UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHERIA MECÂNICA

MATHEUS DE JESUS PIMENTA

DESENVOLVIMENTO DE UMA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERFORMANCE DE VÁLVULAS DE SEGURANÇA OPERANDO COM AR COMPRIMIDO EM CONTRAPRESSÃO ATMOSFÉRICA

VITÓRIA

2016

MATHEUS DE JESUS PIMENTA

DESENVOLVIMENTO DE UMA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERFORMANCE DE VÁLVULAS DE SEGURANÇA OPERANDO COM AR COMPRIMIDO EM CONTRAPRESSÃO ATMOSFÉRICA

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.
Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos.

VITÓRIA
2016

MATHEUS DE JESUS PIMENTA

DESENVOLVIMENTO DE UMA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERFORMANCE DE VÁLVULAS DE SEGURANÇA OPERANDO COM AR COMPRIMIDO EM CONTRAPRESSÃO ATMOSFÉRICA

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em ___ de _____ de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Rogério Ramos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

_____

Prof. Dr. João Luiz Marcon Donatelli
Universidade Federal do Espírito Santo

_____

Prof. Dr. Rogério Lima Mota de Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

Nenhum desafio eu teria superado sem a Tua presença em minha vida, meu Deus. A ti eu agradeço por todas as bênçãos, se hoje cheguei até aqui, foi porque o Senhor sempre esteve ao meu lado.

Muito obrigado à minha família pela confiança que me foi depositada. Jamais hei de esquecer o que vocês passam por mim. Ao meu pai, Paulo Rogério, meu melhor amigo e maior ídolo, agradeço pelos conselhos e pelas oportunidades que me concedeu. À minha mãe, Marister, minha guerreira, agradeço por estar sempre cuidando de mim. À minha irmã, Tamara, pela ajuda e pelo companheirismo sempre. Vocês são tudo para mim.

Aos demais familiares, muito obrigado por sempre me receberem de braços abertos e tornarem os nossos momentos em família sempre maravilhosos. Especialmente a minha avó Maria, que tenho certeza que segue intercedendo por nós ao lado de Deus.

À minha namorada, Mariana, tenho que agradecer pela paciência, porque sempre fora você quem aguentou o meu estresse, que sentiu a minha ausência e me apoiou quando eu tive que me dedicar a esse projeto. Obrigado por ser minha parceira, amo você, meu bem.

Aos meus amigos, agradeço também pela paciência em compreender minhas ausências, agradeço por vocês comporem sempre uma parte feliz do meu dia. Especialmente aos companheiros da UFES, não poderia deixar de agradecer por cada congresso. Que os senhores nunca se esqueçam que a fé move montanhas e que nós provamos isso.

Ao meu professor orientador, Dr. Rogério Ramos, muito obrigado pelos direcionamentos e esclarecimentos. O senhor fez grande parte da minha formação acadêmica e eu tenho muito orgulho disso.

Por fim, um agradecimento especial aos rapazes da 2Solve, principalmente, ao Gabriel, pelo apoio na resolução de várias dificuldades durante o desenvolvimento do projeto.

RESUMO

Buscou-se, nesse trabalho, desenvolver uma bancada de teste de capacidade de vazão de válvulas de segurança, bem como a sua metodologia de operação dos ensaios, operando com ar comprimido e sob contrapressão atmosférica, objetivando certificar as válvulas testadas quanto a sua vazão. Para tanto, foram utilizadas como base, as recomendações ASME PTC 25 e ASME UG-131, com o intuito de validar a bancada final desenvolvida, bem como os ensaios realizados. O elemento primário de medição de vazão foi um deprimogênio do tipo cone invertido e a aquisição de dados e as operações dos testes foram feitas através de um sistema supervisório. Foram testadas válvulas de segurança com pressão de ajuste de 2, 3, 4, 5 e 6 kgf/cm². Após tratamentos estatísticos, os dados foram analisados perante instruções e parâmetros estabelecidos nas recomendações ASME. Os resultados, suas incertezas e a metodologia dos testes foram calculados e criticados. Todos os resultados obtidos foram condizentes com os parâmetros em todos os requisitos, com exceção da maior oscilação da leitura da vazão mássica, que foi superior ao limite estabelecido.

Palavras-chave: Válvulas de segurança, capacidade de vazão, certificação, teste de performance de válvulas de segurança.

ABSTRACT

This work sought to develop a safety valve flow capacity test bench and its operating methodology of tests, operating with compressed air and atmospheric backpressure, aiming to certify the tested valve as its flow. To this end, the recommendations ASME PTC 25 and ASME UG-131 were used as bases, in order to validate the final developed bench and its tests. The primary flow meter element was a differential pressure inverted cone type and data acquisition and operations of the tests were made via a supervisory system. Safety valves were tested with set pressure 2, 3, 4, 5 and 6 kgf/cm². After statistical processing, the data were analyzed under instructions and parameters set forth in the ASME recommendations. The results, their uncertainty and the methodology of the tests were calculated and criticized. All results were consistent with the parameters for all the requirements, except for the higher oscillation of the mass flow, which was above the threshold.

Keywords: Safety valve, flow capacity, certification, safety valve performance test.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Dispositivos de alívio de pressão. 17
Figura 2 - Disco de Ruptura. 17
Figura 3 - Válvula de segurança e alívio contrapeso 18
Figura 4 – Válvula de segurança: construção mecânica 19
Figura 5 - Sequência de abertura de uma válvula de segurança sob ação de um fluido compressível. 21
Figura 6 - Foto do trecho de medição de vazão e da instrumentação da instalação. 32
Figura 7 – Foto da válvula de controle e vaso de teste da instalação. 33
Figura 8 – Esquema da montagem da linha de teste no laboratório de máquinas de fluxo da UFES. 34
Figura 9 - Diagrama P&ID da linha de teste de acordo com a simbolização padrão. 35
Figura 10 – Ilustração V-Cone 35
Figura 11 - Geometria do medidor do tipo cone invertido. 36
Figura 12 - Ilustração da vista axial da tubulação: Diferença das áreas de restrição ao escoamento: Medidor Cone Invertido x Placa de Orifício. 37
Figura 13 – Válvula de segurança VS 140N 39
Figura 14 - Compressor COPA 30 HP. 40
Figura 15 – Reservatório utilizado como vaso de teste, acompanhado de seu compressor original. 41
Figura 16 - Válvula de controle Hora BR216RA 42
Figura 17 – Interface principal da aplicação criada para o teste de capacidade de vazão de válvulas de segurança. 44
Figura 18 - Interface da aba suporte para configuração dos dados do experimento a ser realizado. 45
Figura 19 - Diagrama P&ID da primeira construção da linha de teste. 46
Figura 20 – Ensaio de capacidade de vazão pelo método de alimentação direta do tanque. 48
Figura 21 - Ensaio de capacidade de vazão pelo método de alimentação através da válvula reguladora de pressão. 49
Figura 22 - Gráfico comparativo das leituras de vazão mássica de dois ensaios de capacidade de vazão realizados em uma válvula de PA = 3 kgf/cm², com duas faixas diferentes de trabalho do compressor. 57

Figura 23 – Observação do fenômeno operacional de ciclagem no ensaio de uma válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm² com a válvula de controle aberta a 6% do seu curso total. 60
Figura 24 – Simulação do comportamento de ciclagem para uma válvula de segurança com 6% da sua vazão mássica máxima. 60
Figura 25 – Gráfico das leituras de temperatura e vazão mássica do ensaio de capacidade de vazão de uma válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm². 65
Figura 26 - Respostas da variável de temperatura para dois transmissores de temperatura na mesma condição, ao ar. 66
Figura 27 - Gráfico do comportamento das variáveis pressão e vazão no ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 2 kgf/cm² 68
Figura 28 - Gráfico do comportamento das variáveis pressão e vazão no ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm² 69
Figura 29 - Gráfico do comportamento das variáveis pressão e vazão no ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 4 kgf/cm² 70
Figura 30 - Gráfico do comportamento das variáveis pressão e vazão no ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 5 kgf/cm² 71
Figura 31 - Gráfico do comportamento das variáveis pressão e vazão no ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 6 kgf/cm² 72
Figura 32 - Arranjo recomendado para o ensaio de dispositivos com contrapressão atmosférica – Arranjo de teste com medidor de vazão 77
Figura 33 – Gráfico dos resultados quanto a vazão mássica, obtidos nos ensaios de capacidade de vazão de válvulas de segurança. 80
Figura 34 – Gráfico dos coeficientes de descarga das válvulas de segurança ensaiadas, ilustrando a tendência descendente com o aumento da pressão de ajuste. 81
Figura 35 - Ilustração dos perfis comuns do conjunto sede e tampão de válvulas de alívio de pressão. 87

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	Ar comprimido
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	International Organization for Standardization
NIST	National Institute of Standards and Technology
PA	Pressão de ajuste ou ajustagem
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram/Drawing
PMTP	Pressão máxima de trabalho permissível
PTC	Performance Test Code
VP	Vaso de pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Massa específica do fluido
t	Instante de tempo
u	Velocidade
A	Área
P	Pressão
z	Cota de altura
g	Aceleração da gravidade
$\dot{m}, q_m$	Vazão mássica
C_d	Coeficiente de descarga
β	Razão beta
D, d	Diâmetro
Y	Fator de expansão
k	Coeficiente de expansão adiabática
R	Constate universal dos gases perfeitos
M	Peso molecular
T	Temperatura
S_x	Desvio padrão
$S_{\bar{x}}$	Incerteza do tipo-A
B	Incerteza do tipo-B
b	Incertezas associadas a elementos de medição
U	Incerteza final
n	Número de leituras

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dimensionais das tubulações da planta de teste. 34
Tabela 2 - Características do V-Cone utilizado 36
Tabela 3 - Propriedades da válvula de controle (VC-AC1).....42
Tabela 4 - Especificações da instrumentação utilizada. 43
Tabela 5 - Requisitos de aceitação do teste de capacidade de válvulas de segurança 50
Tabela 6 - Recomendações para o teste de capacidade de válvulas de segurança.53
Tabela 7 - Comparação entre o coeficiente de variação da vazão mássica e da pressão no vaso de teste durante os regimes permanentes.....57
Tabela 8 – Resultados comparativos de três ensaios diferentes sob as mesmas configurações do sistema para três tipos de válvulas diferentes.....58
Tabela 9 - Critério de rejeição de Chauvenet.....62
Tabela 10 - Resultados médios das temperaturas no regime permanente do ensaio de capacidade de vazão de uma válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm². 66
Tabela 11 - Principais resultados médios do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 2 kgf/cm².....68
Tabela 12 - Principais resultados médios do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm².....69
Tabela 13 - Principais resultados médios do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 4 kgf/cm².....70
Tabela 14 - Principais resultados médios do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 5 kgf/cm².....71
Tabela 15 - Principais resultados médios do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 6 kgf/cm².....72
Tabela 16 - Configurações do ensaio de capacidade de vazão da válvula de segurança de PA = 2 kgf/cm².....93
Tabela 17 - Resultados específicos de cada trecho do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 2 kgf/cm².....93
Tabela 18 - Configurações do ensaio de capacidade de vazão da válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm².....94

Tabela 19 - Resultados específicos de cada trecho do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm² 94
Tabela 20 - Configurações do ensaio de capacidade de vazão da válvula de segurança de PA = 4 kgf/cm² 95
Tabela 21 - Resultados específicos de cada trecho do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 4 kgf/cm² 96
Tabela 22 - Configurações do ensaio de capacidade de vazão da válvula de segurança de PA = 5 kgf/cm² 97
Tabela 23 - Resultados específicos de cada trecho do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 5 kgf/cm² 97
Tabela 24 - Configurações do ensaio de capacidade de vazão da válvula de segurança de PA = 6 kgf/cm² 98
Tabela 25 - Resultados específicos de cada trecho do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 6 kgf/cm² 98

SUMÁRIO

1 Introdução 15

2 Fundamentação Teórica 16

2.1 Dispositivos de alívio de pressão 16

2.2 Conceito de Válvulas de Segurança 18

2.3 Aspectos Construtivos 19

2.4 Princípio de Funcionamento 20

2.5 Medição de vazão por elementos deprimogênios 21

3 Definições 25

3.1 Características Operacionais 25

3.2 Fenômenos Operacionais 28

4 Recomendações Técnicas 30

4.1 Performance Test Code 25: Pressure Relief Devices 30

4.2 ASME UG-131 30

4.3 Outras Recomendações 31

5 Descrição do Aparato Experimental 32

5.1 Diagrama P&ID 33

5.2 V-Cone utilizado 35

5.3 Válvulas de Segurança utilizadas 38

5.4 Equipamentos de suporte 39

5.5 Instrumentação utilizada 42

5.6 Sistema Supervisório 44

6 Desenvolvimento e metodologia dos Ensaios 45

6.1 Propostas iniciais do experimento 45

6.2 Requisitos para validação do teste 50

6.3 Metodologia dos testes realizados 53

7 Análise dos dados 60

7.1 Regime Permanente....61
7.2 Fator de Expansão (Y) 62
7.3 Medição do deslocamento vertical do tampão 62
8 Cálculo dos Resultados 63
8.1 Análise das Incertezas 63
8.2 Correção da variável temperatura 64
8.3 Área real de escoamento 66
9 Apresentação dos Resultados 67
9.1 Válvula de pressão de ajuste de 2 kgf/cm²....68
9.2 Válvula de pressão de ajuste de 3 kgf/cm²....69
9.3 Válvula de pressão de ajuste de 4 kgf/cm²....70
9.4 Válvula de pressão de ajuste de 5 kgf/cm²....71
9.5 Válvula de pressão de ajuste de 6 kgf/cm²....72
10 Conclusões e críticas aos ensaios....74
10.1 Incertezas e calibração 74
10.2 Supervisão e documentação....75
10.3 Condições do teste 76
10.4 Execução do teste....79
10.5 Certificação 80
10.6 Vazão Mássica....80
10.7 Resultados do coeficiente de descarga 81
10.8 Propostas de melhorias para trabalhos futuros....82
11 Considerações Finais 83
12 Referências....84
13 Anexo 1....87
14 Apêndice A – Desenvolvimento da equação da vazão mássica teórica para o escoamento de fluido compressível 88

15 Apêndice B – Propagação de Incertezas 90
16 Apêndice C – Resultados por trechos dos ensaios 93
16.1 Válvula de pressão de ajuste de 2 kgf/cm² 93
16.2 Válvula de pressão de ajuste de 3 kgf/cm² 94
16.3 Válvula de pressão de ajuste de 4 kgf/cm² 95
16.4 Válvula de pressão de ajuste de 5 kgf/cm² 97
16.5 Válvula de pressão de ajuste de 6 kgf/cm² 98

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da tecnologia, tubulações e vasos pressurizados são cada vez mais acessíveis ao contexto humano. No que tange o meio industrial, com a evolução dos materiais e na busca por processos mais rentáveis e eficientes, ocorre então a utilização de pressões de ordem elevadíssima, submetendo, assim, o ser humano ao risco de eventos catastróficos na ocorrência de falhas nessas tecnologias. Portanto, é nesse contexto que surgem os dispositivos de segurança, os quais em geral, atuam na prevenção desses eventos, quando possível, se não, ao menos amenizando seus efeitos.

Desde o início da Revolução Industrial que o homem busca maneiras de controlar e armazenar fluidos em elevadas pressões, nesse caminho ocorreram inúmeros acidentes, com danos imensuráveis. Segundo a Associação Norte-Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME), ocorreram nos Estados Unidos entre 1870 e 1910, aproximadamente dez mil explosões de caldeiras, nos anos seguintes o número de explosões por ano subiu para mais de mil e trezentas, levando a morte de cinquenta mil pessoas, por ano. Tais acontecimentos levaram a criação pela ASME, em 1919 e da Comissão Nacional de Inspetores de Caldeira e Vasos de Pressão nos Estados Unidos. A importância dessas entidades está no legado de regulamentações que estas criaram para este tipo de aplicação. No Brasil as principais regulamentações para este tema estão contidas na Norma Regulamentadora nº 13: Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações, publicada em 1978. (Chainho J. P. apud A Origem da Inspeção, sd.)

A produção em série de dispositivos de segurança para vasos de pressão e caldeiras, então, se difundiu pelo mundo para dar o aporte necessário as atividades industriais. Em função disso, a regulamentação e padronização se tornaram necessárias para garantir o desempenho desses componentes, elas dissertam sobre temas como dimensionamento, instalação, fabricação e aspectos construtivos desses equipamentos de segurança. Contido nesse universo estão as condições de operação deles, fundamentais para o correto dimensionamento destes elementos. Dessas condições, duas destacam-se: a pressão de abertura e a capacidade de vazão. Esta é de mais complexa mensuração quanto aquela, de maneira geral devido ao aparato experimental necessário para o ensaio. Isso é compreendido devido ao volume necessário de fluido para disparar uma válvula de segurança sob uma determinada

pressão ser irrisório frente ao volume necessário para ensaiar corretamente a capacidade de vazão dela. Tal fato leva a certa ausência desse tipo de ensaio nos laboratórios de calibração dos fabricantes, frente ao ensaio de pressão de abertura das válvulas de segurança, o qual é amplamente difundido, logo, bem comum nesse meio.

Em 1909, durante uma reunião da ASME, o sr. P. G. Darling colocou em discussão o conceito de Capacidade de Válvulas de Segurança, dando enfoque a variabilidade desses valores entre diferentes exemplares, provocando a justificativa inicial para a proposta de uma metodologia de ensaio padronizada para obtenção dessa característica desses dispositivos de segurança.

Como fruto deste desenvolvimento sobre padronização desses elementos, a ASME publicou em 1958 seu primeiro código de teste de performance para eles: ASME *Performance Test Code* 25 (ASME PTC 25). Com o tempo, revisões e atualizações foram publicadas, sendo a versão atual datada de 2014. Assim, este documento compõe hoje a principal padronização para o ensaio de capacidade de vazão para dispositivos de segurança e alívio.

Diante das linhas de pesquisa do Laboratório de Máquinas de Fluxo da Universidade Federal do Espírito Santo serem voltadas para a medição de vazão, surgiu a demanda de construção de uma bancada de teste para avaliar a capacidade de vazão de válvulas de segurança. Assim, esse trabalho procura avaliar essa aplicação, principalmente, em função dos equipamentos já presentes e instalados no laboratório.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo busca introduzir conceitos fundamentais ao entendimento dos mecanismos utilizados no estudo proposto, desde o objeto principal de estudo: válvulas de segurança, passando por conceitos relacionados a elas, até informações pertinentes ao entendimento do aparato experimental utilizado.

2.1 Dispositivos de alívio de pressão

Dispositivos de alívio de pressão ou, também, dispositivos de segurança são compreendidos como elementos mecânicos responsáveis por regular a pressão de um vaso de pressão ou tubulação em que se encontram instalados. Cabe-se o

entendimento ainda, que a pressão regulada é a montante do dispositivo, ou seja, na sua entrada.

Figura 1 - Dispositivos de alívio de pressão.

Fonte: Farris Pressure Relief Valves (Site da Seal Pump Engineering Ltd).

Uma divisão simples desses equipamentos pode ser feita quanto ao seu fechamento. Isso porque existem dispositivos que podem atuar seguidas vezes, sem intervenção, abrindo e fechando apenas com a ação do processo (*reclosing devices*), mas também existem dispositivos que atuam apenas na ação de abertura, sendo necessário a operação manual para que estes possam voltar ao estado inicial de operação (*nonreclosing devices*), ou seja, não possuem retorno espontâneo a sua posição fechada. Como exemplo desta última classe, destacam-se os discos de ruptura.

Figura 2 - Disco de Ruptura.

Fonte: Rupture Discs for conventional and special applications (Site da Rembe Inc).

O escopo desse trabalho abrange o estudo de válvulas de fechamento automático apenas, logo, não serão abordados dispositivos de fechamento manual.

2.2 Conceito de Válvulas de Segurança

As válvulas de segurança ou alívio são, portanto, equipamentos mecânicos capazes de atuar quando a pressão a montante de sua entrada se elevar acima do limiar para o seu disparo (abertura) e se fechar quando essa mesma pressão cair a um ponto inferior da sua pressão de fechamento.

Historicamente, as válvulas de segurança existem desde 1682, criadas na Inglaterra pelo físico francês Denis Papin (1647-1712). Suas construções mais primordiais se utilizavam de um sistema de contrapeso ao longo de um braço de alavanca. Esse modo de construção ainda pode ser encontrado nos dias atuais, entretanto o princípio mais utilizado atualmente é a atuação por mola.

Figura 3 - Válvula de segurança e alívio contrapeso

Fonte: Site da W. Burguer.

Um entendimento importante, já bastante consolidado, que tange o fluido de trabalho, é a diferenciação das válvulas de segurança e válvulas de alívio. Esta é responsável pela regulagem de pressão em escoamentos de fluidos incompressíveis, enquanto aquela exerce regulagem acerca de escoamentos de fluidos incompressíveis.

Uma outra diferença sobre esses dois tipos citados acima é evidenciada pelo regime de abertura. Isso porque, nas válvulas de segurança, o comportamento de abertura total ocorre imediatamente após ser atingida a pressão de abertura. Diferente das válvulas de alívio, nas quais ocorre o contrário, a abertura é gradual, diretamente

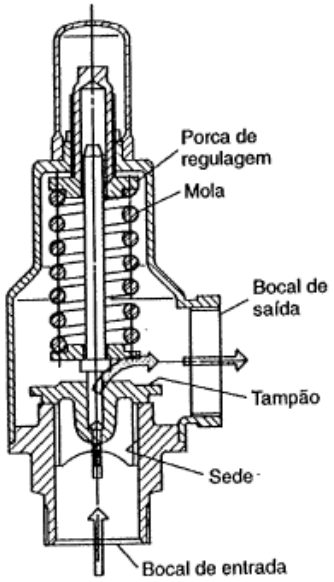
relacionada com o aumento da pressão. Segundo Telles (Telles, 2012), isso se dá devido a uma pequena quantidade de líquido vazada já realizar uma grande redução da pressão.

2.3 Aspectos Construtivos

Como citado anteriormente, a maioria desses dispositivos são atuados pela ação mecânica de uma mola. A regulagem da tensão dessa mola sob um deslocamento pré-determinado para coincidir com a pressão de abertura dela é, portanto, o modo de calibração desse tipo de dispositivo.

Segundo Telles (Telles, 2012), a construção desses dispositivos é basicamente similar (Figura 4), com variação interessante apenas no perfil da sede e do tampão que reside sobre ela. A ASME PTC 25, traz alguns aspectos construtivos desse conjunto, como vê-se no anexo 1.

Figura 4 – Válvula de segurança: construção mecânica



Fonte: Cortesia de Dresser Industries Inc. (apud Telles, 2012)

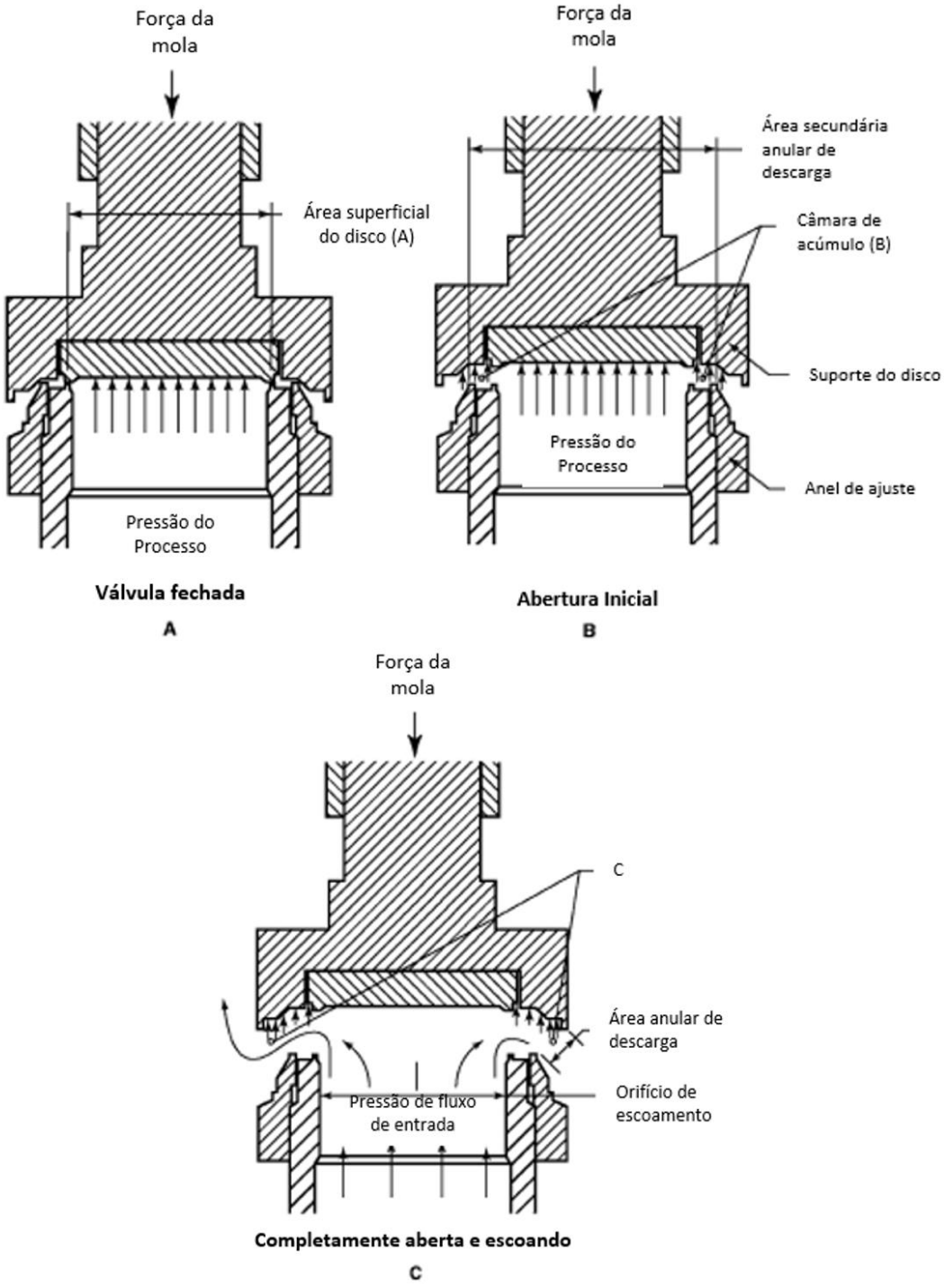
Vale citar, ainda, que existem no mercado modelos que possuem uma alavanca de acionamento manual. Esta é utilizada para procedimentos de emergência ou manutenção, quando se deseja o alívio do vaso de pressão que se encontre a pressões abaixo da pressão de abertura.

