



Leonardo Motta Carneiro

**Estudo do comportamento dinâmico de
válvula de mola para alívio de pressão em
dutos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo
Co-orientador: Prof. Luis Fernando Gonçalves Pires

Rio de Janeiro
Março de 2011



Leonardo Motta Carneiro

**Estudo do comportamento dinâmico de
válvula de mola para alívio de pressão em
dutos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC - Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Luis Fernando Gonçalves Pires

Co-orientador

Centro Tecnológico do Exército - DDQBN

Profa. Angela Ourivio Nieckele

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Sidney Stuckenbruck

Olympus Software Científico e Engenharia

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de março de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Leonardo Motta Carneiro

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2006. Kursou Engenharia de Dutos no CCE/PUC-Rio em 2007. Participou de diversos congressos na área de petróleo e gás. É coordenador de pesquisa no Núcleo de Simulação Termo-hidráulica de Dutos da PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Carneiro, Leonardo Motta

Estudo do comportamento dinâmico de válvula de mola para alívio de pressão em dutos / Leonardo Motta Carneiro ; orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo ; Luis Fernando Gonçalves Pires. – 2011.

177 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Válvula de alívio. 3. Comportamento dinâmico. 4. Segurança. 6. Duto. I. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. II. Pires, Luis Fernando Gonçalves. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Dedico esta dissertação à minha família e à comunidade de dutos.

Agradecimentos

À Deus por me iluminar.

Ao meu filho Leandro que virá ao mundo em breve, trazendo muitas alegrias.

À minha esposa Alessandra, pelo amor, carinho e apoio.

Aos meus pais, Luiz Antônio e Tereza Cristina, à minha irmã Cintia Cristina, à meu cunhado Luiz Felipe e à minha avó Gercy pelo total apoio e incentivo nesta etapa da minha vida.

Aos familiares que já partiram, por olharem sobre mim.

Ao Professor orientador Luis Fernando A. Azevedo pela orientação e oportunidade.

Ao Professor Luis Fernando G. Pires, pela co-orientação e pelo apoio técnico, acadêmico e pessoal.

À PUC-Rio, ao CTDUT e a FINEP, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus amigos Philipe Krause e Claudio Veloso pelo contínuo apoio e incentivo e a toda equipe do SIMDUT (Núcleo de Simulação Termohidráulica da PUC-Rio) pela motivação.

Ao amigo Leonardo Guedes, pela indicação desta empreitada.

A todos os professores que compuseram o quadro de aulas oferecidas e à Comissão examinadora.

À toda equipe do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

E a todos que, de alguma forma, me ajudaram a concluir mais esta meta.

Resumo

Carneiro, Leonardo Motta; Azevedo, Luis Fernando A.. **Estudo do comportamento dinâmico de válvula de mola para alívio de pressão em dutos**. Rio de Janeiro, 2011. 177p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A grande maioria dos dutos de transporte de petróleo e derivados no Brasil trabalha com válvulas de alívio no projeto dos seus sistemas de proteção. Desta forma, o perfeito dimensionamento e funcionamento destas válvulas são fundamentais para garantir a segurança de dutos de transporte e dos terminais de carga e descarga, caso haja alguma condição anormal de operação que gere sobrepressões. Estas válvulas aliviam a pressão interna do duto caso a mesma ultrapasse um valor definido e calibrado na válvula. Simplificadamente, a válvula de alívio de pressão tipo mola possui um disco o qual é pressionado pela mola contra o bocal de entrada. Quando a pressão do duto se eleva, a força gerada na superfície do disco aumenta e, dependendo do ponto de ajuste da mola, supera a força exercida pela mesma fazendo com que o disco se eleve, descarregando pelo bocal de saída o fluido para o tanque de alívio e, conseqüentemente, reduzindo a pressão no duto. Desta forma, a válvula de alívio garante que o duto não seja submetido a pressões superiores às pressões de projeto, o que poderia levar a uma falha do duto e a um possível vazamento de produto para meio ambiente. Este trabalho propõe um estudo experimental e numérico para determinar o comportamento dinâmico de válvulas de alívio de mola. Foi realizada a montagem de uma bancada experimental com um circuito de água contendo uma bomba, uma válvula de alívio e uma válvula de bloqueio capaz de interromper o fluxo no circuito gerando um transiente de pressão que obriga a abertura da válvula para aliviar a pressão interna no sistema. A válvula de alívio foi instrumentada para medir as grandezas necessárias para estudar o comportamento dinâmico da válvula e os transientes de pressão e vazão gerados no duto. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados obtidos de modelos computacionais proporcionando o aperfeiçoamento e validação destes modelos.

