

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS DE ALÍVIO EM DUTOS DE TERMINAIS MARÍTIMOS

Luis F.G. Pires¹, Renata C. da Cunha Ladeira², Arturo J. Ortega Malca³,
Helmut Kossatz⁴

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

Com a intenção de reduzir custos operacionais, terminais marítimos trabalham com altas vazões transferindo produto entre navios e tanques em terra. Para proteger o duto de possíveis transientes hidráulicos, é comum a instalação de sistemas de alívio e segurança em posições estratégicas. Durante a etapa de projeto do duto, a simulação computacional é utilizada como ferramenta auxiliar na determinação do tipo da válvula e do local onde o sistema de alívio deve ser instalado. O presente trabalho apresenta resultados que mostram que o tipo de sistema de alívio e sua localização no duto afetam diretamente os valores de pressão gerados no transiente. Além disso, compara o comportamento do sistema de alívio de mola e de disco de ruptura utilizando as ferramentas de um programa comercial e utilizando a modelagem com o método das características.

Abstract

In order to reduce operational costs, maritime terminals work with high flows transferring product between ships and in shore tanks. To protect the pipeline from any hydraulic transient, relief systems are commonly installed in strategic positions. During the project stage, computational simulation is widely used as auxiliary tool to determine the kind of valve and the place where the relief system must be installed. The present work points out the importance of the kind of valve chosen and its location along the pipeline, and shows that these factors affect directly the surge pressure produced by the valve closure. Besides, it compares a conventional spring-loaded relief valve behavior to a rupture disc one, making use of commercial program tools and employing a model based on the method of the characteristics.

1. Introdução

A transferência de petróleo e derivados entre navios e tanques em terra geralmente é realizada através de dutos de comprimento da ordem de alguns quilômetros que operam com vazões elevadas. Uma vez que este processo ocorre em locais onde um vazamento pode resultar em conseqüências drásticas para o meio ambiente, os navios são providos de válvulas caracterizadas por um tempo de fechamento extremamente rápido. Ao ocorrer o fechamento desta válvula com o duto operando, é gerado o fenômeno conhecido como golpe de aríete, caracterizados por pressões extremamente elevadas. Para garantir uma transferência segura, geralmente é projetado um sistema de alívio que atenua o aumento de pressão gerado pelo golpe de aríete. O tipo do sistema de alívio e sua localização no duto afetam diretamente os valores dos picos de pressão gerados no transiente. Desta forma, durante a etapa de projeto do duto, a simulação computacional é utilizada como ferramenta auxiliar na determinação do tipo do sistema de alívio e do local onde o sistema deve ser instalado. Dentre os diversos sistemas de alívio existentes, o disco de ruptura e a válvula de alívio de mola são os mais simples e largamente utilizados. Porém, alguns programas comerciais de simulação de escoamento em dutos não são providos de modelos próprios para simulação destes elementos. Assim, dependendo da flexibilidade do programa,

¹ PhD, Engenheiro Mecânico – PUC-Rio, SIMDUT

² Engenheira Mecânica – PUC-Rio, SIMDUT

³ MSc, Engenheiro Mecânico – PUC-Rio, SIMDUT

⁴ MSc, Engenheiro de Equipamentos – Petrobras Transporte S.A.

outros dispositivos pré-programados devem ser utilizados para simular estes elementos. O presente trabalho compara o comportamento destes dois sistemas de alívio utilizando as ferramentas disponíveis do programa comercial Stoner Pipeline Simulator 9.3 (SPS) e utilizando uma modelagem empregando o método das características (MOC). Por fim, o desempenho e a localização dos sistemas de alívio são avaliados para um duto real.

