

Transientes em Adutoras de Barragens-Estudos de Casos

C. G. Rampinelli- UnB , A.N. Barbosa-UnB e L.J.Pedroso-UnB

Resumo- O presente trabalho caracteriza-se por uma síntese de estudos anteriormente realizados relacionados ao estudo de escoamentos transitórios em adutoras. Resultados obtidos a partir de rotinas computacionais implementadas serão confrontados com casos da literatura e simulações em softwares desenvolvidos pelo grupo. Serão analisados os efeitos produzidos sobre escoamentos advindos de fechamento de válvulas, mudanças de diâmetros e situações indutoras de transientes. Os casos foram simulados com auxílio do programa TRANSPETRO e algumas rotinas computacionais ainda em fase de implementação, permitindo a verificação da pressão e velocidade ao longo da tubulação. As análises realizadas com o auxílio de métodos numéricos, das rotinas implementadas e do programa TRANSPETRO corresponderam às tendências esperadas.

Palavras-chave—Adutoras, Golpe de Aríete, Transientes Hidráulicos, Tubulações.

I. INTRODUÇÃO

A segurança de circuitos tubulares pressurizados de petróleo, de usinas nucleares, de instalações industriais, adutoras de barragens, entre outros sistemas que comportam fluidos sob pressão, necessita do conhecimento de certo número de fenômenos acidentais. Dessa forma, fechamento de válvulas para controle de escoamento, ruptura de tubulações, danificações de bombas, sismos, alterações de diâmetro, manutenção de sistemas, manobras de rotina, entre outras operações podem alterar as condições de fluxo do circuito gerando fenômenos transitórios danificando componentes tais como reatores nucleares, bombas, turbinas, válvulas e outros componentes, podendo causar graves acidentes além de grandes prejuízos.

A análise de fenômenos hidráulicos com condições de escoamento variáveis ou transientes envolve uma complexidade maior do que aquela relativa a regimes de escoamentos permanentes. O uso de métodos numéricos bem como o de rotinas computacionais para o estudo de fenômenos dessa natureza é uma ferramenta importante para avaliar a propagação de ondas transientes ao longo de condutos submetidos a escoamentos pressurizados.

Os autores agradecem à ELETRONORTE e ao CNPq pelos recursos materiais (equipamentos) e financeiros (bolsas) colocados à disposição desta pesquisa.

C. G. Rampinelli é aluno de Iniciação Científica na Universidade de Brasília (e-mail: cassiorampinelli@yahoo.com.br).

L.J. Pedroso é professor no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília e coordenador do projeto METAHIDRO-UnB/ELETRONORTE. (e-mail: lineu@unb.br).

Três equações básicas são fundamentais para modelar o problema: Equação da Continuidade, Equação da Quantidade de Movimento e Equação de Estado. Essas equações podem ser manipuladas e adaptadas a cada tipo de problema em análise. O método das Características é utilizado para transformar as equações diferenciais parciais em equações diferenciais ordinárias.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentadas as equações clássicas que descrevem o movimento transitório: Equação da Quantidade de Movimento e Equação da Continuidade. Essas equações possuem como variáveis dependentes pressão e velocidade e como variáveis independentes o tempo e o espaço.

A. Equação da Quantidade de Movimento

Considerando as forças atuantes ao longo do eixo de um tubo genérico aplica-se a segunda lei de Newton obtendo-se a equação abaixo:

$$L_1 = V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad (1)$$

Onde:

V- Velocidade de escoamento; P- Pressão; x- Posição ao longo do conduto; t- Tempo; f- Fator de atrito; D- Diâmetro do conduto; g- Aceleração da gravidade; θ - Ângulo de inclinação do conduto em relação ao eixo horizontal.

B. Equação da Continuidade

A partir da lei de conservação da massa obtém-se a equação apresentada a seguir:

$$L_2 = \frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Onde:

V- Velocidade de escoamento; P-Pressão; x-Posição ao longo do conduto; t- Tempo; ρ - Massa Específica do fluido; a- Velocidade de Propagação da Onda do Som no Meio.

C. Método das Características

As equações 1 e 2 são convertidas em equações diferenciais ordinárias que são então solucionadas pelo método das diferenças finitas. Combinando as equações 1 e 2 a partir de um multiplicador λ , obtém-se quatro equações características:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + g \operatorname{sen} \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V + a \end{aligned} \right\} a^+ \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dt} - \frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + g \operatorname{sen} \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V - a \end{aligned} \right\} a^- \quad (4)$$

A partir das quatro equações características apresentadas acima, é possível a solução do sistema de equações obtendo-se os valores de pressão e velocidade ao longo do tempo e posição no conduto.

$$V_P = \frac{1}{2} \left[V_R + V_S + \frac{1}{\rho a} (P_R - P_S) - 2\Delta t g \operatorname{sen} \theta - \frac{f \Delta t}{2D} (V_R |V_R| + V_S |V_S|) \right] \quad (5)$$

$$P_P = \frac{1}{2} \left[P_R + P_S + \rho a (V_R - V_S) - \rho a \frac{f \Delta t}{2D} (V_R |V_R| - V_S |V_S|) \right] \quad (6)$$

Essa solução pode ser visualizada a partir de um diagrama clássico que relaciona o tempo e a posição no conduto:

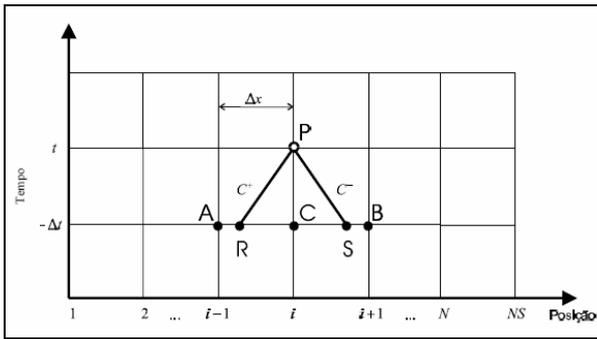


Figura 1. Diagrama clássico para o método das diferenças finitas.

