



IBP48504

## COMPORTAMENTO DE PULSOS DE PRESSÃO EM TRECHOS DE DIÂMETRO REDUZIDO DE DUTOS DE TERMINAIS MARÍTIMOS

Antônio Geraldo de Sousa<sup>1</sup>, Luis Fernando G. Pires<sup>2</sup>, Renata C. Sarmento<sup>3</sup>, Cláudio V. Barreto<sup>4</sup>

### Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2004*, realizada no período de 4 a 7 de outubro de 2004, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pela Comissão Técnica 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, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2004*.

### Resumo

Num terminal marítimo a tubulação no píer apresenta um diâmetro reduzido que amplifica 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. A modelagem dinâmica de válvulas de retenção foi realizada utilizando um programa comercial de simulação de dutos e os resultados foram comparados com um modelo desenvolvido utilizando o método das características. Um caso real, de um terminal marítimo, demonstrou que, mesmo para um duto que trabalha a baixa pressão e com pequena elevação a modelagem cuidadosa desta válvula deve ser realizada de forma que não se obtenha resultados irreais de pressão no trecho de diâmetro reduzido.

### Abstract

In a shipping terminal, the pipeline in the pier usually has a diameter smaller than the main pipeline diameter. This diameter reduction amplifies the effects caused by hydraulic transients. It was noticed during simulations that check valves placed in the pier may introduce some error in the maximum pressure when it was modeled in a conventional fashion. The dynamic check valve model had been added to a commercial pipeline simulation software and the results was compared with a similar model using the method of characteristics. Considering a real state shipping terminal case, it was proved even a pipeline that works with low pressure and smooth elevation profile 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

<sup>1</sup> Engenheiro de Terminais e Dutos – Petrobras/Transpetro

<sup>2</sup> Doutor, Engenheiro Mecânico – SIMDUT (PUC-Rio)

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

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico – SIMDUT (PUC-Rio)

fato de que elas devem fechar tão logo a vazão seja reduzida a zero. Em sistemas onde o bombeamento trabalha com *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.

Um modelo simples, como apresentado na Figura 1, permite observar o efeito do fechamento instantâneo e de dois valores para tempo de retardo, 0,05min e 0,1min. Com a parada da bomba verifica-se, pelos resultados apresentados na Figura 2, que este parâmetro está diretamente ligado à pressão resultante na válvula.

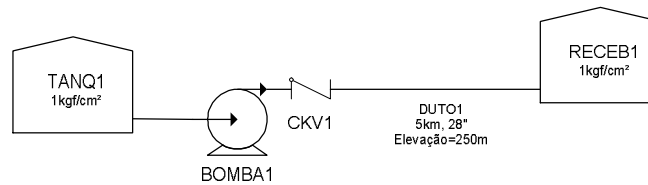


Figura 1. Modelo simplificado.

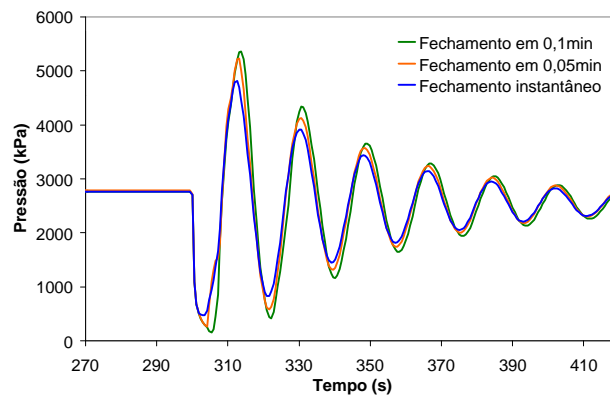


Figura 2. Variação de pressão na válvula para diferentes instantes de fechamento.

Este efeito pode ser ainda mais severo quando existem bombas trabalhando em paralelo e somente uma é parada. Como as descargas das bombas estão comunicadas, a válvula de retenção na descarga da bomba parada

observa uma variação de pressão extremamente rápida, provocando seu fechamento e, dependendo do tipo da válvula de retenção, elevados picos de pressão podem ser gerados (Leishear e Morehouse 2004).

