



Marcos José Babilonia Pérez

**Estudo do comportamento dinâmico de uma
válvula de alívio de pressão do tipo mola**

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-orientadora: Dra. Juliana Kuhlmann Abrantes

Rio de Janeiro
Abril de 2016



Marcos José Babilonia Pérez

**Estudo do comportamento dinâmico de uma
válvula de alívio de pressão do tipo mola**

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

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dra. Juliana Kuhlmann Abrantes

Co-orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luis Fernando Gonçalves Pires

Centro Tecnológico do Exército

Prof. Sidney Stuckenbruck

Olympus Software Científico e Engenharia Ltda.

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de abril de 2016

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

Marcos José Babilonia Pérez

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidad del Atlántico (Barranquilla, Colômbia), em 2012. Participou de diversos congressos na área de mecânica de fluídos. É pesquisador no laboratório de engenharia de fluídos da PUC-Rio. Atua principalmente na área de turbulência, métodos ópticos (PIV) para medição e análise de escoamentos.

Ficha Catalográfica

Pérez, Marcos José Babilonia

Estudo do comportamento dinâmico de uma válvula de alívio de pressão do tipo mola / Marcos José Babilonia Pérez ; orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo ; co-orientadora: Juliana Kuhlmann Abrantes. – 2016.

171 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Válvula de alívio de pressão tipo mola. 3. Velocimetria por imagem de partículas (PIV). 4. Escoamento transiente rápido. 5. Coeficiente de descarga. I. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. II. Abrantes, Juliana Kuhlmann. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

A Deus, por me amparar sempre e colocar pessoas tão especiais a meu lado desde minha chegada ao Brasil.

A meus pais; Damaris Pérez e Marcos Babilonia, pela formação desde criança e por me exortar a ser cada dia melhor pessoa.

A meus irmãos; Javier e Oscar Babilonia pelo apoio e incentivo constante.

Agradeço ao meu orientador, professor Luis Fernando Azevedo, pela oportunidade e confiança dada, além da orientação durante todo o projeto.

A minha co-orientadora, Dra. Juliana Abrantes, pela orientação, grande apoio técnico, acadêmico e pessoal.

Ao professor Igor Braga, pela contribuição durante o avanço do projeto.

Aos amigos do laboratório de Engenharia de fluidos, pela disposição em ajudar em todos os momentos, em especial a Jose Daniel, Fabio, Luan, Helena, Leo e Luciana.

Agradeço ao apoio financeiro da Finep e do Ministério da ciência, Tecnologia e inovação – MCTI, com recursos do FNDCT.

Finalmente, agradeço à CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Babilonia, Marcos José Pérez; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Estudo do comportamento dinâmico de uma válvula de alívio de pressão do tipo mola**. Rio de Janeiro, 2016. 171p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As válvulas de alívio de pressão (PRVs, do inglês, pressure relief valves) são dispositivos fundamentais para a segurança de operações em dutos de transporte de fluidos, sendo encarregadas de garantir a integridade das instalações no caso de algum bloqueio súbito do escoamento. Dependendo da natureza e duração do evento de bloqueio, das características da válvula de alívio e do comprimento do duto, o comportamento dinâmico da PRV, i.e., seu tempo de resposta e o coeficiente de descarga em função da abertura, podem variar consideravelmente. Estas informações mais detalhadas sobre o comportamento transiente da válvula não são especificadas em normas e raramente são disponibilizadas pelos fabricantes. Uma caracterização detalhada do comportamento dinâmico da válvula de alívio é informação importante para a simulação computacional de transientes hidráulicos em dutos de líquido. Em particular, o comportamento dinâmico do coeficiente de descarga da válvula não é conhecido, sendo por vezes simplifiadamente representado por dados obtidos em condições de regime permanente. No presente trabalho foi realizado um estudo detalhado do comportamento dinâmico de um modelo de válvula de alívio, com o objetivo de obter informações comparativas sobre o comportamento do coeficiente de descarga da válvula quando investigada sob condições de regime permanente e transiente rápido. Para isso, construiu-se um modelo de PRV transparente, permitindo a medição de campos instantâneos de escoamento em seu interior com a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas em duas dimensões (PIV). Transdutores de pressão e deslocamento foram devidamente instalados de maneira a fornecer informações instantâneas sobre a queda de pressão e posição de abertura da válvula, com alta resolução temporal. O modelo da válvula transparente foi montado em um circuito fechado, no qual água era bombeada através de uma tubulação longa, passando pela PRV e por uma válvula de bloqueio com tempo de fechamento controlado eletronicamente, podendo produzir bloqueios súbitos no escoamento, com tempos na faixa de 4 ms

a 3,5 s. Sistemas de controle foram especialmente desenvolvidos para sincronizar os eventos de bloqueio da válvula, disparo do laser do sistema PIV, aquisição de imagens e dados de pressão e deslocamento. Estes dados permitiram a determinação do valor instantâneo e de média de fase para o coeficiente de descarga da válvula de alívio de pressão no caso transiente.

Palavras-chave

Válvula de alívio de pressão tipo mola; Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV); escoamento transiente rápido; coeficiente de descarga.

Abstract

Babilonia, Marcos José Pérez; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir (Advisor). **Study of the dynamic behavior of a spring-type pressure relief valve**. Rio de Janeiro, 2016. 171p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Pressure relief valves (PRVs) are important devices which guarantee the safe operation of liquid pipelines, being responsible for preserving the integrity of the duct in case a sudden flow blockage event occurs. The PRV's dynamic behavior, that is, its response time and discharge coefficient as a function of open fraction, can vary considerably depending on the nature and duration of the blockage event, on the valve's characteristics and on the duct length. This more detailed information on the valve's transient behavior is not specified in standards and is rarely made available by valve manufacturers. A detailed characterization of the valve's dynamic behavior is relevant information for the computational simulation of hydraulic transients in liquid pipelines. In particular, the dynamic behavior of the valve discharge coefficient is not known, being normally replaced by data obtained from tests under steady state conditions. In the present work, a detailed study was conducted using a valve model with the objective of obtaining comparative information on the valve discharge coefficient for steady and transient conditions. To this end, a transparent PRV model was constructed in order to allow for the use of the two-dimensional Particle Image Velocimetry technique (PIV) for measuring the instantaneous flow field inside the valve. Pressure and displacement transducers were employed to yield instantaneous information on the pressure drop and valve opening. The valve model was installed in a closed circuit where water was pumped through a long pipe, passing through the PRV and through the blockage valve that was capable of producing flow blockage events in the range of 4 ms to 3.5 s. Control systems were specially constructed to synchronize the events of valve blockage, PIV laser firing, and acquisition of pressure, and displacement data. These data allowed the determination of the instantaneous and phase-averaged values for the valve discharge coefficient.

Keywords

Spring-type pressure relief valve; Particle Image Velocimetry (PIV); fast transient flow; discharge coefficient

Sumário

1	Introdução	19
1.1.	Motivação	23
1.2.	Objetivo	23
1.3.	Estrutura da dissertação	24
2	Revisão da literatura	26
3	Válvulas de alívio de pressão tipo mola	30
3.1.	Terminologia básica	31
3.2.	Tipos de válvulas de alívio de pressão - PRVs	33
3.2.1.	Válvulas de alívio operadas por piloto.	34
3.2.2.	Válvulas de alívio operadas por mola direta	35
3.3.	Características dinâmicas das válvulas de alívio de pressão	41
3.3.1.	Deformação inicial da mola	42
3.3.2.	Análise da lei de Newton e conservação de massa	44
3.3.3.	Adimensionalização do modelo matemático	48
4	Velocimetria por Imagem de Partículas - <i>PIV</i>	50
4.1.	Descrição geral da técnica	51
4.2.	Partículas traçadoras	52
4.2.1.	Dinâmica	53
4.2.2.	Seleção das partículas	54
4.3.	Plano de iluminação por laser	56
4.4.	Registro das imagens	58
4.4.1.	Câmera	59
4.4.2.	Sincronizador	60
4.4.3.	Formação da imagem	60
4.5.	Análise de imagens e cálculo do campo vetorial	62
4.5.1.	Correlação cruzada de imagens	63
4.5.2.	Pós-processamento dos dados	65

5 Experimentos	66
5.1. Descrição geral da bancada de testes	66
5.2. Modelo de válvula de alívio tipo mola em acrílico	68
5.3. Sistema de escoamento da água	70
5.3.1. Bomba	71
5.3.2. Controle da vazão	72
5.3.3. Calibração da medição da vazão	73
5.4. Válvula coaxial de bloqueio	74
5.5. Instrumentação e aquisição de dados	78
5.5.1. Sensor de Pressão	79
5.5.2. Transdutor Linear de Deslocamento - LVDT	82
5.5.3. Trigger para Aquisição dos Dados	84
5.6. Sistema <i>PIV</i>	85
5.6.1. Laser e plano de iluminação	86
5.6.2. Câmera e lente objetiva	87
5.6.3. Sincronizador de sinais	88
5.6.4. Partículas traçadoras	88
6 Procedimento experimental	91
6.1. Caracterização do evento de bloqueio no circuito hidráulico	91
6.1.1. Classificação do transiente	94
6.2. Estimativa da pressão de ajuste na válvula de alívio	95
6.3. Definição dos casos testados	98
6.4. Medição dos campos de velocidade com <i>PIV</i>	106
6.4.1. Ajuste das imagens e calibração espacial	107
6.4.2. Processo de aquisição de imagens	109
6.4.3. Processamento de imagens e cálculo do campo vetorial	110
6.5. Testes em regime permanente	112
6.6. Testes em regime transiente	113
7 Resultados e discussões	117
7.1. Avaliação dos campos de velocidade e coeficiente de descarga em regime permanente	117
7.1.1. Medidas de pressão	117

7.1.2. Campos de escoamento ao redor da válvula de alívio	119
7.1.3. Avaliação da vazão de descarga	123
7.1.4. Coeficiente de descarga	125
7.2. Avaliação dos campos de velocidade e coeficiente de descarga em regime transiente	127
7.2.1. Medidas de pressão e deslocamento	128
7.2.2. Campo de escoamento ao redor da válvula de alívio	133
7.2.3. Avaliação da vazão de descarga	138
7.2.4. Coeficiente de descarga em regime transiente rápido	139
8 Conclusões e sugestões	141
9 Referências bibliográficas	143
10 Anexos	146
10.1. Desenho Técnico da Válvula de alívio em Acrílico	146
10.2. Catálogo da Válvula Coaxial de Bloqueio	154
10.3. Catálogo da Válvula Solenoide	155
10.4. Folha de Dados do Aquisitor de Dados	156
10.5. Dados de Calibração e Instruções de Instalação do Sensor de Pressão	162
10.6. Folha de Dados do Transdutor Linear de Deslocamento - LVDT	164
Apêndices	166
A. Avaliação das incertezas experimentais	166
A.1. Análises de Incerteza na vazão volumétrica do circuito hidráulico	167
A.2. Análises de Incerteza no deslocamento da válvula de alívio	168
A.3. Análises de Incerteza no coeficiente de descarga C_d	170

Lista de figuras

Figura 1.1 - Desenho esquemático de uma válvula de alívio tipo mola convencional e um modelo simplificado da mesma com forma de “copo invertido”.	20
Figura 1.2 - Evolução teórica da pressão na abertura e fechamento de uma válvula de alívio de pressão.	21
Figura 3.1 – Relação entre os níveis de pressão em uma válvula de alívio com sobrepressão de 10%.	31
Figura 3.2 - Exemplos de válvulas de alívio operadas por mola direta.	33
Figura 3.3 - Exemplos de válvulas de alívio operadas por piloto.	34
Figura 3.4 - Representação esquemática de uma válvula de alívio operada por piloto, de ação rápida, tipo piloto com escoamento.	35
Figura 3.5 - Desenho esquemático de uma PRV convencional.	37
Figura 3.6 - Efeitos típicos da contrapressão sobre a pressão de ajuste em uma PRV convencional.	38
Figura 3.7 - Desenho esquemático de uma PRV balanceada.	40
Figura 3.8 - Efeitos típicos da contrapressão sobre a pressão de ajuste em uma PRV balanceada.	41
Figura 3.9 - Sistema simplificado da válvula de alívio.	42
Figura 3.10 - Balanço de forças no disco no instante da abertura da válvula de alívio.	42
Figura 3.11 - Volume de controle no duto no instante da abertura da válvula de alívio.	43
Figura 3.12 - Diagrama de corpo livre do disco durante seu deslocamento.	45
Figura 3.13 - Volume de controle no interior da válvula de alívio durante a atuação da mesma.	45
Figura 4.1 - Desenho esquemático de um sistema PIV bidimensional.	52

Figura 4.2 - Espectro de absorção e fluorescência de partículas utilizadas em PIV.	55
Figura 4.3 - Configuração óptica empregada para gerar o plano de luz no presente trabalho (visões frontal e superior).	57
Figura 4.4 - Esboço do interior do cabeçote de um laser Nd:YAG comum.	58
Figura 4.5 - Sincronização entre câmera e laser em modo de operação <i>frame straddling</i> para PIV.	59
Figura 4.6 - Parâmetros envolvidos no registro de imagens PIV.	62
Figura 4.7 - Esquema do método de correlação cruzada de imagens.	64
Figura 5.1 - (1) Válvula PRV em acrílico; (2) Válvula coaxial pilotada; (3) Válvula manual; (4) Reservatório de entrada; (5) Câmera; (6) Laser; (7) Bomba de cavidade progressiva; (8) Tanque de descarga (vazão de descarga da PRV).	66
Figura 5.2 - Detalhe da seção de testes em acrílico, que contém o modelo de válvula de alívio (PRV). (a) Vista isométrica representando a seção de testes dividida em três blocos, montados em conjunto com a devida vedação; (b) vista frontal com indicação dos principais componentes.	69
Figura 5.3 - Vista da tubulação e estrutura da bancada, mostrando o detalhe dos suportes de polipropileno.	70
Figura 5.4 - Curva de operação da bomba de cavidade progressiva utilizada nos experimentos.	71
Figura 5.5 - Bomba de cavidade progressiva <i>Weatherford</i> , modelo 24/I, utilizada nos ensaios.	72
Figura 5.6 - Inversor de Frequência <i>WEG</i> , modelo CFW08, utilizado para o controle da rotação da bomba.	72
Figura 5.7 - Vista esquemática da montagem da seção de testes para calibração da vazão de água no circuito hidráulico.	73
Figura 5.8 - Curva de calibração: vazão volumétrica versus frequência do inversor.	74
Figura 5.9 - Válvula coaxial pilotada por solenoide utilizada para o bloqueio da via principal do escoamento.	75

Figura 5.10 - Diagrama lógico do sistema utilizado para acionamento da válvula de bloqueio.	75
Figura 5.11 - Diagrama de bloco do <i>LabVIEW</i> usado na automatização do processo de bloqueio na válvula coaxial.	76
Figura 5.12 - Configuração de tempos usados na automatização do evento de bloqueio, no regime transiente lento, para 100 realizações. Diagrama referente à válvula coaxial.	77
Figura 5.13 - Configuração de tempos usados na automatização do evento de bloqueio, no regime transiente rápido, para 100 realizações. Diagrama referente à válvula coaxial.	77
Figura 5.14 - Sistema de aquisição de dados QuantumX MX-840 utilizado nos experimentos.	78
Figura 5.15 - Exemplo da tela de visualização em tempo real durante medições de pressão e deslocamento na válvula de alívio.	79
Figura 5.16 - Esquerda: instalação do sensor de pressão; direita: desenho esquemático com detalhe das tomadas de pressão na PRV.	80
Figura 5.17 - Arranjo de mangueira e conexões utilizado na calibração do sensor de pressão UNIK 5000.	81
Figura 5.18 - Curva de calibração do sensor de pressão UNIK 5000 utilizado nos ensaios.	81
Figura 5.19 - Vistas da cúpula-suporte em acrílico e da montagem do LVDT para realizar as medições do deslocamento da haste da válvula.	83
Figura 5.20 - Curva de calibração do transdutor de deslocamento (LVDT).	83
Figura 5.21 - Tela do programa <i>CatmanEasy</i> com a configuração utilizada para a aquisição de dados.	84
Figura 5.22 - Representação esquemática do sistema PIV utilizado. Abaixo, vista lateral.	85
Figura 5.23 - Arranjo óptico utilizado para formação do plano de luz, representado também esquematicamente na Figura 5.22.	86

Figura 5.24 - Magnificação final na seção da válvula de alívio tipo “copo invertido” durante os experimentos; à esquerda, partículas traçadoras regulares; à direita, partículas fluorescentes.	88
Figura 5.25. Foto da instalação do filtro óptico na frente da câmera e exemplo de visualização a olho nu das partículas fluorescentes em regime transiente.	90
Figura 6.1 - Arranjo utilizado para avaliação dos tempos de fechamento da válvula de bloqueio: (A) vista superior da montagem, (B) representação esquemática da configuração.	92
Figura 6.2 - Série de 5 das 500 imagens tomadas, selecionadas para ilustrar a evolução da intensidade luminosa com o fechamento da válvula e a câmera em sua frente.	93
Figura 6.3 - Caracterização do tempo de fechamento da válvula coaxial para o evento de bloqueio rápido = 4ms.	93
Figura 6.4 - Caracterização do tempo de fechamento da válvula coaxial para o evento de bloqueio lento = 3,5 s.	94
Figura 6.5 - Ensaios de compressão para o cálculo da constante da mola.	96
Figura 6.6 - Arranjo utilizado para medir a pressão de abertura da válvula de alívio, P_{set} .	97
Figura 6.7 - Gráfico resultante das medições do LVDT para determinar a pressão de abertura da válvula de alívio.	98
Figura 6.8 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes iniciais para vazão principal $Q = 10$ L/min ($Re = 7633$).	100
Figura 6.9 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes iniciais para vazão principal $Q = 14$ L/min ($Re = 10686$).	101
Figura 6.10 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes iniciais para vazão principal $Q = 17$ L/min ($Re = 12976$).	102
Figura 6.11 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes iniciais para vazão principal $Q = 21$ L/min ($Re = 16030$).	103

Figura 6.12 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes iniciais para vazão principal $Q = 26$ L/min ($Re = 19846$).	104
Figura 6.13 - Exemplo da qualidade das imagens <i>PIV</i> , antes e depois da colocação da cartolina preta.	108
Figura 6.14 - Imagem evidenciando a altura do copo da válvula de alívio, utilizada como referência na calibração espacial.	108
Figura 6.15 - Configuração utilizada no <i>Insight 3G</i> para o processamento das imagens.	110
Figura 6.16 - Exemplo de pós-processamento dos dados no <i>Insight 3G</i> .	111
Figura 6.17 - Mecanismo para fixar as diferentes frações de abertura na válvula de alívio durante os testes em regime permanente.	113
Figura 6.18 - À esquerda; foto do sistema utilizado na aquisição sincronizada das imagens <i>PIV</i> , assim como na medição da fração de abertura da PRV nos testes de regime transiente. À direita; desenho detalhado do <i>photogate</i> .	115
Figura 7.1 - Diferença de pressão a montante e a jusante da válvula para cada caso e fração de abertura definida em regime permanente.	118
Figura 7.2 - Campos médios de velocidade ilustrando seis diferentes posições de abertura da válvula no caso A, $Re = 7633$.	120
Figura 7.3 - Campos médios de velocidade ilustrando seis diferentes posições de abertura da válvula no caso B, $Re = 12976$.	121
Figura 7.4 - Campos médios de velocidade ilustrando seis diferentes posições de abertura da válvula no caso C, $Re = 19846$.	122
Figura 7.5 – Áreas de referência para o cálculo da vazão de descarga na PRV com integração do campo de velocidade. r é a coordenada radial, com origem no eixo de simetria circunferencial.	124
Figura 7.6 - Vazões de descarga QS contra a fração de abertura, calculadas por meio da integração do campo de velocidade nos casos testados em regime permanente.	125

Figura 7.7 - Coeficiente de descarga em regime permanente contra a fração de abertura da válvula de alívio, para os casos A, B e C.	126
Figura 7.8 - Coeficiente de descarga contra a fração de abertura da válvula de alívio, comparando a média dos resultados dos casos A, B e C com resultados obtidos através de simulação computacional [10].	127
Figura 7.9 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes em regime transiente rápido para o caso D ($Re = 19846$). Nota-se o <i>offset</i> temporal da realização instantânea, mais para a esquerda com relação à média das 100 realizações instantâneas.	130
Figura 7.10 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes em regime transiente rápido do caso D ($Re = 19846$). Nota-se boa concordância (sem <i>offset</i> considerável) entre realização instantânea e média das 100 realizações instantâneas.	131
Figura 7.11 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes em regime transiente rápido para o caso D ($Re = 19846$). Nota-se um leve <i>offset</i> temporal da realização instantânea, mais para a direita com relação à média das 100 realizações instantâneas.	132
Figura 7.12 - Campos médios de velocidade ilustrando seis posições de abertura da válvula para o caso D, $Re = 19846$.	135
Figura 7.13 - Campos de contorno de magnitude de velocidade média, ilustrando seis posições de abertura da válvula para o caso D, $Re = 19846$.	137
Figura 7.14 - Vazão de alívio transiente (Q_{Se} e Q_{Sj}) contra a fração de abertura da PRV, calculadas integrando o campo de velocidade do caso D, em regime transiente rápido.	138
Figura 7.15 - Coeficiente de descarga transiente contra a fração de abertura da válvula de alívio, para o caso D, $Re = 19846$.	139
Figura 7.16 - Comparação dos resultados do coeficiente de descarga C_d permanente (Caso C) e C_d transiente (Caso D) em função da fração de abertura da válvula de alívio.	140

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Padrões de orifícios de entrada das válvulas de alívio tipo mola.	36
Tabela 4.1 - Alguns dos materiais comuns para adição de partículas a escoamentos de líquidos e de gases.	54
Tabela 4.2 - Tintas fluorescentes mais comuns para uso em PIV.	55
Tabela 5.1 - Parâmetros da válvula de alívio.	69
Tabela 5.2 - Características do tubo do circuito hidráulico.	70
Tabela 5.3 - Características do sensor de pressão UNIK 5000.	79
Tabela 5.4 - Características do transdutor LVDT utilizado.	82
Tabela 6.1 - Classificação do transiente [20].	95
Tabela 6.2 - Matriz dos casos de estudo testados	106

1 Introdução

O adequado funcionamento dos sistemas de transporte de fluidos, especialmente na indústria de petróleo e gás, exige equipamentos e procedimentos de controle e segurança confiáveis. O Brasil, por exemplo, tem um total de aproximadamente 15.000 km de dutos em operação, contando com oleodutos e gasodutos [1]. A pressão de trabalho ao longo desses dutos é alta e pode aumentar ainda mais em alguma situação anormal de operação. Pressões altas demais por sua vez geram riscos como, por exemplo, o de ruptura, que podem implicar danos ambientais, perigo às pessoas próximas da instalação, e custos extremamente elevados de reparação. Para prevenir esses riscos em sistemas complexos de dutos, são empregados sistemas de segurança cada vez mais confiáveis, estando as válvulas de alívio entre os equipamentos mais importantes. Desse modo, estudos experimentais, numéricos e teóricos deste tipo de válvula e dos sistemas de transporte em geral vêm se tornando mais frequentes e importantes.

A compreensão do comportamento e o correto dimensionamento das válvulas de alívio de pressão (PRVs, do inglês, *Pressure Relief Valves*) são fundamentais para garantir a segurança operacional nas linhas de transporte. Estas válvulas funcionam aliviando a pressão interna no duto caso ocorra uma condição anormal ou acidental no sistema que cause incremento da pressão acima do valor pré-definido e calibrado na válvula (a pressão de ajuste, do inglês, *set pressure*, P_{set}).

As válvulas de alívio de pressão do tipo mola são as mais utilizadas em instalações industriais. São dispositivos de segurança passivos, sendo baseadas na ação da força da mola (mais uma contrapressão ou pressão de retorno do lado do alívio), contra a força exercida pela pressão do fluido na superfície interior do disco da válvula. Não há necessidade de uma fonte de energia externa. A Figura 1.1 apresenta, à esquerda, um desenho esquemático de uma PRV convencional e, à direita, um modelo simplificado que mostra a nomenclatura e os principais parâmetros envolvidos no presente trabalho. À medida que a força devida à pressão do fluido no orifício de entrada supera a força da mola, a válvula começa a permitir

que líquido escape. Um aumento adicional na pressão do sistema eleva ainda mais o disco da válvula de seu assento, quando o fluido é então desviado de volta para baixo da saia (algumas válvulas, como é o caso da válvula-modelo de laboratório utilizada no presente trabalho, têm a forma de "copo invertido"), invertendo o sentido. Isso cria forças de reação que levantam ainda mais o disco. A pressão P_2 (ver Figura 1.1 à direita) na saída de alívio ou descarga da válvula normalmente é a pressão atmosférica. O desequilíbrio de forças no sentido oposto acarreta no fechamento da válvula após o restabelecimento das condições normais de pressão no sistema, evitando alívio desnecessário de líquido.

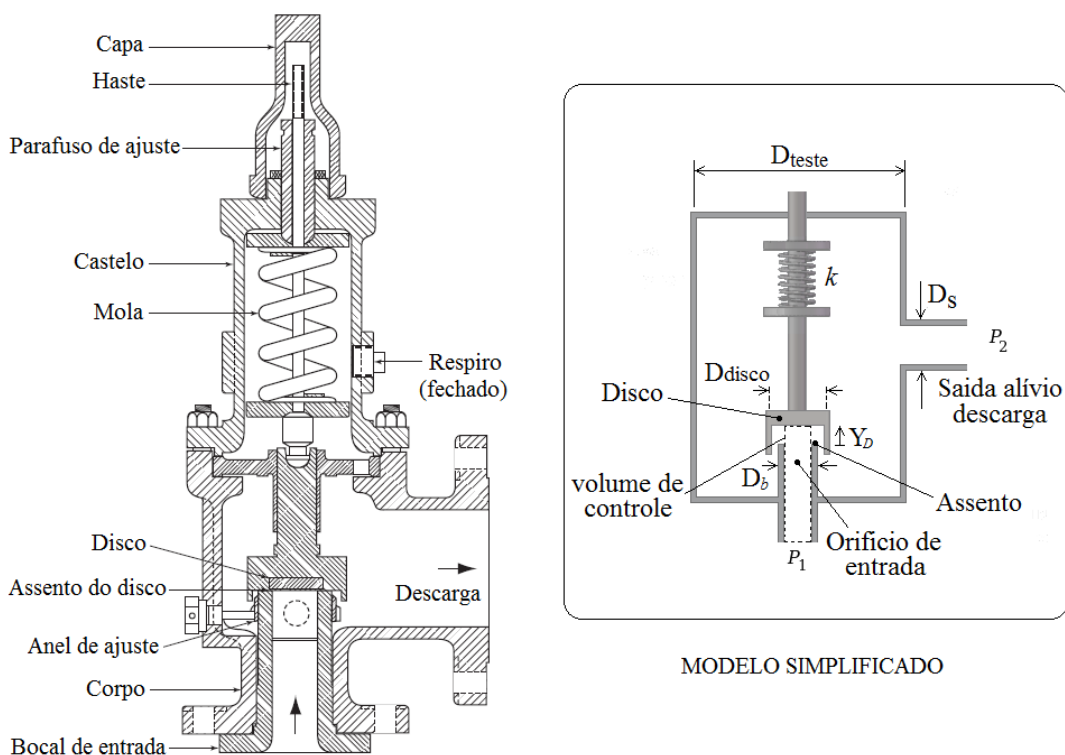


Figura 1.1 - Desenho esquemático de uma válvula de alívio tipo mola convencional, à esquerda (adaptado da norma API 520, 2008), e um modelo simplificado da mesma com forma de "copo invertido", à direita.

A Figura 1.2 apresenta um exemplo do comportamento típico da pressão variando com o tempo em uma PRV. Neste gráfico pode-se observar os diferentes níveis de pressão existentes. Depois do bloqueio, o salto de pressão é súbito, a válvula tende a se estabilizar em um valor entre a pressão máxima de alívio (ou pressão acumulada máxima permitida) e a pressão de ajuste, dependendo da curva

característica da bomba e do sistema por onde o fluido escoar. Quando as condições normais de serviço são reestabelecidas, a pressão diminui e a válvula se fecha normalmente a uma pressão ligeiramente abaixo da pressão de ajuste, devido à energia cinética do fluido no sistema de descarga. O entendimento do comportamento dinâmico da válvula é fundamental para prever como a pressão irá se comportar no duto.

Uma vez que a taxa de crescimento da pressão é geralmente alta, especialmente em eventos de bloqueios em dutos curtos com alta vazão, a válvula deverá apresentar uma resposta rápida, garantindo que as pressões resultantes no sistema fiquem abaixo das pressões máximas operacionais admissíveis (linha tracejada vermelha), a fim de garantir a segurança do sistema.

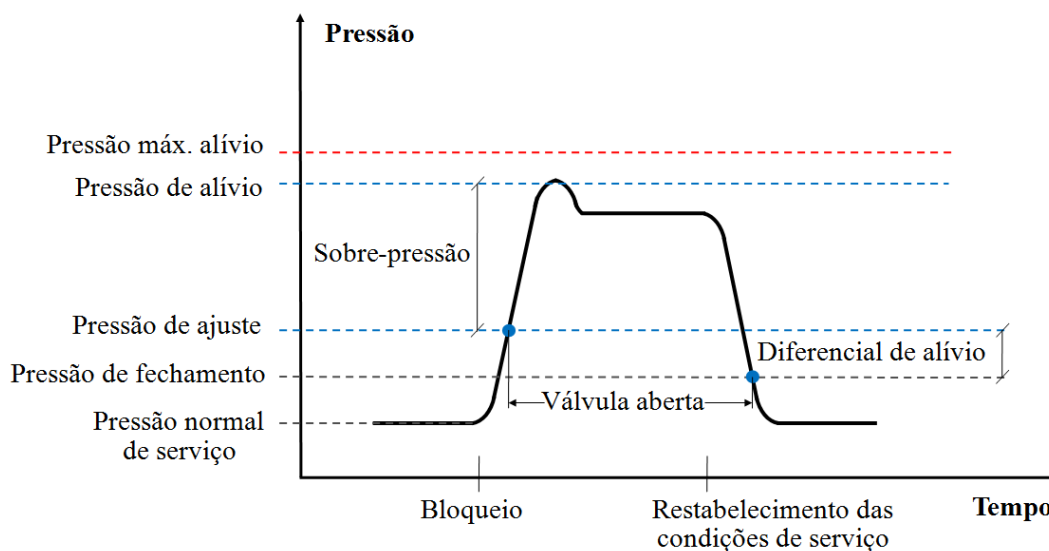


Figura 1.2 - Evolução teórica da pressão na abertura e fechamento de uma válvula de alívio de pressão. (Referência gráfica: norma técnica espanhola NTP 342 - Válvulas de segurança: características técnicas, 1994.)

Alguns dos parâmetros importantes definidos pelo usuário necessários para a seleção apropriada de uma válvula são: a vazão de alívio requerida, que é normalmente a vazão principal esperada no duto Q (L/min), a pressão de ajuste desejada P_{set} (kPa), a sobrepressão permitida P_{over} (kPa), e a pressão de saída esperada P_2 (kPa). Com base nessas entradas o usuário pode estimar a área de descarga mínima requerida, A (mm²), e escolher o modelo e a geometria da válvula, conforme definido na norma API 520 [3]:

$$A = \frac{11,78 Q}{K_d K_w K_c K_v} \sqrt{\frac{\rho}{P_1 - P_2}}, \quad (1)$$

onde P_1 é a pressão no orifício de entrada, a montante da válvula (kPa), $P_1 = P_{set} + P_{over}$, $K_d = 0.65$ quando a PRV está instalada com ou sem um disco de ruptura¹ combinado ou $= 0.62$ quando deseja-se dimensionar um disco de ruptura. K_w é o fator de correção devido à pressão a jusante P_2 , que para uma PRV de mola convencional ou uma PRV auto-operada é igual a 1. $K_c = 0,9$ quando existe disco de ruptura instalado e vale 1 quando não existe disco de ruptura instalado. ρ é a massa específica do líquido à temperatura prevista do escoamento em condições normais e K_v o fator de correção da viscosidade, determinado pela equação (2), onde Re é o número de Reynolds do escoamento baseado no diâmetro do orifício de entrada da PRV (da Tabela 3.1):

$$K_v = \left(0,9935 + \frac{2,878}{Re^{0,5}} + \frac{342,75}{Re^{1,5}} \right)^{-1,0}. \quad (2)$$

A equação (1) é utilizada para a estimativa inicial do dimensionamento da válvula para uma dada aplicação, mas não há maneira de saber se o coeficiente real de descarga durante a operação da válvula, C_d , é bem representado pelo valor do coeficiente nominal K_d . Além disso, geralmente não há informações do fabricante sobre como C_d ou a vazão de alívio Q_s se comportam durante a subida transiente da válvula. Esta informação, que dependeria das características de cada fabricante e seria extremamente útil para o desenho de sistemas de transporte de fluidos que incorporam válvulas de alívio, normalmente não está disponível, e quando está, baseia-se numa análise em regime permanente para cada fração de abertura fixa da válvula.

¹ Dispositivo de segurança sacrificial, instalado no sistema a ser protegido, que se rompe quando a pressão interna no sistema ultrapassa um diferencial de pressão determinado. Os discos de ruptura são utilizados para proteger as válvulas de alívio quando se trabalha com líquidos agressivos.

1.1. Motivação

No projeto de sistemas complexos de transporte de fluidos, é fundamental utilizar *softwares* para simular e prever diferentes situações em todo o funcionamento. Estes *softwares* devem incluir modelos apropriados e confiáveis para cada equipamento específico que compreende o sistema. Modelos para PRVs são muitas vezes baseados em um desempenho da válvula em regime permanente, mas transientes hidráulicos nestas válvulas podem ter efeitos relevantes, cuja predição pode ser valiosa. Dependendo do tempo de resposta da válvula, a dinâmica do sistema pode ser significativamente influenciada pela sua localização e características. Além disso, se a frequência das variações da pressão de entrada coincide com a frequência natural da válvula, ela pode oscilar e ter batimentos excessivos (*chattering*), o que também pode afetar o sistema como um todo.

Assim, julgou-se que um estudo experimental mais detalhado do comportamento de um modelo de PRV tipo mola poderia trazer contribuições relevantes às discussões mencionadas acima, dando continuidade a trabalhos conduzidos anteriormente no laboratório, nos quais estudou-se experimentalmente o comportamento de uma válvula industrial [12], e simulou-se numericamente sua dinâmica a partir de um modelo simplificado [10].

1.2. Objetivo

O objetivo principal desta pesquisa é estudar o comportamento dinâmico de uma válvula de alívio de pressão, representada aqui por um modelo reduzido fabricado em acrílico, a fim de proporcionar uma caracterização mais detalhada do processo transiente. Para isso, como será explicado em capítulos posteriores, são utilizados diferentes mecanismos de medição, assim como configurações de sincronização especiais para medir campos de escoamento, vazão transiente, deslocamento instantâneo do copo da válvula e pressão de entrada e saída durante a subida transiente. Com isso é possível disponibilizar tanto resultados de

realizações² instantâneas quanto resultados estatísticos, que caracterizam o comportamento “típico” de eventos individuais de bloqueio no duto e alívio pela PRV.

Deseja-se, em especial, agregando as medições mencionadas no parágrafo anterior, tornar possível então abordar a questão se é ou não razoável caracterizar o comportamento da válvula através de uma série de posições fixas em regime permanente e assumir que é uma boa previsão para o comportamento real transiente, como é feito por alguns fabricantes, e comum encontrar na literatura curvas de coeficiente de descarga em função da fração de abertura, $C_d \times Y_D$, obtidos desta forma.

A bancada permite analisar o comportamento da válvula para diferentes durações de bloqueio, consideradas lentas e rápidas. O nível de adequação deste tipo de suposição (a de que a caracterização em regime permanente fornece informação correta e suficiente para o usuário) pode variar dependendo da duração do bloqueio e da natureza do transiente. Medições em regime permanente são conduzidas – de forma a permitir a comparação – no mesmo modelo de válvula em acrílico e com os mesmos métodos de medição empregados nas realizações transientes.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta de nove capítulos. No capítulo 2 será apresentada uma breve revisão bibliográfica, com trabalhos experimentais e numéricos realizados sobre o comportamento de válvulas de alívio.

O capítulo 3 expõe alguns conceitos e nomenclaturas sobre as válvulas de alívio tipo mola com base na norma API 520, assim como o equacionamento que regula seu comportamento dinâmico com base no modelo utilizado em [10, 12], levemente modificado para ser mais fiel à geometria da válvula de estudo.

No Capítulo 4, são apresentadas noções básicas em relação à técnica de medição denominada Velocimetria por Imagem de partículas (do inglês, *Particle*

² Por “realizações” denota-se cada evento de abertura da PRV. Como será visto à frente, este evento é controlado precisamente no experimento, sendo acionado a partir do fechamento rápido de uma válvula coaxial posicionada a jusante da PRV no duto principal da bancada experimental.

Image Velocimetry – PIV). O motivo pelo qual um capítulo é dedicado a esta técnica é que ela torna possível visualizar o campo de velocidade no interior da câmara onde se encontra a PRV, e uma explicação dos conceitos envolvidos é necessária para leitores interessados e que desconheçam a técnica. É a partir destes campos de velocidade que se obtém os valores da vazão de descarga transiente durante a elevação da PRV, como será visto à frente.

O capítulo 5 apresenta a configuração experimental utilizada, e no capítulo 6 são descritos os procedimentos seguidos na realização da pesquisa.

No capítulo 7 os resultados experimentais obtidos são apresentados e discutidos, ao passo em que no capítulo 8 são expostas as conclusões e sugestões do trabalho. Para finalizar, o capítulo 9 reúne as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação.

2 Revisão da literatura

Tentativas de entender os detalhes do comportamento dinâmico de PRVs têm sido conduzidas com abordagens tanto experimentais quanto numéricas há bastante tempo. Em 1978, Ray [4] desenvolveu um modelo dinâmico não-linear de uma válvula tipo mola, com base nos princípios fundamentais dos movimentos de corpos rígidos e nas leis da mecânica dos fluidos. O autor concluiu que a inércia do escoamento do fluido no orifício produz um efeito de amortecimento no movimento da válvula, resultando num atraso inicial, e que o tempo de abertura da válvula é aproximadamente proporcional à razão entre o comprimento e o raio do orifício de entrada. Também apontou para o fato de que a combinação massa-mola pode gerar oscilações e o *chattering*, que é caracterizado por violentas oscilações do disco, como resultado de altas variações de pressão na entrada da válvula é, de fato, observado na prática.

Sallet *et al* (1981) [5] realizaram medições experimentais tendo como objetivo uma melhor compreensão das características do fluxo no interior da válvula em diferentes regimes de escoamento. Os autores analisaram as distribuições do fluxo e da pressão no interior de uma PRV típica, estudando parâmetros como geometria da válvula, frações de abertura, entre outros, que afetam o desempenho e a capacidade de alívio.

A análise da estabilidade dinâmica de uma válvula de alívio tipo mola e o estudo dos efeitos de seus componentes na estabilidade da mesma foram apresentados por Catalani em 1984 [6]. Segundo o autor, os fatores que afetam o rendimento da válvula são: o ajuste do anel, as condições de escoamento a montante, e o comprimento da tubulação também a montante. Foi desenvolvido um modelo computacional para investigar a influência de componentes pneumáticos e eletromagnéticos na estabilidade da válvula. A conclusão foi de que o uso de tais dispositivos melhora o desempenho, permitindo um melhor controle da pressão de abertura e fechamento.

McLeod (1985) [7] estudou o fenômeno conhecido como *chattering* em uma válvula de alívio, que é caracterizado pela oscilação violenta do disco sobre seu assento, como sendo um fenômeno dinâmico que pode ser modelado através de equações diferenciais. O autor investigou a estabilidade da válvula usando o critério de *Routh-Hurwitz*. Ele sugeriu que a estabilidade dinâmica numa válvula de alívio depende da pressão do sistema de dutos e das características reais da válvula, e que é necessário ter um conjunto de equações diferenciais concisas que represente bem o sistema de acordo com sua metodologia, quando se pretende realizar uma minuciosa análise da estabilidade.

Francis e Betts (1996) [8] apresentaram uma análise do escoamento de fluido incompressível dentro de uma válvula de alívio. Usando o método de elementos finitos, os autores simularam o escoamento dentro de um modelo bidimensional, com simetria axial, de uma válvula de alívio real. Foram estudadas cinco frações de abertura, em estado estacionário. As comparações foram feitas com os resultados experimentais obtidos com a técnica de filme de óleo. Os resultados das simulações permitiram visualizar os regimes do escoamento dentro da válvula, com a identificação das regiões de separação e re-colamento, que por sua vez poderiam ser relacionados com a mudança da forma da curva do C_d contra a elevação. Segundo os autores, este tipo de conhecimento pode ter implicações importantes para um projeto eficaz.

Francis e Betts publicaram outro trabalho em 1998 [9] propondo um modelo zonal para expressar a força sobre o disco de uma válvula de alívio de alta elevação através de um número de parâmetros-chave geométricos e dinâmicos. Eles enfatizam que a força no disco em uma válvula de alívio de alta elevação depende das características do escoamento através da válvula, e que deve-se considerar os efeitos de compressibilidade na descrição do fluxo. Entre os parâmetros geométricos, é identificado o quadrado da relação entre o diâmetro do disco e a elevação para um diâmetro nominal da válvula. Outro parâmetro foi o comprimento da saia (para uma válvula em forma de copo) em relação ao diâmetro nominal, que vai influenciar significativamente a variação global na quantidade de movimento do fluxo e, conseqüentemente, as pressões médias experimentadas na superfície do disco. A importância de uma caracterização detalhada está acentuada, e representada, principalmente, através das curvas do coeficiente de descarga contra a subida e pressão contra subida.

Mais recentemente, simulações numéricas foram realizadas para um estudo mais aprofundado das características dinâmicas das válvulas de alívio. No trabalho do Ortega *et al* [10], de 2008, um modelo transiente bidimensional é apresentado para análise do fluxo através de uma válvula de alívio de mola simplificada, com o objetivo de determinar o coeficiente de descarga C_d por uma metodologia mais rigorosa, considerando o comportamento dinâmico da válvula e os detalhes do escoamento. Os resultados foram comparados com um modelo unidimensional e mostraram que, embora diferentes posições de equilíbrio do disco e vazões tivessem sido obtidas com cada método, ambos os modelos previram o mesmo comportamento para o coeficiente de descarga, como uma função da fração da abertura da válvula.

Song *et al* (2010) [11] investigaram escoamentos turbulentos de água através da válvula usando um modelo numérico bidimensional com malha deformável devido à interação fluido-sólido, com diferentes condições de entrada de pressão. Os autores obtiveram distribuições de velocidade e pressão através da válvula em cada passo de tempo, concluindo que a interação instável entre o fluido e a mola comprimida criam cargas instáveis que fazem oscilar o disco da válvula.

Em 2011, Carneiro [12] contribuiu com a construção de uma bancada experimental para estudar o comportamento dinâmico de uma PRV comercial em diferentes condições operacionais. Foram gerados resultados como: curvas de pressão a montante e a jusante da válvula, vazão de alívio, e fração de abertura em função do tempo durante a subida transiente. O autor produziu curvas para o coeficiente de descarga C_d contra a fração de abertura, tanto para o regime permanente (aquisição de dados para frações de abertura fixas) quanto regime transiente, e concluiu que os dados de regime permanente coincidiam bem com os dados transientes, fornecendo uma boa representação, pelo menos para as durações de bloqueio estudadas, as quais caracterizavam o processo como transiente lento. Para este tipo de situação o autor considerou as curvas próximas para os casos em regime transiente e permanente, mas recomendou um estudo mais detalhado do comportamento do coeficiente de descarga para regimes transientes mais severos.

Em 2015, Babilonia *et al* [13] mostraram resultados preliminares do presente trabalho de dissertação, onde as características dinâmicas de um modelo de PRV foram determinadas em detalhes para eventos de bloqueio classificados como lentos

e rápidos. Os detalhes deste trabalho são o objeto da presente dissertação e serão explorados no texto que segue.

Como se pode notar a partir do levantamento dos trabalhos disponíveis na literatura sobre o comportamento dinâmico de PRV's, o conhecimento do coeficiente de descarga da válvula como função da abertura apresenta ainda lacunas que justificam um estudo mais aprofundado. Em particular, é relevante avaliar a validade da aproximação usualmente empregada de utilizar-se o coeficiente de descarga obtido para regime permanente como representação do coeficiente dinâmico para eventos rápidos de bloqueio, e talvez até mesmo para os lentos. O presente trabalho apresenta uma contribuição neste tópico.

3

Válvulas de alívio de pressão tipo mola

Este capítulo apresenta a terminologia, tipos e características operacionais das válvulas de alívio de pressão tipo mola, assim como o equacionamento que regula seu comportamento dinâmico.

Nas instalações industriais o tipo de válvula de alívio mais comum de ser encontrado é a de mola, projetado para abrir e aliviar o excesso de pressão e fechar novamente impedindo assim uma maior descarga de fluido após a restauração das condições normais de operação. Estas válvulas, dependendo da aplicação e do tipo de fluido a operar, são referenciadas tradicionalmente pelos seguintes termos:

- Válvulas de alívio (*Pressure Relief Valves* – PRVs): Usadas principalmente em serviços com fluidos incompressíveis, e caracterizadas por uma abertura progressiva e proporcional à sobrepressão do sistema.
- Válvulas de segurança (*Pressure Safety Valves* – PSVs): Destinadas para serviços com fluidos compressíveis, como gases e vapores e, diferentemente das PRVs, estas válvulas aliviam o excesso de pressão de forma rápida e instantânea.
- Válvulas de alívio e segurança (*Safety Relief Valves* – SRVs): Adequadas para trabalhar como válvulas de segurança ou de alívio, dependendo da aplicação desejada. Podem operar com ambos tipos de fluidos, compressíveis e incompressíveis.

As funções em comum destas válvulas incluem: abrir a uma pressão pré-determinada e calibrada; descarregar todo o volume previsto no seu dimensionamento, na sobrepressão prevista, e fechar dentro do diferencial de alívio previsto.

3.1. Terminologia básica

Para entender o comportamento das válvulas de alívio é necessário conhecer a terminologia utilizada e os níveis de pressão presentes durante o processo de alívio, a maioria deles ilustrados previamente na Figura 1.2. Adicionalmente, outra representação gráfica é mostrada na Figura 3.1.

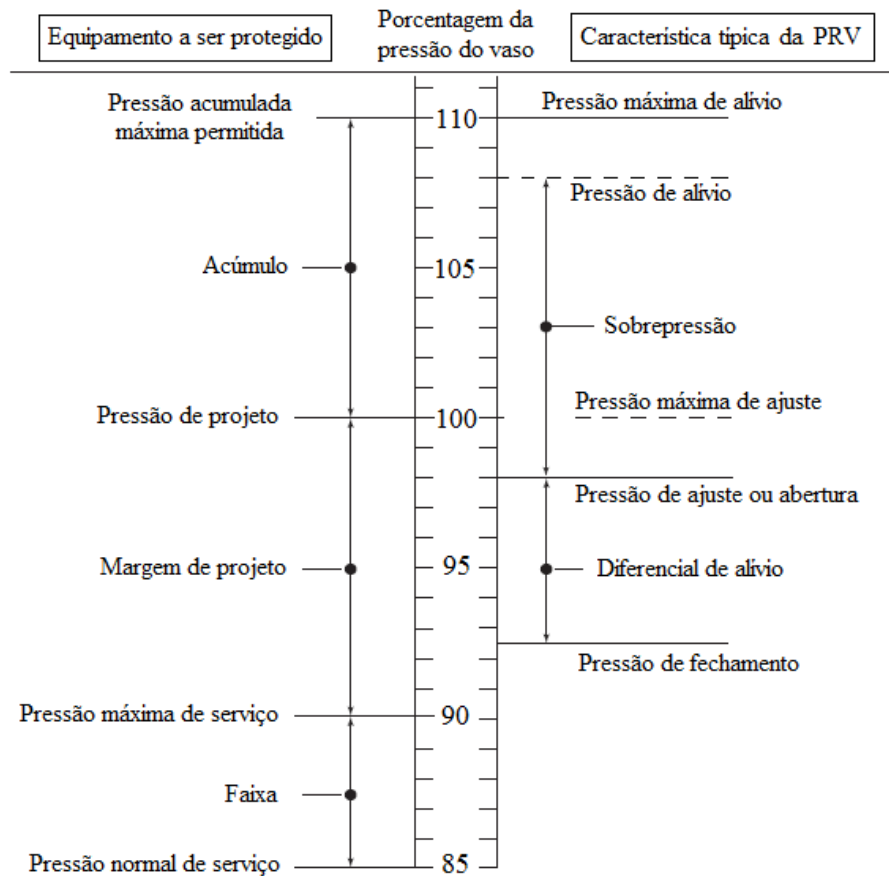


Figura 3.1 – Relação entre os níveis de pressão em uma válvula de alívio com sobrepessão de 10% (adaptado da norma API 520, 2008).

- **Pressão de operação ou serviço:** É a pressão normal de operação do equipamento ou sistema à temperatura de serviço.
- **Pressão de ajuste:** Pressão pré-determinada na qual a válvula de alívio começa a abrir ou inicia a descarga, ou “alívio”.
- **Sobrepessão:** É o incremento de pressão sobre a pressão de ajuste durante a abertura da válvula. O valor máximo de sobrepessão

corresponde à válvula completamente aberta. Normalmente expressa em porcentagem da pressão de ajuste.

- **Pressão de alívio:** É a soma da pressão de ajuste com a sobrepressão.
- **Diferencial de alívio (Blowdown):** É a diferença entre a pressão de ajuste e a pressão de fechamento da válvula. Expresso normalmente como uma porcentagem da pressão de ajuste.
- **Pressão de fechamento:** É o valor após a diminuição da pressão na entrada da válvula, na qual o disco reestabelece o contato com seu assento ou a abertura da válvula é nula.
- **Contrapressão:** É a pressão existente no bocal de saída da válvula de alívio, como resultado da pressão no sistema de descarga. É a soma da contrapressão superimposta e desenvolvida.
 - **Contrapressão superimposta:** É a pressão estática existente no bocal de saída antes da abertura da válvula. É o resultado da pressão no sistema de descarga proveniente de outras fontes, e pode ser constante ou variável.
 - **Contrapressão desenvolvida:** É o acréscimo de pressão que se desenvolve no bocal de saída da válvula quando há uma descarga.
- **Pressão de projeto:** É a pressão para a qual o equipamento deve ser projetado a fim de atender às condições de pressão e temperatura mais severas, previstas em operação normal.
- **Acúmulo:** É o incremento de pressão sobre a pressão de projeto do equipamento durante a descarga através da válvula de alívio. O acúmulo máximo permitido está regulado pelas normas e códigos de projeto dos equipamentos e sistemas a serem protegidos.
- **Pressão acumulada máxima permitida:** É a soma da pressão de projeto e o acúmulo máximo permitido.