D. Condições de Contorno

A partir das equações apresentadas, condições de contorno entre os tubos podem ser avaliadas. Uma notação em índices duplos será apresentada, onde o primeiro índice se refere ao número do tubo e o segundo a seção do tubo. A seguir serão apresentadas as condições de contorno consideradas.

E. Reservatório de Nível Fixo

A pressão na extremidade inicial do conduto é considerada constante em função da manutenção da altura da coluna de fluido na entrada do tubo-conexão tubo-reservatório.

$$V_{P_{j,0}} = C_1 + C_2 P_0 \quad (7)$$

$$P_{P_{j,0}} = P_0 \quad (8)$$

Em que C_1 e C_2 são constantes recalculadas a cada passo de tempo dadas por:

$$C_1 = V_{S_j} - \frac{1}{\rho a} P_{S_j} - g \operatorname{sen} \theta \Delta t - \frac{f_j V_{S_j} |V_{S_j}|}{2D_j} \Delta t \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{1}{\rho a} \quad (10)$$

F. Reservatório de Nível Variável

Levando em conta uma variação da pressão de forma periódica na extremidade inicial da tubulação, a oscilação da pressão pode ser expressa por:

$$P_{P_{j,0}} = P_0 + \overline{P_0} [\operatorname{sen}(\omega t)] \quad (11)$$

$$V_{P_{j,0}} = C_1 + C_2 (P_0 + \overline{P_0} [\operatorname{sen}(\omega t)]) \quad (12)$$

Onde:

P_0 - Pressão inicial no reservatório; $\overline{P_0}$ - Amplitude da pressão; ω - Frequência angular da variação de pressão.

G. Válvula na Extremidade da Tubulação

Considerando o caso de válvula instalada em uma seção N de um conduto, a velocidade de escoamento será função da curva de fechamento da válvula. A velocidade de escoamento é dada por:

$$V_{PP_{j,N}} = \frac{C_5}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 4C_3 \frac{1}{C_5}} \right) \quad (13)$$

Onde:

$$C_3 = V_{R_j} + \frac{1}{\rho a} P_{R_j} - g \operatorname{sen} \theta \Delta t - \frac{f_j V_{R_j} |V_{R_j}|}{2D_j} \Delta t \quad (14)$$

$$\frac{1}{C_5} = \left(\frac{P_0 C_4}{\tau^2 V_{0j}^2} \right) \quad (15)$$

$$\tau = \left(\frac{C_d A_G}{(C_d A_G)_0} \right) \quad (16)$$

A pressão na seção N pode ser obtida pela expressão:

$$V_{PP_{j,N}} = C_3 + C_4 P_{P_{j,N}} \quad (17)$$

Onde:

$$C_4 = \frac{1}{\rho a} \quad (18)$$

H. Mudança de Diâmetro

A mudança de diâmetro pode ser entendida como uma condição de contorno entre dois tubos. Sendo o tubo j o anterior e o tubo j+1 o seguinte a configuração genérica para esse caso pode ser visualizada na figura a seguir:

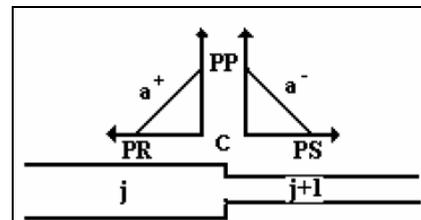


Figura 2. Condição de contorno entre tubos [11].

Como a vazão deve ser equivalente em ambos os tubos, as velocidades podem ser relacionadas a partir da equação:

$$(V_{P_{j,N}})A_j = (V_{P_{(j+1),0}})A_{j+1} \quad (19)$$

Considerado o caso de não haver perda singular entre as conexões dos dutos a pressão no ponto de junção deve ser a mesma:

$$P_{P_{j,N}} = P_{P_{(j+1),0}} \quad (20)$$

Dessa forma, após algumas manipulações algébricas obtém-se a expressão:

$$P_{P_{j,N}} = \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1} + C_4 A_j} \quad (21)$$

Em que as constantes C_1 , C_2 , C_3 e C_4 foram definidas anteriormente.

III. FENOMENOLOGIA

O efeito de propagação de ondas de pressão e velocidade geradas ocasionalmente por rupturas de condutos, abertura ou fechamento de válvulas, pode ser compreendido, em linhas gerais, a partir de um caso particular que consiste na obstrução abrupta de um conduto forçado causando um retardamento no escoamento do fluido ao longo da tubulação. O fechamento rápido de uma válvula interrompe brusca-mente o escoamento gerando ondas de pressão e velocidade transitórias que se propagam por todo o conduto.

Para facilitar a análise do problema, as etapas sucessivas dos eventos que ocorrem após o fechamento repentino da válvula serão apresentadas para um caso relativamente simples. Considera-se inicialmente regime de escoamento permanente ao longo de uma tubulação horizontal e retilínea, de comprimento L , acoplada a um reservatório. Esse escoamento transporta uma vazão inicial com velocidade média V_0 . Em um instante de tempo $t=t_0$, ocorre o fechamento total e instantâneo da válvula acoplada à extremidade da tubulação. A figura a seguir esquematiza a situação para o instante inicial, imediatamente antes do fechamento da válvula.

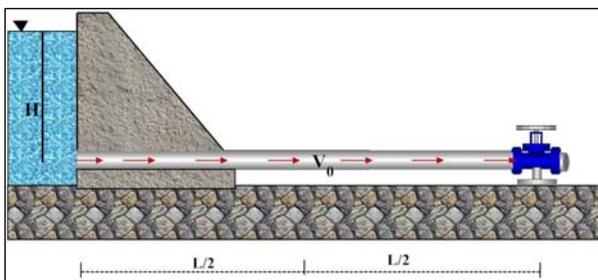


Figura 3. Instante inicial imediatamente antes do fechamento de válvula.

Neste instante, o fluido que se encontra diretamente em contato com a válvula é imediatamente freado e comprimido, distendendo as paredes do conduto. O quadro torna-se relativamente complexo, uma vez que parte do sistema encontra-se parado, enquanto o fluido localizado mais a montante da tubulação continua escoando em direção a válvula. Dessa forma, a camada junto ao obturador ao ser comprimida sofre um acréscimo de pressão ΔP . Esse aumento de

pressão se propaga ao longo da tubulação por meio de uma onda de compressão. Considerando a velocidade de propagação da onda (a), no instante de tempo $t=t_0+L/2a$, a onda de compressão atinge metade da tubulação. No instante de tempo t_0+L/a a onda terá percorrido todo o conduto.

