

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Pipeline Conference & Exposition 2005*, realizada no período de 17 a 19 de outubro de 2005, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Pipeline Conference & Exposition 2005*.

---

## Resumo

Em terminais marítimos a tubulação no píer geralmente apresenta um diâmetro reduzido em relação ao resto da tubulação, o que pode amplificar efeitos produzidos por transientes na linha. Observou-se que a modelagem de válvulas de retenção localizadas neste trecho pode introduzir erros significativos nos resultados de máximas pressões em transientes quando não consideradas de forma dinâmica. O presente trabalho utiliza um programa comercial de simulação de escoamentos em dutos para caracterizar a existência deste fenômeno através de uma modelagem dinâmica das válvulas de retenção. É estudada a influência do diâmetro e do tipo da válvula de retenção na elevação de pressão durante o transiente de fechamento indevido de uma válvula de bloqueio. É demonstrado também que o tempo de fechamento da válvula de retenção, em relação à velocidade de propagação da onda de pressão, interfere de forma acentuada no perfil de máximas pressões geradas no transiente.

## Abstract

As usual a shipping terminal contains a header and its diameter is smaller than the main pipeline diameter. This diameter reduction amplifies the effects caused by hydraulic transients. It was noticed during simulations that check valves without dynamic modeling may introduce some error in the maximum pressure results without a dynamic model approach. The current paper uses commercial pipeline simulation software to model the dynamic behavior of the check valves. It was studied the header diameter influence and how the check valve model type may change the maximum pressure in the pipeline. It was proved that even a pipeline that works with low pressure and small elevation drop needs a detailed valve modeling to prevent the calculation of unreal pressure values in the region with diameter reduction.

## 1. Introdução

Os terminais marítimos de petróleo costumam trabalhar com pequenas elevações de pressão e grandes vazões, sendo dutos de pequeno comprimento, da ordem de alguns quilômetros. Os parâmetros operacionais e os sistemas de proteção do duto são determinados pela observação do desempenho do duto quando submetido a determinadas condições de operação, como por exemplo, o fechamento indevido de uma válvula de bloqueio colocada junto ao tanque de recebimento com as bombas do navio ainda operando. A análise deste tipo de transiente, normalmente feita por simulação computacional, implica no conhecimento detalhado das características do duto, das bombas e da válvula responsável pelo evento. Na região do píer, a tubulação normalmente com um diâmetro bem menor que o restante do duto, faz com que o fluido escoe com uma velocidade elevada produzindo efeitos que devem ser observados cuidadosamente. Neste trecho, estão instalados diversos equipamentos, dentre eles válvulas de retenção.

Válvulas de retenção são equipamentos desenvolvidos para evitar o fluxo reverso em sistemas de tubulação. Em dutos são utilizadas para evitar o esvaziamento quando o sistema de bombeamento é desligado. Além disto, estas válvulas protegem as bombas contra o fluxo reverso evitando, desta forma, danos nos elementos estruturais e nos selos mecânicos, bem como eventual sobre-pressão no sistema de sucção. A concepção inicial destas válvulas baseia-se no fato de que elas devem fechar tão logo a vazão seja reduzida a zero. Em sistemas onde o bombeamento trabalha com

---

<sup>1</sup> Doutor, Engenheiro Mecânico- SIMDUT-PUC-Rio

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico – SIMDUT-PUC-Rio

<sup>3</sup> Mestre, Engenheira Mecânica – SIMDUT-PUC-Rio

*head* elevado, observa-se que a atuação da válvula de bloqueio pode produzir um pico de pressão no duto e um som característico, conhecido como *slam*. Esta elevação de pressão pode comprometer o duto ou equipamentos caso não tenha sido considerada no projeto. Desta forma, o desempenho dinâmico destas válvulas passou a ser estudado com um crescente grau de detalhes. Porém, como a configuração característica de operação de um terminal difere desta condição, a modelagem da válvula de retenção para esta configuração, de maneira geral, não parece interferir de forma significativa nos resultados, o que pode levar o projetista a tratar estas válvulas de forma simplificada. Assim, o presente trabalho pretende apresentar que, sob certas circunstâncias, a modelagem convencional de válvulas de retenção em dutos onde existe redução de diâmetro, pode levar a valores incorretos de pressão observados durante transientes.

