



ANÁLISE COMPUTACIONAL DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS NUMA TUBULAÇÃO COM E SEM PERDAS DE PRESSÃO LOCALIZADAS

Matheus Santinello

Lineu J. Pedroso

matheus.santinello@gmail.com

lineu@unb.br

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Campus Darcy Ribeiro - CEP 70919-970

Asa Norte, Brasília, DF, Brasil

Abstract. O transiente de pressão é um dos fenômenos mais críticos em tubulações percorridas por fluídos. Ele ocorre quando o escoamento sofre uma parada brusca ou despressurização, podendo ser ocasionado por diversos fatores, como fechamento de válvulas e paradas de bombas ou turbinas, etc. Essa interrupção brusca no escoamento provoca o surgimento de uma onda de pressão, que se propaga no sistema elevando significativamente a pressão na tubulação. Pressões dessa magnitude podem causar acidentes catastróficos nas estruturas, como ocorreu com a usina hidrelétrica de Oigawa, Japão (1950) e mais recentemente, na usina de Sayano-Shushenskaya, Rússia (2009). Esse fenômeno tem sido amplamente estudado por vários pesquisadores. Um dos estudos mais interessantes foi o de Contractor (1965), que estudou os transientes de pressão para o caso de fechamento brusco de válvulas, onde ele analisa resultados experimentais e desenvolve uma solução numérica para o problema. Entre os casos estudados estão as situações do duto com e sem a presença de perdas singulares. Neste trabalho é utilizado o programa TRANSPETRO-1D para simular o referido experimento, sendo estudados os dois casos: tubo com e sem perdas de pressão localizadas. É então avaliada a influência da singularidade no transiente de pressão e a potencialidade do programa de representar o fenômeno em questão e compará-lo com os resultados experimentais.

Keywords: Golpe de aríete, transientes hidráulicos, fechamento de válvula, perdas singulares, perdas localizadas

1 INTRODUÇÃO

Um transiente hidráulico é originado quando mudanças nas condições de pressão e velocidade do fluido variam com o tempo num escoamento (escoamento em regime transiente). Essas alterações nas condições do escoamento podem causar variações de pressão de grande magnitude, elevando a pressão a valores altos o suficiente para comprimir a água. Valores excessivos de pressão podem gerar danos graves na estrutura e até ocasionar acidentes. Alguns fatores que podem gerar o transiente hidráulico numa tubulação são: abertura ou fechamento de válvulas, início ou parada de bombas, paradas de turbina, impacto na tubulação, sismos, etc. Um caso recente, na Usina Hidrelétrica Russa - Sayano - Shushenskaya, (2009), ocasionado pela parada de uma turbina, deixou mais de 70 mortos além da completa paralisação da usina e do prejuízo econômico gerado. Diversos estudos foram feitos a respeito do fenômeno, visando simular seus efeitos nas estruturas. Entre estes, Contractor (1965) estudou o fechamento brusco de válvulas, analisando as elevações de pressão e os efeitos de uma singularidade sobre a propagação da onda transiente. Neste artigo, é feita uma simulação computacional da bancada Contractor, analisando dois casos (com e sem singularidade) e comparando-os com resultados experimentais. O programa foi desenvolvido por Nascimento (2002), baseado principalmente no trabalho de Streeter e Wylie (1967). Entretanto o Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura da UnB (GDFE) tem se consagrado em estudos de transientes depois de muitos anos, onde alguns textos técnicos e publicações podem ser citados aqui: Neri e Pedroso (1999); Pedroso, Vital de Brito e Barbosa (1994); Gómez (2015); entre outros.

2 FORMULAÇÕES MATEMÁTICAS

O fenômeno do transiente é regido por três equações fundamentais, sendo elas: Equação da Continuidade; Equação da Quantidade de Movimento; e Equação de Estado. Essas três equações estão apresentadas a seguir em sua forma geral, ou seja, aplicadas a um escoamento qualquer:

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

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \vec{V} \text{div}(\vec{V}) + \nabla(P) - \rho g - \mu [\nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3} \nabla(\text{div} \vec{V})] = 0 \quad (2)$$

$$a^2 = \frac{k}{\rho} \quad (3)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, $\vec{V}$ é o campo de velocidade do fluido, P é a pressão, g é a aceleração da gravidade local, t é o tempo, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, a é a velocidade do som no fluido, e k é o modulo de compressibilidade do fluido.

O estudo feito leva em conta algumas simplificações para o escoamento: escoamento unidirecional; a tubulação sofre pequenas deformações e tem comportamento linear; massa específica sofre pequenas variações; a seção transversal tem área constante; não se levam em conta os efeitos da degasagem e da temperatura; e a tubulação é horizontal.