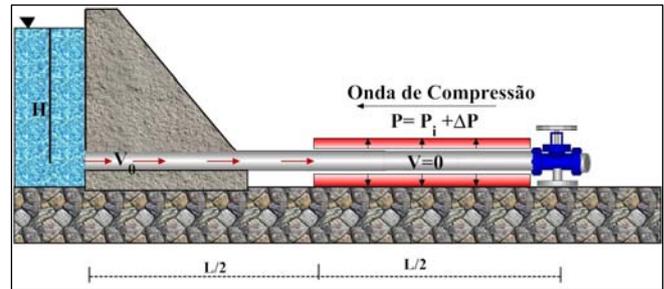


Figura 4. Instante $t=t_0+L/2a$

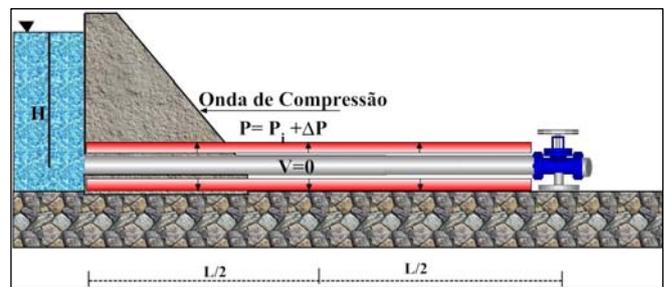


Figura 5. Instante $t=t_0+L/a$

Quando a onda de compressão percorre todo o conduto e atinge o reservatório, no instante $t=t_0+L/a$, ocorre uma situação de desequilíbrio no ponto de interface entre o reservatório e o tubo. A pressão no reservatório não se altera, entretanto, a pressão no conduto encontra-se incrementada de ΔP . Em virtude da diferença de pressões, o fluxo do fluido inverte seu sentido e começa a migrar em direção ao reservatório, da região de maior pressão para a de menor pressão. Esse escoamento alivia a pressão até o valor normal reinante antes do fechamento.

No instante $t=t_0+3L/2a$, o alívio de pressão atinge a metade da tubulação. No instante $t=t_0+2L/a$ o alívio de pressão alcança a válvula, a pressão ao longo de todo o conduto volta ao valor inicial e a velocidade ao longo de todos os pontos equivale em módulo ao valor inicial, porém em sentido contrário.

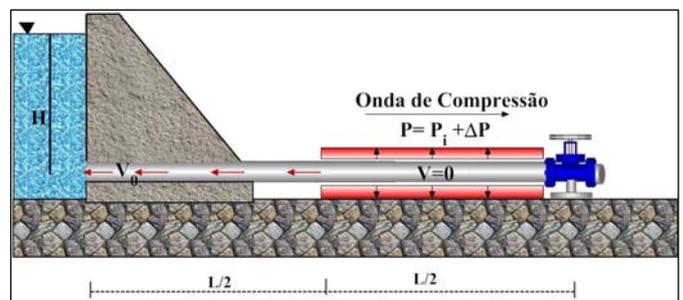


Figura 6. Instante $t=t_0+3L/2a$

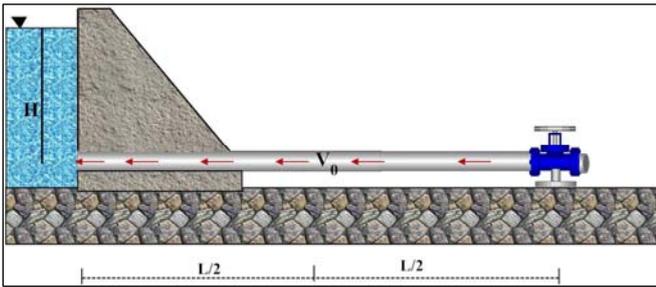


Figura 7. Instante $t=t_0+2L/a$

Estando a válvula fechada não há fluido para manter o escoamento na seção da válvula e uma baixa pressão se desenvolve de tal modo a parar o fluido. Essa onda de baixa pressão avança para montante à velocidade (a) , paralisa o fluido, ocasiona a sua expansão em virtude da pressão mais baixa e permite que a parede do conduto se contraia. (Se a pressão estática no conduto não for suficiente para conservar a carga acima da pressão de vapor, o líquido se vaporizará parcialmente e continuará a mover-se durante um período de tempo mais longo).

No instante de tempo $t=t_0+5L/2a$, a onda de baixa pressão atinge metade da tubulação. A descompressão alcança o encontro do conduto com o reservatório no instante $3L/a$.

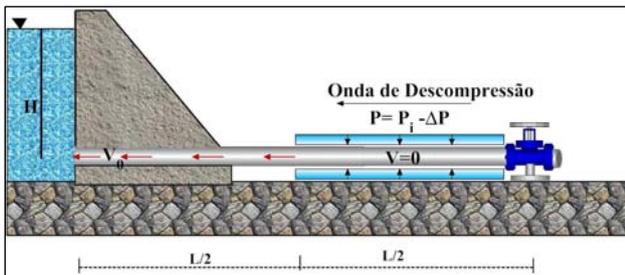


Figura 8. Instante $t=t_0+5L/2a$

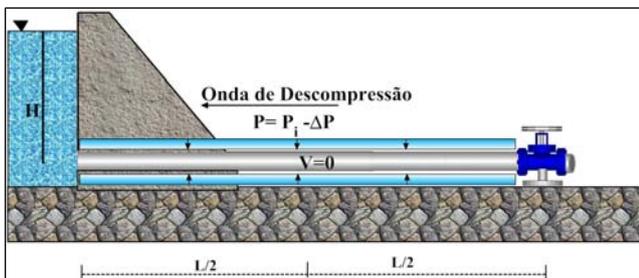


Figura 9. Instante $t=t_0+3L/a$

No instante em que a onda de baixa pressão atinge a extremidade do conduto localizada na interface conduto-reservatório, instaura-se novamente uma situação de desequilíbrio. O líquido dentro da tubulação encontra-se em repouso e com uma pressão menor do que a pressão no ponto do reservatório localizado no mesmo nível do conduto. Devido a diferença de pressões, inicia-se o movimento do fluido em direção ao conduto, adquirindo a velocidade de escoamento inicial, retornando o conduto as condições iniciais.

