelo Método das Características (MOC). Para a descrição matemática da função de fluência, o modelo mecânico generalizado Kelvin-Voigt de um sólido viscoelástico é utilizado. Tal modelo consiste de uma combinação de elementos mecânicos – molas e amortecedores – que reproduzem o comportamento viscoelástico de um sistema real (Aklonis e MacKnight, 1983):

$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^{N_{KV}} J_k (1 - e^{-t/\tau_k}) \quad (4)$$

sendo J_0 o coeficiente de fluência instantânea (primeiro elemento mola) definido por $J_0 = 1/E_0$, E_0 o módulo de elasticidade (mola) do primeiro elemento, J_k o coeficiente de fluência (mola) do k -ésimo elemento Kelvin-Voigt definido por $J_k = 1/E_k$, E_k o módulo de elasticidade (mola) do k -ésimo elemento, τ_k o tempo de relaxação (amortecedor) do k -ésimo elemento, $\tau_k = \mu_k/E_k$, μ_k a viscosidade dinâmica (amortecedor) do k -ésimo elemento, e N_{KV} o número de elementos Kelvin-Voigt. Assim, o comportamento reológico do material do conduto sob pressão é definido pelos parâmetros J_0 , J_k e τ_k , determinados de acordo com dados experimentais.

Maiores detalhes sobre a integração das Equações 1, 2 e 3 podem ser obtidos em Covas *et al.* (2004; 2005) e Soares *et al.* (2008).

2.2 Modelo DVCM (*Discrete Vapour Cavity Model*)

O modelo DVCM é amplamente utilizado nas análises dos fenômenos de cavitação vaporosa, e está disponível em diversos *softwares* comerciais. Tal modelo é baseado na hipótese de separação da coluna líquida, na qual o líquido se separa instantânea e completamente de sua fase de vapor quando a cavidade é formada (modelo líquido-vapor). Depois de realizada a discretização do sistema, cada trecho de tubulação, entre duas seções de cálculo (seção computacional), é considerado como sendo preenchido somente por líquido com uma celeridade constante; cavidades de vapor podem se formar em cada seção de cálculo, desde que a pressão calculada seja menor do que a pressão de vapor (Figura 1). Assim, a pressão absoluta na cavidade de vapor é estabelecida como sendo igual à pressão de vapor, $p^* = p_v^*$ (Bergant *et al.*, 2006).

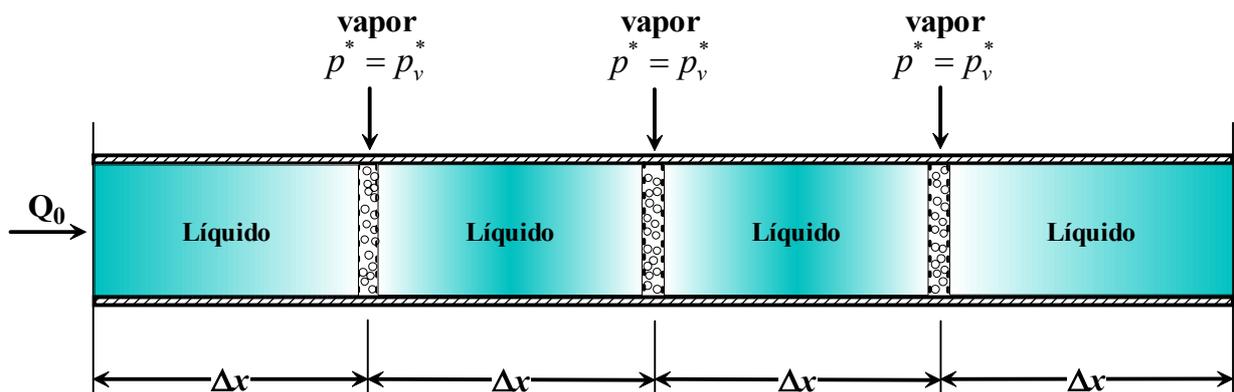


Figura 1: Esquema do modelo DVCM (adaptado de Tijsseling, 1993)

Desprezando a transferência de massa durante o fenômeno da cavitação, o volume de cada cavidade de vapor pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\frac{dV}{dt} = Q_P - Q_{Pu} \quad (5)$$

sendo Q_{Pu} e Q_P as vazões de montante e jusante da cavidade, respectivamente. Utilizando o Método

das Características com uma malha alternada (Figura 2), a Equação 5 é aproximada numericamente por:

$$\nabla_P^t = \nabla_P^{t-2\Delta t} + [\psi(Q_P^t - Q_{Pu}^t) + (1-\psi)(Q_P^{t-2\Delta t} - Q_{Pu}^{t-2\Delta t})]2\Delta t \quad (6)$$

sendo ∇_P^t e $\nabla_P^{t-2\Delta t}$ os volumes da cavidade de vapor nos passos de tempo t e $t-2\Delta t$, e ψ um fator numérico de ajuste do passo de tempo variando de 0,5 a 1. Wylie e Streeter (1993) recomendam $\psi = 1$, por haver oscilações numéricas mínimas.

No modelo DVCM, quando o volume calculado torna-se negativo, é dito que a cavidade entrou em colapso e a fase líquida é restabelecida, sendo possível a solução do problema pelo modelo elástico clássico. Um fluxograma do modelo DVCM, construído com base no trabalho de Shu (2003), é apresentado na Figura 11 (Apêndice).