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 3 (Val-Matic, 1993). Neste gráfico o eixo horizontal representa a desaceleração média do escoamento até o instante 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 e T2 representam as respostas dinâmicas típicas de válvulas de retenção do tipo esfera e de portinhola respectivamente e a curva T3 representa modelos de válvulas redutoras de golpe de aríete (SCV). De posse da aceleração, consulta-se o gráfico da Figura 3 para obter a velocidade reversa máxima, que é utilizada na equação 1 para determinar a elevação de pressão resultante da atuação da válvula.

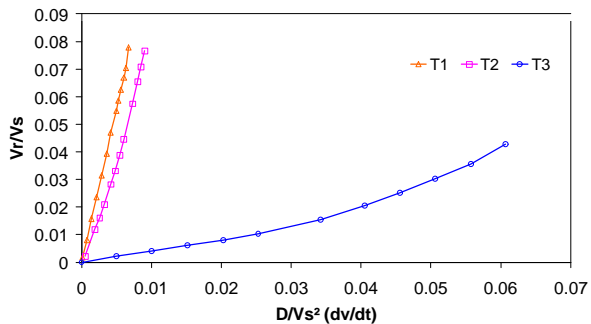


Figura 3. Respostas dinâmicas típicas de diversos modelos de válvula de retenção.

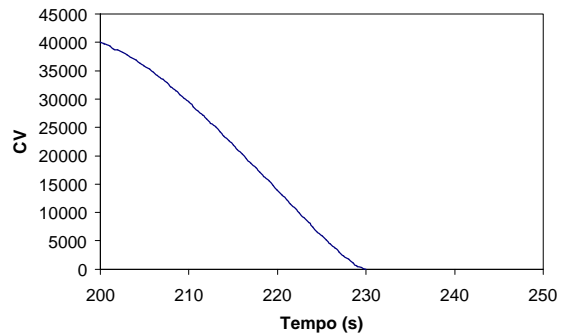


Figura 4. Variação do coeficiente de descarga da válvula de bloqueio com o tempo.

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 a 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

De forma a validar o procedimento de modelagem dinâmica da válvula de retenção, realizou-se, inicialmente, uma comparação entre a instrução padrão de válvula de retenção do programa comercial de simulação de dutos Stoner Pipeline Simulator (SPS) e um programa de simulação desenvolvido que utiliza o método das características (SIEMC) (Willie and Streeter). Assim, foi realizada uma comparação entre os dois programas, utilizando um modelo simplificado de um terminal. Neste modelo, o escoamento é produzido pelo diferencial de pressão entre os tanques de envio (fonte de pressão constante) e o tanque de recebimento. Um trecho de 100m, com um diâmetro reduzido, reproduz a tubulação no píer, e um trecho complementar de 18km, com um diâmetro maior, representa o restante do duto até o tanque de recebimento. A válvula de retenção analisada, CKV1, está localizada no início do duto curto, e uma válvula de bloqueio no final do duto de maior diâmetro é fechada produzindo o transiente na linha. O fluido

possui massa específica de  $946\text{kg/m}^3$  e a velocidade de propagação da onda sonora no duto é de  $1475\text{m/s}$ . A curva de fechamento da válvula de bloqueio encontra-se na Figura 4. O diagrama esquemático deste duto está apresentado na Figura 5. A Figura 6 apresenta a comparação entre os programas quando a válvula de retenção tem um fechamento instantâneo. Observa-se que neste caso, Figura 6, os programas apresentam uma excelente concordância, com valores de pressão máxima na face da válvula de retenção de  $3232\text{ kPa}$  (SIEMC) e de  $3247\text{ kPa}$  (SPS). Quando é utilizado o procedimento no qual defini-se o tempo de fechamento da válvula de retenção, no caso  $3\text{ s}$  (valor padrão do SPS), observa-se um pico de pressão extremamente elevado quando a válvula é completamente fechada ( $8379\text{ kPa}$ ). Este efeito é decorrente da existência de uma velocidade reversa neste instante (Figura 7).

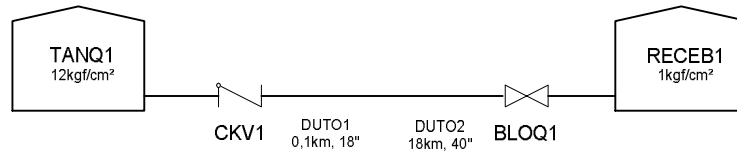


Figura 5. Esquema do modelo utilizado para validação do procedimento empregado no programa Stoner Pipeline Simulator.

