ANÁLISE DE TRANSIENTES DEVIDO A FECHAMENTO RÁPIDO DE VÁLVULAS EM DUTOS CURTOS

Luis Fernando Gonçalves Pires
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225, Prédio Cardeal Leme, Dpto Engenharia Mecânica, Sala 101.
Gávea - Rio de Janeiro - Brasil – CEP 22453-900
lpires@mec.puc-rio.br

Renata Carneiro da Cunha Ladeia
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
rladeia@mec.puc-rio.br

Claudio Veloso Barreto
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
cvb-prg@mec.puc-rio.br

Resumo
Ao acionar uma válvula de seguraça em um duto curto com alta vazão são provocados pulsos de pressão no duto, gerando o fenômeno conhecido como Golpe de Aríete. Em decorrência, a sobrepressão resultante pode vir a ultrapassar a máxima pressão de operação da tubulação, causando sua falha mecânica. O presente trabalho tem como objetivo identificar as variáveis envolvidas neste fenômeno e determinar a importância de cada uma para o caso de um duto real.

Palavras-chave: *Transiente hidráulico, Golpe de Aríete, Duto curto, Fechamento de válvula*

1. INTRODUÇÃO

A transferência de óleo e derivados entre navios e tanques em terra é realizada por dutos curtos que necessitam trabalhar com vazões elevadas. Estes sistemas de transporte são formados basicamente por uma estação de bombeamento, dutos de transporte, estação de recebimento do produto e demais acessórios, como válvulas de controle, bloqueio e retenção. O projeto e a operação destes dutos visam promover uma alta vazão como objetivo de minimizar o tempo de estadia dos navios e, com isso, os custos de operação.

Uma vez que este processo ocorre em regiões cujo vazamento de óleo seria extremamente comprometedor para o meio ambiente, as válvulas de segurança são projetadas para um tempo de fechamento muito curto. Quando isto ocorre, um surto (ou onda) de pressão surge no duto decorrente da repentina conversão de energia cinética do líquido em movimento em energia de deformação causada pela compressão do fluido e pela expansão da parede da tubulação. Este fenômeno, que pode provocar um ruído audível também é conhecido como golpe de arite (“water hammer”). Em conseqüência, o projeto do duto deve considerar a sobrepressão resultante que pode vir a ser várias vezes superior a pressão de operação.

Em dutos reais, variáveis como velocidade e curva de fechamento de válvulas, curva da bomba, presença de válvula de retenção, vazão, propriedades do fluido, propriedades mecânicas do duto, etc são normalmente associadas aos valores observados na sobrepressão gerada nos transientes de

fechamento de válvulas. O presente trabalho tem como objetivo identificar as variáveis envolvidas neste fenômeno e avaliar a importância de cada uma para o caso de um duto real.

2. FUNDAMENTOS E METODOLOGIA APLICADA

2.1. Abordagem Matemática

A sobrepressão Δp gerada pela redução de velocidade Δv é normalmente estimada pela equação de Joukowsky (Wylie e Streeter, 1967 e ISGOTT, 1996), determinada para um escoamento sem atrito:

$$\Delta p = \rho a \Delta v \tag{1}$$

onde p é a pressão (Pa), ρ é a massa específica do fluido (kg/m³), a é a velocidade de propagação da onda sonora na tubulação (m/s) e v é a velocidade do escoamento do fluido (m/s). Para o caso da parada instantânea do escoamento tem-se que $\Delta v = Q/A$, sendo Q a vazão antes do fechamento. Para a análise global do transiente, diversos autores (Kameswara Rao e Eswaran, 1999) utilizam as equações de continuidade e de conservação de quantidade de movimento para um escoamento unidimensional, incompressível e com atrito como desenvolvidas por Wylie e Streeter (1967) para aplicação do Método das Características:

$$v\frac{\partial H}{\partial s} + \frac{\partial H}{\partial t} - v\sin\alpha + \frac{a^2}{g}\frac{\partial v}{\partial s} = 0 \tag{2}$$

