



ANALISE DE TRANSIENTES DE PRESSÃO GERADOS PELO FECHAMENTO DE DIFERENTES TIPOS DE VÁLVULAS EM CIRCUITOS TUBULARES PERCORRIDOS POR FLUIDOS

Wilber H. V. Gómez

Lineu J. Pedroso

wilbervelez@hotmail.com

lineu@unb.br

Universidade de Brasília - UnB

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) – Grupo de Dinâmica e Fluido - Estrutura (GDFE). Caixa Postal 04492, Campus Darcy Ribeiro, CEP 70.919-970, Brasília - DF, Brasil.

Abstract. *O escoamento transiente é um dos principais fenômenos a ser analisado em projetos de grandes sistemas hidráulicos ou tubulações industriais, tais como: centrais nucleares, adutoras de barragens, oleodutos, gasodutos entre outros. Normalmente estes tipos de projetos requerem o emprego de válvulas no interior desses circuitos, as quais durante a operação do sistema podem gerar uma onda transiente ocasionada pelo tipo e natureza do processo de fechamento da mesma. Para este estudo estabeleceu um circuito específico onde foram efetuadas simulações com diferentes tipos de válvulas comerciais presentes, submetidas a diversos tempos e formas de fechamentos das mesmas. Foi utilizado o programa computacional TRANSPETRO - 1D, desenvolvido pelo GDFE (Grupo de Dinâmica e Fluido Estrutura) da Universidade de Brasília, o qual permite representar circuitos tubulares forçados sob várias condições, e em presença de elementos e órgãos especiais. Como consequência, foi possível comparar os resultados produzidos com outros obtidos experimentalmente na literatura internacional. Finalmente, foi verificada a influência de diferentes tipos de válvulas, com suas principais características, com a finalidade de se avaliar os cenários onde as mesmas podem ser melhor utilizadas em sistemas hidráulicos com características pré-determinadas.*

Palavras-chave: *Transientes de pressão, Conduitos Forçados, Método das Características, Propagação de Ondas, Válvulas.*

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas hidráulicos utilizados nos grandes projetos como centrais nucleares, adutoras de barragens, oleodutos, gasodutos, entre outros; são compostos de diferentes dispositivos mecânicos que cumprem determinadas funções. As válvulas são dispositivos de vital importância utilizados para controlar e interromper a descarga de um fluido, algumas delas garantem segurança para o sistema, outras controlam o fluxo para permitir a reparação da instalação, e do ponto de vista hidráulico estas aumentam as perdas de carga e o consumo de energia. Existem diferentes tipos de válvulas e diversos subtipos, a escolha de uma delas depende das propriedades do fluido e da pressão e temperatura as quais serão submetidas.

No momento quando se ativa uma válvula no sistema origina-se um fenômeno transiente que gera um grande impacto, o qual se não for controlado de forma adequada pode gerar o colapso do sistema trazendo perdas de vidas e/ou do capital investido como o acontecido na usina hidroelétrica de Sayano na Rússia (Cruz, 2009). Durante o decorrer do tempo diferentes investigadores estudaram os conceitos mais importantes e as principais equações para análise deste fenômeno, os quais foram desenvolvidos e confirmados experimentalmente por Joukowski (1898), Allievi (1903), além de Streeter e Wylie (1967) que fizeram a obra mais importante para o estudo deste fenômeno.

Dentre os estudos recentes, Brunone *et al.* (2000) fizeram experimentos onde se tem variações de velocidade no tempo para o fechamento de uma válvula em várias zonas ao longo de uma mesma seção do tubo. Pires *et al.* (2004) estudaram o fechamento rápido de válvulas em dutos curtos. Magzoub e Kwane (2007) empregaram o Método das Características para calcular e simular transientes. Silvore (2007) desenvolveu no programa computacional Java uma rotina para simular transientes com válvulas de fechamento brusco e gradual. Bratland (2009) publicou o livro *Pipe Flow 1: Single-phase Flow Assurance* onde utiliza o Método das Características para abordar problemas complexos com fenômenos transientes. Fontes *et al.* (2011) determinaram a fadiga em tubulações submetidas ao fenômeno transiente. Bratland (2013) publicou o segundo livro chamado *Pipe Flow 2: Multi-phase Flow Assurance* onde faz a análise de fluxos que tem presença de líquido e gás utilizando métodos numéricos, entre outros.

O Grupo de Dinâmica e Fluido Estrutura (GDFE) da Universidade de Brasília (UnB) tem uma grande experiência nesta área de conhecimento pelo desenvolvimento de importantes trabalhos nas últimas duas décadas. Pedroso & Barbosa (1993), desenvolveram um programa computacional baseado no Método das Características denominado TRANS, o qual calcula as pressões induzidas pela propagação de ondas em condutos forçados. Pedroso *et al.* (1994) produziram uma nova versão do programa (TRANS-II) fazendo uma análise de transientes em circuitos de reatores nucleares. Neri e Pedroso (1999) desenvolveram o programa RETRANS com novas condições de contorno. Nascimento (2002) desenvolveu o programa chamado TRANSPETRO - 1D, que permite identificar e caracterizar os efeitos transientes causados pela pressão das ondas com várias condições de contorno. Neves (2004) apresentou um estudo de vibrações em fluido-estrutura que examinava as frequências de ressonância em problemas de vazão com alta e baixa velocidade, e propôs uma solução para encontrar o campo de pressão bidimensional na válvula comparando os resultados com as soluções apresentadas na literatura utilizando o método de características. Gómez *et al.* (2014) estudaram os parâmetros básicos que influenciam na resposta das pressões em escoamentos transientes. Gómez (2015) fez um análise de parâmetros que afetam as respostas das pressões em escoamentos transientes. Gómez *et al.* (2015) fizeram simulações de transientes de pressão em dutos de usinas hidroelétricas e nucleares pelo método das características.

2 FORMULAÇÃO TEÓRICA DE TRANSIENTES DE PRESSÃO E VELOCIDADE EM DUTOS ELÁSTICOS

Num conduto forçado o fenômeno transiente é regido por equações diferenciais parciais hiperbólicas não-lineares que apresentam soluções numéricas no domínio do tempo ou da frequência. Este fenômeno é tratado com um modelo matemático inercial elástico unidimensional de parâmetros distribuídos que cumprem determinadas hipóteses e simplificações (Santos, 2010).

2.1 Hipóteses e simplificações

- escoamento unidimensional (1-D) com um perfil pseudo-uniforme de cada seção transversal do duto;
- escoamento monofásico, homogêneo e ligeiramente compressível;
- O material do duto tem um comportamento reológico linear;
- O duto tem área de seção transversal constante e sem escoamento lateral;
- Os efeitos termodinâmicos são excluídos;
- Não considera o fenômeno de degasagem (ar dissolvido no fluido).
- A interação fluido-estrutura é negligenciada;

2.2 Equações fundamentais

Equação (1) denominada equação de continuidade, esta estabelece que independente das simplificações a conservação da massa se mantém em qualquer campo do fluxo.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

Equação (2) denominada equação de quantidade de movimento, considera o somatório de todas as forças que agem na massa de um fluido em uma direção menos o produto desta massa pela aceleração e igual a zero.

