

Bruno Silva Marció

**AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE EM VASOS DE PRESSÃO
DE PEQUENO PORTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Eng. Mecânica.
Orientador: Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Marció, Bruno Silva

Avaliação de estanqueidade em vasos de pressão de
pequeno porte / Bruno Silva Marció ; orientador, Carlos
Alberto Flesch - Florianópolis, SC, 2014.

113 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Avaliação de estanqueidade. 3.
Técnica da bolha por imersão. 4. Vasos de pressão de
pequeno porte. 5. Compressores herméticos. I. Flesch,
Carlos Alberto. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
III. Título.

Bruno Silva Marció

AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE EM VASOS DE PRESSÃO DE PEQUENO PORTE

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 28 de novembro de 2014.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng. (Presidente)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Saulo Güths, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Tiago Loureiro Fígaro da Costa Pinto, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à
minha família e a todos que
contribuíram para sua realização.

AGRADECIMENTOS

A toda minha família pelo apoio e carinho nos momentos que mais precisei.

À minha namorada, Lauren, pelo amor, incentivo e companheirismo durante todos esses anos que estamos juntos.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PosMec) e ao Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios (LIAE) por tornar possível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Carlos Alberto Flesch, pela oportunidade, ensinamentos e confiança para integrar seu grupo de trabalho.

A Miguel Burg Demay pela ajuda, paciência e amizade ao longo deste trabalho.

A todos os amigos do Labmetro/LIAE pelos momentos de descontração e suporte durante o mestrado.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma maneira com este trabalho.

RESUMO

Na fabricação de vasos de pressão, ensaios não destrutivos são amplamente adotados para garantir a integridade e confiabilidade dos bens produzidos. No caso específico de compressores herméticos para refrigeração, os respectivos ensaios são principalmente aplicados visando assegurar característica essencial do produto, a estanqueidade. Pesquisas realizadas mostraram que métodos para avaliação de estanqueidade atualmente utilizados por fabricantes de compressores herméticos apresentam um desempenho aquém às expectativas, em consequência da baixa eficácia ou do elevado custo para empregá-los. Em vista disso, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um conceito de sistema de avaliação de estanqueidade para compressores herméticos capaz de ser implantado em linhas de produção. Como parte do trabalho, foi realizado um levantamento bibliográfico, a partir da literatura científica e normas da área, com o objetivo de selecionar um método de ensaio não destrutivo adequado para avaliar estanqueidade em vasos de pressão, particularmente compressores herméticos. Com base nos conceitos do método escolhido, desenvolveu-se um sistema de medição da vibração da carcaça de compressores, provocada pela presença de vazamentos no objeto avaliado. A partir do sistema de avaliação de estanqueidade concebido, ensaios foram realizados para determinar seu desempenho tanto em laboratório quanto em fábrica. O respectivo sistema alcançou um excelente desempenho em laboratório no que se refere à identificação de compressores com vazamento. Porém, tal comportamento não se reproduziu no chão-de-fábrica devido, principalmente, às condições ambientais do local correspondente. Com o intuito de isolar o objeto avaliado do meio externo, uma cabine acústica foi concebida, e ensaios preliminares em laboratório – simulando o ambiente fabril – evidenciaram resultados extremamente promissores. Desse modo, acredita-se que o sistema de avaliação de estanqueidade desenvolvido se torne uma alternativa viável para implantação em linhas de produção.

Palavras-chave: Avaliação de estanqueidade, Técnica da bolha por imersão para detecção de vazamentos, Compressor hermético, Descontinuidades passantes em vasos de pressão.

ABSTRACT

Nondestructive tests are widely used for the assurance of the integrity and reliability of pressure vessels. In relation to hermetic refrigeration compressors, these tests are mainly used to ensure the leak tightness, which is an essential feature of the product. However, researches demonstrated that current leak tightness evaluation methods used by hermetic compressors manufacturers show poor performance, as a result of the low effectiveness and high cost. Thus, this study presents the development of a concept of a leak tightness evaluation system to be used in production lines. The literature was reviewed in order to select a nondestructive testing method suitable for the evaluation of leak tightness in pressure vessels, especially hermetic compressors. It was developed a measurement system able to evaluate the vibration of compressor shell caused by the presence of leaks. Tests were conducted to evaluate its performance in laboratory and in the production line environment. The system achieved excellent performance related to leak detection in laboratory. However, the same performance was not achieved in the production line, mainly due to local environment conditions. An acoustic enclosure was developed to isolate the object under test from external environment. Preliminary tests, performed in laboratory to simulate the factory environment, showed promising results. Thus, it is believed that the developed leak tightness evaluation system might be a suitable alternative to be used in production line.

Keywords: Leak tightness evaluation, Bubble immersion technique for leak detection, Hermetic compressor, Leak in pressure vessels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho de um típico vaso de pressão	25
Figura 2 - Vasos de pressão cilíndricos e esféricos.....	26
Figura 3 - Vasos de pressão na posição horizontal e vertical.....	27
Figura 4 - Trinca em um cordão de solda	28
Figura 5 - Normas para projeto e fabricação de vasos de pressão	29
Figura 6 – Descontinuidade passante em uma região soldada	35
Figura 7 - Princípio de funcionamento do método por radiografia	36
Figura 8 - Princípio de funcionamento do método por ultrassom	37
Figura 9 - Peça submetida ao método por partículas magnéticas.....	38
Figura 10 - Peça submetida ao método por líquidos penetrantes	40
Figura 11 - Ilustração de um compressor hermético com destaque para a junta soldada.....	44
Figura 12 - Compressor hermético com destaque para regiões onde ocorrem vazamentos	45
Figura 13 - Métodos e técnicas do ensaio de vazamento	46
Figura 14 - Árvore de decisão.....	48
Figura 15 - Imagem real e termograma de uma mangueira de ar comprimido ..	52
Figura 16 - Imagem real e termogramas antes e depois da pressurização, respectivamente	53
Figura 17 - Imagem real e termograma gerado do compressor hermético no primeiro ciclo de ensaios	54
Figura 18 - Imagem real e termograma gerado do compressor hermético no segundo ciclo de ensaios.....	55
Figura 19 - Princípio de funcionamento da técnica por acumulação com câmara a vácuo.....	57
Figura 20 - Ensaios com o compressor hermético empregando a técnica do espectrômetro de massa por acumulação	59
Figura 21 - Ensaio de vazamento com a técnica por queda de pressão.....	60
Figura 22 - Bancada de ensaios empregando a técnica por queda de pressão....	62
Figura 23 - Ensaios de queda de pressão junto ao compressor hermético	62
Figura 24 - Ensaios com o compressor hermético empregando a técnica da bolha por imersão	65
Figura 25 - Análise em frequência das medições do hidrofone - compressor com e sem vazamento.....	68
Figura 26 - Atuação do ruído eletromagnético nas medições do hidrofone	68
Figura 27 - Análise em frequência das medições do acelerômetro - compressor com e sem vazamento	69
Figura 28 - Características metrológicas do acelerômetro 353B04.....	72
Figura 29 - Características metrológicas do sistema de aquisição 3050-A-060.73	73
Figura 30 - Bancada de ensaios em laboratório	74
Figura 31 - Resposta em frequência típica de compressores com e sem vazamento.....	74
Figura 32 - Características metrológicas do acelerômetro 621B41.....	77

Figura 33 - Características metrológicas do sistema de aquisição NI-9234.....	78
Figura 34 - Configuração geral do sistema	79
Figura 35 - Bancada de ensaios em laboratório com sistema de avaliação de estanqueidade desenvolvido	80
Figura 36 - Resposta em frequência de compressores com e sem vazamento ...	80
Figura 37 - Ensaios realizados em laboratório.....	82
Figura 38 - Ensaios realizados em fábrica	83
Figura 39 - Comparação entre o ruído de fundo do laboratório e da fábrica	84
Figura 40 - Bancada de ensaios para avaliar o desempenho da cabine acústica	86
Figura 41 - Acelerômetro acoplado ao compressor submerso no recipiente de plástico (a) e na cabine acústica (b).....	86
Figura 42 - Comparação entre as medições com recipiente de plástico e o ruído de fundo da fábrica	87
Figura 43 - Comparação entre as medições com a cabine acústica e o ruído de fundo do laboratório	88
Figura 44 – Pontos de acoplamento do acelerômetro no compressor não submerso.....	107
Figura 45 - Medições realizadas próximas ao local de vazamento	108
Figura 46 - Medições realizadas no centro do tampo da carcaça.....	108
Figura 47 - Sistema de medição da vibração	109
Figura 48 - Medições em compressores com e sem vazamento	110
Figura 49 - Compartimentos interno (a) e externo (b) da cabine acústica	112
Figura 50 - Corte transversal da cabine acústica finalizada.....	113

LISTA DE ABREVIATURAS

ABENDI	Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	<i>Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASNT	<i>American Society for Nondestructive Testing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standard</i>
CEN	<i>European Committee for Standardization</i>
END	Ensaaios Não Destrutivos
IEPE	<i>Integrated Electronic Piezoelectric</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LABMETRO	Laboratório de Metrologia e Automatização
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
NI	<i>National Instruments</i>
NR	Norma Regulamentadora
SNTC	<i>Syndicat National de la Chaudronnerie et de la Tuyauterie Industrielle</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	19
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO.....	21
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: VASOS DE PRESSÃO E	
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	23
2.1 VASOS DE PRESSÃO	23
2.1.1 Definição.....	23
2.1.2 Classificação dos vasos de pressão	24
2.1.3 Principais componentes de um vaso de pressão.....	25
2.1.4 Controle da qualidade na fabricação de vasos de pressão	27
2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	31
2.2.1 Definição.....	31
2.2.2 Métodos de ensaios não destrutivos	32
2.2.3 Seleção do método de ensaios não destrutivos para avaliação de estanqueidade em vasos de pressão.....	41
3 ENSAIO DE VAZAMENTO PARA VASOS DE PRESSÃO	43
3.1 COMPRESSORES HERMÉTICOS	43
3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS DO ENSAIO DE VAZAMENTO PARA AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE EM COMPRESSORES HERMÉTICOS	46
3.2.1 Técnica da termografia infravermelha por emissão padrão..	50
3.2.2 Técnica do espectrômetro de massa por acumulação.....	56
3.2.3 Técnica da variação de pressão por queda de pressão	59
3.2.4 Técnica da bolha por imersão.....	63
4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE	
ESTANQUEIDADE PARA COMPRESSORES HERMÉTICOS	
.....	71
4.1 ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DA GRANDEZA MEDIDA	71
4.2 ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE.....	75
4.2.1 Seleção do acelerômetro e do sistema de aquisição	75
4.2.2 Desenvolvimento do software	78
4.2.3 Configuração geral do sistema de medição	79

4.2.4 Avaliações preliminares e comparativas do sistema de avaliação de estanqueidade desenvolvido e o do item 4.1	79
4.3 ANÁLISE DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE EM LABORATÓRIO E FÁBRICA	81
4.3.1 Ensaios em laboratório	81
4.3.2 Ensaios em fábrica	82
4.3.3 Resultados alcançados.....	83
4.4 MELHORIAS PARA O SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE EM AMBIENTE FABRIL.....	85
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
5.1 CONCLUSÕES.....	89
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
REFERÊNCIAS.....	93
ANEXO	105
APÊNDICE A – ESTUDO SOBRE A VIBRAÇÃO DA CARÇAÇA EM COMPRESSORES HERMÉTICOS NÃO SUBMERSOS ..	107
APÊNDICE B – ANÁLISE DA INCERTEZA INSTRUMENTAL DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE CONCEBIDO.....	109
APÊNDICE C – MONTAGEM DE UMA CABINE ACÚSTICA..	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

Vasos de pressão podem ser definidos como recipientes estanques capazes de conter fluidos sob pressão. Dentre os vasos de pressão mais aplicados na indústria, destacam-se reatores, torres de fracionamento e destilação, trocadores de calor, aquecedores e caldeiras (TELLES, 2007).

A partir do início do século XIX, em virtude de frequentes explosões de caldeiras pelo uso intensivo de máquinas a vapor, o conceito de regulamentação do projeto e da fabricação de vasos de pressão começou a ser introduzido. As primeiras normas de projeto e fabricação surgiram no século XX, das quais se destaca o código geral de caldeiras e vasos de pressão da ASME¹ (CHATTOPADHYAY, 2004; ELLENBERGER, 2004; ASME, 2010).

A origem do código de normas ASME, como de outras ao redor do mundo, está relacionada diretamente a aspectos de segurança na operação do vaso de pressão, com o intuito de reduzir o número de acidentes e, conseqüentemente, prejuízos financeiros e perdas de vidas humanas (TELLES, 2007).

Em consequência da introdução e da divulgação das normas publicadas, houve uma forte redução no número e na gravidade dos acidentes. Entretanto, o emprego cada vez mais intenso dos vasos de pressão, principalmente em condições severas de operação, resultou na necessidade de alterações das normas vigentes, com revisões periódicas e inclusões de apêndices. (ELLENBERGER, 2004; TELLES, 2007).

Dentre as diversas alterações realizadas, às quais o código ASME foi submetido, se destaca a regulamentação do sistema de controle da qualidade do processo de fabricação de vasos de pressão, publicado a partir da edição de 1977. Este sistema possui uma série de instruções de caráter organizacional e administrativo, às quais os fabricantes devem se submeter para que sua produção tenha um efetivo controle da qualidade. Tais diretrizes fornecem aos mesmos uma maior garantia de integridade e confiabilidade dos vasos de pressão produzidos (ELLENBERGER, 2004; TELLES, 2007).

¹ O código geral de caldeiras e vasos de pressão da *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) se destaca por atualmente ser uma das normas mais aplicadas para fabricação de vasos de pressão (TELLES, 2007).

Elemento essencial para consolidar um sistema de controle da qualidade e, conseqüentemente, assegurar desempenho adequado e seguro de um vaso de pressão é o emprego de ensaios não destrutivos². (MCGOONNAGLE, 1965; RAJ et al., 2006). Esta ferramenta³ de controle da qualidade consiste na aplicação de métodos capazes de identificar descontinuidades⁴ durante a fabricação de vasos de pressão – sem alterar ou danificar o objeto avaliado –, além de inspecionar a deterioração do mesmo ao longo de sua operação (RAJ et al., 2002; SAMPAIO, 2009).

Ensaio não destrutivo são largamente aplicados na fabricação de vasos de pressão, a fim de se garantir a qualidade dos bens produzidos. No que tange à indústria de compressores herméticos, os quais podem ser definidos como vasos de pressão por conter fluido pressurizado, ensaios não destrutivos são empregados visando assegurar característica essencial do produto, a estanqueidade.

Estudos realizados junto a fabricantes de compressores mostraram que os métodos atualmente empregados para avaliação de estanqueidade são pouco eficientes ou são altamente dispendiosos, interferindo de forma significativa no custo de fabricação desses produtos.

Frente a esse cenário, observa-se uma oportunidade de desenvolvimento de um sistema de avaliação de estanqueidade de compressores herméticos. Embora o enfoque deste trabalho seja o componente em questão, a abordagem aqui apresentada não será restrita aos mesmos, abrindo a possibilidade de ser aplicada a outros tipos de vasos de pressão de pequeno porte.

² Segundo Jackson Jr. *et al.* (1998), denominam-se ensaios não destrutivos qualquer tipo de avaliação ou teste realizado em uma objeto sem alterar, de modo permanente, suas funcionalidades.

³ Com a finalidade de obter resultados efetivos na aplicação de ensaios não destrutivos, determinados fatores devem ser avaliados, como profissionais capacitados, procedimentos qualificados, equipamentos calibrados, além de requisitos de normas e especificações bem definidos (SAMPAIO, 2009).

⁴ Descontinuidades são interrupções ou violações das estruturas típicas de um material ou peça, em relação à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas dos mesmos (MARQUES *et al.*, 2011; ABNT, 2012).

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um conceito de sistema de avaliação de estanqueidade para vasos de pressão de pequeno porte.

Para tanto, realizou-se um estudo de métodos de ensaios não destrutivos com a finalidade de selecionar o mais adequado para avaliação de estanqueidade em vasos de pressão. Após essa etapa, técnicas do método escolhido foram analisadas experimentalmente, empregando o compressor hermético como estudo de caso, com o intuito de definir a mais viável de ser empregada para o objetivo em questão.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em cinco capítulos, e seus principais tópicos estão descritos na sequência.

No capítulo dois é feita uma caracterização dos vasos de pressão, sendo os mesmos definidos, classificados e seus principais componentes descritos. É dada ênfase aos principais problemas relacionados à fabricação de vasos de pressão e são apresentadas normas para projeto e fabricação dos mesmos, com destaque ao sistema de controle da qualidade do código ASME. Além disso, é apresentado um levantamento bibliográfico de ensaios não destrutivos, bem como de seus principais métodos que possuem capacidade de avaliar a estanqueidade de vasos de pressão, mediante a identificação da presença de descontinuidades passantes⁵. Cada um dos métodos é analisado e, posteriormente, o mais apropriado é selecionado, de acordo com a aplicação em questão.

O terceiro capítulo apresenta um estudo de caso sobre a avaliação de estanqueidade em compressores herméticos. É realizada uma breve descrição do objeto em questão, onde são expostos os problemas de estanqueidade do mesmo. São apresentadas as principais técnicas do método de ensaios não destrutivos selecionado no capítulo dois e as vantagens e desvantagens para avaliação de estanqueidade são evidenciadas. O desempenho de cada técnica é demonstrado e comparado com as demais, tomando o compressor hermético como

⁵ O termo descontinuidade passante representa um orifício, fissura ou passagem física por onde ocorre vazamento de fluido (PAYÃO FILHO *et al.*, 2000a; ABNT, 2013).

objeto de estudo, com o intuito de verificar a viabilidade das mesmas frente à aplicação deste trabalho. Por último, a técnica com melhor desempenho é selecionada.

O quarto capítulo apresenta o desenvolvimento do sistema de avaliação de estanqueidade baseado na técnica mais viável determinada no capítulo anterior. São realizados ensaios preliminares em laboratório com o intuito de caracterizar o fenômeno físico a ser medido. Em seguida, o sistema de avaliação de estanqueidade é descrito, onde se aborda a especificação dos componentes de um sistema de medição e o desenvolvimento do software. Além disso, é feita uma análise dos resultados de ensaios realizados em laboratório e no chão-de-fábrica para verificar a viabilidade do sistema. Por fim, é apresentada uma proposta de aperfeiçoamento do sistema de avaliação de estanqueidade desenvolvido e, em seguida, é feita uma análise acerca dos resultados obtidos.

Por último, o quinto capítulo apresenta as conclusões em relação ao objetivo traçado e aos resultados alcançados, como também são feitas sugestões para a continuidade do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: VASOS DE PRESSÃO E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

O capítulo em questão introduz os conceitos de vasos de pressão e apresenta um estudo sobre métodos de ensaios não destrutivos, com a finalidade de determinar a viabilidade dos mesmos para avaliação de estanqueidade em vasos de pressão.

2.1 VASOS DE PRESSÃO

2.1.1 Definição

De acordo com a *American Society of Mechanical Engineers* (ASME, 2010), vasos de pressão são todos os reservatórios de diferentes dimensões ou finalidades, que contenham fluidos em pressão inferior ou superior à atmosférica. Com esta ampla definição, incluem-se neste grupo desde uma panela de pressão de cozinha a tanques, oleodutos e reatores nucleares (TELLES, 2007).

Os vasos de pressão são empregados, em sua maioria, na forma de equipamentos de linha de produção, principalmente na indústria de processos⁶ (indústrias químicas e petroquímicas, alimentares e farmacêuticas). Geralmente, os mesmos são utilizados para realizar as seguintes aplicações (CHATTOPADHYAY, 2004; TELLES, 2007):

- armazenamento de gases sob pressão, a fim de conter grande quantidade de fluido em volume relativamente pequeno;
- acumulação intermediária de líquidos e gases, com o intuito de impedir desperdício de energia ou estabilizar operações entre etapas de processos;
- processamento de gases e líquidos, para realizar transformações físicas e químicas em ambiente pressurizado.

As aplicações descritas anteriormente exigem elevado nível de confiabilidade dos vasos de pressão, devido ao regime de operação contínuo ao qual esses equipamentos ficam submetidos, não ocorrendo paradas para manutenção e inspeção por longo período de tempo. Além disso, o emprego dos mesmos está associado a circunstâncias de grande

⁶ São raros os casos em que vasos de pressão são itens padronizados de linhas de produção (TELLES, 2007). Um desses seria os compressores herméticos, objeto de estudo do próximo capítulo.

risco, sobretudo na operação com fluidos inflamáveis, tóxicos, em elevadas pressões ou temperaturas. Ademais, os vasos de pressão comumente integram uma cadeia contínua de produção, por onde circulam os fluidos de processo. Deste modo, caso um único equipamento entre em colapso, toda a produção geralmente é paralisada, acarretando grandes prejuízos à empresa (TELLES, 2007).

2.1.2 Classificação dos vasos de pressão

A literatura científica apresenta diferentes classificações para vasos de pressão. Moss (2004) e Telles (2007), por exemplo, abordam diferentes parâmetros para classificá-los, como: material empregado na fabricação, método de aquecimento, posição de instalação e geometria.

No âmbito do território brasileiro, a norma regulamentadora 13 (NR-13) adota um critério, distinto dos citados, para classificar os vasos de pressão conforme os riscos envolvidos no manuseio dos mesmos⁷. A norma em questão realiza esse procedimento segundo dois aspectos: classe de fluido e potencial de risco (ABNT, 2014).

Em relação à classe de fluido, avalia-se o estado físico, a toxicidade e a temperatura do fluido utilizado. De acordo com tais características, os vasos de pressão são enquadrados em classes, conforme descrito a seguir:

- CLASSE A: Fluidos inflamáveis e fluidos combustíveis com temperatura superior ou igual a 200 °C;
- CLASSE B: Fluidos combustíveis com temperatura inferior a 200 °C;
- CLASSE C: Vapor de água, gases asfixiantes ou ar comprimido;
- CLASSE D: Outros fluidos não enquadrados nas classes anteriores.

Quanto ao potencial de risco, o mesmo consiste no produto pressão máxima de operação do vaso de pressão (P, em megapascals) e do seu volume interno (V, em metros cúbicos) (ABNT, 2014). Deste

⁷ A NR-13, intitulada Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações, determina aspectos técnicos e legais em relação à instalação, inspeção, operação e manutenção de caldeiras a vapor, vasos de pressão e tubulações, com o propósito de prevenção de acidentes (ABNT, 2014).

modo, por meio do potencial de risco, os vasos de pressão são separados em grupos, conforme segue:

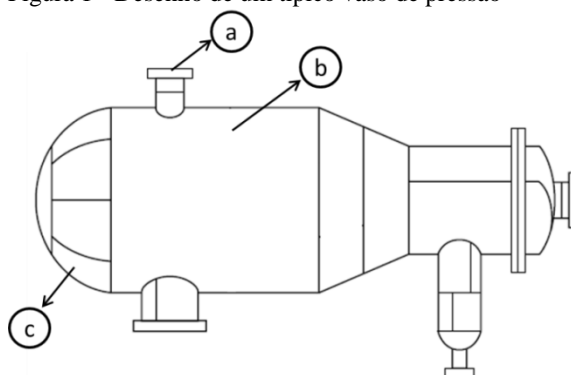
- GRUPO 1: $P.V \geq 100$;
- GRUPO 2: $P.V < 100$ e $P.V \geq 30$;
- GRUPO 3: $P.V < 30$ e $P.V \geq 2,5$;
- GRUPO 4: $P.V < 2,5$ e $P.V \geq 1$;
- GRUPO 5: $P.V < 1$.

A relação entre as classes de fluido contido nos vasos de pressão e os grupos de potencial de risco resulta na classificação dos mesmos em cinco categorias, conforme apresentadas no Anexo desta dissertação. Essas estão ordenadas de forma decrescente em termos dos riscos envolvidos na operação dos vasos de pressão.

2.1.3 Principais componentes de um vaso de pressão

Os principais componentes que integram um vaso de pressão são a parede de pressão, constituída pelo corpo e tampo, os bocais e as peças internas (TELLES, 2007; PULLACORT, 2002). A figura 1 apresenta um típico vaso de pressão.

Figura 1 - Desenho de um típico vaso de pressão



Legenda: a bocal;
b corpo;
c tampo.

Fonte: adaptado de Pullacort, 2002.

A parede de pressão é o componente que contém o fluido pressurizado, isto é, o envoltório estanque do vaso de pressão, sendo basicamente formada pelo corpo e tampo.

O corpo, também chamado de casco ou costado, possui formato de uma superfície de revolução, geralmente cilíndrica, cônica, esférica, ou a combinação dessas formas. O formato ideal do mesmo para um vaso de pressão é o esférico, pois se obtêm menor espessura da parede e menor peso. No entanto, este formato possui alto custo e complexidade de fabricação (TELLES, 2007).

Atualmente, o formato cilíndrico é o mais utilizado, devido ao grande número de aplicações e pela facilidade de fabricação e transporte para o local de instalação (CHATTOPADHYAY, 2004; TELLES, 2007). A figura 2 ilustra vasos de pressão com formatos cilíndrico e esférico, respectivamente.

Figura 2 - Vasos de pressão cilíndricos e esféricos



Fonte: Assertivo, 2014 e CN Industrial, 2014.