Palavras-chave

Válvula de alívio; comportamento dinâmico; segurança, duto.

Abstract

Carneiro, Leonardo Motta; Azevedo, Luis Fernando A. (Advisor). **Study of the dynamic behavior of spring pressure relief valve for pipelines.** Rio de Janeiro, 2011. 177p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The majority of oil and refined product pipelines in Brazil employ pressure relief valves in the design of their protection system. Thus, the perfect design and operation of these valves is essential to ensure the safety of transport pipelines and loading and unloading terminals, under any abnormal condition of operation that generates overpressures. These valves work by relieving the internal pressure in case it exceeds a pre-set and calibrated value. In a nutshell, the spring-type pressure relief valve has a disk which is pressed by a spring against the inlet nozzle of the valve. When the pressure rises, the force generated on the surface of the disk increases and, depending on the pressure relief valve set point, the pressure force overcomes the force exerted by the spring, causing the disk to rise and thus discharging the fluid through the outlet nozzle to the relief tank, consequently reducing the pressure in the pipeline. Using this principle, the relief valve ensures that the pipeline is not subjected to high transient pressures, which could lead to pipeline or equipment rupture and possible product leak. The present dissertation describes a numerical and experimental study conducted to determine the dynamic behavior of spring-type relief valves. The experiments were conducted in a water pipe loop equipped a pump, a block valve to generate the pressure transients and a commercial spring-type pressure relief valve. The loop was instrumented with pressure, flow and temperature transducers. The relief valve was instrumented to measure the variables necessary to study the dynamic behavior of the valve and the transient pressure and flow generated in the pipeline. The experimental results were compared with results obtained from computer models allowing the improvement and validation of these models.

Keywords

Pressure relief valve; dynamic behavior; safety; pipeline.