$$g\frac{\partial H}{\partial s} + v\frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{f\, v|v|}{2D} = 0 \tag{3}$$

onde s é a coordenada espacial ao longo do duto, t é o tempo, f é o fator de atrito, D é o diâmetro interno do duto, H é a altura manométrica em metros de coluna de líquido e a é definida pela Eq. (4):

$$a^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{E}\cdot\frac{D}{e}} \tag{4}$$

onde e é a espessura do duto, E é o módulo de elasticidade do material do duto e K é o modulo de compressibilidade do fluido.

No presente trabalho o duto foi modelado utilizando o *Stoner Pipeline Simulator 9.3* (SPS) e o *Pipeline Studio Simulator 2.1* (TLNET), dois programas comerciais de simulação tradicionalmente utilizados na área de petróleo.

2.2. Descrição do Duto

O duto modelado consiste em uma linha de transferência de óleo cru entre os tanques terrestres (TENV) localizados em Fazenda Alegre (Espírito Santo) e o tanque do navio aportado no Terminal Norte Capixaba (TREC). Esta linha consiste de um duto rígido de 406,4 mm (16”) de diâmetro, revestido, com comprimento de 3,50 km e um duto flexível de 304,8 mm (12”) com comprimento de 250 m que chega até o navio apoiado a uma monobóia.

Para fazer o carregamento de óleo é utilizada a bomba centrífuga BCE com vazão controlada através da válvula VCONT. A Fig. (1) ilustra o esquema do modelo que simula o carregamento

entre o terminal terrestre e o navio indicando os equipamentos utilizados. Uma lista com as características de cada elemento modelado está apresentada na Tab. (1).

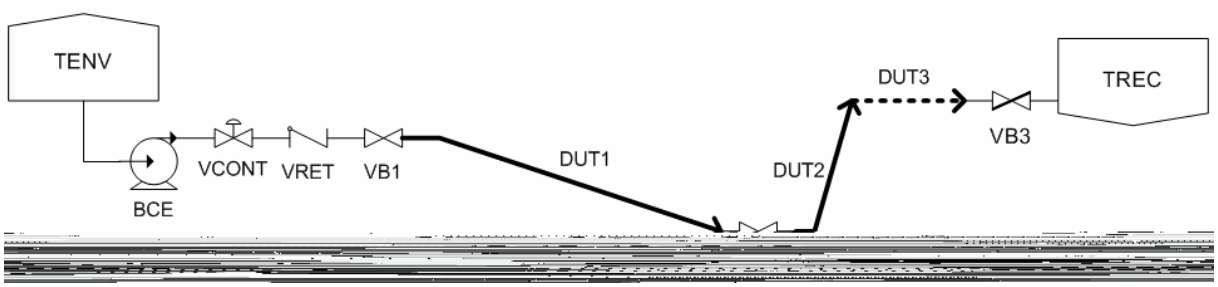


Figura 1. Esquema do modelo do duto

Tendo em vista que os efeitos observados nos transientes são da ordem de um minuto, a troca de calor com o ambiente, que envolve períodos de tempo muito maiores, não foi considerada. Desta forma, toda a análise foi realizada na condição isotérmica a 65^{o}C, temperatura a qual o óleo é aquecido antes de ser bombeado com o objetivo de reduzir sua viscosidade. O produto a esta temperatura possui massa específica igual a 943,66 kg/m^3, viscosidade absoluta de 0,0083 Pa.s e módulo de compressibilidade de 1,381 GPa.