O segundo elemento formador da parede de pressão, denominado tampo, é uma peça de fechamento do corpo. Os formatos mais comuns do mesmo são o elíptico, toriesférico, hemisférico, cônico e plano.

Em referência aos bocais, os mesmos são aberturas feitas no corpo ou no tampo do vaso de pressão para a ligação de tubulações de entrada e saída de fluidos, instalação de válvulas, instrumentos e respiros. Por sua vez, as peças internas são constituídas por grades, bandejas e distribuidores, entre outros componentes (TELLES, 2007).

Uma questão importante para vasos de pressão se refere à posição de instalação do mesmo, com opções na vertical, horizontal ou até inclinado. Geralmente, o formato e a posição do vaso de pressão é uma condição imposta pela atividade ou finalidade do mesmo.

Os vasos verticais são empregados, principalmente, quando se torna essencial utilizar a ação da gravidade para a operação ou para o

escoamento de fluidos, como ocorre em torres de fracionamento ou retificação. Por outro lado, os vasos horizontais, normalmente mais utilizados e de menor custo em relação aos verticais, são empregados em trocadores de calor e vasos de acumulação. A figura 3 ilustra as principais posições de instalação dos vasos de pressão (TELLES, 2007).

Figura 3 - Vasos de pressão na posição horizontal e vertical



Fonte: Aberko, 2014

2.1.4 Controle da qualidade na fabricação de vasos de pressão

A fabricação de vasos de pressão é geralmente realizada a partir de chapas de aço calandradas, conformadas e ligadas entre si por soldagem⁸. Este último processo é empregado principalmente para fixar os elementos que integram a parede de pressão do vaso, como corpo e tampo, do mesmo modo para os bocais e peças não pressurizadas, tanto internas como externas (TELLES, 2007).

Entretanto, processos de fabricação frequentemente são responsáveis por incorporar descontinuidades em vasos de pressão, que por incompetência ou ausência de adequado controle da qualidade, não são detectados e reparados durante sua fabricação (LANCASTER, 1973; NICHOLS, 1975).

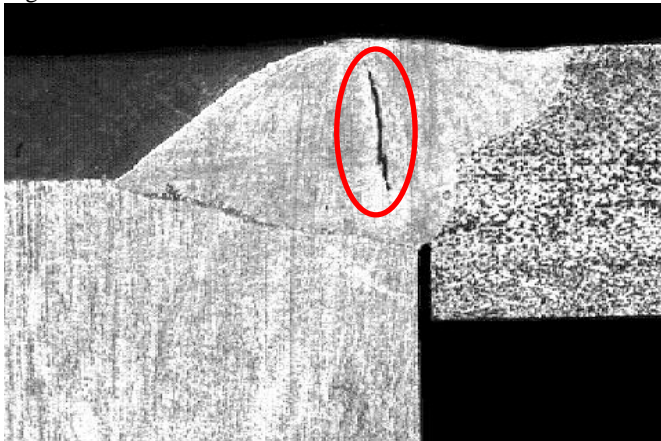
Entre as etapas de fabricação de vasos de pressão, o processo de soldagem se destaca na geração de diferentes tipos de descontinuidades,

⁸ Os vasos de pressão eram fabricados, anteriormente, empregando chapas de metal com costuras rebitadas, uma prática que ao longo do tempo entrou em desuso (TELLES, 2007).

como fusão incompleta, bolhas, inclusões de escória, falta de penetração e, principalmente, trincas (SOLOMON *et al.*, 1975; BURGESS, 1989).

De acordo com Marques *et al.* (2011), trincas são consideradas descontinuidades graves, as quais podem propiciar o estabelecimento de uma fratura frágil na estrutura soldada. Essa condição pode originar descontinuidades passantes, tornando o vaso de pressão não estanque, ou até mesmo levando a uma falha catastrófica do equipamento, pela ruptura do mesmo (LANCASTER, 1973; MARQUES *et al.*, 2011). Dessa forma, descontinuidades como trincas não são aceitas em qualquer norma de projeto e de fabricação de vasos de pressão, sendo que as mesmas devem ser rigorosamente identificadas e reparadas (TELLES, 2007). A figura 4 ilustra uma trinca formada em um cordão de solda.

Figura 4 - Trinca em um cordão de solda



Fonte: Marques *et al.*, 2011.

Além das descontinuidades geradas na fabricação dos vasos de pressão, outras podem surgir durante seu funcionamento, como corrosão, erosão e fadiga por tensões repetitivas. Isso ocorre devido ao meio e às condições operacionais às quais o equipamento está submetido (RAJ *et al.*, 1997; ELLENBERGER, 2004).

A presença de descontinuidades originadas tanto na fabricação quanto na operação dos vasos de pressão pode acarretar mau funcionamento dos mesmos, levando à interrupção da produção de uma fábrica, ou até em consequências mais graves, como vazamento de fluido pressurizado, resultando em prejuízos ambientais ou explosões

(LANCASTER, 1973). Assim, a necessidade de regulamentar o projeto e a fabricação de vasos de pressão, visando garantir a integridade do mesmo, se tornou um fator indispensável devido, principalmente, a aspectos econômicos e de segurança (NICHLOS, 1975; PALANIAPPAN *et al.*, 1997; RAJ *et al.*, 1997).

A garantia da qualidade na fabricação de vasos de pressão é uma abordagem sistemática, que envolve várias etapas, desde a identificação das matérias-primas utilizadas na fabricação até a fase final de testes. Normas existentes estabelecem regras a serem cumpridas durante o projeto, a fabricação e a inspeção de vasos de pressão, com o objetivo de garantir condições mínimas de segurança de operação dos mesmos⁹ (ELLENBERGER, 2004; TELLES, 2007).

As principais normas mundiais para projeto e fabricação de vasos de pressão estão apresentadas na figura 5 (CHATTOPADHYAY, 2004).

Figura 5 - Normas para projeto e fabricação de vasos de pressão

País	Código	Entidade emissora
Estados Unidos	ASME Boiler and Pressure Vessel Code	ASME
Reino Unido	BS5500 Unfired Fusion Welded Pressure Vessels	British Standard Institution
Alemanha	AD Merblatter	Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter
França	SNCT Construction Code for Unfired Pressure Vessels	Syndicat National de la Chaudronnerie et de la Tuyauterie Industrielle

Fonte: adaptado de CHATTOPADHYAY, 2004.

O código geral de caldeiras e vasos de pressão da ASME é a norma mais aplicada para projeto e fabricação de vasos de pressão no Brasil e em grande parte do mundo (TELLES, 2007). A mesma aborda diferentes fatores do projeto e da fabricação de caldeiras e vasos de pressão, como o dimensionamento, fabricação, materiais a serem utilizados, inspeção e controle da qualidade. (MARTINS, 2009).

⁹ As normas para a garantia da qualidade na fabricação de vasos de pressão estão disponíveis em códigos, os quais foram desenvolvidos por associações técnicas ou por sociedades de normalização (TELLES, 2007).

A partir da publicação de 1977, a ASME introduziu em seu código o denominado sistema de controle da qualidade. Este representa um conjunto de disposições obrigatórias, as quais especificam procedimentos envolvidos em diferentes etapas da produção de vasos de pressão, desde o projeto até a fabricação e a inspeção final dos mesmos (TELLES, 2007). Como essas prescrições são mandatórias, as mesmas precisam ser atendidas em sua plenitude, para que o vaso de pressão seja considerado fabricado de acordo com o código ASME¹⁰ (TELLES, 2007; ELLENBERGER, 2004).

O elemento central do sistema de controle da qualidade é o programa de avaliação e inspeção dos vasos de pressão. Esta etapa engloba todas as funções de inspeção, testes e avaliações, desde a chegada da matéria-prima até a certificação e o transporte do produto ao cliente.

Dentro desse contexto, ensaios não destrutivos se destacam na garantia do controle da qualidade pois fornecem um meio de identificar discontinuidades em soldas, materiais e componentes produzidos, antes, durante e depois da fabricação. Essa ferramenta de controle da qualidade também é empregada durante a vida operacional do vaso, para garantir um funcionamento seguro do mesmo¹¹ (ELLENBERGER, 2004).

Desse modo, os ensaios não destrutivos possuem uma importância vital no êxito do sistema de controle da qualidade estabelecido pelo fabricante de vasos de pressão. Esses ensaios se destacam por proporcionar soluções para identificação de discontinuidades originadas nos processos de soldagem, estabelecido como umas das principais causas de problemas referentes à garantia da estanqueidade de um vaso de pressão.

¹⁰ Os principais aspectos a serem empregados pelos fabricantes para implantar um sistema de controle da qualidade podem ser encontrados, com maiores detalhes, em Ellenberger (2004), Telles (2007) e ASME (2010).

¹¹ O código ASME – seção V (ASME, 2010a) fornece regras e orientações para a seleção de métodos de ensaios não destrutivos, além de diretrizes para o desenvolvimento de procedimentos para inspeção e avaliação dos resultados dos ensaios (ELLENBERGER, 2004).

2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

2.2.1 Definição

No objetivo de certificar que os produtos fabricados atendam rigorosamente aos requisitos de normas de projeto e de fabricação, as empresas desenvolvem diferentes tipos de ensaios em suas linhas de produção. No caso específico dos vasos de pressão, garantir a integridade do produto por meio de ensaios realizados é de vital importância, pois, caso ocorra um rompimento estrutural deste ao longo de seu funcionamento, graves consequências de caráter ambiental, prejuízos financeiros ou até perda de vidas humanas podem vir a ocorrer. (PALANIAPPAN *et al.*, 1997; RAJ *et al.*, 1997).

Deste modo, a indústria se utiliza dos chamados ensaios não destrutivos (END). Segundo Hellier (2001), os END são avaliações realizadas nas propriedades físicas e mecânicas de um objeto em teste, sem alterar ou danificar o mesmo, a fim de determinar a presença ou não de descontinuidades. Os ensaios não destrutivos também podem ser realizados com a finalidade de medir outras características do objeto em teste, tais como tamanho, dimensão e características da estrutura¹² (HELLIER, 2001).

Para avaliar a integridade de um objeto através dos END, é necessário, primeiramente, encontrar um fenômeno físico (parâmetro de interrogação) que interaja com o objeto em teste (parâmetro de interrogado) sem que ocorra dano ou alteração das funções do mesmo (RAJ *et al.*, 1997; SHULL, 2001).

Na indústria em geral, ensaios não destrutivos são normalmente empregados nas seguintes etapas de fabricação (HELLIER, 2001):

- avaliação de matérias-primas;
- avaliação de produtos durante o processo de fabricação, como um meio de controle de processos;
- avaliação de produtos recém-fabricados, como um meio de controle da qualidade;
- avaliação de equipamentos e estruturas para fins de manutenção preventiva.

¹² A definição de ensaios não destrutivos pode compreender os chamados diagnósticos médicos não invasivos. Entretanto, o termo não destrutivo geralmente não é utilizado para descrever aplicações médicas (NESS *et al.*, 1996).

Com a aplicação dos ensaios não destrutivos, as empresas tendem a possuir um eficiente controle do processo de fabricação, o qual irá reduzir custos de produção, preservando a qualidade do produto e, deste modo, assegurando a reputação do fabricante e a satisfação do cliente (NESS *et al.*, 1996; SHULL, 2001).

Os END são empregados em diferentes ramos da indústria e em todas as etapas de produção. O setor aeroespacial, automotivo e petroquímico são as principais áreas industriais que fazem uso destes ensaios (NESS *et al.*, 1996; SHULL, 2001).

2.2.2 Métodos de ensaios não destrutivos

De acordo com a *American Society for Nondestructive Testing* (ASNT), os métodos de ensaios não destrutivos são definidos pelo tipo de meio penetrante ou do equipamento empregado no teste¹³ (ASNT, 2014). No âmbito da literatura científica, os mais encontrados são os métodos por radiografia, ultrassom, correntes parasitas, partículas magnéticas, inspeção visual, líquidos penetrantes, emissão acústica e vazamento (JACKSON JR. *et al.*, 1998; ASNT, 2014).

O objetivo dos mesmos é fornecer informações acerca dos seguintes parâmetros:

- descontinuidades, como trincas, espaços vazios e inclusões;
- características estruturais, como tamanho do grão, segregação e desalinhamento;
- dimensões, como espessura, diâmetro e tamanho da descontinuidade;
- propriedades físicas e mecânicas, como condutividade e módulo de elasticidade.

2.2.2.1 Classificação

Os métodos de ensaios não destrutivos podem ser classificados em função da capacidade de detecção desses em relação às descontinuidades presentes no objeto em teste. Este critério classifica os diferentes métodos de ensaios não destrutivos em superficiais, sub-

¹³ O termo método é utilizado no escopo deste trabalho para representar um conjunto especializado de procedimentos, técnicas e instrumentos relacionados aos ensaios não destrutivos (NESS *et al.*, 1996).

superficiais, volumétricos e passantes¹⁴ (BRAY *et al.*, 1996; JACKSON JR. *et al.*, 1998).

Os métodos de END superficiais permitem avaliar apenas a superfície da peça e incluem os ensaios por líquidos penetrantes e inspeção visual. Os sub-superficiais têm a capacidade de avaliar regiões próximas à superfície da peça, incluindo os ensaios de correntes parasitas e de partículas magnéticas (BRAY *et al.*, 1996).

Em relação aos métodos de END volumétricos, os mesmos permitem avaliar todo o volume do objeto, tornando-o capaz de indicar a presença de descontinuidades internas ao mesmo, e incluem os ensaios por radiografia, ultrassom e emissão acústica¹⁵ (SOLOMON *et al.*, 1975; BRAY *et al.*, 1996).

Por último, os métodos de END passantes permitem identificar a presença de descontinuidades passantes no objeto em teste e inclui o ensaio de vazamento (JACKSON JR. *et al.*, 1998).

2.2.2.2 Seleção de um método de ensaios não destrutivos

Para a seleção de um método de END adequado para determinada aplicação, existem diferentes fatores técnicos e econômicos que precisam ser analisados. Os principais fatores são (SHULL, 2001):

- compreender o funcionamento do método de ensaios não destrutivos e sua interação com o objeto em teste;
- analisar a natureza física da propriedade do material e da descontinuidade a ser avaliada;
- avaliar a capacidade e limitação da tecnologia disponível para a realização dos ensaios;
- apresentar um corpo técnico qualificado para operar os ensaios.

Primeiramente, deve-se ter um profundo conhecimento sobre a interação entre os princípios de operação dos métodos de END e as propriedades ou características de interesse do objeto em teste. Cada método de END possui suas limitações para determinar a presença ou

¹⁴ O termo “método passante” foi adotado como uma tradução livre da palavra *through-boundary method*, pois não se encontrou o termo correspondente na literatura científica em língua portuguesa.

¹⁵ O ensaio de emissão acústica também pode ser incluso no grupo de métodos passantes, por possuir determinadas técnicas capazes de detectar a presença de descontinuidades passantes (JACKSON JR. *et al.*, 1998).

não de descontinuidades ou avaliar as propriedades de um objeto em teste, não proporcionando uma total garantia que o mesmo exercerá efetivamente suas funções (HELLIER, 2001; SHULL, 2001).

O segundo fator envolve a natureza e as características do objeto que está sendo examinado. Como pré-requisito para a realização dos ensaios não destrutivos, é essencial possuir elevado conhecimento e compreensão de informações acerca das descontinuidades que estão previstas, das propriedades físicas e mecânicas e dos processos de produção, pelo qual o objeto em teste foi submetido (HELLIER, 2001; SHULL, 2001).

Outro fator a ser destacado se refere aos equipamentos a serem utilizados nos ensaios. Na seleção de um método de END, deve-se estar ciente da capacidade e da limitação da tecnologia existente, pois, mesmo que exista uma correlação entre os princípios físicos do método de END e as propriedades ou características do objeto em teste, não significa que os equipamentos disponíveis possuam sensibilidade suficiente para a realização dos ensaios (SHULL, 2001).

A qualificação pessoal de quem opera os ensaios também é um fator determinante na eficácia dos ensaios não destrutivos. Os operadores não somente devem ser capazes de realizar os ensaios, mas é imprescindível que sejam devidamente certificados. A primeira norma para esse fim, denominada SNT-TC-1A, foi publicada no ano de 1967 pela ASNT como uma série de recomendações para a qualificação e certificação dos operadores para os métodos de ensaios não destrutivos (HELLIER, 2001; MIX, 2005). Atualmente, a norma SNT-TC-1A continua sendo amplamente empregada em diferentes países para qualificar operadores. No Brasil, a Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos e Inspeção (ABENDI) realiza o processo de certificação, o qual possui como base a norma ABNT NBR NM/ISO 9712 (ANDREUCCI, 2013; ABNT, 2014a).

Além dos aspectos listados neste item, existem outros fatores que também influenciam na seleção de um método de END, como o custo para implantá-lo, o tempo requerido e o local do ensaio. A compreensão desses pontos geralmente resulta na escolha de um método adequado para determinada aplicação (SHULL, 2001).

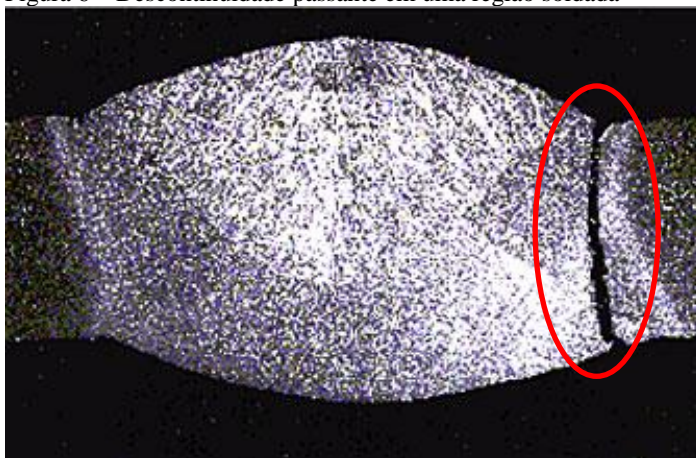
2.2.2.3 Métodos de ensaios não destrutivos para avaliação de estanqueidade em vasos de pressão

Na fabricação dos vasos de pressão, os ensaios não destrutivos são empregados praticamente em toda cadeia de produção. Porém, sua

principal aplicação está na avaliação de soldas deste produto, permitindo analisar aspectos da qualidade das mesmas que não podem ser observados visualmente (BURGESS, 1989).

Com a finalidade de detectar a presença de descontinuidades passantes em regiões soldadas (vide figura 6) e, conseqüentemente, avaliar a estanqueidade em vasos de pressão, existem diferentes métodos de ensaios não destrutivos para esse fim.

Figura 6 – Descontinuidade passante em uma região soldada



Fonte: Miller *et al.*, 1998.

O item em questão descreverá os principais métodos de END encontrados na literatura científica para avaliação de estanqueidade e selecionará o mais adequado para a aplicação em vasos de pressão. Dentre esses métodos de END, podem ser citados: radiografia, ultrassom, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, emissão acústica e vazamento (JACKSON Jr. *et al*, 1998).

a) Método por radiografia

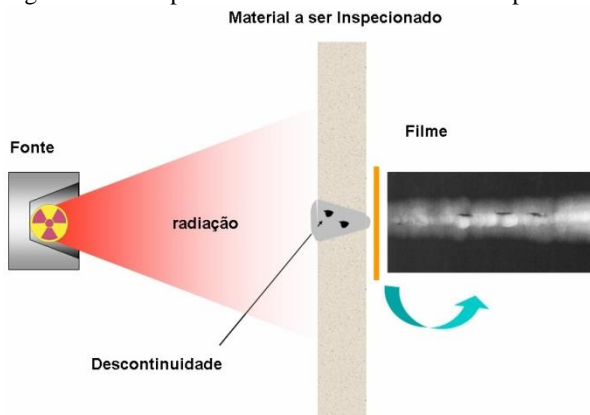
O ensaio por radiografia é um método de ensaio não destrutivo que tem, por objetivo, gerar um registro fotográfico produzido pela passagem de raios-X ou raios gama através de um objeto. O mesmo pode ser empregado em estruturas para detectar descontinuidades superficiais e internas da peça, como trincas, vazios ou inclusões (SHULL, 2001; ANDREUCCI, 2013).

Este método é utilizado em indústrias da área petrolífera, nuclear, alimentícia, farmacêutica e bélica, sendo que uma de suas principais aplicações envolve a avaliação de soldas com o intuito de identificar discontinuidades na mesma.

O método em questão tem como princípio a absorção diferenciada da radiação pelo objeto a ser avaliado, em virtude de alterações na densidade e na espessura ou de variações na composição do mesmo (SHULL, 2001; ANDREUCCI, 2013).

Dessa maneira, a presença de discontinuidades no material altera o nível de absorção de radiação, as quais poderão ser registradas por meio de filmes radiográficos, tubos de imagem ou detectores eletrônicos de radiação (BURGESS, 1989; ANDREUCCI, 2013). A figura 7 ilustra o princípio de funcionamento do método por radiografia.

Figura 7 - Princípio de funcionamento do método por radiografia



Fonte: Andreucci, 2011.

b) Método por ultrassom

O ensaio por ultrassom tem por finalidade detectar e caracterizar discontinuidades internas em materiais ou equipamentos (SHULL, 2001; ANDREUCCI, 2011). Este método é empregado, principalmente, em inspeções de matérias-primas, na fabricação de peças ou durante a operação de equipamentos, para identificar discontinuidades como trincas, bolhas de gás e inclusões em regiões soldadas. Outra aplicação do ensaio em questão se refere à medição de espessura, onde é comumente utilizado em estruturas como tubulações, peças de

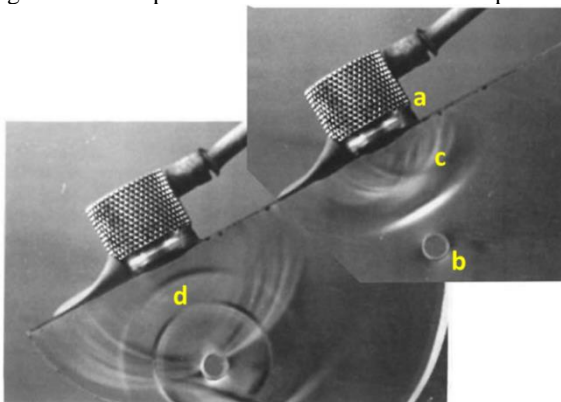
aeronaves e cascos de submarinos (NESS *et al.*, 1996; HELLIER, 2001; MIX, 2005).

O princípio do método por ultrassom se baseia na emissão de ondas mecânicas de alta frequência, geradas principalmente por cristais piezoelétricos, os quais são posicionados na superfície do objeto avaliado. Ao interceptar a interface entre dois meios distintos, como em casos de descontinuidades ou da própria parede interna do material, as ondas mecânicas de alta frequência sofrerão reflexão em direção ao elemento emissor (NESS *et al.*, 1996; ABNT, 2011; ANDREUCCI, 2011).

Caso haja a presença de descontinuidade no material avaliado, a onda refletida pela mesma será convertida em sinal elétrico por meio do cristal piezoelétrico emissor, cuja amplitude está relacionada com as características da descontinuidade e cujo tempo de propagação é proporcional à distância desta para a superfície do objeto.

Ademais, as ondas de alta frequência, refletidas devido à parede interna do material, estão diretamente relacionadas com as dimensões do objeto avaliado, como largura, espessura e comprimento (SHULL, 2001; MIX, 2005). A figura 8 ilustra a reflexão de ondas ultrassônicas devido à descontinuidade circular presente em uma determinada estrutura.

Figura 8 - Princípio de funcionamento do método por ultrassom



- Legenda:
- a transdutor (cristal piezoelétrico);
 - b descontinuidade circular;
 - c ondas mecânicas emitidas;
 - d ondas mecânicas refletidas pela descontinuidade.

Fonte: adaptado de Shull, 2001.

c) Método por partículas magnéticas

O ensaio por partículas magnéticas é um método de ensaio não destrutivo com o objetivo de detectar descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ou estruturas ferromagnéticas (NESS *et al.*, 1996; HELLIER, 2001; ABNT, 2012b).

Este método pode ser empregado na avaliação de matérias-primas e durante os processos de fabricação e de inspeção do produto final. Uma importante aplicação do ensaio de partículas magnéticas acontece na avaliação de peças sujeitas aos processos de soldagem, com o intuito de identificar descontinuidades como trincas no cordão de solda, penetração incompleta ou inclusões (NESS *et al.*, 1996; HELLIER, 2001; SHULL, 2001).

O princípio do método em questão consiste em submeter o objeto em teste a um campo magnético e, caso existam descontinuidades na região magnetizada da estrutura, um campo de fuga do fluxo magnético irá surgir. Com a aplicação de partículas ferromagnéticas¹⁶ na superfície do objeto em questão, as mesmas serão atraídas e irão se agrupar ao redor do campo de fuga gerado. Deste modo, por meio desse fenômeno, o contorno do respectivo campo poderá ser detectado, proporcionando o reconhecimento do formato e da extensão da descontinuidade (NESS *et al.*, 1996; HELLIER, 2001; ANDREUCCI, 2009; ABNT, 2012b). A figura 9 ilustra uma peça submetida ao método por partículas magnéticas, com destaque para a descontinuidade superficial revelada.