2.4 Princípio de Funcionamento

Um dos fatores diferenciadores das válvulas de segurança, como dito anteriormente, é sua capacidade de abertura total de maneira rápida ao atingir a pressão de abertura. Tal fenômeno contribui para a chamada *ação pop*. Esta ação é resultado da rápida expansão do fluido compressível através da câmara de entrada da válvula e recebe esse nome devido ao som característico, facilmente ouvido em testes de bancada durante a calibração.

A sequência dessa ação pode ser acompanhada pela figura 5. Inicialmente, a pressão do processo no qual a válvula está acoplada exerce uma força no disco (A), esta, porém, é menor do que a força necessária para provocar o deslocamento da mola que resiste ao movimento de elevação dele. Com o aumento da pressão do processo, até acima da pressão de ajuste da válvula de segurança, a força exercida pela pressão do sistema no disco se torna maior que a força de resistência da mola, assim ocorre o deslocamento do tampão. Neste momento, com uma abertura inicial entre a sede e o disco, inicia-se o escoamento de fluido, caracterizado pelo chiado (*simmering*). É importante, também, notar que ocorre um aumento da área de contato (B) entre o fluido (pressão do processo) e o disco, devido ao contato do fluido agora também com a área secundária de descarga. A soma dos efeitos do aumento da força contra o disco, devido ao aumento da área, e da força causada pela expansão do fluido na região de descarga provoca a abertura *pop*. Por fim, uma pressão adicional ocorre em C devido ao rápido aumento do escoamento do fluido pela área anular entre a borda interna do suporte do disco e o anel de ajuste. Essa pressão é responsável pela abertura substancial da válvula junto ao *pop*.

Figura 5 - Sequência de abertura de uma válvula de segurança sob ação de um fluido compressível.



Fonte: API 520 (adaptado pelo autor).

2.5 Medição de vazão por elementos deprimogênios

Com o desenvolvimento da tecnologia, diversas propostas de instrumentos têm sido inseridas no mercado objetivando mensurar a vazão de escoamentos. Essas tecnologias utilizam dos mais variados princípios, podendo ser subdivididas em dois

grandes grupos: medição de vazão direta e por inferência. Esta busca, através de um princípio físico, avaliar uma variável do escoamento e através de um raciocínio matemático concluir, inferir, na taxa de volume do escoamento no tempo, já aquela, através também de um determinado princípio físico, mensura diretamente a vazão do fluxo. Fato certo é que não existe elemento primário de medição de vazão que atenda a todas as aplicações, isso porque cada um deles possui características específicas que os limitam em determinadas situações.

Medidores de vazão deprimogênios são um tipo de elementos primários de medição de vazão que através de uma restrição de área ao escoamento, que provoca uma queda de pressão no mesmo, procura-se inferir a vazão medindo-se a variação de pressão provocada por essa restrição.

Também conhecidos, portanto, por medidores de vazão por diferencial de pressão, esses instrumentos se apresentam em várias geometrias, sendo a placa de orifício e o tubo Venturi os mais consolidados desse tipo de tecnologia. Entretanto, devido às limitações desses exemplos antepostos, fomenta-se o desenvolvimento de novas tecnologias, fruto disso é o medidor de vazão do tipo cone invertido, o qual é objeto de estudo do Laboratório de Medição de Vazão Multifásica na Universidade Federal do Espírito Santo – MEDMULTI, onde dar-se-á o desenvolvimento desse trabalho.

2.5.1 Medidor de vazão deprimogênio do tipo cone invertido

O trecho de medição de vazão disponível para o desenvolvimento desse trabalho é composto por um elemento primário de tecnologia relativamente recente. Apesar dos medidores de vazão por queda de pressão serem já bem antigos e estabelecidos tecnologicamente, o de tipo cone invertido é uma técnica ainda recente, que há pouco tempo ainda estava protegida por patente.

Diante desses pontos, vale o destaque para algumas características positivas que condicionam esse tipo de instrumento primário como uma opção de uso na indústria. Inicialmente a ausência de partes móveis em conjunto com o aspecto autolimpante o colocam em excelente situação do ponto de vista de manutenção. Mais especificamente, por sua restrição ao escoamento acontecer na linha de centro da tubulação, ocorre que o próprio escoamento carreia qualquer sedimento que poderia se depositar ali.

Uma segunda característica e talvez a mais importante para os medidores do tipo cone invertido é a capacidade de melhorar o comportamento do perfil de velocidades do escoamento, uma vez que a obstrução central induz ao direcionamento do escoamento para a superfície da tubulação. Essa interação, segundo Correia (Correia W. J., 2016), tende a forçar a uniformização dos perfis de velocidade, contribuindo para a redução da necessidade de longos trechos retos para a medição. Segundo Orlando (Orlando, 2010 apud Correia W. J., 2016) em casos de intensos acidentes de linha, apenas cinco diâmetros de tubulação reta são suficientes para tornar o escoamento uniforme.

Por fim, outros dois pontos positivos para esse tipo de medição frente a placa de orifício foram acrescentados por Correia (Correia W. J., 2016):

- A menor perda de carga devido a sua geometria que provoca uma variação da seção suave quando comparado a placa de orifício;
- Faixas de medição que chegam até a 10:1, quando as placas de orifício se limitam à 3:1.

Entretanto, existem também aspectos negativos que devem ser ressalvados para esse instrumento. Sendo o principal deles a ausência de padronizações (normas) e estudos especificamente para ele, tal fato está fortemente relacionado ao fato de a tecnologia ainda ser recente, como dito anteriormente.

2.5.2 Cálculo da vazão

O equacionamento é iniciado partindo da formulação diferencial da conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{1}$$

Admitindo as hipóteses de massa específica (ρ) constante ao longo do escoamento e tempo, regime permanente, escoamento completamente desenvolvido e perfis de velocidades lineares, chega-se em:

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 \tag{2}$$

Toma-se agora a equação de Bernoulli de conservação de energia, admitindo-se já as suas hipóteses: escoamento incompressível e invíscido, sem atrito, em regime permanente e escoamento ao longo de uma linha de corrente:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} + gz = constante \tag{3}$$

Desprezando a variação de altura entre as linhas de corrente e igualando os termos das duas seções, tem-se:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \tag{4}$$

Assim, unindo-se as equações antepostas, chega-se a formulação para a velocidade a montante do escoamento em função da variação de pressão:

$$u_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]}} \tag{5}$$

Sendo: $\Delta P = p_1 - p_2$.

Utilizando novamente as hipóteses de velocidade constante ao longo da seção transversal do escoamento e a massa específica constante, sabe-se que a vazão mássica teórica pode ser dada por:

$$\dot{m}_t = \rho \cdot u_2 \cdot A_2 \tag{6}$$

Logo:

$$\dot{m}_t = A_2 \sqrt{\frac{2\rho\Delta P}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]}} \tag{7}$$

Obtendo-se então a vazão mássica teórica do escoamento como função apenas do diferencial de pressão entre as seções 1 e 2. Entretanto, devido as diversas hipóteses adotadas, é razoável aceitar que esse equacionamento não levará a um valor real do fluxo do escoamento. Logo, a vazão mássica real ainda depende do

coeficiente de descarga do medidor (C_d), sendo esse definido pela calibração do mesmo, esse valor é encontrado pela razão entre o fluxo real, aferido por um outro tipo de medição mais confiável, a qual se possui plena confiança em sua calibração, e o fluxo teórico mensurado pela equação acima.

Assim, têm-se a formulação final da vazão mássica real do escoamento para um medidor deprimogênio:

$$\dot{m} = C_d A_2 \sqrt{\frac{2\rho\Delta P}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]}} \tag{8}$$

3 DEFINIÇÕES

Para o correto entendimento do trabalho proposto faz-se necessário estabelecer algumas definições de parâmetros e fenômenos que serão analisados e discutidos ao longo deste. Estes serão dispostos majoritariamente em consonância com a ASME PTC 25, que regula testes relativos ao aqui proposto, quando a definição for oriunda de outra referência, esta será evidenciada.

3.1 Características Operacionais

Nesta seção busca-se introduzir conceitos sobre variáveis relativas ao funcionamento das válvulas de segurança e ao teste proposto. Esses conceitos podem ser utilizados no desenvolvimento, execução do teste, ou ainda podem ser mostrados como resultados obtidos no teste proposto.

3.1.1 Pressão de Ajuste (*Set Pressure)* - PA

É entendido como o valor da pressão na entrada do dispositivo de alívio ou segurança no qual ele exibe o fenômeno de disparo ou abertura. É definido pelo fabricante. É a principal informação dos dispositivos de alívio e segurança.

Destaca-se que ao longo deste trabalho, toda vez que se atribuir à uma válvula o valor de uma pressão, essa é a de ajuste.

3.1.2 Sobrepressão (*Overpressure*)

Compreende-se como o incremento de pressão acima da de ajuste da válvula de segurança ou alívio, usualmente expresso em porcentagem da pressão de ajuste.

3.1.3 Pressão Máxima de Trabalho Permissível (PMTP)

Esse conceito tem relação ao equipamento no qual a válvula está instalada, sendo definido por Mathias (Mathias, 2008), como o limite mecânico de um vaso de pressão. É a maior das pressões aqui definidas, sendo que a pressão de ajuste do dispositivo de alívio deve ser menor que esta.

3.1.4 Pressão de Operação

Tal informação está ligada a pressão do processo ao qual o equipamento está conectado. É menor que a pressão de ajuste e, consequentemente, menor que a PMTP. Devido as características mais relacionadas ao processo onde a válvula está aplicada, esses dois últimos conceitos não estão descritos na ASME PTC 25.

3.1.5 Pressão de Alívio (*Relieving Pressure*)

Segundo ASME PTC 25 é a pressão de ajuste mais a sobrepressão. Além disso, Mathias (Mathias, 2008) ainda cita que é a pressão na qual a capacidade de vazão máxima da válvula é atingida.

3.1.6 Diferencial de Alívio (blowdown)

Interpreta-se como a diferença entre a pressão de disparo ou abertura e a pressão de fechamento. Pode ser expressa como porcentagem da pressão de ajuste.

Um ponto de vista importante para essa informação é o que tange os fenômenos operacionais que serão citados a mais à frente. Segundo Mathias (Mathias, 2008), se uma válvula for superdimensionada, a pressão de fechamento pode estar muito próxima da de ajuste, provocando o batimento (*chattering*). No caso de subdimensionamento, essa pressão pode estar longe da de ajuste e coincidir com a de operação, causando o chiado (*simmering*).

3.1.7 Contrapressão (*back pressure*)

Compreendido como o valor da pressão estática existente na saída do dispositivo de alívio de pressão devido a pressão no sistema de descarga. Esse valor pode ser oriundo do próprio coletor de fluido descarregado pela válvula, antes do disparo da válvula (contrapressão *superimposta*) ou surgir na descarga após o início do escoamento de alívio da válvula (contrapressão desenvolvida). Nesse presente trabalho as análises serão feitas com contrapressão atmosférica.

3.1.8 Acumulação

É o máximo aumento da pressão, acima da de operação, durante a situação de descarga da válvula. Em geral, ela é expressa em porcentagem da pressão de abertura.

3.1.9 Capacidade de Vazão

É dado como a capacidade de alívio do dispositivo de alívio de pressão, podendo ser avaliado em unidades de volume ou massa por tempo. Mathias (Mathias, 2008), cita como o principal fator na especificação de uma válvula de segurança, em geral cedido pelo fabricante. Além disso, faz uma observação destacável do ponto de vista da aplicação: a capacidade de vazão efetiva de uma válvula de segurança não deve ser inferior à capacidade de produção do equipamento que ela irá proteger.

É a principal informação que se deseja mensurar pelo teste proposto nesse trabalho.

3.1.10 Coeficiente de Descarga

Conceito comum da mecânica dos fluidos que trata de medição de vazão, é igual a razão entre a vazão real e teórica através do dispositivo estudado. No caso das válvulas de segurança, especificamente, a vazão teórica é dada pelos conceitos de escoamento compressível. Logo, como a vazão calculada (teórica) é uma limitação física do escoamento, Mathias (Mathias, 2008), destaca que a vazão real é sempre menor do que a teórica devido as irreversibilidades.

3.1.11 Inclinação

A inclinação é um parâmetro introduzido pela ASME UG-131, o qual participa da avaliação da possibilidade de aplicação do símbolo do Código a um determinado projeto de válvulas de segurança. Vale dizer que é calculado pela razão entre a capacidade (vazão) medida e a pressão absoluta do fluxo em kPa.

3.2 Fenômenos Operacionais

Algumas situações de operação das válvulas de segurança merecem destaque, uma vez que compõem grande influência sobre o seu desempenho, logo, sobre a correta realização do ensaio proposto.

Tais situações são objetos de muitos estudos, os quais buscam entender os fenômenos por meio da modelagem física, simulação numérica e investigações experimentais. Green e Woods (Green & Woods, 1973 apud Hos, Champneys, Paul, & McNeely, 2014) desenvolveram a primeira discussão sobre o que de fato acarretaria essas instabilidades nas válvulas em geral, sugerindo que esses podem ser induzidos por 5 diferentes efeitos:

- A interação entre a válvula e outros elementos próximos;
- A transição do escoamento de laminar a turbulento durante a abertura ou fechamento da válvula;
- O efeito da força restauradora negativa;
- A histerese da força do fluido;
- A flutuação da pressão de alimentação.

3.2.1 Batimento (Chattering)

Inicialmente, o batimento é definido por Mathias (Mathias, 2008) como “movimento rápido e anormal dos componentes móveis de uma válvula de segurança e alívio em que o disco tem contato físico com o bocal durante o processo de alívio”. Mathias destaca, ainda, que esse fenômeno não é exclusivo desse tipo de válvula, ocorrendo também em válvulas de bloqueio e retenção, por exemplo, sob escoamento de fluidos compressíveis, podendo levar a diversos danos no elemento.

Ressalta-se o “contato físico” entre as superfícies, pois segundo a ASME PTC 25, esse contato é o que diferencia do próximo fenômeno, flutuação.

3.2.2 Flutuação (Fluttering)

Como anteposto, ASME PTC 25 define esse fenômeno como um anormal e rápido movimento de oscilação da parte móvel de uma válvula de segurança na qual o disco não realiza contato com a sede. Mathias (Mathias, 2008), segue a mesma ideia, comparando a flutuação com o batimento sem contato entre as superfícies. Além disso, ele destaca que os danos causados ao componente se restringem a guia de movimentação.

Isto posto, vale destaque que a ASME PTC 25 evidencia que, durante o ensaio aqui discutido, a observação das características mecânicas da válvula sob estudo deve ser feita com atenção e registro em caso de ocorrência de batimento ou flutuação.

3.2.3 Chiado (Simmering)

Esse fenômeno tende a ocorrer antes da ação de disparo da válvula e é definido por ASME PTC 25 como um escape audível e visível do fluido entre a sede e o disco a uma pressão de entrada abaixo da pressão de disparo, cuja vazão não é mensurável.

Mathias (Mathias, 2008), cita ainda que esse vazamento pode prejudicar a vedação do componente, isso porque as elevadas velocidades que surgem na pequena área gerada provocam efeitos erosivos nos elementos da vedação do componente. Há ainda a possibilidade de formação de gelo, devido ao efeito endotérmico da expansão intensa nessas regiões.

3.2.4 Ciclagem (Cycling)

Esse fenômeno pode ser entendido como um batimento de frequência muito baixa. A recomendação API RP 520 caracteriza como Ciclagem os múltiplos eventos de abertura e fechamento de uma válvula de segurança cuja frequência seja da ordem de 1 Hz ou menor. Contrapondo a frequência de flutuações ou batimentos, da ordem de 10 Hz ou mais.

3.2.5 Travamento (Hang-up)

Por fim, menos comum na literatura é o travamento, Mathias (Mathias, 2008), cita o agarramento como uma baixa taxa de fluxo antes que a válvula feche

definitivamente. Ele destaca razões mecânicas para esse efeito, que pode manter a válvula ainda aberta mesmo quando o diferencial de alívio já fora atingido.

4 RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS

Muitos documentos de recomendações tentam disciplinar a aplicação de válvulas de segurança, entretanto no que tange o objetivo desse trabalho, mensurar a capacidade de vazão de válvulas de segurança, apenas a recomendação ASME PTC 25 procura definir um padrão para o ensaio de capacidade. Ainda vale destaque que a proposta inicial desse projeto é a de montar um laboratório de certificação de capacidade de válvulas de segurança segundo a recomendação ASME UG-131, assim, as definições para o experimento devem seguir o padrão ditado pela organização, logo, justificando o uso principalmente da ASME PTC 25.

4.1 Performance Test Code 25: Pressure Relief Devices

Como dito anteriormente, esse documento é a principal referência para esse trabalho, uma vez que ele dita os requisitos para a correta proposta de testes de vazão de válvulas de segurança, mais especificamente ao longo de seu terceiro capítulo. Ao longo desse trabalho, serão enunciados limites, parâmetros e especificações estabelecidos por esse código para a realização do teste e ao fim, o julgamento dos resultados obtidos de acordo com os parâmetros pedidos nesse código para a validação do ensaio.

Vale ainda destaque que ao longo das informações observadas na ASME PTC 25, outras recomendações ASME PTC são referenciadas, como as que ditam padrões para a mensuração de incertezas de ensaios (ASME PTC 19.1), para a medição de pressão (ASME PTC 19.2), temperatura (ASME PTC 19.3) e vazão (ASME PTC 19.5).

4.2 ASME UG-131

O intuito inicial deste trabalho fora fundamentar testes de capacidade de vazão de válvulas de segurança para poder certificá-las de acordo com esse documento. A ASME UG-131 dita os parâmetros que devem ser analisados e o requisitos que eles devem apresentar para que as válvulas sob análise recebam a certificação de sua capacidade.

Diferentemente da ASME PTC 25, a UG-131 não indica requisitos para o teste, mas sim, a metodologia de análise dos resultados para a certificação ou não das

válvulas em teste. Logo, ao longo deste trabalho é de se esperar que este documento seja bastante observado no exame dos resultados, enquanto aquele no desenvolvimento da estrutura e metodologia do teste.

4.3 Outras Recomendações

A utilização dos elementos de segurança para limitação da pressão está presente em todo o mundo, levando a consequente regulação de cada setor ou região sobre os seus parâmetros de utilização, instalação, certificação e dimensionamento. Entretanto para os fins deste referido trabalho, os ensaios de capacidade de vazão são pouco abrangidos. Em sequência serão citadas mais algumas recomendações, com destaque para o que elas tratam no referido tema.

4.3.1 ISO 4126-1

Com atuação majoritariamente na Europa, essa norma traz informações sobre as disposições construtivas das válvulas de segurança, os testes de pressão de abertura e estanqueidade, evidenciando parâmetros de interesse e seus critérios de aceitação.

Quanto a avaliação de capacidade de vazão de válvulas de segurança este documento traz as fórmulas para os cálculos dos dados teóricos de maneira bastante similar a ASME UG-131, além de critérios de tolerância para a incerteza produzida no ensaio. De uma maneira geral, essa norma se equivale mais a ASME UG-131, avaliando o experimento e não propondo uma metodologia correta de sua execução.

4.3.2 Normas Técnicas internas da Petrobras

Diante do grande impacto nacional causado pela Petrobras, é comum no meio industrial basear-se na normatização interna desta empresa para o desenvolvimento de aplicações específicas. Nesse tema cita-se a norma N-2368, a qual trata da inspeção, manutenção, calibração e teste de válvulas de segurança e/ou alívio. Novamente, no que interessa esse trabalho, ela não traz informações sobre teste de capacidade, se limitando a testes de pressão e estanqueidade.

4.3.3 API 520

Em consonância com as citadas anteriormente, a recomendação da Associação Internacional do Petróleo também não aborda a metodologia de ensaio para testes de capacidade de vazão. Quanto a este parâmetro ela aborda apenas a metodologia e equacionamento para dimensionamento do componente. As demais características são similares a norma ISO citada.

5 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

As instalações que abrigam a estrutura do experimento proposto estão localizadas no Laboratório de Medição de Vazão Multifásica – MEDMULTI, que faz parte do Laboratório de Máquinas de Fluxo da Universidade Federal do Espírito Santo.

Com a intenção de descrever a construção física do teste, esse capítulo irá indicar os principais componentes utilizados, bem como as informações pertinentes a eles, iniciando por uma sequência de imagens do aspecto construtivo do experimento.

Figura 6 - Foto do trecho de medição de vazão e da instrumentação da instalação.

Fonte: Imagem feita pelo autor.

Figura 7 – Foto da válvula de controle e vaso de teste da instalação.

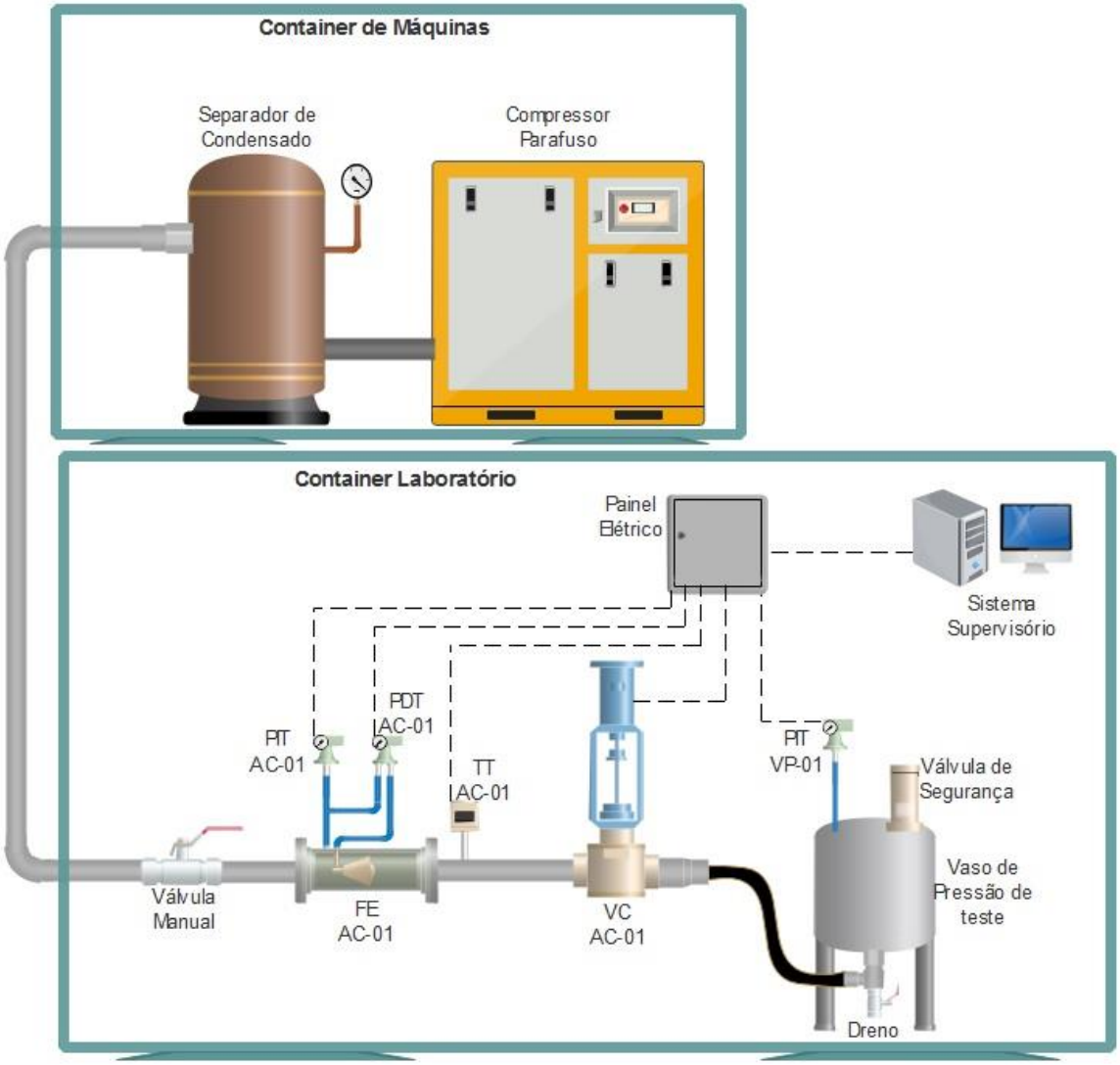
Fonte: Imagem feita pelo autor.