## 2. Comportamento Dinâmico de Válvulas de Retenção

A elevação de pressão  $\Delta p$  resultante devido à redução da velocidade de um escoamento de  $V_0$  a zero, instantaneamente, pode ser determinada pela conhecida equação de Joukowski:

$$\Delta p = aV_0\rho \quad (1)$$

onde  $a$  é a velocidade de deslocamento da onda sonora no duto e  $\rho$  é a massa específica do fluido. Desta forma, é desejável que a válvula de retenção feche no instante em que a velocidade do escoamento nela seja nula. Assim, alguns modelos de válvula de retenção, utilizados para simulação, empregam esta condição, isto é, a válvula fecha instantaneamente quando a velocidade é nula. Porém, na prática observa-se que, em certas situações, ocorre fluxo reverso e uma elevação de pressão na válvula. Este fato levou a uma segunda linha de modelagem na qual é permitido estabelecer um tempo de retardo no fechamento da válvula.

Trabalhos experimentais desenvolvidos por Provoost (1980, 1983) determinaram que, se a válvula de retenção estiver completamente aberta inicialmente, a desaceleração do escoamento é a única variável que influencia o comportamento da válvula. Desta forma, Provoost propôs que o comportamento dinâmico da válvula de retenção pode ser representado por gráficos como o apresentado na Figura 1 (Val-Matic, 1993). Neste gráfico o eixo horizontal representa a desaceleração média do escoamento até o instante em que a velocidade do fluido é nula, adimensionalizada pelo diâmetro  $D$  da válvula de retenção e pela velocidade inicial  $V_s$ , sendo  $dv/dt$  a desaceleração média. O eixo vertical representa a razão da máxima velocidade reversa ( $V_r$ ), no instante em que a válvula fecha completamente, pela velocidade inicial ( $V_s$ ). As curvas T1, T2 e T3 representam as respostas dinâmicas típicas de uma válvula retenção do tipo esfera, portinhola e SCV (*Silent Check Valve*) respectivamente. De posse da aceleração, consulta-se o gráfico da Figura 1 para obter a velocidade reversa máxima, que é utilizada na equação 1 para determinar a elevação de pressão resultante da atuação da válvula.

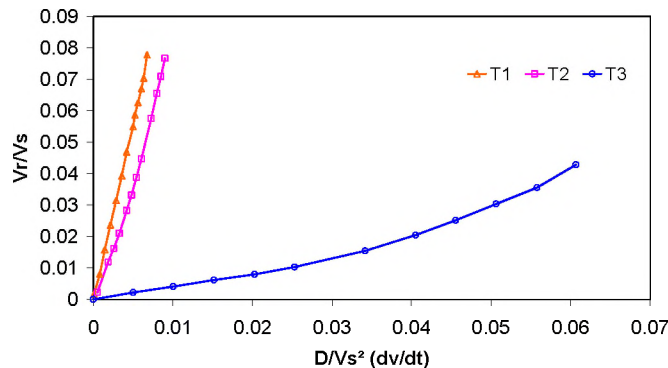


Figura 1. Respostas dinâmicas típicas de diversos modelos de válvula de retenção

Isto significa que uma mesma válvula de retenção vai produzir efeitos distintos em função do sistema e do transiente ocorrido neste sistema e, desta forma, a adoção de um tempo de fechamento como o parâmetro de caracterização dinâmica da válvula pode levar a resultados não representativos.

Recentemente, Liou e Li (2004) constataram que a relação indicada por Provoost é válida quando a desaceleração é constante. Na presença de eventos que provocam desacelerações que variam com o tempo, a relação única entre a desaceleração e a máxima velocidade reversa para um determinado modelo de válvula deixa de existir, e os parâmetros que interferem no torque necessário à atuação da válvula devem ser considerados.

Nos transientes gerados pelo fechamento de válvulas observa-se que, de maneira geral, a desaceleração aumenta com o tempo. Liou e Li (2004) verificaram que neste caso, a aplicação da relação de Provoost geraria sobrepressões mais elevadas na válvula de retenção, produzindo valores mais conservativos. No momento, os fabricantes de válvulas de retenção não fornecem os parâmetros que caracterizam a válvula em função do torque necessário ao seu fechamento. Porém, existe uma tendência entre os diversos fabricantes em fornecer as características dinâmicas de suas válvulas, como sugerido por Provoost. Assim, este conceito será utilizado no presente trabalho, uma vez que este procedimento representa de forma mais real o comportamento da válvula do que os métodos de fechamento instantâneo ou de tempo de fechamento pré-determinado.

### 3. Modelagem

Este trabalho utiliza o software comercial Stoner Pipeline Simulator (SPS) para as simulações. Uma vez que o SPS não dispõe de um modelo dinâmico de válvula de retenção, foi desenvolvida uma rotina de programação, com as instruções disponíveis do programa, de forma a alterar um modelo de uma válvula de bloqueio existente para que esta se comportasse como uma válvula de retenção dinâmica.