Sumário

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | Introdução | 17 |
| 1.1. | Objetivo | 20 |
| 1.2. | Organização da Dissertação | 21 |
| 2 | Revisão Bibliográfica | 22 |
| 3 | Válvulas de Alívio Tipo Mola | 26 |
| 3.1. | Terminologias | 26 |
| 3.2. | Tipos de Válvulas de Alívio | 29 |
| 3.2.1. | Válvulas de Alívio Piloto-Operadas | 30 |
| 3.2.2. | Válvulas de Alívio de Mola ou de Ação Direta | 30 |
| 3.2.3. | Válvulas de Alívio de Mola sem Fole | 33 |
| 3.2.4. | Válvulas de Alívio de Mola com Fole | 35 |
| 3.2.5. | Características Dinâmicas da Válvula de Alívio | 37 |
| 4 | Modelos para Válvulas de Alívio | 45 |
| 4.1. | Modelos para Válvula de Alívio Utilizado na Indústria de Dutos Brasileira (BR) | 46 |
| 4.1.1. | Modelo para Válvula de Alívio Proposto pelo Programa Stoner Pipeline Simulator (SPS) | 48 |
| 4.1.2. | Modelo para Válvula de Alívio Proposto no Presente Trabalho | 48 |
| 5 | Montagem Experimental | 53 |
| 5.1. | Bomba do Circuito Fechado | 55 |
| 5.2. | Dreno e Controle de Vazão do Circuito Fechado | 57 |
| 5.3. | Medidor de Vazão do Circuito Fechado | 59 |
| 5.4. | Válvula de Alívio | 62 |
| 5.5. | Medidor de Vazão da Descarga da Válvula de Alívio | 63 |
| 5.6. | Instrumentação do Circuito Fechado | 68 |
| 5.6.1. | Transdutores de Pressão | 70 |
| 5.6.2. | Transdutor Linear de Deslocamento – LVDT | 71 |
| 5.6.3. | Transdutor de Temperatura – PT100 | 73 |
| 5.6.4. | Acelerômetro | 74 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5.7. | Válvula de Bloqueio Motorizada | 75 |
| 5.8. | Procedimento experimental | 77 |
| 6 | Resultados | 79 |
| 6.1. | Coeficiente de Descarga da Válvula de Alívio para Regime Permanente | 79 |
| 6.2. | Coeficiente de Descarga da Válvula de Bloqueio | 85 |
| 6.3. | Ensaio de Bloqueio do Duto sem a Presença da Válvula de Alívio | 87 |
| 6.4. | Ensaio de Bloqueio do Duto com a Presença da Válvula de Alívio | 88 |
| 6.4.1. | Pressão de Ajuste da Válvula de Alívio | 90 |
| 6.4.2. | Sobrepresão da Válvula de Alívio | 92 |
| 6.5. | Comparação dos Resultados Experimentais com os Modelos Matemáticos | 95 |
| 6.5.1. | Previsão do Salto de Pressão: Comparação com a Equação de Joukowski | 95 |
| 6.5.2. | Influência do Ancoramento na Velocidade de Propagação | 96 |
| 6.6. | Comparação das Simulações Numéricas com Resultados Experimentais | 97 |
| 6.6.1. | Comparação entre Simulação e Experimentos para Bloqueios sem a Presença da Válvula de Alívio | 98 |
| 6.6.2. | Comparação entre Simulação e Experimentos para Bloqueios com a Presença da Válvula de Alívio | 101 |
| 6.6.3. | Avaliação do Coeficiente de Descarga da Válvula de Alívio em Regime Transiente. | 116 |
| 7 | Conclusões e Sugestões | 119 |
| 8 | Referências bibliográficas | 122 |
| 9 | Anexos | 124 |
| 9.1. | Folha de Dados da Bomba | 124 |
| 9.2. | Memória de Cálculo da Válvula de Alívio | 126 |
| 9.3. | Folha de Dados da Válvula de Alívio | 127 |
| 9.4. | Folha de Dados do Medidor de Vazão Tipo Turbina | 147 |
| 9.5. | Certificado do Medidor de Vazão Tipo Turbina | 150 |
| 9.6. | Folha de Dados do Aquisitor de Dados | 151 |
| 9.7. | Folha de Dados do Transdutor de Pressão | 167 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 9.8. | Folha de Dados do Transdutor Linear de Posição | 171 |
| 9.9. | Certificado do Transdutor Linear de Posição | 174 |
| 9.10. | Catálogo da Válvula de Bloqueio da MIPEL | 177 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Mapa com dutos existentes e futuros do Brasil (TRANSPETRO). | 17 |
| Figura 1.2 – Aumento de pressão típico causado por bloqueio do duto. | 18 |
| Figura 3.1 – Regime de pressões em uma válvula de alívio com sobrepressão de 10%. | 27 |
| Figura 3.2 – Exemplos de válvulas de alívio de mola (Catálogo da fabricante Crosby). | 29 |
| Figura 3.3 – Exemplos de válvulas de alívio piloto-operada (Catálogo da fabricante Crosby). | 30 |
| Figura 3.4 – Desenho esquemático da válvula de alívio de mola sem fole (API 520). | 31 |