5.1 Diagrama P&ID

Inicialmente, com o intuito de contextualizar a instalação da planta de teste como um todo, fora feito um esquema de montagem ilustrativo dos equipamentos utilizados no trecho de teste, evidenciando a separação deles entre os dois containers do laboratório. Na sequência, utilizando-se das padronizações da Sociedade Internacional de Automação – ISA, fora concebido um diagrama P&ID com as simbolizações dos instrumentos e linhas de sinais utilizados na planta de teste desenvolvida. Segue, também, uma tabela com as características dimensionais das tubulações utilizadas na linha de teste.

Ambos os diagramas devem ser utilizados ao longo do trabalho para auxiliar a compreensão dos assuntos discutidos pertinentes aos instrumentos descritos neles.

Figura 8 – Esquema da montagem da linha de teste no laboratório de máquinas de fluxo da UFES.



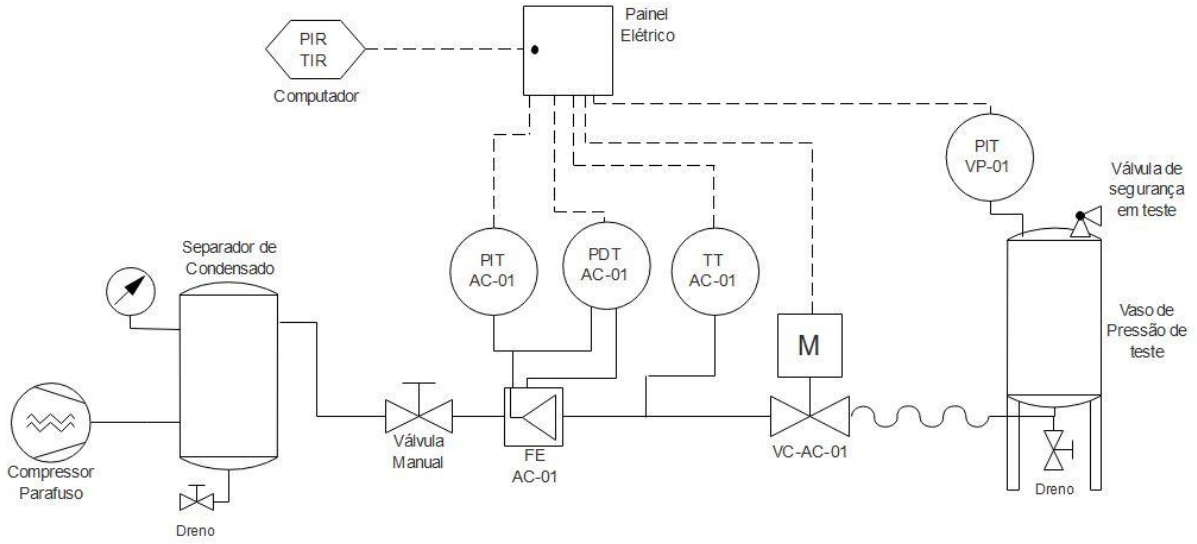
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1 - Características dimensionais das tubulações da planta de teste.

Trecho	Comprimento	Diâmetro Nominal
Entre o separador de condensado e a válvula manual	12 m	3/4"
Entre a válvula manual e o FE-AC-01	280 mm	3/4"
Entre o FE-AC-01 e a válvula de controle	600 mm	3/4"
Entre a válvula de controle o vaso de teste (mangueira)	1500 mm	3/4"

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 - Diagrama P&ID da linha de teste de acordo com a simbolização padrão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 V-Cone utilizado

O instrumento utilizado nesse experimento como elemento primário de medição de vazão (FE-AC-01) é um V-Cone, produzido pela fabricante McCrometer, cujas características principais foram dispostas na tabela em sequência.

É digno de destaque que a faixa de calibração do instrumento primário de medição de vazão utilizado é fator limitante no teste de capacidade de vazão das válvulas de segurança, mesmo porque a própria interface do sistema supervisório responde com valor nulo sempre que o valor do diferencial de pressão medido estiver fora da faixa de calibração do instrumento.

Figura 10 – Ilustração V-Cone.

Fonte: Documento do site da McCrometer (V-Cone General Brochure).

Tabela 2 - Características do V-Cone utilizado

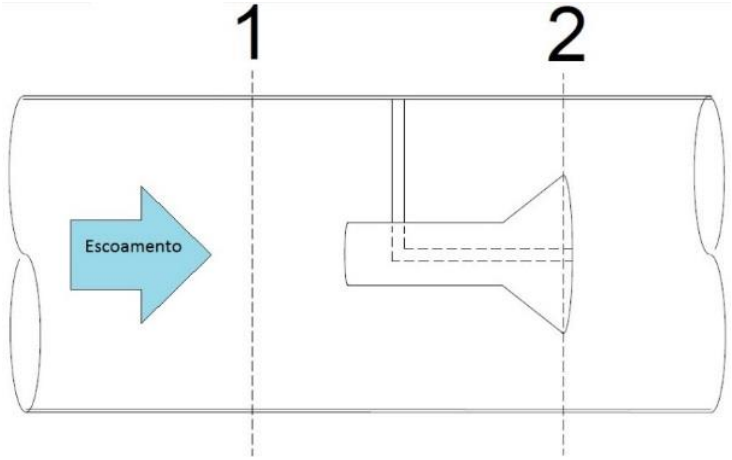
Incerteza da medição	0,5%
Faixa de calibração (diferencial de pressão)	6,406 – 644,45 mmca
Diâmetro Nominal	3/4''
β	0,75
Coeficiente de Descarga	0,80

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1 Cálculo da Vazão

Portanto, no laboratório onde fora desenvolvido esse trabalho utiliza-se o medidor do tipo cone invertido, logo, a formulação da vazão mássica real (equação 8) será desenvolvida segundo a sua geometria.

Figura 11 - Geometria do medidor do tipo cone invertido.



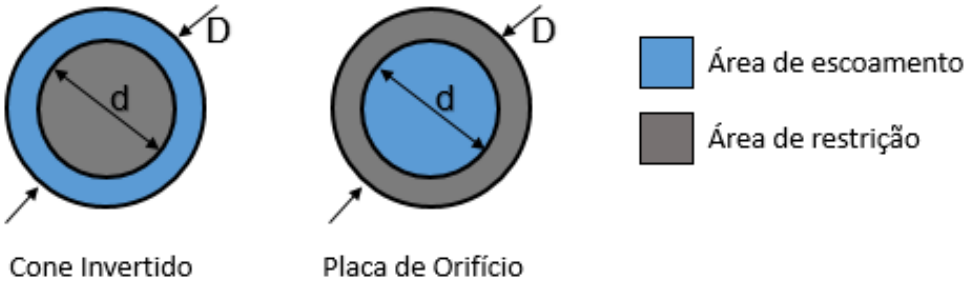
Fonte: Elaborado pelo autor.

Da equação da vazão mássica real encontrada para medidores deprimogênios de uma maneira generalizada, pode-se desenvolver o conceito da razão β, muito conhecida de placas de orifício.

$$\beta = \sqrt{\frac{A_{mín}}{A_{máx}}} \tag{9}$$

Para a medição de vazão por placa de orifício, devido a geometria do elemento, a equação se resume a razão entre os diâmetros do orifício e da tubulação, levando a um falso entendimento de que esse seria o real conceito desse fator β.

Figura 12 - Ilustração da vista axial da tubulação: Diferença das áreas de restrição ao escoamento: Medidor Cone Invertido x Placa de Orifício.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, para o medidor do tipo cone invertido, a área mínima para o escoamento é dada por:

$$A_{mín} = \frac{\pi . D^2}{4} - \frac{\pi . d^2}{4} \tag{10}$$

Logo, seu β pode ser definido como:

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \tag{11}$$

Há, ainda, um fator que compõe a medição do fluxo por esse instrumento. Indicado pela letra Y, é o fator de expansão para fluidos compressíveis. Segundo Batinga (Batinga, 2005), inicialmente era utilizado o fator de expansão oriundo das placas de orifício, segundo a norma ISO 5167, entretanto a fabricante do elemento primário de medição e até recentemente detentora de sua patente, McCrometer, solicitou ao National Engineering Laboratory (NEL) um rigoroso estudo para determinar esse fator. Sendo a seguinte equação resultado:

$$Y = 1 - (0{,}649 + 0{,}696\beta^4)\frac{\Delta P}{k . P} \tag{12}$$

Devido ao fluido de trabalho para este experimento ser compressível, é importante que a sua massa específica seja calculada de acordo com o estado

termodinâmico do escoamento. Portanto, é necessário mais um equacionamento para defini-la. Como o fluido de trabalho da linha é ar atmosférico, é razoável modelá-lo como gás perfeito. Assim, utiliza-se a Lei dos Gases Perfeitos para obter-se a massa específica do escoamento:

$$\rho = \frac{P}{T}\frac{M}{\bar{R}} \tag{13}$$

Sendo P e T a pressão e a temperatura do estado termodinâmico do fluido, M seu peso molecular e $\bar{R}$, a Constante Universal dos Gases Perfeitos.

Finalmente, agora então é possível compreender o equacionamento cedido pelo fabricante do instrumento, para mensuração da vazão de fluido compressível:

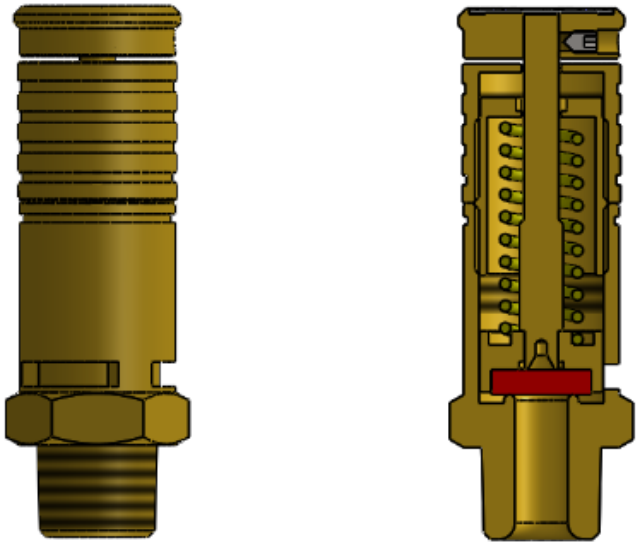
$$q_m = \frac{\pi}{4}\frac{D^2\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}}C_d Y\sqrt{2\rho\Delta P} \tag{14}$$

Recentemente, em 2015, foi lançada a primeira versão da norma de medição de vazão para este tipo de medidor: ISO 5167 – Parte V, ainda com pouca informação, quando comparado as demais partes que tratam de placas de orifício, bocais e Venturi. Ela ratifica o cálculo do fator de expansão e da vazão mássica como descrito acima. Além disso, ela traz ainda a dimensão de trechos retos mínimos a montante e a jusante para a medição ideal, sendo esse valor de seis diâmetros, logo, como nota-se pela tabela das características dimensionais da tubulação mostrada anteriormente, as instalações apresentam trechos retos mais longos que os mínimos estabelecidos pela norma.

5.3 Válvulas de Segurança utilizadas

Os dispositivos de segurança testados foram disponibilizados pela empresa Fluid Controls do Brasil, fabricante destes dispositivos. São do modelo VS-140N, cuja conexão ao processo é de diâmetro ¼”. São construídas basicamente em latão, sendo sua mola fabricada em aço carbono. Todos os exemplares utilizados foram calibrados pelo laboratório do próprio fabricante. Abaixo segue um desenho com a imagem e uma vista em corte do dispositivo.

Figura 13 – Válvula de segurança VS 140N



Fonte: Cedido pela Fluid Controls do Brasil.

5.4 Equipamentos de suporte

O laboratório onde fora feito esse trabalho fora dimensionado por Correia (Correia W. J., 2014) para trabalhar com escoamentos trifásicos, de água, óleo e ar, com o objetivo de simular diferentes padrões de escoamentos de gás úmido. Logo, por adaptação, utilizou-se a linha de ar para a execução deste projeto. Assim, os equipamentos utilizados não foram dimensionados para a realização deste trabalho, mas sim aproveitados e, quando possível, adaptados para esse objetivo.

5.4.1 Compressor

A linha de ar é alimentada por um compressor parafuso Chiaperini COPA 30 HP. Ao longo da evolução desse trabalho uma das dificuldades encontradas foi superar a oscilação de vazão e pressão apresentada devido ao trabalho do compressor, isso porque o regime de trabalho desta máquina apresenta uma específica característica que provoca esse comportamento.

Figura 14 - Compressor COPA 30 HP.

Fonte: Site da Chiaperini Industrial.

Este equipamento funciona trabalhando entre duas pressões, uma de alta e uma de baixa. Toda vez que a pressão a sua jusante atingir a pressão de baixa, ele inicia o processo de compressão, entrando em regime de trabalho. A pressão em sua saída aumenta, até atingir a pressão de alta, então o compressor entra em estado de repouso. Destaca-se que devido ao interesse desse trabalho ser realizar um ensaio de laboratório, é fundamental que as variáveis sejam estáveis no tempo, logo, pressão e vazão o mais constantes possíveis. Isso é evidenciado ainda pelos requisitos para regime permanente descritos na ASME PTC 25 – esses requisitos serão descritos, ainda, ao longo do trabalho. Assim buscou-se adotar a diferença mínima entre as pressões de alta e baixa, utilizando-se desse controle de pressão que o próprio equipamento realiza, assim, seleciona-se o menor intervalo possível entre a pressão de alta e de baixa, sendo esse 0,2 bar.

5.4.2 Vaso de pressão

A linha de ar pressurizado utilizada para este teste é composta por dois vasos de pressão. O primeiro deles não tem muita relação com o experimento, por ser o vaso de pressão que atua em conjunto com o compressor para a alimentação da linha, uma de suas funções é reter o condensado formado até aquele ponto da linha. Já o segundo vaso de pressão, o qual está com a válvula de segurança de teste instalada compõe objeto específico de análise, uma vez que existe relação direta com o experimento.

Novamente, vale o destaque que este equipamento fora reaproveitado de uma aplicação externa, logo, não fora dimensionado para esta instalação. Tal fato leva a situação que este vaso de pressão constitui o limitante principal para a aplicação do teste. Isso porque sua pressão máxima de trabalho é de 8 kgf/cm², apesar da linha de ar pressurizado ter sido dimensionada para aplicações de até 12 bar (12,24 kgf/cm²) e existirem 10 exemplares de válvulas de segurança (PA = 1 a 10 kgf/cm²), como o experimento necessita de uma sobrepressão, os testes serão realizados apenas até pressões de 7 kgf/cm².

Figura 15 – Reservatório utilizado como vaso de teste, acompanhado de seu compressor original.

Fonte: Site da Chiaperini Industrial.

Outro limitante imposto pelo reservatório utilizado é a ausência de entradas para medição de temperatura. O reservatório, como na imagem é oriundo de um compressor odontológico, assim, possui apenas uma saída para drenagem de condensado (embaixo do reservatório) e duas saídas superiores, uma de alimentação e outra para medição de pressão.

A montagem que foi escolhida está descrita nos diagramas P&I e consiste na alimentação de ar pela entrada inferior, bem como o dreno de condensado, a instalação da válvula de segurança na entrada superior de maior diâmetro e a medição de pressão na outra entrada superior.

5.4.3 Válvula de controle

Grande parte da metodologia dos ensaios é realizada atuando a válvula de controle (VC-AC-01), a qual possui movimentação via motor de passo (atuação elétrica). Abaixo seguem as características principais da válvula utilizada.

Figura 16 - Válvula de controle Hora BR216RA

Fonte: Site do EastEnergoGroup.

Tabela 3 - Propriedades da válvula de controle (VC-AC1)

Kvs [m³/h]	4
Diâmetro Nominal	1/2''
Curva Característica	Igual porcentagem

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.4 Trena a laser

Com o intuito de realizar a medição do deslocamento vertical da válvula de segurança aberta, uma trena a laser foi instalada em um suporte de laboratório sobre o vaso de teste, com seu foco direcionado a face superior do cabeçote da válvula de segurança.

A trena laser utilizada é um modelo Disto D2 da marca Leica, que tem como característica uma precisão de ±1,5 mm.

5.5 Instrumentação utilizada

Aspecto importante para o acompanhamento do teste de capacidade de vazão é a instrumentação utilizada para tanto. Inicialmente existem ligados ao elemento primário de medição de vazão (FE-AC-01: V-Cone) um medidor de pressão estática

(PT-AC-01) e um medidor de pressão diferencial (PDT-AC-01). Mais à frente do elemento primário de medição de vazão, 150 mm, têm-se um medidor de temperatura PTC-100 (TT-AC-01), esses três aparatos atuam cedendo dados para a inferência da vazão de ar que transpõe a linha, participando do experimento indiretamente.

Já no vaso de pressão em que a válvula de segurança está instalada, existe um medidor de pressão estática (PT-VP-01), o qual é responsável por mensurar a pressão ao longo de todo o teste.

A seguir, segue uma tabela com as especificações dos instrumentos acima descritos.

Tabela 4 - Especificações da instrumentação utilizada.

Instrumento	Marca	Faixa de Trabalho	Faixa de Calibração	Incerteza da medição	Exatidão da Calibração
PT-AC-01	Rosemount	1 - 55 bar	0 - 10 bar	0,065% do spam	0,025%
PDT-AC-01	Rosemount	-2,5 - 2,5 bar	0 - 700 mmca	0,065% do spam	0,050%
TT-AC-01	-	-	0 - 100 ^{o}C	0,5 ^{o}C	-
PT-VP-01	Rosemount	1 - 55 bar	0 - 10 bar	0,065% do spam	0,025%

Fonte: Elaborado pelo autor

5.5.1 Calibração

Os instrumentos de medição de pressão foram calibrados utilizando-se de um calibrador universal de processo MCS-XV da fabricante PRESYS. O procedimento de calibração foi realizado segundo o manual do aparelho, que possui um certificado de garantia que garante que o instrumento foi ajustado e verificado, utilizando-se de padrões devidamente rastreados, tendo em vista o atendimento das prescrições estabelecidas pela norma ISO 9001. Esse certificado teve validade até 30 de outubro de 2016, nesta data todos os instrumentos de pressão já estavam operando, dado que os testes já haviam sido iniciados.

Ainda segundo esse certificado, os padrões utilizados são rastreados ao National Institute of Standards and Technology – NIST ou Instituto de Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO, através de uma cadeia metrológica pré-estabelecida.

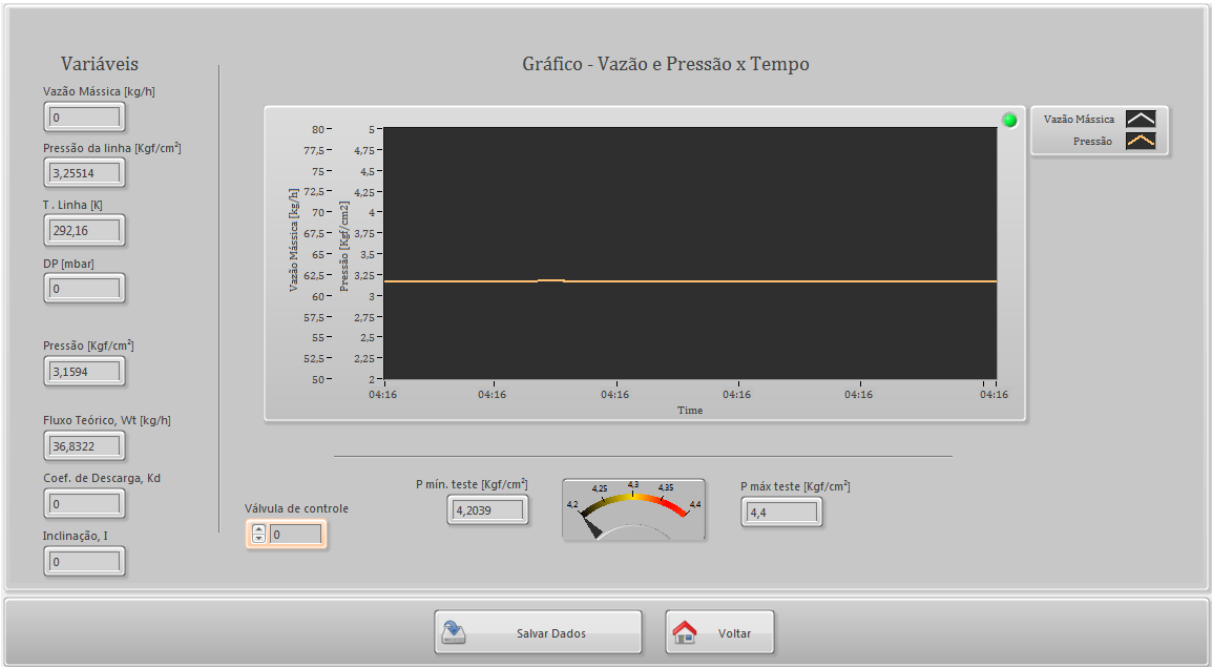
Por fim, os valores relativos à sua exatidão estão dispostos na tabela de características da instrumentação utilizada, na coluna de exatidão da Calibração.

O transmissor de pressão utilizado não possui calibração recente, por motivos de não possuir necessidade e nem possibilidade de alteração na faixa de calibração, não foi proposto método de calibração para este instrumento.

5.6 Sistema Supervisório

O software utilizado para o acompanhamento, atuação da válvula de controle e coleta de dados da instrumentação utilizada é o LabView. A interface foi feita por um desenvolvedor associado certificado, ratificando a credibilidade da aplicação, baseado na demanda necessária de dados a serem visualizados e coletados. É composta basicamente de duas abas: uma de acompanhamento e operação do experimento e outra de configuração das entradas para o ensaio. Segue uma imagem da interface principal da aplicação criada e da interface de configuração dos dados do teste a ser realizado.

Figura 17 – Interface principal da aplicação criada para o teste de capacidade de vazão de válvulas de segurança.



Fonte: Print Screen do software feita pelo autor.

Figura 18 - Interface da aba suporte para configuração dos dados do experimento a ser realizado.

Fonte: Print Screen do software feita pelo autor.

É importante destacar que a aquisição de dados fora realizada a uma taxa de 2 coletas por segundo, ou seja, o intervalo de aquisições fora de 500 ms para os ensaios realizados nesse trabalho.

6 DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA DOS ENSAIOS

O desenvolvimento deste ensaio ocorreu gradativamente com o aumento do conhecimento a respeito das válvulas de segurança, sendo que a principal evolução se deu com o conhecimento da recomendação ASME PTC 25. Este capítulo vai trazer metodologia, os resultados e críticas as primeiras concepções, os requisitos para o ensaio e, por fim, a metodologia adotada na concepção final dos ensaios.

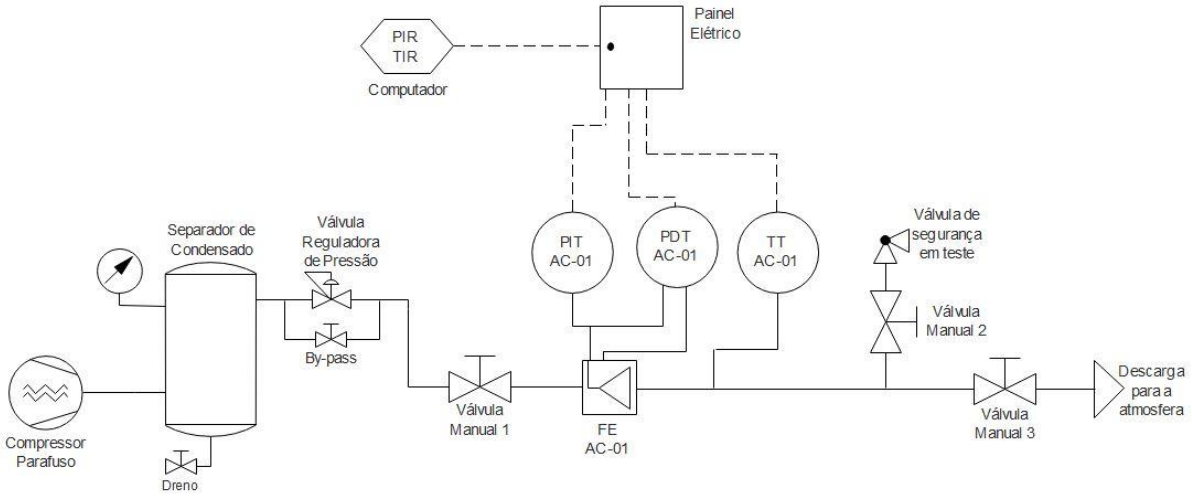
6.1 Propostas iniciais do experimento

A primeira proposta do experimento foi iniciada de maneira bastante simples. Devido ao trecho de medição de escoamento de ar comprimido já ser bem estabelecido no laboratório, apenas instalou-se a válvula de segurança a jusante deste trecho. A primeira dúvida que surgiu fora quanto a metodologia do teste, uma vez que a existência da ASME PTC 25 ainda era desconhecida, isso implicava por

exemplo na dúvida se o ensaio poderia ser realizado diretamente em uma tubulação, com ausência de um vaso de pressão. Outro ponto negativo de destaque fora a incapacidade de realizar o teste utilizando-se da válvula de controle, uma vez que esta estava a jusante da derivação onde fora instalado a válvula de segurança para teste, logo, todo a metodologia que fora testada dependia da atuação do operador sobre um conjunto de válvulas manuais. Ainda no que tange as dificuldades encontradas inicialmente, o regime de trabalho oscilante do compressor atingia diretamente as medições, provocando resultados de leituras de vazão e pressão altamente variáveis de maneira periódica no tempo.