- **Vazão de alívio requerida:** É a vazão requerida na válvula de alívio nas condições de alívio para manter a pressão do equipamento protegido em nível inferior à pressão permitida ao equipamento.

3.2. Tipos de válvulas de alívio de pressão - PRVs

O *American Petroleum Institute*, em sua norma API 520 [3], classifica as válvulas de alívio de pressão em três grupos: válvulas de alívio operadas por mola direta (Figura 3.2), válvulas de alívio operadas por piloto (Figura 3.3) e demais dispositivos de alívio de pressão, detalhados a seguir.



Figura 3.2 - Exemplos de válvulas de alívio operadas por mola direta (Catálogo da fabricante Crosby e Leser, esquerda e direita respectivamente).

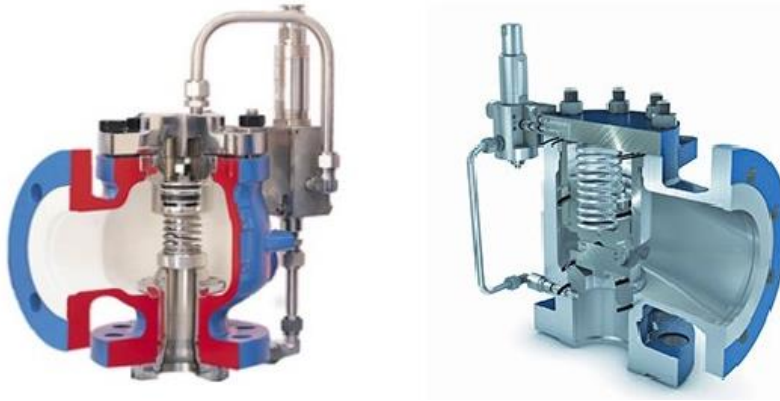


Figura 3.3 - Exemplos de válvulas de alívio operadas por piloto (Catálogo da fabricante Crosby e Leser, esquerda e direita respectivamente).

3.2.1. Válvulas de alívio operadas por piloto.

Uma válvula de alívio operada por piloto consiste de uma válvula principal de alívio, que normalmente inclui um conjunto de êmbolo não balanceado flutuante, e uma válvula auxiliar externa (válvula piloto), como ilustrado na Figura 3.4. O pistão é concebido para ter uma área maior no topo do que no fundo. Até a pressão de ajuste, as áreas superior e inferior são expostas à mesma pressão de operação de entrada. Devido à área maior na parte superior do pistão, a força resultante mantém o pistão firmemente apoiado no assento da válvula principal. Com o aumento da pressão de operação, a força sobre o assento aumenta e tende a tornar a válvula mais apertada. Esta característica permite que a maioria das válvulas operadas por piloto possam ser usadas onde a pressão operacional máxima esperada seja maior que o 21% de sobrepressão. Ao atingir a pressão de ajuste, o piloto expulsa a pressão do topo do êmbolo; a força total resultante é agora ascendente causando levantamento do êmbolo, e o fluxo do processo passa através da válvula principal. Após o incidente de sobrepressão, o piloto fechará o respiro do topo do êmbolo, restabelecendo assim a pressão, e a força resultante retornará o êmbolo à sua posição normal de assento.

Estas válvulas podem ser de ação rápida ou modulante, e o piloto pode ser com ou sem escoamento. Possuem alta capacidade de alívio, ocupam pouco espaço, suportam altas pressões, baixos diferenciais de pressão e altas contrapressões. Porém, são mais caras, pouco utilizadas e não serão estudadas neste projeto.

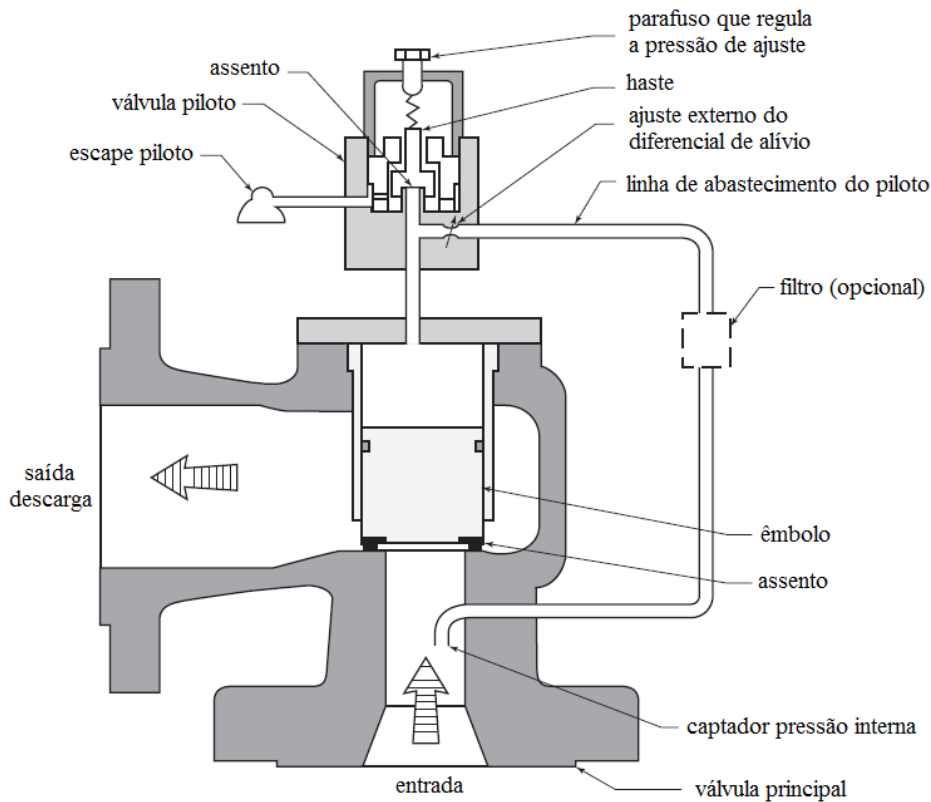


Figura 3.4 - Representação esquemática de uma válvula de alívio operada por piloto, de ação rápida, tipo piloto com escoamento (adaptado da norma API 520, 2008).

3.2.2. Válvulas de alívio operadas por mola direta

As válvulas de alívio operadas por mola direta estão disponíveis com ou sem fole, classificadas como válvulas de alívio convencionais e válvulas de alívio balanceadas, como ilustrado na Figura 3.5 e Figura 3.7 respectivamente. Tendo em comum que a resistência à abertura é gerada por uma ação mecânica direta de uma mola, estas são carregadas axialmente, e ao atingir uma pressão pré-definida de ajuste, se abrem automaticamente devido à força exercida pela pressão do processo atuando sobre o disco da válvula. Normalmente estas válvulas atingem sua capacidade de descarga certificada com uma sobrepressão de 10% para gases e vapores, e de 10 a 25% para líquidos.

As válvulas de alívio de pressão tipo mola são comercializadas pelos fabricantes com diâmetros/área dos bocais de entrada padronizados, segundo a norma API 526, sendo designadas por meio de letras que vão desde “D” até “T”, como pode ser verificado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Padrões de orifícios de entrada das válvulas de alívio tipo mola (adaptado da norma API 526, 2002)

Designação do Orifício	Área (in ²)	Área (mm ²)	Diâmetro (mm)
D	0,110	71	9,5
E	0,196	126,5	12,7
F	0,307	198,1	15,9
G	0,503	324,5	20,3
H	0,785	506,4	25,4
J	1,287	830,3	32,5
K	1,838	1185,8	38,9
L	2,853	1840,6	48,4
M	3,60	2322,6	54,4
N	4,34	2800	59,7
P	6,38	4116,1	72,4
Q	11,05	7129	95,3
R	16,00	10322,6	114,6
T	26,00	16774,2	146,1

3.2.2.1. Válvulas de alívio convencional (sem fole)

Uma válvula de alívio convencional ou de ação direta pode descarregar diretamente para a atmosfera (conforme o modelo utilizado neste projeto), dependendo do tipo de fluido. Sua pressão de ajuste pode ser alterada pela contrapressão superimposta quando a saída é conectada a uma linha de alívio. Os elementos básicos de uma válvula de alívio convencional incluem um bocal de entrada ligado a um vaso de pressão ou a um duto a ser protegido, um disco móvel que controla o escoamento através do assento, e uma mola, a qual controla a posição do disco, conforme ilustrado na Figura 3.5. Sob condições normais de funcionamento do sistema, a pressão na entrada é inferior à pressão de ajuste, e o disco está apoiado no assento impedindo o fluxo através do bocal.

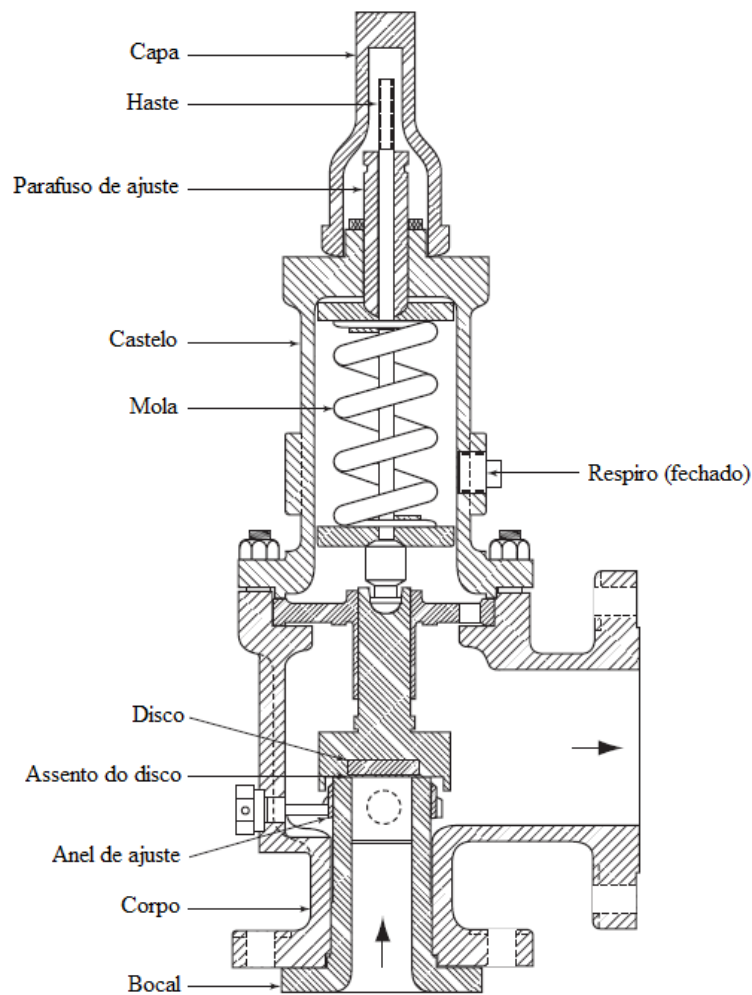


Figura 3.5 - Desenho esquemático de uma PRV convencional (adaptado da norma API 520, 2008).

Como a parte superior do disco de fechamento da válvula está submetida normalmente a uma contrapressão existente na descarga, a força aplicada pela mola deve se equilibrar com as forças ocasionadas pela pressão do fluido e pela contrapressão. Se a contrapressão muda, também mudará a pressão de abertura ou de ajuste.

Estabelece-se o equilíbrio de forças no instante em que a válvula abre, e as forças de reação no assento desaparecem, como pode-se observar de forma esquemática na Figura 3.6.

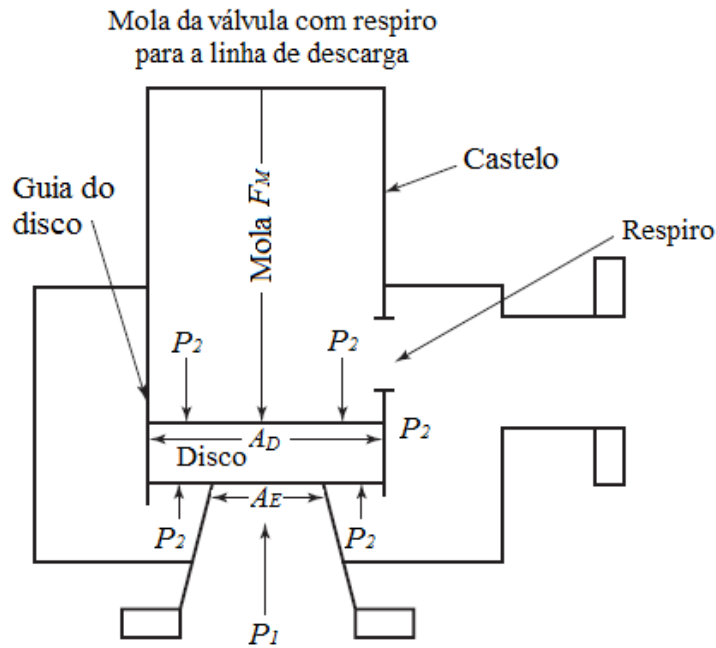


Figura 3.6 - Efeitos típicos da contrapressão sobre a pressão de ajuste em uma PRV convencional (adaptado da norma API 520, 2008).

Na Figura 3.6, temos que:

A_E : Área do bocal de entrada

A_D : Área do disco, sendo $A_D > A_E$

F_M : Força da mola

P_1 : Pressão interna do sistema ou equipamento protegido

P_2 : Contrapressão superimposta (na linha de alívio)

A equação do equilíbrio de forças pode ser escrita como:

$$P_1 A_E + P_2 (A_D - A_E) = F_M + P_2 A_D \quad (3)$$

No momento em que a válvula abre, P_1 passa a ser a pressão de abertura e a relação fica:

$$P_1 = \frac{F_M}{A_E} + P_2 A_D \quad (4)$$

Com a ajuda da eq. (4) podemos observar que a contrapressão incrementa a pressão de abertura, pois além da pressão de ajuste prevista, F_M/A_E soma-se à

contrapressão P_2 . Este fato pode levar ao risco da válvula não abrir quando necessário, ou abrir com retardo a uma pressão superior àquela ajustada.

Quando a contrapressão excede os 10% da pressão de abertura, a norma API recomenda utilizar válvulas de alívio especiais que permitem contrapressões de até 50% da pressão absoluta de ajuste. A partir desse valor, a capacidade de descarga dessas válvulas decresce notavelmente.

3.2.2.2. Válvulas de alívio balanceadas (com fole)

Uma válvula convencional pode ser convertida em balanceada apenas pela inclusão de um fole e a respectiva junta de vedação entre este e o corpo, evitando que a descarga da válvula se comunique com o interior do castelo, equilibrando assim o efeito da contrapressão, desde que o fole possua uma área efetiva igual à área do assento. A Figura 3.7 ilustra esquematicamente uma válvula balanceada, com fole, referindo seus principais componentes.

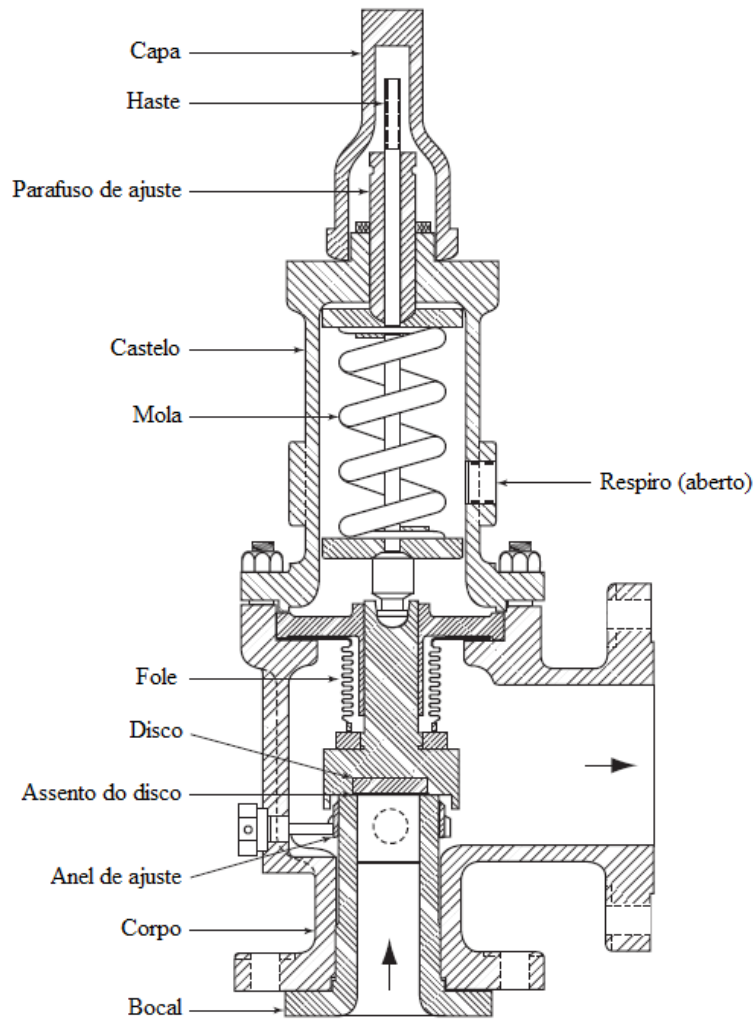


Figura 3.7 - Desenho esquemático de uma PRV balanceada (adaptado da norma API 520, 2008).

Os foles são projetados para que as forças ocasionadas pelas pressões em ambos os lados do disco se igualem. O equilíbrio de forças pode ser visto esquematicamente na Figura 3.7, adotando a simbologia anterior, sendo A_F a área do fole.

A equação do equilíbrio de forças pode ser escrita como:

$$P_1 A_E + P_2 (A_D - A_E) = F_M + P_2 (A_D - A_F) . \quad (5)$$

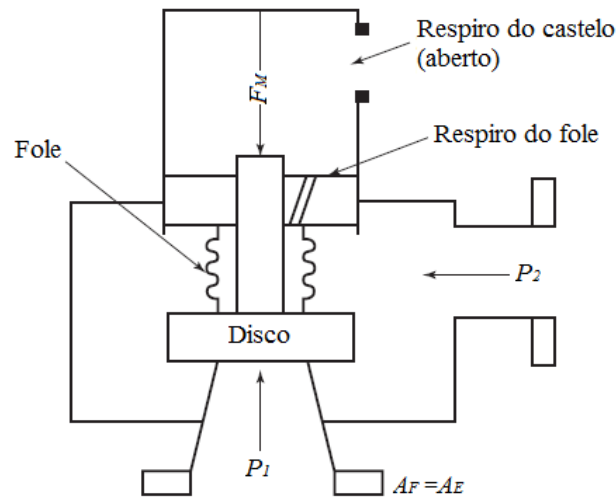


Figura 3.8 - Efeitos típicos da contrapressão sobre a pressão de ajuste em uma PRV balanceada (adaptado da norma API 520, 2008).

Como $A_F = A_E$, então a contrapressão P_2 não influi na pressão de abertura P_1 . Como pode-se observar na eq. (6):

$$P_1 = \frac{F_M}{A_E}. \quad (6)$$

É importante ressaltar que o castelo da PRV balanceada deve apresentar um respiro ventilado para a atmosfera, de maneira que o fole funcione corretamente. Se a válvula está localizada onde o respiro para a atmosfera implica um perigo ou não é permitido pelos regulamentos, o respiro deve ser canalizado para um local seguro, livre de contrapressão que possa afetar a pressão de abertura da PRV.

3.3. Características dinâmicas das válvulas de alívio de pressão

O comportamento dinâmico das válvulas de alívio é fortemente influenciado pelas dimensões geométricas destas. Carneiro e Azevedo, em 2011, desenvolveram um modelo matemático simplificado, mostrado na Figura 3.9. O sistema simplificado é composto de uma mola, uma tampa ou disco e um pequeno duto para a entrada do fluido, ambos de forma cilíndrica. Para a análise do escoamento atravessando a válvula foi considerado um fluido incompressível isotérmico.

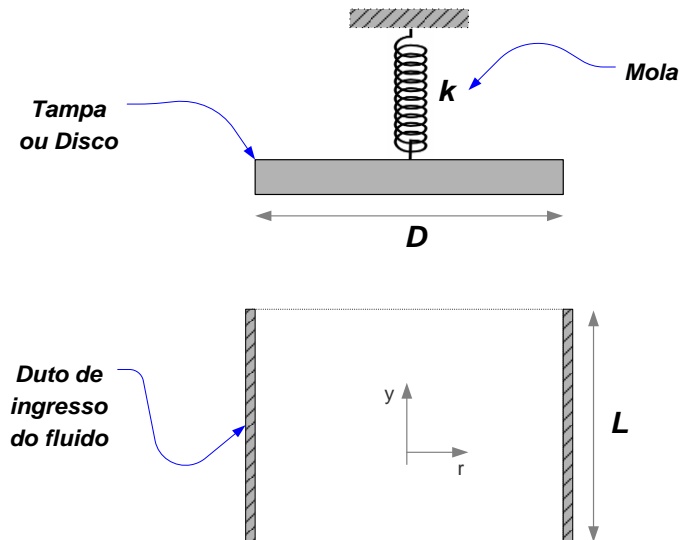


Figura 3.9 - Sistema simplificado da válvula de alívio (Carneiro, 2011).

A seguir serão explicados os passos e os critérios utilizados no desenvolvimento do modelo matemático.

3.3.1. Deformação inicial da mola

Para a determinação da deformação inicial da mola, realiza-se um balanço de forças no disco no instante da abertura de válvula, como mostrado na Figura 3.10.

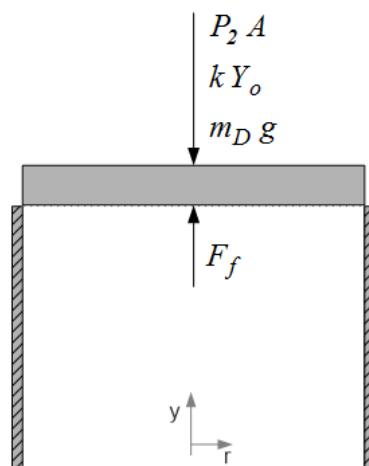


Figura 3.10 - Balanço de forças no disco no instante da abertura da válvula de alívio (adaptado de Carneiro, 2011).

Neste instante existe um equilíbrio de forças em volta do disco, que gera a relação apresentada na equação (7).

$$P_2 A + k Y_o + m_D g = F_f , \quad (7)$$

onde:

P_2 : Pressão externa, atmosférica (Pa).

A : Área da seção transversal do duto / superfície do disco (m^2).

D : Diâmetro do disco (m).

k : Constante da mola (N/m).

Y_o : Deformação inicial da mola (m).

m_D : Massa do disco (kg).

g : Aceleração da gravidade (m/s^2).

F_f : Força que o fluido aplica ao disco (N).

Para determinar a força que o fluido aplica no disco, imediatamente antes da válvula se abrir, aplica-se o balanço de forças no fluido dentro do cilindro fechado ilustrado na figura 3.11.

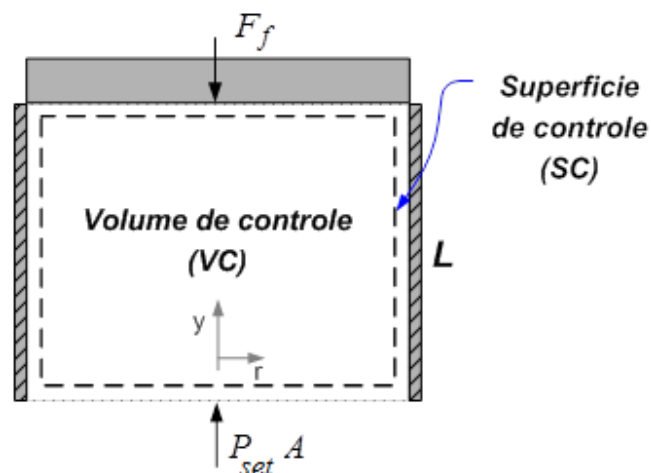


Figura 3.11 - Volume de controle no duto no instante da abertura da válvula de alívio (Carneiro, 2011).

$$-\rho g AL - F_f + P_{set} A = 0, \quad (8)$$

onde:

ρ : massa específico do fluido (kg/m^3).

L : Comprimento do duto na entrada (m).

F_f : Força de reação que o disco aplica ao fluido (N).

P_{set} : Pressão de abertura (ajuste) da válvula ou pressão de *set point* (Pa).

Combinando as equações (7) e (8) obtemos a deformação inicial da mola:

$$Y_o = \frac{1}{k} [(P_{set} - P_2)A - \rho g AL - m_D g]. \quad (9)$$

3.3.2.

Análise da lei de Newton e conservação de massa

Quando a pressão de operação supera a de ajuste, a abertura da válvula de alívio com o deslocamento do disco se iniciam. A dinâmica do disco da válvula de alívio pode ser representada por um modelo matemático como o descrito a seguir. Aplicando a segunda lei de Newton ao disco durante seu deslocamento, Figura 3.12, obtemos a relação mostrada na equação (10), a equação da dinâmica do sistema mola – disco resultante deste modelo.

$$F_f - k(Y_D + Y_o) - c \frac{dY_D}{dt} - m_D g - P_2 A = m_D \frac{d^2 Y_D}{dt^2}, \quad (10)$$

onde:

F_f : Força que o fluido aplica ao disco (N).

Y_D : Deslocamento do disco (m).

c : Coeficiente de amortecimento da mola. ($N - s/m$).

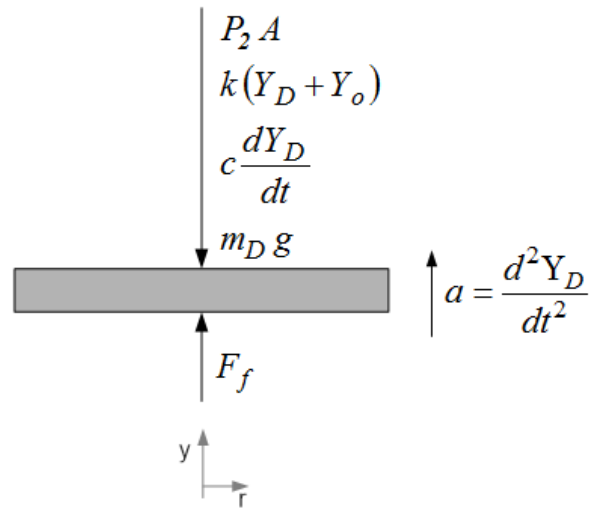


Figura 3.12 - Diagrama de corpo livre do disco durante seu deslocamento (Carneiro, 2011).

Aplicando o princípio de conservação de quantidade de movimento linear na direção y , equação (11), no volume de controle no interior da válvula de alívio, mostrado na Figura 3.13, obtemos a relação mostrada na equação (12).

$$\sum F_y = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} v \rho dV + \int_{sc} v \rho \vec{u} d\vec{A} . \quad (11)$$

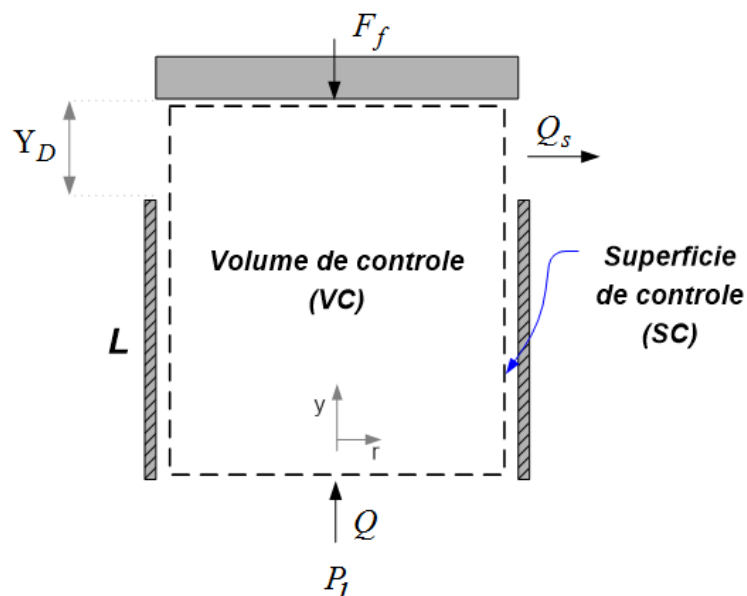


Figura 3.13 - Volume de controle no interior da válvula de alívio durante a atuação da mesma (Carneiro, 2011).

$$-\rho g A(L + Y_D) - F_f + P_1 A = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} u \rho dV - u_e \rho u_e A, \quad (12)$$

onde:

u_e : Velocidade média entrando no volume de controle (m/s).

P_1 : Pressão de operação ou pressão na entrada da válvula de alívio (Pa).

Desprezando a variação da quantidade de movimento vertical com o tempo dentro do volume de controle, pois esta é pequena se comparada com o fluxo de quantidade de movimento na entrada da válvula, obtemos a seguinte relação:

$$-\rho g A(L + Y_D) - F_f + P_1 A = -u_e \rho u_e A. \quad (13)$$

Substituindo a equação (10) na equação (13) e reordenando obtemos a seguinte equação:

$$0 = m_D \frac{d^2 Y_D}{dt^2} + c \frac{dY_D}{dt} + (k + \rho g A) Y_D + k Y_o \dots \quad (14)$$

$$+ \rho g AL + m_D g - (P_1 - P_2) A - Q^2 \frac{\rho}{A},$$

onde $Q = \rho u_e A$ é a vazão volumétrica entrando no volume de controle (m^3/s).

Substituindo a equação (9), da deformação inicial da mola, dentro da equação (14) obtemos a relação apresentada na equação (15).

$$0 = m_D \frac{d^2 Y_D}{dt^2} + c \frac{dY_D}{dt} + (k + \rho g A) Y_D - (P_1 - P_{set}) A - Q^2 \frac{\rho}{A}. \quad (15)$$

Aplicando o princípio da conservação de massa, equação (16), no volume de controle no interior da válvula, mostrado na Figura 3.13,

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{u} d\vec{A}, \quad (16)$$

obtemos a relação apresentada na equação (17).

$$0 = A \frac{dY_D}{dt} - Q + Q_s, \quad (17)$$

onde Q_s é a vazão volumétrica saindo do volume de controle (m^3/s), a qual é definida mediante a seguinte equação:

$$Q_s = C_d A \sqrt{2 \frac{(P_1 - P_2)}{\rho}}, \quad (18)$$

onde:

A : Área de referência, neste trabalho foi usada a área do orifício de entrada da válvula (m^2).

C_d : Coeficiente de descarga da válvula (adimensional).

O coeficiente de descarga da válvula foi obtido experimentalmente neste trabalho para diversas posições de abertura da válvula, originando uma curva que o relaciona com a fração ou porcentagem de abertura da válvula. Um gráfico de $C_d \times Y_D$ (coeficiente de descarga de acordo com a equação (18) versus fração de abertura) encontra-se ilustrado na Figura 7.7, resultado de nossos testes em regime permanente.

Combinando as equações (18) e (17) com a equação (15) e reordenando obtemos a seguinte equação:

$$0 = m_D \frac{d^2 Y_D}{dt^2} + \left(c - 2C_d A \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \right) \frac{dY_D}{dt} \dots \quad (19)$$

$$\dots + (k + \rho g A) Y_D - (P_1 - P_{set}) A - \left(\frac{dY_D}{dt} \right)^2 \rho A - 2C_d^2 A (P_1 - P_2).$$

A equação (19) representa o modelo matemático que governa o comportamento dinâmico da válvula de alívio durante sua atuação, levando em consideração as hipóteses deste modelo específico. Observa-se que o deslocamento do disco da válvula, Y_D , depende da massa do conjunto móvel m_D , do coeficiente de amortecimento do sistema c , do coeficiente de descarga da válvula C_D , da área do bocal de entrada A , do diferencial de pressão $P_1 - P_2$, entre a pressão no interior

do duto (na entrada) e na descarga da válvula, respectivamente. Depende também da constante da mola k , da massa específica do fluido ρ , e da diferença de pressão na entrada e pressão de abertura da válvula $P_1 - P_{set}$.

3.3.3. Adimensionalização do modelo matemático

Antes de adimensionalizar, é conveniente reescrever a equação (19), utilizando parâmetros normalmente encontrados em sistemas oscilatórios amortecidos, definidos por:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m_D}} \quad (20)$$

$$\xi^* = \frac{c}{2\sqrt{k m_D}} \quad (21)$$

onde:

ω_o : Frequência natural do sistema (*rad/s*).

ξ^* : Taxa de amortecimento adimensional

Substituindo as equações (20) e (21) na equação (19), obtemos:

$$\begin{aligned} 0 = & \frac{d^2 Y_D}{dt^2} + 2\xi^* \omega_o \left(1 - 2 \frac{C_d A}{c} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \right) \frac{dY_D}{dt} \dots \\ & \dots + \omega_o^2 \left(1 + \frac{\rho g A}{k} \right) Y_D - (P_1 - P_{set}) \frac{A}{m_D} - \left(\frac{dY_D}{dt} \right)^2 \frac{\rho A}{m_D} \dots \\ & \dots - 2 \frac{C_d^2 A}{m_D} (P_1 - P_2) \end{aligned} \quad (22)$$

Adimensionalizando o deslocamento do disco Y_D^* , a pressão P^* e o tempo t^* de acordo com as equações (23), (24), (25) respetivamente:

$$Y_D^* = \frac{Y_D}{D} \quad (23)$$

$$P^* = \frac{P}{\rho v^2 / A} \quad (24)$$

$$t^* = t \frac{\nu}{D^2}, \quad (25)$$

sendo $\nu = \mu / \rho$ a viscosidade cinemática (m^2/s) e μ a viscosidade dinâmica (Pa·s), pode-se rescrever a equação (22) na sua forma adimensional como:

$$\begin{aligned} 0 = & \frac{d^2 Y_D^*}{dt^{*2}} + 2\xi^* \omega_o^* \left(1 - \sqrt{2\pi} C_d \frac{1}{C^*} \sqrt{P_1^* - P_2^*} \right) \frac{dY_D^*}{dt^*} \dots \\ & \dots + \omega_o^{*2} \left(1 + \psi^* \right) Y_D^* - \left(P_1^* - P_{set}^* \right) \frac{1}{m_D^*} \dots \\ & \dots - \frac{\pi}{4} \left(\frac{dY_D^*}{dt^*} \right)^2 \frac{1}{m_D^*} - 2C_d^2 \frac{1}{m_D^*} \left(P_1^* - P_2^* \right) \end{aligned} \quad (26)$$

A partir da equação (26), pode-se identificar os seguintes parâmetros adimensionais que governam o comportamento dinâmico da válvula de alívio:

$$\omega_o^* = \omega_o \frac{D^2}{\nu} \quad : \text{frequência natural do sistema, adimensional.}$$

$$\psi^* = \frac{\rho g A}{k} \quad : \text{peso do fluido por unidade de comprimento / constante da mola.}$$

$$m_D^* = \frac{m_D}{\rho D^3} \quad : \text{massa do conjunto móvel adimensional.}$$

$$C^* = \frac{c}{\mu D} \quad : \text{coeficiente de amortecimento adimensional.}$$

$$\xi^* = \frac{c}{2\sqrt{k m_D}} \quad : \text{taxa de amortecimento adimensional.}$$

$$C_d \quad : \text{coeficiente de descarga da válvula.}$$

4

Velocimetria por Imagem de Partículas - *PIV*

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos básicos sobre a técnica Velocimetria por Imagem de Partículas (*PIV*), do inglês *Particle Image Velocimetry*. A utilização desta técnica constitui parte importante do presente trabalho. Sua utilização possibilita a visualização de campos de velocidade no entorno da válvula para diferentes frações de abertura tanto durante o transiente (quando aplicada com *phase-averaging*, ou média em fase, como será explicado posteriormente), quanto no caso da análise em regime permanente (em que a válvula é fixada em certas frações de abertura e a descarga se dá continuamente). A partir destes campos de velocidade, pode-se integrar numericamente – com a hipótese de axissimetria – perfis de velocidade para o cálculo da vazão de alívio Q_s através da PRV.

Serão também descritas, de forma sucinta, algumas questões relevantes para a aplicação do sistema *PIV*, como a iluminação laser, a aquisição das imagens pela câmera, o tratamento das imagens para obtenção dos campos vetoriais, assim como as características das partículas traçadoras e alguns cuidados importantes que devem ser tomados quando a técnica é aplicada na atual seção de testes. Para o caso específico deste estudo, será utilizado o denominado “*PIV* clássico”, ou 2D-2C (significando que mede duas das componentes de velocidade em uma região bidimensional – um plano).

O leitor interessado em aprofundar o conhecimento a respeito de *PIV* pode consultar trabalhos como, por exemplo, Raffel *et al.*, 2007 [15], Adrian e Westerweel, 2011 [16], Abrantes *et al.*, 2012 [17], nos quais descrições completas e detalhadas da técnica são apresentadas.

4.1. Descrição geral da técnica

A técnica PIV na versão clássica mencionada anteriormente, como mostra esquematicamente a Figura 4.1, consiste na determinação do deslocamento de partículas traçadoras previamente dispersas de modo homogêneo no fluido e iluminadas externamente por um plano de luz pulsada, normalmente produzida por uma fonte laser e um arranjo óptico (lentes e espelho). Uma câmera é posicionada e alinhada ortogonalmente ao plano de luz. A captura das imagens das partículas é sincronizada com os pulsos do laser, cujo intervalo de tempo ($\Delta t = t' - t$) é muito próximo e conhecido, parâmetro definido pelo usuário e que dependerá do fenômeno físico em estudo.

Como veremos à frente, séries de pares de imagens (cuja frequência temporal depende do laser, que tem duas cavidades, uma para o feixe A em t e outra para o feixe B em t'), podem ser registrados para a obtenção do cálculo de uma sequência de campos de velocidade.

Após o registro de no mínimo um par de imagens, é realizada uma análise estatística para a determinação dos deslocamentos das partículas neste par. Algoritmos especializados de processamento de imagens são utilizados para este fim, e uma vez conhecendo o intervalo de tempo entre as imagens, as componentes da velocidade podem ser determinadas por:

$$u = \frac{(\Delta X/M)}{\Delta t} \quad (27)$$

$$v = \frac{(\Delta Y/M)}{\Delta t} \quad (28)$$

onde M é a magnificação da imagem, tipicamente na faixa de 0,1 a 10, como definido na Figura 4.6, e pode ser determinada através de um procedimento de calibração (Abrantes *et al.*, 2012) [17]. ΔX e ΔY são as componentes do deslocamento medidas nas duas direções do plano, enquanto u e v são as componentes da velocidade nestas direções.

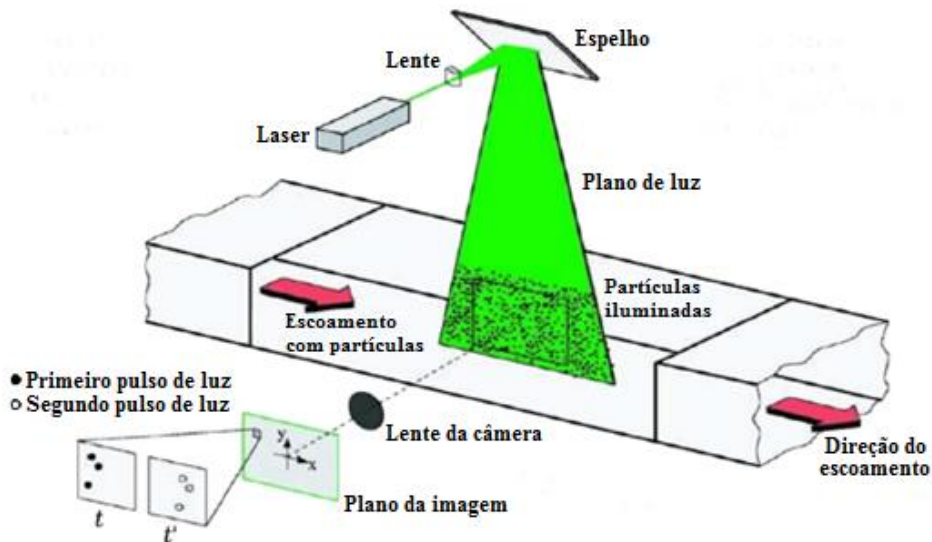


Figura 4.1 - Desenho esquemático de um sistema PIV bidimensional (Adaptado do Raffel *et al*, 2007)

A própria natureza da técnica levou a que fosse descrita como uma técnica de visualização quantitativa, uma vez que permite a visualização e avaliação numérica do campo de velocidades no escoamento numa região de interesse. É classificada também como uma técnica não invasiva, pois mede o deslocamento de partículas traçadoras (pressupondo que elas acompanham fielmente o escoamento em cada ponto), sem a inserção de nenhum equipamento ou sonda no escoamento propriamente dito.

4.2. Partículas traçadoras

As partículas traçadoras desempenham um papel fundamental no sistema de medição *PIV*, e sua escolha deve ser feita de forma cuidadosa, pois o uso de partículas inadequadas ao experimento em questão tende a comprometer os resultados finais. Para fazer uma boa escolha destas partículas é importante levar em consideração certos requerimentos a cumprir. As partículas devem seguir fielmente o movimento do fluido, com precisão e sem influenciar o escoamento e, além disso, devem ter capacidade de espalhar luz suficiente, produzindo imagens de boa qualidade. A primeira exigência é relacionada com a densidade do material que constitui a partícula e seu tamanho, enquanto a segunda não só depende da

própria partícula, mas também está relacionada com a potência do laser utilizado e a sensibilidade do sistema de registro das imagens.

4.2.1. Dinâmica

Em relação às propriedades físicas, uma potencial fonte de erro é a diferença entre a massa específica das partículas, ρ_p , e a do fluido, ρ_f , que pode provocar uma velocidade de sedimentação das partículas, U_g , na direção da gravidade. A partir da lei de Stokes, a fim de estudar o comportamento da partícula submetida à aceleração, a velocidade U_g pode ser explicada como uma velocidade relativa causada pela diferença das massas específicas do fluido e do meio. Assim, assumindo que as partículas possuem diâmetro muito pequeno e são esféricas (hipóteses corroboradas na prática para o caso de partículas compradas especialmente para *PIV*), sendo o número de Reynolds seja suficientemente baixo, tem-se:

$$U_g = \frac{(\rho_p - \rho_f)d_p^2}{18\mu_f}g, \quad (29)$$

onde g é a aceleração da gravidade, μ_f é a viscosidade dinâmica do fluido e d_p é o diâmetro da partícula. De maneira similar à equação (29), pode ser derivada uma expressão para a velocidade de atraso, \vec{U}_s , de uma partícula em um fluido com aceleração contínua, \vec{a} :

$$\vec{U}_s = \vec{U}_f - \vec{U}_p = \frac{(\rho_p - \rho_f)d_p^2}{18\mu_f}\vec{a}, \quad (30)$$

onde \vec{U}_f e \vec{U}_p são as velocidades do fluido e da partícula respectivamente. \vec{U}_p segue tipicamente uma lei exponencial se a massa específica da partícula é muito maior que do fluido ($\rho_p \gg \rho_f$), como descrito a seguir:

$$\vec{U}_p(t) = \vec{U}_f \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) \right], \quad (31)$$

onde τ_p é o *tempo de resposta da partícula*, que caracteriza a habilidade das partículas de seguir fielmente o fluido. Assim, quando o tempo de resposta é menor em comparação à menor escala do tempo do escoamento, as partículas seguirão adequadamente a dinâmica do escoamento (Adrian, 1995). Isto é expresso da seguinte forma:

$$\tau_p = d_p^2 \frac{\rho_p}{18\mu_f} \quad (32)$$

4.2.2. Seleção das partículas

O critério de seleção das partículas deve ser pensado cuidadosamente de acordo com as considerações apresentadas acima. Em especial, a visibilidade das imagens de partículas deve ser otimizada, combinando potência de laser adequada com partículas de índice de refração apropriado e tamanho suficiente. A Tabela 4.1 apresenta os tipos de materiais e propriedades das partículas mais utilizadas em escoamentos de líquido e de gás.

Tabela 4.1 - Alguns dos materiais comuns para adição de partículas a escoamentos de líquidos e de gases (Abrantes *et al.*, 2012).

	Material	Diâmetro nominal médio [μm]	Densidade [g/mL]	Índice de Refração
Partículas para escoamentos de líquidos	Poliestireno	0.1 a 100	1.05	1.49
	Esferas ocas de vidro	10 a 50	0.5 a 1.5	1.5
	TiO ₂	3 a 5	4.2	2.6 a 2.7
Partículas para escoamentos de gases	Poliestireno	0.1 a 10	1.05	1.49
	Gotículas de óleos e líquidos	0.5 a 10	0.9 a 1.1	1.3 a 1.6
	Bolhas de sabão com hélio	300 a 3000	neutra	1.33

Além das partículas anteriormente descritas, também são amplamente usadas partículas do tipo “fluorescente”, que convertem a iluminação incidente em luz de outro comprimento de onda. Isto pode ser necessário quando se precisa tornar as

partículas mais visíveis em um experimento em que há grande espalhamento da luz por superfícies da seção ou quando as partículas são muito pequenas, ou em aplicações com escoamentos multifásicos. Tais partículas são usadas em combinação com um filtro óptico que só deixa passar a luz fluorescente emitida pelas partículas traçadoras especiais. A Tabela 4.2 mostra dois tipos de partículas fluorescentes comuns.

Tabela 4.2 - Tintas fluorescentes mais comuns para uso em PIV (Abrantes *et al.*, 2012).

Tipo (tinta)	Faixa de absorção [nm]	Faixa de emissão [nm]	Fonte de iluminação típica
Fluoresceína	470 a 505	500 a 545	Laser argônio-ion (488 nm)
Rodamina	510 a 540	520 a 570	Nd:YAG (532 nm), Nd:YLF (527 nm)

A Figura 4.2 apresenta um exemplo do espectro de absorção e emissão para as partículas fluorescentes utilizadas no presente trabalho, quando excitadas por luz verde com comprimento de onda de 532 nm. No gráfico é plotada a intensidade da luz incidente contra o comprimento de onda da excitação e emissão.

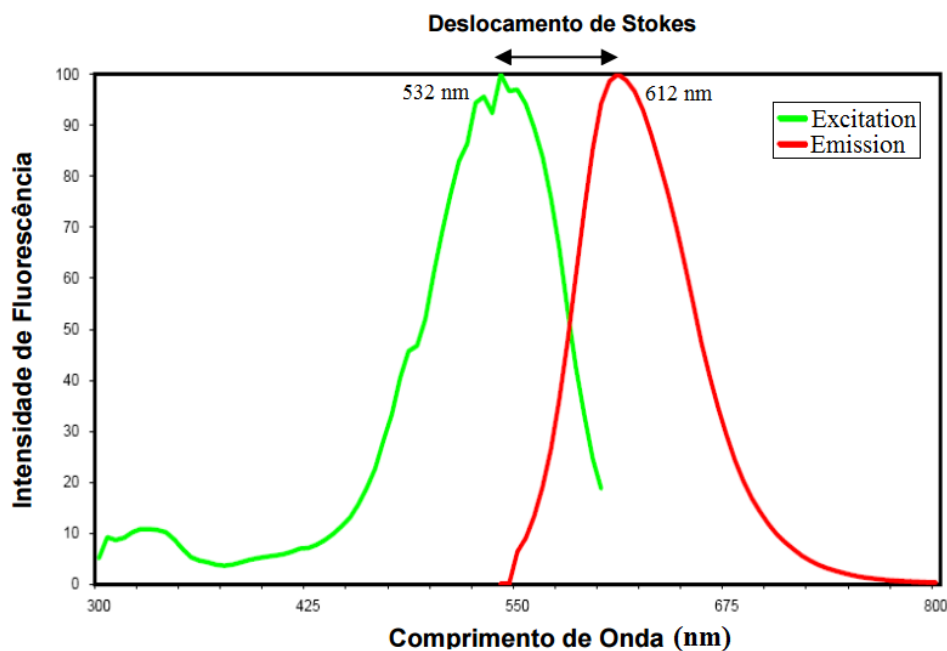


Figura 4.2 - Espectro de absorção e fluorescência de partículas utilizadas em PIV (Fonte: Thermo Scientific).

Para maximizar a intensidade da fluorescência capturada pela câmera é necessário utilizar um filtro óptico que apresente características adequadas com base na informação do comprimento de onda de excitação e emissão das partículas fluorescentes, de modo a bloquear a iluminação proveniente da excitação (luz verde) e suas reflexões, permitindo a passagem somente da luz no comprimento da fluorescência.

4.3. Plano de iluminação por laser

Como foi explicado anteriormente, deseja-se iluminar a área de interesse do escoamento com um plano de luz. O equipamento do laser gera um feixe de diâmetro em torno de 8 mm, com seção reta aproximadamente gaussiana, de luz monocromática, coerente, com intensidade e duração bem definidos. O plano de luz é então formado, a partir do feixe, com a utilização de uma ou mais lentes que o colocam na geometria desejada. Uma das configurações mais comuns é composta por uma lente cilíndrica e uma lente esférica, como ilustrado na Figura 4.33. A lente cilíndrica é usada para abrir o plano, e a lente esférica é usada para focalizar a luz, diminuindo a espessura do plano, sendo que tudo deve ser otimizado (distância focal das lentes, distância das lentes à seção de testes) de acordo com o tamanho de plano desejado.

Assim, este sistema deve produzir, a partir do feixe, um plano com características adequadas às dimensões da região de observação; a espessura da região iluminada deve ser menor que a profundidade de campo esperada para o experimento, para impedir o aparecimento de imagens de partículas fora de foco. A altura do plano de luz afeta a intensidade de iluminação no plano, devendo ser bem aproveitada para otimizar a energia luminosa disponível.

Em princípio, qualquer fonte de luz planar poderia ser usada como fonte de iluminação para a técnica *PIV*. No entanto, lasers são utilizados na maioria das aplicações, especialmente em escoamentos mais rápidos, devido à alta densidade de energia que oferecem e facilidade de controle de intervalo entre pulsos bastante curtos.

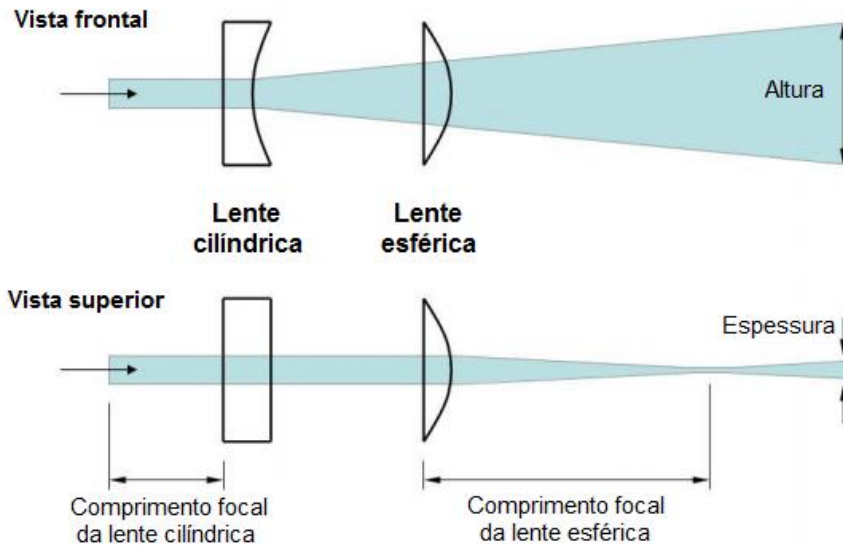


Figura 4.3 - Configuração óptica empregada para gerar o plano de luz no presente trabalho (visões frontal e superior).