O instante $t=t_0+7L/2a$ marca o momento em que as condições iniciais foram restabelecidas até metade da tubulação em sentido jusante. No momento $t=t_0+4L/a$ as condições iniciais são restabelecidas ao longo de toda a tubulação e o ciclo se reinicia. Se não houvesse perdas o fluido permaneceria nessa movimentação indefinidamente. Esse fenômeno

é, portanto, periódico, com período de $4L/a$ e formado por ondas de pressão e descompressão que se alternam até que haja o amortecimento total na propagação das ondas.

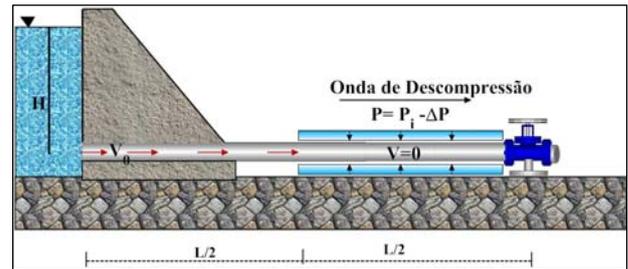


Figura 10. Instante $t=t_0+7L/2a$

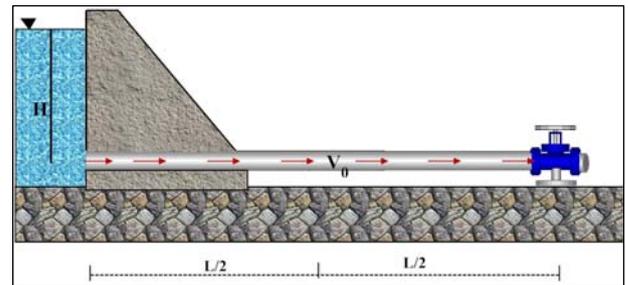


Figura 11. Instante $t=t_0+4L/a$

A figura abaixo mostra uma curva genérica da pressão em função do tempo para um ponto situado junta à válvula, considerando o caso exemplificado:

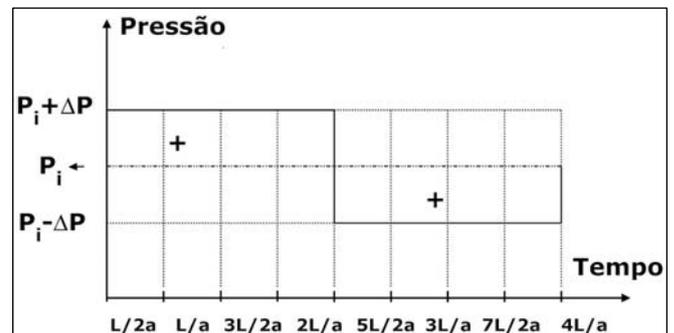


Figura 12. Curva pressão em função do tempo para um ponto na válvula

IV. RESULTADOS

Este tópico apresenta simulações desenvolvidas no programa TRANSPETRO e a partir das rotinas computacionais implementadas. O caso com tubulações de diferentes diâmetros foi avaliado apenas com o programa TRANSPETRO. Dentre as situações indutoras de transientes avaliadas neste trabalho estão: fechamento de válvulas (instantâneo, linear e parabólico), alterações de diâmetro e situações indutoras de ressonância para as condições de nível do reservatório variável à montante e extremidade final de jusante fechada.

A. Fechamento de Válvulas

As simulações serão desenvolvidas em sistemas referências. Para o caso de fechamento de válvulas, o modelo padronizado é semelhante ao apresentado na figura 3. Os parâmetros de entrada são apresentados na tabela a seguir:

TABELA I
PARÂMETROS GERAIS DE ENTRADA

g (m/s)	P_0 (Pa)	ρ (Kg/m ³)
9,81	98100 (10m.c.a)	1000

TABELA II
PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO CONDUITO

L(m)	D(m)	f	a (m/s)	NS
10	0,1	0,019	1500	50

NS-Número de seções computacionais

B. Fechamento Instantâneo

O primeiro caso simulado consiste no fechamento instantâneo de válvula. O tempo de fechamento da válvula, portanto, é aproximadamente 0 s. A seção de análise é considerada na válvula, ou seja na extremidade final do conduto, na seção 50 (x=10m).