2. Equacionamento e Método de Análise

A elevação de pressão ΔP , gerada pela redução de velocidade ΔV , é geralmente estimada por uma equação simplificada, conhecida como equação de Joukowsky (Wylie e Streeter, 1967 e ISGOTT, 1996).

$$\Delta P = \rho a \Delta V \quad (1)$$

A Equação 1 é aplicável ao fenômeno quando o fechamento da válvula pode ser caracterizado como instantâneo. Neste caso, a elevação de pressão será diretamente proporcional à variação da velocidade do escoamento antes do fechamento da válvula ΔV , à massa específica ρ e à velocidade de propagação da onda de pressão no duto a , dada pela expressão:

$$a^2 = \frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{E} \cdot \frac{D}{e}} \quad (2)$$

onde e é a espessura do duto, E é o módulo de elasticidade do material do duto, D o diâmetro e K é o módulo de bulk do fluido. Porém, para a análise do fenômeno num duto real, onde se deseja levar em consideração a curva de fechamento da válvula, a curva das bombas e outros acessórios no projeto do sistema de alívio, é necessário que o problema seja tratado utilizando as equações de conservação numa formulação transiente.

2.1. Método das Características

Uma vez que o fenômeno de golpe de aríete nestes dutos é caracterizado por ser extremamente rápido, o MOC se tornou uma ferramenta muito utilizada para a abordagem deste fenômeno uma vez que é necessário utilizar passos de tempo pequenos para se obter uma solução realista. O método utiliza as equações de conservação massa e de quantidade de movimento adaptadas para um escoamento unidimensional e incompressível como desenvolvido por Wylie e Streeter (1967):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial s} + V \operatorname{sen} \alpha = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial v}{\partial s} + g \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad (4)$$

onde s é a distância ao longo do duto, t é o tempo, f é o fator de atrito, H é o head e g é a aceleração da gravidade. A velocidade de propagação da onda no duto e o fator de atrito são tratados como constantes na formulação desenvolvida. Neste trabalho, a modelagem do método das características foi implementada com um passo de tempo fixo que é relacionado com a malha através da Equação 5.

$$\Delta t = \frac{L}{aN} \quad (5)$$

onde L é o comprimento do duto em metros e N é o número de pontos nodais definidos no domínio. Para complementar esta formulação é necessário definir as condições de contorno apropriadas para cada caso.

2.2. Formulação do Programa Comercial

O modelo matemático utilizado no programa SPS, assim como na maioria dos programas comerciais para finalidades semelhantes, resolve as equações de conservação de massa e quantidade de movimento como apresentado nas Equações 6 e 7:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{a^2}{g} \frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial s} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + V \frac{\partial v}{\partial s} + g \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{f}{2} \frac{V|V|}{D} + g \sin \alpha = 0 \quad (7)$$

Para completar a modelagem é preciso definir a correlação empírica que representa o fator de atrito f e equações de estado para avaliar as propriedades do fluido, como massa específica.

O conjunto de Equações 6 e 7 deve ser resolvido, utilizando-se pelo menos duas condições de contorno. O SPS resolve o sistema de equações lineares a cada passo de tempo. A análise transiente consiste na solução do sistema de equações diferenciais parciais linearizado, com segunda ordem de precisão no tempo. O passo de tempo é definido baseado na variação da pressão.

3. Sistemas de Alívio

3.1. Disco de Ruptura

Segundo a prática recomendada pela API 520 (2000), o disco de ruptura deve ser dimensionado através da Equação 8:

$$A = \frac{Q}{38K_d K_w K_c K_v} \sqrt{\frac{SG}{P - P_b}} \quad (8)$$

$$CV = \frac{Q}{\sqrt{\frac{P - P_b}{SG}}} \quad (9)$$

onde A é a área do orifício em pol^2 , Q é a vazão em gpm , SG é a densidade relativa do líquido, P é a pressão de alívio em psig , P_b é a pressão da linha de alívio em psig . O termo K_d , chamado de coeficiente de descarga específico, foi utilizado igual a 0,62 para o disco de ruptura. Os fatores K_w (fator de correção para a contra pressão), K_c (fator de correção para a condição de instalação) e K_v (fator de correção da viscosidade) foram considerados iguais a 1.

A modelagem do disco de ruptura considera que não existe escoamento através dele enquanto a pressão estiver abaixo do valor de rompimento. Quando a pressão no ponto onde o disco estiver instalado for igual ou superior a este valor, o disco se rompe instantaneamente.