| Figura 3.5 – Desenho esquemático da válvula de alívio de mola com fole (API 520). | 32 |
| Figura 3.6 – Equilíbrio de forças para válvulas de alívio de mola sem fole no instante de abertura (API 520). | 34 |
| Figura 3.7 – Equilíbrio de forças para válvulas de alívio de mola com fole (API 520). | 36 |
| Figura 3.8 – Sistema simplificado da válvula de alívio. | 37 |
| Figura 3.9 – Balanço de forças no disco no instante da abertura da válvula de alívio. | 38 |
| Figura 3.10 – Volume de controle no duto no instante da abertura da válvula de alívio. | 40 |
| Figura 3.11 – Diagrama de corpo livre do disco durante seu deslocamento. | 41 |
| Figura 3.12 – Volume de controle no interior da válvula de alívio durante a atuação da mesma. | 41 |
| Figura 4.1 – Fluxograma do modelo de PRV utilizado na indústria de dutos. | 46 |
| Figura 4.2 – Variação do fator de correção da sobrepressão, K_p , com o percentual de sobrepressão (API 520). | 47 |
| Figura 4.3 – Fluxograma do modelo de PRV proposto. | 49 |
| Figura 5.1 – Desenho da Montagem Experimental. | 53 |
| Figura 5.2 – Foto da Montagem Experimental. | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.3 – Curvas características da bomba DANCOR modelo CAM-W6C utilizada nos ensaios. | 56 |
| Figura 5.4 – Fotografia da bomba DANCOR, modelo CAM-W6C, utilizada nos ensaios. | 57 |
| Figura 5.5 – Acessórios na descarga da bomba. | 58 |
| Figura 5.6 – Inversor de frequência utilizado no controle da rotação da bomba. | 58 |
| Figura 5.7 – Medidor de Vazão do Circuito Fechado. | 60 |
| Figura 5.8 – Curva de calibração do medidor de vazão marca INCONTROL, modelo VML 019 utilizado na medição de vazão do circuito fechado. | 61 |
| Figura 5.9 – Aterramento do medidor de vazão eletromagnético (Fonte: manual da Incontrol). | 61 |
| Figura 5.10 – Válvula de alívio montada no circuito de testes. | 62 |
| Figura 5.11 – Vista explodida do medidor de vazão tipo turbina (fonte: catálogo da Contech). | 64 |
| Figura 5.12 – Medidor de vazão tipo turbina Contech, série SVT-L, modelo L19 utilizado nos ensaios para medir a vazão de alívio da válvula. | 65 |
| Figura 5.13 – Instalação do medidor de vazão tipo turbina (Fonte: Manual da Contech). | 66 |
| Figura 5.14 – Placa Amplificadora do medidor de vazão tipo turbina (Fonte: Manual da Contech). | 67 |
| Figura 5.15 – Indicador e totalizador do medidor de vazão tipo turbina (Fonte: Manual da Contech). | 68 |
| Figura 5.16 – Fotografia do sistema de aquisição de dados HBM QUANTUMX MX-840 utilizado nos ensaios. | 69 |
| Figura 5.17 – Exemplos de telas de monitoramento das variáveis medidas ao longo dos experimentos. | 70 |
| Figura 5.18 – Transdutores de pressão instalados a montante e jusante da válvula de alívio. | 71 |
| Figura 5.19 – Transdutores linear de deslocamento conectado à haste da válvula de alívio. | 72 |
| Figura 5.20 – Curva de calibração do LVDT utilizada nos ensaios. | 73 |
| Figura 5.21 – Sensor de temperatura da água do tipo PT100 instalado na linha de retorno da seção de testes. | 74 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.22 – Acelerômetro instalado solidário à haste da válvula de alívio para medir sua aceleração. | 75 |
| Figura 5.23 – Válvula de bloqueio utilizada para produzir os transientes hidráulicos na seção de testes. | 76 |
| Figura 5.24 – Sistema de fechamento da válvula de bloqueio. | 77 |
| Figura 6.1 – Coeficiente de descarga da válvula de alívio como função da abertura para diferentes vazões, na condição de operação de regime permanente. | 80 |
| Figura 6.2 – Linhas de corrente representando o escoamento na geometria da válvula de alívio axissimétrica. Resultados numéricos obtidos com o programa Fluent [6]. | 82 |
| Figura 6.3 – Coeficiente de descarga para a válvula de alívio como função da abertura, por simulação numérica empregando o programa Fluent [6]. | 82 |