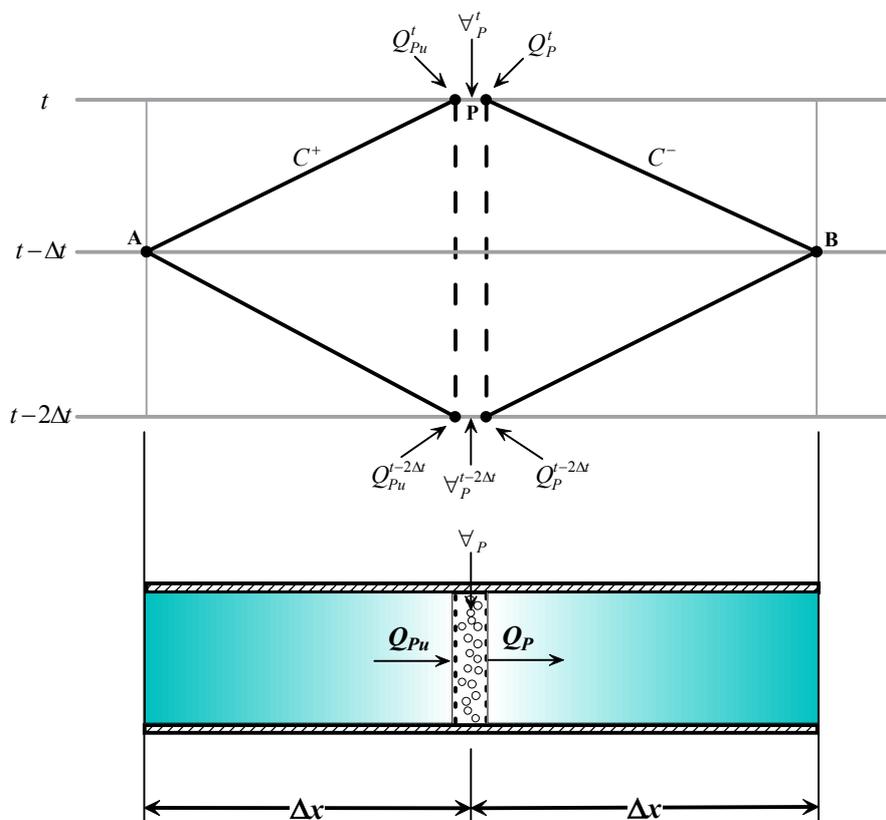


Figura 2 – Malha característica alternada

2.3 Modelo DGCM (*Discrete Gas Cavity Model*)

Uma das características dos líquidos é sua capacidade de absorver e desprender certa quantidade de gás livre quando a superfície líquida entra em contato com a atmosfera. Sendo assim, o escoamento em dutos sob pressão pode apresentar certa quantidade de gases livre, dissolvido e desprendido no meio líquido, tendo como efeito impactante durante transitórios hidráulicos o fenômeno chamado de cavitação gasosa.

O escoamento transitório de uma mistura líquido-gás homogênea pode ser descrito pelo clássico modelo do Golpe de Aríete, no qual a celeridade a_0 (válida somente para o meio líquido) é substituída pela celeridade da mistura, a_m (Wylie, 1984):

$$a_m = a_0 / \sqrt{1 + \frac{\alpha_g \rho a_0^2}{p^*}} \quad (7)$$

sendo α_g a fração de gás livre no volume da mistura líquido-gás, ρ a massa específica do líquido, e p^* a pressão absoluta.

Uma alternativa à modelagem de gás livre distribuído ao longo do meio líquido numa mistura homogênea é concentrar a massa de gás livre em cada seção de cálculo (seção computacional), o que leva ao modelo DGCM (*Discrete Gas Cavity Model*). Tal modelo é similar ao modelo DVCM, mas com uma quantidade de gás livre concentrada em cada seção computacional. Ao contrário da simples adoção da pressão absoluta igual à pressão de vapor do modelo DVCM, no modelo DGCM, cada pequeno volume de gás isolado expande e contrai isotermicamente assim que a pressão varia, em concordância com a lei dos gases ideais (Wylie e Streeter, 1993):

$$(p^* - p_v^*) \nabla = (p_0^* - p_v^*) \nabla_0 = C_3 \quad (8)$$

A Figura 3 mostra as curvas volume *versus* pressão absoluta dos modelos DVCM e DGCM, o que demonstra que o DVCM é um caso particular do modelo DGCM.

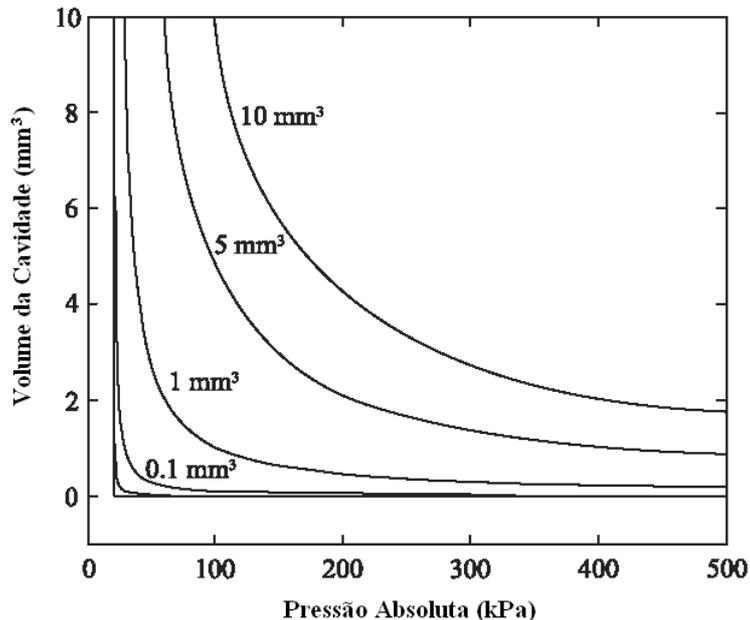


Figura 3 – Curvas volume *versus* pressão absoluta para o modelo DVCM (linha com formato em L, $\nabla_0 = 0 \text{ mm}^3$) e para o modelo DGCM (linhas com $\nabla_0 = 0,01 \text{ mm}^3$, $\nabla_0 = 0,1 \text{ mm}^3$, $\nabla_0 = 1 \text{ mm}^3$, $\nabla_0 = 5 \text{ mm}^3$ e $\nabla_0 = 10 \text{ mm}^3$) para $p_0^* = 1 \text{ bar}$ e $p_v^* = 0,2 \text{ bar}$ (água a 60°C , valor escolhido elevado para demonstrar a influência da pressão de vapor) (Fonte: Bergant *et al.*, 2006)