A Equação 8 foi introduzida no modelo desenvolvido com o método das características como uma condição de contorno no ponto onde o disco está instalado. Os intervalos de tempo utilizados permitiram o acompanhamento do transiente e a abertura do disco, não apresentando nenhuma instabilidade numérica.

No programa SPS, como não existe um dispositivo programado para simular o disco de ruptura, foi utilizado um modelo modificado de uma válvula de bloqueio. O coeficiente de descarga (CV) para a válvula totalmente aberta foi definido pela Equação 9 para um disco com uma determinada área. Inicialmente, a válvula encontra-se fechada e sua abertura é comandada quando a pressão iguala ou ultrapassa a pressão de rompimento do disco.

3.2. Válvula de Alívio de Mola

Segundo a prática recomendada pela API 520 (2000), o dimensionamento de uma válvula de mola não certificada deve ser realizado segundo a Equação 10:

$$A = \frac{Q}{38K_d K_w K_c K_v K_p} \sqrt{\frac{SG}{1,25P - P_b}} \quad (10)$$

O termo K_p é o fator de correção devido ao valor da sobre-pressão. Para uma sobre-pressão de 25%, K_p é igual a 1. Para outros valores deve-se utilizar a curva apresentada na Figura 1. Este valor define a área, isto é, a fração de abertura do orifício em função de um percentual de sobre-pressão (%OP).

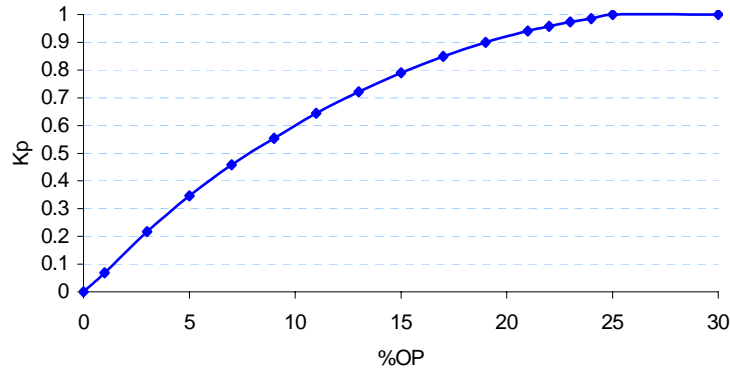


Figura 1. Coeficiente K_p em função do percentual de sobre-pressão (%OP)

O MOC permite uma solução numérica não iterativa, uma vez que a solução das equações em um instante de tempo depende somente da solução obtida no instante anterior. Isso caracteriza o método como explícito. A Equação 10 foi introduzida no modelo desenvolvido com o MOC na condição de contorno do ponto onde a válvula de alívio de mola está instalada. A metodologia adotada para a modelagem da condição de contorno na saída do duto é descrita abaixo.

1. Verifica-se se a pressão a montante da válvula de alívio é superior à pressão de alívio
2. Se a pressão for maior que a pressão de alívio, calcula-se a sobre-pressão com a Equação 11

$$\%OP = \left(\frac{P - P_{set}}{P_{set}} \right) \cdot 100 \quad (11)$$

3. Entra-se com o %OP no gráfico da Figura 1 e obtém-se o fator K_p
4. Com o K_p encontrado, calcula-se a vazão que passa pela válvula de alívio utilizando a Equação 10
5. Mediante a conservação de massa, calcula-se a velocidade
6. Calcula-se o *head* utilizando o valor da velocidade obtido no item anterior
7. Repete-se o processo a cada passo de tempo

Deve-se reparar que a abertura e o fechamento da válvula são obtidos diretamente pelo valor de K_p em função do percentual de sobre-pressão.