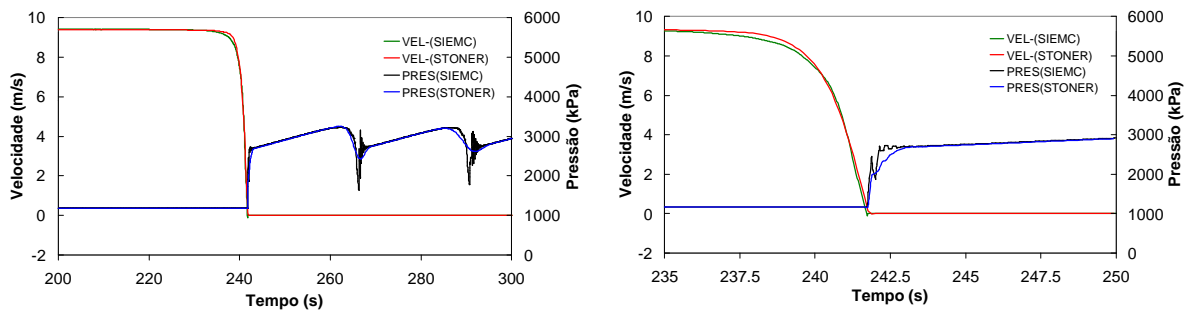


Figura 6. a) Variação da pressão e velocidade depois da válvula de retenção para fechamento instantâneo e b) com escala de tempo ampliada.

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 3), 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.

Uma vez que o SPS não dispõe de um modelo de válvula de retenção dinâmico, 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. De forma a validar este procedimento, uma mesma estrutura lógica de válvula de retenção foi implementada no programa que utiliza o método das características (SIEMC). Selecionou-se uma válvula de retenção tipo portinhola de  $18''$  cujo comportamento está representado pela curva T2 da Figura 3. Os resultados dos dois métodos foram comparados e estão apresentados na Figura 8. Observa-se que a atuação desta válvula produz uma elevação de pressão de  $4432\text{ kPa}$  no programa SIEMC e de  $4295\text{ kPa}$  no SPS, representando uma variação de  $3,1\%$ , o que permite considerar que a rotina implementada no SPS é válida. A Tabela 1 apresenta os resultados de forma resumida. Verifica-se que, em relação a modelagem dinâmica realizada no SPS, existe uma diferença considerável na máxima pressão quando se considera o fechamento instantâneo ( $-24,0\%$ ) e o fechamento com um tempo determinado ( $+95,1\%$ ).

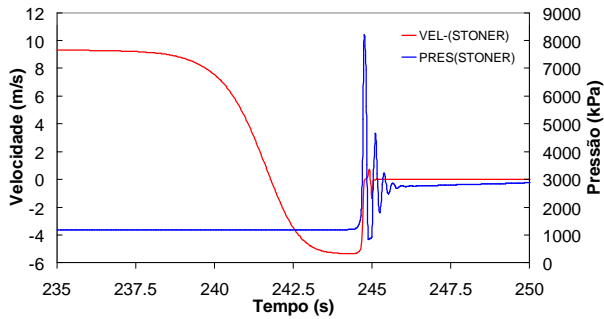


Figura 7. Variação da pressão e velocidade depois da válvula de retenção para fechamento em 3s.

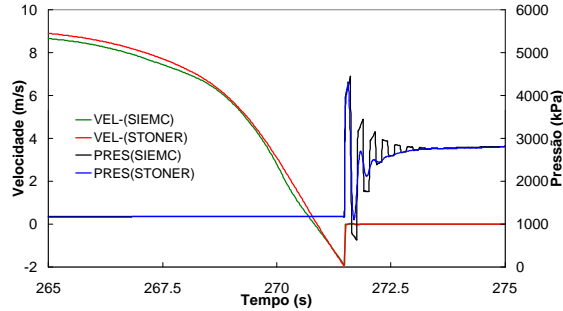


Figura 8. Variação da pressão na válvula de retenção com o tempo para os dois programas utilizando modelagem dinâmica.

Tabela 1. Comparação entre os programas SPS e SIEMC para diferentes tipos de simulação da válvula de retenção.