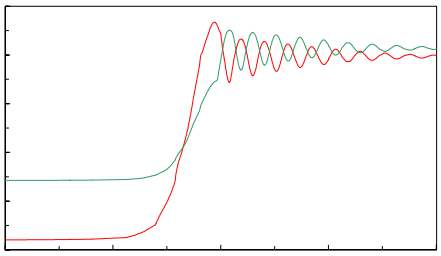
Tabela 1. Lista de equipamentos modelados

ID do Equip.	Equipamento	Descrição
TENV	Tanque de envio	Pressão controlada em 98,06 kPa (1 kg/cm^2)
BCE	Bomba centrífuga	917,21 kW (1230 HP) a 1200 RPM
VCONT	Válvula de controle ou PCV	CV: 500 gpm/psi$^{0.5}$. Vazão de ajuste: 0,222 m^3/s (800 m^3/h). Tempo para atuação total: 4 s
VRET	Válvula de Retenção	Waffle de 304,8 mm (12”). CV: 5000 gpm/psi$^{0.5}$. Tempo de fechamento: 0,06 s
V1, V2	Válvulas de Bloqueio	Gaveta de 304,8 mm (12”). CV: 5000 gpm/psi$^{0.5}$
DUT1	Duto rígido (enterrado)	D_e: 406,4 mm (16”). *e*: 14,27 mm (0,562”). *L*: 3500 m
DUT2	Duto rígido (submarino)	D_e: 406,4 mm (16”). *e*: 25,4 mm (1”). *L*: 31 m
DUT3	Duto flexível (monoboia)	Diâmetro externo: 304,8 mm (12”). *e*: 25,4 mm (1”). *L*: 250 m
VB3	Válvula de Bloqueio Motorizada	Borboleta de 304,6 mm (12”). CV: 5000 gpm/psi$^{0.5}$. Tempo de fechamento: 60 s
TREC	Tanque de recebimento	Pressão controlada em 98,06 kPa (1 kg/cm^2)

2.3. Descrição do Transiente

Após o duto ter atingido o estado estacionário na vazão desejada, é dada a instrução para o fechamento da válvula VB3 do navio. A vazão é reduzida gerando uma elevação de pressão de acordo com a Eq. (1). A informação da redução de vazão e do aumento de pressão viaja pelo duto na velocidade sônica. Em resposta a redução de vazão, a pressão na descarga da bomba aumenta, segundo sua curva característica, e a válvula de controle começa a abrir, de forma a retornar a vazão para o ponto de ajuste. Quando a vazão cessa, a pressão na bomba atinge seu valor máximo (*shut-off*) e o pulso de pressão vindo da extremidade do duto tende a produzir um fluxo reverso. Neste instante a válvula de retenção começa a fechar e, dependendo do seu tempo de resposta pode ocorrer algum alívio da pressão devido a um fl

apresentada nas Figs. (2a) e (2b). Uma vez que as válvulas VB3 e VRET estão nos extremos do duto, o tempo que a onda de pressão leva para percorrer o duto pode ser obtido pelo intervalo entre a crista das ondas de pressão observadas nestes pontos.



Para a análise desta situação, a válvula de controle foi retirada do modelo e as diversas vazões foram obtidas alterando-se a rotação da bomba. As pressões máximas obtidas no transiente estão apresentadas na Fig. (9) para diversas vazões (e rotações correspondentes). Como esperado, vazões maiores produzem pressões máximas mais elevadas. Porém, comparando os resultados da Fig. (9) com as curvas correspondentes apresentadas na Fig. (8), verifica-se que as pressões máximas geradas são menores que as observadas quando se utiliza a válvula de controle. Isto é explicado pelo fato de que, ao se retirar a válvula de controle, retira-se a perda de carga introduzida por este elemento e, desta forma, a bomba deve trabalhar em uma rotação menor para produzir a mesma vazão. Nesta rotação menor, a pressão de estagnação (*shut-off*) é reduzida, o que leva a pressões máximas menores ao longo do duto.