As válvulas de alívio de mola são construídas de forma a evitar o efeito de batimento (*chatter*) do disco na sede devido a variação da pressão durante o processo de alívio. Assim, somente quando a pressão é reduzida de um percentual determinado (*blowdown*) é que a válvula muda de uma situação de abertura para fechamento. Para haver o fechamento da PSV, o percentual de sobre-pressão deve sofrer um decréscimo regido pelo valor do *blowdown* adotado. A descrição da metodologia implementada no modelo de fechamento por *blowdown* de 20% é mostrada abaixo:

1. Verifica-se se o %OP no instante de tempo atual é superior ao %OP do passo de tempo anterior
2. Se o %OP atual for maior que o %OP anterior, aumenta-se o K_p
3. Se o %OP atual for menor que o %OP anterior, porém superior a 80% do %OP anterior, a válvula deve permanecer com o mesmo percentual de abertura
4. Se o %OP atual for menor que 80% do %OP anterior, a válvula começa a se fechar
5. Repete-se o processo a cada passo de tempo

No SPS, a válvula de alívio de mola é modelada por uma válvula de controle cujo coeficiente CV varia em função de K_p . O controlador PID (proporcional, integral e derivativo) e o atuador associados à malha da válvula de controle são configurados para representar o comportamento da mola do sistema de alívio.

4. Resultados

4.1. Caso Base para Estudo

A comparação do comportamento dos modelos implementados no SPS e no MOC foi realizada com sistema simplificado que consiste em um tanque de envio pressurizado a 12 kgf/cm^2 ($1176,8 \text{ kPa}$) e em um tanque de recebimento a 1 kgf/cm^2 (98 kPa) interligados por um duto de 18000 m de extensão. O diâmetro externo do duto é de 50 pol ($1,27 \text{ m}$) e sua espessura é igual a $5,5 \text{ mm}$ ($55 \times 10^{-4} \text{ m}$). O escoamento é produzido pelo diferencial de pressão entre os tanques. Uma válvula de bloqueio com tempo de fechamento de 30 segundos está localizada no final do duto e à montante encontra-se o sistema de alívio, como ilustrado na Figura 2. O fluido possui massa específica de 946 kg/m^3 e a velocidade de propagação da onda sonora no duto é 1532 m/s . O escoamento é isotérmico à temperatura de 25°C e o fator de atrito foi considerado constante igual a $0,029$. Tanto no teste com a PSV de mola quanto no modelo com disco de ruptura, a pressão de alívio é igual a 20 kgf/cm^2 (1961 kPa) e a contra-pressão foi considerada constante igual a $1,05 \text{ kgf/cm}^2$ (103 kPa) no tanque de alívio aberto.

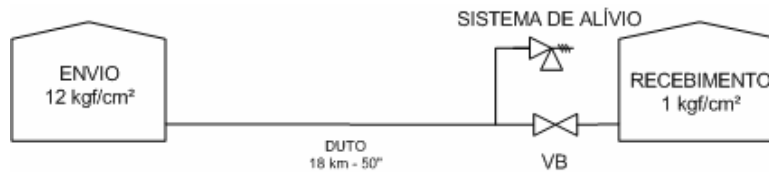


Figura 2. Esquema do modelo de validação do MOC

4.1.1. Disco de Ruptura

As Figuras 3 e 4 mostram os resultados obtidos com o MOC e com o método de diferenças finitas do SPS para o modelo simulado com disco de ruptura. No MOC definiu-se um domínio de 700 pontos nodais que resultou em um intervalo de tempo igual a $0,016785$ segundos, calculado através da Equação 5. No SPS o tempo de abertura da válvula de bloqueio que simula o disco de ruptura foi ajustado para $0,12$ segundos com o objetivo de representar uma abertura instantânea. O intervalo de tempo é definido pelo próprio programa, porém, o usuário pode estabelecer os valores máximos e mínimos. O intervalo de tempo mínimo foi ajustado para $6,6 \times 10^{-6}$ segundos.

O transiente se iniciou no tempo igual a 200 segundos e a válvula leva 30 segundos para se fechar completamente. Em $t = 228$ segundos, a pressão na face do disco atinge a pressão de ruptura e o disco se rompe aliviando a pressão na linha. Neste momento a pressão cai rapidamente para 120 kPa como pode ser observado na Figura 3. A Figura 4 apresenta a tendência da velocidade a montante da válvula de bloqueio. Com o fechamento da válvula de bloqueio, a vazão é gradativamente reduzida até o instante do rompimento do disco, o que provoca uma elevação da velocidade a praticamente os valores existentes antes do início do transiente. Os demais pulsos de velocidade são decorrentes da reflexão da onda no duto. É possível notar que o método de diferenças finitas introduz um amortecimento numérico ao se comparar com o método das características.