Figura 9 - Peça submetida ao método por partículas magnéticas



Fonte: adaptado de Andreucci, 2009.

¹⁶ O método por partículas magnéticas utiliza, principalmente, partículas de óxido de ferro (SHULL, 2001).

d) Método por líquidos penetrantes

O ensaio por líquidos penetrantes é um método utilizado para detectar e proporcionar evidência visual de descontinuidades abertas na superfície de materiais sólidos não porosos (NESS *et al.*, 1996; SHULL, 2001; ABNT, 2012a).

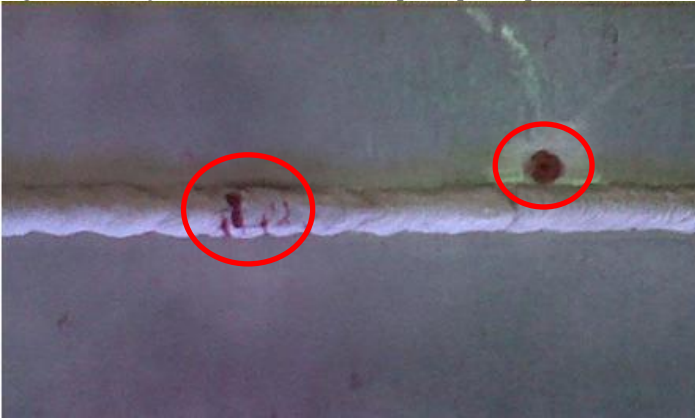
Este método é um dos mais antigos ensaios não destrutivos, visto que o emprego do mesmo se iniciou por volta do século XIX, em fábricas de manutenção de estradas de ferro (NESS *et al.*, 1996). Atualmente, o ensaio por líquidos penetrantes é empregado em diferentes áreas da indústria, principalmente aquelas que possuem processos como soldagem e usinagem, os quais comumente geram descontinuidades no objeto produzido (HELLIER, 2001; SHULL, 2001).

Ademais, o método em questão pode ser empregado para identificar a presença de descontinuidades passantes. Entretanto, a peça a ser analisada deve proporcionar acesso a ambos os lados e possuir paredes estreitas o suficiente para propiciar, ao líquido penetrante, capacidade de percorrer o caminho formado pela descontinuidade e expor a mesma na superfície oposta pela qual o líquido ingressou (NESS *et al.*, 1996; HELLIER, 2001).

O princípio deste ensaio consiste na capacidade de determinados líquidos em interagir com pequenas aberturas. Caso o objeto analisado possua uma descontinuidade em sua superfície, o líquido penetrante utilizado irá penetrar na mesma, incitado por forças de tensão superficial. Esta interação resultará em uma indicação visual da localização, forma e tamanho aproximado da descontinuidade na superfície da peça (NESS *et al.*, 1996; ABNT, 2012a; ANDREUCCI, 2013a).

A figura 10 apresenta uma peça submetida ao ensaio por líquidos penetrantes, o qual indica descontinuidades na região do cordão de solda.

Figura 10 - Peça submetida ao método por líquidos penetrantes



Fonte: adaptado de Andreucci, 2013a.

e) Método por emissão acústica

O método por emissão acústica tem a finalidade de monitorar a integridade de uma estrutura, além de detectar a presença de discontinuidades, sejam essas passantes ou não (NESS *et al.*, 1996). Este método possui a capacidade de fornecer informações sobre a origem de uma discontinuidade, bem como a respeito da expansão da mesma durante a operação de um maquinário (HELLIER, 2001; MIX, 2005; ABNT, 2013b).

O ensaio por emissão acústica pode ser empregado em diferentes aplicações. Destacam-se as inspeções em vasos de pressão para detectar e localizar discontinuidades, além de monitorar a integridade de soldas durante a fabricação de peças e equipamentos (NESS *et al.*, 1996; SHULL, 2001; MIX, 2005).

O método em questão é baseado no princípio de que materiais sólidos emitem energia, na forma de ondas mecânicas, quando são mecanicamente ou termicamente estimulados até o ponto em que ocorra uma deformação ou fratura (HELLIER, 2001; MIX, 2005).

Desta forma, esse ensaio possui a capacidade de detectar, localizar e expor discontinuidades em objetos no momento que as mesmas acontecem. A emissão acústica pode ser gerada desde trincas em asas de aeronaves a deformações em vasos de pressão ou tubulações (SHULL, 2001; MIX, 2005).

f) Método de vazamento

O ensaio de vazamento é empregado como um método de ensaio não destrutivo capaz de localizar ou detectar a presença de descontinuidades passantes, bem como medir a taxa de vazamento em sistemas ou componentes pressurizados ou a vácuo (NESS *et al.*, 1996; PAYÃO FILHO, 2000a).

O método em questão é utilizado principalmente em sistemas hidráulicos e de refrigeração, componentes eletrônicos, tubulações e vasos de pressão (PAYÃO FILHO, 2000a). O mesmo pode ser aplicado nos sistemas e componentes citados por três razões fundamentais: preservar o vácuo ou os fluidos contidos em sistemas ou componentes, prevenir explosões ou contaminações do meio e identificar componentes não conformes (JACKSON Jr. *et al.*, 1998).

O princípio deste ensaio consiste em aplicar um diferencial de pressão, por meio de um determinado fluido, entre o interior da estrutura e o ambiente onde a mesma está localizada. O vazamento do fluido correspondente ocorrerá através de descontinuidades passantes existentes no respectivo objeto avaliado, como fissuras ou orifícios, os quais se localizam principalmente em soldas, flanges ou rebites (NESS *et al.*, 1996; PAYÃO FILHO, 2000a).

Desta forma, o objetivo fundamental deste método é atestar a estanqueidade e, conseqüentemente, assegurar a integridade e a confiabilidade de componentes, além de prevenir falhas em sistemas que contenham fluidos sob pressão ou vácuo (NESS *et al.*, 1996).

2.2.3 Seleção do método de ensaios não destrutivos para avaliação de estanqueidade em vasos de pressão

Os métodos de ensaios não destrutivos descritos anteriormente apresentam diferentes níveis quanto à capacidade de identificar a presença de descontinuidades passantes, especificamente em vasos de pressão. Porém, os métodos de superfície, sub-superfície ou volumétricos possuem limitações para avaliação de estanqueidade frente aos métodos passantes, como o ensaio de vazamento.

O ensaio por radiografia, por exemplo, possui limitações quanto ao uso da radiação, o qual gera riscos à saúde do operador. Deve-se considerar, ainda, o tempo necessário para realizar o processamento e interpretação dos resultados, assim como o custo elevado na aquisição de equipamentos (HELLIER, 2001; SHULL, 2001).

O ensaio por ultrassom, da mesma forma, não é considerado um método adequado, pois apenas tem a capacidade de revelar a exata localização de uma descontinuidade passante quando a presença da mesma já foi detectada (JACKSON JR. *et al.*, 1998). Outro fator que inviabiliza o emprego deste método é a necessidade de realizar inúmeros ensaios para contemplar toda a superfície do objeto avaliado (NESS *et al.*, 1996).

Em relação ao método por partículas magnéticas, existe o risco do mesmo danificar o objeto avaliado, devido à formação de arco elétrico ou superaquecimento nos pontos de contato (HELLIER, 2001; SHULL, 2001). Outra limitação deste método é a dificuldade em identificar descontinuidades em geral, que não estejam situadas perpendicularmente à direção do campo magnético gerado (NESS *et al.*, 1996).

O método por líquidos penetrantes, por sua vez, necessita de um período muito longo para cobrir toda a superfície de um objeto durante o teste, inviabilizando seu uso em linhas de produção (MIX, 2005). Além disso, outros fatores a serem elencados seriam a eventual contaminação dos elementos internos da estrutura avaliada pelo líquido penetrante e a impossibilidade de determinar se todas as indicações de descontinuidades feitas por esse método seriam necessariamente passantes (NESS *et al.*, 1996; JACKSON JR. *et al.*, 1998).

No caso do método por emissão acústica, embora o mesmo possua técnicas com capacidade para apontar a existência de descontinuidades passantes, essas apresentam uma sensibilidade limitada (JACKSON JR. *et al.*, 1998). Outro aspecto que restringe o uso deste método é a susceptibilidade do mesmo frente ruídos de fontes externas (HELLIER, 2001; MIX, 2005; ABNT, 2013b).

Deste modo, apesar dos métodos citados possuírem capacidade para identificar a presença de descontinuidades passantes, se torna imprescindível utilizar o ensaio de vazamento para avaliar a estanqueidade de vasos de pressão. Isso ocorre não só devido às limitações presentes nos demais métodos para esse fim, mas principalmente porque o método de vazamento possui o propósito fundamental de identificar a existência de descontinuidades passantes em recipientes estanques, conforme descrito no item 2.2.2.3.

Tendo assim definido o ensaio de vazamento como o método de ensaio não destrutivo adequado aos objetivos deste trabalho, o próximo capítulo apresentará a seleção de técnicas do método em questão visando seu emprego no desenvolvimento de um sistema de avaliação de estanqueidade em vasos de pressão.

3 ENSAIO DE VAZAMENTO PARA VASOS DE PRESSÃO

Neste capítulo serão comparadas diferentes técnicas do ensaio de vazamento, buscando identificar a mais viável de ser empregada para o desenvolvimento de um sistema de avaliação de estanqueidade para vasos de pressão de pequeno porte. Contudo, o presente capítulo é iniciado com uma sucinta introdução sobre compressores herméticos, os quais serão empregados como estudo de caso neste trabalho.

Como a avaliação de estanqueidade de compressores herméticos é realizada durante o processo de fabricação dos mesmos, foram estabelecidas as seguintes condições de contorno visando maior aplicabilidade do sistema de avaliação de estanqueidade a ser desenvolvido em linhas de produção:

- ser capaz de identificar de forma confiável a presença de descontinuidades passantes em compressores herméticos;
- não elevar o tempo de ciclo da linha de produção;
- evitar custos excessivos com a aquisição de equipamentos e a alteração da linha de produção.

3.1 COMPRESSORES HERMÉTICOS

Compressores se destacam como o principal elemento de sistemas de refrigeração. Os mesmos são os responsáveis por elevar a pressão de um fluido refrigerante, com o objetivo de deslocá-lo ao longo de uma tubulação (SCHLICKMANN, 2012).

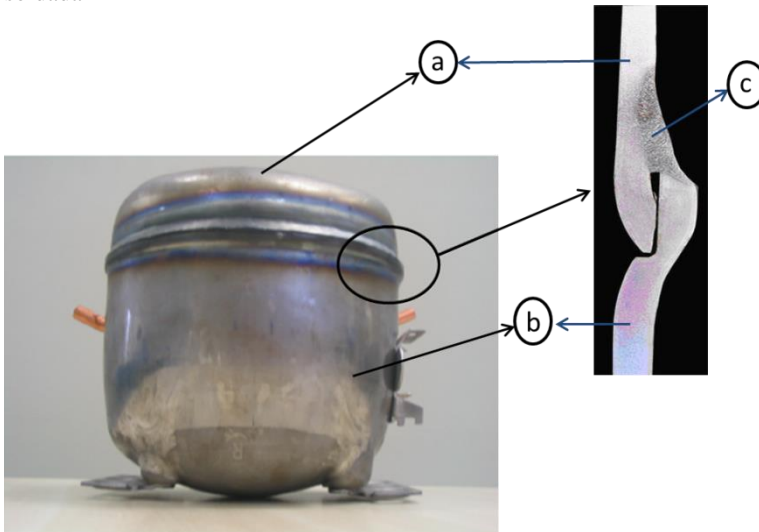
No caso da refrigeração residencial, os compressores mais empregados são do tipo hermético alternativo, caracterizados pela presença de um conjunto cilindro-pistão e de um motor interno à sua carcaça. As ligações existentes entre o interior do compressor e o meio externo são as conexões elétricas do motor e os acessos de entrada e saída do fluido, denominados tubos passadores (STOECKER et al., 2002).

Estruturalmente, a carcaça de um compressor hermético é composta por duas calotas de aço, conformadas a frio e com bordos arqueados, com o intuito de formar uma junta sobreposta e garantir, então, encaixe e alinhamento das partes. Essas calotas são denominadas de corpo, onde os componentes mecânicos do compressor são montados, e tampo, o qual é encaixado sobre o primeiro (SCHWEDERSKY, 2011).

A operação de selamento dos elementos formadores da carcaça do compressor hermético é realizada, normalmente, por meio do processo de soldagem MIG/MAG¹⁷, após a montagem de todos os componentes do produto (IETKA, 2010; SCHWEDERSKY, 2011).

A figura 11 apresenta um compressor hermético após o processo de soldagem, destacando um corte transversal na região da junta soldada entre tampo e corpo.

Figura 11 - Ilustração de um compressor hermético com destaque para a junta soldada



Legenda: a tampo;
b corpo;
c junta soldada.

Fonte: adaptado de Ietka, 2010.

Na fabricação de compressores herméticos, o processo de soldagem é de suma importância. A junta soldada do produto em questão deve possuir qualidade satisfatória, com o objetivo de manter o fluido refrigerante contido no sistema de refrigeração e evitar, então, queda de eficiência ou inutilização do mesmo (IETKA, 2010). Em vista

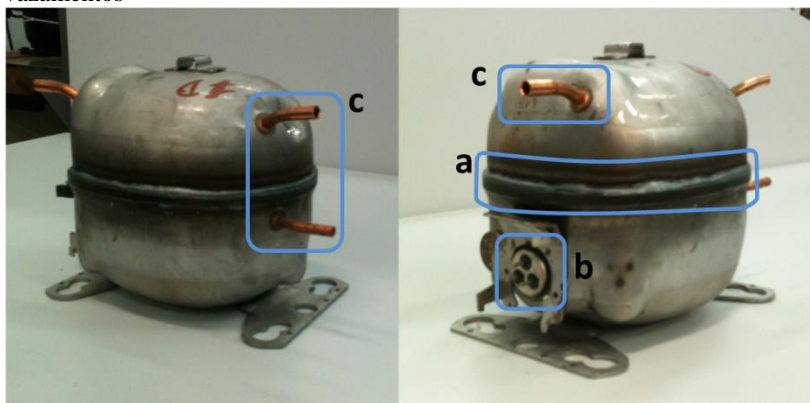
¹⁷ O processo de soldagem a arco com eletrodo consumível utilizando gases, inertes ou ativos, para proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é designado MIG (*Metal Inert Gas*) ou MAG (*Metal Active Gas*), respectivamente (MARQUES *et al.*, 2011).

disso, a estanqueidade pode ser considerada uma das propriedades essenciais do compressor hermético¹⁸.

Embora os fabricantes de compressores adotem processos de soldagem com desempenho adequado, em termos de produtividade e qualidade da junta soldada, não se pode assegurar que todas estarão conformes em relação à estanqueidade desse produto.

No objeto de estudo desta dissertação, o vazamento surge normalmente em três regiões: na junta soldada entre o tampo e corpo da carcaça; nas conexões elétricas; e nos tubos passadores de fluido refrigerante (sucção, descarga e processo)¹⁹. A figura 12 ilustra um compressor hermético, com destaque para as regiões onde comumente surgem os vazamentos.

Figura 12 - Compressor hermético com destaque para regiões onde ocorrem vazamentos



Legenda: a junta soldada entre tampo e corpo;
 b terminais elétricos;
 c tubos passadores.

Fonte: elaborado pelo autor.

¹⁸ A carcaça de um compressor hermético deve apresentar, teoricamente, estanqueidade total. Entretanto, na prática, podem existir pequenos vazamentos que não chegam a comprometer a operação do compressor e do sistema como um todo, durante a vida útil do circuito de refrigeração (NESS *et al.*, 1996; JACKSON JR. *et al.*, 1998)

¹⁹ Componentes do compressor hermético, como tubos passadores de fluido refrigerante e conexões elétricas, são unidos à carcaça pelo processo de soldagem por resistência ou por brasagem (IETKA, 2010).

Dos três locais descritos, este trabalho se limita à avaliação da junta soldada entre o tampo e corpo do compressor hermético, pois, de acordo com fabricantes do produto em questão, a maior incidência de vazamentos ocorre nesta região.

Como já mencionado no capítulo anterior, os ensaios não destrutivos têm um papel primordial no controle da qualidade para os fabricantes de vasos de pressão – incluem-se os compressores herméticos nesse grupo. Dentre os métodos existentes, o ensaio de vazamento se destaca na garantia da estanqueidade dos mesmos.

A literatura apresenta uma série de trabalhos a respeito de técnicas do ensaio de vazamento aplicáveis para a identificação de descontinuidades passantes em compressores herméticos. No item a seguir, as principais técnicas são apresentadas, de acordo com os objetivos desta dissertação.

3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS DO ENSAIO DE VAZAMENTO PARA AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE EM COMPRESSORES HERMÉTICOS

O ensaio de vazamento, como relatado no capítulo anterior, tem um papel primordial na garantia da confiabilidade e da integridade de equipamentos e sistemas a vácuo ou que contenham fluidos pressurizados, devido à sua capacidade de avaliar a estanqueidade dos mesmos (JACKSON JR *et al.*, 1998).

Atualmente, diversos métodos do ensaio de vazamento são empregados em uma ampla variedade de aplicações. A norma SNT-TC-1A divide este ensaio em doze métodos, com maior enfoque em quatro desses, conforme apresentados com suas respectivas técnicas na figura 13 (NESS *et al.*, 1996; ASNT, 2006).

Figura 13 - Métodos e técnicas do ensaio de vazamento

Métodos	Técnicas
Bolha	imersão; solução formadora de espuma
Detector de halogênio	convencional; transdutor de diodo
Variação de pressão	absoluta; aumento e queda de pressão; medição de fluxo
Espectrômetro de massa	pistola de gás de ensaio; sonda aspiradora; acumulação; <i>bombing</i>

Fonte: adaptado de Ness *et al.*, 1996.

De acordo com Peters *et al.*(1969) e Jackson Jr. *et al.* (1998), os métodos do ensaio de vazamento podem ser agrupados em duas categorias: localização de vazamento e detecção ou medição da taxa de vazamento.

A categoria localização de vazamento engloba os métodos de ensaio de vazamento que visam avaliar a superfície do objeto em teste, fornecendo indicações da localização exata do vazamento (PETERS *et al.*, 1969; JACKSON JR *et al.*, 1998).

Por outro lado, os métodos ligados à detecção ou medição da taxa de vazamento implicam na avaliação do objeto em teste como um todo, proporcionando confiabilidade para assegurar a existência ou não de vazamentos. Os procedimentos básicos consistem em contemplar toda a superfície interna ou externa do objeto em teste com fluido rastreador, estabelecendo um diferencial de pressão por meio da pressurização ou evacuação do mesmo, a fim de propiciar o fluxo do fluido através da descontinuidade passante. Assim, a presença e a concentração deste, na região cuja pressão é menor, pode ser determinada e, conseqüentemente, medida (PETERS *et al.*, 1969; JACKSON JR *et al.*, 1998; ASTM, 2011).

Quanto à questão da escolha de métodos do ensaio de vazamento, a seleção deve ser feita com extrema cautela, pois a mesma irá determinar fatores cruciais como desempenho e confiabilidade do teste para a aplicação em questão (PETERS *et al.*, 1969; ASTM, 2011).

A norma EN 1779 (CEN, 1999) apresenta determinados aspectos relacionados ao objeto em teste e ao ensaio, os quais precisam ser considerados anteriormente à definição do método e da técnica de ensaio de vazamento, como:

- taxa máxima de vazamento admissível do objeto em teste²⁰;
- pressão aplicada ao objeto em teste durante os ensaios²¹;
- direção de ensaio à qual o objeto em teste será submetido, isto é, pressurizar ou evacuar o mesmo;
- finalidade do ensaio, isto é, localizar ou medir a taxa de vazamento.

²⁰ De acordo com Payão Filho *et al.* (2000), as normas existentes determinam que sejam especificadas taxas de vazamento maiores que zero, pois nenhum objeto pode ser considerado totalmente estanque.

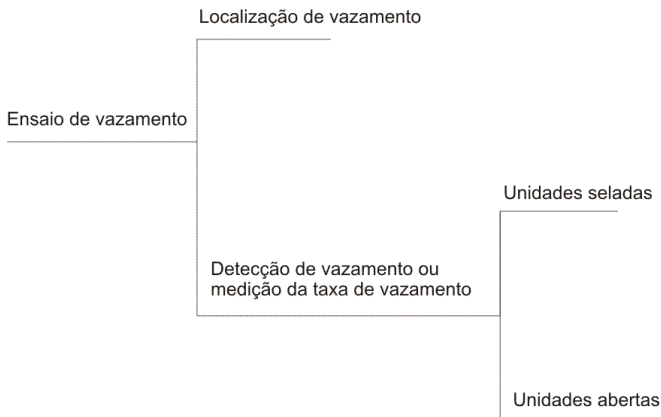
²¹ Peters *et al.* (1969) afirma ser de grande importância realizar os ensaios de vazamento aplicando a máxima pressão permitida sobre o objeto, com o objetivo de revelar qualquer vazamento presente no mesmo.

De acordo com Payão Filho *et al.* (2000a), há ainda outros fatores capazes de influenciar a seleção, como a incompatibilidade do objeto em teste com o meio de ensaio. Além disso, deve-se considerar o custo para realizar o teste, no qual se inclui o tempo para empregar o mesmo e a aquisição de equipamentos e fluidos rastreadores.

Com a finalidade de auxiliar a seleção do método e técnica do ensaio de vazamento apropriado, a literatura fornece diferentes abordagens para esse fim, como as designadas pelas normas EN 1779²² (CEN, 1999) e E432 (ASTM, 2011). Dentre as citadas, optou-se pela última, por ser a mais difundida na área de interesse e por estar inclusa no código geral de caldeiras e vasos de pressão da ASME (ASME, 2010).

A norma E432 (ASTM, 2011), intitulada Guia para Seleção de um Método de Ensaio de Vazamento²³, apresenta uma árvore de decisão, conforme ilustrado na figura 14, proporcionando um processo passo-a-passo para a seleção de técnicas de diferentes métodos do ensaio de vazamento.

Figura 14 - Árvore de decisão



Fonte: adaptado de ASTM, 2011.

²² A norma EN 1779 (CEN, 1999) classifica, de forma sistemática em tabelas, os diferentes métodos do ensaio de vazamento, além de apresentar critérios para a seleção do mesmo (PAYÃO FILHO *et al.*, 2000).

²³ Tradução livre do original *Standard Guide for Selection of a Leak Testing Method*.

O primeiro ponto de decisão se refere ao objetivo central do ensaio, isto é, se o mesmo será realizado para apresentar a localização de um vazamento – ramo superior designado como localização de vazamento – ou revelar a presença de vazamento – ramo inferior intitulado detecção ou medição da taxa de vazamento (PETERS *et al.*, 1969; ASTM, 2011).

No âmbito desta dissertação, o ensaio de vazamento terá o propósito de identificar a existência de vazamentos em toda a superfície do compressor hermético. Desse modo, os métodos enquadrados – e as respectivas técnicas – na categoria detecção ou medição da taxa de vazamento serão analisados por corroborar aos objetivos do trabalho em questão.

A próxima decisão a ser tomada, conforme a árvore de decisão, refere-se à acessibilidade das superfícies do objeto em teste, a qual pode ser classificada em dois grupos distintos: unidades seladas – acessíveis somente a superfície externa – e unidades abertas – acessíveis em ambos os lados da superfície (PETERS *et al.*, 1969; ASTM, 2011). O segundo grupo descrito é formado por objetos de ensaio que possuem um meio de comunicação, como um orifício ou flange, através do qual é possível pressurizar ou evacuar os mesmos (PAYÃO FILHO *et al.*, 2000a). Nesse contexto, o compressor hermético pode ser integrado ao grupo de unidades abertas, por ser acessível em ambos os lados da superfície por meio dos tubos passadores.

Com base na árvore de decisão da norma E432 e em referências literárias da área, ao menos seis técnicas de métodos de ensaio de vazamento se mostraram apropriadas para serem empregadas no trabalho em questão: bolha por imersão, termografia infravermelha por emissão padrão, detector de halogênio por transdutor de diodo, variação de pressão por queda de pressão, radioatividade e espectrômetro de massa por acumulação.

Devido a aspectos como indisponibilidade de equipamentos, custo elevado, riscos de explosão e de contaminação do compressor hermético e do meio ambiente, bem como possibilidade de danos à saúde do operador do ensaio, descartaram-se as técnicas detector de halogênio por transdutor de diodo e radioatividade.

Desse modo, somente quatro das técnicas indicadas foram selecionadas:

- termografia infravermelha por emissão padrão;
- espectrômetro de massa por acumulação;

- variação de pressão por queda de pressão;
- bolha por imersão.

Nos itens subsequentes, cada uma das técnicas mencionadas terá seu desempenho avaliado frente à aplicação específica deste trabalho. Com base nesses resultados, será possível optar pela técnica mais viável de ser implantada em processos de produção de fabricantes de compressores herméticos.

3.2.1 Técnica da termografia infravermelha por emissão padrão

A termografia infravermelha pode ser definida como um conjunto de técnicas baseadas no princípio da transferência de calor por emissão de energia térmica, a partir de corpos com temperatura acima do zero absoluto, na forma de radiação infravermelha (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013). A emissão ocorre a uma frequência não perceptível pelo olho humano e em função da temperatura e das propriedades superficiais do objeto (MEOLA *et al.*, 2004; ABNT, 2006).