Programa	Fechamento instantâneo	Tempo de fechamento de 3s	Fechamento dinâmico
SPS	3264 kPa (-22,8%)	8379 kPa (98,1%)	4295 kPa
SIEMC	3237 kPa		4432 kPa

#### 4. Análise de Caso

O modelo em estudo foi baseado em um oleoduto real, que interliga o terminal de Ilha d' Água ao Terminal de Campos Elíseos (CEL). 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 (CEL). Nas extremidades destes dutos existem pequenos trechos de tubulação com diâmetros menores, como indicado no esquema apresentado na Figura 9. Na área do píer a tubulação tem um diâmetro de 18 polegadas e um comprimento aproximado de 100m.

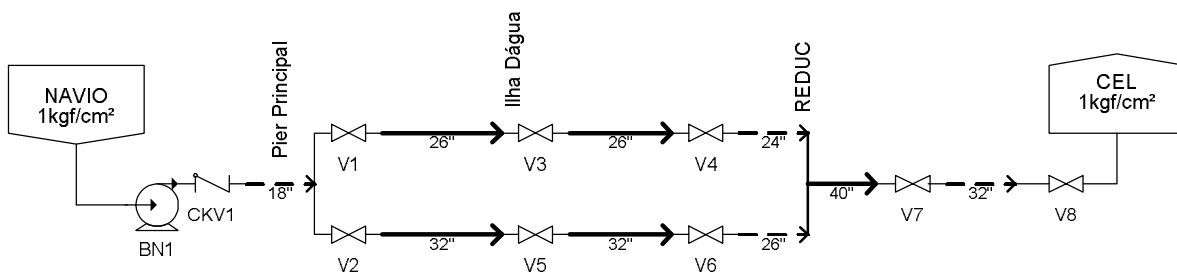


Figura 9. Desenho esquemático do modelo utilizado no SPS (Ilha D'água a Campos Elíseos).

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 3 min. Foi considerada, inicialmente, o modelo de válvula de retenção padrão do SPS, cujo controle é feito através da alteração do tempo de atuação, com fechamento total em atraso de 0,05 min (3 s).

A Figura 10 ilustra o perfil de máxima pressão entre o Píer e o terminal de Campos Elíseos através das linhas de 18", 26" e 40" quando é utilizado o tempo de fechamento padrão do SPS para esta válvula, 0,05 min (3 s). Nota-se que a máxima pressão obtida durante o transiente (3037 kPa) ocorre no trecho de 18" (trecho entre 0 e 100 m) devido ao contra-pulso promovido pela válvula de retenção. Este contra-pulso é superior ao pulso original gerado pela válvula de bloqueio porque no instante em que a válvula de bloqueio fecha completamente, a velocidade reversa é elevada (-1,948 m/s). Verifica-se que neste trecho a pressão máxima ultrapassa a pressão máxima de operação admissível (PMOA). Os históricos de velocidade e de pressão na válvula de retenção (CKV1) e na válvula de bloqueio V7 estão apresentados na Figura 11.

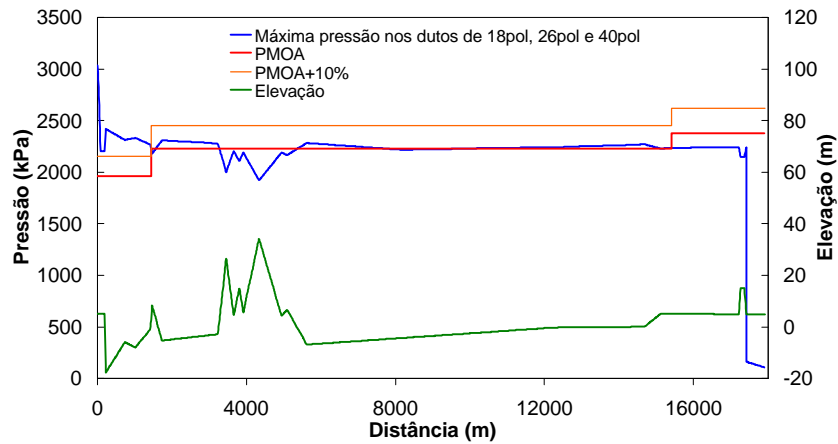


Figura 10. Perfil de máxima pressão nos oleodutos 18”, 26” e 40” (fechamento com atraso de 3s).