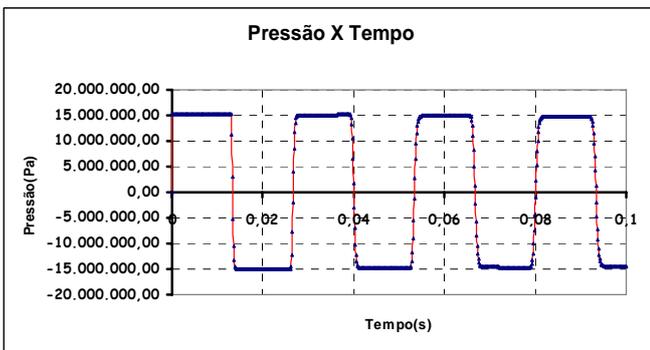


Figura 13: Curva: Pressão X Tempo- Rotina implementada

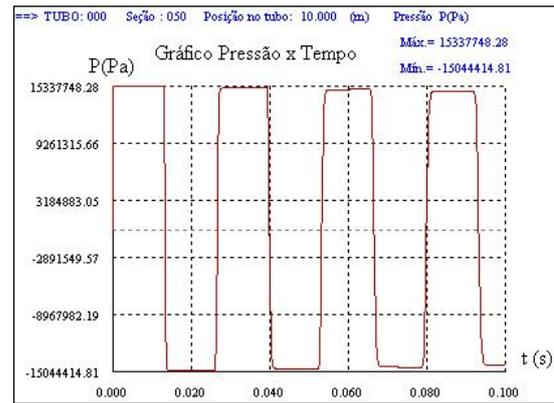


Figura 16: Curva: Pressão X Tempo- TRANSPEYRO

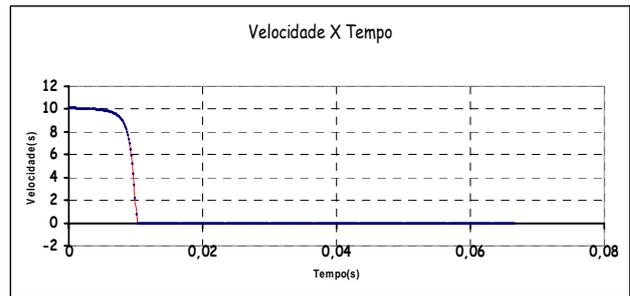


Figura 17: Curva: Velocidade X Tempo- Rotina Implementada

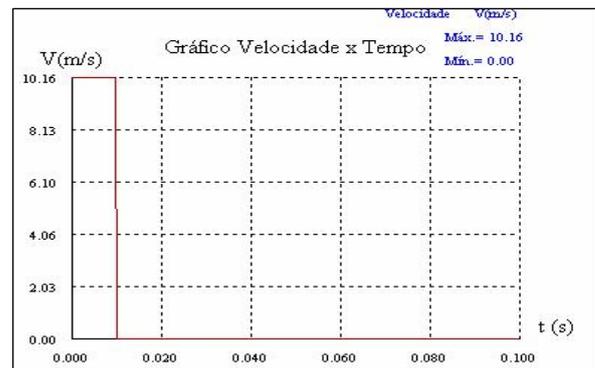


Figura 18: Curva: Velocidade X Tempo- TRANSPEYRO

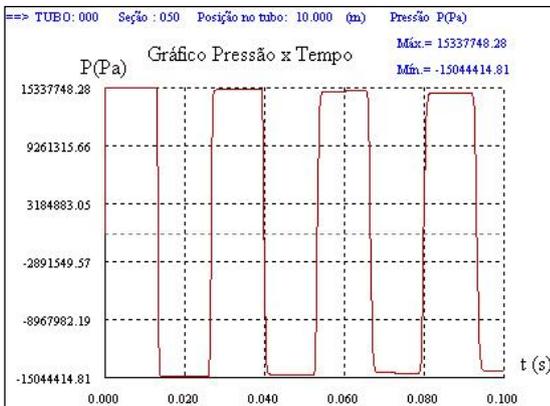


Figura 14: Curva: Pressão X Tempo- TRANSPEYRO

D. Fechamento Parabólico

Para esse caso, o tempo de fechamento da válvula foi mantido de 0,01s, assim como a seção de análise (na válvula), entretanto, o a curva de fechamento foi admitida parabólica do segundo grau.

C. Fechamento Linear

Para esse caso, o tempo de fechamento da válvula foi de 0,01s a curva de fechamento foi tomada como linear.