Assim, a primeira evolução proposta foi a instalação de uma válvula reguladora de pressão para controlar melhor a pressão a sua jusante, causando uma queda de pressão pela sua atuação estrangulando o escoamento e assim atenuar as respostas oscilantes das variáveis do teste. Vale destaque que o exemplar que se possuía dessa válvula era de operação manual com regulagem perante um manômetro analógico e sua instalação fora realizada no container de máquinas, tornando dispendioso operá-la. Diante de tudo isso, o resultado inicial da montagem da linha de teste pode ser descrito pelo diagrama P&ID seguinte.

Figura 19 - Diagrama P&ID da primeira construção da linha de teste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliar esta montagem e a utilização da válvula reguladora de pressão, foram propostos dois métodos de teste descritos a seguir.

1 – Alimentação direta pelo tanque (TQ)

Nesse método, a válvula reguladora de pressão estava bloqueada, utilizando o by-pass, assim a alimentação da linha era feita diretamente pelo tanque. O teste pode ser descrito da seguinte maneira:

1. Inicialmente escolhe-se uma faixa de trabalho do compressor imediatamente acima da pressão de ajustagem da válvula de teste.
2. Então submete-se a linha, despressurizada e estanque, a alimentação do compressor e verifica-se se o fenômeno de disparo da válvula ocorre. Caso contrário, despressuriza-se a linha, aumenta-se em 0,1 bar a faixa de trabalho do compressor e repete-se o procedimento até que se encontre a mínima faixa de trabalho do compressor que dispare a válvula.
3. Encontrado esse intervalo, a válvula é então submetida a um intervalo de aproximadamente 4 minutos de teste onde se aquisitam automaticamente aproximadamente 1200 dados de pressão da linha, vazão e temperatura.

Devido a variação de regime do compressor, ora trabalhando, ora em repouso, a vazão e a pressão da linha são submetidas a frequentes oscilações, de períodos da ordem de 10 segundos. Tal comportamento foi tido como incômodo, motivando a implementação de uma válvula reguladora de pressão na saída do tanque, gerando o segundo método de teste.

2 – Alimentação pela válvula reguladora de pressão (RP)

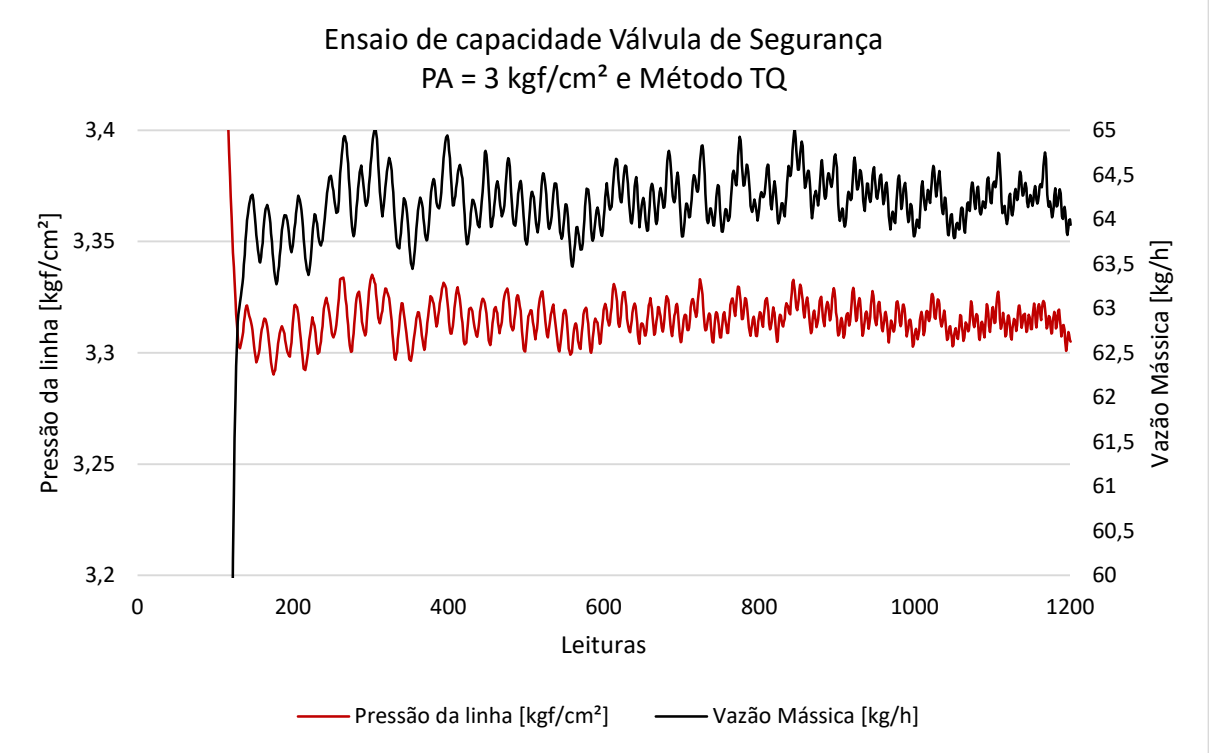
O teste utilizando o escoamento pela válvula reguladora de pressão seguiu os seguintes procedimentos:

1. O compressor é configurado para trabalhar em uma faixa de pressão de 10 a 10,2 bar;
2. A linha é aberta para o escoamento de ar comprimido, mantendo-se a válvula 2 fechada, através da válvula reguladora de pressão regula-se a pressão de fluxo da linha a um valor imediatamente superior a pressão de ajustagem;
3. O escoamento é interrompido pela válvula manual 1. A linha se despressuriza e, então, a válvula manual 3 é fechada, mantendo a linha, agora, estanque. A válvula manual 2, que liga a válvula de segurança ao processo é aberta;

4. Abre-se, então, a válvula manual 1 e observa-se se a válvula de segurança irá disparar. Caso não, se repete os procedimentos anteriores aumentando a pressão de fluxo escolhida na válvula reguladora de pressão.
5. Caso ocorra o fenômeno de disparo, a válvula de segurança é então submetida a um intervalo de aproximadamente 4 minutos de teste onde se aquisitam automaticamente aproximadamente 1200 dados de pressão da linha, vazão e temperatura.

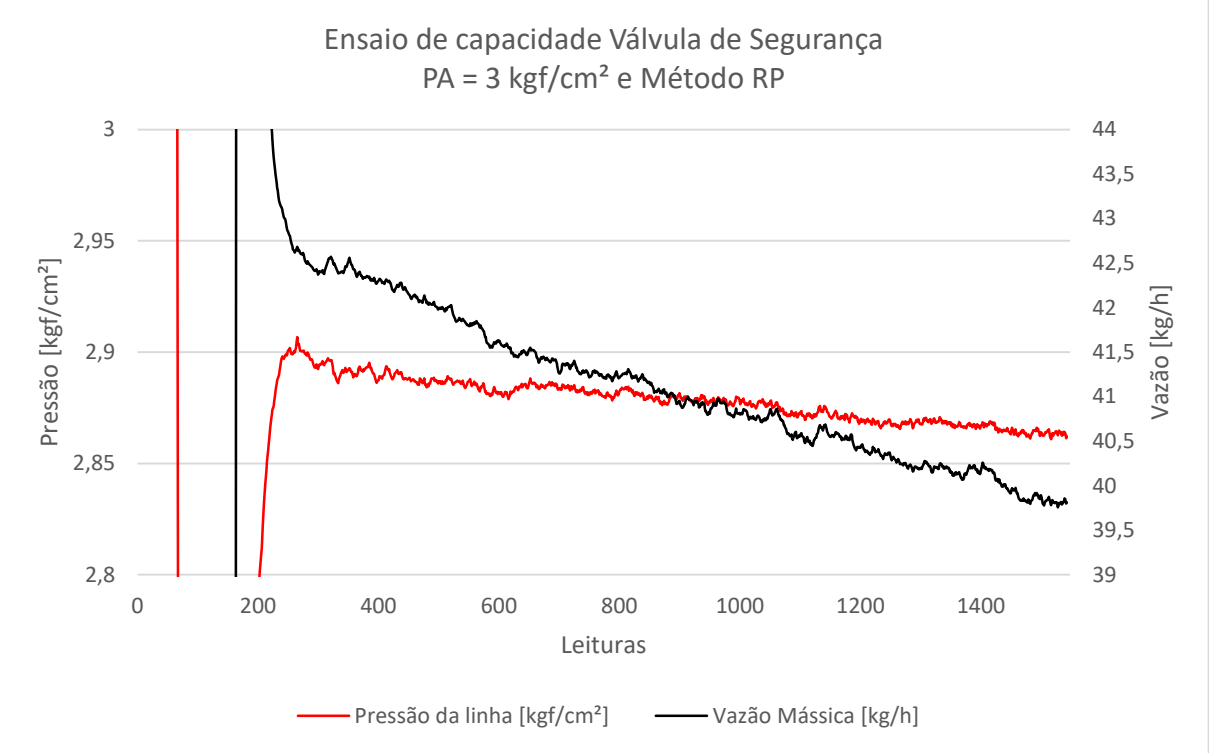
Para avaliar os resultados destas duas metodologias foram feitos ensaios com uma válvula de PA = 3 kgf/cm². Os resultados encontrados para estes dois testes são mostrados nos gráficos a seguir.

Figura 20 – Ensaio de capacidade de vazão pelo método de alimentação direta do tanque.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Ensaio de capacidade de vazão pelo método de alimentação através da válvula reguladora de pressão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A priori, poucas conclusões puderam ser retiradas entre os dois métodos experimentais. Isso porque, apesar de visualmente o método RP gerar um regime menos oscilante, ele também causa uma queda gradativa da média das variáveis. Entendeu-se que essa queda gradativa das variáveis se devia ao fato de que o compressor permaneceu em repouso durante o experimento, devido à queda de pressão no tanque ser insuficiente para que ele entre em regime de compressão.

É necessário destacar também que a tentativa de simular a instalação da válvula de segurança em um tanque utilizando-se apenas dos trechos de tubulação do laboratório não foi satisfatória. Isso porque ocorre uma queda de pressão gradativa ao longo da tubulação, devido à distância, de mais de dez metros, da alimentação da tubulação ao recalque através da válvula de segurança. Logo, o efeito capacitivo, de acumulação, de um tanque não é simulado de maneira satisfatória, contribuindo para vazões e pressões oscilantes ao longo do teste.

Por fim, notou-se a necessidade um melhor estudo dos métodos devido ao fato de que metodologia utilizada influenciaria nos valores médios de capacidade e

pressão de fluxo. Acarretando assim em respostas diferentes para os parâmetros de inclinação e coeficiente de descarga, desejados no teste de capacidade.

6.2 Requisitos para validação do teste

Inicialmente, vale destaque que os códigos ASME citados tratam de vários tipos de ensaios de capacidade de vazão de dispositivos de alívio de pressão. Esses são divididos em três grupos, que ainda se subdividem quanto ao fluido de teste: contrapressão atmosférica (fluidos: gases, incluindo ar, vapor e líquidos), contrapressão superimposta (com os mesmos tipos de fluidos) e ensaios para determinar o fator de resistência dos discos de ruptura. Não obstante, de acordo com o fluido de trabalho os testes podem variar quanto a medição de vazão: por massa de condensado ou por um instrumento medidor de vazão por inferência, que pode ser subsônico ou sônico.

O ensaio de capacidade de vazão de válvulas de segurança que se pretende desenvolver é restrito às seguintes características: teste para dispositivos com fechamento automático, com ar como fluido, logo compressível, assim, limitando a ensaios de válvulas de segurança, contrapressão atmosférica e medição da capacidade utilizando o método do medidor de vazão por inferência subsônico.

Diante do propósito já justificado de seguir a regulamentação da ASME PTC 25 e da ASME UG-131, duas tabelas na sequência irão dispor sobre os requisitos de aceitação e as recomendações para o desenvolvimento do ensaio de certificação de capacidade de válvulas de segurança.

Tabela 5 - Requisitos de aceitação do teste de capacidade de válvulas de segurança

Tipo	Documento/Seção	Requisitos
Incerteza	ASME PTC 25/1-3	Procedimentos de cálculo de Incerteza segundo ASME PTC 19.1.
Incerteza	ASME PTC 25/1-3	Incerteza máxima da medição de vazão de ±2%.
Incerteza	ASME PTC 25/1-3	Incerteza máxima da medição das demais variáveis do teste de capacidade de vazão ±0,5%.
Supervisão	ASME PTC 25/3-2	O supervisor do teste deve ser uma pessoa com conhecimentos acadêmicos em termodinâmica e mecânica dos fluidos, além de possuir experiência em medição de vazão e supervisão de teste.

Supervisão	ASME PTC 25/3-10	É vedado o ajuste ao dispositivo de alívio de pressão durante o período de leitura dos dados do teste.
Calibração	ASME PTC 25/3-7.1	Calibração dos instrumentos de medição de pressão de acordo com ASME PTC 19.2, ou em acordo com as partes interessadas.
Calibração	ASME PTC 25/3-7.2	Calibração dos instrumentos de medição de temperatura de acordo com ASME PTC 19.3 com um prazo de validade de 90 dias, ou em acordo com as partes interessadas.
Calibração	ASME PTC 25/3-8	Calibração do trecho de medição de vazão, em observância com a ASME PTC 19.5. O elemento primário deve ser recalibrado, no mínimo, uma vez a cada cinco anos.
Documentação	ASME PTC 25/3-11	A documentação do teste deve incluir todas as observações, medições, leituras e documentação de calibração (se requerido) dos instrumentos usados no teste.
Documentação	ASME PTC 25/3-11	A documentação do teste deve ser fornecida a todas as partes interessadas e a versão original deve ficar sob custódia do responsável pelo teste por pelo menos 5 anos.
Documentação	ASME PTC 25/3-11	A documentação do teste deve estar de acordo com o exemplo da seção 6 da ASME PTC 25.
Condições do Teste	ASME PTC 25/4-2.1	Pressão atmosférica deve ser medida de acordo com a ASME PTC 19.2.
Condições do Teste	ASME PTC 25/4-2.4	A vazão do escoamento deve ser mensurada em regime permanente, sendo que o medidor de pressão diferencial não deve apresentar pulsação total (amplitude dupla) maior que 2% da pressão diferencial medida.
Condições do Teste	ASME PTC 25/4-2.5	A elevação do disco da válvula, em condições de escoamento, deve ser determinada por meios adequados, seja qual for o grau de precisão imposto pelo procedimento sob o qual a válvula está sendo testada. Deve-se ter atenção para que a disposição de medição não imponha uma carga adicional sobre a válvula ou interfira com o funcionamento dela.
Condições do Teste	ASME PTC 25/4-2.7	Para testes com o ar como fluido de trabalho, a temperatura de entrada deve estar entre 255,4K e 366,5K.

Condições do Teste	ASME PTC 25/4-2.10	O diâmetro e o volume do vaso de teste devem ser suficientemente grandes para se obter uma precisa medição de pressão estática e uma precisa determinação das características operacionais do dispositivo de alívio de pressão testado.
Execução do Teste	ASME PTC 25/4-4.2	Testes preliminares devem ser realizados para quantificar e ajustar as condições de operação do ensaio. Testes de vazamentos devem ser incluídos.
Execução do Teste	ASME PTC 25/4-4.4	A partir de 90% da pressão de ajustagem a taxa de aumento da pressão na entrada do dispositivo de alívio não deve exceder 0,141 Kgf/cm²s (2 psi/s).
Execução do Teste	ASME PTC 25/4-4.4	As leituras de pressão de abertura e fechamento serão consideradas estabelecidas através da média de pelo menos 3 processos de abertura e fechamento realizados sequencialmente.
Execução do Teste	ASME PTC 25/4-4.4	As leituras das pressões serão consideradas estáveis quando: os valores medidos não apresentarem uma consistente tendência para cima ou para baixo e todas as leituras estiverem dentre ± 1% ou ± 0,0352 kgf/cm² (0,5 psi), o que for maior, do valor médio.
Execução do Teste	ASME UG-131/(c)(1)	Os testes de certificação de capacidade devem ser efetuados a uma pressão que não exceda em mais do que 10% ou 20 kPa, o que for maior, a pressão para a qual a válvula é ajustada para operar.
Execução do Teste	ASME UG-131/(c)(1)	Os testes de certificação de capacidade devem ser efetuados a uma pressão mínima de 20 kPa, pelo menos, superior à pressão de ajustagem.
Certificação	ASME UG-131/(d)(1)	O teste de certificação da capacidade deve ser efetuado em um conjunto de três válvulas de mesmas especificações. A capacidade para cada uma delas não deve variar mais do que ± 5% do valor médio.
Certificação	ASME UG-131/(d)(2)	Se um fabricante pretende aplicar um símbolo do Código a um determinado projeto de válvulas de alívio de pressão, devem ser testadas quatro válvulas. Sendo que as inclinações obtidas nos ensaios não devem variar mais do que ± 5% do valor médio.

Certificação	ASME UG-131/(e)	Para certificar um projeto específico de válvulas de segurança, pode-se estabelecer um coeficiente de descarga, K, para um projeto específico de válvula de segurança. Para tanto são necessários testes em três válvulas de cada uma de três bitolas diferentes (totalizando nove válvulas). O coeficiente de descarga encontrado para cada uma delas não deve se distanciar de ± 5% do valor médio.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Recomendações para o teste de capacidade de válvulas de segurança

Tipo	Documento - Seção	Recomendação
Condições do Teste	ASME PTC 25/4-2.2	Medições de temperatura devem ser instaladas em tubulações de fluidos compressíveis, quando possível, que não excedam a velocidade de 30,5 m/s (100 pés/s), em casos onde não seja possível, as medições estão sujeitas a correções contidas na ASME PTC 19.5.
Condições do Teste	ASME PTC 25/4-2.4	Arranjo para teste com contrapressão atmosférica utilizando medidor de vazão segundo a figura 4-2.3-1 da recomendação ASME PTC 25.
Documentação	ASME PTC 25/4-4.7	Informações adicionais oriundas dos experimentos, se possível, devem ser anexas ao relatório.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3 Metodologia dos testes realizados

Diante da experiência adquirida com a proposta inicial e com o contato com as recomendações da ASME PTC 25, fora possível então, o desenvolvimento de uma concepção final para os testes nesse laboratório. Nos parágrafos seguintes busca-se descrever fidedignamente os procedimentos realizados para os ensaios de capacidade das válvulas de segurança.

O primeiro ponto a ser indiscutivelmente destacado é a utilização do abafador auricular durante os ensaios, isso porque o ruído provocado pelo escoamento do fluido pela válvula de segurança é extremamente alto, causando um incômodo muito grande no bem-estar do operador.

6.3.1 Testes Preliminares

Inicialmente a válvula de segurança deve ser instalada no vaso de teste. Para isso, deve se ter o vaso de teste despressurizado e manter a válvula manual do início da linha fechada. Como o fluido de trabalho é gasoso, é imprescindível o uso de fita teflon veda rosca para uma correta vedação da conexão. É interessante ainda, posteriormente, quando o vaso de teste estiver em alta pressão, realizar um teste de bolha para a detecção de vazamentos. Quanto a linha de medição, a possibilidade de vazamentos nela fora descartada com seguidos testes após sua montagem. Em casos de retirada dos elementos da linha para manutenção ou calibração, os testes de vazamentos devem ser refeitos.

Com a correta instalação da válvula de segurança, deve-se ligar o compressor, selecionando uma faixa de trabalho de pressões superiores à de abertura da válvula, esse procedimento é importante para manter a vazão medida menos oscilante. Ao longo dos testes, foram utilizadas faixas de trabalho do compressor de 6,8 – 7,0 bar para as válvulas de segurança de pressão de ajustagem até 2 kgf/cm² e 7,8 – 8,0 bar para as válvulas de pressão de ajustagem acima de 2 kgf/cm². Não obstante nessa seleção deve ser a observação da máxima pressão suportada pelo vaso de teste (8 kgf/cm²), para garantir a segurança da operação, porém, como a válvula de controle atua limitando a pressão do vaso de teste e este sempre possui uma válvula de segurança instalada, optou-se em alguns momentos por operar o compressor no limiar da pressão máxima do vaso de teste, essa opção favorece a redução da amplitude das oscilações das variáveis pressão e vazão do teste. Com o compressor ligado, fecha-se a válvula de controle e abre-se a válvula manual, pressurizando a linha, então abre-se a válvula de controle à aproximadamente 10% de sua abertura para iniciar a pressurização do tanque. Na sequência, a qualquer momento pode ocorrer o disparo da válvula de segurança.

Nesse momento, o operador deve então encontrar uma porcentagem de abertura da válvula de controle na qual a válvula de segurança permaneça aberta e a pressão no tanque esteja entre as pressões mínima e máxima do teste. Essa checagem pode ser feita pelo visor na interface do supervisório. Logo, para cada válvula de segurança existirá uma abertura da válvula de controle que permitirá que ela mantenha o escoamento e a pressão no tanque dentro do correto intervalo em um regime permanente, esse dado ainda é dependente do intervalo de pressões ajustadas no compressor. De posse dessa informação, fecha-se a válvula de controle

e aguarda-se a estabilização do sistema e então pode-se iniciar a execução do ensaio de capacidade de vazão.

6.3.2 Execução do teste

Primeiramente, para a execução do teste, as variáveis de entrada devem ser configuradas na aba de configuração do sistema supervisório. São elas: Área real de descarga da válvula de segurança em mm², peso molecular do ar (a configuração padrão é aceita: 29,96 kg/kmol), pressão de ajustagem (PA) da válvula de segurança em teste em kgf/cm², diretório do arquivo de dados gerado, incluindo o formato do arquivo, sendo indicado utilizar-se o formato ".xls", por fim o intervalo entre amostras em milissegundo (durante todos os testes descritos aqui, utilizou-se 500 ms).

Configurações fixadas, o teste pode ser iniciado. Acompanhando-se a sequência dos passos a seguir:

1. É importante inicialmente habilitar a opção salvar dados para que todos os dados sejam salvos desde o instante zero do teste.
2. Abre-se a válvula de controle em sua abertura mínima que permite escoamento de fluido (entre 6 e 8%) e acompanha-se o aumento de pressão no vaso de teste.
3. Quando a pressão atingir 90% da pressão de ajuste, aproximadamente, muda-se a abertura da válvula de controle para o valor encontrado nos testes preliminares.
4. Observa-se a estabilização das variáveis e mantém-se o sistema dessa forma por aproximadamente 3 minutos. Esse tempo é suficiente para a estabilização das variáveis de pressão e vazão, além de ser suficiente para aquisitar uma grande quantidade de dados.
5. Fecha-se, então, a válvula de controle e acompanha-se a estabilização do sistema.
6. Agora, o ciclo de abertura e fechamento deve ser repetido para estabelecer os valores encontrados. Logo, repetem-se os passos 2, 3, 4 e 5, em sequência, por pelo menos mais duas vezes.
7. Por fim, desabilita-se a opção salvar dados, para que o arquivo com as leituras dos instrumentos durante o ensaio seja gerado.
8. Fecha-se a válvula manual e despressuriza-se a linha e o vaso de pressão através do dreno deste.

Durante toda a execução do teste é fundamental que os fenômenos mecânicos sejam observados e em caso de ocorrência de algum fenômeno operacional, este deve ser evidenciado no relatório final do experimento.

Quanto a medição do deslocamento vertical do cabeçote da válvula, em cada um dos três trechos de cada teste, 4 leituras na trena a laser foram realizadas, além do valor do seu zero, com a válvula fechada.

6.3.3 Justificativas da metodologia de execução do teste

Alguns pontos devem ser ressaltados para compreender-se o porquê de a execução do teste ter sido determinada segundo os passos anteriormente descritos.