3.5. Curva da Bomba (influência do shut-off)

A influência da pressão de descarga da bomba para a situação de estagnação (vazão zero) foi analisada considerando diferentes curvas de bomba, mas todas com um mesmo ponto de operação para a vazão de 0,222 m^3/s (800 m^3/h) (Fig.10). Observa-se que a chegada da onda de pressão na bomba provoca uma redução da vazão e, em conseqüência, a pressão de descarga se altera de acordo com a curva da bomba. Quando a vazão chega a zero, a pressão de descarga fica constante e a pressão máxima neste ponto é a resultante da soma da pressão máxima de descarga com a do pulso de pressão, como ilustrado na Fig. (11), para o início do duto.

Caso a válvula de bloqueio fosse fechada instantaneamente, a sobrepressão resultante neste extremo do duto seria independente da curva da bomba. Porém, para um fechamento mais lento (60s), o valor de *shut-off* da bomba repercute em todo o perfil de pressão máxima no duto (Fig.11).

como se não houvesse válvula de retenção, ocorrendo fluxo reverso total de líquido através da bomba.

3.7. Material do Duto

A velocidade acústica varia em função das propriedades termohidráulicas do produto bombeado (módulo de compressibilidade e massa específica) e das propriedades do duto (área e módulo de elasticidade) como definido na Eq. (4). Dutos flexíveis são compostos por várias camadas de materiais distintos (anéis de aço, polímeros, borracha, etc) de forma que o módulo de elasticidade destes dutos difere do módulo de elasticidade de um duto rígido de aço. A partir de dados de fabricantes de dutos flexíveis verifica-se que a velocidade acústica pode ser reduzida em até 2/3 da velocidade num duto rígido. Nas simulações realizadas em todos os outros itens deste trabalho, o módulo de elasticidade do duto flexível (mangote) de 250 m foi considerado como sendo igual ao duto de aço rígido. Isto foi feito para compatibilizar as simulações realizadas com os programas SPS e TLNET, uma vez que neste último o efeito desta propriedade não é considerado.

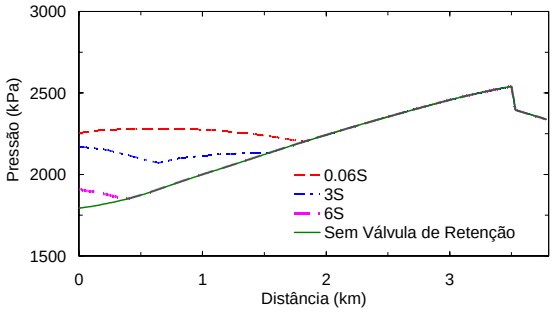


Figura 12. Perfil de máxima pressão variando o tempo de fechamento da válvula de retenção.

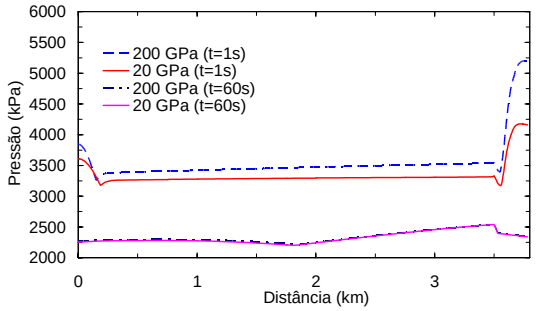


Figura 13. Perfil de máxima pressão alterando o módulo de elasticidade do material do mangote.

A redução do módulo de elasticidade em 10 vezes (20 GPa) de acordo com Eq. (4) gera uma redução na velocidade sônica no duto para 895 m/s. Para fechamentos lentos (60s) a variação do módulo de elasticidade do mangote não gera alteração dos perfis de máxima pressão. No entanto, para o fechamento instantâneo (1s) verifica-se que a pressão máxima na válvula VB3 sofre uma redução de 11,33 kPa (10 kgf/cm^2) quando comparada com o caso no qual o módulo de elasticidade do mangote é considerado igual ao do aço comum.