Assim, uma relação isotérmica volume *versus* carga piezométrica é válida em cada cavidade de gás:

$$\nabla_P^t = \frac{C_3}{H_P^t - z - H_v} \quad (9)$$

na qual a constante C_3 é calculada pela seguinte expressão:

$$C_3 = \frac{p_0^* \alpha_0 \Delta x A}{\rho g} \quad (10)$$

sendo p_0^* a pressão absoluta de referência, α_0 a fração de gás livre no volume da mistura líquido-gás para p_0 , z a cota topográfica da seção de cálculo, e H_v a carga de pressão de vapor do líquido.

Como no modelo DVCM, entre cada seção de cálculo ou volume concentrado de gás, há líquido puro com celeridade constante e ausência de gás livre (Figura 4). O modelo DGCM é também utilizado para a simulação de cavitação vaporosa desde que seja atribuído um baixo valor inicial para a fração de gás livre ($\alpha_0 \leq 10^{-7}$) em todas as seções de cálculo (Wylie, 1984; Simpson e Bergant, 1994).

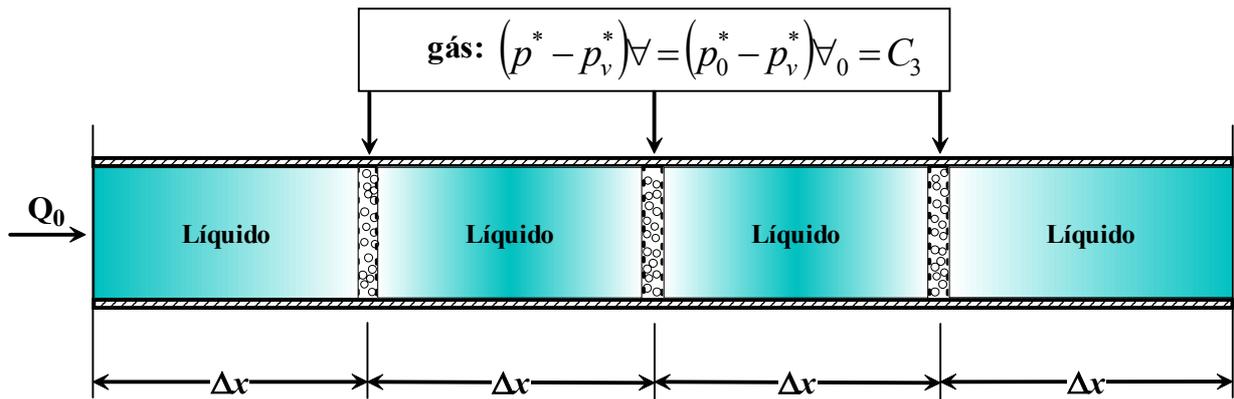


Figura 4 – Esquema do modelo DGCM

Wylie e Streeter (1993) apresentam o equacionamento para cálculo da cavitação gasosa empregando o Método das Características (MOC) com malha de cálculo alternada (Figura 2). As equações de compatibilidade resultantes são dadas por

$$C^+ : H_P^t = C_P - B_P Q_{Pu}^t \quad (11)$$

$$C^- : H_P^t = C_M + B_M Q_P^t \quad (12)$$

Substituindo as Equações 9, 11 e 12 na Equação 6, tem-se:

$$\left(H_P^t - z - H_v\right)^2 + 2B_1\left(H_P^t - z - H_v\right) - C_4 = 0 \quad (13)$$

cuja solução é:

$$H_P^t - z - H_v = -B_1\left(1 + \sqrt{1 + B_B}\right), \text{ se } B_1 < 0 \quad (14)$$

$$H_P^t - z - H_v = -B_1\left(1 - \sqrt{1 + B_B}\right), \text{ se } B_1 > 0 \quad (15)$$

nas quais:

$$B_B = C_4 / B_1^2 \quad (16)$$

$$B_1 = -B_2(B_P C_M + C_P B_M) + B_2 B_P B_M B_v + (z + H_v) / 2 \quad (17)$$

$$B_2 = 0,5 / (B_P + B_M) \quad (18)$$

$$C_4 = C_3 B_P B_M B_2 / (\psi \Delta t) \quad (19)$$

$$B_v = \left[\psi_P^{t-2\Delta t} / (2\Delta t) + (1-\psi) (Q_P^{t-2\Delta t} - Q_{Pu}^{t-2\Delta t}) \right] / \psi \quad (20)$$

Os coeficientes C_P , C_M , B_P e B_M são calculados de acordo com Soares *et al.* (2008), para inclusão dos efeitos relacionados à viscoelasticidade do material do tubo, fator de atrito para regime variável, perda de carga em escoamento permanente, impedância característica e coeficiente de resistência.