O procedimento utilizado para modelar uma válvula de retenção dinamicamente, segundo a relação de Provoost segue os seguintes passos (Thorley, 1989, Koetzier et al, 1986):

1. Determinar a desaceleração média até o instante em que a velocidade do escoamento no ponto onde existe a válvula de retenção é nula;
2. Utilizando a relação dinâmica da válvula (Figura 1), obter a máxima velocidade reversa a partir da desaceleração calculada;
3. Prosseguir no transiente até que a velocidade reversa na válvula seja igual ao valor obtido no item 2;
4. Colocar a condição de contorno de velocidade deste ponto igual a zero, instantaneamente;
5. Prosseguir no transiente com a velocidade neste ponto mantida em zero.

De forma a validar este procedimento, foi desenvolvido um programa de simulação de escoamentos em dutos que utiliza o método das características. Neste programa, foi implementada a mesma estrutura lógica de válvula de retenção utilizada no SPS e diversos testes foram realizados com os resultados dos dois métodos apresentando excelente concordância (Sousa, Pires, Sarmento, Barreto, 2004).

### 4. Análise de Casos

#### 4.1. Modelo Simplificado de Carregamento

A Figura 2 apresenta um modelo simplificado de carregamento de petróleo, onde o escoamento é produzido por uma bomba localizada no terminal. Um trecho de 100m, com um diâmetro de 24", reproduz a tubulação no terminal, e um trecho de 18km, com diâmetro de 40", representa a interligação do duto até a tubulação do píer de 18" de diâmetro. A válvula de retenção analisada, CKV1, está localizada no início do duto curto de 24", e a válvula de bloqueio V-1 no final do duto é fechada em 12 segundos produzindo o transiente na linha. O fluido possui massa específica de 946kg/m<sup>3</sup> e viscosidade de 264.4cP. Nesta situação, a vazão obtida é de 4265m<sup>3</sup>/h.

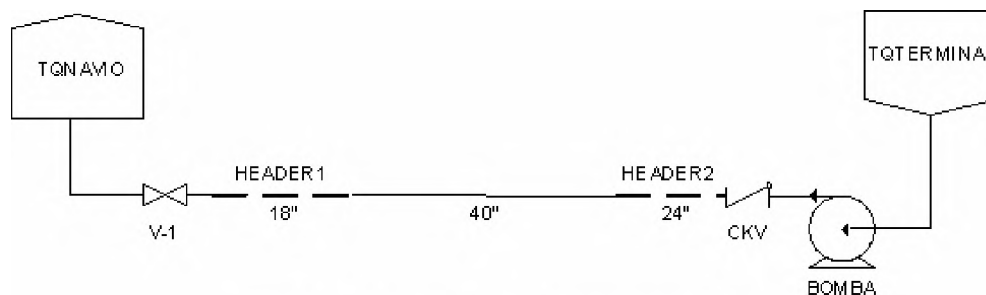


Figura 2. Modelo simplificado de carregamento de petróleo

Foi considerado, inicialmente, o modelo de válvula de retenção padrão do SPS, cujo controle é feito através da alteração do tempo de atuação. As Figuras 3 e 4 permitem observar o efeito do bloqueio da válvula V-1 para dois tempos de fechamento da válvula de retenção: 0,05min (3s) e 0,00001min (fechamento instantâneo). Verifica-se a partir da Figura 3 que no fechamento com atraso de 3s ocorre uma elevação de pressão no instante que a válvula está completamente fechada (2474kPa). Este efeito é decorrente do contra-pulso promovido pela válvula

1,24m/s). Observa-se também que o trecho de tubulação próximo a bomba apresenta um diâmetro menor (24") que o restante do duto (40"), fazendo com que o fluido escoe com velocidade maior, o que produz pressões altas durante os transientes.

A Figura 4 apresenta os resultados para o fechamento instantâneo da válvula de retenção. Neste caso observa-se que o máximo transiente obtido é de 2389 kPa, não apresentando o pico de pressão verificado na situação anterior, uma vez que não existe mais uma velocidade reversa no momento do fechamento da válvula. (Figura 3).