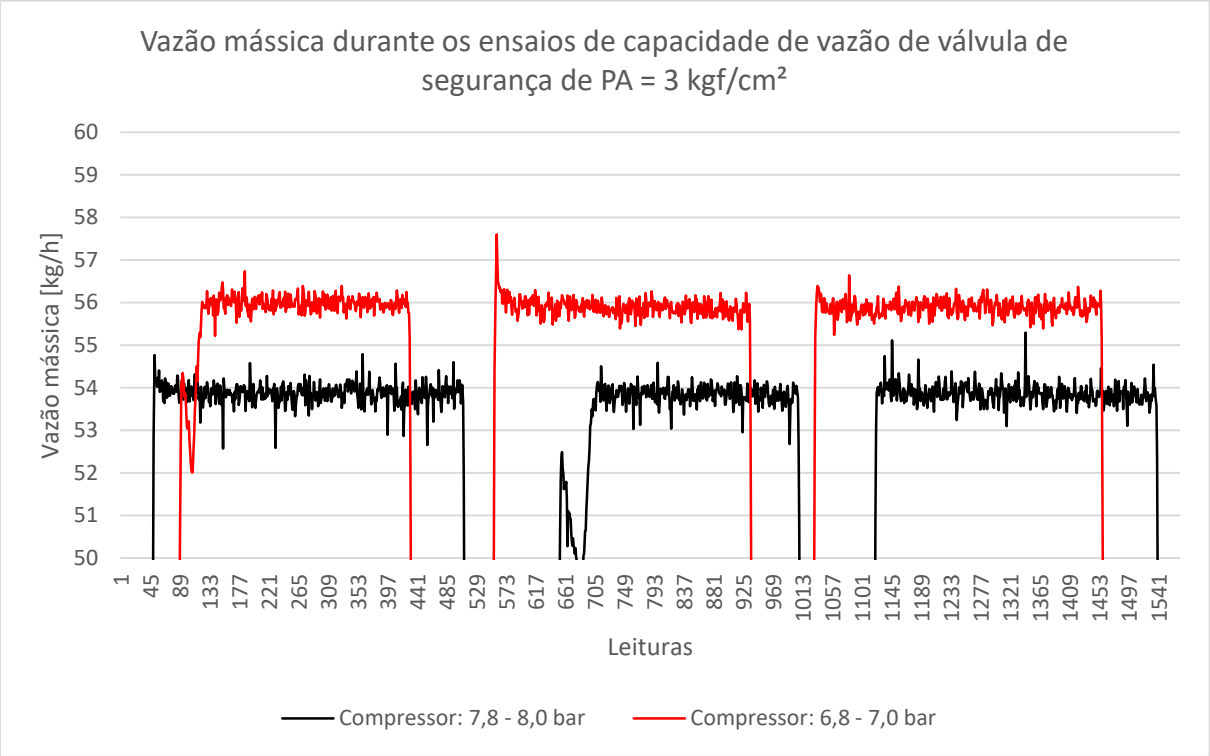
Quanto à faixa de pressão de trabalho do compressor

Como citado anteriormente, duas faixas de pressão de trabalho do compressor foram utilizadas. Quanto maiores os níveis de pressão da faixa de trabalho do compressor, notou-se que menores eram as oscilações nas variáveis de pressão e vazão do teste. Entretanto, para válvulas de segurança de pressões de ajuste baixas (até 2 kgf/cm²), foi necessário diminuir esse nível de faixa de pressão, isso porque o comportamento da resposta da vazão no regime permanente dos experimentos passou a apresentar alguns pontos muito discrepantes da média, aumentando a variabilidade dos resultados. Isso é mostrado e justificado nos gráficos e tabela seguintes.

Como os requisitos de estabilização da pressão no vaso de teste da ASME PTC 25 são mais brandos, apesar de a pressão continuar a apresentar uma redução na variabilidade das suas leituras, isso não se torna mais vantajoso, uma vez que os critérios para as leituras de vazão são mais exigentes, além do que, a variabilidade da pressão já está dentro dos critérios no regime de trabalho do compressor de 6,8 a 7,0 bar, como será mostrado na seção de resultado dos testes.

Por fim, também como poderá ser visto nos resultados obtidos, para a válvula de pressão de ajuste de 4 kgf/cm² o fenômeno do aumento da variabilidade descrito acima não ocorreu para a faixa de trabalho do compressor de 7,8 – 8,0 bar.

Figura 22 - Gráfico comparativo das leituras de vazão mássica de dois ensaios de capacidade de vazão realizados em uma válvula de PA = 3 kgf/cm², com duas faixas diferentes de trabalho do compressor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 - Comparação entre o coeficiente de variação da vazão mássica e da pressão no vaso de teste durante os regimes permanentes.

Faixa de pressões do Compressor	**Coeficiente de Variação**	
	Pressão no vaso de teste	Vazão mássica
4,8 - 5,0 bar	0,113%	0,748%
5,8 - 6,0 bar	0,201%	0,560%
6,8 - 7,0 bar	0,108%	0,293%
7,8 - 8,0 bar	0,094%	0,412%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observação: Coeficiente de variação é a razão entre o desvio padrão de uma variável e o seu valor médio.

Quanto à necessidade dos testes preliminares:

A válvula de controle utilizada nesse experimento possui uma atuação peculiar e limitada também quanto ao seu curso. Ao longo dos experimentos notou-se que ela não necessariamente estabelecia a mesma posição para um dado set point de abertura, por exemplo: foi presenciado que em alguns momentos 6% de abertura permitia escoamento, mas também foi presenciado que os mesmos 6% de abertura

de set point não gerava escoamento algum. Além desse fato, a rede elétrica da Universidade não é muito confiável, apresentando oscilações na alimentação elétrica do compressor. Por fim, ainda, vale citar que as mudanças de condições ambientes também influenciam as propriedades termodinâmicas do fluido, logo a vazão mássica que transpõe a válvula de segurança.

Tudo isso foi evidenciado para destacar que os testes preliminares devem ser realizados em um curto período de tempo antes do ensaio propriamente dito. Isso porque como comprovado a seguir na tabela de resultados, para o mesmo sistema, configurado da mesma maneira (mesma porcentagem de abertura da válvula de controle e mesma configuração de faixa de pressões no compressor), não necessariamente as condições de operação requeridas para o teste serão aceitas, devido a variabilidade possível da pressão e vazão mássica do sistema.

Tabela 8 – Resultados comparativos de três ensaios diferentes sob as mesmas configurações do sistema para três tipos de válvulas diferentes.

Data e hora dos ensaios	**VS: PA = 2 kgf/cm²; VC: 24% de abertura; C: 6,8 - 7,0 bar**		**VS: PA = 4 kgf/cm²; VC: 44% de abertura; C: 7,8 - 8,0 bar**		**VS: PA = 6 kgf/cm²; VC: 60% de abertura; C: 7,8 - 8,0 bar**	
	q_m [kg/h]	P [kgf/cm²]	q_m [kg/h]	P [kgf/cm²]	q_m [kg/h]	P [kgf/cm²]
31/10 - 15h	28,449	2,063	68,196	4,275	65,68	6,504
1º/11 - 10h	28,034	2,074	68,192	4,229	66,701	6,445
1º/11 - 20h	31,197	2,013	70,478	4,177	70,157	6,445

Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde VS é a válvula de segurança com sua respectiva pressão de ajuste; VC é a Porcentagem de abertura da válvula de controle; C mostra a faixa de pressões de trabalho do compressor; q_m é a vazão mássica do experimento; P a pressão no vaso de teste durante o ensaio de capacidade de vazão.

Portanto, segundo a tabela acima, caso os testes preliminares não sejam realizados, mesmo que seja utilizada uma configuração já consolidada, é possível que a pressão do teste esteja fora da faixa requisitada pela ASME UG-131, vide requisitos para a validação do teste, como por exemplo no terceiro ensaio da válvula de segurança de PA = 4 kgf/cm².

Quanto à importância dos passos 2 e 3:

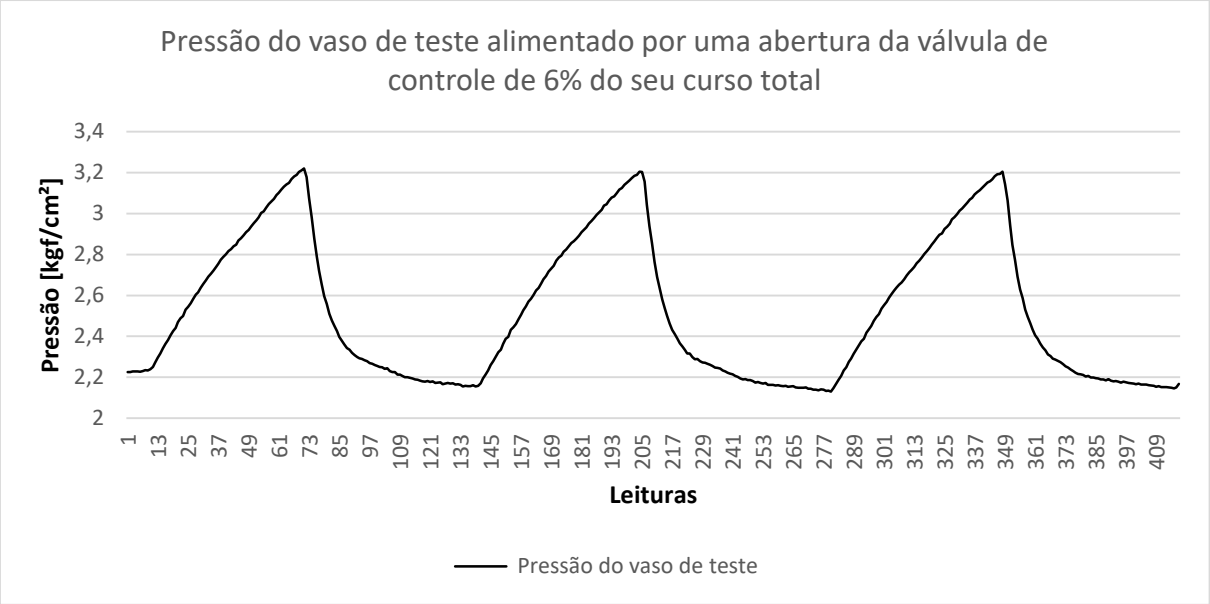
A recomendação ASME PTC 25 destaca claramente um limite para a taxa de aumento de pressão no vaso de teste a partir de 90% da pressão de ajuste da válvula

de segurança em teste, sendo esse igual a 0,141 kgf/cm²s (2 psi/s). Dessa forma, para limitar essa taxa de aumento da pressão, é fundamental que a o tanque seja alimentado de maneira menos intensa até o disparo da válvula de segurança. Para isso, o passo 2 informa que a válvula de controle deve ser pouco aberta (6 a 8%) para que essa taxa máxima não seja atingida. Ocorre então no passo 3 uma informação que à primeira vista contradiz o que foi explicado acima: quando a pressão no vaso de teste atingir 90% do valor da pressão de ajuste da válvula de segurança, aumenta-se a abertura da válvula de controle para o valor encontrado para o regime permanente nos testes iniciais.

Entretanto, inicialmente, o passo 3 não quebra a ideia aplicada pelo passo 2, porque a válvula de controle utilizada na planta possui uma velocidade de atuação extremamente lenta, de modo que ao se selecionar uma nova abertura, essa só de fato acontecerá alguns instantes depois, quando a válvula de segurança já estiver aberta, escoando o fluido. Logo, agora é possível explicar que a função do passo 3 é impedir que a válvula de segurança feche logo após o disparo, uma vez que ao disparar ela é, em geral, capaz de expelir muito mais fluido que o vaso de teste admite com a válvula de controle com uma pequena abertura. Caso o passo 3 não seja executado no tempo descrito, a válvula de segurança pode aliviar a pressão do vaso de teste de tal modo que seja suficiente para que ela se feche.

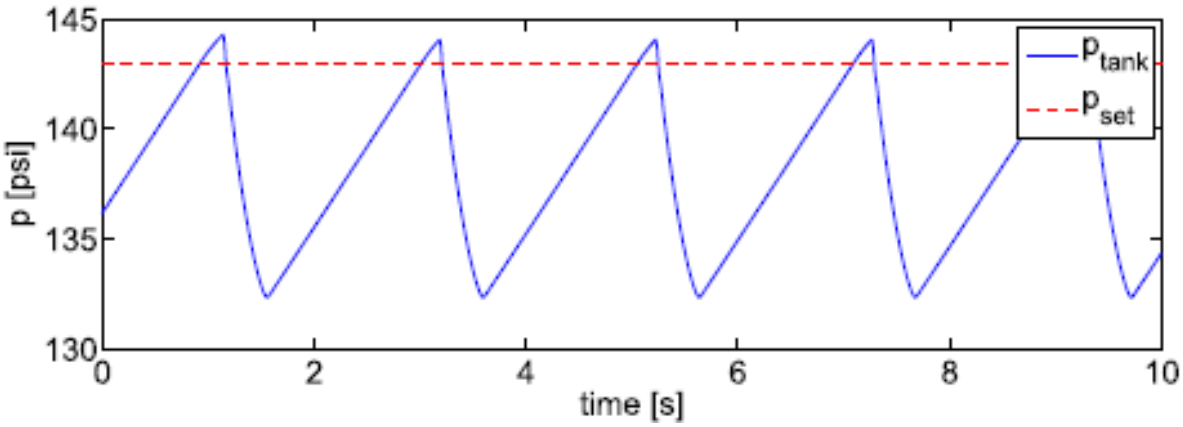
Todo esse efeito pode ser mostrado no gráfico a seguir: uma válvula de segurança de pressão de ajuste de 3 kgf/cm² é submetida a situação em que a válvula de controle fica limitada a uma abertura de 6% durante todo o ensaio. Vale o destaque que o efeito gerado é o do fenômeno operacional chamado ciclagem (*cycling*), visualmente similar ao simulado por Hos, Champneys, Paul & McNeely (Hos, Champneys, Paul, & McNeely, 2014).

Figura 23 – Observação do fenômeno operacional de ciclagem no ensaio de uma válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm² com a válvula de controle aberta a 6% do seu curso total.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Simulação do comportamento de ciclagem para uma válvula de segurança com 6% da sua vazão mássica máxima.



Fonte: Dynamic behavior of direct spring loaded pressure relief valves in gas service (Hos, Champneys, Paul, & McNeely, 2014).

7 ANÁLISE DOS DADOS

Os resultados dos ensaios realizados devem ser analisados sobre os dados coletados pelo sistema supervisório. É importante destacar que nas recomendações ASME utilizadas, os resultados são tratados como valores médios das medições realizadas. Assim, diante da grande coleta de dados realizada, é possível analisar a média de cada uma das variáveis analisadas.

Muitas são as variáveis presentes e lidas nos ensaios, logo, muitos resultados podem ser tirados e muitas são as análises a serem feitas. Diante das limitações anteriormente discutidas, os experimentos propostos buscaram seguir o roteiro descrito pela ASME PTC 25 e buscar o maior número de resultados no que tange também a ASME UG-131.

7.1 Regime Permanente

As variáveis originárias do período de escoamento da válvula devem ser avaliadas principalmente em seu regime permanente, segundo a ASME PTC 25. Assim, esse intervalo de regime permanente é definido inicialmente a partir da análise visual da tendência de constância das variáveis. Em sequência, aplica-se o critério de Chauvenet, explicado na sequência, para eliminação de pontos duvidosos. Posteriormente, os dados contidos nesse intervalo são submetidos ao critério de aceitação de regime permanente adotado, sendo este: todas as medições da variável nesse intervalo estejam dentro da média mais ou menos três vezes o desvio padrão. Caso a aceitação do intervalo seja rejeitada, sua extremidade inicial deve ser transladada para a direita, assim reduzindo o intervalo. Então, um novo teste de aceitação é feito neste novo intervalo. Em caso de nova rejeição o processo se repete. A extremidade final dos intervalos é menos problemática, uma vez que ela pode ser estabelecida como o ponto imediatamente anterior a mudança na abertura da válvula de controle.

7.1.1 Critério de Chauvenet

A aplicação desse tratamento estatístico buscou, através de um método bem consolidado na literatura, descartar dados das leituras que apresentaram valores espúrios ou duvidosos, que poderiam levar a erros nas conclusões dos resultados. O critério baseia-se em identificar o maior desvio da amostra, o que implica em calcular o desvio d_i de cada evento em relação à média (x_i): $d_i = x_i - \bar{x}$ (Schneider, 2007). O critério de eliminação depende do parâmetro $\frac{d_{máx}}{\sigma}$, sendo dado por:

$$\frac{d_i}{\sigma} > \frac{d_{máx}}{\sigma}$$

Os valores de $\frac{d_{máx}}{\sigma}$ são dados na tabela abaixo.

Tabela 9 - Critério de rejeição de Chauvenet

Nº de leituras	$\frac{d_{máx}}{\sigma}$
5	1,65
10	1,96
20	2,24
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

Fonte: Holman, 1994 apud Schneider, 2007

Como os trechos de análise estão entre 200 e 300 leituras, adota-se o critério mais rigoroso para a exclusão: 3,14 (300 leituras).

7.2 Fator de Expansão (Y)

Ao longo das leituras dos experimentos realizados, o fator de expansão Y praticamente não se alterou, ou seja, todas as medições dos experimentos levaram a um valor de Y = 1. Isso acontece devido as suas variações serem apenas na quarta casa decimal, logo os dados gerados pelo sistema supervisório trazem apenas o valor de uma unidade para esta variável.

Como exceção, está o teste para a válvula de segurança de PA = 4 kgf/cm², a única que apresentou Y = 0,999 durante os intervalos do teste em que a válvula de segurança estava aberta em escoamento.

7.3 Medição do deslocamento vertical do tampão

Como dito na metodologia, foram feitas 4 leituras para esta variável, porém, como a trena estava operando em deslocamentos da ordem de milímetros, os resultados buscados se localizavam no dígito duvidoso do dispositivo, portanto muitas vezes a medição oscilava constantemente entre dois valores. Para estes casos, o valor tomado fora a média dos dois. Por fim, o valor final da área de escoamento para o trecho do teste foi calculado utilizando-se a média das leituras realizadas dentro dos intervalos adotados como regime permanente.

8 CÁLCULO DOS RESULTADOS

Esta seção vem para apresentar os cálculos destacáveis feitos nos dados para obtenção de resultados que serão apresentados na sequência. O principal ponto a ser abordado é a análise das incertezas, bem como seu modo de cálculo e em seguida uma correção à uma limitação dos experimentos será introduzida. Vale lembrar que as recomendações ASME tratam os resultados como a média dos valores obtidos, então, salvo disposição em contrário, os resultados foram calculados através de média simples dos valores.

8.1 Análise das Incertezas

De maneira resumida, um experimento possui dois tipos de incertezas: Tipo A e Tipo B. A avaliação da incerteza do tipo A tem relação com a análise estatística de uma série de observações, enquanto a do tipo B tem característica residual, abrangendo outros métodos que não o da análise estatística de uma série de medições (Cabral, 2004).

Assim, com o intuito de mensurar as incertezas do experimento proposto, desenvolveu-se o procedimento seguinte em consonância com a ASME PTC 19.1, que trata da avaliação das incertezas de ensaios. Logo, admitindo que os graus de liberdade são suficientemente grandes, então o valor da variável t da curva de Student, utilizado como multiplicador é igual a 2 e, por fim, admitindo também que os erros têm distribuição normal e simétrica, a incerteza final dos resultados para um intervalo de confiança de 95% é dada por:

$$U_{95} = 2\sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + (S_{\bar{x}})^2} \tag{15}$$

As incertezas do tipo A podem ser mensuradas avaliando-se o quanto que a média da variável representa das amostras. É demonstrável que a incerteza ($S_{\bar{x}}$) de uma variável, tratando-se apenas do tipo A, é dada pelo desvio padrão dividido pela raiz do número de medições.

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \tag{16}$$

As incertezas do tipo-B (B) serão avaliadas em função dos instrumentos de medição, segundo seus padrões ou fabricantes, como mostrado na tabela de instrumentação e combinadas com a incerteza de suas calibrações, seguindo a ASME PTC 19.1.

$$B = \left[\sum_{i=1}^{n} b_i^2\right]^{1/2} \tag{17}$$

É importante o destaque que no caso da avaliação da vazão mássica e da massa específica do fluido, a incerteza é oriunda da medição de diversos outros fatores, o que implica na necessidade de propagar essa incerteza. Tal procedimento é descrito no apêndice B.

8.2 Correção da variável temperatura

Uma das limitações impactantes da planta do experimento apresentado foi a ausência da tomada de temperatura no vaso de pressão de teste. Isso porque ele possui apenas 3 entradas em sua superfície, como explicado na seção que tratou desse equipamento.

A temperatura nesse experimento é fundamental para compor o estado termodinâmico do fluido para a correta mensuração da vazão, logo, por essa razão, existe um transmissor de temperatura instalado próximo ao elemento primário de medição de vazão. Não obstante, é o fato que a temperatura ainda é necessária no cálculo da massa específica do fluido no vaso de teste e do fluxo teórico que transpõe a válvula de segurança, segundo o equacionamento do escoamento compressível e como determinado pela recomendação ASME UG-131, vide Apêndice A. Porém, nesse caso a temperatura utilizada deve ser a do fluido no ponto de entrada da válvula de segurança, logo, no vaso de teste.

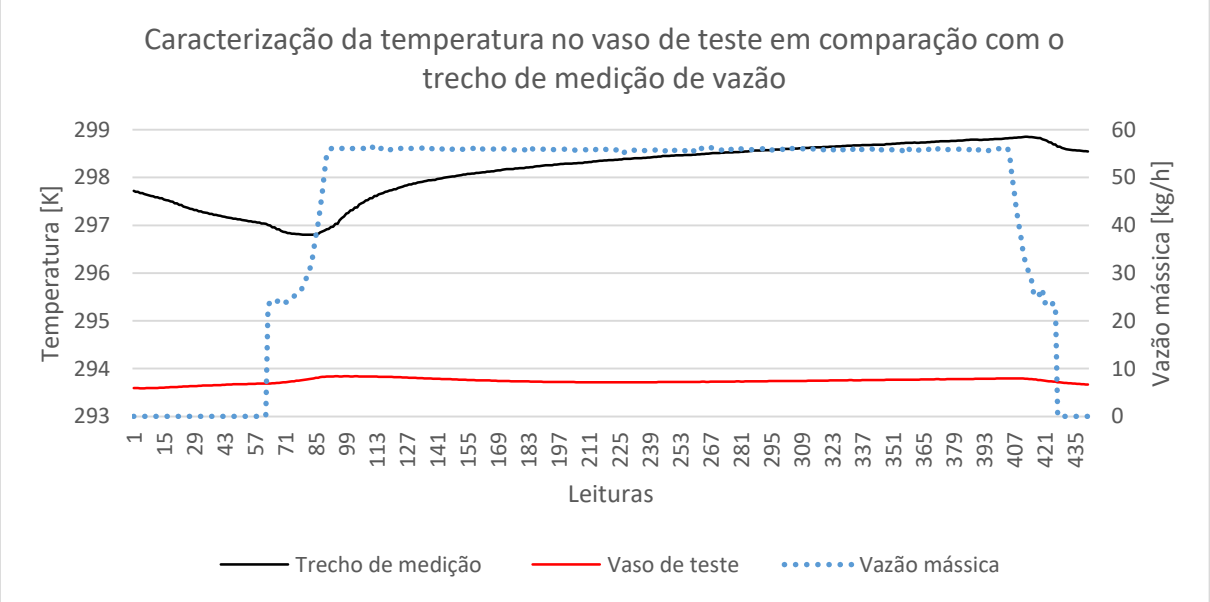
Assim, como não é possível, pela limitação no número de entradas do vaso de teste, medir essa temperatura durante os experimentos, propôs-se quantificar o quanto que ela se distancia da temperatura aferida no trecho de medição de vazão. Para tanto, utilizando-se de um ensaio de capacidade de vazão já bem estabelecido quanto aos testes preliminares, com uma válvula de PA = 3 kgf/cm², realizando-se os procedimentos de operação da válvula de controle o mais próximo possível dos testes normais, utilizou-se de uma entrada do vaso de teste para introdução de um segundo

transmissor de temperatura, então, nesse caso, trocou-se a medição de pressão do vaso de teste por uma medição de temperatura.

A partir desse teste foi possível ter uma ideia da diferença de comportamento da variável temperatura nos dois pontos de análise. No gráfico a seguir, foi mostrado o comportamento das variáveis e na tabela os resultados médios para o período de regime permanente, entre as leituras 120 e 380. Alguns pontos devem ser destacados: as curvas se comportaram razoavelmente constantes; os valores utilizados nos resultados finais são valores médios; a influência da variação de poucas unidades da temperatura no fluxo teórico é relativamente baixa, pois seu valor é da ordem de 300K.

Com essa análise, buscando corrigir de uma maneira razoável a temperatura para o cálculo do fluxo teórico, será adicionado o valor médio da diferença entre as temperaturas (4,653 K) a temperatura do trecho de medição de vazão sempre que for feito o cálculo do fluxo teórico da válvula de segurança e da massa específica no vaso de teste. Segue também um ensaio comparativo, feito ao ar, entre os dois transmissores de temperatura utilizados, com o intuito de checar se eles apresentavam uma diferença de calibração. O resultado médio da diferença entre as suas temperaturas, desprezando os efeitos iniciais, foi da ordem de 0,04%. Logo, desprezou-se o erro apresentado entre as medições dos dois transmissores.

Figura 25 – Gráfico das leituras de temperatura e vazão mássica do ensaio de capacidade de vazão de uma válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm².