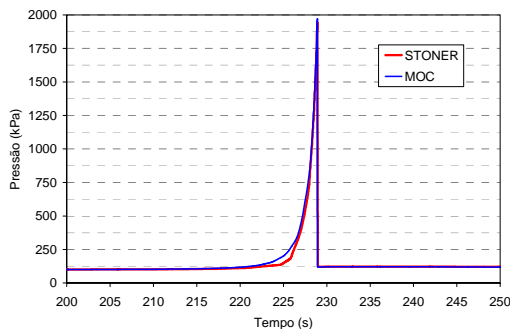


Figura 3. Pressão a montante da válvula de bloqueio (disco de ruptura)

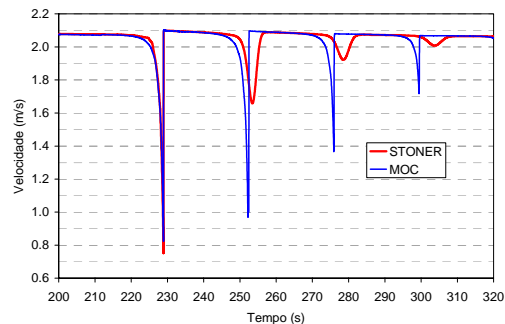


Figura 4. Velocidade a montante da válvula de bloqueio (disco de ruptura)

4.1.2. Válvula de Alívio de Mola

A variação de pressão e velocidade com o tempo a montante da válvula de bloqueio está apresentada nas Figuras 5 e 6. Observa-se uma resposta muito semelhante no valor do pico de pressão inicial entre os dois simuladores e, assim como no modelo com disco de ruptura, um amortecimento na resposta do SPS representado por uma redução e defasagem dos picos de pressão. Foram feitos testes com um *blowdown* de 20% e de 30% e não houve uma diferença significativa em termos de oscilações decorrentes do fechamento da válvula de alívio de mola comparando os modelos com diferentes percentuais de *blowdown*.

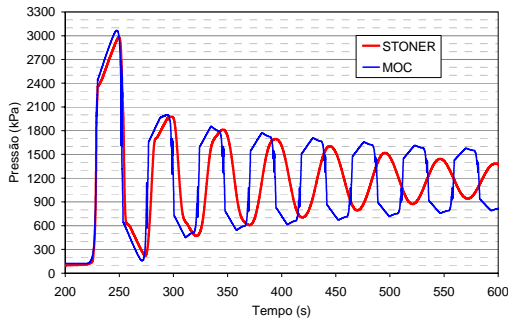


Figura 5. Pressão a montante da válvula de bloqueio (PSV de mola)

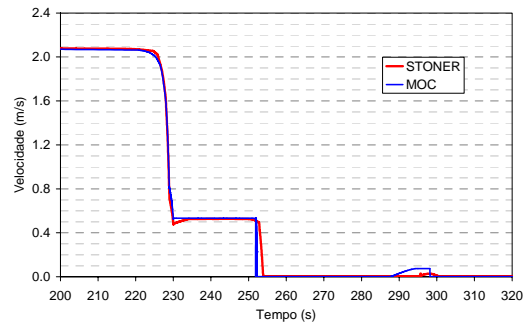


Figura 6. Velocidade a montante da válvula de bloqueio (PSV de mola)

A excelente concordância entre os valores de máximas pressões encontrados utilizando o método das características e o SPS, permite validar as modelagens desenvolvidas para o disco de ruptura e para a válvula de alívio de mola a serem empregadas no SPS.