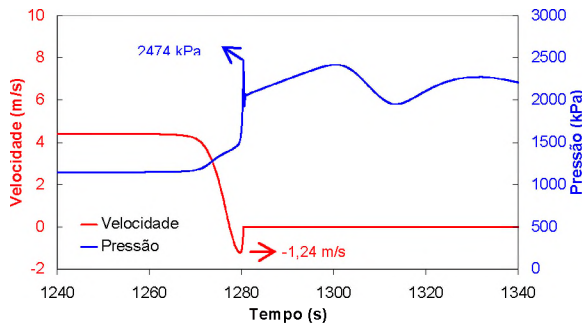


Figura 3. Histórico de velocidade e pressão na válvula de retenção para fechamento em 3s. Válvula de bloqueio fechando em 1min

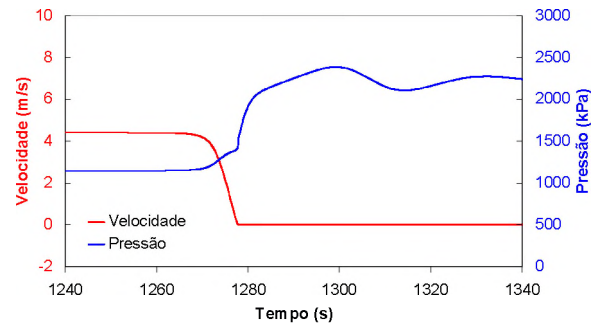


Figura 4. Histórico de velocidade e pressão na válvula de retenção para fechamento instantâneo. Válvula de bloqueio fechando em 1min

As Figuras 5 e 6 mostram os resultados da simulação do mesmo transiente, porém utilizando a modelagem dinâmica da válvula de retenção tipo portinhola (curva T2 da Figura 1). Observa-se na Figura 5 que para um fechamento de 1 minuto da válvula de bloqueio, a máxima pressão obtida no transiente é de 2404 kPa, e a elevação de pressão no instante do fechamento da válvula de retenção é reduzida para 1926 kPa. A resposta da válvula de retenção na modelagem dinâmica depende de cada tipo de transiente gerado na tubulação. Assim, quando a válvula de bloqueio é fechada num tempo menor, de 12s, a velocidade reversa na válvula de retenção, no instante do seu fechamento total, tem amplitude maior (Figura 6) e por esta razão a pressão neste instante é superior (2211kPa). Como pode ser observado o efeito de "slam" promovido pela válvula de retenção pode passar despercebido, visto que os valores máximos do transiente obtidos para fechamento instantâneo, em 3s, e dinâmico não variam muito, contudo este mesmo modelo com escoamento no sentido inverso possui um comportamento diferente, onde a modelagem da válvula de retenção influencia de forma mais efetiva o comportamento transiente.

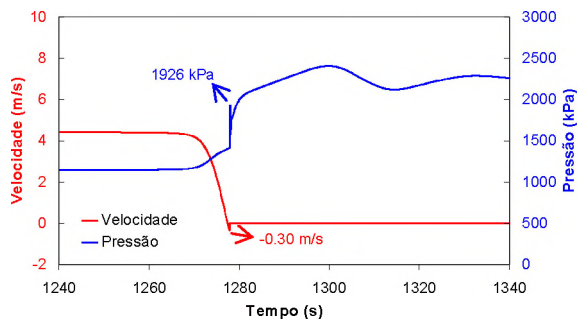


Figura 5. Histórico de velocidade e pressão na válvula de retenção tipo portinhola. Válvula de bloqueio fechando em 1 min

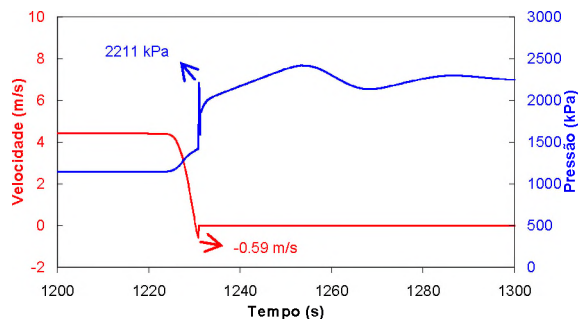


Figura 6. Histórico de velocidade e pressão na válvula de retenção tipo portinhola. Válvula de bloqueio fechando em 12s