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \vec{V} \nabla(\vec{V}) + \nabla(P) - \mu \left[\Delta \vec{V} + \frac{1}{3} \nabla(DIV(\vec{V})) \right] = 0 \quad (2)$$

Equação (3) denominada equação de estado, esta é aplicável num fluido denso como a água considerado levemente compressível, em particular quando são fenômenos como o ar dissolvido na água (degasagem), e elasticidade da parede do tubo (Neri e Pedroso, 1999).

$$f(P, \rho) = cte \leftrightarrow \tilde{P} = \tilde{\rho} \cdot a^2 (linearizada) \therefore a^2 = \frac{k}{\rho} \quad (3)$$

As três equações determinam num ponto a pressão (P), a velocidade (V) e a densidade do fluido (ρ). Se tem um sistema matematicamente determinado com três incógnitas e três variáveis, os vetores de pressão e velocidade se convertem em escalares pela hipótese de fluxo unidimensional.

Para escoamentos em regime transiente em circuitos tubulares unidimensionais (com $L \gg D$, ondas planas) é possível fazer simplificações e chegar as seguintes equações diferenciais quase-lineares para dutos circulares.

Equação de continuidade. Eq. (4).

$$V \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

Equação de quantidade de movimento. Eq. (5).

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \cdot \text{sen}(\alpha) + \frac{f \cdot V \cdot |V|}{2D} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

Para determinar a celeridade da onda transiente de pressão e velocidade e o fator de atrito, utilizam-se a Eq. (6) e (7), respectivamente.

$$a = \frac{\sqrt{k/\rho}}{\sqrt{1 + (k/E)(D/e)C}} \quad (6)$$

$$f(V, D, \nu, \varepsilon) = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{\text{Re}(V, D, \rho, \mu_f)^{0.9}} \right) \right)^2} \quad (7)$$

Onde, k : Módulo de expansão volumétrica do fluido; ρ : Densidade do fluido; E : Módulo de elasticidade do material; D : Diâmetro interno do duto; e : Espessura da parede do duto; C : Constante adimensional função das propriedades elásticas do tubo (dimensões de seção transversal, condições de ancoragem da tubulação, coeficiente de Poisson); ε : Rugosidade relativa do material; Re : Número de Reynolds, α : Ângulo de inclinação do duto; \vec{V} : Vetor de velocidade de escoamento; μ_f : Viscosidade cinemática do fluido, P : Pressão do fluido; \vec{P} : Pressão variável do fluido, $\vec{\nabla}$: Divergente, $\tilde{\rho}$: Densidade variável do fluido; V : Velocidade do fluido.

3 MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Mediante o método numérico denominado Método das Características se solucionaram as equações que regem o fenômeno transiente; uma importante vantagem deste é sua grande flexibilidade para a introdução de condições de contorno. Mediante a técnica das diferenças finitas de primeira ordem em conjunto com o método dos intervalos de tempos especificados se da solução as equações diferenciais parciais transformamo-las em equações diferenciais totais (Streeter e Wylie, 1967).

3.1 Método das características

A pressão e velocidade são duas variáveis dependentes do tempo, isto pode se observar nas Eq. (4) e (5) que são as equações diferenciais parciais; com as equações da continuidade e da quantidade do movimento, Eq. (8) e (9), respectivamente, se faz o desenvolvimento do Método das Características.

$$L_1 = V \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$L_2 = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \operatorname{sen}(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

Entre a Eq. (8) e (9), se faz uma combinação linear através do multiplicador λ , onde resulta a seguinte equação:

$$L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left[\frac{\partial P}{\partial x} \left(V + \frac{1}{\lambda \rho} \right) + \frac{\partial P}{\partial t} \right] + \frac{\partial V}{\partial t} (V + \lambda \rho a^2) + \frac{\partial V}{\partial t} + g \operatorname{sen}(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (10)$$

Se conclui que:

$$\lambda = \pm \frac{1}{\rho a} \quad (11)$$

$$\frac{dx}{dt} = V \pm a \quad (12)$$

Ao substituir-se a Eq. (11) e (12) na Eq. (10), se obtém as equações características:

$$a^+ = \begin{cases} \frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + \frac{dV}{dt} + g \operatorname{sen}(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V + a \end{cases} \quad (13)$$

$$\frac{dx}{dt} = V + a \quad (14)$$

$$a^- = \begin{cases} -\frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + \frac{dV}{dt} + g \operatorname{sen}(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V - a \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{dx}{dt} = V - a \quad (16)$$

3.2 Método das diferenças finitas

Utiliza-se o método das diferenciais finitas para a solução das equações linhas características, Eq. (13) e (15). Na Fig. 1 se apresenta o desenvolvimento do método no plano (x-t), onde as curvas características a^+ e a^- são conhecidas como linhas características.

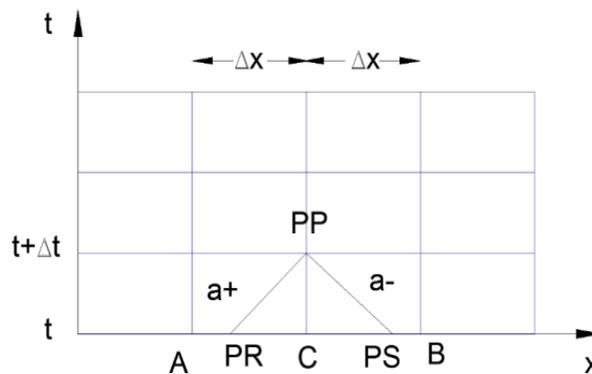


Figura 1. Método das diferenças finitas (Nascimento, 2002)

Supõem-se conhecidas as condições (P,V,x,t) nos pontos PR e PS, a partir destes se quer conhecer as condições desconhecidas (P,V) em PP, numa posição media entre esses pontos após um determinado passo de tempo Δt .

Linha característica a^+

$$V_{PP} - V_{PR} - \frac{1}{\rho a} (P_{PP} - P_{PR}) + g(t_{PP} - t_{PR}) \text{sen}(\alpha) + \frac{f}{2D} V_{PR} |V_{PR}| (t_{PP} - t_{PR}) = 0 \quad (17)$$

Linha característica a^-

$$V_{PP} - V_{PS} - \frac{1}{\rho a} (P_{PP} - P_{PS}) + g(t_{PP} - t_{PS}) \text{sen}(\alpha) + \frac{f}{2D} V_{PS} |V_{PS}| (t_{PP} - t_{PS}) = 0 \quad (18)$$

As expressões de pressão e de velocidade no ponto PP são dadas pela Eq. (17) e (18):

$$V_{PP} = \frac{1}{2} \left[V_{PR} + V_{PS} + \frac{1}{\rho a} (P_{PR} - P_{PS}) - 2g\Delta t \text{sen}(\alpha) - \frac{f\Delta t}{2D} (V_{PR} |V_{PR}| + V_{PS} |V_{PS}|) \right] \quad (19)$$

$$P_{PP} = \frac{1}{2} \left[P_{PR} + P_{PS} + (\rho a (V_{PR} - V_{PS})) - \frac{f\Delta t}{2D} (V_{PR} |V_{PR}| - V_{PS} |V_{PS}|) \right] \quad (20)$$

Devido que a pressão e velocidade são desconhecidas nos pontos PR e PS, utilizasse o método das características de intervalos tempo especificados (Streeter e Wylie, 1967).