Nesta seção será descrito o laser de Neodímio-YAG (Nd:YAG), que foi utilizado nos testes experimentais. Este tipo de laser de estado sólido é dos mais importantes para *PIV*, sendo o feixe gerado por íons Nd^{3+} . O íon Nd^{3+} pode ser incorporado em cristais de YAG (“yttrium-aluminum-garnet”), e podem emitir pulsos de 10 ns com comprimento de onda $\lambda = 532$ nm repetidamente a taxas entre 10 e 30 Hz, e duas cavidades de laser podem ser combinadas de forma a produzir uma série de pulsos duplos periódicos com separação entre pulsos praticamente zero (possível devido ao mecanismo de *Q-switch*, ou “*quality switch*”). Uma lâmpada de flash é usada para o bombeamento de energia, excitando os átomos do meio ativo dentro de uma cavidade óptica de alta reflexão (*high reflector*), como ilustrado na Figura 4.4. A energia gerada no processo adquire forma de feixe de luz infravermelha e também gera calor, sendo por isto importante contar com um adequado resfriamento das cavidades.

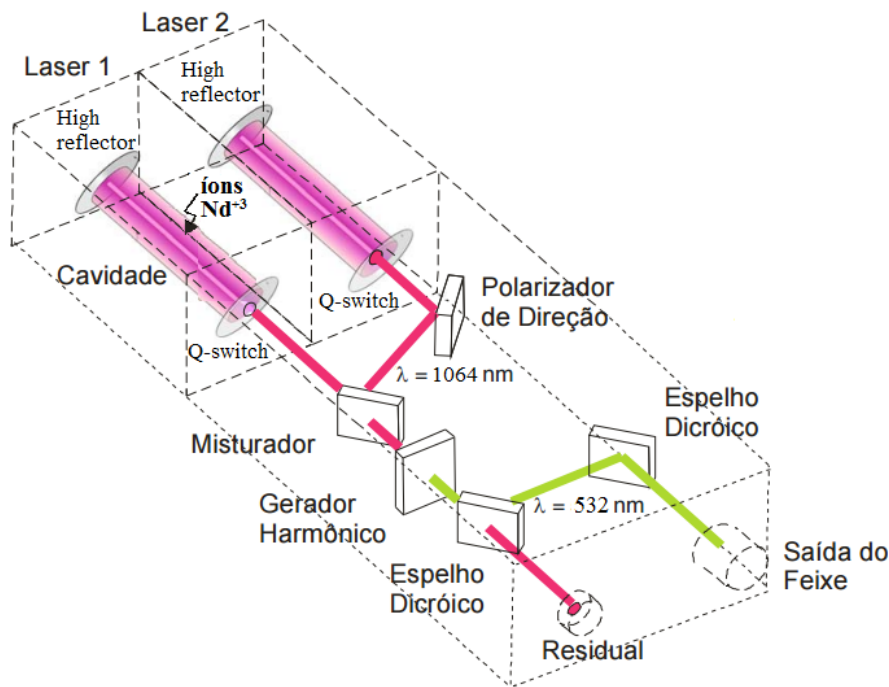


Figura 4.4 - Esboço do interior do cabeçote de um laser Nd:YAG comum (Adaptado de Sánchez, 2011)

Na Figura 4.4 mostra-se os componentes ópticos utilizados para mudar o comprimento de onda do feixe do laser de luz infravermelha, inicialmente com comprimento de onda $\lambda = 1064 \text{ nm}$, sendo refletido e direcionado ao combinador. Os feixes resultantes de luz visível verde, que neste caso tem comprimento de onda $\lambda = 532 \text{ nm}$, são direcionados com o uso de espelhos à seção de saída.

4.4. Registro das imagens

Historicamente, na técnica *PIV*, o registro das imagens era realizado utilizando câmaras fotográficas com filmes químicos, mas os avanços na tecnologia das câmeras digitais fizeram com que estes tipos de sensores substituíssem as câmeras antigas, tornando mais simples o processo de registro, devido à imediata disposição das imagens e por consequência um adequado “*feedback*” durante a aquisição. A função da câmera digital é capturar os pares de imagens das posições das partículas iluminadas no escoamento em estudo, e por este motivo deve estar sincronizada com o *timing* do laser.

4.4.1. Câmara

Existem vários tipos de câmara que usam sensores eletrônicos com diferentes características. Os principais e mais comuns tipos de sensores usados em câmaras para aplicações da técnica *PIV* são as tipo *CCD* (*Charged Couple Device*) e tipo *CMOS* (*Complementary Metal–Oxide–Semiconductor*).

O *CCD* é um sensor formado por elementos sensíveis à luz denominados *pixels*, capazes de converter fótons gerados pelo objeto em cargas elétricas. Este tipo de sensor é amplamente utilizado em aplicações *PIV*. Lasers Nd-YAG de cavidade dupla bombeados a *flashlamp* oferecem taxas de repetição que trabalham bem em conjunto com as taxas de aquisição da maioria das câmaras *CCD* comercialmente disponíveis. O *CCD* é composto por uma matriz bidimensional de pixels, sendo o tamanho de um pixel geralmente da ordem de $10 \times 10 \mu\text{m}^2$. Entretanto, a capacidade de armazenamento de um pixel é limitada, medida em elétrons por pixel. O tempo necessário para a transferência de carga em geral é menor que o tempo de exposição, e para aumentar a resolução temporal de uma medida com *PIV*, surgiu a técnica denominada *frame straddling*, que consiste em disparar o primeiro pulso do laser no final da exposição do primeiro quadro e o segundo pulso de laser no início da segunda exposição, logo após a transferência das cargas, com tempos de separação pequenos, como ilustrado na Figura 4.5.

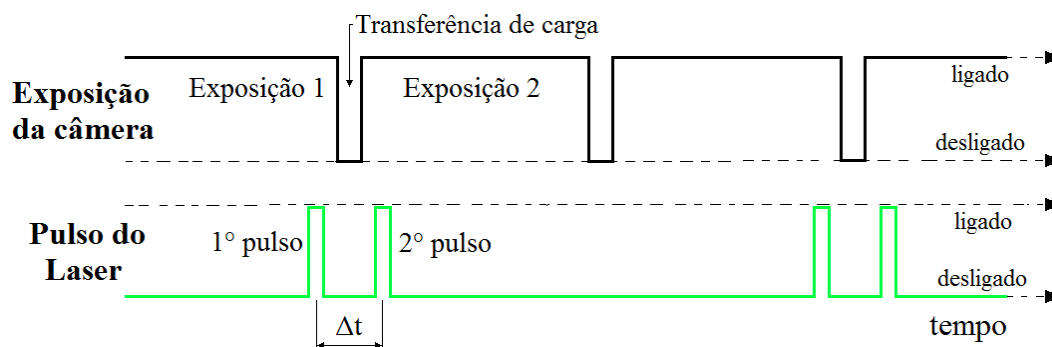


Figura 4.5 - Sincronização entre câmera e laser em modo de operação *frame straddling* para *PIV*.

Ao contrário dos sensores *CCD*, cada pixel de um sensor *CMOS* (“*Complementary Metal Oxide Semiconductor*”) contém um circuito eletrônico

próprio, e esta arquitetura de pixel ativo ("APS – *active pixel sensor*"), em conjunto com o acesso individual a cada pixel, oferece algumas vantagens consideráveis, permitindo integrar no chip funções como amplificação, transformações não-lineares de sinal, entre outras (Abrantes *et al.*, 2012). Um amplificador de leitura de saída é incorporado a cada pixel. Isto converte a carga acumulada pelo fotodiodo em voltagem, que é amplificada dentro do pixel e então transferida em linhas e colunas sequenciais para circuitos de processamento de sinal adicionais. Além disso, o número de pixels ativos pode ser escolhido através da definição de um subdomínio sensível à luz, o que permite atingir taxas de aquisição mais rápidas em troca de alguma perda de resolução espacial. Assim, estes sensores são em geral apropriados para medições *PIV* de alta frequência, e também permitem utilizar a técnica de *frame straddling* ilustrada na Figura 4.5. Uma desvantagem em relação aos sensores *CCD* é que eles são, em geral, menos sensíveis, e portanto requerem áreas maiores de pixels, tipicamente $20 \times 20 \mu\text{m}^2$, tornando maiores as chances de introdução de erros como "*pixel locking*" nas medições (Abrantes *et al.*, 2012).

4.4.2. Sincronizador

O sincronizador é uma unidade eletrônica que dispara os eventos *PIV* na sequência correta, conectando o computador, a câmera, o laser, e outros dispositivos externos, garantindo a precisa sincronização do sistema. O usuário controla o sincronizador através de um *software* que gerencia as medições, programando e configurando particularidades como: duração dos pulsos do laser, intervalo entre pulsos, energia fornecida por pulso, abertura da câmera, e controle de dispositivos externos, como por exemplo, o *trigger* utilizado nas medições *PIV* do presente trabalho.

4.4.3. Formação da imagem

A Figura 4.6 ilustra o esquema detalhado da formação de uma imagem de *PIV*, com os principais parâmetros envolvidos. Nesta ilustração, Z_0 é a distância entre o plano de luz e a lente da câmera, e z_0 a distância entre a lente da câmera até

o sensor da mesma (plano da imagem). A razão entre essas distâncias é conhecida como o fator de magnificação:

$$M = \frac{Z_0}{Z_0} \quad (33)$$

Uma lente apropriada define o grau de magnificação da imagem, assegurando ao mesmo tempo que o campo de visão cubra a região que se deseja investigar no escoamento, e garantindo uma resolução adequada na imagem das partículas registradas.

A fórmula para o diâmetro da partícula na imagem, por efeito da difração, é dada pela equação (34):

$$d_{dif} = 2,44f_{\#}(M + 1)\lambda \quad (34)$$

onde $f_{\#}$ é a abertura relativa da lente (“f-number”), definida como a razão entre sua distância focal e seu diâmetro de abertura, e λ é o comprimento de onda que ilumina a partícula. Este diâmetro, d_{dif} , somente é obtido quando o diâmetro real da partícula é muito pequeno na ordem de alguns microns, e para fatores de magnificação pequenos.

Para partículas de diâmetros e magnificações mais altas a influência da geometria da partícula é cada vez mais dominante. Para este caso, desprezando aberrações de lente, o diâmetro da partícula **na imagem**, d_{im} , é dado pela equação (35):

$$d_{im} = \sqrt{(Md_p)^2 + d_{dif}^2} \quad (35)$$

Os resultados de *PIV* mostram que o erro na medição de velocidade depende, entre outros fatores, do diâmetro da imagem das partículas d_{im} , que afeta a incerteza na localização do centroide da imagem ou do pico de correlação.

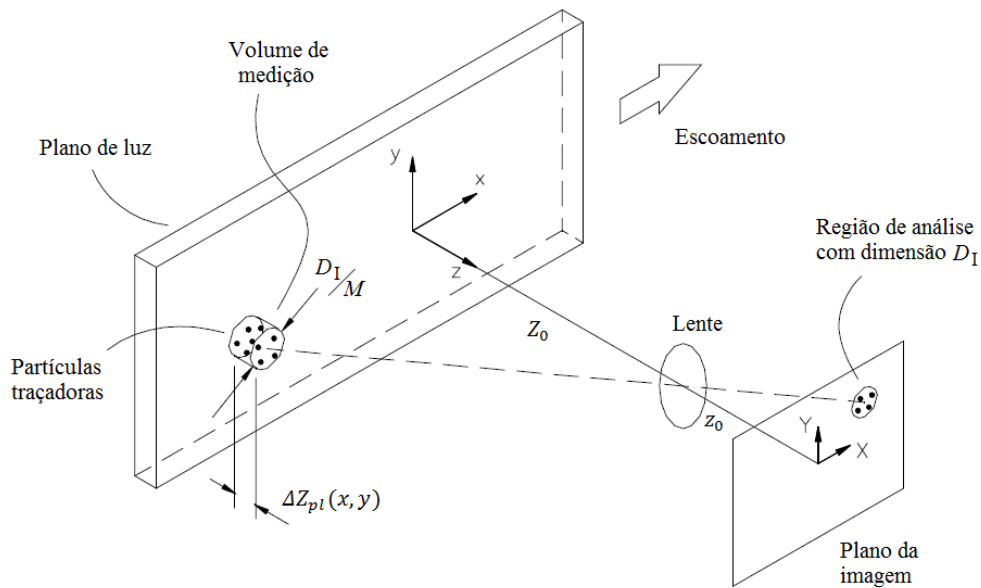


Figura 4.6 - Parâmetros envolvidos no registro de imagens PIV.

4.5. Análise de imagens e cálculo do campo vetorial

Uma vez registradas as imagens das partículas traçadoras correspondentes aos dois pulsos de luz, o próximo passo é avaliar a qualidade das imagens. Se não estão adequadas (por ex., iluminação deficiente, problemas de contraste, muito ruído), é importante aplicar algum esforço de *pré-processamento* para melhorá-las, ou até mesmo refazer o experimento – pois o ideal é que não seja necessário muito pré-processamento, apesar de sua utilidade mesmo em imagens de qualidade – antes de efetuar o processamento e análise para cálculo dos campos de velocidade. Técnicas de pré-processamento de imagens encontram-se descritas em Abrantes *et al.*, 2012 [17].

O *método de correlação* para análise das imagens PIV é o mais utilizado no processamento dos dados para avaliar o deslocamento das partículas e posteriormente estimar o campo de velocidades. Dependendo da forma como as imagens foram capturadas, o método de processamento de imagens pode ser denominado como “auto-correlação”, se as duas imagens foram capturadas em um mesmo quadro (duplo pulso/quadro único). Caso as duas imagens tenham sido capturas em quadros distintos (pulso único/duplo quadro), como no caso *frame straddling*, utiliza-se um processamento baseado na “correlação cruzada” de

imagens. Este último foi o método utilizado no presente trabalho e é descrito a seguir.

4.5.1. Correlação cruzada de imagens

O método de correlação cruzada permite determinar o módulo, a direção e também o sentido de cada vetor que compõe o campo de velocidade medido, a partir de duas imagens sucessivas do escoamento, uma obtida no instante t , e outra em $t + \Delta t$, como ilustrado esquematicamente na Figura 4.7. As imagens são divididas em pequenas áreas, denominadas “janelas de interrogação”, com dimensões tais que incorporem as imagens de aproximadamente 10 partículas. A imagem da janela de interrogação destacada é uma função bidimensional da posição, $I_1(x, y)$, que representa a intensidade da imagem em cada ponto no primeiro quadro. Em uma imagem binária, as partículas são representadas por um valor 1, enquanto o fundo é representado pelo valor zero. A imagem da janela de interrogação é comparada com todas as possíveis posições na imagem 2. Para cada posição determina-se o valor da função de correlação cruzada, dada pela equação (36):

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N I_1(i, j) I_2(i + \Delta x, j + \Delta y), \quad (36)$$

onde $I_2(i + \Delta x, j + \Delta y)$ representa a região na imagem 2 deslocada $(\Delta x, \Delta y)$ que está sendo comparada com a imagem da janela de interrogação I_1 . A equação (36) está apresentada em sua forma discreta, onde os índices i e j representam as coordenadas x e y . N_1 é o tamanho da janela de interrogação da primeira imagem e N_2 é o tamanho da janela de interrogação da imagem 2.

Para cada posição de comparação é computado o valor da função correlação cruzada, que pode ser observada na representação tridimensional da Figura 4.7. As coordenadas onde o valor da função é máximo representam a posição mais provável onde o padrão de partículas contido na janela de interrogação se deslocou no intervalo de tempo Δt . Repetindo-se este procedimento para diversas posições da janela de interrogação na imagem 1, determina-se o campo completo de velocidade desejado.

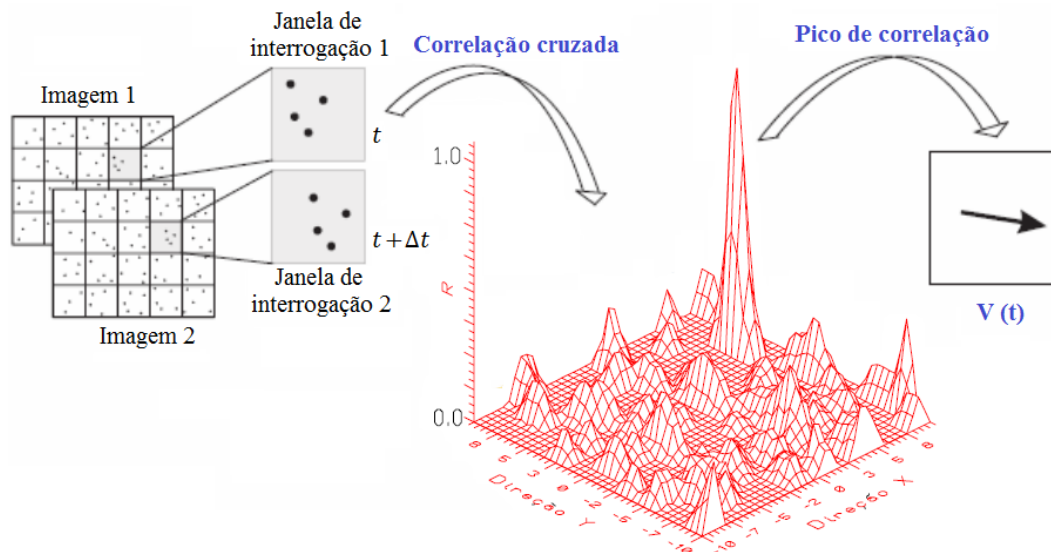


Figura 4.7 - Esquema do método de correlação cruzada de imagens (adaptado de *LaVision*, 2011).

O cálculo da correlação através da equação (36) é um procedimento lento do ponto de vista computacional. Por isso, é comum o uso de um método alternativo baseado no teorema de *Wiener-Kinchin*, que assegura que a correlação de duas funções é equivalente ao produto conjugado complexo das transformadas de Fourier dessas funções:

$$R_{II} \Leftrightarrow \hat{I}_1 \cdot \text{conj}(\hat{I}_2), \quad (37)$$

Onde \hat{I}_1 e \hat{I}_2 são as transformadas de Fourier das imagens ou janelas 1 e 2, respectivamente. Maior eficiência no cálculo das transformadas de Fourier é obtida utilizando-se algoritmos de transformada rápida, conhecidos pela sigla FFT “*Fast Fourier Transform*”. Estes métodos são tipicamente utilizados em amostras contendo 2^n dados, por isso é comum o uso de janelas de interrogação com tamanho igual a $2^n \times 2^n$ pixels.

4.5.2. Pós-processamento dos dados

Após uma análise das imagens com as técnicas descritas anteriormente, uma quantidade significativa de vetores velocidade fica disponível para análise. Se a técnica *PIV* é bem aplicada, apenas uma pequena fração dos vetores calculados são incorretos, da ordem de menos de 5% do total de vetores medidos. Estes vetores devem ser descartados para evitar que o cálculo das quantidades derivadas e integrais seja contaminada por estes vetores espúrios. Os vetores espúrios podem ser identificados por ter comportamento diferente, ou fisicamente fora do normal, quando comparados com vetores vizinhos e com valores de parâmetros do escoamento estudado.

Várias técnicas são propostas para remover vetores espúrios. Em sua maioria as técnicas de remoção são baseadas na comparação de vetores com seus vizinhos, aplicação de critérios de desvio máximo, valores absolutos de deslocamentos e estatísticas locais. Assim, para a avaliação, detecção e substituição dos vetores espúrios na totalidade dos campos vetoriais, foram utilizadas as ferramentas disponíveis no programa *Insight 3G* da *TSI*.

Após a devida remoção e substituição dos vetores espúrios, os campos de velocidade instantâneos são calculados, assim como a obtenção de perfis de velocidade, campos médios, e outras grandezas de interesse.

5 Experimentos

Neste capítulo será descrita a montagem utilizada para o desenvolvimento do trabalho experimental proposto. Primeiramente será apresentada uma visão geral da bancada de testes utilizada. Em seguida, serão descritos os elementos constituintes e suas características de operação.

5.1. Descrição geral da bancada de testes

A bancada de ensaios, montada no Laboratório de Engenharia de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, foi projetada para realizar medições tais como deslocamento do disco da válvula durante sua subida (fração de abertura), pressão, e campos de velocidade utilizando a técnica *PIV* bi-dimensional em um modelo reduzido de válvula de alívio de pressão fabricado em acrílico, e utilizando água como fluido de trabalho. A Figura 5.1 mostra uma visão geral da montagem experimental.

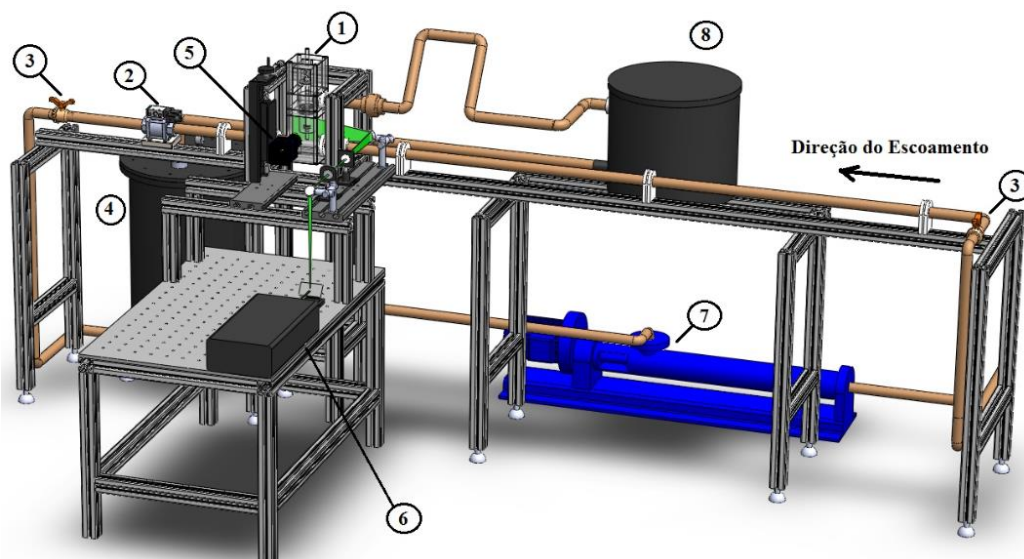


Figura 5.1 - (1) Válvula PRV em acrílico; (2) Válvula coaxial pilotada; (3) Válvula manual (deixada aberta); (4) Reservatório de entrada; (5) Câmera; (6) Laser; (7) Bomba de cavidade progressiva; (8) Tanque de descarga (vazão de descarga da PRV).

No circuito fechado de água, uma bomba de cavidades progressiva gera a vazão principal. A água filtrada armazenada em um tanque de entrada é bombeada e circulada através de um sistema de tubos de PVC de 32 mm de diâmetro com aproximadamente 7 metros de comprimento, sendo a tubulação fixada sobre uma estrutura metálica a um metro do chão. Em condições normais de funcionamento, a água flui através de uma passagem horizontal, de mesma dimensão que o tubo de PVC, perfurada na modelo em acrílico da válvula PRV. A válvula está representada em mais detalhes na figura 5.2.

A jusante da PRV de acrílico foi instalada uma válvula coaxial pilotada por uma solenoide, que através de um programa escrito em linguagem *LabVIEW*, pode ser acionada pelo computador, de modo a fechar causando um bloqueio súbito, gerando um transiente hidráulico e, conseqüentemente, um aumento acentuado da pressão no sistema. Neste caso, a crescente pressão fará com que o disco no interior do modelo reduzido da PRV comece a se abrir, permitindo a passagem de água pelo orifício de entrada, sendo o escoamento então aliviado por uma saída de descarga, tal como representado à direita na figura 5.2. A água é descarregada para um tanque na saída e retorna para o tanque de entrada. Nesta configuração, P_2 (pressão a jusante da PRV) é aproximadamente atmosférica ($P_2 = P_{atm}$), pois o tanque de descarga é deixado aberto durante as medições para controle de nível.

Um inversor de frequência é utilizado no controle da rotação da bomba, e por consequência no controle da vazão principal, proporcionando a vazão desejada para os casos selecionados para estudo. A vazão transiente em caso de alívio foi medida indiretamente a partir da integração dos campos de velocidade do escoamento, tal como será visto em seções subseqüentes.

Como será descrito em mais detalhes a seguir, o modelo de válvula de alívio estudado foi devidamente instrumentado com um sensor de deslocamento e um sensor diferencial de pressão com tomadas a jusante e montante da válvula. Os sinais gerados pelos instrumentos são registrados simultaneamente por um sistema de aquisição de dados com capacidade para altas taxas de medição. Esta instrumentação foi devidamente configurada e sincronizada com a técnica *PIV*, aplicada de forma paralela para medição de campos de velocidade bi-dimensionais na região ao redor da válvula de alívio.

5.2.

Modelo de válvula de alívio tipo mola em acrílico

A parte principal da seção de testes foi projetada reproduzindo um modelo de válvula de alívio tipo mola real, com forma de copo invertido, em escala reduzida. Foi fabricada em acrílico para possibilitar a visualização do escoamento necessária para o uso da técnica *PIV*, possuindo 3 blocos principais, sendo o bloco 1 a região de entrada, 2 a região de saída, e 3 o bloco sede da mola. Isto pode ser observado na figura 5.2 (a).

O interior da seção de testes em acrílico, uma câmara cilíndrica que fica cheia de água, tem diâmetro interno $D_{test} = 50$ mm. O diâmetro da passagem horizontal do escoamento principal é de 25 mm. A mola está posicionada na metade superior da seção de ensaio (bloco 3), entre pequenos discos de compressão com aperto ajustável. A haste do eixo da válvula sobe até a parte de fora da seção, o que é importante para alguns aspectos do controle de medição (medições de deslocamento com LVDT e *trigger* para o *PIV*), como ficará claro mais à frente. Na figura 5.2 observa-se a vista frontal da válvula com indicação do escoamento principal no duto, orifício de entrada, saída de descarga e tomadas para medições de pressão.

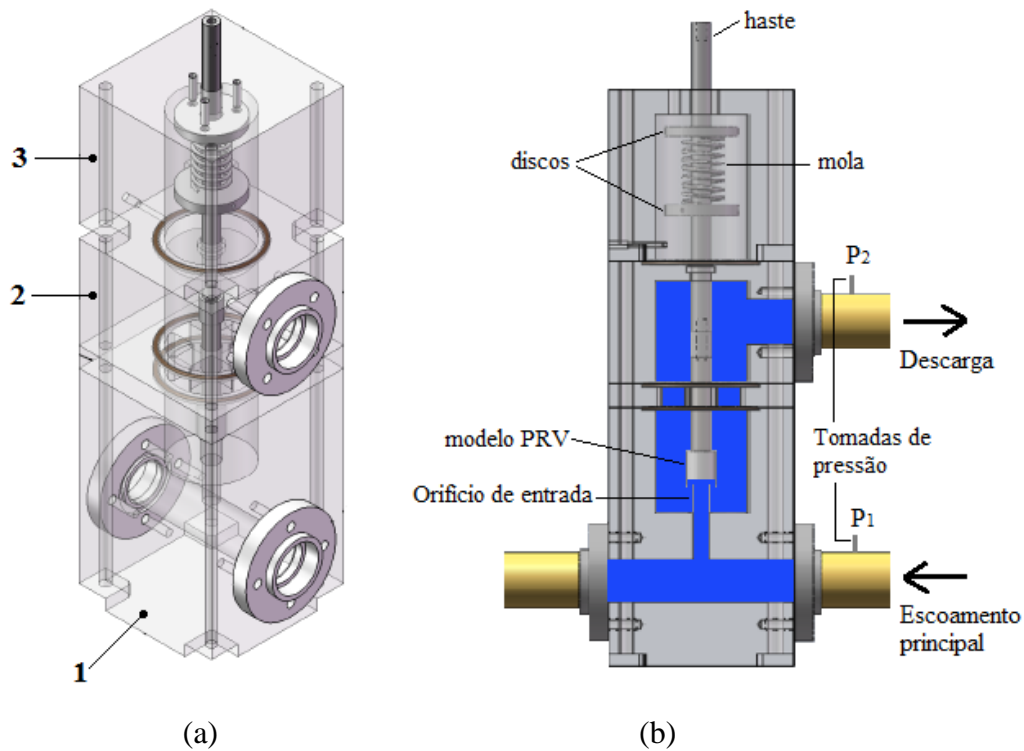


Figura 5.2 - Detalhe da seção de testes em acrílico, que contém o modelo de válvula de alívio (PRV). (a) Vista isométrica representando a seção de testes dividida em três blocos, montados em conjunto com a devida vedação; (b) vista frontal com indicação dos principais componentes.

O Anexo 10.1 mostra em mais detalhes o desenho técnico da seção de testes, com todas suas partes e componentes. A tabela 5.1 resume os dados relevantes do conjunto disco-haste da válvula de alívio.

Tabela 5.1 - Parâmetros da válvula de alívio.

Parâmetros	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro do orifício de entrada	D_b	9	mm
Diâmetro do disco	D_{disco}	14	mm
Massa do conjunto móvel (disco e haste)	m_D	55	g
Constante da mola	k	1018	N/m

5.3. Sistema de escoamento da água

O circuito hidráulico foi montado com tubos de PVC marca Tigre. A tubulação foi fixada à estrutura da bancada, composta por perfis estruturais *Bosch* de 45 x 45 mm de seção reta. Na parte superior, a tubulação foi apoiada sobre 4 suportes usinados em polipropileno e distribuídos ao longo da estrutura, de forma a garantir alinhamento e rigidez ao sistema durante as solicitações bruscas produzidas pela válvula coaxial quando fecha (Figura 5.3). A tubulação tem aproximadamente 7 metros de comprimento total.



Figura 5.3 - Vista da tubulação e estrutura da bancada, mostrando o detalhe dos suportes de polipropileno.

A tabela 5.2 apresenta as características detalhadas do tubo, informação relevante para o cálculo da velocidade de propagação da onda de pressão e posterior caracterização do transiente hidráulico.

Tabela 5.2 - Características do tubo do circuito hidráulico.

Características	Valor	Unidade
Diâmetro externo	32	mm
Espessura da parede	2,1	mm
Pressão de serviço (a 20 °C)	7,5	Kgf/cm ²
Módulo de elasticidade (a 20 °C)	2900	MPa

5.3.1. Bomba

A bomba de líquido utilizada neste experimento é uma bomba helicoidal de cavidade progressiva fabricada pela *Weatherford*, modelo WHT 24/I, a qual oferece uma pressão diferencial máxima de $6,0 \text{ kgf/cm}^2$ e uma vazão de $1,86 \text{ m}^3/\text{h}$, valores suficientes para manter aberta a PRV em estudo, a qual apresenta uma pressão manométrica de ajuste de $0,3 \text{ kgf/cm}^2$, e superar com folga a vazão máxima de projeto testada de 26 l/min ($1,56 \text{ m}^3/\text{h}$). O desempenho deste modelo de bomba é descrito pelo fabricante através das curvas de vazão em função da pressão, e curvas de potência e torque em função da pressão, apresentadas na Figura 5.4.

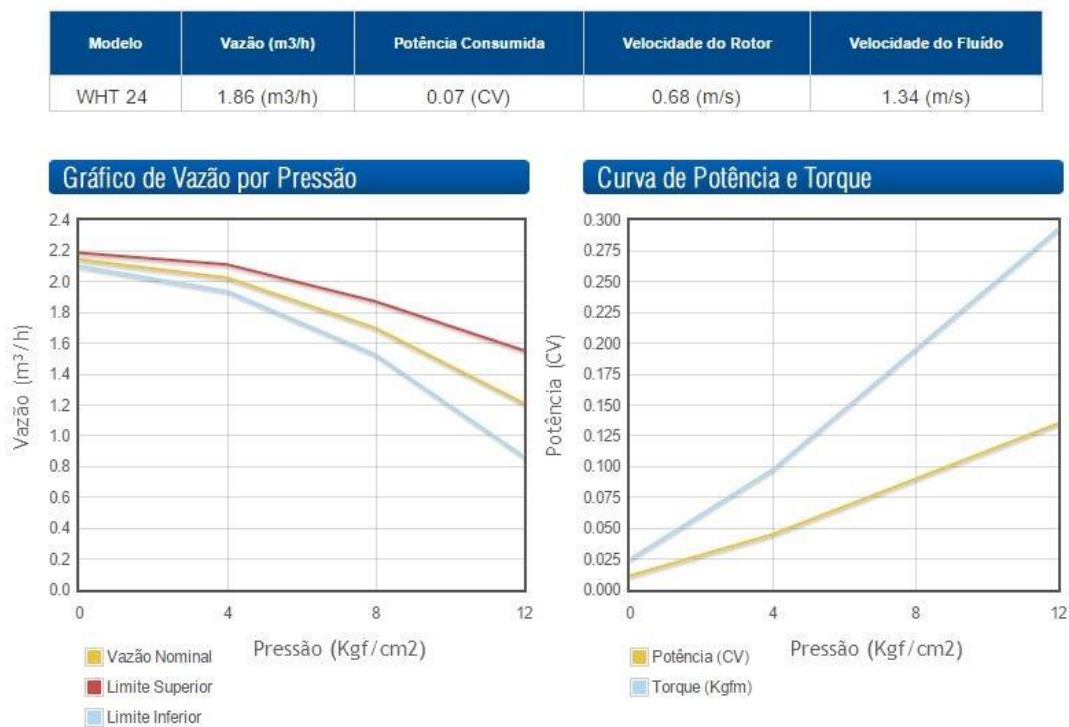


Figura 5.4 - Curva de operação da bomba de cavidade progressiva utilizada nos experimentos. Fonte: <http://bombasgeremia.com.br/selecao-bombas>

O motor elétrico acoplado à bomba é trifásico de 4 polos com $1/2 \text{ HP}$ de potência, com tensão de alimentação de 220 Volts e 60 Hz de frequência. A Figura 5.5 apresenta uma fotografia da bomba utilizada nos ensaios, que possui um estator de plástico especialmente selecionado para não produzir oxidação e manter a água limpa.

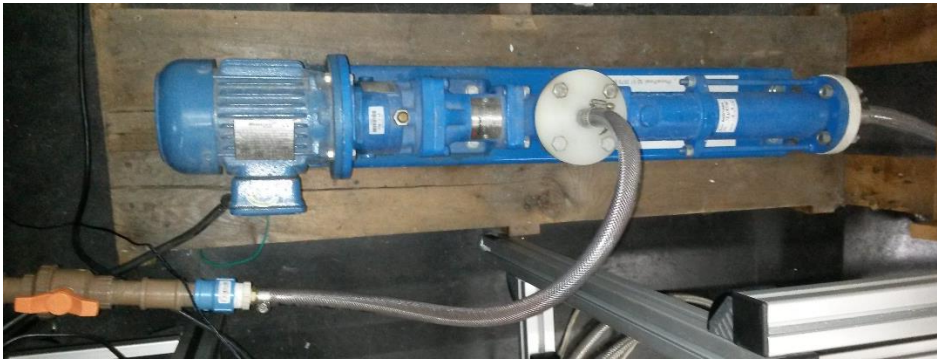


Figura 5.5 - Bomba de cavidade progressiva *Weatherford*, modelo WHT 24/I, utilizada nos ensaios.

5.3.2. Controle da vazão

Para garantir a realização dos testes propostos a diferentes níveis de vazão, a bomba é acionada por um inversor de frequência da marca *WEG*, modelo CFW08, ilustrado na Figura 5.6. Ele permite o controle da rotação e, conseqüentemente, da vazão do fluido bombeado. A vazão da bomba pode ser controlada de 0 a 28 L/min.



Figura 5.6 - Inversor de Frequência *WEG*, modelo CFW08, utilizado para o controle da rotação da bomba.

5.3.3. Calibração da medição da vazão

O método gravimétrico foi utilizado para relacionar as indicações da rotação da bomba no inversor de frequência com a vazão de água. A Figura 5.7 ilustra a montagem utilizada no procedimento de calibração. Para isso, foram utilizados uma balança digital, com uma resolução de 0,01 kg e capacidade máxima de 50 kg; um tanque com capacidade de 20 l; e um cronômetro digital com resolução de 0,01 s. Assim, a vazão volumétrica Q , foi determinada pela seguinte equação:

$$Q = \frac{m}{\rho t}, \quad (38)$$

onde m é a massa medida na balança, ρ é a massa específica da água, e t representa o tempo medido no cronômetro digital.

Assim, a medida indireta do volume no tanque ao longo de um período de tempo longo o suficiente para reduzir a incerteza a um nível bastante baixo (de $\pm 0,14\%$), informa a vazão volumétrica fornecida pela bomba no circuito hidráulico. A medida da vazão acontece, portanto, de maneira não intrusiva. Procurou-se evitar a instalação de um medidor de vazão (invasivo) que poderia influir no transiente hidráulico durante os testes com a válvula de alívio, por representar uma perda de carga considerável no sistema.

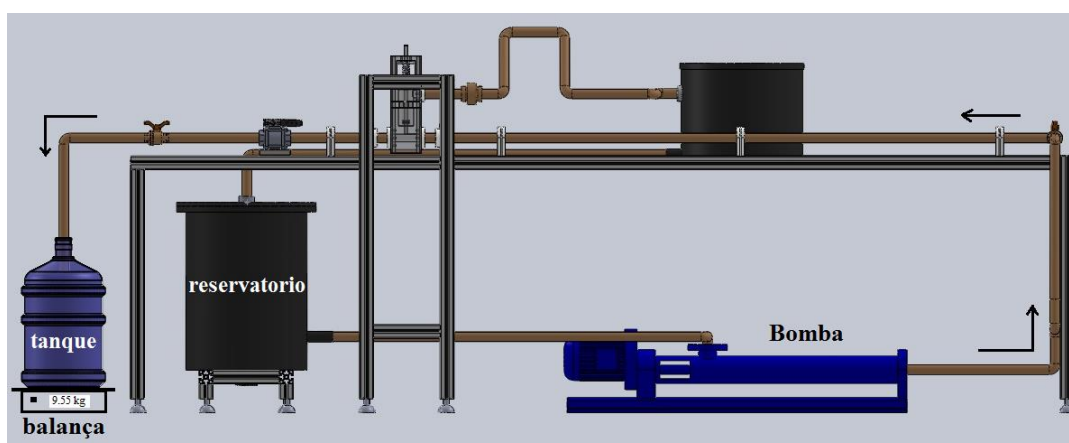


Figura 5.7 - Vista esquemática da montagem da seção de testes para calibração da vazão de água no circuito hidráulico.

A Figura 5.8 apresenta a curva de calibração resultante do processo de medição da vazão a diferentes valores da rotação da bomba indicados no inversor de frequência. O cálculo da estimativa de incerteza resultou em $\pm 0,14\%$ com um nível de confiabilidade de 95% e encontra-se descrito no Apêndice A.1.

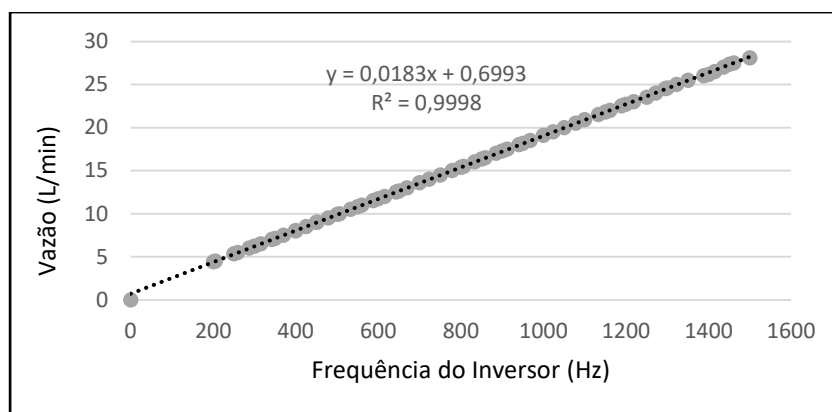


Figura 5.8 - Curva de calibração: vazão volumétrica versus frequência do inversor.

A vazão transiente em caso de alívio foi medida indiretamente a partir dos campos de velocidade do escoamento obtidos utilizando-se a técnica *PIV-2D*, tal como será visto nas seções 7.1.2 e 7.2.2.

5.4. Válvula coaxial de bloqueio

A fim de estudar e comparar o comportamento dinâmico da válvula de alívio nos casos de transientes rápidos e lentos, foi instalada a jusante da seção de testes uma válvula coaxial modelo CXF 25, para causar o bloqueio súbito e, conseqüentemente, um aumento acentuado de pressão no circuito. Tal válvula era operada por uma solenoide piloto modelo 6519 *Namur* de interface pneumática 5/2 vias. A solenoide piloto tem uma entrada de alimentação para ar comprimido e um par de restritores cujos parafusos regulam a saída de ar e, conseqüentemente, controlam o tempo de fechamento e abertura da válvula coaxial principal. Mais informações sobre a válvula coaxial e solenoide podem ser encontradas nos catálogos dos fabricantes, Anexos 10.2 e 10.3, respectivamente.

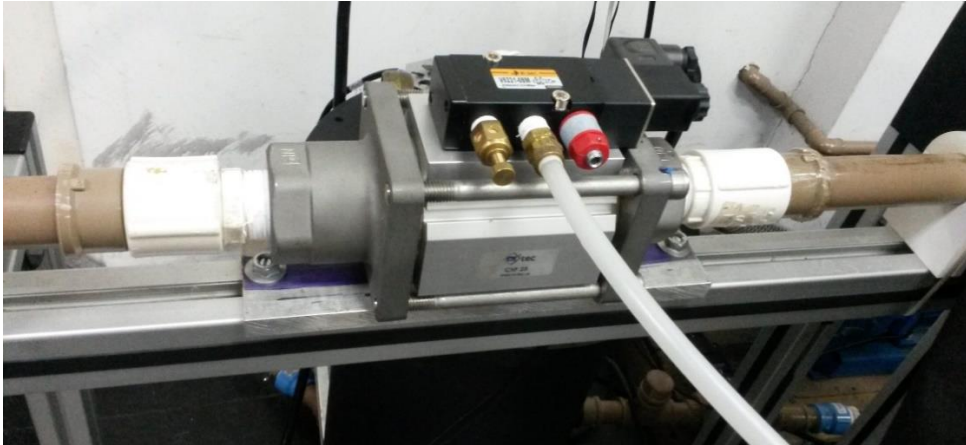


Figura 5.9 - Válvula coaxial pilotada por solenoide utilizada para o bloqueio da via principal do escoamento.

Na instalação e configuração eletrônica da solenoide utilizou-se um dispositivo de aquisição de dados (DAQ) da *National Instruments*, modelo SCB-68, sendo a válvula acionada por um circuito composto por relês e resistências, controlada pelo port0 da DAQ. A Figura 5.10 mostra um diagrama lógico da configuração.

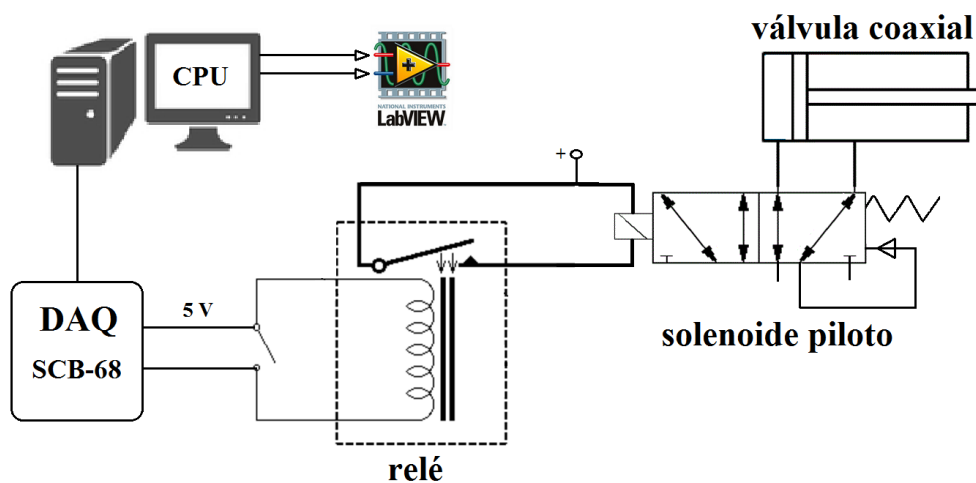


Figura 5.10 - Diagrama lógico do sistema utilizado para acionamento da válvula de bloqueio.

Para uma automatização do processo de bloqueio, um programa *LabVIEW* foi desenvolvido, ilustrado na Figura 5.11. Partindo do centro da imagem: a “*sequence structure*” é uma estrutura de subdiagramas que são executados sequencialmente,

da esquerda para direita. No primeiro encontra-se um temporizador (t_1), e no segundo outro temporizador (t_2). Esta estrutura encontra-se inserida num “*while loop*” com função de executar repetições (*iterations*).

Essas duas estruturas anteriores são inseridas numa outra (“*case structure*”), estrutura condicional com finalidade de executar comandos enquanto houver condição verdadeira; ou seja, ao ser dado o “*start*” é acionada a válvula de bloqueio dando início às repetições, que quando terminadas, interrompem a sequência lógica, reestabelecendo a condição falsa.

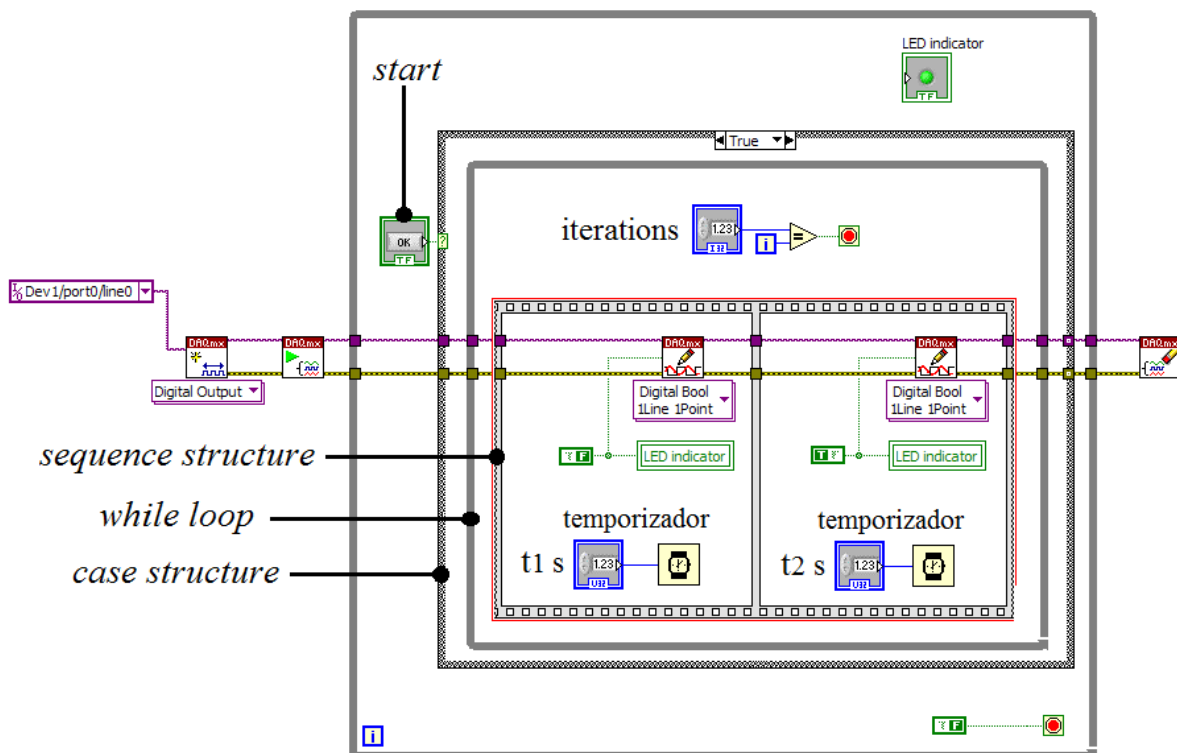


Figura 5.11 - Diagrama de bloco do *LabVIEW* usado na automatização do processo de bloqueio na válvula coaxial.

Esse diagrama foi utilizado para desencadear uma **realização** do evento de bloqueio na válvula (isto é, o fechamento da válvula coaxial, espera de uma quantidade adequada de tempo t_1 e, em seguida, sua reabertura), ou uma sequência de 250 realizações, com tempo suficiente entre eles denominado t_2 para permitir que o escoamento reestabeleça as condições iniciais. A Figura 5.12 e Figura 5.13 ilustram de forma esquemática a configuração utilizada para os casos de estudo em transiente lento e rápido respectivamente. Os resultados das 250 repetições são

usados posteriormente para se obter o comportamento médio das diversas medidas físicas instantâneas independentes; pressão, deslocamento e campos de velocidades na válvula de alívio, como será explicado nas seções seguintes.

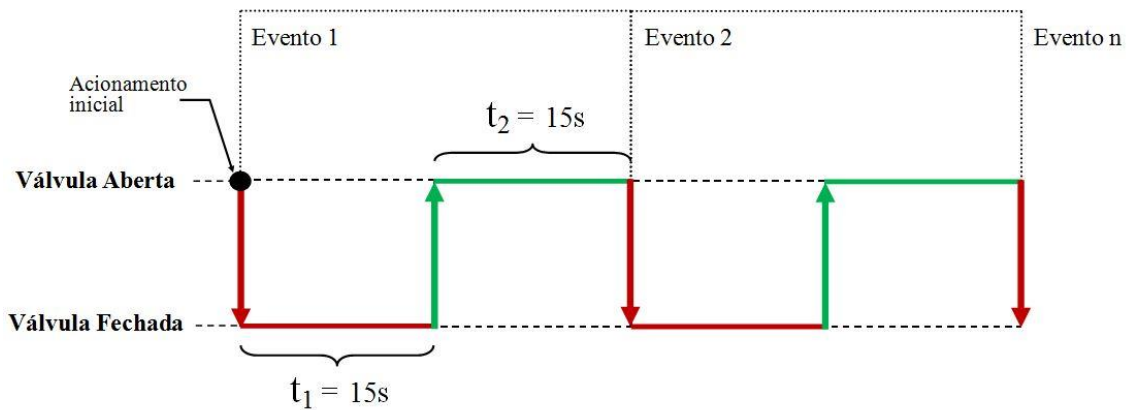


Figura 5.12 - Configuração de tempos usados na automatização do evento de bloqueio, no regime transiente lento, para 100 realizações. Diagrama referente à válvula coaxial.