| Figura 6.4 – Valores médio, máximo e mínimo para os coeficientes de descarga da válvula de alívio médios para a vazão de 4 m ³ /h. | 83 |
| Figura 6.5 – Coeficiente de vazão válvula de alívio testada. | 85 |
| Figura 6.6 – Coeficiente de descarga da válvula de bloqueio. | 86 |
| Figura 6.7 – Coeficiente de vazão da válvula de bloqueio. | 87 |
| Figura 6.8 – Determinação da pressão de abertura da válvula de alívio a partir dos dados de pressão e deslocamento da válvula de alívio para vazão inicial de 5,9 m ³ /h, rotação da bomba de 3350 rpm e tempo de bloqueio de 0,5 s. | 91 |
| Figura 6.9 – Variação da taxa de crescimento da pressão em função do tempo, após o bloqueio da linha, sem a presença de válvula de alívio. | 94 |
| Figura 6.10 – Comparação entre experimentos e simulação para a pressão a montante da válvula de bloqueio sem a presença da válvula de alívio. Vazão de 4,5 m ³ /h e diferentes tempos de bloqueio. | 99 |
| Figura 6.11 – Comparação entre experimentos e simulação para a pressão a montante da válvula de bloqueio sem a presença da válvula de alívio. Vazão de 5,5 m ³ /h e diferentes tempos de bloqueio. | 101 |
| Figura 6.12 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,2 s e vazão de alívio de 2,0 m ³ /h. | 102 |
| Figura 6.13 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,3 s e vazão de alívio de 2,0 m ³ /h. | 105 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.14 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,5 s e vazão de alívio de 2,0 m ³ /h. | 106 |
| Figura 6.15 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,8 s e vazão de alívio de 2,0 m ³ /h. | 107 |
| Figura 6.16 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 1,0 s e vazão de alívio de 2,0 m ³ /h. | 108 |
| Figura 6.17 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 1,5 s e vazão de alívio de 2,0 m ³ /h. | 109 |
| Figura 6.18 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,2 s e vazão de alívio de 3,7 m ³ /h. | 110 |
| Figura 6.19 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,3 s e vazão de alívio de 3,7 m ³ /h. | 111 |
| Figura 6.20 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,5 s e vazão de alívio de 3,7 m ³ /h. | 112 |
| Figura 6.21 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,8 s e vazão de alívio de 3,7 m ³ /h. | 113 |
| Figura 6.22 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 1,0 s e vazão de alívio de 3,7 m ³ /h. | 114 |
| Figura 6.23 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 1,5 s e vazão de alívio de 3,7 m ³ /h. | 115 |
| Figura 6.24 – Comparação entre coeficientes de descarga determinados em regime permanente e em regime transiente para rotação da bomba de 2950 rpm e tempo de bloqueio de 1,5 s. | 117 |
| Figura 6.25 – Comparação entre coeficientes de descarga determinados em regime permanente e em regime transiente para rotação da bomba de 3350 rpm e tempo de bloqueio de 1,5 s. | 118 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Padrões de orifícios das válvulas de alívio de mola (API 526). | 33 |
| Tabela 5.1 – Características do Motor da Bomba. | 56 |
| Tabela 5.2 – Características do Medidor de Vazão do Circuito Fechado. | 59 |
| Tabela 5.3 – Características do Medidor de Vazão da Descarga da Válvula de Alívio. | 64 |
| Tabela 5.4 – Características dos transdutores de pressão. | 70 |
| Tabela 5.5 – Característica do transdutor linear de deslocamento utilizado. | 72 |
| Tabela 5.6 – Característica do acelerômetro. | 74 |
| Tabela 6.1 – Taxa de crescimento da pressão após bloqueio da linha. Sem a válvula de alívio. | 88 |
| Tabela 6.2 – Matriz de Testes. | 89 |
| Tabela 6.3 – Pressões de abertura. | 92 |
| Tabela 6.4 – Sobrepressão máxima. | 93 |
| Tabela 6.5 – Sobrepressão no regime permanente de alívio. | 93 |
| Tabela 6.6 – Saltos de pressão. | 96 |
| Tabela 6.7 – Velocidades de propagação da onda de pressão por tipo de ancoramento. | 97 |

Ele não sabia que era impossível. Foi lá e fez.

Jean Cocteau