3.3 Método das Características de Intervalos de tempo especificados

Se apresenta um regime de escoamento permanente antes de iniciar o fenômeno transiente, razão pela qual é possível conhecer as condições de pressão e velocidade no ponto C mediante interpolação linear entre os pontos A e B; é possível obter a pressão e velocidade nos pontos PR e PS fazendo um desenvolvimento matemático.

$$V_{PR} = V_C - (\theta a (V_C - V_A)) \quad (21)$$

$$V_{PS} = V_C - (\theta a (V_C - V_B)) \quad (22)$$

$$P_{PR} = P_C - (\theta a (P_C - P_A)) \quad (23)$$

$$P_{PS} = P_C - (\theta a (P_C - P_B)) \quad (24)$$

$$\theta = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (25)$$

A estabilidade e convergência do método são asseguradas impondo-se uma condição no tempo, Eq. (26). Para modelar sistemas complexos (com dois ou mais dutos) o incremento do tempo (Δt) deve ser o mesmo para todos onde o objetivo é ter distancias mínimas entre as secções a fim de poder capturar no tempo a evolução do fenômeno transiente.

$$\Delta t = \frac{L_j}{(V_j + a_j) E_j} \quad (26)$$

Onde, L_j : Comprimento do duto j , E_j : Módulo de elasticidade do material, V_j : Velocidade do escoamento no duto j , a_j : Celeridade da onda de propagação no meio no duto j ; θ : Taxa de variação da malha de pontos.

3.4 Condições de contorno

As equações das condições de contorno obtêm-se a partir das Eq. (17) e (18). As expressões das condições de contorno permitem a solução numérica do problema transiente utilizando a técnica das diferenças finitas (Nascimento, 2002). Utiliza-se esta técnica nas duas linhas características para os contornos apresentadas na Fig. 2. A pressão e velocidade nos pontos C, PR e PS são conhecidas inicialmente no instante t_0 (regime permanente).

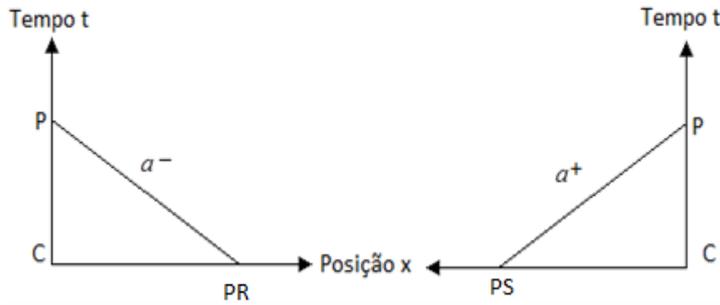


Figura 2. Linhas Características nos contornos (Nascimento, 2002)

Para uma condição de contorno a montante (à esquerda), na seção 0 do tubo j , a Eq. (19) pode ser apresentada como:

$$V_{PPj,0} = V_{PSj} + \frac{1}{\rho a_j} (P_{PSj,0} - P_{PSj}) - g \Delta t \sin(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PSj} |V_{PSj}| \Delta t \quad (27)$$

Reescrevendo a Eq. (27), separasse a mesma em dois termos, obtendo-se as seguintes expressões.

$$C_1 = V_{PSj} - \frac{1}{\rho a_j} P_{PSj} - g \Delta t \sin(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PSj} |V_{PSj}| \Delta t \quad (28)$$

$$C_2 = \frac{1}{\rho a_j} \quad (29)$$

Assim da Eq. (27) se tem a seguinte expressão:

$$V_{PPj,0} = C_1 + C_2 P_{PPj,0} \quad (30)$$

C_1 e C_2 são funções ou quantidades conhecidas e constantes durante cada passo de tempo. Para o caso do reservatório de nível fixo ou pressão constante na extremidade inicial (Seção 0), conexão tubo-reservatório, tem-se a seguinte condição, Eq. (31).

$$P_{PPj,0} = P_0 \quad (31)$$

Substituindo a Eq. (31) na Eq. (30) obtêm-se a seguinte expressão.

$$V_{PPj,0} = C_1 + C_2 P_0 \quad (32)$$

Para uma condição de contorno a jusante (à direita), na seção N do tubo j, a Eq. (19) se torna:

$$V_{PPj,N} = V_{PRj} + \frac{1}{\rho a_j} (P_{PRj,N} - P_{PRj}) - g \Delta t \text{sen}(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PRj} |V_{PRj}| \Delta t \quad (31)$$

Reescrevendo a Eq. (31), separasse a mesma em dois termos, obtendo-se as seguintes expressões.

$$C_3 = V_{PRj} + \frac{1}{\rho a_j} P_{PSj} - g \Delta t \text{sen}(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PRj} |V_{PRj}| \Delta t \quad (32)$$

$$C_4 = \frac{1}{\rho a_j} \quad (33)$$

Assim, da Equação (31) se chega à seguinte expressão:

$$V_{PPj,N} = C_3 + C_4 P_{PPj,N} \quad (34)$$

C3 e C4 são funções ou quantidades conhecidas e constantes durante cada passo de tempo. Para onde se apresenta uma válvula a condição é determinada pela velocidade de fechamento da válvula; quando a válvula fecha subitamente a velocidade de saída do fluido é zero, e quando a válvula se fecha em função do tempo, a condição de contorno a jusante varia em razão do tempo. A comporta pode ser tratada como um orifício variável no tempo.

$$V_N = -\frac{C_4}{2} + \sqrt{\frac{C_4^2}{4} + C_3 C_4} \quad (35)$$

$$P_N = \frac{V_N^2 P_0}{V_0^2 \tau^2} \quad (36)$$

Os gráficos da forma da curva de fechamento que é dada pelo coeficiente de abertura da válvula em função do tempo são determinados pela seguinte expressão, Eq. (37):

$$\tau = \left(1 - \frac{t_i}{t_c}\right)^n \quad (37)$$

Onde, τ : Coeficiente de abertura da válvula; t_i : Ponto da malha de tempo; t_c : Tempo de fechamento da válvula; n : Exponente da curva.

Modificando a abertura da válvula se modifica o valor de τ para determinar os novos valores de V_N e P_N mediante as Eq. (35) e (36).

4 ASPECTOS COMPUTACIONAIS

O Grupo de Dinâmica e Fluido Estrutura (GDFE) baseado primeiras rotinas computacionais apresentadas pelo Streeter e Wylie (1967) desenvolveu novos programas na linguagem computacional FORTRAN90: primeiro o TRANS (Pedroso et al., 1994^a) e posteriormente RETRANS (Neri e Pedroso, 1999), ambos orientados a problemas transientes em circuitos de reatores Nucleares. Com a experiência obtida na validação da formulação e a teoria

empregada, elaborou-se um novo programa reorientado para problemas transientes do setor petrolífero chamado TRANSPETRO 1-D (Nascimento, 2002), posteriormente foi utilizado para a análise de sistemas hidráulicos de dutos de usinas hidroelétricas e nucleares (Gomez, 2015). A continuação na figura 3 apresenta-se a arquitetura simplificada do programa TRANSPETRO-1D, nesta observa a interação entre cada uma das funções que fazem parte do programa.