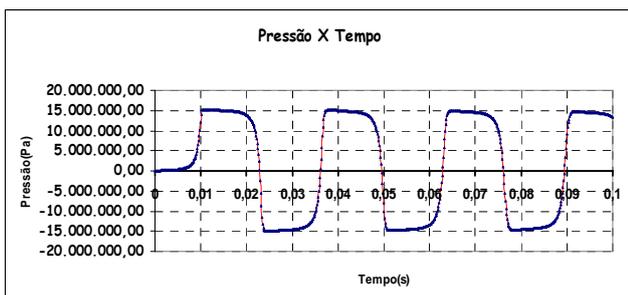


Figura 15: Curva: Pressão X Tempo- Rotina implementada

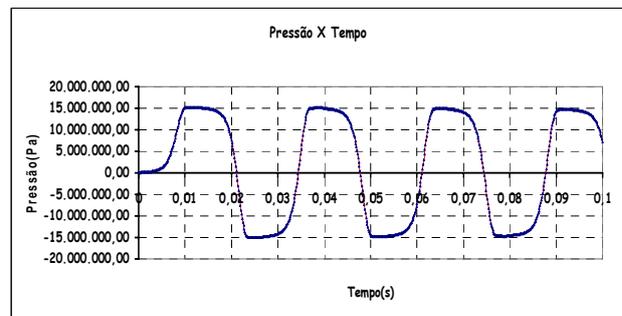


Figura 19: Curva: Pressão X Tempo- Rotina implementada

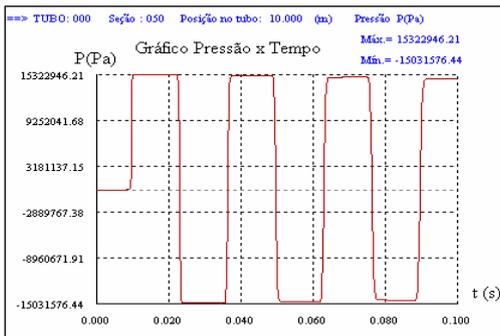


Figura 20: Curva: Pressão X Tempo- TRANSPETRO

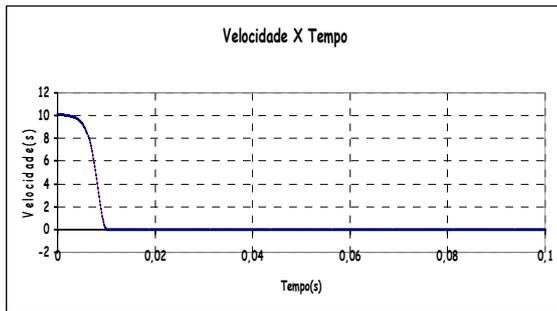


Figura 21: Curva: Velocidade X Tempo- Rotina implementada

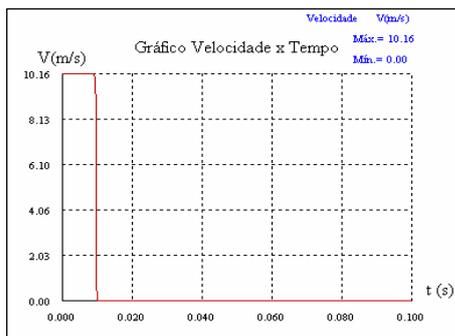


Figura 22: Curva: Velocidade X Tempo- TRANSPETRO

Considerando as curvas apresentadas percebeu-se uma adequada correspondência entre valores e curvas para o caso de fechamento instantâneo. Entretanto, para os casos de fechamento linear e parabólico, apesar das amplitudes de pressão se corresponderem, o formato das curvas não foi coincidente. As curvas mostradas para as rotinas propostas apresentaram um certo abaulamento dos picos de pressão e concavidades para as curvas de velocidade conforme o esperado. Porém, os resultados gerados pelo TRANSPETRO considerando as mesmas curvas apresentaram picos de pressão em formato retangular assim como as curvas de velocidade. Essas quinças observadas não eram esperadas para esses tipos de fechamento, indicando a possibilidade de problemas com aproximações numéricas no TRANSPETRO ou defeitos de plotagem de gráficos no software.

E. Análise de Ressonância

Para análise de ressonância as condições de contorno foram alteradas e o comprimento do tubo considerado foi de 200m. O reservatório à montante foi tomado com nível variável e a extremidade de jusante fechada. A amplitude de variação de pressão foi de $P=30 \times 10^3$ e oscilou em torno de um valor inicial de 1000×10^3 . A frequência angular de exci-

tação foi de $\omega=11,78097$ rad/s equivalente à 1,875Hz ($f=\omega/4L$) para o primeiro harmônico. A seção de análise foi adotada na extremidade final do conduto

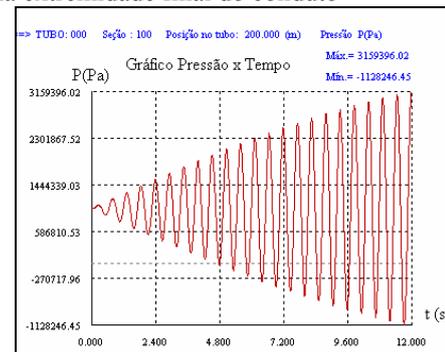


Figura 23: Curva: Pressão X Tempo- TRANSPETRO

O fenômeno da ressonância indica a ocorrência de transferência contínua de energia da fonte para o sistema, cuja amplitude de vibração vai aumentando. Esse aumento ocorre até o instante em que a energia dissipada por eventuais amortecimentos e outras perdas passa a equivaler à energia fornecida pela fonte. Dessa forma, com o passar do tempo, os incrementos que ocorrem nos valores de pressão e velocidade vão se reduzindo até se tornarem insignificantes. A partir desse ponto, os picos de pressão e velocidade se estabilizam.

Para simulação a partir das rotinas implementadas considerou-se o comprimento do tubo de 10m. A frequência angular de vibração adotada foi de $\omega=235,62$ rad/s, equivalente a $f= 37,5$ Hz ($f=\omega/4L$), frequência natural de vibração do sistema. O valor de P_0 foi admitido como 98100 Pa (10m.c.a). Na figura 24 apresenta-se a ocorrência da ressonância para o caso citado.

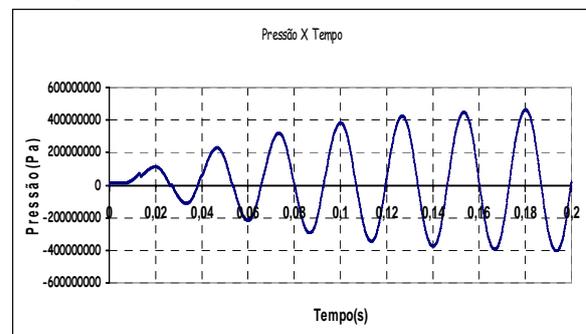


Figura 24: Curva: Pressão X Tempo- Rotina implementada

F. Mudança de Diâmetro

Considerando o caso de alteração de diâmetro o sistema referência consiste em uma tubulação horizontal e retilínea, composta por dois trechos, tubo 1 com $L_1=20$ m, e tubo 2 com $L_2=30$ m. Em um instante $t=t_0$ inicia-se o fechamento da válvula, adotado para este caso com 0,05s. O modelo adotado é mostrado na figura a seguir:

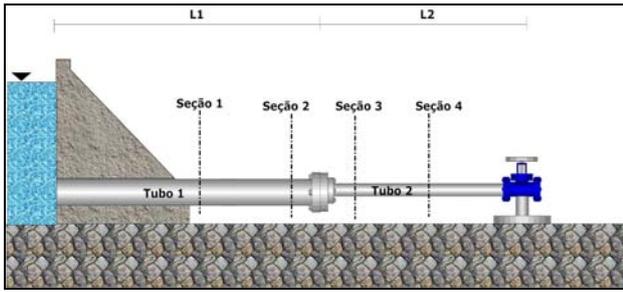


Figura 25: Modelo para alteração de diâmetro

Considerando os diâmetro dos condutos, o primeiro trecho permanecerá com diâmetro fixo, $D1=0,40$, para todos os casos analisados. A mudança de diâmetro será verificada alterando o diâmetro do tubo 2 ($D2$), de tal forma que a razão $\sigma=D2/D1$, apresente os seguintes valores: 0,5 e 0,01. A tabela abaixo relaciona os casos que serão estudados:

TABELA III
PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO CONDUTO

Casos:	D1(m)	D2(m)	$\sigma=D2/D1$
1	0,40	0,2	0,5
2	0,40	0,04	0,01

TABELA IV
PARÂMETROS GERAIS DE ENTRADA

g (m/s)	ρ_0 (Pa)	ρ (Kg/m ³)
9,81	784800	1000

TABELA V
PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO CONDUTO 1

L1(m)	D1(m)	f	a (m/s)	NS
20	0,4	0,019	1500	50

TABELA VI
TEMPO E TIPO DE FECHAMENTO

Tempo fechamento de válvula (s)	Tipo de fechamento
0,05	Linear

TABELA VII
PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO CONDUTO 2

L2(m)	D2(m)	f	a (m/s)
30	D2	0,019	1500

TABELA VIII
SEÇÕES DE ANÁLISE

Seção de Análise	Posição (m)
Seção 1	10,00
Seção 2	19,60
Seção 3	20,39
Seção 4	35,00

As seções de análise para o primeiro tubo localizam-se na metade da tubulação $x=10$ m e a 40cm antes do ponto de mudança de diâmetro, $x=19,60$ m (tomando como referência a primeira seção de montante). No segundo tubo as seções de análise localizam-se a 39cm após o ponto de junção dos tubos, $x=20,39$ m e na metade da segunda tubulação, $x=35,00$ m.