De acordo com Wylie e Streeter (1993), sob condições extremas de elevadas cargas piezométricas valores muito baixos para os volumes de gás livre, ou em elevados valores para os volumes e muito baixos para a carga piezométrica, as Equações 14 e 15 podem apresentar resultados imprecisos. Isto ocorre quando $|B_B| \ll 1$ e, para evitar quaisquer problemas numéricos, uma linearização das Equações 14 e 15 é proposta:

$$H_P^t - z - H_v = -2B_1 - \frac{C_4}{2B_1}, \text{ se } B_1 < 0 \quad (21)$$

$$H_P^t - z - H_v = \frac{C_4}{2B_1}, \text{ se } B_1 > 0 \quad (22)$$

3. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Foi utilizada a instalação experimental do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura do Instituto Superior Técnico (IST) de Lisboa, Portugal, para a análise da cavitação durante transitórios hidráulicos em tubos de polietileno de alta densidade (PEAD). A instalação experimental tem uma configuração do tipo Reservatório-Válvula-Tubo-Válvula (RVTV) com comprimento total de 203 m (Figura 5). O conduto possui diâmetro interno igual a 44 mm, espessura da parede igual a 3 mm e classe de pressão nominal igual a 10 kgf/cm², disposto de forma helicoidal, com um raio de curvatura de 1 m. A montante do sistema, existe um tanque hidropneumático que simula as condições de nível d'água fixo, e, a jusante, há uma válvula de esfera aberta para a atmosfera. As condições transitórias foram estabelecidas pela manobra da válvula de esfera localizada imediatamente a jusante do tanque hidropneumático (Seção 1) para os ensaios envolvendo cavitação. Cargas de pressão em escoamento transitório foram medidas por transdutores de pressão em quatro locais com uma frequência de aquisição de 500 Hz: (i) no tanque hidropneumático; (ii) a jusante da válvula de esfera localizada a montante dos tubos de PEAD (Seção 1); (iii) no meio do

sistema em série (Seção 5); e (iv) a montante da válvula de esfera localizada a jusante do sistema (Seção 6).

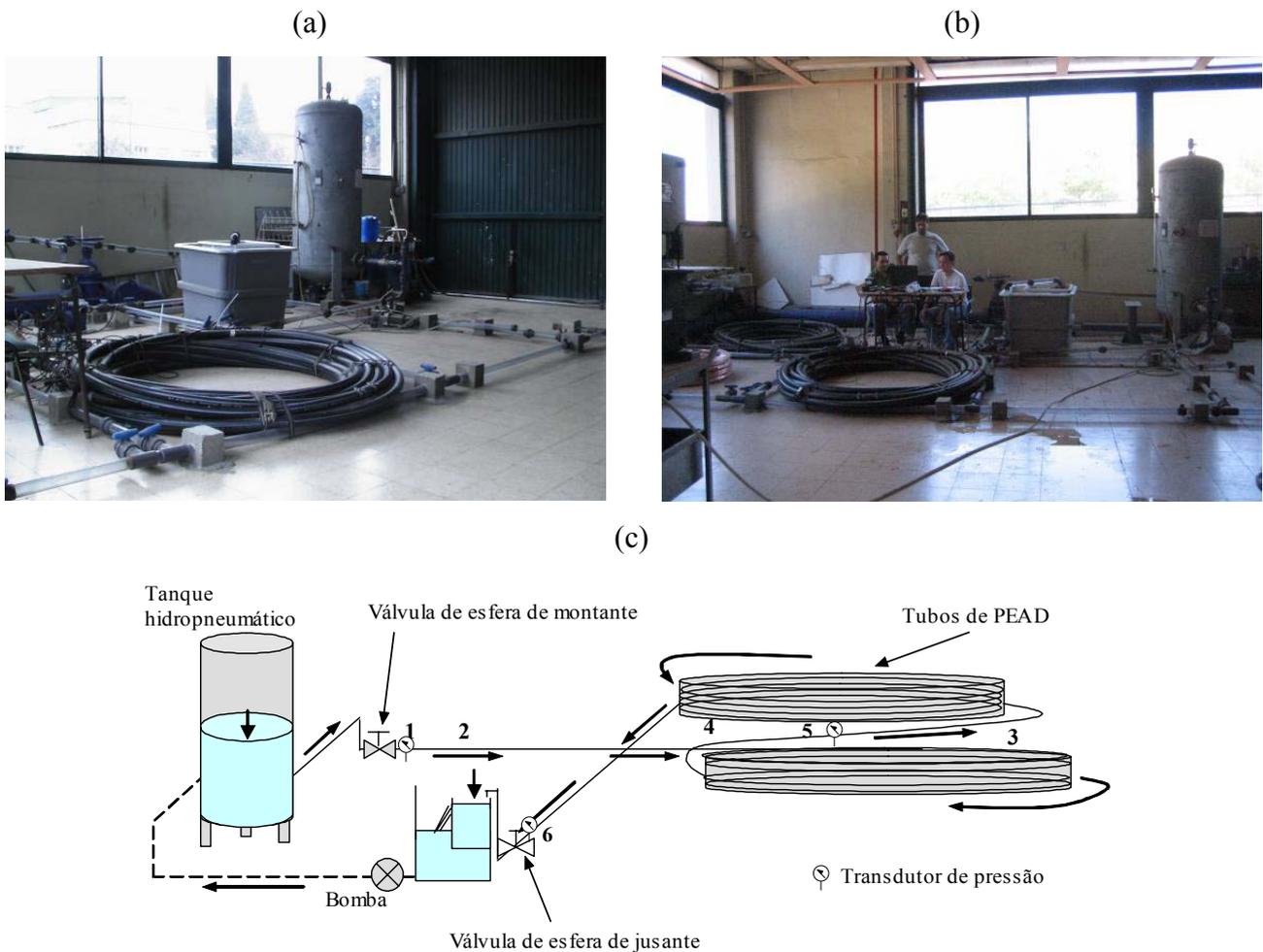


Figura 5 – (a), (b) Vista geral da instalação experimental com tubos de PEAD; (c) esquema simplificado do aparato experimental