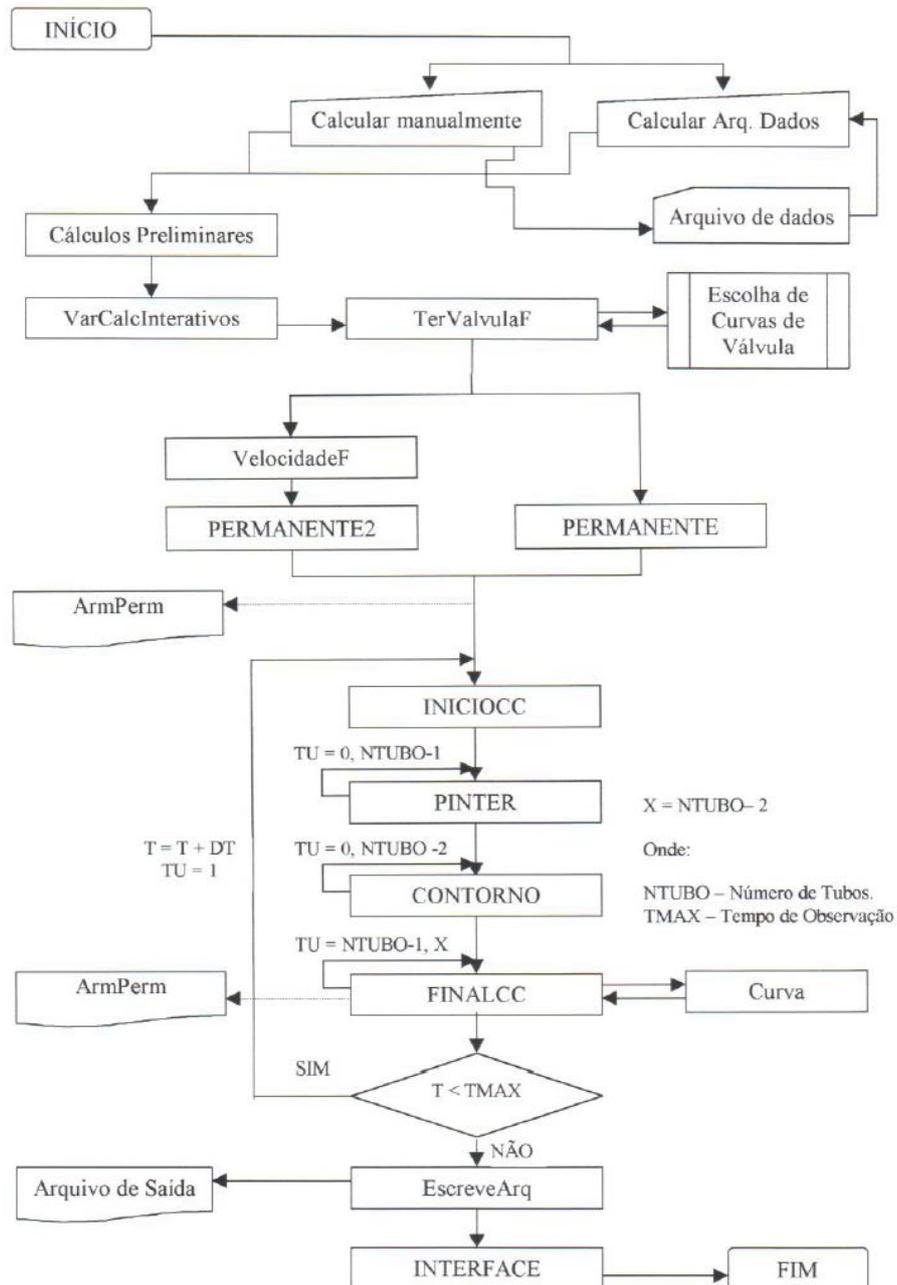


Figura 3. Arquitetura do programa (Nascimento, 2002)

Nascimento (2002) elaborou o programa TRANSPETRO-1D utilizando o programa Visual C++ 6.0 o qual tem uma grande quantidade de recursos gráficos que melhora a interação programa-usuário. Na Figura 4 a tela de exibição do programa.

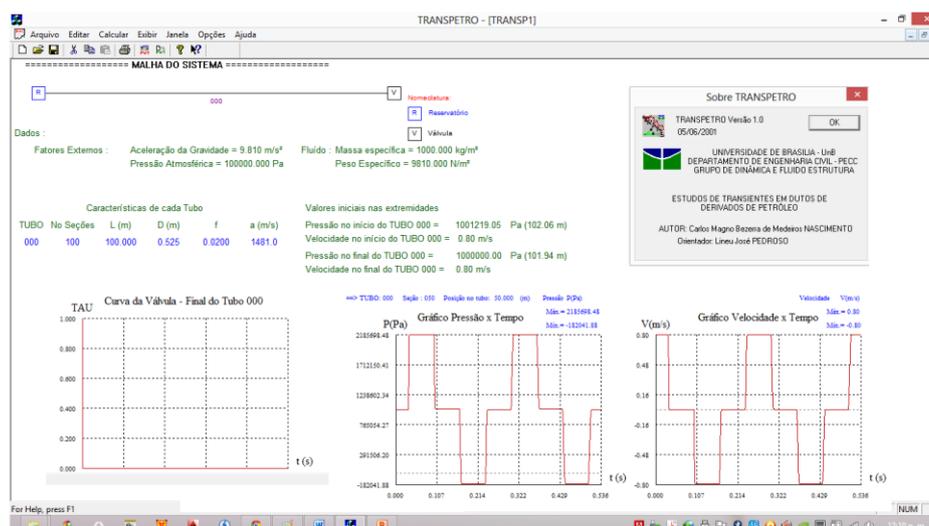


Figura 4. Tela de exibição de TRANSPETRO-1D, caixa de diálogo e gráficos da curva da válvula, pressão e velocidade em função do tempo (modificado – Nascimento, 2002)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com o programa TRANSPETRO-1D na simulação de um sistema hidráulico com diferentes tipos de válvulas, fazendo uma comparação entre as ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e das válvulas. A validação do programa foi feita por Gómez et al. (2014) onde se apresentou uma comparação entre os resultados experimentais e numéricos para um experimento que foi realizado por Contractor (1965); o esquema do sistema hidráulico utilizado no experimento era uma câmara de pressão fixa em um extremo e no outro extremo uma válvula com sua respectiva curva de fechamento experimental, no artigo apresentado se expressa e observa que existe uma grande semelhança entre a onda transiente de pressão experimental e numérica no primeiro ciclo, nos ciclos posteriores umas diferenças cada vez mais notórias. Na Figura 5 se apresenta uma ilustração do sistema hidráulico utilizado no experimento.