4.2. Aplicação a um Terminal Típico

Após conhecer e avaliar o comportamento de ambos os métodos, é possível aplicar a metodologia a um caso com as características de um terminal típico. Este caso é representado por um oleoduto de 5000 m de extensão com o diâmetro nominal de 30" (0,762 m) nos primeiros 2500 m e de 34" (0,8636 m) no restante do comprimento, terminando em quatro braços de carregamento. Neste processo, o terminal transporta óleo cru (densidade = 930 kg/m³ e viscosidade = 70 cP @ 30°C) à uma vazão de operação de 6500 m³/h. A pressão na descarga das 3 bombas principais é 13,8 kgf/cm² (1353 kPa) e a pressão de *shut-off* é igual a 15,0 kgf/cm² (1471 kPa). O transiente é gerado pelo fechamento acidental da válvula de bloqueio do navio, localizada à jusante dos 4 braços de carregamento, em um tempo de fechamento de 5 segundos. As condições no estado estacionário são apresentadas na Figura 7.

Foram realizadas simulações no programa comercial SPS com 2 tipos de sistema de alívio – válvulas de mola e disco de ruptura – localizados em posições distintas. Primeiramente o sistema de alívio foi disposto no píer, imediatamente à montante dos braços de carregamento. A linha de alívio está conectada a um tanque fechado com capacidade para 25 m³, inicialmente preenchido com nitrogênio.

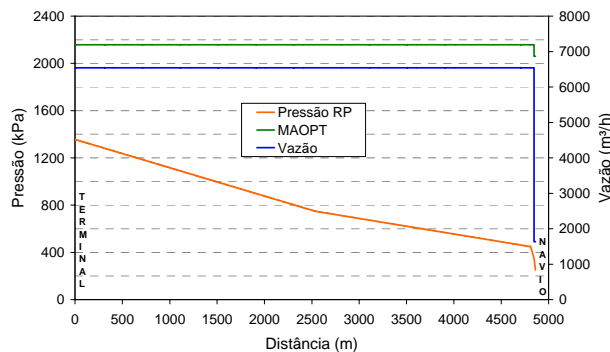


Figura 7. Estado estacionário do caso real

O outro teste consistiu em posicionar o sistema de alívio no km 2,5 do duto, no fim do trecho terrestre. Neste caso, como o alívio está distante da válvula do navio, a preocupação é ajustar uma pressão de abertura o mais baixo possível mas que não comprometa o estado estacionário, isto é, definir um *set point* para o sistema de alívio de forma que este não seja acionado durante uma operação normal de carregamento.

4.2.1. Disco de Ruptura

A Figura 8 apresenta o resultado da atuação do sistema de alívio com disco de ruptura colocado nas duas posições. Como o disco de ruptura não se fecha com a queda da pressão, nesta simulação foi programado o desligamento automático das bombas quando a pressão no sistema de alívio atinge o *set point*. Observa-se que nesta condição, um disco dimensionado para se romper numa pressão de 2059,2 kPa (21 kgf/cm²) permite manter as pressões máximas abaixo do valor da pressão máxima de operação admissível no transiente (PMOAT) para a linha (22 kgf/cm²) quando instalado no píer. Quando o sistema é instalado a 2500 metros do píer, o *set point* de 1569 kPa (16 kgf/cm²) não é suficiente para manter as pressões desenvolvidas no transiente abaixo da PMOA. A Tabela 1 apresenta um resumo dos sistemas adotados.

Tabela 1. Comparação das características do sistema de alívio de disco de ruptura para 2 posições

Localização do sistema de alívio DISCO DE RUPTURA	Pset (kgf/cm ²)	Contra-pressão (kgf/cm ²)	Volume do tanque de alívio	CV	Quantidade
PIER	2059,2 kPa (21)	0,98 kPa (0,01) (inicial)	Tanque fechado 25 m ³	1689 gal/min-psi.5	2
KM 2,5	1569 kPa (16)	196,1 kPa (2,0)	Tanque aberto (infinito)	1978 gal/min-psi.5	2

4.2.2. PSV de Mola

A Tabela 2 apresenta um resumo das características dos sistemas de alívio com válvula de mola instalados no píer e a 2500 metros da válvula do navio. Neste caso, como a válvula de mola se fecha com a queda de pressão, as bombas não são desligadas. Porém, com o sistema instalado no píer, continua-se utilizando um tanque de alívio fechado, com 25 m³. Observa-se pelos resultados apresentados na Figura 9 a necessidade de um valor de *set point* mais baixo que o utilizado com o disco de ruptura, de forma que as pressões máximas não ultrapassem a PMOA. Observa-se ainda, que a localização do sistema de alívio, longe da válvula do navio, torna a sua utilização completamente ineficiente.