3.8. Propriedades do Produto

3.8.1. Variação da Massa Específica (viscosidade constante)

O efeito da variação da massa específica sobre as pressões máximas é claramente expresso pela Eq. (1) para fechamento rápido de válvulas. Porém, para óleos crus, a variação desta propriedade implica na variação do módulo de compressibilidade, normalmente calculado por correlações como a expressa pela norma API (1984), e, conseqüentemente, na variação da velocidade de propagação da onda sonora no duto. Além disto, a massa específica afeta diretamente a pressão de descarga da bomba, já que a curva característica da bomba (HxQ) é obtida, normalmente, para a água. Assim, fluidos mais densos aumentam a pressão máxima de descarga da bomba (*shut-off*) o que acarreta maiores sobrepressões durante o transiente.

Como nos casos anteriores, a vazão na válvula controladora foi ajustada em 0,222 m^3/s e o tempo de fechamento em 60s. A variação da densidade desloca todo o perfil de máximas pressões ao longo do duto, sendo a variação de pressão diretamente proporcional à massa específica do produto (Fig.14).

3.8.2. Variação da Viscosidade

A variação da viscosidade do produto afeta, principalmente, o gradiente de pressão no estado estacionário, considerando a vazão constante. Porém, como a velocidade do escoamento na válvula de bloqueio, a pressão de estagnação da bomba e a curva da válvula não mudam, para um determinado tempo de fechamento a variação da viscosidade praticamente não produz qualquer efeito significativo sobre as pressões máximas geradas no transiente, como ilustrado na Fig. (15).

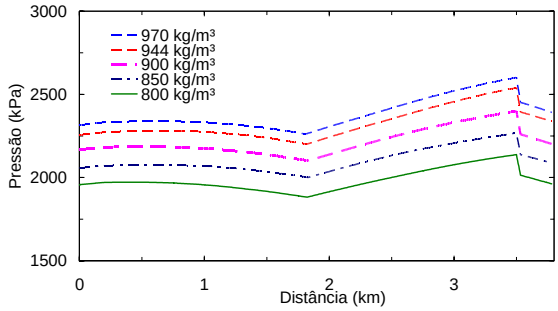


Figura 14. Perfil de máxima pressão variando a densidade do produto (viscosidade constante).

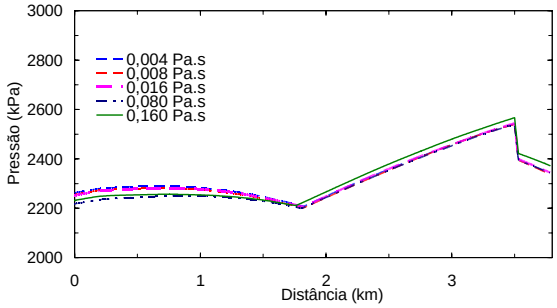


Figura 15. Perfil de máxima pressão para diferentes viscosidades (densidade constante).

4. CONCLUSÕES

Um terminal marítimo de carregamento de petróleo foi modelado utilizando dois programas comercias. Verificou-se que para o tempo de fechamento instantâneo ($t<2L/a$) da válvula de bloqueio na extremidade do duto, são produzidas sobrepressões neste elemento que seguem a equação de Joukowsky. Variações no diâmetro, módulo de elasticidade, presença de válvula de retenção e controle alteram levemente a predição desta equação em outros pontos do duto. Para tempo de fechamento superior a $2L/a$ somente a simulação detalhada pode predizer os reais valores de sobrepressão que ocorrerão no duto.

Quando tempos de fechamento próximos a $2L/a$ são necessários, somente a manutenção da vazão em níveis adequados garante que as sobrepressões estarão dentro dos níveis aceitáveis. Porém, deve-se estar atento quando o produto transportado difere do utilizado no projeto do duto, já que a massa específica do produto afeta fortemente as pressões máximas geradas no transiente.