#### 4.2. Modelo Simplificado de Descarregamento

A operação de descarregamento de petróleo simulada consiste no modelo anterior operando no sentido inverso, onde a bomba está localizada no navio e a válvula de retenção analisada, CKV1, está localizada no início do duto curto de 18" de diâmetro. Foi utilizado o mesmo fluido do modelo de carregamento e a válvula de bloqueio V-2 com CV de 40000 foi fechada em 1min para gerar o transiente na linha. A vazão de operação é a mesma, mas as velocidades no header de entrada, trecho de 18", são maiores que as existentes no trecho de 24". A Figura 7

apresenta o comportamento da válvula de retenção com fechamento em atraso de 3s. Nota-se que a pressão máxima alcançada de 2776 kPa é superior ao valor obtido no caso de carregamento (2474kPa). A pressão máxima alcançada no trecho inicial de 18" para fechamento instantâneo da válvula de retenção é de 2245 kPa., como ilustrado na Figura 8, não se verificando o efeito da válvula de retenção, como no caso do descarregamento (Figura 4). Utilizando a modelagem dinâmica (Figura 9) de uma válvula de portinhola, a pressão máxima foi de 2446 kPa, superior ao modelo de carregamento. Estes valores, superiores aos obtidos no descarregamento, são devidos ao header de 18", localizado antes da válvula de retenção, o qual provoca velocidades mais elevadas que no caso do carregamento. Para transientes mais lentos, como apresentado na Figura 10, a elevação de pressão associada a retenção é menor .

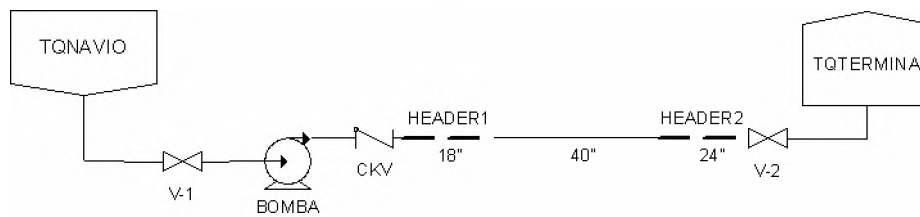


Figura 6. Modelo simplificado de carregamento de petróleo

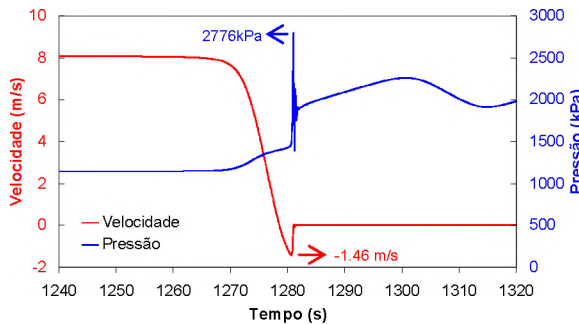


Figura 7. Histórico de velocidade e pressão na válvula de retenção para fechamento em 3s (descarga). Válvula de bloqueio fechando em 1min (CV 40000)

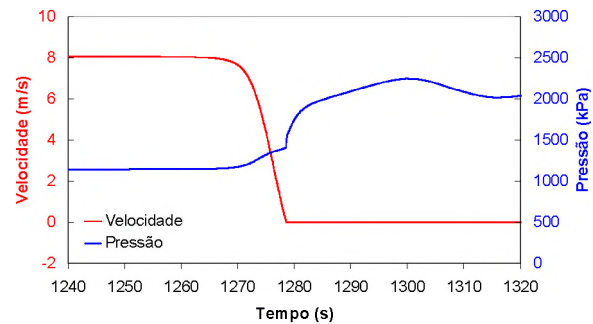


Figura 8. Histórico de velocidade e pressão na válvula de retenção para fechamento instantâneo (descarga). Válvula de bloqueio fechando em 1min (CV 40000)

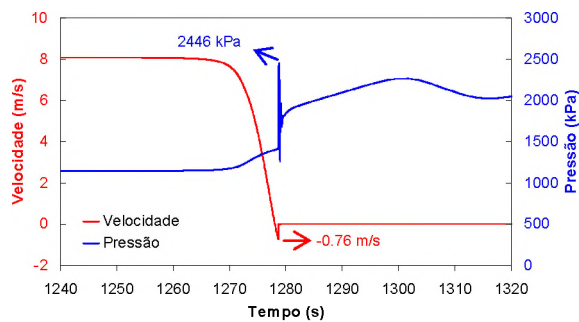


Figura 9. Histórico de velocidade e pressão na válvula de retenção tipo portinhola (descarga). Válvula de bloqueio fechando em 1min (CV 40000)