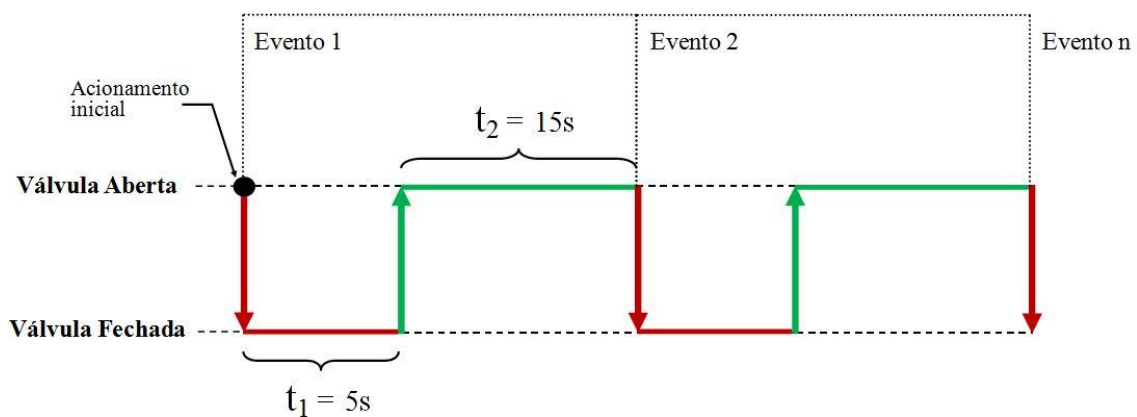


Figura 5.13 - Configuração de tempos usados na automatização do evento de bloqueio, no regime transiente rápido, para 100 realizações. Diagrama referente à válvula coaxial.

Na seção 6.1 explica-se em mais detalhes o processo empregado na caracterização do evento de bloqueio e estimativa do tempo de fechamento da válvula coaxial.

5.5. Instrumentação e aquisição de dados

A válvula de alívio estudada foi instrumentada com um sensor diferencial de pressão e um transdutor linear de deslocamento – LVDT. Para registrar as medidas de pressão e deslocamento da válvula foi utilizado um sistema de aquisição de dados da *HBM*, série QuantumX, modelo MX-840 de 8 canais multifuncionais, que oferece um conversor analógico/digital de 24 bits por canal, filtros de 0,01Hz a 3,2 KHz, com alimentação para transdutores de 5 a 24Vdc. Informações mais detalhadas sobre este equipamento podem ser encontradas em sua folha de dados no Anexo 10.4.

A Figura 5.14 apresenta o sistema de aquisição de dados instalado com os canais ocupados pelos transdutores e *trigger* (cabos verde e branco). O trigger envia o sinal do evento de bloqueio, caracterizando assim o início da escala de tempo da realização instantânea de um evento de alívio ($t = 0$).



Figura 5.14 - Sistema de aquisição de dados QuantumX MX-840 utilizado nos experimentos.

O sistema de aquisição de dados é administrado através do *software CatmanEasy-AP*, também da marca *HBM*, que realiza as tarefas de visualização em tempo real e registro dos dados adquiridos. A Figura 5.15 mostra um exemplo da

tela do programa durante o monitoramento das variáveis de interesse medidas nos experimentos.

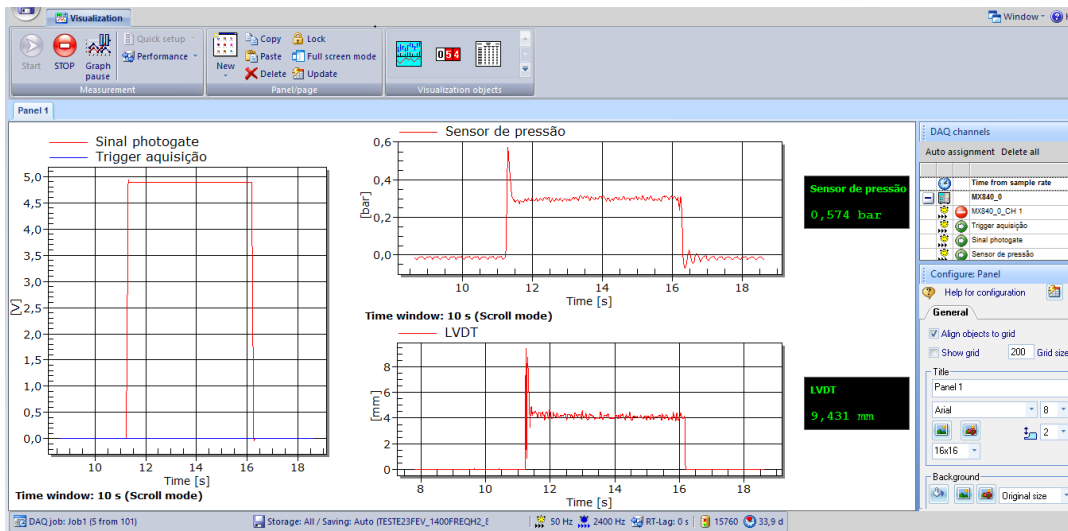


Figura 5.15 - Exemplo da tela de visualização em tempo real durante medições de pressão e deslocamento na válvula de alívio.

5.5.1. Sensor de Pressão

Para as medições de pressão foi utilizado um sensor diferencial de pressão de resposta rápida do tipo ressoante de silício, da marca *GE* modelo UNIK 5000, instalado e fixado à estrutura da mesa ótica (adjacente à seção de testes) e com tomadas a montante (P_1) e a jusante (P_2) da válvula de alívio, como ilustrado na figura 5.16. As características do sensor selecionado encontram-se descritas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Características do sensor de pressão UNIK 5000.

Características	Especificação
Faixa nominal de medição	0 a 5 bar (0 a 5 Volts)
Resposta em Frequência	1 kHz
Estabilidade típica	0,05%
Exatidão	de $\pm 0,2\%$ até $\pm 0,04\%$ (fundo de escala)
Conexão mecânica	G1/4 macho para uma saída aberta
Conexão elétrica	DIN 43650

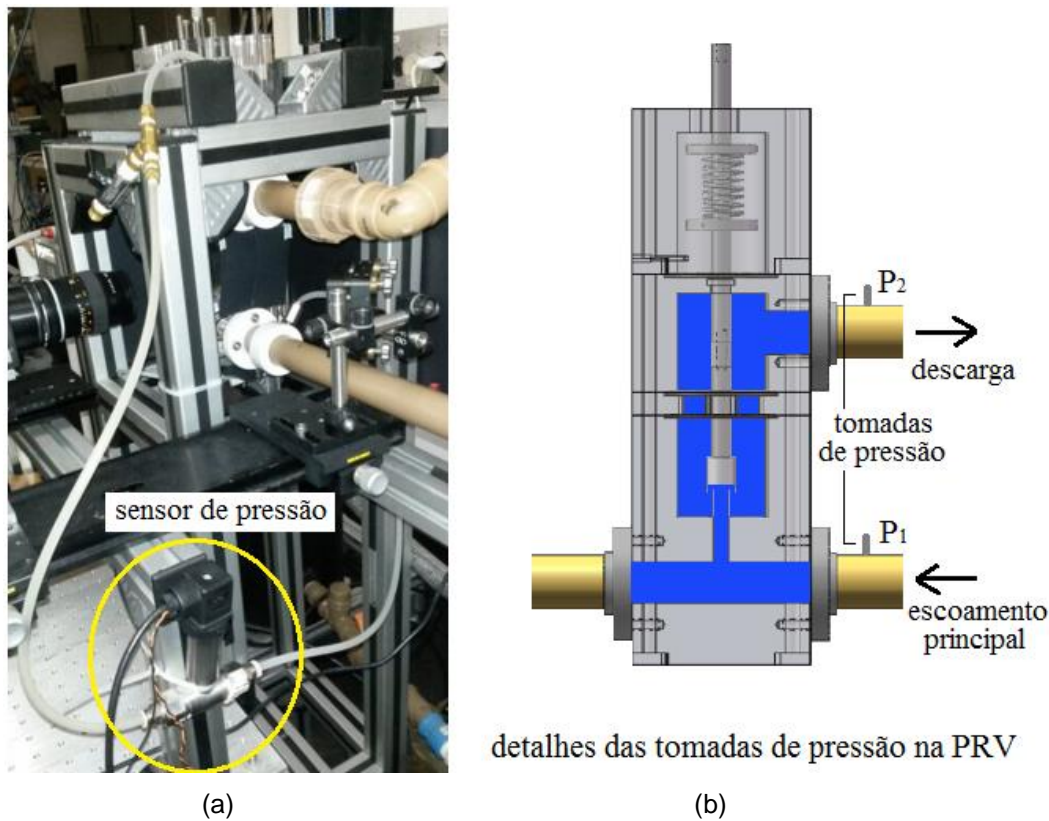


Figura 5.16 - Esquerda: instalação do sensor de pressão; direita: desenho esquemático com detalhe das tomadas de pressão na PRV.

O sensor de pressão foi calibrado colocando-se inicialmente diferentes alturas de coluna d'água com valores conhecidos (até 3 m), utilizando um arranjo de conexões em T, válvulas e mangueiras plásticas de $\frac{1}{4}$ de diâmetro, como ilustrado na Figura 5.17. Para valores maiores de pressão que não puderam ser obtidos com uma coluna de água, um dos extremos da mangueira foi ligado ao circuito de ar comprimido do laboratório dispondo de um manômetro calibrado, com faixa de medição até 160 psi. A tensão de saída do sensor de pressão foi medida com um multímetro portátil marca *Fluke*, modelo 116. A Figura 5.18 mostra a curva de calibração resultante, com uma incerteza de medição máxima de $\pm 0,2\%$ de fundo de escala, fornecida pelo fabricante.

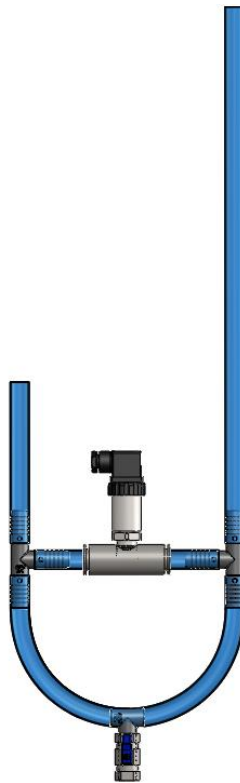


Figura 5.17 - Arranjo de mangueira e conexões utilizado na calibração do sensor de pressão UNIK 5000.

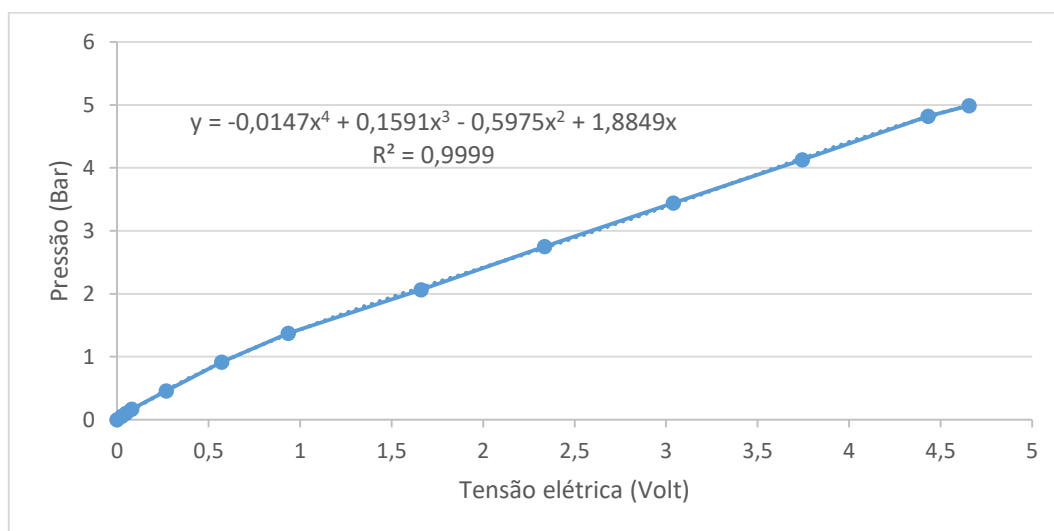


Figura 5.18 - Curva de calibração do sensor de pressão UNIK 5000 utilizado nos ensaios.

O Anexo 10.5 traz a folha de calibração e instruções de instalação do sensor de pressão, fornecidos pelo fabricante.

5.5.2. Transdutor Linear de Deslocamento - LVDT

Para a medição do deslocamento da haste foi selecionado o transdutor linear de deslocamento (LVDT) da *Measurement Specialties*, modelo MHR 500, cujas características são descritas na Tabela 5.4. A faixa nominal do transdutor selecionado cobre com folga o deslocamento máximo da válvula de estudo que é de aproximadamente 9,5 mm.

Tabela 5.4 - Características do transdutor LVDT utilizado.

Características	Especificação
Faixa nominal de medição linear	$\pm 12,5$ mm
Linearidade (50% da faixa)	0,15
Resposta em Frequência	10 kHz
Sensibilidade	1,96 mV/V
Impedância primária	264 Ω
Impedância secundária	810 Ω

O transdutor foi instalado na parte superior da haste da válvula de alívio com o objetivo de registrar a posição instantânea do disco em relação ao assento, uma vez que na válvula de alívio estudada, a haste estava conectada diretamente ao disco.

Foi necessário projetar e fabricar uma cúpula em acrílico para centrar o corpo do LVDT à haste da válvula e um adaptador em polipropileno para fixar o núcleo na ponta da haste e introduzi-lo no interior do corpo do LVDT. A figura 5.19 apresenta na esquerda o desenho da cúpula suporte e na direita mostra o detalhe da cúpula montada (completamente vedada para impedir a fuga de ar ou de água, o que poderia afetar as condições de pressão no interior da câmara) no topo da seção de testes.

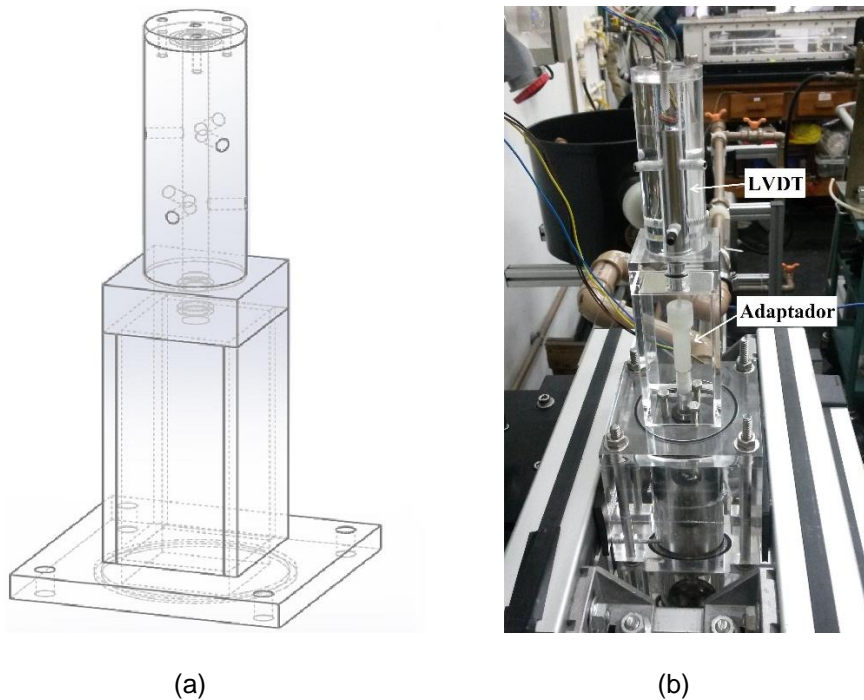


Figura 5.19 - Vistas da cúpula-suporte em acrílico e da montagem do LVDT para realizar as medições do deslocamento da haste da válvula.

O Anexo 10.6 traz a folha de dados completa do transdutor. Para o processo de calibração do LVDT foi utilizado um micrômetro Mitutoyo de 0 a 25 mm, e o cálculo da estimativa de incerteza, detalhado no Apêndice A.2, resultou em $\pm 0,6\%$ com um nível de confiabilidade de 95%.

A Figura 5.20 apresenta a curva de calibração produzida com o auxílio do micrômetro.

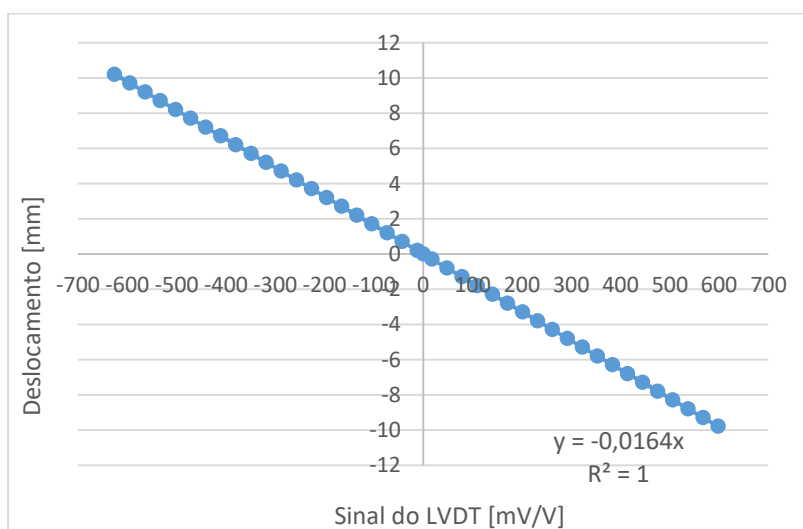


Figura 5.20 - Curva de calibração do transdutor de deslocamento (LVDT).

5.5.3. Trigger para Aquisição dos Dados

Para iniciar e interromper a operação de aquisição de dados simultâneos de pressão e deslocamento, utilizou-se um *trigger* externo, com base no evento de bloqueio causado pela válvula coaxial pilotada. O *trigger* foi configurado para sincronizar a aquisição, gerando tensão (variação de 0 a 0,6 mV) durante o acionamento (fechamento e abertura) da válvula coaxial, através de um impulso elétrico externo, comunicando o relé que alimenta a válvula coaxial e o sistema de aquisição de dados MX-840 da HBM.

O sistema de aquisição foi configurado para iniciar a aquisição de dados quando ocorre a condição de pico de subida de 0,35 mV gerado pela válvula coaxial durante seu fechamento (início do bloqueio, ou $t = 0$), e para interromper e salvar a aquisição quando ocorre o contrário (inclinação de descida de 0,35 mV, correspondendo à abertura da válvula coaxial e restabelecimento do fluxo normal). Um pós-trigger de 2,5 s permite observar o comportamento de pressão depois da reabertura da válvula coaxial e conseqüente fechamento da válvula de alívio. A Figura 5.21 mostra a configuração utilizada na aquisição dos dados no programa *CatmanEasy*.

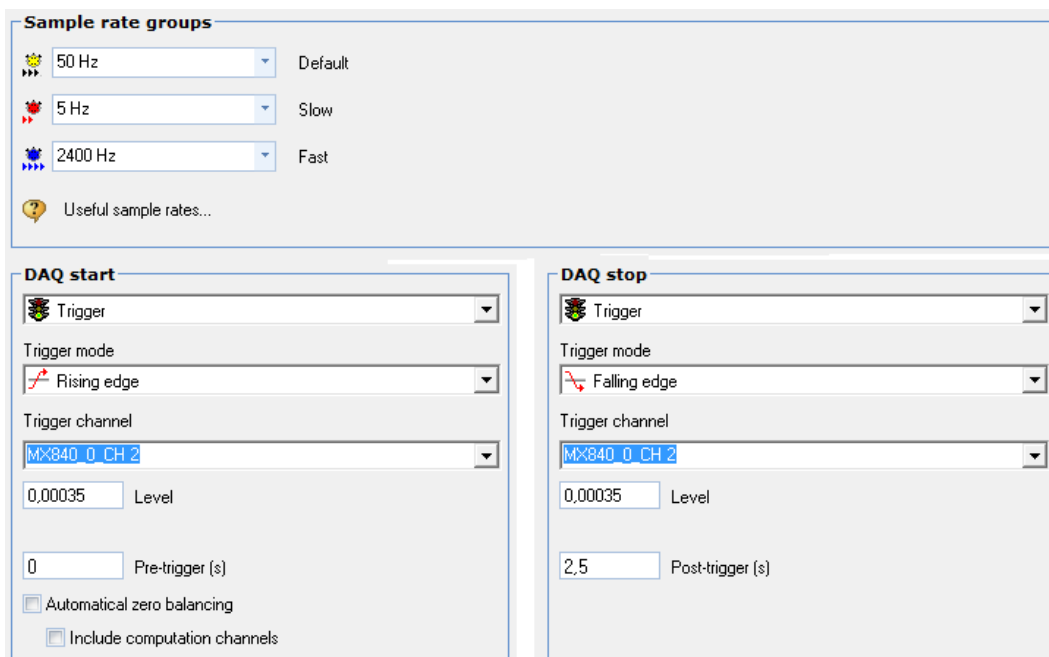


Figura 5.21 - Tela do programa *CatmanEasy* com a configuração utilizada para a aquisição de dados.

5.6. Sistema *PIV*

A técnica *PIV*, descrita no Capítulo 4, foi empregada na medição e visualização dos campos de velocidade bi-dimensionais na região ao redor da válvula de alívio, supondo simetria axial da válvula. O sistema *PIV*, ilustrado esquematicamente na Figura 5.22, foi montado numa mesa óptica (na frente da seção de testes), previamente projetada para conferir estabilidade e rigidez ao sistema óptico descrito a seguir.

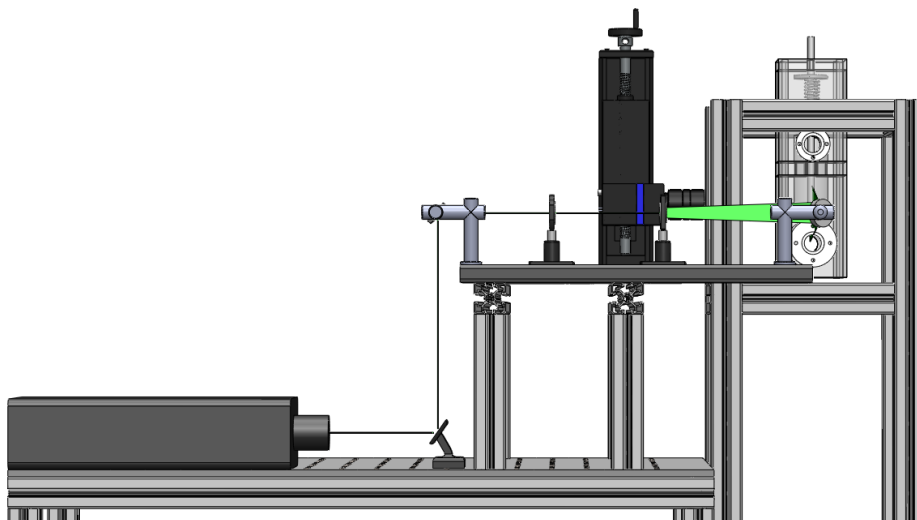
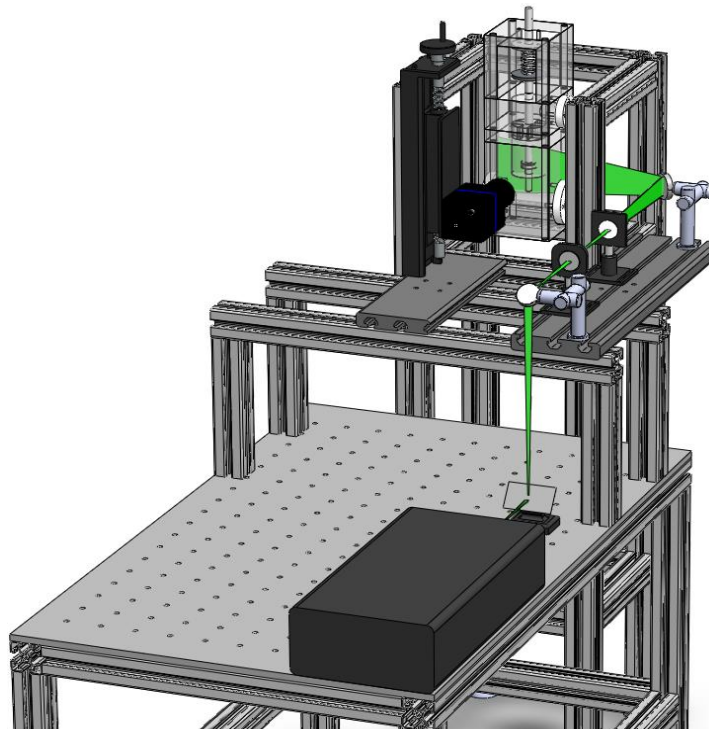


Figura 5.22 - Representação esquemática do sistema PIV utilizado. Abaixo, vista lateral.

5.6.1. Laser e plano de iluminação

Foi utilizado um laser pulsado do tipo Nd:YAG de dupla cavidade, marca *Quantel*, modelo *EverGreen*. O laser emite uma energia máxima por pulso de 145 mJ, com comprimento de onda de 532 nm (luz verde), a uma frequência de pulsação de 15 Hz com duração de 5 ns.

Para fornecer a iluminação das partículas traçadoras na forma de um plano de luz, foram utilizadas duas lentes; uma esférica, com distância focal de 500 mm, que determina a espessura do plano de luz, e uma lente cilíndrica, com distância focal de -15 mm e que determina a abertura do plano de luz, como ilustrado esquematicamente na Figura 4.3, seção 4.3. O feixe de luz que sai da cavidade do laser foi direcionado por 3 espelhos com ângulo de 45°, devidamente posicionados e alinhados para iluminar da direita para a esquerda a região do escoamento a ser estudada na seção de testes (plano de simetria da válvula). Uma foto do arranjo óptico utilizado se encontra na Figura 5.23.

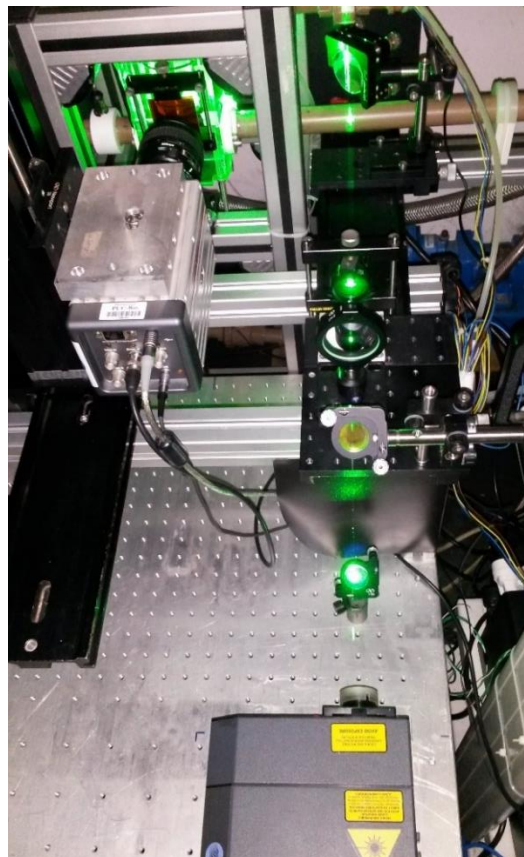


Figura 5.23 - Arranjo óptico utilizado para formação do plano de luz, representado também esquematicamente na Figura 5.22.

5.6.2. Câmara e lente objetiva

Foi utilizada uma câmera de 4 Megapixels de resolução (2048 x 2048 pixel, tamanho do pixel 7.4 μm) modelo 4MP da *TSI Inc*, com sensor tipo CCD, e taxa de captura de imagens de 16 quadros por segundo

A câmera foi montada em um suporte giratório, que permite o ajuste fino do ângulo perpendicular de observação, e que por sua vez era fixado a uma mesa de coordenadas vertical que tem por finalidade controlar a altura da câmera. Uma lente objetiva de 60 mm AF micro-Nikkor Nikon foi utilizada em conjunto com um anel de extensão PK-12, que ajudou a otimizar a magnificação, capturando em foco toda a área de interesse da seção de testes sem “desperdício” de pixels. Optou-se por registrar a imagem só de um lado da câmara cilíndrica, que possui simetria circunferencial. Por outro lado, decidiu-se mostrar o tubo de entrada vertical inteiro (ver Figura 5.24), e não só sua parte direita, para que posteriormente as integrações numéricas de perfis simétricos de velocidade pudessem ser comparadas.

Esta configuração foi então calibrada para determinar a resolução espacial produzida pelo conjunto, isto é, para determinar quantitativamente a magnificação, ou em outras palavras, o valor em microns por pixel resultante. A Figura 5.24 mostra duas imagens como exemplo da magnificação e foco utilizados, com as partículas misturadas à água para a aplicação da técnica *PIV*. Na imagem à esquerda foram usadas partículas traçadoras normais, aplicadas nos testes em regime permanente, e na imagem à direita foram utilizadas partículas fluorescentes, que eliminam a maior parte das reflexões, para os testes em regime transiente. O motivo para isto será explicado posteriormente.

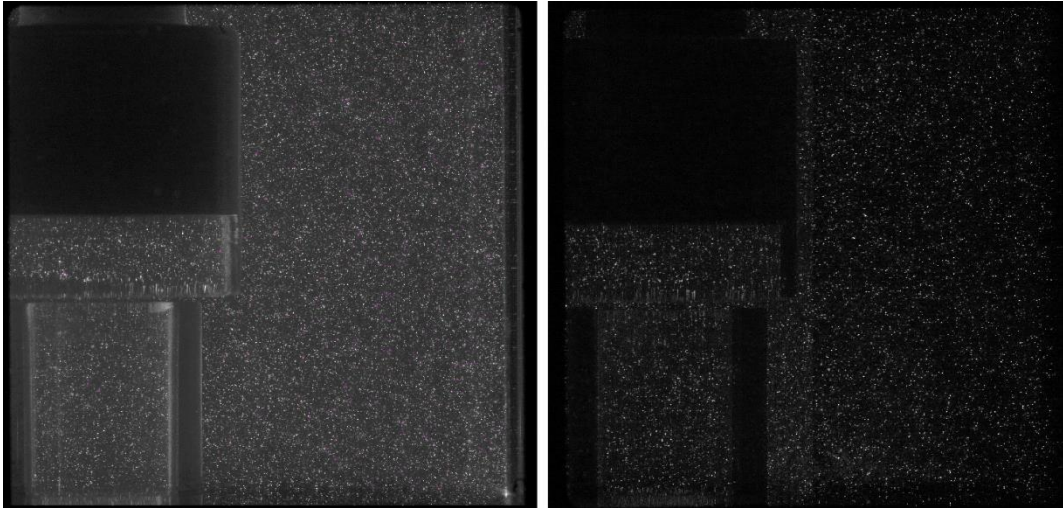


Figura 5.24 - Magnificação final na seção da válvula de alívio tipo “copo invertido” durante os experimentos; à esquerda, partículas traçadoras regulares; à direita, partículas fluorescentes.

5.6.3. Sincronizador de sinais

Foi usado um Sincronizador *LaserPulse* modelo 610035 da *TSI*, que controla o funcionamento de todo o sistema *PIV*. Este equipamento é responsável por sincronizar cada pulso do laser com a aquisição da imagem pela câmera. O sincronizador pode também aceitar sinais para sincronização com eventos externos relevantes para o experimento, como a abertura da válvula de alívio no caso em questão (ou melhor, o fechamento da válvula coaxial). Este esquema de sincronização específico montado para os testes em regime transiente será explicado em mais detalhes na seção 6.6. O sincronizador era administrado e programado pelo *software Insight 3G*, também da *TSI*, utilizado para registrar e processar as imagens, assim como para pós-processamento dos vetores velocidade calculados.

5.6.4. Partículas traçadoras

Como foi mencionado no capítulo 4, a seleção das partículas tem um papel crucial nas medições com *PIV*, posto que estas partículas devem ter a capacidade de seguir fielmente o movimento do fluido, sem influenciar o escoamento, e de espalhar luz suficiente para gerar imagens de qualidade e com baixo nível de ruído.

Para o presente trabalho, dependendo dos testes a se realizar, em regime permanente ou transiente, foram utilizados dois tipos de partículas sólidas. Para os testes em regime permanente, foram usadas partículas de poliestireno com diâmetro nominal de 13 μm da marca *Potters*, massa específica de 1,05 g/cm^3 e índice de refração de 1,49. Já para o caso de regime transiente, foram utilizadas partículas fluorescentes com diâmetro nominal de 15 μm da marca *Duke Scientific*, massa específica de 1,05 g/cm^3 , com comprimento de onda de absorção de 542 nm e de emissão em 612 nm. Isto porque procurava-se evitar a necessidade de gerar uma quantidade muito grande de máscaras (usadas para apontar áreas da imagem onde não há fluido e não se deseja calcular vetores-velocidade, como por exemplo a parede do tubo, ou ainda o copo da válvula, cuja posição varia bruscamente durante o transiente) no processamento das imagens. Usando partículas fluorescentes evita-se reflexos e defeitos ópticos, o que por sua vez deixa as áreas onde não há fluidos apenas com pixels escuros, como se pode observar na Figura 5.24 (à direita). Em imagens assim, o processamento sem o uso de máscaras não perde a qualidade.

Para este caso de partículas fluorescentes foi utilizado um filtro óptico passa-alta, posicionado na frente da lente da câmera (Figura 5.25), a fim de obter imagens de boa qualidade que permitam avaliar corretamente o campo de velocidade na válvula de alívio estudada, sem reflexões de luz verde. O filtro selecionado foi o modelo FSQ-OG550 da marca *Newport*, com comprimento de onda de corte da ordem de 550 nm, adequado para bloquear a luz verde do laser com comprimento de onda da ordem de 532 nm, deixando passar a luz da fluorescência com comprimento de 612 nm.

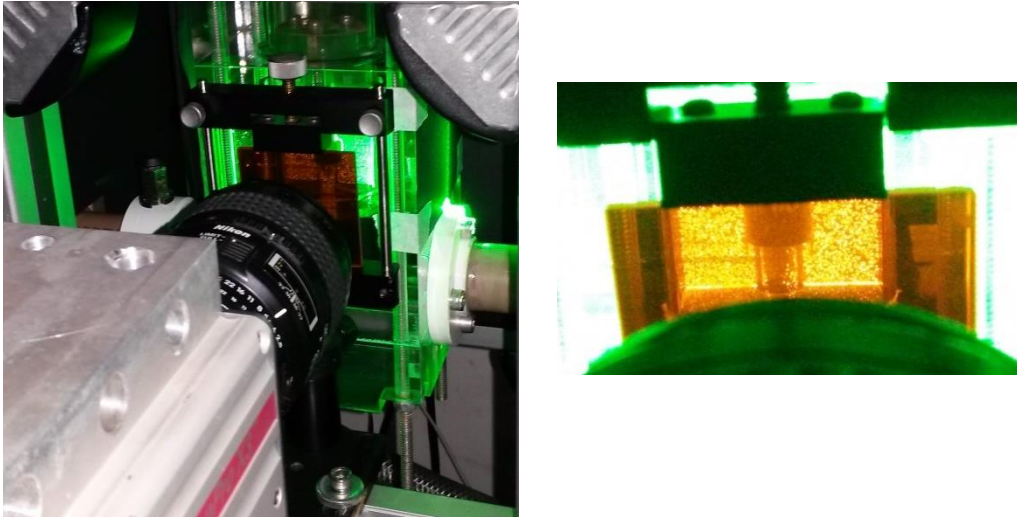


Figura 5.25. Foto da instalação do filtro óptico na frente da câmera e exemplo de visualização a olho nu das partículas fluorescentes em regime transiente.

6 Procedimento experimental

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais adotados na realização dos testes. Diversas grandezas foram medidas ao longo dos ensaios, medições simultâneas de pressão, deslocamento e *PIV* durante a abertura da válvula de alívio. Para isto foi necessário garantir uma série de passos e procedimentos; inicialmente a atenção estava concentrada na caracterização do evento de bloqueio, em seguida, na estimativa da pressão de ajuste da válvula de alívio, e finalmente nas medições finais. Cada uma das etapas será descrita a seguir.

6.1. Caracterização do evento de bloqueio no circuito hidráulico

Como passo inicial, analisou-se a natureza do evento de bloqueio que, de acordo com a literatura [12, 20], pode ser classificado como muito lento, lento, ou rápido. Como foi explicado anteriormente, para causar o bloqueio súbito no circuito foi utilizada uma válvula coaxial pilotada a jusante da seção de acrílico onde se encontra o modelo da PRV. Esta válvula coaxial de bloqueio, controlada por uma solenoide, pode ser ajustada para fechar com diferentes durações de fechamento, dependendo do aperto dos restritores e da pressão do ar comprimido que alimenta a solenoide. Desta maneira, se fez necessário um procedimento que pudesse relacionar a posição do restritor com o tempo de fechamento da válvula coaxial, pois o fabricante não fornece informações tão detalhadas.

Assim, os tempos de fechamento da válvula coaxial foram medidos em um procedimento à parte. A válvula foi desmontada do circuito hidráulico e fixada na mesa óptica, como ilustrado na Figura 6.1(A). Uma fonte de luz LED de 230 watts de potência foi posicionada de um lado da válvula inicialmente aberta, e no outro lado foi fixada uma câmara rápida (alta taxa de aquisição de quadros), *Photron FASTCAM SA3*, alinhada com o eixo da válvula. Esta configuração pode ser observada esquematicamente na Figura 6.1(B). Nesta imagem, pode-se observar:

(1) câmera de alta velocidade, (2) válvula coaxial, (3) válvula solenoide piloto, (4) entrada de ar comprimido a 80 psi, (5) restritor de saída de ar que regula o tempo de fechamento, (6) restritor que regula o tempo de abertura, mantido na mesma posição para todas as medidas, (7) Pannel de iluminação LED.

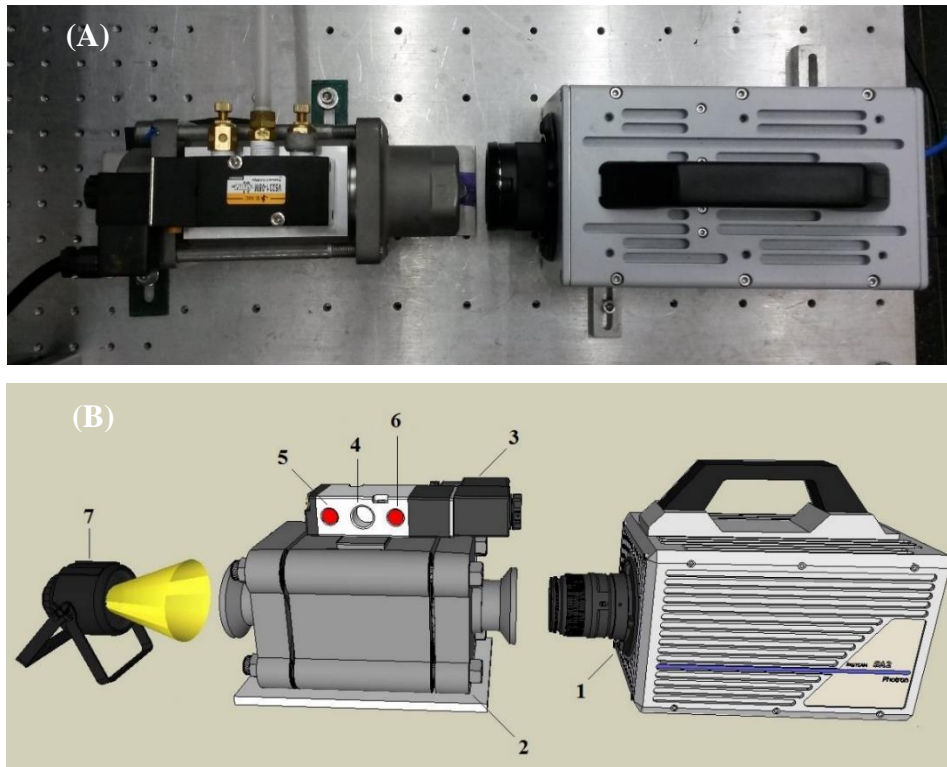


Figura 6.1 - Arranjo utilizado para avaliação dos tempos de fechamento da válvula de bloqueio: (A) vista superior da montagem, (B) representação esquemática da configuração.

O restritor que regula a saída de ar e por conseguinte a velocidade de fechamento da válvula de bloqueio foi ajustado para os casos de fechamento rápido e lento. Em ambos os casos, durante os testes de fechamento foram adquiridas séries de 500 imagens com alta resolução temporal. A Figura 6.2 ilustra a evolução das imagens correspondentes à válvula completamente aberta no sentido de bloqueio completo da luz (nesta figura apenas 5 imagens estão representadas para ilustrar o procedimento, mas a série real possui 500 imagens, com intervalo de tempo conhecido entre elas – 200 μ s). Em seguida, foi calculada a intensidade média dos pixels de cada uma das imagens das séries, e plotou-se gráficos de intensidade média (normalizada pela máxima) versus tempo – Figuras 6.3 e 6.4. Conhecendo o

tempo entre quadros, foram então estimados os tempos de fechamento para cada caso (tempo correspondente à queda de intensidade entre os platôs dos gráficos) com boa precisão: 4 ms para fechamento rápido, ilustrado na Figura 6.3, e 3.5 s para fechamento lento, ilustrado na Figura 6.4.



Figura 6.2 - Série de 5 das 500 imagens tomadas, selecionadas para ilustrar a evolução da intensidade luminosa com o fechamento da válvula e a câmera em sua frente.

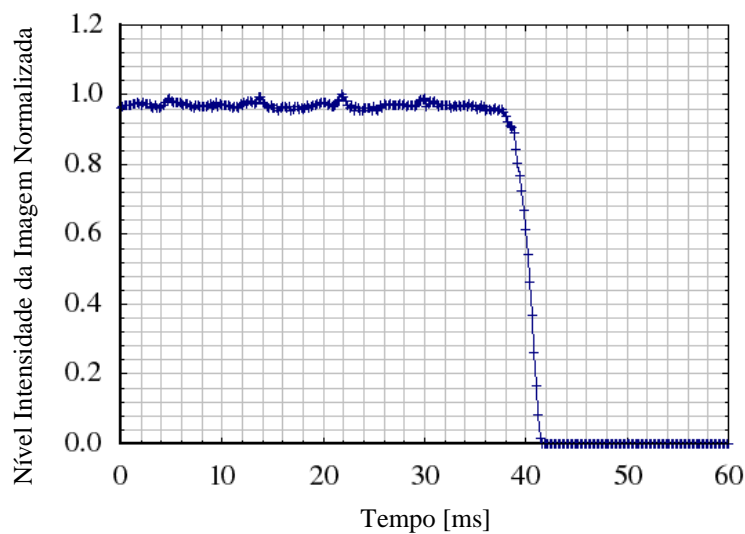


Figura 6.3 - Caracterização do tempo de fechamento da válvula coaxial para o evento de bloqueio rápido = 4ms (Babilonia *et al.*, 2015).

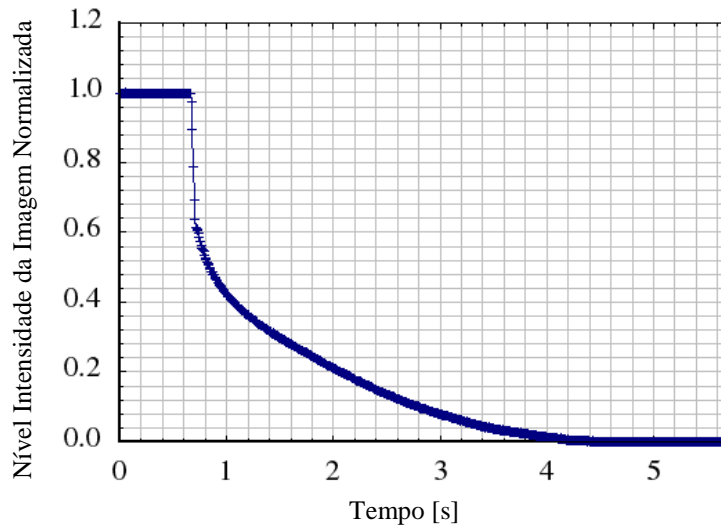


Figura 6.4 - Caracterização do tempo de fechamento da válvula coaxial para o evento de bloqueio lento = 3,5 s (Babilonia *et al.*, 2015).

Após esses testes, a válvula coaxial foi montada de volta ao circuito hidráulico, 70 cm a jusante da seção de testes de acrílico. Os resultados foram utilizados para classificar o transiente hidráulico nos ensaios, tal como apresentado a seguir.

6.1.1. Classificação do transiente

As variações de pressão em dutos são classificadas na literatura em três tipos de evento [20], descritos na Tabela 6.1. Este critério é baseado na relação entre o tempo T , necessário para o fluido mudar de velocidade (correspondente ao tempo de fechamento medido na válvula coaxial), e o período da linha $2L/c$, que refere-se ao intervalo de tempo necessário para que a onda de pressão percorra o caminho de ida e volta (da válvula coaxial de bloqueio à bomba e desta à válvula de bloqueio) no circuito ou sistema. L é o comprimento do duto, neste caso trecho da descarga da bomba até a válvula coaxial (aproximadamente 4 m), e c é a velocidade de propagação das ondas de pressão na tubulação.

Tabela 6.1 - Classificação do transiente [20].

Eventos	Características	Expressão
Rápidos	Ocorre num intervalo de tempo menor que um período da linha.	$T \leq 2L/c$
Lentos	Ocorre num intervalo de tempo que pode variar entre 1 a 500 vezes o período da linha.	$2L/c \leq T \leq 500 \ 2L/c$
Muito lentos	A variação da velocidade do escoamento excede 500 vezes o período da linha.	$T \geq 500 \ 2L/c$

A velocidade de propagação da onda de pressão é função de propriedades termodinâmicas do fluido (módulo de Bulk, K , e densidade, ρ) e de propriedades da tubulação (diâmetro D , espessura e , módulo de elasticidade E), sendo tradicionalmente calculada na literatura [21] com ajuda da seguinte equação:

$$c = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + [(K/E)(D/e)] c_1}} \quad (39)$$

Na equação (39) o coeficiente c_1 é definido em relação ao tipo de ancoragem da tubulação, que para nosso caso foi calculado como uma tubulação ancorada contra o movimento axial, $c_1 = 1 - \mu^2$, onde $\mu = 0,38$ para o PVC. Assim, com os dados das características do duto descritos na tabela 5.2, e as propriedades da água a 25°C, temos que $c \approx 530$ m/s. Logo, conhecendo os tempos de fechamento da válvula coaxial T , para efeito dos ensaios, podemos classificar os eventos transientes em rápidos e lentos.

6.2.

Estimativa da pressão de ajuste na válvula de alívio

O nível de pressão a montante da seção de testes (onde P_1 é medida - ver Figura 5.16) e na qual a válvula de alívio começa a abrir é conhecido na literatura como *pressão de ajuste*, P_{set} , um parâmetro relevante na caracterização do comportamento dinâmico da válvula de alívio. Por exemplo, a sobrepressão,

pressão de alívio e outros parâmetros são definidos em relação à pressão de abertura [3]. Antes de determinar o valor da pressão de ajuste, foi necessário testar várias molas de compressão de aço inoxidável, ajustadas a diferentes apertos entre os discos de compressão, procurando achar uma configuração que mostrasse bom desempenho na abertura da válvula de alívio (com estabilidade no sistema e sem presença de *chattering*) para as diferentes vazões principais testadas.

Para determinar a constante da mola selecionada, foram feitos ensaios de compressão no Laboratório de Caracterização de Materiais da PUC-Rio, executados numa máquina universal de ensaios modelo AME-2KN. A mola era posicionada na máquina, e sobre esta aplicava-se uma força conhecida, gerenciada pelo programa *Dynamic View Standard*, que aponta então o valor de deslocamento sofrido pela mola. Aplicando a lei de *Hooke*, foi calculada a constante da mola, $k = 1,018 \text{ N/m}$. A Figura 6.5 ilustra o equipamento utilizado, nos instantes antes e depois da deformação da mola.

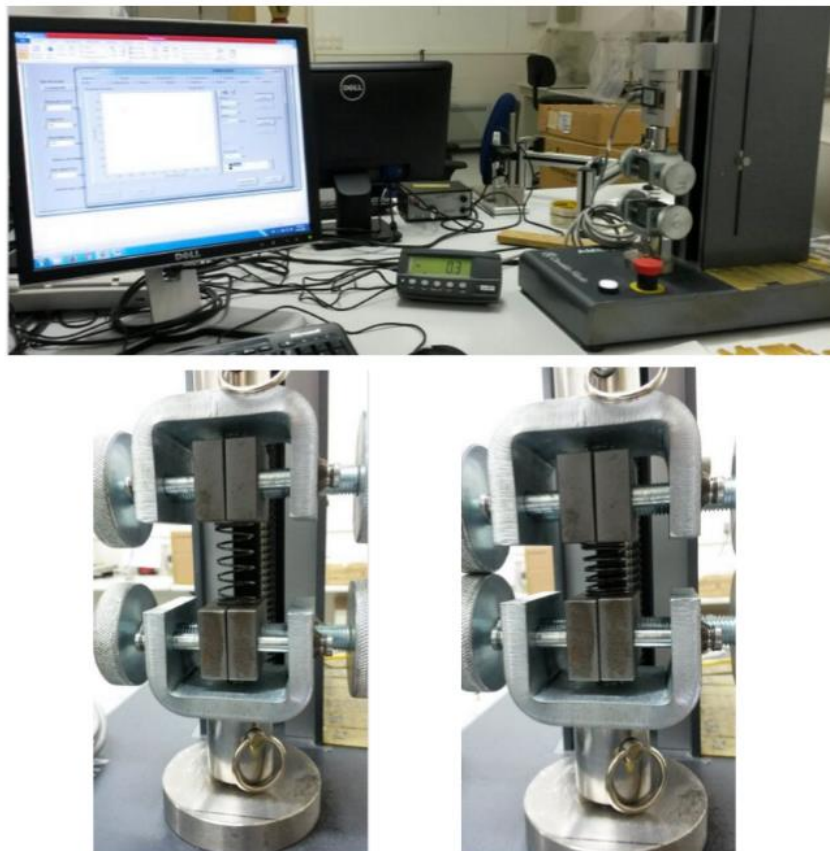


Figura 6.5 - Ensaios de compressão para o cálculo da constante da mola.

Uma vez selecionada e ajustada a mola na válvula de alívio, o circuito hidráulico foi bloqueado a jusante e a montante da seção de testes com válvulas de controle manual de PVC (ver Figura 5.1). A pressão adicional no circuito foi imposta a montante (P_1), mediante um toque leve inserido com uma seringa de 60 ml, cheia d'água. Um manômetro calibrado de coluna de mercúrio foi utilizado para medir esse incremento de pressão, e através do sistema de aquisição de dados foi possível acompanhar e verificar o momento exato de abertura da válvula, indicado pelas medições do LVDT, como ilustrado na Figura 6.7. Neste procedimento, considerou-se o início da abertura da válvula o momento em que a fração de abertura atingia o valor de 0,03% ($Y_D/D_b \times 100$), percebendo um mínimo alívio (gotículas de água) na descarga. Nesta abertura, a pressão manométrica a montante foi medida como 225 mmHg (0,3 bar), definida então como a pressão de abertura da válvula de alívio, $P_{set} = 0.3$ bar.