Com essas condições impostas, as Eq. (1), (2) e (3) são adaptadas para o problema estudado, assumindo seguinte forma:

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

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

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

Onde ρ , V , P , t , x , a , e k foram definidos anteriormente, e f é o fator de atrito, E é o módulo de rigidez do material do duto, D é o diâmetro interno do duto, e é a espessura das paredes do duto, e C é uma constante adimensional que depende das características elásticas do duto.

Procura-se encontrar os valores de P , V e ρ ao longo do tempo em uma dada seção do tubo. Como têm-se três incógnitas e três equações o sistema pode ser solucionado. São utilizados métodos matemáticos e numéricos para se encontrar a solução desejada.

3 MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Para solução das Equações Diferenciais Parciais anteriormente mostradas podem ser utilizados diferentes métodos numéricos e técnicas. Streeter e Wylie (1967) propuseram usar o Método das Características para transformar as Equações Diferenciais Parciais em Equações Diferenciais Totais, e então usar o Método das Diferenças Finitas para resolvê-las.

O método das características consiste em fazer uma combinação linear entre as Eq. (4) e (5), de forma que: $[Eq.(4)] + \lambda[Eq.(5)] = 0$. Dessa igualdade, encontra-se o valor de λ , e agrupando a equação de acordo com a derivada no tempo, encontra-se dois sistemas de equações características:

$$a^+ \left\{ \frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \right. \quad (11)$$

$$\left. \frac{dx}{dt} = V + a \right\} \quad (12)$$

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

$$(14)$$

A primeira equação de cada sistema é válida somente quando a segunda ocorre. Assim estas Equações Diferenciais Totais podem ser resolvidas por diferentes métodos. Streeter e Wylie (1967) e Nascimento (2002) utilizam o Método das Diferenças Finitas para isso. Essa técnica consiste em usar a série de Taylor de uma função para aproximar sua derivada. Na malha espaço-tempo, procura-se encontrar os valores de P e V em pontos no meio da malha. Os valores são obtidos, pela técnica de Diferenças Finitas, usando valores conhecidos em outros pontos (pontos anteriores), onde os primeiros valores são as condições de contorno do sistema.

4 ASPECTOS COMPUTACIONAIS E RESULTADOS

A solução do problema foi obtida utilizando-se o programa TRANSPETRO 1-D, elaborado por Nascimento (2002) a partir de rotinas anteriores implementadas, no Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura da Universidade de Brasília. O programa soluciona o problema usando os métodos de solução descrito, através de funções e processos iterativos contidos no código do programa. Os dados de entrada são os dados gerais do problema e as condições de contorno, e o programa retorna gráficos e um arquivo de dados com as pressões e velocidades (ou cargas e vazões) ao longo do tempo numa determinada seção do duto.

O programa foi usado para simular o transiente hidráulico que ocorre no experimento realizado por Contractor (1965). O aparato experimental é mostrado na Fig. 1:

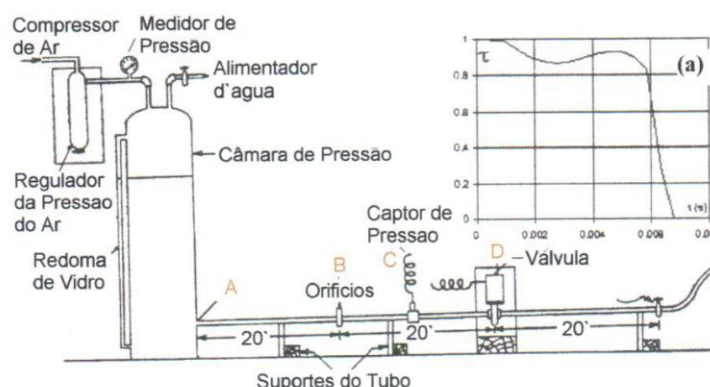


Figura 1: Bancada de ensaios (Contractor , 1965) e curva de fechamento da válvula (a).

Foram simulados dois casos: um sem a presença de singularidade (diafragma com orifício) no ponto B (Fig.1) e outro com. Para os dois casos, as condições de contorno são um reservatório no início (A) e uma válvula no final (D), e no segundo caso foi inserida uma condição entre tubos de perda singular (B). A evolução da pressão no tubo foi observada na seção em C (Fig.1), e os resultados das duas simulações foram comparadas entre si e com os

resultados experimentais de Contractor. A Fig. 2 mostra os dados e os resultados obtidos. Para manter coerência com os resultados experimentais foram usadas unidades inglesas.