Para o primeiro caso, a razão $\sigma=0,5$ indica que o tubo 2 foi considerado com diâmetro de 0,2m.

A avaliação dos gráficos de pressão e velocidade mostrados abaixo apresenta uma perturbação na propagação da onda de pressão. A modificação do diâmetro é ponto adicional de reflexão parcial interna ao conduto. Essas reflexões provocam interferências nas frentes de onda e podem originar pontos de interferência construtiva ou destrutiva. A onda ao chegar ao ponto de mudança de diâmetro apresenta uma parte transmitida e outra parte refletida criando um efeito de corte na pressão.

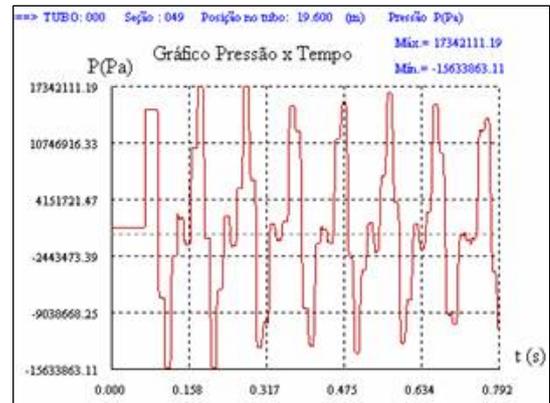


Figura 26: Pressão para seção 2-TRANSPETRO

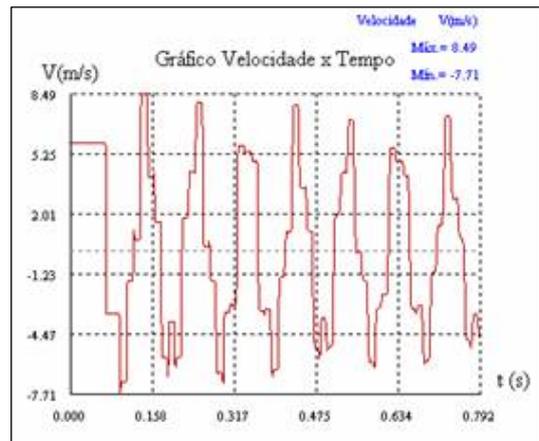


Figura 27: Velocidade para seção 2-TRANSPETRO

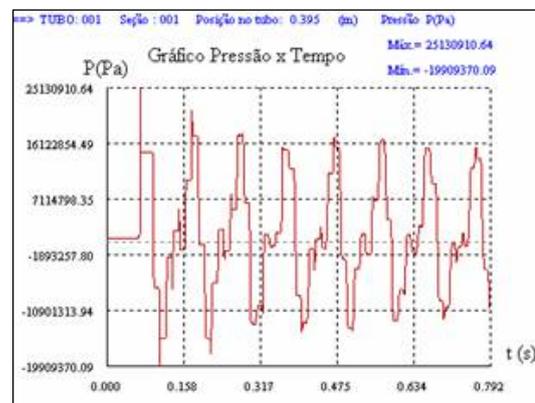


Figura 28: Pressão para seção 3-TRANSPETRO

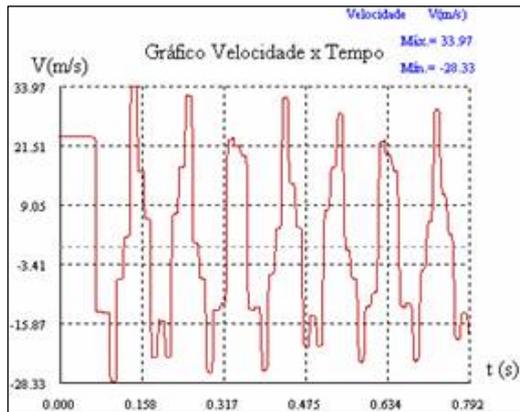


Figura 29: Velocidade para seção 3

Para o segundo caso considerou-se $\sigma=0,01$, utilizando-se para o diâmetro do segundo tubo 0,004m. Avaliando-se os resultados obtidos, se for considerado um mesmo intervalo de análise, percebe-se que o número de picos de pressão para este caso de alteração de diâmetro é maior que o verificado no primeiro, devido a maior influência das reflexões causadas pela diferença mais acentuada entre os diâmetros dos dois tubos. Considerando os valores máximos de pressão obtidos para os casos de alteração de diâmetro, constata-se que o primeiro caso, no qual a relação de diâmetros foi de 0,5, apresentou os maiores valores.