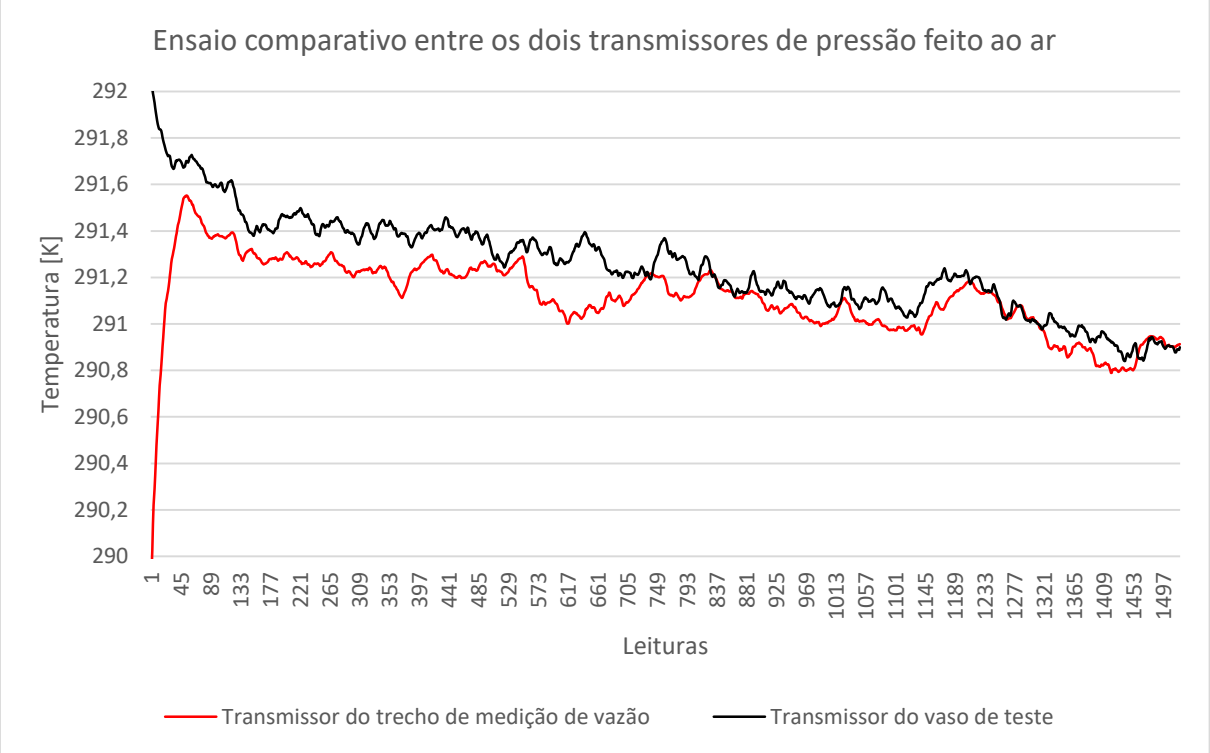
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Resultados médios das temperaturas no regime permanente do ensaio de capacidade de vazão de uma válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm².

	Trecho de medição de vazão	Vaso de teste	Variação de Temperatura
Valor médio [K]	293,747	298,400	4,653

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Respostas da variável de temperatura para dois transmissores de temperatura na mesma condição, ao ar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Obs: Excepcionalmente neste experimento as leituras foram feitas a cada 2 segundos.

8.3 Área real de escoamento

Um dos parâmetros que compõem a fórmula do fluxo teórico contida na ASME UG-131 é a área real de descarga através da válvula de segurança. Como tentativa de mensurar esse valor, foi montado um aparato para medição do deslocamento superficial do corpo da válvula. Assim, baseado na estrutura interna do componente, pode-se calcular a área de descarga gerada com o levantamento do tampão. O perfil do conjunto sede-tampão foi aproximado para o primeiro caso do anexo 1, sendo, portanto, a área dada por:

$$A = \pi DL \quad (18)$$

Onde L é o deslocamento vertical do tampão e D o diâmetro do orifício de conexão ao processo, o qual foi medido por um paquímetro, sendo seu valor de 7,5 mm. A recomendação ASME PTC 25 ratifica essa possibilidade de cálculo para essa variável em um conjunto de sede e tampão como o adotado.

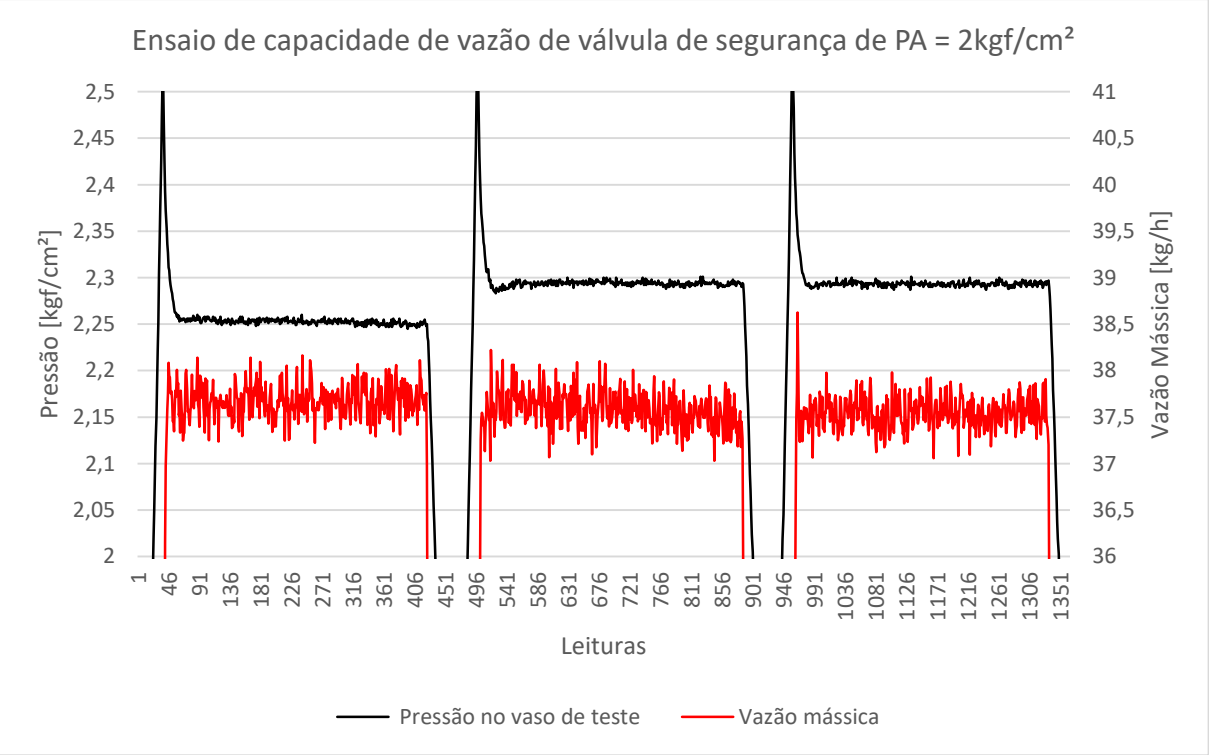
9 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A principal linha de apresentação de resultados buscou testar válvulas de segurança de diferentes pressões de ajuste para analisar se as condições de execução do teste estão em concordância com os termos da ASME PTC 25 para os testes de capacidade de vazão de válvulas de segurança. Para isso, foram testadas válvulas de pressão de ajuste de 2, 3, 4, 5 e 6 kgf/cm².

Os resultados médios serão dados com quatro algarismos significativos, enquanto os resultados de incerteza serão destacados com apenas dois, como é de costume no máximo para estes valores.

9.1 Válvula de pressão de ajuste de 2 kgf/cm²

Figura 27 - Gráfico do comportamento das variáveis pressão e vazão no ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 2 kgf/cm²



Fonte: Elaborado pelo autor.

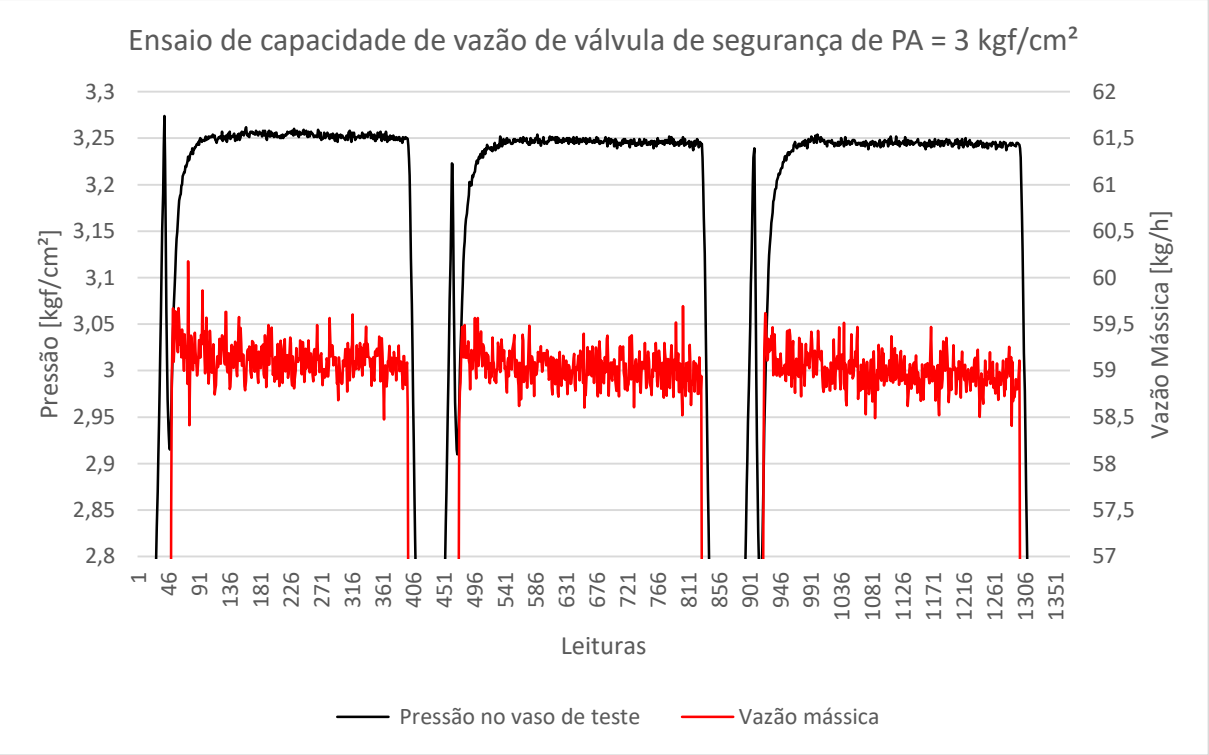
Tabela 11 - Principais resultados médios do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 2 kgf/cm²

MÉDIA DOS RESULTADOS - PA = 2 kgf/cm²		Incerteza Associada	
Vazão Mássica [kg/h]	37,60	0,19	0,50%
Diferencial de Pressão [mbar]	1,723	0,045	2,6%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	2,280	0,0065	0,29%
Pressão da linha [kgf/cm²]	6,812	0,0068	0,10%
Massa específica do fluido [kg/m³]	2,575	0,0086	0,33%
Temperatura na linha [K]	296,4	0,50	0,17%
Temperatura no vaso de teste [K]	301,1		
Pressão de abertura [kgf/cm²]	2,526		
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	1,641		
Deslocamento vertical do cabeçote [mm]	1,000		
Fluxo Teórico [kg/h]	63,65		
Coeficiente de descarga	0,5908		
Inclinação [(kg/h)/(kgf/cm²)]	11,36		

Fonte: Elaborado pelo autor.

9.2 Válvula de pressão de ajuste de 3 kgf/cm²

Figura 28 - Gráfico do comportamento das variáveis pressão e vazão no ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm²



Fonte: Elaborado pelo autor.

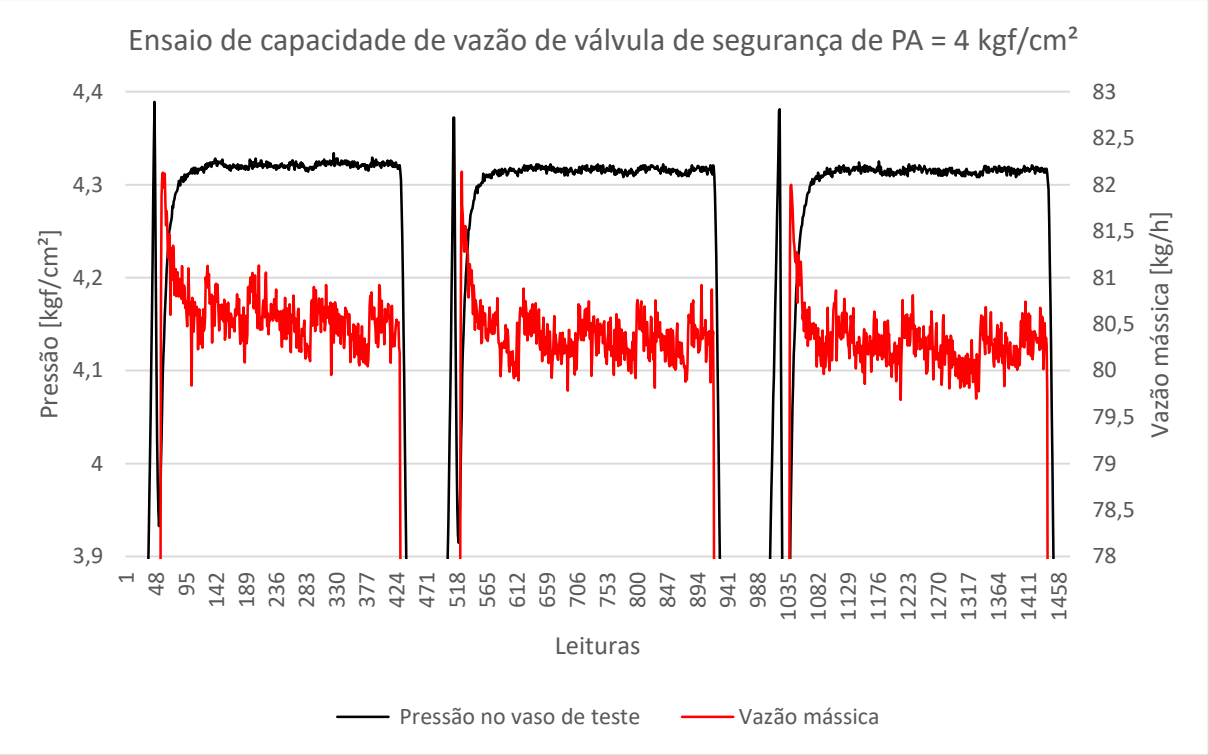
Tabela 12 - Principais resultados médios do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm²

MÉDIA DOS RESULTADOS - PA = 3 kgf/cm²		Incerteza Associada	
Vazão Mássica [kg/h]	59,05	0,30	0,50%
Diferencial de Pressão [mbar]	3,842	0,045	1,2%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	3,248	0,0066	0,20%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,710	0,0069	0,09%
Massa específica do fluido [kg/m³]	3,66	0,010	0,26%
Temperatura na linha [K]	298,6	0,50	0,17%
Temperatura no vaso de teste [K]	303,3		
Pressão de abertura [kgf/cm²]	3,245		
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	2,218		
Deslocamento vertical do cabeçote [mm]	1,250		
Fluxo Teórico [kg/h]	106,14		
Coeficiente de descarga	0,5563		
Inclinação [(kg/h)/(kgf/cm²)]	13,80		

Fonte: Elaborado pelo autor.

9.3 Válvula de pressão de ajuste de 4 kgf/cm²

Figura 29 - Gráfico do comportamento das variáveis pressão e vazão no ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 4 kgf/cm²



Fonte: Elaborado pelo autor.

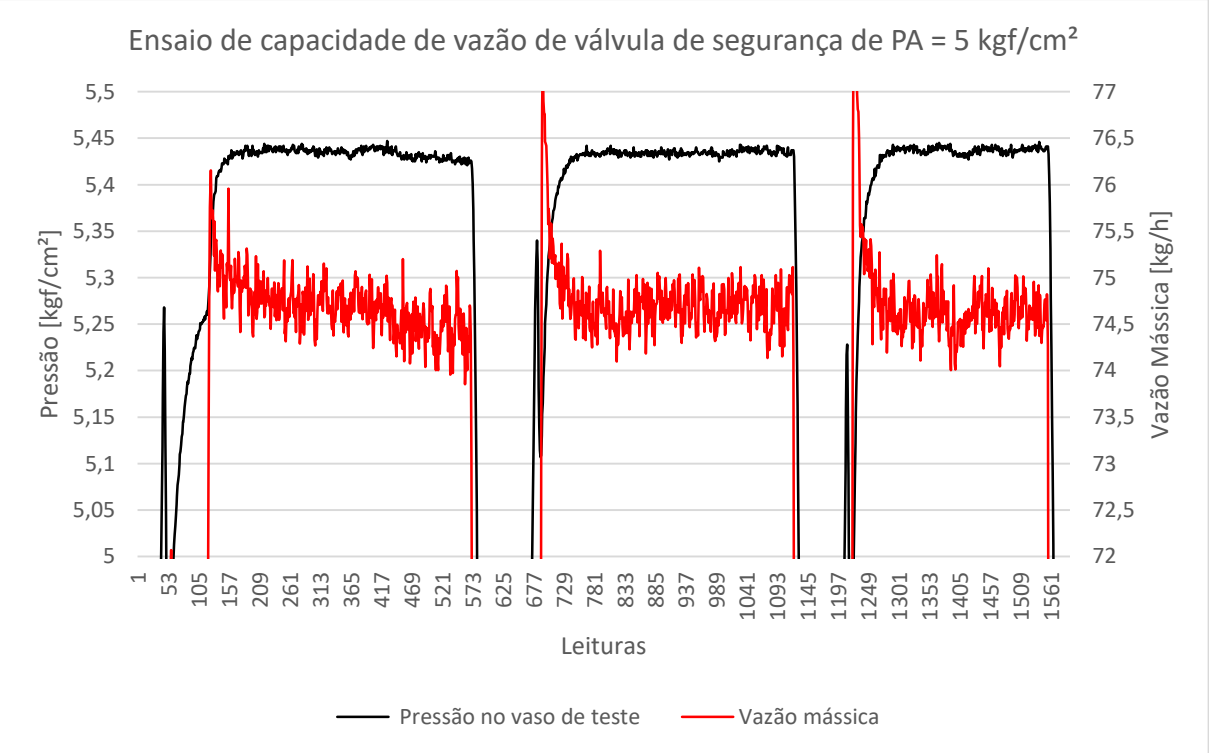
Tabela 13 - Principais resultados médios do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 4 kgf/cm²

MÉDIA DOS RESULTADOS - PA = 4 kgf/cm²		Incerteza Associada	
Vazão Mássica [kg/h]	80,37	0,40	0,50%
Diferencial de Pressão [mbar]	7,228	0,045	0,6%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	4,317	0,0066	0,15%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,560	0,0069	0,09%
Massa específica do fluido [kg/m³]	4,88	0,011	0,23%
Temperatura na linha [K]	297,9	0,50	0,17%
Temperatura no vaso de teste [K]	302,5		
Pressão de abertura [kgf/cm²]	4,381		
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	2,889		
Deslocamento vertical do cabeçote [mm]	1,500		
Fluxo Teórico [kg/h]	159,9		
Coeficiente de descarga	0,5026		
Inclinação [(kg/h)/(kgf/cm²)]	15,03		

Fonte: Elaborado pelo autor.

9.4 Válvula de pressão de ajuste de 5 kgf/cm²

Figura 30 - Gráfico do comportamento das variáveis pressão e vazão no ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 5 kgf/cm²



Fonte: Elaborado pelo autor.

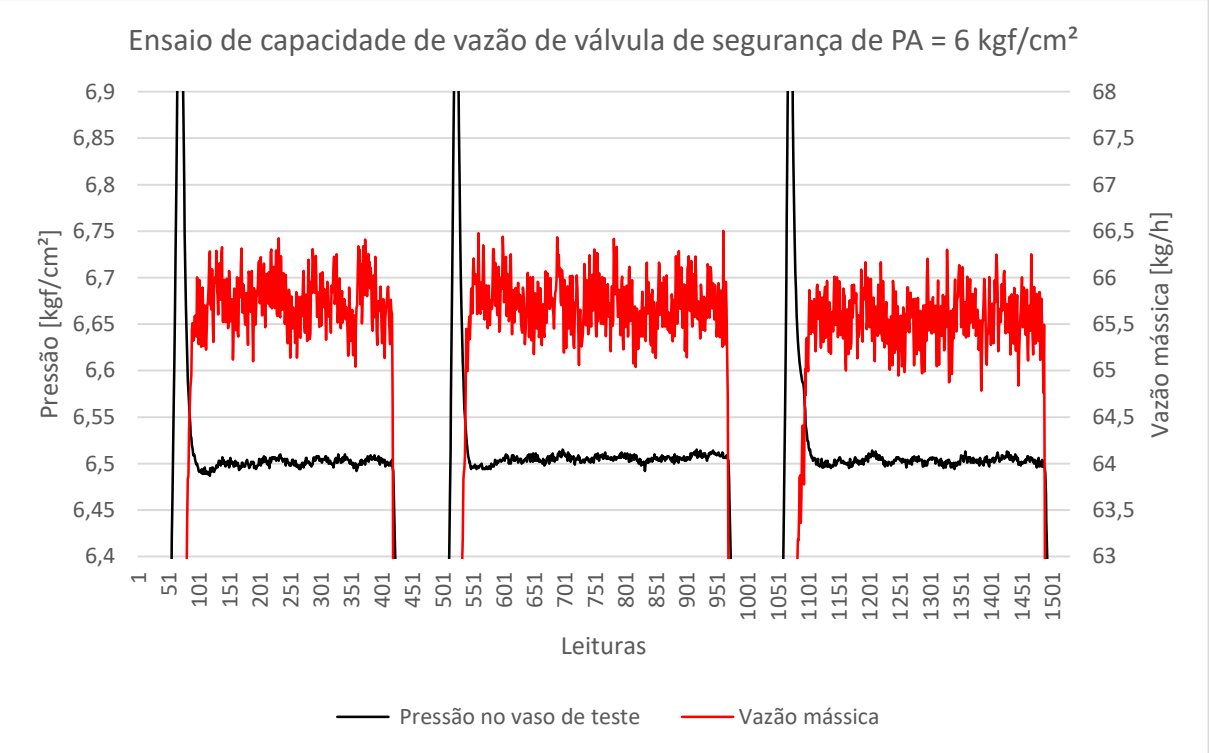
Tabela 14 - Principais resultados médios do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 5 kgf/cm²

MÉDIA DOS RESULTADOS - PA = 5 kgf/cm²		Incerteza Associada	
Vazão Mássica [kg/h]	74,66	0,37	0,50%
Diferencial de Pressão [mbar]	6,166	0,045	0,7%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	5,436	0,0067	0,12%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,610	0,0069	0,09%
Massa específica do fluido [kg/m³]	6,17	0,013	0,21%
Temperatura na linha [K]	296,2	0,50	0,17%
Temperatura no vaso de teste [K]	300,9		
Pressão de abertura [kgf/cm²]	5,279		
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	3,743		
Deslocamento vertical do cabeçote [mm]	1,917		
Fluxo Teórico [kg/h]	246,4		
Coeficiente de descarga	0,3030		
Inclinação [(kg/h)/(kgf/cm²)]	11,55		

Fonte: Elaborado pelo autor.

9.5 Válvula de pressão de ajuste de 6 kgf/cm²

Figura 31 - Gráfico do comportamento das variáveis pressão e vazão no ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 6 kgf/cm²



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Principais resultados médios do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 6 kgf/cm²

MÉDIA DOS RESULTADOS - PA = 6 kgf/cm²		Incerteza Associada	
Vazão Mássica [kg/h]	65,68	0,33	0,50%
Diferencial de Pressão [mbar]	4,802	0,045	0,9%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	6,504	0,0067	0,10%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,626	0,0069	0,09%
Massa específica do fluido [kg/m³]	7,32	0,014	0,19%
Temperatura na linha [K]	298,7	0,50	0,17%
Temperatura no vaso de teste [K]	303,4		
Pressão de abertura [kgf/cm²]	7,200		
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	5,092		
Deslocamento vertical do cabeçote [mm]	-		
Fluxo Teórico [kg/h]	-		
Coeficiente de descarga	-		
Inclinação [(kg/h)/(kgf/cm²)]	8,72		

Fonte: Elaborado pelo autor.

9.5.1 Ocorrência de flutuação e batimento

Nos experimentos das válvulas de pressão de ajuste de 5 e 6 kgf/cm² foi notado que durante o processo de abertura elas apresentaram em alguns momentos os fenômenos operacionais de flutuação e batimento. Entretanto um ponto deve ser destacado, esses fenômenos operacionais têm relação com a posição do cabeçote da válvula de segurança em relação ao seu castelo. Isso porque, nos testes iniciais a válvula de PA = 5 kgf/cm² apresentou flutuação e batimento durante todos os períodos de abertura do seu ensaio, mas a válvula de PA = 6 kgf/cm², como foi ensaiada por três vezes, sofreu o processo de instalação no vaso de teste por três vezes, só apresentando esses fenômenos nos testes preliminares do segundo ensaio, levando a conclusão que o processo de manuseio da válvula induziu a ocorrência desses fenômenos operacionais.

O desaparecimento da ocorrência desses fenômenos se deu de maneira gradativa com a rotação do cabeçote da válvula de segurança. Isso leva a conclusão que esse grau de liberdade da rotação da parte superior da válvula pode influenciar na ocorrência dos fenômenos operacionais citados acima, levando a necessidade de uma discussão mais aprofundada do ponto de vista da montagem mecânica desse dispositivo, uma vez que não há orientação clara nele da correta posição angular do cabeçote em relação ao seu castelo.

Entretanto, nos testes finais, que compuseram os resultados aqui apresentados, a válvula de segurança de PA = 5 kgf/cm² apenas apresentou batimento e flutuação no segundo fenômeno de disparo. Já a válvula de PA = 6 kgf/cm², os fenômenos de flutuação e batimento ocorreram por todo o ensaio e de maneira tão intensa que o aparato para medição do deslocamento vertical do cabeçote teve de ser retirado, de tal modo que para esta válvula, essa medição não foi realizada.

Os valores encontrados para pressão de abertura podem ter relação com estes fenômenos, uma vez que a válvula de PA = 6 kgf/cm² apresentou um valor muito acima da sua pressão de ajuste, aproximadamente 1,2 kgf/cm² acima dela, enquanto as demais válvulas apresentaram a abertura no máximo em 0,5 kgf/cm² acima da pressão de ajuste.