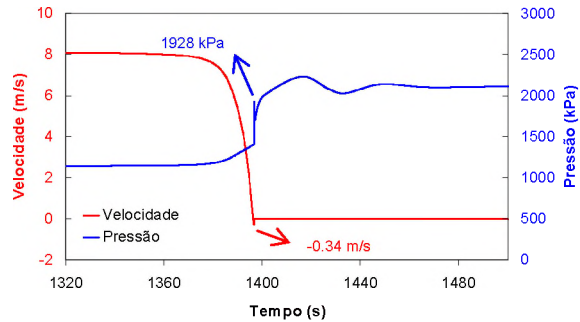


Figura 10. Histórico de velocidade e pressão na válvula de retenção tipo portinhola (descarga). Válvula de bloqueio fechando em 3min (CV 40000)

### 4.3. Modelo de um Oleoduto Real

O modelo apresentado esquematicamente na Figura 2 foi baseado em um oleoduto real, que interliga o terminal de Ilha d' Água ao Terminal de Campos Elíseos (CE). Neste terminal os navios bombeiam o petróleo através dos dutos de 26" e 32" até a refinaria de Duque de Caxias (REDUC), onde estes dois dutos são interligados num único duto de 40" até chegar no Terminal de Campos Elíseos (CE). Nas extremidades destes dutos existem pequenos trechos de tubulação com diâmetros menores e na área do píer a tubulação tem um diâmetro de 18

polegadas e um comprimento aproximado de 100m. Esta redução de diâmetro produz velocidades elevadas neste trecho, o que, normalmente, amplifica os efeitos dos transientes. O sistema de alívio existente na Ilha D'água não foi considerado nas simulações.

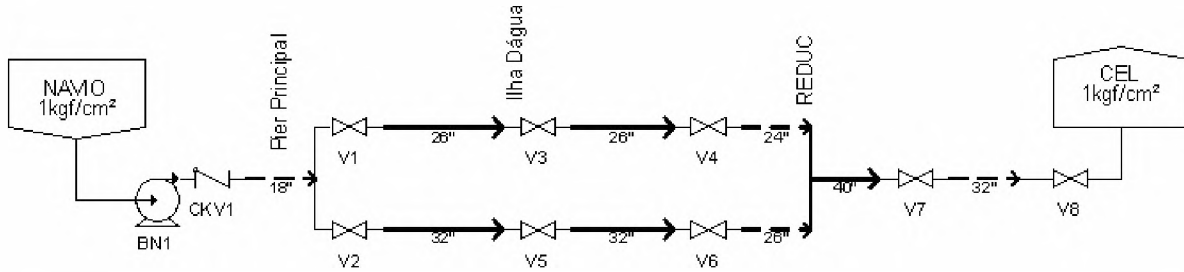


Figura 11. Desenho esquemático do modelo utilizado no SPS (Ilha D'água a Campos Eliseos)

Nas operações de descarregamento de petróleo o transiente mais crítico ocorre quando a válvula de bloqueio (V7) no final da linha de 40" é fechada, com a bomba ainda operando. Esta válvula possui intervalo de fechamento conhecido e normalmente ocorre em 3min.

A Figura 12 ilustra o perfil de máxima pressão entre o Pier e o terminal de Campos Eliseos através das linhas de 18", 26" e 40", quando é utilizado o tempo de fechamento padrão do SPS para a válvula de retenção (3 s). Nota-se que a máxima pressão obtida durante o transiente ocorre no trecho de 18" (trecho entre 0 e 100m) devido ao contra-pulso promovido pela válvula de retenção, que é superior ao pulso original gerado pela válvula de bloqueio. Verifica-se que neste trecho a pressão máxima ultrapassa a pressão máxima de operação admissível (PMOA) em mais de 10%. O histórico de velocidade e de pressão na válvula de retenção (CKV1) está apresentado na Figura 13.

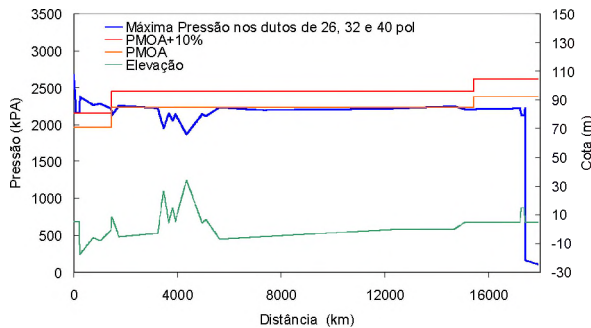


Figura 12. Perfil de máxima pressão nos oleodutos 18", 26" e 40" (fechamento em 3s)