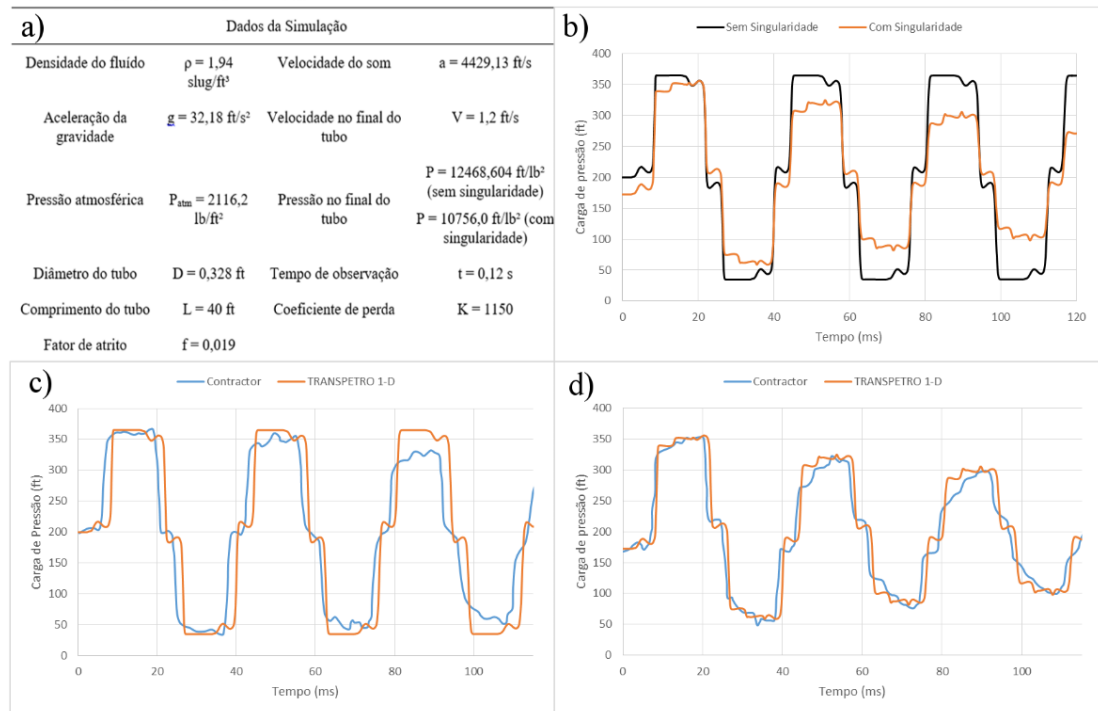


Figura 2: a) Dados da simulação; b) Transiente com e sem singularidade pelo TRANSPETRO 1 – D; c) Resultados (caso sem singularidade) pelo TRANSPETRO 1 – D e por Contractor; d) Resultados (caso com singularidade) pelo TRANSPETRO 1 – D e por Contractor

5 CONCLUSÃO

No gráfico (b) (Fig.2), observa-se que no caso do duto com a presença de singularidade o amortecimento na curva de pressão é muito mais elevado. Assim, perdas singulares são uma forma eficiente de mitigar os efeitos de uma sobre pressão no duto, atenuando o efeito do transiente mais rapidamente.

Nos gráficos (c) e (d) (Fig.2), observa-se que os resultados do TRANSPETRO simulam bem os resultados experimentais de Contractor. No primeiro e segundo ciclos, os resultados são mais próximos, havendo uma maior concordância entre as pressões de pico, tempo de pico e forma da curva. A partir do terceiro ciclo os gráficos começam a se distanciar, sendo isso mais acentuado no caso sem singularidade. Isso ocorreu por conta de limitações no programa que não calcula algumas perdas que ocorrem no experimento e outros efeitos, como a degasagem. No caso com singularidade, essa discordância é menos perceptível pois as perdas de pressão singulares são mais notáveis que as perdas não previstas pelo modelo. Assim, o TRANSPETRO – 1D se mostrou adequado para representar resultados experimentais.

Portanto, os resultados obtidos com o programa e os resultados experimentais apresentaram um acordo entre eles, assim como reproduziram as tendências observadas pelo fenômeno.

6 BIBLIOGRAFIA

Contractor, D.N. – The Reflection of Waterhammer Pressure Waves From Minor Losses, *Journey of Basic Engineering*, pp.445-452, jun (1965)

Gómez, W,H,V – Análise de Parâmetros que Afetam as Respostas das Pressões em Escoamentos Transientes, Universidade de Brasília (2015)

Nascimento, C.M.B.M – Estudo de Transientes em Dutos de Derivados de Petróleo, Universidade de Brasília (2002)

Neri, L.J.A.L e Pedroso L.J- Aspectos Numéricos na Avaliação de Escoamentos Transientes em Tubulações (1999)

Pedroso, L.J.; Vital de Brito, J.L. e Barbosa, A.N. - TRANS- A computer code for the Analysis of Transients in Nuclear Reactors Piping Networks, V CGEN, R.J., Vol I pp.1-6, Aug (1994)

Streeter, V.L. e Wylie, E.B. – Hydraulic Transients, McGraw-Hill Company, E.U.A (1967)