Tabela 2. Comparação das características do sistema de alívio de mola para 2 posições

Localização do sistema de alívio PSV DE MOLA	Pset (kgf/cm ²)	% Sobre-pressão	Contra-pressão (kgf/cm ²)	Volume do tanque de alívio	Área do Orifício (po ²)	Quantidade
PIER	1569 kPa (16)	25	0,98 kPa (0,01) (inicial)	Tanque fechado 25 m ³	0,0167 m ² (26)	4
KM 2,5	1569 kPa (16)	25	103 kPa (1,05)	Tanque aberto (infinito)	0,0167 m ² (26)	4

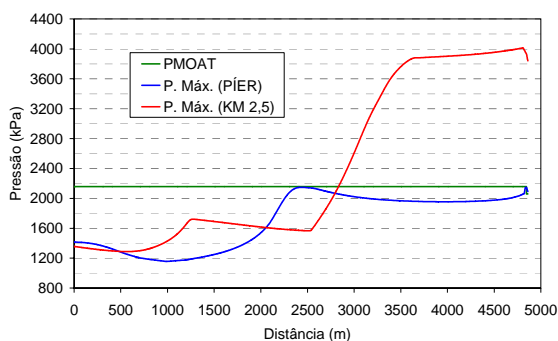


Figura 8. Sistema de alívio de disco de ruptura localizado no píer e no km 2,5

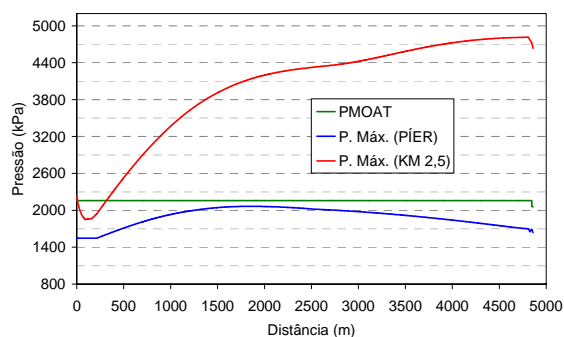


Figura 9. Sistema de alívio de mola localizado no píer e no km 2,5

5. Conclusões

A modelagem de sistemas de alívio de mola e de disco de ruptura foi realizada utilizando um programa de simulação comercial e os resultados foram comparados com a solução do método das características. A excelente concordância entre os métodos permitiu validar a modelagem desenvolvida para o programa comercial.

Discos de ruptura são dispositivos de segurança simples operacionalmente e de fácil manutenção. Estes dispositivos podem ser indicados instalação em píeres onde a manutenção do sistema de segurança é complexa. Os discos de ruptura respondem instantaneamente a elevação de pressão e fornecem uma alta vazão de alívio. Porém, é aconselhável instalar um sistema de controle capaz de enviar um sinal para desligar as bombas no momento em que o disco se rompe, de forma a reduzir o volume necessário para o tanque de alívio.

Os *set points* utilizados com válvulas de alívio de mola são normalmente mais baixos que os utilizados com disco de ruptura. Valores baixos de *set point* podem levar a restrições nas condições operacionais, como a impossibilidade das bombas operarem no *shutoff* sem que ocorra a abertura do sistema de alívio. Por outro lado, válvulas de mola se fecham quando a pressão cai abaixo do valor de *set point*.

6. Agradecimentos

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

7. Referências

- International Safety Guide for Oil Tankers & Terminals (ISGOTT), ICS/OCIMF/IAPH 4ª Edição, 1996
 Sizing, Selection and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries, Part I-Sizing and Selection, API Recommended Practice 520, Seventh Edition, January, 2000.
 STREETER, V. L., WYLIE, B. E. Hydraulic Transients, McGraw-Hill Book Company, 1967.