A técnica da termografia infravermelha, especificamente por emissão padrão, consiste em empregar detectores de infravermelho²⁴, como câmeras termográficas, os quais convertem a radiação infravermelha captada em uma forma mensurável de energia. Geralmente, os detectores de infravermelho produzem imagens térmicas, ou termogramas²⁵, da superfície do objeto analisado, cuja intensidade é proporcional à radiação recebida (CORTIZO *et al.*, 2008; RODRÍGUEZ, 2010).

A técnica em questão tem a finalidade de obter um perfil térmico ou padrão de temperatura da superfície do objeto, através da análise do termograma gerado. Em vista disso, é possível avaliar a integridade de um objeto, ao comparar o perfil térmico do mesmo com o de uma referência (ABNT, 2006; CORTIZO *et al.*, 2008; RODRÍGUEZ, 2010).

²⁴ Determinados aspectos precisam ser considerados para seleção de um detector de infravermelho adequado, como a faixa de temperatura de medição do instrumento, a resolução de medição, bem como a emissividade do material a ser avaliado (ABNT, 2013a; BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013).

²⁵ Uma imagem térmica ou termograma apresentam, essencialmente, o perfil térmico da superfície do objeto, em gradientes de coloração ou tonalidades de cinza (ALMEIDA, 2010).

Atualmente, a termografia infravermelha é uma ferramenta consolidada na avaliação da integridade de equipamentos ou materiais (ALMEIDA, 2010; BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013). A mesma é empregada em uma série de aplicações nas áreas militar e medicinal, na indústria de manufatura, de petróleo e de gás natural, bem como em sistemas de suprimento de água e esgoto (JACKSON JR. *et al.*, 1998).

As principais vantagens apresentadas pela técnica são: possibilitar a análise das imagens no momento da medição; não empregar radiação de natureza letal; e não requerer contato com o objeto a ser avaliado. Entre as desvantagens, pode-se citar a necessidade dos componentes inspecionados possuírem pequena espessura, o custo relativamente alto e suscetibilidade às condições ambientais no local de ensaio (MALDAGUE, 2002; ALMEIDA, 2010; ALTOÉ *et al.*, 2012; ABNT, 2013a).

Segundo Maldague (2002), as técnicas da termografia infravermelha podem ser divididas em dois grupos: termografia ativa e termografia passiva.

Na termografia ativa, o objeto a ser avaliado é submetido a uma estimulação externa – como excitações mecânicas, eletromagnéticas ou por métodos óticos – com o objetivo de provocar um fluxo de calor no interior do mesmo. Uma possível presença de descontinuidades passantes poderá ser identificada pela perturbação do fluxo de calor gerado, ocasionando um contraste no mapa térmico da superfície em questão²⁶ (CORTIZO *et al.*, 2008; ALMEIDA, 2010; RODRÍGUEZ, 2010).

O segundo grupo, correspondente à termografia passiva, é caracterizado por não empregar fontes externas artificiais. Nesse caso, o objeto a ser avaliado possui capacidade suficiente de emitir radiação infravermelha ou é estimulado por meio de uma fonte natural de calor, como a energia solar. A presença de descontinuidades passantes é identificada, neste caso, quando o perfil térmico do objeto analisado possuir diferenças localizadas de temperatura, ou seja, fora de um padrão estabelecido (CORTIZO *et al.*, 2008; ALMEIDA, 2010; RODRÍGUEZ, 2010).

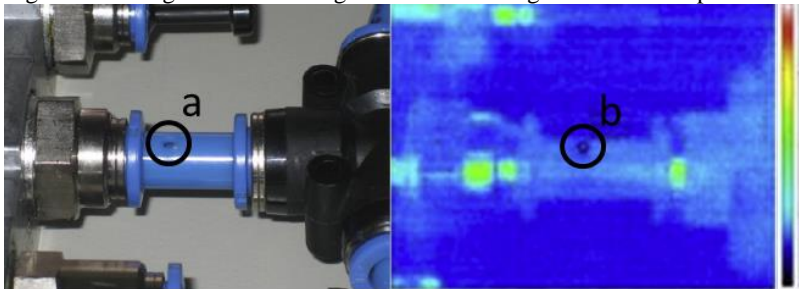
Em literatura, há uma ampla variedade de trabalhos que empregam a técnica da termografia infravermelha por emissão padrão

²⁶ Existem técnicas da termografia infravermelha ativa que empregam fontes externas com capacidade de excitar o fluido – e não o objeto analisado – ao emitir radiação infravermelha em frequências específicas (JACKSON JR. *et al.*, 2008).

para detecção e localização de vazamentos. Lewis *et al.* (2003) empregam a termografia como uma ferramenta para detectar vazamento de gases em aterros sanitários. Os autores destacam que a técnica utilizada apresentou limitações frente às condições ambientais no local dos ensaios, como luminosidade e temperatura do ar, além da natureza da superfície do objeto analisado e a distância entre a câmera termográfica e a superfície testada. Nos casos onde a termografia infravermelha por emissão padrão foi capaz de identificar vazamentos, de acordo com os autores, o termograma evidenciou uma diferença de temperatura entre a região do vazamento e outras áreas em torno da mesma.

Dudic *et al.* (2012) apresentam um estudo sobre o emprego da termografia infravermelha na avaliação de sistemas pneumáticos. Segundo os autores, por meio dessa técnica, a detecção e localização do vazamento, em uma mangueira de ar comprimido, pôde ser determinada como uma região com menor temperatura se comparado as áreas próximas da descontinuidade passante. A figura 15 ilustra a imagem real e seu respectivo termograma ao lado, com destaque para a região onde se encontra o vazamento.

Figura 15 - Imagem real e termograma de uma mangueira de ar comprimido



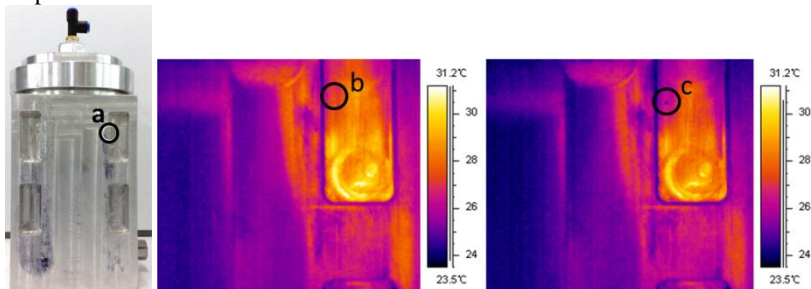
Legenda: a local do vazamento – imagem real;
b local do vazamento – termograma.

Fonte: adaptado de Dudic *et al.*, 2012.

Ge *et al.* (2009) propuseram um procedimento baseado na termografia infravermelha por emissão padrão para detectar e localizar vazamentos em vasos de pressão. Durante os ensaios, os autores pressurizaram o vaso de pressão com ar comprimido, a uma temperatura menor que a do ambiente, e a diferença dessa grandeza entre a região do vazamento e a área envolta do mesmo foi monitorada por uma câmera termográfica. As alterações de temperatura na região onde se encontra a

descontinuidade passante se mostraram nítidas e suficientes para serem detectadas pelo equipamento. A figura 16 ilustra o vaso de pressão e os termogramas gerados antes e depois da pressurização do objeto, respectivamente.

Figura 16 - Imagem real e termogramas antes e depois da pressurização, respectivamente



Legenda: a local do vazamento – imagem real;
 b local do vazamento – termograma (não pressurizado);
 c local do vazamento – termograma (pressurizado).

Fonte: adaptado de Ge *et al.*, 2009.

A partir dos conhecimentos adquiridos por meio dos conceitos estudados e dos trabalhos existentes na literatura, a termografia infravermelha por emissão padrão foi empregada, no âmbito deste trabalho, com o objetivo de analisar sua viabilidade frente à detecção de vazamento na junta soldada, entre tampo e corpo, da carcaça do compressor hermético.

Para isso, a técnica em questão foi analisada em duas etapas. Primeiramente, os ensaios foram realizados em ambiente de laboratório para atestar a capacidade da termografia infravermelha em identificar o vazamento. Como objeto de estudo, empregou-se um compressor hermético não conforme fornecido por um fabricante, o qual possuía uma descontinuidade passante localizada na junta soldada.

Após essa etapa, realizou-se um estudo de viabilidade de implantação desta tecnologia em linhas de produção.

3.2.1.1 Primeira etapa

Um primeiro ciclo de ensaios foi realizado empregando o compressor hermético à temperatura ambiente, e pressurizando-o com ar

comprimido aquecido a aproximadamente $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ²⁷. O objetivo foi monitorar a região da descontinuidade passante buscando pontos de menor temperatura, os quais poderiam indicar a presença de vazamento. Para tanto, foi empregada a câmera termográfica T400 da FLIR (FLIR, 2014). A figura 17 ilustra a imagem real do objeto e seu respectivo termograma gerado.

Figura 17 - Imagem real e termograma gerado do compressor hermético no primeiro ciclo de ensaios



Legenda: a local do vazamento – imagem real;
b local do vazamento – termograma.

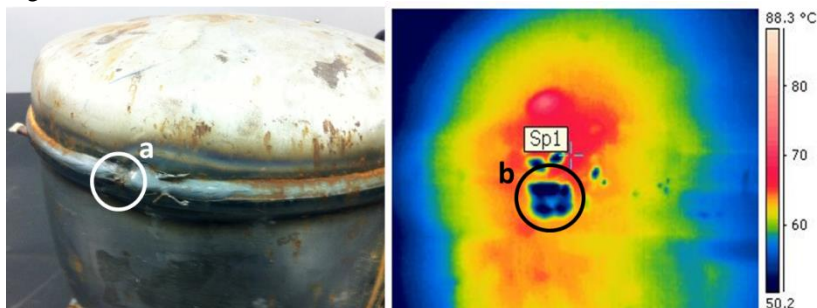
Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme pode ser visto no termograma da figura 17, a região próxima ao vazamento apresentou uma diferença localizada de temperatura, em relação a outras áreas da carcaça do compressor, devido ao fluxo do fluido. Logo, a descontinuidade passante na junta soldada pôde ser identificada, demonstrando a capacidade desta técnica em avaliar a estanqueidade de compressores herméticos.

Em um segundo ciclo de ensaios, uma extensa área da carcaça do mesmo compressor foi aquecida por meio de uma fonte externa, incluindo a região da descontinuidade passante. Após esse procedimento, o objeto foi pressurizado com ar comprimido resfriado, a uma temperatura de aproximadamente $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Como nos ensaios do primeiro ciclo, o objetivo foi monitorar a região da descontinuidade passante, com o emprego da câmera termográfica, e avaliar se o vazamento poderia ser detectado. A figura 18 ilustra a imagem real do objeto e seu respectivo termograma gerado.

²⁷ O compressor hermético foi pressurizado a $0,8\text{ MPa}$, pressão essa definida pela capacidade de fornecimento do sistema de ar comprimido em laboratório.

Figura 18 - Imagem real e termograma gerado do compressor hermético no segundo ciclo de ensaios



Legenda: a local do vazamento – imagem real;
b local do vazamento – termograma.

Fonte: elaborado pelo autor.

Por meio da análise do termograma da figura 18, contata-se que a região onde o vazamento se encontra apresentou uma diferença localizada de temperatura, em relação a outras áreas da carcaça do compressor, mais evidente que no primeiro ciclo de ensaios. Portanto, novamente, a técnica da termografia infravermelha por emissão padrão se mostrou promissora por ter sido capaz de identificar a descontinuidade passante na junta soldada.

3.2.1.2 Segunda etapa

A partir dos resultados alcançados na primeira etapa, conclui-se que a técnica da termografia infravermelha por emissão padrão, no trabalho em questão, se mostrou promissora para a detecção de vazamentos, situados na junta soldada de compressores herméticos. Entretanto, tais resultados foram obtidos em condições específicas de ensaio, as quais se tornariam difíceis de replicar em ambiente fabril. Em vista disso, o estudo realizado nesta etapa evidenciou uma série de obstáculos para implantar a técnica em questão frente à realidade da fábrica.

Dentre os aspectos levantados, pode-se citar, primeiramente, a dificuldade em determinar um perfil térmico padrão da carcaça dos compressores, devido à variação do ritmo de produção da linha. Esta conjuntura provoca situações em que compressores chegam ao local do ensaio com uma temperatura desconhecida e, em consequência disso, cada peça apresenta um perfil térmico singular. Dessa forma, o

desempenho da técnica seria prejudicado, dificultando seu uso na identificação de descontinuidades passantes.

Outro ponto levantado se refere à necessidade de avaliar toda a região da junta soldada. Devido ao formato do compressor hermético, seria preciso rotacionar o objeto à frente de uma única câmera termográfica, ou empregar mais de uma câmera para envolver por completo a área de interesse. Entretanto, o tempo necessário para realizar o ensaio seria muito amplo ou elevaria demasiadamente o custo, caso fosse adquirida mais de uma câmera.

Portanto, verificou-se que a termografia infravermelha por emissão padrão não satisfaz as condições de contorno estabelecidas neste trabalho. Apesar de sua capacidade de identificar descontinuidades passantes em compressores herméticos, os fatores elencados anteriormente descartam o uso dessa tecnologia para solucionar o problema em questão.

3.2.2 Técnica do espectrômetro de massa por acumulação

As técnicas do método por espectrômetro de massa para detecção de vazamento têm como princípio a criação de um diferencial de pressão entre o interior do objeto analisado e a região onde o mesmo está situado, com a finalidade de provocar a passagem de um gás rastreador por meio de uma eventual descontinuidade passante. No lado de menor pressão, a identificação de propriedades físicas ou químicas do gás rastreador é realizada através de um detector de vazamento, especificamente, um espectrômetro de massa²⁸ (JACKSON JR. *et al.*, 1998; PAYÃO FILHO *et al.*, 2000a; CEN, 2001).

O hélio, como gás rastreador, é comumente empregado em virtude de ser atóxico e ambientalmente seguro; ser inerte, o que evita processos de corrosão ou danos; bem como ser capaz de atravessar por menores descontinuidades passantes, devido ao pequeno diâmetro atômico do mesmo (JACKSON JR. *et al.*, 1998; PAYÃO FILHO *et al.*, 2000a).

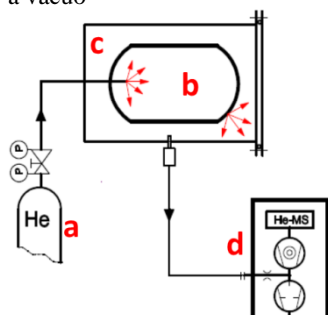
De acordo com Payão Filho *et al.* (2000a), as diferentes técnicas desse método podem ser divididas em dois grupos: técnicas com sobrepressão e com vácuo. O primeiro se refere aos ensaios realizados

²⁸ Para detecção e localização de vazamentos, utilizando hélio como gás rastreador, os espectrômetros mais empregados no mercado são os de campo setorial. Os elementos formadores e o princípio de funcionamento do mesmo podem ser encontrados em Payão Filho *et al.* (2000a).

em objetos que não podem ser evacuados, sendo necessário, então, pressurizá-los com gás rastreador a uma pressão maior que a atmosférica. Por outro lado, as técnicas do segundo grupo são realizadas com o objeto de ensaio evacuado e a superfície externa do mesmo em contato com o gás rastreador.

A técnica por acumulação, a qual está inclusa no primeiro grupo citado no parágrafo anterior, consiste em posicionar o objeto em teste no interior de um envoltório plástico ou câmara a vácuo e, posteriormente, pressurizá-lo com gás rastreador. Após um determinado intervalo de tempo, o detector de vazamento – espectrômetro de massa – conectado ao envoltório ou à câmara irá identificar e quantificar qualquer vestígio de gás hélio que, porventura, tenha atravessado uma descontinuidade passante presente no objeto analisado (JACKSON JR. *et al.*, 1998; PAYÃO FILHO *et al.*, 2000a; CEN, 2001). A figura 19 ilustra o princípio de funcionamento da técnica em questão.

Figura 19 - Princípio de funcionamento da técnica por acumulação com câmara a vácuo



- Legenda:
- a suprimento de gás hélio;
 - b objeto em teste;
 - c câmara à vácuo;
 - d detector de vazamento (espectrômetro de massa).

Fonte: Adaptado de Payão Filho, 2000a.

A técnica por acumulação é aplicada em vasos de pressão de diferentes tamanhos ou configurações, os quais podem ser pressurizados a uma pressão maior que a atmosférica (JACKSON JR. *et al.*, 1998).

Sob esse enfoque, a literatura apresenta diferentes trabalhos que empregam ou se baseiam na técnica por acumulação do método de espectrômetro de massa. Schröder *et al.* (1999) fizeram uso da técnica em questão, com câmara a vácuo, para avaliar a integridade da junta tubular de um duto constituído por um tubo de aço inoxidável e de

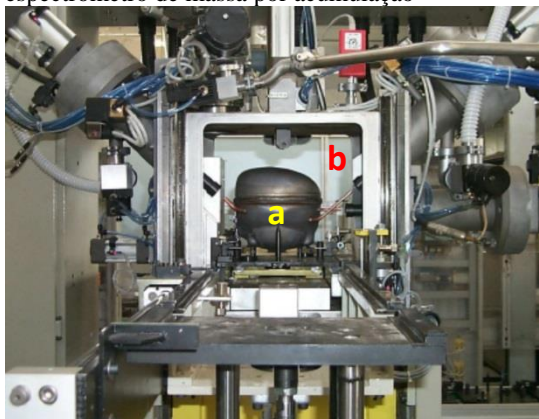
alumínio. Com esta finalidade, o objeto de ensaio, com as extremidades vedadas, foi posicionado e, em seguida, pressurizado com gás hélio em uma câmara a vácuo. Através de um detector de vazamento, acoplado à câmara, foi possível identificar a presença do gás rastreador.

Palaniappan *et al.* (1997a) realizaram ensaios de vazamento, empregando procedimentos baseados na técnica por acumulação, em vasos de pressão e tanques de grandes volumes. Neste caso, as estruturas citadas foram inicialmente evacuadas, com o intuito de obter vácuo no interior das mesmas, e envolvidas por um invólucro de polietileno, o qual foi preenchido com gás hélio. Após esta etapa, determinou-se a presença do gás rastreador por meio de um detector de vazamento, acoplado ao interior das estruturas avaliadas.

Loganathan *et al.* (2009) apresentaram um estudo de caso que demonstrou a inviabilidade de empregar a técnica por acumulação devido ao formato e às dimensões do objeto analisado – um vaso de pressão integrante de um reator nuclear. Nesse caso, a alternativa encontrada para a avaliação da estrutura foi aplicar uma adaptação dessa técnica. Para isso, específicas caixas de vácuo foram projetadas e, posteriormente, fixadas na superfície externa do vaso – principalmente em regiões soldadas – bem como envoltórios de plástico preenchidos com hélio no lado oposto. A presença de descontinuidades passantes pôde ser constatada com a identificação de gás rastreador por meio de detectores acoplados às caixas de vácuo.

No contexto deste trabalho, fabricantes de compressores herméticos costumam realizar ensaios baseados na técnica por acumulação, empregando hélio como gás rastreador, com o intuito de avaliar a integridade dos produtos fabricados. O procedimento aplicado consiste em posicionar o objeto em teste no interior de uma câmara, local este onde será criado um diferencial de pressão, submetendo-a ao vácuo e pressurizando o compressor com gás hélio. Na eventual existência de uma descontinuidade passante, a presença do gás rastreador é identificada por meio de um detector de vazamento conectado à câmara. A figura 20 ilustra o emprego desta técnica em uma linha de produção.

Figura 20 - Ensaio com o compressor hermético empregando a técnica do espectrômetro de massa por acumulação



Legenda: a compressor hermético;
b câmara de teste.

Fonte: (LAZZERO TECHNOLOGIE, 2014).

O emprego da técnica em questão é considerado extremamente satisfatório pelas respectivas empresas, em virtude da elevada capacidade da técnica em identificar compressores com descontinuidades passantes. No entanto, a implantação da mesma em linhas já existentes demandaria um investimento considerado muito elevado, o que inviabilizaria sua adoção, devido a fatores como a drástica alteração necessária nas linhas de produção correspondentes e no alto custo para aquisição de equipamentos relacionados à técnica por acumulação.

3.2.3 Técnica da variação de pressão por queda de pressão

As técnicas integrantes do método por variação de pressão têm, por finalidade, determinar a presença de vazamento em um objeto, submetido a um diferencial de pressão, por meio da análise da variação de massa do fluido utilizado no ensaio, quando o mesmo atravessa uma eventual descontinuidade passante na estrutura avaliada²⁹ (NESS *et al.*, 1996; PAYÃO FILHO *et al.*, 2000a; CEN, 2001a).

²⁹ O ar atmosférico se tornou o fluido comumente utilizado no método por variação de pressão devido à sua disponibilidade e por não ser inflamável ou tóxico (MIX, 2005).

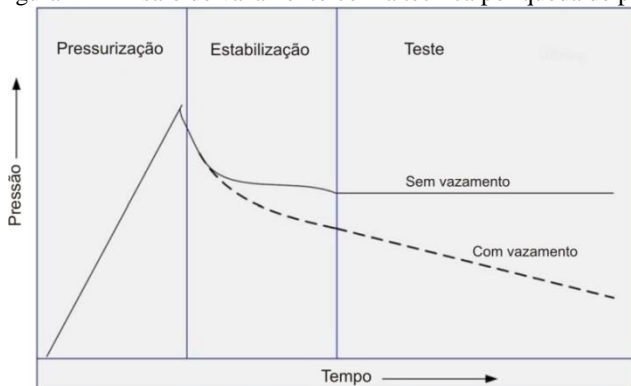
A instrumentação relativamente fácil de ser implantada, o fato de não necessitar de gases rastreadores e a possibilidade de determinar a taxa de vazamento de sistemas pressurizados ou evacuados são algumas das vantagens que podem ser elencadas, a respeito das técnicas do método por variação de pressão. Por outro lado, a principal limitação para o emprego das mesmas é o tempo requerido nos ensaios, que dependerá das dimensões do objeto analisado (JACKSON JR. *et al.*, 1998; MIX, 2005).

O emprego do método por variação de pressão, com o intuito de detectar vazamentos, tem uma ampla aplicação para avaliar a integridade de estruturas como vasos de pressão, dutos e elementos selados (GU *et al.*, 2006).

De forma específica, a técnica por queda de pressão³⁰ consiste em pressurizar o objeto em teste, ou posicioná-lo em uma câmara a vácuo, com o intuito de gerar um diferencial positivo de pressão. Após esta etapa, um período de estabilização é requerido, para equalização da temperatura da estrutura avaliada, e, posteriormente, valores de pressão são medidos em intervalos regulares, com o intuito de gerar uma curva representativa da pressão interna da estrutura, bem como calcular a taxa de vazamento correspondente (CEN, 2001a; ASTM, 2013).

A figura 21 apresenta curvas referentes a duas situações de ensaios, comparando condições com e sem vazamento, com as respectivas etapas da técnica por queda de pressão.

Figura 21 - Ensaio de vazamento com a técnica por queda de pressão



Fonte: adaptado de ASTM, 2013.

³⁰ A técnica por queda de pressão é aplicada para avaliar objetos que, ao serem pressurizados, não sofram deformação ou alteração significativa de volume (CEN, 2010a; ASTM, 2013).

Dentro do contexto para detecção de vazamentos, diversos trabalhos têm sido apresentados empregando a técnica por queda de pressão. Bergoglio *et al.* (2011) elencam esta técnica como um dos procedimentos a serem empregados para avaliar a integridade de materiais e componentes.

Tusek *et al.* (2004) afirmam que fabricantes de recipientes para aquecedores de água empregam três diferentes técnicas para avaliar a estanqueidade destes, principalmente nas regiões de juntas soldadas. Dentre as mesmas, inclui-se a técnica por queda de pressão, a qual, segundo os autores, possui elevada confiabilidade para garantir a integridade do produto.

Koizumi *et al.* (2001) adotam a técnica em questão para identificar vazamentos na fabricação de um recipiente estanque, elemento esse integrante de um reator nuclear, cuja função é formar a primeira barreira para contenção de radioatividade.

Kishawy *et al.* (2010) citam a técnica por queda de pressão como um procedimento convencional para monitorar a integridade de dutos, a fim de evitar potenciais acidentes e interrupções de serviço.

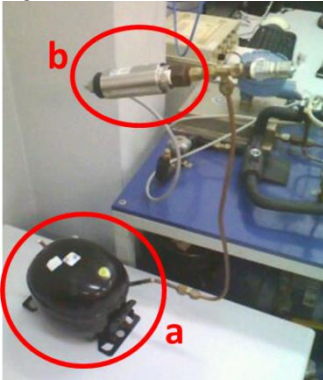
Palmieri *et al.* (2001) apresentam um estudo sobre danos à integridade de componentes pressurizados, os quais integram naves espaciais, em consequência do impacto de meteoritos e lixo orbital. Segundo os autores, a técnica por queda de pressão foi empregada, durante simulações de impacto realizadas em vasos de pressão blindados, para monitorar a presença de vazamentos em uma eventual perfuração da estrutura.