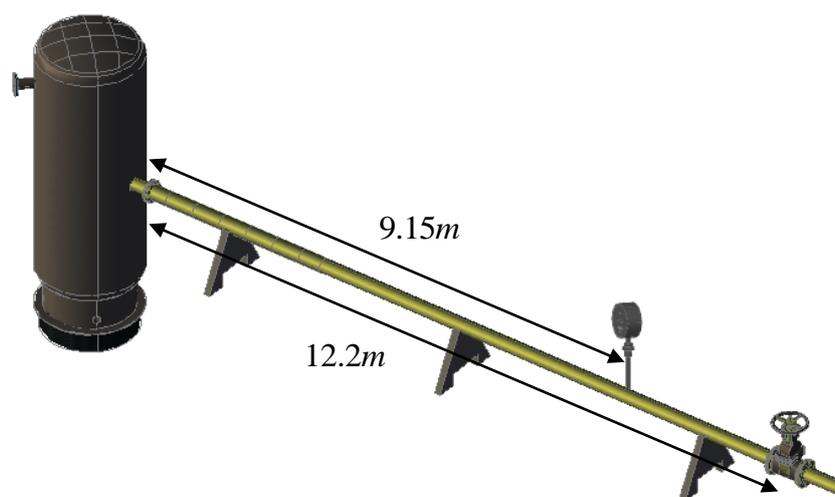


Figura 5. Sistema hidráulico utilizado para as modelações (Gomez, 2015)

O sistema hidráulico utilizado pelo Contractor (1965) será o utilizado para fazer as modelações neste trabalho, os dados gerais são: comprimento do duto, $L = 12.2$ m, diâmetro interior, $D = 0.1$ m, espessura do duto, $e = 0.016$ m, coeficiente de atrito do fluido com o tubo, $f = 0.024$, densidade do fluido (água a 20°C) $\rho = 998.2$ kg/m^3 , a aceleração da gravidade $g=9,81$ m/s^2 , velocidade de propagação a do som no fluido, $a = 1427.22$ m/s ; velocidade inicial na válvula $V_0 = 0.366$ m/s e pressão inicial na válvula, $P_0 = 597213.972$ Pa. Num ponto artificial localizado a 9.15 m do reservatório são feitas as medições das ondas transientes. Vão ser utilizadas quatro diferentes tipos de válvulas: Portão, Cone, Borboleta e Howell-Bunger.

As ilustrações das válvulas que vão ser apresentadas posteriormente foram tomadas das bibliotecas do programa computacional de AutoCAD.

5.1 Válvula tipo Portão

Seu mecanismo consiste num corpo interno (haste), o qual apresenta um deslocamento linear quando é acionado por um volante. Este dispositivo mecânico é utilizado para o bloqueio da vazão em tubulações de fluidos provenientes das indústrias químicas, petroquímicas e de saneamento, é empregado em processos onde a abertura e fechamento não são frequentes. Suas principais vantagens são: possui um ótimo custo/benefício; passagem desobstruída (quando é totalmente aberta) e permite o fluxo nos dois sentidos; usada em qualquer tipo de fluido. Na Fig. 6 se mostra a curva de fechamento para este tipo de válvula e uma ilustração da sua forma real.

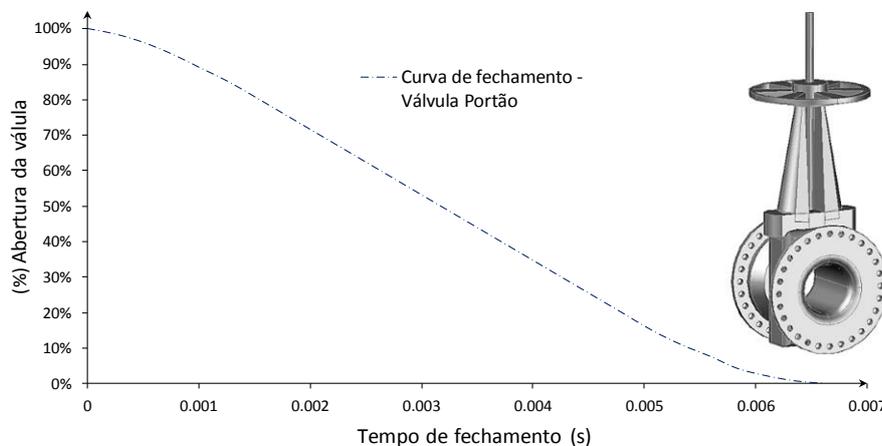


Figura 6. Válvula Portão e sua curva de fechamento (Gomez, 2015)

Na Figura 6 observa-se que este tipo de válvula permite uma abertura e um fechamento total (a porcentagem de abertura da válvula varia entre 0% e 100%), o comportamento da curva de fechamento é quase linear, esta apresenta leves inflexões na parte inicial e na parte final da mesma.

Os históricos das ondas transientes de pressão para dois tipos de fechamento súbito e válvula tipo portão) são expostos na Fig. 7.

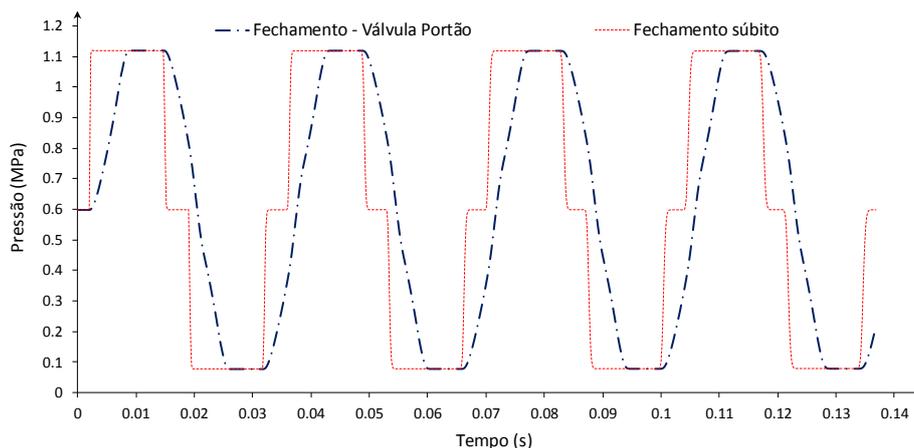


Figura 7. Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Portão

Na Figura 7 se observa que para o fechamento súbito se tem uma onda quadrada e para a onda gerada pelo fechamento com a válvula Portão se apresenta uma inclinação que está diretamente associada à forma do fechamento da válvula.

5.2 Válvula tipo Cone

Seu mecanismo consiste num obturador com forma esférica que permite o vazamento do fluido quando está totalmente alinhado com a tubulação, e bloqueia a passagem quando seu furo fica perpendicular ao sentido do fluxo. Este dispositivo mecânico é utilizado para o bloqueio ou abertura de vazão em tubulações de gases ou líquidos em condições de baixa ou alta pressão. Suas principais vantagens são a rápida abertura e fechamento, e possui uma perda de carga praticamente desprezível. Apresenta-se na Fig. 8 a curva de fechamento para este tipo de válvula e uma ilustração caracterizando a forma que esta pode ter na realidade.