10 CONCLUSÕES E CRÍTICAS AOS ENSAIOS

Essa seção foi introduzida com o objetivo de avaliar e criticar os resultados obtidos no que tange os requisitos e recomendações dispostas nas documentações ASME PTC 25 e UG-131, assim, esta será disposta de acordo com os tipos de recomendações introduzidas nas tabelas 5 e 6.

10.1 Incertezas e calibração

O primeiro ponto quanto a esse assunto é que todos os cálculos de incertezas foram realizados em consonância com a ASME PTC 19.1, como era desejado, isso inclui a combinação das incertezas, bem como a sua propagação quando fora necessário.

Em relação aos resultados das incertezas, todos se contiveram dentro dos limites estabelecidos pelas recomendações. Ainda quanto as incertezas, deve ser citado, que de fato, as incertezas do tipo-A, relacionadas a dispersão dos resultados em uma sequência de medições, iriam apresentar um resultado baixíssimo, isso porque trata-se de um sistema de aquisição de dados, de modo que o total de leituras para cada trecho do teste é maior que duzentas unidades, o que torna a média desses valores muito representativa sobre a vaiável mensurada. Já as incertezas do tipo-B, vinculadas a qualquer outro tipo de erro relacionado a medição, foram calculadas levando em consideração a exatidão do calibrador e do equipamento de medição, que como mostrados são valores muito baixos, como era de se esperar para estes equipamentos. A resolução da medição fora desprezada uma vez que como o sistema de aquisição de dados trabalha com 16 bits de tamanho para os dados, a resolução é da ordem do fundo de escala divido por 2^{16}, logo, desprezível.

A ASME PTC 19.2, que trata da medição de pressão, delimita possibilidades da metodologia de calibração dos instrumentos além de solicitar que eles estejam relacionados por uma cadeia metrológica com o NIST. Como o método de calibração dos instrumentos de pressão utilizados neste trabalho foram estabelecidos de acordo com o equipamento padrão que se possuía, ocorre nesse caso uma limitação na abrangência desse ponto. Para tornar de fato a planta de ensaio apta a certificar válvulas de segurança, é necessário uma avaliação futura precisa dos métodos de calibração dos instrumentos de pressão pela organização regulamentadora deste ensaio, para garantir que os mesmos estão de acordo com a regulamentação.

Ainda quanto a calibração, é necessária uma padronização de um método para calibrar os instrumentos de temperatura respeitando as recomendações pertinentes, uma vez que esse procedimento ainda não é realizado no laboratório que se realizou esse experimento.

Apesar disto, é aceitável a confiabilidade da medição de pressão, uma vez que o calibrador utilizado é rastreado pelas entidades competentes, como explicado na seção pertinente a ele. Quanto a temperatura, apesar da ausência de uma calibração recente, os instrumentos se comportam razoavelmente como esperado e, além disso, as variações de temperatura durante o experimento são pequenas, logo a influência da temperatura nos resultados não é tão determinante. Concluindo-se assim, que apesar da limitação da confiabilidade da calibração, os resultados encontrados podem ser considerados razoavelmente fidedignos.

10.2 Supervisão e documentação

Como a planta dos ensaios foi concebida em um laboratório dentro de uma universidade, é razoável aceitar que a supervisão do teste pode ser realizada por pessoas competentes no que tange os conhecimentos de termodinâmica e mecânica dos fluidos. Os testes aqui dispostos foram feitos pelo autor, graduando em engenharia mecânica, com as disciplinas referentes aos temas antepostos já concluídas. Ainda quanto aos testes, durante a execução dos ensaios cujos resultados foram mostrados aqui, não houve interferência manual sobre o funcionamento das válvulas de segurança.

Quanto a documentação, todas as informações, com exceção dos deslocamentos do cabeçote superior da válvula, estão salvas no documento gerado pelo sistema supervisório ao fim do ensaio. Ficando sob critério do operador o manuseio e a disponibilização dos resultados. Na seção de resultados deste trabalho apresentou-se um resumo dessas informações, enquanto no apêndice elas foram dispostas de maneira mais completa. No que tange a ASME PTC 25, apenas as informações médias são solicitadas na documentação, como aqui se propõe a validação do teste, de acordo com as respostas à sua execução, outras variáveis estatísticas foram dispostas no resultado. Vale citar também que o modelo de documentação trazido pela ASME PTC 25 é restrito a utilização de placas de orifício para medição de vazão, como nesse trabalho se propõe outro medidor, a documentação deve ser consideravelmente adaptada. Por fim, é razoável adaptar

também as unidades de medidas da documentação, uma vez que aqui no Brasil se adora o Sistema Internacional, diferentemente da recomendação ASME PTC 25 que traz o Sistema Inglês.

10.3 Condições do teste

O primeiro ponto disposto na tabela de requisitos, diz que a medição da pressão atmosférica deve ser realizada segundo a recomendação ASME PTC 19.2. Entretanto, não houve medição de pressão atmosférica ao longo deste trabalho, uma vez que não se cogitou essa possibilidade devido à ausência de instrumentos para tanto, mas também de não se considerar necessário, isso porque o laboratório é estabelecido em uma cidade litorânea e ainda próximo a um canal do mar, inclusive geograficamente localizado em área de mangue. Logo, é muito aceitável supor que a altitude é zero, portanto, a pressão é de uma atmosfera.

O segundo ponto a ser observado constitui o principal resultado não satisfatório da bancada de ensaio proposto. Isso porque apesar dos resultados do diferencial de pressão terem sido avaliados no regime permanente, com uma hipótese razoável de três desvios padrão, ocorreram ainda oscilações máximas na medição variando de 1,5% a 3% de amplitude simples nos ensaios. O disposto na ASME PTC 25 como requisito é uma amplitude dupla de 2% no máximo, logo 1% em amplitude simples. Dessa forma, apesar de próximo do pedido, os valores extrapolaram ao desejado.

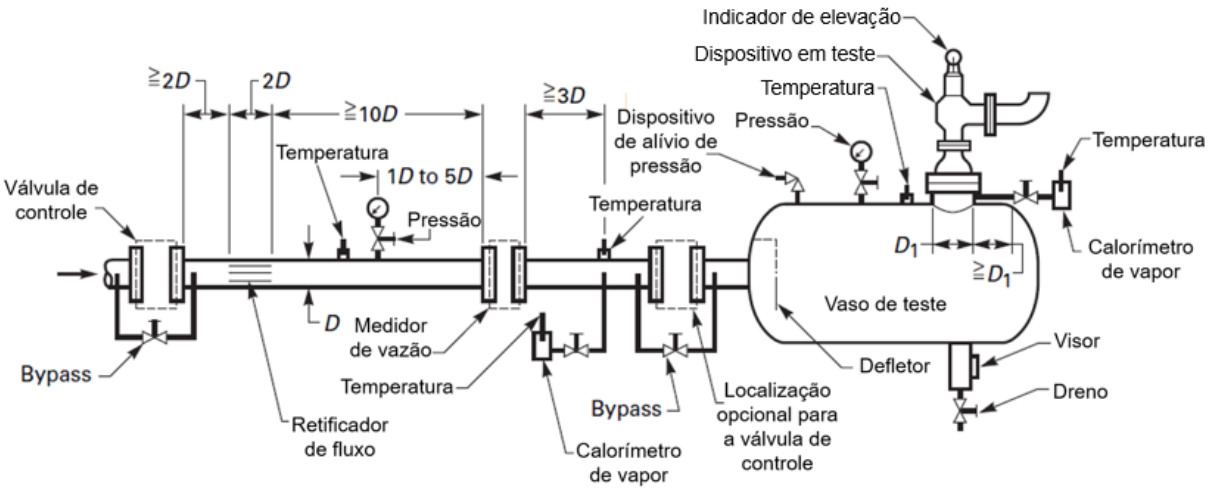
A temperatura do ar na entrada do compressor e na linha nunca atingiu resultados abaixo de 15ºC ou acima de 40ºC. Logo, tranquilamente dentro da faixa de aceitação dos limites para o experimento.

Por fim, quanto ao diâmetro e o volume do vaso de pressão, estes não exerceram influência sobre as condições de operação do teste no que tange o comportamento da pressão estática no vaso, uma vez que como um dos principais pontos positivos deste experimento é que a variabilidade dessa variável foi bastante baixa. Quanto as características operacionais das válvulas de segurança testadas, aparentemente não foram influenciadas pelo vaso de teste, isso porque os fenômenos operacionais ocorridos foram justificados por outro motivo, como explicado anteriormente.

Além dos requisitos discutidos, a ASME PTC 25 recomenda um arranjo para os ensaios de dispositivos de alívio de pressão com contrapressão atmosférica. Essa recomendação está explícita na figura que se segue. A tendência na construção de

um experimento desse tipo, logo, é se aproximar ao máximo da montagem recomendada, porém isso não foi totalmente viável devido a construção ter tido como base as instalações e equipamentos já presentes no laboratório, além de outros componentes, como o vaso de teste, reaproveitados de outras aplicações.

Figura 32 - Arranjo recomendado para o ensaio de dispositivos com contrapressão atmosférica – Arranjo de teste com medidor de vazão



Fonte: ASME PTC 25 (adaptado pelo autor)

Entretanto, alguns pontos devem ser destacados: apesar de o método de medição de vazão utilizado ser o que a imagem trata, ela é genérica para diversos fluidos de teste, incluindo vapor. Logo os calorímetros de vapor não são aplicáveis nesse experimento.

Ademais, pode-se citar a ausência de retificador de fluxo na planta de teste aqui proposta, mas destaca-se que o longo trecho reto que se possui e a geometria do elemento primário de medição (V-Cone) contribuem para se aceitar um fluxo razoavelmente comportado para o experimento.

Cita-se também, a geometria do vaso de teste, uma vez que nesse trabalho foi utilizado um na vertical, enquanto a recomendação traz um na horizontal, além da presença do defletor, porém, devido ao comportamento estável da medição de pressão no interior do vaso de teste, admitiu-se que essas variações não foram também impactantes nos resultados dos ensaios. A ausência da tomada de temperatura no vaso de teste já fora discutida em capítulo anterior, ratifica-se que ela possui uma importância considerável, mas no vaso de teste que existia para o experimento ela fora inaplicável. Pelo mesmo motivo, limitado número de aberturas

do vaso de teste, um segundo dispositivo de alívio de pressão, que não o em teste, para garantir a segurança da instalação não foi utilizado, mas destaca-se a atenção para a segurança na limitação da pressão no compressor. Por fim, no vaso de teste, pede-se que o bocal de saída para o dispositivo de alívio de pressão em teste seja de um diâmetro igual ao da linha (3/4”), isso não foi viável devido ao vaso de teste ter a maior saída superior de 1/2” de diâmetro, entretanto, como as válvulas de segurança testadas são pequenas, com conexões de 1/4”, acredita-se, baseado da teoria de ponto de estagnação do escoamento compressível, que como a menor área do escoamento segue sendo a do interior da válvula de segurança, o tamanho do bocal não exerce influência nos resultados, por não estar nem próximo de ser a menor área do escoamento. Vale ainda destaque que esse bocal foi escolhido de modo a provocar uma redução do diâmetro (de ½” do tanque para ¼” da válvula de segurança) de maneira suave como evidenciado na recomendação da ASME PTC 25.

A válvula de controle, como percebe-se, foi utilizada em sua posição opcional. O restante do trecho de medição de vazão foi aproveitado diretamente de outras aplicações do laboratório, logo, sua alteração não foi cogitada. Porém todos os trechos retos determinados na figura estão em consonância com a montagem. É notável também que no medidor de vazão utilizado a tomada de pressão é realizada dentro do próprio elemento, já a tomada de temperatura está, opostamente a recomendação, a jusante do medidor, porém como a intrusão do transmissor de temperatura no escoamento é mínima, também não se considera um fator considerável.

O indicador de elevação foi feito com uma trena a laser como disposto no capítulo que tratou desse assunto, vale o destaque que esse método de medição não provoca um carregamento extra na válvula de segurança, não interferindo no seu funcionamento. Porém, os resultados coletados não foram confiáveis, devido ao instrumento utilizado possuir uma faixa de trabalho muito superior aos deslocamentos que se procurou medir, de modo que as medições realizadas eram da ordem de grandeza da incerteza do instrumento. Logo, o que pode ser melhorado nesta parte do sistema é o modelo da trena, um instrumento com maior confiabilidade, que opere em uma faixa de trabalho da ordem de milímetros e possua uma calibração documentada deve ser cogitado para certificar a instalação.

10.4 Execução do teste

No que tange a execução dos ensaios, este trabalho já tratou desse assunto, explicitando a metodologia de execução e justificando os pontos mais importantes, demonstrando o impacto que sua não realização pode causar.

Utilizando-se da metodologia proposta para os ensaios, foi atendido o requisito de limite na taxa de aumento da pressão no vaso de teste para todos os ensaios, essa informação está evidenciada nas tabelas de resultados completos para cada válvula, disposto no apêndice C. Vale o destaque que para mensurar essa taxa, a variação da pressão no intervalo entre 90% da pressão de ajuste e a pressão de abertura foi aproximada para uma variação linear, consideração razoável, visto que o intervalo é curto, em geral de menos que 20 leituras (10 segundos).

Também pelos resultados, nos gráficos dos ensaios, é possível acompanhar a execução dos testes e notar que o procedimento de abertura e fechamento, por pelo menos 3 vezes, foi executado sempre. Também nos resultados mais completos do apêndice, é possível notar através dos valores máximos e mínimos das leituras de pressão, que elas não ultrapassaram o requisito de variação máxima de ±1% do valor médio durante o regime permanente, logo, consideradas estáveis.

Por fim, quanto a pressão do teste, a ASME UG-131 alega uma situação de pressão mínima e uma de pressão máxima para a execução dos testes de certificação de capacidade. Durante os ensaios das válvulas de pressão de ajuste 3, 4, 5 e 6 kgf/cm² esses limites foram considerados desde os testes preliminares para a determinação da abertura da válvula de controle para o teste. Ocorre, porém, um fato inusitado para válvulas de pressão menor que 3 kgf/cm², a recomendação ASME UG-131 dispõe que “os testes de certificação de capacidade devem ser efetuados a uma pressão mínima de 20 kPa, pelo menos, superior à pressão de ajustagem.” e “os testes de certificação de capacidade devem ser efetuados a uma pressão que não exceda em mais do que 10% ou 20 kPa, o que for maior, a pressão para a qual a válvula é ajustada para operar.”, assim para a válvula de segurança que tiver uma pressão de ajuste de 2 ou 1 kgf/cm², o limite inferior coincide com o superior, propondo um ponto, e não uma faixa, de pressão para o ensaio. Assim, para estas válvulas não há condições operacionais para obedecer a esses requisitos.

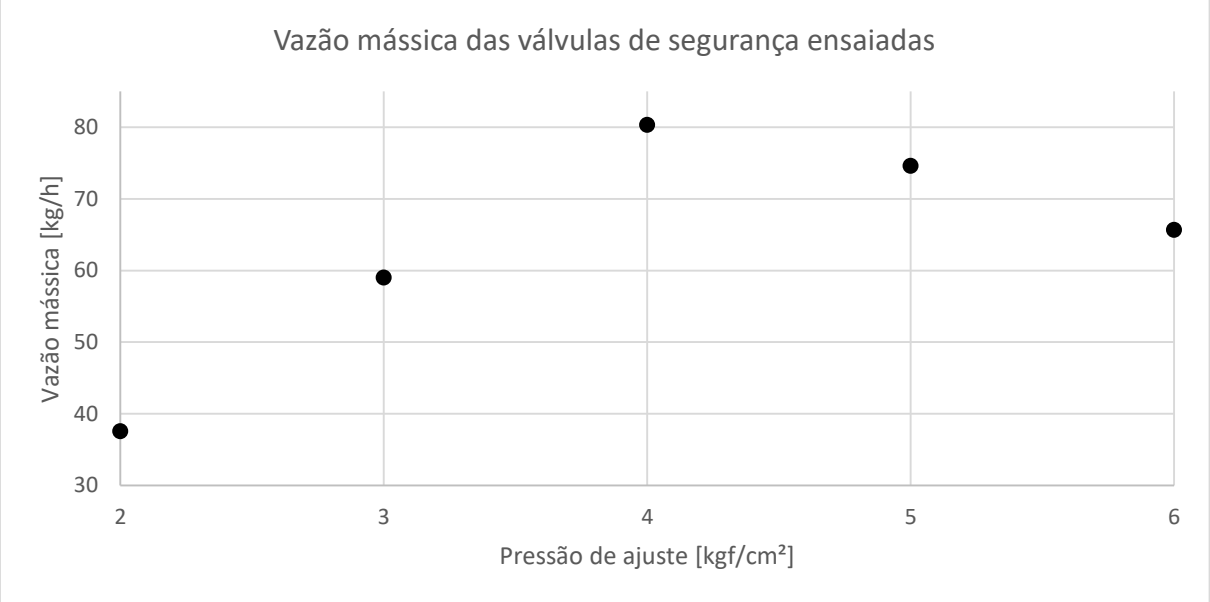
10.5 Certificação

Os requisitos sobre a certificação não foram passíveis de julgamento nesse trabalho, uma vez que todos delimitam um número mínimo de exemplares de válvulas de segurança de mesmas características para o teste. Porém, como as válvulas são avaliadas individualmente, esses requisitos não constituem fator impeditivo ao ensaio proposto.

10.6 Vazão Mássica

Para a principal variável de estudo deste trabalho, os resultados obtidos não foram os intuitivos, isso porque as válvulas de maior pressão de ajuste, logo maior pressão de teste, não apresentaram a maior vazão.

Figura 33 – Gráfico dos resultados quanto a vazão mássica, obtidos nos ensaios de capacidade de vazão de válvulas de segurança.



Fonte: Elaborado pelo autor.

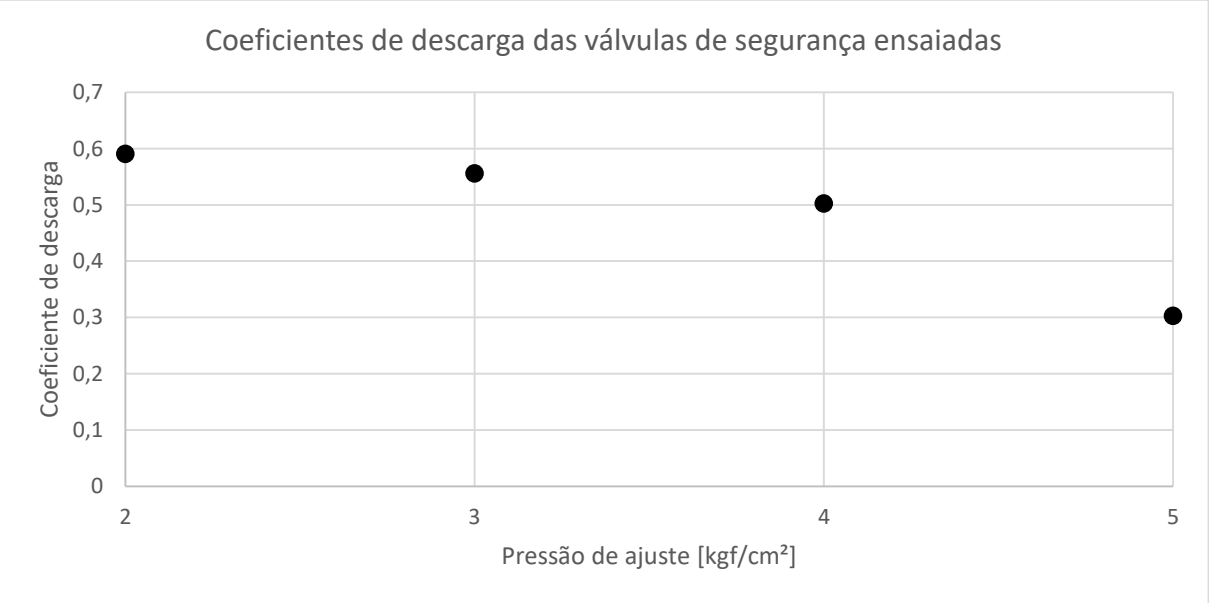
Esse comportamento pode ter sido influenciado pelas condições de operação do teste, porém, como os requisitos dispostos nas recomendações foram observados, pouco pode ser feito quanto a isso. Vale destaque, portanto, que a válvula de segurança de pressão de ajuste de 4 kgf/cm² foi a que escoou maior vazão mássica quando submetida as condições do ensaio.

10.7 Resultados do coeficiente de descarga

A análise do coeficiente de descarga das válvulas de segurança ensaiadas deve ser limitada, isso porque essa característica é calculada com base no fluxo teórico e este depende da área real de descarga, logo, do deslocamento vertical na abertura da válvula. Portanto, como citado, o método utilizado para esta medição não foi satisfatório devido à trena a laser utilizada estar trabalhando muito próximo ao seu valor de incerteza, provocando uma medição extremamente inconfiável. Por fim, segundo Mathias (Mathias, 2008), valores esperados para este dado giram em torno de 0,975, muito longe dos resultados encontrados nos experimentos.

Apesar disso, uma tendência decrescente pode ser vista na relação dos valores para o coeficiente de descarga, de acordo com a pressão de ajuste da válvula de segurança, como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 34 – Gráfico dos coeficientes de descarga das válvulas de segurança ensaiadas, ilustrando a tendência descendente com o aumento da pressão de ajuste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como possibilidade de evolução na avaliação deste parâmetro, deve ser feito um estudo mais aprofundado na dinâmica da abertura da válvula de segurança, de modo a quantificar melhor a área real de descarga através da válvula.

10.8 Propostas de melhorias para trabalhos futuros

Com o desenvolvimento deste trabalho, percebeu-se que alguns pontos podem ser evoluídos para melhorar os resultados obtidos. Na sequência, estes serão elencados, a fim de criar possibilidades para o desenvolvimento de novos trabalhos quanto a este tema.

Em primeiro lugar, um vaso de teste com mais conexões será interessante para compor melhor a caracterização do escoamento pela válvula de segurança. Além disso, é importante que possua uma conexão de diâmetro razoável para permitir o ensaio de válvulas de segurança de maiores diâmetros de conexão ao processo.

Outro ponto importantíssimo é uma nova trena a laser ou outro método de medição de deslocamento mais confiável que o utilizado, uma vez que o dispositivo usado para este fim neste trabalho limitou bastante a confiabilidade dos resultados relacionados a ele.

Também se cita como proposta para redução da oscilação da medição de vazão, requisito não atendido de aceitação do teste de capacidade de válvulas de segurança da ASME PTC 25, a mudança da localização da válvula de controle para um ponto a montante do medidor de vazão, de modo que a queda de pressão que ela impõe no escoamento ocorra antes da medição da vazão. Lembra-se da necessidade de rearranjar os trechos retos para respeitar as recomendações e a correta medição da vazão.

11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi capaz de introduzir de maneira satisfatória uma nova linha de estudos na engenharia mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, o desenvolvimento de um teste de capacidade de vazão de válvulas de segurança.

Lembra-se que todos os equipamentos e dispositivos utilizados foram oriundos de outras aplicações, logo, tornando praticamente nulo o investimento até este presente momento nesse estudo. Isso é importante uma vez que agora é viável propor pontos interessantes para a alocação de um possível recurso, contribuindo assim para a evolução do teste proposto.

Quanto a certificação desta instalação para realizar testes de capacidade de vazão, buscou-se atender aos requisitos presentes na recomendação ASME PTC 25, evidenciando os sucessos e fracassos, porém deve ainda ser avaliado pontos oriundos de outras recomendações, como a calibração do aparato experimental. Assim, este trabalho deve ser compreendido como o passo inicial para esta certificação, sendo necessário buscar, junto à organização responsável por ela, os demais requisitos para tanto.

Diante do que foi dito no parágrafo acima, é razoável entender que os resultados obtidos das válvulas testadas são iniciais, não sendo dotados de toda a confiabilidade possível, assim, ainda limitados comercialmente, porém podendo ser utilizados para comparação de outros trabalhos futuros nesses estudos.

Por fim, o desenvolvimento do experimento de acordo com as recomendações pertinentes, o tratamento estatístico e a propagação de incertezas propostos neste trabalho foram capazes de formar uma estrutura inicial para a evolução deste projeto. Além disso, os resultados encontrados evidenciaram que alguns pontos já estão bem encaminhados no objetivo de validar a execução deste tipo de ensaio no laboratório de Medição de Vazão Multifásica da UFES – MEDMULTI.

12 REFERÊNCIAS

A Origem da Inspeção. (s.d.). Acesso em Outubro de 2016, disponível em Site Inspeção de Equipamentos: http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/p/a-origem-da-inspecao.html

ASME PTC 19.1. (1998). *Performance Test Code: Test Uncertainty*.

ASME PTC 19.3. (1974). *ASME Performance Teste Code 19.3: Temperature Measurement*.

ASME PTC 19.5. (2004). *ASME Performance Test Code 19.5: Flow Measurement*.

ASME PTC 25. (2014). *Performance Test Code 25: Pressure Relief Devices*.

ASME UG-131. (1983). *Código ASME Para Caldeiras e Vasos de Pressão – Seção VIII*.

Batinga, H. (2005). VCONE - Nova tecnologia para medição de gás úmido. *Congresso Rio Automação*.

Cabral, P. (Julho de 2004). Erros e Incertezas nas medições.

Cálculo de Incertezas de Grandezas Físicas. (2015). *Orientação para Cálculo de Incertezas*.