No escopo desta dissertação, a técnica por queda de pressão foi aplicada para avaliar a estanqueidade de compressores herméticos. Em vista disso, ensaios foram realizados em ambiente de laboratório, numa primeira etapa, com a finalidade de analisar o desempenho de tal técnica. Posteriormente, a mesma foi empregada no ambiente fabril, visando avaliar a viabilidade de sua aplicação em linhas de produção.

3.2.3.1 Primeira etapa

Nesta etapa, empregou-se um compressor hermético não conforme fornecido por um determinado fabricante, o qual possuía uma descontinuidade passante localizada na junta soldada. Para início dos ensaios, um transmissor de pressão modelo 891.10.501 da fabricante WIKA (COSTA, 2010) e um sistema de fornecimento de ar comprimido foram acoplados a um dos tubos passadores do objeto em teste, conforme pode ser visto na figura 22.

Figura 22 - Bancada de ensaios empregando a técnica por queda de pressão

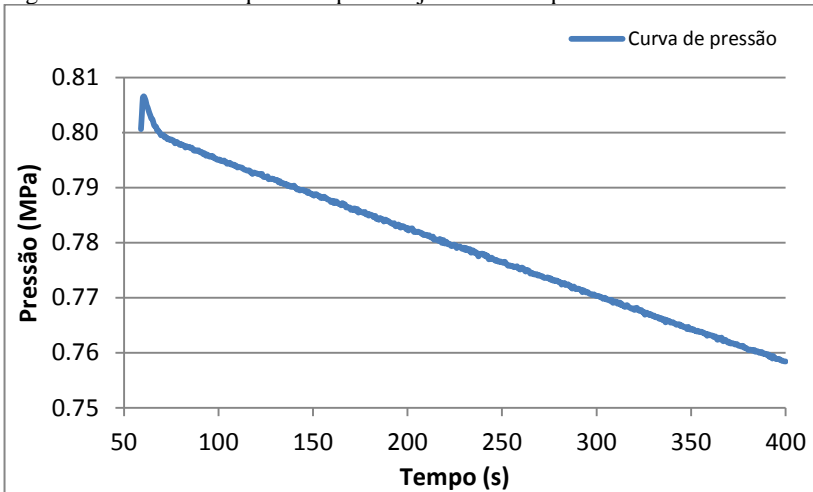


Legenda: a compressor hermético;
b transmissor de pressão.

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a montagem da bancada descrita, o compressor foi pressurizado com 0,8 MPa e, em seguida, a pressão interna do mesmo foi medida por meio do transmissor. A figura 23 apresenta a curva referente aos valores de pressão medidos durante os ensaios.

Figura 23 - Ensaios de queda de pressão junto ao compressor hermético



Fonte: elaborado pelo autor

Conforme pode ser visto na figura 23, a curva referente aos valores de pressão medidos apresentou uma tendência de decaimento, o que permitiu calcular uma taxa de vazamento de aproximadamente -0,13 kPa/s. Dessa forma, o vazamento presente no compressor avaliado pôde ser identificado, mostrando a viabilidade desta técnica, frente às específicas condições empregadas.

3.2.3.2 Segunda etapa

Por meio dos resultados obtidos na primeira etapa, a aplicação da técnica por queda de pressão se mostrou promissora para a detecção de vazamentos situados na junta soldada de compressores herméticos. Entretanto, existem algumas limitações da mesma, frente ao seu emprego em ambiente fabril.

Conforme ensaios realizados nas linhas de produção com o sistema comercial modelo LS-1822A da COSMO (COSMO INSTRUMENTS, 2014), a técnica da variação de pressão por queda de pressão apresentou elevada susceptibilidade à variação de temperatura do compressor, grandeza essa de complexo controle na fábrica e que tem forte impacto na eficiência do ensaio, no que se refere a identificação de compressores com vazamento.

Deste modo, a técnica por queda de pressão não se mostrou propícia para implantação em ambiente fabril, devido ao fator elencado anteriormente.

3.2.4 Técnica da bolha por imersão

As técnicas do método da bolha têm, como princípio, estabelecer um diferencial de pressão sobre o objeto analisado, e colocá-lo em contato com um líquido de teste. Caso uma descontinuidade passante esteja presente na estrutura do objeto, o vazamento do fluido empregado poderá ser detectado ao observar a formação e o desprendimento de bolhas no líquido de teste³¹ (JACKSON JR. *et al.*, 1998; CEN, 1999a; PAYÃO FILHO *et al.*, 2000a; ASTM, 2011a; ABNT, 2013).

A capacidade do respectivo método para detecção bolhas pode ser influenciada por fatores, como diferencial de pressão aplicado no objeto de ensaio, propriedades físicas do líquido de teste e do fluido pressurizado, presença de impurezas na superfície do objeto, condições

³¹ O ar é o fluido normalmente utilizado no método da bolha (CEN, 1999a; ABNT, 2013).

ambientais do local de ensaio e qualificação dos operadores (JACKSON JR. *et al.*, 1998).

A simplicidade, a rapidez e o custo reduzido são as vantagens relacionadas a esse método, o qual geralmente possibilita a avaliação de toda a superfície do objeto pressurizado, além de permitir a localização de cada vazamento presente. Dentre as limitações existentes, citam-se a subjetiva avaliação do operador para identificar o vazamento, a presença de bolhas no líquido de teste não relacionadas ao vazamento e a contaminação da superfície do objeto de ensaio (JACKSON JR. *et al.*, 1998; ASTM, 2011a).

O método em questão é comumente aplicado para detectar vazamento em objetos que permitem ser pressurizados, como dutos e vasos de pressão. Em estruturas de maior porte, às quais o processo de pressurização se torna complexo, descontinuidades passantes podem ser identificadas com o emprego de caixas de vácuo em conjunto com uma solução de bolhas, aplicada diretamente na região a ser avaliada (MIX, 2005).

Particularmente, a técnica da bolha por imersão consiste em pressurizar e selar o objeto a ser ensaiado com um determinado fluido e, posteriormente, submergi-lo em um recipiente contendo específico líquido de teste. O vazamento, então, poderá ser interpretado como um fluxo de bolhas procedente de um ou mais pontos da superfície do objeto, os quais identificarão os locais das descontinuidades passantes. Desse modo, a técnica em questão pode ser aplicada visando tanto a detecção quanto a localização de vazamentos (JACKSON JR. *et al.*, 1998; CEN, 1999a; PAYÃO FILHO *et al.*, 2000a; ASTM, 2011a;).

Há uma série de trabalhos publicados que aplicam a técnica da bolha por imersão com a finalidade de avaliar a estanqueidade de estruturas. Tusek *et al.* (2004) afirmam que fabricantes de recipientes para aquecedores de água utilizam esta técnica com o intuito de avaliar, principalmente, as regiões submetidas a processos de soldagem.

Vaughan *et al.* (2007) empregam a técnica da bolha por imersão em recipientes para transporte de materiais radioativos, após a realização de testes de impacto, com a finalidade de atestar a estanqueidade dos mesmos.

Kim *et al.* (2008) apresentam uma avaliação de estruturas de contenção em navios destinados a transportar gás natural liquefeito. Segundo os autores, a técnica em questão foi aplicada para determinar a localização exata das descontinuidades passantes, por meio da identificação de bolhas desprendidas das estruturas analisadas.

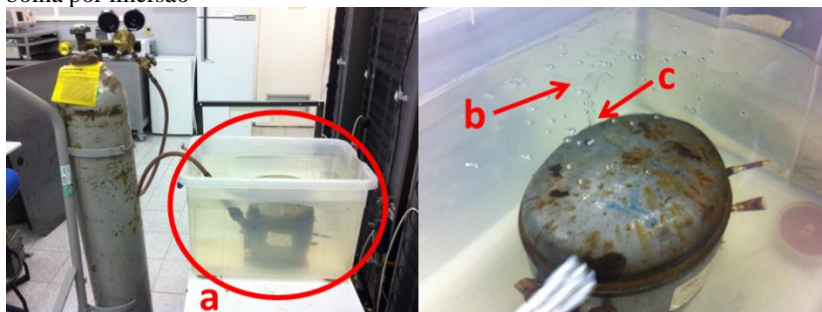
Tao *et al.* (2004) avaliam o processo de encapsulamento e de colagem de componentes microeletrônicos, ao adotar a técnica da bolha por imersão, a fim de detectar descontinuidades passantes nos mesmos.

Dentro do contexto deste trabalho, avaliou-se o desempenho da técnica em questão para atestar a estanqueidade de compressores herméticos. Conforme ocorreu com as técnicas anteriormente descritas, realizaram-se ensaios em laboratório, em uma primeira etapa, para certificar a viabilidade e, em seguida, um estudo para implantar a tecnologia da mesma em campo.

3.2.4.1 Primeira etapa

Para início dos ensaios, um compressor hermético não conforme, o qual possuía uma descontinuidade passante localizado na junta soldada, foi pressurizado com ar comprimido a 0,8 MPa. Após esse procedimento, o objeto em teste foi posicionado dentro de um recipiente preenchido com água e a ocorrência bolhas foi observada.

Figura 24 - Ensaios com o compressor hermético empregando a técnica da bolha por imersão



Legenda: a compressor submerso;
 b ocorrência de bolhas;
 c local da descontinuidade passante.

Fonte: elaborado pelo autor

Conforme pode ser visto na figura 24, a presença de bolhas formadas na região da descontinuidade passante se tornou extremamente evidente, demonstrando a viabilidade da técnica da bolha por imersão para detectar e até mesmo localizar vazamentos no objeto analisado.

3.2.4.2 Segunda etapa

A partir dos resultados alcançados em laboratório, a técnica da bolha por imersão se mostrou promissora para identificar vazamentos em compressores herméticos. Em referência à sua implantação nas linhas de produção, a respectiva técnica se apresenta como uma alternativa já estabelecida na fabricação de compressores herméticos. Ademais, considerando as condições de contorno definidas anteriormente, diversos fatores tornam a técnica da bolha por imersão mais viável para avaliar estanqueidade em compressores, comparando-a com as demais técnicas analisadas.

Primeiramente, a alternativa da bolha por imersão possui custo relativamente mais baixo para aquisição de equipamentos e para a alteração da linha de produção, em oposição às técnicas de termografia e de hélio por acumulação. Outro ponto relevante é a inviabilidade de empregar a técnica por queda de pressão para avaliar estanqueidade de compressores em linhas de produção, devido à elevada susceptibilidade dessa às condições de ensaio no ambiente fabril.

Porém, mesmo a técnica da bolha por imersão sendo a melhor alternativa dentre as apresentadas para atestar a estanqueidade de compressores herméticos, o processo de identificação do vazamento depende de uma análise subjetiva do operador do ensaio, o que pode levar a erros quanto à avaliação do compressor.

Buscando elevar a confiabilidade do ensaio, foi proposta a automatização do processo de identificação das bolhas, para o qual diferentes abordagens se encontram disponíveis. Especificamente para este trabalho, destacam-se o emprego de uma câmera e de dois sistemas de medição com diferentes transdutores: um com hidrofone e outro com acelerômetro.

Com a finalidade de selecionar uma das alternativas citadas, ensaios preliminares foram realizados em laboratório empregando cada uma das opções designadas. Um compressor hermético apresentando um descontinuidade passante na junta soldada foi pressurizado com ar comprimido a 0,8 MPa e, posteriormente, submerso em um recipiente com água.

a) Câmera

O emprego da câmera consiste em registrar uma imagem do compressor hermético, e do meio onde esse se situa, no momento do ensaio de vazamento. Em um posterior processamento da imagem

adquirida, realiza-se a identificação da bolha para atestar a presença de vazamento no objeto avaliado. Bergoglio *et al.* (2012) citam este procedimento para detecção de bolhas, com a finalidade de substituir o operador do ensaio de vazamento.

Para a realização dos ensaios preliminares, uma *webcam* foi empregada como o dispositivo responsável pela aquisição de imagens. Os resultados alcançados mostraram um desempenho satisfatório do sistema utilizado, através do qual foi possível identificar a bolha gerada durante o vazamento.

Embora apresente potencial para a aplicação em questão, a susceptibilidade às condições do ambiente – principalmente iluminação no local de ensaio e qualquer tipo de oscilação na água – poderia dificultar a implantação desta abordagem nas linhas de produção.

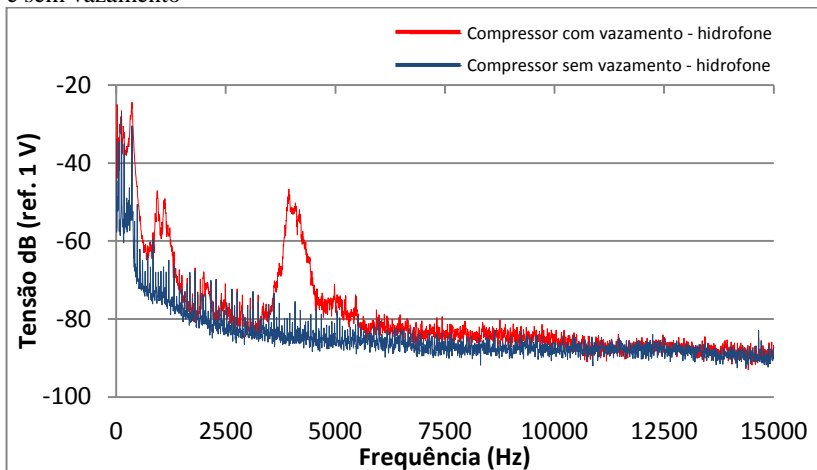
b) Hidrofone

O hidrofone pode ser caracterizado como um microfone submersível, o qual estará diretamente em contato com o meio líquido (BOYD *et al.*, 2001; FRADEN, 2010). O emprego desse transdutor possibilita a identificação de um compressor hermético com descontinuidade passante, por meio da medição dos sinais sonoros emitidos por bolhas formadas durante o vazamento, desde o desprendimento até o estouro das mesmas na superfície (LEIGHTON *et al.*, 1986; LEIGHTON *et al.*, 1990; BOYD *et al.*, 2001).

No contexto dos ensaios preliminares realizados, o hidrofone modelo MR-23151 da Knowles (KNOWLES ELECTRONICS, 2014) se mostrou capaz de medir o sinal sonoro gerado pelas bolhas, ao diferenciar compressores com e sem vazamento. A figura 25 ilustra a análise em frequência das medições realizadas nas situações descritas³².

³² Pelo fato do hidrofone e acelerômetro medirem grandezas distintas – pressão sonora e vibração, respectivamente – avaliou-se a resposta em frequência da tensão gerada pelos transdutores. Adotou-se a análise do sinal em decibéis (dB), pois a mesma é comumente empregada para análise de sinais da área de vibração e acústica, bem como para representar valores extremos de amplitude em uma mesma escala (BISTAFA, 2011; BRÜEL & KJAER, 2014b). A referência de 1 V foi determinada arbitrariamente, pois não se encontrou referência para tensão em literatura científica. Ao longo deste trabalho, essa abordagem continuará a ser adotada.

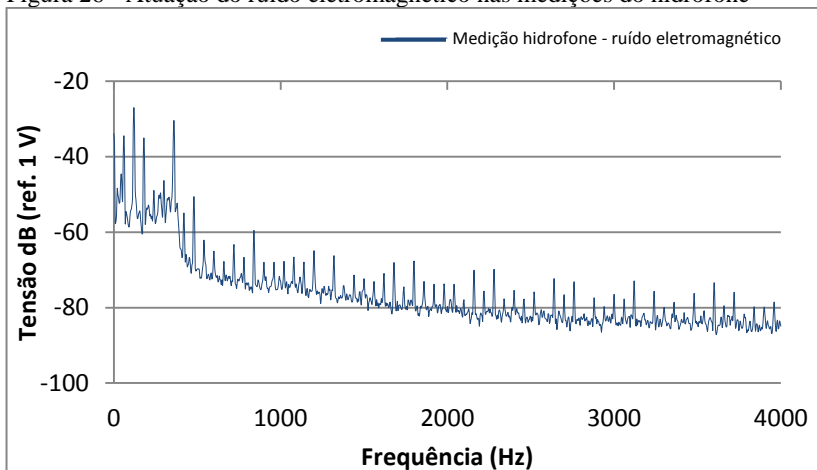
Figura 25 - Análise em frequência das medições do hidrofone - compressor com e sem vazamento



Fonte: elaborado pelo autor

Apesar de promissor, o modelo do hidrofone analisado se mostrou vulnerável a ruídos eletromagnéticos, o que prejudicou seu desempenho e, conseqüentemente, poderia inviabilizar o emprego do transdutor no ambiente fabril. A atuação desse ruído é evidenciada pelo surgimento de harmônicas na medição do transdutor, conforme pode ser visto com maiores detalhes na figura 26.

Figura 26 - Atuação do ruído eletromagnético nas medições do hidrofone



Fonte: elaborado pelo autor

Além da limitação referente a ruídos eletromagnéticos para o modelo utilizado, a ausência de fornecedores com representatividade nacional, o que dificultaria qualquer assistência necessária, é outro fator que restringe a escolha desse transdutor para o trabalho em questão.

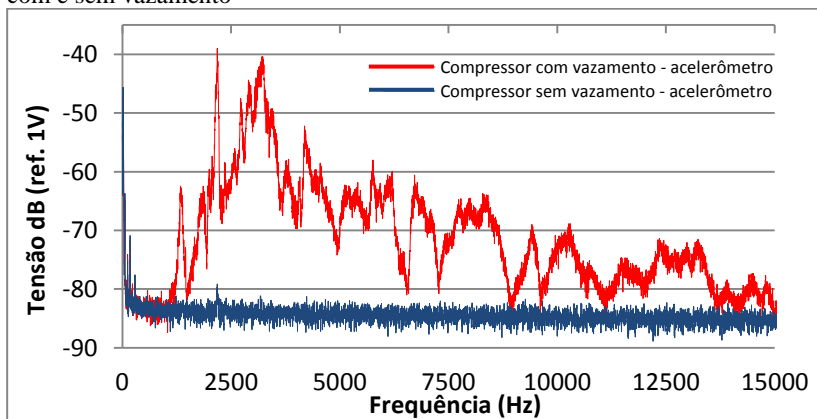
Trata-se, no entanto, de alternativa que merece análise mais aprofundada, por ter apresentado resultados promissores em termos de identificação de compressores com vazamento.

c) Acelerômetro

O emprego do acelerômetro se baseou no fato de que vazamentos localizados em estruturas com descontinuidades passantes excitam a carcaça das mesmas, gerando vibração em frequências específicas. Em literatura, diferentes trabalhos abordam o uso desse transdutor para detectar e localizar vazamentos, como Thompson *et al.* (1997), Gao *et al.* (2005), Garcia (2010), Pal *et al.* (2010) e Ben-Mansour *et al.* (2012).

No âmbito dos ensaios preliminares, o acelerômetro modelo 3006A da Dytran (DYTRAN INSTRUMENTS, 2014), acoplado à carcaça do compressor hermético submerso³³, se mostrou apto para detectar o vazamento no objeto analisado, além de apresentar melhor desempenho frente às medições realizadas pelo hidrofone. Para corroborar essas afirmações, a figura 27 ilustra a análise em frequência das medições realizadas em compressores com e sem vazamento.

Figura 27 - Análise em frequência das medições do acelerômetro - compressor com e sem vazamento



Fonte: elaborado pelo autor

³³ Definiu-se o centro do tempo do compressor como o ponto de acoplamento do acelerômetro.

Além de possuir a capacidade de identificar o vazamento em um compressor hermético, o acelerômetro se mostrou mais robusto a ruídos eletromagnéticos em comparação ao hidrofone disponível. Outro aspecto considerado pertinente ao transdutor em questão se refere à presença de fornecedores com representatividade nacional.

Diante dos resultados alcançados com as três abordagens disponíveis, optou-se pelo sistema de medição com acelerômetro devido às limitações encontradas nas demais alternativas, bem como por apresentar uma menor dificuldade de implantação futura nas linhas de produção.

O próximo capítulo deste trabalho descreverá o desenvolvimento do sistema de avaliação de estanqueidade, baseado nos conceitos da técnica da bolha por imersão e no sistema de medição com acelerômetro, para detectar vazamentos na junta soldada de compressores herméticos.

4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE PARA COMPRESSORES HERMÉTICOS

O presente capítulo apresenta o desenvolvimento do sistema de avaliação de estanqueidade para compressores herméticos, baseado na técnica da bolha por imersão. Como transdutor, foi previsto o emprego de um acelerômetro, pois, por meio desse, será possível medir a vibração da carcaça do compressor hermético e avaliar a estanqueidade do mesmo, como mostrado no capítulo anterior.

Em relação à técnica da bolha por imersão, essa tem o propósito fundamental de submergir o objeto avaliado em um meio líquido e identificar a formação de bolhas. Entretanto, com a instrumentação definida segundo o capítulo anterior, a necessidade de imersão do conjunto acelerômetro/compressor passou a ser um procedimento questionável, devido à possibilidade de medir a vibração provocada pelo vazamento sem introduzir o respectivo conjunto no meio líquido. Em vista disso, um estudo foi realizado sobre a vibração da carcaça do compressor hermético não submerso, o que poderia simplificar a avaliação de estanqueidade do mesmo. Contudo, os resultados obtidos mostraram que o vazamento presente em compressores não conformes somente foi identificado quando se acopla o acelerômetro próximo ao local da descontinuidade passante (vide Apêndice A). Como a localização do vazamento será evidentemente desconhecida, a alternativa em questão não se mostrou viável para o contexto desta dissertação.

Desse modo, para o prosseguimento dos trabalhos, realizou-se o estudo das características da grandeza a ser medida: vibração da carcaça do compressor submerso provocada pelo vazamento. Em seguida, é apresentada a especificação da instrumentação empregada, o desenvolvimento do software e avaliações preliminares e comparativas do sistema de avaliação de estanqueidade concebido. Por último, os resultados de ensaios realizados em laboratório e fábrica com o respectivo sistema são descritos, bem como melhorias sugeridas para o aperfeiçoamento do mesmo.

4.1 ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DA GRANDEZA MEDIDA

No contexto desta dissertação, o modo como o vazamento excita a carcaça de um compressor hermético, resultando na vibração da mesma, não foi objeto de estudo, devido à alta complexidade do assunto em questão, e pelo tempo hábil necessário para esse fim. Apesar de

algumas hipóteses terem sido levantadas, como o impacto do meio líquido à carcaça do compressor no momento do descolamento da bolha ou pelo fenômeno de cavitação³⁴, o foco deste trabalho foi direcionado somente para a medição da vibração e interpretá-la em termos do vazamento de compressores herméticos.

Em vista disso, ensaios foram realizados nesta etapa, com o intuito de estudar as propriedades da grandeza a ser medida. Para alcançar esse objetivo, utilizou-se um sistema de medição formado por componentes disponíveis e adequados às necessidades, como: acelerômetro modelo 353B04 da PCB (PCB PIEZOTRONICS, 2014); sistema de aquisição modelo 3050-A-060 (BRÜEL & KJAER, 2014a) e software PULSE da Brüel & Kjaer³⁵.

O transdutor modelo 353B04 foi selecionado por possuir amplo intervalo de frequências aliado à maior sensibilidade dentre as opções disponíveis, requisitos necessários para caracterizar o respectivo fenômeno físico. A figura 28 apresenta as características metrológicas deste acelerômetro.

Figura 28 - Características metrológicas do acelerômetro 353B04

Característica	Valor
Intervalo de medição	(-4905 a +4905) m/s ²
Intervalo de frequências (± 3 dB)	(0,35 a 20000) Hz
Sensibilidade	1,02 mV/(m/s ²)

Fonte: adaptado de PCB Piezotronics, 2014.

Em relação à aquisição, processamento e análise de sinais, o sistema da Brüel & Kjaer foi empregado pela reputação da respectiva empresa e por ser uma solução consolidada na área de vibração e acústica. A figura 29 mostra as características do sistema de aquisição modelo 3050-A-060 utilizado nesta etapa.

³⁴ O fenômeno de cavitação pode ser definido como a formação de bolhas ou bolsas de vapor em um escoamento líquido, devido à queda de pressão estática local a um valor menor que a pressão de vapor do líquido. Este fenômeno ocorre principalmente em sistemas hidráulicos (FOX *et al.*, 2006).

³⁵ O software PULSE da Brüel & Kjaer consiste em uma plataforma especializada para medição e análise de sinais na área de vibração e acústica (BRÜEL & KJAER, 2014).

Figura 29 - Características metrológicas do sistema de aquisição 3050-A-060

Característica	Valor
Intervalo de medição	(-5 a +5) V
Intervalo de frequências	0 a 51,2 kHz
Frequência de aquisição (máxima)	131 kHz
Número de bits do conversor A/D	2x24 bits

Fonte: adaptado de Brüel & Kjaer, 2014a.

Previamente aos ensaios de estanqueidade com o sistema proposto, a intensidade dos vazamentos em compressores herméticos foi caracterizada em termos quantitativos. Para isso, ensaios de queda de pressão foram realizados nos objetos avaliados com o intuito de associar os valores gerados nas medições com a análise visual feita por operadores do ensaio de estanqueidade em linhas de produção. Os resultados alcançados mostraram que para uma queda de pressão da ordem de 0,015 kPa/s; 0,5 kPa/s e 3 kPa/s, o vazamento em um compressor não conforme pode ser classificado como pequeno, médio e grande, respectivamente.