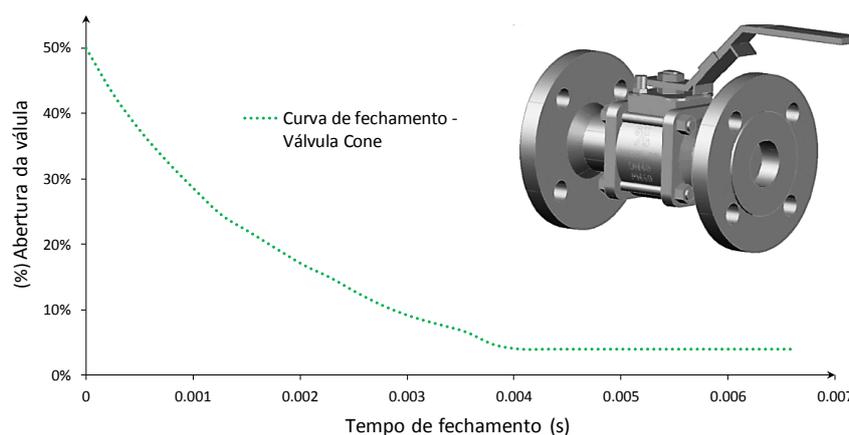


Figura 8. Válvula Cono e sua curva de fechamento (Gomez, 2015)

Na Figura 8 se observa que este tipo de válvula não permite uma abertura nem um fechamento total. O comportamento das curvas de fechamento é similar a uma curva descrita por uma parábola e no final apresenta uma assíntota que permite um pequeno vazamento.

A Figura 9 mostra o histórico das ondas transientes de pressão para o fechamento súbito e o fechamento com a válvula tipo Cone.

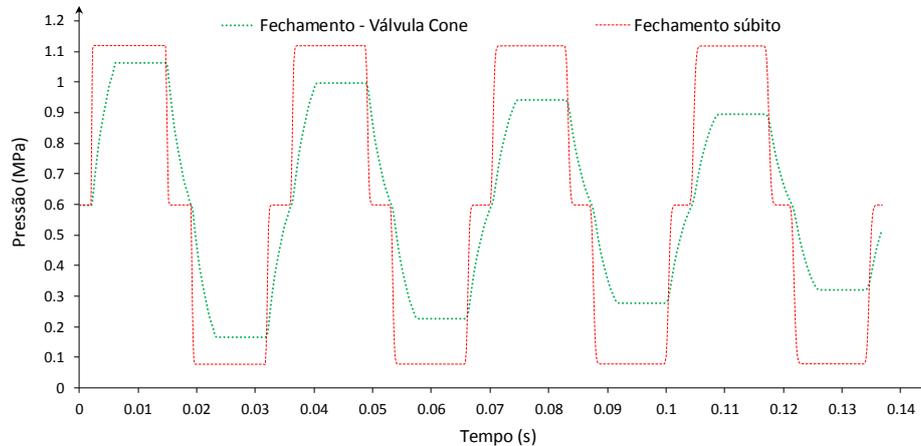


Figura 9. Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Cone

Nota-se na Figura 9 que a curva com o fechamento da válvula tipo Cone apresenta uma menor sobre pressão devido à uma menor variação na área de fechamento da mesma. Uma leve inflexão no ramo vertical das curvas evidencia o fato delas estarem diretamente relacionada com o tipo de fechamento, também se percebe uma maior atenuação das ondas de pressão aspecto que diminui a fadiga que pode ser gerada nos dutos do sistema.

5.3 Válvula tipo Borboleta

Seu mecanismo consiste num anel do mesmo tamanho da tubulação com um disco que gira dentro dele em torno de um eixo, o qual regula a passagem do fluido. Este dispositivo mecânico é utilizado para a regulagem de vazão ou pressão em tubulações de gases ou líquidos em condições de baixa pressão. Suas principais vantagens são a baixa perda da pressão, rápida ação e baixo custo. Num sistema hidráulico este tipo de válvula pode estar localizado na linha e/ou no final do sistema. Na Figura 10 se apresenta a curva de fechamento para este tipo de válvula e sua ilustração.

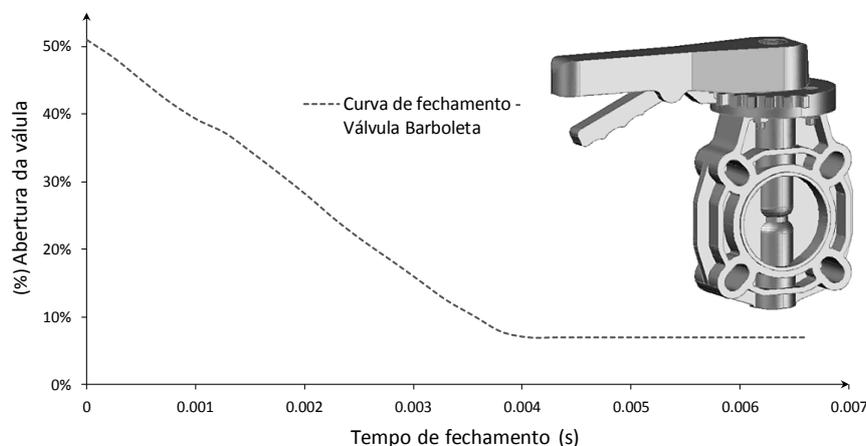


Figura 10. Válvula Borboleta e sua curva de fechamento (Gomez, 2015)

Infere-se da Fig. 10 que este tipo de válvula não permite uma abertura total. O comportamento da curva de fechamento é irregular, permitindo um vazamento residual, e produzindo desta forma uma menor variação na relação do percentual aberto para o fechado da válvula.

A Figura 11 ilustra o histórico das ondas transientes de pressão para o fechamento súbito e para a válvula tipo Borboleta.

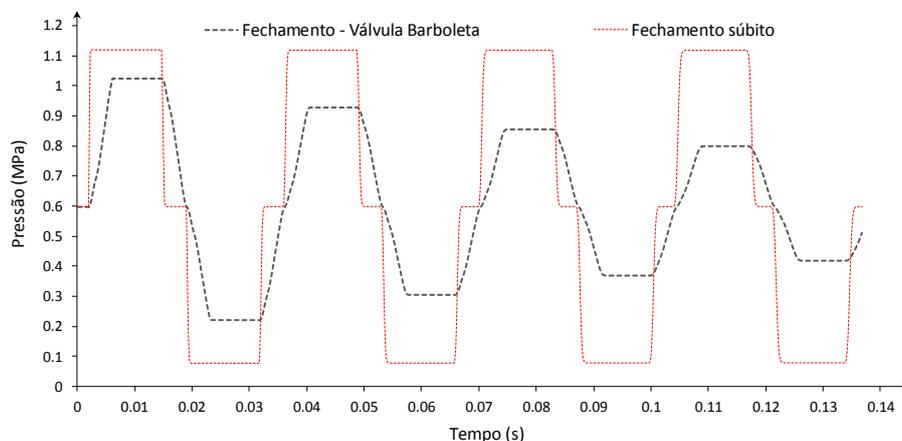


Figura 11. Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Borboleta

Analisando-se a Figura 11, observa-se que uma menor sobrepressão é produzida no sistema devido a uma menor variação da velocidade a causa do vazamento do fluido quando não se interrompe totalmente o fluxo.