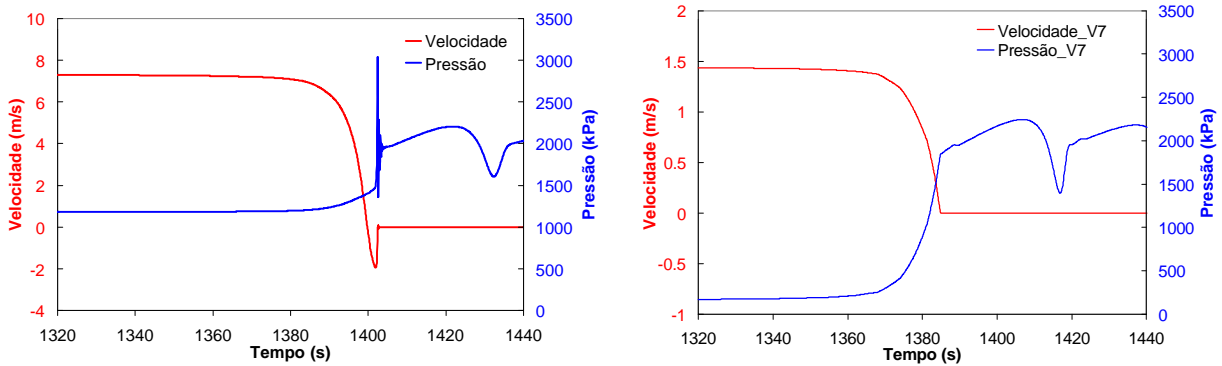


Figura 11. Histórico de pressão e velocidade nas válvulas CKV1 e V7 (fechamento com atraso de 3s).

Modificando o fechamento da válvula de retenção para um valor muito pequeno (0,0006 s), de forma a simular um fechamento instantâneo, obteve-se um novo transiente (Figura 12), 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 13), não promovendo mais o pico de pressão neste equipamento (2209 kPa). A diferença de 22,3% entre os dois resultados é decorrente unicamente da 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 incorreta.

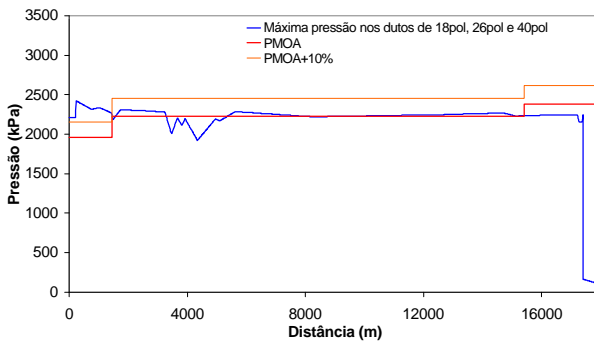


Figura 12. Perfil de máxima pressão nos oleodutos 18”, 26” e 40” (fechamento instantâneo).

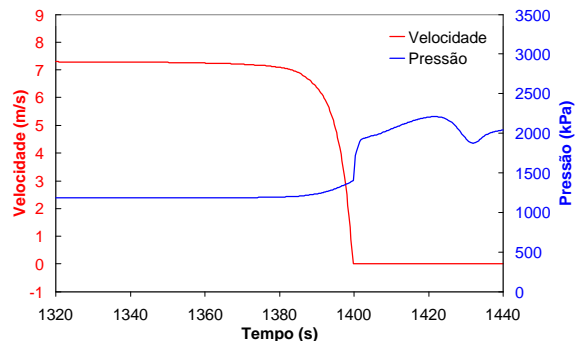


Figura 13. Histórico de pressão e velocidade na CKV1 (fechamento instantâneo).

Assim, o mesmo transiente foi simulado, porém utilizando a modelagem dinâmica da válvula de retenção. Foram analisados dois tipos diferentes de válvulas de retenção (curvas T2 e T3 retiradas da Figura 3) com dois tempos de fechamento da válvula de bloqueio que gera o transiente: 1 e 3 minutos. Os resultados estão apresentados nas Figuras 14 e 15. Observa-se que o tipo da válvula de retenção influi diretamente no valor da máxima pressão ocorrida neste equipamento e que este efeito é mais pronunciado quando o transiente é mais severo, isto é, quando a válvula de bloqueio fecha mais rapidamente, o efeito do tipo da válvula de retenção produz resultados significativamente diferentes nos valores de pressão máxima.