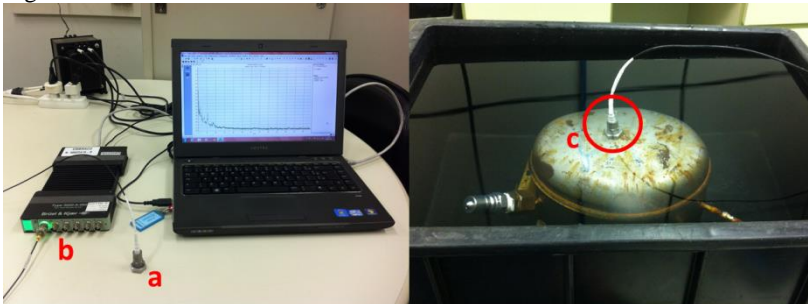
Após a caracterização do vazamento em compressores, uma bancada de ensaios, formada por um recipiente de plástico preenchido com água e pelo sistema de medição proposto, foi desenvolvida em laboratório.

O procedimento adotado para realização das medições foi, primeiramente, pressurizar o compressor hermético a 0,8 MPa³⁶, submergi-lo no recipiente em questão e, em seguida, acoplar o acelerômetro 353B04 diretamente à carcaça do objeto avaliado, por meio de uma base magnética³⁷. A figura 30 ilustra a bancada descrita.

³⁶ Máxima pressão fornecida pelo sistema de ar comprimido disponível no LABMETRO (Laboratório de Metrologia e Automatização).

³⁷ A base magnética foi utilizada com o intuito de facilitar o procedimento de acoplamento e desacoplamento do transdutor. Em referência à imersão do acelerômetro 353B04 no recipiente preenchido com água, a conexão elétrica do mesmo foi isolada conforme recomendações do fabricante (PCB PIEZOTRONICS, 2014d).

Figura 30 - Bancada de ensaios em laboratório



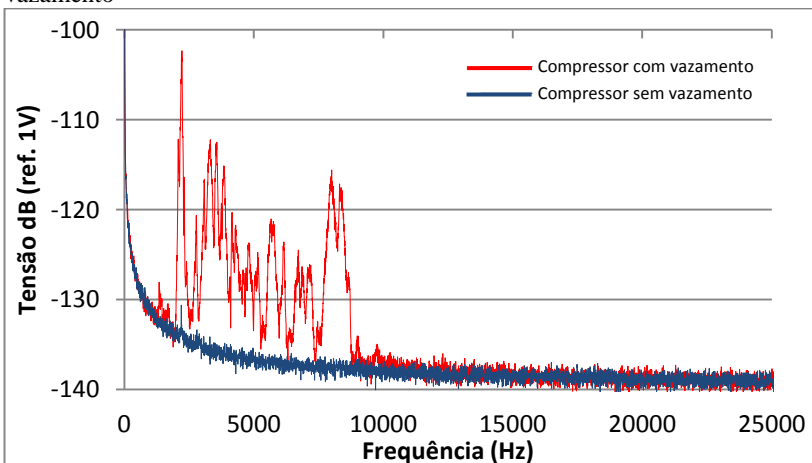
Legenda: a acelerômetro modelo 353B04;
 b sistema de aquisição modelo 3050-A-060;
 c acelerômetro acoplado ao compressor submerso.

Fonte: elaborado pelo autor.

Posteriormente à montagem da bancada, ensaios foram realizados empregando diferentes compressores com e sem descontinuidade passante na junta soldada, visando caracterizar o fenômeno físico a ser medido. Os dados adquiridos foram processados e analisados por meio do software PULSE, o qual apresentou os sinais medidos pelo acelerômetro em gráficos no domínio da frequência.

A figura 31 apresenta a resposta em frequência típica das medições em compressores com e sem vazamento. O comportamento em questão se mostrou similar para todos os ensaios realizados.

Figura 31 - Resposta em frequência típica de compressores com e sem vazamento



Fonte: elaborado pelo autor.

Com base na comparação feita, é possível observar que o vazamento na junta soldada do compressor hermético excita o transdutor em uma determinada região do espectro de frequências, principalmente no intervalo de (2 a 10) kHz. Outra característica relevante está relacionada ao valor de amplitude do sinal medido na região citada, da ordem de 1 μV , o qual corresponde a uma vibração com amplitude de aproximadamente 0,001 m/s^2 .

Desse modo, por meio dos ensaios realizados nesta etapa, a grandeza medida pelo acelerômetro, quando o transdutor está acoplado à carcaça de um compressor, pôde ser caracterizada em termos da região do espectro de frequências onde essa se manifesta e do valor de amplitude da mesma.

Apesar do sistema utilizado neste item ter apresentado um desempenho satisfatório nos ensaios realizados, o mesmo foi desconsiderado pelo fato de não ser formado por componentes específicos para a medição do fenômeno físico em questão, bem como o software disponível da Brüel & Kjaer não apresentar flexibilidade para trabalhar com as ferramentas de processamento e análise de sinais, o que dificulta o desenvolvimento de algoritmos específicos para futuras aplicações. Em vista disso, para o prosseguimento das atividades, um sistema de medição próprio foi especificado, conforme as características levantadas da grandeza em questão.

4.2 ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

Este tópico irá descrever a especificação de componentes para integrar o sistema de medição, o desenvolvimento do software, bem como avaliações preliminares e comparativas do sistema de avaliação de estanqueidade concebido.

4.2.1 Seleção do acelerômetro e do sistema de aquisição

A escolha de transdutores e sistemas de aquisição de dados, compatíveis com o fenômeno físico a ser medido, é uma etapa de extrema importância para obtenção de um desempenho adequado do processo de medição. Dessa maneira, determinadas características metrológicas dos instrumentos de medição devem ser avaliadas, de forma a atender as necessidades impostas pelo comportamento da grandeza.

No caso do acelerômetro, uma dessas características seria a sensibilidade do respectivo transdutor, a qual determina a relação entre a variação do sinal elétrico de saída e a variação correspondente do fenômeno físico de entrada (GAUTSCHI, 2012). O acelerômetro adequado para a respectiva aplicação deverá ter uma sensibilidade que garanta uma saída em tensão – quando estimulado pelo fenômeno de vibração – que contemple da melhor forma possível o intervalo de medição do sistema de aquisição.

Outra característica fundamental para a medição de vibração é o intervalo de frequências do acelerômetro, o qual define limites mínimos e máximos para a faixa de frequências onde a sensibilidade do transdutor terá um comportamento constante³⁸ (GAUTSCHI, 2012; BRÜEL & KJAER, 2014b). Em vista disso, o intervalo de frequências do acelerômetro deverá ser suficientemente amplo para compreender toda a região do espectro de frequências na qual o fenômeno físico excita o transdutor.

Ademais, é preferível que o acelerômetro escolhido seja do tipo IEPE³⁹ (*Integrated Electronic Piezoelectric*), em vista do sinal gerado pelo transdutor ser menos susceptível a ruídos presente no ambiente de medição, bem como ser possível transmitir este sinal diretamente ao sistema de aquisição de dados, dispensando, então, o emprego de amplificadores de carga (LEVINZON, 2014).

A partir das características citadas, foram avaliados transdutores disponíveis no mercado, porém não se encontrou um modelo que aliasse intervalo de frequências e sensibilidade adequados à medição da grandeza em questão. Assim, priorizou-se a seleção de um acelerômetro que atendesse ao requisito referente ao intervalo de frequências com a maior sensibilidade possível. Essa prioridade foi adotada, pois um intervalo de frequências não apropriado poderia acarretar perda de informação referente ao sinal de interesse.

³⁸ Os limites inferior e superior do intervalo de frequências podem ser determinados como as frequências onde ocorre um desvio, com valores típicos de $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ e $\pm 3\text{dB}$, da sensibilidade do acelerômetro (BRÜEL & KJAER, 2014b).

³⁹ O acelerômetro IEPE é um transdutor piezoelétrico, o qual possui um circuito condicionador de sinal integrado ao mesmo, visando converter um sinal de carga elétrica de alta impedância em um sinal de tensão de baixa impedância (PCB PIEZOTRONICS, 2014c; BRÜEL & KJAER, 2014b).

Nesse caso, o acelerômetro modelo 621B41 da PCB (PCB PIEZOTRONICS, 2014a) foi o transdutor escolhido. As características metrológicas do mesmo são apresentadas na figura 32.

Figura 32 - Características metrológicas do acelerômetro 621B41

Característica	Valor
Intervalo de medição	(-490 a +490) m/s ²
Intervalo de frequências (± 3 dB)	(0,8 a 20000) Hz
Sensibilidade	10,2 mV/(m/s ²)

Fonte: adaptado de PCB Piezotronics, 2014a.

De acordo com a figura 32, o transdutor 621B41 possui um intervalo de frequências de até 20 kHz, que o torna apto para medir o sinal de interesse. Em relação à sensibilidade do mesmo – definido em 10,2 mV/(m/s²) – o acelerômetro em questão irá gerar uma tensão de aproximadamente 10 μ V quando submetido à grandeza de mesma amplitude medida pelo transdutor do item 4.1, na ordem de 0,001 m/s².

No contexto do sistema de aquisição, determinadas características metrológicas também devem ser avaliadas para sua seleção. O dispositivo deverá possuir uma resolução apropriada para representar o sinal de tensão gerado pelo transdutor, mais especificamente os valores de amplitude das componentes em frequência localizadas na região de interesse. Como esse parâmetro indica o número de valores distintos na qual o sinal de entrada será representado, quanto melhor for a resolução do equipamento, mais sensível o mesmo será para variações de tensão da grandeza medida (PETROVIC, 2007; NATIONAL INSTRUMENTS, 2014b).

Outro fator relevante se refere à frequência de aquisição do mesmo. Para obter um processo de amostragem satisfatório, esse parâmetro do sistema de aquisição deverá ser pelo menos duas vezes maior que a componente de máxima frequência do sinal presente⁴⁰ (PROAKIS *et al.*, 1996). Além disso, o sistema de aquisição deverá ter específicas funcionalidades de um condicionador de sinal, como alimentação de transdutores IEPE e filtro anti-aliasing.

Desse modo, dos sistemas de aquisição disponíveis no mercado, foi possível definir um que se adequava aos requisitos expostos. O modelo escolhido foi o NI-9234 da *National Instruments* (NATIONAL

⁴⁰ Caso não se atenda esse requisito, o sinal amostrado não será reconstruído de forma fiel, fenômeno esse denominado *aliasing* (PROAKIS *et al.*, 1996; PETROVIC, 2007).

INSTRUMENTS, 2014), cujas características metrológicas são apresentadas na figura 33.

Figura 33 - Características metrológicas do sistema de aquisição NI-9234

Característica	Valor
Intervalo de medição	(-5 a +5) V
Intervalo de frequências	0 a 23 kHz
Frequência de aquisição (máxima)	51,2 kHz
Número de bits do conversor A/D	24 bits

Fonte: adaptado de National Instruments, 2014.

Conforme as informações mostradas na figura 33, o modelo NI-9234 possui um conversor A/D de 24 bits. Logo, a menor variação de tensão detectável da grandeza medida será de $0,59 \mu\text{V}$, tornando-o apropriado para os níveis de amplitude do sinal de interesse, na ordem de $10 \mu\text{V}$. Em relação à frequência de aquisição, o mesmo apresentou um valor de 51,2 kHz, o qual se mostrou adequado para realizar o processo de amostragem das componentes em frequência do fenômeno físico (vide figura 31). Ademais, o dispositivo em questão é capaz de alimentar transdutores IEPE acoplados ao mesmo, além de possuir um filtro anti-aliasing integrado.

Entretanto, como o sistema de aquisição selecionado apresenta um intervalo de medição de (-5 a +5) V, os valores de tensão gerados pelo acelerômetro escolhido, ao medir a vibração em compressores não conformes, contemplariam somente uma pequena parcela do respectivo intervalo, não explorando todo o potencial do sistema de aquisição. Para aprimorar o desempenho do processo de medição, introduziu-se um condicionador de sinal modelo 482C16 da PCB (PCB PIEZOTRONICS, 2014b), visando amplificar o sinal elétrico gerado pelo transdutor e, conseqüentemente, utilizar uma faixa maior de valores do intervalo de medição do sistema de aquisição⁴¹.

4.2.2 Desenvolvimento do software

Para processamento e análise de sinais, um algoritmo foi desenvolvido com o objetivo de realizar análise em frequência do fenômeno físico medido pelo transdutor, de forma semelhante ao software PULSE disponível, e apresentar a curva de resposta em frequência do mesmo em um gráfico.

⁴¹ O condicionador de sinal 482C16 também possui a funcionalidade de alimentação para transdutores IEPE.

Devido às limitações do PULSE para o desenvolvimento de algoritmos específicos para futuras aplicações, o software deste trabalho foi concebido com o emprego da linguagem de programação gráfica LabVIEW da *National Instruments*, a qual proporciona um ambiente de desenvolvimento próprio para aplicações de medição, aquisição, processamento e análise de dados (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014a). Com essa linguagem, abriu-se a possibilidade de se trabalhar, de maneira mais flexível, com diferentes ferramentas de processamento e análise dos sinais gerados pelo acelerômetro.

4.2.3 Configuração geral do sistema de medição

Como configuração final, o sistema de medição especificado tem sua arquitetura apresentada na figura 34.

Figura 34 - Configuração geral do sistema



Fonte: elaborado pelo autor

O sistema de medição projetado terá como finalidade medir a vibração em carcaças de compressores herméticos, por meio do acelerômetro modelo 621B41. O sinal elétrico gerado pelo transdutor será amplificado pelo condicionador de sinal modelo 482C16 e adquirido pelo sistema de aquisição modelo NI-9234. Em seguida, os dados serão processados, analisados e apresentados pelo algoritmo desenvolvido em LabVIEW.

4.2.4 Avaliações preliminares e comparativas do sistema de avaliação de estanqueidade desenvolvido e o do item 4.1

Após a fase de especificação, ensaios preliminares foram realizados em laboratório. O objetivo desta etapa foi avaliar o desempenho do sistema de avaliação de estanqueidade desenvolvido, bem como compará-lo ao sistema utilizado no item 4.1⁴². A figura 35 ilustra a bancada utilizada para os respectivos ensaios.

⁴² Os ensaios desta etapa foram realizados de acordo com procedimento definido no item 4.1. Para fins de comparação, foi utilizado o compressor não conforme apresentado na figura 31 do item citado.

Figura 35 - Bancada de ensaios em laboratório com sistema de avaliação de estanqueidade desenvolvido

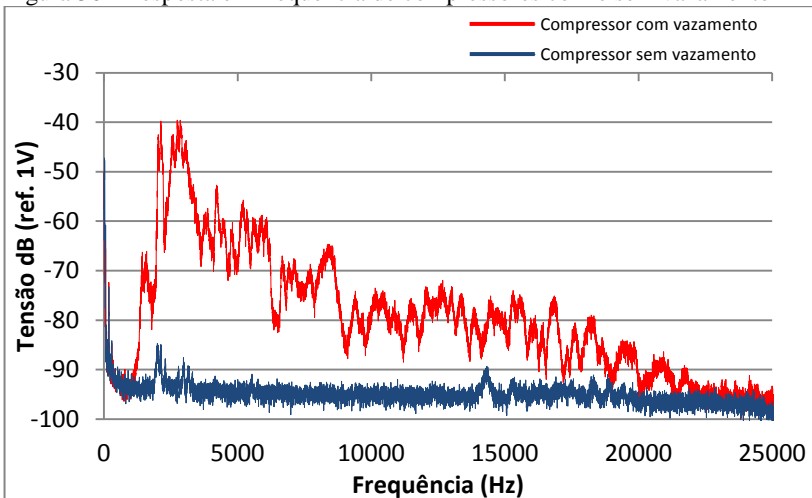


Legenda: a acelerômetro modelo 621B41;
 b amplificador modelo 482C16;
 c sistema de aquisição modelo NI-9234;
 d acelerômetro acoplado ao compressor submerso.

Fonte: elaborado pelo autor.

Os dados adquiridos foram processados e analisados por meio do algoritmo desenvolvido, o qual apresentou os sinais medidos pelo acelerômetro em gráficos no domínio da frequência, de acordo com a figura 36.

Figura 36 - Resposta em frequência de compressores com e sem vazamento



Fonte: elaborado pelo autor.

Por meio da figura 36, é possível constatar que o sistema de avaliação de estanqueidade desenvolvido foi capaz de diferenciar os respectivos compressores com um desempenho superior ao do sistema empregado no item 4.1. Verifica-se que a diferença dos valores de amplitude entre as curvas de resposta em frequência, relacionadas aos compressores com e sem descontinuidade passante, se mostrou mais evidente. Ademais, foi observado um maior intervalo de frequências excitadas pelo fenômeno físico, ao analisar o espectro de frequências. Ressalta-se que o efeito da incerteza instrumental pode ser desprezado, conforme descrição feita no Apêndice B.

Em vista disso, a decisão de descartar o sistema de medição do item 4.1 e especificar um próprio para a aplicação pôde ser corroborada com os resultados apresentados. O respectivo sistema se mostra favorável não só pela possibilidade de desenvolver algoritmos específicos para futuras aplicações e possuir um custo mais baixo, mas também pelo grupo de trabalho ter maior experiência com a linguagem LabVIEW.

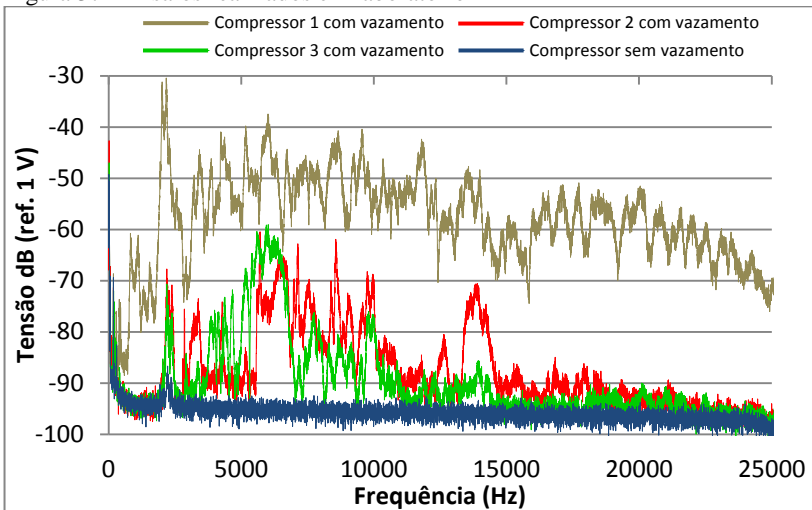
4.3 ANÁLISE DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE EM LABORATÓRIO E FÁBRICA

Nesta etapa do trabalho, foram separadas amostras de compressores não conformes para ensaios em laboratório e, posteriormente, em fábrica. O principal objetivo foi comparar o desempenho do sistema de avaliação de estanqueidade nestes dois ambientes distintos e avaliar os resultados alcançados.

4.3.1 Ensaios em laboratório

Para o início das atividades, uma bancada foi preparada, e ensaios realizados de acordo com os procedimentos descritos no item 4.2.4. Os resultados alcançados em três amostras, as quais representaram comportamento típico de compressores não conformes, foram comparadas ao de um compressor sem vazamento, como pode ser visto na figura 37.

Figura 37 - Ensaio realizado em laboratório



Fonte: elaborado pelo autor.

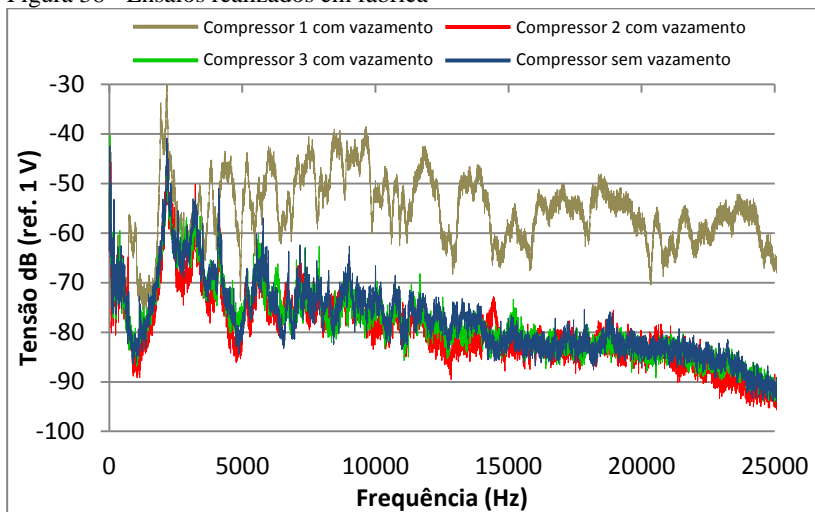
Conforme apresentado na figura 37, observa-se o comportamento distinto das curvas de resposta em frequência do acelerômetro, ao comparar os resultados dos ensaios entre os três compressores não conformes e o sem vazamento. Em vista disso, o sistema de avaliação de estanqueidade mostrou-se apto a identificar vazamentos no respectivo produto em laboratório, reiterando os resultados apresentados no item 4.2.4.

Ademais, é possível verificar que as curvas de resposta em frequência referentes aos três compressores com vazamento apresentaram diferenças entre si, as quais estão diretamente relacionadas à intensidade do vazamento nos respectivos compressores avaliados.

4.3.2 Ensaio em fábrica

Após o ciclo de medições em laboratório, a bancada correspondente foi transferida para a fábrica, e ensaios foram realizados neste ambiente, utilizando-se os mesmos compressores do item anterior. As curvas de resposta em frequência do transdutor, referentes às medições nas três amostras representativas de compressores não conformes, bem como de um compressor sem vazamento, são apresentadas na figura 38.

Figura 38 - Ensaio realizado em fábrica



Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com a figura 38, pode-se verificar que a distinção entre as curvas de resposta em frequência do acelerômetro, nos casos de compressores com e sem vazamento, não se mostraram tão evidentes quanto aos ensaios realizados em laboratório. Por esse motivo, somente o compressor 1 pôde ser identificado como um não conforme no ambiente fabril.

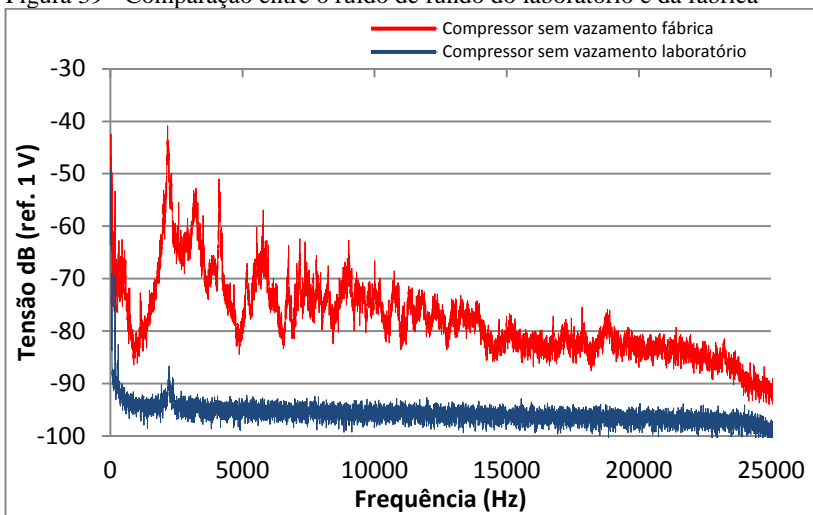
Deve-se ressaltar que, para garantir equivalência nas condições de ensaio referentes aos compressores herméticos, as medições realizadas no laboratório e na fábrica foram feitas em um curto intervalo de tempo. Assim, eliminou-se a possibilidade de ocorrer alterações do vazamento presente nos compressores avaliados, o que poderia acarretar em um comportamento distinto da resposta em frequência do acelerômetro nos respectivos ambientes.

4.3.3 Resultados alcançados

Os resultados alcançados nos ensaios em laboratório e em fábrica apresentaram uma conjuntura distinta. Enquanto o sistema de avaliação de estanqueidade obteve excelente desempenho no primeiro, em termos de identificação de compressores não conformes, o mesmo não repetiu essa eficácia quando transferido para o ambiente fabril.

Este cenário provavelmente foi ocasionado pela presença de ruídos – de origem sonora, estrutural (vibração) e eletromagnética – os quais prejudicaram o desempenho do processo de medição na fábrica. Para comprovar esta afirmação, compararam-se as medições realizadas nos respectivos locais, empregando compressores sem vazamento, com objetivo de analisar o ruído de fundo⁴³ dos mesmos, conforme apresentado na figura 39.

Figura 39 - Comparação entre o ruído de fundo do laboratório e da fábrica



Fonte: elaborado pelo autor.

Com base na comparação feita, as curvas de resposta em frequência do acelerômetro apresentaram comportamentos divergentes entre o ambiente de laboratório e o de fábrica. Os ruídos presentes no ambiente fabril excitaram o transdutor com elevada intensidade em uma extensa região do espectro de frequências, os quais limitaram a capacidade do sistema utilizado e, conseqüentemente, prejudicaram a identificação de compressores não conformes.