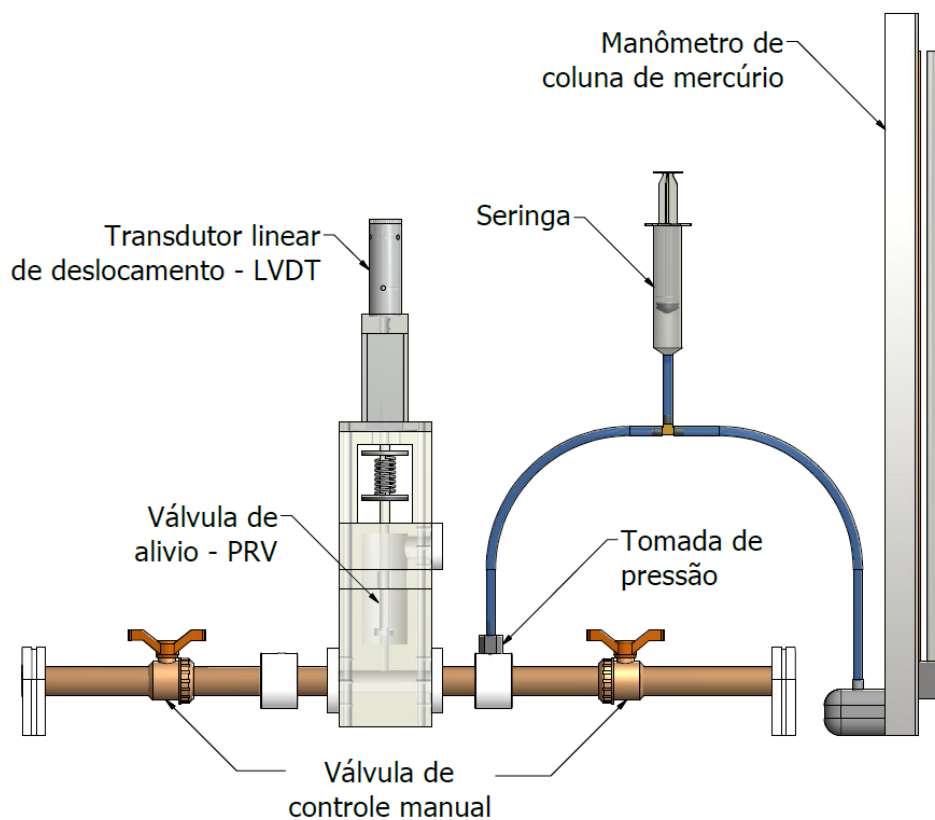


Figura 6.6 - Arranjo utilizado para medir a pressão de abertura da válvula de alívio, P_{set} .

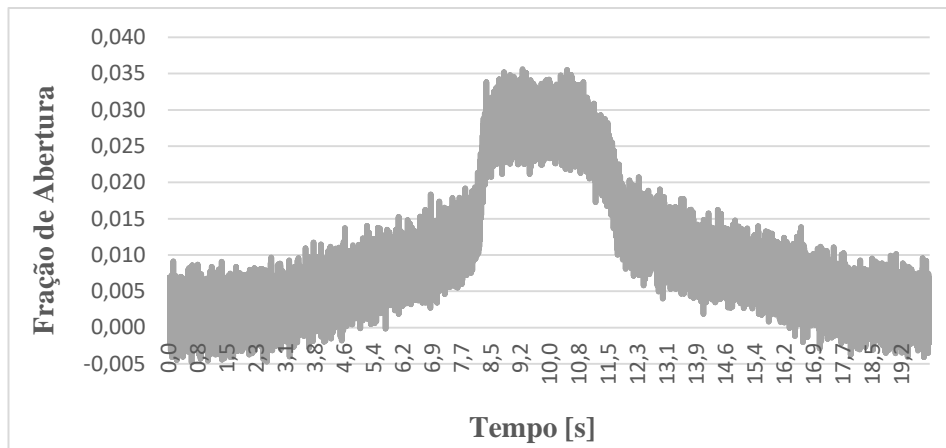


Figura 6.7 - Gráfico resultante das medições do LVDT para determinar a pressão de abertura da válvula de alívio.

6.3. Definição dos casos testados

Nesta seção é apresentada a matriz dos casos de estudo inicialmente escolhidos no presente projeto, resultado de uma caracterização preliminar da válvula de alívio. Nesta caracterização inicial testou-se diversas vazões Q do escoamento principal, com fechamento rápido e lento, medindo apenas deslocamento e diferencial de pressão em função do tempo durante o alívio (sem medidas *PIV* de campo de velocidade), sendo que, para cada caso eram feitas 250 realizações. Isto para que se pudesse obter também gráficos médios para cada caso, que ilustram o comportamento instantâneo “típico” da válvula, já que seu comportamento em realizações instantâneas distintas pode variar ligeiramente, especialmente no que diz respeito ao *offset* inicial (a válvula pode começar a subir pouco antes ou depois em relações a outras realizações). Resultados destes testes iniciais para diferentes vazões são apresentados nas figuras 6.8 a 6.12. Em todas estas figuras, na primeira coluna pode-se observar o comportamento do diferencial de pressão, ΔP , a montante e a jusante da PRV, e do deslocamento Y_D (escalas dimensional e adimensionalizada pelo diâmetro D_b do tubo de entrada), até que as condições sejam restabelecidas e a válvula volte ao assento. Já na segunda coluna pode-se observar os mesmos dados com mais detalhes na região de início do alívio, de $t = 0$ até 1s na escala de tempo.

Nestes gráficos (Figuras 6.8 a 6.12 e outros do mesmo tipo que aparecerão no capítulo seguinte), estão apresentados dados de uma entre as 250 realizações instantâneas conduzidas (vermelho para pressão e azul para LVDT), como exemplo. Em geral, tirando a variação de *offset* inicial, o comportamento do modelo de válvula é bastante repetitivo, mesmo nos detalhes das curvas. A linha cinza nos gráficos de pressão corresponde à pressão de ajuste P_{set} . Pode-se observar que no instante de tempo em que a pressão cruza com a de ajuste, o deslocamento da válvula se inicia (observado no gráfico de baixo), normalmente com um forte pico inicial.

Já as curvas nas cores marrom (pressão) e verde (deslocamento) correspondem a médias ponto a ponto, envolvendo as 250 realizações de cada caso de estudo. A ideia é ter uma representação, para cada caso, do comportamento transiente típico para aquelas condições. Entretanto, justamente por causa do *offset* inicial observado (apesar das curvas serem sempre parecidas, a subida da válvula ocorre às vezes mais cedo, às vezes mais tarde, ocasionando pequenos deslocamentos no eixo x entre diferentes realizações instantâneas), este cálculo comum da média ponto a ponto não é satisfatório, pois os picos são muito estreitos, fortes, e anulam uns aos outros. Isto pode ser claramente observado nas curvas médias, que não representam os picos mais acentuados, e, portanto, não mostram informações que podem ser importantes quando se tem interesse no entendimento completo do fenômeno transiente. No capítulo seguinte, no qual resultados transientes mais detalhados para um único caso de estudo são apresentados, as curvas médias apresentadas são calculadas de outra forma, colocando em fase os picos com base no início da primeira subida (tanto nas curvas de deslocamento quanto de pressão), e calculando também o instante médio em que isto acontece.

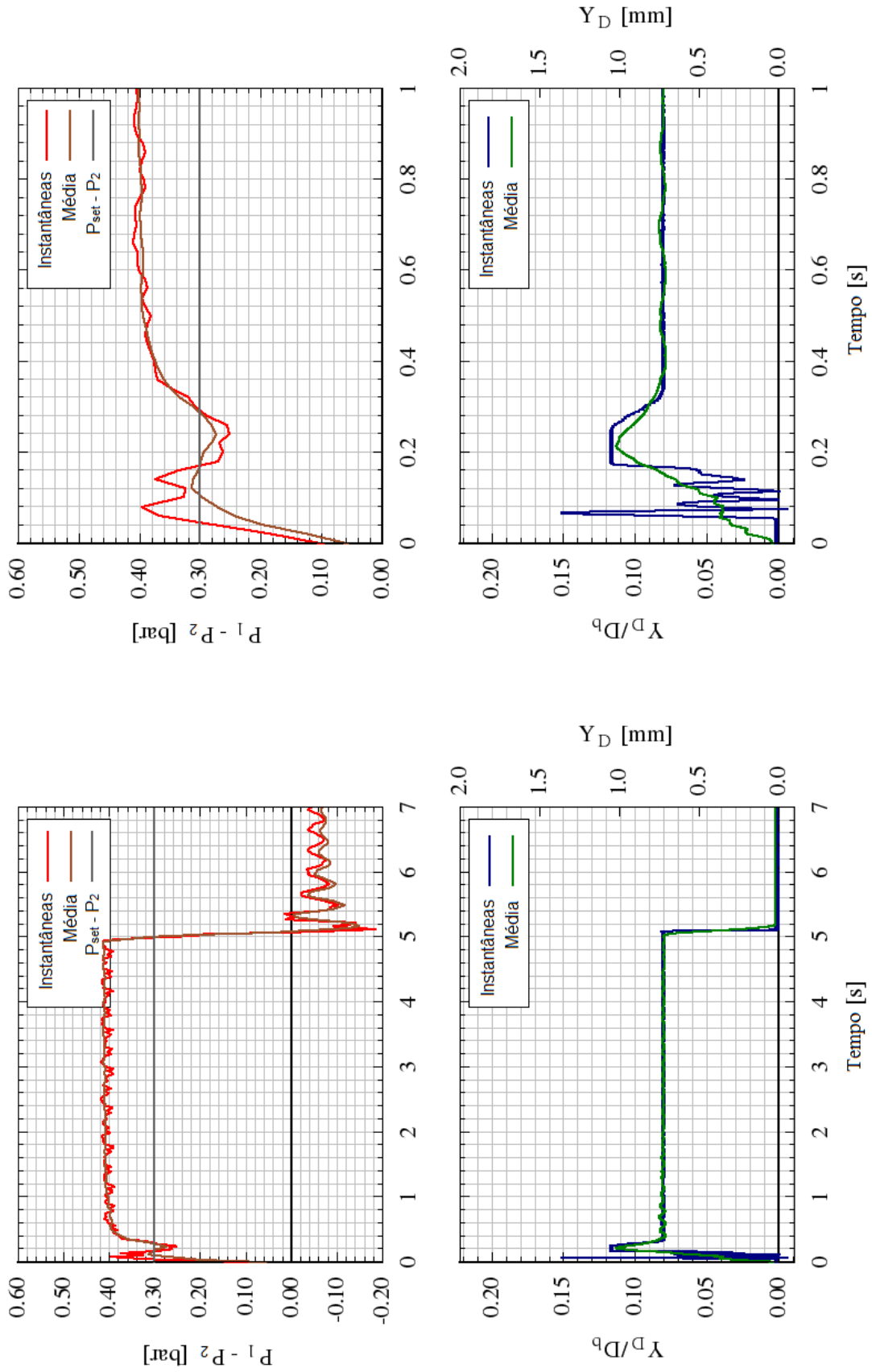


Figura 6.8 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes iniciais para vazão principal $Q = 10$ L/min ($Re = 7633$).

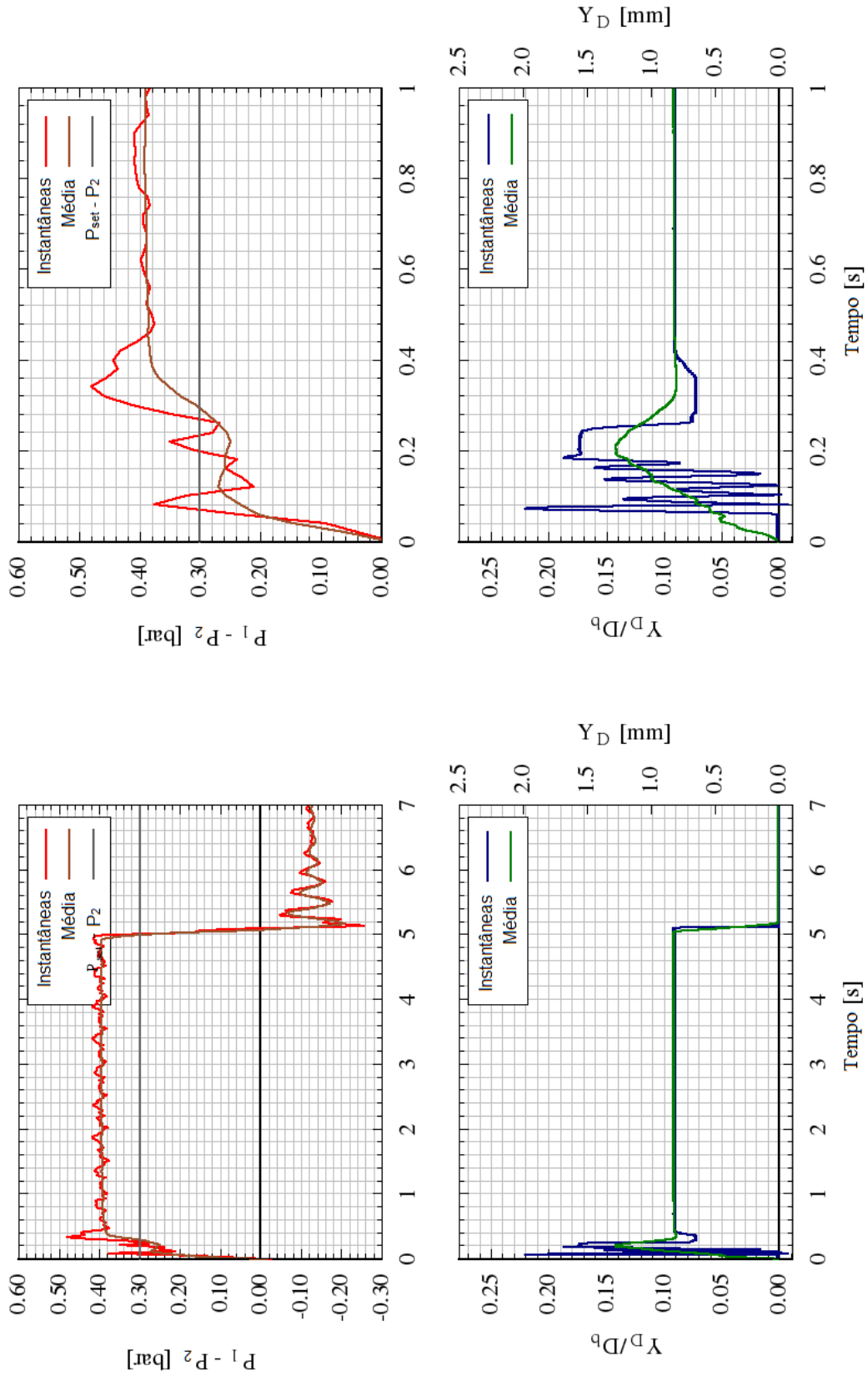


Figura 6.9 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes iniciais para vazão principal $Q = 14$ L/min ($Re = 10686$).

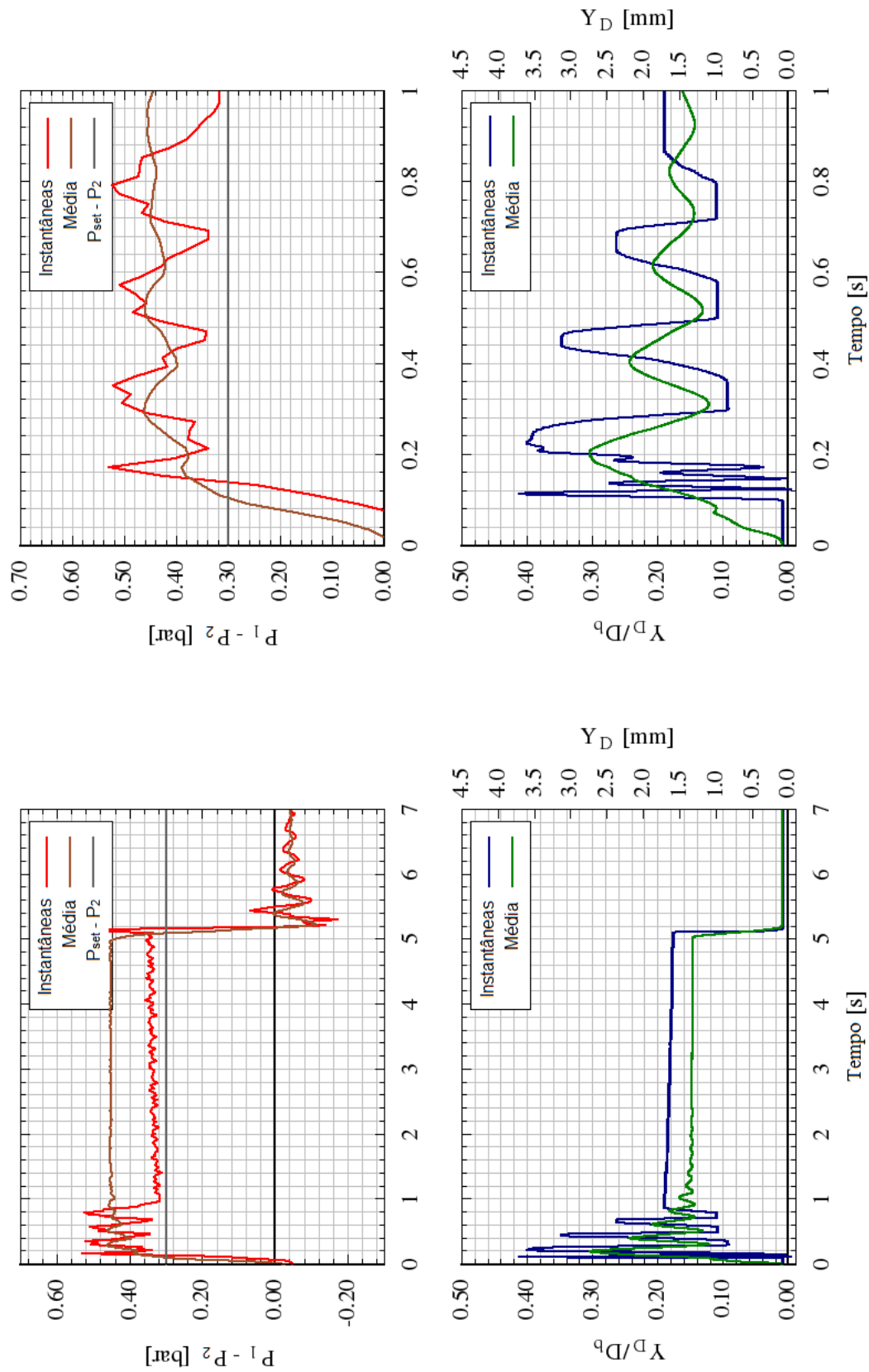


Figura 6.10 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes iniciais para vazão principal $Q = 17$ L/min ($Re = 12976$).

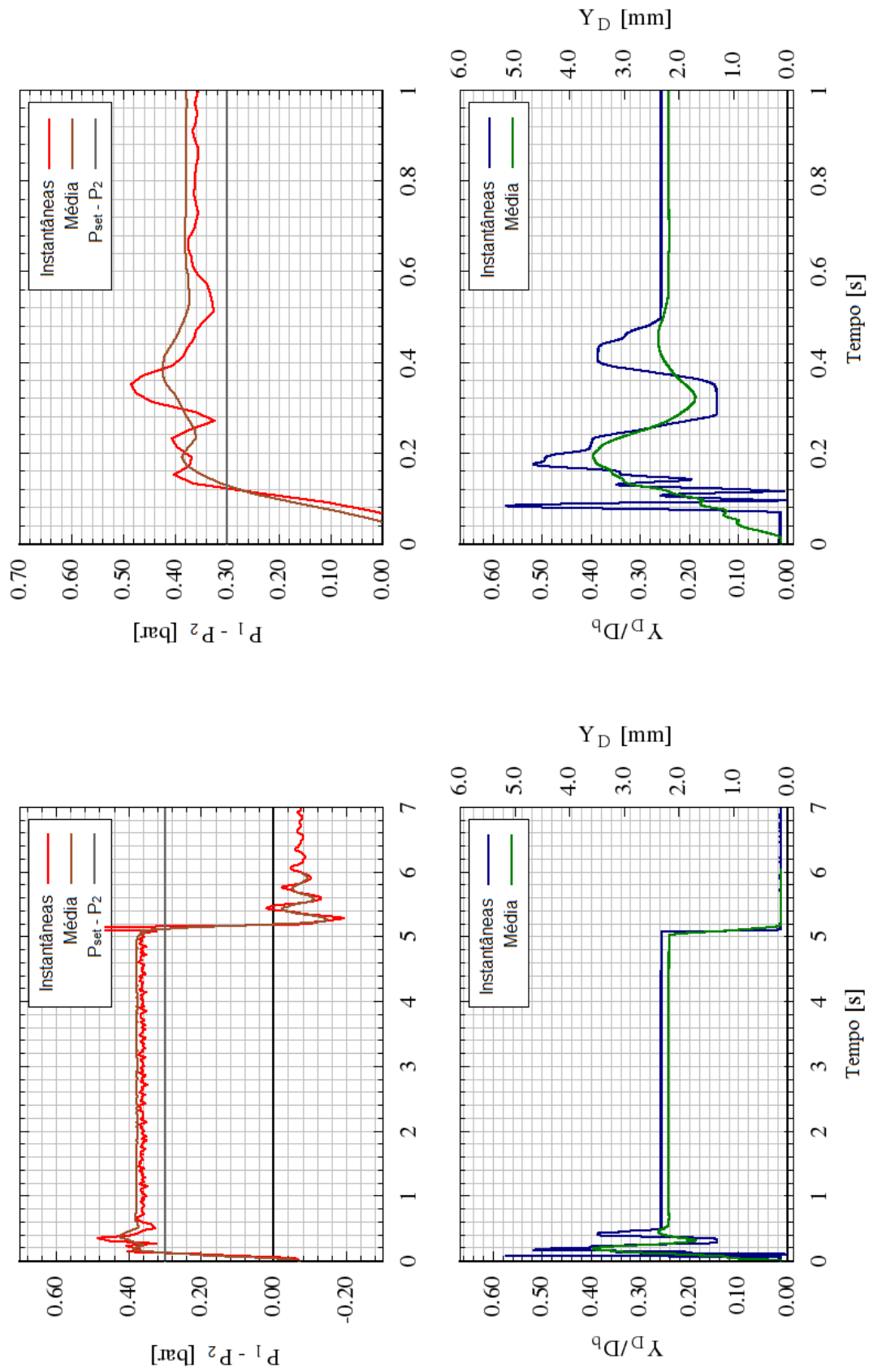


Figura 6.11 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes iniciais para vazão principal $Q = 21$ L/min ($Re = 16030$).

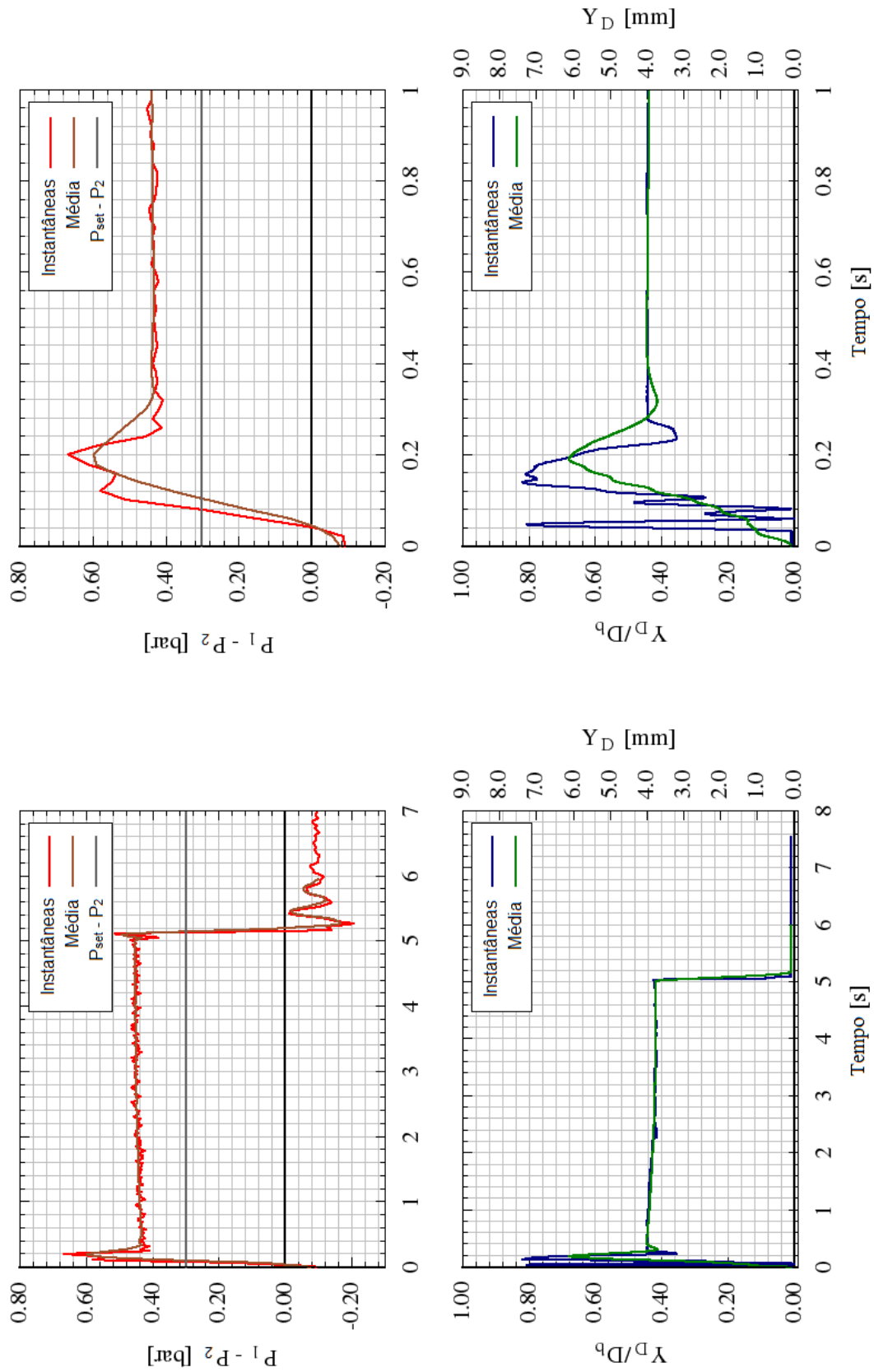


Figura 6.12 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes iniciais para vazão principal $Q = 26$ L/min ($Re = 19846$).

Nota-se que, independente da vazão principal, a válvula sempre oscila um pouco no início do transiente, e conseqüentemente a pressão medida a montante de sua entrada também. Na maioria dos casos, portanto, diversos picos de deslocamento são observados, sendo que em geral o primeiro pico é o mais forte (deslocamento alto em um curto espaço de tempo). Em um desses casos ($Re = 12976$), as oscilações continuam apenas diminuindo um pouco em amplitude; este caso se aproxima do fenômeno denominado *chattering*, em que oscilações violentas provocando a abertura e o fechamento de forma contínua durante o alívio. Isto está relacionado com a frequência natural do sistema massa-mola-amortecimento da válvula, que pode se aproximar da frequência de estruturas e variações de velocidade do escoamento presentes ao seu redor ou no tubo de entrada.

Estes tipos de dinâmica – que se afastam um pouco daquela esperada com um único deslocamento no início e depois uma estabilização – também ocorrem com frequência, em certas condições, para válvulas industriais em situações de campo. Isto é justamente o que torna interessante estudar mais a fundo o funcionamento de PRVs com atenção para o que ocorre de fato no transiente, ao invés de se basear apenas em análises de coeficiente de descarga crescente em função da abertura. Aliás, as curvas acima mostram que a própria ideia de resumir o que se espera do comportamento de uma PRV com uma curva $C_d \times Y_D$ não faz sentido, pois comumente o copo/disco da válvula passa pela mesma altura Y_D mais de uma vez durante um evento de alívio. Esta discussão será retomada no próximo capítulo.

A Tabela 6.2 lista as condições experimentais dos casos de estudo selecionados. Os testes foram divididos em dois grupos; testes em regime permanente, e transiente rápido (que por questões de tempo não foi possível analisar o caso de transiente lento, mencionado na Tabela 6.1). O objetivo era estudar – medindo, além de pressão e deslocamento, campos de velocidade e vazões de alívio com *PIV* – três vazões principais Q diferentes, entre as cinco apresentadas na caracterização inicial das figuras 6.8 a 6.12, em regime permanente e transiente rápido. Entretanto, devido a problemas técnicos incontornáveis com o laser, foi estudado em detalhes apenas o caso da vazão mais alta com a abordagem transiente; para a abordagem de regime permanente foi possível estudar as três vazões. A

metodologia utilizada nas medições finais é descrita no presente capítulo, enquanto os resultados propriamente ditos serão apresentados no capítulo a seguir.

Tabela 6.2 - Matriz dos casos de estudo testados

Número de realizações para cada caso	Duração do bloqueio T [ms]	Classificação	Vazão principal Q [L/min]	Número de Reynolds $Re^{(*)}$	Caso de estudo
250	N/A (Sem bloqueio)	Regime Permanente	10	7633	A
			17	12976	B
			26	19846	C
100	4	$T \leq 2L/c$ (Transiente rápido)	26	19846	D

(*) Número de Reynolds do escoamento é baseado no diâmetro do tubo do circuito hidráulico.

Após a definição da matriz de casos de estudo, os testes em regime permanente foram iniciados, como será descrito na seção subsequente. Os experimentos eram iniciados com a energização de todos os equipamentos, pelo menos trinta minutos antes dos testes, conforme recomendação do fabricante do laser. Em seguida os equipamentos eram ligados; dando abertura ao programa de aquisição de dados CatmanEasy-AP. O sensor de pressão e transdutor LVDT eram inicializados, seus dados de calibração carregados pelo programa e posteriormente era realizado o ajuste do zero em cada transdutor. Também era inicializado o programa *Insight 3G*, encarregado de administrar o funcionamento de todo o sistema *PIV*, como será explicado em detalhe a seguir.

6.4. Medição dos campos de velocidade com PIV

Nesta seção descreve-se a metodologia adotada para medir e visualizar os campos de velocidade na região de interesse na válvula de alívio, utilizando a técnica *PIV-2D*, de acordo com a introdução teórica apresentada Capítulo 4. Em geral, a técnica de *PIV* pode ser dividida em duas etapas; a de aquisição dos pares de imagens, e a de análise dos pares de imagens adquiridos para obter os campos de velocidade correspondentes.

6.4.1. Ajuste das imagens e calibração espacial

Antes de iniciar o processo de aquisição de imagens, é necessário analisar a qualidade das imagens e otimizar os parâmetros explicados no Capítulo 4.

Para minimizar defeitos ópticos e evitar a aparição de zonas de alta reflexão produzidas pelo próprio material da válvula, foi necessário envolver a seção de testes com uma cartolina preta (especialmente na face da seção em que entrava o laser – onde se recortou uma fenda apenas para a passagem da luz), além de um manto preto sobre toda a bancada, o que confere também maior proteção para o ambiente do laboratório em relação à luz de alta energia do laser. A Figura 6.13 ilustra um exemplo da qualidade das imagens *PIV* antes (à esquerda) e depois (à direita) desta pequena correção. As diferenças ficam claras primordialmente nas regiões da parede do tubo de entrada e da câmara cilíndrica, onde algumas linhas de reflexão foram eliminadas, restando presente somente a linha que de fato define as fronteiras físicas.

Posicionou-se a câmera com a lente propícia para se obter a magnificação desejada, de forma a capturar imagens da região de interesse, que pode ser observada na própria Figura 6.13. Escolheu-se visualizar apenas um lado da seção cilíndrica, devido à simetria axial; entretanto, se optou por visualizar o tubo de entrada inteiro, mesmo que a hipótese de simetria seja também válida ali. Isto porque é conveniente ter perfis dos dois lados para o cálculo da vazão via integração numérica.

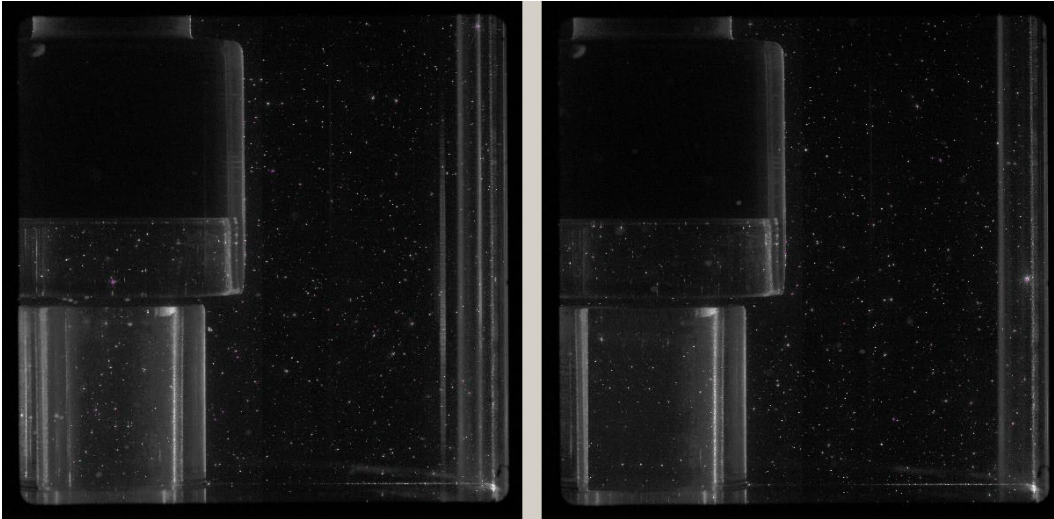


Figura 6.13 - Exemplo da qualidade das imagens *PIV*, antes e depois da colocação da cartolina preta.

Após estes procedimentos iniciais, o passo seguinte foi realizar um procedimento de calibração espacial, que determina a correspondência entre as dimensões reais no plano do escoamento e as dimensões em *pixels* na imagem. Este procedimento de calibração foi realizado tomando como referência a altura do copo da válvula de alívio, de dimensão conhecida, conforme indicado na Figura 6.14.

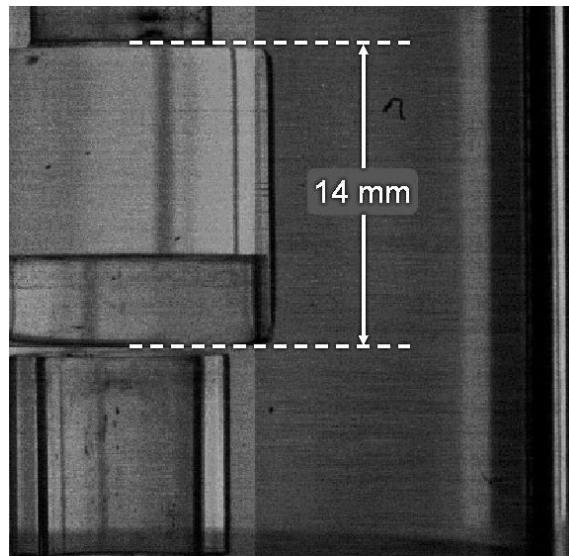


Figura 6.14 - Imagem evidenciando a altura do copo da válvula de alívio, utilizada como referência na calibração espacial.

A calibração pixel/ μm é determinada com o auxílio do programa *Insight 3G*. Assim, a razão entre a medida em *pixels* e a medida conhecida da altura do copo da válvula fornecia a calibração desejada, utilizada no procedimento de análise de imagens. Este procedimento de calibração foi realizado duas vezes; inicialmente para os testes em regime permanente (1 pixel = 13,76 μm) e logo para os testes em regime transiente (1 pixel = 14,07 μm), dado que qualquer modificação na posição da câmera ou algum outro parâmetro modifica também o fator de calibração ou magnificação.

6.4.2. Processo de aquisição de imagens

O processo de aquisição de imagens para *PIV* consta dos seguintes passos:

1. Misturar as partículas traçadoras ao fluido.
2. Energizar e interligar os equipamentos; computador, câmera, laser e sincronizador.
3. Inicializar o programa de aquisição de dados, *Insight 3G*, carregar e configurar os equipamentos no *software*; câmera, laser e sincronizador. Para o presente trabalho, a câmera e o laser foram configurados em modo de operação *frame straddling*.
4. Configurar o tempo entre pulsos do laser e parâmetros de sincronização da câmera. No presente trabalho a frequência entre pares de imagens (e consequentemente campos de velocidade) é de 15 Hz, suficiente para implementação da metodologia de média em fase (*phase-average*) implementada aqui e discutida mais à frente. Já o tempo entre as duas imagens de cada par, Δt , pode e deve ser alterado de acordo com algum conhecimento prévio do escoamento e das velocidades esperadas. Nestes experimentos, variou-se Δt entre 1,2 μs a 8 μs , dependendo principalmente da vazão principal Q .
5. Indicar o modo de aquisição – neste caso em sequência – e o número total de pares de imagens a serem adquiridos (este passo do procedimento difere um pouco entre os testes em regime permanente e transiente, como será explicado a seguir).
6. Iniciar a sequência de aquisição das imagens no programa *Insight 3G*.

6.4.3. Processamento de imagens e cálculo do campo vetorial

Após a aquisição de todas as imagens, o processamento para obtenção de campos de velocidade era feito no próprio programa de aquisição, através de algoritmo que usa FFT para cálculo da correlação cruzada, que ao fim fornece módulo, direção e sentido de cada vetor que compõe o campo de velocidade medido. Utilizou-se um ajuste Gaussiano, iniciando com dimensões de janelas de interrogação de 64 x 64 pixels e finalizando com janelas de 32 x 32. No segundo passo, mais refinado, informações do primeiro passo são utilizadas para otimização do cálculo, que fornecerá o valor final de velocidade naquela janela. Estas configurações de processamento são implementadas no programa *Insight 3G* da TSI® (Figura 6.15).

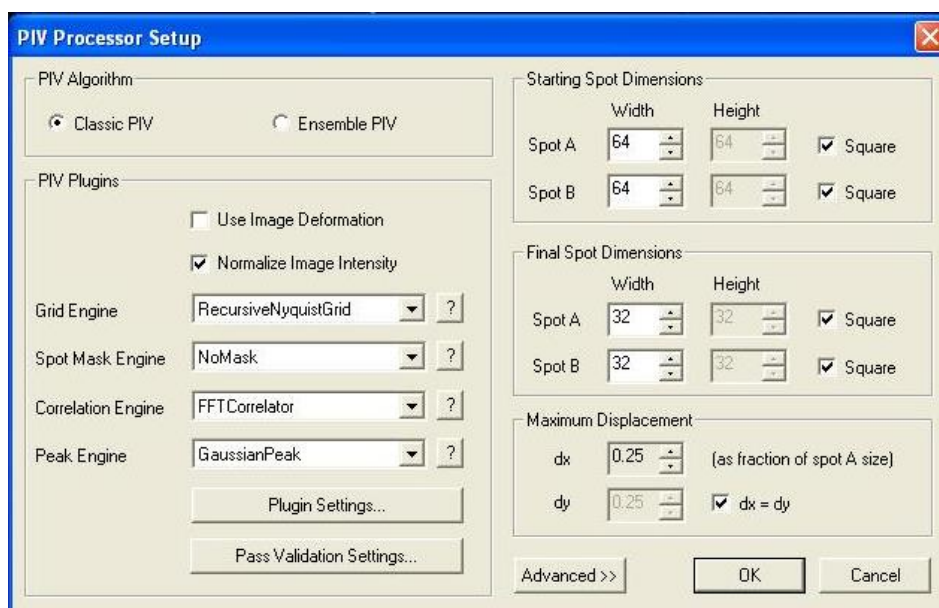


Figura 6.15 - Configuração utilizada no *Insight 3G* para o processamento das imagens.

Após o processamento das imagens, observou-se uma pequena fração dos vetores denominados *espúrios*, que são aqueles calculados incorretamente. É comum haver uma pequena fração de vetores deste tipo, especialmente em regiões da imagem próximas a superfícies. No caso do presente experimento, regiões onde há maior superposição deacrílico no caminho óptico, como por exemplo a região da borda do copo da válvula, acarretam em pior qualidade local da imagem, o que por sua vez deteriora as imagens das partículas ali presentes, gerando mapas de

correlação sem pico distinto e, portanto, vetores incorretos. Isto pode ser bem observado nas figuras que apresentam os resultados dos campos de velocidade média no capítulo de resultados.

Estes vetores foram descartados através de técnicas de pós-processamento que consistem em sua avaliação, detecção e substituição, com ferramentas disponíveis no programa *Insight 3G*.

Após a devida remoção e substituição dos vetores espúrios, os campos de velocidade instantâneos são calculados, assim como perfis de velocidade e campos médios a partir das séries de realizações, como será apresentado no capítulo de resultados do presente trabalho.

A Figura 6.16 ilustra um exemplo do pós-processamento utilizado na técnica *PIV* do presente trabalho. Indica claramente vetores espúrios (na cor vermelha) e zonas vazias, os quais devem ser descartados e substituídos. Várias técnicas foram empregadas para remover os vetores errados, como técnicas de remoção baseadas na comparação de vetores com seus vizinhos e aplicação critérios de desvio máximo. Após sua identificação, os vetores errados são removidos e substituídos por vetores interpolados (na cor amarela) para que não haja vazios nos campos de velocidade medidos.

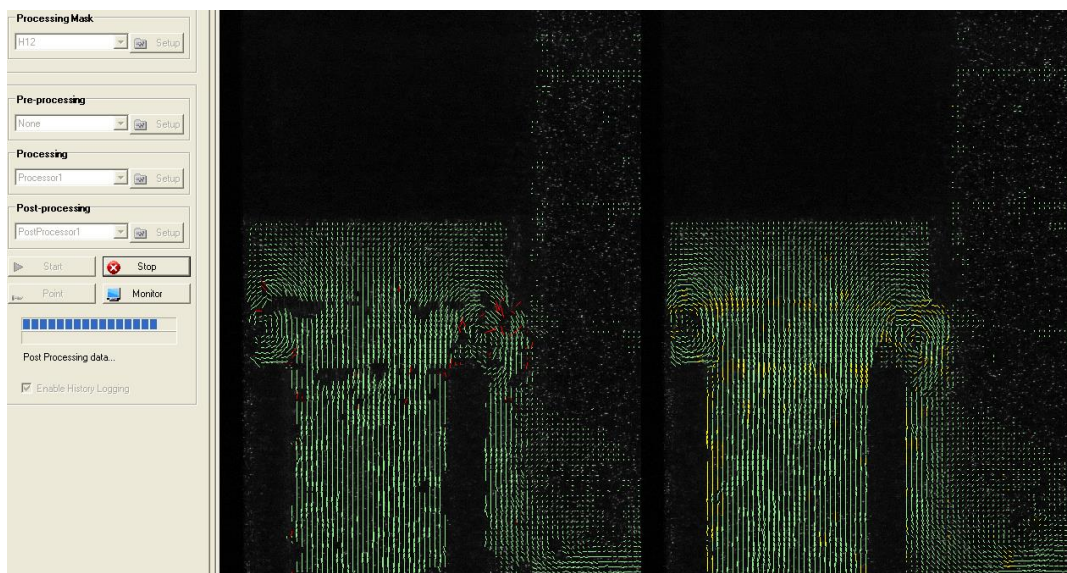


Figura 6.16 - Exemplo de pós-processamento dos dados no *Insight 3G*.

6.5. Testes em regime permanente

A fim de analisar a hipótese em mais detalhe e saber se é uma boa previsão caracterizar o comportamento dinâmico de válvulas de alívio através de uma série de posições fixas em regime permanente, foi necessário realizar testes neste regime. Mantendo bloqueado o fluxo principal (válvula coaxial fechada durante todo o tempo), o escoamento era totalmente direcionado para a válvula de alívio ao longo de todas as medições. Foram fixadas diferentes frações de abertura através do travamento da haste da válvula em diferentes alturas, utilizando um sistema mola – haste de micrômetro.

A Figura 6.17 mostra o detalhe do mecanismo utilizado para controlar a fração de abertura na válvula de alívio. Uma mola de compressão era instalada no eixo da haste da válvula entre dois adaptadores de polipropileno, o adaptador inferior (passante) era utilizado para proporcionar maior abertura na válvula, por meio da força exercida pela mola sobre o adaptador superior (roscado à haste). Um micrômetro Mitutoyo com escala de 0 a 25 mm, alinhado ao eixo da haste era o encarregado de fixar as diferentes posições de abertura na válvula. O micrômetro era instalado em uma caixa em acrílico, fabricada especialmente para esta fase do experimento, completamente vedada e montada no topo da seção de testes.

Usando este mecanismo, foram feitas medições simultâneas do diferencial de pressão e campos de velocidade no escoamento para cada uma das posições fixadas, que iam desde uma abertura mínima inicial (levemente acima do assento) até a fração de abertura máxima na válvula, calibradas pelo micrômetro.

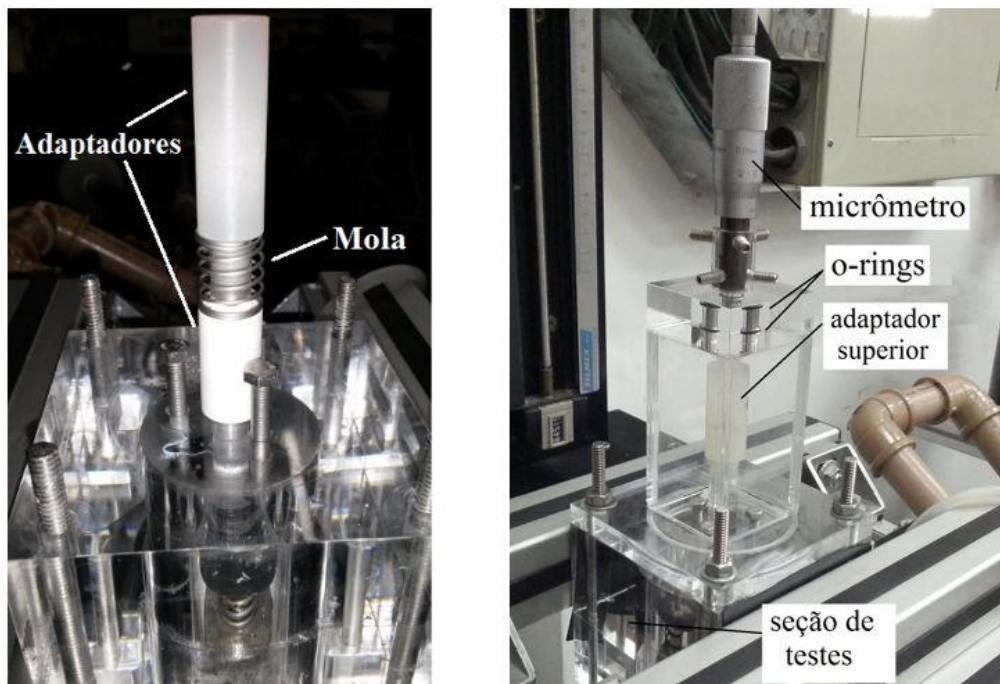


Figura 6.17 - Mecanismo para fixar as diferentes frações de abertura na válvula de alívio durante os testes em regime permanente.

Com o emprego da técnica *PIV* pode-se obter campos de velocidade instantâneos. Com a média do conjunto das realizações instantâneas, pode-se então calcular campos médios de velocidade com boa precisão. Com este objetivo, para cada fração de abertura na válvula, Y_D/D_b , foram aquiritados 250 pares de imagens. As Figura 7.2, 7.3 e 7.4, do capítulo de resultados mostram os campos vetoriais médios dos casos testados em regime permanente.

6.6. Testes em regime transiente

Visando comparar os resultados obtidos nos testes em regime permanente com o comportamento transiente da PRV, submetida a eventos de bloqueio rápido, foi usada a válvula coaxial de bloqueio instalada a jusante da seção de testes, para causar o bloqueio súbito no circuito. A válvula coaxial pilotada ficou configurada com tempo de fechamento de 4 ms durante a realização de todos os experimentos. O processo de bloqueio era automatizado através de um programa *LabVIEW*, utilizado para desencadear uma sequência de 100 realizações de eventos de bloqueio, com um tempo de espera de 15 s entre eles, suficiente para permitir que

o escoamento reestabeleça as condições iniciais. Detalhes desta configuração encontram-se descritas na seção 5.4.

Assim, a cada realização do evento em que há bloqueio do escoamento principal, obtém-se medidas simultâneas do diferencial de pressão e fração de abertura durante a ação de alívio da PRV (em função do tempo de abertura), assim como um par de imagens *PIV* – i.e., um campo de velocidade instantâneo – para uma determinada altura de abertura pré-escolhida da PRV.

A aquisição *PIV* para alturas pré-escolhidas durante cada realização de transientes bruscos foi possível graças à configuração descrita nos próximos parágrafos e ilustrada na Figura 6.18. Esta metodologia serve justamente o propósito de conseguir extrair uma série de campos instantâneos em alturas de interesse, e depois calcular campos *médios em fase* (*phase-averaged*).

Assim, a metodologia utilizada para a aquisição sincronizada das imagens *PIV* de forma a viabilizar o esquema de média em fase – ilustrada na Figura 6.18 – consiste na utilização de um *photogate* para detectar o movimento da haste da válvula e enviar um sinal elétrico para o sincronizador *PIV*.

É importante ressaltar novamente que, nesta etapa dos experimentos, continua-se medindo a fração de abertura com o transdutor LVDT, alinhado concentricamente à haste da PRV com o auxílio de um adaptador em polipropileno, assim como o diferencial de pressão na PRV, ambos em função do tempo para cada realização de evento, de acordo com as explicações da seção 5.5.

O *photogate* é colocado na posição mostrada na Figura 6.18. Trata-se de um sensor fotoelétrico de barreira, com um feixe infravermelho, que ao ser bloqueado – neste caso pela haste da válvula quando ela sobe durante o transiente – envia um sinal elétrico que dispara a aquisição de imagens *PIV*. Do ponto de vista do sistema *PIV*, gerenciado pelo sincronizador, este sinal é denominado um *trigger* externo, que ativa as medições no instante em que é recebido, com atraso de tempo desprezível para as medições, *da ordem de nanosegundos*.

Vale notar que este mesmo sinal do *photogate* é também enviado ao sistema de aquisição de dados da HBM, para medir o *delay* entre o sinal de fechamento da válvula coaxial ($t = 0$), e o tempo em que a PRV leva para atingir as diferentes frações de aberturas definidas como pontos de medida *PIV*.