4. CALIBRAÇÃO DO MODELO

Para verificação dos modelos matemáticos desenvolvidos, dados coletados na instalação experimental foram utilizados. Primeiro, partiu-se para a determinação dos parâmetros do modelo viscoelástico linear. Nas análises inversas, foi empregado o método Levenberg-Marquardt para a busca dos valores dos coeficientes de fluência e de amortecimento, J_k e τ_k . A velocidade da onda elástica foi estimada em 250 m/s ($\Delta t = 0,08$ s and $\Delta x = 20$ m) e três elementos Kelvin-Voigt foram utilizados para a descrição da função de fluência ($\tau_1 = 0,10$ s; $J_1 = 0,60$ GPa⁻¹; $\tau_2 = 0,50$ s; $J_2 = 0,35$ GPa⁻¹; e $\tau_3 = 3,0$ s; $J_3 = 0,50$ GPa⁻¹). Na realidade, quando a pressão diminui e atinge a pressão de vapor, uma cavidade de gás é formada e, conseqüentemente, a velocidade da onda elástica também diminui. Assim, a função de fluência calibrada incorpora os efeitos devidos ao

fator de atrito para regime variável, à viscoelasticidade das paredes do conduto e à variação da celeridade provocada pela formação de cavidades de gás localizadas.

Na tentativa de reproduzir o escoamento cavitante observado nos ensaios, os modelos DVCM e DGCM foram utilizados, sendo que, no caso do último modelo, um baixo valor inicial para a fração de gás no volume da mistura foi adotado ($\alpha_0 \leq 10^{-7}$), já que o escoamento não exibia bolhas de ar distribuídas no início dos testes (em escoamento permanente).

Os resultados observados experimentalmente e numéricos obtidos pelo modelo DVCM considerando o comportamento reológico viscoelástico dos tubos de PEAD são apresentados na Figura 6, para a Seção 1 (válvula de esfera a montante do sistema), e na Figura 7, para a Seção 5 (meio do sistema em série). O uso do modelo DVCM não resultou na descrição do comportamento do escoamento, tanto em termos de atenuação quanto em termos da dispersão das pressões.

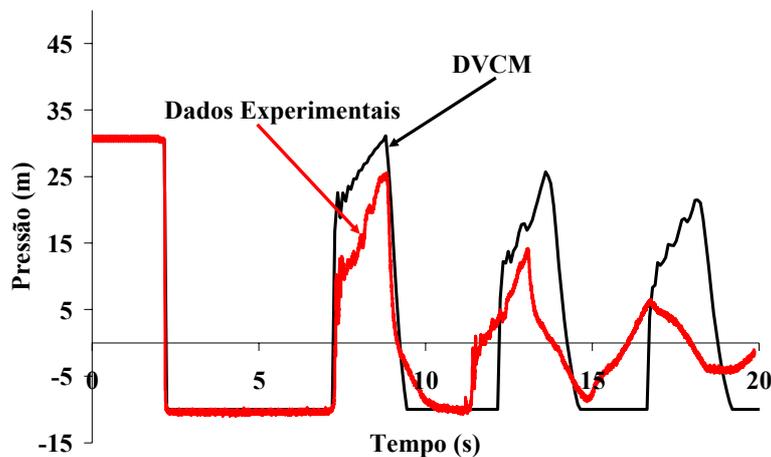


Figura 6 – Resultados numéricos do modelo DVCM considerando viscoelasticidade *versus* dados experimentais para a Seção 1 ($Q_0 = 4,0$ L/s; $Re \approx 120.000$)

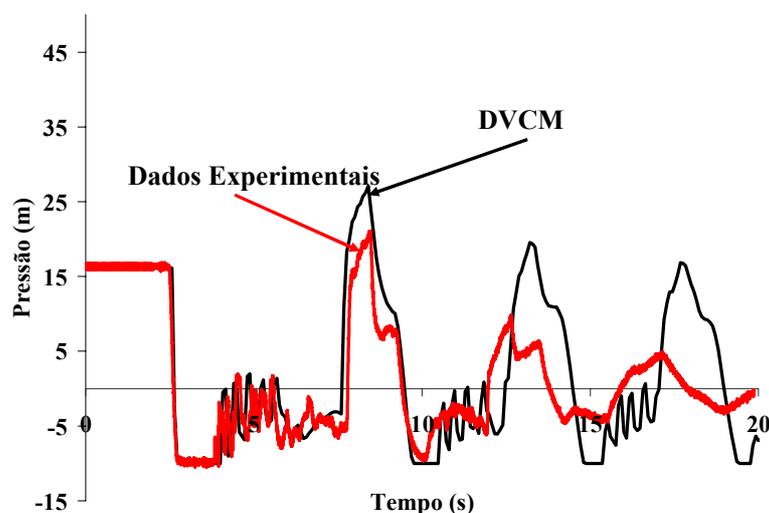


Figura 7 – Resultados numéricos do modelo DVCM considerando viscoelasticidade *versus* dados experimentais para a Seção 5 ($Q_0 = 4,0$ L/s; $Re \approx 120.000$)