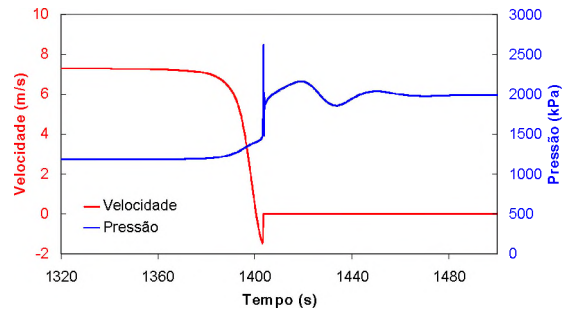


Figura 13. Histórico de velocidade e pressão na válvula de retenção para fechamento em 3s. Válvula de bloqueio fechando em 3min

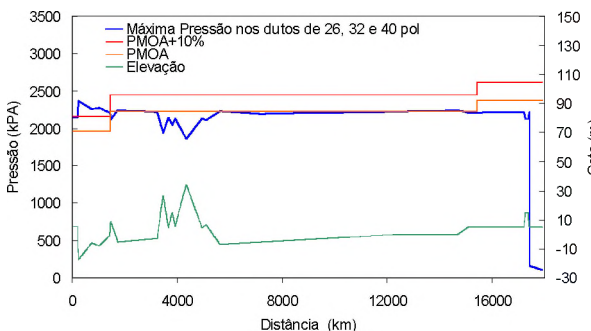


Figura 14. Perfil de máxima pressão nos oleodutos 18", 26" e 40" (fechamento instantâneo)

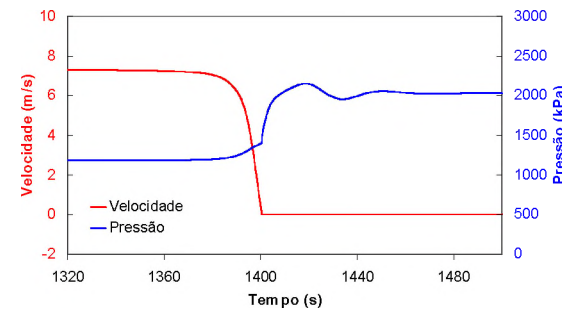


Figura 15. Histórico de velocidade e pressão na válvula de retenção para fechamento instantâneo. Válvula de bloqueio fechando em 3min

Modificando o fechamento da válvula de retenção para um valor muito pequeno 0,00001min (0,0006 s), de forma a simular um fechamento instantâneo, obteve-se um novo transiente (Figura 14), menos intenso que o inicialmente obtido com tempo de 3 s. Isto ocorre por que a velocidade reversa no momento do fechamento da válvula é muito pequena (Figura 15), não promovendo mais a elevação de pressão no pier. A diferença de 21,6% entre os dois resultados é devida unicamente à modelagem da válvula de retenção. Somente uma modelagem mais precisa desta válvula poderá evitar que, por exemplo, o dimensionamento de tubulações ou o dimensionamento de um sistema de alívio sejam feitos de forma correta.

Assim, o mesmo transiente foi simulado, porém utilizando a modelagem dinâmica da válvula de retenção. A válvula de retenção foi do tipo portinhola (curva T2 da Figura 1). O perfil de máxima pressão obtido (Figura 16) é praticamente igual ao obtido com fechamento instantâneo (Figura 14) uma vez que a velocidade na válvula de retenção, no momento do seu fechamento completo é muito pequena (Figura 17). Quando a mesma válvula de retenção do tipo portinhola é submetida a uma maior desaceleração sua resposta é diferente. Isto pode ser constatado para o transiente no qual o tempo de fechamento da válvula de bloqueio é reduzido para 1 minuto. Observa-se que os valores de pressão máxima no momento do fechamento completo da válvula de retenção (Figuras 18 e 19) são mais elevados que no caso anterior.

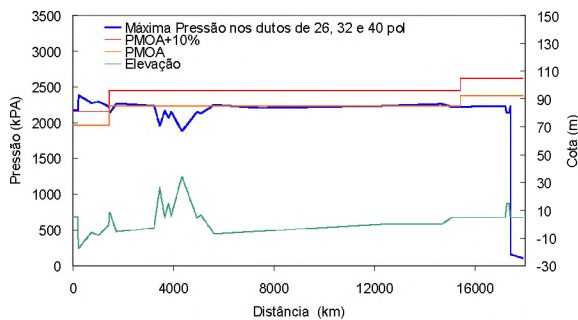


Figura 16. Perfil de máxima pressão para válvula de retenção tipo portinhola (T2) e válvula de bloqueio fechando em 3min