O *photogate* fica montado em uma mesa de coordenadas de deslocamento vertical, utilizada para fixar os diferentes pontos a serem medidos, i.e, quanto mais se eleva o *photogate*, maior a fração de abertura da PRV na qual ele enviará o sinal para aquisição de imagens. Após o registro da série de 100 pares de imagens, levanta-se um pouco a mesa de coordenadas e o *photogate* para obter nova série de imagens para a próxima altura pré-selecionada. Ao todo foram estudadas 13 alturas, desde a posição na qual o copo da válvula se encontra quase assentado, até uma altura próxima da máxima atingida pelo copo para aquelas condições.

Com a disponibilidade de 100 campos de velocidade para cada uma das 13 alturas de “congelamento” da válvula, pode-se então calcular os 13 campos médios de velocidade, e é precisamente isto que é denominado média em fase ou, em inglês, *phase-average*. No presente caso, obviamente, o termo *média em fase* se refere à fase relativa ao deslocamento do copo da válvula.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1413450/CA

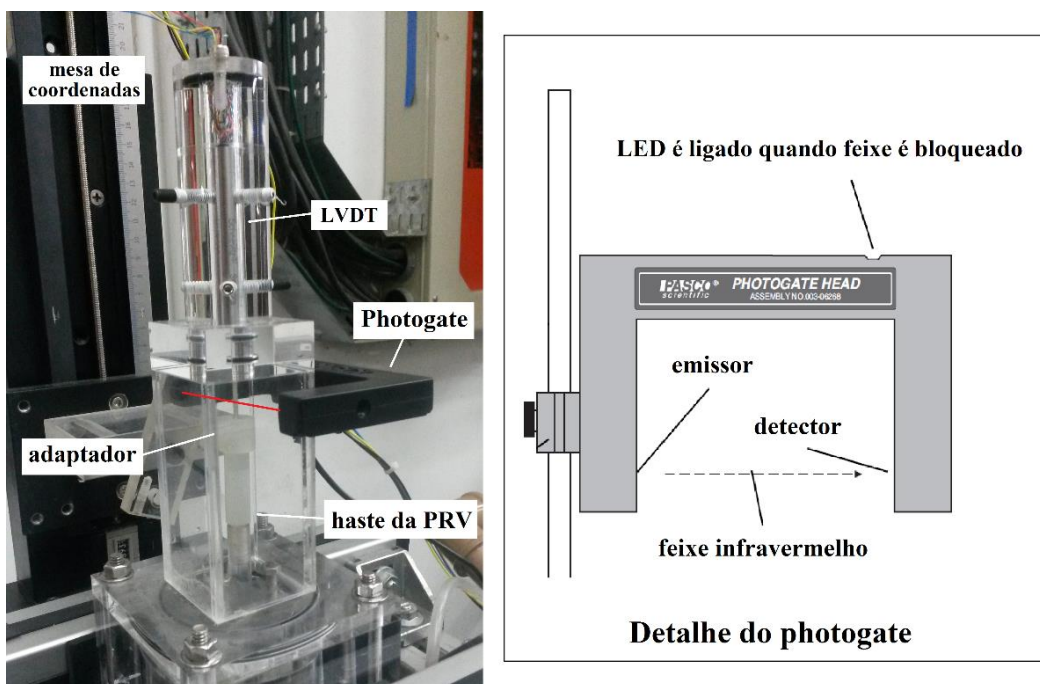


Figura 6.18 - À esquerda; foto do sistema utilizado na aquisição sincronizada das imagens PIV, assim como na medição da fração de abertura da PRV nos testes de regime transiente. À direita; desenho detalhado do *photogate* (catálogo da PASCO).

O *photogate* utilizado foi o modelo ME-9498A da PASCO®, de rápida resposta (tempo de detecção de aproximadamente 50 ns), que consiste de um

emissor e um detector de feixe infravermelho e emite um sinal de 5 V quando o feixe infravermelho é bloqueado.

Como já foi mencionado, nestes testes em regime transiente foram adquiridas medidas simultâneas do diferencial de pressão transiente, fração de abertura instantânea, e campos de velocidade na ação de alívio da PRV, para cada uma das posições fixadas. Com o conhecimento dos valores de ΔP e Q_s para cada uma dessas 13 frações de abertura, pode-se plotar o gráfico do coeficiente de descarga C_d em função da fração de abertura Y_D/D_b , como será apresentado no capítulo 7.

A Figura 7.12, do capítulo de resultados, mostram os campos vetoriais médios para as alturas estudadas no caso transiente (caso D da Tabela 6.2). É como se o escoamento no exato instante em que a válvula se encontra em uma determinada altura pudesse ser “congelado” e seu comportamento médio pudesse ser observado.

7 Resultados e discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos a partir das técnicas de medição implementadas e procedimentos descritos nos capítulos anteriores, seguindo a matriz de testes definida na Tabela 6.2. Estes resultados são relevantes para comparações com outros trabalhos experimentais apresentados anteriormente, e especialmente com resultados numéricos, a fim de validar e melhorar os modelos e metodologias utilizados na caracterização do comportamento dinâmico de válvulas de alívio de pressão tipo mola.

Primeiramente, na seção 7.1 serão apresentados os resultados extraídos dos testes operados em regime permanente, seguidos dos resultados dos testes em regime transiente rápido, seção 7.2.

7.1. Avaliação dos campos de velocidade e coeficiente de descarga em regime permanente

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nos testes em regime permanente, para os casos A, B e C definidos na tabela 6.2, correspondendo a três valores de vazão do escoamento principal, Q . O coeficiente de descarga C_d é dado pela Eq.(18), e pode ser plotado em função da fração de abertura (Y_D/D_b) quando se possui dados de ΔP (diferencial de pressão montante / jusante da PRV) e Q_s (vazão de alívio). Assim, neste trabalho foram conduzidas medições simultâneas do diferencial de pressão e campos de velocidade no escoamento para cada uma das posições de abertura fixadas na PRV.

7.1.1. Medidas de pressão

Embora se saiba que a diferença de pressão ΔP a montante e a jusante da válvula será de valor constante no tempo para regime permanente, as medidas de

pressão foram tomadas como sendo a média durante 5 segundos de aquisição do sinal, para cada fração de abertura. Nas frações de abertura iniciais, com o copo da válvula muito perto do assento, a pressão de entrada aumenta consideravelmente por causa da área de fluxo reduzida.

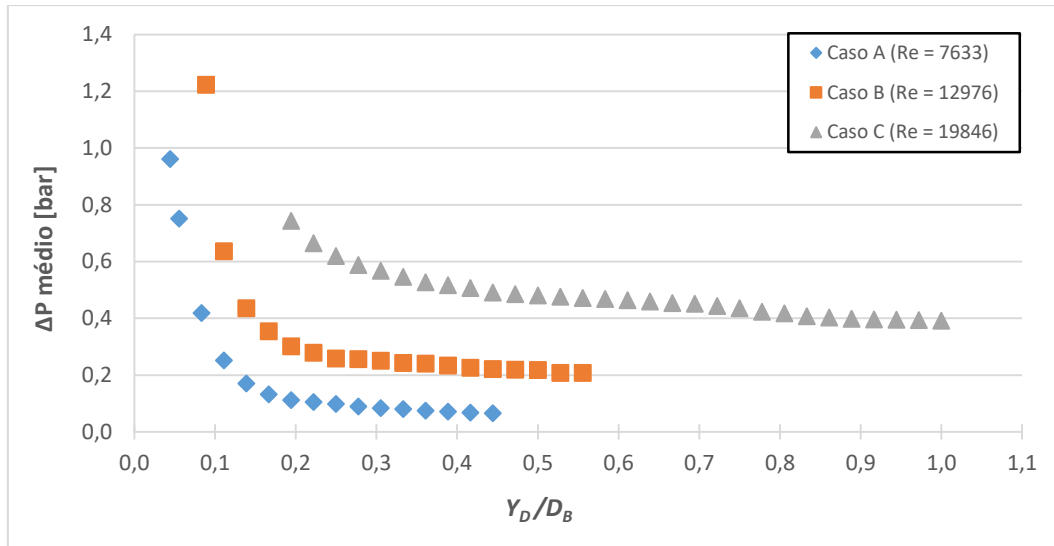


Figura 7.1 - Diferença de pressão a montante e a jusante da válvula para cada caso e fração de abertura definida em regime permanente.

No gráfico anterior, pode-se observar que as frações de aberturas (Y_D/D_b) mínimas e máximas medidas para cada caso de estudo são diferentes. Para definir as frações de abertura mínima em cada caso testado, foi necessário ir diminuindo progressivamente a abertura da válvula em função da pressão máxima permitida no circuito hidráulico (tubulação PVC) sem que ocorresse cavitação ou comprometimento da seção de testes devido ao alto nível de pressão. Já as frações de abertura máxima em que se conseguiu medir foram definidas em função do máximo deslocamento atingido pela válvula para cada vazão.

Os valores de pressão indicados na Figura 7.1 foram utilizados para calcular e apresentar o coeficiente de descarga C_d contra a fração de abertura para o caso de regime permanente, na Figura 7.7.

7.1.2. Campos de escoamento ao redor da válvula de alívio

Os campos de velocidade médios extraídos dos testes em regime permanente permitem visualizar a estrutura do campo do escoamento na válvula de alívio, para diferentes frações de abertura fixadas com o auxílio do aparato descrito na seção 6.5. Estes campos médios são gerados a partir de 250 campos instantâneos, e estão apresentados nas Figura 7.2, 7.3 e 7.4 (casos A, B e C respectivamente). Por limitações de espaço, são apresentadas sequências de apenas seis posições de abertura da válvula, apesar de várias outras terem sido medidas (correspondentes aos pontos do gráfico na Figura 7.1). Este último caso C será comparado posteriormente com o caso de estudo D (abordagem transiente), para as mesmas posições de abertura da PRV.

Nestas figuras de campo de velocidade, a silhueta da válvula de alívio se encontra representada pela cor branca, resultante da máscara aplicada sobre ela durante o processamento das imagens no programa *Insight 3G*.

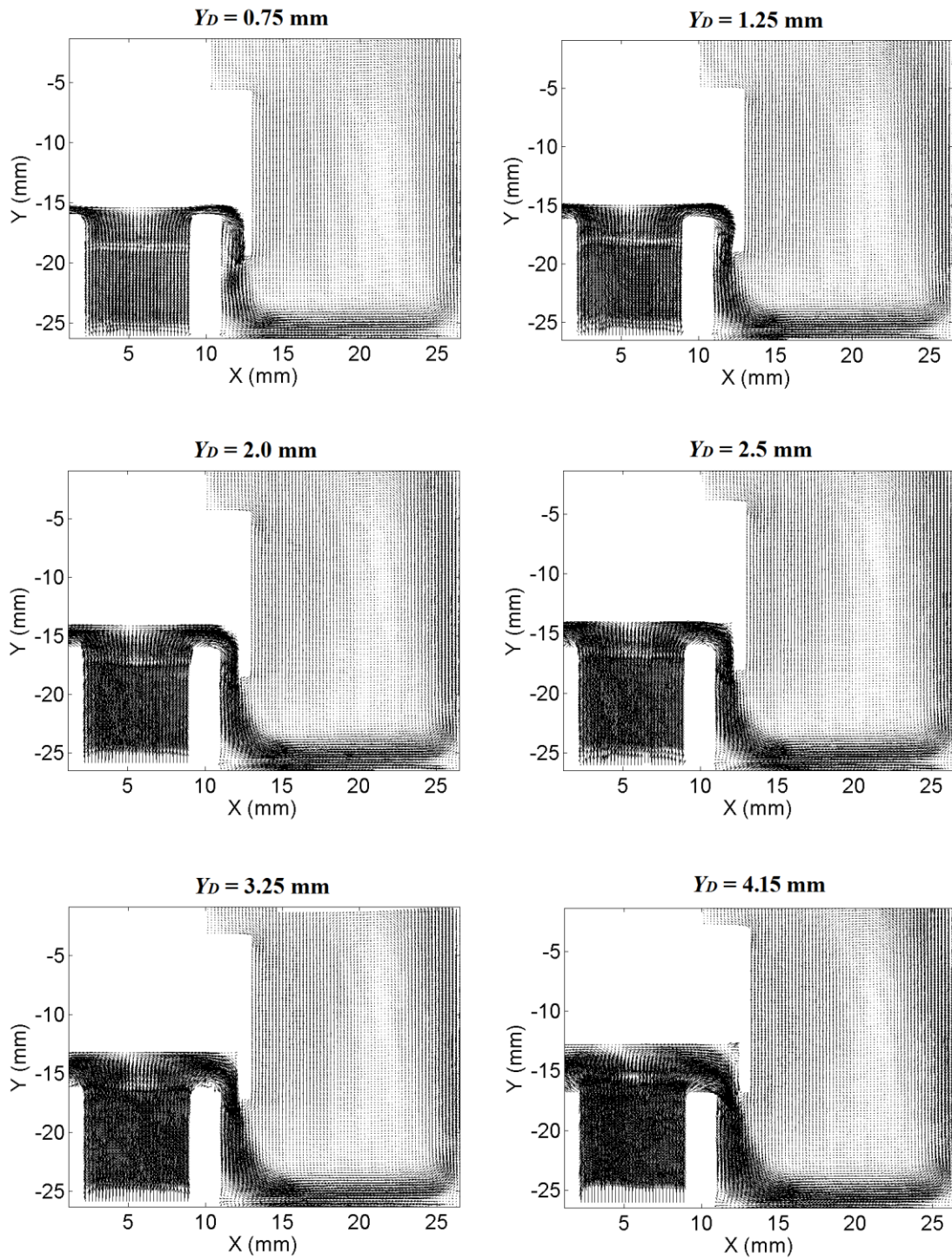


Figura 7.2 - Campos médios de velocidade ilustrando seis diferentes posições de abertura da válvula no caso A, $Re = 7633$.

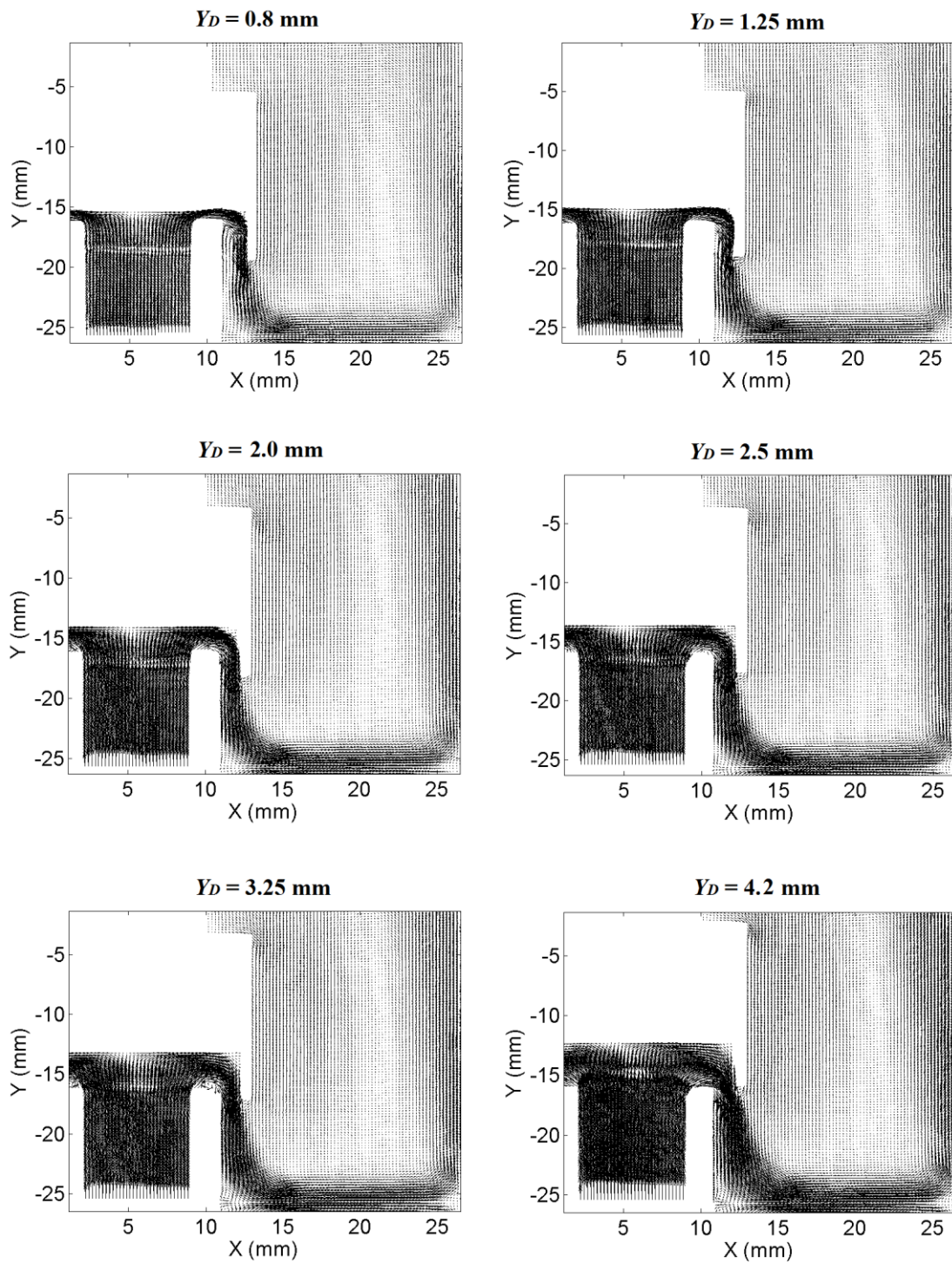


Figura 7.3 - Campos médios de velocidade ilustrando seis diferentes posições de abertura da válvula no caso B, $Re = 12976$.

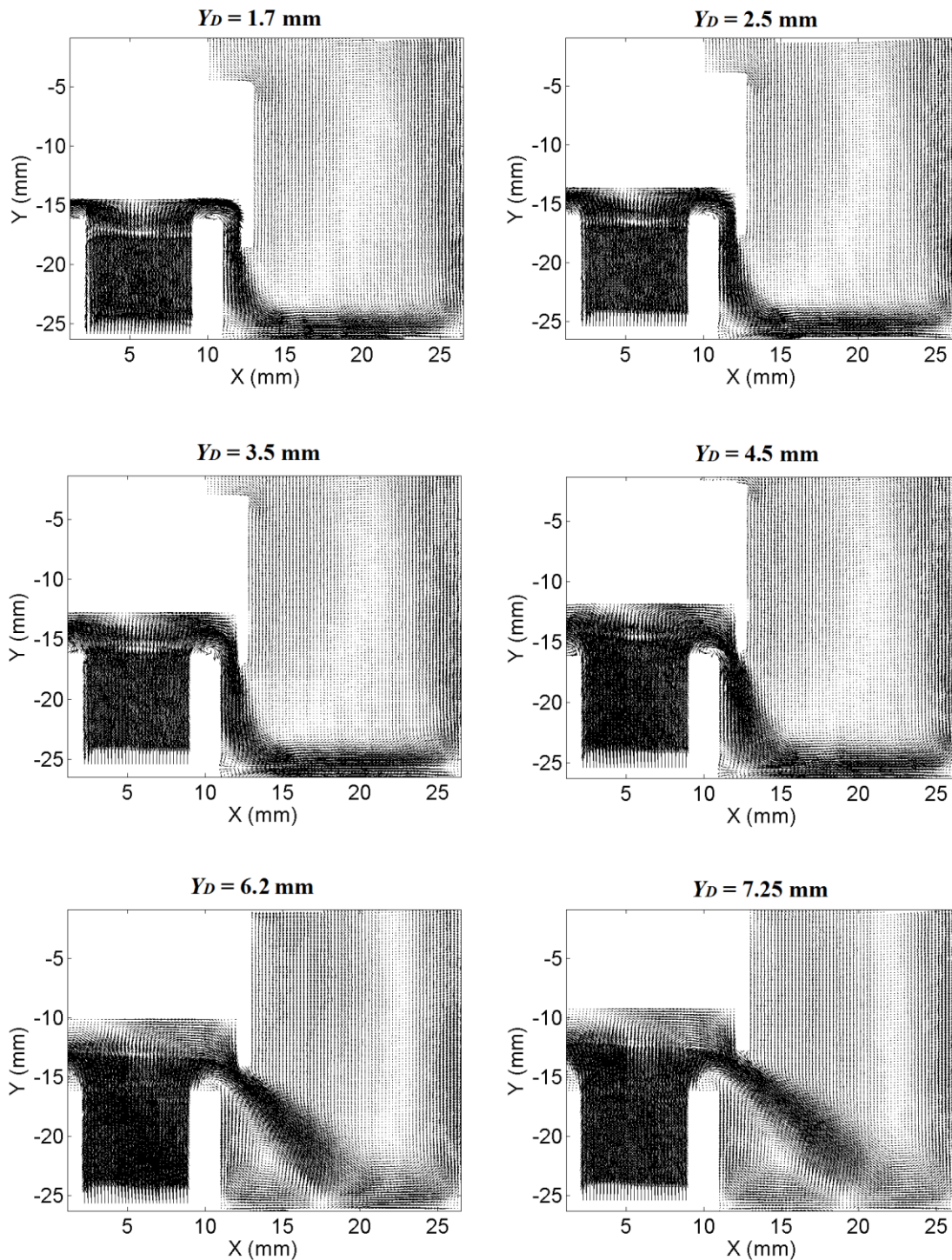


Figura 7.4 - Campos médios de velocidade ilustrando seis diferentes posições de abertura da válvula no caso C, $Re = 19846$.

Uma análise comparativa visual dos campos de velocidade para as mesmas frações de abertura da válvula indica que os padrões de escoamento são semelhantes para as três vazões investigadas. Para o caso C, da Figura 7.4, em que foi possível

a medição de maiores aberturas, nota-se um deslocamento angular pronunciado do fluxo ejetado entre o copo da válvula e o tubo de entrada.

Os resultados do caso C ($Re = 19846$), da Figura 7.4, serão comparados com os campos médios de velocidade em regime transiente (caso D, para a mesma vazão principal) na Figura 7.12. Estes comentários são apresentados na seção 7.2.2.

7.1.3. Avaliação da vazão de descarga

A vazão volumétrica Q_S na descarga da válvula de alívio pode ser calculada pela integração de perfis de velocidade em regiões específicas dos campos médios de velocidade, de acordo com a equação (40), que pode ser discretizada de maneira a utilizar os dados obtidos das medições com a técnica *PIV*.

A vazão foi calculada a partir de perfis em três regiões diferentes para comparação, como ilustrado na Figura 7.5. Como pode se observar nos campos de velocidade das Figuras 7.2 a 7.4, as imagens foram registradas de um lado só da câmara na qual a válvula é situada, devido à simetria circunferencial; entretanto, o lado esquerdo da imagem não foi delimitado pelo eixo central de simetria no meio do tubo de entrada, como poderia ter sido, i.e., o tubo inteiro aparece nas imagens. Assim, a extração de dois dos perfis de integração (1 e 2) é feita no tubo vertical de entrada de diâmetro D_b . O terceiro perfil (3) é extraído da região de fluxo de saída do copo invertido. A Figura 7.5 ilustra duas alturas diferentes durante a abertura da válvula, quando a borda da saia da válvula está abaixo e acima do topo do tubo de entrada (esquerda e direita, respectivamente).

$$Q_S = \int_A \vec{V} \cdot d\vec{A} , \quad (40)$$

sendo $Q_{S1} = Q_{S2} = 2\pi \int_0^R |V_y(r)| \cdot r \cdot dr$ e $Q_{S3} = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} -|V_y(r)| \cdot r \cdot dr$ ou $Q_{S3} = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} -|V_y(r)| \cdot r \cdot dr + 2\pi \int_0^{Y_{D'}} |V_r(r)| \cdot r \cdot dy$, para os casos ilustrados na esquerda e na direita da Figura 7.5, respectivamente.

Para cada caso de estudo em regime permanente (A, B e C), nos quais se espera que $Q_{S1} = Q_{S2} = Q_{S3} = Q_S = Q$, a vazão foi estimada como a média das

vazões calculadas a partir dos três perfis extraídos de acordo com a Figura 7.5 e a equação (40). Este mesmo procedimento foi empregado no resultados da análise em regime transiente apresentada em seções a seguir. O erro médio percentual nas vazões medidas foi estimado entre 10% e 14%, a partir da comparação com a vazão Q imposta pela bomba, que era conhecida.

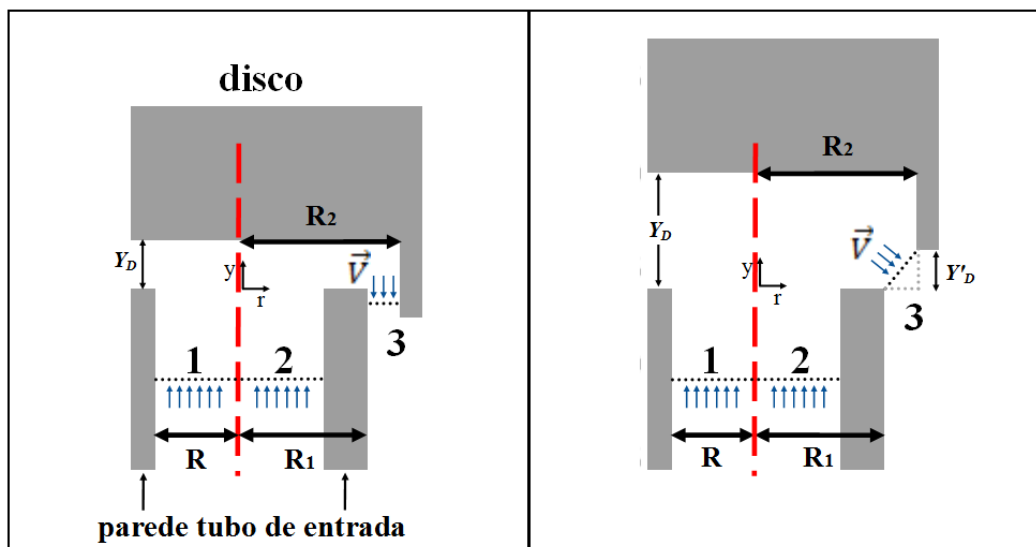


Figura 7.5 – Áreas de referência para o cálculo da vazão de descarga na PRV com integração do campo de velocidade. r é a coordenada radial, com origem no eixo de simetria circunferencial.

Este erro não é desprezível, e ocorre devido à disponibilidade limitada de vetores nos campos *PIV*, i.e., o erro na integração depende da resolução espacial das medições. Depende também da qualidade das imagens e da quantidade de vetores espúrios. Para melhorar a qualidade das imagens, especialmente nas regiões de superposição de acrílico, uma possível alternativa seria adicionar uma solução salina à água; esta solução aproxima bastante os índices de refração sólido-fluido, reduzindo as distorções. Pela facilidade com que esta solução oxida, sua utilização é bastante trabalhosa, e julgou-se que para estes experimentos não valeria a pena. A Figura 7.6 mostra as vazões de alívio medidas contra a fração de abertura da válvula, e seu afastamento em relação às vazões da bomba Q correspondentes, para os casos A, B e C.

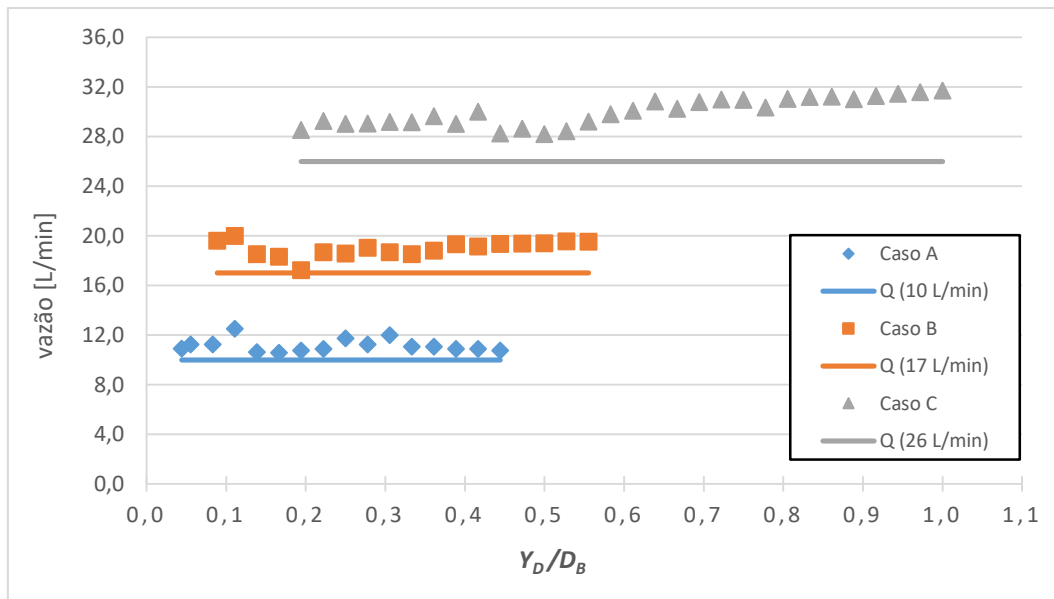


Figura 7.6 - Vazões de descarga Q_s contra a fração de abertura, calculadas por meio da integração do campo de velocidade nos casos testados em regime permanente.

7.1.4. Coeficiente de descarga

Com os dados de pressão e vazão de descarga, é possível avaliar o coeficiente de descarga em regime permanente contra a fração de abertura, usando valores médios de ΔP e Q_s para cada fração de abertura, empregando a equação (18).

As curvas resultantes de C_d permanente contra a fração de abertura são mostradas na Figura 7.7 para os casos testados (A, B e C). Estas curvas podem ou não ser representativas de uma descarga típica em transiente brusco, e isso será avaliado na próxima seção, na qual os resultados do caso transiente D são apresentados.

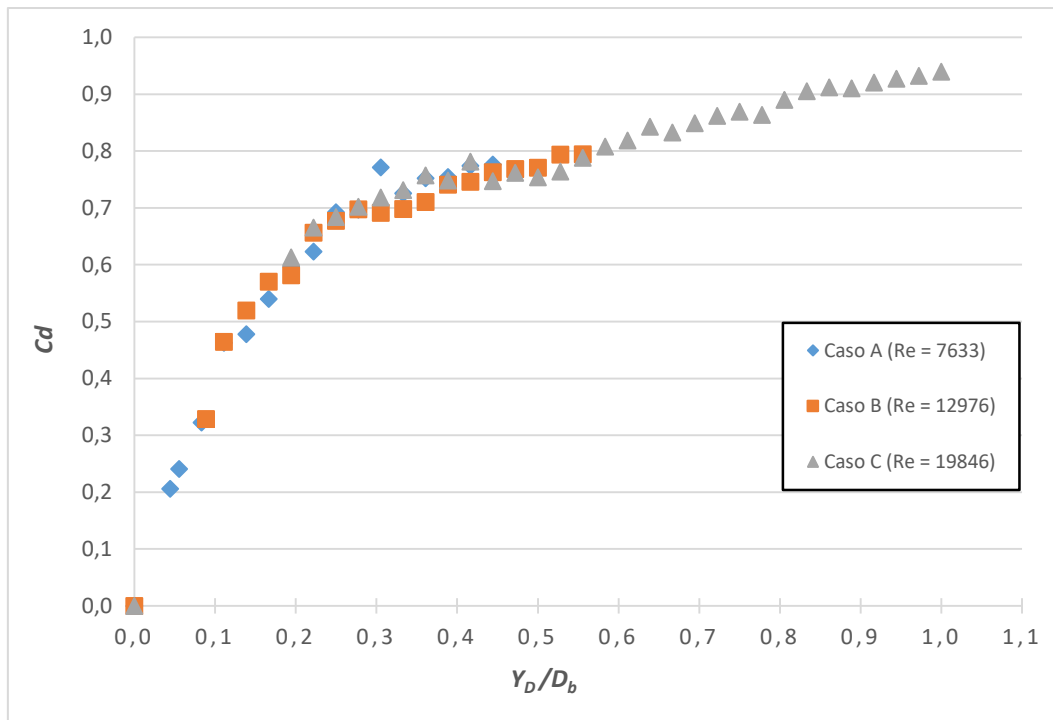


Figura 7.7 - Coeficiente de descarga em regime permanente contra a fração de abertura da válvula de alívio, para os casos A, B e C.

Nota-se, na Figura 7.7, que o coeficiente de descarga não varia significativamente com relação às três diferentes vazões testadas, i.e., as curvas praticamente se sobrepõem. Além disso as curvas mostram um comportamento que se aproxima de um comportamento distinto em duas regiões. A primeira região da curva possui derivada mais acentuada (C_d aumentando mais rapidamente com Y_D). Esta região inicial se estende até aproximadamente 25% da fração de abertura da válvula. Cabe ressaltar que, acima de 20% de fração de abertura, a área superficial de descarga pelo copo da válvula passa a ser maior que a área da seção reta do tubo de entrada. Na região da direita da curva de C_d , depois de 25% de fração de abertura, o coeficiente cresce com derivada menor até que a fração de abertura atinge 100%.

A Figura 7.8 mostra uma comparação da média dos resultados de C_d permanente obtidos experimentalmente no presente trabalho para as três vazões estudadas, com resultados obtidos através de simulação computacional para um modelo transiente bidimensional de uma válvula de alívio tipo mola simplificada, desenvolvido por pesquisadores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio utilizando o programa Fluent [10].

Os resultados experimentais e numéricos não coincidem exatamente, sendo os valores de C_d numéricos mais baixos na primeira região (mais à esquerda) da curva e mais altos na segunda região. Um dos possíveis motivos para o modelo obter resultados que diferem dos experimentos é que ele utiliza um diferencial de pressão constante para todas as frações de abertura, enquanto nos resultados experimentais do presente trabalho o diferencial de pressão muda, como foi observado na Figura 7.1. Além disso, o cálculo de C_d tem uma incerteza experimental de $\pm 15,4\%$ para uma confiabilidade metrológica de 95%, e encontra-se descrito no Apêndice A.3.

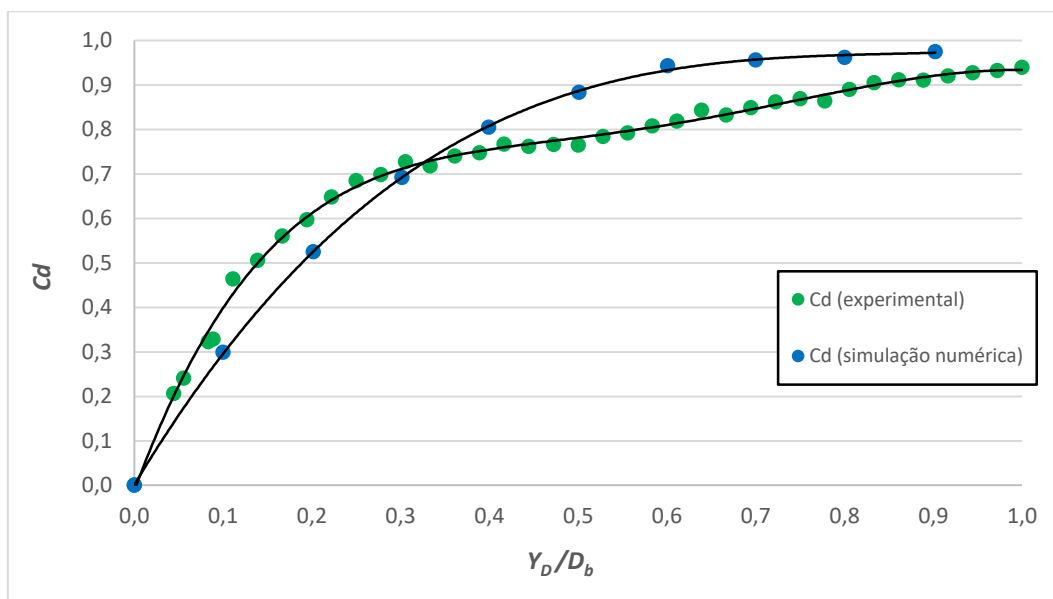


Figura 7.8 - Coeficiente de descarga contra a fração de abertura da válvula de alívio, comparando a média dos resultados dos casos A, B e C com resultados obtidos através de simulação computacional [10].

7.2.

Avaliação dos campos de velocidade e coeficiente de descarga em regime transiente

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nos testes em regime transiente rápido, caso D, para uma vazão principal $Q = 26$ L/min ($Re = 19846$) e 100 realizações instantâneas, como definido na tabela 6.2, relacionando medições simultâneas do diferencial de pressão, deslocamento e campos de velocidade durante o alívio transiente da PRV.

Inicialmente serão apresentados os resultados do comportamento do diferencial de pressão e deslocamento da PRV submetida a transientes de bloqueios classificados como sendo rápidos, o que permite observar uma caracterização preliminar da válvula de alívio [13]. Nas seções subsequentes são apresentados os campos de velocidade médios (das 100 realizações instantâneas), que permitem visualizar a estrutura do campo do escoamento e obter os valores da vazão de descarga transiente durante a elevação da PRV, para posteriormente calcular o coeficiente de descarga da mesma.

7.2.1. Medidas de pressão e deslocamento

As Figura 7.9, Figura 7.10 e 7.11 mostram curvas de diferencial de pressão (tomadas a montante e a jusante da PRV) e deslocamento da válvula. As figuras correspondem a três exemplos de realizações instantâneas, entre as 100 realizações conduzidas no total (vermelho para pressão e azul para deslocamento). À exceção das pequenas variações de *offset* inicial no tempo, o comportamento da válvula é bastante repetitivo entre as realizações independentes. A linha cinza nos gráficos de pressão corresponde à pressão de ajuste P_{set} . Pode-se observar que no instante de tempo em que a pressão cruza com a de ajuste, o deslocamento da válvula se inicia, normalmente com um forte pico inicial.

Em todas estas figuras, na primeira coluna pode-se observar o comportamento do diferencial de pressão ΔP e do deslocamento Y_D (escalas dimensional e adimensionalizada pelo diâmetro D_b do tubo de entrada), até que as condições sejam restabelecidas e a válvula volte ao assento. Já na segunda coluna pode-se observar os mesmos dados com mais detalhes na região de início do alívio, de $t = 0$ até 1s na escala de tempo.

As curvas nas cores marrom (pressão) e verde (deslocamento) correspondem a médias ponto a ponto, envolvendo as 100 realizações do caso de estudo. O cálculo comum da média ponto a ponto não é satisfatório, pois os picos são muito estreitos, fortes, e anulam uns aos outros devido ao *offset* mencionado. Isto pode ser claramente observado nas curvas médias das figuras 6.8 à figura 6.12 (plotadas para definir os casos de estudo, na seção 6.3), que não representam os picos mais

acentuados, e portanto, não mostram informações que podem ser importantes para a caracterização completa do fenômeno transiente.

Tendo em consideração a questão anterior, na preparação dos gráficos do caso D, as curvas médias apresentadas são calculadas de outra forma, colocando em fase os picos com base no início da primeira subida (tanto nas curvas de deslocamento quanto de pressão). Com isso as curvas médias (marrom e verde) se tornam fiéis representações do comportamento instantâneo típico de realizações do evento de bloqueio e alívio para o caso D em questão.

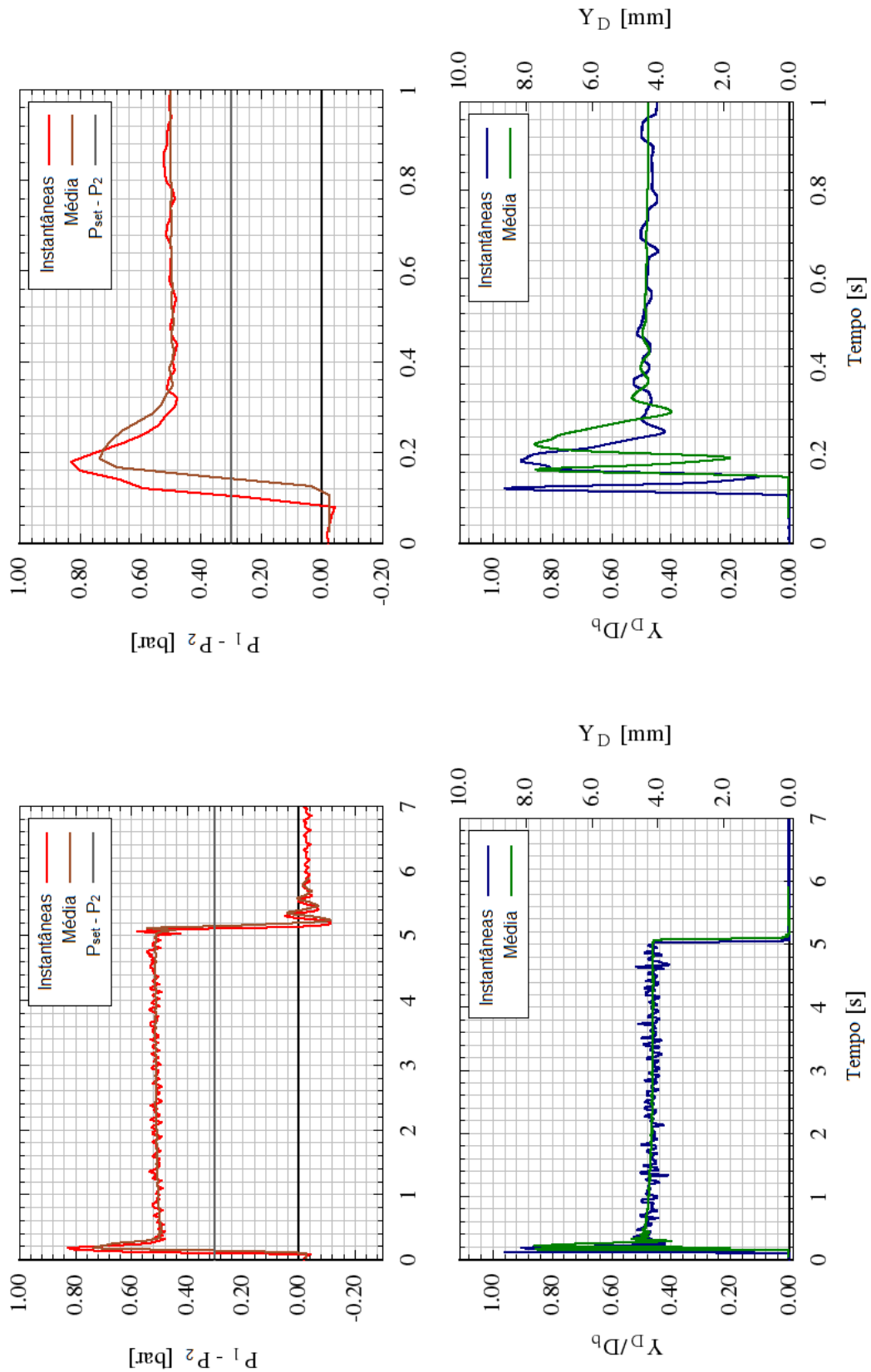


Figura 7.9 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes em regime transiente rápido para o caso D ($Re = 19846$). Nota-se o *offset* temporal da realização instantânea, mais para a esquerda com relação à média das 100 realizações instantâneas.

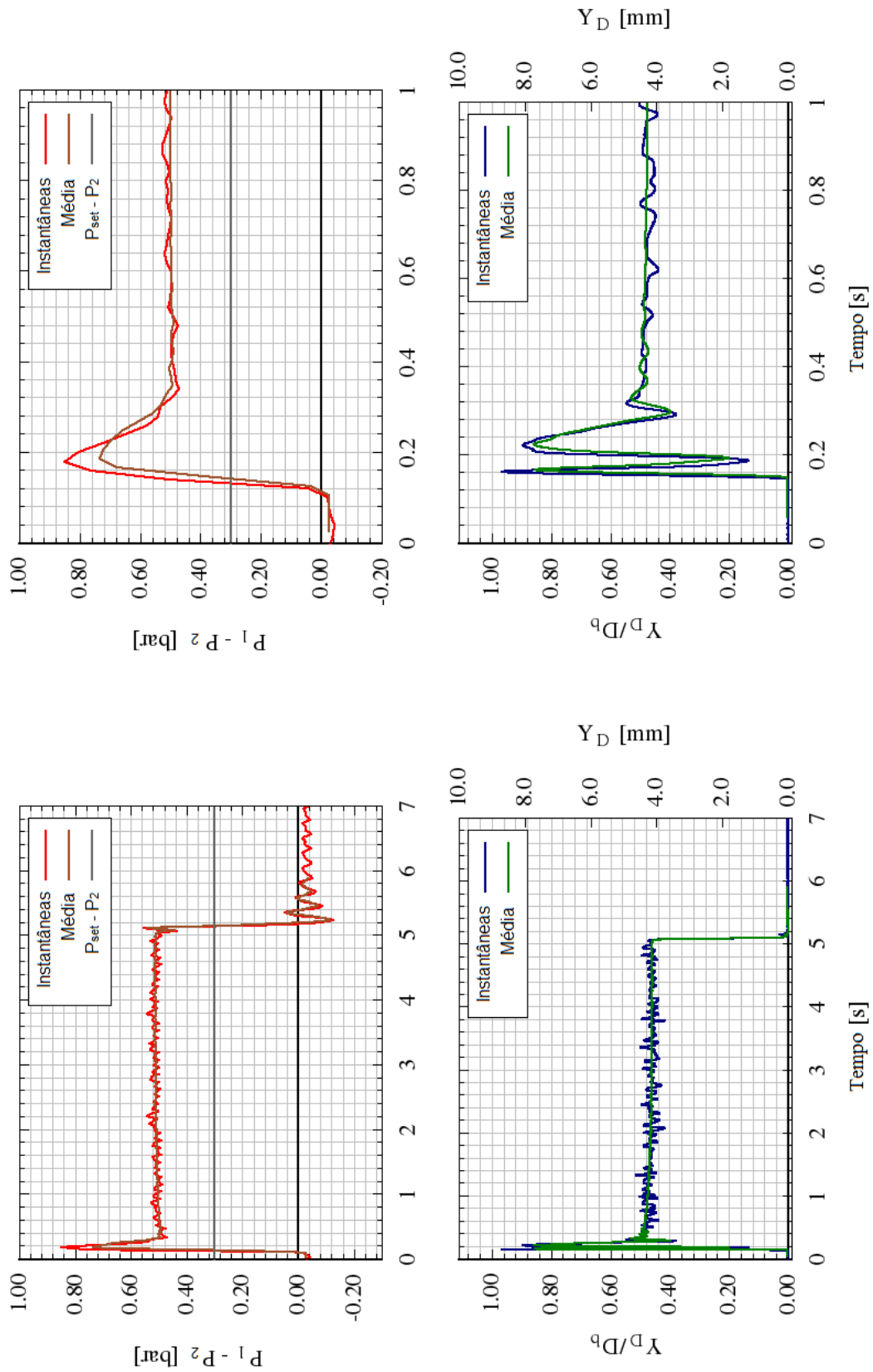


Figura 7.10 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes em regime transiente rápido do caso D ($Re = 19846$). Nota-se boa concordância (sem *offset* considerável) entre realização instantânea e média das 100 realizações instantâneas.

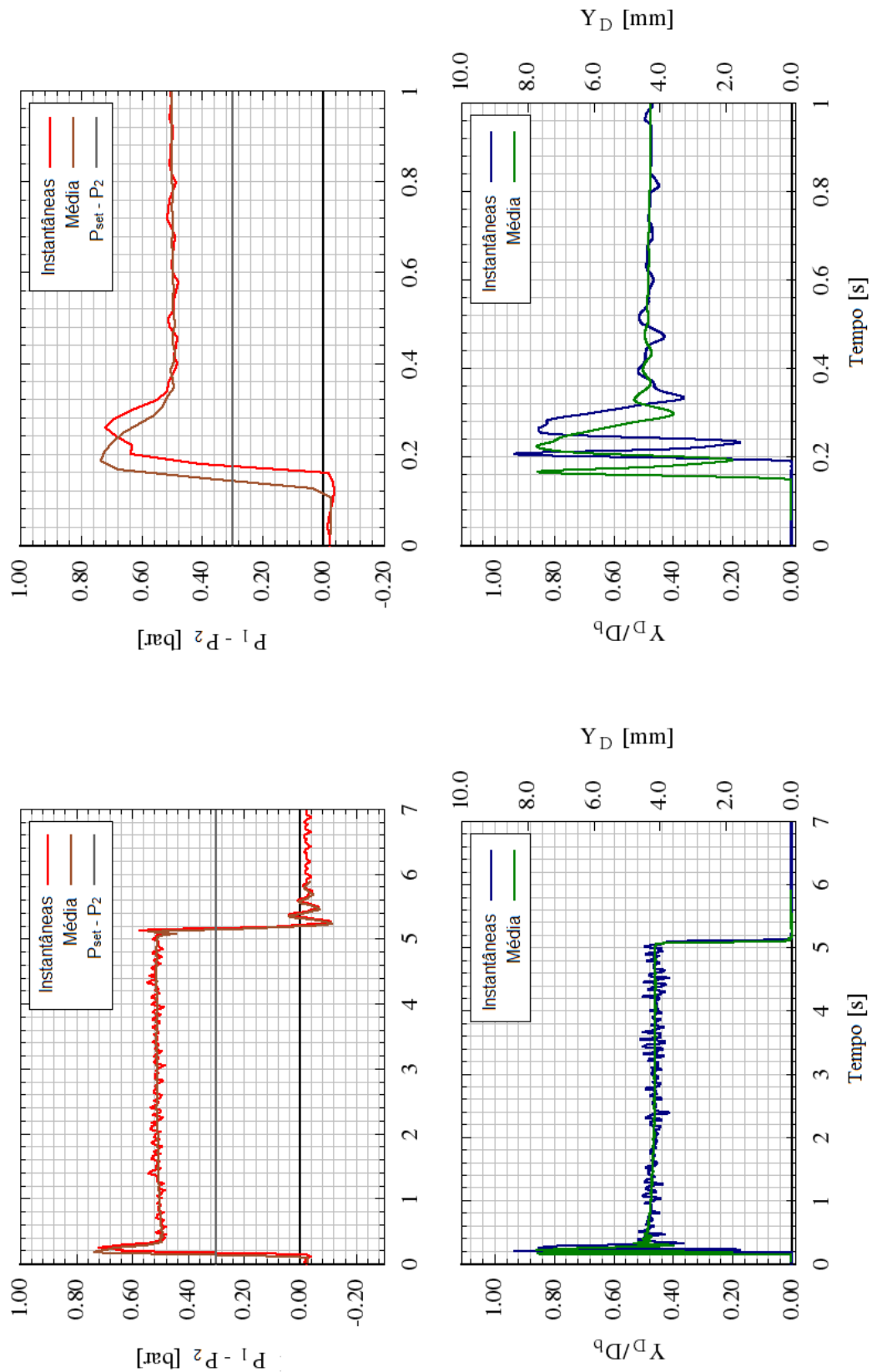


Figura 7.11 - Gráficos de diferencial de pressão e fração de abertura na PRV, resultantes dos testes em regime transiente rápido para o caso D ($Re = 19846$). Nota-se um leve *offset* temporal da realização instantânea, mais para a direita com relação à média das 100 realizações instantâneas.