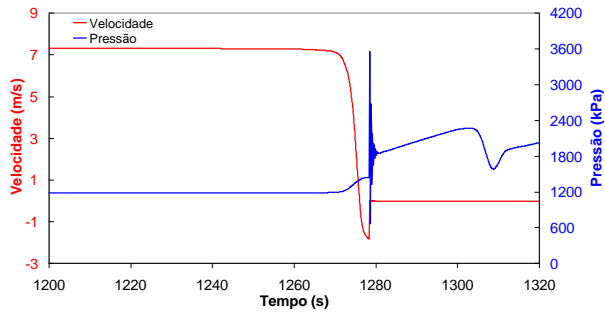


Figura 14 a. Válvula de retenção tipo portinhola (T2) e válvula de bloqueio fechando em 1min

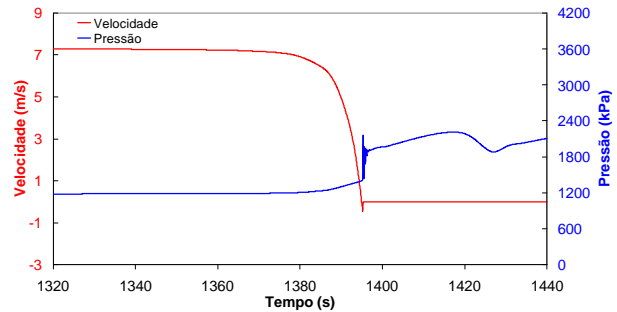


Figura 14 b. Válvula de retenção tipo portinhola (T2) e válvula de bloqueio fechando em 3min

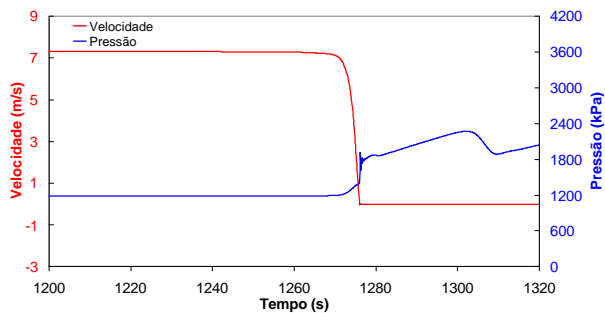


Figura 15 a. Válvula de retenção tipo SCV (T3) e válvula de bloqueio fechando em 1min

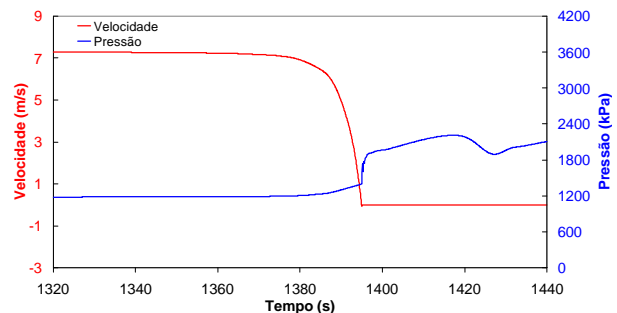


Figura 15 b. Válvula de retenção tipo SCV (T3) e válvula de bloqueio fechando em 3min

## 5. Conclusões

A modelagem de atuação dinâmica de válvulas de retenção foi realizada utilizando um programa de simulação comercial e alguns resultados foram comparados com um programa desenvolvido que utiliza o método das características. No caso de um duto real, como o de um terminal marítimo, a redução do diâmetro no píer, próximo à válvula, produz uma velocidade mais acentuada do escoamento neste trecho e os efeitos da modelagem da atuação das válvulas de retenção são amplificados. Demonstrou-se que mesmo num duto sem elevação acentuada e com baixo head a modelagem das válvulas de retenção deve ser feita com precisão de forma a não gerar resultados com um elevado grau de imprecisão.

## 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.
- WYLIE, E.B., STREETER, V.L. *Fluid Transients*, McGraw-Hill, 1978.