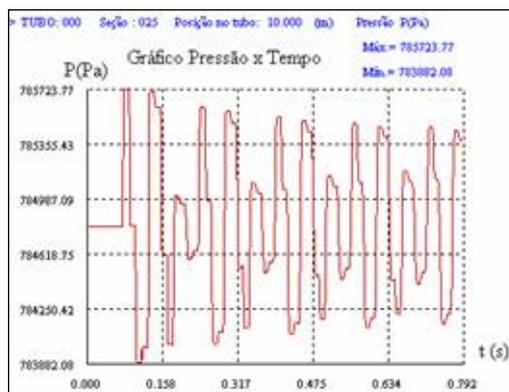


Figura 30: Pressão para seção 1

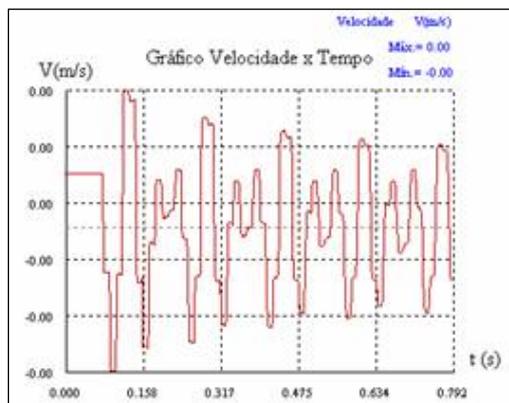


Figura 31: Velocidade para seção 1

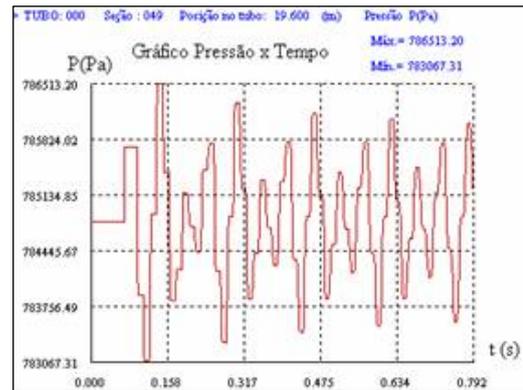


Figura 32: Pressão para seção 2

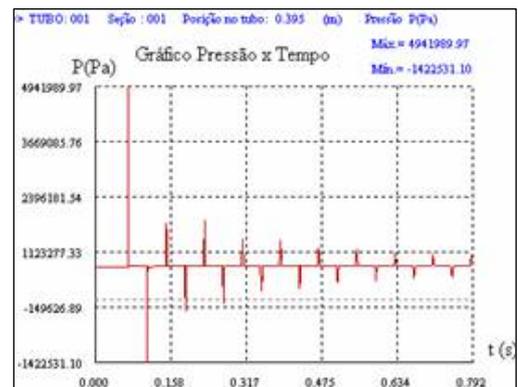


Figura 33: Pressão para seção 3

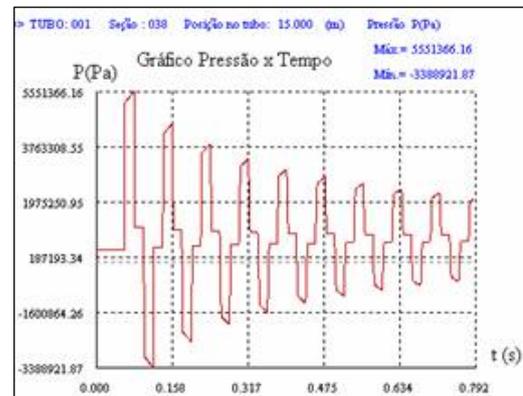


Figura 34: Pressão para seção 4

V. ANGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições do pesquisador André Nascimento Barbosa, recebidas ao longo da elaboração deste trabalho.

VI. CONCLUSÕES

A partir de simulações efetuadas com auxílio do programa TRANSPETRO e de rotinas computacionais desenvolvidas, a pressão e velocidade do escoamento do fluido foram avaliadas em determinadas seções, considerando diversas situações indutoras de transientes.

A influência sobre a pressão e a velocidade foi verificada para fechamentos de válvula: instantâneo, linear e parabólico, alterações de diâmetros e variadas condições de contorno. Curvas de pressão e velocidade foram traçadas facilitando a confrontação dos resultados.

O caso de nível de água a montante oscilante e extremi-

dade fechada mostrou-se interessante para detecção preliminar dos harmônicos naturais do sistema.

Constatou-se que a mudança de diâmetro introduz alterações consideráveis na resposta dinâmica do sistema. Apesar das simplificações impostas aos modelos, percebeu-se relativa correspondência entre os resultados obtidos e as tendências esperadas. A diferença entre as curvas de pressão e velocidade fornecidas pelo TRANSPETRO e as geradas pelas rotinas implementadas indicam a necessidade de estudos mais aprofundados e simulações de vários casos para confrontação de resultados a apuração das eventuais diferenças.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros:

- [1] M.C. Potter, e D.C.Wiggert. *Mecânica dos Fluidos*. Pioneira Thomson Learning LTDA, 2004.
- [2] V.L. Streeter e E.B. Wylie. *Mecânica dos Fluidos*. 7ª ed. McGraw-Hill, 1982.
- [3] F. M. White. *Mecânica dos Fluidos*. 4ª ed. McGraw-Hill, 2002.
- [4] E.B. Whyle, V.L. Streeter e L. Suo. *Fluid Transients in Systems*. Prentice Hall, 1997.
- [5] A.R.D.Thorley. *Fluid Transients in Pipeline Systems*. American Society of Mechanical Engineers. 2ª ed, 2004.

Relatórios Técnicos:

- [6] T. L. Pimenta e L. J. Pedroso, "Estudo de Transientes em Engenharia de Barragens-Adutoras e Estruturas de Barramento" UnB/ENC, Brasília, DF, Relatório Técnico de IC. 2004/2005.
- [7] L. J. L. Néri e L.J.Pedroso, "Aspectos Numéricos Na Avaliação de escoamentos Transientes em Tubulações", UnB/ENC, Brasília, DF, Relatório Técnico de IC. 1999.
- [8] C.E.V. Neves e L.J.Pedroso, "Estudos Analíticos e Numéricos de Transientes e Vibrações Livres em Adutoras de Barragens", UnB/ENC, Brasília, DF, Relatório Técnico de IC. 2005.
- [9] C.E.V. Neves e L.J.Pedroso, "Aspectos do Efeito da Mudança de Diâmetro em Adutoras de Barragens sob Ação de Transientes" UnB/ENC, Brasília, DF, Relatório Técnico de IC. 2005.
- [10] C.G. Rampinelli e L.J.Pedroso, "Aspectos Preliminares na Análise de Transientes em Adutoras de Barragens" UnB/ENC, Brasília, DF, Relatório Técnico de IC. 2006.

Dissertações e Teses:

- [11] C.M.B.M.Nascimento, "Estudos de Transientes em dutos de derivados de Petróleo," Dissertação de Mestrado, Dept. de Eng. Civil, Univ. de Brasília (UnB)-DF, 2002.
- [12] L.F.M. Lima, "Termo de Atrito em Escoamento Transitório Para Condutos Forçados", Tese de Doutorado, Univ. de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo. 2006.