Estima-se, a partir destes dados das Figura 7.9, Figura 7.10 e 7.11, que a sobrepressão média na PRV para este caso seja de aproximadamente 35%, apresentando assim um valor maior do que o estipulado em normas (máximo de 25% para líquidos) [3]. Entretanto, valores de sobrepressão acima de 25% são encontrados na prática, mesmo para válvulas industriais adquiridas como certificadas, como foi evidenciado por Carneiro (2011), que mediu sobrepressões de até mais de 50% em seu estudo experimental com válvula industrial.

7.2.2.

Campo de escoamento ao redor da válvula de alívio

Para obter os resultados dos campos de velocidade nos testes em regime transiente rápido foi empregada a metodologia descrita na seção 6.6, extraindo os campos médios de velocidade através da técnica *PIV* com média em fase (*phase-average*), para diferentes frações de abertura ao longo do primeiro pico de subida da válvula (ver gráficos de fração de abertura, gráficos na parte inferior direita das Figura 7.9, Figura 7.10 e 7.11).

As fortes oscilações observadas na posição do copo da válvula, mostradas pelas medições instantâneas com o sensor de deslocamento, indicam ser impossível estabelecer-se uma relação unívoca entre o tempo e o deslocamento da válvula. Em outras palavras, a mesma fração de abertura é observada em diferentes instantes de tempo ao longo da realização de um evento de abertura transiente rápida. Por esta razão, as medições em média de fase que serão apresentadas estão restritas ao trecho de subida do primeiro pico de abertura observado nas Figuras 7.9 a 7.11. Obviamente, este fato traz uma limitação à análise comparativa do comportamento do coeficiente de descarga sob condições de regime permanente e transiente. Para resolver esta questão, iniciou-se um estudo utilizando laser e câmera de alta frequência, que forneceriam para o caso transiente campos instantâneos de velocidade para todas as posições instantâneas da válvula, para além do primeiro pico de deslocamento. Infelizmente, a fonte laser de alta frequência disponível no laboratório apresentou problemas que não foram solucionados até a conclusão do presente trabalho. Optou-se então pelo procedimento *phase-average* na primeira subida.

Os campos de velocidade média permitem visualizar a estrutura do escoamento no tubo de entrada, copo, e câmara cilíndrica, além de possibilitar a integração numérica de perfis de velocidade em diferentes regiões para a estimativa dos valores da vazão de descarga transiente durante a elevação da PRV. Estes campos médios, apresentados na Figura 7.12, são gerados a partir de 100 campos instantâneos. A Figura 7.12 ilustra a evolução em apenas seis frações de abertura entre as 13 medidas, por questões de espaço. Da mesma maneira que no caso dos campos de regime permanente, a silhueta da válvula de alívio é representada pela cor branca. Vale ressaltar que se analisou a questão da convergência dos campos médios de velocidade. Para $Y_D = 1.5$ mm foram realizadas 200 realizações instantâneas de campos de velocidade, e verificou-se que numericamente os campos médios de 100 e 200 realizações possuíam diferença desprezível.

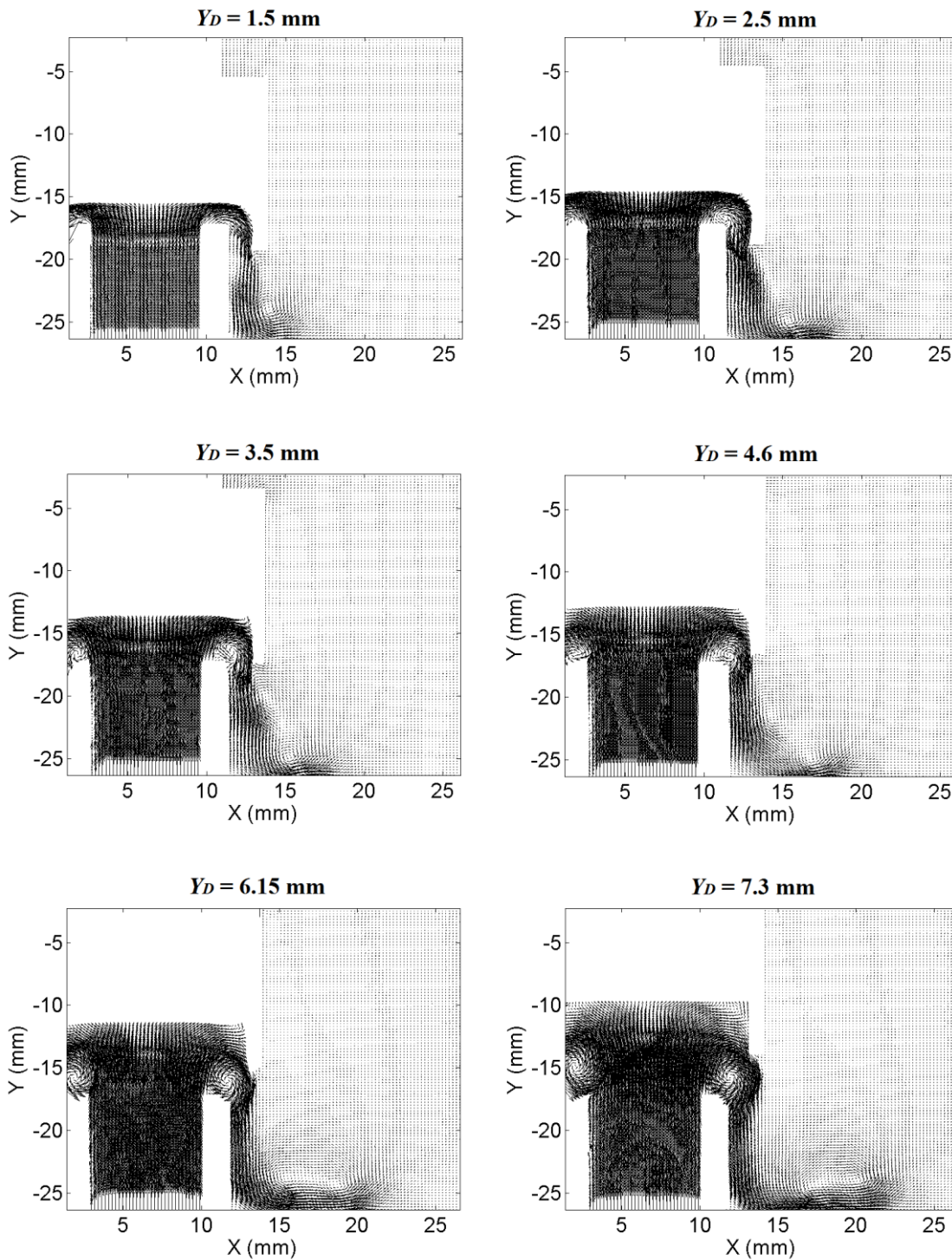


Figura 7.12 - Campos médios de velocidade ilustrando seis posições de abertura da válvula para o caso D, $Re = 19846$.

Uma comparação da evolução dos campos médios de velocidade com Y_D entre os casos de regime permanente e transiente pode ser feita com o auxílio das Figuras 7.4 e 7.12. Enquanto para o caso de regime permanente (Figura 7.4) se

observa a formação de um jato circunferencial que se eleva à medida que a válvula abre, no caso transiente um forte vórtice toroidal é formado na borda superior do tubo de entrada, mantendo o jato sempre na direção vertical, colado ao tubo de entrada.

Na Figura 7.13 são apresentados contornos de magnitude de velocidade média durante o alívio da válvula no caso D, para seis posições de abertura diferentes. Esta figura mostra tanto de forma qualitativa quanto quantitativa as magnitudes de velocidade média, com auxílio de uma escala de cores.

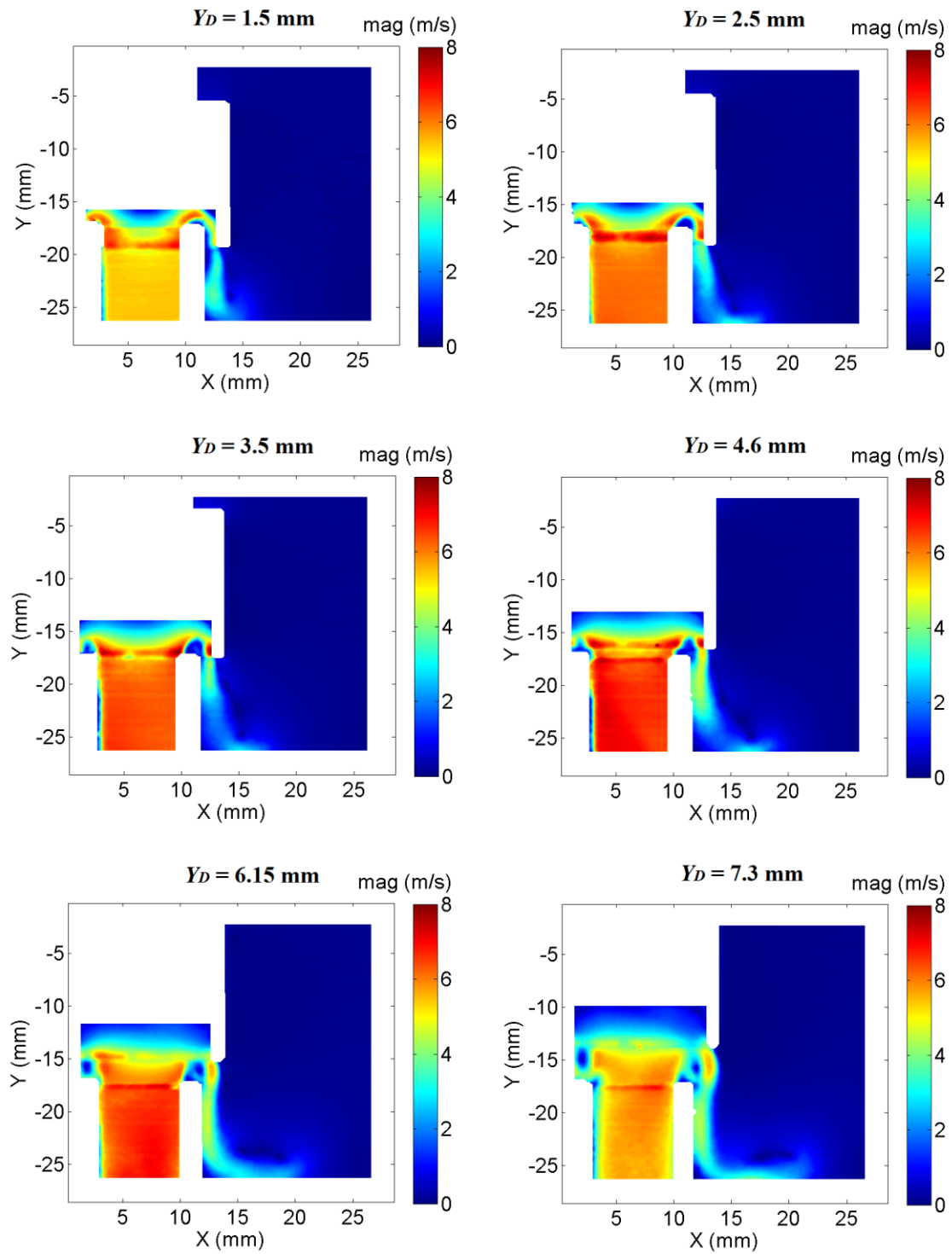


Figura 7.13 - Campos de contorno de magnitude de velocidade média, ilustrando seis posições de abertura da válvula para o caso D, $Re = 19846$.

7.2.3. Avaliação da vazão de descarga

Analogamente ao caso de regime permanente, a vazão de descarga na válvula de alívio, Q_S , pode ser calculada para o caso transiente integrando perfis de velocidade dos campos medidos, com a equação (40). Este procedimento foi ilustrado previamente na Figura 7.5. A vazão foi também calculada para os três pontos de referência ali apontados, sendo que na extração de dois dos perfis de integração (1 e 2) no tubo vertical de entrada, foi feita uma média dessas vazões resultantes, denotada como Q_{Se} . O terceiro perfil (3) foi extraído da região de fluxo de saída do copo invertido (ver Figura 7.5) denotado como Q_{Sj} .

Apesar do cálculo da vazão de descarga pela integração de campos de velocidade média *PIV* ter uma incerteza não desprezível, tem a vantagem de fornecer valores em diferentes regiões (1,2 e 3). Isto possibilitou a observação, por exemplo, de que no caso transiente D a vazão estimada no tubo é consistentemente maior do que aquela estimada no jato formado na saída do copo. Esta diferença pode estar associada à propagação de ondas de pressão características do fenômeno.

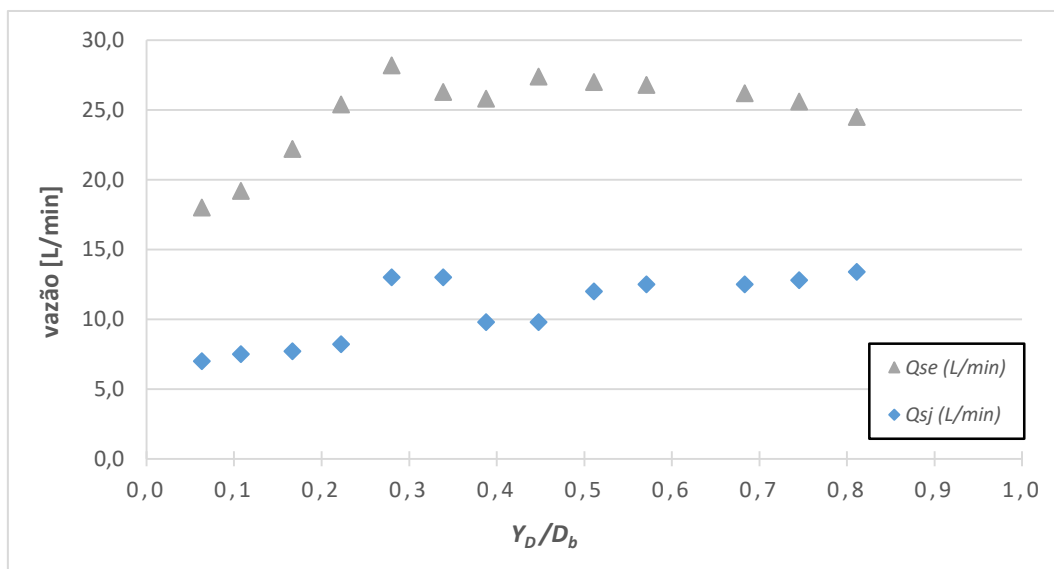


Figura 7.14 - Vazão de alívio transiente (Q_{Se} e Q_{Sj}) contra a fração de abertura da PRV, calculadas integrando o campo de velocidade do caso D, em regime transiente rápido.

7.2.4. Coeficiente de descarga em regime transiente rápido

O coeficiente de descarga transiente foi obtido para diversas posições de abertura da válvula durante seu alívio, originando uma curva que o relaciona com a fração ou porcentagem de abertura da válvula, da mesma forma que nos resultados em regime permanente. É importante reiterar que, pelas vazões já explicadas, o coeficiente de descarga foi obtido apenas para o primeiro pico de subida da válvula.

A Figura 7.15 apresenta os resultados do coeficiente de descarga em função da abertura da válvula, para o caso transiente. Na figura, C_d é calculado utilizando os dois valores de vazão, os medidos no tubo de entrada, Q_{Se} , e no jato, Q_{Sj} . Dois aspectos devem ser enfatizados na análise dos resultados apresentados nesta figura. Como foi mostrado anteriormente, estas vazões são significativamente diferentes quando transientes rápidos estão presentes. Também, a diferença de pressão medida entre a entrada e a saída da válvula não é necessariamente aquela que gera o escoamento na válvula, no caso transiente.

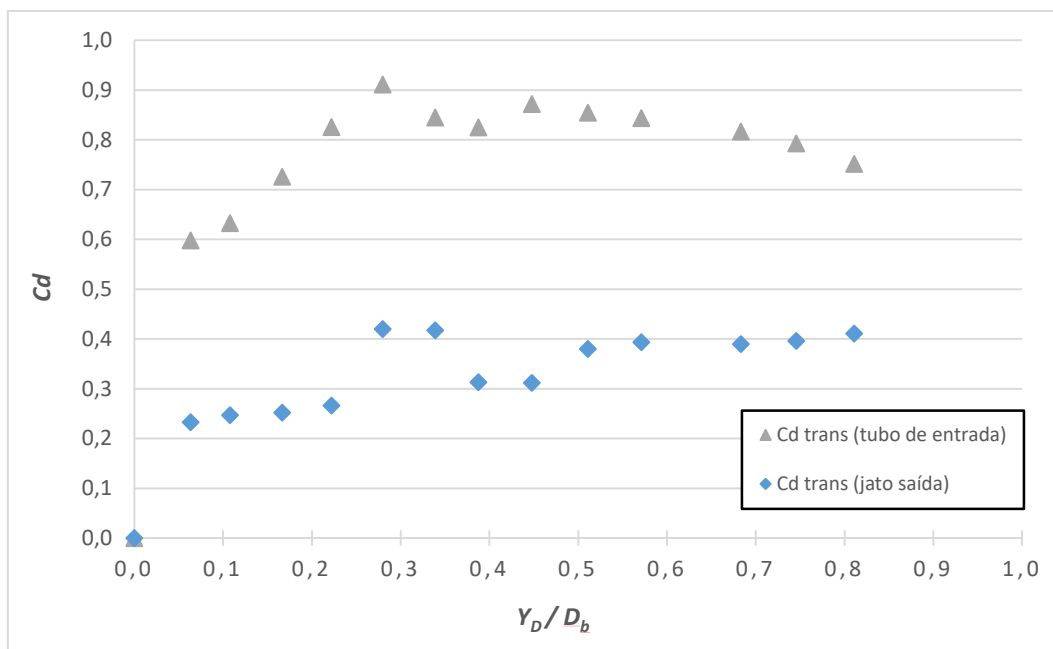


Figura 7.15 - Coeficiente de descarga transiente contra a fração de abertura da válvula de alívio, para o caso D, $Re = 19846$.

Os resultados obtidos indicam que a representação do comportamento transiente da válvula de alívio durante os instantes iniciais de transientes severos por meio de coeficientes de descarga obtidos em condições de regime permanente pode ser significativamente inapropriada, como ilustrado na Figura 7.16. Assim, estes resultados preliminares revelados aqui apontam para a necessidade da continuidade dos estudos.

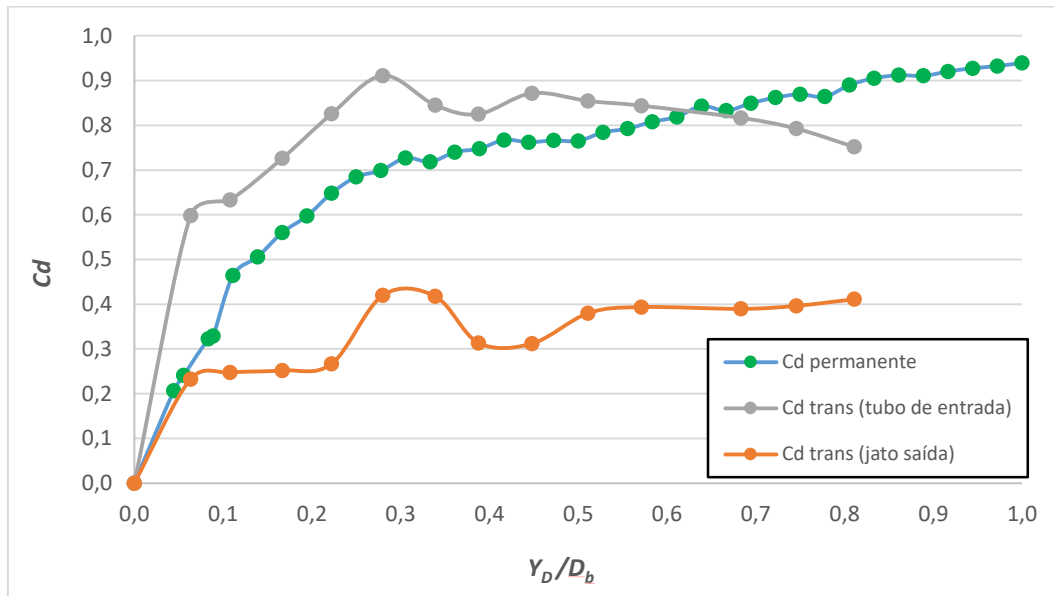


Figura 7.16 - Comparação dos resultados do coeficiente de descarga C_d permanente (Caso C) e C_d transiente (Caso D) em função da fração de abertura da válvula de alívio.

8 Conclusões e sugestões

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental sobre o comportamento dinâmico de uma válvula de alívio de pressão do tipo mola, representada aqui por um modelo de escala reduzida em acrílico. O principal objetivo do trabalho foi obter informações comparativas sobre o comportamento do coeficiente de descarga da válvula obtido sob condições de regime permanente e transiente rápido. Para isto, foi construída uma bancada experimental combinando diferentes técnicas de medição, sincronizadas de modo a obter campos de escoamento, vazão transiente, deslocamento instantâneo do copo da válvula e pressão de entrada e saída ao longo do tempo de abertura da válvula.

A caracterização do escoamento foi feita com o auxílio da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (*PIV-2D*), que permite a obtenção de campos bidimensionais de velocidade instantâneos e médios no plano de simetria da válvula de alívio, e pela integração de perfis de velocidade para calcular a vazão de descarga ou alívio.

A bancada de ensaios foi configurada para realizar tanto experimentos em regime permanente quanto transiente, de modo a analisar a validade de caracterizar o comportamento transiente da válvula através de ensaios em regime permanente. Este procedimento é comumente adotado por fabricantes, que disponibilizam curvas de coeficiente de descarga em função da fração de abertura obtidos somente para regime permanente (fixando a válvula em diferentes posições).

Os resultados obtidos no presente trabalho mostram que os bloqueios transientes hidráulicos classificados como rápidos têm efeitos relevantes na dinâmica das válvulas de alívio de pressão tipo mola, cuja predição pode ser valiosa para sistemas de transportes expostos a altas taxas de crescimento da pressão. Os dados obtidos direcionam para a conclusão de que o comportamento do coeficiente de descarga em regime permanente não proporciona uma adequada representação do comportamento real transiente neste tipo de válvula de alívio para eventos rápidos.

A estimativa da vazão de descarga na válvula de alívio Q_S foi obtida através da integração do campo de velocidade PIV . As medidas de Q_S no tubo de entrada e na saída do copo da válvula, no caso transiente, apresentam valores diferentes para o mesmo instante de tempo, o que pode ser indicativo de efeitos de compressibilidade.

Devido às fortes oscilações na válvula para transientes severos, o coeficiente de descarga foi obtido apenas para a região inicial da curva de abertura (deslocamento) da válvula. Para esta região, foram observadas significativas diferenças entre os coeficientes de descarga transiente e aqueles determinados para regime permanente.

As medições de diferencial de pressão e deslocamento apresentam alta resolução temporal, mas com os problemas técnicos mencionados anteriormente, as medições de campo de velocidade com a técnica PIV ainda não. Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se a utilização de equipamento que permita realizar medições de campo de velocidade com alta frequência temporal para uma análise ainda mais detalhada da dinâmica completa.

9

Referências bibliográficas

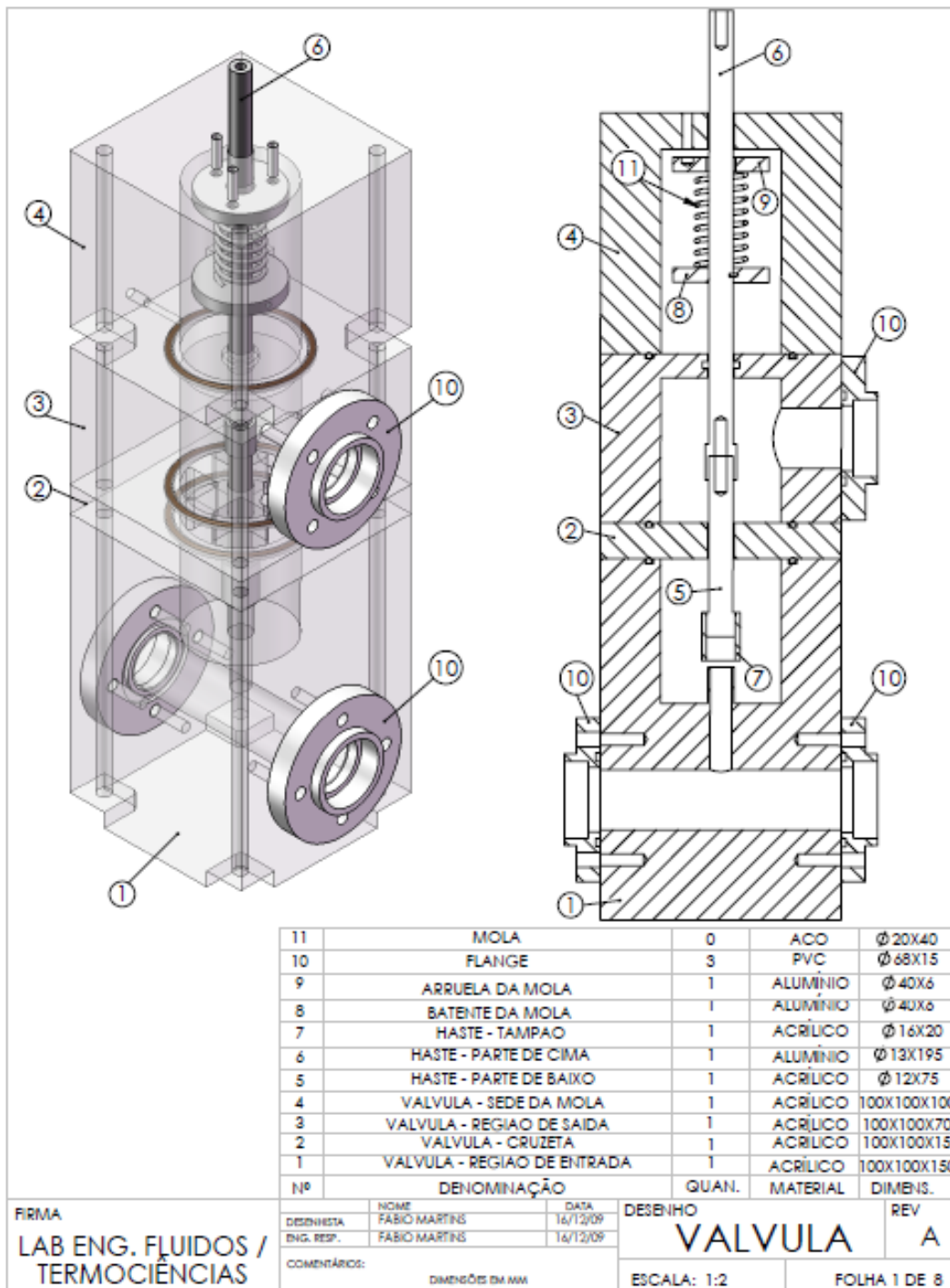
- 1 TRANSPETRO. Petrobras Transporte S.A. **Total de dutos operados no Brasil**. Disponível em: http://www.transpetro.com.br/pt_br/quemsomos/numeros.html. Acesso em: 22/11/2015.
- 2 INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. **NTP 342, Válvulas de seguridad: características técnicas**, 1994.
- 3 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API STANDARD 520 Sizing, Selection and Installation of Pressure-relieving Devices in Refineries**. Eighth edition, 2008.
- 4 RAY, A. **Dynamic modeling and simulation of a relief valve**. Simulation Councils, 1978, 31 (5), p. 167–172.
- 5 SALLET, D. W.; NASTOLL, W.; KNIGHT, R. W.; PALMER, M. E.; SINGH, A. **Experimental investigation of the internal pressure and flow fields in a safety valve**. ASME paper, 81-WA/NE-19, 1981.
- 6 CATALANI, L. **Dynamic stability analysis of spring loaded safety valve-elements for improved valves performance through assistance devices**. In Transactions of the 7th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. 1, 1984.
- 7 MACLEOD, G. **Safety valve dynamic instability: An analysis of chatter**. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 107, 1985.
- 8 FRANCIS, J.; BETTS, P. L. **Modelling incompressible flow in a pressure relief valve**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 211, Part E, 1996.
- 9 FRANCIS, J.; BETTS, P. L. **Backpressure in a high-lift compensated pressure relief valve subject to single phase compressible flow**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 11, 1998, p. 55-66.

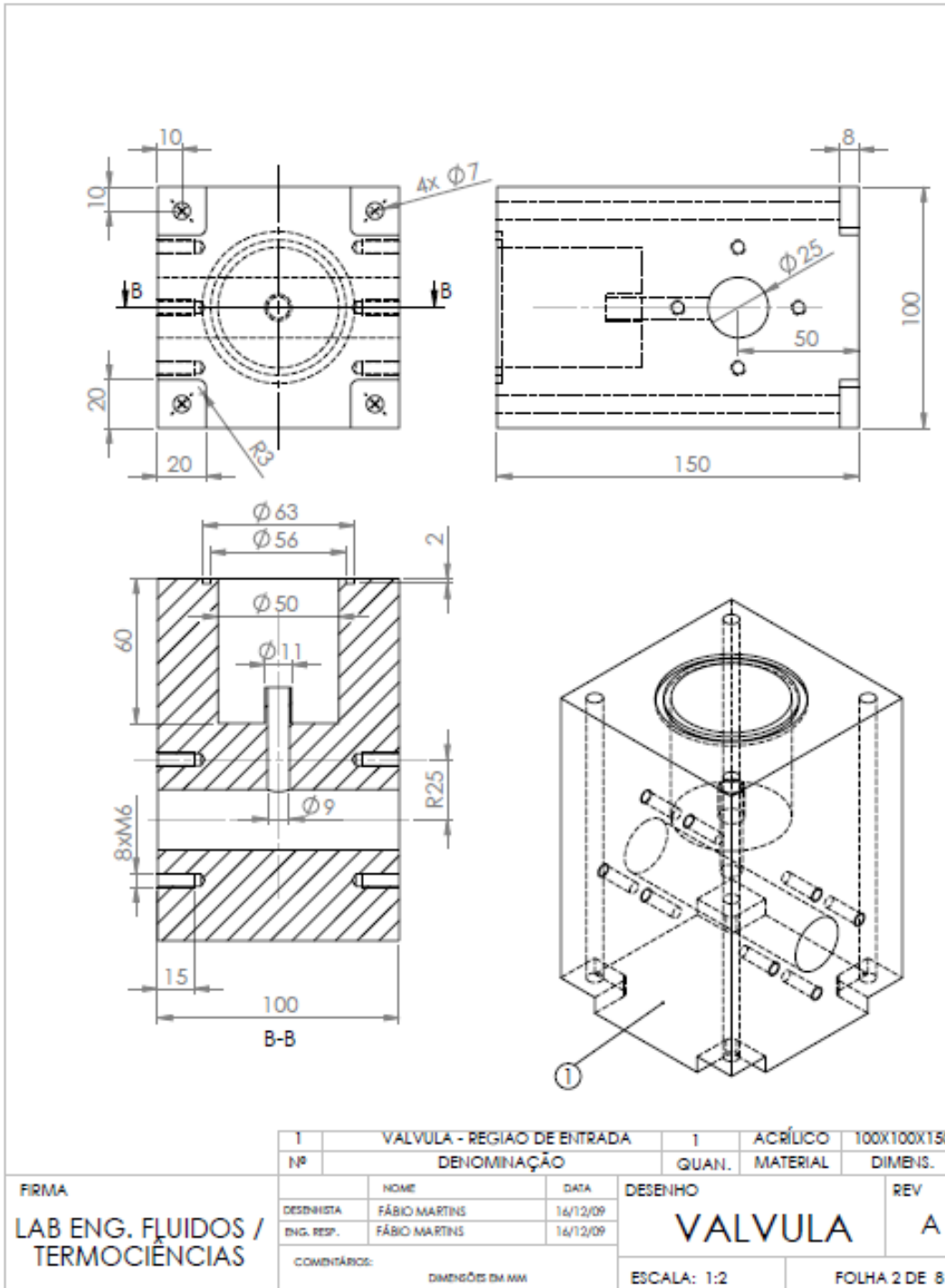
- 10 ORTEGA A. J.; AZEVEDO B. N.; PIRES L. F. G.; NIECKELE A. O.; AZEVEDO L. F. A. **A numeral model about the dynamic behavior of a pressure relief valve**. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, 2008.
- 11 SONG, X. G.; JUNG, J. H.; LEE, H. S.; KIM, D. K.; PARK, Y. C. **2-D dynamic analysis of a pressure relief valve by CFD**. Proceedings of the 9th WSEAS Int. Conference on Applied Computer and Applied Computational Science, 2010.
- 12 CARNEIRO, L. M. **Estudo do comportamento dinâmico de válvula de mola para alívio de pressão em dutos**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2011.
- 13 BABILONIA, M. J.; ABRANTES, J. K.; AZEVEDO, L. F. A. **Experimental study of the response of a pressure relief valve for slow and fast blockage events**. In: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2015.
- 14 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API STANDARD 526 Flanged Steel Pressure Relief Valves**. Fifth edition, 2002.
- 15 RAFFEL, M.; WILLERT, C.; WERELEY, S.; KOMPENHANS, J. **Particle Image Velocimetry: A practical guide**. Springer, Second edition, 2007.
- 16 ADRIAN, R. J.; WESTERWEEL, J. **Particle Image Velocimetry**. Cambridge University Press, First edition, 2011.
- 17 ABRANTES, J. K.; DE PAULA, I. B.; AZEVEDO, L. F. A. **Medição de escoamentos turbulentos utilizando Velocimetria por Imagem de Partículas**. In: Carmo, Assi, Meneghini, Aranaha, Volpi. Turbulência. 1ed. São Paulo: ABCM USP, 2012, v. 8, p. 133-209.
- 18 SÁNCHEZ, F. P. **Estudo experimental do escoamento de fluido newtoniano em contração abrupta axissimétrica com a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.
- 19 LA VISION. **Flow master manual**. Goettingen, Germany, 2011.
- 20 MELIANDE P.; NASCIMENTO E. A.; LACERDA R. F. **Transient Evaluation for LPG and oil pipelines**. Proceedings of the 8th International Pipeline Conference, IPC2010-31323, 2010.

- 21 WYLIE, E. BENJAMIN; L. STREETER. **Fluid Transients in Systems**. Prentice Hall, NJ 07458, 1993.
- 22 ISO GUM, Avaliação de dados de Medição: **Guia para a expressão de incerteza de medição**, 1ª edição brasileira, 2008.
- 23 TANAKA, M.; GIRARD, G.; DAVIS, R.; PEUTO, A.; BIGNELL, N. **Recommended table for the density of water between 0 degrees C and 40 degrees C based on recent experimental reports**. Metrologia, V. 38, p. 301-309, 2001. ISSN 0026-1394.

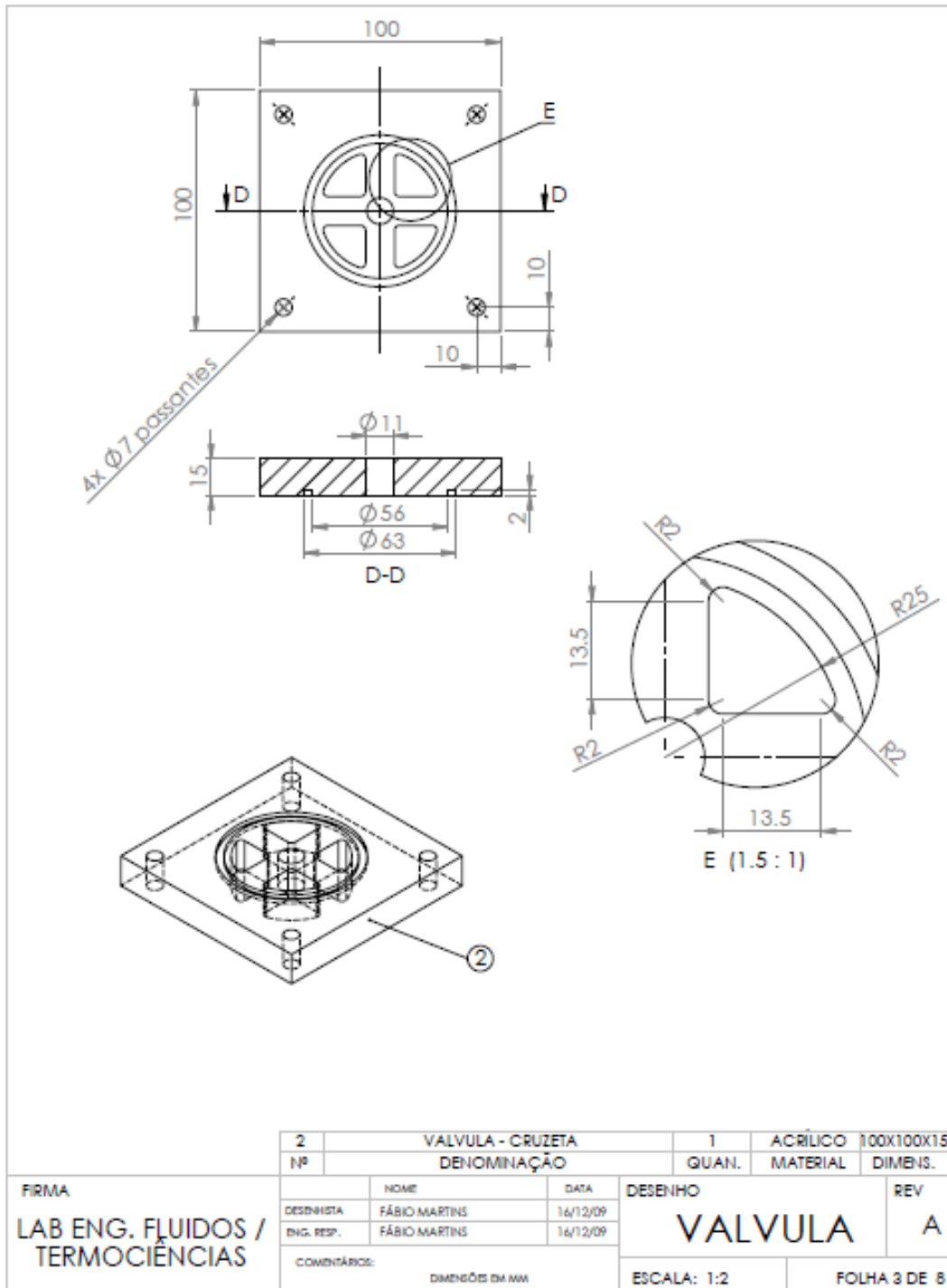
10 Anexos

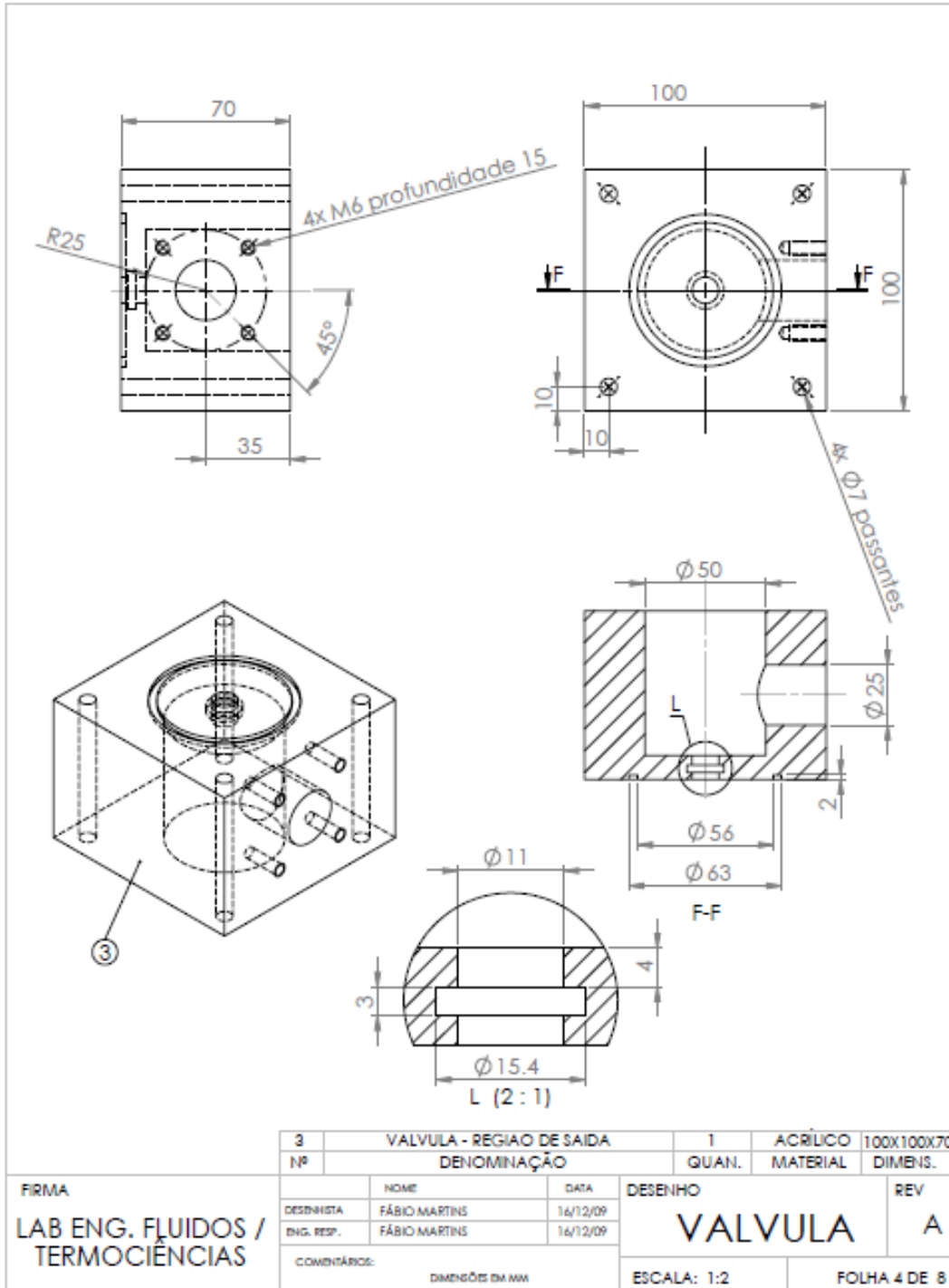
10.1. Desenho Técnico da Válvula de alívio em Acrílico



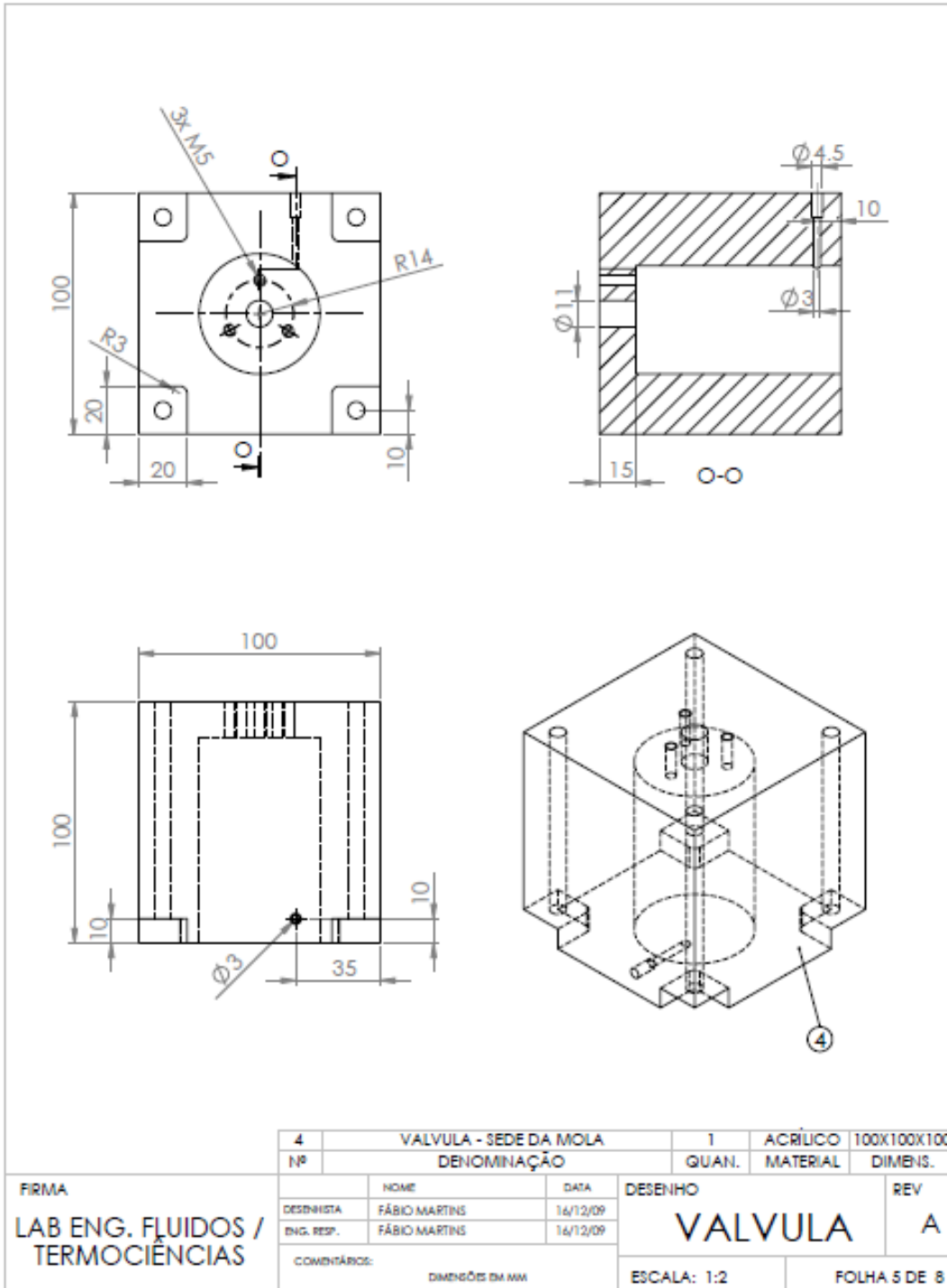


1			VALVULA - REGIAO DE ENTRADA	1	ACRÍLICO	100X100X150
Nº			DENOMINAÇÃO	QUAN.	MATERIAL	DIMENS.
FIRMA		LAB ENG. FLUIDOS / TERMOCIÊNCIAS	DESENHO	VALVULA		REV A
DESENHISTA	FÁBIO MARTINS	DATA	16/12/09	ESCALA: 1:2		FOLHA 2 DE 8
ENG. RESP.	FÁBIO MARTINS	DATA	16/12/09			
COMENTÁRIOS:			DIMENSÕES EM MM			

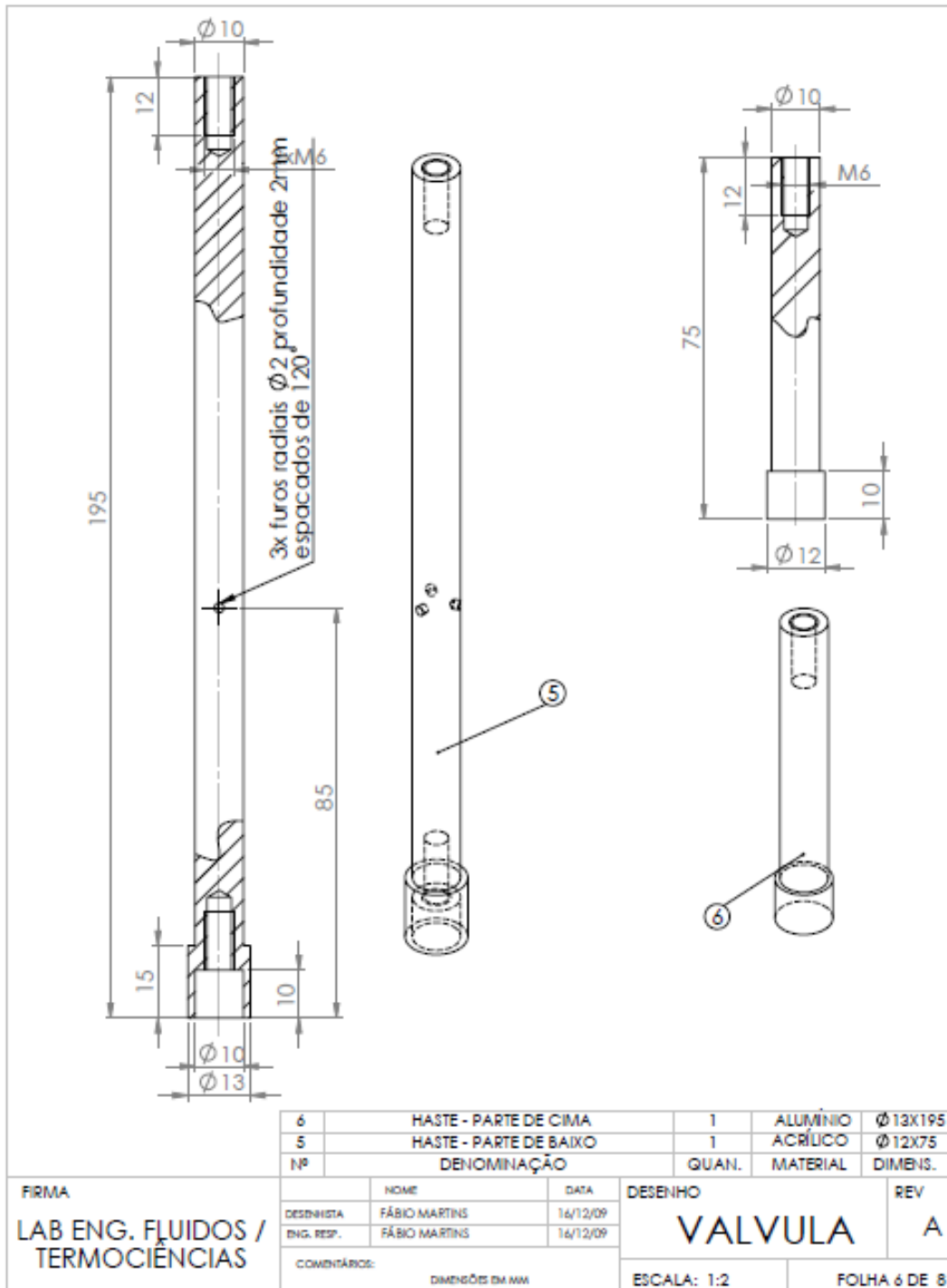


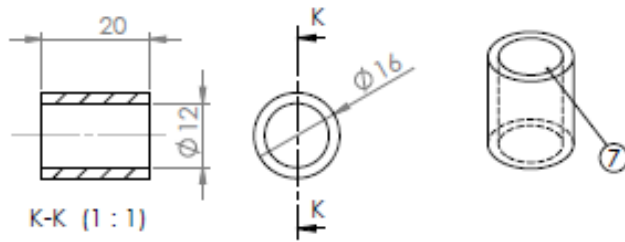


3	VALVULA - REGIAO DE SAIDA	1	ACRÍLICO	100X100X70
Nº	DENOMINAÇÃO	QUAN.	MATERIAL	DIMENS.
FIRMA	NOME	DATA	DESENHO	REV
LAB ENG. FLUIDOS / TERMOCIÊNCIAS	DESENHISTA	FÁBIO MARTINS	VALVULA	A
	ENG. RESP.	FÁBIO MARTINS		
COMENTÁRIOS:		ESCALA: 1:2	FOLHA 4 DE 8	
DIMENSÕES EM MM				



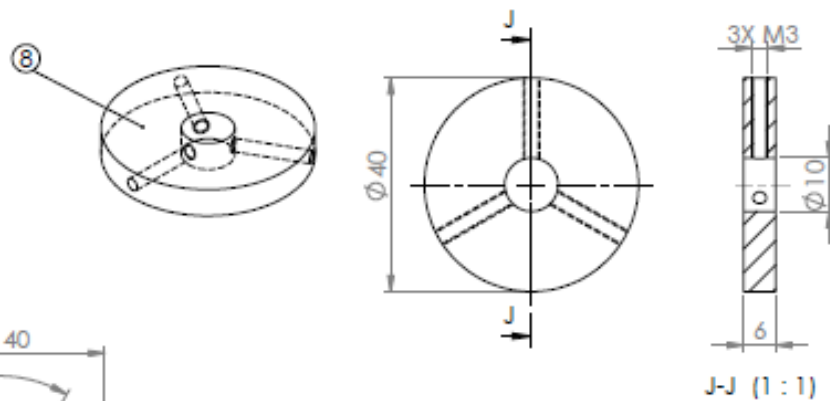
FIRMA	4		VALVULA - SEDE DA MOLA	1	ACRILICO	100X100X100
	N°		DENOMINAÇÃO	QUAN.	MATERIAL	DIMENS.
LAB ENG. FLUIDOS / TERMOCIÊNCIAS	DESENHISTA	FÁBIO MARTINS	DATA	DESENHO		REV
	ENG. RESP.	FÁBIO MARTINS	14/12/09	VALVULA		A
	COMENTÁRIOS:			ESCALA: 1:2	FOLHA 5 DE 8	
			DIMENSÕES EM MM			



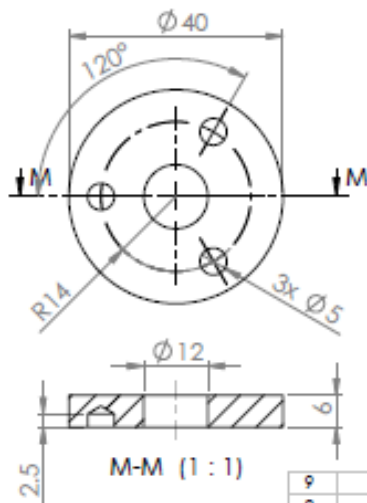


K-K (1 : 1)

A peça 7 deve ser colada a peça 5.