Diante do exposto, pode-se afirmar que o sistema de avaliação de estanqueidade, quando situado em laboratório, atingiu o objetivo principal deste trabalho, em termos de identificação de compressores

⁴³ No escopo deste trabalho, o termo ruído de fundo é definido como a resposta do acelerômetro frente a fontes de ruído do meio onde o transdutor está situado.

com vazamento. Entretanto, torna-se necessário aprimorar o desempenho do respectivo sistema no ambiente fabril, visando alcançar o mesmo propósito. Deste modo, o próximo tópico deste capítulo descreverá uma proposta para esse fim.

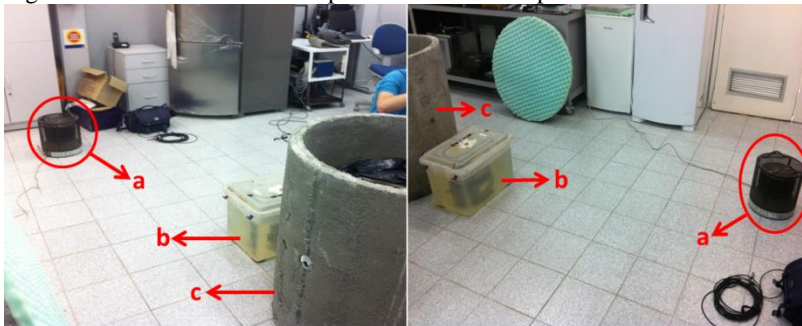
4.4 MELHORIAS PARA O SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE EM AMBIENTE FABRIL

Conforme os resultados apresentados no item 4.3, o sistema de avaliação de estanqueidade demonstrou ser susceptível a ruídos de origem sonora, estrutural e eletromagnética, quando o mesmo foi alocado em fábrica. Para contornar os obstáculos referentes as duas primeiras formas de ruído, realizou-se a montagem de uma cabine acústica⁴⁴, de caráter experimental, com o objetivo de reduzir a transmissão de energia sonora e vibratória do ambiente externo para o interior da estrutura, local esse onde foi posicionado o conjunto acelerômetro/compressor. A montagem da cabine em questão é descrita no Apêndice C deste trabalho.

Após a etapa de montagem, uma bancada de ensaios foi preparada em laboratório, a qual era formada por uma fonte sonora de referência modelo 4204 da Brüel & Kjaer (BRÜEL & KJAER, 2014c), por um recipiente de plástico – semelhante ao utilizado nos itens anteriores, pela cabine acústica concebida e pelo sistema de medição especificado neste capítulo. Uma visão geral da respectiva bancada de ensaios pode ser vista na figura 40.

⁴⁴ Cabine acústica pode ser definida como um ambiente fechado, o qual envolve completamente o objeto, isolando-o de uma fonte de ruído situada externamente (BISTAFA, 2011).

Figura 40 - Bancada de ensaios para avaliar o desempenho da cabine acústica



Legenda: a fonte sonora de referência;
 b recipiente de plástico;
 c cabine acústica.

Fonte: elaborado pelo autor

Para avaliar o desempenho da estrutura em questão, ensaios foram realizados empregando a fonte sonora de referência, com a finalidade de simular ruídos sonoros presentes no ambiente fabril. O acelerômetro modelo 621B41 foi acoplado diretamente à carcaça de um compressor sem vazamento, conjunto este imerso em dois locais preenchidos com água: recipiente de plástico e compartimento interno da cabine acústica.

A figura 41 ilustra o conjunto acelerômetro/compressor no recipiente de plástico e no compartimento interno da cabine acústica.

Figura 41 - Acelerômetro acoplado ao compressor submerso no recipiente de plástico (a) e na cabine acústica (b)



(a)

(b)

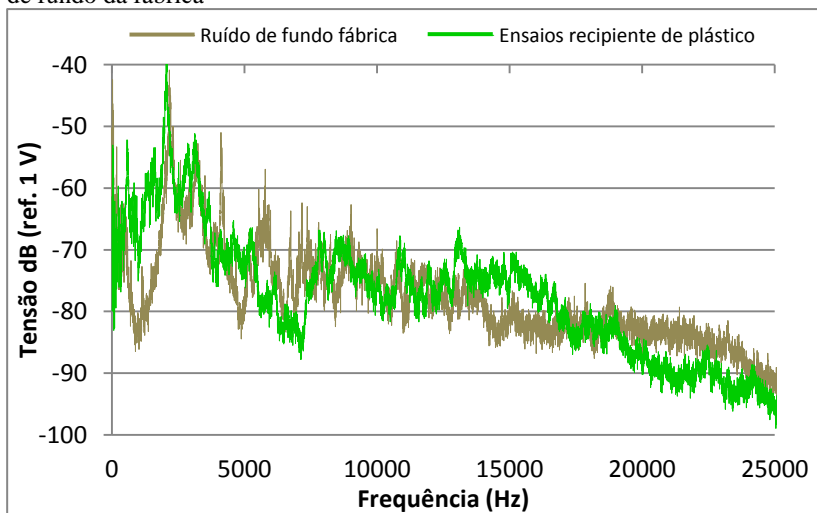
Legenda: a conjunto acelerômetro/compressor submerso no recipiente de plástico;
 b conjunto acelerômetro/compressor submerso no interior da cabine.

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos nas medições realizadas – quando o acelerômetro está acoplado ao compressor no interior do recipiente de plástico e no compartimento interno da cabine acústica – foram comparados ao ruído de fundo do laboratório e da fábrica, os quais estão descritos no item 4.3 (vide figura 39).

A figura 42 apresenta a comparação entre a resposta em frequência do acelerômetro nas medições com o recipiente de plástico e o ruído de fundo da fábrica.

Figura 42 - Comparação entre as medições com recipiente de plástico e o ruído de fundo da fábrica

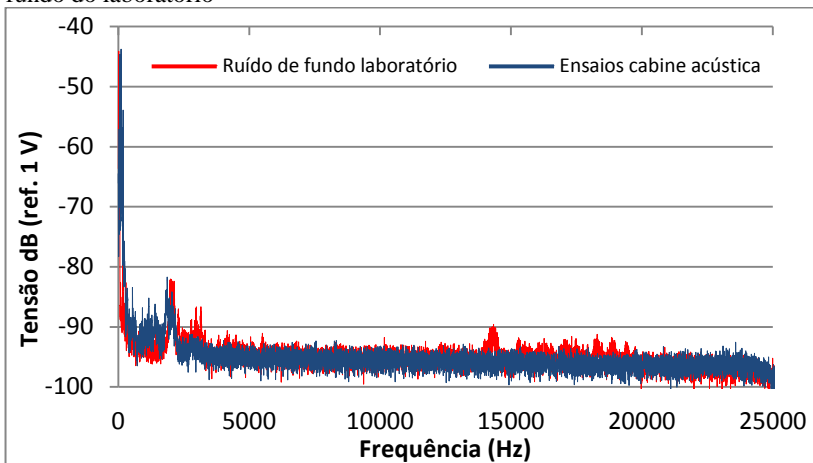


Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com a figura 42, é possível observar que, ao comparar os resultados obtidos em fábrica com os alcançados nesta etapa empregando o recipiente de plástico, o ruído sonoro gerado pela fonte excitou o acelerômetro com uma intensidade semelhante àquela encontrada no ambiente fabril. Entretanto, não foi possível representar fielmente as condições de ensaio estabelecidas nesse local, pois o ruído de fundo da fábrica também possui componentes de origem estrutural e eletromagnética.

Outro ponto de destaque refere-se à comparação entre a resposta do acelerômetro posicionado no interior da cabine acústica e o ruído de fundo do laboratório, conforme apresentado na figura 43.

Figura 43 - Comparação entre as medições com a cabine acústica e o ruído de fundo do laboratório



Fonte: elaborado pelo autor.

Com base na figura 43, verifica-se que a estrutura em questão se mostrou apropriada para atenuar, suficientemente, o ruído sonoro gerado pela fonte de referência. Dessa forma, a resposta em frequência do acelerômetro no interior da cabine teve um comportamento equivalente à resposta do respectivo transdutor em laboratório, local esse onde o sistema de avaliação de estanqueidade obteve excelente desempenho na identificação de compressores não conformes.

Diante dos resultados alcançados, o emprego da cabine acústica se mostrou muito promissor para as medições em fábrica, pela atuação da mesma na redução do ruído incidente. Contudo, a estrutura em questão foi submetida somente a ruídos de origem sonora, sendo necessário, então, avaliá-la diretamente no ambiente fabril, pois o desempenho da mesma poderá ser prejudicado pela presença de ruídos de origem tanto estrutural⁴⁵ quanto eletromagnética.

Salienta-se que o objetivo da cabine concebida foi apenas avaliar a capacidade dessa em atenuar o ruído proveniente do ambiente fabril. No âmbito deste trabalho, não se desejou realizar a concepção de uma cabine acústica ideal, pois não haveria tempo hábil para um estudo aprofundado sobre a intensidade do ruído no respectivo local e para um projeto dimensionado visando sua aplicação em linhas de produção.

⁴⁵ Embora a cabine concebida possua isoladores de vibração, não se sabe o quão intensa é a parcela de ruído estrutural no ambiente fabril, a ponto de influenciar as medições realizadas no respectivo local.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um conceito de sistema de avaliação de estanqueidade para vasos de pressão de pequeno porte.

Para tanto, realizou-se um levantamento bibliográfico de métodos de ensaios não destrutivos, com ênfase nos que possuem capacidade de identificar a presença de vazamentos em vasos de pressão. Conforme descrito no capítulo 2, o ensaio de vazamento demonstrou ser o método mais propício para este fim, em razão das limitações inerentes aos outros métodos analisados, bem como ter o propósito fundamental de identificar descontinuidades passantes em recipientes estanques.

Por meio de normas e referências literárias da área de ensaios não destrutivos, selecionaram-se quatro técnicas do método em questão, que proporcionam uma avaliação qualitativa da estanqueidade de vasos de pressão. Empregando o compressor hermético como estudo de caso, ensaios realizados em laboratório mostraram que as técnicas da termografia por emissão padrão, da variação de pressão por queda de pressão e da bolha por imersão apresentaram grande potencial para identificação de vazamentos no objeto avaliado, enquanto a técnica do espectrômetro de massa por acumulação já é uma realidade em linhas de produção de compressores herméticos. Entretanto, analisando vantagens e desvantagens para a aplicação em ambiente fabril e as condições de contorno estabelecidas, as técnicas da termografia por emissão padrão e da variação de pressão por queda de pressão apresentaram limitações para a escolha das mesmas, como a dificuldade em determinar um perfil térmico padrão da carcaça dos compressores e a elevada susceptibilidade às condições de ensaio no ambiente fabril, respectivamente. No que se refere à técnica do espectrômetro de massa por acumulação, a implantação dessa em linhas existentes demandaria investimento muito elevado, pela drástica alteração necessária no chão-de-fábrica e pelo alto custo para aquisição de equipamentos.

Logo, a técnica da bolha por imersão se mostrou a mais propícia para a aplicação em questão, devido às limitações das demais alternativas e por satisfazer as condições de contorno estabelecidas neste trabalho, como a não elevação do tempo de ciclo da linha de produção e pelo custo relativamente baixo para aquisição de equipamentos e para alterações da linha no chão-de-fábrica.

Embora a respectiva técnica determine que a identificação de bolhas, as quais representam a presença de vazamentos, seja estritamente visual, definiu-se a necessidade de automatizar este processo, com o objetivo de elevar a confiabilidade do mesmo. Diante deste cenário, diferentes abordagens se encontram disponíveis para identificar o vazamento por meio da técnica da bolha por imersão. Dentre essas, destacou-se o emprego de uma câmera e de um sistema de medição com hidrofone e outro com acelerômetro; tais soluções apresentaram resultados promissores em ensaios empregando compressores não conformes. Apesar do potencial mostrado, o uso tanto da câmera quanto do hidrofone evidenciou algumas dificuldades, como susceptibilidade às condições do ambiente – iluminação no local de ensaio e oscilação da água – e a ruídos eletromagnéticos, respectivamente. Optou-se, então, pelo sistema de medição com acelerômetro devido às limitações encontradas nas outras abordagens, bem como por apresentar uma menor dificuldade para implantação futura em fábrica.

Dessa forma, após estudos a respeito das propriedades da vibração da carcaça de compressores, provocada pela presença de vazamentos na estrutura em questão, um sistema de medição próprio foi especificado ao selecionar componentes cujas características metrológicas satisfazem as necessidades impostas pelo comportamento do fenômeno físico medido. Posteriormente, o sistema de avaliação de estanqueidade, baseado nos conceitos da técnica da bolha por imersão e no sistema de medição especificado, teve seu desempenho avaliado, tanto em laboratório quanto em fábrica, para detecção de vazamentos em compressores herméticos. Por meio de ensaios realizados, os resultados alcançados nos respectivos locais apresentaram uma conjuntura distinta. O sistema de avaliação de estanqueidade mostrou excelente desempenho quando situado em laboratório. Porém, o mesmo não repetiu esse comportamento no ambiente fabril, devido à presença de ruídos de origem sonora, estrutural e eletromagnética, os quais prejudicaram o processo de medição em fábrica.

Em vista disso, para aprimorar o desempenho do sistema de avaliação de estanqueidade e tornar viável sua implantação no ambiente fabril, foi proposta a concepção de uma cabine acústica, de forma a reduzir a transmissão de energia sonora e vibratória do ambiente externo para o interior da mesma. Ensaios realizados em laboratório mostraram a aptidão da cabine acústica para atenuar de forma efetiva o ruído sonoro gerado por uma fonte de referência, a qual foi empregada para simular as condições do ambiente em fábrica. Entretanto, devido às

limitações de tempo para realização deste trabalho, não foi possível avaliar a estrutura concebida no ambiente fabril, etapa essa necessária para viabilizar o sistema de avaliação de estanqueidade no local correspondente.

De uma forma geral, o sistema de avaliação de estanqueidade desenvolvido mostrou ser uma alternativa concreta para ser implantada nas linhas de produção de compressores herméticos, principalmente quando se analisa os resultados alcançados em laboratório. Com o emprego de uma estrutura com o intuito de isolar o conjunto acelerômetro/compressor do ambiente fabril, como a cabine acústica concebida, esperam-se resultados promissores nos ensaios a serem feitos no chão-de-fábrica. Portanto, de uma forma geral, o trabalho em questão alcançou de maneira satisfatória o objetivo estabelecido.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste tópico estão apresentados fatores que precisam ser explorados para alcançar melhor desempenho do atual sistema de avaliação de estanqueidade em fábrica. Ademais, aspectos relevantes a serem estudados para a integração do respectivo sistema às linhas de produção também estão elencados e descritos, conforme segue:

- Visto que o foco do presente trabalho foi direcionado somente à medição da vibração, sugere-se um estudo aprofundado sobre o modo como o vazamento excita a carcaça de compressores herméticos.
- Para atestar a viabilidade em fábrica do sistema de avaliação de estanqueidade em conjunto à cabine acústica, torna-se de suma importância a realização de ensaios frente ao respectivo local, bem como a análise dos resultados alcançados;
- Sugere-se um estudo aprofundado sobre a presença de ruídos eletromagnéticos no ambiente fabril, além de alternativas para minimizar a influência da mesma em relação ao processo de medição;
- Para aprimorar o desempenho do sistema de avaliação de estanqueidade, deve-se realizar um estudo aprofundado sobre as ferramentas de processamento e análise de sinais disponíveis, visando o emprego da mais adequada para aplicação em questão.

- Como os resultados alcançados foram analisados apenas de forma qualitativa, isto é, distinguindo compressores conformes dos não conformes, propõe-se a realização de uma análise quantitativa dos mesmos, com o intuito de determinar o grau de vazamento presente em cada compressor avaliado, bem como definir o menor nível de detecção do sistema de avaliação de estanqueidade desenvolvido;
- Após a validação em fábrica, torna-se necessária a integração do sistema de avaliação de estanqueidade às linhas de produção. Como a cabine acústica deste trabalho foi concebida de forma experimental, sugere-se um estudo mais aprofundado do tema, visando desenvolver uma cabine específica para a aplicação em questão.
- Embora a câmara e o hidrofone tenham sido desconsiderados neste trabalho, acredita-se no potencial de tais soluções para identificar o vazamento por meio da técnica da bolha por imersão. Deste modo, recomenda-se estudo detalhado das alternativas em questão para aplicações futuras.

REFERÊNCIAS

ABERKO. **Equipamentos industriais:** Vasos de pressão verticais. Disponível em: <
<http://www.aberko.com.br/produtos/vasos-de-pressao-tanques-hidropneumaticos> >. Acesso em: 09/06/2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15404:** Ensaio não destrutivo – Emissão acústica – Detecção e localização de vazamento, 2013b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15424:** Ensaio não destrutivo – Termografia – Terminologia, 2006.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15571:2013:** Ensaio não destrutivo – Estanqueidade – Detecção de vazamentos, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15572:** Ensaio não destrutivo – Termografia – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos, 2013a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16030:** Ensaio não destrutivo – Partículas magnéticas – Detecção de descontinuidades, 2012b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16079-1:** Ensaio não destrutivo – Terminologia. Parte 1: Descontinuidades em juntas soldadas, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 330:** Ensaio não destrutivo – Ensaio por ultrassom – Princípios gerais, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 334:** Ensaio não destrutivo – Líquidos penetrantes – Detecção de descontinuidades, 2012a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM ISO 9712:2014:** Ensaio não

destrutivos - Qualificação e certificação de pessoal em END, 2014a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NR - 13**: Caldeiras, vasos de pressão e tubulações. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: < [http://portal.mte.gov.br/data/files/FF80808145B26962014600A0AF41169F/NR-13%20\(Atualizada%202014\).pdf](http://portal.mte.gov.br/data/files/FF80808145B26962014600A0AF41169F/NR-13%20(Atualizada%202014).pdf) >. Acesso em: 20/05/2014.

ALMEIDA, E. G. R. **Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados compósitos sólidos de matriz polimérica fortalecida com fibras de carbono**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2010.

ALTOÉ, L.; OLIVEIRA FILHO, D. **Termografia infravermelha aplicada à inspeção de edifícios**. Acta Tecnológica, v. 7, p.55-59, 2012.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI, 2011.

ANDREUCCI, R. **Líquidos Penetrantes**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI, 2013a.

ANDREUCCI, R. **Partículas Magnéticas**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI, 2009.

ANDREUCCI, R. **Radiologia Industrial**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI, 2013b.

ASME - THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Boiler and Pressure Vessel Code: An International Code - Section XIII – Pressure Vessels**. New York, 2010.

ASME - THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Boiler and Pressure Vessel Code: An**

International Code - Section V – Non Destructive Examination. New York, 2010a.

ASNT - THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. **Introduction to nondestructive testing**. Disponível em: < <https://www.asnt.org/MajorSiteSections/NDT-Resource-Center/Introduction%20to%20Nondestructive%20Testing> >. Acesso em: 25/05/2014

ASNT - THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. **Recommended Practice No. SNT-TC-1A**. Columbus, 2006.

ASSERTIVO. **Vasos de pressão cilíndricos**. Disponível em: < <http://www.assertivo.com/#!/VASOS-DE-PRESSO-zoom/ch6q/i7d3e> >. Acesso em: 08/06/2014.

ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2930-13**: Standard Practice for Pressure Decay Leak Test Method, 2013.

ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM E432-91**: Standard Guide for Selection of a Leak Testing Method, 2011.

ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM E515-11**: Standard Practice for Leaks Using Bubble Emission Techniques, 2011a.

BAGAVATHIAPPAN, S.; LAHIRI, B. B.; SARAVANAN, T.; PHILIP, J.; JAYAKUMAR, T. **Infrared thermography for condition monitoring – A review**. Infrared Physics & Technology, vol. 60, p.35-55, 2013.

BEN-MANSOUR, R.; HABIBI, M. A.; KHALIFA, A.; YOUCEF-TOUMI, K.; CHATZIGEORGIOU, D. **Computational fluid dynamic of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction**. Computers & Fluids, vol. 57, p. 110-123, 2012.

BERGOGLIO, M.; MARI, D. **Leak rate metrology for the society and industry**. Measurement, vol. 45, p. 2434-2440, 2012.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2 ed. Blucher, 2011.

BOYD, J. W. R.; VARLEY, J. **The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes**. Chemical Engineering Science, vol. 56, p. 1749-1767, 2001.

BRAY, D. E.; STANLEY, R. K. **Nondestructive Evaluation: A tool in design, manufacturing and service**. CRC Press, 1996

BRÜEL & KJAER. **LAN-XI Data Acquisition Hardware**. Disponível em: < <http://www.bksv.com/doc/bp2215.pdf> >. Acesso em: 28/07/2014a.

BRÜEL & KJAER. **Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers: Theory and Application Handbook**. Disponível em: < <http://www.bksv.com/doc/bb0694.pdf> >. Acesso em: 18/08/2014b.

BRÜEL & KJAER. **PULSE analyzers and solutions**. Disponível em: < <http://bksv.com/doc/bf0209.pdf> >. Acesso em: 23/07/2014.

BRÜEL & KJAER. **Reference Sound Source – Type 4204**. Disponível em: < <http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/sound-sources/reference-4204?tab=overview> >. Acesso em: 28/08/2014c.

BURGESS, N.T. **Quality assurance of welded construction**. 2 ed. Barking: Elsevier science publishers LTD, 1989.

CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 13184:2001**: Non-destructive testing – Leak testing – Pressure change method, 2001a.

CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 13185:2001**: Non-destructive testing – Leak testing – Tracer gas method, 2001.

CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1593:1999**: Non-destructive testing – Leak testing – Bubble emission techniques, 1999a.

CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1779:1999**: Non-destructive testing – Leak testing – Criteria for method and technique selection, 1999.

CHATTOPADHYAY, S. **Pressure Vessels**: Design and Practice. CRC Press, 2004.

CN INDUSTRIAL Co., Ltd. **Spherical Pressure Vessel Projects**. Disponível em: <
<http://www.cnipvc.com/project/category/4/spherical-pressure-vessel-projects.html> >. Acesso em: 12/06/2014.

CORTIZO, E. C.; BARBOSA, M. P.; SOUZA, L. A. C. **Estado da arte da termografia**. Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, v. 2, p.158-193, 2008.

COSMO INSTRUMENTS. **COSMO Air Leak Tester model LS-1822A**. Disponível em: <
http://www.waveelectronics.com.my/catalog/manuals/LS-1822-Air_Leak_Tester.pdf >. Acesso em: 14/07/2014.

COSTA, J. G. F. D. **Automação de ensaios de compressores de refrigeração operando sob condições extremas**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

DUDIC, S.; IGNJATOVIC, I.; SESLIJA, D.; BLAGOJEVIC, V.; STOJILKOVIC, M. **Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography**. Measurement, vol. 45, p.1689-1694, 2012.

DYTRAN INSTRUMENTS. **Specifications model 3006A**. Disponível em: <
http://www.dytran.com/Assets/PDF/3006A_ds.pdf >. Acesso em: 17/07/2014.

ELLENBERGER, J. P. **Pressure vessels**: The ASME Code Simplified. 8 ed. New York: McGraw Hill Professional, 2004.

FLIR. **Technical Specifications**. Disponível em: <
[http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_APAC/Products/Product_Literture/T400_Datasheet%20APAC\(1\).pdf](http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_APAC/Products/Product_Literture/T400_Datasheet%20APAC(1).pdf) >. Acesso em: 10/07/2014.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6 ed. LTC, 2006.

FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications**. 4 ed. Springer International Publishing, 2010.

GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; MUGGLETON, J. M.; HUNAIDI, O. **On the selection of acoustic/vibration sensors for leak detection in plastic water pipes**. Journal of Sound and Vibration, vol. 283, p. 927-941, 2005.

GARCIA, F. M. **Caracterização vibroacústica de vazamentos a partir de uma seção de duto para aplicações na indústria de petróleo e gás**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

GAUTSCHI, G. **Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers**. Springer Berlin Heidelberg, 2002.

GE, N.; PENG, G.; JIANG, M. **Fuzzy clustering of infrared images applied in air leak localization**. SPIE Proceedings, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, vol. 7383, 2009.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 1 ed. Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.

HELLIER, C. J. **Handbook of Nondestructive Evaluation**. McGraw Hill Professional, 2001.

IETKA, M. F. **Avaliação da soldagem TIG no selamento de compressores herméticos para refrigeração**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

JACKSON JR., C. N.; SHERLOCK, C. N. **Nondestructive Testing Handbook Volume 1: Leak Testing**. 3 ed. American Society for Nondestructive Testing, 1998.

KIM, B. G.; LEE, D. G. **Leakage characteristics of the glass fabric composite barriers of LNG ships**. Composite Structures, vol. 86, p. 27-36, 2008.

KISHAWY, H. A.; GABBAR, H. A. **Review of pipeline integrity management practices.** International Journal of Pressure Vessel and Piping, vol. 87, p. 373-380, 2010.

KNOWLES ELECTRONICS. **Waterproof microfone MR-23151.** Disponível em: <
<http://www.knowles.com/eng/content/download/5268/74296/version/2/file/MR-23151-000.pdf> >. Acesso em: 15/07/2014.