Embora o modelo DVCM seja facilmente implementado, ele apresenta certas deficiências como reportadas por Shu (2003): (i) para evitar o cálculo de valores negativos para os volumes das cavidades (ou valores negativos de pressão absoluta), restrições artificiais são impostas, as quais resultam em elevados e irrealistas picos de pressão; (ii) a condição de fronteira interna permite a formação de cavidades de vapor somente nas seções de cálculo, e os resultados das simulações são influenciados de acordo com a localização das seções de cálculo, dependentes da discretização do sistema; (iii) por causa da desconsideração do tamanho da cavidade de vapor e sua transferência de massa, o modelo é limitado em descrever o escoamento cavitante; e (iv) em cada seção de cálculo, é adotada uma descontinuidade de vazões e, conseqüentemente, dois valores de vazão serão calculados, o que é claramente inconsistente com o comportamento observado em cada seção. A diferença em tais valores de vazão tende a ser maior na medida em que o grau de cavitação aumenta e, também, quando o número de seções de cálculo é baixo. Por outro lado, quando um número elevado de seções de cálculo é utilizado, haverá um número maior de descontinuidades resultando em um modelo matemático mal definido. Neste sentido, Simpson e Bergant (1994) recomendam que o volume máximo de cada cavidade discreta seja menor que 10% do volume do trecho entre duas seções de cálculo ($\forall < 0,1.A.\Delta x$).

Além das deficiências apontadas por Shu (2003), pode-se levar em consideração também que o modelo DVCM estabelece que a pressão absoluta reinante nas cavidades de vapor seja igual à pressão de vapor, negligenciando os mecanismos de dissipação de energia durante a expansão e a contração da bolha.

Assim, o modelo DGCM foi utilizado na tentativa de reproduzir o comportamento hidráulico do sistema, considerando um baixo valor inicial para a fração de gás livre na mistura ($\alpha_0 \leq 10^{-7}$). Os resultados numéricos obtidos pelo modelo DGCM considerando os efeitos da viscoelasticidade dos tubos de PEAD são apresentados na Figura 8, para a Seção 1 (válvula de esfera a montante do sistema), e na Figura 9, para a Seção 5 (meio do sistema em série).

A variação da celeridade é mostrada na Figura 10, considerando a função de fluência determinada. Partindo de um valor inicial de 250 m/s, a celeridade torna-se aproximadamente constante após 8 s, com um valor final igual a 167 m/s.

A escolha pela utilização do modelo DGCM em conjunto com o modelo viscoelástico linear demonstrou que: (i) um ajuste melhor aos dados experimentais foi obtido do que aquele apresentado pelo modelo DVCM; (ii) a consideração da lei dos gases ideais é mais apropriada do que a simples adoção da pressão de vapor quando a pressão calculada atinge a pressão de vapor (DVCM) – isto influencia na dissipação de energia durante a expansão e contração da bolha; no modelo DGCM, o expoente politrópico é adotado como sendo igual a 1 para se obter equações explícitas e, além disso, o gás livre se comporta isotermicamente, o que é válido para pequenas bolhas; neste estudo, bolhas

de grande volume eram formadas na parte superior do tubo de PEAD e expandiam ao longo do eixo axial do tubo; bolhas de grande volume e separações de coluna apresentam comportamento adiabático; assim, recomenda-se um estudo futuro do expoente politrópico, bem como da formulação implícita obtida; e (iii) algumas particularidades do aparato experimental durante os testes em escoamento transitório, como um leve deslocamento de tubos e uma saída livre para a atmosfera a jusante do sistema em série, provocaram maiores incertezas na reprodução do comportamento hidráulico do sistema.

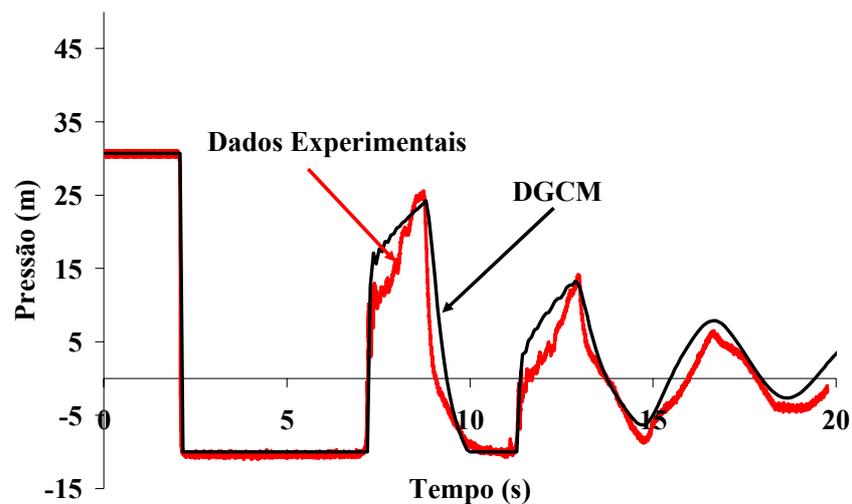


Figura 8 – Resultados numéricos do modelo DGCM considerando viscoelasticidade *versus* dados experimentais para a Seção 1 ($Q_0 = 4,0$ L/s; $Re \approx 120.000$)