5.4 Válvula tipo Howell-Bunger

Seu mecanismo consiste num tubo com um cone soldado na extremidade e na outra extremidade um duto atua como um obturador que se desliza linearmente no corpo pelos suportes até fazer contato com o cone para fechar a válvula. Este dispositivo mecânico é utilizado para a descarga de água com alta pressão proveniente de reservatórios ou condutos forçados na atmosfera. Suas principais vantagens são: o controle na descarga dos reservatórios; válvulas de fornecimento, e dissipação de energia sem sofrer cavitação ou vibração, entre outros. Na Fig. 12 se apresenta a curva de fechamento para este tipo de válvula e se faz uma ilustração dela.

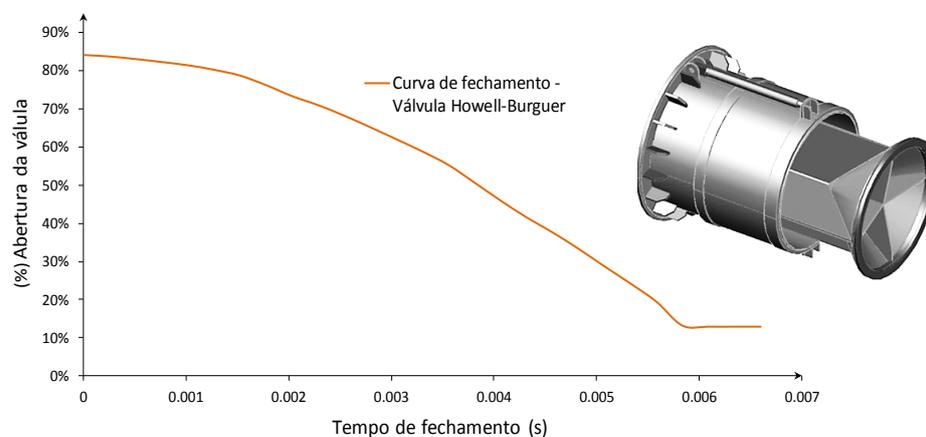


Figura 12. Válvula Howell-Burger e sua curva de fechamento (Gomez, 2015)

Observa-se a Figura 12 que este tipo de válvula também não permite uma abertura total da mesma. O comportamento da curva de fechamento permite um vazamento residual, produzindo desta forma uma menor variação na velocidade do escoamento no sistema, e conseqüentemente numa menor sobrepressão.

A Figura 13 mostra o histórico das ondas de pressão para dois tipos de fechamento: o súbito e aquele com a válvula tipo Howell-Bunger.

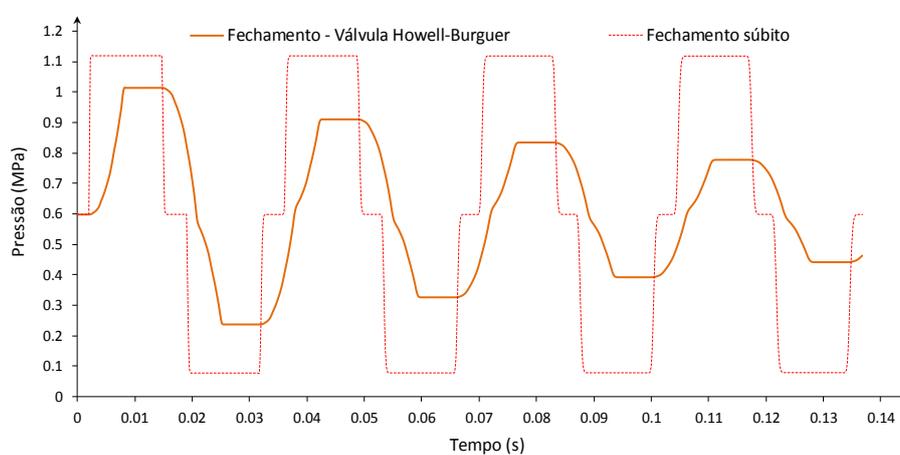


Figura 13. Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento súbito e o fechamento com a válvula Howell-Bunger

Observa-se pela Fig. 13 que a válvula Howell-Bunger apresenta diferente sobrepressão ao longo dos ciclos avaliados. Isto se deve ao fato dela apresentar um vazamento residual, que de certa forma atenua as ondas de pressão.

Na Figura 14 se apresentam as curvas de fechamento das válvulas utilizadas no trabalho com o objetivo de fazer uma comparação entre elas.

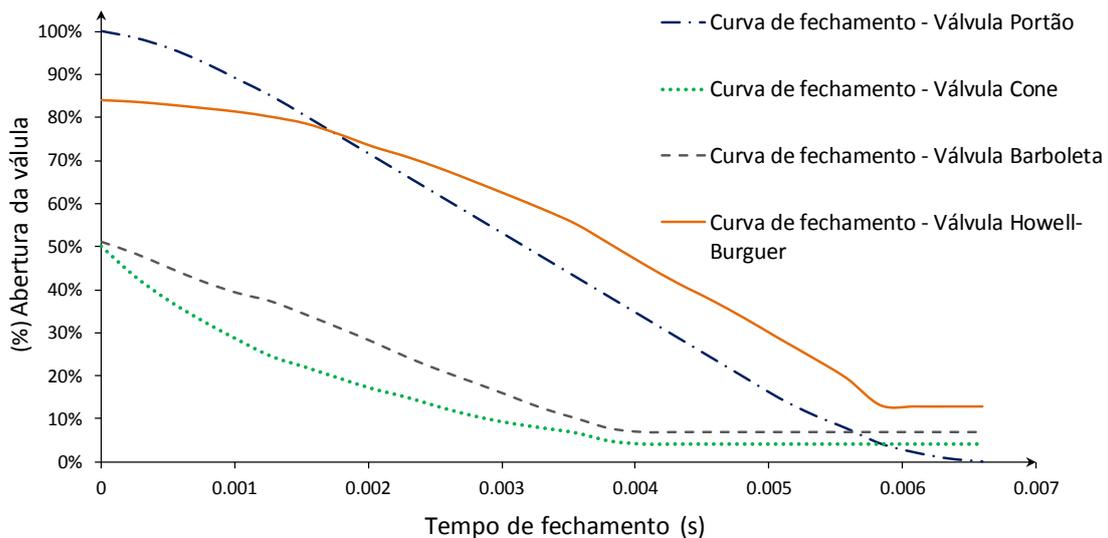


Figura 14. Curvas de fechamento de válvulas localizadas no final do sistema hidráulico

Na Figura 14 observa-se que a válvula tipo Portão é a única que permite uma abertura e um fechamento total, os outros tipos de válvulas só permitem uma abertura e fechamento parcial. Nota-se que a válvula tipo Howell-Burguer é a que permite maior vazamento (escoamento residual) no final de um determinado sistema hidráulico ou circuito tubular.