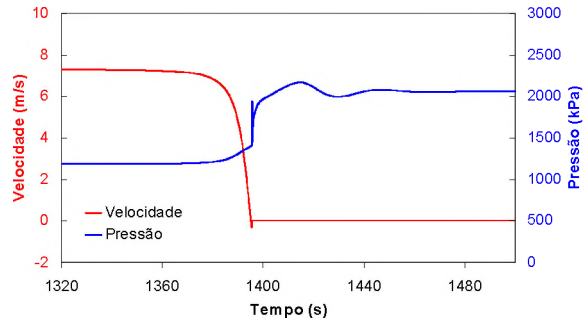


Figura 17. Válvula de retenção tipo portinhola (T2) e válvula de bloqueio fechando em 3min

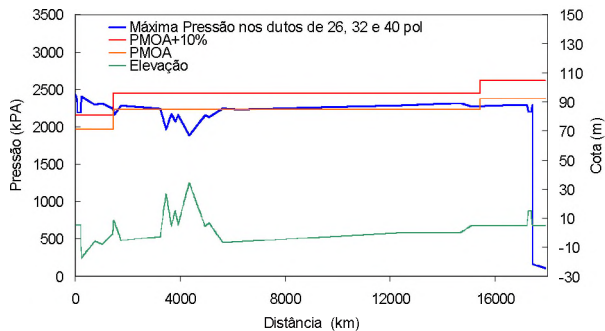


Figura 18. Perfil de máxima pressão para válvula de retenção tipo portinhola (T2) e válvula de bloqueio fechando em 1min

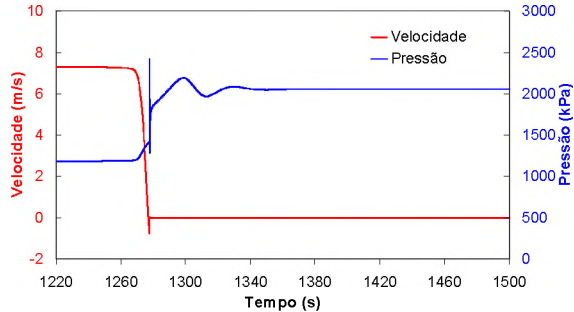


Figura 19. Válvula de retenção tipo portinhola (T2) e válvula de bloqueio fechando em 1min

## 5. Conclusões

A modelagem de atuação dinâmica de válvulas de retenção foi realizada utilizando um programa de simulação comercial e alguns resultados foram comparados para o mesmo modelo em dois sentidos de bombeio. No caso de um duto real, como o de um terminal marítimo, a redução do diâmetro nas extremidades do oleoduto, produzem uma velocidade mais acentuada do escoamento nestes trechos e os seus efeitos transitórios sofrem influência de outros fatores como o do tipo da modelagem da válvula de retenção. Demonstrou-se que nem sempre a modelagem tradicional de válvulas de retenção, ou seja, com fechamento instantâneo pode ser adotada como sendo o de caráter mais conservativo, e que outras como a de fechamento em atraso, se apresentam no outro extremo podendo maximizar os resultados do transitório.

## 6. Agradecimentos

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

## 7. Referências

- KOETZIER, H., KRUISBRINK, A.C.H., LAVOOIJ, C.S.W. *Dynamic Behavior of Large Non-Return Valves*, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Pressure Surges, Hannover, Germany, pp 237-243, 1986.
- LEISHEAR, R.A., MOREHOUSE, J.H.. *Water Hammer Pressure Transients*, Proceedings of HT-FED04, 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, Charlotte, N.C., July 11-15.
- LIOU, J.C.P., LI, G. *Provoost's Dynamic Characteristic of Check Valves Revisited*,. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Pressure Surges, Chester, UK, Volume I, 2004.
- PROVOOST, G.A. *The Dynamic Behavior of Non-Return Valves*, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Pressure Surges, BHRA, Canterbury, England, pp415-428, 1980.
- PROVOOST, G.A. *A Critical Analysis to Determine Dynamic Characteristics of Non-Return Valves*, paper F4, 4<sup>th</sup> International Conference on Pressure Surges, BHRA, Bath, England, pp 275-286, 1983.
- THORLEY, A.R.D. *Check Valve Behavior under Transient Flow Conditions, a State-of-the-Art Review*, J. of Fluids Engineering, ASME, Vol. 111, pp 178-183, 1989.
- VAL-MATIC VALVE AND MANUFACTURING CORP. *Dynamic Characteristics of Check Valves*, Technical Paper, 1993.