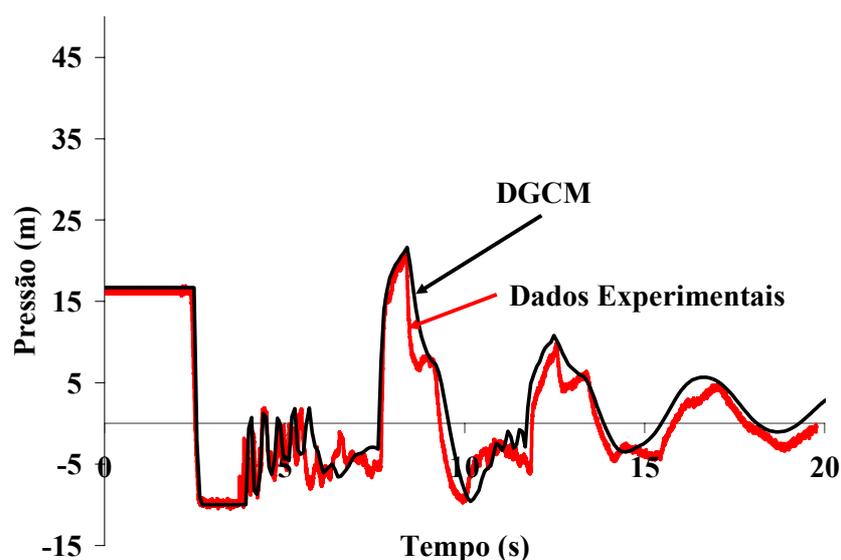


Figura 9 – Resultados numéricos do modelo DGCM considerando viscoelasticidade *versus* dados experimentais para a Seção 5 ($Q_0 = 4,0$ L/s; $Re \approx 120.000$)

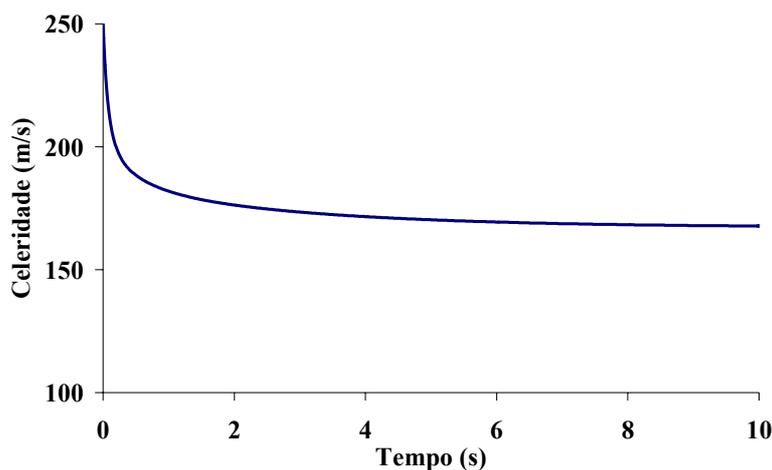


Figura 10 – Variação da celeridade

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentados testes experimentais e análises numéricas sobre transitórios hidráulicos com cavitação em um sistema pressurizado em série composto por tubos de polietileno de alta densidade (PEAD). Dados de pressão foram medidos durante transitórios hidráulicos em regime turbulento causados pelo fechamento brusco de uma válvula de esfera a montante do sistema. Tais dados foram utilizados para a verificação de dois modelos mecânicos na reprodução do escoamento cavitante: DVCM (*Discrete Vapour Cavity Model*) e DGCM (*Discrete Gas Cavity Model*). Além disso, foi desenvolvido um modelo hidráulico que leva em consideração o comportamento reológico viscoelástico dos tubos de PEAD.

Os resultados numéricos obtidos demonstraram que o modelo DVCM foi impreciso na tentativa de reproduzir as condições hidráulicas no sistema. Embora tal modelo esteja do lado da segurança para projeto de sistemas hidráulicos, já que prevê maiores sobrepressões, ele não se mostrou preciso para propostas de calibração devido à negligência dos efeitos relativos à dissipação de energia durante a expansão e contração das cavidades de vapor. A consideração da lei dos gases ideais (DGCM) mostrou-se mais apropriada do que a simples adoção da pressão de vapor quando a pressão atinge a pressão de vapor (DVCM) e induziu maiores atenuação e dispersão nas ondas de pressão.

Considerando as análises realizadas neste trabalho, o escoamento transitório com cavitação em sistemas pressurizados compostos por tubos plásticos deve ser objeto de análises futuras. O emprego de outros métodos numéricos, como métodos bidimensionais, pode ser a solução para a reprodução de transitórios hidráulicos com cavitação.

AGRADECIMENTOS

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos de estágio pós-doutoral no exterior concedida ao primeiro autor, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT), pelo auxílio financeiro na forma do projeto “Modelagem Integrada e Calibração Automática para Avaliação e Controle de Sistemas de Distribuição de Água”. Os autores agradecem também a Fábio Gonçalves e Nelson Carriço pelo suporte durante os ensaios de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKLONIS, J.J., MACKNIGHT, W.J. (1983). *Introduction to Polymer Viscoelasticity*, John Wiley & Sons, New York, USA.
- ALMEIDA, A.B., KOELLE, E. (1992). *Fluid Transients in Pipe Networks*. Computational Mechanics Publications, Glasgow.
- BRUNONE, B., GOLIA, U.M., GRECO, M. (1991). Modelling of Fast Transients by Numerical Methods. In: CABRERA, E.; FANELLI, M. (eds.): *Proceedings of the International Meeting on Hydraulic Transients and Water Column Separation*, Valencia, Spain, p. 273-280.
- BERGANT, A., SIMPSON, A.R., TIJSSELING, A.S. (2006). Water Hammer with Column Separation: A Historical Review. *Journal of Fluids and Structures*, v.22, p.135-171.
- CHAUDHRY, M.H. (1987). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Company, 2nd Ed., New York.
- COVAS, D.I.C., STOIANOV, I., MANO, J., RAMOS, H., GRAHAM, N., MAKSIMOVIC, C. (2004). The Dynamic Effect of Pipe-Wall Viscoelasticity in Hydraulic Transients. Part I - Experimental Analysis and Creep Characterization. *Journal of Hydraulic Research*, v.42, n.5, p.516-530.
- COVAS, D.I.C., STOIANOV, I., MANO, J., RAMOS, H., GRAHAM, N., MAKSIMOVIC, C. (2005). The Dynamic Effect of Pipe-Wall Viscoelasticity in Hydraulic Transients. Part II - Model Development, Calibration and Verification. *Journal of Hydraulic Research*, v.43, n.1, p.56-70.
- MARTIN, C.S. (1976). Entrapped Air in Pipelines. *Proc. 2nd Int. Conf. on Pressure Surges*, BHRA, F2.15-F2.27.
- RAMOS, H.M., BORGA, A., COVAS, D.I.C., LOUREIRO, D. (2004). Surge Damping Analysis in Pipe Systems: modelling and experiments. *Journal of Hydraulic Research*, v.42, n.4, p.413-425.
- SHU, J.J. (2003). Modelling Vaporous Cavitation on Fluid Transients. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v.80, p.187-195.