J-J (1 : 1)



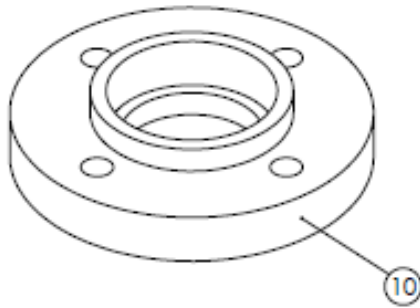
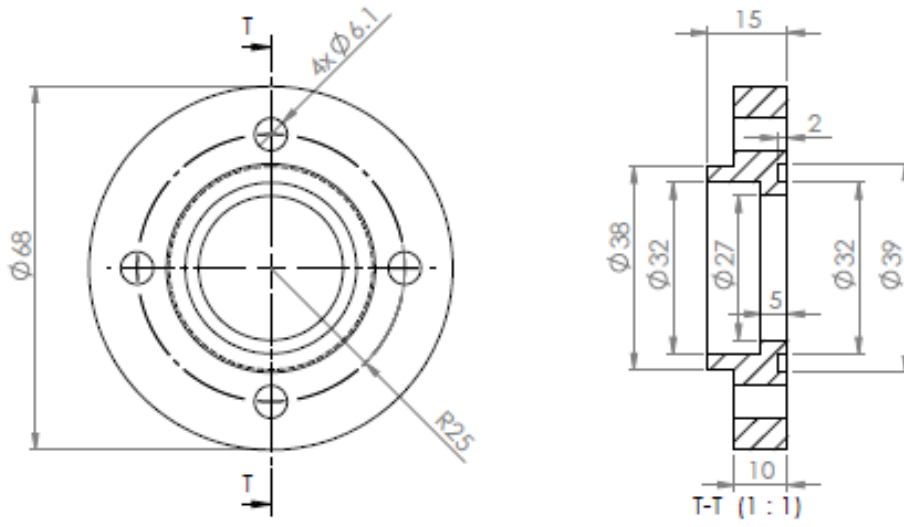
M-M (1 : 1)

9	ARRUELA DA MOLA	1	ALUMINIO	Ø 40X6
8	BATENTE DA MOLA	1	ALUMINIO	Ø 40X6
7	HASTE - TAMPAO	1	ACRILICO	Ø 16X20
Nº	DENOMINAÇÃO	QUAN.	MATERIAL	DIMENS.

FIRMA
LAB ENG. FLUIDOS /
TERMOCIÊNCIAS

DESENHISTA	HOME	DATA
FÁBIO MARTINS		16/12/09
ENG. RESP.	FÁBIO MARTINS	16/12/09
COMENTÁRIOS: DIMENSÕES EM MM		

DESENHO	REV
VALVULA	A
ESCALA: 1:1	FOLHA 7 DE 8



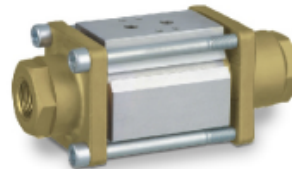
10	FLANGE		3	PVC	Ø 68X15
Nº	DENOMINAÇÃO		QUAN.	MATERIAL	DIMENS.
FIRMA LAB ENG. FLUIDOS / TERMOCIÊNCIAS	DESENHISTA	FÁBIO MARTINS	DESENHO		REV
	ENG. RESP.	FÁBIO MARTINS	VALVULA		A
	COMENTÁRIOS:	DIMENSÕES EM MM			

10.2. Catálogo da Válvula Coaxial de Bloqueio


CXF

2/2-way coaxial valve

nominal specifications	CXF 2/2-way coaxial valve
2/2-way valve	externally controlled / air operated
pressure range	0-600 psi
connection	FNPT threads
function	NC - normally closed NO - normally open
design	pressure balanced, with spring return
body materials parts in contact with media	brass, stainless steel
seal materials seat / dynamic / static	PTFE / FPM / FPM customer to verify seal / seat compatibility with media
media	gaseous-liquid-gelathous-highly viscous-contaminated
actuator connection	FNPT 1/8 with NAMUR pilot valve interface



technical data	CXF 10	CXF 15	CXF 20	CXF 25
orifice mm	DN 10	DN 15	DN 20	DN 25
port connection threads	FNPT 3/8	FNPT 1/2	FNPT 3/4	FNPT 1
Cv A → B	2.5	6.1	10.8	15.0
media temperature	-4 °F to +212 °F	-4 °F to +212 °F	-4 °F to +212 °F	-4 °F to +212 °F
ambient temperature	-4 °F to +140 °F	-4 °F to +140 °F	-4 °F to +140 °F	-4 °F to +140 °F
pneumatic actuation	pilot valve accessory	pilot valve accessory	pilot valve accessory	pilot valve accessory
actuating pressure	60-120 psi	60-120 psi	60-120 psi	60-120 psi
actuation time opening, 60 psi actuating pressure	30 ms to 3000 ms	35 ms to 3000 ms	40 ms to 3000 ms	50 ms to 3000 ms
actuation time closing, 60 psi actuating pressure	50 ms to 3000 ms	60 ms to 3000 ms	60 ms to 3000 ms	70 ms to 3000 ms
vacuum leak rate	< 10 ⁻⁴ mbar·l·s ⁻¹	< 10 ⁻⁴ mbar·l·s ⁻¹	< 10 ⁻⁴ mbar·l·s ⁻¹	< 10 ⁻⁴ mbar·l·s ⁻¹
flow direction	A → B B → A	A → B B → A	A → B B → A	A → B B → A
length L1 / L2	5.71 in / 1.97 in	6.81 in / 2.76 in	7.60 in / 3.15 in	8.35 in / 3.54 in
length L3 / L4	- / -	- / -	- / -	- / -
weight without pilot valve	2.87 lb	5.51 lb	8.38 lb	11.24 lb

accessories optional	order-codes			
5/2-way pilot valve NAMUR DC 24 V	1 2 3 7 4 7	1 2 3 7 4 7	1 2 3 7 4 7	1 2 3 7 4 7
5/2-way pilot valve NAMUR AC 110 V	1 2 3 7 4 8	1 2 3 7 4 8	1 2 3 7 4 8	1 2 3 7 4 8
mounting brackets stainless steel	1 2 3 5 5 5	1 2 3 5 5 6	1 2 3 5 5 7	1 2 3 5 5 8
limit switch Reed AC / DC 10-30 V	1 2 3 5 5 4	1 2 3 5 5 4	1 2 3 5 5 4	1 2 3 5 5 4

drawings	circuit symbols	valve order-code
	<p>Function NC valve normally closed</p> <p>Function NO valve normally open</p>	<p>9 NC=5 NO=6</p> <p>8 DN10=5 DN15=6 DN20=7 DN25=8</p> <p>3</p> <p>Encas=1 stainless steel=2</p>

10.3. Catálogo da Válvula Solenoide

6518/6519

bürkert

Type 6519 NAMUR standard (with tag connector acc. to DIN EN 175301-803 Form A, without cable plug)



The valve bodies of Type 6519 NAMUR are identical with the EEx m variants. The difference is in the coils, which are laid out and approved in different ways. By changing the coil on the valve body, it is possible to easily convert from Non-Ex operation to Ex operation (or vice versa). The coils are designed to be push-over and can be locked in 4 x 90° displaced positions and be positioned any where in-between.

Technical data		
Orifice	DN 6.0	
Body materials	Polyamide (PA)	
Pilot valve and main valve		
Thread insert material	Brass, nickel-plated or stainless steel	
Seal material	NBR and PUR	
Pneumatic connection	Threaded port G 1/4 NAMUR flange	
Supply ports 1,3,5 Service ports 2 and 4		
Electrical connection	Tag connector acc. to DIN EN 175301-803 Form A (previously DIN 43650)	
Protection class	IP65 with cable plug	
Operating voltage	24/110/230 V/UC (direct or universal current)	
Voltage tolerance	±10%	
Duty cycle	100 % continuous rating	
Ambient temperature	-25 to +55°C	
Media	Compressed air, nitrogen, instrument air	
Environmental conditions	Slightly aggressive, also open air	
Power consumption		
Inrush	Hold (hot coil)	
AC [VA]	AC [VA/W]	DC [W]
11	6/2	2
Response times ¹⁾		
Opening	20 [ms]	
Closing	40 [ms]	

¹⁾ Measured at valve outlet at 6 bar and +20°C acc. to ISO 12238.
Opening: Pressure rise 0 to 90%,
Closing: Pressure drop 100 to 10%

Ordering chart valves with manual override (without manual override on request)

Circuit function	Orifice [mm]	Seal material body	Thread insert material ¹⁾	Port connection threaded port	$Q_{n, \text{valve air}}^{(2)}$ [l/min]	Pressure range ³⁾ [bar]	Weight [g]	Power consumption [W]	Voltage/frequency [V/Hz]	Item no.
C 3/2-way valve with exhaust recycling, in de-energized position port 2 fed back internally	6.0	NBR and PUR	stainless steel	G 1/4	900	2-8	460	2	024/DC	131 425
									024/50-60	131 426
									110/50-60	131 427
									230/50-60	131 428
H 5/2-way valve, servo-assisted, in de-energized position pressure port 1 connected to port 2, output 4 exhausted	6.0	NBR and PUR	brass, nickel-plated	G 1/4	900	2-8	460	2	024/DC	131 421
									024/50-60	131 422
									110/50-60	131 423
									230/50-60	131 424

¹⁾ If the connectors are from stainless steel, the mounting screws will also be from stainless steel

²⁾ Flow rate: $Q_{n, \text{valve air}}$ value air [l/min]: Measured at +20°C, 6 bar pressure at valve inlet, 1 bar pressure difference

³⁾ Pressure values [bar]: Gauge pressures with respect to the prevailing atmospheric pressure

All valves can be operated in circuit function C as well as in circuit function H. By replacing the adapter plate that comes with the valves, the change between the two circuit functions can be set up.

10.4. Folha de Dados do Aquisitor de Dados

QUANTUM^X MX840

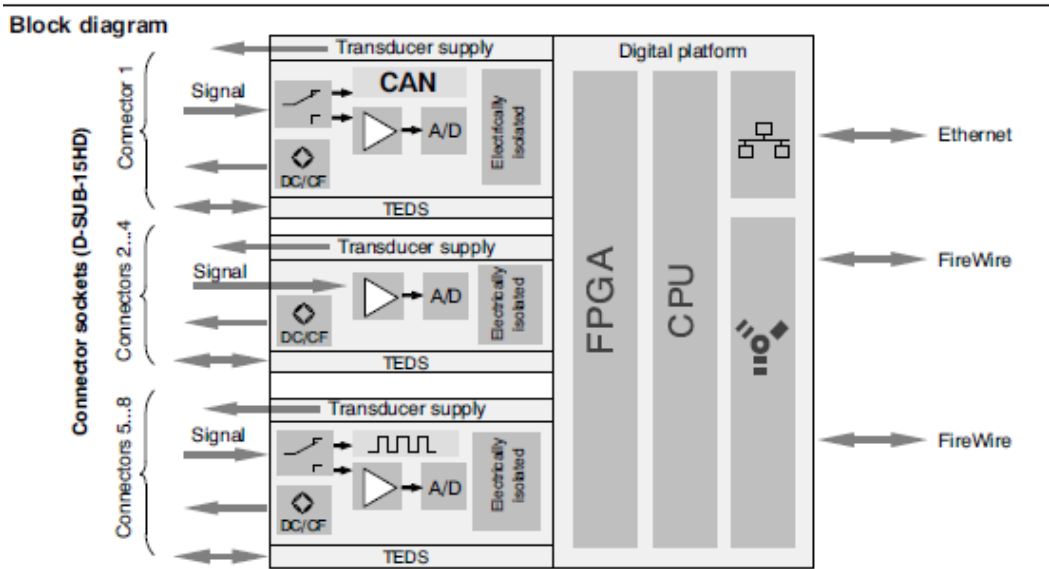
Universal amplifier

Data Sheet



Special features

- 8 individually configurable inputs (electrically isolated)
- Connection of more than 10 transducers technologies
- Data rate: up to 19,200 values/s
- 24-bit A/D converter per channel for synchronous, parallel measurements
- Active low pass filter
- TEDS support
- Supply voltage (DC): 10 V ... 30 V
- Supply voltage for active transducers (DC): 5 V ... 24 V



Specifications

General specifications		
Inputs	Number	8, electrically isolated from each other
Transducer technologies		Strain gage full bridge, inductive full and half bridge, piezoresistive full bridge, Potentiometric transducers, three voltage ranges, current, resistance thermometers; thermocouples (K, N, E, T, S, ...) with cold junction in the plug (1-THERMO-MXBOARD) Frequency, pulse counting, SSI, incremental rotary encoder (connectors 5-8 only) CAN (ISO 11898; connector 1 only)
Data rate	Values/s	0.1 ... 19200, adjustable for each channel
A/D converter		24 Bit Delta Sigma converter
Active low-pass filter (Bessel/Butterworth)	Hz	0.01 ... 3200 (-3 dB)
Transducer identification (TEDS, IEEE 1451.4) max. distance of the TEDS module	m	100
Transducer connection		D-SUB-15HD
Supply voltage range (DC)	V	10 ... 30, 24 V nominal (rated) voltage
Supply voltage interruption		max. 5 ms at 24 V
Power consumption without adjustable transducer excitation with adjustable transducer excitation	W W	< 10 < 13
Transducer Excitation (active transducers) Adjustable supply voltage (DC) Maximum output power	V W	5 ... 24; adjustable for each channel 0.7 each channel / a total of 2
Ethernet (data link) Protocol/addressing Connection Max. cable length to module	- - m	10Base-T / 100Base-TX TCP/IP (direct IP address or DHCP) 8P8C plug (RJ-45) with twisted pair cable (CAT-5) 100
FireWire (module synchronization, data link, optional supply voltage) Baud rate Max. current from module to module Max. cable length between the nodes Max. number of modules connected in series (daisy chain) Max. number of modules in a FireWire system (including hubs ¹⁾ backplane) Max. chain of hops ²⁾	Mbaud A m - - -	IEEE 1394b (HBM modules only) 400 (approx. 50 MByte/s) 1.5 5 12 (=11 Hops) 24 14
Nominal (rated) temperature range	°C [°F]	-20 ... +60 [-4 ... +140]
Operating temperature range (no dewing allowed/module not dew-point proof)	°C [°F]	-20 ... +65 [-4 ... +149]
Storage temperature range	°C [°F]	-40 ... +75 [-40 ... +167]
Rel. humidity at 31 °C	%	80 (non condensing) lin. reduction to 50 % at 40 °C
Protection class (up to 2000 m height, degree of contamination 2)		III
Degree of protection		IP20 per EN 60529
Mechanical tests ³⁾ Vibration (30 min) Shock (6 ms)	m/s ² m/s ²	50 350
EMC requirements		per EN 61326
Maximum input voltage at transducer socket to ground (PIN 6) PIN 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 13 PIN 14	V V	5.5 (no transients) 60 (no transients) / typ. 500
Dimensions, horizontal (W x H x D)	mm	52.5 x 200 x 122 (with case protection) 44 x 174 x 119 (without case protection)
Weight, approx.	g	980

¹⁾ Hub: FireWire node or distributor

²⁾ Hop: Transition from module to module/signal conditioning

³⁾ Mechanical stress is tested according to European Standard EN60068-2-6 for vibrations and EN60068-2-27 for shock. The equipment is subjected to an acceleration of 25 m/s² in a frequency range of 5...65 Hz in all 3 axes. Duration of this vibration test: 30min per axis. The shock test is performed with a nominal acceleration of 200 m/s² for 11 ms, half sine pulse shape, with 3 shocks in each of the 6 possible directions.

Specifications (Continued)

5 mV/V CF strain gage full bridge with 1 V or 2.5 V excitation (effective)		
Accuracy class		0.05
Carrier frequency (sine)	Hz	4800 ± 0.6
Bridge excitation voltage (effective)	V	1 and 2.5 (± 5 %)
Transducers that can be connected		strain gage full bridges
Permissible cable length between MX840 and transducer	m	100
Measuring ranges		
at 2.5 V excitation	mV/V	± 5
at 1 V excitation	mV/V	± 10
Measurement frequency range (-3 dB)	kHz	0 ... 1.6
Transducer impedance		
at 2.5 V excitation	Ω	300 ... 1000
at 1 V excitation	Ω	80 ... 1000
Noise at 25 °C and 2.5 V excitation (peak to peak)		
with filter 1 Hz Bessel	μV/V	< 0.2
with filter 10 Hz Bessel	μV/V	< 0.5
with filter 100 Hz Bessel	μV/V	< 1
with filter 1 kHz Bessel	μV/V	< 4
Linearity error	%	< 0.02 of full scale
Zero drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	0.02 of full scale
Full-scale drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	< 0.05 of measurement value

100 mV/V (DC) piezoresistive strain gage full bridge with 2.5 V (DC) excitation		
Accuracy class		0.05
Excitation voltage (DC)	V	2.5
Transducers that can be connected		piezoresistive strain gage full bridges
Permissible cable length between MX840 and transducer	m	100
Measuring range	mV/V	± 100
Measurement frequency range (-3 dB)	kHz	0 ... 3.2
Transducer impedance		
Carrier frequency	Ω	300 ... 1000
DC supply	Ω	300 ... 5000
Noise at 25 °C (peak to peak)		
with filter 1 Hz Bessel	μV/V	< 4
with filter 10 Hz Bessel	μV/V	< 6
with filter 100 Hz Bessel	μV/V	< 15
with filter 1 kHz Bessel	μV/V	< 80
Linearity error	%	< 0.02 of full scale
Zero drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	< 0.02 of full scale
Full-scale drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	< 0.05 of measurement value

1000 mV/V (DC) piezoresistive strain gage full bridge with 2.5 V (DC) excitation		
Accuracy class		0.05
Bridge excitation voltage (DC)	V	2.5
Transducers that can be connected		piezoresistive strain gage full bridges
Permissible cable length between MX840 and transducer	m	100
Measuring range	mV/V	± 1000
Measurement frequency range (-3 dB)	kHz	0 ... 3.2
Transducer impedance	Ω	300 ... 1000
Noise at 25 °C (peak to peak)		
with filter 1 Hz Bessel	μV/V	< 40
with filter 10 Hz Bessel	μV/V	< 100
with filter 100 Hz Bessel	μV/V	< 200
with filter 1 kHz Bessel	μV/V	< 700
Linearity error	%	< 0.02 of full scale
Zero drift (1 V excitation)	% / 10 K	< 0.02 of full scale
Full-scale drift (1 V excitation)	% / 10 K	< 0.1 of measurement value

Specifications (Continued)

100 mV/V CF inductive full bridge with 1 V or 2.5 V excitation (effective)		
Accuracy class		0.05
Carrier frequency (sine)	Hz	4800 ± 0.6
Bridge excitation voltage (effective)	V	1 and 2.5 (± 5 %)
Transducers that can be connected		inductive full bridges
Permissible cable length between MX840 and transducer	m	100
Measuring ranges		
at 2.5 V excitation	mV/V	± 100
at 1 V excitation	mV/V	± 300
Measurement frequency range (-3 dB)	kHz	0 ... 1.6
Transducer impedance		
at 2.5 V excitation	Ω	300 ... 1000
at 1 V excitation	Ω	80 ... 1000
Noise at 25 °C and 2.5 V excitation (peak to peak)		
with filter 1 Hz Bessel	μV/V	< 3
with filter 10 Hz Bessel	μV/V	< 5
with filter 100 Hz Bessel	μV/V	< 15
with filter 1 kHz Bessel	μV/V	< 50
Linearity error	%	< 0.02 of full scale
Zero drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	< 0.02 of full scale
Full-scale drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	< 0.05 of measurement value

1000 mV/V CF inductive full bridge with 1 V excitation (effective)		
Accuracy class		0,05
Carrier frequency (sine)	Hz	4800 ± 0.6
Bridge excitation voltage (effective)	V	1 (± 5 %)
Transducers that can be connected		inductive full bridges
Permissible cable length between MX840 and transducer	m	100
Measuring range	mV/V	± 1000
Measurement frequency range (-3 dB)	kHz	0 ... 1.6
Transducer impedance	Ω	80 ... 1000
Noise at 25 °C (peak to peak)		
with filter 1 Hz Bessel	μV/V	< 40
with filter 10 Hz Bessel	μV/V	< 100
with filter 100 Hz Bessel	μV/V	< 500
with filter 1 kHz Bessel	μV/V	< 1200
Linearity error	%	< 0.02 of full scale
Zero drift (1 V excitation)	% / 10 K	< 0.02 of full scale
Full-scale drift (1 V excitation)	% / 10 K	< 0.1 of measurement value

Specifications (Continued)

100 mV/V CF inductive half bridge with 1 V or 2.5 V excitation (effective)		
Accuracy class		0.1
Carrier frequency (sine)	Hz	4800 ± 0.6
Bridge excitation voltage (effective)	V	1 and 2.5 (± 5 %)
Transducers that can be connected		inductive half bridges
Permissible cable length between MX840 and transducer	m	100
Measuring ranges		
at 2.5 V excitation	mV/V	± 100
at 1 V excitation	mV/V	± 300
Measurement frequency range (-3 dB)	kHz	0 ... 1.6
Transducer impedance		
at 2.5 V excitation	Ω	300 ... 1000
at 1 V excitation	Ω	80 ... 1000
Noise at 25 °C and 2.5 V excitation (peak to peak)		
with filter 1 Hz Bessel	μV/V	< 3
with filter 10 Hz Bessel	μV/V	< 5
with filter 100 Hz Bessel	μV/V	< 15
with filter 1 kHz Bessel	μV/V	< 50
Linearity error	%	< 0.02 of full scale
Zero drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	< 0.1 of full scale
Full-scale drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	< 0.1 of measurement value

LVDT		
Accuracy class		0.1
Carrier frequency (sine)	Hz	4800 ± 0.6
Bridge excitation voltage (effective)	V	1 (± 5 %)
Transducers that can be connected		LVDT
Permissible cable length between MX840 and transducer	m	100
Measuring range	mV/V	± 3000
Measurement frequency range (-3 dB)	kHz	0 ... 1.6
Transducer impedance	mH	4 ... 33
Noise at 25 °C (peak to peak)		
with filter 1 Hz Bessel	μV/V	< 40
with filter 10 Hz Bessel	μV/V	< 100
with filter 100 Hz Bessel	μV/V	< 500
with filter 1 kHz Bessel	μV/V	< 1200
Linearity error	%	< 0.02 of full scale
Zero drift (1 V excitation; effective)	% / 10 K	< 0.1 of full scale
Full-scale drift (1 V excitation; effective)	% / 10 K	< 0.1 of measurement value

Specifications (Continued)

Potentiometric transducer		
Accuracy class		0.1
Excitation voltage (DC)	V	2.5
Transducers that can be connected		potentiometric transducers
Permissible cable length between MX840 and transducer	m	100
Measuring range	mV/V	± 1000
Measurement frequency range (-3 dB)	kHz	0 ... 3.2
Transducer impedance	Ω	300 ... 5000
Noise at 25 °C (peak to peak) with filter 1 Hz Bessel with filter 10 Hz Bessel with filter 100 Hz Bessel with filter 1 kHz Bessel	$\mu\text{V/V}$ $\mu\text{V/V}$ $\mu\text{V/V}$ $\mu\text{V/V}$	< 40 < 100 < 200 < 700
Linearity error	%	< 0.02 of full scale
Zero drift (1 V excitation)	% / 10 K	< 0.1 of full scale
Full-scale drift (1 V excitation)	% / 10 K	< 0.1 of measurement value

10 V DC voltage		
Accuracy class		0.05
Transducers that can be connected		voltage generator ± 10 V
Permissible cable length between MX840 and transducer	m	100
Measuring range	V	± 10
Measurement frequency range (-3 dB)	kHz	0 ... 3.2
Internal resistance of the voltage source	Ω	< 500
Internal impedance	M Ω	typ. 1
Noise at 25 °C (peak to peak) with filter 1 Hz Bessel with filter 10 Hz Bessel with filter 100 Hz Bessel with filter 1 kHz Bessel	μV μV μV μV	< 150 < 300 < 600 < 3000
Linearity error	%	< 0.02 of full scale
Common-mode rejection with DC common mode with 50 Hz common mode	dB dB	> 100 typ. 75
Maximum common-mode voltage (to housing and supply ground)	V	± 60
Zero drift	% / 10 K	< 0.02 of full scale
Full-scale drift	% / 10 K	< 0.1 of measurement value

10.5.


Dados de Calibração e Instruções de Instalação do Sensor de Pressão

GE
Sensing & Inspection Technologies

UNIK 5000

Calibration Data and Installation Instructions

Date	: 22 March 2010	Serial Number	: 3080978
Supply voltage	: 7 to 32 V dc	Output signal	: 0 to 5 V dc
Pressure range	: -70 to 0 mbar gauge	Pressure connection	:
Part number	: A5073-TA-A3-CB-H0-PF		



Electrical Details

<p>Power Supply Requirements Supply voltage.....7 to 32 V dc</p> <p>Output Signal 0 to 5 V dc (4 wire)</p>	<p>Electrical Connection DIN 43650</p> <p>Wiring Details Positive Supply 1 Negative Supply 2 Signal Positive 3 Signal Negative E</p>
--	--

Calibration Data

Room Temperature Calibration

Pressure (mbar g)	Measured Deviation	Permitted Deviation
-69.999	0.006 %FS	0.04 %FS BSL
-55.999	0.021 %FS	0.04 %FS BSL
-41.990	-0.014 %FS	0.04 %FS BSL
-28.013	0.011 %FS	0.04 %FS BSL
-14.002	-0.002 %FS	0.04 %FS BSL
-0.002	0.000 %FS	0.04 %FS BSL
0.006	-0.003 %FS	0.04 %FS BSL
-35.003	0.000 %FS	0.04 %FS BSL
-70.001	-0.019 %FS	0.04 %FS BSL

Zero and Span check

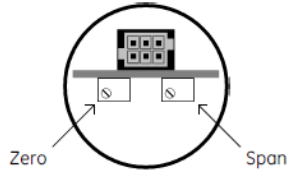
Low Range Output	: 0.000 V
Full Range Output	: 4.999 V
Span	: 4.998 V

K0477 Issue No. 2
PS1297 1.00.06

Span and Zero Setting

To adjust the span and zero settings for the pressure transmitter.

1. Remove the electrical connector to access the zero and span potentiometers.
2. Connect the power supply to the transmitter and allow the transmitter to get a stable temperature.
3. Connect the pressure source and set to the necessary zero pressure value.
4. Adjust the zero potentiometer to required output at zero pressure.



5. Set the pressure source to the necessary span value.
6. Adjust the span potentiometer to required output at full-scale pressure.
7. Release the pressure.
8. Disconnect the pressure source and power supply.
9. Refit the electrical connector.

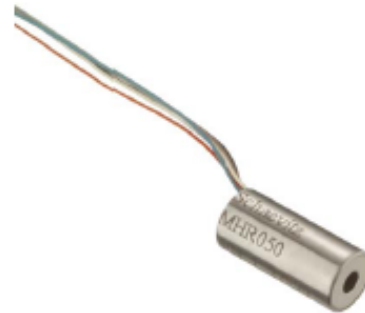
10.6.

Folha de Dados do Transdutor Linear de Deslocamento – LVDT

MHR Series



The MHR Series of LVDT is ideal for applications where excessive core weight could influence the motion of sensitive mechanisms. The lightweight core also helps minimize stresses and preserves the structural integrity of the core actuation assembly. High sensitivity results from close electrical coupling between coil and core. Magnetic stainless steel housing provides electromagnetic and electrostatic shielding.



FEATURES

- Small Size
- Low-Mass Core
- Certificate of Calibration Supplied with Each LVDT
- Compatible with All Schaevitz® Signal Conditioners
- High Temperature (220°C) and High Pressure (vented case) Available – Consult Factory

APPLICATIONS

- X, Y, Z Stage Position Feedback
- Wire-Die Bonding Machines
- Cylinder Position Feedback
- Voice Coil Teasing
- Materials Testing Machines

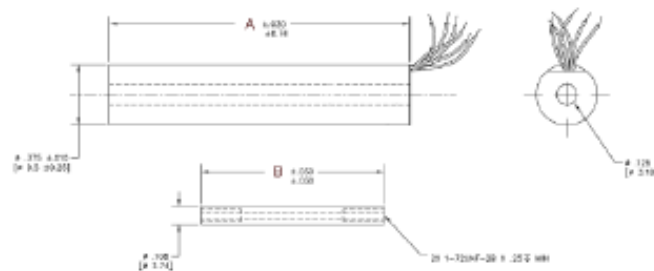
OPTIONS

- Alternative 5.0 and 10.0 kHz Excitation Frequency Testing
- Metric Thread Core

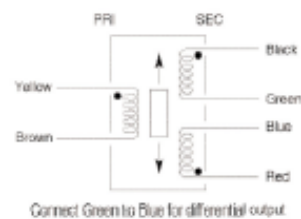
Specifications

Input Voltage	3 V rms (nominal)
Frequency Range	2 kHz to 20 kHz
Operating Temp Range	-65F to 300F (-55C to 150C)
Null Voltage	<0.5% full scale output
Shock Survival	1,000 g for 11 m-sec
Vibration Tolerance	20 g up to 2 kHz
Coil Form Material	High Density, glass-Filled Polymer
Housing Material	AISI 400 Series Stainless Steel
Lead Wires	32 AWG, Copper, Teflon Insulated, 12 Inches long

dimensions



wiring





MHR Series

Performance and electrical specifications @ 10kHz (recommended)

MHR Series Model Number	Nominal Linear Range		Linearity				Sensitivity		Impedance (Ohms)		Phase Shift Degrees
	Inches	mm	60	100	126	160	mV/V/0.001 In	mm	Pri	Sec	
005 MHR	±0.005	±0.13	0.20	0.25	0.30	0.40	8.70	342	84	302	+38
010 MHR	±0.010	±0.25	0.10	0.25	0.35	0.35	6.05	238	165	300	+20
025 MHR	±0.025	±0.64	0.15	0.25	0.25	0.30	8.10	319	238	485	+15
050 MHR	±0.050	±1.27	0.15	0.25	0.35	0.50	3.15	124	419	154	+8
100 MHR	±0.100	±2.54	0.15	0.25	0.25	0.30	2.80	110	400	200	+5
250 MHR	±0.250	±6.35	0.15	0.25	0.35	0.50	2.07	86	345	420	+7
500 MHR	±0.500	±12.70	0.15	0.25	0.30	0.75	1.96	77	264	810	+4
1000 MHR	±1.000	±25.40	0.20	0.25	0.50	N/R	0.77	30	155	450	-1
2000 MHR	±2.000	±50.80	TBD	0.50	TBD	N/R	0.49	19.26	500	1760	-16

Performance and electrical specifications @ 2.5 kHz

MHR Series Model Number	Nominal Linear Range		Linearity				Sensitivity		Impedance (Ohms)		Phase Shift Degrees
	Inches	mm	60	100	126	160	mV/V/0.001 In	mm	Pri	Sec	
005 MHR	±0.005	±0.13	0.20	0.25	0.30	0.40	3.14	124	59	260	+73
010 MHR	±0.010	±0.25	0.10	0.25	0.35	0.35	3.29	129	78	192	+39
025 MHR	±0.025	±0.64	0.15	0.25	0.25	0.30	4.36	172	116	286	+38
050 MHR	±0.050	±1.27	0.15	0.25	0.35	0.50	2.55	100	141	90	+36
100 MHR	±0.100	±2.54	0.15	0.25	0.25	0.30	2.40	94	135	125	+30
250 MHR	±0.250	±6.35	0.15	0.25	0.35	0.50	1.73	68	147	268	+29
500 MHR	±0.500	±12.70	0.15	0.25	0.30	0.75	1.60	67	145	445	+19
1000 MHR	±1.000	±25.40	0.20	0.25	0.50	N/R	0.70	27	100	370	+6
2000 MHR	±2.000	±50.80	TBD	0.25	TBD	N/R	0.47	18.47	304	1362	+3.3

Mechanical specifications

MHR Series Model Number	Weight				Dimensions			
	Body		Core		A (Body)		B (Core)	
	oz	gm	oz	gm	In	mm	In	mm
005 MHR	0.07	2	.004	0.1	0.38	9.7	0.18	4.6
010 MHR	0.11	3	.007	0.2	0.54	13.7	0.23	5.8
025 MHR	0.18	5	.016	0.4	0.66	16.8	0.40	10.2
050 MHR	0.21	6	.016	0.4	0.80	20.3	0.50	12.7
100 MHR	0.21	6	.025	0.5	1.00	25.4	0.62	15.7
250 MHR	0.32	9	.032	0.9	1.65	47.0	1.12	28.4
500 MHR	0.60	17	.056	1.6	3.30	83.8	2.00	50.8
1000 MHR	0.92	26	.088	2.5	5.60	142.2	3.00	76.2
2000 MHR	1.4	40	.088	2.5	8.00	203.2	3.00	76.2

The information in this sheet has been carefully reviewed and is believed to be accurate; however, no responsibility is assumed for inaccuracies. Furthermore, this information does not convey to the purchaser of such devices any license under the patent rights to the manufacturer. Measurement Specialties, Inc. reserves the right to make changes without further notice to any product herein. Measurement Specialties, Inc. makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its product for any particular purpose, nor does Measurement Specialties, Inc. assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. Typical parameters can and do vary in different applications. All operating parameters must be validated for each customer application by customer's technical experts. Measurement Specialties, Inc. does not convey any license under its patent rights nor the rights of others.

ordering info	MHR Model	options
Specify the MHR Model followed by the desired option number(s) ordered together.	005 MHR 010 MHR 025 MHR 050 MHR 100 MHR 250 MHR 500 MHR 1000 MHR 2000 MHR	Number 002 003 006 Description 5.0 kHz Linearity Test 10 kHz Linearity Test Metric Thread Core
Ordering Example: Model Number 050MHR-009 is an MHR Series LVDT with a ±0.05" range (050 MHR), with 10 kHz testing (003), Metric thread core (006)		

Apêndices

A. Avaliação das incertezas experimentais

Neste apêndice é apresentado o procedimento utilizado para estimar as incertezas associadas à medição da vazão volumétrica no circuito hidráulico, medição do deslocamento e campo de velocidade na válvula de alívio, explicadas de forma sucinta a seguir. Nesta avaliação foram aplicados os lineamentos definidos pela ISO GUM (2008) para o cálculo da incerteza associada à medição. A incerteza-padrão de y , onde y é a estimativa do mensurando, e desta maneira o resultado da medição é obtida pela combinação apropriada de incertezas-padrão das estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Esta incerteza-padrão combinada da estimativa y é representada por $u_c(y)$, calculada como a raiz quadrada positiva da variância combinada $u_c^2(y)$, como indicado na equação (A.1):

$$u_c^2(y) = \left[\frac{\partial f}{\partial x_1} u(x_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial x_2} u(x_2) \right]^2 + \dots + \left[\frac{\partial f}{\partial x_N} u(x_N) \right]^2 \quad (A.1)$$

Nesta equação, as derivadas parciais, $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, representam a sensibilidade do resultado a cada variável medida.

Embora $u_c(y)$ possa ser universalmente usada para expressar a incerteza de um resultado de medição, é muitas vezes necessário fornecer uma medida de incerteza que defina um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando, denominada incerteza expandida U . A incerteza expandida U , é obtida, multiplicando-se a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$, por um fator de abrangência k .

A.1. Análises de Incerteza na vazão volumétrica do circuito hidráulico

Como foi explicado na seção 5.3.3, a vazão volumétrica da água é determinada mediante a seguinte equação:

$$Q = \frac{m}{\rho t} \quad (\text{A.2})$$

Onde m , é a massa medida na balança (em kg), ρ , é a massa específica (em kg/m^3) e, t , representa o tempo medido no cronômetro digital (em s).

De acordo com a equação (A.1), a incerteza-padrão combinada da vazão volumétrica foi calculada pela seguinte equação:

$$u_c(Q) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial m} u_m\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} u_t\right)^2} \quad (\text{A.3})$$

Para este cálculo, a incerteza da massa específica da água foi considerada constante a 24 °C, sendo igual a $997,2988 \pm 0,83 \text{ kg/m}^3$ (Tanaka, 2001). Agora, derivando a equação (A.2), em função da massa e do tempo, obtiveram-se as equações (A.4) e (A.5) abaixo:

$$\frac{\partial Q}{\partial m} = \frac{1}{\rho t} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{m}{\rho t^2} \quad (\text{A.5})$$

A incerteza da balança utilizada na medida da massa (com 0,01 kg de resolução), u_m , foi estimada como 0,0058 kg, e a incerteza do cronômetro digital utilizado na medida do tempo (com 0,01 s de resolução), u_t , foi assumida como 0,0058 segundos. Na tabela A.1, observa-se as incertezas associadas à medição da vazão durante o curso dos experimentos. Os dados experimentais foram associados a uma distribuição normal de probabilidade (Distribuição Gaussiana) e, a incerteza de medição foi estimada para uma confiabilidade metrológica de 95% (i.e.: $k=1,96$).

Tabela A.1 - Estimativa da incerteza na medição da vazão volumétrica.

Freq. Inv.	Massa medida	Tempo	Vazão média	Incerteza vazão	Fator abran gência	Incerteza Expandida	Vazão média	Incerteza Expandida	% incerteza
Freq	m _{água}	t	Q	u _c (Q)	k	U	Q	U	U / Q
(Hz)	(kg)	(s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	-	(m ³ /s)	(L/min)	(L/min)	(%)
200	8,345	113,54	7,4E-05	5,11E-08	1,96	1,0021E-07	4,42184	0,0060	0,13
250	9,09	102,35	8,9E-05	5,68E-08	1,96	1,113E-07	5,34321	0,0067	0,12
300	8,625	83,06	0,0001	7,01E-08	1,96	1,3734E-07	6,24731	0,0082	0,13
350	9,295	78,13	0,00012	7,46E-08	1,96	1,4625E-07	7,15744	0,0088	0,12
400	8,46	63,25	0,00013	9,23E-08	1,96	1,8099E-07	8,04703	0,010	0,13
450	8,455	56,53	0,00015	1,04E-07	1,96	2,0295E-07	8,9983	0,012	0,14
500	8,285	50,22	0,00017	1,17E-07	1,96	2,2899E-07	9,92526	0,013	0,14
550	8,345	46,28	0,00018	1,27E-07	1,96	2,4913E-07	10,8482	0,014	0,14
600	8,105	41,47	0,0002	1,42E-07	1,96	2,7879E-07	11,7583	0,016	0,14
650	8,775	41,69	0,00021	1,42E-07	1,96	2,7813E-07	12,6631	0,016	0,13
700	8,695	38,44	0,00023	1,54E-07	1,96	3,0264E-07	13,6086	0,018	0,13
750	8,615	35,66	0,00024	1,67E-07	1,96	3,2735E-07	14,5345	0,019	0,14
800	8,59	33,53	0,00026	1,78E-07	1,96	3,4933E-07	15,4129	0,020	0,14
850	8,335	30,62	0,00027	1,96E-07	1,96	3,8405E-07	16,3767	0,023	0,14
900	8,175	28,38	0,00029	2,12E-07	1,96	4,1607E-07	17,3301	0,024	0,14
950	9,015	29,78	0,0003	2,03E-07	1,96	3,9809E-07	18,2124	0,024	0,13
1000	8,95	28,12	0,00032	2,16E-07	1,96	4,2346E-07	19,1485	0,025	0,13
1050	9,195	27,62	0,00033	2,21E-07	1,96	4,3298E-07	20,0288	0,026	0,13
1100	9,055	25,97	0,00035	2,36E-07	1,96	4,6271E-07	20,977	0,028	0,13
1150	8,975	24,71	0,00036	2,49E-07	1,96	4,8855E-07	21,8518	0,029	0,13
1200	9,375	24,78	0,00038	2,5E-07	1,96	4,8957E-07	22,7612	0,029	0,13
1250	9,17	23,4	0,00039	2,66E-07	1,96	5,2081E-07	23,5765	0,031	0,13
1300	8,665	21,13	0,00041	2,96E-07	1,96	5,8039E-07	24,6715	0,034	0,14
1350	8,84	20,81	0,00043	3,02E-07	1,96	5,9241E-07	25,5568	0,035	0,14
1400	9,06	20,78	0,00044	3,04E-07	1,96	5,9568E-07	26,2306	0,036	0,14
1450	9,09	19,96	0,00046	3,19E-07	1,96	6,2465E-07	27,3987	0,037	0,14
1500	9,555	20,41	0,00047	3,13E-07	1,96	6,1385E-07	28,1653	0,037	0,13

A.2. Análises de Incerteza no deslocamento da válvula de alívio

Para o cálculo da incerteza-padrão combinada associada às medições realizadas pelo transdutor de deslocamento (LVDT), dada pela equação (A.6), foram consideradas fontes de incertezas como; incerteza do micrômetro (padrão) u_{mi} , incerteza do sinal de saída do LVDT (em mV/V) u_{LVDT} , e a incerteza do ajuste u_s .

$$u_c(D) = \sqrt{\left(\frac{\partial D_{at}}{\partial S_{LVDT}} u_{LVDT}\right)^2 + u_{mi}^2 + u_s^2} \quad (A.6)$$

Onde $\frac{\partial D_{at}}{\partial x}$, é a derivada do deslocamento ajustado do tradutor com relação ao sinal de saída do LVDT, S_{LVDT} , dado pela equação (A.7), resultante da curva de calibração para polinômio grau um:

$$D_{at} = -0,0164 * S_{LVDT} - 0,0092 \quad (A.7)$$

Foram consideradas quatro curvas de calibração, desde polinômio grau um até polinômio grau quatro, observando-se que o melhor ajuste corresponde ao polinômio de grau um, pois a incerteza do ajuste é menor em comparação àquele obtido pelas demais curvas. Desse modo, o deslocamento ajustado do transdutor, D_{at} , pode ser calculado a partir da Equação (A.7).

A Tabela A.2 mostra os resultados do cálculo de incerteza nas medições realizadas pelo transdutor de deslocamento – LVDT.

Tabela A.2 - Estimativa da incerteza na medição do deslocamento.

Posição do Micrômetro	Posição relativa	Sinal saída LVDT	Deslocamento ajustado (padrão)	Incerteza do ajuste	Incerteza micrômetro	Incerteza LVDT	Incerteza deslocamento	Incerteza expandida (k=1,96)
-	-	S_{LVDT}	D_{at}	u_s	u_{mi}	u_{LVDT}	$u_c(D)$	U
(mm)	(mm)	(mV/V)	(mm)	(mm)	(mm)	(mV/V)	(mm)	(mm)
0,0	-9,795	598,01	-9,8166	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
0,5	-9,295	567,37	-9,3141	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
1,0	-8,795	536,75	-8,8119	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
1,5	-8,295	506,09	-8,3091	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
2,0	-7,795	475,5	-7,8074	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
2,5	-7,295	444,97	-7,3067	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
3,0	-6,795	414,36	-6,8047	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
3,5	-6,295	383,73	-6,3024	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
4,0	-5,795	353,22	-5,8020	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
4,5	-5,295	322,75	-5,3023	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
5,0	-4,795	292,37	-4,8041	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
5,5	-4,295	262,09	-4,3075	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
6,0	-3,795	231,85	-3,8115	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
6,5	-3,295	201,44	-3,3128	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
7,0	-2,795	170,9	-2,8120	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
7,5	-2,295	140,32	-2,3104	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
8,0	-1,795	109,73	-1,8088	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
8,5	-1,295	79,03	-1,3053	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
9,0	-0,795	48,49	-0,8044	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
9,5	-0,295	17,99	-0,3042	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
10,0	0,205	-12,44	0,1948	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
10,5	0,705	-42,94	0,6950	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
11,0	1,205	-73,47	1,1957	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
11,5	1,705	-104,13	1,6985	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062

12,0	2,205	-134,88	2,2028	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
12,5	2,705	-165,4	2,7034	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
13,0	3,205	-195,98	3,2049	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
13,5	3,705	-226,56	3,7064	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
14,0	4,205	-257,17	4,2084	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
14,5	4,705	-287,8	4,7107	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
15,0	5,205	-318,51	5,2144	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
15,5	5,705	-349,3	5,7193	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
16,0	6,205	-380,08	6,2241	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
16,5	6,705	-410,77	6,7274	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
17,0	7,205	-441,4	7,2298	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
17,5	7,705	-471,97	7,7311	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
18,0	8,205	-502,53	8,2323	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
18,5	8,705	-533,27	8,7364	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
19,0	9,205	-564,17	9,2432	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
19,5	9,705	-595,31	9,7539	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062
20,0	10,205	-626,43	10,2643	0,03132	0,002	0,000577	0,031	0,062

No cálculo de incerteza das medições do transdutor de deslocamento, obteve-se uma incerteza expandida igual a $\pm 0,6\%$ com um nível de confiabilidade de 95% ($k=1,96$).

A.3. Análises de Incerteza no coeficiente de descarga C_d

As principais fontes de incertezas no cálculo do coeficiente de descarga são; a incerteza no cálculo da vazão de descarga Q_s , medição do diferencial de pressão ΔP ($P_1 - P_2$), a área da seção transversal do duto de entrada da válvula A , e a incerteza na massa específica da água ρ . Cada um destes parâmetros encontram-se na equação (A.8) para o cálculo do coeficiente de descarga C_d .

$$C_d = \frac{Q_s}{A \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}} \quad (A.8)$$

Utilizando o procedimento de propagação de incerteza descrito na equação (A.1), a incerteza-padrão combinada do coeficiente de descarga pode ser calculada com base na seguinte equação:

$$u_c(C_d) = \sqrt{\left(\frac{\partial C_d}{\partial Q_s} u_{Q_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_d}{\partial A} u_A\right)^2 + \left(\frac{\partial C_d}{\partial \rho} u_\rho\right)^2 + \left(\frac{\partial C_d}{\partial \Delta P} u_{\Delta P}\right)^2} \quad (A.9)$$

Agora, derivando a equação (A.8), em função de cada um de seus parâmetros, obtiveram-se as equações (A.10), (A.11), (A.12), (A.13) abaixo:

$$\frac{\partial C_d}{\partial Q_s} = \frac{1}{A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}} \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{\partial C_d}{\partial A} = -\frac{Q_s}{A^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}} \quad (\text{A.12})$$

$$\frac{\partial C_d}{\partial \rho} = \frac{Q_s}{2A \sqrt{2\Delta P} * \rho} \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{\partial C_d}{\partial \Delta P} = -\frac{Q_s}{2A \sqrt{\frac{2}{\rho}} * (\Delta P)^{3/2}} \quad (\text{A.14})$$

A incerteza da vazão de descarga Q_s , calculada pela integração do campo de velocidade medido com a técnica PIV sobre a área transversal do escoamento, como descrito na seção 7.1, foi estimada em 14 % para uma vazão principal de 26 L/min.

A incerteza da área transversal do duto de entrada da válvula u_A , (medida com um paquímetro com resolução de 0,05 mm) foi estimada de $\pm 0,2$ mm (1,2% do diâmetro do tubo de entrada), e na incerteza da massa específica da água u_ρ foi considerada constante a 24 °C, sendo igual a $997,2988 \pm 0,83$ kg/m³ (Tanaka, 2001). Agora, na incerteza do diferencial de pressão $u_{\Delta P}$, foi utilizada a informação dada pelo fabricante do sensor de pressão sendo igual a $\pm 0,2\%$ do fundo de escala.

Substituindo-se, então, as equações (A.10), (A.11), (A.12), (A.13), e os valores de incertezas de u_{Q_s} , u_A , u_ρ , e $u_{\Delta P}$, na equação (A.9) pode-se estimar que a incerteza padrão combinada do coeficiente de descarga C_d é de $\pm 15,4$ % com um nível de confiabilidade de 95%. Sendo que a maior fonte de incerteza é dada pela incerteza na medição da vazão de descarga na válvula de alívio.