Na Figura 15 fez-se uma comparação no histórico das ondas transientes de pressão para os quatro tipos de válvulas localizadas no final do sistema.

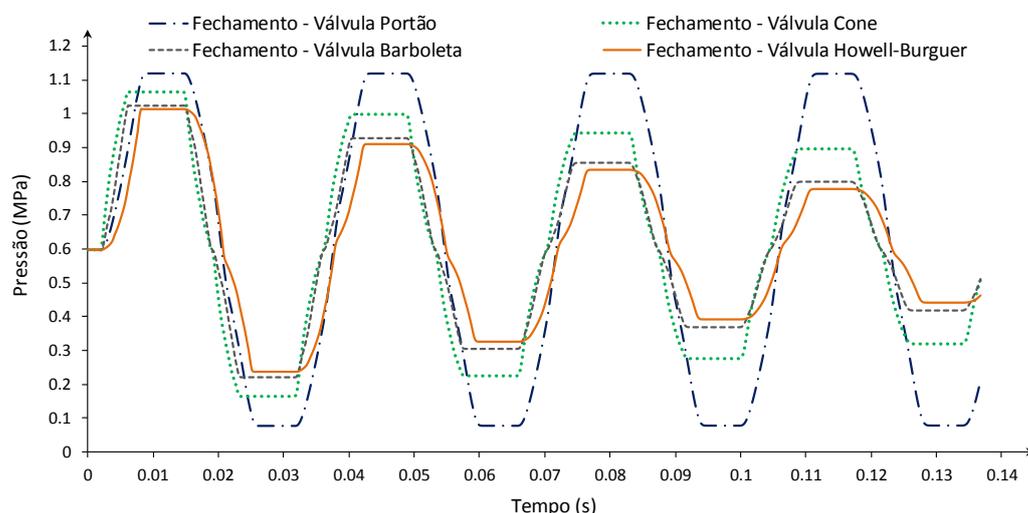


Figura 15. Comparação das ondas transientes de pressão geradas pelo fechamento das diferentes válvulas localizadas no final do sistema hidráulico

Pela Figura 15 observa-se que a única válvula que não permite a atenuação da onda de pressão, é a válvula tipo portão. Adicionalmente, esta apresenta um leve deslocamento horizontal, provocado pela forma da curva de fechamento. Os demais tipos de válvulas apresentam atenuação, mas a válvula tipo Howell-Burguer é a que mostra a maior atenuação ao longo do tempo, como ela não se fecha completamente, há um escoamento residual, e toda a onda que chega ao final do circuito, só parte dela é refletida. Assim há uma corte na onda principal a cada passagem pela extremidade do sistema e a menor sobrepressão.

6 CONCLUSÕES

De acordo aos resultados vistos pode-se concluir que a maior sobrepressão é produzida quando se tem um fechamento total da válvula sem levar em conta a forma da curva de fechamento, e a percentagem da abertura inicial.

O tipo de fechamento da válvula não apresenta uma grande influência no aumento da pressão do sistema. No entanto, as curvas de fechamento que se apresentam mais próximas ao fechamento súbito são as que proporcionam os maiores aumentos na pressão. Verifica-se que produzem apenas variações na forma da onda transiente de pressão, a qual depende da forma da curva de fechamento da válvula.

Nas simulações observa-se que a válvula Howell-Burguer localizada no final da linha principal do sistema hidráulico é a melhor para sistemas de usinas hidroelétricas devido que esta permite um vazamento pequeno em função de provocar uma transiente menor magnitude e uma maior atenuação das ondas transientes de pressão.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ, CAPES e à Universidade de Brasília através do Grupo de Dinâmica e Fluido-estrutura pelo apoio e incentivo à pesquisa.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allievi, L., 1903. Teoría del colpo d'ariete. Anais do collegio degli ingegneri ed architetti. milan.

Bratland, O., 2009. Pipe flow 1: single-phase flow assurance. Fonte: <http://www.drbratland.com/download-two-free-books-on-flow-assurance/>.

Bratland, O., 2013. Pipe flow 2: multi-phase flow assurance. Fonte: <http://www.drbratland.com/download-two-free-books-on-flow-assurance/>.

Brunone, B., 2000. Velocity profiles and un-steady pipe friction in transient flow. Journal Resources Planning and Management (asce). pages: 236-244.

Cruz, E., 2009. Acidente em Usina Hidrelétrica na Rússia. Trad e Adap: Gilson Cardoso.

Fontes, A. M., Lima, R. F., Bezerra, L. M., 2011. Determinação prática de fadiga em tubulação sob transiente fluído. XXXII Iberian-Latin Congresso Computational Methods in Engineering (CILAMCE – XXXII).

Gómez, W. H. V., Pedroso, L. J., Nascimento, C. M. B. M., 2014. Estudos parâmetros básicos que influenciam na resposta das pressões em escoamentos transientes. XXXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE – XXXV).

Gómez, W. H. V., 2015. Análise de parâmetros que afetam as respostas das pressões em escoamentos transientes. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.

Gómez, W. H. V., Pedroso, L. J., Mendes, N. B. 2015. Simulação de transientes de pressão em dutos de usinas hidroelétricas e nucleares pelo método das características. XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE – XXXVI).

Joukowsky, N., 1898. On the hydraulic hammer in water supply pipes. Memoires de l'académie imperiale des sciences de st.-petersbourg.

Magzoub, E., Kwame, A., 2007. Hydraulic transient in a pipeline. using computer model to calculate and simulate transient. Master Thesis. Lund university.

Nascimento, C. M. B., 2002. Estudo de transientes em dutos derivados de petróleo. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.

Neves, C.E.V., 2004. Estudos analíticos e numéricos de transientes e vibrações livres em adutoras de barragens”. Relatório Técnico de IC - Universidade de Brasília, GDFE.

Neri, L., Pedroso, L. J., 1999. Aspectos numéricos na avaliação de escoamentos transientes em tubulações. Relatório Técnico de Pesquisa - Universidade de Brasília, GDFE, 1999.

Pedroso, L. J., Barbosa, A. N., 1993. Ondas transientes em circuitos tubulares pressurizados: reflexões e amortecimentos. CILAMCE XIV; IPT-SP, pages: 812-821.

Pedroso, L. J., Brito, V. J. L., Barbosa, A. N., 1994. Trans – a computer code for the analysis of transients in nuclear reactors piping networks”. in: V General Conference on Nuclear Energy, Rio de Janeiro.

Pires, L. F. G., Barreto, C. V., Ladeia, R. C. C., 2004. Análise de transientes devido ao fechamento rápido de válvulas em dutos curtos. in: III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2004, Belém. Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.

SANTOS, F. O., 2010. Simulação de escoamentos transientes em dutos de transporte de líquido. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Silvove, K., 2007. Transient analysis in pipe networks. Master Thesis. Virginia Polytechnic Institute & State University.

Streeter, V., Wylie, E., 1967. Fluid transients. McGraw-Hill Company.