- SIMPSON, A.R., BERGANT, A. (1994). Numerical Comparison of Pipe-column-separation Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.120, n.3, p.361-377.
- SOARES, A.K., COVAS, D.I.C., REIS, L.F.R. (2008). Analysis of PVC Pipe-Wall Viscoelasticity during Water Hammer. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.134, n.4, p.1389 - 1394.
- TIJSSELING, A.S. (1993). *Fluid-structure Interaction in Case of Waterhammer with Cavitation*. PhD Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Delft, the Netherlands.
- TIJSSELING, A.S. (1996). Fluid-Structure Interaction in Liquid-Filled Pipe Systems: a Review. *Journal of Fluids and Structures*, v.10, n.2, 109-146.
- WARD, I.M., HADLEY, D.W. (1993). *An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers*. John Wiley & Sons, England.
- WYLIE, E.B. (1984). Simulation of Vaporous and Gaseous Cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, v.106, n.3, p.307-311.
- WYLIE, E.B., STREETER, V.L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. Prentice-Hall, New Jersey.

APÊNDICE

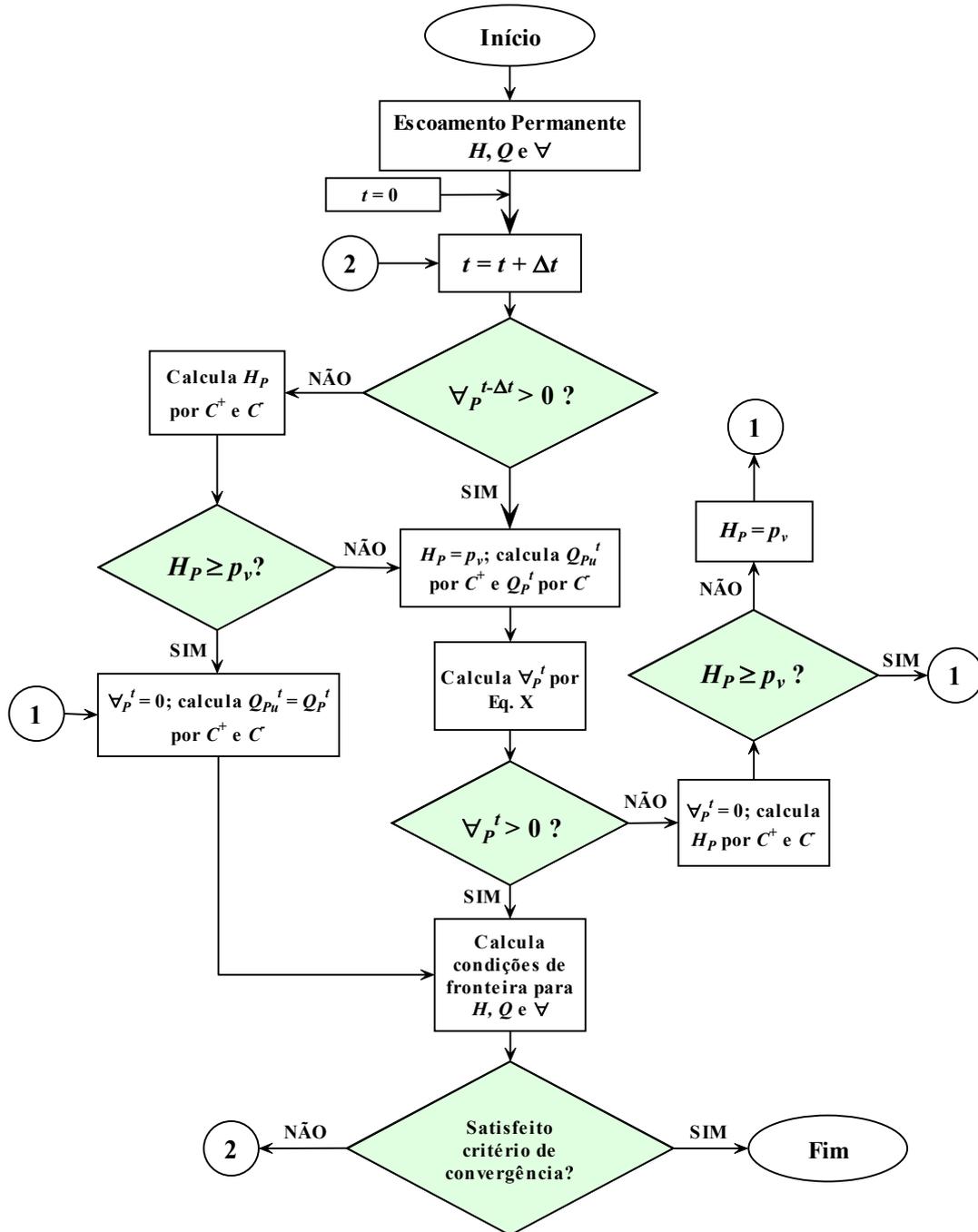


Figura 11: Fluxograma do modelo DVCM (*Discrete Vapour Cavity Model*)