Visando aumentar a capacidade de transporte do duto, diversas estratégias podem ser empregadas: a) utilização de um sistema de atuação da válvula de bloqueio de forma a alterar a curva de fechamento da válvula no tempo, gerando um rápido fechamento no início, e um fechamento mais gradativo no curso final; b) utilização de um sistema de controle de vazão através da alteração da rotação da bomba em substituição a válvula de controle; c) aumento do diâmetro do mangote ou sua duplicação de forma a reduzir a velocidade do escoamento neste trecho.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer a TRANSPETRO Petrobrás Transportes S.A. pela colaboração técnica indispensável para a execução deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

Azoury, P.H., Baasiri, M. and Najm, H., 1986, “Effect of Valve-Closure Schedule on Water Hammer”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 112, No. 10, pp. 890-903.

Cabelka, J. e Franc, I., 1959, “Closure Characteristics of a Valve with Respect to Water Hammer”, Eighth Congress of the International Association for Hydraulic Research, Montreal, Canadá, pp 6-A-1 a 6-A-23

Goldberg, D. E. and Karr, C. L., 1987, “Quick Stroking: Design of Time-Optimal Valve Motions”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 113, No. 6, pp. 780-795.
International Safety Guide for Oil Tankers & Terminals (ISGOTT), ICS/OCIMF/IAPH 4ª Edição, 1996
Kameswara Rao, C. V. e Eswaran, K., 1999, “Pressure Transients in Incompressible Fluid Pipeline Networks”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 188, pp. 1-11
Manual of Petroleum Measurement Standards, CH 11.2.1, API, 1984.
Propson, T. P., 1970, “Valve Stroking to Control Transient Flows in Liquid Piping Systems”, Universidade de Michigan.
Quick, R. S., 1927, “Comparison and Limitation of Various Waterhammer Theories”, Transactions of the ASME, Vol. 49, No. 5, pp. 524-530.
Rehymer, W. J., 1993, “Sinsing of swing Check Valves for Stability and Minimum Velocity Limits”, Tans. ASME, Vol. 115, pp. 406-410
Streeter, V. L., 1963, “Valve Stroking to Control Waterhammer”, Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 89, No. 2, pp. 39-66
Streeter, V. L., e Wylie, B. E., 1967, “Hydraulic Transients”, McGraw-Hill Book Company.
Streeter, V. L., 1967, “Valve Stroking for Complex Piping Systems”, Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 93, No. 3, pp. 81-98
Thorley, A.R.D., 1989, “Check Valve Behaviour under Transient Flow Conditions. A State of theArt Review”, ASME JFE 111, 2.
Uspuras, E., Kaliatka, A. and Dundulis, 2001, “Analysis of Potential Watherhammer at the Ignalina NPP Using Thermal-hydraulic and Strutural Analysis Codes”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 203, pp. 1-12.
Wood, D. J. and Jones, S. E., 1973, “Water-Hammer Charts for Various Types of Valves”, Journal of Hydraulic Division, Vol. 99, No. 1, pp. 167-178.

TRANSIENT FLOW ANALYSIS OF FAST VALVE CLOSURE ON SHORT PIPELINES

Luis Fernando Gonçalves Pires
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225, Prédio Cardeal Leme, Dpto Engenharia Mecânica, Sala 101.
Gávea - Rio de Janeiro - Brasil – CEP 22453-900
lpires@mec.puc-rio.br

Renata Carneiro da Cunha Ladeia
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
rladeia@mec.puc-rio.br

Claudio Veloso Barreto
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
cvb-prg@mec.puc-rio.br

Abstract. Once block valves are acted in short pipelines with high flows, pressure pulse are induced inside the pipeline, generating a phenomenon known as Waterhammer. As a result, the magnitude of the surge pressure can surpass the maximum operational pressure of the pipeline causing its mechanical fail. The objective of this paper is to identify the variables concerned with this phenomenon and to quantify the importance of each one of these variables in the study of a real pipeline.

Keywords: *Hydraulic transient, Waterhammer, Short pipeline, Valve closure*