KOIZUMI, K.; JONES, L.; KRYLOV, V; NELSON, D. E.; ONOZUKA, M. **ITER R&D: Vacuum Vessel and In-Vessel Components: Vacuum Vessel.** Fusion Engineering and Design, vol. 55, p. 193-203, 2001.

LANCASTER, J. F. **Failures of boilers and pressure vessels: Their causes and prevention.** International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 1, p.155-170, 1973.

LAZZERO TECHNOLOGIE. **Compressores Herméticos.** Disponível em: <
https://www.lazzero.com/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=97&lang=pt >. Acesso em: 15/07/2014.

LEIGHTON, T. G.; FAGAN, K. J.; FIELD, J. E. **Acoustic and photographic studies of injected bubbles.** European Journal of Physics, vol. 12, p. 77-85, 1991.

LEIGHTON, T. G.; WALTON, A. J. **An experimental study of the sound emitted from a gas bubbles in a liquid.** European Journal of Physics, vol. 8, p. 98-104, 1986.

LEVINZON, F. **Piezoelectric Accelerometers with Integral Electronics.** Springer International Publishing, 2014.

LEWIS, A. W.; YUEN, S. T.; SMITH, A. J. **Detection of gas leakage from landfills using infrared thermography – applicability and limitations.** Waste Management & Research, vol. 21, p.436-447, 2003.

LOGANATHAN, T.; NAIK, S. S.; RAMADASAN, P.; CHAKRABORTI, A.; KHUMAR, P. **Experience of helium leak testing on large size main reactor vessel for 500 MWe prototype fast breeder reactor.** Proceedings of the National

Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation, p. 204-209, 2009.

MALDAGUE, X. P. **Introduction to NDT by active infrared thermography**. Materials Evaluation, vol. 60, p.1060-1073, 2002.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MARTINS, F. J. S. **Análise da possibilidade de crescimento subcrítico de descontinuidades durante a realização de testes hidrostáticos em vasos de pressão e seus possíveis efeitos**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

MCGOONNAGLE, W. J. **Quality control and nondestructive testing in reactor pressure vessel fabrication**. Nuclear Structural Engineering, vol. 2, p. 293-300, 1965.

MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G. M. **Recent advances in the use of infrared thermography**. Measurement Science and Technology, vol. 15, 2004.

MILLER, S. E.; GARDINER, M. A.; WARD, C. R. **In-line inspections detects early cracking on Canadian crude-oil line**. Oil & Gas Journal, 1998.

MIX, P. E. **Introduction to Nondestructive Testing: a training guide**. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

MOSS, D. R. **Pressure vessels design manual: illustrated procedures for solving major pressure vessels design problems**. 3 ed. Burlington: Gulf professional publishing, 2004.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Glossário técnico de aquisição de dados**. Disponível em: < <http://www.ni.com/white-paper/13493/pt/> >. Acesso em: 09/08/2014b.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI 9234 – Operating instructions and specifications**. Disponível em: < <http://www.ni.com/pdf/manuals/374238c.pdf> >. Acesso em: 02/08/2014.

NATIONAL INSTRUMENTS. **O que é LabVIEW.**

Disponível em: < <http://www.ni.com/webcast/3187/pt> >. Acesso em: 10/08/2014a.

NESS, S.; SHERLOCK, C. N. **Nondestructive Testing Handbook Volume 10: Overview.** 2 ed. American Society for Nondestructive Testing, 1996.

NICHOLS, R. W. **The assessment and assurance of pressure vessel reliability.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 189, p. 391-404, 1975.

PAL, M.; DIXON, N.; FLINT, J. **Detecting & Locating in Water Distribution Polyethylene Pipes.** Proceedings of the World Congress on Engineering, vol. 2, 2010.

PALANIAPPAN, M.; SUBBARATNAM, R.; BASKARAN, A.; CHANDRAMOHAN, R. **The role of non-destructive examination in improving the quality for pipeline and pressure vessels – case studies.** International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 73, p.33-37, 1997.

PALANIAPPAN, M.; THOMAS, P. V.; RAO, B. S. C.; CHANDRAMOHAN, R. **Mass spectrometer helium leak testing of large volume pipelines and pressure vessels of a nuclear power plant.** International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 73, p.39-44, 1997a.

PALMIERI, D.; SCHÄFER, F; HIERMAIER, S.; LAMBERT, M. **Numerical simulation of non-perforating impacts on gas-shielded pressure vessels.** International Journal of Impact Engineering, vol. 26, p. 591-602, 2001.

PAYÃO FILHO, J. C.; SCHMIDT, W.; SCHRÖDER, G. **Fundamentos de ensaio de vazamento e estanqueidade.** 1 ed. Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2000a.

PAYÃO FILHO, J. C.; SCHMIDT, W.; SCHRÖDER, G.; PAULY, F. **Seleção do método de estanqueidade.** Soldagem & Inspeção, vol. 6, p. 9-16, 2000.

PCB PIEZOTRONICS. **General Signal Conditioning Guide.**

Disponível em: <

http://www.pcb.com/techsupport/docs/pcb/PCB-G0001G-1209_Lowres.pdf >. Acesso em: 18/08/2014c.

PCB PIEZOTRONICS. Introduction to Piezoelectric

Accelerometers: Cables and Connections. Disponível em: < https://www.pcb.com/techsupport/tech_accel.aspx >. Acesso em: 18/08/2014d.

PCB PIEZOTRONICS. Model 353B04. Disponível em: < http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/products/Manuals/353B04.pdf >. Acesso em: 27/07/2014.

PCB PIEZOTRONICS. Model 482C16. Disponível em: < http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/products/Manuals/482C16.pdf >. Acesso em: 06/08/2014b.

PCB PIEZOTRONICS. Model 621B41. Disponível em: < http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/IMI/products/Manuals/621B41.pdf >. Acesso em: 03/08/2014a.

PETERS, P. H.; STONE, E. E.; BIALOUS, A. J. **Leakage Testing Handbook.** National Aeronautics and Space Administration, 1969.

PETROVICIC, S. A. B. **Proposta de arquitetura do sistema de automação aplicado a ensaios de desempenho de compressores herméticos de refrigeração.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. **Digital Signal Processing: Principles, algorithms and Applications.** 3 ed. Prentice-Hall, 1996.

PULLACORT, S. K. **Practical guide to pressure vessel manufacturing.** CRC Press, 2002.

RAJ, B.; JAYAKUMAR, T. **NDE methodologies for characterisation of defects, stresses and microstructures in pressure vessels and pipes.** International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 73, p.133-146, 1997.

RAJ, B.; JAYAKUMAR, T.; THAVASIMUTHU, M. **Practical Non-destructive Testing.** Woodhead Publishing, 2002.

RAJ, B.; MUKHOPADHYAY, C. K.; JAYAKUMAR, T. **Frontiers in NDE research nearing maturity for exploitation to ensure structural integrity of pressure retaining**

components. International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 83, p.322-335, 2006.

RODRÍGUEZ, F. J. L. **Detecção de defeitos em materiais cerâmicos usando termografia.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

SAMPAIO, M. V. C. **Aplicação da inspeção não intrusiva em equipamentos do sistema de dessulfurização de gás natural da plataforma de pampo.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

SCHLICKMANN, D. G. **Aprimoramento e caracterização do comportamento metrológico de uma bancada de ensaios de partida e de tombamento de compressores de refrigeração.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

SCHRÖDER, G.; PAULY, F.; PAYÃO FILHO, J. C. **Ensaio de estanqueidade a temperatura criogênica (-196° C) empregando hélio como gás rastreador.** Soldagem & Inspeção, vol. 5, p. 1-5, 1999.

SCHWEDERSKY, M. B. **Um estudo da eficiência e produtividade dos principais processos de soldagem a arco.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

SHULL, P. J. **Nondestructive Evaluation: theory, techniques and applications.** Marcel Dekker, Inc, 2001.

SOLOMON, K. A.; OKRENT, D.; KASTENBERG, W. E. **Pressure vessel integrity and weld inspection procedure.** Nuclear Engineering and Design, vol. 35, p. 87-153, 1975.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. S. **Refrigeração Industrial.** 2 ed. Edgard Blücher, 2002.

TAO, Y.; MALSHE, A. P.; BROWN; W. D. **Selective bonding and encapsulation for wafer-level vacuum packaging of**

MEMS and related micro systems. Microelectronics Reliability, vol. 44, p. 251-158, 2004.

TELLES, P. C. S. **Vasos de pressão.** 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

THOMPSON, G.; ZOLKIEWSKI, G. **An experimental investigation into the detection of internal leakage of gases through valves by vibration analysis.** Journal of Process Mechanical Engineering, vol. 211, p. 195-207, 1997.

TUSEK, J.; BOZIDAR, B.; KAMPUS, Z. **On line leak testing of welded water heaters.** Journal of Materials Processing Technology, vol. 155-156, p. 1164-1170, 2004.

VAUGHAN, R.; FARRINGTON, L. M. **Helicopter drop testing of Type B packages in UK.** Packaging, Transport, Storage and Security of Radioactive Material, vol. 18, p. 163-169, 2007.

ANEXO

CATEGORIAS DE VASOS DE PRESSÃO

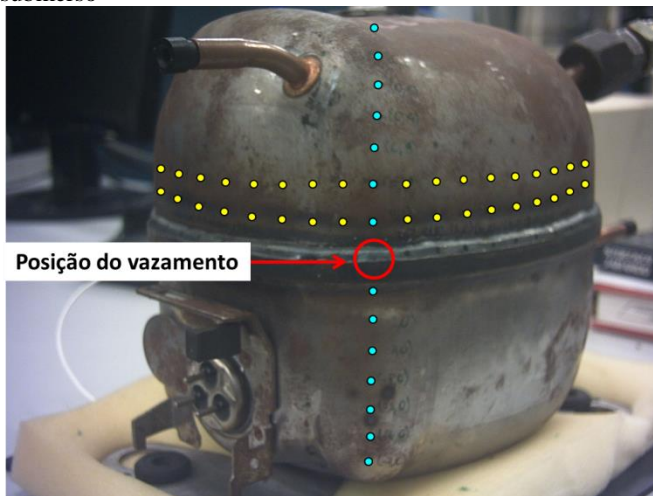
		GRUPO DE POTENCIAL DE RISCO				
		1	2	3	4	5
		P.V \geq 100	P.V < 100 P.V \geq 30	P.V < 30 P.V \geq 2,5	P.V < 2,5 P.V \geq 1	P.V < 1
CATEGORIAS						
CLASSE DO FLUIDO	A -Líquidos inflamáveis -Combustível com temperatura igual ou superior a 200°C	I	I	II	III	III
	B -Combustível com temperatura menor que 200°C	I	II	III	IV	IV
	C -Vapor de água -Gases asfixiantes simples -Ar comprimido	I	II	III	IV	V
	D -Outros fluidos não enquadrados nas classes anteriores	II	III	IV	V	V

APÊNDICE A – ESTUDO SOBRE A VIBRAÇÃO DA CARÇAÇA EM COMPRESSORES HERMÉTICOS NÃO SUBMERSOS

O presente apêndice apresenta um estudo sobre a vibração da carcaça de compressores herméticos não submersos, com o intuito de avaliar a estanqueidade dos mesmos. Para isso, um acelerômetro foi acoplado em diferentes pontos da carcaça de um compressor não conforme, o qual foi pressurizado a 0,8MPa, como um mapeamento da distribuição do respectivo fenômeno físico gerado pelo vazamento.

A figura 44 apresenta os diferentes pontos de acoplamento do acelerômetro no produto em questão.

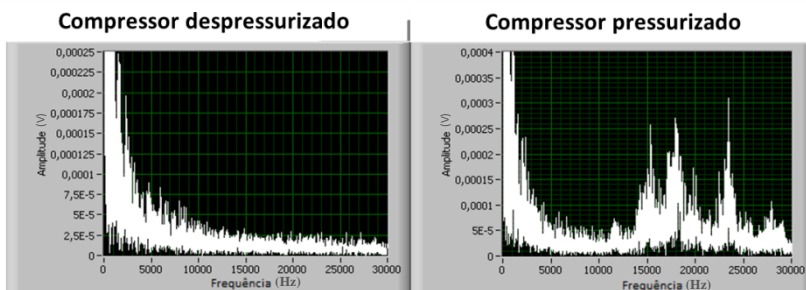
Figura 44 – Pontos de acoplamento do acelerômetro no compressor não submerso



Fonte: elaborado pelo autor.

Após a realização das medições, os resultados obtidos mostraram que, ao aproximar o transdutor do local onde se encontra a descontinuidade passante, verifica-se uma evidente diferença entre as respostas em frequência do acelerômetro, o que comprova a presença do vazamento no objeto avaliado. A figura 45 ilustra as medições em um ponto próximo ao vazamento, nas situações de compressor pressurizado e despressurizado.

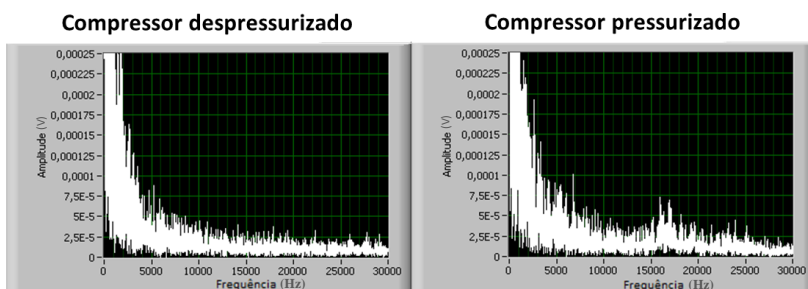
Figura 45 - Medições realizadas próximas ao local de vazamento



Fonte: elaborado pelo autor.

Entretanto, no caso do acelerômetro ser acoplado no centro do tampo da carcaça do compressor⁴⁶, os ensaios realizados ao pressurizar ou não o objeto avaliado apresentaram resultados semelhantes, o que impossibilita a identificação do vazamento. A figura 46 mostra as medições feitas para as respectivas situações descritas.

Figura 46 - Medições realizadas no centro do tampo da carcaça



Fonte: elaborado pelo autor.

Em vista dos resultados alcançados, torna-se inviável a avaliação da estanqueidade de compressores não submersos por meio da medição da vibração da carcaça, pois a localização do vazamento será evidentemente desconhecida.

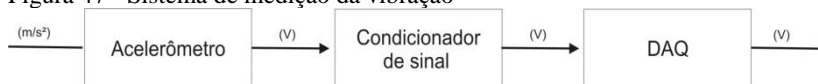
Ressalta-se que neste estudo, o emprego do compressor despressurizado representou a condição do respectivo objeto sem vazamento. Perante ensaios realizados, tais situações apresentaram resultados semelhantes frente à resposta em frequência do acelerômetro.

⁴⁶ O centro do tampo da carcaça foi a posição definida para o acoplamento do acelerômetro nos ensaios realizados com o compressor submerso.

APÊNDICE B – ANÁLISE DA INCERTEZA INSTRUMENTAL DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE CONCEBIDO

Neste apêndice será apresentada a análise da incerteza instrumental do sistema de avaliação de estanqueidade concebido no capítulo 4. O sistema de medição da vibração da carcaça do compressor é composto pelos seguintes módulos, conforme apresentados na figura 47.

Figura 47 - Sistema de medição da vibração



Fonte: elaborado pelo autor.

A incerteza instrumental é dada pela combinação das parcelas sistemáticas – erro de zero, de ganho, de linearidade, deriva térmica e temporal – e do erro aleatório de cada componente do sistema. Como a medição realizada para avaliar a estanqueidade é diferencial, isto é, comparam-se resultados de ensaios nas condições de compressor com e sem vazamento, considerações a respeito das parcelas sistemáticas podem ser feitas.

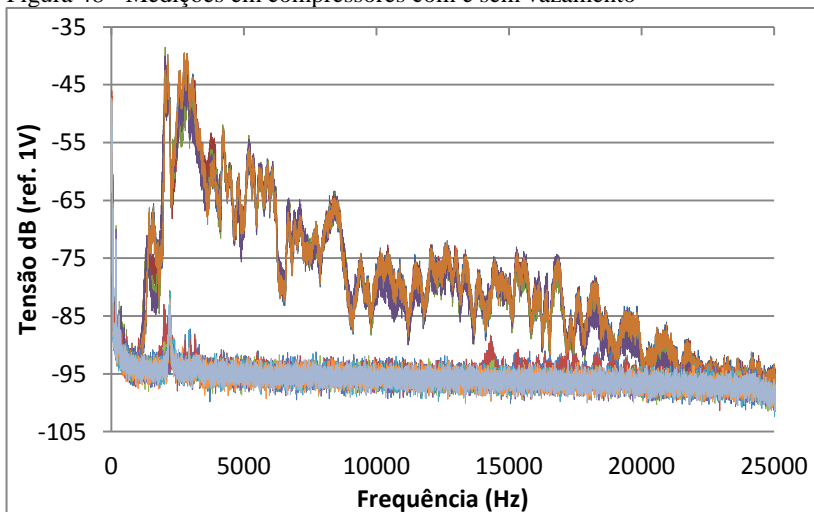
O erro de zero, por exemplo, pode ser totalmente desconsiderado. Os erros de ganho e de linearidade tem compensação praticamente integral, pois a diferença entre os valores de vibração medidos nos casos de compressor com e sem vazamento é ínfima, em relação ao intervalo de medição do acelerômetro. No que se refere à deriva térmica e temporal, as mesmas podem ser desprezadas, pois, devido às condições estáveis de ensaio e a possibilidade de realizar a zeragem do sistema de medição por meio das medições em compressores sem vazamento, o efeito das respectivas parcelas sistemáticas não é crítico.

Quando se analisa a parcela aleatória da incerteza instrumental, verifica-se que a repetibilidade em medições de compressores sem vazamento apresentou, na região de interesse do espectro de frequências, uma variação de aproximadamente $\pm 6 \mu\text{V}$ – o que corresponde a $\pm 3 \text{ dB}$ ⁴⁷. No que se refere às medições em compressores com vazamento – no caso específico do compressor do item 4.2.4 – observou-se uma mesma variação de aproximadamente $\pm 3 \text{ dB}$ para a

⁴⁷ Para probabilidade de 95% e 9 graus de liberdade.

repetibilidade. A figura 48 ilustra as curvas de resposta em frequência dos ensaios realizados nos casos de compressores com e sem vazamento, medições estas utilizadas para estimar a repetibilidade⁴⁸.

Figura 48 - Medições em compressores com e sem vazamento



Fonte: elaborado pelo autor

Diante do que foi apresentado, pode-se afirmar que a incerteza instrumental não afeta significativamente a análise qualitativa de compressores herméticos, pois esta representa um valor irrelevante diante do efeito do vazamento na resposta do sistema de medição.

Logo, o importante para a avaliação de estanqueidade é o sistema de medição apresentar características metrológicas, como resolução e intervalo de frequências, que o torne capaz de identificar o vazamento. Conforme mostrado no item 4.2, o sistema de medição especificado possui uma resolução que o permite detectar variações de $0,59 \mu\text{V}$, valor esse adequado para medir a alteração da resposta em frequência do sistema de medição provocada pelo vazamento. Quanto à segunda característica metrológica citada, a instrumentação apresenta um intervalo de frequências amplo o suficiente para compreender toda a região do espectro, na qual o efeito do vazamento se manifesta.

⁴⁸ Apesar de não estar evidente no gráfico, a figura 48 apresenta dez medições para cada caso analisado, ou seja, para as condições de compressor com e sem vazamento.

APÊNDICE C – MONTAGEM DE UMA CABINE ACÚSTICA

Devido aos problemas enfrentados no ambiente fabril, uma cabine acústica foi concebida com o objetivo de atenuar a transmissão do ruído presente no ambiente externo para o interior da mesma.

Para caracterizar a isolamento sonora da respectiva estrutura, o parâmetro normalmente empregado é a grandeza física chamada perda de transmissão, a qual representa a relação entre a energia sonora incidente e a transmitida (GERGES, 1992; BISTAFA, 2011). Essa grandeza é determinada de acordo com as dimensões da estrutura em questão e de suas características físicas, representadas pela rigidez à flexão e pela densidade superficial – produto da espessura pela densidade do material⁴⁹. Deste modo, uma estrutura com características isoladoras, isto é, com elevada perda de transmissão sonora, deve geralmente apresentar paredes densas, espessas e rígidas (GERGES, 1992; BISTAFA, 2011).

Entretanto, quando se torna necessário desenvolver uma estrutura com características isoladoras, mas com menor peso e custo, recomenda-se o uso de paredes duplas com a presença de material de absorção acústica na cavidade formada (GERGES, 1992; BISTAFA, 2011).

Outro fator de extrema importância se refere à isolamento de vibrações da estrutura. Para reduzir a transmissão de energia vibratória do solo para o interior da mesma, torna-se necessário o emprego de isoladores de vibração, como molas, coxins de borracha e mantas fibrosas (BISTAFA, 2011).

Diante dos conceitos descritos anteriormente, foi concebida uma cabine acústica com espessa parede de concreto, a fim de se obter uma elevada perda de transmissão sonora. A estrutura em questão possui dois compartimentos, um interno e outro externo⁵⁰.

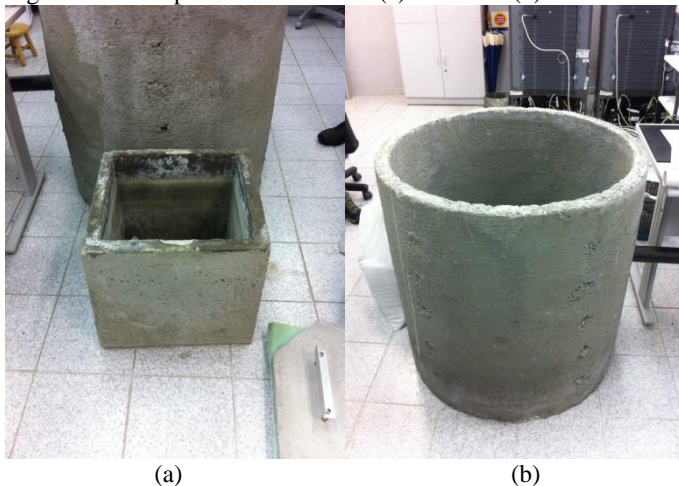
O compartimento interno foi empregado como recipiente a ser preenchido com água, local onde ocorre o processo de imersão do

⁴⁹ Além dos fatores citados, a perda de transmissão está submetida à frequência do som incidente, existindo uma relação direta entre ambos. Deste modo, quanto menor for a frequência do mesmo, menor será a isolamento sonora a ser feita pela estrutura (BISTAFA, 2011).

⁵⁰ Os dois compartimentos citados possuem aberturas na parte superior, conforme ilustrado na figura 44. Em vista disso, tornou-se necessário empregar tampas de concreto com o intuito de isolar completamente o interior dos mesmos.

conjunto acelerômetro/compressor. O segundo foi utilizado efetivamente como uma barreira acústica, visando reduzir a transmissão da energia sonora incidente à estrutura. A figura 49 ilustra os compartimentos integrantes da cabine.

Figura 49 - Compartimentos interno (a) e externo (b) da cabine acústica



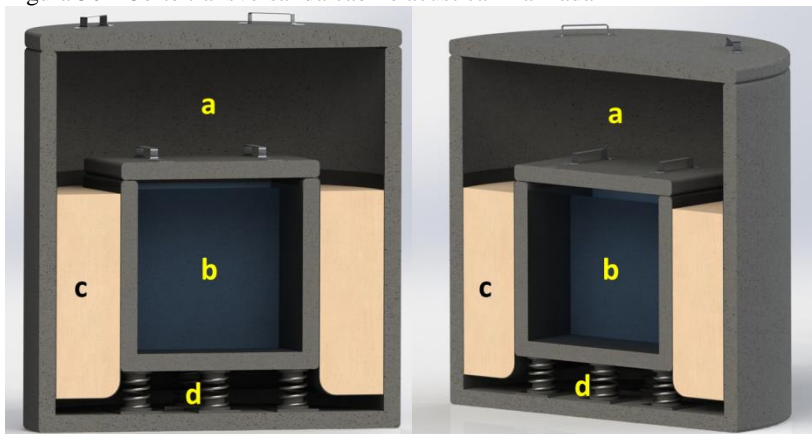
Fonte: elaborado pelo autor.

Para o início da montagem, isoladores de vibração foram posicionados dentro do compartimento externo. Após este passo, o compartimento interno foi disposto sobre os isoladores, visando atenuar a transmissão de energia vibratória ao local onde o conjunto acelerômetro/compressor foi submerso.

Por último, a cavidade formada entre os dois compartimentos citados, tal como uma parede dupla, foi preenchida com areia para garantir maior dissipação da energia sonora transmitida⁵¹. A figura 50 ilustra um corte transversal da cabine acústica ao final de sua montagem.

⁵¹ Com a finalidade de evitar que a areia cubra totalmente os isoladores de vibração, um involucro plástico foi empregado.

Figura 50 - Corte transversal da cabine acústica finalizada



Legenda: a compartimento externo;
 b compartimento interno;
 c areia;
 d isoladores de vibração.

Fonte: elaborado pelo autor

Posteriormente ao processo de montagem da cabine, foi possível realizar ensaios com o intuito de conhecer o efeito da estrutura em questão, ao isolar o conjunto acelerômetro/compressor de ruídos com origem sonora e estrutural, conforme pode ser visto no item 4.4 do capítulo 4.