Chainho, J. A. (s.d.). A História da Inspeção de Equipamentos.

Compressores Odontológicos: MC 6 BPV RV 60L. (s.d.). Acesso em Outubro de 2016, disponível em Site da Chiaperini Industrial: http://www.chiaperini.com.br /produtos/138/mc-6-bpv-rv-60l#.WA4sxPkrK00

Compressores Parafuso: COPA 30 HP. (s.d.). Acesso em Outubro de 2016, disponível em Site da Chiaperini Industrial: http://www.chiaperini.com.br/produtos/7/copa-30-g2

Correia, W. J. (2014). Projeto de concepção de um laboratório de avaliação da medição de vazão de gás úmido.

Correia, W. J. (2016). Avaliação Experimental de Correlações Empíricas para Correção da Superestimação das Leituras em Medidores Tipo Cone em Escoamento Bifásico.

Farris Pressure Relief Valves. (s.d.). Acesso em Outubro de 2008, disponível em Site da Seal Pump Engineering Ltd: http://www.sealpump.com/farris-pressure-relief-valves.php

Fox, R., McDonald, A., & Pritchard, P. (2014). *Introdução a Mecânica dos Fluidos.* Rio de Janeiro: LTC.

França, F. A. (2007). *Instrumentação e Medidas: Grandezas Mecânicas.* UNICAMP.

Green, W., & Woods, G. (1973). Some causes of chatter in direct acting spring loaded poppet valve. *3º International Fluid Power Symposium*.

Holman, J. P. (1994). *Experimental Methods for Engineers.* New York.

HORA Regerlamaturen. (s.d.). Acesso em Outubro de 2016, disponível em Site do EastEnergoGroup: http://en34234.f-michail.ru/produkcia/hora/katalogi/82/206

Hos, C., Champneys, A., Paul, K., & McNeely, M. (2014). Dynamic behavior of direct spring loaded pressure relief valves in gas service: Model development, measurements and instability mechanisms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries - Elsevier*.

ISO 5167- Part 5. (2015). *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits*.

Mathias, A. C. (2008). *Válvulas: Industriais, Segurança e Controle.* São Paulo: Artliber Editora.

Orlando, A. d. (2010). Avaliação metrológica do desempenho do medidor tipo v-cone para medição de vazão de gás úmido.

Pressure Measurement. (2010). *ASME Performance Test Code 19.2: Pressure Measurement*.

Rupture Discs for conventional and special applications. (s.d.). Acesso em Outubro de 2016, disponível em Site da REMBE, INC.: http://www.rembe.us/products/process-safety/rupture-discs-for-conventional-and-special-applications/

Schneider, P. (Agosto de 2007). Incertezas de Medição e Ajuste de dados.

Telles, P. C. (2012). *Tubulações Industriais - Materiais, Projeto, Montagem.* LTC.

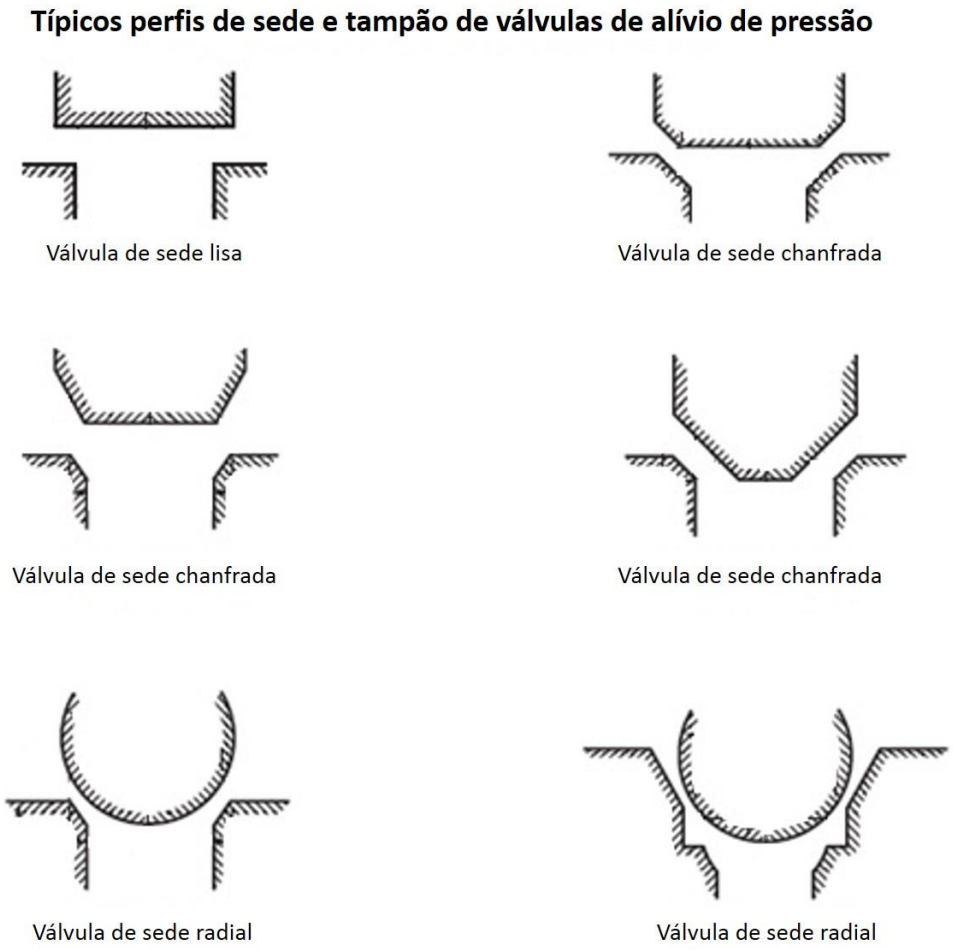
Válvula de Segurança e Alívio Contrapeso. (s.d.). Acesso em Outubro de 2016, disponível em Site da W.Burguer: http://www.wburger.com.br/?page_id=87

V-Cone Flow Meter Technical Brief. (2011). *McCrometer*.

V-Cone General Brochure. (s.d.). Acesso em Outubro de 2016, disponível em McCrometer: http://www.mccrometer.com/library/pdf/24509-49.pdf

13 ANEXO 1

Figura 35 - Ilustração dos perfis comuns do conjunto sede e tampão de válvulas de alívio de pressão.



Fonte: ASME PTC 25, 2014 (adaptado pelo autor).

14 APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA TEÓRICA PARA O ESCOAMENTO DE FLUIDO COMPRESSÍVEL

Como explicado anteriormente, ocorre em válvulas de segurança, uma intensa vazão de fluido compressível ao longo do elemento. Para entender e equacionar tal fenômeno, faz-se então necessário o estudo e compreensão dos conceitos de escoamento compressível.

É a partir da análise de um escoamento isentrópico em um bocal convergente que Fox, McDonald & Pritchard (Fox, McDonald, & Pritchard, 2014) sustentam o conceito de que existe um limite para a vazão mássica através de um bocal. Esse limite acontece em um estado chamado de estagnação (representado pelo asterisco). Assim nesses casos, utilizando das equações de continuidade, quantidade de movimento, primeira e segunda leis da termodinâmica e a equação de Estado de Gases, eles mostram que:

$$\dot{m}_{bloqueado} = \rho^* V^* A^* \tag{1}$$

Sendo:

$$\rho^* = \frac{P^*}{RT^*} \tag{2}$$

$$T^* = \frac{2T_0}{k+1} \tag{3}$$

$$P^* = \frac{P_0}{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}} \tag{4}$$

$$V^* = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0} \tag{5}$$

Sendo k o coeficiente de expansão adiabática do fluido e o índice 0 representa as condições do reservatório a montante do ponto de estagnação. A* representa a área mínima que provoca a estagnação do escoamento. Fazendo-se as substituições algébricas, tem-se:

$$\dot{m}_{bloqueado} = A_e p_o \sqrt{\frac{k}{RT_o}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/2(k-1)} \tag{6}$$

Assim, nota-se que a vazão mássica depende apenas da área de estagnação, ou mínima, do escoamento, isso porque k e R são dados do fluido e p_o e T_o são as condições do reservatório. Assim, para o ar, tem-se:

$$\dot{m}_{bloqueado} = 0{,}04\frac{A_e p_o}{\sqrt{T_o}} \tag{7}$$

Para unidades de medida no sistema internacional.

Esse fenômeno, acima descrito é o ocorrido durante o escoamento em uma válvula de segurança, a qual funciona como um bocal convergente-divergente, sendo a área mínima do escoamento do fluido ao longo dela a área de estagnação. Tal conceito é o adotado pela recomendação ASME UG 131 para definir o fluxo máximo teórico do escoamento ao longo da válvula de segurança submetida a certificação. Utilizando-se da equação da vazão mássica bloqueada e introduzindo o peso molecular do ar no numerador na raiz, além de adequar as unidades de medidas utilizadas pela recomendação, tem-se a equação da vazão mássica teórica de uma válvula de segurança pela ASME UG 131:

$$W_t = 0{,}027AP\sqrt{\frac{M}{T}} \tag{8}$$

Em que T é dado em Kelvin, A é a área real de descarga através da válvula em mm², P é a pressão em kPa (sendo o maior valor entre 1,1PA + 101 e PA + 20 + 101), levando a W_t em kg/h.

15 APÊNDICE B – PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

As variáveis que devem ter suas incertezas propagadas são a vazão mássica do escoamento de ar medida pelo medidor do tipo cone invertido e a massa específica do fluido durante a medição de vazão. Isso porque as demais variáveis não são inferidas, mas medidas diretamente, logo suas incertezas estão diretamente evidenciadas pelos medidores ou pelos resultados obtidos.

Na sequência será feito a propagação da incerteza a partir da fórmula da vazão mássica do medidor de vazão V-Cone, consequentemente da massa específica do fluido. Para tanto, segundo França (França, 2007), utiliza-se do Teorema da Superposição dos Erros para as variáveis da equação da vazão mássica.

$$s_j^2 = \sum_{i=1}^{j} \left(\frac{\partial u}{\partial x_i}\right)^2 s_i^2 \tag{1}$$

Equacionamento semelhante é proposto pela recomendação ASME PTC 19.1, na seção que trata de incertezas de resultados (representado pelo índice R). Assim para garantir a compatibilidade dos cálculos, este se seguirá como disposto pela ASME PTC 19.1, as variáveis têm o mesmo significado que foi descrito na seção de análise de incertezas, porém agora, se referem aos resultados (R) da propagação da incerteza.

$$U_{R95} = 2\sqrt{\left(\frac{B_R}{2}\right)^2 + (S_{\bar{R}})^2} \tag{2}$$

Sendo:

$$B_R^2 = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial R}{\partial \bar{P}_i}\right)^2 B_{\bar{P}i}^2 \tag{3}$$

$$S_{\bar{R}} = \frac{S_R}{\sqrt{n}} \tag{4}$$

Lembrando que S_R é o desvio padrão amostral das leituras da variável resultado e $\bar{P}_i$ representa o valor médio de cada uma das variáveis que exercem influência sobre a variável resultado.

Uma vez que o diâmetro interno (D) do medidor e o fator β são dados oriundos do fabricante, serão admitidos como confiáveis, de modo que suas incertezas serão

desprezadas e serão tratados como constantes. Além disso, métodos de mensurar suas incertezas foram tidos como inviáveis. Dessa forma a propagação de incertezas se dará em função de três variáveis: fator de expansão (Y), diferencial de pressão (ΔP), coeficiente de descarga (C_d) e a massa específica do fluido (ρ). Porém, como a massa específica é inferida por outras variáveis, sua incerteza deve ser encontrada pela propagação das variáveis contidas na sua formulação descrita anteriormente, pressão termodinâmica e temperatura do fluido. A incerteza da medição de vazão do V-Cone foi atribuída ao coeficiente de descarga e pode ser encontrada na documentação do fabricante (V-Cone Flow Meter Technical Brief, 2011), como sendo igual a ±0,5%. Outro ponto é a incerteza do fator de expansão, isso porque a norma ISO 5167-5 traz a equação 6 para esta incerteza, mostrada abaixo. Assim tem-se:

$$B_{q_m} = \sqrt{B_{\overline{\Delta P}}^2 \left(\frac{\partial q_m}{\partial \overline{\Delta P}}\right)^2 + B_{\bar{Y}}^2 \left(\frac{\partial q_m}{\partial \bar{Y}}\right)^2 + B_{\bar{\rho}}^2 \left(\frac{\partial q_m}{\partial \bar{\rho}}\right)^2 + B_{\overline{C_d}}^2 \left(\frac{\partial q_m}{\partial \overline{C_d}}\right)^2} \quad (5)$$

Sendo:

$$\frac{\partial q_m}{\partial \overline{\Delta P}} = \frac{\pi}{4} \frac{D^2 \beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} C_d \bar{Y} \sqrt{2\bar{\rho}} \left(\frac{1}{2\overline{\Delta P}^2}\right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \bar{\rho}} = \frac{\pi}{4} \frac{D^2 \beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} C_d \bar{Y} \sqrt{2\overline{\Delta P}} \left(\frac{1}{2\bar{\rho}^2}\right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \bar{Y}} = \frac{\pi}{4} \frac{D^2 \beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} C_d \sqrt{2\bar{\rho}\overline{\Delta P}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial C_d} = \frac{\pi}{4} \frac{D^2 \beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \bar{Y} \sqrt{2\bar{\rho}\overline{\Delta P}} \quad (10)$$

$$B_{\bar{Y}} = 0{,}096 \frac{\overline{\Delta P}}{K\bar{P}} \quad (11)$$

$$B_\rho = \sqrt{B_{\bar{P}}^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \bar{P}}\right)^2 + B_{\bar{T}}^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \bar{T}}\right)^2} \quad (12)$$

No qual:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \bar{P}} = \frac{1}{R\bar{T}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \bar{T}} = \frac{\bar{P}}{R}\left(\frac{-1}{\bar{T}^2}\right) \quad (14)$$

Com:

$$S_{\overline{q_m}} = \frac{S_{q_m}}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

$$S_{\bar{\rho}} = \frac{S_\rho}{\sqrt{n}} \quad (16)$$

Logo:

$$U_{q_m 95} = 2\sqrt{\left(\frac{B_{q_m}}{2}\right)^2 + \left(S_{\overline{q_m}}\right)^2} \quad (17)$$

$$U_{\rho 95} = 2\sqrt{\left(\frac{B_\rho}{2}\right)^2 + \left(S_{\bar{\rho}}\right)^2} \quad (18)$$

16 APÊNDICE C – RESULTADOS POR TRECHOS DOS ENSAIOS

16.1 Válvula de pressão de ajuste de 2 kgf/cm²

Tabela 16 - Configurações do ensaio de capacidade de vazão da válvula de segurança de PA = 2 kgf/cm²

Informações da execução do teste	
Pressão de Ajuste (PA) [kgf/cm²]	2
Pressão mínima de teste [kgf/cm²]	2,204
Pressão máxima de teste [kgf/cm²]	2,204
Faixa de pressão do compressor [bar]	6,8 - 7,8
Porcentagem de abertura da válvula de controle no regime permanente	32%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 17 - Resultados específicos de cada trecho do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 2 kgf/cm²

INTERVALO 1	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	105	365	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	37,67	0,1748	37,225	38,165	1,31%
Diferencial de Pressão [mbar]	1,726	0,01515	1,685	1,769	2,49%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	2,253	0,002403	2,247	2,26	0,31%
Pressão da linha [kgf/cm²]	6,815	0,01497			
Massa específica do fluido [kg/m³]	2,561	0,003495			
Temperatura na linha [K]	295,8	0,1747			
Temperatura no vaso de teste [K]	300,5				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,07388	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	2,512				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	1,628				

INTERVALO 2	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	570	850	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	37,59	0,1887	37,032	38,103	1,48%
Diferencial de Pressão [mbar]	1,722	0,01601	1,668	1,771	3,15%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	2,294	0,002337	2,288	2,301	0,30%
Pressão da linha [kgf/cm²]	6,811	0,01474			
Massa específica do fluido [kg/m³]	2,603	0,003005			
Temperatura na linha [K]	296,5	0,1441			
Temperatura no vaso de teste [K]	301,2				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,07271	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	2,531				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	1,647				

INTERVALO 3	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	1000	1300	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	37,54	0,1688	37,057	37,982	1,29%
Diferencial de Pressão [mbar]	1,720	0,01424	1,678	1,758	2,44%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	2,293	0,002469	2,287	2,301	0,35%
Pressão da linha [kgf/cm²]	6,811	0,01482			
Massa específica do fluido [kg/m³]	2,561	0,003495			
Temperatura na linha [K]	296,9	0,1425			
Temperatura no vaso de teste [K]	301,6				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,072	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	2,534				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	1,648				

Fonte: Elaborado pelo autor

16.2 Válvula de pressão de ajuste de 3 kgf/cm²

Tabela 18 - Configurações do ensaio de capacidade de vazão da válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm²

Informações da execução do teste	
Pressão de Ajuste (PA) [kgf/cm²]	3
Pressão mínima de teste [kgf/cm²]	3,204
Pressão máxima de teste [kgf/cm²]	3,3
Faixa de pressão do compressor [bar]	7,8 - 8,0
Porcentagem de abertura da válvula de controle no regime permanente	40%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 19 - Resultados específicos de cada trecho do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 3 kgf/cm²

INTERVALO 1	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	100	360	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	59,11	0,1736	58,681	59,631	0,87%
Diferencial de Pressão [mbar]	3,844	0,02040	3,794	3,91	1,73%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	3,253	0,003043	3,245	3,262	0,28%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,711	0,01119			
Massa específica do fluido [kg/m³]	3,671	0,003988			
Temperatura na linha [K]	298,1	0,1961			
Temperatura no vaso de teste [K]	302,7				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,07813	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	3,274				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	2,22				

INTERVALO 2	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	520	800	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	59,03	0,1689	58,602	59,517	0,82%
Diferencial de Pressão [mbar]	3,840	0,02000	3,779	3,912	1,86%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	3,246	0,002912	3,236	3,254	0,31%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,708	0,01120			
Massa específica do fluido [kg/m³]	3,657	0,003880			
Temperatura na linha [K]	298,7	0,1892			
Temperatura no vaso de teste [K]	303,4				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,08383	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	3,223				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	2,22				

INTERVALO 3	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	950	1250	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	59,00	0,1814	58,487	59,513	0,87%
Diferencial de Pressão [mbar]	3,841	0,02093	3,782	3,914	1,90%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	3,244	0,004392	3,218	3,254	0,80%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,711	0,01234			
Massa específica do fluido [kg/m³]	3,649	0,004703			
Temperatura na linha [K]	299,0	0,2045			
Temperatura no vaso de teste [K]	303,7				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,06925	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	3,239				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	2,214				

Fonte: Elaborado pelo autor

16.3 Válvula de pressão de ajuste de 4 kgf/cm²

Tabela 20 - Configurações do ensaio de capacidade de vazão da válvula de segurança de PA = 4 kgf/cm²

Informações da execução do teste	
Pressão de Ajuste (PA) [kgf/cm²]	4
Pressão mínima de teste [kgf/cm²]	4,204
Pressão máxima de teste [kgf/cm²]	4,4
Faixa de pressão do compressor [bar]	7,8 - 8,0
Porcentagem de abertura da válvula de controle no regime permanente	47%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 21 - Resultados específicos de cada trecho do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 4 kgf/cm²

INTERVALO 1	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	120	400	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	80,55	0,2255	79,954	81,132	0,74%
Diferencial de Pressão [mbar]	7,239	0,03223	7,124	7,327	1,59%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	4,321	0,003123	4,313	4,334	0,30%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,559	0,01179			
Massa específica do fluido [kg/m³]	4,894	0,005502			
Temperatura na linha [K]	297,0	0,3021			
Temperatura no vaso de teste [K]	301,7				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,08922	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	4,389				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	2,882				

INTERVALO 2	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	600	880	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	80,32	0,2113	79,786	80,884	0,70%
Diferencial de Pressão [mbar]	7,220	0,03140	7,126	7,297	1,30%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	4,316	0,002945	4,308	4,322	0,18%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,560	0,01166			
Massa específica do fluido [kg/m³]	4,873	0,004946			
Temperatura na linha [K]	297,9	0,1908			
Temperatura no vaso de teste [K]	302,6				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,09071	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	4,372				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	2,894				

INTERVALO 3	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	1100	1380	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	80,26	0,2193	79,685	80,864	0,76%
Diferencial de Pressão [mbar]	7,225	0,03249	7,141	7,312	1,20%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	4,315	0,003093	4,308	4,325	0,23%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,562	0,01135			
Massa específica do fluido [kg/m³]	4,86	0,00535			
Temperatura na linha [K]	298,7	0,2194			
Temperatura no vaso de teste [K]	303,3				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,06696	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	4,381				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	2,892				

Fonte: Elaborado pelo autor

16.4 Válvula de pressão de ajuste de 5 kgf/cm²

Tabela 22 - Configurações do ensaio de capacidade de vazão da válvula de segurança de PA = 5 kgf/cm²

Informações da execução do teste	
Pressão de Ajuste (PA) [kgf/cm²]	5
Pressão mínima de teste [kgf/cm²]	5,204
Pressão máxima de teste [kgf/cm²]	5,5
Faixa de pressão do compressor [bar]	7,8 - 8,0
Porcentagem de abertura da válvula de controle no regime permanente	46%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 23 - Resultados específicos de cada trecho do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 5 kgf/cm²

INTERVALO 1	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	200	450	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	74,70	0,1982	74,153	75,231	0,74%
Diferencial de Pressão [mbar]	6,160	0,02926	6,079	6,248	1,43%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	5,437	0,003230	5,427	5,447	0,19%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,605	0,00943			
Massa específica do fluido [kg/m³]	6,189	0,006295			
Temperatura na linha [K]	295,4	0,2433			
Temperatura no vaso de teste [K]	300,1				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,08019	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	5,268				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	3,581				

INTERVALO 2	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	600	880	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	74,67	0,2028	74,097	75,112	0,77%
Diferencial de Pressão [mbar]	6,170	0,02947	6,085	6,243	1,38%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	5,435	0,003043	5,425	5,443	0,18%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,613	0,00929			
Massa específica do fluido [kg/m³]	6,166	0,003793			
Temperatura na linha [K]	296,4	0,1215			
Temperatura no vaso de teste [K]	301,1				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,07800	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	5,34				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	3,831				

INTERVALO 3	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	1100	1380	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	74,60	0,2107	74,006	75,241	0,86%
Diferencial de Pressão [mbar]	6,167	0,03062	6,08	6,271	1,69%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	5,437	0,003542	5,427	5,446	0,19%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,613	0,00990			
Massa específica do fluido [kg/m³]	6,16	0,00489			
Temperatura na linha [K]	296,8	0,1291			
Temperatura no vaso de teste [K]	301,5				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,08365	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	5,228				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	3,817				

Fonte: Elaborado pelo autor

16.5 Válvula de pressão de ajuste de 6 kgf/cm²

Tabela 24 - Configurações do ensaio de capacidade de vazão da válvula de segurança de PA = 6 kgf/cm²

Informações da execução do teste	
Pressão de Ajuste (PA) [kgf/cm²]	6
Pressão mínima de teste [kgf/cm²]	6,204
Pressão máxima de teste [kgf/cm²]	6,6
Faixa de pressão do compressor [bar]	7,8 - 8,0
Porcentagem de abertura da válvula de controle no regime permanente	60%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 25 - Resultados específicos de cada trecho do ensaio de capacidade da válvula de segurança de PA = 6 kgf/cm²

INTERVALO 1	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	150	400	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	65,76	0,2808	65,043	66,425	1,09%
Diferencial de Pressão [mbar]	4,803	0,03756	4,71	4,894	1,94%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	6,502	0,003723	6,492	6,51	0,15%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,623	0,00947			
Massa específica do fluido [kg/m³]	7,341	0,007250			
Temperatura na linha [K]	297,9	0,3001			
Temperatura no vaso de teste [K]	302,6				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,07913	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	7,227				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	5,091				

INTERVALO 2	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	600	900	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	65,71	0,2750	65,039	66,442	1,12%
Diferencial de Pressão [mbar]	4,807	0,03605	4,722	4,909	2,11%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	6,505	0,003187	6,492	6,515	0,21%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,627	0,00923			
Massa específica do fluido [kg/m³]	7,324	0,005900			
Temperatura na linha [K]	298,8	0,1927			
Temperatura no vaso de teste [K]	303,5				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,08330	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	7,192				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	5,104				

INTERVALO 3	Inicial	Final			
Leituras do regime permanente	1150	1450	Valor Mínimo	Valor Máximo	Maior oscilação
	Média	Desvio Padrão			
Vazão Mássica [kg/h]	65,56	0,2848	64,783	66,298	1,19%
Diferencial de Pressão [mbar]	4,795	0,03800	4,692	4,9	2,20%
Pressão no vaso de teste [kgf/cm²]	6,503	0,003657	6,494	6,514	0,16%
Pressão da linha [kgf/cm²]	7,628	0,00937			
Massa específica do fluido [kg/m³]	7,31	0,00501			
Temperatura na linha [K]	299,4	0,1434			
Temperatura no vaso de teste [K]	304,0				
Taxa de aumento da pressão [kgf/cm²s]	0,08663	(a partir de 90% de PA)			
Pressão de abertura [kgf/cm²]	7,181				
Pressão de fechamento [kgf/cm²]	5,082				

Fonte: Elaborado pelo autor